

経 歴

| | | | |
|---------|--|----------|---|
| 商 号 | : アムテック有限会社 (AMTEC INC.) | 2000年05月 | New involute Σ 販売開始 |
| 住 所 | : 〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番30号 プリオタワー4305 | 2000年05月 | 円弧歯形歯車の歯形および応力解析ソフト |
| TEL/FAX | : TEL 06-6577-1552 FAX 06-6577-1554 | 2000年06月 | VGR ラックソフトウェア |
| URL | : www.amtecinc.co.jp | 2000年08月 | トロコイド曲線を用いた歯車のソフトウェア |
| E-mail | : info@amtecinc.co.jp | 2000年09月 | ハイポイドギヤ強度計算ソフトウェア |
| 設 立 | : 1983年4月 | 2000年12月 | ウォームギヤ歯形レンダリング |
| 資 本 金 | : 300万円 | 2001年01月 | 金型用歯形出力ソフト GearPro2000 |
| 代表取締役 | : 博士(工学) 上田 昭夫 | 2001年02月 | ヒンドレーウォームギヤのソフトウェア |
| 取引銀行 | : りそな銀行 難波支店 三井住友銀行 港支店 | 2001年03月 | ウォームホイール切削歯形および工具歯形の解析ソフトウェア |
| 業務内容 | : 機械設計に関するエンジニアリング業務およびこれに関するコンピュータソフトウェアの開発と販売 | 2001年04月 | 新遊星歯車(Planet AGIT Ω) |
| 所属団体 | : 一般社団法人 日本機械学会 法人会員 公益社団法人精密工学会 成形プラスチック歯車研究専門委員会 正会員 一般社団法人日本歯車工業会 正会員 近畿歯車懇話会 会員 | 2001年05月 | 3D 歯形応力, 伝達誤差解析ソフト |
| | | 2002年07月 | 非接触歯車測定装置(G3-System) |
| | | 2002年10月 | 新サイクロイドギヤソフトウェア |
| | | 2002年12月 | 新楕円系歯車ソフトウェア |
| | | 2003年03月 | 新ベベルギヤソフトウェア |
| | | 2003年04月 | ねじ歯車ソフトウェア |
| | | 2004年05月 | L-Hypoid Gear ソフトウェア |
| | | 2004年08月 | Gear Navigation System |
| | | 2004年09月 | CT-FEM System ソフトウェア |
| | | 2005年04月 | 少歯数(1 歯)歯車ソフトウェア |
| | | 2005年04月 | ウォームギヤの歯当り跡表示ソフト |
| | | 2005年05月 | Hob chip Calculation software |
| | | 2005年06月 | involute Gemma 測定データによる歯当たり, 伝達誤差シミュレーションソフトウェア |
| | | 2005年08月 | CT-FEM System Ver.2 |
| | | 2006年03月 | 不思議遊星歯車を販売 |
| | | 2007年03月 | 遊星歯車のダブルピニオン式ソフトウェア |
| | | 2007年04月 | CT-FEM System Ver.4.0 |
| | | 2007年07月 | 成形歯車研削盤 GT-30 機(YASDA)の完全パイアス対応ソフトウェア |
| | | 2007年08月 | スプライン(JIS B 1603:1995) ソフトウェア |
| | | 2007年10月 | 不等配遊星歯車ソフトウェア |
| | | 2007年12月 | 斜傾ウォーム |
| | | 2007年12月 | L-Niemann Worm Gear Design software |
| | | 2008年02月 | 左右異圧力角歯車設計ソフトウェア |
| | | 2008年08月 | ピッチ誤差計算ソフトウェア |
| | | 2008年10月 | 楕円系歯車(任意ピッチ曲線) ソフトウェア |
| | | 2009年02月 | Taper and Crossed Gear Design System |
| | | 2009年01月 | AGMA925-A03:2003(Scoring) ソフトウェア |
| | | 2009年05月 | 複溝用成形砥石歯形解析ソフトウェア |
| | | 2009年09月 | 歯車強度 JGMA6101-02:2007, JGMA6102-02:2009 ソフトウェア |
| | | 2010年04月 | 正弦歯車設計ソフトウェア |
| | | 2010年06月 | ねじ状砥石(Diamond Tool) ソフトウェア |
| | | 2010年11月 | ピンラック歯車ソフトウェア |
| | | 2011年04月 | K-H-V Differential Gear Design System |
| | | 2011年05月 | ハイボトロコイド歯形歯車ソフトウェア |
| | | 2011年06月 | Double Enveloping Worm Gear Design System |
| | | 2011年09月 | 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ |
| | | 2011年11月 | UTS(常時伝達変速システム設計) |
| | | 2011年12月 | 内歯ウォームギヤ設計システム |

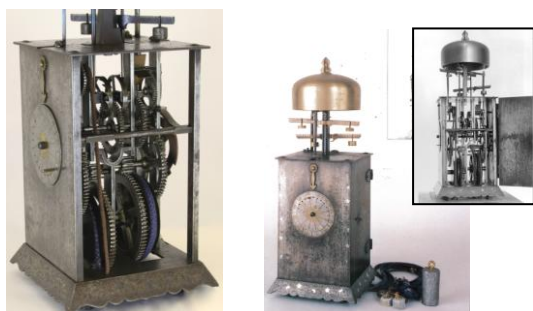
ソフトウェア開発・販売の沿革

| | |
|----------|--|
| 1985年11月 | 日刊工業新聞に歯車ソフト23種を初期発表 |
| 1987年06月 | 日刊工業新聞に遊星歯車ソフトウェアを発表 |
| 1989年10月 | 楕円歯車ソフト発表 |
| 1990年03月 | はずば歯車の成形理論歯形解析ソフトを発表 |
| 1990年05月 | ベベルギヤ3次元歯形ソフト発表 |
| 1991年01月 | JGMA(日本歯車工業会)入会 |
| 1992年01月 | 推論機能付き歯車設計ソフト involute α 開発 |
| 1992年06月 | 3次元干渉を考慮したウォーム解析ソフト発表 |
| 1992年09月 | ホブ研削時における3次元干渉解析ソフト開発 |
| 1992年10月 | 米国AGMAよりANSI/AGMA2001-B88の開発許可を賜りプログラム開発に着手(1993年1月完成)ANSI/AGMA2003-A86を1993年3月に完成 |
| 1993年08月 | 樹脂歯車設計ソフト involute γ を発表 |
| 1994年01月 | 歯車設計システムDOS/V機用「involute Σ 」を開発し韓国に販売開始 |
| 1994年10月 | 「involute Σ 」を台湾に販売開始 |
| 1995年06月 | 歯切り工具管理システム「Hob Pilot」を発表 |
| 1995年09月 | トロコイド歯車ソフトウェアを開発 |
| 1996年05月 | 歯車設計ソフト involute Σ for Windows 発表 |
| 1997年06月 | ヘリカルフェースギヤ歯形ソフトウェアを開発 |
| 1997年08月 | FEM 歯形応力解析&歯形修整ソフト開発, 発売 |
| 1998年02月 | 複葉楕円系歯車ソフトウェア開発, 発売 |
| 1998年04月 | 歯車伝達誤差解析ソフトウェア開発, 発売 |
| 1998年04月 | Hob Pilot for Windows を開発, 発売 |
| 1998年08月 | ANSI/AGMA2001-C95 for Windows を開発, 発売 |
| 1998年09月 | ANSI/AGMA2003-A86 for Windows を開発, 発売 |
| 1998年10月 | 歯形出力ソフト G-Caster を開発, 発売 |
| 1998年12月 | ベベルギヤ3D歯形解析ソフトを開発, 発売 |
| 1999年03月 | 成形砥石歯形解析ソフトを開発, 発売 |
| 2000年04月 | 3D 歯形レンダリングソフトを開発 |

- 2012年05月 多段歯車設計システム
- 2012年07月 内歯ねじ歯車設計システム
- 2013年06月 involute Σ iii (spur and helical gear)
- 2013年06月 involute ASM (high-intensity gear)
- 2014年03月 CT-FEM OPERA
- 2014年03月 CT-FEM ASM
- 2014年04月 involute Σ iii (bevel gear design system)
- 2014年12月 Skiving cutter design system
- 2015年03月 SS-Worm gear design system
- 2015年05月 Linear bevel gear design system
- 2015年06月 Face gear design system iii
- 2015年12月 円弧歯すじ歯車設計システム
- 2016年01月 involute Σ iii (worm gear design system)
- 2016年02月 GearPro iii (involute gear profile design system)
- 2016年04月 CT-FEM Opera iii
- 2017年05月 日経ものづくり誌5月号, p63~68に「生産性10倍の新形状歯車」として Linear bevel gear (IP-bevel gear) 記事が掲載される。
- 2017年06月 大阪市港区弁天 1-2-30 プリオタワー4305に住所移転
- 2017年08月 ピン歯車ソフトウェア
- 2017年10月 ピニオンカッタソフトウェア
- 2017年12月 楕円系歯車ソフトウェア(New)
- 2018年01月 ISO6336強度計算ソフトウェア
- 2018年03月 Diamond ねじ状砥石ソフトウェア(New)
- 2017年04月 Strain wave gearing design system (波動歯車)

:
:
:
:
:

カタログ vol.17や vol.18に掲載しているソフトウェアは、順次、新しくしていますのでホームページでご確認ください。また、技術資料などもご確認ください。



二挺天符櫓時計
三代目津田助左衛門信貫 製作 (1688年)
セイコーミュージアム所蔵

日本機械学会論文集 Vol. 83(2017) No. 847
「和時計から日本の歯車の源流を探る」
https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjsme/83/847/83_16-00295/_pdf
計算機や工作機械がない時代でもこのようなことができたという技術への取り組みの本質を見直すきっかけになれば良いのではないかと考えています。

Amalgamation Technology

人間が作り出した最も古い機械要素の一つといわれる歯車は、ギリシャのアリストテレス(紀元前 384~322年)やアルキメデス(紀元前 287~212年)の著書に記載されておりこの時代が歯車発達の第1世代といわれています。15世紀後半にレオナルド・ダ・ビンチが多くの歯車を考案した時代が第2世代であり1674年にデンマークの天文学者レーマーがエピサイクロイド歯形を提唱し更に1841年英国のウィルス教授が交換性歯車を実用化したのが第3世代といわれています。

現在主流となっているインボリュート歯車は、1700年頃フランスのフィリップ・ド・ライールが、エピサイクロイドの特殊な歯形曲線として論及したのが最初であり1765年スイスのオイラーがインボリュート歯車について論じこの歯形の開拓者といわれています。

我が国に伝来した最初の歯車は、1551年(安土桃山時代)にフランシスコ・ザビエルが、時の周防探題大内義隆に献上した機械時計が最初とされています。次に、徳川時代に(1600年初期)津田助左衛門が時計を製作したと記録があり、これが我が国における歯車製作最古の記録です。(カタログ Vol.15, 付録 G: 歯車の歴史年表参照)

近年、歯車の精度は飛躍的に向上し機械加工による歯車だけではなく金型を使用した鍛造歯車や焼結歯車および成形プラスチック歯車が数多く生産されています。歯車の第5世代を迎えている現在、AMTECKは、ただ単に回る歯車ではなく

美しく回る歯車とするためにはどうするか

を基本理念としてソフトウェアを開発しています。

カタログは、

最後までお読みください。思わぬヒントがあるかも知れません。また、カタログをご覧いただきお気づきの点やご意見やご希望などがございましたら、下記までご連絡くださいますようお願い申し上げます。

E-mail : info@amtecinc.co.jp
URL : www.amtecinc.co.jp



日本機械学会 機素潤滑部門
功績賞 2011年4月受賞

歯車の種類と適応ソフトウェア

ソフトウェア選択の際は、歯車の種類とソフトウェア[Software No.]からお選びください。
[Software No.]は、カタログ (vol.18) の番号です。旧カタログの番号とは異なりますのでご注意ください。

・円筒歯車関係

| Software No. | ソフトウェア名 |
|--------------|---|
| [1] | involute Σ iii (spur and helical Gear) ISO6336 強度計算 |
| [4] | involute ASM (high-intensity gear design system) |
| [8] | Tooth thickness converter (転位歯厚変換) |
| [12] | AGMA2001-C95 |
| [14] | GearPro iii |
| [15] | ねじ歯車 |
| [22] | CT-FEM ASM, 非対称歯形歯車応力解析 |
| [24] | involute Σ (spur and helical 少歯数) |
| [30] | Taper and crossed gear design system |
| [31] | AGMA925-A03 (Scoring) |
| [32] | 正弦歯形歯車設計システム |
| [41] | 内歯ねじ歯車設計システム |
| [43] | 円弧歯すじ歯車設計システム |
| [45] | CT-FEM Opera iii (歯車かみ合い応力解析) |

・ベベルギヤ関係

| | |
|------|--|
| [2] | involute Σ iii (bevel gear design system) |
| [2] | involute Σ iii (bevel gear design) + AGMA2003-B97 |
| [20] | Face gear design system iii |
| [21] | L-Hypoid gear design system |
| [46] | Linear bevel gear design system |

・ウォームギヤ関係

| | |
|------|---|
| [3] | involute Σ iii (worm gear design system) |
| [28] | 傾斜ウォームギヤ設計システム |
| [29] | L-Niemann worm gear design system |
| [36] | Double enveloping worm gear (ヒンドレーウォーム) |
| [37] | 鼓形ウォーム&ヘリカルギヤ設計システム |
| [39] | 内歯ウォームギヤ設計システム |
| [44] | SS-Worm gear design system (鼓形ウォームギヤ) |

・ラック関係

| | |
|------|----------------|
| [--] | ラック&ピニオン設計システム |
| [19] | VGR ラック設計システム |
| [26] | CGR ラック設計システム |
| [33] | ピン&ラック設計システム |

・その他歯車

| | |
|------|---|
| [5] | 遊星&不思議遊星 |
| [9] | Elliptical gear design system (楕円系歯車) |
| [17] | トロコイド曲線を用いた歯車 (ポンプギヤ) |
| [18] | Adduction Differential Gear Design System (ピンコイド) |
| [27] | インボリュートスプライン寸法設計 (JIS B 1603) |
| [32] | 正弦歯形歯車設計システム |
| [34] | Hypo-Trochoid gear design system |
| [35] | K-H-V Differential gear design system |
| [38] | UTS 設計支援システム |

| Software No. | ソフトウェア名 |
|--------------|--|
| [40] | 多段減速歯車設計システム |
| [47] | Strain wave gearing design system (波動歯車) |
| [*] | ピン歯車 |
| [*] | スプロケット |
| [*] | サイクロイド歯車 |
| [*] | 三角セレーション |
| [*] | 円弧歯形歯車 |
| [*] | インボリュート曲線図 |
| [--] | ポンプギヤ歯形 |

・加工関係

| | |
|--------|---|
| [2] | ベベルギヤ加工写真 |
| [6] | Hob Erase (歯車電極用エンドミル歯形解析) |
| [7] | Differential change gear calculation system (有理数分解) |
| [10] | Worm Bite2 (ウォームバイト刃形解析) |
| [11] | Gear Navigation System |
| [13] | Electroplated wheel profile design system (ねじ状砥石) |
| [16] | 成形砥石歯形解析 (外歯車) |
| [16.A] | 複溝成形砥石歯形解析 (外歯車) |
| [16.B] | 成形砥石歯形解析 (内歯車) |
| [23] | Hob Chip software (切粉形状シミュレーション) |
| [42] | Skiving cutter design system |
| [*] | ピニオンカッタ刃形設計システム |
| [*] | ウォーム I 形 (4 形) 用砥石設計システム |
| [*] | 切り上げ距離計算 |
| [**] | 成形研削盤 |

・検査関係

| | |
|-------|----------------|
| [25] | involute Gemma |
| [*] | ピッチ誤差計算 |
| [***] | 歯車精度規格 |
| [--] | 両歯面かみ合い検査 |

| | |
|-------|------------------|
| [*] | : 作図例 |
| [**] | : 機械の紹介 |
| [***] | : 無償ダウンロードソフトウェア |
| [--] | : 別途お問い合わせください。 |



錦絵 (女禮式四季之活花), 時計は一挺天符台時計
セイコーミュージアム所蔵

INDEX

Software [No.]

- [1] **involute Σ iii (spur and helical gear design system)** 1
鋼歯車の強度式は、ISO に準拠した JGMA6101-02, 6102-02 を標準装備し、プラスチック歯車の強度計算は JIS B 1759(2013)に対応しています。また、ISO6336 (2006)をオプションとして追加しました。
- [2] **involute Σ iii (bevel gear design system)** 12
かさ歯車の寸法、強度（鋼、樹脂）、組図、軸荷重、歯面修整、伝達誤差、歯面評価、FEM 解析、歯形データおよび測定データ等の機能を備えており、効率よく的確に設計することができます。
- [3] **involute Σ iii (worm gear design system)** 22
ウォーム×ウォームホイールの寸法、歯形、強度、歯当たり跡、FEM、回転伝達誤差、周波数解析
ウォーム×ヘリカルギヤの寸法、歯形、強度、歯当たり跡、FEM、回転伝達誤差、周波数解析
- [4] **involute ASM(high-intensity gear design system)** 31
非対称歯形歯車設計。非対称歯形歯車の特性については付録[H]をご覧ください。
- [5] **遊星 & 不思議遊星歯車設計システム** 37
歯数の設定やトルク配分を自動決定します。寸法、歯形、効率、強度、etc.
ダブルピニオンタイプ遊星歯車、不等配遊星歯車
- [6] **Hob Erase (歯車電極用エンドミル歯形解析)** 45
ホブを使用しないで歯車電極等をエンドミルで加工するためのソフトウェア
- [7] **Differential change gear calculation system (有理数分解)** 45
小数点付き数値を2つの分数に分解するソフトで差動換え歯車計算に最適
- [8] **Tooth thickness converter (転位歯厚変換)** 46
歯切り時の歯厚(またぎ、オーバーピン、弦)変化とピンの位置を表示
- [9] **Elliptical gear design system (楕円系歯車)** 47
同じ葉数(1葉×1葉、2葉×2葉等)だけでなく異葉数(3葉×5葉等)も設計できる。
任意ピッチ曲線を持つ楕円系歯車ソフトウェア
- [10] **Worm Bite2 (ウォームバイト刃形解析)** 48
ウォーム歯形を1形に加工するための刃形解析ソフトウェア
- [11] **Gear navigation system (歯切り, シェーピング, ホーニング)** 49
ホブ切削, シェーピング, ホーニング加工, バイアス修整を与えた歯数の異なるドレスギヤ
- [12] **AGMA2001-C95** 54
ANSI/AGMA2001-C95 規格に基づいた強度計算ソフト。曲げ、面圧、寿命、フラッシュ温度、油膜厚さからスコーリングと摩耗の発生確率を計算
- [13] **Electroplated wheel profile design system (Diamond Tool, ねじ状砥石歯形)** 56
ねじ状砥石用の電着砥石(ダイヤモンドドレッサ)形状を出力
- [14] **GearPro iii (involute gear profile design system) (インボリュート歯形出力)** 59
射出成形歯車にも考慮し真円ではない歯車の歯形も生成することができ、歯形・歯すじ修整、そして軸方向直径修整にも歯切り工具加工にも対応した歯形を生成
- [15] **involute Σ (crossed helical gear design system) (ねじ歯車)** 63
ねじ歯車のかみ合い理論に基づいて寸法、歯形、接触軌跡を計算
- [16] **成形砥石歯形解析** 65
- [16.A] **複溝成形砥石歯形解析** 67
- [16.B] **内歯車用成形砥石歯形解析** 67
- [17] **トロコイド曲線を使用した歯車 (ポンプ用歯車)** 69
歯数、アウターロータの歯底円、偏心量から歯形を生成し吐出量を計算
- [18] **Adduction differential gear design system (愛称: ピンコイド歯車)** 70
内歯車にピンを配置した内転差動式の減速機構

| | | |
|------|---|-----|
| [19] | VGR ラック設計システム | 71 |
| | Variable gear ratio ラック設計ソフトウェア. ギヤレシオカーブに基づいてラックの歯形を生成 | |
| [20] | Face gear design system iii | 74 |
| | 軸角は 90° 以外も計算でき, ピニオン歯数 1 歯 (少歯数オプション) にも対応 | |
| [21] | L-Hypoid gear design system | 79 |
| | ハイポイドギヤの寸法設計, 歯形生成, 強度計算が可能. 球面インボリュート歯形を持つギヤにオフセットを与えたピニオンの歯形を決定 | |
| [22] | CT-FEM ASM (非対称歯形歯車応力解析) | 82 |
| | 非対称歯形歯車の 3 次元歯面修整, 摩擦係数, 接触応力, フラッシュ温度, PV 値等 従来の歯車に比して 50%UP の負荷容量を得ることが可能. 詳しくは付録[H]をご覧ください. | |
| [23] | Hob chip (切粉形状シミュレーション) | 89 |
| | ホブ切削時における切粉の切取り形状や厚さのシミュレーションソフトウェア | |
| [24] | involute Σ (spur and helical 少歯数対応) | 92 |
| | 高減速機構とするためピニオン歯数を 1 歯, 2 歯とする設計ソフトウェア | |
| [25] | involute Gemma | 93 |
| | 歯形測定データによる歯当たりと回転伝達誤差解析のソフトウェア | |
| [26] | CGR ラック & ピニオン設計システム | 96 |
| | Constant gear ratio ラック設計ソフトウェア | |
| [27] | インボリュートスプライン(JIS B 1603) 寸法設計 | 99 |
| [28] | 傾斜ウォームギヤ設計システム | 100 |
| | 軸角 90° 以外のかみ合い | |
| [29] | L-Niemann worm gear design system | 102 |
| [30] | Taper and crossed gear design system | 105 |
| | 軸交差角を持つインボリュート歯車の設計, 歯形生成 | |
| [31] | AGMA925-A03 (Scoring) | 108 |
| | AGMA925-A03 規格に基づいて歯面損傷に対する潤滑効果の評価 | |
| [32] | 正弦歯形歯車設計システム | 110 |
| | 正弦歯形歯車は, インボリュート歯車に比べすべり率が小さいため動力損失が小さくなる. | |
| [33] | ピン & ラック設計システム | 112 |
| | ピニオンをピン歯車としてかみ合うラックを生成 | |
| [34] | Hypo-Trochoid gear design system | 113 |
| | トロコイド曲線を持つ歯車は, かみ合い率はインボリュート歯形に比して数倍 | |
| [35] | K-H-V Differential gear design system | 116 |
| | インボリュート歯車の差動減速 (増速) 機構設計 (歯数差 0, 1, 2 の 3 種類) | |
| [36] | Double enveloping worm gear design system (ヒンドレーウォーム) | 120 |
| [37] | 鼓形ウォーム & ヘリカルギヤ設計システム | 122 |
| | 鼓形ウォームとインボリュートヘリカルギヤのかみ合い | |
| [38] | UTS (常時伝達変速システム設計) | 126 |
| | 歯車式変速機で非円形歯車を用いることにより 変速の際に生じる“駆動力抜け”をゼロにできる. | |
| [39] | 内歯ウォームギヤ設計システム | 130 |
| | 内歯車方式のウォームギヤ | |
| [40] | 多段歯車設計システム | 133 |
| | 総減速比を与えれば減速段数とその歯数比, 寸法, 強度, 軸受荷重を一括計算 | |
| [41] | 内歯ねじ歯車設計システム | 137 |
| | 内歯車と外歯車に任意の軸角を与えた場合であってもかみ合いが成立する外歯車の歯形を生成 | |
| [42] | Skiving cutter design system | 140 |
| | 歯車諸元と工具の取り付け角から工具 (ピニオンカッタ) の歯形を生成 | |

| | | |
|-------|--|-----|
| [43] | 円弧歯すじ歯車設計システム | 145 |
| | 円弧歯すじを持つ歯車はスラスト荷重がなく、歯の位置合わせ能力があり、かみ合い率を大きく（平歯車に対して）することができる。 | |
| [44] | SS-Worm gear design system | 148 |
| | ホブ加工したホイールとかみ合う鼓形ウォーム | |
| [45] | CT-FEM Opera iii (歯車かみ合い応力解析) | 153 |
| | 実績のある CT-FEM Opera を並列処理プログラムにバージョンアップしました。 解析例を付録[I~K]に示します。 | |
| [46] | Linear bevel gear design system (IP-bevel gear) | 161 |
| | 大歯車の歯形と歯すじを直線としたベベルギヤで内歯ベベル、オフセット、軸角変更も可能。 円盤形砥石で歯面研削が可能。 | |
| [47] | Strain wave gearing design system (波動歯車) | 167 |
| | 波動歯車（カップ型）の歯形生成を基準ラックまたは工具（ホブ）を基準にして歯形を生成。 リング型（基準ラック）も設計可能。 | |
| [101] | その他ソフトウェアの作図例 | 172 |
| [102] | 歯車精度規格ソフトウェア（ダウンロード） | 172 |
| [103] | 動作環境 | 173 |
| [104] | 機械の紹介 | 174 |

付録

| | | |
|-----|--|-----|
| [A] | CT-FEM System による「はすば歯車の歯元応力解析例」 | 175 |
| [B] | Gear navigation system によるギヤホーニングシミュレーション | 178 |
| [C] | ゲート位置変形を考慮したプラスチック歯車の成形歯形 | 181 |
| [D] | 歯元応力解析例（最弱断面歯厚が同じ場合） | 183 |
| [E] | 正弦歯形歯車の動力損失低減の可能性 | 184 |
| [F] | 遊星歯車設計のポイント | 189 |
| [G] | 歯車の歴史と和算 | 193 |
| [H] | 非対称歯形歯車の特性 | 195 |
| [I] | 歯車解析例（損傷歯車） | 199 |
| [J] | 伝達誤差解析例 | 203 |
| [K] | 動力損失解析例 | 205 |
| | 歯車歴史年表 | 206 |
| | 価格表 | 209 |

■カタログに記載していないソフトウェアもございますのでお問い合わせください。

また、歯車だけでなく機械要素、干渉解析などのソフト開発も別途承っておりますのでお問い合わせください。

URL : www.amtecinc.co.jp

E-mail: info@amtecinc.co.jp



[2] involute Σ iii (bevel gear design)



[46] Linear bevel gear



[43] 円弧歯すじ歯車

[1] involute Σ iii(spur and helical gear design system)

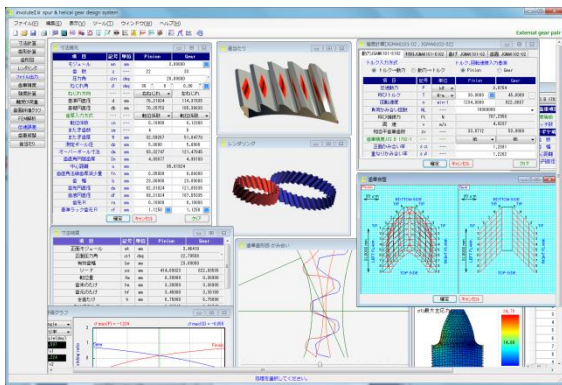


図 1.1 involute Σ iii(spur and helical)

1.1 概要

involute Σ iii(spur and helical)は、円筒歯車の寸法、強度（鋼、樹脂）、軸荷重、歯面修整、伝達誤差、歯面評価、FEM 解析、歯形データ等の機能を備えており、効率よく的確に設計することができます。

本ソフトウェアは、involute Σ (spur and helical)[Software No.1]をバージョンアップしたソフトウェアです。今までオプション扱いしていた機能も一部、基本ソフトウェアに含めました。図 1.1 に全体画面を示します。

1.2 ソフトウェアの構成

involute Σ iii の構成を表 1.1 に示します。表中の○は、基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

適応歯車：インボリュート平、はすば歯車（外歯車、内歯車）

表 1.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | 構成 |
|-----|--------------------------------|------|----|
| 1 | 基準ラックの設定 | 1.3 | ○ |
| 2 | 寸法 | 1.4 | ○ |
| 3 | 推論 | 1.5 | ○ |
| 4 | 歯形創成図 | 1.6 | ○ |
| 5 | かみ合い図 | 1.6 | ○ |
| 6 | かみ合い回転機能 | 1.6 | ○ |
| 7 | 歯形レンダリング図 | 1.7 | ○ |
| 8 | 歯車精度 | 1.8 | ○ |
| 9 | 歯車強度計算（鋼） | 1.9 | ○ |
| 10 | 歯車強度計算（樹脂） | 1.10 | ○ |
| 11 | 金属×樹脂歯車強度 | 1.10 | ○ |
| 12 | 軸受け荷重 | 1.11 | ○ |
| 13 | すべり率、ヘルツ応力 | 1.12 | ○ |
| 14 | 歯形出力（DXF, IGES） | 1.17 | ○ |
| 15 | HELP 機能 | 1.19 | ○ |
| 16 | 設計データ管理 | 1.20 | ○ |
| 17 | FEM 歯形応力解析 | 1.13 | ◎ |
| 18 | 回転伝達誤差（フーリエ解析、ワウ・フラッタ、CSV 出力） | 1.16 | ◎ |
| 19 | 歯面評価（歯面接触温度、油膜厚さ、すべり速度線図、PV 値） | 1.12 | ◎ |
| 20 | 歯面修整（歯形、歯すじ、バイアス） | 1.14 | ◎ |
| 21 | 歯当たり | 1.15 | ◎ |
| 22 | ISO6336 | 1.21 | ◎ |

1.3 プロパティ（基準ラック、精度、強度）

図 1.2~1.5 に設定画面を示します。

- ・歯車の組み合わせ：外歯車×外歯車，外歯車×内歯車
- ・基準ラック：並歯，低歯，特殊
- ・歯先円決定の方式：標準方式，等クリアランス方式
- ・鋼歯車の強度計算規格は，図 1.5 に示すように
 - ・ JGMA 401-02:1974, 402-02:1975
 - ・ JGMA 6101-02:2007, 6102-02:2009
 - ・ ISO 6336:2006

の 3 種類があり，プラスチック歯車の強度計算規格は，JIS B 1759(2013)にも対応しています。



図 1.2 基準ラック

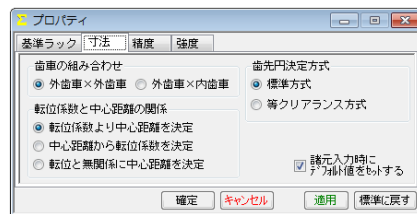


図 1.3 寸法

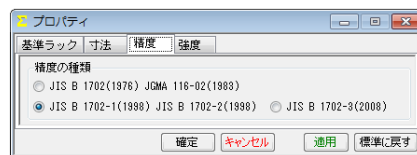


図 1.4 精度

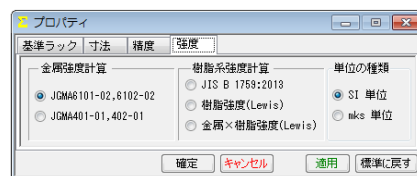


図 1.5 強度

1.4 寸法

歯車寸法は，各部寸法，かみ合い率，すべり率などを計算します。アンダーカットが発生している歯車のかみ合い率は，TIF (True Involute Form) 径を基準にかみ合い率を決定します。また，歯先に丸みがある場合は R を考慮したかみ合い率を算出します。

(1)中心距離と転位係数の関係は，以下の 3 種類です。

- <1>転位係数をピニオンとギヤに与え中心距離を決定
- <2>中心距離を基準として各歯車の転位係数を決定
- <3>転位係数を無視して任意に中心距離を決定

(2)転位係数の設定方式は，以下の 4 種類です。

- <1>転位係数を直接入力
- <2>またぎ歯厚を入力して転位係数を決定
- <3>オーバピン寸法を入力して転位係数を決定
- <4>円弧歯厚を入力して転位係数を決定

図 1.6 に諸元設定画面を示します。また，転位係数入力時は，転位係数を直接入力する方法以外に，歯厚から転位係数を決定することもできます。図 1.7 に寸法結果画面を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|------------|-----|----------|-----------|
| モジュール | mn | mm | 3.00000 | |
| 歯数 | z | --- | 22 | 33 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 30 * 0 | 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 76.21024 | 114.31535 |
| 基礎円直径 | db | mm | 70.25753 | 105.38630 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 | 転位係数 |
| 転位係数 | xn | --- | 転位係数 | 0.12300 |
| またぎ歯数 | zm | --- | またぎ歯厚 | 6 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 70.25753 | 51.04770 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.0000 | 5.0000 |
| オーバーボール寸法 | dm | mm | 83.32747 | 121.47045 |
| 歯直角円弧歯厚 | Sn | mm | 4.93077 | 4.98100 |
| 中心距離 | a | mm | 95.91924 | |
| 歯直角法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.05000 | 0.06000 |
| 歯幅 | b | mm | 23.00000 | 23.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 82.81024 | 121.05335 |
| 歯底円直径 | df | mm | 83.31024 | 107.55335 |
| 歯先R | ra | mm | 0.10000 | 0.10000 |
| 基準ラック歯元R | rf | mm | 1.1250 | 1.1250 |

図 1.6 諸元設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------------|-------------------|-----|-----------|------------|
| 正面モジュール | mt | mm | 3.46410 | |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 22.79588 | |
| 有効歯幅 | bw | mm | 23.00000 | |
| リード | pz | mm | 414.69023 | 622.03535 |
| 転位量 | Xm | mm | 0.30000 | 0.36300 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 3.30000 | 3.36300 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 3.45000 | 3.38100 |
| 全歯たけ | h | mm | 6.75000 | 6.75000 |
| クリアランス | c | mm | 0.73745 | 0.73745 |
| 基礎円歯ねじれ角 | β_b | deg | 28 * 1 | 27.55 |
| 正面かみ合い圧力角 | α_w | deg | 23 * 42 | 41.41 |
| かみ合いピッチ円直径 | d _w | mm | 76.73539 | 115.10309 |
| 正面法線ピッチ | p _{bt} | mm | 10.03275 | |
| 歯直角法線ピッチ | p _{bn} | mm | 8.86639 | |
| かみ合い長さ | ga | mm | 12.39304 | |
| 正面かみ合い率 | ϵ_α | --- | 1.28908 | |
| 重なりかみ合い率 | ϵ_β | --- | 1.22019 | |
| 全かみ合い率 | ϵ_γ | --- | 2.50927 | |
| すべり率 (歯先) | σ_a | --- | 0.48858 | 0.55044 |
| すべり率 (歯元) | σ_b | --- | -1.22439 | -0.95535 |
| 設計またぎ歯厚 | w | mm | 32.542672 | 50.987699 |
| 設計オーバーボール寸法 | dm | mm | 83.138909 | 121.311318 |
| 設計歯直角円弧歯厚 | sn | mm | 4.877562 | 4.917148 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 5.693564 | 5.751562 |
| 正面またぎ歯厚 | wa | mm | 38.865179 | 57.760182 |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 3.35381 | 3.40869 |
| キャリア歯厚 | Sj | mm | 4.87578 | 4.91834 |
| 基準ラック歯末のたけ係数 | hac | --- | 1.00000 | 1.00000 |
| 基準ラック歯元のたけ係数 | hfc | --- | 1.25000 | 1.25000 |
| バックラッシュ | jt | mm | 0.13610 | |
| 法線方向バックラッシュ | jn | mm | 0.10792 | |

図 1.7 寸法結果

1.5 推論

推論 1 は、図 1.8 のように曲げ強さを基準としてモジュールと歯幅を決定します。ここで推論したモジュールと歯幅を有効にして次の設計に進むこともできます。強度を満足するモジュール、歯幅、材料の組み合わせは何通りもありますので、推論結果を基本として歯車の概略を決定する際には非常に有効な機能です。

推論 2 は、すべり率とかみ合い率を基準として最適な転位係数を決定するための機能です。図 1.9 に示すグラフは、ピニオンの最大すべり率を赤線で、ギヤの最大すべり率を青線で、正面かみ合い率を緑線で示しています。図 1.9 の場合、すべり率とかみ合い率から判断してピニオンの転位係数 0.3 が、歯形にとって最適な値ということが出来ます。転位係数の決定理由は、アンダーカット防止や中心距離の変更、かみ合い圧力角の調整などが一般的ですが、この推論機能により、すべり率とかみ合い率の関係を基本とした転位係数を決定することが出来ます。アンダーカットが発生している歯形では、すべり率の値が大きくなります。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------|-----------------|-----|--------------|----------|
| 歯車材料 | --- | --- | S43C (MHR22) | |
| 熱処理 | --- | --- | 焼きならし | |
| 硬 度 | --- | --- | HR220 | |
| 接触圧力(曲げ) | σ_{Flim} | MPa | 205.3937 | 205.3937 |
| 接触圧力(歯面) | σ_{Hlim} | MPa | 529.5591 | 529.5591 |
| トルク | T | Nm | 30.0000 | 75.0000 |
| 回転数 | n | rpm | 1000.0000 | 400.0000 |
| モジュール | mn | mm | 1.5000 | |
| 歯 数 | z | --- | 50 | |
| 圧力角 | α_n | deg | 20 | |
| ねじれ角 | β | deg | 20 * 0 | |
| 歯 幅 | b | mm | 41.5029 | |
| 曲げ安全率 | SF | --- | 1.000 | |
| 呼び円周力 | Ft | N | 1873.3852 | |
| 許容歯元曲げ応力 | σ_{FP} | MPa | 307.8797 | 307.8797 |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 103.4921 | 96.3151 |
| 曲げ強さ | SFl | --- | 2.3749 | |
| 歯面安全率 | SH | --- | 1.000 | |
| 呼び円周力 | Fc | N | 1873.3852 | |
| 許容接触圧力 | σ_{HP} | MPa | 628.1119 | 628.1119 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 610.1243 | 610.1243 |
| 歯面強さ | Sfc | --- | 1.0295 | |

図 1.8 推論 1 (曲げ強さ)

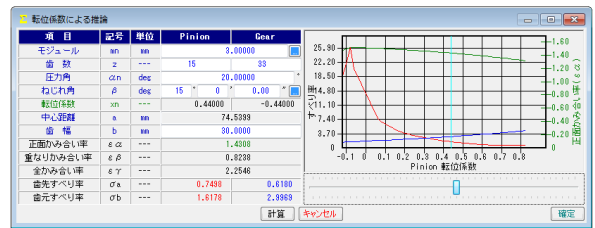


図 1.9 推論 2 (転位係数)

1.6 歯形図

かみ合い図を図 1.10 に示します。補助フォームに示すようにズーム、距離計測 (図 1.11)、R 計測 (図 1.12) 機能および直径、修整歯形、作用線、奇数歯 Y 測定値の表示そして回転機能があります。歯形創成を図 1.13 に示します。

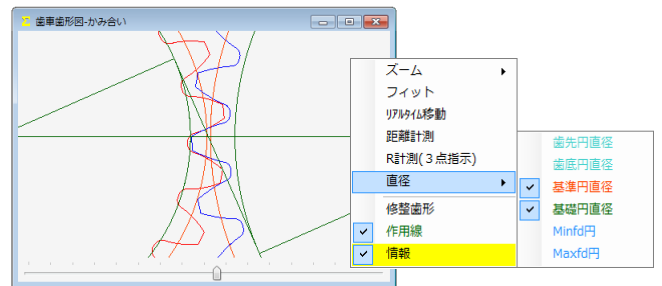


図 1.10 かみ合い図と補助フォーム

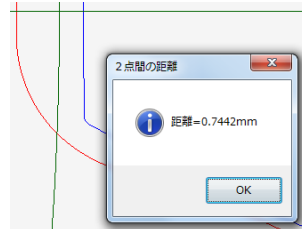


図 1.11 距離計測

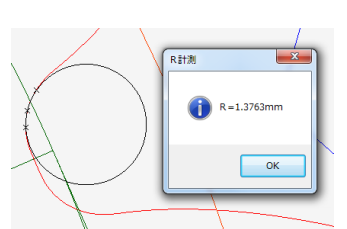


図 1.12 R 計測

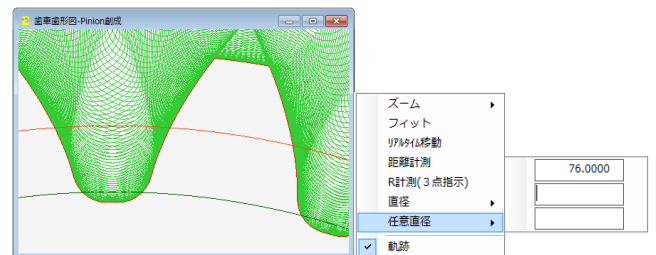


図 1.13 歯形創成 (ピニオン) と補助フォーム

1.7 歯形レンダリング

3次元歯形のかみ合いを図 1.14 のように作図することができ、かみ合い部分に接触線を観察することができます。コントロールフォームにより歯形の向きを自由に変えることができ、拡大、縮小が可能です。

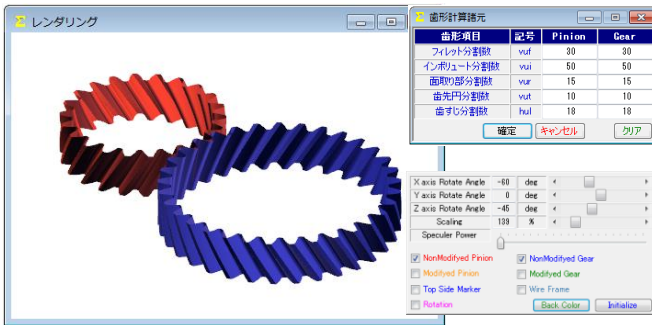


図 1.14 歯形レンダリング

1.8 歯車精度

図 1.15 と図 1.16 に新 JIS の歯車精度規格 JIS B 1702-1:1998 と JIS B 1702-2:1998 による誤差の許容値を示します。また、図 1.4 の設定により新 JIS と旧 JIS の切り換えが可能です。歯車精度規格は

- JIS B 1702-1:1998, JIS B 1702-2:1998, JIS B 1702-3:2008
- JIS B 1702:1976
- JGMA 116-02:1983

の 5 種類です。



図 1.15 JIS B 1702-1



図 1.16 JIS B 1702-2

1.9 歯車強度計算 (鋼)

歯車強度計算は、図 1.5 に示すように ISO6336:2006 規格に準拠した JGMA6101-02:2007 および JGMA 6102-02:2009 規格と JGMA401-01:1974, 402-01:1975 の 2 種類あり、設計単位は、SI 単位系、MKS 単位系を選択することができます。図 1.17 に強度計算の動力設定画面を示します。材料の選択は、図 1.18 に示すように「材料」と「熱処理」に適応した材料の選択フォームを表示します。また、図 1.19 に曲げに関する係数設定画面を、図 1.20 に面圧に関する係数の設定画面を示し、図 1.21 に強度計算結果を示します。



図 1.17 強度計算 (動力設定)



図 1.18 強度計算 (材料)



図 1.19 強度計算 (曲げに関する係数)



図 1.20 強度計算 (面圧に関する係数)

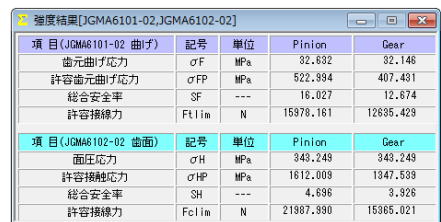


図 1.21 強度結果

1.10 歯車強度計算 (樹脂)

プラスチック歯車の強度は、図 1.5 で JIS B 1759(2013)または Lewis の式を選択することができます。JIS B 1759「プラスチック円筒歯車の曲げ強さ評価方法」は、歯車の運転試験に基づいて歯車の許容曲げ応力を求める方法が規定されていて POM の許容曲げ応力は各所の実験結果から 80.0[MPa]と定まり、POM 以外の材料についても規格に基づいて独自に決定することができます。そして歯元曲げ応力と各種係数(歯元形状係数、寿命係数、雰囲気温度係数等)を考慮した許容歯元曲げ応力とを比較して安全か否かを判断します。詳しくは規格をご覧ください。

プラスチック歯車の強度計算の例として図 1.22 に歯車諸元を、図 1.23 に強度諸元を、図 1.24 に曲げ応力に関する値を図 1.25 に相当歯車の値を図 1.26 に係数と安全率 SF を示します。

| 寸法語元 | | | |
|------------|------------|-----|-------------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion Gear |
| モジュール | mn | mm | 1.00000 |
| 歯数 | z | | 16 30 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 0.00000 |
| ねじれ方向 | | | 右ねじれ 左ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 17.02694 31.92593 |
| 基準円直径 | db | mm | 15.87745 29.77022 |
| 歯厚入力方式 | | | 転位係数 転位係数 |
| 転位係数 | xn | | 0.20000 0.00000 |
| またぎ歯数 | zm | | 3 4 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 7.78466 10.83407 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 2.0000 2.0000 |
| オーバーホール寸法 | dm | mm | 20.58245 35.28587 |
| 歯面角円弧歯厚 | Sn | mm | 1.71638 1.57080 |
| 中心距離 | a | mm | 24.90000 |
| 歯面角法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 0.00000 |
| 歯幅 | b | mm | 10.00000 10.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 19.42684 33.92593 |
| 歯底円直径 | df | mm | 14.92684 29.42593 |
| 歯先R | ra | mm | 0.10000 0.10000 |
| 基準ラック歯元R | rf | mm | 0.3750 0.3750 |

図 1.22 歯車諸元

| プラスチック円筒歯車の曲げ強さ評価結果 JIS B 1759:2013 | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| トルク入力方式 | | トルク・回転速度入力基準 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion Gear |
| 材料 | --- | --- | POM × POM |
| 伝達効力 | P | W | 52.9560 |
| トルク | T | N·m | 0.5000 0.9375 |
| 回転速度 | n | min ⁻¹ | 1000.0000 539.9599 |
| 呼び慣性モーメント | Fwt | N | 57.7309 |
| 周速 | vw | m/s | 0.3070 |
| 正面噛み合い圧力角 | α_{vt} | deg | 29.5692 |
| 正面噛み合い率 | ϵ_α | --- | 1.15170 |
| 噛み合い回数 | N | --- | 10000000 5399399 |
| リム厚さ | sR | mm | 2.0000 2.0000 |
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 80.0180 80.0180 |
| 工具刃先丸み半径 | ρ_{FPv} | mm | 0.3750 0.3750 |
| 歯元形状係数 | Yf | --- | 1.409 1.247 |
| 寿命係数 | YNT | --- | 0.779 0.829 |
| 疲労強度係数 | Y θ | --- | 1.000 |
| 温度上昇係数 | Y $\Delta\theta$ | --- | 0.981 |
| 潜傷係数 | YL | --- | 1.190 |
| 相手歯係数 | YM | --- | 0.650 |
| 最小安全係数 | SFmin | --- | 1.000 1.000 |

図 1.23 強度諸元

| プラスチック円筒歯車の曲げ強さ評価結果 JIS B 1759:2013 | | | |
|-------------------------------------|------------|-----|---------------|
| 歯元曲げ | 相当歯車 | 係数 | |
| 項目(歯元曲げ) | 記号 | 単位 | Pinion Gear |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 26.904 29.843 |
| 歯形係数 | YF | --- | 1.976 1.999 |
| 基準ラック歯元すみ肉半径... | E | mm | 0.068 0.068 |
| 補助係数(歯元危険断面面...) | G | --- | -0.676 -0.875 |
| 補助角度(歯元危険断面面...) | H | rad | -0.889 -0.969 |
| ラック工具(ピニオンカッ...) | θ | rad | 0.814 0.901 |
| 歯元危険断面歯厚 | SFn | mm | 2.049 2.106 |
| 曲げモーメントの腕の長さ | hFe | mm | 1.407 1.473 |
| 歯元すみ肉半径 | ρ_F | mm | 0.504 0.534 |
| 基準円ねじれ角 | β_b | deg | 18.74724 |

図 1.24 歯元曲げ

| プラスチック円筒歯車の曲げ強さ評価結果 JIS B 1759:2013 | | | |
|-------------------------------------|-------------------|-----|-------------------|
| 歯元曲げ | 相当歯車 | 係数 | |
| 項目(相当歯車) | 記号 | 単位 | Pinion Gear |
| 歯数 | zn | --- | 18.9892 35.6029 |
| 正面噛み合い率 | ϵ_α | --- | 1.2844 |
| 基準円直径 | dn | mm | 18.9892 35.6029 |
| 歯面角法線ピッチ | Pbn | mm | 2.8521 |
| 基準円直径 | dbn | mm | 17.8431 33.4558 |
| 歯先円直径 | dan | mm | 21.3882 37.6029 |
| 外側の点を通る円弧直径(...) | den | mm | 20.5108 36.8667 |
| 外側の点の圧力角(一歯かみ...) | α_{en} | deg | 29.54644 24.84055 |
| 外側の点の角度(一歯かみ...) | γ_e | deg | 3.10176 1.89879 |
| 外側の点の作用角(一歯かみ...) | α_{Fen} | deg | 26.44468 23.14180 |

図 1.25 相当歯車

| プラスチック円筒歯車の曲げ強さ評価結果 JIS B 1759:2013 | | | |
|-------------------------------------|---------------|-----|-------------------|
| 歯元曲げ | 相当歯車 | 係数 | |
| 項目(係数) | 記号 | 単位 | Pinion Gear |
| 応力修正係数 | Ys | --- | 1.789 1.789 |
| 危険断面歯厚と曲げモーメ... | L | --- | 1.452 1.480 |
| 危険断面歯厚と歯元すみ... | qs | --- | 2.027 1.971 |
| ねじれ角係数 | Y β | --- | 0.999 |
| リム厚さ係数 | YB | --- | 1.128 1.128 |
| バックアップレシオ | BR | --- | 0.889 0.889 |
| 許容曲げ応力 | σ_{FP} | MPa | 46.935 50.935 |
| 曲げ強さに対する安全係数 | SF | --- | 1.745 2.111 |
| 安全判定 | | | SF>SFmin SF>SFmin |

図 1.26 係数

1.11 軸受け荷重

歯車に作用する荷重と、軸受けに作用する荷重を計算します。荷重の種類は、接線力、法線力など各軸受けに作用する荷重 20 種類を計算します。図 1.27 に計算結果を示します。

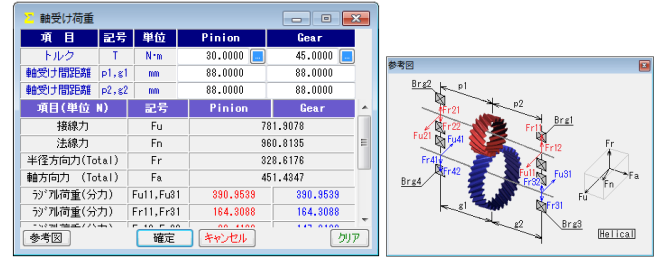


図 1.27 軸受け荷重

1.12 歯面評価¹⁾

歯面評価では、すべり率、ヘルツ応力、油膜厚さ、接触温度、すべり速度、すべり速度図(PV値)を表示します。これらの計算結果は、歯面修整には適応していません。また油膜厚さ、接触温度(歯車温度+フラッシュ温度)は、AGMA2001-C95, Annex A による計算結果です。そのため歯面修整量や荷重分担などを考慮した厳密な解析は[45]CT-FEM Opera iii をお使いください。

図 1.28 の油の種類は、鉱物油、合成油を選択でき ISO グレードも選択(任意設定可)することができます。また、摩擦係数は、一定値、ISO、AGMA 方式の中から選択することができます。

図 1.29~1.34 に、すべり率、ヘルツ応力グラフ等を示しますが、横目盛はロールアングルと作用線長さの切り換えができます。

図 1.31 の油膜厚さから摩擦の発生確率を、図 1.32 の接触温度からスカuffing の発生確率を計算します。



図 1.28 歯面評価(設定)

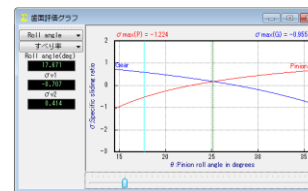


図 1.29 すべり率

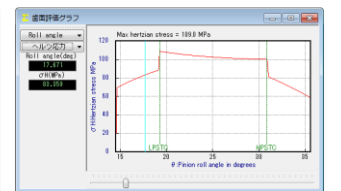


図 1.30 ヘルツ応力

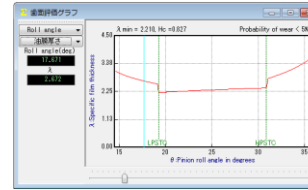


図 1.31 油膜厚さ

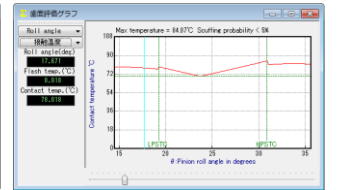


図 1.32 接触温度

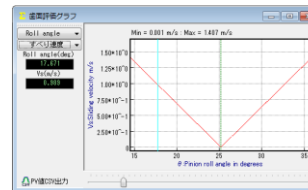


図 1.33 すべり速度

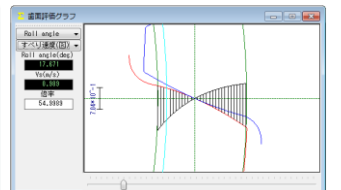


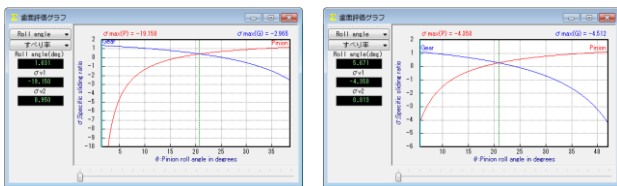
図 1.34 すべり速度図

*1) すべり率とヘルツ応力は標準機能で、他はオプションです。

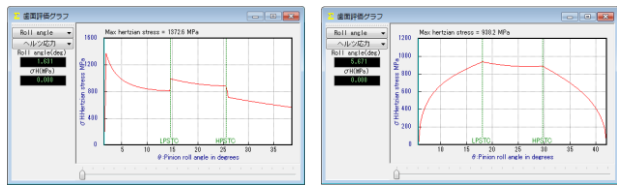
1.12a すべり率とヘルツ応力グラフ

インボリュート歯形の特徴としてかみ合いピッチ円ではころがり運動となりますが、これ以外ではすべりを伴う運動となります。例題歯車 ($m_n=2, z_1=15, z_2=24, \alpha=20^\circ$ の標準平歯車) のすべり率とヘルツ応力、歯面接触温度 (歯車温度+フラッシュ温度) および油膜厚さグラフは、図 1.35 (左列) となり、ピニオンの歯元のすべり率が大きいいため、かみ合い始めに急激なヘルツ応力変化を示しています。このような場合、精度を良くしても問題解決にはなりません。かみ合い率だけでなく、すべり率およびヘルツ応力の変化を考慮して設計する必要があります。ヘルツ応力の変化を滑らかにするには、転位を調整するだけで簡単に解決する場合があります。また、樹脂歯車は、すべりによる熱の影響が大きいため十分注意して設計する必要があります。

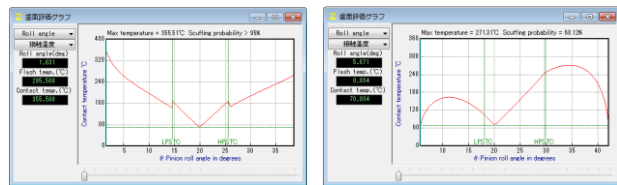
中心距離を変化させないで、転位係数を $x_{n1}=0.24, x_{n2}=0.24$ とし歯形修整 (スムースメッシング) を施した場合のすべり率とヘルツ応力そして歯面接触温度の変化を、図 1.36 に示します。この結果、図 1.35(c) のスカuffing発生確率 90% から図 1.36(c) では 68% に低下し、摩耗の発生確率も 30% から 26% に低下していることが解ります。



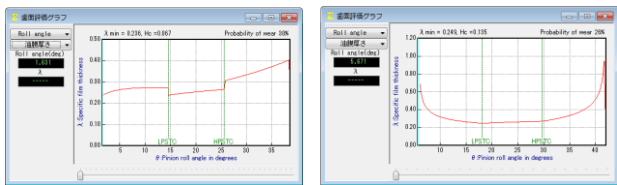
(a) すべり率



(b) ヘルツ応力



(c) 歯面接触温度 (歯車温度+フラッシュ温度)



(d) 油膜厚さ

図 1.35 標準歯車

図 1.36 転位+歯形修整

1.12b O級歯車

歯車歯形のインボリュート面は重要ですが、これと同様に歯元形状も重要です。図 1.37 のグラフは、歯元曲線を任意Rで接続した歯形の試験結果 (両歯面かみ合い) であり、図 1.38 のグラフは、理論トロコイド曲線歯形の試験結果を示しています。創成運動を基本に考えますと歯元の形状は①圧力角、②基準ラック歯元のたけ、③基準ラック歯元R、④転位量、⑤歯数によって決定される準トロコイド曲線となります。involuteΣiii (spur and helical) は、理

論歯形曲線を出力します。また、歯元形状に対する応力の影響は付録Dをご覧ください。



図 1.37 歯車試験結果(任意歯形)



図 1.38 歯車試験結果(理論歯形)

1.13 FEM 歯形応力解析

強度計算終了後、[FEM]アイコンをクリックするだけで簡単に応力解析を行うことができます。図 1.39 に、FEM 解析の設定画面を示します。縦弾性係数、ポアソン比、分割数および荷重点位置として荷重 (変更可能) を与えることで応力を解析 (σ_x, σ_y , せん断応力 τ , 主応力 σ_1, σ_2) します。歯車強度計算と歯に作用する実応力を評価する事により歯車強度の信頼性を高めることができます。図 1.40 にピニオンの最大主応力 σ_1 の応力分布図を示します。また、歯形の変位 (色分布表示も可能) と歯形修整量を図 1.41 に示します。

歯形修整は、歯車の運転性能を上げるための有用な方法であり精度の良い歯車であってもかみ合い時の歯のたわみにより駆動歯車と被動歯車の歯に法線ピッチの差が発生します。この法線ピッチの差によるかみ合いのずれが、[振動]や、[音]の原因となります。歯形修整はこれを解決する一つの方法です。弾性率が小さい樹脂材料は変位も大きくなりますので歯形修整の効果は大きいといえます。図 1.41 のように 2D-FEM により歯のたわみから歯先修整を決定する際の歯のたわみ量を知ることができますが、3 次元歯面修整の決定は[45]CT-FEM Opera iiiをお使いください。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-----------|-------|-----|---------------|----------|
| 解析方式 | --- | --- | 2D-FEM 歯形応力解析 | |
| 材料記号 | --- | --- | SCM415H | SMn443H |
| 縦弾性係数 | E | MPa | 206000.0 | 206000.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.30 | 0.30 |
| 縦分割数(歯面部) | nNO | --- | 21 | 21 |
| 横分割数 | nND | --- | 21 | 21 |
| 荷重点位置 | NF | --- | 2 | 2 |
| 荷重 | F | N | 787.2958 | |

図 1.39 FEM 設定 (2D)

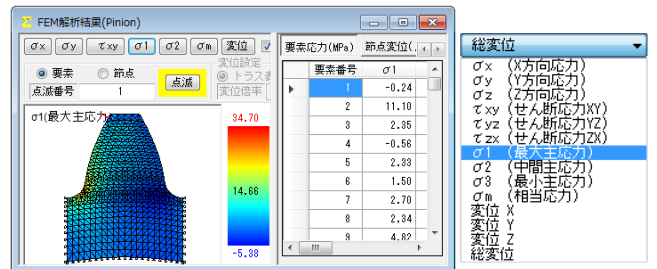


図 1.40 最大主応力 σ_1 (ピニオン)

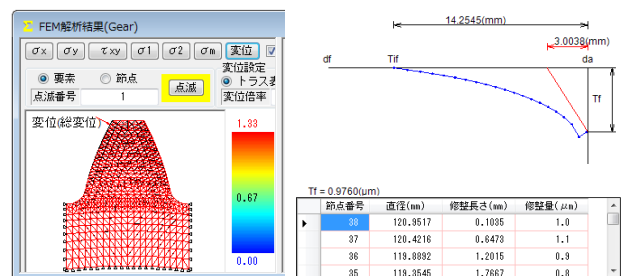


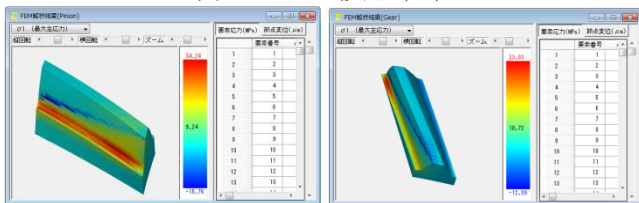
図 1.41 歯の変位とグラフ (ギヤ)

図 1.42 に 3D-FEM 解析条件設定画面を示します。図 1.43 にピニオンとギヤの応力分布図を、図 1.44 にピニオンとギヤの変位図を示します。また、図 1.43 および図 1.44 の画面上部のスクロールバーで縦回転、横回転機能で観察角度を変えることができ、ズーム機能で図の拡大、縮小ができます。

本ソフトウェアでは 1 歯に荷重が作用したときの歯の応力および変位を計算しますが、同時かみ合い歯に荷重が作用したときの応力、歯の変位、軸角誤差、歯形誤差、ピッチ誤差そして歯面修整などに対応した解析をしたい場合は[45]CT-FEM Opera iii をお使いください。

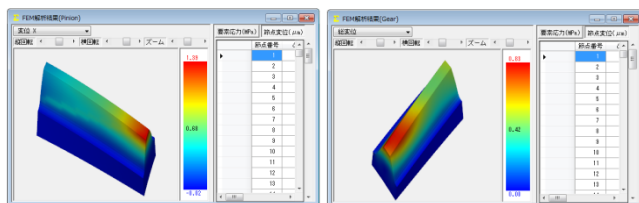
| FEM解析諸元 | | | | |
|-----------|-------|-----|---------------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 解析方式 | --- | --- | 3D-FEM 歯形応力解析 | |
| 材料記号 | --- | --- | SCM415H | SM449H |
| 弾性係数 | E | MPa | 208000.0 | 208000.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.30 | 0.30 |
| 縦分割数(歯面部) | mNO | --- | 11 | 11 |
| 横分割数 | wNO | --- | 11 | 11 |
| 荷重点位置 | NF | --- | 2 | 2 |
| 荷重 | F | N | 787.2958 | |

図 1.42 FEM 設定 (3D)



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 1.43 最大主応力 σ_1



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 1.44 歯の変位

1.14 歯車修整 (歯形、歯すじ、バイアス修整)

図 1.45 に歯面修整を与えた例を示します。この歯形を得るためには図 1.46 の歯形修整を数値入力でも与えることもできますが、右側の図のようにパターン化した歯形に数値を入力して与えることもできます。同様に、歯すじ修整も図 1.47 のように設定することができます。この歯形修整と歯すじ修整の 2 つを図 1.48 のように表し、反対歯面にコピーすれば左右歯面同じ修整歯形となり、それを合成すると図 1.45 として表示することができます。

また、図 1.48 の画面上部のコンボボックスで「歯形」、「歯すじ」、「歯形・歯すじ」を選択することができます。歯形だけ方向は作用線または直径で指定することができます。また、歯形修整の倍率は最大 1000 倍で設定することができます。

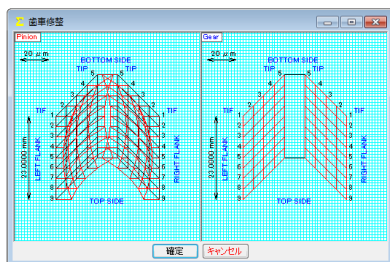


図 1.45 歯面修整 (トポグラフ)

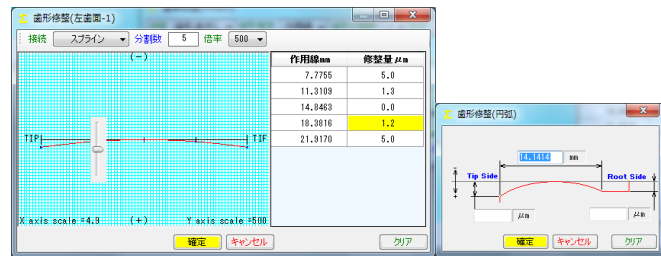


図 1.46 歯形修整

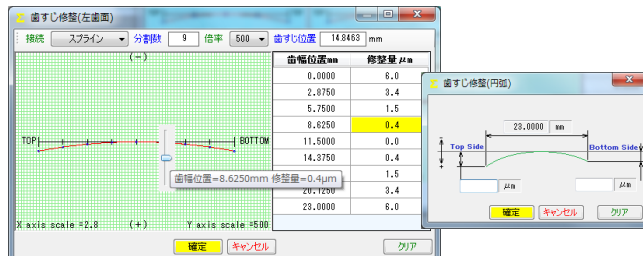


図 1.47 歯すじ修整

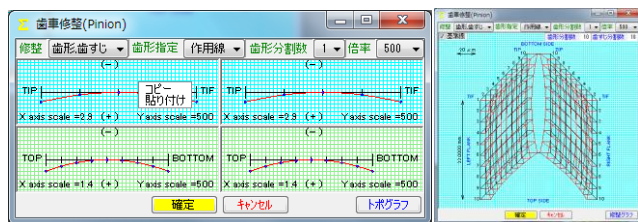


図 1.48 歯形修整&歯すじ修整とトポグラフ

歯面修整を与えた歯形は、図 1.49 の歯形計算諸元で設定することができます。ここで設定した歯形計算条件は、図 1.10~1.14 に示す歯形に有効で、図 1.14 の歯形レンダリングに重ね合わせることができるため図 1.50 のように表示することができます。ここでは、ピニオンに歯面修整を与えているため図中の赤色歯面の中に黄色歯面が表れています (ギヤは無修整)。

| 歯形計算諸元 | | | |
|------------|-----|--------|------|
| 歯形項目 | 記号 | Pinion | Gear |
| フレット分割数 | vuf | 30 | 30 |
| インボリュート分割数 | vui | 50 | 50 |
| 面取り部分割数 | vur | 15 | 15 |
| 歯先円分割数 | vut | 10 | 10 |
| 歯すじ分割数 | hul | 31 | 31 |

図 1.49 歯形計算諸元

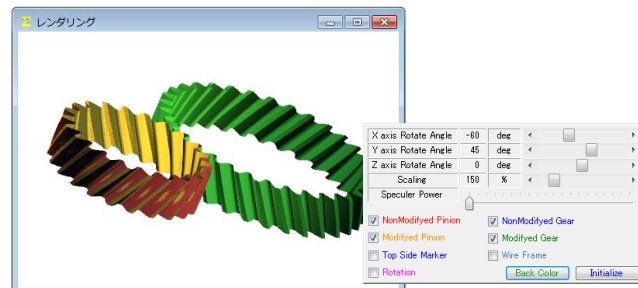


図 1.50 歯形レンダリング (歯面修整)

1.15 歯当たり

歯面修整 (図 1.45) を与えた歯車に図 1.51 で歯当たり条件を設定し歯当たりを確認することができます。ここでは、平行度誤差および食い違い誤差を 0 とし、接触最大クリアランスを $2.0 \mu\text{m}$ としたときの歯当たりを図 1.52 および図 1.53 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------------|-----|-----|---------|
| 中心距離 | a | mm | 95.9192 |
| 平行度誤差 | p | deg | 0.00000 |
| 食い違い誤差 | di | deg | 0.00000 |
| 歯すじ分割数 | hul | --- | 20 |
| 歯形補間精度 | ac | μm | 0.0 |
| 回転分割数(1ピッチ当たり) | urP | --- | 50 |
| 接触最大クリアランス | c | μm | 2.0 |

BOTH(両歯面)
 CCW(左歯面)
 CW(右歯面)

図 1.51 歯当たり設定

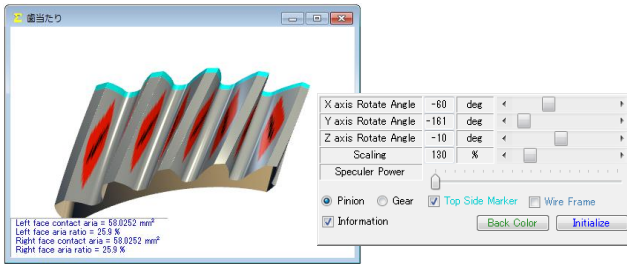


図 1.52 歯当たり (ピニオン)

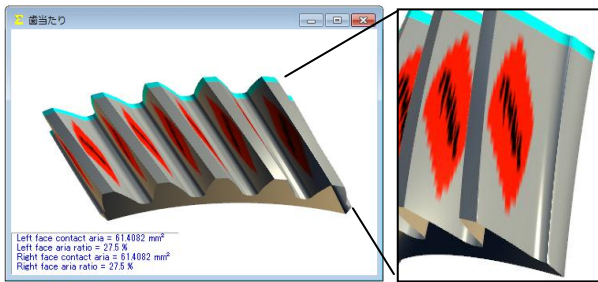
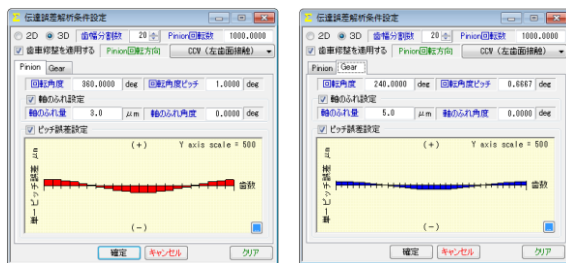


図 1.53 歯当たり (ギヤ) & 拡大

1.16 伝達誤差解析

伝達誤差解析では、無修整歯形または図 1.45 で与えた歯形で無負荷時の回転伝達誤差試験をすることができます。図 1.54 に伝達誤差設定を示しますが、ここでは 2D 解析または 3D 解析の選択をすることができ、軸の振れ、回転速度を設定することができます。また、ピッチ誤差は図 1.55 のように最大値の設定または全歯のピッチ誤差を設定することができます。

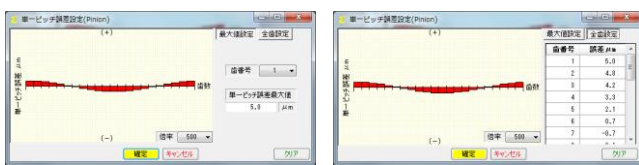
伝達誤差解析、ワウ・フラッタ (回転むら) そしてフーリエ解析結果を図 1.56~1.58 に示します。図 1.57 の **Sound** **消す/取り除く** で **[音]** を聞くことができます。



(a)ピニオン

(b)ギヤ

図 1.54 伝達誤差設定



(a)最大値の設定

(b)全歯設定

図 1.55 ピッチ誤差設定

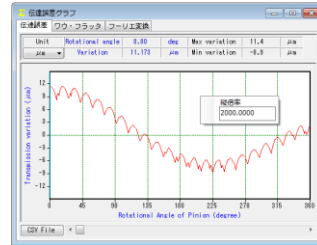


図 1.56 伝達誤差解析結果

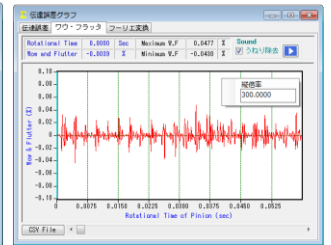


図 1.57 ワウ・フラッタ

伝達誤差解析、ワウ・フラッタ、フーリエ解析結果は、図 1.56 ~1.58 の左下にある **CSV File** で図 1.59 のように csv ファイル (本例の場合 361 個のデータ) に出力することができます。

本ソフトウェアは無負荷での伝達誤差解析試験です。負荷や軸角誤差に対応した伝達誤差解析は[45]CT-FEM Opera iii をお使いください。

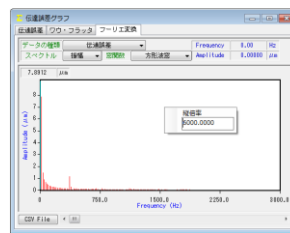


図 1.58 フーリエ解析

| A | B |
|---|------------|
| 1 | 0 11.17325 |
| 2 | 1 11.4156 |
| 3 | 2 11.17309 |
| 4 | 3 11.04796 |
| 5 | 4 10.86674 |
| 6 | 5 10.55849 |
| 7 | 6 10.1466 |
| 8 | 7 9.554466 |
| 9 | 8 8.887885 |

図 1.59 csv ファイル例

1.17 歯形出力

生成した歯形は、図 1.60 の歯形ファイル形式 で出力することができます。3D-IGES の場合、歯形を一体型と分割型を選択することができます。分割型の場合は歯元フィレット部、インボリュート歯面、歯先 R、歯先部に分割して図 1.61 のように出力します。

図 1.62 に示す座標補正設定では、金型用を使用することを考慮し、モジュール収縮率や圧力角補正、ねじれ角補正そして放電ギャップを考慮した歯形を出力することができます。例として図 1.63 にモジュール収縮率 20/1000 を考慮した歯形図(2D)を示します。また、歯形座標値を図 1.64 のようにテキストファイルで出力することができます。

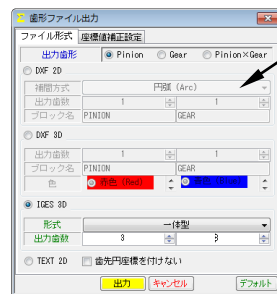


図 1.60 歯形ファイル形式

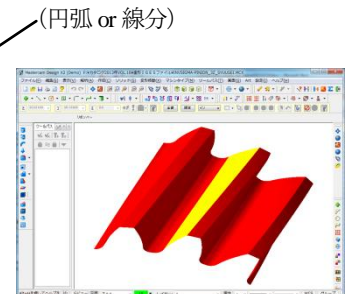


図 1.61 CAD 作図例



図 1.62 座標値補正設定

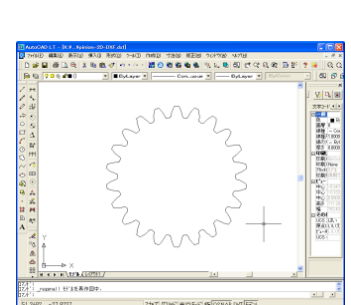


図 1.63 CAD 作図例

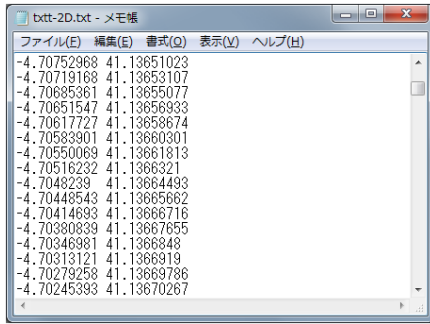


図 1.64 テキストファイル(.txt)

1.18 内歯車

内歯車は図 1.3 で「外歯車×内歯車」を選択することで外歯車と同様に計算することができます。図 1.65 に歯車諸元を図 1.66 に寸法を示します。図 1.67 に歯形レンダリングを図 1.68 に歯当たりを示します。なお、図 1.68 のギヤにかみ合うピニオンは、図 1.45 と同じ歯面修整を与えています。また、強度計算、伝達誤差解析、FEM 解析そして歯形出力などは「外歯車×外歯車」と同様です。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|------------|-----|----------|-----------|
| モジュール | mn | mm | | 3.00000 |
| 歯数 | z | --- | 22 | 65 |
| 圧力角 | α_n | deg | | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 30 * 0 | 0.00 * |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 76.21024 | 225.16680 |
| 基準円直径 | db | mm | 70.25753 | 207.57907 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 | 転位係数 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.10000 | 0.12300 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 4 | 11 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 32.59267 | 97.35160 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.0000 | 5.0000 |
| オーバーボール寸法 | dm | mm | 83.32747 | 219.15593 |
| 歯直角円弧歯厚 | Sn | mm | 4.93077 | 4.44878 |
| 中心距離 | a | mm | | 74.54701 |
| 歯直角法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.05000 | 0.06000 |
| 歯幅 | b | mm | 23.00000 | 23.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 82.81024 | 219.30460 |
| 歯底円直径 | df | mm | 69.31024 | 233.40460 |
| 歯先 R | ra | mm | 0.10000 | 0.10000 |
| 基準ラック歯元 R | rf | mm | 1.1250 | 1.1250 |

図 1.65 諸元 (内歯車)

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------------|---------------------|-----|-----------|------------|
| 正面モジュール | mt | mm | | 3.48410 |
| 正面圧力角 | α_{zt} | deg | | 22.78588 |
| 有効歯幅 | bw | mm | | 23.00000 |
| リード | pz | mm | 414.63023 | 1225.22113 |
| 転位量 | X_n | mm | 0.30000 | 0.36900 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 3.30000 | 2.63100 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 3.45000 | 4.11900 |
| 全歯たけ | h | mm | 6.75000 | 6.75000 |
| クリアランス | c | mm | 0.75017 | 0.75017 |
| 基準円歯ねじれ角 | β_b | deg | 28 * 1 | 27.55 * |
| 正面かみ合い圧力角 | α_{zw} | deg | 22 * 55 | 17.09 * |
| かみ合いピッチ円直径 | dw | mm | 76.28066 | 225.37488 |
| 正面法線ピッチ | pbt | mm | | 10.09275 |
| 歯直角法線ピッチ | pbn | mm | | 8.85639 |
| かみ合い長さ | sa | mm | | 14.05211 |
| 正面かみ合い率 | ϵ_{α} | --- | | 1.40062 |
| 重なりかみ合い率 | ϵ_{β} | --- | | 1.22019 |
| 全かみ合い率 | ϵ_{γ} | --- | | 2.62081 |
| すべり率 (歯先) | σ_a | --- | 0.21134 | 0.37569 |
| すべり率 (歯元) | σ_b | --- | -0.60227 | -0.26797 |
| 設計またぎ歯厚 | W | mm | 32.542672 | 97.411604 |
| 設計オーバーボール寸法 | dm | mm | 83.198909 | 219.395224 |
| 設計歯直角円弧歯厚 | sn | mm | 4.877582 | 4.378928 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 5.639564 | 5.131234 |
| 正面またぎ歯厚 | Wn | mm | 36.885179 | 110.390381 |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 3.95981 | 2.62037 |
| キャリア歯厚 | Sj | mm | 4.67578 | 4.36991 |
| 基準ラック歯末のたけ係数 | hac | --- | 1.00000 | 1.00000 |
| 基準ラック歯元のたけ係数 | hfc | --- | 1.25000 | 1.25000 |
| バックラッシュ | Jt | mm | | 0.19529 |
| 法線方向バックラッシュ | Jn | mm | | 0.10791 |

図 1.66 寸法 (内歯車)

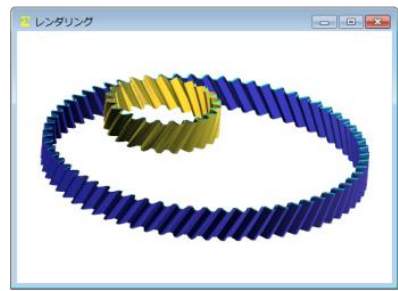


図 1.67 レンダリング

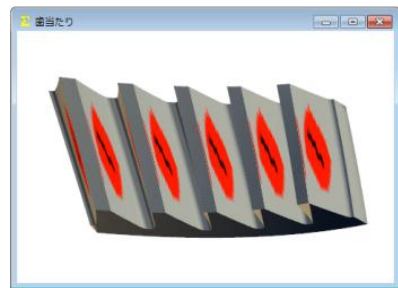


図 1.68 歯当たり (ギヤ)

1.19 HELP 機能

操作方法を知りたい場合は[HELP]機能を使うことができます。例えば、歯車精度について知りたい場合は、「精度」フォームをアクティブにして[F1]キーを押すことにより図 1.69 のように精度についての説明を表示します。

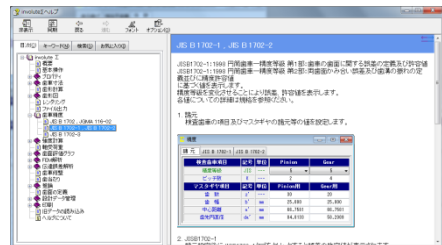


図 1.69 HELP 機能

1.20 設計データ管理 (保存・読み込み)

データベースの設定は、図 1.70 のように選択することができます。また、設計データは図 1.71 のように保存することができます。図 1.72 のようにデータを読み込むことができます。データ読み込みは、管理番号やタイトルの他に歯車諸元 (モジュール、歯数、圧力角、ねじれ角) から検索することができます。

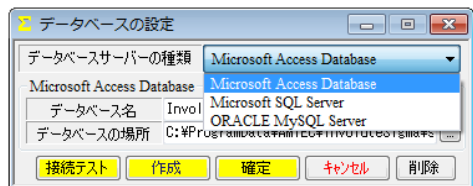


図 1.70 データベースの設定

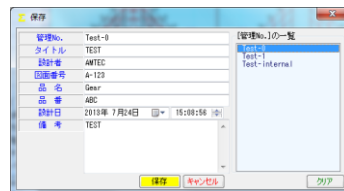


図 1.71 データ保存



図 1.72 読み込み

1.21 ISO 6336(2006): International Standard

Calculation of load capacity of spur and helical gears

以下に、ISO 6336(2006)の計算例を示します。

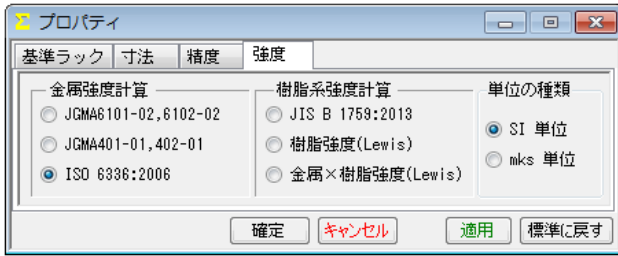


図 1.73 強度, ISO 6336 設定を追加

1.21.2 ISO 6336 規格

ISO 6336 の規格に基づいた計算例を以下に示します。



図 1.74 諸元設定 (外歯車×外歯車)

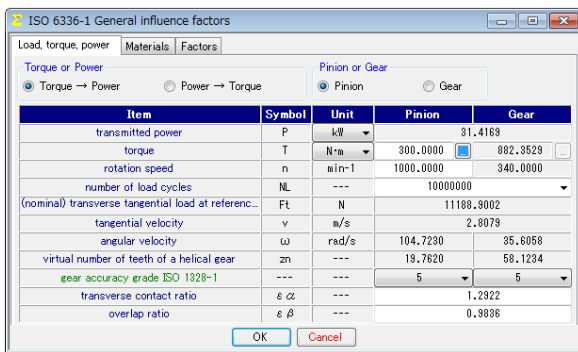


図 1.75 トルク, 回転速度の設定, 6336-1

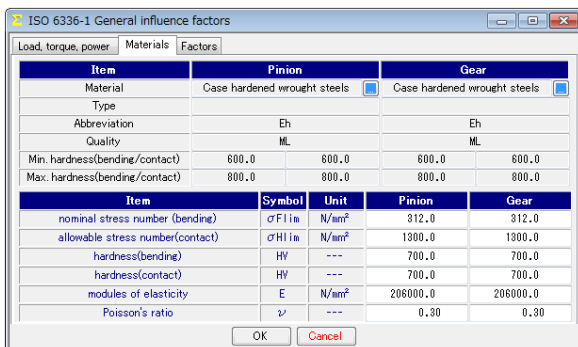


図 1.76 材料の設定

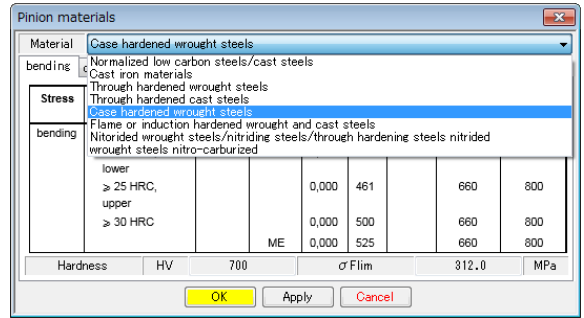


図 1.77 材料選択 1

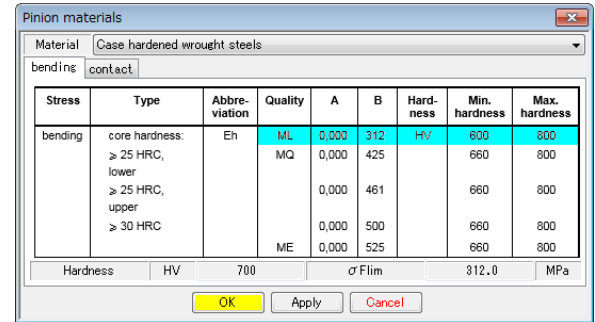


図 1.77a 材料選択 2 (曲げの例)

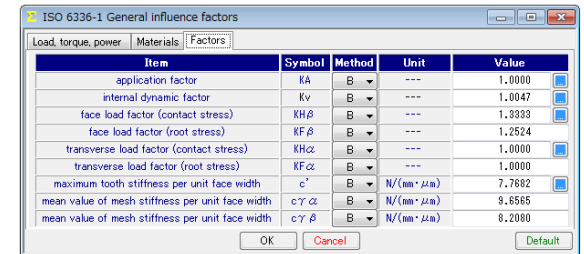


図 1.78 係数, 6336-1

A, B, C 法を  で選択することができます。

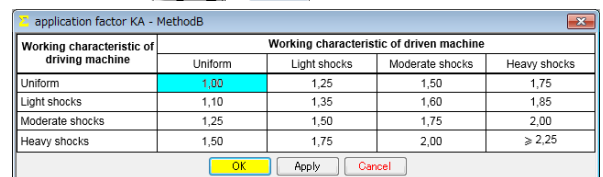


図 1.78a 係数 KA, 6336-1

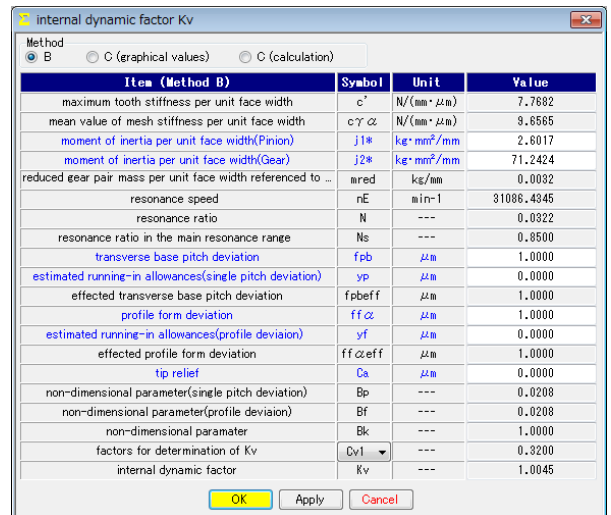


図 1.78b 係数 Kv, 6336-1

face load factors KH β and KF β

Method
 B C

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|------------------------------------|------------------|------|------------|
| mean transverse tangential load | F _m | N | 11241.4880 |
| maximum transverse tangential load | F _{max} | N | 13489.7856 |
| maximum load contact face width | b _{max} | mm | 27.0000 |
| face load factor(contact stress) | KH β | --- | 1.3333 |
| face load factor(root stress) | KF β | --- | 1.2524 |

OK Apply Cancel

図 1.78c 係数 KH β , 6336-1

transverse load factors KH α and KF α

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|---|-----------------|---------|---------------|
| transverse base pitch deviation(Pinion/Gear) | f _{pb} | μ m | 1.0000 1.0000 |
| running-in allowance for a gear pair | y α | μ m | 0.0750 |
| determinant tangential load in a transverse plane | FLH | N | 14988.2760 |
| transverse load factor (contact stress) | KH α | --- | 1.0000 |
| transverse load factor (root stress) | KF α | --- | 1.0000 |

OK Apply Cancel

図 1.78d 係数 KH α , 6336-1

maximum tooth stiffness per unit face width c'

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|--|-------------|---------------------|---------|
| minimum value for the flexibility of a pair of meshing teeth | q' | (mm $\cdot\mu$ m)/N | 0.0580 |
| web thickness | bs | mm | 30.0000 |
| rim thickness | sR | mm | 10.1059 |
| theoretical single stiffness | c' th | N/(mm $\cdot\mu$ m) | 17.2488 |
| correction factor | CM | --- | 0.8000 |
| gear blank factor | CR | --- | 1.0000 |
| basic rack factor | CB | --- | 0.5919 |
| maximum tooth stiffness per unit face width | c' | N/(mm $\cdot\mu$ m) | 7.7682 |
| mean value of mesh stiffness per unit face width | c' α | N/(mm $\cdot\mu$ m) | 9.6564 |
| mean value of mesh stiffness per unit face width | c' β | N/(mm $\cdot\mu$ m) | 8.2080 |

OK Apply Cancel

図 1.78e 係数 c', 6336-1

work hardening factor Zw

Surface-hardened pinion with through-hardened gear
 Through-hardened pinion and gear

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|----------------------------------|------------|--------------------|---------------|
| mean peak-to-valley roughness | Rz | μ m | 3.0000 3.0000 |
| ISO viscosity class (grade) | --- | --- | VG 150 |
| nominal viscosity at 40°C | ν 40 | mm ² /s | 150.0 |
| radius of relative curvature | ρ red | mm | 7.3237 |
| The equivalent roughness | RZH | μ m | 5.0559 |
| pitch line velocity | v | m/s | 2.8079 |
| Brinell hardness | HB | --- | 622.1 |
| work hardening factor(reference) | Zw | --- | 1.0000 |
| work hardening factor(static) | Zw | --- | 1.0000 |

OK Apply Cancel

図 1.79c 歯面強さ, Zw

ISO 6336-2 Surface durability(pitting), ISO 6336-3 Tooth bending strength

Contact(ISO6336-2) Bending(ISO6336-3)

| Item | Symbol | Method | Unit | Pinion | Gear |
|--|------------------|--------|-------------------|----------|----------|
| tooth form factor | YF | B | --- | 1.4316 | 1.7889 |
| stress correction factor | YS | --- | --- | 2.0437 | 1.7070 |
| stress correction factor, relevant to the di... | YST | --- | --- | --- | 2.0000 |
| helix angle factor (tooth root) | Y β | --- | --- | --- | 0.8525 |
| rim thickness factor | YB | --- | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| deep tooth factor | YDT | --- | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| life factor for tooth root stress | YNT | B | --- | 0.9762 | 0.9762 |
| relative notch sensitivity factor | Y δ relT | B | --- | 0.3977 | 0.3913 |
| relative notch sensitivity factor for static ... | Y δ relTB | B | --- | 1.0192 | 0.8711 |
| relative surface factor | YRelT | B | --- | 1.0663 | 1.0663 |
| size factor (tooth root) | Yx | B | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| minimum required safety factor for tooth r... | SFmin | --- | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| tooth root stress | σ F | B | N/mm ² | 390.1564 | 407.2120 |
| permissible tooth root stress | σ FP | B | N/mm ² | 663.3790 | 659.5739 |
| safety factor for tooth breakage | SF | --- | --- | 1.7016 | 1.6197 |

OK Cancel Default

図 1.80 曲げ強さ 6336-3

ISO 6336-2 Surface durability(pitting), ISO 6336-3 Tooth bending strength

Contact(ISO6336-2) Bending(ISO6336-3)

| Item | Symbol | Method | Unit | Pinion | Gear |
|---|--------------|--------|-------------------|-----------|-----------|
| zone factor | ZH | --- | --- | --- | 2.3661 |
| single pair tooth contact factors | ZBZD | --- | --- | 1.0098 | 1.0000 |
| elasticity factor | ZE | --- | $\sqrt{N/mm^2}$ | 189.8117 | --- |
| contact ratio factor (pitting) | Z ϵ | --- | --- | 0.8703 | --- |
| helix angle factor (pitting) | Z β | --- | --- | 0.9752 | --- |
| permit of pitting | --- | --- | --- | --- | --- |
| life factor for contact stress | ZNT | B | --- | 1.1294 | 1.1294 |
| lubricant factor | ZL | B | --- | 0.9917 | --- |
| velocity factor | Zv | B | --- | 0.9701 | --- |
| roughness factor affecting surface durabil... | ZR | B | --- | 0.9917 | --- |
| work hardening factor (reference stress) | Zw | B | --- | 1.0000 | --- |
| work hardening factor (static stress) | Zw | B | --- | 1.0000 | --- |
| size factor (pitting) | Zx | B | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| minimum required safety factor for surfac... | SFmin | --- | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| Item (Pitting) | Symbol | Method | Unit | Pinion | Gear |
| contact stress | σ H | --- | N/mm ² | 1360.1103 | 1345.3000 |
| permissible contact stress | σ HP | B | N/mm ² | 1645.9399 | 1645.9399 |
| safety factor for pitting | SH | --- | --- | 1.2102 | 1.2220 |

OK Cancel Default

図 1.79 歯面強さ, 6336-2

lubricant factor ZL

Use Equation 37 Use Equation 41

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|-----------------------------|----------|--------------------|--------|
| ISO viscosity class (grade) | --- | mm ² /s | VG 150 |
| nominal viscosity at 50°C | ν 50 | mm ² /s | 89.0 |
| nominal viscosity at 40°C | ν 40 | mm ² /s | 0.9100 |
| nominal viscosity at 50°C | ν 50 | mm ² /s | 0.9100 |
| lubricant factor | ZL | --- | 0.9917 |

OK Apply Cancel

図 1.79a 歯面強さ, ZL

roughness factor affecting surface durability ZR

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Pinion | Gear |
|--|------------|---------|--------|--------|
| mean peak-to-valley roughness | Rz | μ m | 3.0000 | 3.0000 |
| radius of relative curvature | ρ red | mm | 7.3237 | --- |
| mean relative peak-to-valley roughness for ... | Rz10 | μ m | 3.3282 | --- |
| factor for determining lubricant film factors | CZR | --- | 0.0800 | --- |
| roughness factor affecting surface durability | ZR | --- | 0.9917 | --- |

OK Apply Cancel

図 1.79b 歯面強さ, ZR

tooth form factor YF (Pinion)

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|--|--------------|------|---------|
| residual fillet undercut | Spr | mm | 0.0000 |
| root fillet radius of basic rack for cylindrical gears | ρ fPv | mm | 1.1000 |
| tip diameter (tip form diameter) | da(dNa) | mm | 60.9880 |
| tooth root chord at the critical section | SFn | mm | 6.3141 |
| bending moment arm for tooth root stress releva... | hFe | mm | 3.2481 |
| load direction angle, relevant to direction of appl... | α Fen | deg | 23.4596 |
| Theta | θ | deg | 47.6447 |
| tooth form factor | YF | --- | 1.4316 |

OK Apply Cancel

図 1.80a 曲げ強さ, YF

stress correction factor YS (Pinion)

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|---|----------|------|--------|
| tooth root radius at the critical section | ρ F | mm | 1.3949 |
| factor L | L | --- | 1.9439 |
| notch parameter | qs | --- | 2.2633 |
| stress correction factor | YS | --- | 2.0437 |

OK Cancel

図 1.80b 曲げ強さ, YS

rim thickness factor YB (Pinion)

| Item (Method B) | Symbol | Unit | Value |
|----------------------|--------|------|---------|
| rim thickness | sR | mm | 10.1059 |
| tooth height | ht | mm | 6.7373 |
| rim thickness factor | YB | --- | 1.0000 |

OK Apply Cancel

図 1.80c 曲げ強さ, YB

[2] involute Σ iii (bevel gear design system)

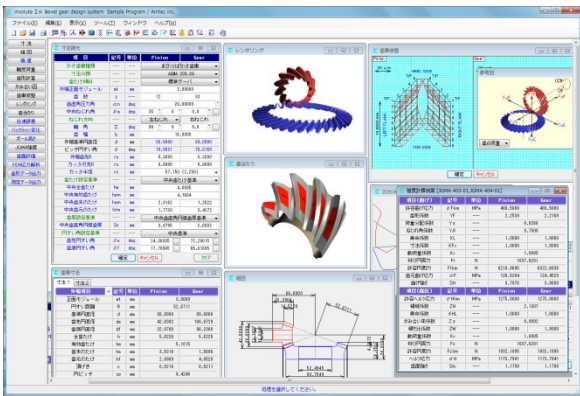


図 2.1 involute Σ iii (bevel gear design system)

2.1 概要

involute Σ iii (bevel gear)は、かさ歯車の寸法、強度（鋼、樹脂）、組図、軸荷重、歯面修整、伝達誤差、歯面評価、FEM 解析、歯形データおよび測定データ等の機能を備えており、効率よく的確に設計することができます。

本ソフトウェアは、今までオプション扱いしていた機能も一部、基本ソフトウェアに含めました。新機能として、5 軸加工機で製造する場合を考慮して大歯車の歯形を平面とした歯車も追加しました (2.25 項参照)。図 2.1 に全体画面を示します。

2.2 ソフトウェアの構成

involute Σ iii (bevel gear)の構成を表 2.1 に示します。表中の○は基本ソフトウェアの機能で◎はオプション機能です。

表 2.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | 構成 |
|-----|-------------------------------|--------------|----|
| 1 | 寸法 | 2.4 | ○ |
| 2 | 精度 | 2.5 | ○ |
| 3 | 軸受荷重 | 2.22 | ○ |
| 4 | 組図 | 2.6 | ○ |
| 5 | かみ合い図 | 2.8 | ○ |
| 6 | 歯形レンダリング | 2.9 | ○ |
| 7 | バックラッシュ変化 | 2.12 | ○ |
| 8 | ボール高さ | 2.13 | ○ |
| 9 | 強度計算(鋼) JGMA403-01, 404-01 | 2.19 | ○ |
| 10 | 強度計算(樹脂) | 2.21 | ○ |
| 11 | 強度計算(鋼) AGMA2003-B97 | 2.20 | ◎ |
| 12 | 歯車修整 (歯形, 歯すじ) および歯当たり | 2.10 2.11 | ◎ |
| 13 | 伝達誤差解析 | 2.15 | ◎ |
| 14 | 歯面評価 | 2.23 | ◎ |
| 15 | FEM 歯形応力解析 | 2.24 | ◎ |
| 16 | 歯形データ出力 (すぐば) | 2.14 | ◎ |
| 17 | 歯形データ出力 (まがりば+ゼ ロールギヤ) | 2.14 | ◎ |
| 18 | 測定データ出力 (大阪精密機械) | 2.16 | ◎ |
| 19 | 測定データ出力 (Carl Zeiss) | 2.16 | ◎ |
| 20 | 歯形出力時の歯幅延長 | 2.14 | ◎ |
| 21 | 大歯車平面歯形 | 2.25 | ◎ |

2.3 寸法設定 (プロパティ)

かさ歯車の種類、寸法分類を以下に示します。また、図 2.2 に例題歯車の設定画面を示します。

(1)かさ歯車の種類

すぐばかさ歯車, まがりばかさ歯車, ゼロール

(2)寸法分類

(2.1)すぐばかさ歯車

- ・標準
- ・平行頂げき
- ・ANSI/AGMA 2005-D03
- ・AGMA 208.03 (最小歯数 7 歯対応)
- ・グリーンソン式自動車用

(2.2)まがりばかさ歯車

- ・ANSI/AGMA 2005-D03
- ・AGMA 209.04
- ・グリーンソン式 (1960)
- ・グリーンソン式 (11 歯以下)

(2.3)ゼロールベベルギヤ

- ・ANSI/AGMA 2005-D03
- ・AGMA 202.03

(3)歯たけの傾斜は、標準テーパ、等高歯、デュープレックステーパ、TRL に対応しています(AGMA)。

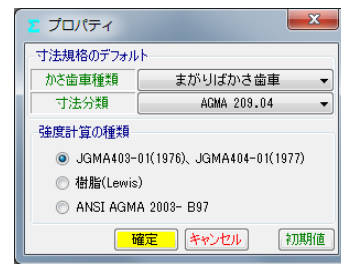


図 2.2 プロパティ

2.4 寸法

モジュール、歯数を入力することにより標準値が入力されます。軸角は標準90°で入力範囲は $\Sigma=60^\circ\sim 160^\circ$ 且つ、冠歯車(ピッチ円すい角最大90°未満)に対応しています。



図 2.3 寸法諸元入力画面

図2.3では、モジュール、歯数、軸角を設定すると、選択した寸法規格に基づき標準値が入力されます。また、入力操作において以下のような機能があります。

- (1) プロパティでは、歯車の種類を設定していますが、図2.3の歯車諸元でも変更することができます。
- (2) 歯たけ、歯厚および円すい角の設定基準は、外端基準または中央基準の選択をすることができます。
- (3) 歯先および歯底円すい角は、図2.4のように60進と10進を交換できる機能があります。
- (4) 図2.5には外端部の数値を表示していますが、中央部、内端部の寸法も表示することができます。図2.6の寸法結果2にかみ合い率等を示します。

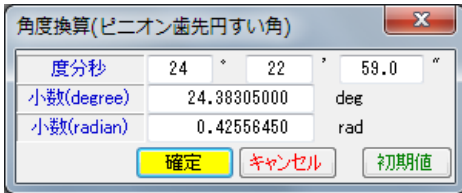


図2.4 角度変換

| 外端項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-----------|----|----|---------|----------|
| 正面モジュール | mt | mm | 3.0000 | |
| 円すい距離 | R | mm | 52.6711 | |
| 基準円直径 | d | mm | 36.0000 | 99.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 42.6382 | 100.0729 |
| 歯底円直径 | df | mm | 32.0700 | 96.2300 |
| 全歯たけ | h | mm | 5.6226 | 5.6225 |
| 有効歯たけ | he | mm | 5.1015 | |
| 歯末のたけ | ha | mm | 3.5318 | 1.5698 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 2.0909 | 4.0528 |
| 頂ずき | c | mm | 0.5210 | 0.5211 |
| 円ピッチ | cp | mm | 9.4248 | |
| 正面円弧歯厚 | St | mm | 5.5841 | 3.8406 |
| 正面円弧歯厚減少量 | ft | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 弦歯厚 | sj | mm | 3.1692 | 2.8954 |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 3.5975 | 1.5767 |

図2.5 寸法結果1

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------------|-------------------|-----|------------------|------------------|
| 基礎円すい角 | ϕb | deg | 18 ° 43 ' 53.3 " | 62 ° 1 ' 14.4 " |
| 歯末角 | θa | deg | 4 ° 23 ' 59.0 " | 2 ° 16 ' 29.7 " |
| 歯元角 | θf | deg | 2 ° 16 ' 23.7 " | 4 ° 23 ' 59.8 " |
| 歯元角の和 | $\Sigma \phi$ | deg | 6 ° 40 ' 23.5 " | |
| 歯先間の軸方向距離 | xb | mm | 14.6160 | 4.8710 |
| 相当90°かさ歯車歯数比 | n80 | mm | 2.7500 | |
| 相当平歯車歯数 | zv | mm | 23.2303 | 175.6793 |
| 円すい頂点~外端歯先 | x | mm | 48.2930 | 16.5247 |
| 外端法線バックラッシ | BL | mm | 0.0000 | |
| 正面かみ合い率 | $\epsilon \alpha$ | mm | 1.0861 | |
| 重なりかみ合い率 | $\epsilon \beta$ | mm | 1.4016 | |
| 総合かみ合い率 | $\epsilon \gamma$ | mm | 1.7731 | |
| ツースアングル | ta | min | 153.2387 | 188.8928 |
| 素材の角度 | θx | deg | 87 ° 43 ' 36.3 " | 85 ° 36 ' 0.2 " |
| 素材の角度 | θy | deg | 70 ° 1 ' 0.8 " | 58 ° 58 ' 59.2 " |

図2.6 寸法結果2

2.5 精度

図2.7に、かさ歯車の精度(JIS B 1704:1978)を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|-----|---------|--------|------|
| 精度等級 | --- | --- | 2 | 3 |
| 単一ピッチ誤差(±) | ft | μm | 15 | 28 |
| 隣接ピッチ誤差 | ftu | μm | 19 | 36 |
| 累積ピッチ誤差(±) | Ft | μm | 59 | 110 |
| 歯溝のふれ | fr | μm | 32 | 67 |

図2.7 かさ歯車精度 (JIS B 1704)

2.6 組図

図2.8~2.11のように組立距離やボス径を設定し作図することができます。作図機能として拡大、距離計測などがあり、図2.8で面取り加工を「する」にすると小端部に面取りを与えた形状(図2.9)とすることができます。図2.10に軸角60°を、図2.11に軸角160°の組図例を示します。

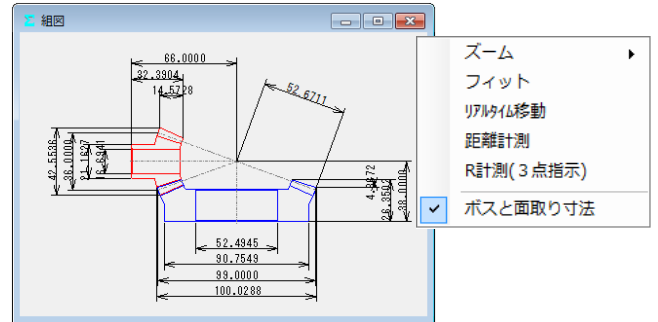


図2.8 組図1

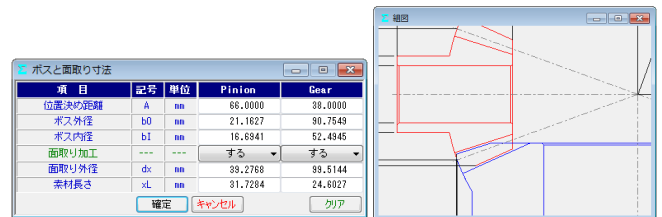


図2.9 ボスと面取りの寸法設定と面取り図

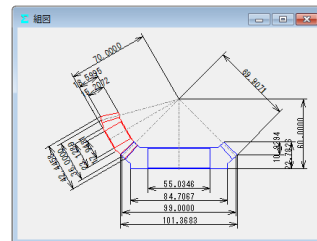


図2.10 軸角 $\Sigma=60^\circ$ の例

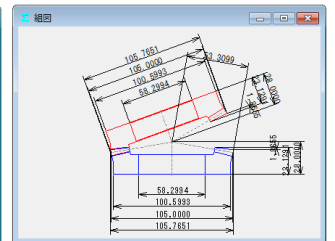


図2.11 $\Sigma=160^\circ$ の例

2.7 かさ歯車の歯形

involute Σ iii (bevel gear design)で生成する歯形は、図2.12に示す球面インボリュートであり、歯元は球面トロコイド曲線です。そのため、デファレンシャルベベルギヤなどの歯数の少ない歯車であっても正しいかみ合いを示します。

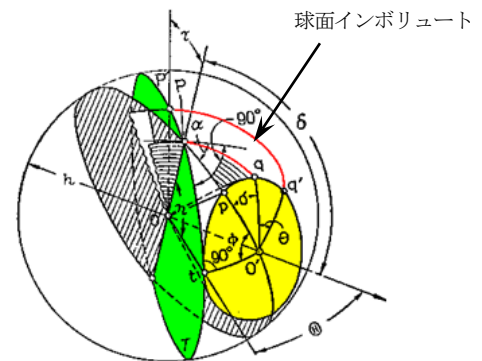


図2.12 球面インボリュート歯形

歯形計算条件を図2.13に示します。また、まがりばかさ歯車の歯すじ(図2.14)は、「円弧」、「インボリュート」、「エピトロコイド(図2.15)」、「等リード」を選択することができます。歯すじ

を等リードとすることで金型から一定のリードで抜くことも可能ですし、大形歯車でも組み立てが容易です。

| 歯形項目 | 記号 | Pinion | Gear |
|------------|-----|--------|------|
| フィレット分割数 | vuf | 30 | 30 |
| インボリュート分割数 | vui | 50 | 50 |
| 歯先R分割数 | vur | 15 | 15 |
| 歯先円分割数 | vut | 10 | 10 |
| 歯すじ分割数 | hul | 18 | 18 |
| 歯すじ曲線の種類 | --- | 円弧 | |

図2.13 歯形計算諸元

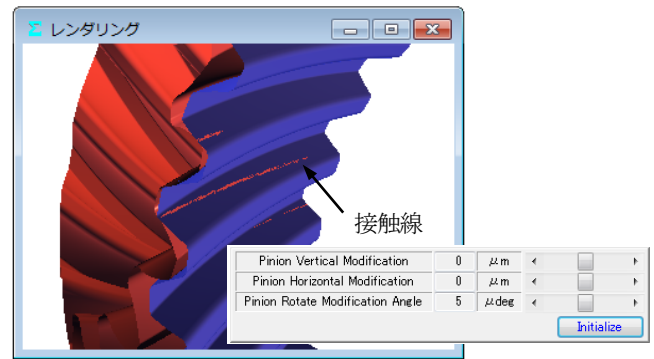


図2.18 歯形レンダリング2 (無修整歯形の例)

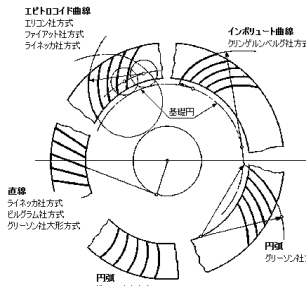


図2.14 歯すじ曲線

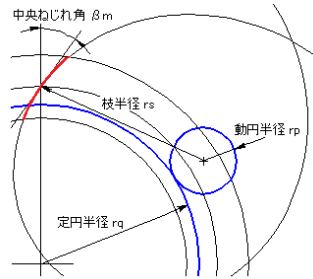


図2.15 エピトロコイド曲線

2.8 かみ合い図

正面歯形の作図機能として拡大、距離計測などがあり、外端、中央、内端部の歯形を表示します。

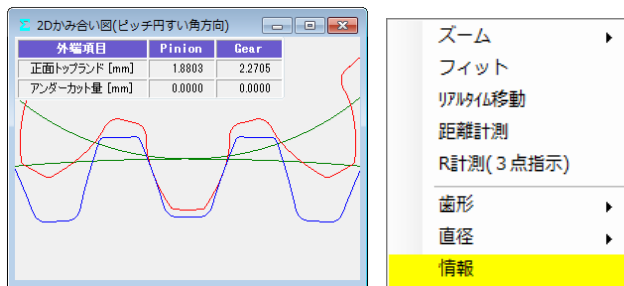


図2.16 歯形 (外端), ピッチ円すい角方向

2.10 歯形・歯すじ修整 (オプション)

歯形修整, 歯すじ修整をする場合, 図2.19~2.23に示すように修整を与えることができます。図2.21では修整する指定点数 (最大=50) を入力することができ, 図2.22のように円弧パターンで入力することもできます。

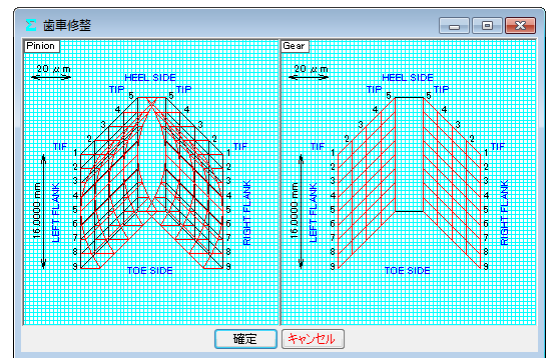


図2.19 歯形・歯すじ修整トポグラフ

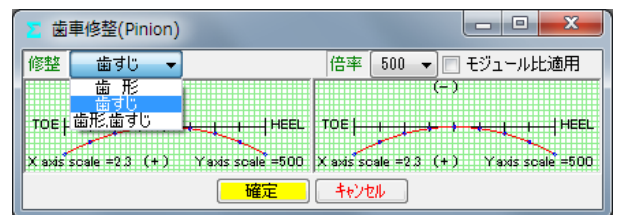


図2.20 歯すじ修整の例

2.9 歯形レンダリング

歯形レンダリングを図2.17に示します。コントロールフォームで歯車の表示角度を変更でき、図の大きさを変えることもできます。また、歯面接触を確認するため角度変換した状態を図2.18に示します。ここでは、ピニオンを「水平」、「垂直」に移動することができますので誤差を与えたときのかみ合い接触線を容易に把握することができます。

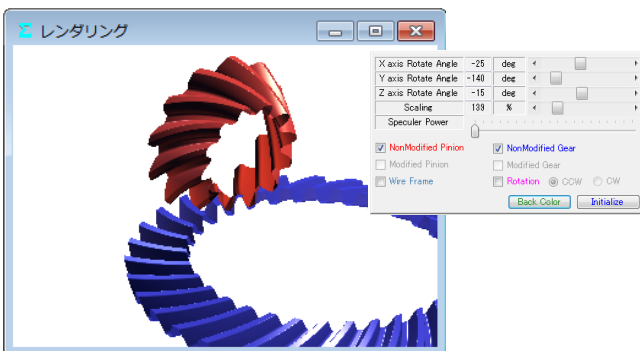


図2.17 歯形レンダリング1とコントロールフォーム



図2.21 歯すじ修整の入力1

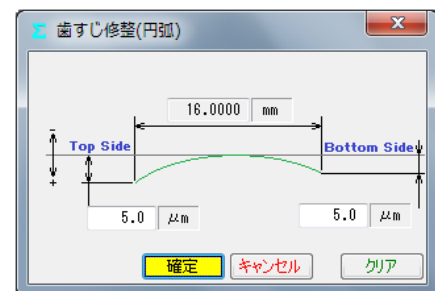


図2.22 円弧パターンの入力

歯形1本、歯すじ1本の修整の例を図2.23に示します。

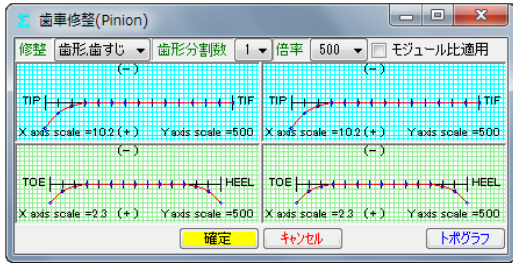


図2.23 歯形・歯すじ修整の入力

歯形断面分割を5、歯すじ1としたときの修整とトポグラフの例を図2.24に示します。トポグラフでは、歯形と歯すじの分割数をそれぞれ最大50まで設定することができます。

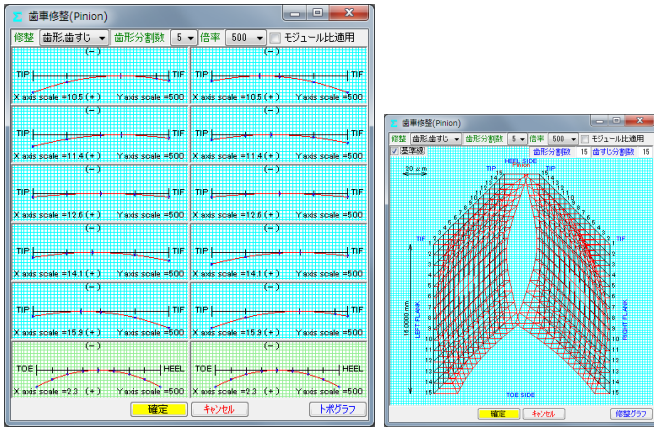


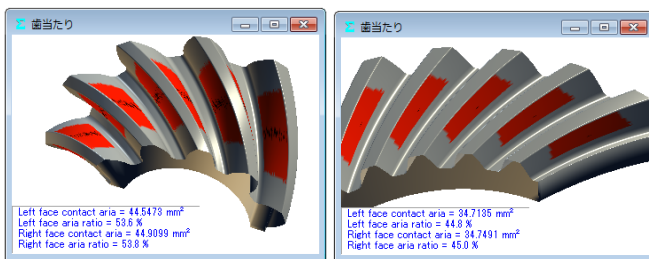
図2.24 歯形・歯すじ (バイアス) 修整とトポグラフの例

2.11 歯当たり (オプション)

歯形・歯すじ修整を与えた歯車 (無修整歯形を含む) の歯当たりを表示することができます。図2.25の歯当たり設定では取り付け誤差, 接触最大クリアランス (光明丹厚さ) を設定することができます。例として図2.19の修整を与えたときの歯当たりを図2.26に示します。



図2.25 歯当たり設定



(a)ピニオン (b)ギヤ

図2.26 歯当たり

2.12 バックラッシ変化

図2.24の歯形・歯すじ修整を有する歯車のバックラッシの変化を図2.27に示します。図2.27よりこの歯車のキックアウトは0.2 μm であることが解ります。

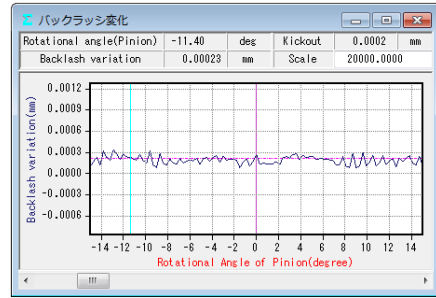


図2.27 バックラッシ変化

2.13 ボール高さ

歯厚管理をするため歯幅の中央付近にボールを配置し、その時のボール高さを計算 (すぐばかさ歯車のみ) します。製造時の歯厚管理に適しています。図2.28に、かさ歯車のボール高さの例を示します。

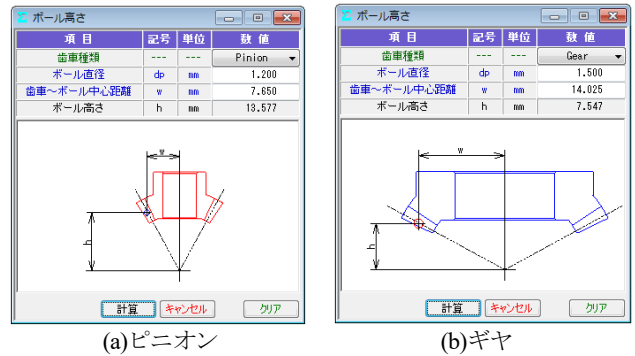


図2.28 ボール高さ

2.14 歯形データ出力 (オプション)

歯形・歯すじ修整を与えた歯形 (無修整歯形を含む) をCADデータで出力することができます。図2.29で歯形ファイル条件を設定し、図2.31のように3D-IGESファイルを出力することができます (3D-DXFも出力可能)。また、かみ合い歯形の3D-IGESや、図2.30のように組図の2D-DXFファイルを出力することができます。なお、図2.30で歯形の分割数を変更することができます。

3D-IGESファイル歯形生成時、歯幅を延長して出力したい場合は、図2.29(b)で対応可能です。CAD作図例を図2.31(b)に示します。



(a) 設計歯幅 (b) 設計歯幅+歯幅延長

図2.29 歯形ファイルの設定

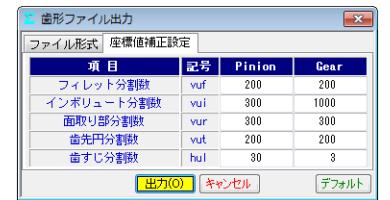
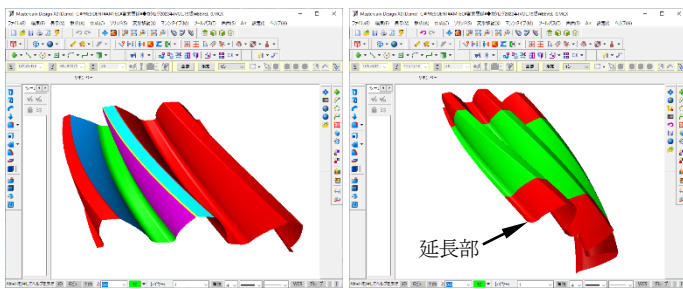


図2.30 歯形ファイルの設定 (分割数)



(a) 設計歯幅 (b) 設計歯幅と延長歯幅
図2.31 CAD作図例 (ピニオン; 分割型の例)

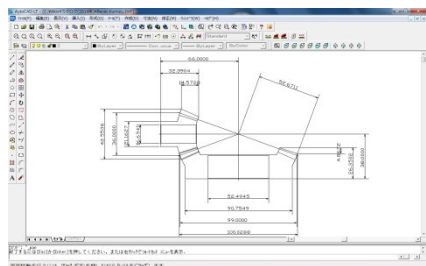


図2.32 CAD作図例 (組図)

2.15 伝達誤差解析 (オプション)

図2.19の歯形で無負荷における回転伝達誤差解析を行った例を以下に示します。取り付け誤差を図2.33のように与え、ピニオンのピッチ誤差 (歯番号6のみ) として $5\mu\text{m}$ を与えています。



図2.33 回転伝達誤差解析の設定



図2.35 ワウ・フラッタ

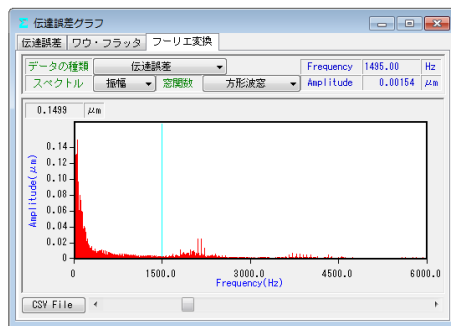


図2.36 フーリエ解析



図2.37 ピッチ誤差の設定 (最大値設定)

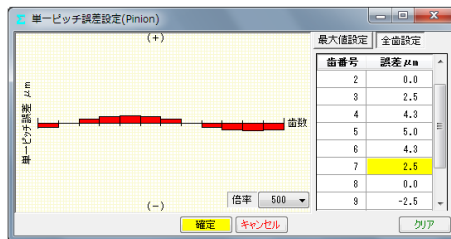


図2.38 ピッチ誤差の設定 (全歯値設定)

伝達誤差, ワウ・フラッタ, フーリエ解析の計算結果を図2.34~2.36に示します。図2.35のワウ・フラッタではこのグラフ波形を音で確認することができます (グラフ右上の Sound)。

ピッチ誤差の設定は図2.37および図2.38に示すように最大値で入力することも歯の誤差を個々に入力することもできます。

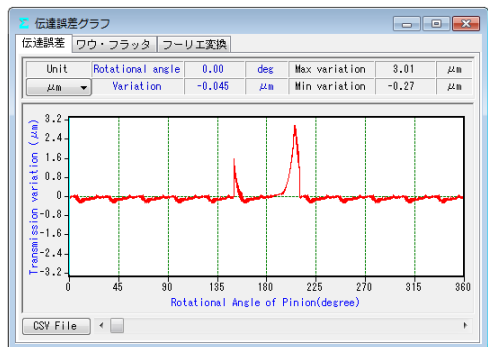


図2.34 伝達誤差結果

2.16 歯形測定データ出力 (オプション)

Carl Zeiss 三次元測定機と大阪精密機械測定機の2種類の測定データ出力機能があります。

(1)三次元測定機 (Carl Zeiss) 用測定データ出力の概要

図2.39に測定データの設定画面を示します。歯形分割数と歯面の測定逃げ量および測定基準距離を設定することにより測定点座標と法線ベクトルをファイルに出力します。

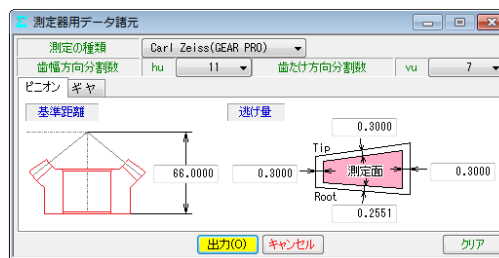


図2.39 測定データの設定 (Carl Zeiss)

(2)大阪精密機械測定機の測定データ出力の概要

図2.40の測定データの設定をすることにより測定ノミナルデータをファイルに出力します。「測定機(HyB-35・65)は、測定歯面を、「点」ではなく「線」で測定するため精密な測定をすることができます。3次元測定機のような格子点ではなく、線で歯のエッジまで測定することにより、騒音や振動の原因となる微妙な形状誤差をキャッチし、歯車の精度を追求します。」(大阪精密機械株式会社カタログより転載)

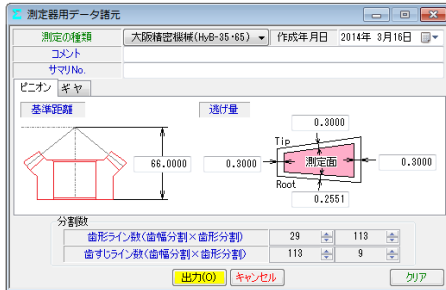


図2.40 測定データの設定 (大阪精密機械)

2.17 測定例1

involuteΣiii(bevel gear design)で、かさ歯車測定用の歯形データと測定ベクトルを出力して Carl Zeiss 社の3次元測定機のベベルギヤ測定用ソフトウェア(GearPro-Bevel¹)で読み込み、表示した例を図2.41~2.43に示します。

*1): 「GearProは、ドイツ・カール ツァイス社(Carl Zeiss IMT GmbH)の製品です。」

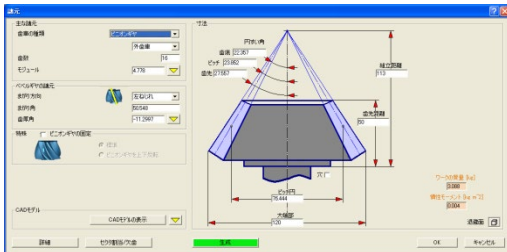


図2.41 ベベルギヤ諸元 (Carl Zeiss)

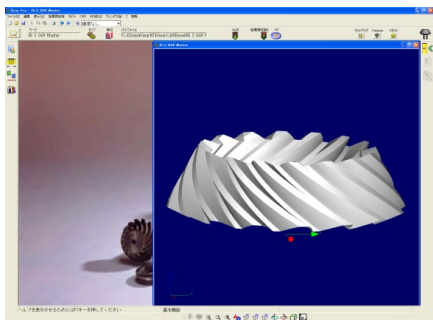


図2.42 ベベルギヤ測定用画面 (Carl Zeiss)

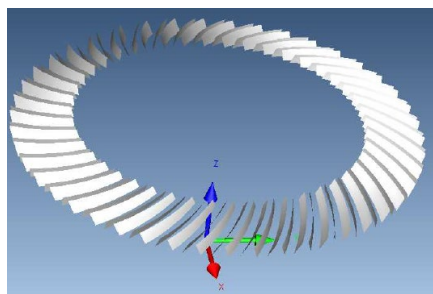


図2.43 歯形測定点およびベクトルデータ (Carl Zeiss)

2.18 測定例2

involuteΣiii(bevel gear design)でベベルギヤ測定用の歯形データと法線ベクトルを出力して大阪精密機械測定機(HyB-35・65)で測定した例を図2.44に示します。

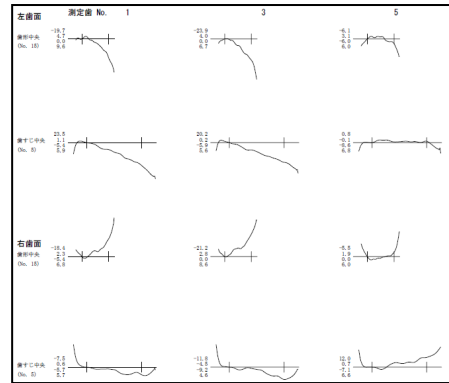


図2.44 ストレートベベル歯形・歯すじ測定例

2.19 歯車強度計算 (JGMA)

JGMA 403-01:1976(曲げ),404-01:1977(面圧)に基いて計算します。

(1)動力設定：トルク設定 (MN・m, kN・m, N・m, N・cm, N・mm, kgf・m, kgf・cm, gf・cm) と回転速度, クラウニングの有無などの設定画面を図2.45に示します。



図2.45 動力設定

(2)材料設定：図2.46の材料設定で許容応力等を設定します。材料の選択は、図2.47の中から硬度を参考にして材料の許容応力値を決定します。また、材料記号、材料の許容応力値(σFlim, σHlim)および硬度は、任意に入力することができます。



図2.46 材料設定

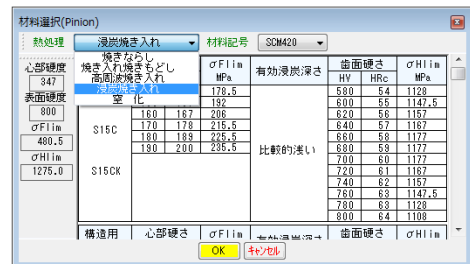


図2.47 材料選択

(3)係数設定：強度計算の係数設定画面を図2.48に示します。係数は補助フォームを表示しますのでその中から選択することも、直接入力することもできます。強度計算結果を図2.49に示します。



図2.48 強度計算の係数設定

| 項目(曲げ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------|-----------------|-----|-----------|-----------|
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 480.5000 | 480.5000 |
| 歯形係数 | YF | --- | 2.2539 | 2.2169 |
| 荷重分配係数 | Y ϵ | --- | 0.8266 | |
| ねじれ角係数 | Y β | --- | 0.7500 | |
| 寿命係数 | KL | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 寸法係数 | KFx | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.0885 | |
| 呼び円周力 | Ft | N | 1637.6201 | |
| 許容円周力 | Ftlim | N | 6218.9695 | 6322.6838 |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 126.5284 | 124.4529 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 3.7976 | 3.8609 |

| 項目(面圧) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|---------|-----------------|-----|-----------|-----------|
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 1275.0000 | 1275.0000 |
| 領域係数 | ZH | --- | 2.1307 | |
| 寿命係数 | KHL | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| かみ合い率係数 | Z ϵ | --- | 0.9092 | |
| 硬さ比係数 | ZW | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.0885 | |
| 呼び円周力 | Fc | N | 1637.6201 | |
| 許容円周力 | Fclim | N | 1932.1895 | 1932.1895 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 1173.7941 | 1173.7941 |
| 歯面強さ | Sfc | --- | 1.1799 | 1.1799 |

図2.49 強度計算結果

2.20 歯車強度計算 (AGMA) (オプション)

AGMA 2003-B97:1997に基いて計算します。図2.2のプロパティで強度計算「AGMA 2003-B97」を選択します。ここでは、図2.51の歯車についての強度計算例を図2.52~2.56に示します。



図2.50 寸法諸元



図2.51 強度諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|------------|-----|--------|
| 歯数比 | mG | --- | 2.800 |
| 周速 | vet | m/s | 14.136 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.315 |
| 荷重分配係数 | KH β | --- | 1.056 |

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|---------------|-----|----------|----------|
| 寸法係数 | Zx | --- | | 0.930 |
| 歯すじ修正係数 | Zxc | --- | | 1.500 |
| 幾何係数 | ZI | --- | | 0.112 |
| 応力繰り返し係数 | ZNT | --- | 1.320 | 1.404 |
| 硬さ比係数 | ZW | --- | | 1.000 |
| 歯面応力 | σ_H | MPa | | 1403.436 |
| 許容接触応力 | σ_{HP} | MPa | 1821.096 | 1987.545 |
| 許容伝達動力(単位) | Pa ϵ | kW | 1883.711 | 1905.323 |
| 許容伝達動力 | Pa ϵ | kW | 1883.711 | 1905.323 |
| 歯面強さの余裕率 | Sfc | --- | 1.684 | 1.906 |

図2.52 強度計算結果 (面圧)

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|------------|-----|--------|
| 歯数比 | mG | --- | 2.800 |
| 周速 | vet | m/s | 14.136 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.315 |
| 荷重分配係数 | KH β | --- | 1.056 |

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|---------------|-----|----------|----------|
| 寸法係数 | YK | --- | | 0.613 |
| 歯すじ曲線係数 | Y β | --- | | 1.061 |
| 応力繰り返し係数 | YNT | --- | 1.018 | 1.036 |
| 幾何係数 | YJ | --- | 0.254 | 0.287 |
| 曲げ応力 | σ_F | MPa | 148.938 | 131.841 |
| 許容曲げ応力 | σ_{FP} | MPa | 386.705 | 393.857 |
| 許容伝達動力(単位) | Pa ϵ | kW | 2596.331 | 2987.272 |
| 許容伝達動力 | Pa ϵ | kW | 2596.331 | 2987.272 |
| 曲げ強さの余裕率 | Sft | --- | 2.596 | 2.987 |

図2.53 強度計算結果 (曲げ: ピニオン凹)

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|------------|-----|--------|
| 歯数比 | mG | --- | 2.800 |
| 周速 | vet | m/s | 14.136 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.315 |
| 荷重分配係数 | KH β | --- | 1.056 |

| 項目(歯面強さ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------|----|-------|-----------|-----------|
| 予想寿命係数 | CL | --- | 1.017 | 1.017 |
| 予想寿命負荷回数 | N | cyces | 7.575E+08 | 7.575E+08 |
| 予想寿命時間 | L | hrs | 1.052E+04 | 2.946E+04 |

| 項目(曲げ強さ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------|----|-------|-----------|-----------|
| 予想寿命係数 | KL | --- | 0.392 | 0.453 |
| 予想寿命負荷回数 | N | cyces | 1.303E+30 | 5.319E+26 |
| 予想寿命時間 | L | hrs | 2.649E+25 | 2.069E+22 |

図2.54 寿命計算結果

| Item | Symbol | Unit | Pinion | Gear |
|--|---------------------|------|---------|----------|
| Geometry factor for Pitting resistance | ZI | --- | --- | 0.112 |
| Mean cone distance | Rm | mm | 284.487 | --- |
| Addendum angle | $\theta \alpha 1.2$ | deg | 3.471 | 1.786 |
| Mean addendum | ham1.2 | mm | 14.645 | 6.257 |
| Location constant | k' | --- | --- | 0.139 |
| Mean transverse diametral pitch | Pm | mm | 0.078 | --- |
| Outer transverse circular pitch | Pe | mm | 47.124 | --- |
| Mean normal base pitch | Pmbn | mm | 30.851 | --- |
| Mean normal circular pitch | Pmnn | mm | 32.831 | --- |
| Mean transverse pitch radius | rmpt1.2 | mm | 101.602 | 796.562 |
| Mean normal pitch radius | rmnp1.2 | mm | 151.417 | 1187.108 |
| Mean normal base radius | rmnb1.2 | mm | 142.285 | 1116.518 |
| Mean normal outside radius | rmne1.2 | mm | 166.062 | 1193.366 |
| Length of mean normal addendum action | g α n1.2 | --- | 33.835 | 17.944 |
| Length of action in mean normal section | g α n | --- | --- | 51.780 |
| Transverse contact ratio | $\epsilon \alpha$ | --- | --- | 1.191 |
| Intermediate variable | kz | --- | --- | 0.363 |
| Face contact ratio | $\epsilon \beta$ | --- | --- | 1.764 |
| Modified contact ratio | $\epsilon \sigma$ | --- | --- | 2.128 |
| Mean base spiral angle | $\Delta \beta$ | deg | 32.615 | --- |
| Length of action within the contact ellipse | $\epsilon \eta$ | --- | --- | 85.228 |
| Mean normal profile radius of curvature at pitch ... | $\rho m1.2$ | mm | 48.979 | 389.392 |
| Assumed locations of critical point on tooth for ... | y1 | --- | -0.408 | --- |
| --- | $\epsilon \eta 1$ | --- | --- | 85.223 |
| Distance along path of action in mean normal se... | eyo | --- | --- | 13.705 |
| Profile radius of curvature at point fl | $\rho 1.2$ | mm | 82.684 | 370.287 |
| Relative radius of profile curvature | ρyo | mm | 53.608 | --- |
| Length of the line of contact | gc | mm | 86.880 | --- |
| Inertia factor | Zi | --- | --- | 1.000 |
| --- | $\epsilon \eta 1$ | --- | --- | 66.696 |
| Load sharing ratio | ϵNI | --- | --- | 0.935 |

図 2.55 幾何係数 (I)

| Item | Symbol | Unit | Pinion | Gear |
|---|-------------------|------|--------|----------|
| Geometry factor for bending | YJ1.2 | --- | 0.254 | 0.287 |
| Mean dedendum | hfm1.2 | mm | 8.869 | 17.257 |
| Assumed locations of critical point on tooth for ... | yJ | --- | --- | 0.000 |
| Length of action within the contact ellipse | $\epsilon \eta$ | --- | --- | 85.228 |
| Determination of point of load application for max | y3 | --- | 31.822 | 18.947 |
| Distance from mean section to center of pressure | g σ | mm | 7.822 | 7.822 |
| Sum of gear and pinion mean normal pitch radii | $\Sigma rmpn$ | mm | --- | 1338.526 |
| Normal pressure angles at point of load applicati... | $\alpha L1.2$ | deg | 24.777 | 19.368 |
| One half of angles subtended by normal circular | $\zeta h1.2$ | deg | 2.868 | 0.403 |
| Normal pressure angles at point of load applicati... | $\alpha h1.2$ | deg | 21.909 | 18.964 |
| Distances from pitch circle to point of load appli... | $\Delta ryo1.2$ | mm | 1.945 | -7.568 |
| Tool or cutter tip edge radii used to produce | $\rho ao1.2$ | mm | 4.000 | 4.000 |
| Tooth fillet radii in mean section at the tooth root | rmf1.2 | mm | 4.152 | 4.146 |
| Tooth strength factor | XN1.2 | --- | 14.185 | 18.449 |
| Tooth form factors excluding stress concentra | Y1.2 | --- | 0.754 | 0.892 |
| Stress concentration and stress correction factor | YF1.2 | --- | 2.114 | 2.326 |
| Empirical constant used in stress correction for ... | H | --- | --- | 0.180 |
| Empirical exponent used in stress correction for ... | L | --- | --- | 0.150 |
| Empirical exponent used in stress correction for ... | M | --- | --- | 0.450 |
| Tooth form factors for gear and pinion | YP,YG | mm | 0.356 | 0.426 |
| --- | $\epsilon \eta 1$ | --- | --- | 66.679 |
| Load sharing ratio | ϵNJ | --- | --- | 0.936 |
| Inertia factor | Yi | --- | --- | 1.000 |
| Projected length of instantaneous line of contact | Δk | mm | --- | 56.322 |
| Toe increments of face width (effective) | $\Delta b1.2$ | mm | 36.210 | 36.210 |
| Toe increments of face width | $\Delta b1.2$ | mm | 36.210 | 36.210 |
| Heal increments of face width (effective) | $\Delta b_e1.2$ | mm | 17.111 | 17.111 |
| Heal increments of face width | $\Delta b_e1.2$ | mm | 17.111 | 17.111 |
| Effective face width | $b'1.2$ | mm | 74.900 | 72.747 |

図 2.56 幾何係数 (J: ピニオン凹)

動力とトルクの関係を計算する補助機能画面を図 2.57 に示します。

トルク、回転数入力基準

Pinion Gear

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------|----|-------------------|-----------|------------|
| 呼びトルク | T | N·m | 7958.1000 | 22282.6815 |
| 回転速度 | n | min ⁻¹ | 1200.0000 | 428.5714 |
| 定格伝達動力 | P | kW | --- | 1000.0000 |

確定 キャンセル 数値クリア

図 2.57 補助機能

2.21 歯車強度計算 (樹脂歯車)

樹脂歯車の曲げ強さは Lewis の式、歯面強さは Hertz の式で計算します。図 2.2 のプロパティで「樹脂」を選択します。ここでは、図 2.58 のすぐばかさ歯車についての強度計算例を図 2.59 および図 2.60 に示します。

樹脂材料の許容応力値は、温度、寿命を考慮した樹脂材料の実験値を使用しています。適応材料は、M90、KT20、GH25、ナイロンです。これ以外の材料は、M90 比率係数 (共通物性値との比) で計算することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-----------|------------|-----|----------------|---------------|
| かかさ歯車種類 | --- | --- | --- | すぐばかさ歯車 |
| 寸法分類 | --- | --- | --- | AGMA 208.03 |
| 歯たけ傾斜 | --- | --- | --- | --- |
| 外端正面モジュール | mt | mm | --- | 1.00000 |
| 歯数 | z | --- | 18 | 33 |
| 歯直角圧力角 | αn | deg | --- | 20.00000 |
| 中央ねじれ角 | βm | deg | 0 ° 0 ' 0.0 " | 0 ° 0 ' 0.0 " |
| ねじれ方向 | --- | --- | --- | --- |
| 軸角 | Σ | deg | 90 ° 0 ' 0.0 " | --- |
| 歯幅 | b | mm | --- | 5.6385 |
| 外端基準円直径 | d | mm | 18.0000 | 33.0000 |
| ピッチ円すい角 | δ | deg | 28.6105 | 61.3885 |
| 外端歯先R | ra | mm | 0.1000 | 0.1000 |
| カッタ刃先R | ro | mm | 0.1200 | 0.1200 |
| カッタ半径 | rc | mm | --- | 0.000 (0.000) |
| 歯たけ設定基準 | --- | --- | --- | 外端歯たけ基準 |
| 外端全歯たけ | ho | mm | --- | 2.2380 |
| 外端有効歯たけ | heo | mm | --- | 2.0000 |
| 外端歯末のたけ | hao | mm | 1.3231 | 0.6769 |
| 外端歯元のたけ | hfo | mm | 0.9149 | 1.5611 |
| 歯厚設定基準 | --- | --- | --- | 外端正面円弧歯厚基準 |
| 外端正面円弧歯厚 | St | mm | 1.8060 | 1.3356 |
| 円すい角設定基準 | --- | --- | --- | 外端基準 |
| 歯先円すい角 | δa | deg | 33.35865 | 64.17626 |
| 歯底円すい角 | δf | deg | 25.82374 | 56.64135 |

確定 キャンセル クリア

図 2.58 寸法諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------|-----|------|----------|----------------------------------|
| 材料記号 | --- | --- | M90-44 | M90-44 |
| M90倍率 | --- | × | M90 | M90-44 |
| トルク | T | N·cm | 10.000 | M90-44 KT-20 GH-25 ナイロン |
| 回転数 | n | rpm | 300.000 | --- |
| 寿命繰り返し回数 | L | --- | --- | 10000000.000 |
| 周速 | v | m/s | --- | 0.283 |
| 潤滑状態 | --- | --- | --- | グリス |
| 歯車周囲温度 | Te | °C | --- | 60.000 |
| 過負荷係数 | Ko | --- | --- | 1.000 |
| 歯元曲げ安全率 | SF | --- | --- | 1.200 |
| 歯面損傷安全率 | SH | --- | --- | 1.150 |
| 弾性係数 | E | MPa | 1721.067 | 1721.067 |

確定 キャンセル クリア

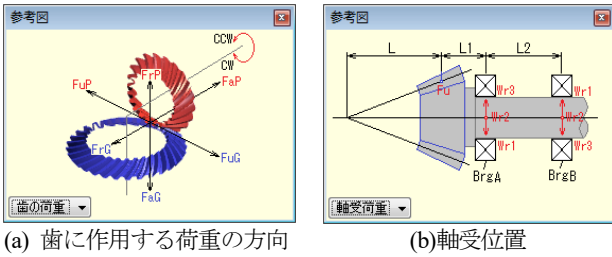
図 2.59 強度諸元 (樹脂歯車)

| 項目 (曲げ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|---------|------------------|-----|---------|---------|
| 許容曲げ応力 | σF_{lim} | MPa | 25.7780 | 26.6426 |
| 歯形係数 | YF | --- | 0.6193 | 0.6970 |
| 速度補正係数 | Kv | --- | --- | 1.3977 |
| 温度係数 | KT | --- | --- | 0.6500 |
| 潤滑係数 | KL | --- | --- | 1.0000 |
| 材質係数 | KM | --- | --- | 0.7500 |
| 呼び円周力 | Ft | N | --- | 13.0719 |
| 許容円周力 | Ftlim | N | 63.1407 | 74.1622 |
| 歯元曲げ応力 | σb | MPa | 5.3368 | 4.6960 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 4.8303 | 5.6734 |
| 項目 (面圧) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 許容面圧応力 | σH_{lim} | MPa | 54.7190 | 63.2217 |
| 呼び円周力 | Fc | N | --- | 13.0719 |
| 許容円周力 | Fclim | N | 29.6890 | 34.3023 |
| ヘルツ応力 | σH | MPa | 20.9500 | 20.9500 |
| 歯面強さ | Sfc | --- | 2.2712 | 2.6241 |

図 2.60 強度結果 (樹脂歯車)

2.22 軸受荷重

歯と軸受に作用する荷重の計算をします。図 2.61 に歯に作用する荷重の方向と軸受位置の参考図を示します。図 2.62 でトルクと軸受距離を入力することにより軸受荷重を表示します。



(a) 歯に作用する荷重の方向 (b) 軸受位置
図 2.61 参考図

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------------------|-----|-----|----------|----------|
| 回転方向 | --- | --- | CCW | CW |
| トルク | T | N·m | 25.000 | 68.750 |
| 軸受け支持方法 | --- | --- | 片持支持 | |
| 円すい頂点～歯幅中心 | L | mm | 41.382 | 15.268 |
| 軸受距離 1 | L1 | mm | 50.0000 | 50.0000 |
| 軸受距離 2 | L2 | mm | 100.0000 | 100.0000 |
| 歯に加わる力 | | | | |
| 軸方向推力 | Fa | N | 1326.301 | 291.960 |
| 接線荷重 | Fu | N | 1637.620 | 1637.620 |
| 半径方向荷重 | Fr | N | 291.960 | 1326.301 |
| 軸受 A に加わる半径方向荷重 | | | | |
| 半径方向荷重(合力) | Wr | N | 2467.690 | 3085.336 |
| Faによる半径方向荷重 | Wr1 | N | 437.940 | 1989.452 |
| Fuによる半径方向荷重 | Wr2 | N | 2456.430 | 2456.430 |
| Frによる半径方向荷重 | Wr3 | N | 202.474 | 122.570 |
| 軸受 B に加わる半径方向荷重 | | | | |
| 半径方向荷重(合力) | Wr | N | 820.757 | 981.161 |
| Faによる半径方向荷重 | Wr1 | N | 146.980 | 663.151 |
| Fuによる半径方向荷重 | Wr2 | N | 818.810 | 818.810 |
| Frによる半径方向荷重 | Wr3 | N | 202.474 | 122.570 |

図 2.62 軸受荷重

2.23 歯面評価 (オプション)

強度計算終了後、図 2.63 の歯面評価グラフ設定画面で歯形修整の有無、駆動歯車の種類、計算ポイント数を入力するとすべり率グラフ (図 2.64) とヘルツ応力グラフ (図 2.65) を表示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------------|--------|--------------------|------------|-------|
| 歯車の温度 | GTC | °C | 70.000 | |
| 油の温度 | Tc | °C | 40.000 | |
| 油の種類 | --- | --- | 鉱物油 | |
| ISOグレード | --- | --- | ISO VG 320 | |
| 動粘度 (40°C) | --- | mm ² /s | 320 | |
| 平均温度 | Mtc | °C | 252.000 | |
| 標準偏差温度 | SD | °C | 41.000 | |
| 絶対粘度 | μ0 | cP | 53.48 | |
| 粘度圧 | α | mm ² /N | 0.02156 | |
| なじみ歯面粗さ (Ra) | σ1, σ2 | μm | 0.400 | 0.400 |
| 摩擦係数の方式 | --- | --- | 一定値 | |
| 摩擦係数 | μm | --- | 0.0600 | |
| 歯形修整 | --- | --- | 有り | |
| 駆動歯車 | --- | --- | Pinion | |
| 計算ポイント数 | --- | --- | 100 | |

図 2.63 歯面評価グラフ

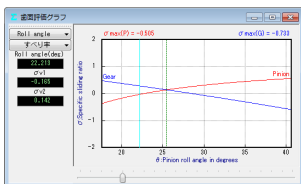


図 2.64 すべり率

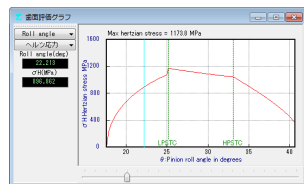


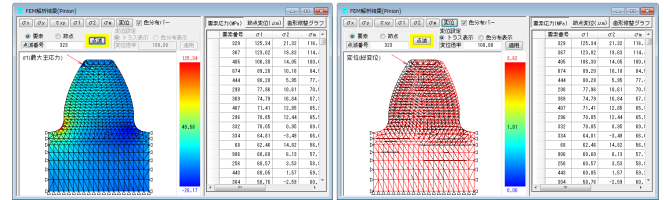
図 2.65 ヘルツ応力

2.24 FEM 歯形応力解析 (オプション)

図 2.66 に示す FEM 解析の設定画面で縦弾性係数, ポアソン比, 分割数および荷重位置として荷重を入力することにより 5 種類の応力 (σ_x, σ_y , せん断応力 τ , 主応力 σ_1, σ_2) を計算します。歯車強度計算と共に歯に作用する実応力を評価する事ができますので歯車強度の信頼性を高めることができます。図 2.67 に最大主応力 σ_1 と変位図を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|-----|-----|-----------|----------|
| 計算位置 | --- | --- | 中央 | 中央 |
| 材料記号 | --- | --- | SCM420 | SCM420 |
| 縦弾性係数 | E | MPa | 206000.0 | 206000.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.30 | 0.30 |
| 歯分番数 (歯面数) | mNO | --- | 21 | 21 |
| 模分番数 | wNO | --- | 21 | 21 |
| 荷重点位置 | Nf | --- | 2 | 2 |
| 荷重 | F | N | 1637.6201 | |

図 2.66 FEM 解析の設定



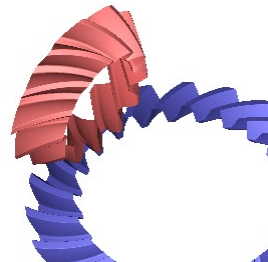
(a) ピニオン, σ_1 (b) ピニオン, 変位

図 2.67 FEM 解析結果

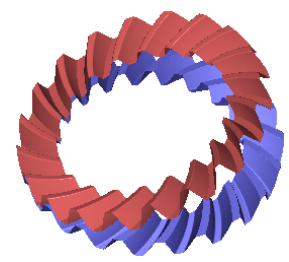
2.25 歯車作図例

まがりばかき歯車の歯すじを等リードで出力した歯形を図 2.68 に、軸角が 160° の例を図 2.69 に示します。デファレンシャルベベルギヤのように歯数が少ない歯車であっても球面インボリュート歯形であるため正しい歯当たりを示します。

歯形データを使用して、ボールエンドミルで機械加工した例を図 2.71 に示します。また、図 2.72 に光造形モデルの写真を示します。



$m2, z_1=12, z_2=23, \beta=35^\circ, \Sigma=90^\circ$



$m2, z_1=z_2=20, \beta=35^\circ, \Sigma=160^\circ$

図 2.68 等リードスパイラル

図 2.69 軸角 160°スパイラル



図 2.71 歯車加工例



$m1 \geq 28, \alpha 20^\circ, \beta 35^\circ$
図 2.72 光造形モデル

2.26 大歯車平面歯形 (オプション)

5 軸加工機歯車を加工する場合、曲面よりも平面の方が、加工効率が良くなるため大歯車の歯面を平面とし、これに共役面を持つ小歯車の歯面を生成することができます。

図 2.3 の歯車で、大歯車の歯すじを図 2.73 のように「スキュー

「ギヤ直線歯」として選択することで大歯車の歯面を平面とすることができます。

歯形を確認すると大歯車の歯形は図2.74のように直線であり歯すじは図2.75のように直線となっていることが分かります。

| 歯形項目 | 記号 | Pinion | Gear |
|------------|-----|-------------|------|
| フィレット分割数 | vuf | 30 | 30 |
| インボリュート分割数 | vui | 50 | 50 |
| 歯先R分割数 | zur | 15 | 15 |
| 歯先円分割数 | vut | 10 | 10 |
| 歯すじ分割数 | hul | 18 | 18 |
| 歯すじ曲線の種類 | --- | スクュー(ギヤ直線歯) | |

図 2.73 歯形計算諸元

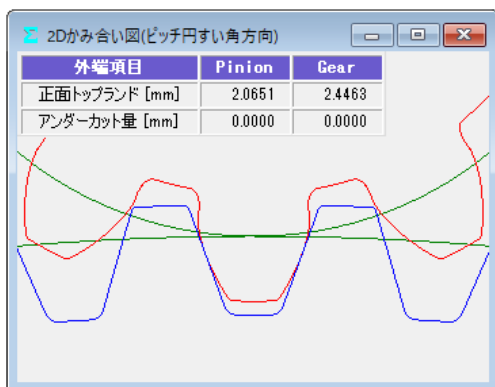


図 2.74 歯形 (外端)

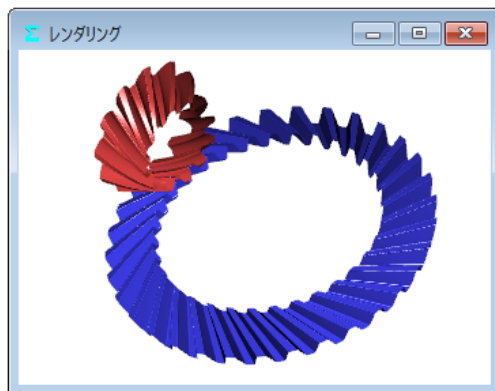


図 2.75 レンダリング

歯面修整は、図2.24と同様に施すことができますが、ここでは、小歯車に単純な歯すじ修整のみ施した例を示します。

小歯車に歯すじ修整を施すことで図277のレンダリングおよび図2.78の歯当たり解析のように歯幅中央部での接触を確認することができます。

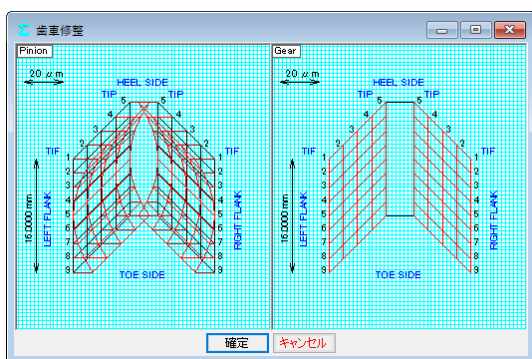


図 2.76 歯すじ修整 (小歯車)

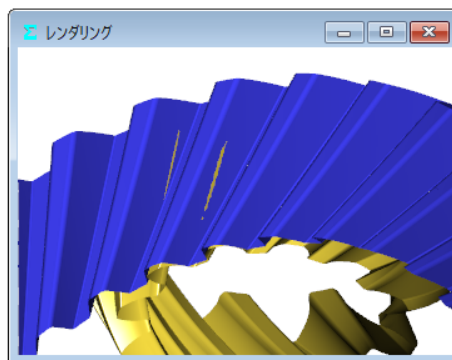
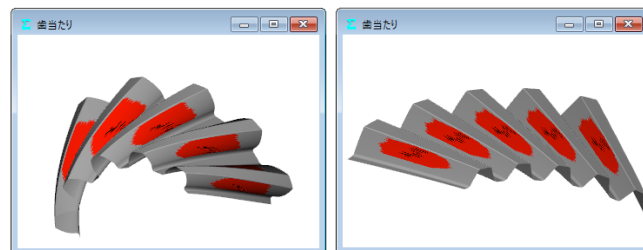


図 2.77 レンダリング (小歯車歯すじ修整)



(a)小歯車 (b)大歯車

図 2.78 歯当たり

伝達誤差も図2.79のようにTE=0.054μmのため球面インボリュート歯形と変わりません。

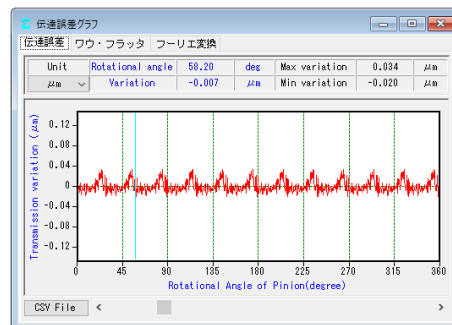
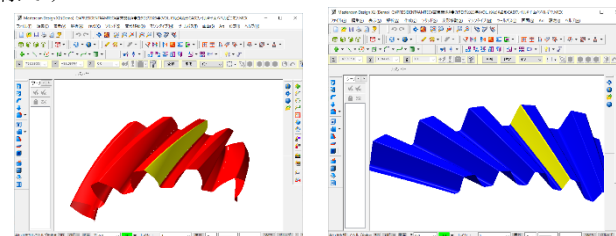


図 2.79 伝達誤差, TE=0.054μm

歯形出力は図2.29と同様で大歯車を平面としたときのCAD作図例を図2.80に示します。

また、測定データも図2.39測定データの設定(Carl Zeiss)と同様です。



(a)小歯車 (b)大歯車

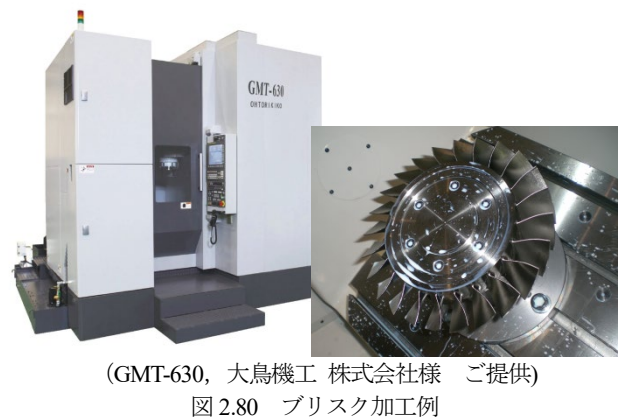
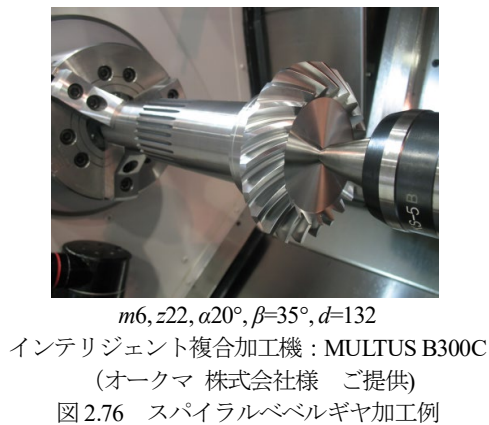
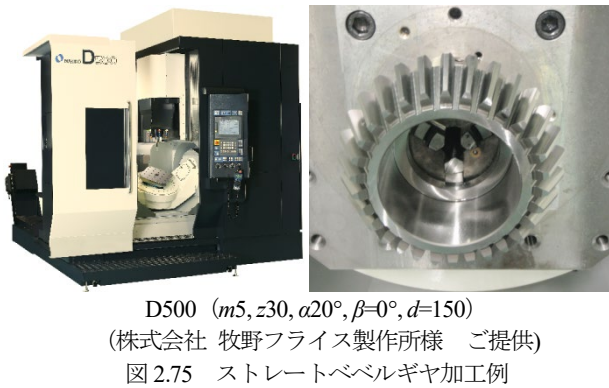
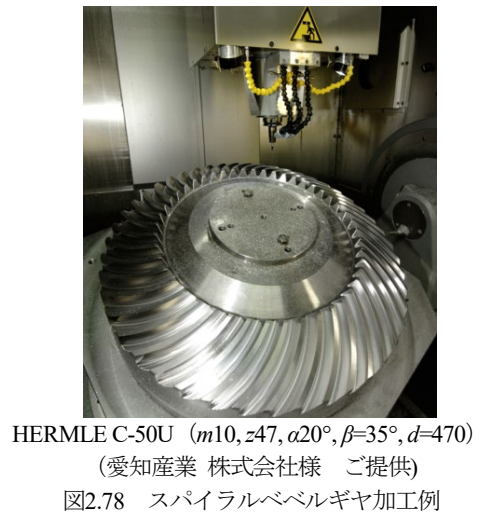
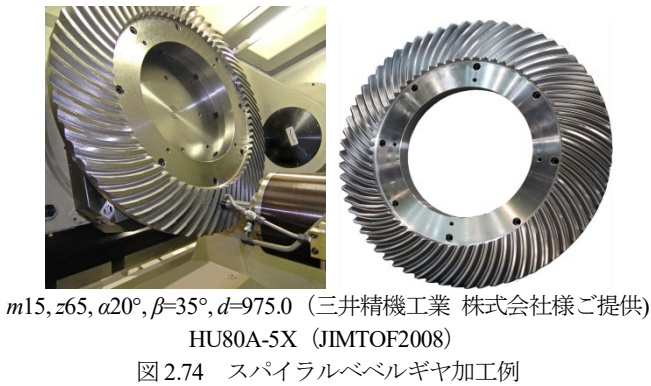
図 2.80 CAD作図例

2.27 特殊かさ歯車

ソフトウェアの標準機能ではありませんが、図2.73のようなダブルスパイラルベベルギヤの歯形も生成することができます。この歯形に関しては別途お問い合わせください。



2.27 マシニングセンタによるベベルギヤの加工例



[3] involute Σ iii (worm gear design system)

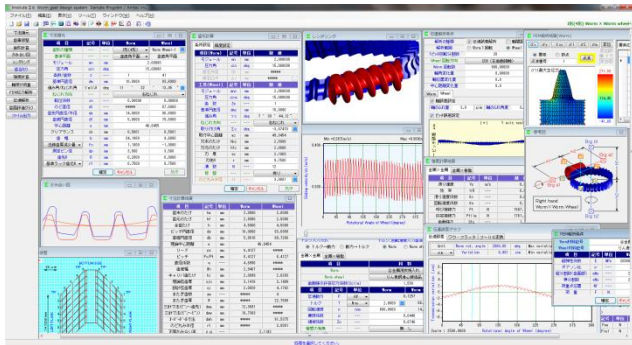


図 3.1 involute Σ iii (worm gear)

3.1 概要

本ソフトウェアは、今まで、別々にしていた involute Σ (worm gear)と involute Σ (worm and helical gear)を一体として新しく開発したソフトウェアです。また、今までオプション扱いしていた機能も一部、基本ソフトウェアに含めると共に種々新しい機能も追加しています。

3.2 ソフトウェアの構成

ソフトウェアの構成を表 3.1 に示します。表中の○は基本ソフトウェアに含まれ◎はオプションです。

involute Σ iii (worm gear)は、ウォームの相手歯車はウォームホイールですが、相手歯車をヘリカルギヤにすることもできます。相手歯車がヘリカルギヤの場合の説明は 3.16 以降をご覧ください。ご注文時は、価格表から必要なソフトウェアをお選びください。

表 3.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | | 構成 |
|-----|-------------|------|-------|----|
| | | WG | WH | |
| 1 | 基準ラック | 3.3 | 3.16 | ○ |
| 2 | 寸法諸元 | 3.4 | 3.17 | ○ |
| 3 | 歯車修整 | 3.5 | 3.18 | ◎ |
| 4 | 歯形計算 | 3.6 | 3.19 | ○ |
| 5 | かみ合い図 | 3.7 | 3.20 | ○ |
| 6 | 歯形レンダリング | 3.8 | 3.21 | ○ |
| 7 | 歯当たり | 3.9 | 3.22 | ◎ |
| 8 | 強度計算(金属×金属) | 3.10 | ----- | ○ |
| 9 | 強度計算(金属×樹脂) | 3.10 | 3.23 | ○ |
| 10 | 軸受荷重 | 3.11 | 3.24 | ○ |
| 11 | FEM 歯形応力解析 | 3.12 | 3.25 | ◎ |
| 12 | 伝達誤差解析 | 3.13 | 3.26 | ◎ |
| 13 | 軸間距離変動解析 | 3.13 | 3.26 | ◎ |
| 14 | 歯面評価 | 3.14 | 3.27 | ◎ |
| 15 | 歯形ファイル出力 | 3.15 | 3.28 | ○ |
| 16 | 設計データ管理 | 3.29 | | ○ |

WG : worm gear, WH : worm and helical gear

3.3 基準ラック (プロパティ)

ウォームギヤの基準ラックを図 3.2 に示します。基準平面は、歯直角または軸平面を選択することができます。また、図 3.2 のように基準ラックの実寸法図を表示することができ、ウォームの基準円直径から進み角を決める方式と、進み角から基準円直径を決める方式を選択することができます。

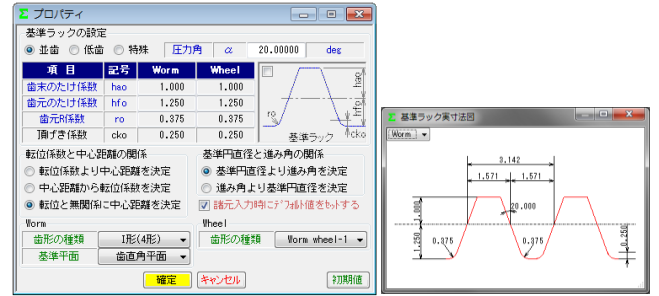


図 3.2 基準ラック (ウォームギヤ)

3.4 寸法諸元

ウォームギヤ寸法諸元の入力画面を図 3.3 に示します。ウォームの歯形は図 3.4(a)に示すように A 形, N 形, K 形, I 形, C 形の 5 種類を標準ソフトウェアに含めています。ただし, C 形は強度計算規格の適用外ですので寸法や歯形生成に留めています。また, 諸元の入力範囲は, モジュールは 0.001~50, 圧力角は 5~30°, 条数は 1~15 です。歯厚を調整する方法は, 図 3.4(c)のように歯厚減少量または横転位係数で設定することができます。本例ではウォームの歯厚を減少させウォームホイールの歯厚を増加させる例を示します。



図 3.3 寸法諸元入力



図 3.4 補助フォーム

3.5 歯車修整 (オプション)

図 3.5 のようにウォームの歯形修整を設定します。ここでは, 図 3.6 ウォーム歯形修整 2 のように歯先および歯元で 3 μ m の歯形修整を与えたウォームとします。

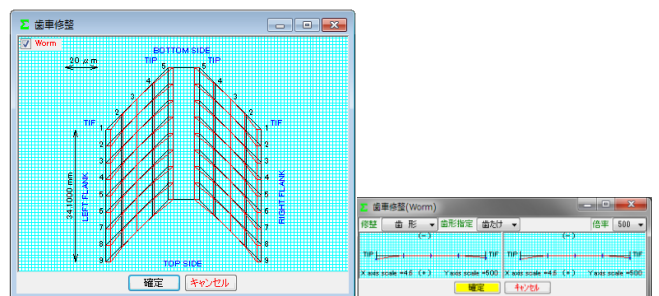


図 3.5 ウォーム歯形修整 1

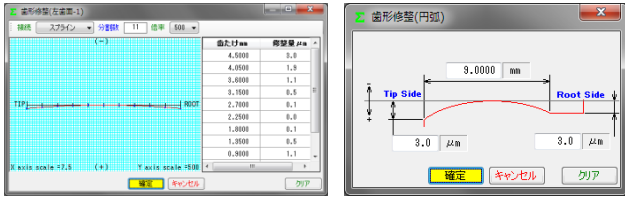


図 3.6 ウォーム歯形修整 2

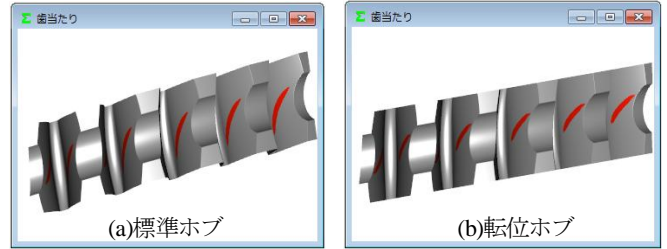


図 3.10 歯当たり (無修整歯形)

3.6 歯形計算

歯形計算条件は図 3.7(a)のようにホイール加工用工具 (ホブ) の諸元を設定することができます。また、歯形を表示する際の分割数は図 3.7(b)で設定することができます。

ホイール加工用工具に歯形修整を与える場合は、図 3.7 で「修整有り」として図 3.8 のように設定することができます。



(a)条件設定

(b)精度設定

図 3.7 歯形計算設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|---------------|-------------------|-----|---------|---------|
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.0000 | 2.0000 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 2.5000 | 2.5000 |
| 全歯たけ | h | mm | 4.5000 | 4.5000 |
| ピッチ円直径 | dw | mm | 10.0000 | 83.6909 |
| 基準円直径 | db | mm | 5.9816 | 80.7266 |
| 理論中心距離 | a | mm | 48.8454 | |
| リード | pz | mm | 6.4127 | ***** |
| ピッチ | Px/Pt | mm | 6.4127 | 6.4127 |
| 直径係数 | q | --- | 4.8930 | ***** |
| 歯度幅 | Wn | mm | 2.9407 | ***** |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 2.0099 | 2.0283 |
| 理論弦歯厚 | sjo | mm | 3.1416 | 3.1409 |
| 設計弦歯厚 | sj | mm | 2.0028 | 4.1762 |
| またぎ歯数 | zm | --- | ***** | 4 |
| またぎ歯厚 | W | mm | ***** | 22.7588 |
| 三針寸法(〃)~歯先 | dma | mm | 12.3691 | ***** |
| 三針寸法(〃)~歯根 | dmm | mm | 10.7393 | ***** |
| オボ-キール寸法 | dnh | mm | ***** | 91.5375 |
| のど丸み半径 | rt | mm | ***** | 3.0001 |
| 正面かみ合い率 | $\epsilon \alpha$ | --- | 2.1193 | |
| 軸/円周方向バックラッシュ | B.Lx | mm | 0.1064 | 0.1026 |

図 3.11 寸法結果

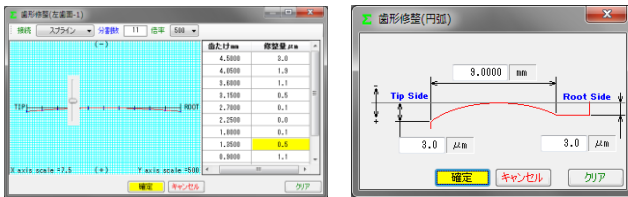


図 3.8 歯形修整

ホイール加工用ホブを図 3.9 のように転位ホブ (例: $\alpha=12^\circ$) として設定することもできます ($\alpha=12^\circ$ とすることにより $m_n=1.975$ と定まる)。この方法は、歯当たり調整方式の一種として採用されています。

図 3.10 に標準ホブと転位ホブで加工したときの歯当たりを示しますが、転位ホブで加工した方の歯当たりが歯たけ中央に寄っていることが解ります。歯当たりに関しては 3.9 をご覧ください。



図 3.9 転位ホブの設定

3.7 かみ合い図

歯形計算終了後、図 3.12 のように歯形を表示することができ、図 3.13 のように歯形の拡大作図や距離計測、R 計測、そして回転機能などがあります。

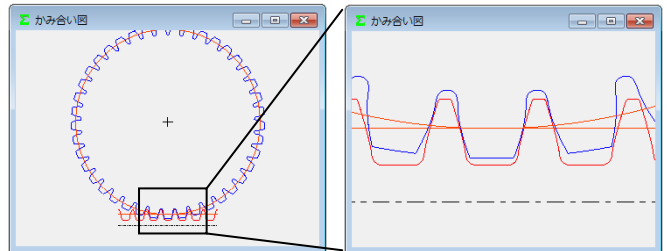


図 3.12 かみ合い図

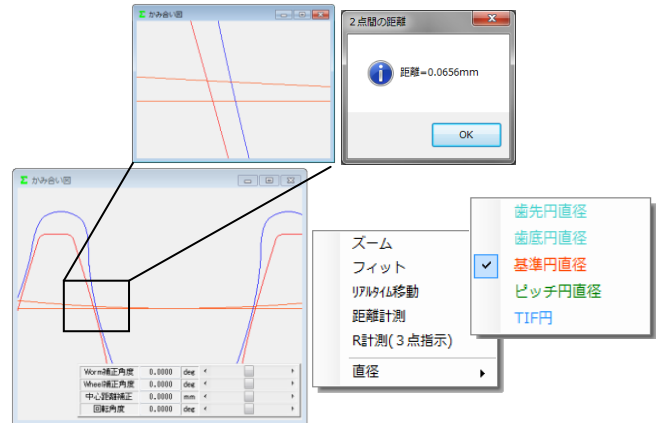


図 3.13 歯のかみ合いと補助フォーム

3.8 歯形レンダリング

歯形計算終了後、図 3.14 のように歯形レンダリングを表示することができます。図 3.13 では歯面が接触していませんが、これはピッチ円部分では歯面接触せず、図 3.15 のようにホイールの歯底と側面部付近で歯面接触しているからです。

図 3.15 の補助フォームは、観察角度や歯車の位置変更、拡大機能、そして自動回転機能などがあります。

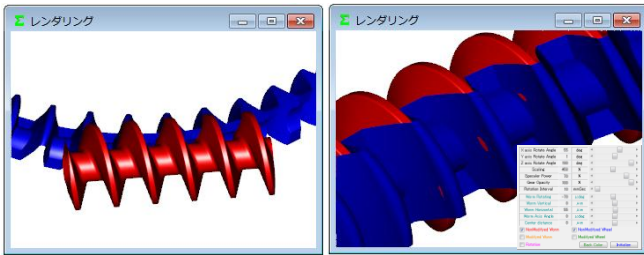


図 3.14 レンダリング

図 3.15 歯の接触

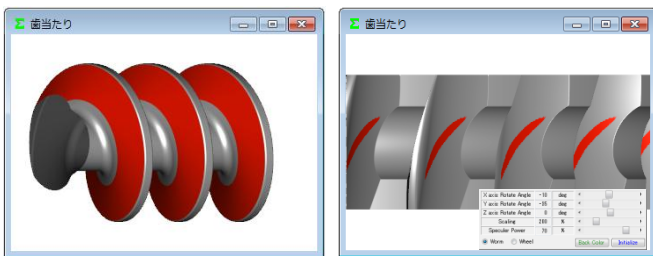
3.9 歯当たり (オプション)

図 3.16 の歯当たり設定では、軸の取り付け誤差や接触最大クリアランス (光明丹厚さ) を設定することができます。本例では、接触最大クリアランスを $c=3\mu\text{m}$ としたときの歯当たりを図 3.17 に示します。ウォームの歯形の種類や歯形修整、そしてホイールを転位ホブで加工したときや、取り付け誤差を与えたとき歯当たりがどのように変化するかを把握することができます。

また、図 3.17(b) 右下の補助フォームで歯形を拡大することや観察角度を変更することができます。図 3.18 は、進み角を $\gamma=5.74^\circ$ としたときの歯当たりで歯当たり模様が大きく変わることが解ります。



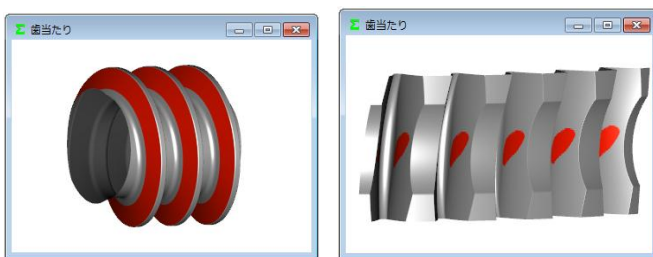
図 3.16 歯当たり設定



(a) ウォーム

(b) ホイール

図 3.17 歯当たり 1 ($m_n=2, \alpha=15^\circ, \gamma=11.54^\circ, I$ 形)



(a) ウォーム

(b) ホイール

図 3.18 歯当たり 2 ($m_n=2, \alpha=15^\circ, \gamma=5.74^\circ, I$ 形)

3.10 強度計算

3.10.1 金属×金属

強度諸元を図 3.19 に、強度計算結果を図 3.20 に示します。強度計算は JGMA405-01:1978 に基づいて計算します。動力は kW と W, トルクは MN·m, kN·m, N·m, N·cm を選択することができます。また、歯面強さ許容応力係数 (Sclim) は、任意に設定することができます。

各種係数は標準値を表示しますが、任意に変更可能ですし、規格適用外の歯車であっても設計者の判断で任意に入力することができます。



図 3.19 強度諸元 (金属×金属)



図 3.20 強度結果

3.10.2 金属×樹脂

ウォームが金属でホイールが樹脂の強度諸元を図 3.21 に、強度計算結果を図 3.22 に示します。強度計算は、Lewis の式に基づき歯面強さはヘルツの応力に基づいて計算します。

樹脂材料は M90-44 を標準としています。他の材料 (KT-20, GH-25, MC ナイロン) を選択することができます。また、これ以外の材料では M90 比率係数 (共通物性値との比) で対処することができます。



図 3.21 強度諸元 (金属×樹脂)

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------------------------|-----------------|-----------------|---------|
| 周速 | ω | m/s | 0.131 |
| 効率 | η | --- | 0.727 |
| 接線力 | F_t | N | 95.590 |
| 有効歯幅 | b_w | mm | 9.600 |
| 曲げ強さ (Worm wheel) | | | |
| 材料係数 | KM | --- | 1.000 |
| 歯形係数 | YF | --- | 0.903 |
| 速度補正係数 | Kv | --- | 1.399 |
| 温度係数 | KT | --- | 0.850 |
| 潤滑係数 | KL | --- | 1.000 |
| 許容曲げ応力 | σ_{blim} | MPa | 10.843 |
| 最大許容曲げ応力 | σ_{lim} | MPa | 9.860 |
| 許容接線力 | F_a | N | 308.039 |
| 曲げ強さ | Sfb | --- | 3.222 |
| せん断強さ (Worm wheel) | | | |
| 円弧歯厚 | So | mm | 4.573 |
| 断面積 | A | mm ² | 102.526 |
| 許容せん断応力 | σ_{slim} | MPa | 5.375 |
| 許容接線力 | F_s | N | 510.471 |
| せん断強さ | Sfs | --- | 5.340 |

図 3.22 強度結果 (金属×樹脂)

3.11 軸受荷重

軸受荷重の計算結果を図 3.23 に示します。

| 諸元項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|----------------------------------|-----------|---------|----------|----------|
| Worm トルク | T | N·m | 2.0000 | 66.4162 |
| 摩擦係数 | μ | --- | 0.044 | |
| 軸受け幅距離 w1, h1 | mm | 50.0000 | 50.0000 | |
| 軸受け幅距離 w2, h2 | mm | 50.0000 | 50.0000 | |
| Worm 回転方向 | --- | --- | 正 転 | |
| <Worm, Wheel に加わる力> | | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
| 円周方向に加わる力 | F_t | N | 400.000 | 1587.178 |
| 軸方向に加わる力 | F_a | N | 1587.178 | 400.000 |
| 半径方向に加わる力 | F_r | N | 438.126 | 438.126 |
| <Worm 側 軸受けに加わる力> | | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Brg a1 | Brg a2 |
| スラスト荷重 | F_{sa} | N | 1587.178 | |
| Fr のラジアル荷重分力 | F_{ra1} | N | 200.809 | 200.000 |
| Fr のラジアル荷重分力 | F_{ra2} | N | 219.063 | 219.063 |
| Fa のラジアル荷重分力 | F_{ra3} | N | -79.359 | 79.359 |
| ラジアル荷重合力 | F_{ra} | N | 249.362 | 358.243 |
| <Wheel 側 軸受けに加わる力> | | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Brg b1 | Brg b2 |
| スラスト荷重 | F_{sb} | N | 400.000 | |
| Fr のラジアル荷重分力 | F_{rb1} | N | 219.063 | 219.063 |
| Ft のラジアル荷重分力 | F_{rb2} | N | 793.589 | 793.589 |
| Fr のラジアル荷重分力 | F_{rb3} | N | -167.382 | 167.382 |
| ラジアル荷重合力 | F_{rb} | N | 795.270 | 892.880 |

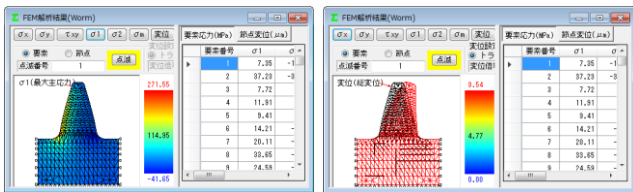
図 3.23 軸受荷重

3.12 2D-FEM 歯形応力解析 (オプション)

図 3.24 の FEM の設定画面では縦弾性係数, ポアソン比, 分割数および荷重 (例では円周力を ε で除した値) を設定します。図 3.25 および図 3.26 にウォームとホイールの解析結果を示します。また, 最大値の節点や要素を点滅表示で示すこともできます。

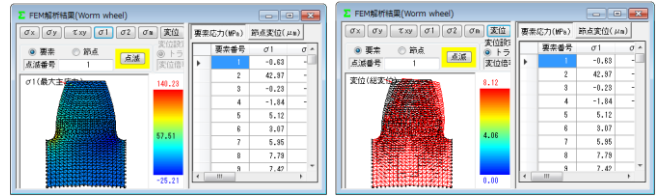
| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|------------|-------|-----|----------|----------|
| 縦弾性係数 | E | MPa | 205800.0 | 80000.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.30 | 0.30 |
| 縦分割数 (歯面部) | mNo | --- | 21 | 21 |
| 横分割数 | wNo | --- | 20 | 20 |
| 荷重点位置 | Nf | --- | 2 | 2 |
| 荷重 | F | N | | 750.0000 |

図 3.24 FEM 解析の設定



(a)最大主応力 (σ_1) (b)変位

図 3.25 ウォーム



(a)最大主応力 (σ_1) (b)変位

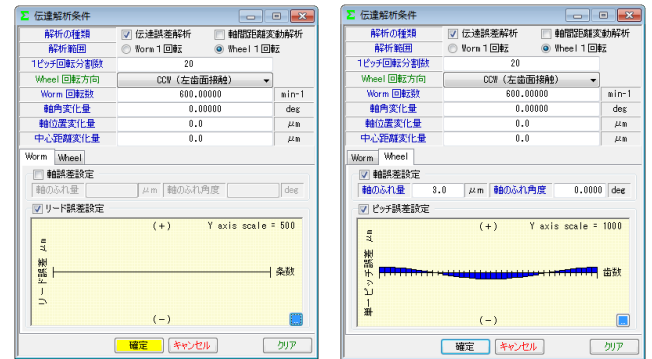
図 3.26 ホイール

3.13 伝達解析 (オプション)

3.13.1 伝達誤差解析 (オプション)

伝達誤差解析は図 3.27 に示すように, 片歯面かみ合いによる伝達誤差解析と, 両歯面かみ合いによる軸間距離変動解析ができ, ウォーム 1 回転時とホイール 1 回転時を選択することができます。例題では, ウォーム回転速度 600min^{-1} でホイール 1 回転とし, 軸の取り付け誤差は無いものとして解析します。

ピッチ誤差は, 図 3.28 のように設定 (最大値設定または, 歯ごとに設定可) することができます。伝達誤差解析結果を図 3.29 に, ワウ・フラッタ (回転むら) を図 3.30 に, フーリエ解析結果を図 3.31 に示します。また, ワウ・フラッタを「音」に変換させる機能もありますし, 解析結果を CSV ファイルに出力することもできます。



(a)ウォーム (リード誤差)

(b)ホイール (ピッチ誤差)

図 3.27 ピッチ誤差設定

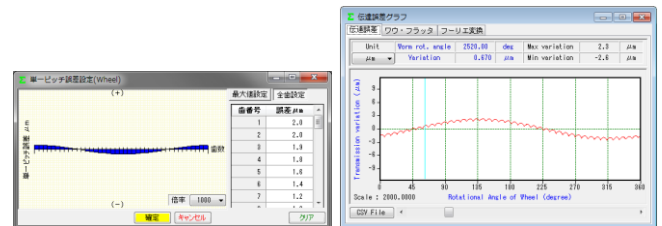


図 3.28 ピッチ誤差 (ホイール)

図 3.29 伝達誤差結果

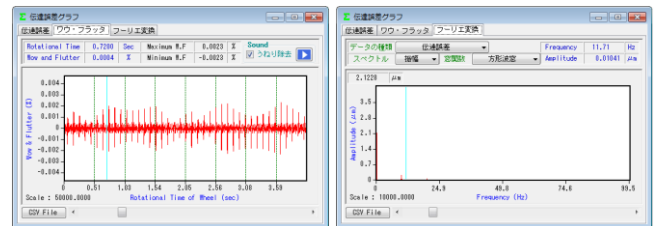


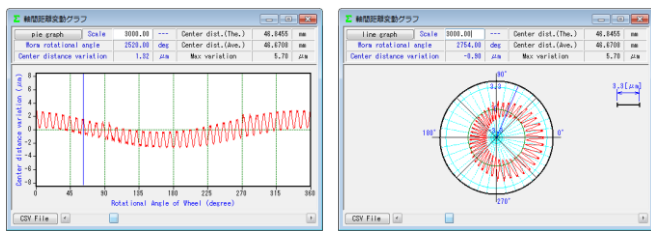
図 3.30 ワウ・フラッタ

図 3.31 フーリエ解析

3.13.2 軸間距離変動解析 (オプション)

多くのウォームギヤは片歯面接合として使用しますが, 装置によっては両歯面を接触させかみ合わせる場合があります。軸間距離変動解析は, 図 3.27 で設定したピッチ誤差や取り付け誤差などを考慮して中心距離の変動を解析します。図 3.32 に解析結果を示

します。また、解析結果を CSV ファイルに出力することができます。



(a)グラフ 1 (b)グラフ 2

図 3.32 軸間距離変動解析

3.14 歯面評価 (オプション)

歯面評価には、すべり速度グラフ (図 3.33) とヘルツ応力グラフ (図 3.34) があります。すべり速度は、歯の接触位置における速度を計算し、ヘルツ応力も歯の接触位置における歯形 (歯の変形は考慮していません) から計算しています。いずれも強度計算および伝達誤差解析後に有効です。

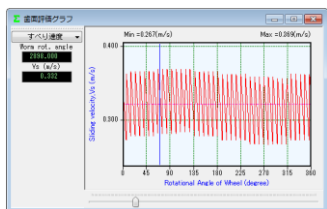


図 3.33 すべり速度グラフ

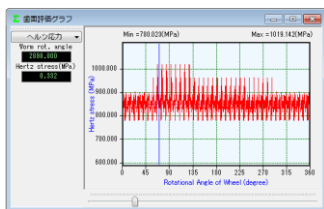


図 3.34 ヘルツ応力

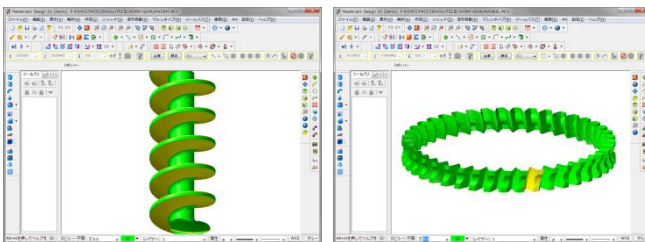
3.15 歯形ファイル出力

歯形ファイルは図 3.35 のようにウォーム、ホイールそして工具 (ホブ) の歯形 (任意歯数出力可) を生成します。ファイルの種類は DXF-2D, DXF-3D, IGES-3D の 3 種類です。CAD 作図例を図 3.36 に示します。



(a)出力歯形 (b)3D-IGES の例

図 3.35 歯形ファイル出力



(a)ウォーム (b)ホイール (全歯数出力の例)

図 3.36 CAD 作図例

◆ウォームの相手歯車がヘリカルギヤの場合◆

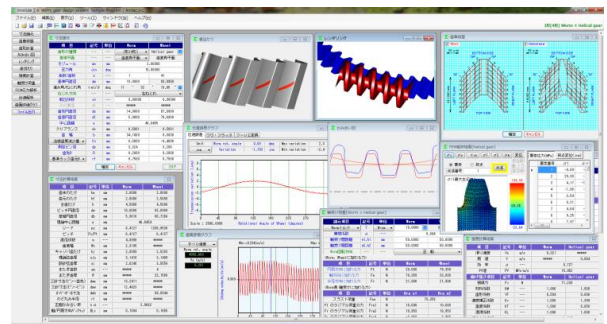


図 3.37 ウォームの相手歯車がヘリカルギヤの場合

3.16 基準ラック

ウォームギヤの基準ラックを図 3.38 に示します。基準平面は、歯直角または軸平面を選択することができます。

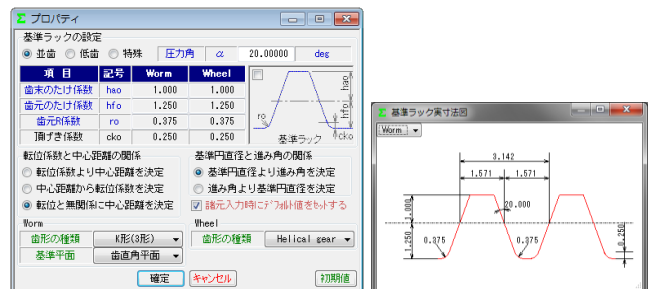


図 3.38 基準ラック (ウォーム&ヘリカルギヤ)

3.17 寸法諸元

ウォーム&ヘリカルギヤ寸法諸元の入力画面を図 3.39 に示します。ウォームの歯形は図 3.40(a)に示すように A 形, N 形, K 形, I 形, C 形の 5 種類を標準ソフトウェアに含めています。ただし, C 形は強度計算規格の適用外ですので寸法や歯形生成に留めています。また, 諸元の入力範囲は, モジュールは 0.001~50, 圧力角は 5~30°, 条数は 1~15 です。歯厚を調整する方法は, 図 3.40(c)のように歯厚減少量または横転位係数で設定することができます。本例ではウォームの歯厚を減少させヘリカルギヤの歯厚を増加させる例を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|----------|---------------------|-----|----------|--------------|
| 歯形の種類 | | | I形(4形) | Helical gear |
| 基準平面 | | | 歯直角平面 | 歯直角平面 |
| モジュール | m | mm | 2.00000 | |
| 圧力角 | α_n | deg | 15.00000 | |
| 条数/歯数 | z | | 1 | 41 |
| 基準円直径 | d | mm | 10.0000 | 83.8908 |
| 進み角/ねじれ角 | γ_{m1}/β | deg | 11 | 32 |
| ねじれ方向 | | | 右ねじれ | |
| 転位係数 | xn | | 0.00000 | 0.00000 |
| のど直径 | dt | mm | ***** | |
| 歯先円直径 | da | mm | 14.0000 | 87.8908 |
| 歯底円直径 | df | mm | 5.0000 | 78.8908 |
| 中心距離 | a | mm | | 48.9455 |
| クリアランス | ck | mm | 0.5001 | 0.5001 |
| 歯幅 | b | mm | 34.1000 | 9.8000 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.5000 | -0.4000 |
| 測定ピッチ | dp | mm | 3.324 | 3.286 |
| 歯先R | R | mm | 0.2000 | 0.2000 |
| 基準ラック歯元R | r | mm | 0.7500 | 0.7500 |

図 3.39 寸法諸元入力



(a)歯形の種類 (b)ヘリカルギヤ (c)歯厚減少量

図 3.40 補助フォーム

3.18 歯車修整 (オプション)

図 3.41 のようにウォームに歯形修整を、ヘリカルギヤに歯面修整を与えることができます。図 3.42 および図 3.43 にウォームの歯形設定とヘリカルギヤの歯面修整の例を示します。

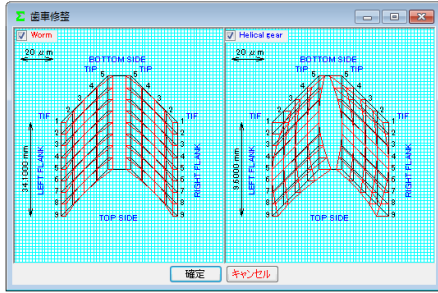


図 3.41 歯形修整 (ウォームとヘリカルギヤ)

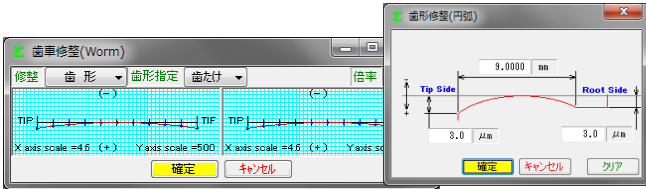


図 3.42 ウォーム歯形修整

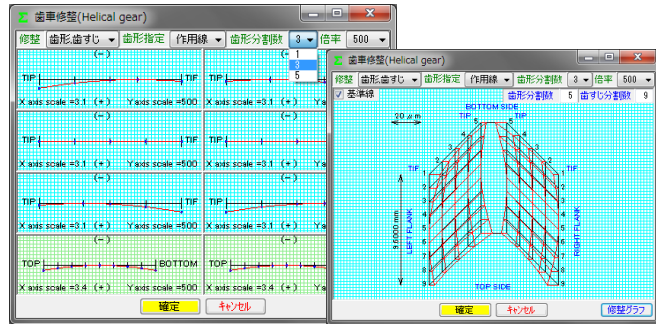


図 3.43 ヘリカルギヤ歯形・歯すじ修整とトポグラフ

3.19 歯形計算

歯形計算条件は図 3.44 (a) のようにヘリカルギヤ加工用工具 (ホブ) の諸元を設定することができます。また、歯形を表示する際の分割数は図 3.44 (b) で設定することができます。歯形計算終了後、図 3.45 に寸法結果を表示します。なお、ウォームの三針寸法およびバックラッシュは歯形修整を考慮した実歯形を基に計算しています。ヘリカルギヤは図 3.44 の工具に基づいて生成した歯形です。

| 条件設定 | | 精度設定 | |
|------------|------------|------|-------------------------|
| 項目 (Worm) | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.000000 |
| 圧力角 | α_n | deg | 15.000000 |
| 歯石外径 | OD | mm | ***** |
| 歯石凸R | Δr | mm | ***** |
| 工具 (Wheel) | | | |
| 項目 (Wheel) | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.000000 |
| 圧力角 | α_n | deg | 15.000000 |
| 変位 | Zv | --- | 1 |
| 基準円直径 | dnc | mm | 15.00000 |
| 進み | γ | deg | $7^{\circ} 39' 44.12''$ |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 取り付け角 | Σc | deg | -3.87470 |
| 取付中心距離 | hc | mm | 49.8454 |
| 刃先のたけ | hkc | mm | 2.5000 |
| 刃厚 | sc | mm | 2.7275 |
| 刃先R | r | mm | 0.7500 |
| 溝数 | N | --- | 12 |
| 修整 | --- | --- | 無し |

(a)条件設定

| 条件設定 | | 精度設定 | |
|---------------|----|------|-----|
| 項目 (Worm) | 記号 | 単位 | 数値 |
| 歯面円分割数 | | | 30 |
| 歯元分割数 | | | 50 |
| 歯面分割数 | | | 100 |
| 歯先分割数 | | | 50 |
| 歯先円分割数 | | | 30 |
| 歯幅面分割数 | | | 50 |
| Wheel表示分割精度項目 | | | |
| フィレット分割数 | | | 50 |
| インテリド分割数 | | | 100 |
| 面取り部分分割数 | | | 30 |
| 歯先円分割数 | | | 30 |
| 歯幅面分割数 | | | 50 |
| 溝深精度項目 | | | |
| 歯石歯形深さ精度 | | | 300 |

(b)精度設定

図 3.44 歯形計算設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|---------------|--------------|-----|---------|-----------|
| 歯元のたけ | ha | mm | 2.0000 | 2.0000 |
| 歯先のたけ | hf | mm | 2.5000 | 2.5000 |
| 全歯たけ | h | mm | 4.5000 | 4.5000 |
| ピッチ円直径 | dw | mm | 10.0000 | 83.6308 |
| 基準円直径 | db | mm | 5.3816 | 80.7268 |
| 理論中心距離 | a | mm | | 48.8454 |
| リード | pz | mm | 6.4127 | 1288.0530 |
| ピッチ | Px/PT | --- | 6.4127 | 6.4127 |
| 直径係数 | q | --- | 4.0390 | ***** |
| 歯幅 | Wn | mm | 2.9195 | ***** |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 2.0039 | 2.0283 |
| 理論弦歯厚 | sj0 | mm | 3.1416 | 3.1409 |
| 設計弦歯厚 | sj | mm | 2.8240 | 3.5550 |
| またぎ歯数 | zm | --- | ***** | 4 |
| またぎ歯厚 | W | mm | ***** | 22.1588 |
| 三針寸法(ピッチ-歯先) | dna | mm | 13.2411 | ***** |
| 三針寸法(ピッチ-歯元) | dhw | mm | 12.4823 | ***** |
| オガ-オガ寸法 | dsh | mm | ***** | 89.0344 |
| のど丸み半径 | rt | mm | ***** | ***** |
| 正面かみ合い率 | ϵ_c | --- | | 2.0882 |
| 軸/円周方向バックラッシュ | BLx | mm | 0.1084 | 0.1055 |

図 3.45 寸法結果

3.20 かみ合い図

歯形計算終了後、図 3.46 のように歯形を表示することができます。図 3.47 のように歯形の拡大作図や距離計測、R 計測、そして回転機能などがあります。

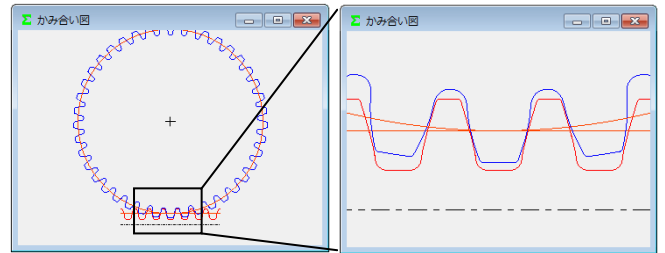


図 3.46 かみ合い図

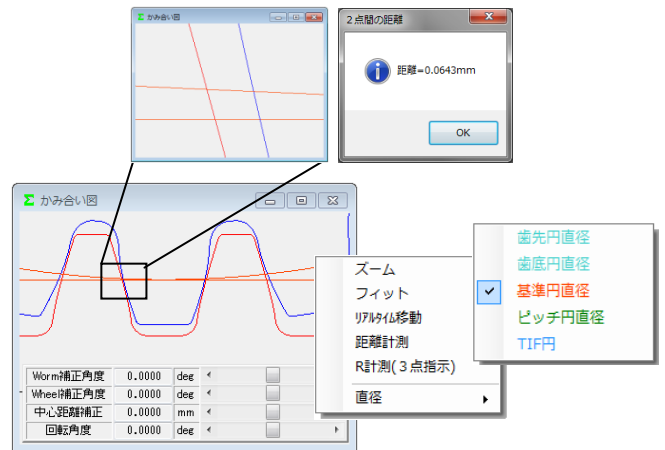


図 3.47 歯のかみ合いと補助フォーム

3.21 歯形レンダリング

歯形計算終了後、図 3.48 のように歯形レンダリングを表示することができます。図 3.49 の補助フォームは、観察角度や歯車の位置変更、拡大機能、そして自動回転機能などがあります。

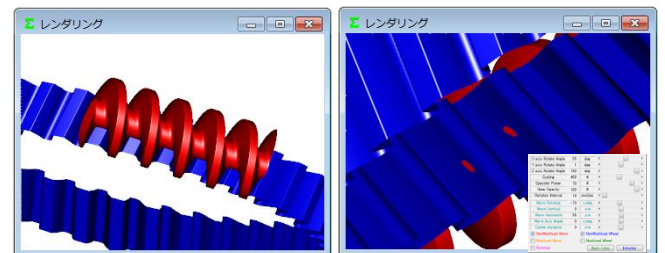


図 3.48 レンダリング

図 3.49 歯の接触

3.22 歯当たり (オプション)

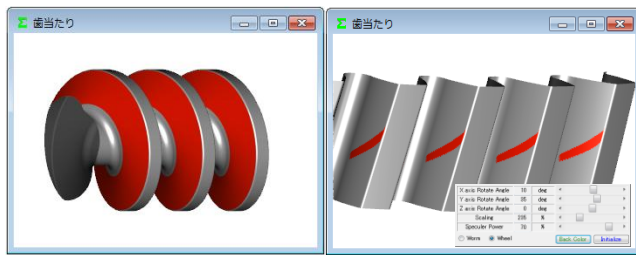
図 3.50 の歯当たり設定では、軸の取り付け誤差や接触最大クリアランス (光明丹厚さ) を設定することができます。本例では、接触最大クリアランスを $c=3\mu\text{m}$ としたときの歯当たりを図 3.51 に示します。ウォームの型式や歯形修整、そして軸の取り付け誤差を与えたとき歯当たりがどのように変化するかを把握することができます。

また、図 3.51(b)右下の補助フォームで歯形を拡大することや観察角度を変更することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|------------|-----------------|---------------|---------|
| 軸位置変化量 | ΔY | μm | 0.0 |
| 軸角変化量 | $\Delta \Sigma$ | deg | 0.00000 |
| 中心距離変化量 | Δa | μm | 0.0 |
| 接触最大クリアランス | c | μm | 5.0 |
| 1ピッチ回転分割数 | --- | --- | 40 |

回転方向
 BOTH(両歯面) CCW(左歯面) CW(右歯面)

図 3.50 歯当たり設定



(a) ウォーム

(b) ホイール

図 3.51 歯当たり

3.23 強度計算

強度諸元を図 3.52 に、強度計算結果を図 3.53 に示します。曲げ強さは Lewis の式に基づき、歯面強さはヘルツの応力に基づいて計算します。動力は kW と W、トルクは MN \cdot m, kN \cdot m, N \cdot m, N \cdot cm を選択することができます。

材料の設定は、ウォームとヘリカルギヤ共に図 3.52a の材料を選択することができます。また、摩擦係数や各種係数は標準値を表示しますが、任意に変更することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical gear |
|----------|-----------------|--------------------|------------|--------------|
| 材料の種類 | --- | --- | 構造用鋼 | M90-44 |
| 材料名 | --- | --- | S45C | ***** |
| 応力比率 | --- | --- | ***** | ***** |
| 摩擦係数 | μ | --- | 0.070 | --- |
| 伝達動力 | P | kW | 0.0063 | --- |
| モータ停動トルク | T_{max} | N \cdot cm | --- | ***** |
| トルク | T | N \cdot cm | 10.0000 | 298.1013 |
| 回転速度 | n | rpm | 600.0000 | 14.6341 |
| 寿命繰り返し回数 | L | --- | 410000000 | 10000000 |
| 潤滑状態 | --- | --- | グリス | --- |
| 周囲温度 | t | $^{\circ}\text{C}$ | 60.000 | --- |
| 弾性率 | E | MPa | 205940.000 | ***** |
| 許容曲げ応力 | σ_{blim} | MPa | 198.000 | ***** |
| 許容せん断応力 | σ_{slim} | MPa | ***** | ***** |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 490.500 | ***** |
| 曲げ安全率 | SF | --- | 1.200 | --- |
| 面圧安全率 | SH | --- | 1.150 | --- |
| せん断安全率 | SS | --- | 1.200 | --- |

トルク入力方式
 トルク→動力 動力→トルク Worm Helical gear

材料選択メニュー:
 N \cdot m
 MN \cdot m
 kN \cdot m
 N \cdot m
 N \cdot cm
 M90-44
 構造用鋼
 リン青銅
 BS
 M90-44
 KT-20
 GH-25
 14G15
 MC(付)

図 3.52 強度諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical gear |
|----------|-----------------|-----------------|------------|--------------|
| 滑り速度 | V_s | m/s | 0.321 | ***** |
| 周速 | V | m/s | ***** | 0.064 |
| 効率 | μ | --- | --- | 0.727 |
| PV値 | PV | MPa \cdot m/s | --- | 15.462 |
| 曲げ強さ項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical gear |
| 接線力 | F_x | N | --- | 71.239 |
| 材料係数 | KM | --- | 1.000 | 1.000 |
| 歯形係数 | YF | --- | 0.504 | 0.696 |
| 速度補正係数 | Kv | --- | 1.000 | 1.399 |
| 温度係数 | KT | --- | 1.000 | 0.650 |
| 潤滑係数 | KL | --- | 1.000 | 1.000 |
| 複合有効歯幅 | b_w | mm | --- | 19.835 |
| 許容曲げ応力 | σ_{blim} | MPa | 198.000 | 8.826 |
| 最大許容曲げ応力 | σ | MPa | 163.333 | 6.691 |
| 許容円周力 | F_a | N | 3268.407 | 184.838 |
| 曲げ応力 | σ_b | MPa | 3.580 | 2.579 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 45.880 | 2.595 |
| 歯面強さ項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical gear |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 490.500 | 57.303 |
| 弾性率 | E | MPa | 205940.000 | 1721.067 |
| 許容円周力 | F_h | N | 7379.542 | 100.718 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 48.193 | 48.193 |
| 歯面強さ | Sfh | --- | 103.589 | 1.414 |
| せん断強さ項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical gear |
| 円弧歯厚 | S_o | mm | ***** | 3.564 |
| 断面積 | A | mm 2 | ***** | 57.715 |
| 許容せん断応力 | σ_{slim} | MPa | ***** | 4.863 |
| 許容円周力 | F_s | N | ***** | 233.904 |
| せん断応力 | σ_s | MPa | ***** | 1.481 |
| せん断強さ | Sfs | --- | ***** | 3.283 |

図 3.53 強度結果

3.24 軸受荷重

軸受荷重の計算結果を図 3.54 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|-----------|-------|----|--------|--------|
| 円周方向に加わる力 | F_t | N | 20.000 | 78.359 |
| 軸方向に加わる力 | F_a | N | 78.359 | 20.000 |
| 半径方向に加わる力 | F_r | N | 21.906 | 21.906 |

図 3.54 軸受荷重

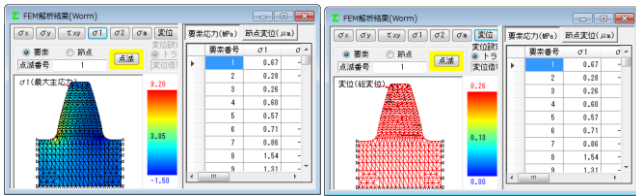
3.25 2D-FEM 歯形応力解析 (オプション)

図 3.55 の FEM の設定画面では縦弾性係数、ポアソン比、分割数および荷重 (例では円周力を ϵ で除した値) を設定します。

図 3.56 および図 3.57 にウォームとヘリカルギヤの解析結果を示します。また、最大値の節点や要素を点滅表示で示すこともできます。

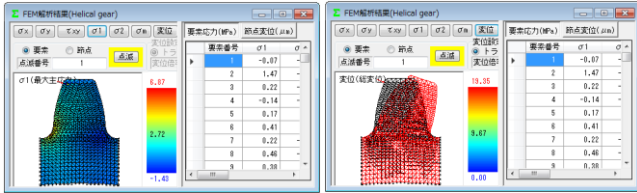
| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|-----------|-------|-----|----------|---------|
| 縦弾性係数 | E | MPa | 205940.0 | 1721.1 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.30 | 0.35 |
| 縦分割数(歯面部) | mNo | --- | 21 | 21 |
| 横分割数 | wNo | --- | 21 | 21 |
| 荷重点位置 | Nf | --- | 2 | 2 |
| 荷重 | F | N | --- | 34.5000 |

図 3.55 FEM 解析の設定



(a)最大主応力 (σ_1) (b)変位

図 3.56 ウォーム



(a)最大主応力 (σ_1) (b)変位

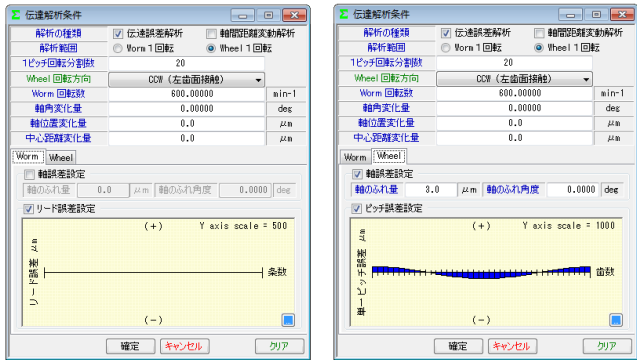
図 3.57 ヘリカルギヤ

3.26 伝達誤差 (オプション)

3.26.1 伝達誤差解析

伝達誤差解析は図 3.58 上部に示すように、片歯面かみ合いによる伝達誤差解析と、両歯面かみ合いによる軸間距離変動解析ができ、ウォーム 1 回転時とヘリカルギヤ 1 回転時を選択することができます。例題では、ウォーム回転速度 600min^{-1} でヘリカルギヤ 1 回転とし、軸の取り付け誤差は無いものとして解析します。

ピッチ誤差は、図 3.58 のように設定 (最大値設定または、歯ごと設定可) することができます。伝達誤差解析結果を図 3.60 に、ワウ・フラッタ (回転むら) を図 3.61 に、フーリエ解析結果を図 3.62 に示します。また、ワウ・フラッタを「音」に変換



(a)ウォーム (リード誤差) (b)ギヤ (ピッチ誤差)

図 3.58 ピッチ誤差設定

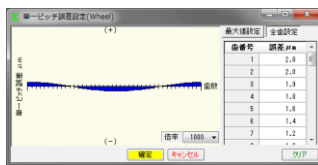


図 3.59 ピッチ誤差(ギヤ)

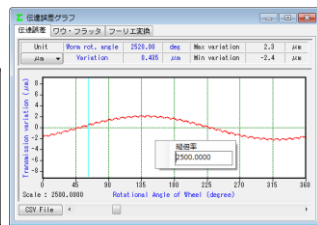


図 3.60 伝達誤差結果

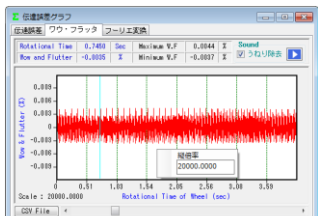


図 3.61 ワウ・フラッタ

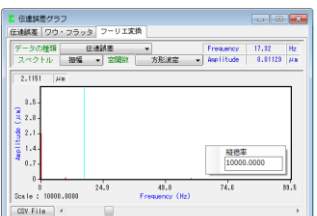
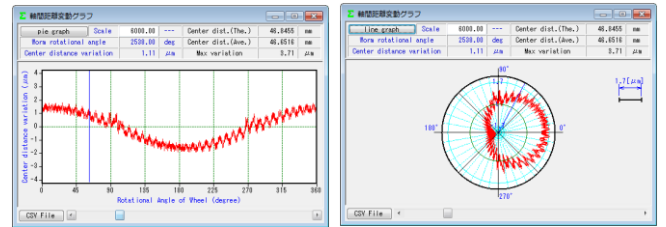


図 3.62 フーリエ解析

させる機能もありますし、解析結果を CSV ファイルに出力することもできます。

3.26.2 軸間距離変動解析

多くのウォームギヤは片歯面接触として使用しますが、装置によっては両歯面を接触させかみ合わせる場合があります。軸間距離変動解析は、図 3.58 で設定したピッチ誤差や取り付け誤差などを考慮して中心距離の変動を解析します。図 3.63 に解析結果を示します。また、解析結果を CSV ファイルに出力することができます。



(a)グラフ 1 (b)グラフ 2

図 3.63 軸間距離変動解析

3.27 歯面評価 (オプション)

歯面評価には、すべり速度グラフ (図 3.64) とヘルツ応力グラフ (図 3.65) があります。すべり速度は、歯の接触位置における速度を計算し、ヘルツ応力は歯の接触位置における歯形 (歯の変形は考慮していません) から計算しています。いずれも強度計算および伝達誤差解析後に有効です。

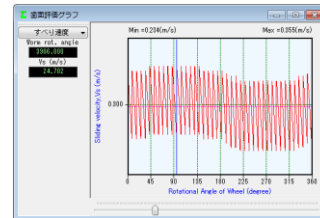


図 3.64 すべり速度グラフ

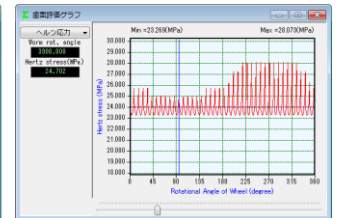
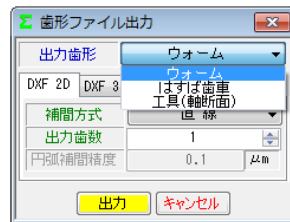


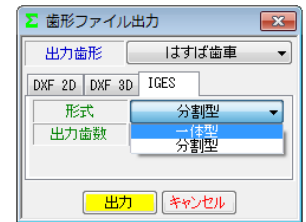
図 3.65 ヘルツ応力

3.28 歯形ファイル出力

歯形ファイルは図 3.66 のようにウォーム、ヘリカルギヤそして工具 (ホブ) の歯形 (任意歯数出力可) を生成します。ファイルの種類は DXF-2D, DXF-3D, IGES-3D の 3 種類です。CAD 作図例を図 3.67 に示します。

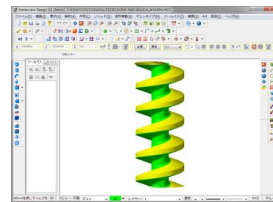


(a)出力歯形

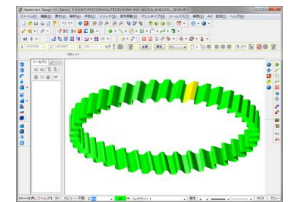


(b)3D-IGES の例

図 3.66 歯形ファイル出力



(a)ウォーム



(b)ギヤ (全歯数出力の例)

図 3.67 CAD 作図例

3.29 設計データ管理

データベースは、Microsoft Access Database、Microsoft SQL Server そして ORACLE MySQL Server に対応しています。また、旧ソフトウェアの involute Σ (Worm Gear) および involute Σ (Worm and Helical Gear) で作成した設計データの読み込みも可能です。データベースの設定画面を図 3.68 に示します。

※Microsoft SQL Server および ORACLE MySQL Server は、インストールされている必要があります。



図 3.68 データベースの設定

3.30 HELP 機能

操作途中で使い方が解らない場合は、アクティブ画面で[F1]キーを押すことで図 3.69 のように説明文を表示します。

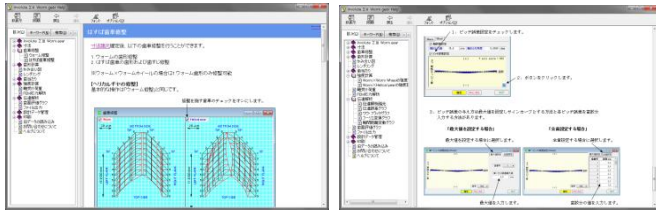


図 3.69 HELP 機能の例

3.31 ウォームギヤの種類

ウォームギヤの種類を図 3.70～3.76 に示します。なお、[] 内数値はソフトウェア番号です。

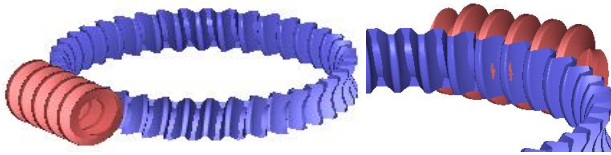


図 3.70 [3]円筒ウォームギヤ

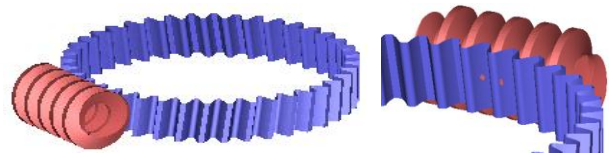


図 3.71 [3]ウォーム×ヘリカルギヤ

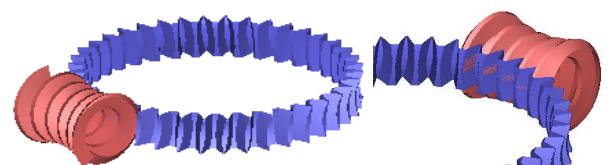


図 3.72 [36]ヒンドレーウォームギヤ

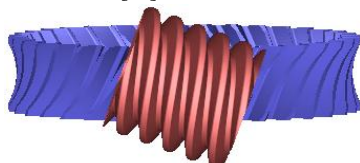


図 3.73 [28]傾斜ウォームギヤ

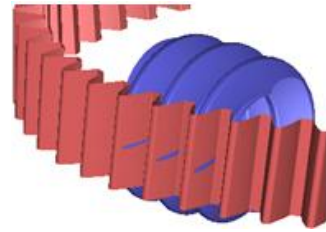


図 3.74 [39]内歯ウォーム

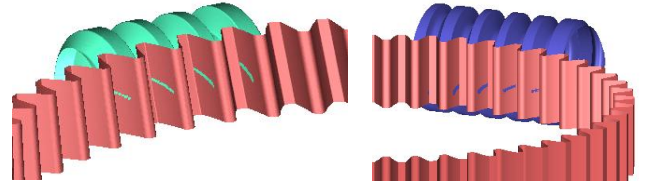
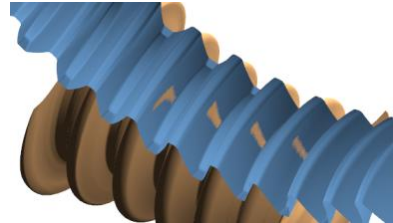


図 3.75 [37]LCCW ウォーム×ヘリカルギヤ



ホブ切削で加工したホイールとかみ合う鼓形ウォーム

図 3.76 [44]SS-Worm gear (鼓形ウォームギヤ)

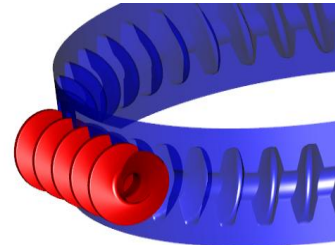


図 3.77 [3]円筒ウォームギヤ (ホイール歯幅が広い例)

[4] involute ASM(high-intensity gear design system)

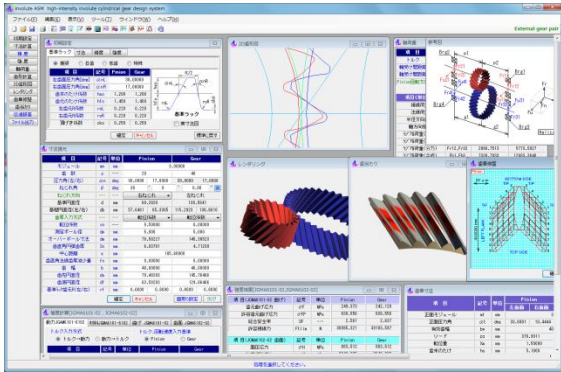


図 4.1 involute ASM(high-intensity gear)

4.1 概要

involute ASM(high-intensity gear)は、非対称圧力角インボリュート歯車（以後、非対称歯形歯車と言う）の設計支援ソフトウェアです。図 4.1 に全体画面を示します。

非対称歯形歯車は、ギヤの大きさや材料を変更しないで歯面負荷容量を増大させることができます。高圧力角歯形は標準圧力角に比べ、ヘルツ応力は低下し、摩擦係数は小さく、すべり率は小さく、そしてフラッシュ温度を低く抑えることができます。

4.2 ソフトウェアの構成

involute ASM の構成を表 4.1 に示します。表中の○は、基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

適応歯車：インボリュート平、はすば歯車（外歯車、内歯車）

表 4.1 ソフトウェアの構成

| 項目 | 機能 |
|------------------------------------|----|
| <1>基準ラックの設定 | ○ |
| <2>歯車寸法 | ○ |
| <3>推論 | ○ |
| <4>歯形創成図 | ○ |
| <5>歯車かみ合い図 | ○ |
| <6>かみ合い連続回転 | ○ |
| <7>歯形 DXF ファイル | ○ |
| <8>歯形レンダリング図 | ○ |
| <9>歯車精度 | ○ |
| <10>設計データ管理 | ○ |
| <11>JGMA6101,6102, JGMA401,402 | ○ |
| <12>樹脂歯車強度計算(JIS B 1759) | ○ |
| <13>軸受け荷重 | ○ |
| <14>3D-IGES 歯形データ | ○ |
| <15>回転伝達誤差解析、フーリエ解析 ワウ・フラッタ、CSV | ◎ |
| <16>歯面修整(歯形, 歯すじ, バイアス修整) | ◎ |
| <17>歯当たり | ◎ |
| <18>FEM 歯形応力解析 | ◎ |

4.3 基準ラックの設定

図 4.2~4.5 に設定画面を示します。

- ・歯車の組み合わせ：外歯車×外歯車, 外歯車×内歯車
- ・基準ラック：並歯, 低歯, 特殊
- ・歯先円決定の方式：標準方式, 等クリアランス方式
- ・鋼歯車の強度計算規格は、図 4.5 に示すように

- ・JGMA 401-02:1974, 402-02:1975
- ・JGMA 6101-02:2007, 6102-02:2009

の 2 種類があり、プラスチック歯車の強度計算規格は、JIS B 1759(2013)に対応しています。



図 4.2 基準ラック(非対称)

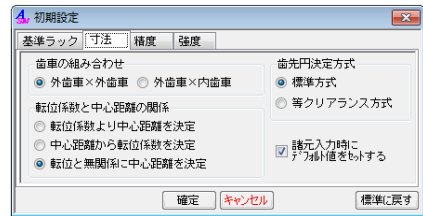


図 4.3 寸法

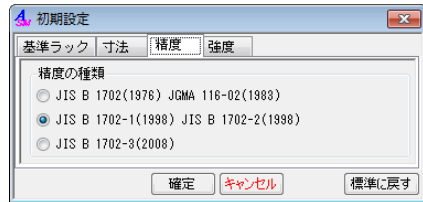


図 4.4 精度

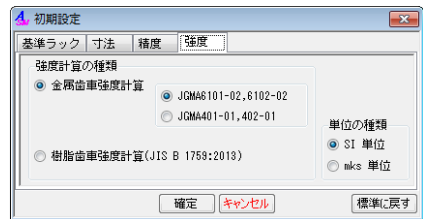


図 4.5 強度

4.4 歯車寸法

歯車寸法は、各部寸法、かみ合い率、すべり率、歯厚などを計算します。アンダーカットが発生している歯車のかみ合い率は、TIF (True Involute Form) 径を基準に、また、歯先に丸みがある場合は歯先 R を考慮したかみ合い率を算出します。

(1)中心距離と転位係数の関係は、以下の 3 種類です。

- <1> 転位係数をピニオンとギヤに与え中心距離を決定
- <2> 中心距離を基準として各歯車の転位係数を決定
- <3> 転位係数を無視して任意に中心距離を決定

(2)転位係数の設定方式は、以下の 4 種類です。

- <1> 転位係数を直接入力
- <2> オーバーピン寸法を入力して転位係数を決定
非対称歯形は、またぎ歯厚測定ができませんので選択できません。図 4.8 に示すまたぎ歯厚は参考値です。
- <3> 円弧歯厚を入力して転位係数を決定

図 4.6 に諸元設定画面を示します。また、転位係数入力時は、転位係数を直接入力方法以外に、歯厚から転位係数を入力することもできます。図 4.7 の面取り設定で歯先 R=0.2 (C 面も可能) としたときの寸法結果画面を図 4.8 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | | Gear | |
|--------------|------------|-----|-----------|---------|-----------|----------|
| モジュール | m | mm | 3.00000 | | | |
| 歯数 | z | --- | 20 | | 40 | |
| 圧力角(左/右) | α_n | deg | 30.0000 | 17.0000 | 30.0000 | 17.0000 |
| ねじれ角 | β | deg | 30 | | | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | | 左ねじれ | |
| 基準円直径 | d | mm | 63.2820 | | 138.5641 | |
| 基礎円直径(左/右) | db | mm | 57.6461 | 65.3305 | 115.2923 | 130.6610 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 | | 転位係数 | |
| 転位係数 | xn | --- | 0.50000 | | 0.50000 | |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.000 | | | |
| オーバーボール寸法 | dm | mm | 78.58227 | | 145.30523 | |
| 歯直円弧歯厚 | Sn | mm | 6.03701 | | 4.71239 | |
| 中心距離 | a | mm | 105.80000 | | | |
| 歯直円弧歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 | | 0.00000 | |
| 歯幅 | b | mm | 40.00000 | | | |
| 歯先円直径 | da | mm | 79.48203 | | 145.76406 | |
| 歯底円直径 | df | mm | 63.58203 | | 129.86406 | |
| 基準圧力歯元R(左/右) | rf | mm | 0.6600 | 0.6600 | 0.6600 | 0.6600 |

図 4.6 諸元設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | | Gear | |
|----------|-----|-----|--------|-------|-------|-------|
| 面取り加工 | --- | --- | R面取り | | | |
| 歯先R | ra | mm | 0.200 | 0.200 | 0.200 | 0.200 |
| 半径方向面取り量 | ca | mm | | | | |
| 円周方向面取り量 | cb | mm | | | | |

図 4.7 面取り設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | | Gear | |
|---------------|-----------------------|-----|----------|---------|----------|----------|
| 正面モジュール | mt | mm | 3.46410 | | | |
| 正面圧力角 | α_{ct} | deg | 33.6901 | 19.4444 | 33.6901 | 19.4444 |
| 有効歯幅 | bw | mm | 40.0000 | | | |
| リード | pz | mm | 376.3911 | | 753.9822 | |
| 転位量 | Xm | mm | 1.50000 | | 0.00000 | |
| 歯末のたけ | ha | mm | 5.1000 | | 3.6000 | |
| 歯元のたけ | hf | mm | 2.3500 | | 4.3500 | |
| 全歯たけ | h | mm | 7.3500 | | 7.9500 | |
| クリアランス | c | mm | 0.3270 | | 0.9270 | |
| かみ合い直径(歯先) | dsa | mm | 79.4820 | 79.4820 | 145.7641 | 145.7641 |
| かみ合い直径(歯元) | dsf | mm | 65.9539 | 66.8307 | 133.1030 | 134.8685 |
| 基礎円ねじれ角 | β_b | deg | 25.6589 | | 25.6589 | |
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wv} | deg | 35.0314 | 21.8783 | 35.0314 | 21.8783 |
| かみ合いピッチ円直径 | dw | mm | 70.4000 | | | |
| 正面法線ピッチ | pbt | mm | 9.0550 | 10.2621 | 9.0550 | 10.2621 |
| 歯直円弧ピッチ | pbn | mm | 8.1621 | 9.0130 | 8.1621 | 9.0130 |
| かみ合い長さ | sa | mm | 11.3380 | 15.5342 | 11.3380 | 15.5342 |
| 正面かみ合い率 | ϵ_{α} | --- | 1.2521 | 1.5196 | 1.2521 | 1.5196 |
| 重なりかみ合い率 | ϵ_{β} | --- | 2.1221 | | | |
| 全かみ合い率 | ϵ_{γ} | --- | 3.3742 | 3.6417 | 3.3742 | 3.6417 |
| 近寄りかみ合い率 | $\epsilon_{\alpha L}$ | --- | 0.7901 | 0.9276 | 0.7901 | 0.9276 |
| 遠のきかみ合い率 | $\epsilon_{\alpha H}$ | --- | 0.4620 | 0.5920 | 0.4620 | 0.5920 |
| ずべり率(歯先) | σ_a | --- | 0.3922 | 0.6308 | 0.2814 | 0.5641 |
| ずべり率(歯元) | σ_b | --- | -0.3917 | -1.2944 | -0.6454 | -1.7087 |
| オーバーボール寸法 | dm' | mm | 78.5823 | | 145.3052 | |
| 歯直円弧歯厚 | sn' | mm | 6.0370 | | 4.7124 | |
| 正面円弧歯厚 | st' | mm | 6.9709 | | 5.4414 | |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 5.2123 | | 3.6300 | |
| キャリア歯厚(参考) | Sj | mm | 6.0327 | | 4.7119 | |
| 基準ラック歯元のたけ係数 | hao | --- | 1.2000 | | 1.2000 | |
| 基準ラック歯元のたけ係数 | hfo | --- | 1.4500 | | 1.4500 | |
| バックラッシュ | jt | --- | 0.2402 | | | |
| 正面法線方向バックラッシュ | jt_n | mm | 0.1967 | 0.2223 | 0.1967 | 0.2223 |

図 4.8 寸法結果

4.6 歯形図

歯形計算は図 4.9 に示すように歯形各部に分割数を与えることができます。そして **歯形計算** で左右の歯形を計算し図 4.10

| 歯形項目 | 記号 | Pinion | Gear |
|------------|-----|--------|------|
| フィレット分割数 | vuf | 30 | 30 |
| インボリュート分割数 | vui | 50 | 50 |
| 面取り部分分割数 | zur | 15 | 15 |
| 歯先円分割数 | vut | 10 | 10 |
| 歯すじ分割数 | hul | 18 | 18 |

図 4.9 歯形計算諸元

のように歯形図を示します。歯形に関する機能は補助フォームに示すように歯形情報(図 4.11)、歯形創成(図 4.12)、ズーム、距離計測(図 4.13)、R 計測(図 4.14)機能および直径、修整歯形表示、作用線、歯先幅、奇数歯 Y 測定の表示そして回転機能があります。

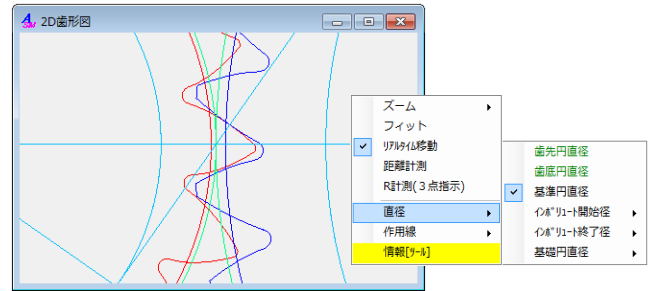


図 4.10 かみ合い図と補助フォーム



図 4.11 歯形情報

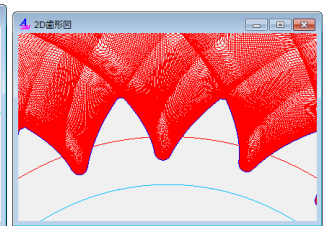


図 4.12 歯形創成

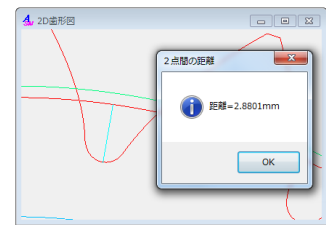


図 4.13 距離計測

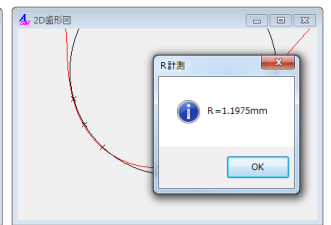


図 4.14 R 計測

4.7 歯形レンダリング

3次元歯形のかみ合いを図 4.15 のように作図することができます。かみ合い部分に接触線を観察することができます。また、補助フォームにより歯形の向きを自由に変えることができ、拡大、縮小および歯車の回転表示をすることができます。

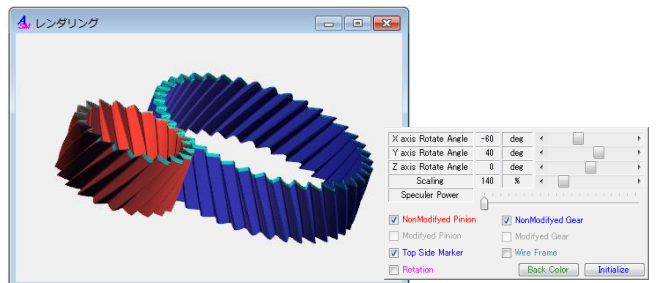


図 4.15 歯形レンダリングと補助フォーム

4.8 歯車精度

図 4.16 と図 4.17 に新 JIS の歯車精度規格 JIS B 1702-1:1998 と JIS B 1702-2:1998 による誤差の許容値を示します。また、図 4.4 の設定により新 JIS と旧 JIS の切り換えが可能です。歯車精度規格は

- JIS B 1702-1:1998, JIS B 1702-2:1998, JIS B 1702-3:2008
- JIS B 1702:1976
- JGMA 116-02:1983

の 5 種類です。



図 4.16 JIS B 1702-1,2 の設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|-----------------|----|--------|------|
| 単一ピッチ誤差 | f _{pt} | μm | 8 | 6.5 |
| 部分重複ピッチ誤差 | F _{pk} | μm | 8.5 | 12 |
| 重複ピッチ誤差 | F _p | μm | 19 | 25 |
| 全歯形誤差 | F _α | μm | 8 | 9 |
| 全歯すじ誤差 | F _β | μm | 8.5 | 9 |
| 片面歯にかみ合い誤差 | f ₁ | μm | 8 | 8.5 |
| 片面歯にかみ合い誤差 | f ₂ | μm | 27 | 34 |
| 歯形分節誤差 | ff _α | μm | 8 | 7 |
| 歯形ごう配誤差 | ff _α | μm | 5 | 5.5 |
| 歯すじ形誤差 | ff _β | μm | 6 | 6.5 |
| 歯すじ線誤差 | F _{Hβ} | μm | 8 | 6.5 |

図 4.17 精度許容値

4.9 歯車強度計算 (鋼)

歯車強度計算は、図 4.5 に示すように ISO6336:2006 規格に準拠した JGMA6101-02:2007 および JGMA 6102-02:2009 規格と JGMA401-01:1974, 402-01:1975 の 2 種類あり、設計単位は、SI 単位系、MKS 単位系を選択することができます。図 4.18 に強度計算の動力設定画面を示します。本例では高圧力角側を作用歯面としますが、低圧力角側を作用歯面として強度計算をすることもできます。材料の選択は、図 4.19 に示すように「材料」と「熱処理」に適した材料の選択フォームを表示します。また、図 4.20 に曲げに関する係数設定画面を、図 4.21 に面圧に関する係数の設定画面を示し、図 4.22 に強度計算結果を示します。


なお、画面中の  は、数値換算や各種係数、そして係数選択をすることができる補助機能です。



図 4.18 強度計算 (動力設定)



図 4.19 強度計算 (材料)



図 4.20 強度計算 (曲げに関する係数)



図 4.21 強度計算 (面圧に関する係数)

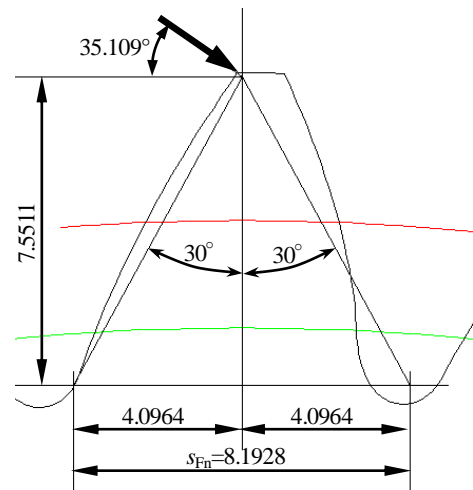
| 項目 (JGMA6101-02 曲げ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|---------------------|--------|-----|-----------|-----------|
| 歯元曲げ応力 | σF | MPa | 249.379 | 242.120 |
| 許容歯元曲げ応力 | σFP | MPa | 639.556 | 639.556 |
| 総合安全率 | SF | --- | 2.561 | 2.837 |
| 許容接線力 | Ft lim | N | 38995.321 | 38103.597 |

| 項目 (JGMA6102-02 歯面) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|---------------------|--------|-----|-----------|-----------|
| 面圧応力 | σH | MPa | 893.512 | 893.512 |
| 許容接触応力 | σHP | MPa | 2040.095 | 2040.095 |
| 総合安全率 | SH | --- | 2.309 | 2.309 |
| 許容接線力 | Fc lim | N | 77032.490 | 77032.490 |

図 4.22 強度結果

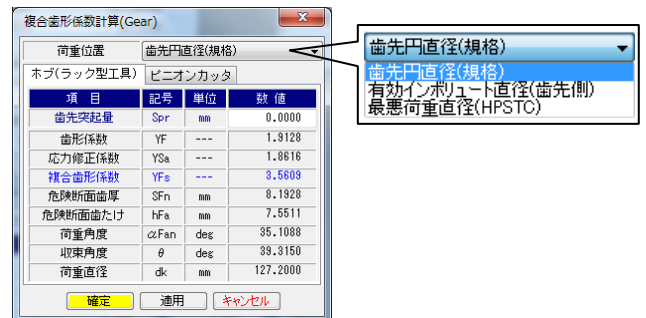
4.9a 歯形係数

対称歯形歯車の歯形係数を決定する際の危険断面歯厚の算出方法は、それぞれの規格で定義されていますが非対称歯形歯車の危険断面歯厚は定義されていません。本ソフトウェアでは図 4.23 および図 4.24 のように高圧力角側の危険断面距離を 2 倍にして危険断面歯厚としています。



$$(m_n=3, z=40, \alpha=30^\circ, \beta=0^\circ, x=0)$$

図 4.23 危険断面歯厚 (歯先荷重の例)



荷重位置は歯先、HPSTC を選択することができます。

図 4.24 歯形係数の数値

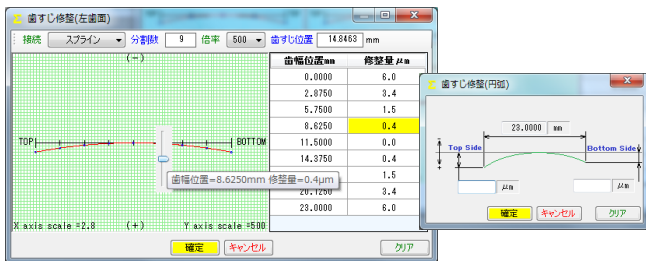


図 4.33 歯すじ修整

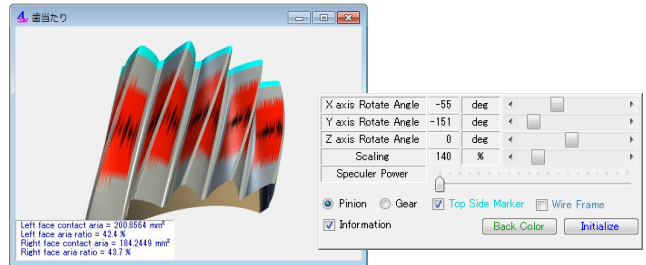


図 4.38 歯当たり (ピニオン)

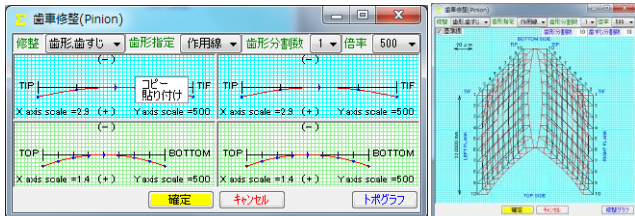


図 4.34 歯形&歯すじ修整とトポグラフ

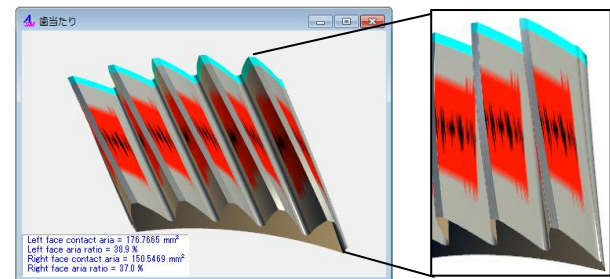


図 4.39 歯当たり (ギヤ) & 拡大

歯面修整を与えた歯形は、図 4.35 の歯形計算諸元で設定することができます。ここで設定した歯形計算条件は、図 4.10~4.14 に示す歯形に有効で、図 4.14 の歯形レンダリングに重ね合わせることができるため図 4.36 のように表示することができます。ここでは、ピニオンに歯面修整を与えているため図中の赤色歯面の中に黄色歯面が表れています (ギヤは無修整)。

| 歯形項目 | 記号 | Pinion | Gear |
|------------|-----|--------|------|
| フレット分割数 | vuf | 30 | 30 |
| インボリュート分割数 | vui | 50 | 50 |
| 面取り部分割数 | vur | 15 | 15 |
| 歯先円分割数 | vut | 10 | 10 |
| 歯すじ分割数 | hul | 31 | 31 |

図 4.35 歯形計算諸元

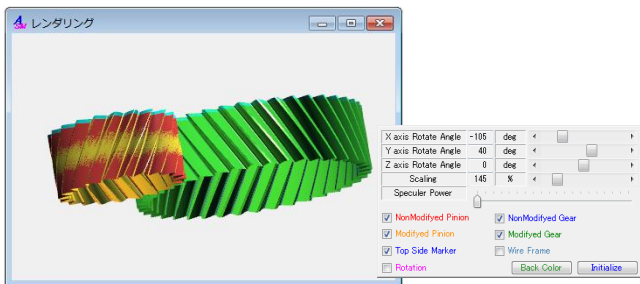


図 4.36 歯形レンダリング (歯面修整)

4.13 歯当たり

歯面修整 (図 4.31) を与えた歯車に図 4.37 で歯当たり条件を設定し歯当たりを確認することができます。ここでは、平行度誤差および食い違い誤差を 0 とし、接触最大クリアランスを 2.0μm としたときの歯当たりを図 4.38 および図 4.39 に示します。

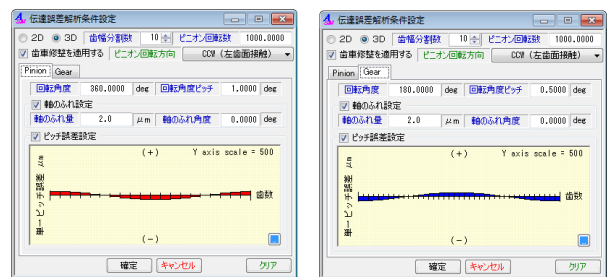
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------------|-----|-----|----------|
| 中心距離 | a | mm | 105.6000 |
| 平行度誤差 | p | deg | 0.0000 |
| 食い違い誤差 | di | deg | 0.0000 |
| 歯すじ分割数 | hul | --- | 18 |
| 歯形補間精度 | ac | μm | 0.0 |
| 回転分割数(ピッチ当たり) | urP | --- | 50 |
| 接触最大クリアランス | c | μm | 2.0 |

図 4.37 歯当たり設定

4.14 伝達誤差

伝達誤差解析では、無修整歯形または図 4.31 で与えた歯形で無負荷時の回転伝達誤差解析をすることができます。図 4.40 に伝達誤差設定を示しますが、ここでは 2D 解析または 3D 解析の選択をすることができ、軸の振れ、回転速度を設定することができます。また、ピッチ誤差は図 4.41 のように最大値の設定または全歯のピッチ誤差を設定することができます。

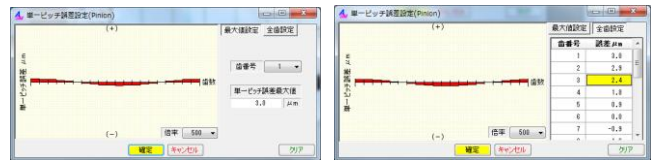
伝達誤差解析、ワウ・フラッタ (回転むら) をしてフーリエ解析結果を図 4.42~4.44 に示します。図 4.42 の [Sound] で [うなり除去] で [音] を聞くことができます。



(a)ピニオン

(b)ギヤ

図 4.40 伝達誤差設定



(a)最大値の設定

(b)全歯設定

図 4.41 ピッチ誤差設定

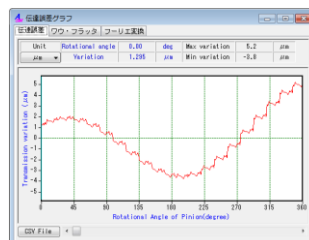


図 4.42 伝達誤差解析結果

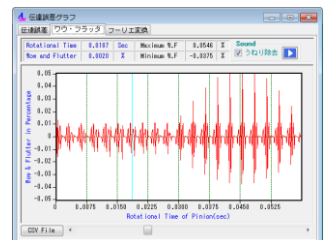


図 4.43 ワウ・フラッタ

伝達誤差解析, ワウ・フラッタ, フーリエ解析結果は, 図 4.42 の左下にある **CSV File** で図 4.45 のように CSV ファイル (本例の場合 361 個のデータ) に出力することができます。

本ソフトウェアは無負荷での伝達誤差解析です。負荷や軸角誤差に対応した応力解析や伝達誤差解析, フラッシュ温度解析等は応力解析用の[22]CT-FEM ASM をお使いください。

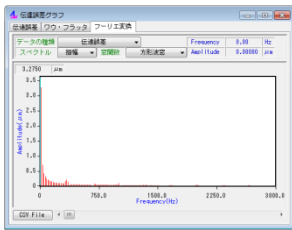


図 4.43 フーリエ解析

| | A | B |
|----|----|----------|
| 1 | 0 | 1.294661 |
| 2 | 1 | 1.243855 |
| 3 | 2 | 1.276325 |
| 4 | 3 | 1.437076 |
| 5 | 4 | 1.216831 |
| 6 | 5 | 1.466321 |
| 7 | 6 | 1.290423 |
| 8 | 7 | 1.432647 |
| 9 | 8 | 1.777061 |
| 10 | 9 | 1.637394 |
| 11 | 10 | 1.599014 |
| 12 | 11 | 1.666504 |

図 4.44 CSV ファイル例

4.15 歯形出力

生成した歯形は, 図 4.46 の歯形ファイル形式 で出力することができます。3D-IGES の場合, 歯形を一体型と分割型を選択することができます。分割型の場合は歯元フィレット部, インボリュート歯面, 歯先 R, 歯先部に分割して図 4.47 のように出力します。

図 4.48 に示す座標補正設定では, 金型用に使用することを考慮し, モジュール収縮率や圧力角補正, ねじれ角補正そして放電ギャップを考慮した歯形を出力することができます。例として図 4.49 にモジュール収縮率 20/1000 を考慮した歯形図(2D)を示します。また, 歯形座標値を図 4.46 画面下方の **TEXT 2D** によりテキストファイルで出力することができます。

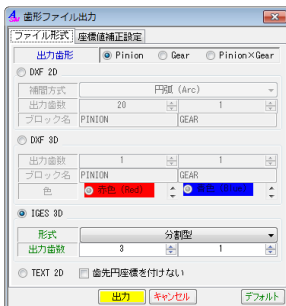


図 4.46 歯形ファイル形式

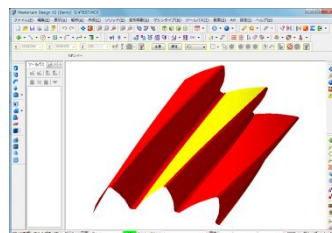


図 4.47 CAD 作図例



図 4.48 座標補助設定

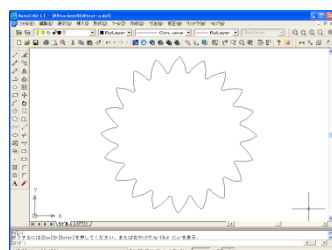


図 4.49 CAD 作図例

4.16 内歯車の計算例

内歯車は図 4.3 の設定で「外歯車×内歯車」を選択することで計算をすることができます。歯車諸元, 寸法, かみ合い図, 歯形レンダリング, 歯当たりの例を図 4.50~4.53 に示します。なお, 図 4.52 のピニオンは, 図 4.31 と同じ歯面修整を与えています。また, 強度計算, 伝達誤差解析そして歯形出力などは「外歯車×外歯車」と同様です。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|-----|-----|-------------------|-----------------------------|
| モジュール | m | mm | | 3.00000 |
| 歯数 | z | --- | 13 | 55 |
| 圧力角(左/右) | α | deg | 30.0000 | 17.0000 / 30.0000 / 17.0000 |
| ねじれ角 | β | deg | 15 | 0 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 40.3758 | 170.8206 |
| 基準円直径(左/右) | db | mm | 34.8568 / 38.4938 | 146.6248 / 182.8575 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 | 転位係数 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.50000 | 0.30000 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.172 | 5.856 |
| オーバーホール寸法 | dn | mm | 48.51346 | 163.49055 |
| 歯道円弧歯厚 | Sn | mm | 6.03701 | 3.81762 |
| 中心距離 | a | mm | | 64.40000 |
| 歯道円弧歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯幅 | b | mm | 25.00000 | 25.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 48.37577 | 166.62057 |
| 歯底円直径 | df | mm | 35.87577 | 178.80000 |
| 基準圧力角(左/右) | rf | mm | 0.9000 | 0.9000 / 0.9000 |

図 4.50 諸元 (内歯車)

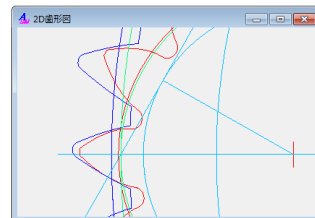


図 4.51 かみ合い

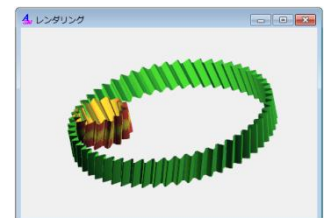
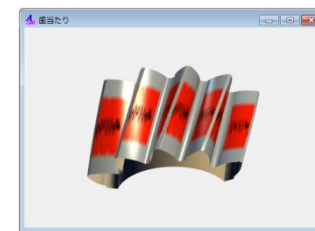
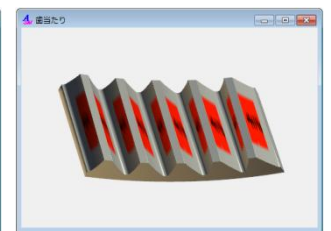


図 4.52 レンダリング



(a)ピニオン



(b)ギヤ

図 4.53 歯当たり

4.17 FEM 歯形応力解析 (オプション)

FEM 解析例を図 4.54, 4.55 に示します。設定方法は involute Σ iii (spur and helical gear design system) と同様です。

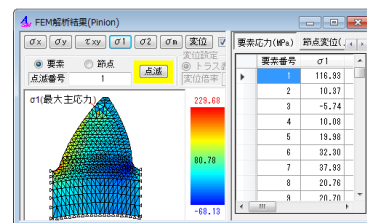


図 4.54 FEM(2D)解析例

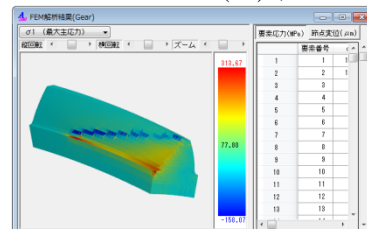


図 4.55 FEM(3D)解析例

4.18 その他

印刷機能, [HELP]機能, 設計データの保存・読み込み等は, [1]involute Σ iii (spur and helical gear design system) と同様です。

※非対称歯形歯車の 3 次元応力解析や歯面応力, フラッシュ温度などの解析は, [22]CT-FEM ASM をお使いください。

[5] Planetary gear design system (遊星 & 不思議遊星)

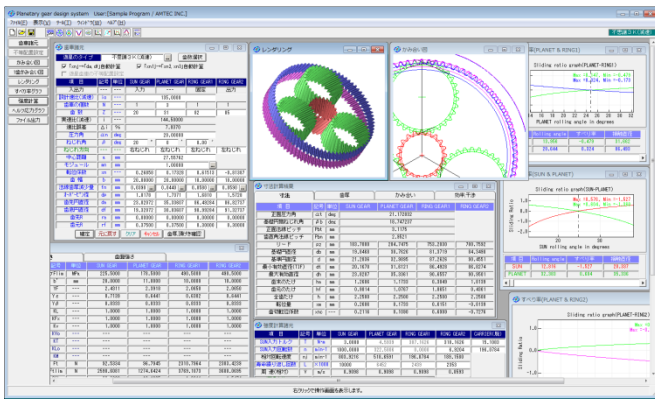


図 5.1 Planetary gear design system

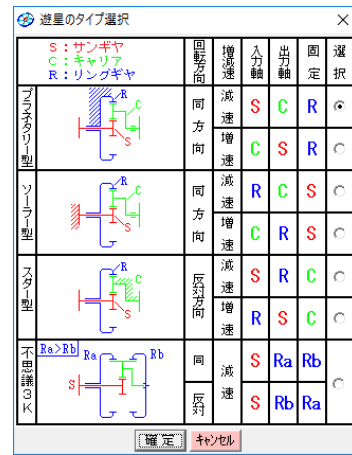


図 5.3 遊星歯車のタイプ

5.1 概要

Planetary gear and Mechanical paradox gear design system は、2016年12月に操作性や画面表示など改良した「Planetary gear design system」に変わりました。本ソフトウェアは、遊星歯車と不思議遊星を簡単に設計できるソフトで、歯数の組み合わせや中心距離などを自動決定し、歯車寸法および歯車強度を簡単に設計することができます。また、遊星歯車の干渉チェックおよび、転位係数の決定、効率計算なども簡単に計算することができます。図5.1に計算結果の全体画面を示します。

5.2 適用

- (1)型式 : 等配置型
: 遊星(プラネタリー, ソーラー, スター)
 - (2)歯車材料 : 金属, 樹脂 (金属と樹脂混同可能)
 - (3)歯車歯形 : インボリュート歯形
 - (4)オプション : 不思議遊星(3K), 少歯数, ダブルピニオン, 不等配置
- 上記, 遊星歯車の歯車寸法, 歯車強度, 歯形設計に適用します。

5.3 プロパティ (基準ラック)

プロパティで、歯先円直径の決定方式、基準ラック、モジュールまたは中心距離基準、歯車精度、摩擦係数の設定をします。図5.2にプロパティの画面を示します。



図 5.2 プロパティ

5.4 遊星歯車機構の選択

図5.3に示す遊星歯車タイプの選択をします(プラネタリー型, ソーラー型, スター型の増減速, 不思議3K)。



図 5.4 歯車諸元



図 5.5 歯数選択

- (1) 遊星歯車の個数は、1~21です。
- (2) 歯数は、直接入力する方式と、速比から計算した歯数一覧(図 5.5)から選択する方式があります。
- (3) 中心距離よりモジュールの計算、またはモジュールより中心距離の計算をすることができます。
- (4) 転位係数の計算は、モジュールと中心距離からバックラッシが0になるように計算します。
- (5) 法線歯厚減少量の入力。(デフォルト値として JIS バックラッシ標準中間値の 1/2 を表示します。)
- (6) 歯先円直径はプロパティで設定した基準ラックの歯たけと転位係数から標準値を計算しますが、変更が可能です。
- (7) 外歯車の歯元部の形状は、基準ラックによる創成運動によって生成する歯形です。内歯車の歯元は、入力 R 接続です。
- (8) 歯車の歯先は R で作成することができます。
- (9) 転位係数は、1 種を変更すると残りの転位係数が連動して変化しますが、歯車それぞれ個別に入力することができます。最適なクリアランス(歯たけの調整)と歯厚(転位係数の調整)の決定のため図 5.6 の歯厚、頂げき確認(補助設定)によって歯形を確認することができます。また、この画面によって、転位係数や歯先円直径を変更したときの歯形形状やクリアランス、干渉の確認をすることができます。この時点での歯形は歯面のみであり歯元形状は含まれていません。

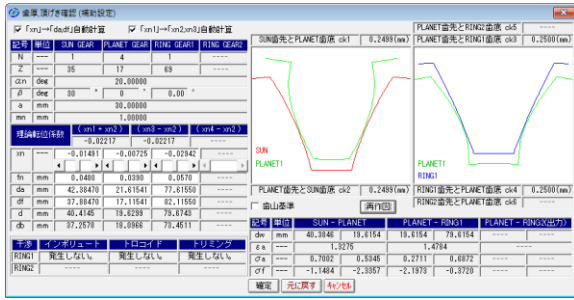


図 5.6 歯厚, 頂げき確認 (補助設定)

5.5 歯車寸法

歯車諸元を確定後, 各種計算結果を図 5.7~図 5.10 に示します. この画面で, 干渉, 効率, クリアランス, バックラッシの確認をすることができます.



図 5.7 結果(標準寸法)



図 5.8 結果(歯厚関係)



図 5.9 結果(かみ合い)

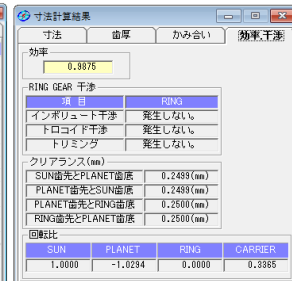


図 5.10 結果(効率, 干渉等)

5.6 歯形作図

5.6.1 かみ合い図

歯車のかみ合い図を図 5.11, 図 5.12 のように 2 次元図で表示します. 操作画面によって, 補助円や共通法線を表示することができますので歯面の接触位置の確認が容易です. 歯車の回転角度を変え, 拡大表示することができます.

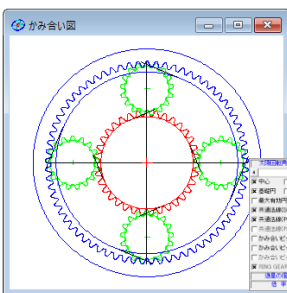


図 5.11 かみ合い図

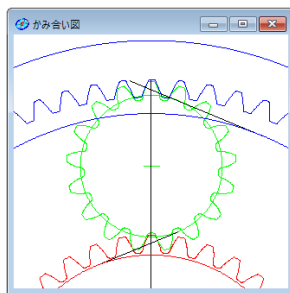


図 5.12 かみ合い拡大

5.6.2 1 歯かみ合い図

1 歯同士のかみ合いを図 5.13 の 2 次元図で確認することができます. この画面にて内歯車と外歯車の歯先と歯元部分の干渉をよ

り詳しく確認することができます(2D かみ合い図ではキャリヤが公転するために確認が難しいことがあります). また, 歯車の回転角度を変え, 拡大表示することができます.

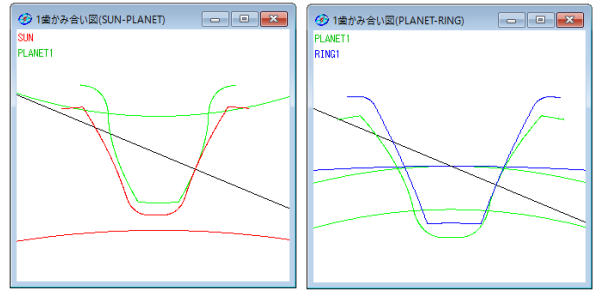


図 5.13 一歯かみ合い図

5.6.3 レンダリング

歯車のかみ合いを図 5.14, 図 5.15 のように 3 次元図で表示することができます. X, Y, Z 方向に回転させることができ図 5.16 に歯形レンダリングのコントロールフォームを示します.

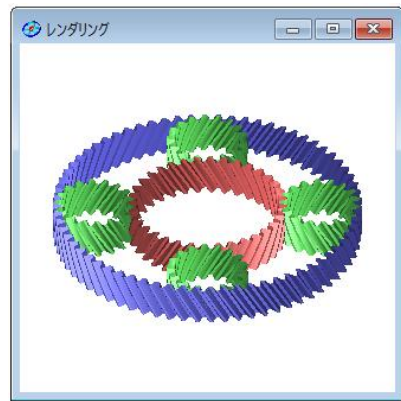


図 5.14 歯形レンダリング

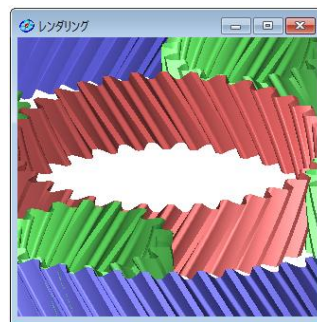


図 5.15 拡大図



図 5.16 操作画面

5.7 すべり率グラフ

すべり率グラフ(図 5.17, 図 5.18)に, 各ロールアングル (または直径) によるすべり率を表示します.

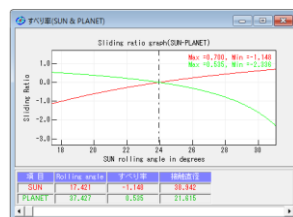


図 5.17 すべり率グラフ

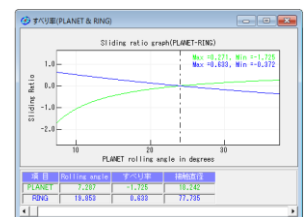


図 5.18 すべり率グラフ

きます。) 図 5.26 に諸元確定画面を示します。

- (7) 中心距離とモジュールが決定したあとは、歯たけ(クリアランスに影響)や歯厚(強度やバックラッシュに影響)の状態を確認し変更することができます。入力画面の「歯厚・頂げき確認」ボタンを押すと、図 5.28 の歯厚、頂げき確認(補助設定)を表示します。この画面で、歯形を確認しながら転位係数や歯先円直径を変更することができます。理論インボリュート歯形の接触や歯たけ、クリアランス、内歯車の干渉を確認し、問題がないためこのまま歯車寸法を確定します。



図 5.26 不思議 3K 遊星諸元入力



図 5.27 歯数選択

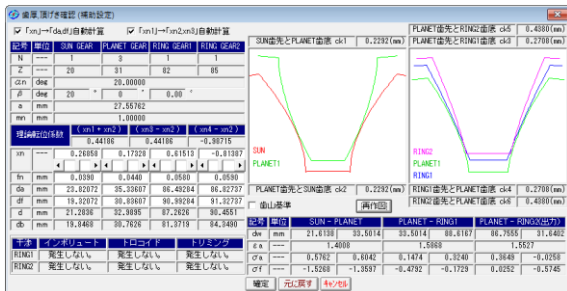


図 5.28 歯厚、頂げき確認(補助設定)

- (8) 図 5.29~5.32 に示すように寸法計算結果画面の効率やかみ合い率やすべり率を確認します。本例の不思議遊星の効率率は、

図 5.32 に示すように 73.1% となります。

- (9) また、外歯車と内歯車の干渉状態を実際に 1 歯かみ合いによってどの程度余裕があるかを確認します。
- (10) 例題の場合、モジュール 1 の寸法が決まりましたが、強度計算により大きさを変えなければならない場合があります。その場合には歯幅を変更したり、転位係数はそのままモジュールや中心距離や歯先円直径を n 倍するなどして対処します。回転比が大きくなるとトルクの比率も大きくなるために強度計算は慎重に行う必要があります。

図 5.29 歯車寸法

図 5.30 歯厚

図 5.31 かみ合い

図 5.32 干渉関係

5.11.2 歯車かみ合い図

図 5.33 にかみ合い図を示します。図 5.34 の拡大図で遊星歯車に 2 つの内歯車がかみ合っている様子が良く解ります。また、図 5.35 に示す歯形レンダリングで不思議遊星のかみ合い回転の様子を観察することができます。

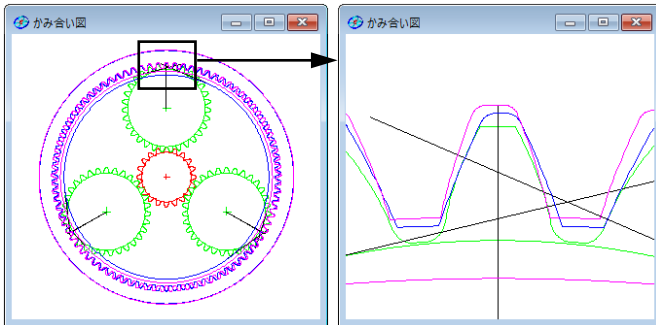


図 5.33 かみ合い図

図 5.34 部分拡大

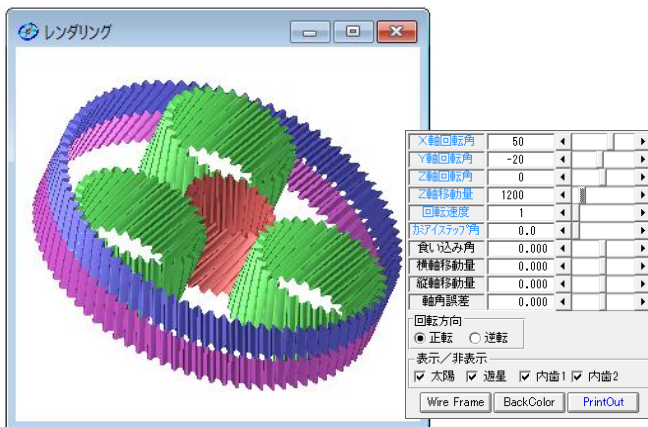


図 5.35 レンダリング(減速比 135)

5.11.3 平歯車不思議遊星の例

- (1) 歯車強度計算やすべり率そしてヘルツ応力グラフは、遊星歯車と同様に計算することができます。(説明省略)
- (2) 平歯車の不思議遊星歯車の作図例を図 5.36 に示します。

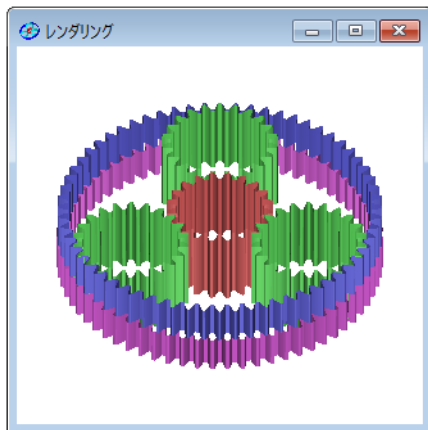


図 5.36 レンダリング(平歯車, 減速比 93.8)

5.12 少歯数 (オプション)

歯数が 4 歯以下の遊星歯車を設計することができます。最小歯数は 1 歯です。少歯数の場合は、正面かみ合い率が小さくなるた

め、ねじれ角を大きくする必要があります。以下に太陽歯数が 1、遊星歯数が 2、内歯車の歯数が 5 の遊星歯車の作図例を示します。

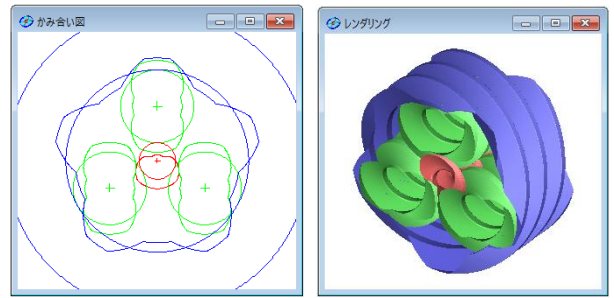


図 5.37 少歯数例(2D)

図 5.38 少歯数例(3D)

5.13 ダブルピニオン (オプション)

図 5.2 プロパティでダブルピニオンを設定します。以下に設計例を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|----------|------------|-----|----------|-------------|-------------|-----------|
| 入出力 | --- | --- | 入力 | 出力 | 出力 | 固定 |
| 設計速比(減速) | io | --- | --- | --- | --- | --- |
| 歯車の個数 | N | --- | 1 | 3 | 3 | 1 |
| 歯数 | Z | --- | 18 | 12 | 13 | 51 |
| 実速比(減速) | i | --- | --- | -1.89393 | --- | --- |
| 速比誤差 | Δi | % | 0.0000 | --- | --- | --- |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | 20.0000 | 20.0000 | 20.0000 |
| ねじれ角 | β | deg | 0 | 0 | 0.00 | 0 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 中心距離 | a | mm | 20.00000 | 16.66667 | 25.33333 | --- |
| モジュール | m | mm | 1.25000 | 1.25000 | 1.25000 | 1.25000 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.01505 | 0.02258 | 0.00878 | 0.05643 |
| 歯幅 | b | mm | 15.00000 | 15.00000 | 15.00000 | 15.00000 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0430 | 0.0380 | 0.0390 | 0.0560 |
| オホーゼリ径 | dp | mm | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 26.48162 | 18.51912 | 19.81484 | 65.80000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 20.85662 | 12.89412 | 14.18984 | 71.10741 |
| 歯先R | ra | mm | 0.10000 | 0.10000 | 0.10000 | 0.20000 |
| 歯底R | rf | mm | 0.46875 | 0.46875 | 0.30000 | 0.30000 |

図 5.39 諸元設定

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|------------|------------|-----|-----------|-------------|-------------|-----------|
| 正面圧力角 | α_t | deg | 21.172832 | 21.172832 | 21.172832 | 21.172832 |
| 基礎円角ねじれ角 | β_b | deg | 18.747237 | 18.747237 | 18.747237 | 18.747237 |
| 正面法線ピッチ | Pbt | mm | 3.8963 | 3.8963 | 3.8963 | 3.8963 |
| 歯面角法線ピッチ | Pbn | mm | 3.8902 | 3.8902 | 3.8902 | 3.8902 |
| リード | pz | mm | 206.6716 | 137.7810 | 149.2628 | 585.5694 |
| 基礎円直径 | db | mm | 22.3277 | 14.8851 | 16.1255 | 63.2617 |
| 基準円直径 | d | mm | 25.9440 | 15.3627 | 17.2929 | 67.8419 |
| 最小有効直径(1F) | dt | mm | 22.3968 | 14.8937 | 16.1289 | 66.0833 |
| 最大有効直径 | dh | mm | 26.3877 | 18.4384 | 19.7294 | 70.7744 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.2668 | 1.2782 | 1.2610 | 1.0207 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.6437 | 1.5343 | 1.5515 | 1.6390 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.8125 | 2.8125 | 2.8125 | 2.6537 |
| 転位量 | xn | mm | 0.0188 | 0.0282 | 0.0110 | 0.0705 |
| 歯切転位係数 | xnc | --- | -0.0352 | -0.0219 | -0.0368 | 0.1219 |

図 5.40 寸法

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|-----------|-----|-----|----------|-------------|-------------|-----------|
| 歯直円弧歯厚 | sn | mm | 1.9314 | 1.9436 | 1.9300 | 1.8526 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 2.0554 | 2.0683 | 2.0538 | 1.9714 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 3 | 2 | 2 | 7 |
| 基準またぎ歯厚 | w | mm | 9.6145 | 6.8054 | 6.8145 | 25.1002 |
| 設計またぎ歯厚 | w' | mm | 9.5715 | 6.7674 | 6.7755 | 25.1562 |
| オホーゼリ径 | dp | mm | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 | 3.0000 |
| 基準オホーゼリ寸法 | dm | mm | 29.6053 | 21.4715 | 22.6690 | 0.0000 |
| 設計オホーゼリ寸法 | dm' | mm | 29.5215 | 21.4035 | 22.5394 | 60.4562 |
| キャリア歯たけ | HJ | mm | 1.3048 | 1.3326 | 1.3106 | 1.0137 |
| 基準キャリア歯厚 | SJ | mm | 1.9754 | 1.9801 | 1.9682 | 1.9120 |
| 設計キャリア歯厚 | SJ' | mm | 1.9299 | 1.9400 | 1.9270 | 1.8486 |

図 5.41 歯厚

| 寸法 | | 歯厚 | | かみ合い | | 効率・干渉 | |
|---------------|------------------|-----|----------|-------------|--------------|-----------------|-----------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | PLANET GEAR | PLANET And RING | |
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 21.5154 | | 21.5154 | | 21.5153 |
| かみ合い円筒間ねじれ角 | β_w | deg | 20.0431 | | 20.0431 | | 20.0431 |
| かみ合いピッチ円直径 | d_w | mm | 24.0000 | 16.0000 | 16.0000 | 17.3333 | 17.3333 66.0000 |
| 有効歯幅 | b_w | mm | 15.0000 | | 15.0000 | | 15.0000 |
| クリアランス | ck | mm | 0.3121 | 0.3121 | 0.3122 | 0.3122 | 0.3130 0.4717 |
| かみ合い長さ | ea | mm | 5.1359 | | 5.0102 | | 5.4228 |
| 近寄りかみ合い率 | e_{a1} | --- | 0.6428 | | 0.6428 | | 0.6428 |
| 遠のきかみ合い率 | e_{a2} | --- | 0.6751 | | 0.6428 | | 0.7487 |
| 正面かみ合い率 | e_{c2} | --- | 1.3179 | | 1.2857 | | 1.3916 |
| 重なりかみ合い率 | e_{β} | --- | 1.3064 | | 1.3064 | | 1.3064 |
| 全かみ合い率 | e_{γ} | --- | 2.6244 | | 2.5921 | | 2.6900 |
| 滑り率(歯先側) | σ_a | --- | 0.9353 | 0.7676 | 0.8857 | 0.9183 | 0.3284 0.8929 |
| 滑り率(歯元側) | σ_f | --- | -3.3033 | -14.4604 | -11.2336 | -7.7498 | -8.3337 -0.4890 |
| 正面法線方向バックラッシュ | jnt | mm | 0.0855 | | 0.0813 | | 0.1003 |
| バックラッシュ角度 | $j\theta$ | deg | 0.4390 | 0.6585 | 0.6280 | 0.5778 | 0.7129 0.1817 |
| 入力軸ねじれ角 | $\Sigma j\theta$ | deg | | | 1.3711 (Sun) | | |
| 最大接触直径 | d_{js} | mm | 26.3877 | 18.4364 | 18.4364 | 19.7294 | 19.7294 69.9929 |
| 最小接触直径 | d_{jf} | mm | 22.6474 | 14.8975 | 14.8975 | 16.1617 | 16.1340 66.0833 |

図 5.42 かみ合い

| 寸法 | | 歯厚 | | かみ合い | | 効率・干渉 | |
|-----------------|--|----|--------|------|---------|-------|---------|
| 効率は 0.9248 | | | | | | | |
| RING GEAR 干渉 | | | | | | | |
| 項目 | | | | | | | |
| インボリュート干渉 | | | | | | | 発生しない。 |
| トロコイド干渉 | | | | | | | 発生しない。 |
| トリミング | | | | | | | 発生しない。 |
| クリアランス (mm) | | | | | | | |
| SUN歯先とPLANET歯底 | | | 0.3121 | (mm) | | | |
| PLANET歯先とSUN歯底 | | | 0.3121 | (mm) | | | |
| PLANET歯先とRING歯底 | | | 0.3122 | (mm) | | | |
| RING歯先とPLANET歯底 | | | 0.3122 | (mm) | | | |
| PLANET歯先とRING歯底 | | | 0.3130 | (mm) | | | |
| RING歯先とPLANET歯底 | | | 0.4717 | (mm) | | | |
| 回転比 | | | | | | | |
| SUN | | | PLANET | | PLANET | | CARRIER |
| | | | | | | | RING |
| | | | 1.0000 | | -2.8636 | | 1.5944 |
| | | | | | | | -0.5455 |
| | | | | | | | 0.0000 |

図 5.43 干渉&効率

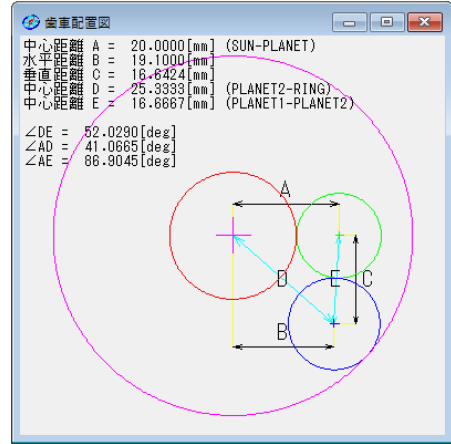


図 5.46 歯車の配置

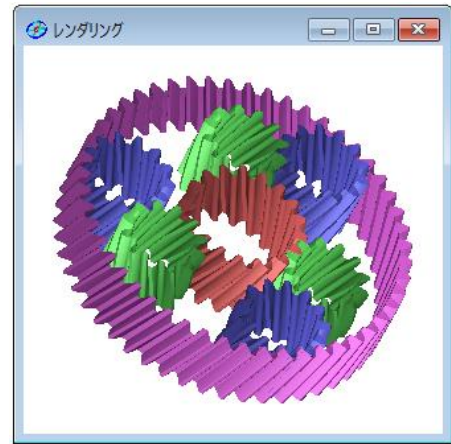


図 5.47 歯形レンダリング

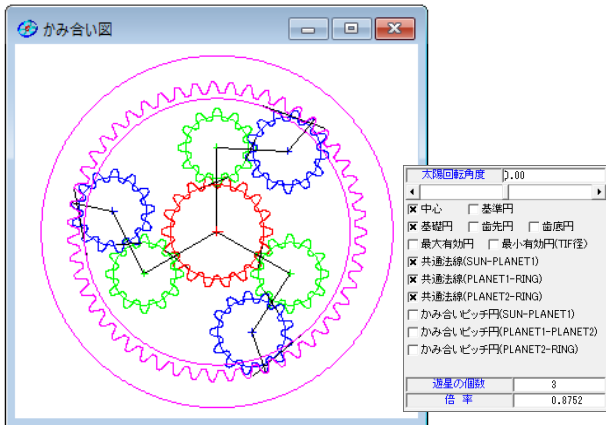


図 5.44 かみ合い 1(2D)

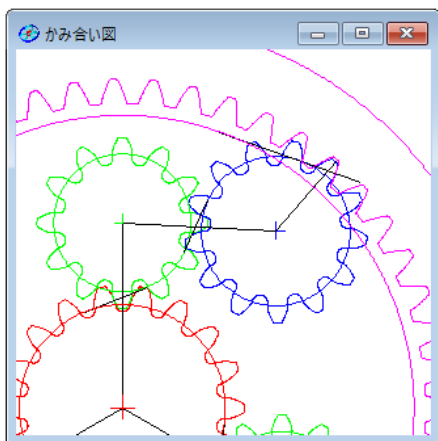


図 5.45 かみ合い 2(2D 拡大)

| 曲げ強さ | | 歯面強さ | | | | |
|----------|-----------------|------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| 項目(曲げ強さ) | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 480.5000 | 480.5000 | 480.5000 | 480.5000 |
| 曲げ有効歯幅 | b' | mm | 15.0000 | 15.0000 | 15.0000 | 15.0000 |
| 歯形係数 | YF | --- | 2.8091 | 3.2102 | 3.2936 | 2.0650 |
| 荷重分布係数 | Y ϵ | --- | 0.7588 | 0.7778 | 0.7778 | 0.7186 |
| ねじれ角係数 | Y β | --- | 0.8333 | 0.8333 | 0.8333 | 0.8333 |
| 寿命係数 | KL | --- | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 寸法係数 | KFx | --- | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.0942 | 1.0942 | 1.0942 | 1.0942 |
| 速度補正係数 | KVo | --- | --- | --- | --- | --- |
| 温度係数 | KT | --- | --- | --- | --- | --- |
| 潤滑係数 | KLo | --- | --- | --- | --- | --- |
| 材質係数 | KM | --- | --- | --- | --- | --- |
| 呼び円周力 | Ft | N | 1888.8880 | 1862.1708 | 1892.4988 | 1921.3256 |
| 許容円周力 | Ftlim | N | 8862.3636 | 3297.6611 | 3208.2736 | 5548.5157 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 2.7813 | 2.4209 | 2.4077 | 4.1392 |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 172.7568 | 196.4810 | 199.5672 | 114.4264 |

図 5.48 強度結果(曲げ)

| 歯面強さ | | 歯面強さ | | | | |
|----------|-------------------------|------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| 項目(歯面強さ) | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 1275.0001 | 1275.0001 | 1275.0001 | 1275.0001 |
| 歯面有効歯幅 | b_w | mm | 15.0000 | 15.0000 | 15.0000 | 15.0000 |
| 接触係数 | ZH | --- | 2.3505 | 2.3505 | 2.3505 | 2.3505 |
| 材料定数係数 | ZM (MPa) ^{0.5} | --- | 189.8000 | 189.8000 | 189.8000 | 189.8000 |
| かみ合い率係数 | Z ϵ | --- | 0.8711 | 0.8819 | 0.8819 | 0.8477 |
| 寿命係数 | NHL | --- | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 粗さ係数 | ZR | --- | 0.9109 | 0.9067 | 0.9067 | 0.9165 |
| 潤滑係数 | ZV | --- | 0.9649 | 0.9649 | 0.9649 | 0.9649 |
| 硬さ比係数 | Z β | --- | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 荷重分布係数 | KH β | --- | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.0938 | 1.0938 | 1.0938 | 1.0938 |
| 弾性係数 | E | --- | --- | --- | --- | --- |
| 呼び円周力 | Fc | N | 1892.1371 | 1865.3566 | 1895.6165 | 1924.4158 |
| 許容円周力 | Fclim | N | 825.3408 | 691.8104 | 691.8104 | 2139.0299 |
| 歯面強さ | sfc | --- | 0.5933 | 0.5087 | 0.5100 | 1.6151 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 1855.3000 | 1781.1822 | 1771.5669 | 1008.2611 |

図 5.49 強度結果(歯面)

歯形データファイル出力や、すべり率グラフなどは基本ソフトウェアと同じです。

5.14 不等配置遊星歯車 (オプション)

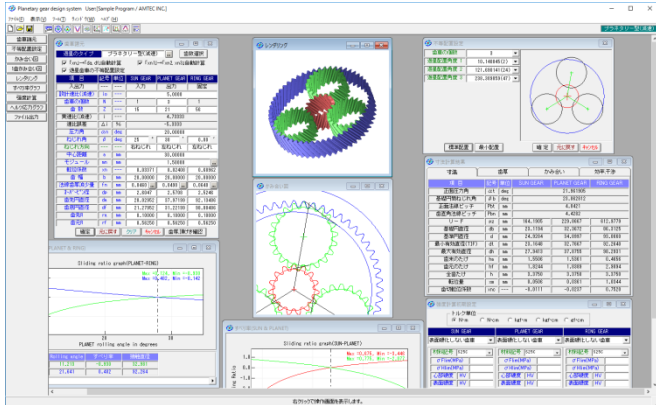


図 5.50 不等配置遊星設計例

5.14.1 不等配置遊星歯車の概要

Planetary gear design systemのオプションとして「不等配置遊星歯車」を設けました。

5.14.2 不等配置遊星歯車の設計例

プラネタリー型(減速)の不等配置の設計例を以下に示します。

図 5.51 の場合、等配置の条件では太陽歯数 15、遊星歯数 21、内歯車歯数 57 となりますが、ここで内歯車歯数を 56 とする場合は、図 5.51 の不等配置の設定を **遊星歯車の不等配置設定** とすることで計算可能となります。

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|----------|----------------|-----|----------|-------------|-----------|
| 入出力 | --- | --- | 入力 | 出力 | 固定 |
| 設計速比(減速) | io | --- | | 5.0000 | |
| 歯車の個数 | N | --- | 1 | 3 | 1 |
| 歯数 | Z | --- | 15 | 21 | 57 |
| 実速比(減速) | i | --- | | 4.80000 | |
| 速比誤差 | Δi | % | | -4.0000 | |
| 圧力角 | α_n | deg | | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 25 | 30 | 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ | 左ねじれ |
| 中心距離 | a | mm | | 30.00000 | |
| モジュール | m _n | mm | | 1.50000 | |
| 転位係数 | x _n | --- | 0.03371 | 0.02408 | 0.08187 |
| 歯幅 | b | mm | 20.00000 | 20.00000 | 20.00000 |
| 法線歯厚減少量 | f _n | mm | 0.0480 | 0.0490 | 0.0640 |
| オグベ径 | dp | mm | 2.6047 | 2.5708 | 2.5246 |
| 歯先円直径 | da | mm | 28.02952 | 37.97199 | 91.97950 |
| 歯根円直径 | df | mm | 21.27952 | 31.22199 | 98.72950 |
| 歯先R | ra | mm | 0.10000 | 0.10000 | 0.10000 |
| 歯元R | rf | mm | 0.56250 | 0.56250 | 0.56250 |

図 5.51 等配置遊星歯車の諸元

内歯車の歯数を 56 に変更した入力画面を図 5.52 に示します。モジュールは図 5.51 と同じく $m_n 1.5$ にしていますので内歯車の転位係数が少し大きくなっています。例題では、はずば歯車について示していますが平歯車も設計することができます。

また、[歯厚・頂げき確認]の機能も使用可能ですが、ここでは説明を省略します。詳しくは図 5.6 をご覧ください。図 5.53~5.55 に寸法結果等を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|----------|----------------|-----|----------|-------------|-----------|
| 入出力 | --- | --- | 入力 | 出力 | 固定 |
| 設計速比(減速) | io | --- | | 5.0000 | |
| 歯車の個数 | N | --- | 1 | 3 | 1 |
| 歯数 | Z | --- | 15 | 21 | 56 |
| 実速比(減速) | i | --- | | 4.73333 | |
| 速比誤差 | Δi | % | | -5.3333 | |
| 圧力角 | α_n | deg | | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 25 | 30 | 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ | 左ねじれ |
| 中心距離 | a | mm | | 30.00000 | |
| モジュール | m _n | mm | | 1.50000 | |
| 転位係数 | x _n | --- | 0.03371 | 0.02408 | 0.08962 |
| 歯幅 | b | mm | 20.00000 | 20.00000 | 20.00000 |
| 法線歯厚減少量 | f _n | mm | 0.0480 | 0.0490 | 0.0640 |
| オグベ径 | dp | mm | 2.6047 | 2.5708 | 2.5246 |
| 歯先円直径 | da | mm | 28.02952 | 37.97199 | 92.13486 |
| 歯根円直径 | df | mm | 21.27952 | 31.22199 | 98.88486 |
| 歯先R | ra | mm | 0.10000 | 0.10000 | 0.10000 |
| 歯元R | rf | mm | 0.56250 | 0.56250 | 0.56250 |

図 5.52 不等配置遊星歯車の諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|-------------|-----------------|-----|----------|-------------|-----------|
| 正面圧力角 | α_t | deg | | 21.961905 | |
| 基礎円間ねじれ角 | β_b | deg | | 23.862012 | |
| 正面法線ピッチ | Pbt | mm | | 4.8421 | |
| 歯面角法線ピッチ | Pbn | mm | | 4.4282 | |
| リード | pz | mm | 164.1905 | 229.8667 | 612.9779 |
| 基礎円直径 | db | mm | 23.1194 | 32.3672 | 88.3125 |
| 基準円直径 | d | mm | 24.9284 | 34.8997 | 93.0660 |
| 最小有効歯径(TIF) | dt | mm | 23.1648 | 32.7667 | 92.2840 |
| 最大有効歯径 | dh | mm | 27.9413 | 37.8755 | 98.2931 |
| 歯元のたけ | ha | mm | 1.5506 | 1.5361 | 0.4656 |
| 歯先のたけ | hf | mm | 1.8244 | 1.8389 | 2.3094 |
| 全歯たけ | h | mm | 3.3750 | 3.3750 | 3.3750 |
| 転位量 | x _m | mm | 0.0506 | 0.0361 | 1.0344 |
| 歯転位係数 | x _{nc} | --- | -0.0111 | -0.0297 | 0.7520 |

図 5.53 寸法結果[不等配置]

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|---------------|---------------------|-----|----------|--------------|-----------|
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 22.3654 | | 25.9615 |
| かみ合い円間ねじれ角 | β_w | deg | 25.5693 | | 26.1978 |
| かみ合いピッチ円直径 | dw | mm | 25.0000 | 35.0000 | 36.0000 |
| 有効歯幅 | b _w | mm | 20.0000 | | 20.0000 |
| クリアランス | ck | mm | 0.3742 | 0.3742 | 0.4564 |
| かみ合い長さ | sa | mm | 6.2653 | | 6.6678 |
| 近寄りかみ合い率 | ϵ_{a1} | --- | 0.6559 | | 0.9732 |
| 遠のきかみ合い率 | ϵ_{a2} | --- | 0.6380 | | 0.4038 |
| 正面かみ合い率 | ϵ_{α} | --- | 1.2939 | | 1.3770 |
| 重なりかみ合い率 | ϵ_{β} | --- | 1.8271 | | 1.8271 |
| 全かみ合い率 | ϵ_{γ} | --- | 3.1211 | | 3.2042 |
| 滑り率(歯先側) | σ_a | --- | 0.6750 | 0.7751 | 0.1243 |
| 滑り率(歯元側) | σ_f | --- | -3.4456 | -2.0769 | -0.3299 |
| 正面法線方向バックラッシュ | j _{nt} | mm | 0.1039 | | 0.1236 |
| バックラッシュ角度 | j θ | deg | 0.5149 | 0.3678 | 0.4374 |
| 入力軸バックラッシュ角度 | $\Sigma j\theta$ | deg | | 1.1273 (Sun) | |
| 最大接触直径 | d _{ja} | mm | 27.9413 | 37.8755 | 37.8755 |
| 最小接触直径 | d _{jf} | mm | 23.3344 | 33.1452 | 32.9812 |

図 5.54 かみ合い数値[不等配置]

| 項目 | 値 |
|-----------------|-------------|
| 効率 | 0.9834 |
| RING GEAR 干渉 | |
| インボリュート干渉 | 発生しない。 |
| トロコイド干渉 | 発生しない。 |
| トリミング | 発生しない。 |
| クリアランス (mm) | |
| SUN歯先とPLANET歯底 | 0.3742 (mm) |
| PLANET歯先とSUN歯底 | 0.3742 (mm) |
| PLANET歯先とRING歯底 | 0.4564 (mm) |
| RING歯先とPLANET歯底 | 0.4564 (mm) |
| 回転比 | |
| SUN | 1.0000 |
| PLANET | -0.3521 |
| RING | 0.0000 |
| CARRIER | 0.2113 |

図 5.55 干渉効率[不等配置]

ツールバーの **不等配置設定** をクリックすることで図 5.56 を表示します。不等配置の表示は、図 5.56 の[A1]歯車が基準歯車となります。また、不等配置角度は任意に入力することができますので図 5.57 の[B]に示す角度表の中から選択します。遊星歯車の配置角度は、例題の場合、71 種類存在します。

図 5.56 の[最小配置]をクリックすると[A2]歯車と[A3]歯車の歯先円が接することがないように配置した図を図 5.58 に示します。

今、図 5.57 の[B]の角度の中から 2 番目の 10.1408 度を選択した場合の歯形かみ合いを図 5.59 に、[C]の拡大図を図 5.60 に、また、歯形レンダリングを図 5.61 に示します。

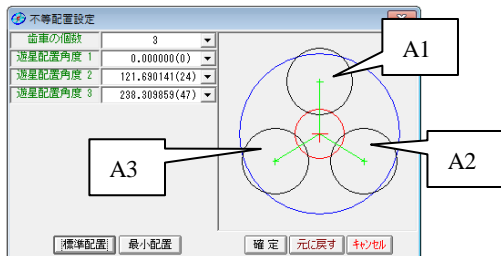


図 5.56 不等配置 1

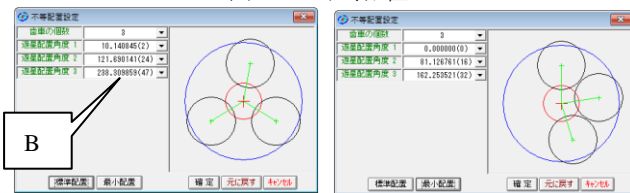


図 5.57 不等配置 2

図 5.58 不等配置 3

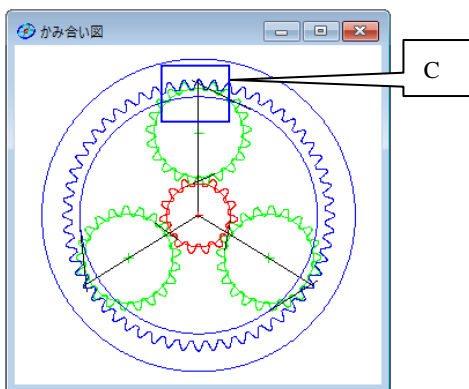


図 5.59 不等配置かみ合い

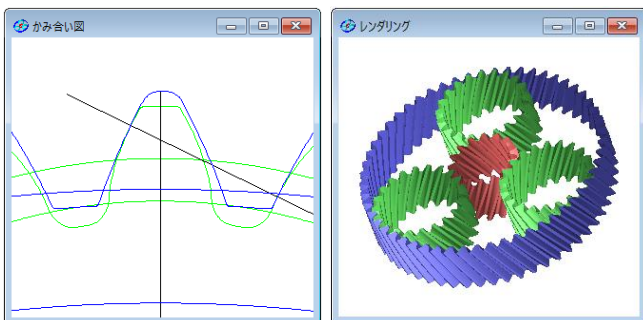


図 5.60 かみ合い[C]部

図 5.61 レンダリング

その他、強度計算、歯形データファイル出力などは基本ソフトウェアと同じです。遊星の個数を 5 としたときの計算例を図 5.62 ~ 5.64 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | SUN GEAR | PLANET GEAR | RING GEAR |
|----------|------------|-----|----------|-------------|-----------|
| 入出力 | --- | --- | 入力 | 出力 | 固定 |
| 設計速比(減速) | io | --- | --- | 5.0000 | --- |
| 歯車の個数 | N | --- | 1 | 5 | 1 |
| 歯数 | Z | --- | 18 | 14 | 45 |
| 実速比(減速) | i | --- | --- | 3.81250 | --- |
| 速比誤差 | Δi | % | --- | -23.7500 | --- |
| 圧力角 | α_n | deg | --- | 20.00000 | --- |
| ねじれ角 | β | deg | 20 | 30 | 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ | 左ねじれ |
| 中心距離 | a | mm | --- | 30.00000 | --- |
| モジュール | mn | mm | --- | 1.80000 | --- |
| 転位係数 | xn | --- | 0.34113 | 0.38987 | 0.51135 |
| 歯幅 | b | mm | 20.00000 | 20.00000 | 20.00000 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0480 | 0.0490 | 0.0640 |
| 外分円径 | do | mm | 2.8047 | 2.5708 | 2.5246 |
| 歯先円径 | da | mm | 35.57522 | 31.90729 | 84.71722 |
| 歯根円径 | df | mm | 27.47522 | 23.80729 | 92.81722 |
| 歯先R | ra | mm | 0.10000 | 0.10000 | 0.10000 |
| 歯根R | rf | mm | 0.58250 | 0.58250 | 0.58250 |

図 5.62 不等配置設計例 2

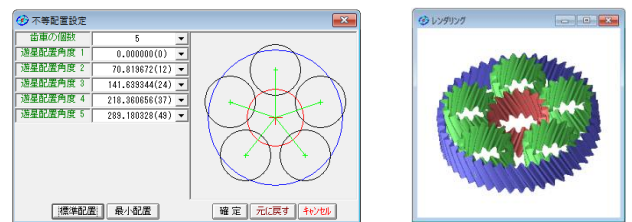


図 5.63 不等配置角度

図 5.64 歯形レンダリング

5.15 歯形データファイル出力

生成した歯車の歯形は図 5.65 でファイル出力することができます。図 5.66 および図 5.67 に CAD 作図例を示します。



図 5.65 ファイル出力 (歯形データ)

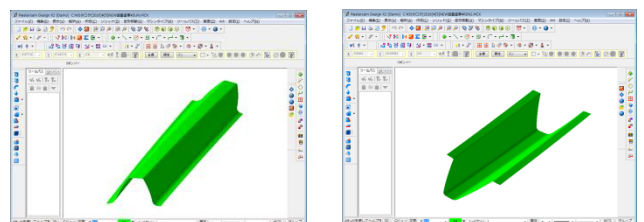


図 5.66 CAD 作図例 (太陽)

図 5.67 CAD 作図例 (内歯)

5.16 HELP 機能

操作方法を知りたい場合は[HELP]機能を使うことができます。

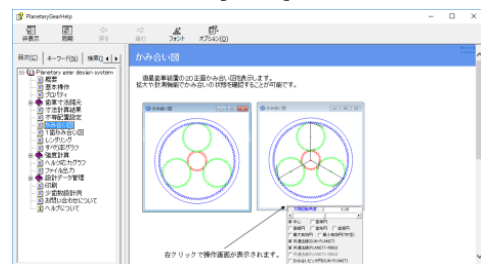


図 5.68 HELP 機能

[6] Hob Erase (歯車電極用エンドミル歯形解析)

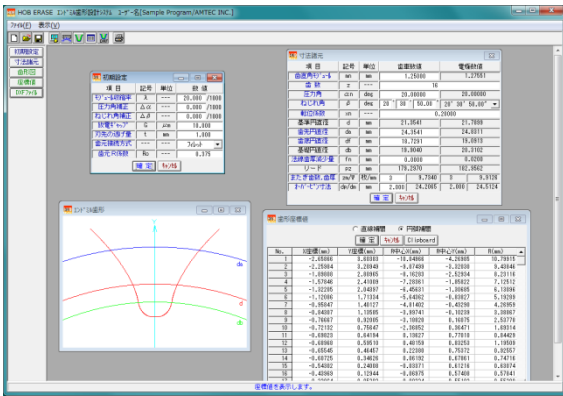


図 6.1 Hob Erase

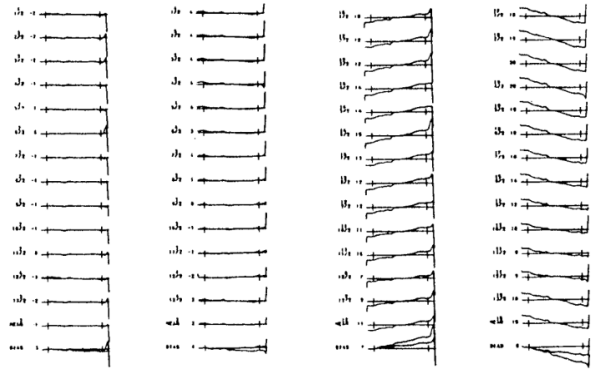


図 6.2 歯形試験結果 1

図 6.3 歯形試験結果 2

6.1 概要

歯車電極用エンドミル歯形解析ソフトウェア **Hob Erase**(ホブイレーズ)は、収縮率、放電ギャップ、圧力角補正、ねじれ角補正を考慮し切削時の包絡線軌跡を解析したエンドミル歯形座標値を決定するソフトウェアです。図 6.1 に、全体画面を示します。

エンドミル歯形は、歯車の歯直角断面歯形ではなく切削時の包絡線軌跡を解析し座標値を決定しています。平歯車の場合は、歯車歯形とエンドミル歯形は一致しますが、はすば歯車の場合は歯数が少ない程、また、ねじれ角が大きいほどエンドミル歯形と歯車歯形の差が大きくなります。歯車のインボリュート面は歯形解析により決定し、歯底付近のフィレットカーブは創成運動に基づいて決定していますので完全な理論歯形となります。Hob Erase は、インボリュート平、はすば歯車(外歯車)に適用します。

6.2 初期設定

初期設定では、①モジュール収縮率、②圧力角補正率、③ねじれ角補正率、④放電ギャップ、⑤歯元R係数を設定します。収縮率を考慮したモジュールを入力する場合は、収縮率に 0 を入力します。

6.3 入力項目

歯車諸元の入力は、①モジュール、②歯数、③圧力角、④ねじれ角、⑤転位係数、⑥歯先円直径、⑦歯底円直径、⑧歯厚減少量を入力します。

6.4 出力項目

- (1) エンドミル歯形を画面作図します。
- (2) エンドミル歯形座標値を表示します。(円弧補間座標値)
- (3) 歯形 DXF ファイルを出力します。

理論座標値を 0.5 μ m の精度で円弧補間データに変換します。

- (4) 諸元を印刷します。
- (5) 歯形図を印刷します。
- (6) 設計データの登録(読み込み)をします。

6.5 エンドミル加工による歯形試験結果例

図 6.2 の歯形試験結果 1 は、収縮率=2%、圧力角補正=0、ねじれ角補正=0 としてエンドミルの刃形を Hob Erase で求め製作した歯車の検査結果を示します。図 6.3 の歯形試験結果 2 は、相当平歯車歯形をエンドミルの刃形として製作した歯車の検査結果を示します。

[7] Differential change gear calculation system (有理数分解)



図 7.1 有理数分解(差動換え歯車)

7.1 概要

- (1) 有理数分解ソフトウェアは、小数点数値を 2 種類の分数に分解するソフトウェアです。全体画面を図 7.1 に示します。
- (2) 分数に分解する数値は、図 7.2 のように小数点数値を直接入力する方法とホブ盤を登録(名称、定数、歯数最大、歯数最小)し、モジュール、ねじれ角を入力して計算する 2 種類の方法があります。図 7.3 にホブ盤の登録例を示します。
- (3) 分解精度は、小数点以下 6 桁以上の精度で歯数の組み合わせ全てを表示します。また、図 7.2 のように同歯数を含まない表示とすることもできます。
- (4) 減速歯車の歯数決定にも使用することができます。



図 7.2 リード数値入力方式の例



図 7.3 ホブ盤登録の例

[8] Tooth thickness converter (転位歯厚変換)

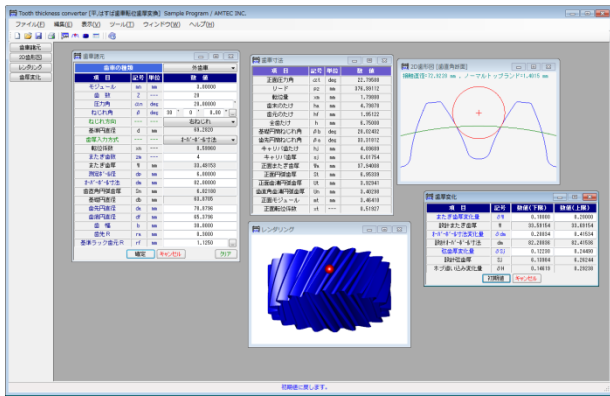


図 8.1 転位歯厚変換

8.1 概要

転位歯厚変換 (図 8.1)は、歯厚と転位係数の関係を計算するソフトウェアです。

- (1) 歯車の種類:インボリュート歯車(外歯車, 内歯車)
- (2) 使用するピン (ボール) を歯形上に作図しますのでスプラインなどの歯たけが低い歯形には、Dカットピンの使用限界を知ることができます (図 8.4 および図 8.5 参照)。
- (3) またぎ歯厚, オーバーピン寸法, 弦歯厚の変化量そしてホブの追い込み量の関係を計算します。

8.2 歯車諸元入力

モジュール, 歯数, 圧力角, ねじれ角を入力し, 歯厚は, ①転位係数, ②またぎ歯厚, ③オーバーボール寸法, ④円弧歯厚の4種類あります。ここでは図 8.2 のようにオーバーボール寸法を基準に計算する例を示します。歯先円直径, 歯底円直径は並歯の標準値が入力されますが, 変更は可能です。諸元入力後, [確定]で図 8.3 の寸法結果を表示します。



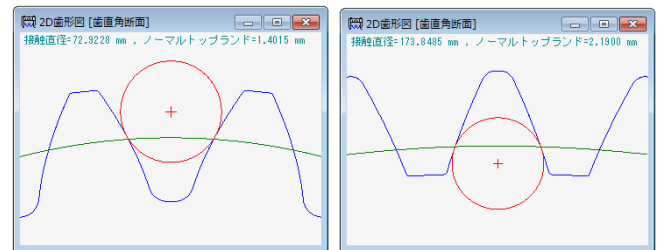
図 8.2 諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-----------|------------|-----|-----------|
| 正面圧力角 | αt | deg | 22.79588 |
| リード | pz | mm | 376.99112 |
| 転位量 | xm | mm | 1.79880 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 4.79878 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.95122 |
| 全歯たけ | h | mm | 6.75000 |
| 基礎円筒ねじれ角 | βb | deg | 28.02432 |
| 歯先円筒ねじれ角 | βa | deg | 33.31812 |
| キャリバ歯たけ | hj | mm | 4.89689 |
| キャリバ歯厚 | sj | mm | 6.01754 |
| 正面またぎ歯厚 | Wa | mm | 37.94008 |
| 正面円弧歯厚 | St | mm | 6.95339 |
| 正面歯溝円弧歯厚 | Ut | mm | 3.92941 |
| 歯直角歯溝円弧歯厚 | Un | mm | 3.40298 |
| 正面モジュール | mt | mm | 3.46410 |
| 正面転位係数 | xt | --- | 0.51927 |

図 8.3 寸法結果

8.3 2D 歯形図

図 8.4 に歯形と測定ボールの位置を示します。図 8.4(a)は図 8.2 の歯車ですが, 図 8.4(b)は内歯車の例を示します。

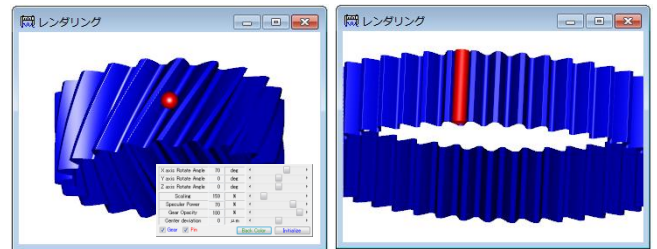


(a)外歯車 (b)内歯車

図 8.4 歯形と測定ボールの位置関係

8.4 レンダリング

図 8.5 に3次元歯形と測定ボールの位置を示します。



(a)はすば歯車 (ボール) (b)平歯車 (ピン)

図 8.5 歯形と測定ボールの位置関係

8.5 歯厚変化

図 8.6 のように, またぎ歯厚, オーバーピン寸法, 弦歯厚変化量のうちいずれか1種類を入力することにより他の2種類の歯厚変化量とホブ追い込み量を表示します。

| 項目 | 記号 | 数値(下限) | 数値(上限) |
|--------------|-------------|----------|----------|
| またぎ歯厚変化量 | δW | 0.10000 | 0.20000 |
| 設計またぎ歯厚 | W | 33.59154 | 33.69154 |
| オーバーボール寸法変化量 | δdm | 0.20834 | 0.41534 |
| 設計オーバーボール寸法 | dm | 82.20836 | 82.41536 |
| 弦歯厚変化量 | δSj | 0.12230 | 0.24490 |
| 設計弦歯厚 | Sj | 6.13984 | 6.26244 |
| ホブ追い込み変化量 | δH | 0.14619 | 0.29238 |

図 8.6 歯厚変化

[9] Elliptical gear design system (楕円系歯車)

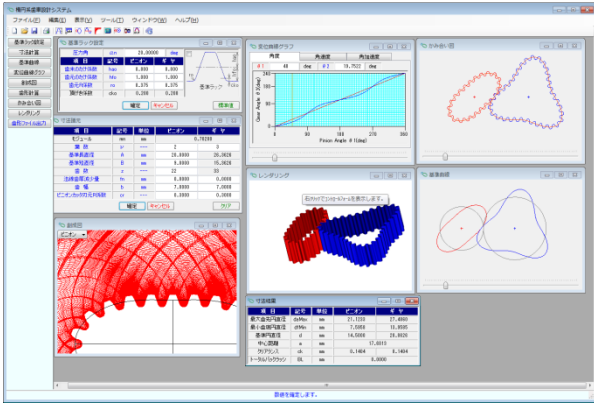


図 9.1 Elliptical gear design system

9.1 概要

非円形歯車はカムに比較して滑りが少なく、リンク機構に比較してコンパクトな設計ができます。また、確実に荷重を伝達することができるなど非常に有利な特徴を有しています。

楕円系歯車設計システム(Elliptical gear design system)は、作図例に示しますように同葉数だけでなく異葉数の設計も可能です。

9.2 諸元入力画面

基準ラックを図 9.1 に、諸元入力画面を図 9.2 に示します。例題の場合、ピニオンの葉数を 2、ギヤの葉数を 3 としていますが、葉数は、1~10 の範囲で設定することができます。



図 9.2 基準ラック



図 9.3 諸元入力

9.3 寸法結果

図 9.3 に楕円系歯車の寸法結果を示します。



図 9.4 楕円系歯車の寸法

9.4 楕円系歯車の基準線

図 9.5 に楕円系歯車の基準線を示します。

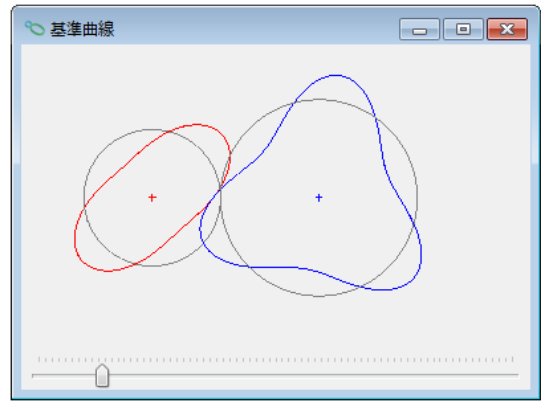
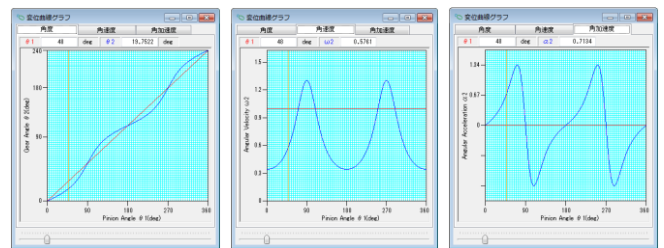


図 9.5 基準線

9.5 変位曲線グラフ

角度変位、角速度変位、角加速度変位グラフを図 9.6 に示します。このグラフの角度カーソルと図 9.5 及び図 9.9 の歯形軌跡図のピニオン回転角と連動しています。



(a) 角度変位

(b) 角速度変位

(c) 角加速度

図 9.6 変位曲線

9.6 歯形創成図

図 9.7 及び図 9.8 に歯形創成図を示します。

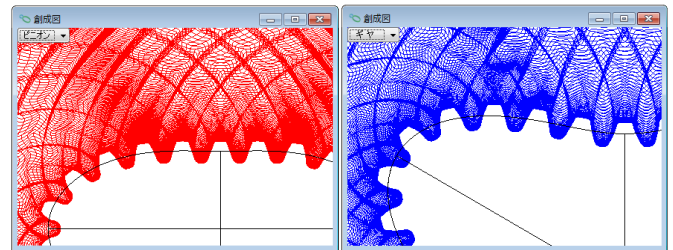


図 9.7 歯形創成図(P)

図 9.8 歯形創成図(G)

9.7 歯形軌跡図

図 9.9 に歯形軌跡図を示します。

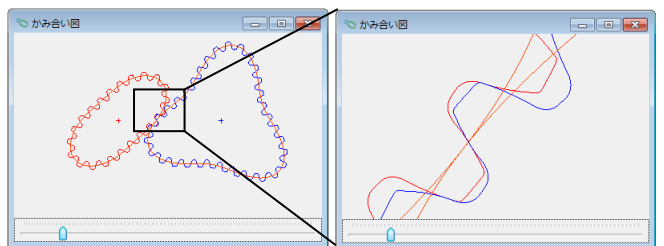


図 9.9 歯形軌跡図

9.8 歯形レンダリング

楕円系歯車の歯形レンダリングを図9.10に示します。コントロールフォームにより視点や回転角を変更することができます。

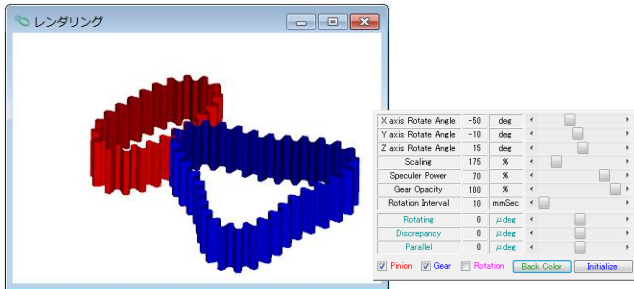


図 9.10 歯形レンダリング

9.9 歯形ファイル

楕円系歯車の歯形を CAD ファイル (DXF, 3D-IGES) で出力することができます。図 9.11 にファイル出力例を示します。

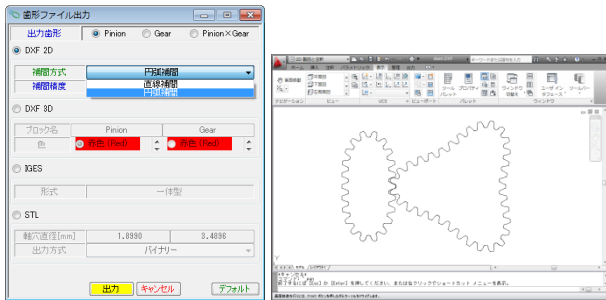


図 9.11 2D-DXF ファイル出力と作図例

9.10 作図例

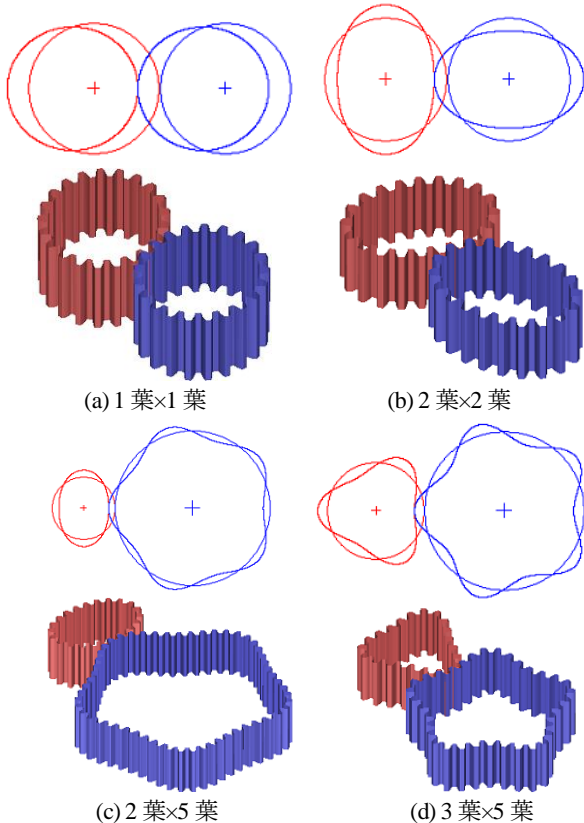
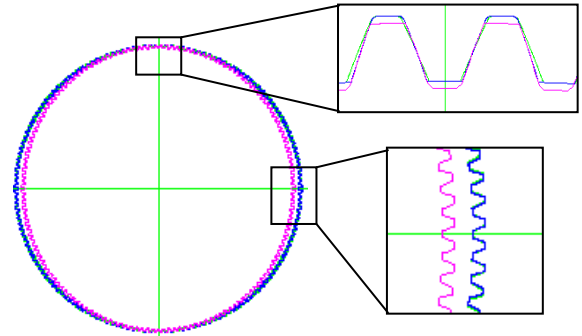


図 9.12 作図例

9.10 作図例

楕円系歯車ソフトウェアを用いて設計した波動歯車例を図9.13に示します。他の波動歯車作図例を[101], 図 101.13 に示します。



Epi_z1=164, Internal_z2=160, Internal_z3=164

図 9.13 波動歯車の作図例

※ CAM 曲線を与え、これに歯を生成するソフトウェアは、別途お問い合わせください。

[10] Worm Bite2 (ウォームバイト刃形解析)

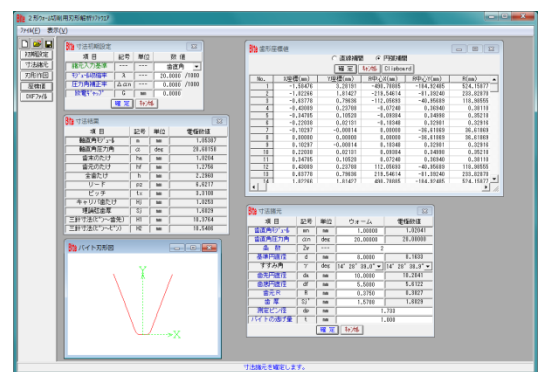


図 10.1 Worm Bite2

10.1 概要

ウォームの歯切り加工は、図 10.2 のようにフライスカッタ (または砥石) で加工する K 形 (3 形) 歯形が一般的ですが、小形のウォームや電極に使用されるウォームはバイトで切削されています。加工方法として図 10.3 のようにバイトを軸方向に対し平行に取り付けて切削すればウォームの軸方向歯形は直線となります。しかし進み角が大きくなると一方の刃のすくい角が負となり反対側では逃げ角を大きくとらなければならないため切削が困難となります。このような場合には図 10.4 のようにバイトをねじ面に対し直角に取り付けて切削する事になります。

図 10.4 のようにバイトを歯直角に取り付けてウォームを切削する (N 形ウォーム) と切削後のウォーム軸方向歯形は直線とはなりません。Worm Bite2 は切削後のウォーム軸方向歯形が直線となるようにバイトの形状を生成するソフトウェアです。

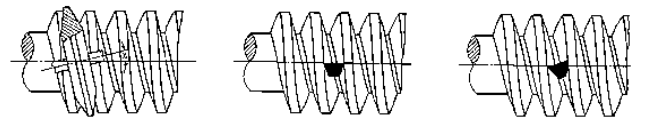


図 10.2 K 形ウォーム 図 10.3 A 形ウォーム 図 10.4 N 形ウォーム

[11] Gear navigation system

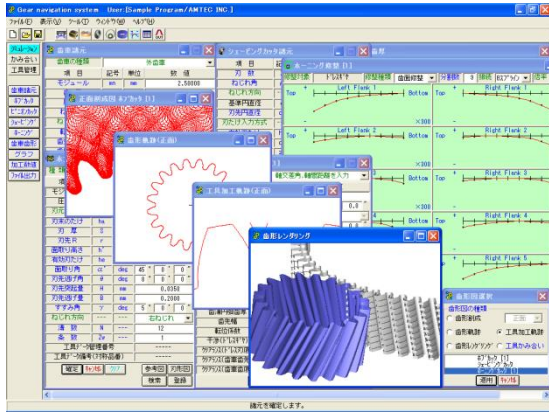


図 11.1 Gear navigation system

11.1 概要

Gear navigation system は、ホブ、ピニオンカッタ、シェービングカッタ、ホーニングの各工具による歯車加工形状解析と、そのかみ合いのシミュレーションをすることができるソフトウェアです。また、データベースによる工具管理機能を有し、条件に見合う工具を共用計算することにより検索することができます。

歯車加工シミュレーションは、歯面、歯元、歯先、面取り形状と各数値の計算、特にホーニングでは、歯形修整、歯すじ修整、歯面修整後の形状を計算しグラフ表示します。更に、かみ合いシミュレーションでは、加工後の歯形をかみ合わせて歯当たりを観察することができます。図 11.1 に Gear navigation system の画面の様子を示します。

11.2 適用歯車

- ・インボリュート平、はすば歯車
- ・外歯車、内歯車

11.3 適用工具

3.1 ホブ

標準、セミトッピング、プロチュバランス、プロチュバランスセミトッピング、転位ホブ、刃先修整ホブ
(セミトッピングホブは刃底のR面およびC面が可能)

3.2 ピニオンカッタ

標準、セミトッピング、プロチュバランス、プロチュバランスセミトッピング (セミトッピングは刃底R面、C面が可能)
ピニオンカッタは、外歯車と内歯車に適用します。

3.3 シェービングカッタ

3.4 ホーニング

ドレスギヤには、歯形修整、歯すじ修整および歯面修整の設定が可能です。また被削歯車と諸元の異なるドレスギヤを設定することも可能です。

11.4 歯車諸元設定

被削歯車の諸元設定を図 11.2 に示します。ここではホブ加工、シェービング加工、ホーニング加工を1回づつ行うものとしてドレスギヤに歯面修整を与えた場合の例を以下に示します。

| 歯車諸元 | | | |
|----------|------------|-----|---------------|
| 歯車の種類 | 外歯車 | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.50000 |
| 歯数 | Z | --- | 20 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000° |
| ねじれ角 | β | deg | 20° 0' 0.0" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 転位係数 | xn | --- | 0.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 58.2089 |
| 歯根円直径 | df | mm | 46.9589 |
| 歯幅 | b | mm | 30.0000 |
| 基準円直径 | d | mm | 53.2089 |
| 基準円ねじれ角 | db | deg | 49.6170 |
| 基礎円間ねじれ角 | β_b | deg | 18° 44' 50.1" |

図 11.2 歯車諸元設定

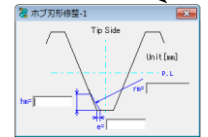
| ホブカッタ諸元 [1] | | | |
|--------------|------------|-----|-----------|
| 種類 | 標準 | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.50000 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000° |
| 刃先のたけ | ha | mm | 3.1250 |
| 刃元のたけ | hf | mm | 3.1250 |
| 刃厚 | S | mm | 3.9270 |
| 刃先R | r | mm | 0.9375 |
| すずみ角 | γ | deg | 5° 0' 0" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 溝数 | N | --- | 12 |
| 条数 | Zw | --- | 1 |
| 工具管理番号 | --- | --- | --- |
| 工具管理備考(対称品番) | --- | --- | --- |

図 11.3 標準ホブ

11.5 工具諸元設定

11.5.1 ホブ諸元設定

各種ホブの設定項目を図 11.3~11.6 に示します。ホブ諸元は、最大3工程まで設定することが可能です。入力したホブ数値の実刃形形状を[刃形図]で作図することができます。また、図 11.3 のようにホブの刃元を修整することもできます。ここでは図 11.6 のホブを使用してシミュレーションをします。



| ホブ | | | |
|--------------|------------|-----|-----------|
| 種類 | プロチュバランス | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.50000 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000° |
| 刃元の形状 | --- | --- | C面 |
| 刃先のたけ | ha | mm | 3.1250 |
| 刃厚 | S | mm | 3.9270 |
| 刃先R | r | mm | 0.9375 |
| 面取り高さ | h' | mm | 5.1000 |
| 有効刃たけ | he | mm | 6.2500 |
| 面取り角 | α' | deg | 45° 0' 0" |
| すずみ角 | γ | deg | 5° 0' 0" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 溝数 | N | --- | 12 |
| 条数 | Zw | --- | 1 |
| 工具管理番号 | --- | --- | --- |
| 工具管理備考(対称品番) | --- | --- | --- |

図 11.4 セミトッピングホブ

| ホブカッタ諸元 [1] | | | |
|--------------|------------|-----|-----------|
| 種類 | セミトッピング | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.42652 |
| 圧力角 | α_n | deg | 14.50000° |
| 刃元の形状 | --- | --- | C面 |
| 刃先のたけ | ha | mm | 3.1250 |
| 刃厚 | S | mm | 3.9270 |
| 刃先R | r | mm | 0.9375 |
| 面取り高さ | h' | mm | 5.1000 |
| 有効刃たけ | he | mm | 6.2500 |
| 面取り角 | α' | deg | 45° 0' 0" |
| すずみ角 | γ | deg | 5° 0' 0" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 溝数 | N | --- | 12 |
| 条数 | Zw | --- | 1 |
| 工具管理番号 | --- | --- | --- |
| 工具管理備考(対称品番) | --- | --- | --- |

図 11.5 プロチュバランス転位ホブ

| ホブカッタ諸元 [1] | | | |
|--------------|-----------------|-----|-----------|
| 種類 | プロチュバランスセミトッピング | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.50000 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000° |
| 刃元の形状 | --- | --- | C面 |
| 刃先のたけ | ha | mm | 3.1250 |
| 刃厚 | S | mm | 3.9270 |
| 刃先R | r | mm | 0.9375 |
| 面取り高さ | h' | mm | 5.1000 |
| 有効刃たけ | he | mm | 6.2500 |
| 面取り角 | α' | deg | 45° 0' 0" |
| 刃先すずみ角 | θ | deg | 8° 0' 0" |
| 刃先突起量 | H | mm | 0.0350 |
| 刃先逃げ量 | B | mm | 0.2000 |
| すずみ角 | γ | deg | 5° 0' 0" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 溝数 | N | --- | 12 |
| 条数 | Zw | --- | 1 |
| 工具管理番号 | --- | --- | --- |
| 工具管理備考(対称品番) | --- | --- | --- |

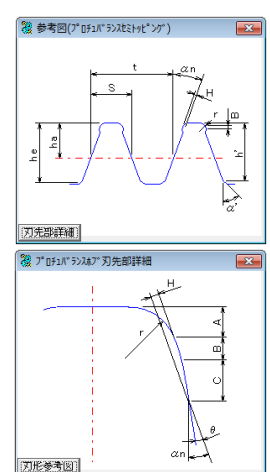


図 11.6 プロチュバランスセミトッピングホブ

11.5.2 ピニオンカッタ諸元設定

各種ピニオンカッタの設定項目を図 11.7~11.10 に示します。ピニオンカッタ諸元は、最大3工程まで設定することができます。ホブと同様に入力した数値の実刃形形状を[刃形図]で作図することができます。



図 11.7 標準ピニオン

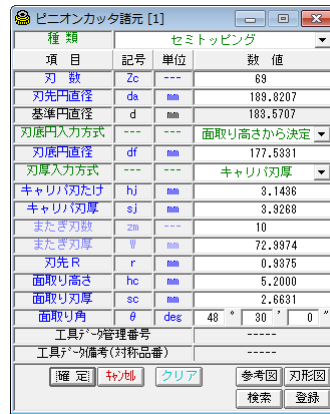


図 11.8 セミトッピングピニオン

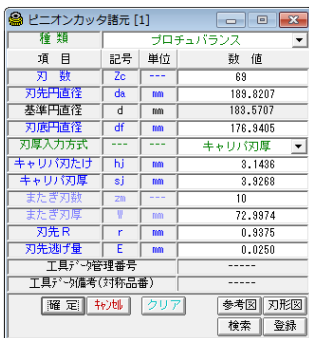


図 11.9 プロデュランスピニオン



図 11.10 プロデュランスセミトッピングピニオン

11.5.3 シェービングカッタ諸元設定

シェービングカッタ諸元設定例を図 11.11 に示します。



図 11.11 シェービングカッタ諸元

11.5.4 ホーニング諸元設定

ホーニング諸元設定は、ドレスギヤ諸元、ホーニング砥石諸元をそれぞれ設定します。ホーニングは、2 工程まで設定することができます。ドレスギヤ諸元項目を図 11.12、ドレスギヤの歯面修整設定を図 11.13、ドレスギヤ修整トポグラフを図 11.14、ホーニング砥石諸元項目を図 11.15 に示します。

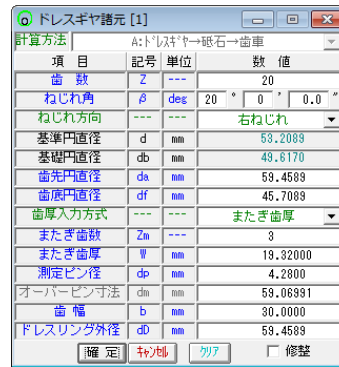


図 11.12 ドレスギヤ諸元

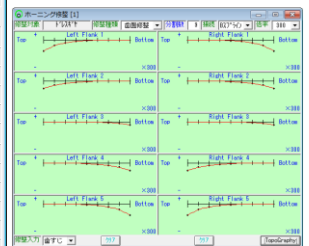


図 11.13 ドレスギヤ修整

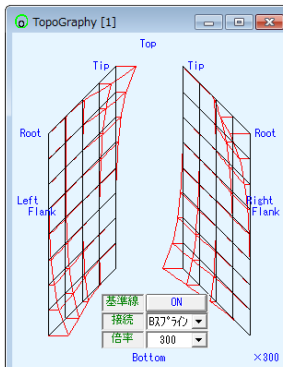


図 11.14 ドレスギヤ修整トポグラフ



図 11.15 ホーニング砥石

11.6 歯車仕上歯厚設定

各工具での歯車仕上歯厚は、またぎ歯厚、ピン寸法、円弧歯厚での設定が可能です。図 11.16 に歯車仕上歯厚設定画面を示します。本例ではホブ加工、シェービング加工、ホーニング加工を 1 回づつ行います。ホブでまたぎ歯厚 $W_1=19.350\text{mm}$ の粗加工を行い、最終のホーニング加工で $W_3=19.287\text{mm}$ に仕上げる手順を示しています。



図 11.16 歯車仕上歯厚設定

11.7 歯車歯形

諸元と加工条件を設定すると、歯車形状を表示します。歯形図では、各工具で加工した歯形形状の重ね合わせや直径、距離の計測、加工後の歯形などを容易に確認することができます。図 11.17 に歯形選択画面を、図 11.18~11.25 に解析後の歯形を示します。

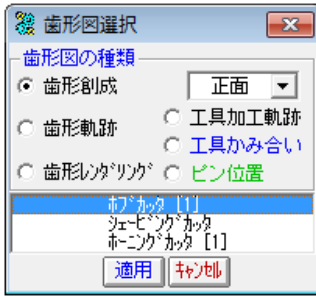


図 11.17 歯形選択

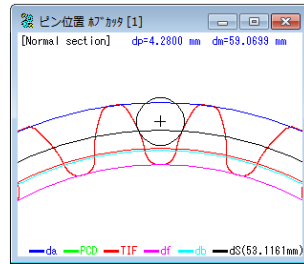


図 11.17a ピン位置図

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|------------|-----------------|----------|
| 半径方向面取り長さ | hp | mm | 0.2609 |
| 円周方向面取り長さ | hk | mm | 0.1680 |
| 面取り開始直径 | dh | mm | 57.6870 |
| 歯先幅 | Sc | mm | 1.6750 |
| 歯面開始径 | fd | mm | 50.7979 |
| 作用線長さ(dh~fd) | RL | mm | 9.2689 |
| 有効歯たけ | he | mm | 3.4446 |
| 歯車体積 | V | mm ³ | 6.610E+4 |
| 歯先円直径 | da | mm | 58.2089 |
| 歯底円直径 | df | mm | 47.1436 |
| 切込み深さ | h | mm | 5.5327 |
| ホブセット角 | βs | deg | -15.0000 |
| 歯面多角形誤差 | Δe | mm | 0.0014 |

図 11.26 ホーニング加工数値

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|----|-----------------|----------|
| 半径方向面取り長さ | hp | mm | 0.3611 |
| 円周方向面取り長さ | hk | mm | 0.3273 |
| 面取り開始直径 | dh | mm | 57.4868 |
| 歯先幅 | Sc | mm | 1.2742 |
| 歯面開始径 | fd | mm | 49.9951 |
| 作用線長さ(dh~fd) | RL | mm | 11.4478 |
| 有効歯たけ | he | mm | 3.7458 |
| 歯車体積 | V | mm ³ | 6.581E+4 |
| 歯先円直径 | da | mm | 58.2089 |
| 歯底円直径 | df | mm | 46.9589 |
| 切込み深さ | h | mm | 5.6250 |

図 11.27 ピンホーニング加工数値

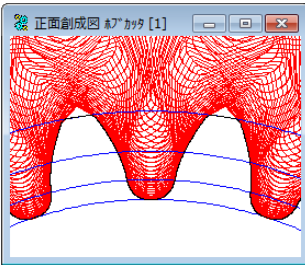


図 11.18 歯形創成図

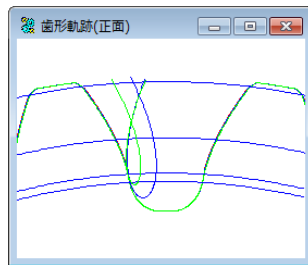


図 11.19 歯形軌跡図

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|-------------|-----------------|----------|
| 半径方向面取り長さ | hp | mm | 0.2322 |
| 円周方向面取り長さ | hk | mm | 0.1474 |
| 面取り開始直径 | dh | mm | 57.7446 |
| 歯先幅 | Sc | mm | 1.6750 |
| 歯面開始径 | fd | mm | 50.8211 |
| 作用線長さ(dh~fd) | RL | mm | 9.7535 |
| 有効歯たけ | he | mm | 3.5617 |
| 歯車体積 | V | mm ³ | 6.608E+4 |
| かみ合い中心距離 | a | mm | 116.7719 |
| 加工最小直径 | TC | mm | 50.8211 |
| 刃先と歯車歯底の隙間 | C | mm | 0.5810 |
| 歯直角かみ合い圧力角 | αnc | deg | 20.0618 |
| かみ合い率 | ϵ | --- | 1.8916 |

図 11.28 シェービングカッタ加工数値

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|----|-----------------|----------|
| 半径方向面取り長さ | hp | mm | 0.1976 |
| 円周方向面取り長さ | hk | mm | 0.1269 |
| 面取り開始直径 | dh | mm | 57.8137 |
| 歯先幅 | Sc | mm | 1.6750 |
| 歯面開始径 | fd | mm | 50.2975 |
| 作用線長さ(dh~fd) | RL | mm | 10.7144 |
| 有効歯たけ | he | mm | 3.7581 |
| 歯車体積 | V | mm ³ | 6.594E+4 |
| 加工最小直径 | TC | mm | 50.2975 |

図 11.29 ホーニング加工数値

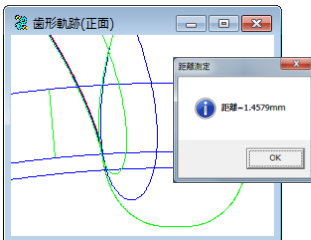


図 11.20 距離計測

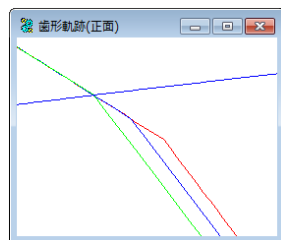


図 11.21 部分拡大

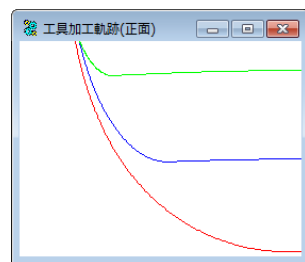


図 11.22 工具の加工軌跡

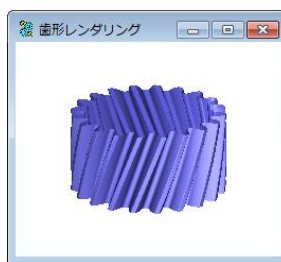


図 11.23 歯形レンダリング

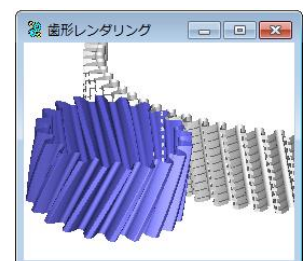


図 11.24 シェービングカッタと歯車のかみ合い

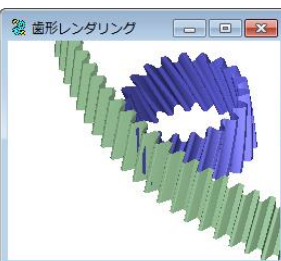


図 11.25 ホーニング砥石と歯車のかみ合い

11.8 加工数値

各工具での加工数値を図 11.26~11.29 に示します。これらの表で面取り長さ、歯面直径、歯車体積、各直径などの詳細数値を確認することができます。

11.9 歯形誤差グラフ

加工後の歯形形状を示す歯形誤差グラフを図 11.30 に示します。特に、被削歯車と異なる諸元のドレスギヤや、バイアス修整等の複雑な修整を施したドレスギヤを使用した場合、正確に歯形が加工されるか否かの判断を容易にすることができるように各直径での修整量や歯形全体の傾向を示すトポグラフ、倍率の指定など豊富な機能を備えています。

図 11.31 は、ホーニング後の歯すじ誤差グラフ例であり、歯面形状と歯すじ形状を表したトポグラフを図 11.32 に示します。

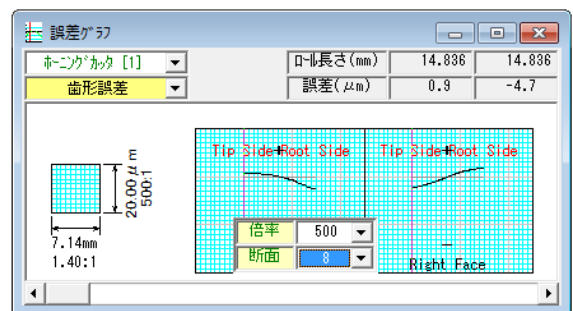


図 11.30 ホーニング後の歯形誤差グラフ例

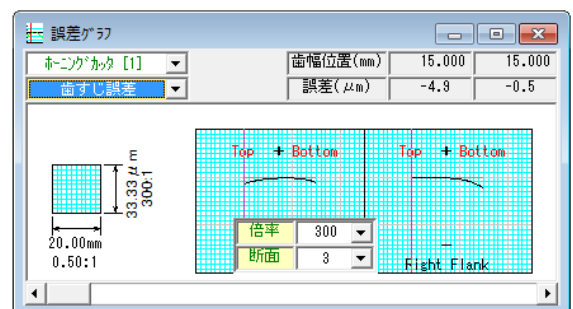


図 11.31 ホーニング後の歯すじ誤差グラフ例

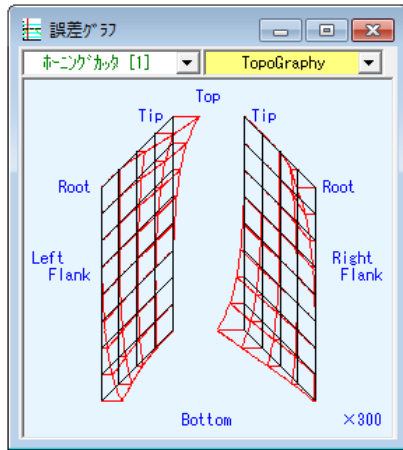


図 11.32 トポグラフ

| 項目 | 記号 | 単位 | 駆動(外) | 従動(外) |
|---------|------------|-----|-------------|-----------|
| 管理番号 | --- | --- | Demo-P | Demo-G |
| モジュール | mn | mm | 2.50000 | |
| 歯数 | Z | --- | 20 | 40 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 20° 0' 0.0" | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 転位係数 | xn | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| またぎ歯数 | Zm | --- | 3 | 6 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 19.28684 | 42.26984 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 4.2800 | 4.2800 |
| ピン寸法 | dm | mm | 58.06992 | 112.15778 |
| 歯直角円弧歯厚 | Sn | mm | 3.92699 | 3.92699 |
| 基準円直径 | d | mm | 58.2089 | 106.4178 |
| 基準円直径 | db | mm | 49.6170 | 99.2341 |
| 歯先円直径 | da | mm | 58.2089 | 111.4178 |
| 歯底円直径 | df | mm | 46.9589 | 100.1678 |
| 歯幅 | b | mm | 30.0000 | 30.0000 |
| 設計中心距離 | a | mm | 80.0000 | |
| 設計列アタリ | ck | mm | 0.8117 | 0.8117 |

図 11.36 かみ合い歯車歯形データ選択

11.10 歯形座標値ファイル出力

加工後の歯形座標値を CAD データとして出力することができます。ファイル形式は DXF と IGES をサポートしています。図 11.33 に歯形座標値ファイル出力フォームを図 11.34 に CAD 作図例を示します。



図 11.33 歯形座標値ファイル出力

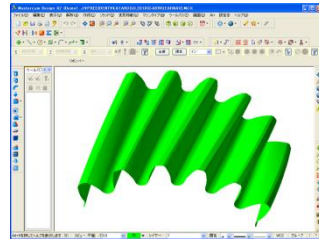


図 11.34 歯形作図例(IGES)

11.11 歯車かみ合い

加工シミュレーションした歯形データを保存しておくことで任意の歯車歯形データ同士のかみ合いシミュレーションを行うことができます。図 11.35 にかみ合いシミュレーションの画面を示します。

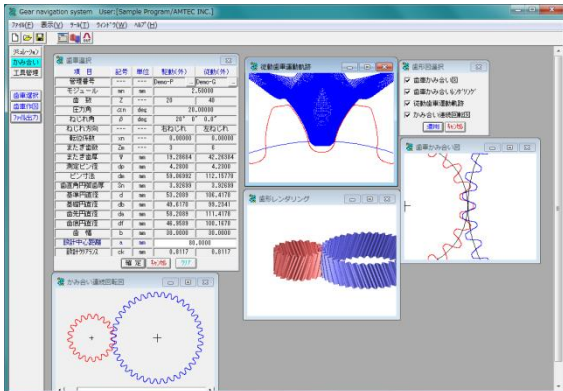


図 11.35 かみ合いシミュレーション

11.12 歯車データの選択

登録したデータから、かみ合わせる歯車のデータを選択し設定します。図 11.36 にかみ合い歯車を選択した画面を示します。

11.13 歯車かみ合い図

図 11.37 の歯形図選択で 2D 歯車かみ合い図、3D かみ合いモデル、従動歯車の回転運動軌跡、連続回転図を表示します。2D 歯車かみ合い図は、部分拡大、距離計測機能や円作図機能をサポートしていますので、かみ合いの状態を細部に渡り確認することができます。図 11.38~11.44 にかみ合い図および運動軌跡図を示します。

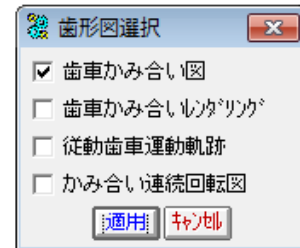


図 11.37 かみ合い歯形図選択

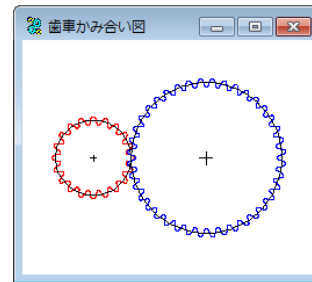


図 11.38 かみ合い図

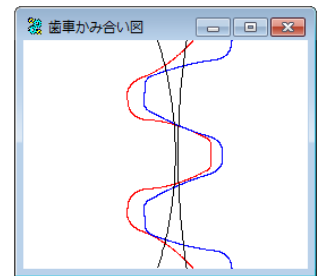


図 11.39 かみ合い図拡大

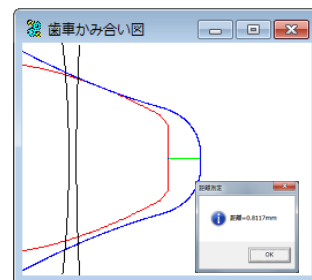


図 11.40 かみ合い図距離計測 (トップクリアランスの測定)

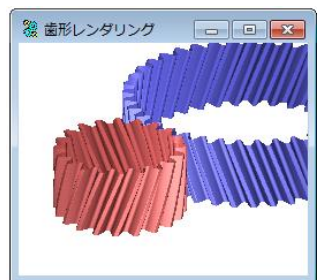


図 11.41 かみ合いレンダリング

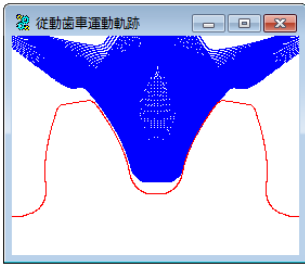


図 11.42 従動歯車運動軌跡

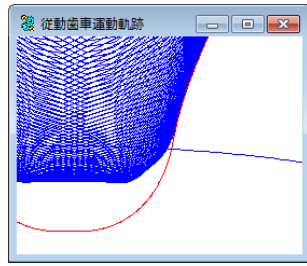


図 11.43 運動軌跡拡大

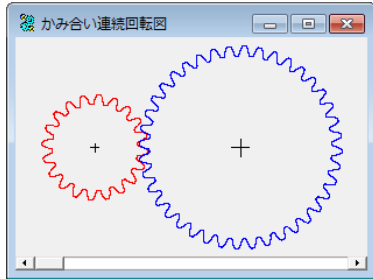


図 11.44 かみ合い連続回転

11.14 かみ合い歯形ファイル出力

かみ合った状態の歯車歯形データを CAD データとして DXF および IGES 形式で出力することができます。図 11.45 にかみ合い歯形ファイル出力フォームを示します。

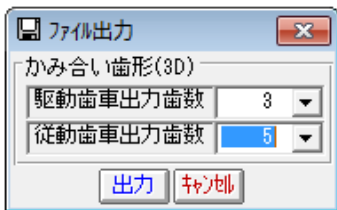


図 11.45 かみ合い歯形ファイル出力

11.15 工具管理 (オプション)

Gear navigation system は、保有の工具諸元をデータベースに登録しておくことにより、加工シミュレーション時に共用計算や加工後の面取り長さや有効歯面長さなどの条件に見合う適正工具を検索することができます。工具管理の画面の様子および設定項目を図 11.46~11.50 に示します。

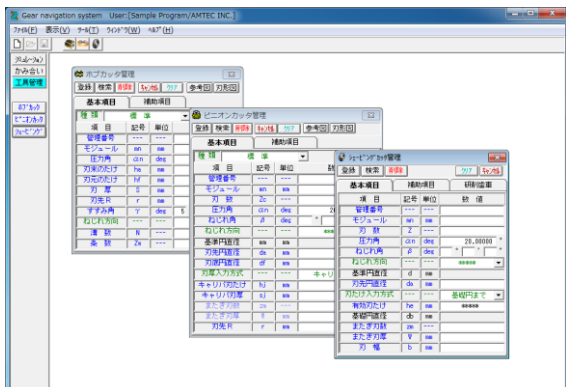


図 11.46 工具管理の画面

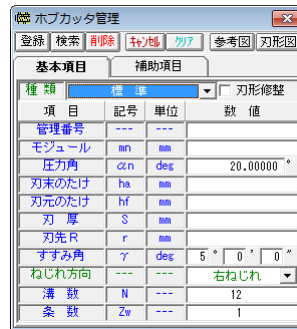


図 11.47 ホブ諸元



図 11.48 ピニオン諸元

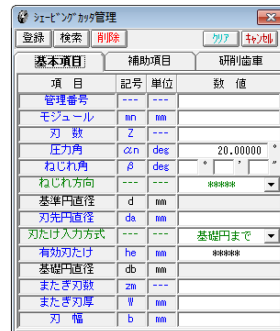


図 11.49 シェービングカッタ諸元

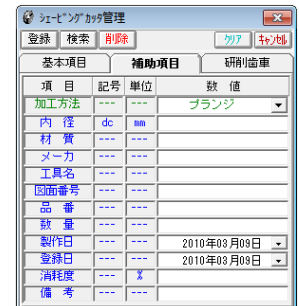


図 11.50 基礎円盤諸元

11.16 その他の機能

16.1 ホブの取り付け角度計算 (オプション), (図 11.51) 転位ホブのホブ取り付け角度を計算します。



図 11.51 ホブの取り付け角度

16.2 データベースの形式

Gear navigation system は、設計データの管理、工具管理などの情報、検索などは SQL サーバを使用して行います。

データベースを容易に構築、管理することができるように補助ツールが付属されています (図 11.52~11.53 参照)。

本ソフトウェアでは Microsoft SQL Server が必要です¹⁾。

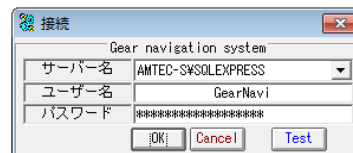


図 11.52 データベースへの接続

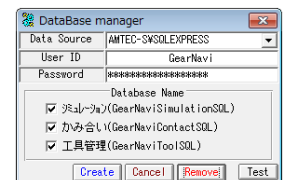


図 11.53 データベースマネージャ

1) SQL サーバを準備していない場合

データベースを mdb ファイルで管理するソフトウェアもございますのでご注文の際にお申し付けください。

※付録[B]のギヤホーニングシミュレーションをご覧ください。

[12] ANSI/AGMA2001-C95 (歯車強度計算)

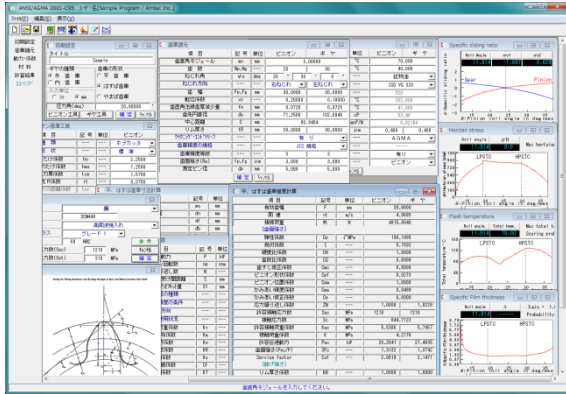


図 12.1 AGMA2001-C95

12.1 概要

AGMA2001-C95 の規格に基づいて歯車の強度計算をします。歯形の幾何係数(I, J)は、AGMA908-B89 に基づいています。

(1)適用規格

「ANSI/AGMA2001-C95」:Fundamental Rating Factors and Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth

「Annex A」:Method for Evaluating the Risk of Scuffing and Wear

「ANSI/AGMA 908-B89」:Geometry Factor for Determining the Pitting Resistance and Bending Strength of Spur, Helical and Herringbone Gear Teeth

(2)歯車の種類

インボリュート平、はすば歯車(外歯車, 内歯車)

(3)工具

ホブおよびピニオンカッタ(プロデュバランス含む)

(4)歯車の強さ

曲げ強さ, 歯面強さ, 寿命および幾何係数の詳細数値

(5)スカuffing

すべり率, ヘルツ応力, 油膜厚さ, フラッシュ温度のグラフと摩耗およびスカuffing発生確率

12.2 初期設定

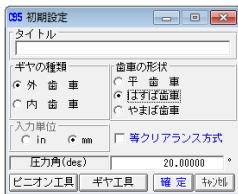


図 12.2 初期設定画面



図 12.3 工具設定画面

12.3 歯車諸元入力

(1)歯車精度は、AGMA, JIS を選択することができます。

(2)歯面粗さは Ra(μm)で入力してください。



図 12.4 歯車諸元入力画面

12.4 動力および係数入力

(1) 動荷重係数, 荷重分配係数などは[0][TAB]で理論値が入力されます。

(2) 平歯車の場合には歯先荷重または外の最悪荷重点を選択することができます。

(3) 入力する数値に関するグラフおよび表などは[表示]機能により参照する事ができます。

図 12.5 に動力および係数入力画面を示します。図 12.6 および図 12.7 に係数, グラフの表示例を示します。



図 12.5 動力及び係数設定

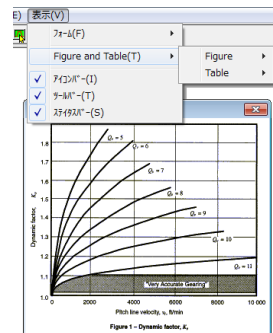


図 12.6 グラフの表示

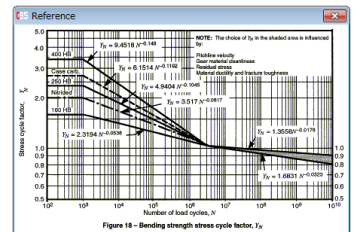


図 12.7 グラフの表示例

12.5 材料入力

(1) 図 12.8 に材料の設定画面を示します。

(2) [参考]をクリックすると材料に適応した許容応力数の表を図 12.9 のように表示します。



図 12.8 ピニオン材料の設定

| Metallurgical factor | Grade 1 | | Grade 2 | |
|---|--------------------------|--------------------------|---|---|
| | Predominantly 5 or finer | Predominantly 5 or finer | Max upper transformation products at 600K | Max upper transformation products at 600K |
| ASTM E112 grain size | Not specified | Not specified | 10% to 10.0 in | 10% to 10.0 in |
| Upper transformation products which primarily include bainite and fine pearlite | Not specified | Not specified | 10% to 10.0 in | 10% to 10.0 in |
| Decarburization and stock removal | Not specified | Not specified | None apparent at 600K; stock removal sufficient to remove any decarburization. | None apparent at 600K; stock removal sufficient to remove any decarburization. |
| Specified hardness at surface, HRC, only | See figure 8 | See figure 8 | See figure 8 | See figure 8 |
| Specified hardness at root, HRC, only | See figure 8 | See figure 8 | See figure 8 | See figure 8 |
| Cleanliness | Not specified | Not specified | AMS 2301 or ASTM A468 for wrought steel (certification not required). Castings are permissible with primary round (Type 1) surface inclusions | AMS 2301 or ASTM A468 for wrought steel (certification not required). Castings are permissible with primary round (Type 1) surface inclusions |
| Sulfur | Not specified | Not specified | 0.005% maximum for wrought | 0.005% maximum for wrought |

図 12.9 材料許容応力数

12.6 強度結果

図 12.10 に強度計算結果を示します。図 12.11 および図 12.12 に、幾何係数の詳細数値と係数を決定する際の歯形図を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|--------------------------|-----|-------|-----------|----------|
| 有効歯幅 | F | mm | 30.0000 | |
| 周速 | vt | m/s | 4.0685 | |
| 接線荷重 【歯面強さ】 | Wt | N | 4915.8040 | |
| 弾性係数 | Cp | 1/MPa | 190.1995 | |
| 幾何係数 | I | --- | 0.1592 | |
| 硬度比係数 | CH | --- | 1.0000 | |
| 歯数比係数 | CG | --- | 0.6000 | |
| 歯すじ修正係数 | Cmc | --- | 0.8000 | |
| ピニオン形状係数 | Cpf | --- | 0.0273 | |
| ピニオン位置係数 | Cpm | --- | 1.0000 | |
| かみあい精度係数 | Cma | --- | 0.0499 | |
| かみあい修正係数 | Ce | --- | 0.8000 | |
| 応力繰り返し係数 | ZN | --- | 1.0000 | 1.0229 |
| 許容接触応力係数 | Sac | MPa | 1210 | 1210 |
| 接触応力係数 | Sc | MPa | 844.7122 | |
| 許容接触荷重係数 | Kac | MPa | 5.5386 | 5.7857 |
| 接触荷重係数 | K | MPa | 4.2176 | |
| 許容伝達動力 | Pac | kW | 26.2641 | 27.4835 |
| 歯面強さ (Fac/P) | SFc | --- | 1.3132 | 1.3742 |
| Service factor 【曲げ強さ】 | Csf | --- | 2.0519 | 2.1471 |
| リム厚さ係数 | KB | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 幾何係数 | J | --- | 0.5117 | 0.5082 |
| 応力繰り返し係数 | YN | --- | 1.0176 | 1.0250 |
| 許容単位荷重 | Uat | MPa | 111.1384 | 111.1826 |
| 単位荷重 | UL | MPa | 54.8200 | |
| 許容曲げ応力係数 | Sat | MPa | 310 | 310 |
| 曲げ応力係数 | St | MPa | 124.0323 | 124.8811 |
| 許容伝達動力 | Pat | kW | 40.6951 | 40.7113 |
| 曲げ強さ (Fat/P) | SFt | --- | 2.0348 | 2.0856 |
| Service factor | Ksf | --- | 2.5434 | 2.5445 |

図 12.10 曲げ、歯面強さ結果

| Symbol | Unit | Pinion | Gear | Symbol | Unit | Pinion | Gear |
|--------|------|----------|----------|--------|------|----------|----------|
| J | --- | 0.5117 | 0.5082 | rL | mm | 13.1861 | 19.1738 |
| Y | --- | 0.5254 | 0.5318 | φns | deg | 20.0226° | 20.0226° |
| Kf | --- | 1.4898 | 1.5171 | αno | deg | 0.0124° | 0.0163° |
| φn# | deg | 31.2024° | 27.5804° | HF | mm | 1.8294 | 1.8042 |
| ΔSn | mm | 0.0255 | 0.0255 | Ch | --- | 1.3512 | |
| Xg | mm | 0.1643 | 0.0648 | Kψ | --- | 0.8762 | |
| Sn | mm | 1.8908 | 1.8181 | εnF | mm | 0.3879 | 1.0104 |
| φL | deg | 29.8892° | 26.5478° | u | mm | 0.5395 | 0.5859 |

図 12.11 幾何係数(J)

| Symbol | Unit | Value | Symbol | Unit | Value |
|--------|------|----------|--------|------|---------|
| I | --- | 0.1592 | mF | --- | 1.1147 |
| φr | deg | 22.7669° | ρm1 | mm | 4.3764 |
| Cψ | --- | 1.0000 | ρm2 | mm | 6.0844 |
| ρ1 | --- | 4.3764 | pN | mm | 2.9521 |
| ρ2 | --- | 6.0644 | Z | mm | 4.4127 |
| d | mm | 21.3522 | pb | mm | 3.1263 |
| mN | --- | 0.6997 | C1 | mm | 2.0892 |
| Cr | mm | 26.9801 | C2 | mm | 3.3556 |
| mG | --- | 1.5000 | C3 | mm | 4.1763 |
| Rm1 | mm | 10.8711 | C4 | mm | 5.1355 |
| Ro1 | mm | 11.8761 | C5 | mm | 6.4819 |
| Ro2 | mm | 17.1141 | C6 | mm | 10.4408 |
| Rb1 | mm | 9.9512 | | | |

図 12.12 幾何係数(I)

12.7 寿命結果

負荷の回数と図 12.7 グラフより曲げ強さに対する寿命時間を計算します。図 12.13 に寿命計算結果を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|------------|-----|-------|-----------|-----------|
| 【歯面強さの寿命】 | | | | |
| 予想応力繰り返し係数 | ZN' | --- | 0.873 | 0.873 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | cy/cs | 3.740E+09 | 3.740E+09 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 5.194E+04 | 7.791E+04 |
| 【曲げ強さの寿命】 | | | | |
| 予想応力繰り返し係数 | YN' | --- | 0.500 | 0.504 |
| 予想寿命負荷回数 | Nt | cy/cs | 2.149E+24 | 1.465E+24 |
| 予想寿命時間 | Lt | hrs | 2.984E+19 | 3.052E+19 |

図 12.13 寿命結果

12.8 スカフティング評価

- (1) 油(ISO 粘度グレード)は VG46~VG1500 を選択することができます。また、範囲外の場合は動粘度、平均温度などを入力することができます。(図 12.14)
- (2) 歯面粗さは Ra(μm)で入力してください。
- (3) 摩擦係数の方式は、AGMA 方式、一定値、ISO 方式を選択することができます。
- (4) すべり率、ヘルツ応力、フラッシュ温度、油膜厚さのグラフを表示します。(図 12.15~図 12.18)
- (5) 摩耗とスカフティングの発生する確率を表示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|--------------|--------|--------------------|------------|-------|
| 歯車の温度 | Gtc | °C | 70.0000 | |
| 油の温度 | Tc | °C | 40.0000 | |
| 油の種類 | --- | --- | 鉱物油 | |
| ISO グレード | --- | --- | ISO VG 420 | |
| 動粘度(40°C) | --- | --- | 320 | |
| 平均温度 | Mtc | °C | 252.0000 | |
| 標準偏差温度 | SD | °C | 41.0000 | |
| 絶対粘度 | μo | cP | 53.48 | |
| 粘圧 | α | mm ² /N | 0.02158 | |
| なじみ歯面粗さ (Ra) | σ1, σ2 | μm | 0.400 | 0.400 |
| 摩擦係数の方式 | --- | --- | AGMA | |
| 摩擦係数 | μ | --- | --- | |
| 歯形修整 | --- | --- | 有り | |
| 駆動歯車 | --- | --- | ピニオン | |

図 12.14 スカフティング評価の設定

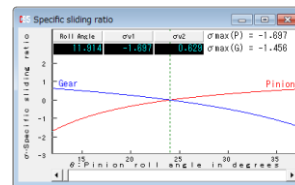


図 12.15 すべり率

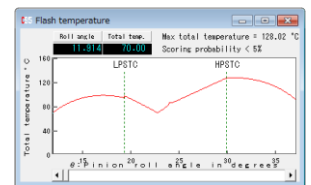


図 12.16 フラッシュ温度

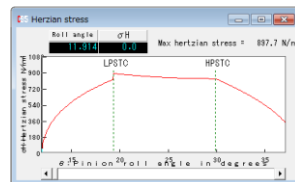


図 12.17 ヘルツ応力

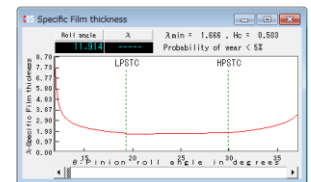


図 12.18 油膜厚さ

12.9 その他機能

- (1) データ管理画面を図 12.19 に示します。
- (2) 印刷(寸法、強度、寿命、スカフティング、グラフ)日本語印刷と英語印刷(オプション)ができます。
- (3) 係数などの図、表、グラフを表示します。
- (4) 計算結果、グラフをクリップボードに出力することができます。

| No. | 整理番号 | ギヤの種類 | 歯車の形状 | 歯直角モジュール | 圧力角 |
|-----|---------|-------|-------|----------|-----------|
| 1 | Manual | 外歯車 | はずば歯車 | 3.00000 | 20.00000° |
| 2 | sa | 内歯車 | 平歯車 | 2.00000 | 20.00000° |
| 3 | Yos | 外歯車 | 平歯車 | 5.00000 | 20.00000° |
| 4 | Hira | 外歯車 | 平歯車 | 4.00000 | 20.00000° |
| 5 | Hasuba | 外歯車 | はずば歯車 | 4.00000 | 20.00000° |
| 6 | AlphaSW | 外歯車 | 平歯車 | 2.00000 | 20.00000° |

図 12.19 データ管理設定

[13] Electroplated wheel profile design system (Diamond tool ねじ状砥石歯形)

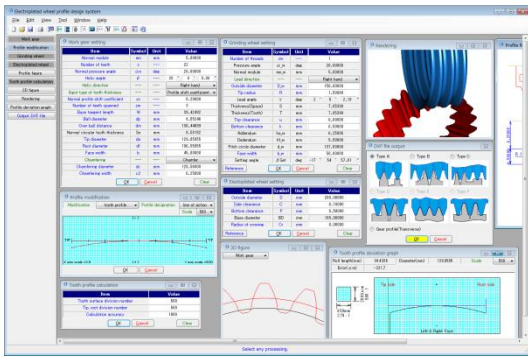


図13.1 Electroplated wheel profile design system

13.1 概要

ねじ状砥石をドレスするためのダイヤモンド工具の歯形を生成することができるソフトウェアです。歯面修整を持つ歯車を研削する場合、ダイヤモンド工具の修整量は歯車と同じではありません。また、本ソフトウェアでは 13.4 項のように歯形修整を充実させています。図 13.1 に全体画面を示します。

13.2 適用

- (1) 歯車の種類：円筒歯車（外歯車）
- (2) 歯形：インボリュート

13.3 歯車諸元設定

図 13.2 に歯車諸元を設定します。転位係数は、またぎ歯厚、またはオーバークール寸法から入力することができます。

| Item | Symbol | Unit | Value |
|----------------------------------|------------|------|---------------------------|
| Normal module | mn | mm | 5.00000 |
| Number of teeth | z | | 22 |
| Normal pressure angle | α_n | deg | 20.00000 |
| Helix angle | β | deg | 20 * 0' 0.00 |
| Helix direction | | | Right hand |
| Input type of tooth thickness | | | Profile shift coefficient |
| Normal profile shift coefficient | xn | | 0.20000 |
| Number of teeth spanned | zm | | 3 |
| Base tangent length | W | mm | 39.42492 |
| Ball diameter | dp | mm | 8.55248 |
| Over ball distance | dm | mm | 130.44639 |
| Normal circular tooth thickness | Sn | mm | 8.58192 |
| Tip diameter | da | mm | 129.05955 |
| Root diameter | df | mm | 106.55955 |
| Face width | b | mm | 45.00000 |
| Chamfering | | | Chamfer |
| Chamfering diameter | dc | mm | 128.56000 |
| Chamfering width | c2 | mm | 0.25000 |

図 13.2 諸元入力

13.4 歯形修整

歯形修整 (図 13.3) は歯形方向に最大 50 分割まで設定することができます。画面右側の数値を任意に設定することができます。

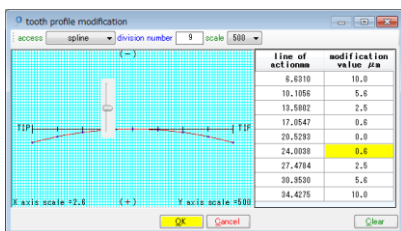


図 13.3 歯形修整

旧バージョンでの歯形修整は2種類でしたが、今回、図 13.4 のように5種類を揃えています。本例では、type3 (円弧) の例を示します。

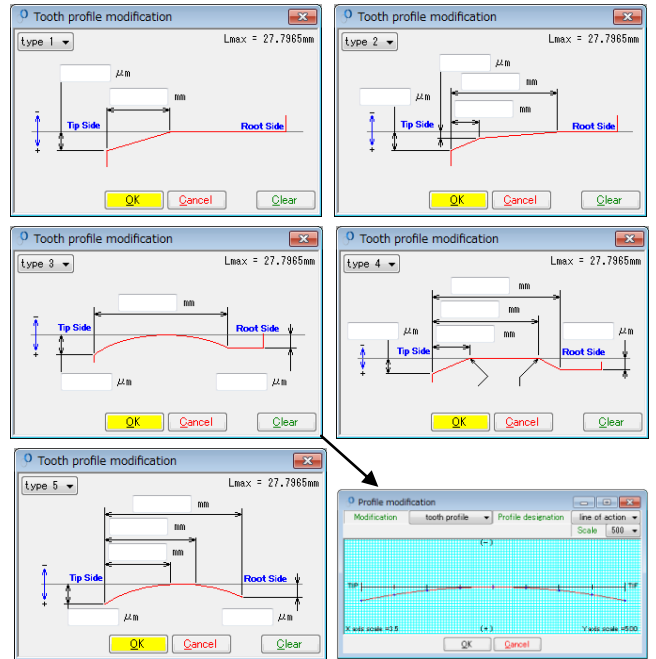


図 13.4 歯先修整設定

13.5 ねじ状砥石の設定

図 13.2 の歯車を研削するねじ状砥石の諸元設定画面を図 13.5 に示します。なお、歯車とねじ状砥石と取り付け角は、Lead angle であり、ねじ状砥石と電着砥石の取り付け角は、Setting angle です。

| Item | Symbol | Unit | Value |
|-----------------------|---------------|------|-----------------|
| Number of threads | zw | | 1 |
| Pressure angle | α_w | deg | 20.00000 |
| Normal module | mn_w | mm | 5.00000 |
| Lead direction | | | Right hand |
| Outside diameter | D_w | mm | 150.00000 |
| Tip radius | R | mm | 1.50000 |
| Lead angle | γ | deg | 2 * 5' 2.19 |
| Thickness(Space) | S | mm | 7.85398 |
| Thickness(Tooth) | T | mm | 7.85398 |
| Top clearance | u | mm | 0.00000 |
| Bottom clearance | k | mm | 0.50000 |
| Addendum | ha_w | mm | 6.25000 |
| Dedendum | hf_w | mm | 5.50000 |
| Pitch circle diameter | d_w | mm | 137.50000 |
| Face width | b_w | mm | 50.00000 |
| Setting angle | β_{Set} | deg | -17 * 54' 57.81 |

図 13.5 ねじ状砥石の諸元設定

13.6 電着砥石 (ダイヤモンドツール) の設定

図 13.5 のねじ状砥石をドレスする電着砥石 (ダイヤモンドツール) の諸元設定画面を図 13.6 に、電着砥石寸法を図 13.7 に示します。

歯車、ねじ状砥石、電着砥石諸元を設定した後、図 13.8 で歯形計算条件 (分割数) を設定し、計算に進みます。

| Item | Symbol | Unit | Value |
|-------------------|--------|------|-----------|
| Outside diameter | D | mm | 200.00000 |
| Side clearance | C | mm | 0.10000 |
| Bottom clearance | P | mm | 0.50000 |
| Base diameter | BD | mm | 188.00000 |
| Radius of crowing | Cr | mm | 0.00000 |

図 13.6 電着砥石の諸元設定

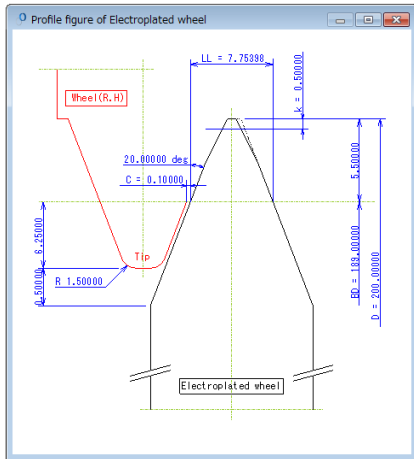


図 13.7 電着砥石寸法

| Item | Value |
|-------------------------------|-------|
| Tooth surface division number | 500 |
| Tip, root division number | 500 |
| Calculation accuracy | 1000 |

図 13.8 歯形計算設定

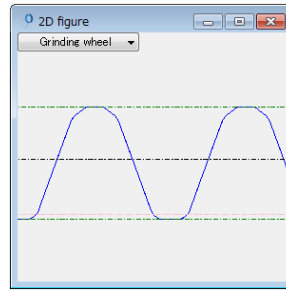


図 13.11 ねじ状砥石歯形

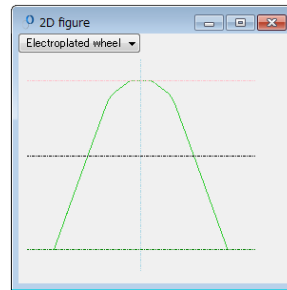


図 13.12 電着砥石歯形

13.7 歯形図

図 13.9～図 13.12 に歯車歯形，ねじ状砥石で研削後の歯形，ねじ状砥石歯形，電着砥石歯形を示します。そして図 13.13 および図 13.14 にレンダリングを示します。

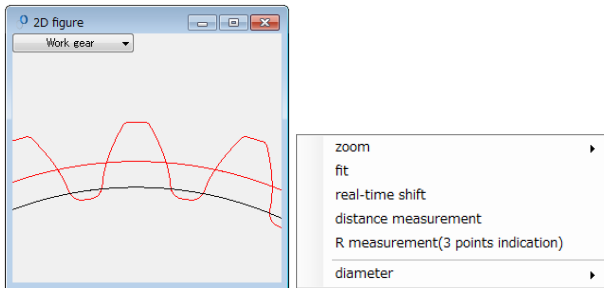


図 13.9 歯車歯形

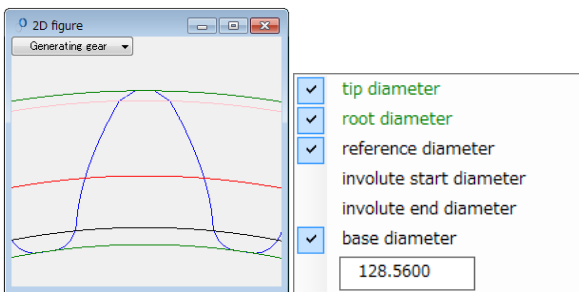


図 13.10 創成後の歯形

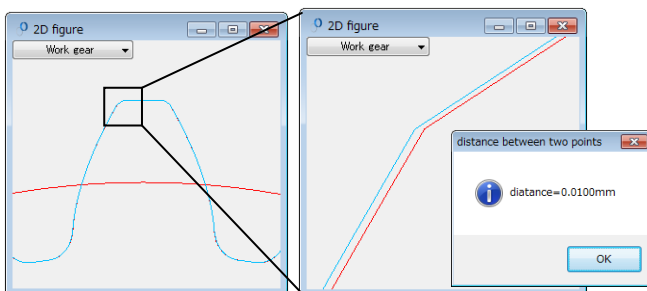


図 13.11 理論歯形と研削後歯形の重ね合わせと計測

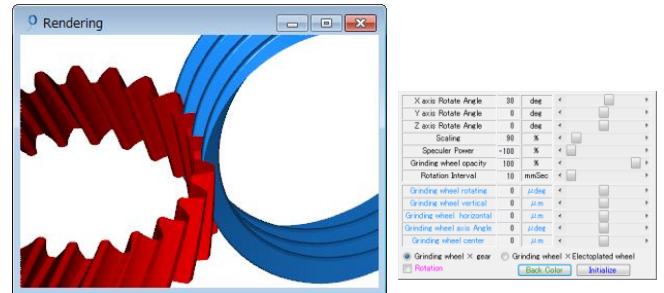


図 13.13 レンダリング（歯車とねじ状砥石）

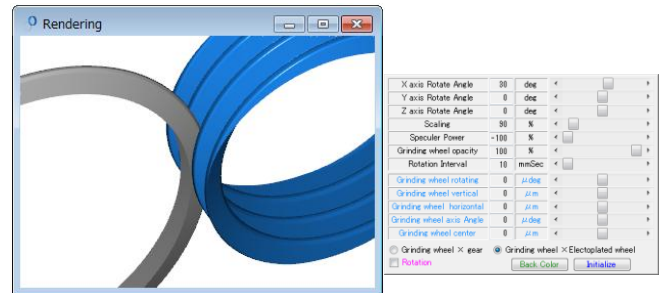


図 13.14 レンダリング（ねじ状砥石と電着砥石）

13.8 歯形グラフ

図 13.3 で与えた歯車の歯形修整が得られるように，ねじ状砥石の歯形を生成させ，次に，ねじ状砥石で創成運動をさせたときの歯車の歯形を歯形グラフとして図 13.15 に示します。

図 13.15 のスライダバーでは，作用線長さが 32.098mm で歯形修整量が 7.1 μ m であることを示しています。なお，面取りを与えているためグラフの歯先部で歯形が大きく逃げています。

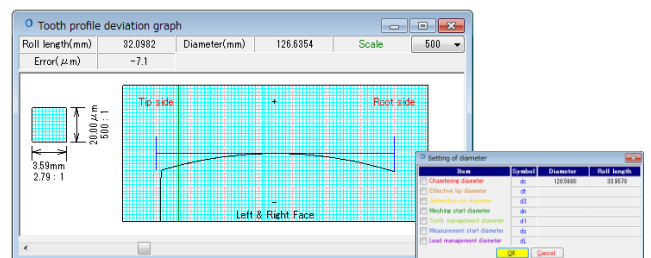


図 13.15 歯形グラフ

13.9 電着砥石（ダイヤモンドツール） DXF ファイル出力

電着砥石の形状選択画面を図 13.16 に示します。ダイヤモンドツール形状を DXF ファイルで出力する場合、図 13.5 で設定したねじ状砥石の諸元により選択する形状が決まります。ここでは図 13.16 の左上のツール形状のダイヤモンドツール形状を出力した例を図 13.17 に示します。

電着砥石歯形の 3ヶ所の座標点を R で近似すると図 13.18 ように $R=970.4mm$ であることが解ります。ただし、指示位置によって R の大きさは変わります。また、図 13.19 のように歯車の正面歯形（歯形修整を含む）を出力することができます。

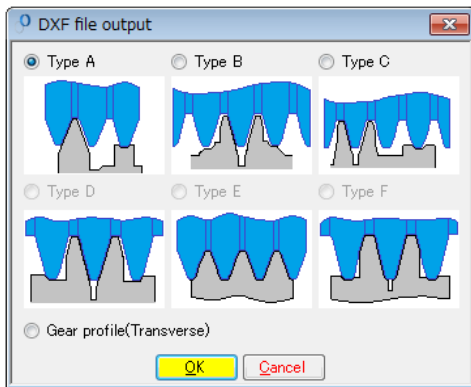


図 13.16 ダイヤモンドツールの形状選択

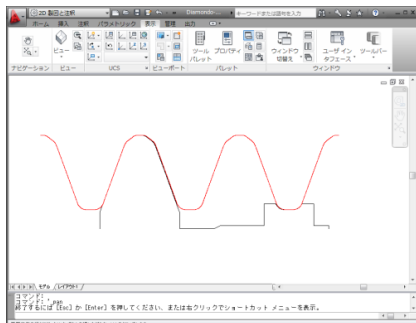


図 13.17 CAD 作図例（ダイヤモンドツール）

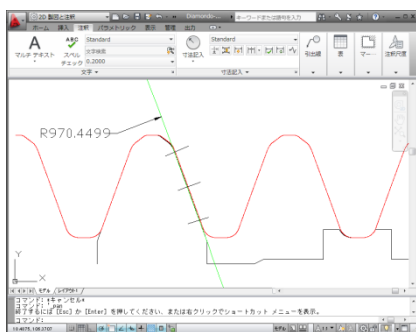


図 13.18 ダイヤモンドツールの歯形

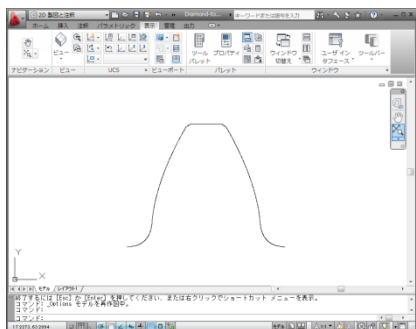


図 13.19 CAD 作図例（正面歯形）

13.10 HELP 機能

本ソフトウェアはの操作説明は、図 13.20 のように HELP 機能を有しています。入力時、不明な項目や操作が解らないときは、その画面をアクティブとして[F1]キーを押すことで図 13.21 のように説明画面を表示します。

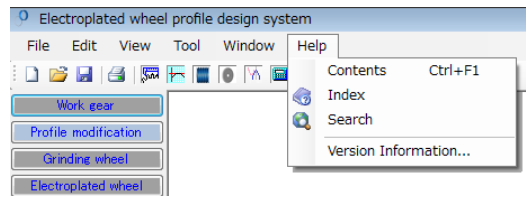


図 13.20 HELP 機能

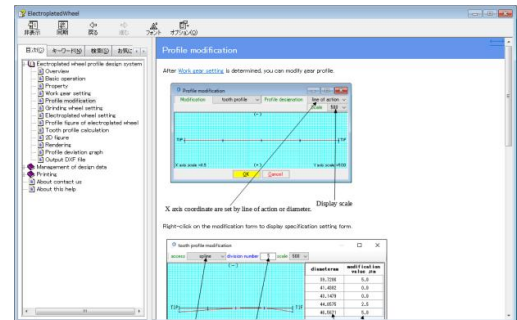


図 13.21 歯形修整の説明

※本ソフトウェアは英語版のみです。

[14] GearPro iii (involute gear profile design system)

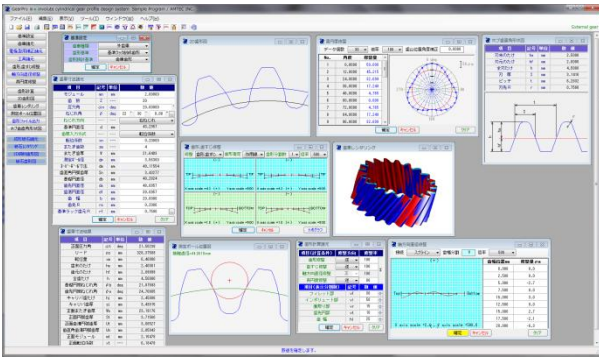


図 14.1 GearPro iii (インボリュート歯形出力)

14.1 概要

本ソフトウェアは、GearPro Master を新しくしたソフトウェアです。2016年2月を以って GearPro Master の販売は終了し、GearPro iii の販売とさせていただきます。

本ソフトウェアは成形歯車にも考慮し真円ではない歯車の歯形も生成することができ、歯形・歯すじ修整、そして軸方向直径修整にも対応していますので成形歯車の製造には最適なソフトウェアといえます。また、工具（ホブ、ピニオンカッタ）加工にも対応した歯形を生成することができますので金属歯車の加工シミュレーションとしても使用することができます。

今までオプション扱いしていた機能も一部、基本ソフトウェアに含めると共に種々新しい機能も追加し、HELP 機能も設けています。図 14.1 に GearPro iii の全体画面を示します。

14.2 ソフトウェアの構成

GearPro iii の構成を表 14.1 に示します。表中の○は基本ソフトウェアに含まれ◎はオプションです。また、△は、別途お問い合わせください。

表 14.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | 構成 |
|-----|-------------|-------|----|
| 1 | 基準ラック (JIS) | 14.4 | ○ |
| | BS 規格 | 14.4 | ◎ |
| | DIN58400 | 14.4 | ◎ |
| 2 | 歯車諸元 | 14.5 | ○ |
| 3 | 工具諸元 | 14.6 | ◎ |
| 4 | 歯形、歯すじ修整 | 14.7 | ◎ |
| 5 | 軸方向直径修整 | 14.8 | ◎ |
| 6 | 真円度修整 | 14.9 | ◎ |
| 7 | 歯形計算 | ---- | ○ |
| 8 | 2D 歯形図 | 14.10 | ○ |
| 9 | 測定ボール位置図 | 14.10 | ○ |
| 10 | 歯形レンダリング | 14.11 | ○ |
| 11 | 歯形出力ファイル | 14.12 | ○ |
| 12 | カウンターラック歯形 | 14.13 | ◎ |
| 13 | 成形砥石歯形 | ---- | △ |
| 14 | 設計データ管理 | 14.14 | ○ |

14.3 適用

- (1) 歯車の種類：円筒歯車(外歯車, 内歯車)
- (2) 歯形：インボリュート
- (3) 基準ラック：JIS, BS, DIN58400
- (4) 工具

- (4.1) ホブ、転位ホブ：標準、セミトッピング、プロチュバランス、プロチュバランスセミトッピング
- (4.2) ピニオンカッタ：標準、セミトッピング、プロチュバランス、プロチュバランスセミトッピング
- (4.3) 工具による加工：外歯車はホブまたはピニオンカッタで加工し内歯車はピニオンカッタで加工します。
- (5) 生成歯形：歯車歯形、電極歯形
- (6) 修整：歯形、歯すじ、真円度、軸方向直径
- (7) 成形研削用砥石歯形の生成

14.4 基準ラック (プロパティ)

基準ラックを図 14.2 に示します。基準ラックの種類は JIS 規格の他に、BS 規格 (オプション) および DIN4158400 規格 (オプション) による基準ラックも設定することができます。図 14.3 に BS 規格と DIN58400 規格の基準ラックを示します。

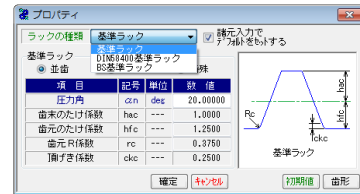
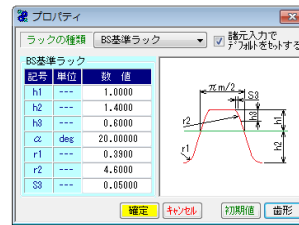
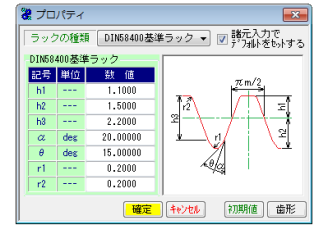


図 14.2 基準ラック 1 (JIS)



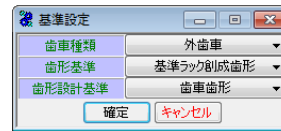
(a)BS 規格



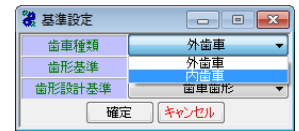
(b)DIN58400 規格

図 14.3 基準ラック 2

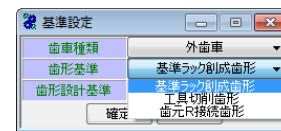
「基準設定」では図 14.4 のように歯車の種類 (外・内歯車の選択)、歯形基準 (基準ラック創成、工具切削、歯元 R 接続) そして歯形設計基準 (歯車歯形、電極) を設定することができます。歯形基準で歯元 R 接続を選択できますが、これは古い図面にも対応することを考慮して設けています。



(a)基準設定



(b)歯車の種類



(c)歯形基準



(d)歯形設計基準

図 14.4 基準設定

歯元を単一 R にすることの不具合は、歯数が少ない場合、相手歯車の歯先干渉の原因となります。また、強度計算は歯元形状がトロコイド形状であることを前提としていますのでそこに単一 R で歯車を製作すると強度計算の意味をなしません。そして、歯元単一 R 形状は、トロコイド形状に比して応力集中が大きくなります。このことは JIS B 1759(2013)「プラスチック円筒歯車の曲げ強さ評価方法」や成形プラスチック歯車研究専門委員会発行の「プラスチック歯車の設計指針」にも記載されています。

14.5 歯車諸元

図 14.5 に示すように歯車諸元を設定します。歯厚入力方式では、①転位係数、②またぎ歯厚、③オーバークラウド寸法④円弧歯厚の内から1つを選択します。図 14.6 に寸法結果を示します。



図 14.5 歯車諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|------------|------------|-----|-----------|
| 正面圧力角 | α_t | deg | 21.50238 |
| リード | pz | mm | 328.37509 |
| 転位量 | xn | mm | 0.40000 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.40001 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 2.09999 |
| 全歯たけ | h | mm | 4.50000 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 21.07593 |
| 歯先円筒ねじれ角 | β_a | deg | 24.70895 |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 2.45806 |
| キャリア歯厚 | sj | mm | 3.43015 |
| 正面またぎ歯厚 | Wa | mm | 23.19176 |
| 正面円弧歯厚 | St | mm | 3.71560 |
| 正面歯溝円弧歯厚 | Ut | mm | 3.08527 |
| 歯直円弧歯溝円弧歯厚 | Un | mm | 2.85042 |
| 正面モジュール | mt | mm | 2.16478 |
| 正面転位係数 | xt | --- | 0.18478 |

図 14.6 寸法

今、図 14.4(d) の設定で「電極」として収縮率を図 14.7 のように設定したとき、歯車寸法および電極寸法は図 14.8 のように決まります。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|------------|-----|---------|
| モジュール収縮率 | Sp | --- | 20.00 |
| 圧力角補正率 | S α | --- | 0.00 |
| ねじれ角補正率 | S β | --- | 3.00 |
| 放電キャップ | δ | μm | 20.00 |
| 歯幅 | b' | mm | 20.0000 |

図 14.7 電極設定

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(歯車) | 数値(電極、型) |
|------------|------------|-----|-----------|-----------|
| 正面圧力角 | α_t | deg | 21.50238 | 21.50238 |
| リード | pz | mm | 328.37509 | 336.02972 |
| 転位量 | xn | mm | 0.40000 | 0.40816 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.40001 | 2.42899 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 2.09999 | 2.16285 |
| 全歯たけ | h | mm | 4.50000 | 4.59184 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 21.07593 | 21.07593 |
| 歯先円筒ねじれ角 | β_a | deg | 24.70895 | 24.69111 |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 2.45806 | 2.48829 |
| キャリア歯厚 | sj | mm | 3.43015 | 3.45774 |
| 正面またぎ歯厚 | Wa | mm | 23.19176 | 23.62177 |
| 正面円弧歯厚 | St | mm | 3.71560 | 3.74536 |
| 正面歯溝円弧歯厚 | Ut | mm | 3.08527 | 3.19491 |
| 歯直円弧歯溝円弧歯厚 | Un | mm | 2.85042 | 2.95116 |
| 正面モジュール | mt | mm | 2.16478 | 2.20896 |
| 正面転位係数 | xt | --- | 0.18478 | 0.18478 |

図 14.8 歯車と電極歯車の寸法

14.6 工具諸元 (オプション)

歯切り工具は、ホブまたはピニオンカッタを選択することができます。工具寸法入力画面を 14.9 に、参考図を図 14.10 に、入力した工具の実刃形を図 14.11 に示します。設定した工具による創成歯形を図 14.12 および図 14.13 に示します。工具の種類は、14.2 の適用に示すように種々工具に対応しています。



図 14.9 工具寸法諸元入力

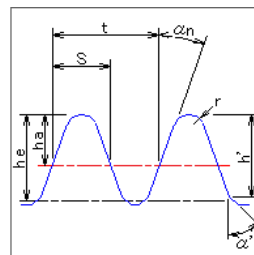


図 14.10 工具参考図

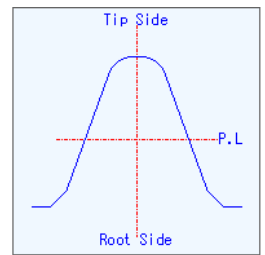


図 14.11 工具刃形

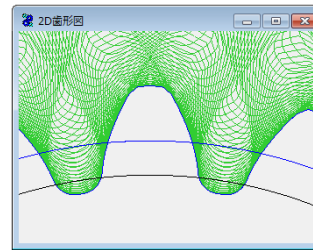


図 14.12 正面歯形

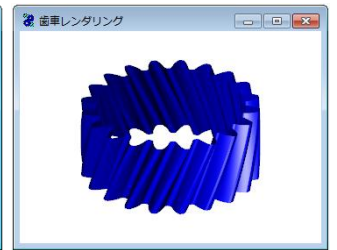


図 14.13 レンダリング

プロチェバランセセミトップングピニオンカッタの入力画面を図 14.14 に、設定した工具による創成歯形を図 14.12 および図 14.13 に示します。

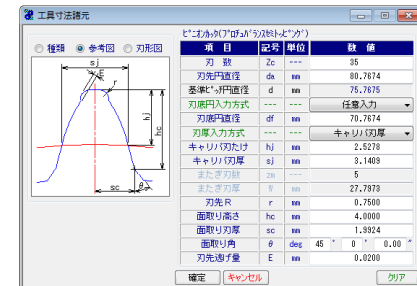


図 14.14 工具寸法諸元入力 (ピニオンカッタ)

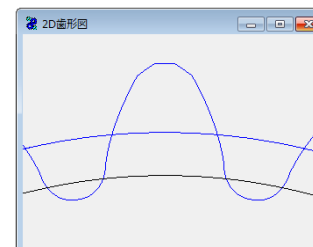


図 14.15 正面歯形

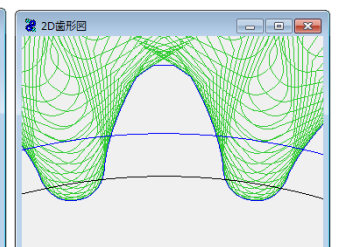


図 14.16 創成歯形

14.7 歯形、歯すじ修整 (オプション)

歯面修整を与える場合、図 14.17 で設定します。修整は、歯形修整、歯すじ修整、歯形・歯すじ修整の3通りを選択することができます。ここでは、歯形・歯すじ修整の例を示します。図 14.18 で歯形修整、図 14.19 で歯すじ修整を与えた結果を図 14.20 に示します。修整量の与え方は、図 14.18 の場合、数値を直接入力することもパターン形状から入力することもできます。また、分割数は最大 50 点まで設定することができます。

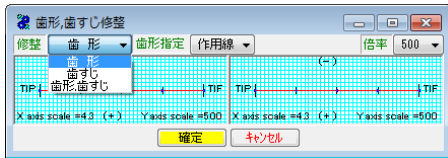


図 14.17 歯形、歯すじ修整の設定

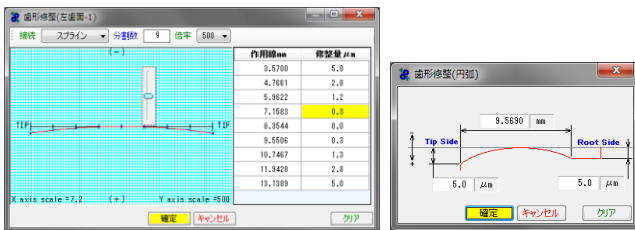


図 14.18 歯形修整の設定

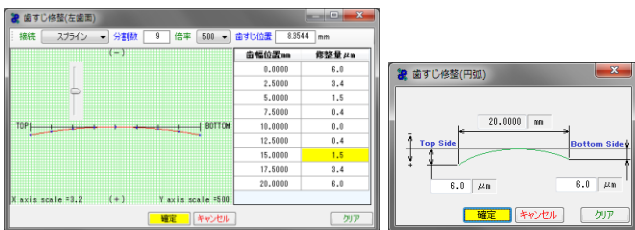


図 14.19 歯すじ修整の設定

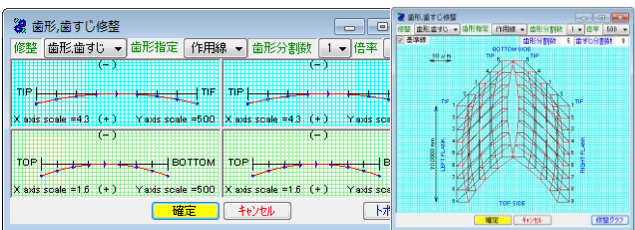


図 14.20 歯形・歯すじ修整の設定とトポグラフ

図 14.26 では歯形修整 1 本と歯すじ修整 1 本を与えた例を示していますが、バイアス修整の場合は、図 14.21 のように歯形 3 本 (5 本も可能)、歯すじ 1 本で設定することができます。

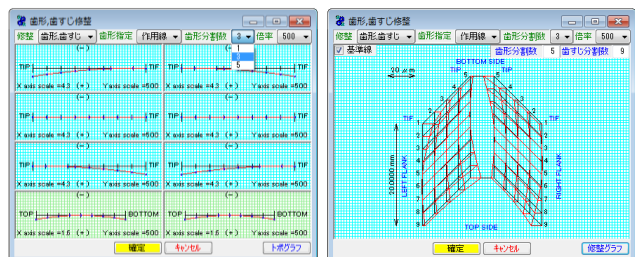


図 14.21 バイアス修整とトポグラフ

14.8 軸方向直径修整 (オプション)

軸方向直径修整は、例えば、2 段歯車を樹脂成型する場合、成形時の収縮による歯幅方向の直径変化を補正するための機能です。例として、図 14.22 のような直径変化があった場合の歯車は、図 14.23 のように表示することができます。



図 14.22 軸方向直径修整の設定の例

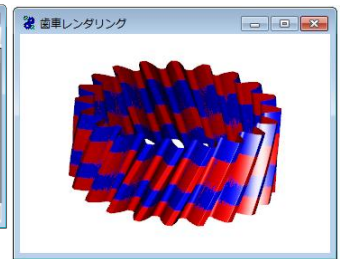


図 14.23 基準歯形(青色)と軸方向直径修整歯形(赤色)

14.9 真円度修整 (オプション)

射出成形プラスチック歯車は、ゲートの位置によって完成した歯車が真円形状になりません。対策としてゲート数を多くすれば解決する場合がありますが余分な工数が必要となります。そこで、本例では完成した歯車のゲート数が 3ヶ所の成形歯車を想定し、図 14.24 の楕円形状の歯車を考え、その逆形状の歯形を出力すると成形完成時に真円歯車が出来上がるものとしています。図 14.24 で修整量を 50µm、楕円の葉数、即ちゲート数を 3 として設定しています (変更は任意可、最大 20)。図 14.25 に真円度修整のグラフを表示します。

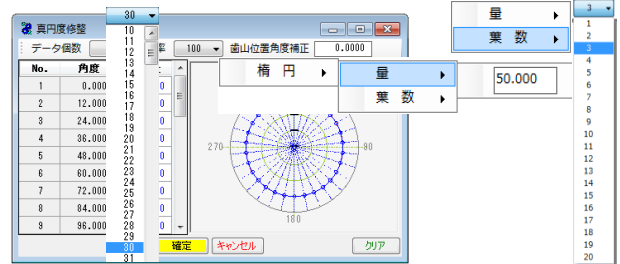


図 14.24 真円度修整 1

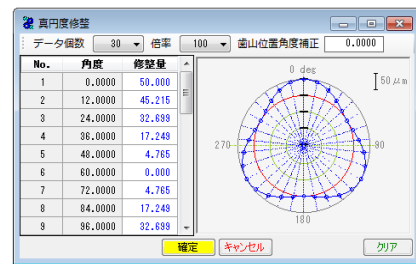


図 14.25 真円度修整 2

図 14.26 では歯形修整 1 本と歯すじ修整 1 本を与えた例を示していますが、バイアス修整の場合は、図 14.21 のように歯形 3 本 (5 本も可能)、歯すじ 1 本で設定することができます。

図 14.26 歯形生成 1 は、歯形修整、歯すじ修整、真円度修整を「正」としていますが、これは図 14.25 で設定した歯形をそのまま出力するという事です。これに対し、図 14.27 歯形出力 2 は修整方向を[逆]としています。これは与えた修整量の逆形状を出力する意味です。即ち、この「逆」で金型を製作すれば完成時に真円となることを目的としています。ただし、「逆」としても 100% 予測した通りにはなりませんので収縮率の程度を設定することができます。例題では真円度のみ 80% とし、他は 100% としています。

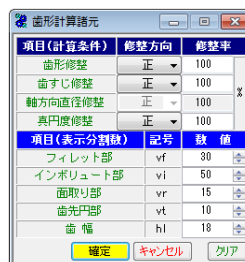


図 14.26 歯形生成 1



図 14.27 歯形生成 2

14.10 2D 歯形図

図 14.28 は、図 14.20 の歯形・歯すじ修整を持つ歯形を図 14.25 で真円度修整を設定し、図 14.27 の[逆]で作図した歯形軌跡図です。歯先部分の拡大図を図 14.29 に示しますが、これら歯先のずれは、歯先修整と偏心により違いが現れ、図 14.29 の A の歯先のずれが大きく、B と C は大きくずれていません。この理由は図 14.25 の真円度修整量からも明らかです。図 14.28 の A 部のずれを図 14.30 のように距離計測すると 0.041mm の違いがあることが解ります。また、図 14.28 の補助フォームに示す R 計測機能は歯元形状の隅部の大きさなどを計測する際には非常に便利です。

図 14.31 に測定ボール位置図を示しますが、これは低歯などを測定する際、ボールと歯底が接触する場合があります。このようなとき事前に確認することができるため現場でも有効に活用することができます。

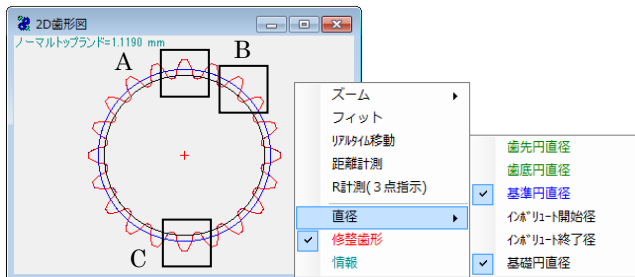


図 14.28 正面歯形

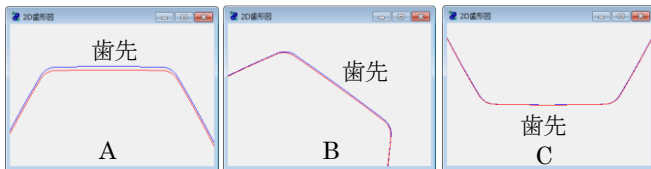


図 14.29 歯先部拡大

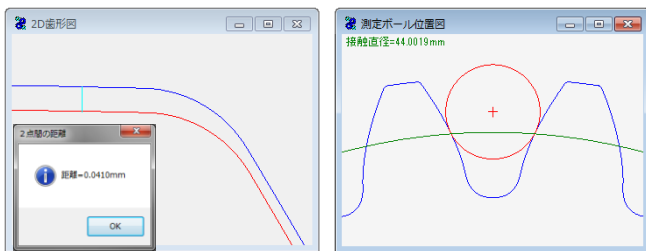
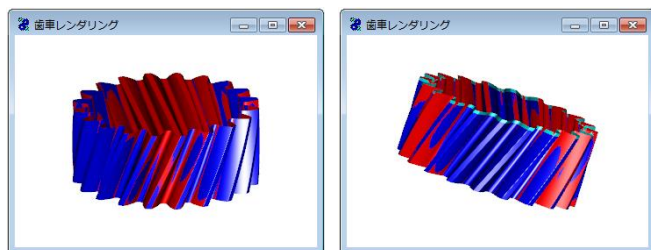


図 14.30 距離計測

図 14.31 ボール位置

14.11 歯形レンダリング

図 14.32 は、図 14.20 の歯形・歯すじ修整を持つ歯形を図 14.25 で真円度修整を設定し図 14.27 の[逆]で作図した歯形です。また、図 14.33 の歯形レンダリングは、図 14.26 の[正]で作図していますので図 14.32 と色合いが反転しています。

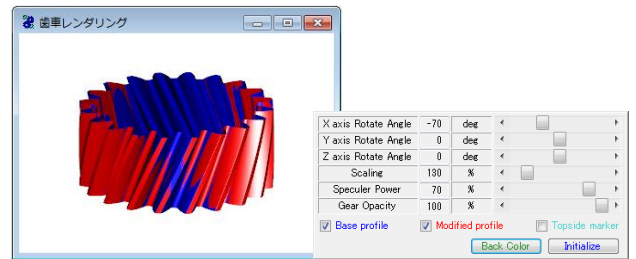


(a) 0° 方向観察

(b) 90° 方向観察

修整方向[逆]の図

図 14.32 歯形レンダリング (基準歯形と修整歯形)



修整方向[正]の図

図 14.33 歯形レンダリングと補助フォーム

14.12 歯形ファイル出力

歯形ファイルは、図 14.37 のように DXF-2D, DXF-3D, IGES-3D, TEXT 2D を生成 (任意歯数出力可) することができます。また、工具刃形も出力できます。図 14.38 および図 14.39 に CAD 作図例を示します。

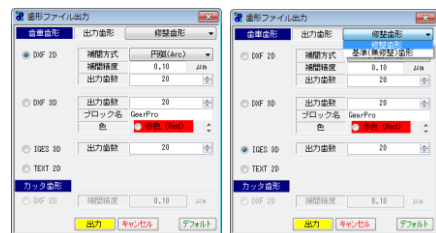


図 14.34 歯形ファイル出力

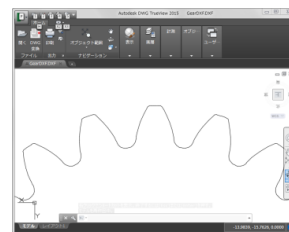


図 14.35 DXF-2D の例

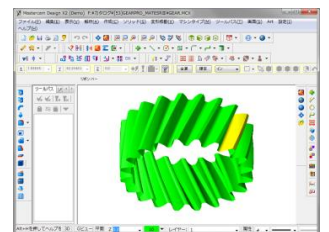


図 14.36 IGES-3D の例

14.13 カウンターラック歯形

図 14.37 の歯車 (基準ラック創成歯形) を加工する場合のホブ寸法を図 14.38 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-----------|-----|-----------------|----------|
| モジュール | m | mm | 2.0000 |
| 歯数 | Z | --- | 20 |
| 圧力角 | αn | deg | 20.0000 |
| ねじれ角 | β | deg | 22.5000 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右にねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 40.0000 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 輪位体積 |
| 輪位体積 | Vn | mm ³ | 0.20000 |
| またぎ歯数 | Zm | --- | --- |
| またぎ歯数 | Zm | --- | 21.6403 |
| 測厚寸法 | dp | mm | 3.56500 |
| トホキ寸法 | dh | mm | 48.11954 |
| 歯底円半径 | Sn | mm | 0.48277 |
| 歯底円直径 | db | mm | 40.2014 |
| 歯頂円直径 | da | mm | 48.0000 |
| 歯厚円直径 | df | mm | 39.7000 |
| 歯幅 | b | mm | 20.0000 |
| 歯先 R | ra | mm | 0.0000 |
| 基準ラック歯元 R | rF | mm | 0.7500 |

図 14.37 歯車諸元 2

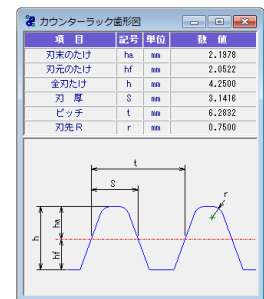


図 14.38 ホブ寸法

14.14 設計データ管理

データベースは、Microsoft Access Database, Microsoft SQL Server そして ORACLE MySQL Server に対応しています。また、旧ソフトウェアの GearPro Master で作成した設計データの読み込みも可能です。

※Microsoft SQL Server および ORACLE MySQL Server は、インストールされている必要があります。

◆成形研削用の砥石歯形の生成も可能です。詳しくは、別途お問い合わせください。

[15] involute Σ (crossed helical gear design system)

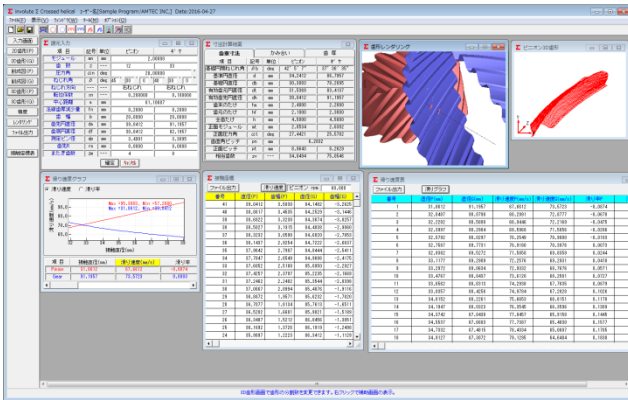


図 15.1 involuteSigma(ねじ歯車)

15.1 概要

ねじ歯車寸法計算ソフトウェアは、ねじ歯車の寸法計算を行い、歯形かみ合いと2次元と3次元歯形のCADデータを出力します。

15.2 初期設定

図 15.2 に設計基準の設定を示します。

(1)軸角の変更

転位を与えた場合や中心距離を変更した場合に、軸角を変更する方式と軸角を変更しない方式 (Buckingham) を選択します。

(2)歯先円直径の決定方式：標準方式および等クリアランス方式

(3)基準ラックの設定：並歯、低歯、特殊

(4)中心距離と転位係数の関係は、以下の3種類です。

- <1>転位係数をピニオンとギヤに与え中心距離を決定
- <2>中心距離を基準として各歯車の転位係数を決定
- <3>転位係数を無視して任意に中心距離を決定



図 15.2 初期設定

15.3 諸元入力画面

図 15.3 に諸元入力画面を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------|------------|-----|----------|----------|
| モジュール | mn | mm | 2.00000 | |
| 歯数 | z | --- | 12 | 33 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 45 | 30 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 転位係数 | xn | --- | 0.200000 | 0.100000 |
| 中心距離 | a | mm | 61.10687 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.2000 | |
| 歯幅 | b | mm | 20.0000 | |
| 歯先円直径 | da | mm | 39.0412 | 91.1957 |
| 歯底円直径 | df | mm | 30.0412 | 82.1957 |
| 測定ピッチ | dp | mm | 3.4991 | 3.3895 |
| 歯先R | ra | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 4 | 8 |

図 15.3 諸元設定

15.4 寸法結果

図 15.4~図 15.6 にねじ歯車の寸法、かみ合い、歯厚計算結果を表示します。

| 歯車寸法 | | かみ合い | | 歯厚 | |
|----------|------------|------|-----------|-------------|--|
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ | |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 42° 5' 7" | 37° 36' 36" | |
| 基準円直径 | d | mm | 34.2412 | 86.7957 | |
| 基礎円直径 | db | mm | 30.3883 | 78.2895 | |
| 有効歯先円直径 | dt | mm | 31.5369 | 83.4137 | |
| 有効歯底円直径 | dh | mm | 39.0412 | 91.1957 | |
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.4000 | 2.2000 | |
| 歯元のたけ | hf | mm | 2.1000 | 2.3000 | |
| 全歯たけ | h | mm | 4.5000 | 4.5000 | |
| 正面モジュール | mt | mm | 2.8534 | 2.6302 | |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 27.4421 | 25.5782 | |
| 歯直角ピッチ | pn | mm | 6.2832 | | |
| 正面ピッチ | pt | mm | 8.9643 | 8.2629 | |
| 相当歯数 | zv | --- | 34.8494 | 75.0546 | |

図 15.4 歯車寸法結果

| 歯車寸法 | | かみ合い | | 歯厚 | |
|----------------|-----------------|------|-------------|-------------|--|
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ | |
| 歯直角かみ合い圧力角 | α_{wn} | deg | 20.8168 | | |
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 28.6106 | 26.6544 | |
| かみ合いピッチ円直径 | d _w | mm | 34.6150 | 87.5987 | |
| かみ合いピッチ円筒ねじれ角 | β_w | deg | 45° 48' 39" | 40° 45' 38" | |
| 軸角 | Σ | deg | 96.5717 | | |
| クリアランス | c | mm | 0.4884 | 0.4884 | |
| 歯直角かみ合い率 | ε_n | --- | 1.7042 | | |
| 歯直角法線方向バックラッシュ | j _{nn} | mm | 0.400 | | |
| 歯直角円周方向バックラッシュ | j _{tn} | mm | 0.428 | | |
| 接触歯幅 | b _w | mm | 7.1661 | 6.5251 | |

図 15.5 かみ合い数値

| 歯車寸法 | | かみ合い | | 歯厚 | |
|-----------|-----|------|---------|---------|--|
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ | |
| 歯直角基準円弧歯厚 | sn | mm | 3.4328 | 3.2872 | |
| 歯直角設計円弧歯厚 | sn' | mm | 3.2199 | 3.0743 | |
| 正面基準円弧歯厚 | st | mm | 4.8976 | 4.3229 | |
| 正面設計円弧歯厚 | st' | mm | 4.5939 | 4.0430 | |
| またぎ歯数 | zm | --- | 4 | 8 | |
| 基準またぎ歯厚 | w | mm | 21.6480 | 46.4176 | |
| 設計またぎ歯厚 | w' | mm | 21.6480 | 46.2176 | |
| オーバーピン直径 | dp | mm | 3.4991 | 3.3895 | |
| 基準オハセ寸法 | dm | mm | 39.9141 | 91.7010 | |
| 設計オハセ寸法 | dm' | mm | 39.4170 | 91.1520 | |
| 基準キャリア歯たけ | hj | mm | 2.4422 | 2.2180 | |
| 設計キャリア歯たけ | hj' | mm | 2.4372 | 2.2157 | |
| 基準キャリア歯厚 | sj | mm | 3.4314 | 3.2869 | |
| 設計キャリア歯厚 | sj' | mm | 3.2188 | 3.0741 | |

図 15.6 歯厚数値

15.5 歯形図

図 15.7 に正面歯形を、図 15.8 に3D 歯形を示します。

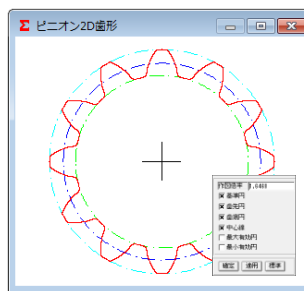


図 15.7 正面歯形

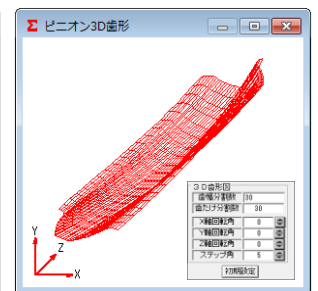


図 15.8 3D 歯形

図 15.8 の歯形レンダリングでかみ合い接触線が歯車の回転に伴い移動する様子を確認することができます。

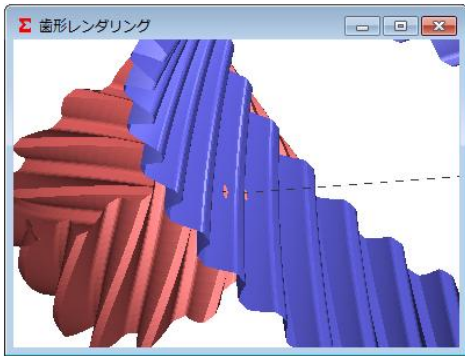


図 15.9 歯形レンダリング

15.6 歯形の接触軌跡 (オプション)

図 15.10 に歯の接触軌跡を示し、図 15.11 に接触座標を示します。さらに、図 15.11 にすべり速度とすべり率数値を、図 15.13 および図 15.14 にすべり速度とすべり率グラフを示します。

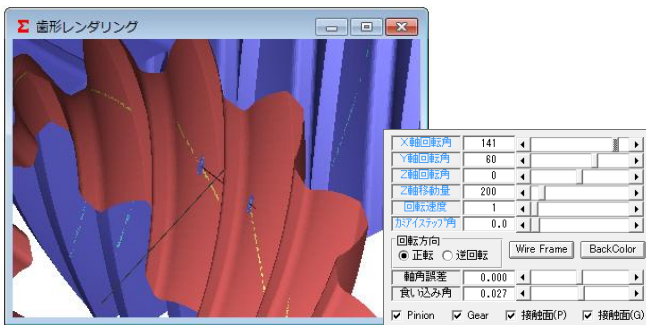


図 15.10 歯面の接触軌跡と補助フォーム

| 番号 | 直径(P) | 歯幅(P) | 直径(G) | 歯幅(G) |
|----|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 31.8612 | -3.1610 | 31.1357 | 2.8782 |
| 2 | 32.0407 | -2.8985 | 30.8790 | 2.6392 |
| 3 | 32.2202 | -2.6489 | 30.5808 | 2.4119 |
| 4 | 32.3997 | -2.4102 | 30.2984 | 2.1946 |
| 5 | 32.5792 | -2.1811 | 30.0297 | 1.9860 |
| 6 | 32.7587 | -1.9602 | 29.7791 | 1.7849 |
| 7 | 32.9382 | -1.7467 | 29.5272 | 1.5905 |
| 8 | 33.1177 | -1.5398 | 29.2909 | 1.4021 |
| 9 | 33.2972 | -1.3387 | 29.0634 | 1.2190 |
| 10 | 33.4767 | -1.1430 | 28.8437 | 1.0408 |
| 11 | 33.6562 | -0.9522 | 28.6313 | 0.8670 |
| 12 | 33.8357 | -0.7658 | 28.4256 | 0.6973 |
| 13 | 34.0152 | -0.5835 | 28.2261 | 0.5313 |
| 14 | 34.1947 | -0.4049 | 28.0323 | 0.3687 |
| 15 | 34.3742 | -0.2298 | 27.8438 | 0.2093 |
| 16 | 34.5537 | -0.0580 | 27.6603 | 0.0528 |
| 17 | 34.7332 | 0.1108 | 27.4815 | -0.1009 |
| 18 | 34.9127 | 0.2768 | 27.3072 | -0.2520 |

図 15.11 接触座標

| 番号 | 直径(P)(mm) | 直径(G)(mm) | 滑り速度(m/s) | 滑り速度(m/s) | 滑り率 | 滑り率 |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|
| 1 | 31.8612 | 31.1357 | 87.8612 | 79.5723 | -0.0874 | 0.0889 |
| 2 | 32.0407 | 30.8790 | 86.2391 | 72.9777 | -0.0676 | -0.0620 |
| 3 | 32.2202 | 30.5808 | 84.6446 | 67.2169 | -0.0475 | -0.0453 |
| 4 | 32.3997 | 30.2984 | 83.0809 | 62.3056 | -0.0286 | -0.0270 |
| 5 | 32.5792 | 30.0297 | 81.5449 | 58.1300 | -0.0109 | -0.0102 |
| 6 | 32.7587 | 29.7791 | 80.0350 | 54.6000 | 0.0073 | -0.0074 |
| 7 | 32.9382 | 29.5272 | 78.5515 | 51.6250 | 0.0244 | -0.0251 |
| 8 | 33.1177 | 29.2909 | 77.0936 | 49.1061 | 0.0410 | -0.0426 |
| 9 | 33.2972 | 29.0634 | 75.6523 | 47.0430 | 0.0577 | -0.0593 |
| 10 | 33.4767 | 28.8437 | 74.2266 | 45.4367 | 0.0727 | -0.0764 |
| 11 | 33.6562 | 28.6313 | 72.8165 | 44.1570 | 0.0879 | -0.0964 |
| 12 | 33.8357 | 28.4256 | 71.4216 | 43.0928 | 0.1026 | -0.1144 |
| 13 | 34.0152 | 28.2261 | 70.0419 | 42.2331 | 0.1170 | -0.1325 |
| 14 | 34.1947 | 28.0323 | 68.6764 | 41.5686 | 0.1309 | -0.1506 |
| 15 | 34.3742 | 27.8438 | 67.3251 | 41.0950 | 0.1445 | -0.1689 |
| 16 | 34.5537 | 27.6603 | 65.9878 | 40.8000 | 0.1577 | -0.1872 |
| 17 | 34.7332 | 27.4815 | 64.6645 | 40.6607 | 0.1705 | -0.2055 |
| 18 | 34.9127 | 27.3072 | 63.3552 | 40.6684 | 0.1830 | -0.2240 |

図 15.12 すべり速度, すべり率

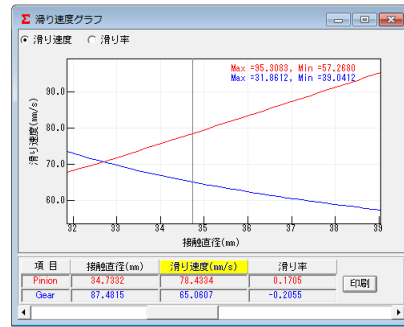


図 15.13 すべり速度

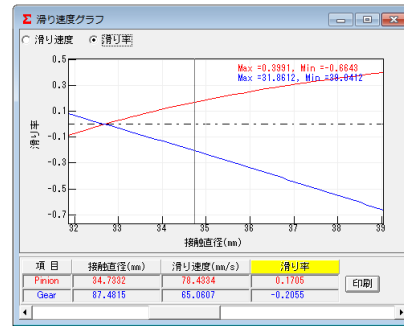


図 15.14 すべり率

15.7 歯形データ

ねじ歯車の歯形座標を DXF または 3D-IGES ファイルに出力することができます。(IGES ファイル出力は、オプションです) 図 15.15 で設定し作例した例を図 15.16 に示します。

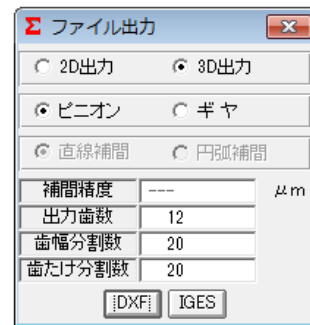


図 15.15 歯形データ出力

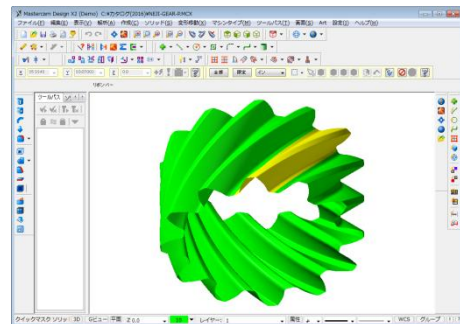


図 15.16 CAD 作例

[16] 成形砥石歯形解析(単溝, 複溝)

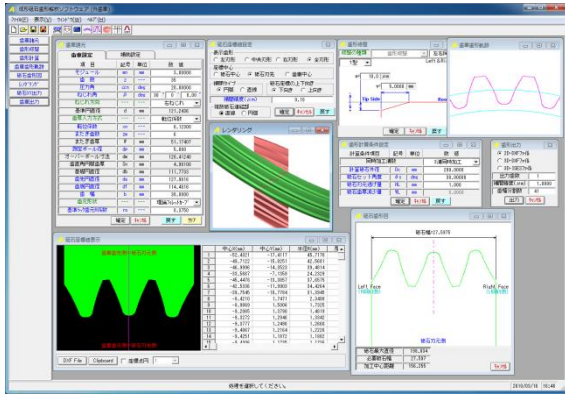


図 16.1 成形砥石歯形解析

16.1 概要

はすば歯車を成形研削する場合、3次元干渉が発生し、ねじれ角や砥石の直径などによってその量は大きく変化します。本ソフトウェアは干渉解析を行い砥石歯形を決定するソフトウェアです。歯形解析は、インボリュート歯形部分は勿論のこと歯元のトロコイド曲線部分も解析しますので正しい砥石座標を得ることができます。

本ソフトウェアは、1溝、2溝または3溝の歯溝を同時に研削する砥石の歯形を出力するソフトウェアです。図 16.1 に全体画面を示します。

16.2 歯車の種類と歯形

- (1)歯車の種類 : 外歯車
- (2)歯形 : インボリュート平歯車及びはすば歯車
- (3)砥石の種類 : 単溝加工用, 複溝加工用 (オプション)
- (4)歯形修整 : 定型 5 種類+フレキシブルタイプ

16.3 歯車諸元入力

図 16.2 に、歯車諸元の入力画面を示します。歯厚入力は、転位係数、またぎ歯厚、オーバーボール寸法から入力することができます。歯元形状は、フィレット形状、単一 R 形状、PG ホブ (オプション)、PG 歯形 (オプション) に対応しています。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-----------|------------|-----|--------------|
| モジュール | m_n | mm | 3.00000 |
| 歯数 | z | --- | 35 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 30° 0' 0.00" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 121.2496 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 |
| 転位係数 | x_n | --- | 0.12300 |
| またぎ歯数 | z_m | --- | 6 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 51.17407 |
| 測定ボール径 | d_p | mm | 5.000 |
| オーバーボール寸法 | d_m | mm | 128.41240 |
| 歯直角円弧歯厚 | S_n | mm | 4.98100 |
| 基準円直径 | d_b | mm | 111.7793 |
| 歯先円直径 | d_s | mm | 127.9816 |
| 歯根円直径 | d_f | mm | 114.4816 |
| 歯幅 | b | mm | 30.0000 |
| 歯元形状 | --- | --- | 理論 R10-T2 |
| 基準円歯元係数 | r_o | --- | 0.3750 |

図 16.2 歯車諸元

補助設定機能は、図 16.3 に示すように歯先 R、歯先 C 面に対応しています。ただし、2溝、3溝用砥石には R 面、C 面を与えることができません。また、電極用歯車を研削することを考慮し、モジュール収縮率、圧力角補正も可能です。



図 16.3 補助設定

16.4 歯形修整

歯形修整は図 16.4~16.7 に示すように 5 種類の修整およびフレキシブル修整に対応しています。本例では図 16.4 の歯形修整を持つ歯形を解析します。図 16.5 は図 16.4 の歯形修整量をグラフ表示した結果です。縦倍率の標準値は 500 倍ですが、任意に設定することができます。

図 16.6 に歯形修整 2 型~5 型を示し、図 16.7 に歯形修整フレキシブル型を示します。

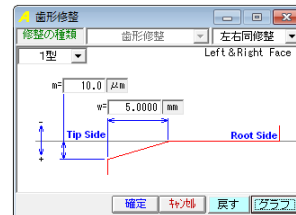


図 16.4 歯形修整(1型)

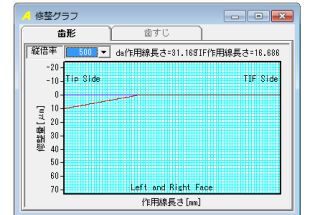
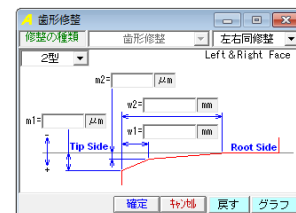
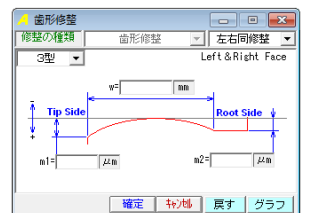


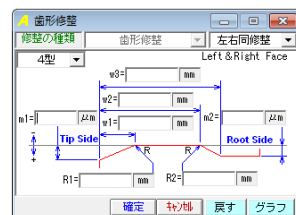
図 16.5 歯形修整グラフ



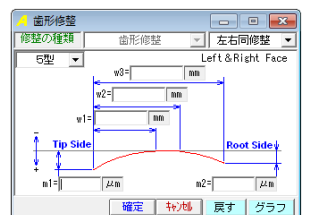
(a) 2 型



(b) 3 型



(c) 4 型



(d) 5 型

図 16.6 歯形修整 2~5 型

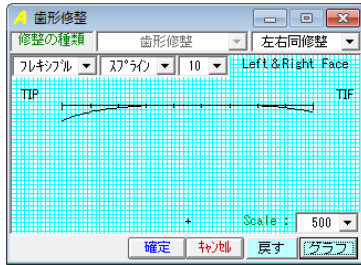


図 16.7 歯形修整フレキシブル型

16.5 歯形計算条件

砥石歯形解析の計算条件を図 16.8 に示します。同時加工歯溝数は、1溝、2溝、3溝を選択することができます。ここでは一般的な加工法である 1 溝加工の例を示します。図 16.8 の [確定] で、砥石形状および歯車歯形を計算します。本ソフトウェアでは、歯車のねじれ角以外の傾け角で研削する場合の砥石の形状も決定することができます。



図 16.8 砥石歯形の計算条件

16.6 歯車歯形と砥石歯形

歯車諸元および歯形の計算条件に基づき砥石の歯形を生成します。そして、その砥石を用いて研削した場合の歯車歯形も計算します。図 16.9 は、理論歯形と修整を与えた歯形そして砥石で研削した歯形を表示しています。

図 16.9 は、研削後の歯形と無修整歯形を重ね合わせた図であり、図 16.10 で歯先部を拡大し、距離測定をすると歯先部で 10 μ m 修整されていることが解ります。

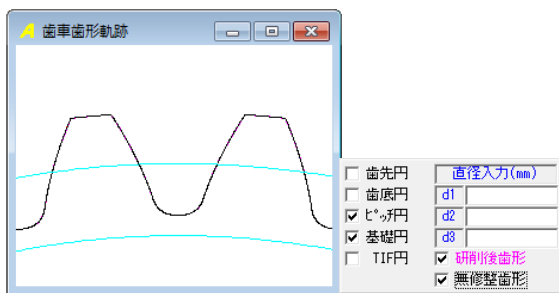


図 16.9 歯車歯形

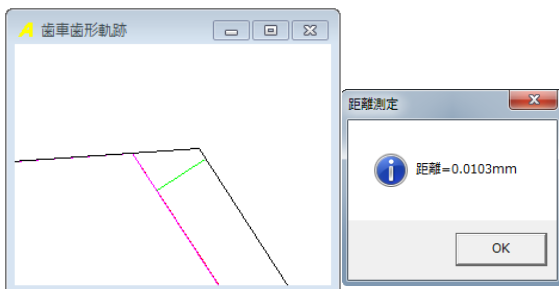


図 16.10 研削歯形と無修整歯形 (距離測定)

図 16.11 に砥石歯形を、図 16.12 に砥石座標の設定を、図 16.13 に砥石座標を示します。砥石形状は DXF ファイルに、そして砥石座標値は図 16.14 のようにテキストファイル(txt)に出力することができます。

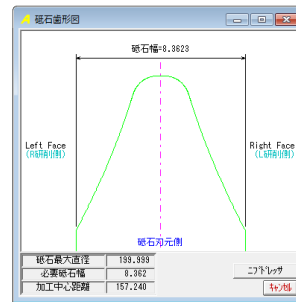


図 16.11 砥石歯形

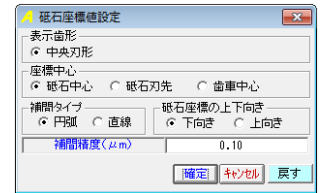


図 16.12 砥石座標の設定

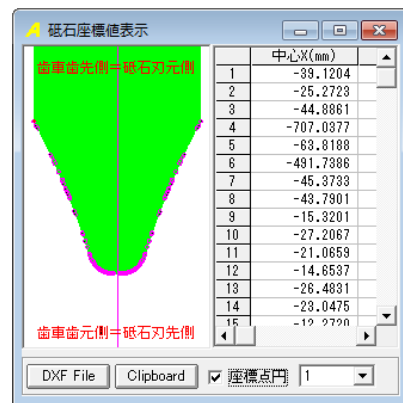


図 16.13 砥石座標

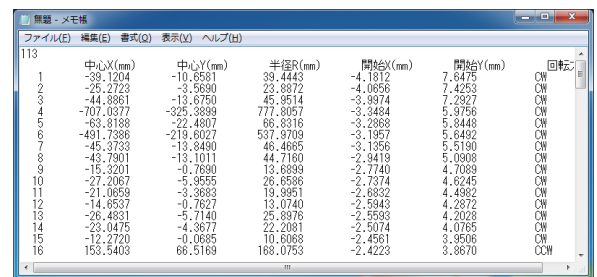
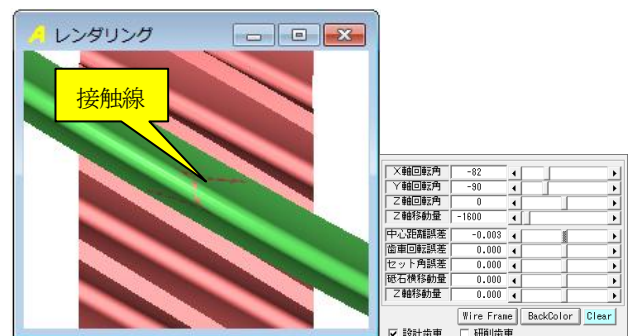


図 16.14 砥石座標

16.7 歯形レンダリング

図 16.14 に示す歯車と砥石のかみ合いレンダリングに綺麗な接触線を確認することができます。表示画像は、コントロールフォームで回転角や観察位置を変更することができます。



設計歯車と砥石のかみ合い

図 16.14 歯形レンダリング

[16.A] 複溝成形砥石歯形解析

歯車諸元および歯形修整は、単溝と同様です。以下に3溝砥石の計算例を示します。

| 歯形計算条件設定 | | | |
|----------|------------|-----|----------|
| 計算条件項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 同時加工溝数 | | | |
| | | | 3溝同時加工 |
| 計算砥石外径 | Dc | mm | 200.0000 |
| 砥石セット角度 | θ_s | deg | 30.00000 |
| 砥石刃元逃げ量 | HL | mm | 1.000 |
| 砥石歯厚減少量 | WL | mm | 0.0000 |

図 16.15 砥石歯形の計算条件（複溝）

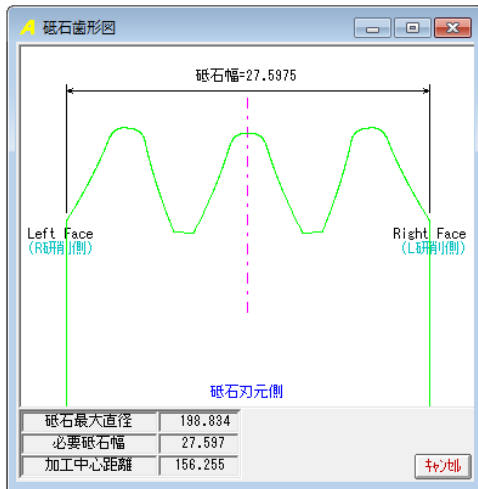
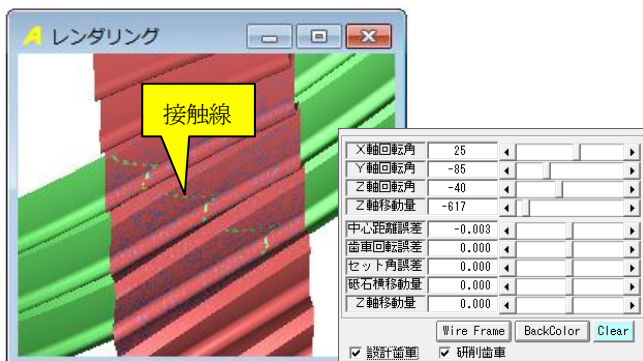


図 16.16 砥石歯形（複溝）

| 点番号 | 中心X(mm) | 中心Y(mm) | 半径R(mm) |
|-----|----------|----------|---------|
| 1 | -52.4321 | -17.4117 | 45.7170 |
| 2 | -49.7122 | -15.8251 | 42.5681 |
| 3 | -46.9896 | -14.3523 | 39.4814 |
| 4 | -39.5967 | -7.1959 | 24.2329 |
| 5 | -45.4478 | -19.2957 | 37.6575 |
| 6 | -42.5398 | -11.8903 | 34.4264 |
| 7 | -38.7545 | -10.7784 | 31.3945 |
| 8 | -8.4210 | 1.7471 | 2.3498 |
| 9 | -8.9868 | 1.5006 | 1.7325 |
| 10 | -9.2065 | 1.3798 | 1.4819 |
| 11 | -9.3272 | 1.2946 | 1.3342 |
| 12 | -9.3777 | 1.2486 | 1.2666 |
| 13 | -9.4067 | 1.2164 | 1.2226 |
| 14 | -9.4251 | 1.1872 | 1.1892 |
| 15 | -9.4398 | 1.1706 | 1.1706 |

図 16.17 砥石座標（複溝）



設計歯車，研削歯車，砥石のかみ合い
図 16.18 歯形レンダリング（複溝）

[16.B]内歯車用成形砥石歯形解析

外歯車と同様に、3次元干渉が発生し、ねじれ角や砥石の直径などによってその量は大きく変化します。本ソフトウェアは研削時の3干渉解析を行い砥石歯形を決定するソフトウェアです。

16.B.1 歯車の種類と歯形

- (1) 歯車の種類 : 内歯車
- (2) 歯形 : インボリュート平歯車及びはすば歯車
- (3) 砥石の種類 : 単溝加工用

16.B.2 歯車諸元入力

図 16.19 に、歯車諸元の入力画面を示します。歯厚入力は、転位係数、またぎ歯厚、ピトウイーンピン寸法から入力することができます。

| 歯車諸元 (内歯車) | | | |
|------------|------------|-----|---------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 3.00000 |
| 歯数 | z | --- | 65 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 25° 30' 0.00" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 216.0461 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | ピトウイーン寸法 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.28148 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 10 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 88.36818 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.000 |
| ピトウイーン寸法 | dm | mm | 211.00000 |
| 歯直円弧歯厚 | Sn | mm | 4.09769 |
| 基礎円直径 | db | mm | 200.3682 |
| 歯先円直径 | da | mm | 210.0000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 223.5000 |
| 歯幅 | b | mm | 30.0000 |
| 歯元R | rf | mm | 1.0000 |

図 16.19 歯車諸元

補助設定機能は、図 16.20 に示すように歯先 R、歯先 C 面に対しています。

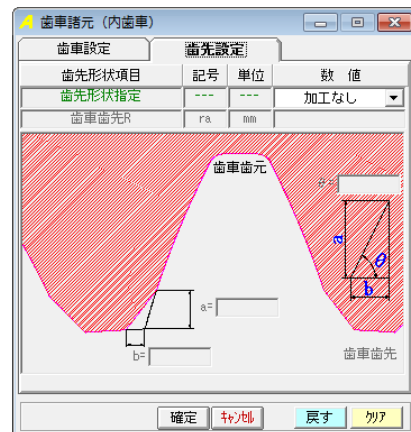


図 16.20 補助設定

16. B. 3 齒形計算条件

内歯車用砥石齒形解析の計算条件を図 16.21 に示します。



図 16.21 砥石齒形の計算条件

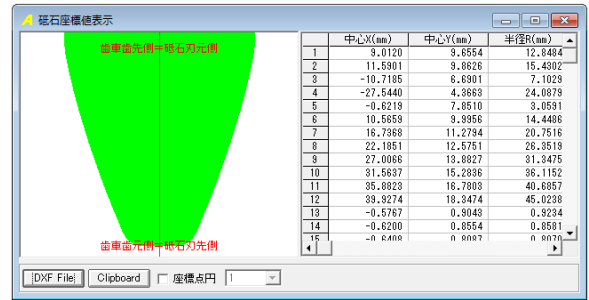


図 16.24 砥石座標

16. B. 3 齒車齒形と砥石齒形

齒車諸元および齒形の計算条件に基づき砥石の齒形を生成します。そして、その砥石を用いて研削した場合の齒車齒形も計算します。図 16.21 は、齒車諸元で修整を与えた齒形、無修整齒形そして砥石で研削した齒形を表示することができます。

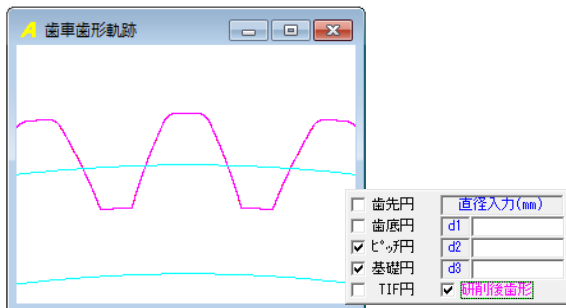
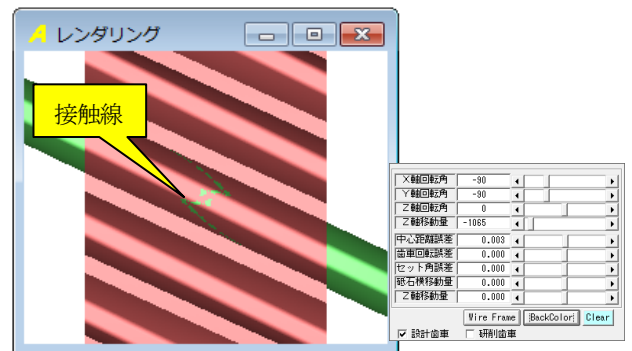


図 16.21 齒車齒形

16. B. 4 齒形レンダリング

図 16.24 に示す齒車と砥石のかみ合いレンダリングに綺麗な接触線を確認することができます。表示画像は、コントロールフォームで回転角や観察位置を変更することができます。



設計齒車と砥石のかみ合い

図 16.24 齒形レンダリング

図 16.22 に砥石齒形を、図 16.23 に砥石座標の設定を、そして図 16.24 に砥石座標を示します。砥石形状は DXF ファイルに、そして砥石座標値はテキストファイル (.txt) に出力することができます。

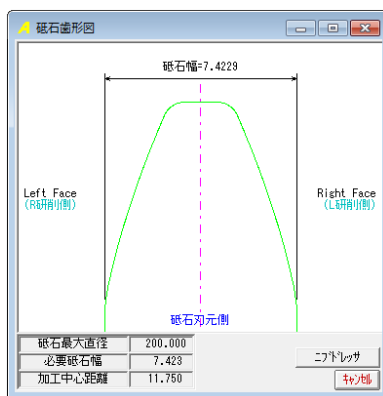


図 16.22 砥石齒形

16. その他機能 (外齒車, 内齒車)

- (1) 砥石で生成した齒車齒形を図 16.25 の「齒形出力」で DXF および IGES ファイルで出力することができます。
- (2) データ管理

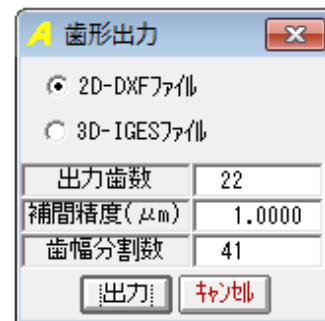


図 16.25 齒形出力

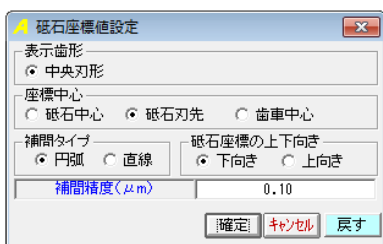


図 16.23 砥石座標の設定

[17] トロコイド曲線を使用した歯車

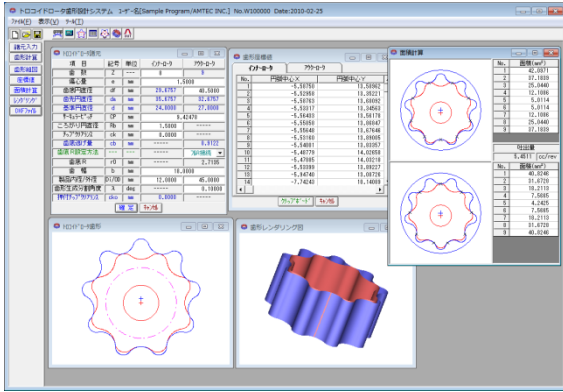


図 17.1 トロコイド曲線を使用した歯車

17.1 概要

インナーロータの歯数、アウターロータの歯底円直径および偏心量を基準として、それぞれの歯形を決定します。歯形曲線は、ころがり円直径や偏心量によって変化し、生成した歯形から、各部屋の面積計算を行い吐出量(cc/rev)を算出します。また、3次元歯形で表示します。

17.2 諸元入力画面

- (1) ロータ諸元の入力画面を図 17.2 に示します。
- (2) サーキュラーピッチの変更により歯の大きさを変更することができます。
- (3) クリアランスを与えた歯形を生成することができます。
- (4) アウターロータの歯底部分はフルRまたは任意のRで接続することができます。
- (5) ころがり円直径により歯形曲線を変更することができます。
- (6) 歯幅は吐出量の計算及び3次元の歯形表示に使用します。
- (7) 歯形生成分割角度は、歯形の細かさの尺度です。

| トロコイド歯諸元 | | | | |
|-----------|-------|-----|---------|---------|
| 項目 | 記号 | 単位 | インナーロータ | アウターロータ |
| 歯数 | Z | --- | 8 | 9 |
| 偏心量 | e | mm | 1.5000 | |
| 歯底円直径 | df | mm | 29.6757 | 40.5000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 35.6757 | 32.6757 |
| 基準円直径 | d | mm | 24.0000 | 27.0000 |
| サーキュラーピッチ | CP | mm | 9.42478 | |
| ころがり円直径 | Rb | mm | 1.5000 | ---- |
| チャッアラ | ck | mm | 0.0000 | |
| 歯底過寸量 | cb | mm | ---- | 0.9122 |
| 歯底R設定方法 | --- | --- | ---- | フルR接続 |
| 歯底R | r0 | mm | ---- | 2.7135 |
| 歯幅 | b | mm | 18.0000 | |
| 製品内径/外径 | Di/OD | mm | 12.0000 | 45.0000 |
| 歯形生成分割角度 | λ | deg | 0.10000 | |
| 押付チャッアラ | cko | mm | 0.0000 | |

図 17.2 ロータ諸元の設定

17.3 ロータの歯形図

ロータのかみ合い組図を図 17.3 に示します。また、補助機能によりピッチ円の作図やインナーロータの回転角度を変更した図を作図(拡大図)することができます。図 17.4 にロータの歯形座標を表示します。

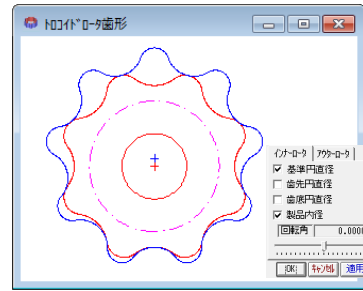


図 17.3 歯形図

| 歯形座標 | | |
|------|----------|----------|
| No. | 円心X | 円心Y |
| 1 | -7.27907 | 26.00819 |
| 2 | -7.35086 | 26.20607 |
| 3 | -7.34629 | 26.19880 |
| 4 | -7.30844 | 26.17423 |
| 5 | -7.32314 | 26.15589 |
| 6 | -7.30681 | 26.12929 |
| 7 | -7.26912 | 26.10179 |
| 8 | -7.25689 | 26.07157 |
| 9 | -7.22785 | 26.03689 |
| 10 | -7.19185 | 26.00421 |
| 11 | -7.15082 | 19.96645 |
| 12 | -7.10388 | 19.93186 |
| 13 | -7.05181 | 19.89580 |
| 14 | -6.99482 | 19.85904 |
| 15 | -6.93212 | 19.82375 |
| 16 | -6.86458 | 19.78980 |
| 17 | -6.79211 | 19.75693 |
| 18 | -6.40802 | 19.61796 |
| 19 | 0.00000 | 17.50647 |
| 20 | 0.00000 | 17.50647 |

図 17.4 座標

17.4 歯形 DXF 出力

①ロータ組図, ②インナーロータ歯形, ③アウターロータ歯形を円弧データ DXF ファイルで出力することができます。図 17.5 に設定フォームを、図 17.6 に CAD 作図例を示します。

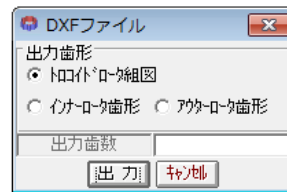


図 17.5 DXF ファイル設定

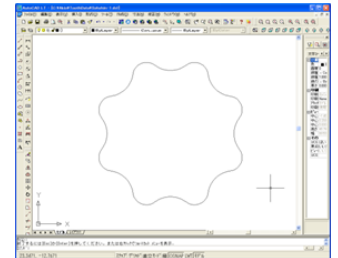


図 17.6 CAD 作図例

17.5 面積計算

歯形計算後、各面積および吐出量を図 17.7 に示します。図中の x マークはロータ歯形の接点を示します。

| 面積計算 | | 吐出量 | |
|------|----------------------|--------|--------|
| No. | 面積(mm ²) | 吐出量 | 単位 |
| 1 | 42.0371 | 5.4511 | cc/rev |
| 2 | 37.1839 | | |
| 3 | 25.0440 | | |
| 4 | 12.1086 | | |
| 5 | 5.0114 | | |
| 6 | 5.0114 | | |
| 7 | 12.1086 | | |
| 8 | 25.0440 | | |
| 9 | 37.1839 | | |

図 17.7 面積と吐出量

17.6 レンダリング図

歯形レンダリングを図 17.8 に示します。図 17.9 のコントロールフォームにより視点や回転角を変更することができます。歯形図に接触線を観察することができます。図 17.10, 図 17.11 に作図例を示します。

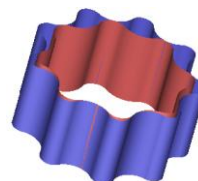


図 17.8 歯形レンダリング

| 項目 | 値 |
|---------|-----|
| X軸回転角 | -20 |
| Y軸回転角 | 5 |
| Z軸回転角 | -20 |
| Z軸移動量 | 325 |
| 回転速度 | 1 |
| ホイステップ角 | 0 |

図 17.9 コントロールフォーム

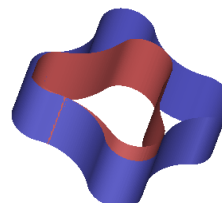


図 17.10 作図例 1

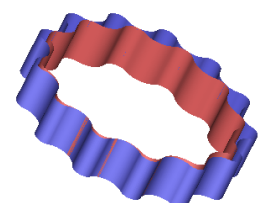


図 17.11 作図例 2

[18] Adduction differential gear design system

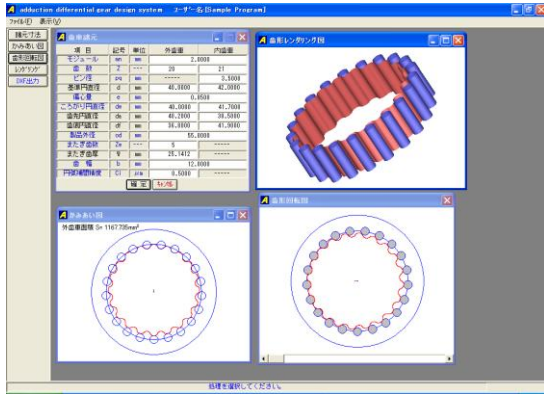


図 18.1 Adduction differential gear

18.1 概要

Adduction differential gear (愛称: ピンコイド歯車) は、外歯車と内歯車に1歯差または2歯差を与えた内転差動式の歯車減速装置です。インボリュート歯形を用いて同じ機構を成立させることができますが、効率やかみ合い干渉の点からも内歯車にピンを配置する歯形が有利と言えます。

18.2 諸元入力

- (1) 歯車諸元の入力画面を図 18.2 に示します。
- (2) 最大歯数差は、2 歯です。
- (3) 外歯車の歯形は、内歯車のピン径と、ころがり円および偏心量から決定します。
- (4) 外歯車の歯厚管理用に、またぎ歯数を設定します。
- (5) 円弧補間精度は、CAD データ作成時の精度です。

| 歯車諸元 | | | | |
|---------|----|-----|---------|---------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 外歯車 | 内歯車 |
| モジュール | mn | mm | 2.0000 | |
| 歯数 | Z | --- | 20 | 21 |
| ピン径 | pq | mm | ---- | 3.5000 |
| 基準円直径 | d | mm | 40.0000 | 42.0000 |
| 偏心量 | e | mm | 0.8500 | |
| ころがり円直径 | dw | mm | 40.0000 | 41.7000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 40.2000 | 38.5000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 38.8000 | 41.9000 |
| 製品外径 | od | mm | 55.0000 | |
| またぎ歯数 | Zw | --- | 5 | ---- |
| またぎ歯厚 | w | mm | 25.1412 | ---- |
| 歯幅 | b | mm | 12.0000 | |
| 円弧補間精度 | Ci | mm | 0.5000 | ---- |

図 18.2 諸元入力

18.3 かみ合い図

図 18.3 にかみ合い図を示します。部分拡大によりピンと外歯のかみ合いを確認することができます。

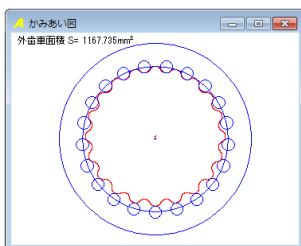


図 18.3 歯形図

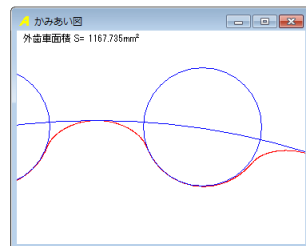


図 18.4 歯形拡大図

18.4 回転図

図 18.5 に歯車回転図を示します。

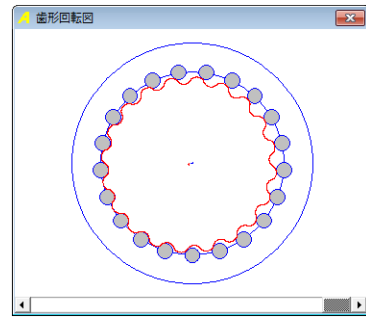


図 18.5 歯形回転図

18.5 歯形レンダリング

図 18.6 に歯形レンダリングを示します。X,Y,Z 軸で観察角度の変更ができ、Z 軸移動量で拡大、縮小ができます。また、かみ合いステップ角により回転速度を変更することができます。

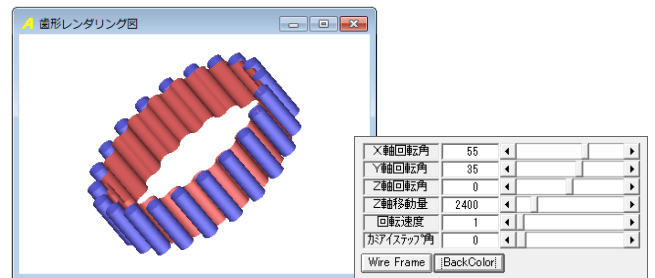


図 18.6 歯形レンダリング

18.6 偏心量を変更した歯形

図 18.2 の歯車で偏心量を 1.3mm に変更した歯形を図 18.7 および図 18.8 に示します。

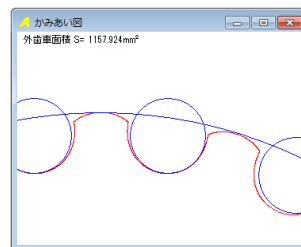


図 18.7 歯形図

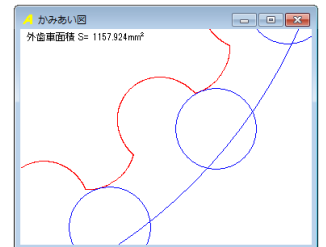


図 18.8 歯形拡大図

18.7 DXF ファイル出力

図 18.9 に CAD 作図例を示します。

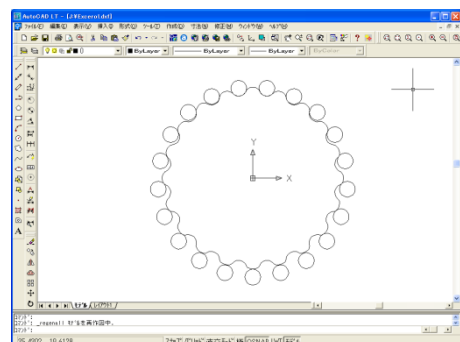


図 18.9 CAD 作図例

19 VGR ラック設計システム

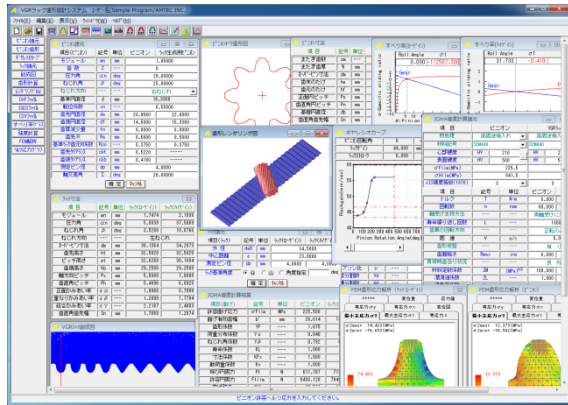


図 19.1 VGR ラック設計システム

19.1 概要

VGR(Variable Gear Ratio)ラック設計システムは、ピニオンを基準にして、ギヤレシオカーブに基づいて運動するラックの歯形を生成し、強度計算、FEM歯形応力解析、すべり率グラフ、ヘルツ応力グラフを計算することができるソフトウェアです。

19.2 ピニオンの諸元入力

ラックとかみ合うピニオンの諸元と、ラックを生成するためのピニオン諸元を入力します。図 19.2 にピニオン諸元の入力画面を、図 19.3 にピニオンの寸法を示します。

| 項目(ピニオン) | 記号 | 単位 | ピニオン | ラック生成用ピニオン |
|------------|------------|-----|---------|------------|
| モジュール | m | mm | | 1.85000 |
| 歯数 | Z | --- | | 8 |
| 圧力角 | α_n | deg | | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | | 25.00000 |
| ねじれ方向 | --- | --- | | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | | 16.3300 |
| 転位係数 | xn | --- | | 0.55000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 20.9560 | 22.0000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 14.5000 | 15.3360 |
| 歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 歯先R | Ra | mm | 0.5000 | 0.5000 |
| 基準ラック歯元R係数 | Rco | --- | 0.3750 | 0.3750 |
| 歯先外円径 | ckt | mm | 0.5220 | ---- |
| 歯底外円径 | ckb | mm | 0.4180 | ---- |
| 測定ピン径 | dp | mm | | 4.0000 |
| 軸交差角 | Σ | deg | | 20.00000 |

図 19.2 ピニオン諸元の設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ラック生成用ピニオン |
|--------|----|-----|---------|------------|
| またぎ歯数 | zm | --- | 2 | 2 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 9.1624 | 9.1624 |
| オハビ寸法 | dm | mm | 24.2471 | 24.2471 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.3130 | 2.8350 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 0.9150 | 0.4970 |
| 正面円ピッチ | Ps | mm | | 6.4128 |
| 歯直円ピッチ | Pn | mm | | 5.8119 |
| 基礎円直径 | db | mm | | 15.1537 |
| 歯直円歯先幅 | Sn | mm | 0.9295 | 0.1006 |

図 19.3 ピニオンの寸法結果

19.3 ピニオン歯形図

ピニオンの歯形図を図 19.4 に示します。図 19.5 は、歯形の部分拡大図です。

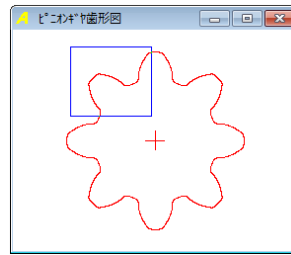


図 19.4 ピニオン歯形図

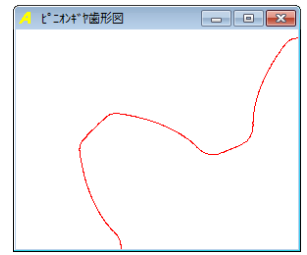


図 19.5 歯形拡大図

19.4 ギヤレシオカーブ

ピニオンの回転角に対するラックゲイン(mm/rev)の数値を設定します。図 19.6 は直線変化のグラフですが、図 19.7 は、スプライン曲線で接続しています。

- ストップ位置の入力
ピニオンの最大回転角度がラック長となります。
- 図中の一点鎖線は、
 - ころがり円がピニオン歯先円のときのストロークゲイン
 - ころがり円がピニオン基準円のときのストロークゲイン
 - ころがり円がピニオン基礎円のときのストロークゲイン
 を示します。
- グラフ表示後、スクロールバーをスライドさせると上部にピニオン回転角とラックストローク値を表示します。

図 19.6 および図 19.7 は、ピニオン回転角の増加に伴いラックゲインも増加していますが、ラックゲインを減少させることも可能です。



図 19.6 ギヤレシオカーブ(直線接続)



図 19.7 ギヤレシオカーブ(スプライン接続)

19.5 ラックの諸元設定

ラックの諸元設定画面を図 19.8 に示します。ラックの基準角度の設定により、ラックの基準位置(ピニオン回転角 0 deg 位置)における中央断面の歯形が、歯山または谷を選択します。ラック寸法の計算結果を図 19.9 に示します。



図 19.8 ラックの諸元設定



図 19.9 ラック寸法

19.6 VGR ラックの歯形創成図

ラック歯幅中央断面歯形の創成図を図 19.10 に示します。図の A は、ラック軸の中央位置であり B は、ストップ位置を示します。左右の歯形の変化を確認することができます。

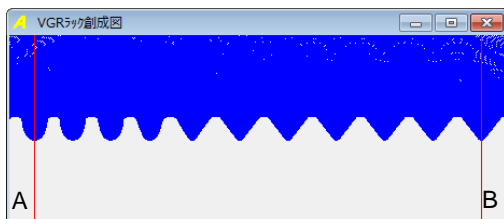


図 19.10 ラックの創成図

19.7 VGR ラックの3D 歯形計算

歯形計算の前に歯形の分割数を設定します(図 19.11).

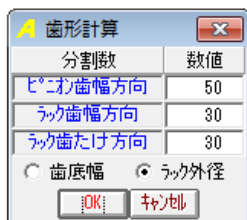


図 19.11 歯形計算の設定

19.8 レンダリング図

歯形計算終了後、[レンダリング図]ボタンを押すと、ピニオンとラックの歯形かみあい図を表示します。レンダリング図は、座標軸の角度を変更することにより、視点を変えて観察することができます。

図 19.12 にピニオン上面から見たレンダリング図を示します。また、図 19.13 のラック背面から観察したレンダリング図には、かみあい接触線を観察することができます。

図 19.13 の右に示すコントロールフォームで、

- ①座標軸の角度変更
- ②ズーム
- ③ワイヤフレーム、シェード表示切り換え
- ④背景色の設定
- ⑤ラックストロークチェック(ピニオンまたはラックの移動)の機能があります。

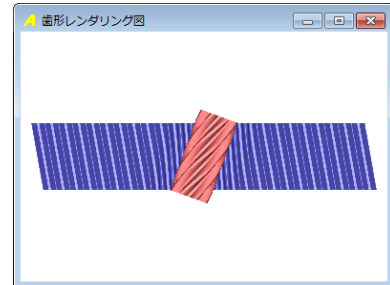


図 19.12 レンダリング(ピニオン上面から観察)

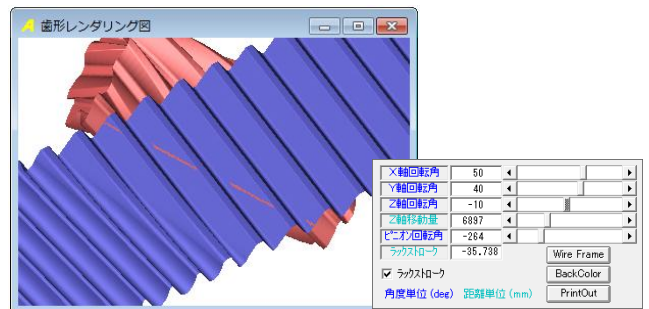


図 19.13 レンダリング(ラック背面から観察)

19.9 CAD ファイル出力

ピニオンと VGR ラックの歯形を DXF または IGES ファイルで出力することができます。図 19.14 および図 19.15 にファイル出力設定を示します。CAD 作図例を、図 19.16~図 19.19 に示します。

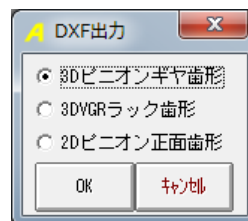


図 19.14 DXF 出力

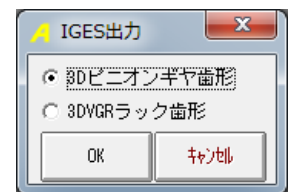


図 19.15 IGES 出力

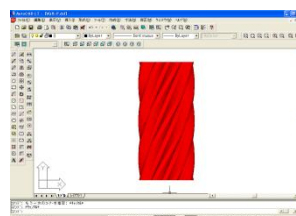


図 19.16 CAD 作図例(DXF)

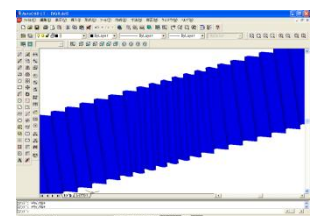


図 19.17 CAD 作図例(DXF)

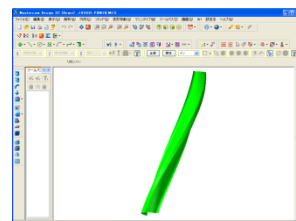


図 19.18 CAD 作図例(IGES)

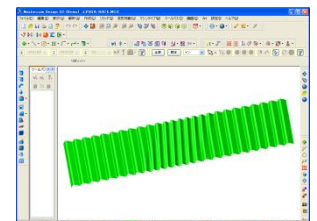


図 19.19 CAD 作図例(IGES)

19.10 すべり率グラフ

ラック軸中央のかみ合い位置とストップ位置でのかみ合いにおけるすべり率グラフを図 19.20 及び図 19.21 に示します。図 19.20 のピニオン歯元で大きなすべりが発生しています。

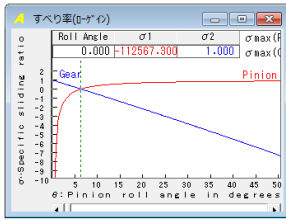


図 19.20 すべり率(Low)



図 19.21 すべり率(High)

19.11 強度計算

JGMA 強度計算に基づいた計算結果を図 19.22 および図 19.23 に示します。ラックの強度は、Low Gain 側と High Gain 側の 2 箇所の歯形について強度計算をします。

※AGMA 強度計算は、別途お問い合わせ下さい。

| JGMA強度計算諸元 | | ピニオン | | VGRラック | |
|-----------------------|--------|---------------|---------|----------|-----|
| 熱処理 | | 高周波焼入れ | | 高周波焼入れ | |
| 材料記号 | SCM440 | SCM440 | | SCM440 | |
| 心部硬度 | HV | 242 | | HV | 242 |
| 表面硬度 | HV | 500 | | HV | 500 |
| σ_{Flim} (MPa) | | 265.0 | | 265.0 | |
| σ_{Hlim} (MPa) | | 1069.0 | | 1069.0 | |
| JIS精度等級(1978) | | 3 | | 3 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | VGRラック | |
| トルク | T | N*m | 5.000 | ----- | |
| 回転数 | n | r/min | 60.000 | ----- | |
| 軸受け支持方法 | | | | 両軸受けに对称 | |
| 寿命繰返し回数 | L | --- | | 10000000 | |
| 歯車の回転方向 | | | | 正転のみ | |
| 周速度 | v | m/s | | 0.0514 | |
| 歯形修整 | | | | 有り | |
| 歯面粗さ | Rmax | μm | 6.00 | 6.00 | |
| 負荷時歯当り状況 | | | | 良好 | |
| 材料定数係数 | ZM | $(MPa)^{0.5}$ | 189.800 | 189.800 | |
| 潤滑油係数 | ZL | --- | 1.000 | 1.000 | |
| 過負荷係数 | Ko | --- | | 1.000 | |
| 歯元曲げ安全率 | SF | --- | | 1.200 | |
| 歯面損傷安全率 | SH | --- | | 1.150 | |

図 19.22 強度計算設定

| JGMA強度計算結果 | | | | |
|------------|-----------------|-----|----------|----------------|
| 項目(曲げ) | 記号 | 単位 | ピニオン | ラック(Low Gain) |
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 265.000 | 265.000 |
| 曲げ有効歯幅 | b' | mm | 20.614 | 13.775 |
| 歯形係数 | YF | --- | 1.675 | 2.065 |
| 荷重分布係数 | Y ϵ | --- | 0.840 | 0.397 |
| ねじれ角係数 | Y β | --- | 0.792 | 0.971 |
| 寿命係数 | KL | --- | 1.000 | 1.400 |
| 寸法係数 | KFx | --- | 1.000 | 1.000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.000 | 1.000 |
| 呼び円周力 | Ft | N | 611.767 | 713.253 |
| 許容円周力 | Ftlim | N | 766.463 | 934.765 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 12.352 | 13.097 |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 21.454 | 20.233 |
| 項目(面圧) | 記号 | 単位 | ピニオン | ラック(High Gain) |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 1069.000 | 1069.000 |
| 面圧有効歯幅 | bw | mm | 18.764 | 13.775 |
| 接触係数 | ZH | --- | 2.296 | 4.075 |
| 寿命係数 | KHL | --- | 1.000 | 1.300 |
| かみあい率係数 | Z ϵ | --- | 0.917 | 0.952 |
| 粗さ係数 | ZR | --- | 1.008 | 1.004 |
| 潤滑速度係数 | ZV | --- | 0.891 | 0.891 |
| 硬さ比係数 | ZW | --- | 1.000 | 1.000 |
| 荷重分布係数 | KH β | --- | 1.000 | 1.000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.000 | 1.000 |
| 呼び円周力 | Fc | N | | 612.370 |
| 許容円周力 | Fclim | N | 1327.453 | 480.501 |
| 歯面強さ | Sfc | --- | 2.168 | 0.785 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 726.064 | 1206.806 |

図 19.23 強度計算結果

19.12 ヘルツ応力グラフ

ラック軸中央のかみ合い位置とストップ位置でのかみ合いにおけるヘルツ応力グラフを図 19.24 および図 19.25 に示します。

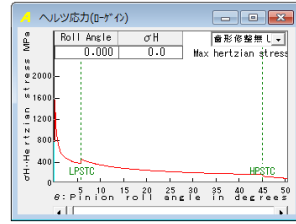


図 19.24 ヘルツ応力(Low)

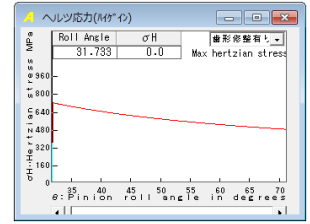


図 19.25 ヘルツ応力(High)

19.13 FEM 歯形応力

ピニオンと VGR ラックの 2 次元 FEM 歯形応力解析をします。図 19.26 に FEM 設定画面を、図 19.27 および図 19.28 に応力分布図を示します。

| FEM 解析諸元 | | | | |
|----------|-------|-----|----------|---------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ラック(Low Gain) |
| 材料記号 | --- | --- | SCM440 | SCM440 |
| 縦弾性係数 | E | MPa | 205800.0 | 205800.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.300 | 0.300 |
| 縦分割数 | Vd | --- | 12 | 12 |
| 横分割数 | Hd | --- | 22 | 23 |
| 荷重点位置 | Pn | --- | 2 | 2 |
| 荷重 | Ft | N | 611.77 | 713.25 |
| 色階調数 | nc | --- | | 100 |
| 変位倍率 | Sd | --- | | 100 |

図 19.26 FEM 解析諸元

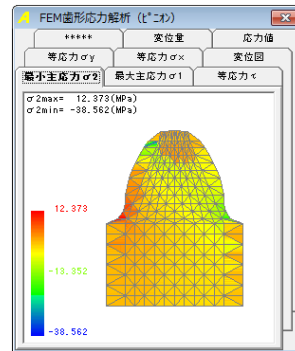


図 19.27 FEM 解析(P)

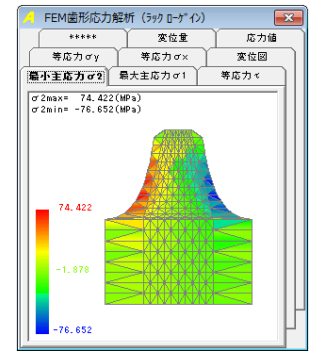


図 19.28 FEM 解析(R-Low)

※ ラックの修整などに関しては、別途お問い合わせください。

[20] Face gear design system iii

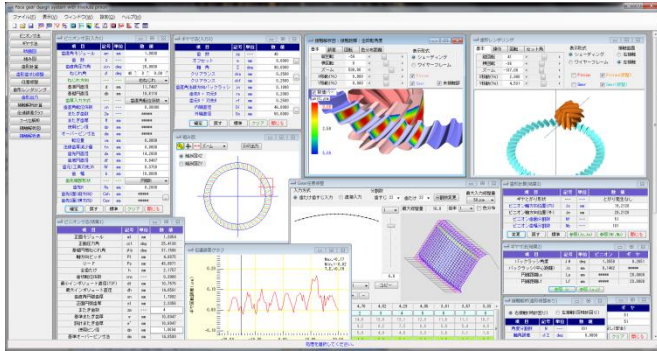


図 20.1 Face gear design system iii

20.1 概要

本ソフトウェアは、Face Gear Design System を新しくした商品です。今までオプション扱いしていた機能も一部、基本ソフトウェアに含めています。また、軸角は90°以外も計算でき、ピニオン歯数1歯（少歯数オプション）にも対応しています。

本ソフトウェアは、ピニオンの歯形（インボリュート）を基にして、それにかみ合うフェースギヤの3次元歯形を決定し、軸角誤差を与えたときの、かみ合い時の歯当たり（接触距離）や実かみ合い率、伝達誤差、すべり速度、そして、すべり率の機能も追加しました。図 20.1 にソフトウェアの全体画面を示します。

20.2 ソフトウェアの構成

ソフトウェアの構成を表 20.1 に示します。表中の○は基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

表 20.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | 構成 |
|-----|----------|-------|----|
| 1 | ピニオン寸法 | 20.3 | ○ |
| 2 | ギヤ寸法 | 20.4 | ○ |
| 3 | 組み図 | 20.4 | ○ |
| 4 | 断面図 | 20.5 | ○ |
| 5 | 歯形計算 | 20.6 | ○ |
| 6 | 歯形、歯すじ修整 | 20.7 | ○ |
| 7 | 任意修整 | 20.7 | ○ |
| 8 | 歯形レンダリング | 20.8 | ○ |
| 9 | 接触解析 | 20.9 | ○ |
| 10 | 歯形出力 | 20.10 | ○ |
| 11 | 少歯数 | 20.12 | ◎ |
| 12 | 設計データ管理 | --- | ○ |

20.3 ピニオン寸法

図 20.2 にピニオン諸元の設定画面を示します。ピニオン歯数は6~99 入力できますが、少歯数対応機能（オプション）として1~5 歯入力することができます。少歯数の設計例は 20.12 項に示します。

ねじれ角は0°~80° までを設定することができ、歯厚入力方式では、転位係数、またぎ歯厚、オーバーピンそして転位量から選択することができます。また、面取りはC面とR面で設定することができます。

図 20.3 にピニオン寸法の計算結果を示します。オーバーピン径は理論値を表示しますが、使用するピン径に合わせて変更することができます。

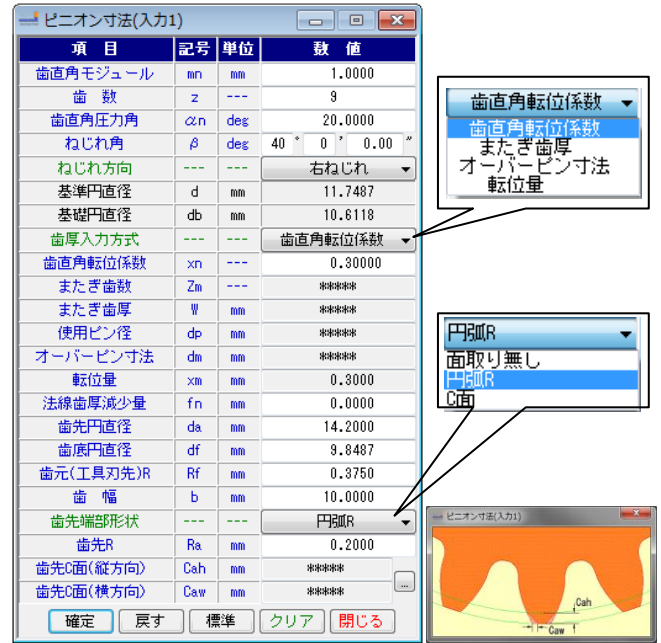


図 20.2 ピニオン諸元



図 20.3 ピニオン寸法

20.4 フェースギヤ寸法

図 20.4 にフェースギヤ諸元設定画面を示します。軸角入力範囲は45°~135°です。オフセットを与えるとフェースギヤの歯形生成に強く影響を及ぼすためフェースギヤの外径側には歯先尖りが、また、内径側にはアンダーカットが生じ易くなります。そのため、入力時には注意が必要ですが、標準値および制限値を示しますので入力は容易です。なお、「刃先R」はフェースギヤを生成するときの工具の刃先Rを示しています。また、オフセットと内径、外径の定義を図 20.5 に示し、寸法結果と組み図を図 20.6 および図 20.7 に示します。なお、オフセットとねじれ角には制限があります。



図 20.4 フェースギヤ諸元

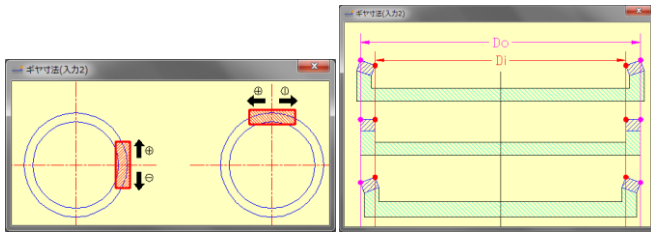


図 20.5 オフセットと内径，外径の定義

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|-----|-----|---------|
| ギヤとがり形状 | --- | --- | とがり発生なし |
| ピニオン軸方向位置(内) | Js | mm | 19.2126 |
| ピニオン軸方向位置(外) | Je | mm | 29.2126 |
| ピニオン歯面分割数 | Nf | --- | 51 |
| ピニオン歯幅分割数 | Nb | --- | 101 |

図 20.10 歯形計算結果

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------------|----|-----|--------|---------|
| バックラッシュ角度 | Jθ | deg | 1.3550 | 0.2851 |
| バックラッシュ(中心距離) | Jc | mm | 0.1462 | --- |
| 円錐距離La | La | mm | --- | 28.0000 |
| 円錐距離Lf | Lf | mm | --- | 28.0000 |

図 20.6 ギヤ寸法

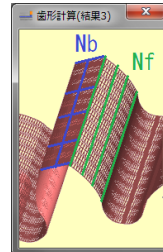


図 20.11 歯形分割

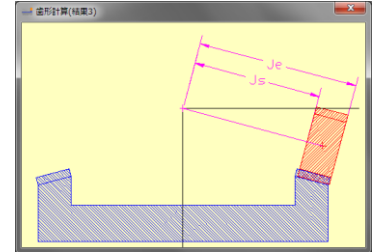


図 20.12 ピニオンの位置

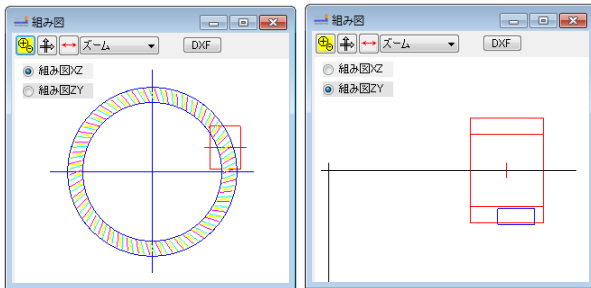
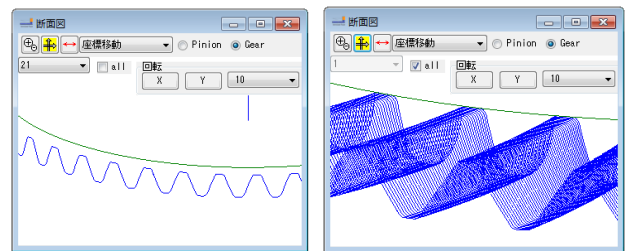


図 20.7 組み図



(a) 断面 No.21 の歯形

(b) 全断面歯形

図 20.13 ギヤ歯形 (断面)

20.5 断面図

図 20.8 にピニオン歯形を示します。ただし、ピニオンの赤線の歯形は図 20.2 で設定したピニオン諸元に基いた歯形で、緑線はギヤを加工する工具の刃形です。

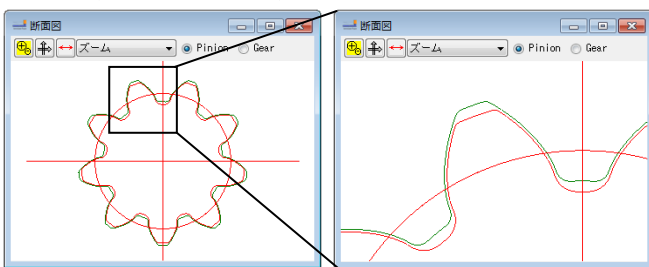


図 20.8 ピニオン歯形

20.6 歯形計算

ギヤの歯形を計算する際、歯形分割数 (図 20.9 参照) と歯幅分割数 (図 20.11 参照) を設定します。このとき、図 20.9 に刃先とがりに発生の有無を表示します。刃先尖りが生じる場合は、フェースギヤの歯形を正しく生成することができません。

| 項目 | 記号 | 単位 | ギヤ |
|-------|----|-----|--------|
| 歯面分割数 | Nf | --- | 51 |
| 歯幅分割数 | Nb | --- | 51 |
| 刃形とがり | | | なし(安全) |

図 20.9 設定 (フェースギヤ歯形)

歯形計算終了後、図 20.10 を表示します。ピニオンとギヤの位置 (Js, Je) の定義を図 20.12 に示し、ギヤの歯形 (断面) の例を図 20.13 に示します。

20.7 歯形・歯すじ修整

歯形および歯すじ修整は図 20.14~20.16 のように定型で与えることができ、設定した修整を図 20.16 のように表示することができます。また、定型で設定した修整は図 20.17 のように任意修整にデータを引き継ぐことができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|------|----|------|
| 歯先修整量1 | f1.1 | μm | 0.00 |
| 歯先修整量2 | f1.2 | μm | 0.00 |
| 歯たけ1 | H1 | mm | 0.00 |
| 歯たけ2 | H2 | mm | 0.00 |

図 20.14 歯形修整 (定型)

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|------|----|------|
| 修整量1(外側) | f1.1 | μm | 0.00 |
| 修整量1(内側) | f1.2 | μm | 0.00 |
| 歯幅方向距離1 | B1 | mm | 0.00 |
| 歯幅方向距離2 | B2 | mm | 0.00 |
| 歯幅方向距離3 | B3 | mm | 0.00 |
| 歯幅方向距離4 | B4 | mm | 0.00 |

図 20.15 歯すじ修整 (定型)

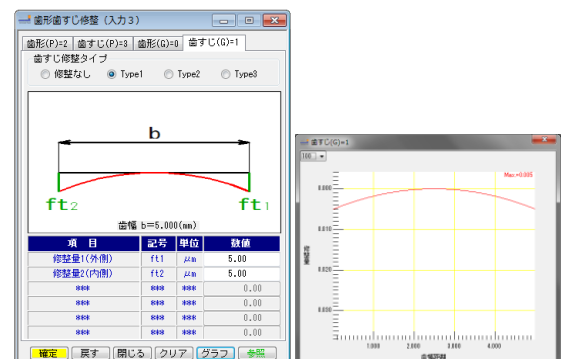
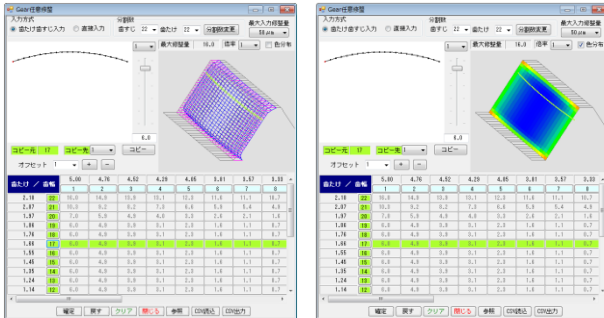


図 20.16 歯すじ修整の例

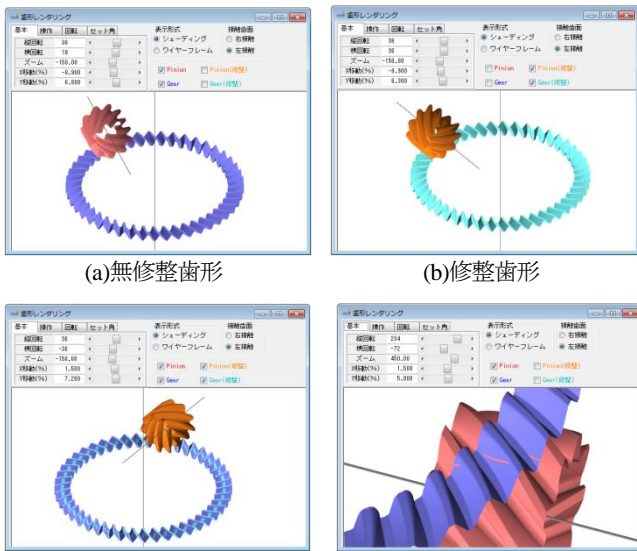
図 20.17 の任意修整では、歯面の分割や各位置でのデータの変更が容易であり図 20.17(b)のように修整を色分布で表すことができます。本例では、図 20.17 のようにピニオンは無修整とし、ギヤに歯面修整を与えるものとします。ここで設定した歯面修整は、CSV ファイルとして出力することができますし、他で作成した CSV ファイルを読み込むこともできます。



(a)歯面修整 (b)色分布表示
図 20.17 歯面修整 (任意修整), ギヤの例

20.8 歯形レンダリング

生成した歯形を図 20.18 のように表示することができます。歯の接触を確認するため自動回転機能や回転補正、そして軸角に誤差を与え歯の接触を確認することができます。



(a)無修整歯形 (b)修整歯形
(c) 無修整歯形と修整歯形 (d)歯面接触
図 20.18 歯形レンダリング

20.9 接触解析

図 20.19 で接触解析の設定を行い[確定]すると生成した歯形の伝達誤差解析、歯当たり (接触距離) や、すべり速度を計算します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|-------------------|---------|---------|
| 角度分割数 | N | --- | 101 |
| 軸角誤差 | $\Delta \Sigma$ | deg | 0.0000 |
| ねじれ角誤差 | $\Delta \beta$ | deg | 0.0000 |
| 誤差X | Δx | mm | 0.0000 |
| 誤差Y | Δy | mm | 0.0000 |
| 誤差Z | Δz | mm | 0.0000 |
| 回転数 | n | 1/min | 800.000 |
| 最大接触距離 | L | μm | 5.00 |
| 全かみ合い率 | $\epsilon \gamma$ | --- | 2.29 |

図 20.19 接触解析設定

そして、歯面修整を考慮し、かみ合い接触を基にして全かみ合い率 (本例では $\epsilon \gamma=2.29$) を計算します。伝達誤差解析結果 (TE=0.19 μm) を図 20.20 に、フーリエ解析結果を図 20.21 に示します。

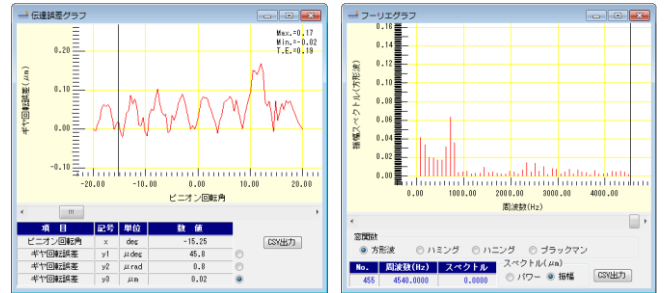
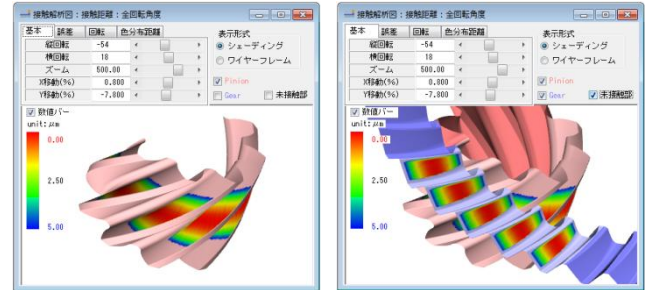
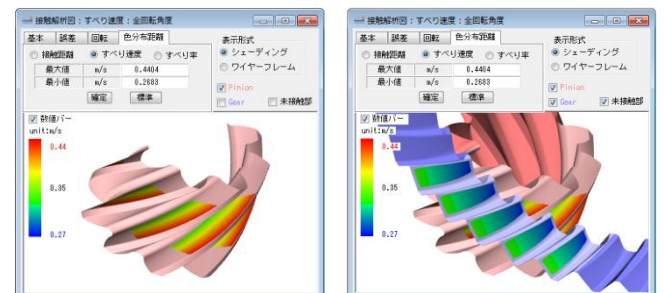


図 20.20 伝達誤差(TE=0.17 μm) 図 20.21 フーリエ解析

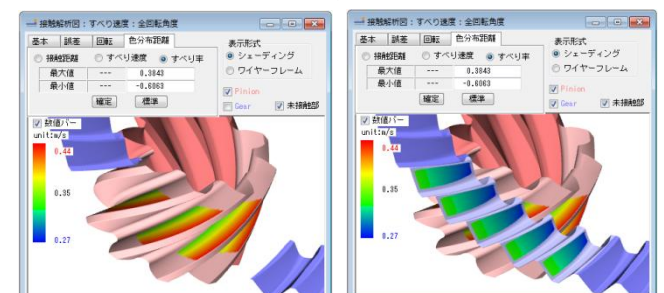
歯当たり解析 (接触距離) とすべり速度、そして、すべり率を図 20.22~20.24 に示します。本例では、図 20.17 でギヤに歯面修整を与えていることから図 20.22 では歯面両端部で接触が弱くなっていることが解ります。また、フェースギヤは、ギヤの外側と内側で、すべりの差が大きくなることから図 20.23 や図 20.25 で、すべり速度を確認することができます。なお、伝達誤差や、すべり速度 (率) は、軸の取り付け誤差を与えても解析することができます、これらは両歯面について解析可能です。



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 20.22 歯当たり解析 (接触距離)



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 20.23 すべり速度



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 20.24 すべり率

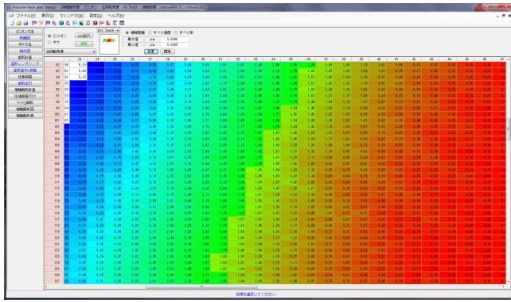


図 20.25 歯当たり解析 (接触距離) のセル表示

20.10 歯形出力

生成した歯形を図 20.26 で出力することができます。図 20.18 の歯形を 3D-IGES で出力し、CAD で作図した例を図 20.27 に示します。

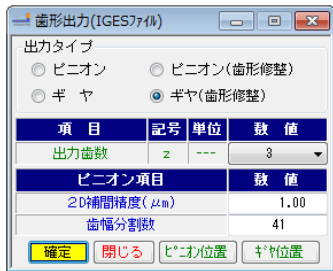
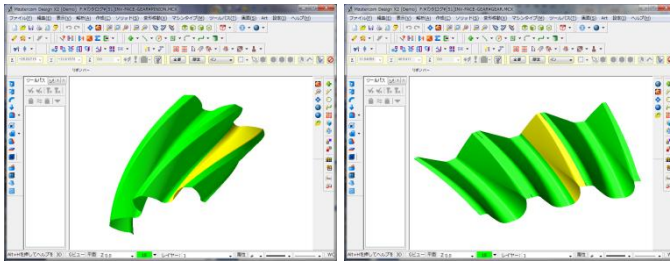


図 20.26 歯形出力



(a)ピニオン

(b)フェースギヤ

図 20.27 CAD 作図例

20.11 軸角 $\Sigma=120^\circ$ および $\Sigma=70^\circ$ の例

ピニオンおよびギヤの諸元を同じとして図 20.28 のように軸角を $\Sigma=120^\circ$ としたときの計算例を図 20.29~20.31 に示します。



図 20.28 ギヤ諸元

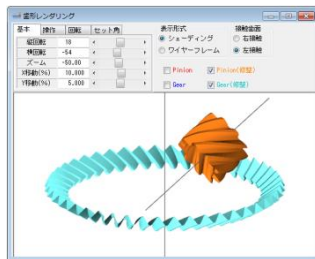


図 20.29 歯形レンダリング

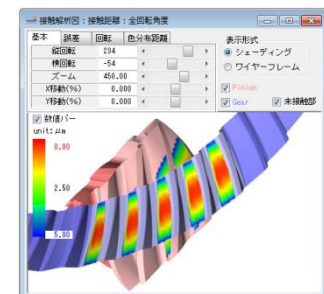


図 20.30 接触距離

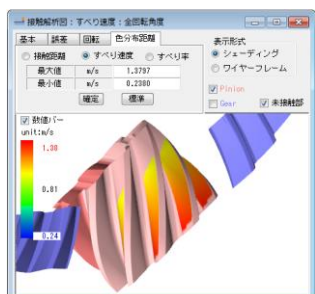


図 20.31 すべり速度

また、ピニオンおよびギヤの諸元を同じとして図 20.32 のように軸角を $\Sigma=70^\circ$ としたときの計算例を以下に示します。



図 20.32 ギヤ諸元

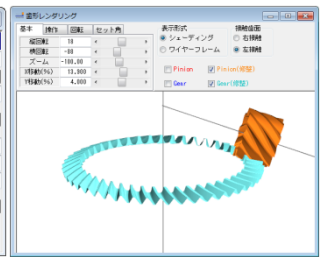


図 20.33 歯形レンダリング

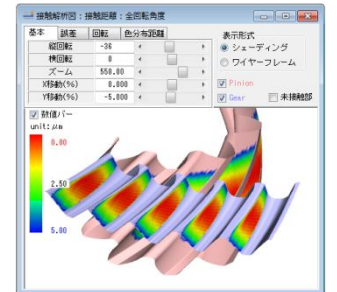


図 20.34 接触距離

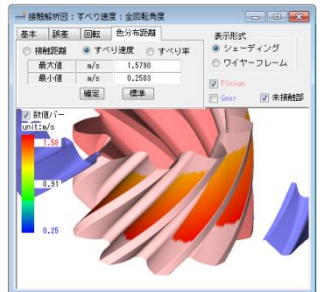


図 20.35 すべり速度

20.12 少歯数 (オプション)

高減速比を得るためピニオン歯数 $z_1=1$ を設定することができます。ここでは $z_1=2$ とし、ギヤ歯数を $z_2=51$ とした例を以下に示します。また、少歯数の場合でも図 20.28 のように軸角を 90° 以外で設計することができます。



図 20.36 ピニオン諸元と寸法

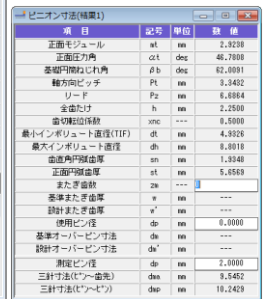


図 20.37 ギヤ諸元

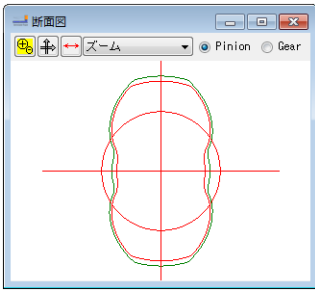


図 20.38 ピニオン歯形

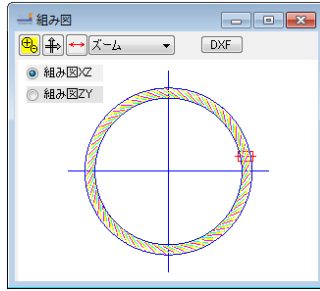


図 20.39 組み図

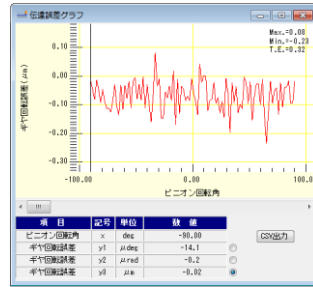


図 20.44 伝達誤差

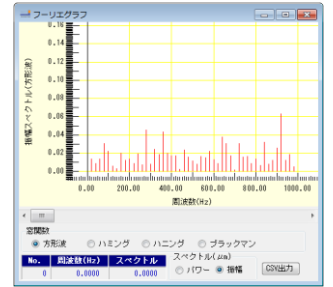
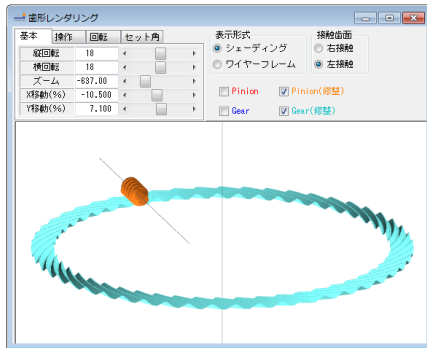


図 20.45 フーリエ解析



$z_1=2, z_2=51, \Sigma=90^\circ, \text{Offset}=15$
図 20.40 歯形レンダリング

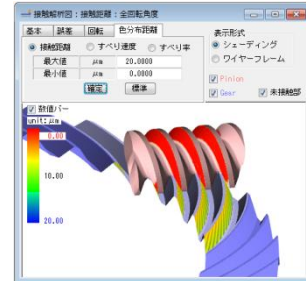


図 20.46 接触距離

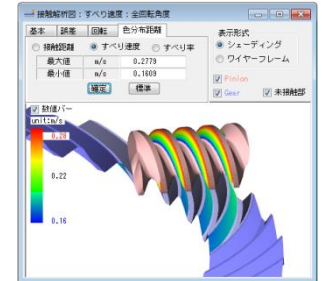


図 20.47 すべり速度

$m_n=1, z_1=2, d_{a1}=5.80, d_{a2}=65.00, d_{f1}=1.611, z_2=51, d_{a0}=80, \Sigma=120^\circ, e=12.0$ としたときの計算結果を図 20.50~20.53 に示します。

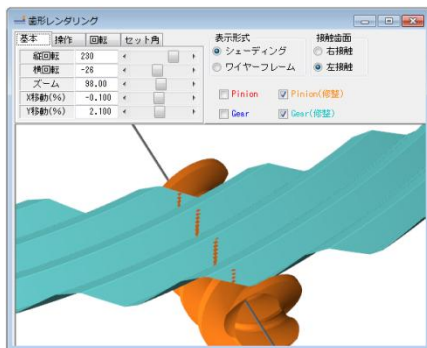
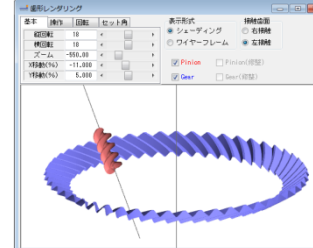


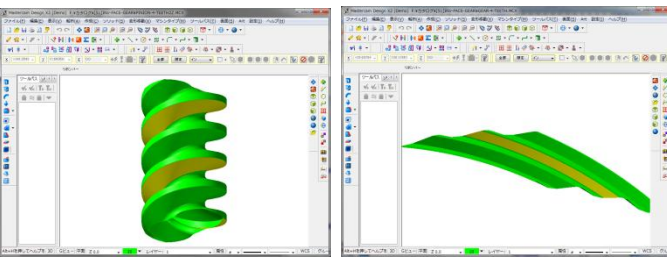
図 20.41 歯形レンダリング



$z_1=2, z_2=51, \Sigma=120^\circ, \text{Offset}=12$
図 20.48 歯形レンダリング

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|----------------------|-------|---------|
| 角度分割数 | N | --- | 101 |
| 軸角誤差 | $\Delta \Sigma$ | deg | 0.0000 |
| ねじれ角誤差 | $\Delta \beta$ | deg | 0.0000 |
| 誤差X | Δx | mm | 0.0000 |
| 誤差Y | Δy | mm | 0.0000 |
| 誤差Z | Δz | mm | 0.0000 |
| 回転数 | n | 1/min | 600.000 |
| 最大接触距離 | L | μm | 10.00 |
| 全かみ合い率 | $\varepsilon \gamma$ | --- | 2.91 |

図 20.49 接触解析設定



(a)ピニオン (b)フェースギヤ

図 20.42 CAD 作図例

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|----------------------|-------|---------|
| 角度分割数 | N | --- | 101 |
| 軸角誤差 | $\Delta \Sigma$ | deg | 0.0000 |
| ねじれ角誤差 | $\Delta \beta$ | deg | 0.0000 |
| 誤差X | Δx | mm | 0.0000 |
| 誤差Y | Δy | mm | 0.0000 |
| 誤差Z | Δz | mm | 0.0000 |
| 回転数 | n | 1/min | 600.000 |
| 最大接触距離 | L | μm | 10.00 |
| 全かみ合い率 | $\varepsilon \gamma$ | --- | 3.34 |

図 20.43 接触解析設定

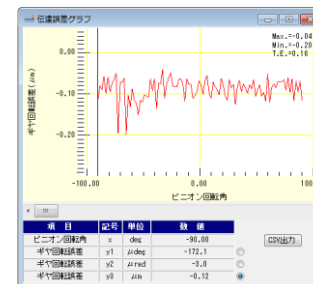


図 20.50 伝達誤差

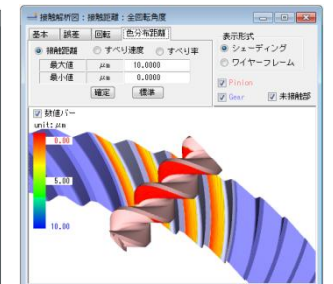


図 20.51 接触距離

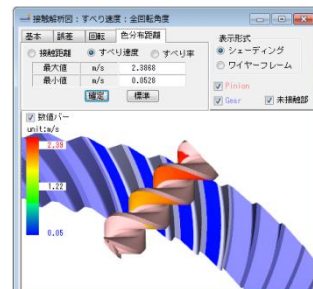


図 20.52 すべり速度

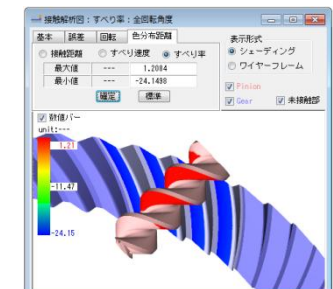


図 20.53 すべり率

[21] L-Hypoid gear design system

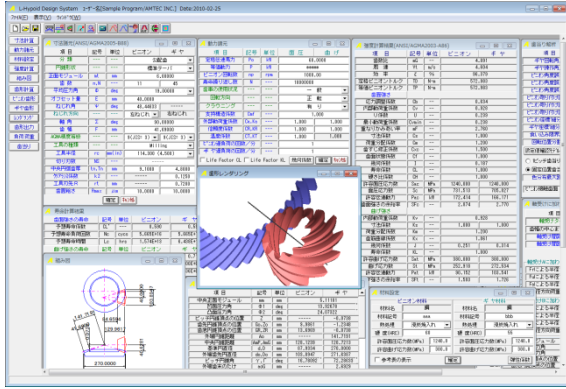


図 21.1 L-Hypoid gear design system

21.1 概要

L-Hypoid gear design system は、寸法、歯形、強度計算をトータルに設計することができます。ハイポイドギヤの歯形、歯すじは、歯切り機械から生成されるものですが、本ソフトウェアでは、球面インボリュート歯形を持つスパイラルベベルギヤ(大歯車)にオフセットを与えピニオンの歯形を解析し1組の歯車としています。図 21.1 に全体画面を示します。

21.2 寸法設定

図 21.2 に寸法設定画面を示します。数値が不明な場合は、標準値を入力することができ、ねじれ角やオフセット量、工具半径などを自由に設定することができます。図 21.2 では勾配歯を選択していますが、等高歯も設計することができます。



図 21.2 寸法諸元設定

21.3 寸法計算結果

AGMA2005-B88 規格に基づいてハイポイドギヤの各部寸法を計算します。図 21.3 に寸法結果を示します。図 21.4 の諸元修整で、歯形の解析精度を設定し、クラウニング、歯形修整、歯先円すい角、歯たけなどを変更することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------------------|----------------------|-----|----------|----------|
| 中央正面モジュール | | mm | 5.11101 | |
| 凹面圧力角 | $\Phi 1$ | deg | 19.92678 | |
| 凸面圧力角 | $\Phi 2$ | deg | 24.07922 | |
| ピッチ円錐頂点の位置 | Z | mm | ---- | |
| 歯先円錐頂点の位置 | G_o, Z_o | mm | 9.9861 | -1.2348 |
| 歯底円錐頂点の位置 | G_R, Z_R | mm | 13.6969 | -0.0738 |
| 外端円錐距離 | A_o | mm | ---- | |
| 中央円錐距離 | A_mP, A_mG | mm | 128.1239 | 120.7213 |
| 基準円直径 | d, D | mm | 87.9334 | 270.0000 |
| 外端歯先円直径 | d_o, D_o | mm | 103.8947 | 271.6387 |
| ピッチ円錐角 | γ, Γ | deg | 16.78092 | 72.28633 |
| 外端歯末のたけ | aoG | mm | ---- | |
| 外端歯元のたけ | boG | mm | ---- | |
| 外端有効歯たけ | hk | mm | ---- | |
| 外端全歯たけ | ht | mm | 12.1669 | 11.9757 |
| 中央歯末のたけ | a | mm | 6.7945 | 2.1286 |
| 中央歯元のたけ | b | mm | 3.2442 | 7.9089 |
| クリアランス | c | mm | 1.1154 | 1.1154 |
| 中央有効歯たけ | h | mm | 8.9231 | |
| 中央全歯たけ | hm | mm | 10.0387 | |
| 歯元角の和 | $\Sigma \delta$ | deg | 5.21780 | |
| 歯元角 | δ | deg | 1.48901 | 3.74879 |
| 歯末角 | α | deg | 3.58355 | 1.53937 |
| 歯底円錐角 | γ_R, Γ_R | deg | 15.31191 | 68.53754 |
| 歯先円錐角 | γ_o, Γ_o | deg | 20.36446 | 73.82570 |
| 90°相当歯数比 | $n/80$ | --- | 3.1308 | |
| 中央円ピッチ | P_m | mm | 18.0567 | |
| Crossing Point～外端歯先 | x_o, X_o | mm | 129.9617 | 40.6281 |
| 中央ピッチ円直径 | d_m | mm | 73.3820 | 229.3956 |
| 中央歯面角円弧歯厚減少量 | f_n | mm | 0.0836 | 0.0331 |
| ギヤ外端ねじれ角 | Ψ_{oG} | deg | ---- | |
| 中央歯面角材割歯厚 | t_{nc} | mm | 8.9767 | 4.6993 |
| 中央歯面角材割歯たけ | ac | mm | 7.0624 | 2.1366 |
| トータルバックラッシュ | j | mm | 0.1664 | |
| 中央ねじれ角 | Ψ_P, Ψ_G | deg | 48.44177 | 29.19668 |

図 21.3 寸法結果(標準値)



図 21.4 修整諸元設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------------------|----------------------|-----|----------|----------|
| 中央正面モジュール | | mm | 5.11101 | |
| 凹面圧力角 | $\Phi 1$ | deg | 19.92678 | |
| 凸面圧力角 | $\Phi 2$ | deg | 24.07922 | |
| ピッチ円錐頂点の位置 | Z | mm | ---- | |
| 歯先円錐頂点の位置 | G_o, Z_o | mm | 9.9862 | -1.2350 |
| 歯底円錐頂点の位置 | G_R, Z_R | mm | 13.6969 | -0.0707 |
| 外端円錐距離 | A_o | mm | ---- | |
| 中央円錐距離 | A_mP, A_mG | mm | 128.1239 | 120.7213 |
| 基準円直径 | d, D | mm | 87.9334 | 270.0000 |
| 外端歯先円直径 | d_o, D_o | mm | 103.8947 | 271.6387 |
| ピッチ円錐角 | γ, Γ | deg | 16.78092 | 72.28633 |
| 外端歯末のたけ | aoG | mm | ---- | |
| 外端歯元のたけ | boG | mm | ---- | |
| 外端有効歯たけ | hk | mm | ---- | |
| 外端全歯たけ | ht | mm | 12.1669 | 11.9757 |
| 中央歯末のたけ | a | mm | 6.7945 | 2.1286 |
| 中央歯元のたけ | b | mm | 3.2442 | 7.9070 |
| クリアランス | c | mm | 1.1154 | 1.1125 |
| 中央有効歯たけ | h | mm | 8.9231 | |
| 中央全歯たけ | hm | mm | 10.0387 | |
| 歯元角の和 | $\Sigma \delta$ | deg | 5.21780 | |
| 歯元角 | δ | deg | 1.48901 | 3.74879 |
| 歯末角 | α | deg | 3.58354 | 1.53937 |
| 歯底円錐角 | γ_R, Γ_R | deg | 15.31191 | 68.53754 |
| 歯先円錐角 | γ_o, Γ_o | deg | 20.36446 | 73.82570 |
| 90°相当歯数比 | $n/80$ | --- | 3.1308 | |
| 中央円ピッチ | P_m | mm | 18.0567 | |
| Crossing Point～外端歯先 | x_o, X_o | mm | 129.9617 | 40.6281 |
| 中央ピッチ円直径 | d_m | mm | 73.3820 | 229.3956 |
| 中央歯面角円弧歯厚減少量 | f_n | mm | 0.0836 | 0.0331 |
| ギヤ外端ねじれ角 | Ψ_{oG} | deg | ---- | |
| 中央歯面角材割歯厚 | t_{nc} | mm | 8.9767 | 4.6993 |
| 中央歯面角材割歯たけ | ac | mm | 7.0624 | 2.1366 |
| トータルバックラッシュ | j | mm | 0.1664 | |
| 中央ねじれ角 | Ψ_P, Ψ_G | deg | 48.44177 | 29.19668 |

図 21.5 寸法結果(修整諸元変更後)

21.4 組み図

図 21.5 の寸法計算結果に基づいたハイポイドギヤ寸法を図 21.6 に示します。

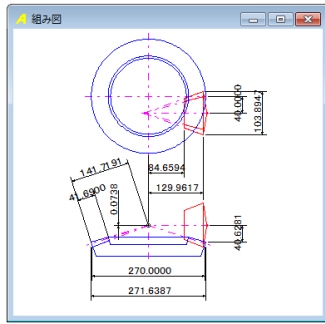


図 21.6 寸法図

21.5 強度計算

21.5.1 動力設定

ハイポイドギヤの強度計算は、ANSI/AGMA2003-A86 規格に基づいています。図 21.7 に動力諸元設定を示します。図 21.8 および図 21.9 に、Life Factor グラフを示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 面圧 | 曲げ |
|--------------|--------|-----|-----------|-------|
| 定格伝達馬力 | Po | kW | 60.0000 | |
| 等価動力 | P | kW | ***** | |
| ピニオン回転数 | np | rpm | 1000.0000 | |
| 寿命繰り直し数 | N | --- | 10000000 | |
| 歯車の使用状況 | --- | --- | 一般 | |
| 回転方向 | --- | --- | 正転 | |
| クラウニング | --- | --- | 有り | |
| 支持構造係数 | Cmf | --- | 1.000 | |
| 外部動荷重係数 | Ca, Ka | --- | 1.000 | 1.000 |
| 信頼度係数 | CR, KR | --- | 1.000 | 1.000 |
| 温度係数 | CT, KT | --- | 1.000 | 1.000 |
| ピニオン過負荷の回転/分 | --- | --- | 1 | |
| ギヤ過負荷の回転/分 | --- | --- | 1 | |

図 21.7 動力諸元設定

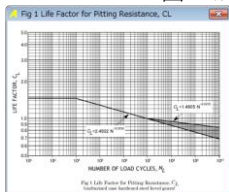


図 21.8 Life Factor (CL)

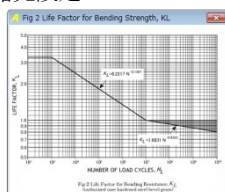


図 21.9 Life Factor (KL)

21.5.2 幾何係数

幾何係数(I, J)の標準値を図 21.10 に示しますが、図 21.11 および図 21.12 のグラフを参考にして任意に変更することができます。

| 項目 | 記号 | ピニオン | ギヤ |
|---------|--------|---------|---------|
| 面圧用幾何係数 | I | | 0.18698 |
| 曲げ用幾何係数 | JP, JG | 0.25112 | 0.31410 |
| オフセット係数 | E/D | | 0.15 |

図 21.10 幾何係数(標準値)

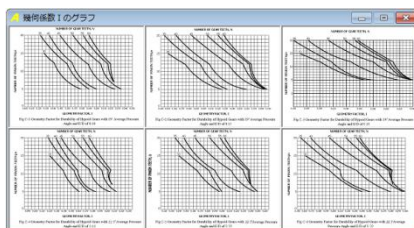


図 21.11 幾何係数(I)

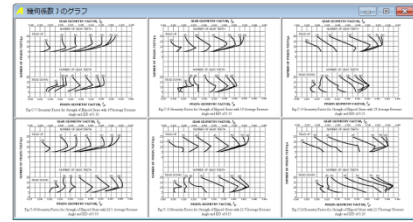


図 21.12 幾何係数(J)

21.5.3 材料設定

図 21.13 に材料、熱処理、硬度、許容応力数を設定します。

| ピニオン材料 | | ギヤ材料 | |
|--------------|--------|--------------|--------|
| 材料名 | 鋼 | 材料名 | 鋼 |
| 材料記号 | aaa | 材料記号 | bbb |
| 熱処理 | 浸炭焼入れ | 熱処理 | 浸炭焼入れ |
| 硬度(HRC) | 60 | 硬度(HRC) | 55 |
| 許容面圧応力数(MPa) | 1240.0 | 許容面圧応力数(MPa) | 1240.0 |
| 許容曲げ応力数(MPa) | 380.0 | 許容曲げ応力数(MPa) | 380.0 |

図 21.13 材料設定

21.5.4 強度計算結果

ハイポイドギヤの強度結果を図 21.14 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|-----------|-----------------|-----|----------|----------|
| 歯数比 | mG | -- | | 4.091 |
| 周速 | Vt | m/s | | 4.604 |
| 効率 | ε | % | | 96.379 |
| 定格ピニオントルク | TD | N·m | 572.983 | |
| 等価ピニオントルク | TP | N·m | 572.983 | |
| 歯面強さ | | | | |
| 応力調整係数 | Ob | -- | 0.634 | |
| 内部動荷重係数 | Cv | -- | 0.928 | |
| U係数 | U | -- | 0.239 | |
| 最小動荷重係数 | Cvmin | -- | 0.238 | |
| 重なりかみあい率 | mF | -- | 2.760 | |
| 寸法係数 | Cs | -- | 1.000 | |
| 荷重分配係数 | Cm | -- | 1.200 | |
| 歯すじ修正係数 | Cxc | -- | 1.500 | |
| 歯面状態係数 | Cf | -- | 1.000 | |
| 幾何係数 | I | -- | 0.187 | |
| 寿命係数 | CL | -- | 1.000 | |
| 硬さ比係数 | CH | -- | 1.000 | |
| 許容面圧応力数 | Sac | MPa | 1240.000 | 1240.000 |
| 面圧応力数 | Sc | MPa | 731.513 | 705.027 |
| 許容伝達動力 | Pac | kW | 172.414 | 166.171 |
| 歯面強さの余裕率 | SF _c | -- | 2.874 | 2.770 |
| 曲げ強さ | | | | |
| 内部動荷重係数 | Kv | -- | 0.928 | |
| 寸法係数 | Ks | -- | 1.000 | 1.000 |
| 荷重分配係数 | Km | -- | 1.200 | |
| 歯筋曲線係数 | Kx | -- | 1.061 | |
| 幾何係数 | J | -- | 0.251 | 0.314 |
| 寿命係数 | KL | -- | 1.000 | |
| 許容曲げ応力数 | Sat | MPa | 380.000 | 380.000 |
| 曲げ応力数 | St | MPa | 252.918 | 272.534 |
| 許容伝達動力 | Pat | kW | 90.152 | 103.541 |
| 曲げ強さの余裕率 | SF _t | -- | 1.503 | 1.726 |

図 21.14 強度計算結果(曲げ, 面圧)

21.5.5 寿命計算結果

図 21.15 に寿命計算結果を示します。

| 歯面強さの寿命 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|----------|-----|-------|-----------|-----------|
| 予想寿命係数 | CL' | --- | 0.590 | 0.590 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | cyccs | 5.665E+16 | 5.665E+16 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 1.574E+13 | 8.438E+13 |
| 曲げ強さの寿命 | | | | |
| 予想寿命係数 | KL' | --- | 0.666 | 0.717 |
| 予想寿命負荷回数 | Nt | cyccs | 1.000E+07 | 1.000E+07 |
| 予想寿命時間 | Lt | hrs | 2.778E+03 | 1.136E+04 |

図 21.15 寿命結果

21.6 歯形レンダリング

図 21.4 で設定した歯幅方向および歯たけ方向分割数に基づいて歯形を解析し表示します。図 21.16 および図 21.17 に歯形レンダリングを示します。図 21.18 の歯形レンダリングは、図 21.17 に加工カッタを重ね合わせた図です。

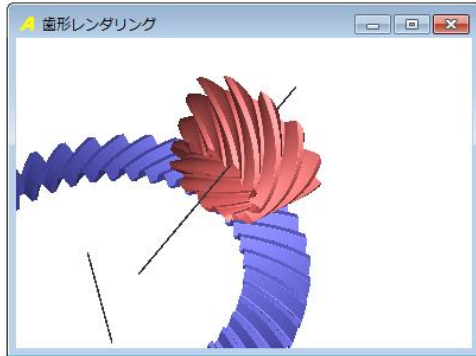


図 21.16 歯形レンダリング 1

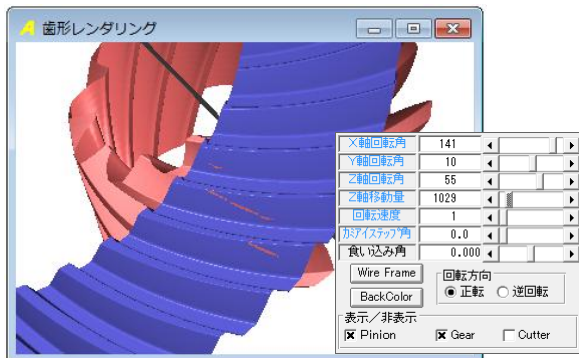


図 21.17 歯形レンダリング 2

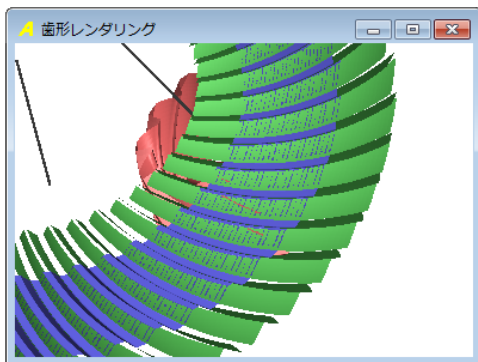


図 21.18 歯形レンダリング(カッタ表示)

ここで出力するハイポイドギヤの歯形は、歯切盤によって得られた歯形ではありません。両歯車の歯形は(1)~(3)で決定しています。

- (1) ギヤ(大歯車)を球面インボリュート歯形で出力します。
- (2) 歯すじ曲線は、諸元設定の工具半径で決定します。
- (3) ピニオン(小歯車)の歯形は、ピニオン軸にオフセットを与え、ギヤ歯形とかみ合うように歯形を決定しています。

21.7 CAD ファイル

ピニオンとギヤの歯形は、DXF および IGES ファイルで出力することができます。図 21.19 にファイル出力フォームを、図 21.20

および図 21.21 に CAD 作図例を示します。

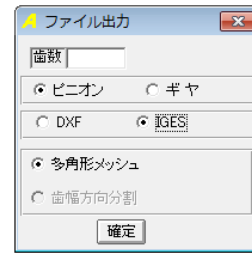
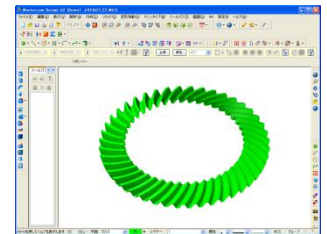


図 21.19 ファイル出力



(ピニオン)



(ギヤ)

図 21.20 CAD 作図例(IGES)

図 21.21 CAD 作図例(IGES)

21.8 歯当たり解析 (オプション)

歯当たり解析例を以下に示します。図 21.22 に歯当たり解析設定を、図 21.23 に解析例を示します。



図 21.22 歯当たり設定

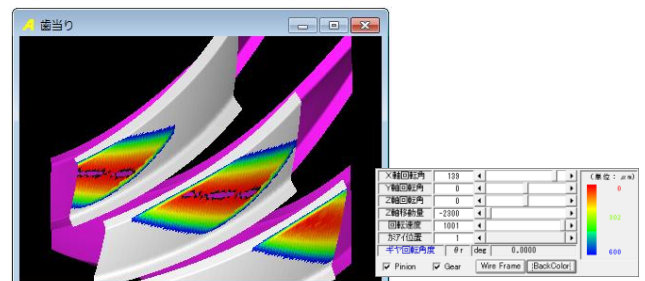


図 21.23 歯当たり

21.9 その他機能

- (1) 軸受け荷重計算
- (2) 設計データの保存、読み込み
- (3) 印刷(寸法、強度計算、組図)

オプション：歯形測定データの生成 (Zeiss 社 3次元測定機用)

[22] CT-FEM ASM (非対称歯形歯車応力解析)

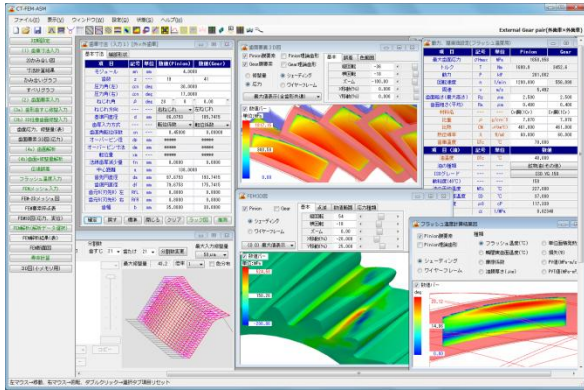


図 22.1 CT-FEM ASM

22.1 概要

非対称歯形歯車は、ギヤの大きさや材料を変更しないで歯面負荷容量を増大させることができます。高圧力角歯形は標準圧力角に比べ、ヘルツ応力は低下し、摩擦係数およびすべり率は小さく、そしてフラッシュ温度を低く抑えることができます。詳しくは【付録 H】をご覧ください。

CT-FEM ASM は、非対称歯形歯車（高強度歯車）の FEM 応力解析ソフトウェアです。CT-FEM Opera iii と同様フラッシュ温度、摩擦係数、油膜厚さ、スカuffィングや摩耗の発生確率そして寿命時間の計算ができ、また、歯面端部接触解析や最適歯面修整機能も付加しています。図 22.1 に全体画面を示します。

22.2 ソフトウェアの構成

CT-FEM ASM の構成を表 22.1 に示します。表中の○は、基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

適応歯車：インボリュート平、はすば歯車（外歯車，内歯車）

表 22.1 ソフトウェアの構成

| 項目 | 機能 |
|---|----|
| <1>基準ラックの設定（非対称歯形） | ○ |
| <2>歯車寸法 | ○ |
| <3>歯車かみ合い図 | ○ |
| <4>歯面修整 | ○ |
| <5>3D 応力分布 | ○ |
| <6>歯面評価 ⁽¹⁾ 摩擦係数、油膜厚さ、発熱量、 損失動力、PV 値、PVT 値 | ○ |
| <7>スカuffィング発生確率 ⁽¹⁾ | ○ |
| <8>摩耗発生確率 ⁽¹⁾ | ○ |
| <9>寿命時間 ⁽¹⁾ | ○ |
| <10>効率 ⁽¹⁾ | ○ |
| <11>3D-FEM 歯形応力解析 | ○ |
| <12>端部部当たり解析 | ◎ |
| <13>回転伝達誤差解析、フーリエ解析、CSV | ◎ |
| <14>内歯車 | ◎ |
| <15>最適歯面修整の生成機能 | ◎ |

(1)樹脂歯車には対応していません。

22.3 基準ラックの設定

図 22.2 に設定画面を示します。

- ・歯車の組み合わせ：外歯車×外歯車，外歯車×内歯車
- ・基準ラック：並歯，低歯，特殊
- ・歯先円決定の方式：標準方式，等クリアランス方式

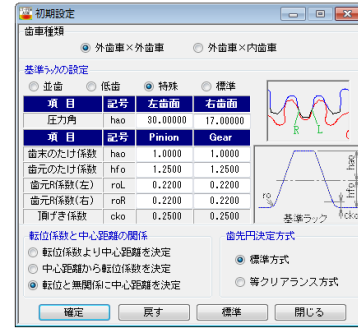


図 22.2 基準ラック

22.4 歯車寸法

歯車寸法は、各部寸法、かみ合い率、すべり率、歯厚などを計算します。アンダーカットが発生している歯車のかみ合い率は、TIF (True Involute Form) 径を基準にかみ合い率を決定します。また、歯先に C 面や丸みがある場合は C または R を考慮したかみ合い率を算出します。

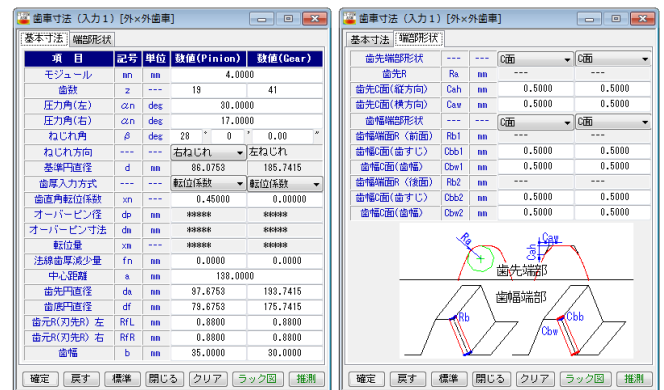
(1)中心距離と転位係数の関係は、以下の3種類です。

- <1>転位係数をピニオンとギヤに与え中心距離を決定
- <2>中心距離を基準として各歯車の転位係数を決定
- <3>転位係数を無視して任意に中心距離を決定

(2)転位係数の設定方式は、以下の3種類です。

- <1>転位係数を直接入力
- <2>オーバーピン寸法を入力して転位係数を決定
- <3>転位量を入力して転位係数を決定

転位係数の入力は、転位係数を直接入力方法以外に、歯厚を基準にして転位係数を逆算することもできます。なお、非対称歯形歯車の「またぎ歯厚」測定はできませんので転位係数の設定方式には含まれません。図 22.3 に諸元設定画面を、図 22.4~22.6 に寸法結果を示します。図 22.7 に非対称歯形歯車のオーバーボール測定位置図を示します。



(a) 歯車諸元 (b) 面取り

図 22.3 諸元設定



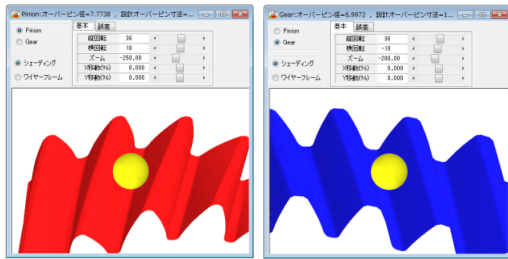
図 22.4 寸法結果 1

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|-------------|---------------------|-----|-------------------------|---------------------------|
| 正面上かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 84.4857(L) / 21.4864(R) | |
| かみ合いねじれ角 | β_w | deg | 28.3843 | |
| かみ合いピッチ円直径 | d_w | mm | 87.4000 | 188.6000 |
| 歯数比 | z_h | --- | 2.1579 | 0.4634 |
| 有効歯幅 | b_w | mm | 30.0000 | |
| クリアランス | ck | mm | 1.2916 | 1.2916 |
| 正面上かみ合い率 | ϵ_{α} | --- | 0.9292(L) / 1.1485(R) | |
| 重なりかみ合い率 | ϵ_{β} | --- | 1.1208(L) / 1.1208(R) | |
| 全かみ合い率 | ϵ_{γ} | --- | 2.0500(L) / 2.2693(R) | |
| すべり率 | σ_1 | --- | -0.2474(L) / -0.7278(R) | 0.1989(L) / 0.4212(R) |
| すべり率 | σ_2 | --- | 0.8401(L) / 0.5876(R) | -0.5154(L) / -1.3129(R) |
| 正面上法線バックラッシ | J_t | mm | 0.3010(L) / 0.3398(R) | |
| バックラッシ角度 | J_{θ} | deg | 0.4788 | 0.2219 |
| 最大接触直径 | d_{ja} | mm | 98.6759(L) / 98.6759(R) | 192.7415(L) / 192.7415(R) |
| 最小接触直径 | d_{jf} | mm | 83.5572(L) / 84.0954(R) | 180.5308(L) / 182.1819(R) |

図 22.5 寸法結果 2

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|----------------------|------------|-----|------------|----------|
| 最大面圧(膜要素応力) | σ_h | MPa | 1817.41 | |
| 要素数 | --- | --- | 40479 | 32301 |
| 節点数 | --- | --- | 67718 | 54266 |
| 最大曲げ応力(σ_1) | σ_1 | MPa | 483.08 | 561.85 |
| 最大曲げ要素番号 | --- | --- | 21004 | 23668 |

図 22.6 計算結果 3



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 22.7 非対称歯形歯車のオーバーボール測定位置

22.5 かみ合い図

図 22.8 に正面上かみ合い図(左歯面接触)を示します。補助フォームで基準円直径や作用線を作図することができます。スクロールバーで歯車を回転させることができます。また、歯形を拡大することもできます。

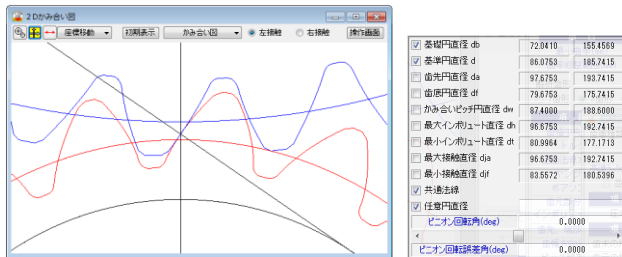
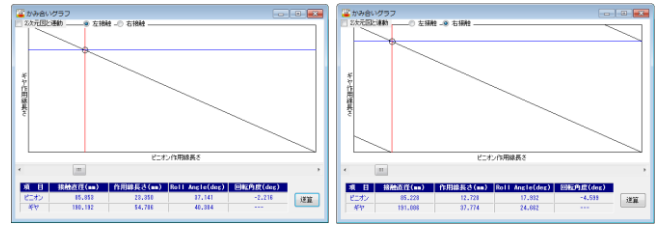


図 22.8 正面上かみ合い図

22.6 かみ合いグラフおよびすべり率グラフ

図 22.9 にかみ合いグラフを示します。このグラフでは横軸にピニオンの作用線長さを、縦軸にギヤの作用線長さを示していますのでかみ合いの関係が良く解ります。図 22.9(a)の場合、ピニオンの接触直径が 85.853mm のときギヤの接触直径は 190.192mm です。また、そのときのピニオンの作用線長さは 23.350mm で、ギヤは 54.786mm です。さらに、図 22.8 の正面上かみ合い図と連動させることができますので歯のかみ合いも把握することができます。

図 22.10 の回転角度計算(図 22.9 中の[逆算]ボタン)は、接触直径、作用線長さ、ロールアングルそして回転角度の関係を計算するための補助計算機能です。また、図 22.11 にすべり率グラフを示します。

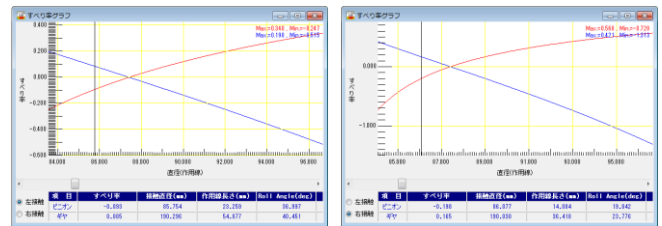


(a)左歯面 (b)右歯面

図 22.9 かみ合いグラフ

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|---------|----------|-----|------------|----------|
| 接触直径 | d' | mm | 87.4000 | 188.6000 |
| 作用線長さ | L | mm | 24.7430 | 53.3927 |
| ロールアングル | ϕ | deg | 39.3572 | 39.3572 |
| 回転角度 | θ | deg | 0.0000 | 逆算結果 |

図 22.10 回転角度計算(左歯面)



(a)左歯面 (b)右歯面

図 22.11 すべり率グラフ

22.7 歯面要素(入力2)

図 22.12 に歯面要素設定画面を示します。ここではトルクとヤング率、ポアソン比そして歯形の分割数を設定します。ヤング率、ポアソン比をプラスチック材料とすることによりプラスチック歯車も解析することができます。解析歯形は 1 歯、3 歯、5 歯を選択することができますので、例題歯車のように全かみ合い率が大きい場合には 5 歯を選択します。また、ピッチ誤差を与えることができますので例題歯車では、ピニオンに 6 μ m のピッチ誤差を与える解析する例を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|-----------------|--------|-----|------------|-----------|
| 歯幅中央位置 | b_m | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| トルク | T | Nm | 1800.0000 | 3452.6316 |
| 正面上法線方向力 | F | N | 44419.2 | |
| ヤング率 | E | MPa | 205800.0 | 205800.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.3000 | 0.3000 |
| 歯元部分割数 | Nh_1 | --- | 20 | 20 |
| インボリュート部分 | Nh_2 | --- | 40 | 40 |
| 歯先、端部分割数 | Nh_3 | --- | 10 | 10 |
| 歯幅方向分割数 | Nb | --- | 40 | 40 |
| ピッチ誤差(μ m) | | | | |
| Pinion | | | 0.0 | 0.0 |
| Gear | | | 0.0 | 0.0 |

図 22.12 歯面要素設定(左歯面)

22.8 歯形歯すじ入力

定型の歯形修整および歯すじ修整は各々 3 種類 (Type1~3) あります。本例で与えるピニオンの歯形修整を図 22.13 に、歯すじ修整を図 22.14 に示します。ただし、ギヤは無修整とします。

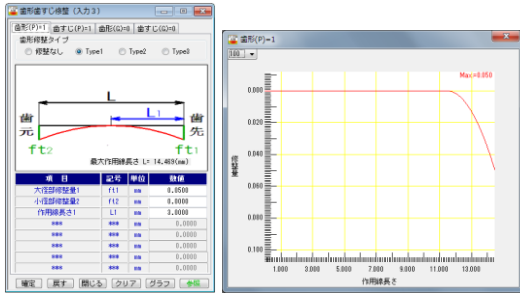


図 22.13 歯形修整とグラフ

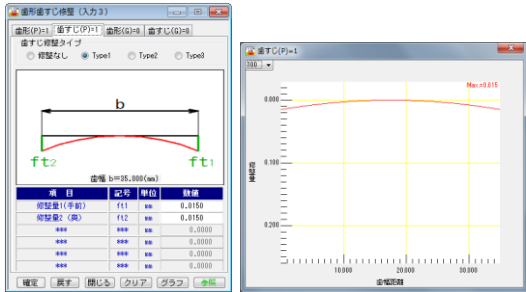
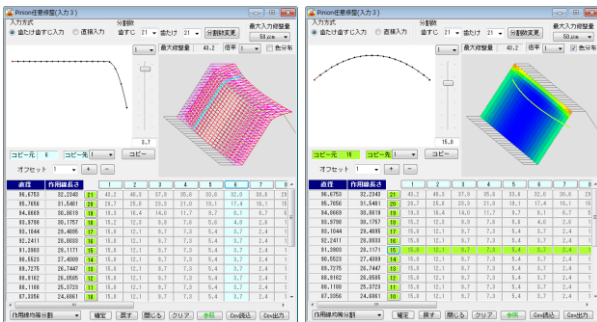


図 22.14 歯すじ修整とグラフ

22.9 3D 任意歯面修整

3D歯面修整は図22.15のように直接入力することもできますし、図22.13および図22.14で設定した修整を引き継ぐこともできます。図22.15は、図22.13と図22.14で設定した修整を3D表示したものです（ギヤは無修整のため省略）。また、この歯形をCSVファイルで出力することも、歯車検査結果データ（CSVファイル）を読み込むこともできます。

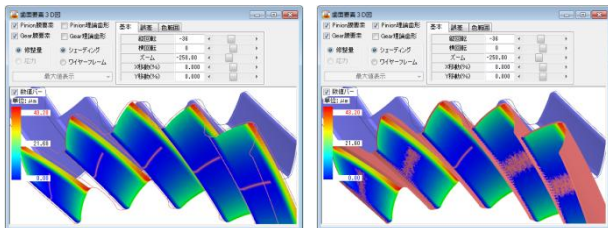


(a)歯形修整表示 (b)歯すじ修整表示+色分布

図 22.15 歯面修整（ピニオン）

22.10 歯面要素 3D 図

図22.15で設定した歯形を3D図で確認することができます。補助フォームでは歯車を回転、ズームさせることができ、中心距離誤差や組み立て誤差角度を設定し、歯当たりを確認することができます。図22.16(a)は歯面修整を持つ歯形を表示したもので、(b)は、それに理論歯形（ピニオン赤色とギヤ青色）を重ねた合わせた図です。また、図22.17に歯面要素メッシュモデルを示します。



(a)歯面修整 (b) 歯面修整+理論歯形

図 22.16 歯面要素

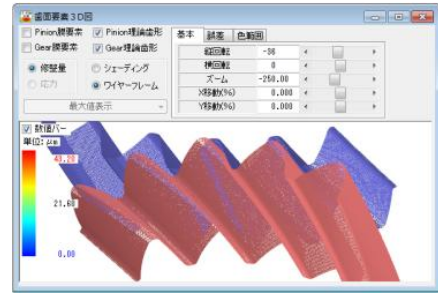


図 22.17 歯面要素メッシュモデル

22.11 歯面解析

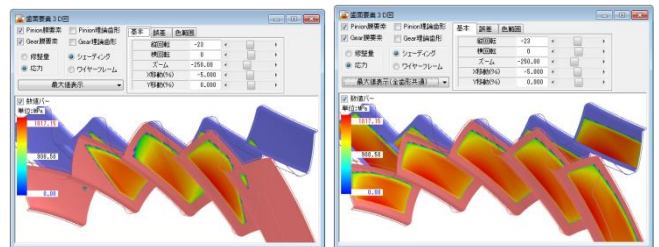
歯車諸元やトルクそして歯面修整を与えたときの歯面応力を解析します。解析角度は、1ピッチ角度と最大接触角度の2種類あります。ここでは例題として図22.18のように最大接触角($\theta_{max}=64.68^\circ$)を60分割し、食い違い角誤差を $\phi_1=0.01^\circ$ 、平行度誤差を $\phi_2=0.001^\circ$ として計算します。この軸角誤差は、負荷により軸受や歯車箱が歪んだときの誤差角であり、この原因により歯当たりが変化し応力分布に変化を生じさせます。



図 22.18 歯面解析設定画面と参照図

22.12 歯面応力解析結果

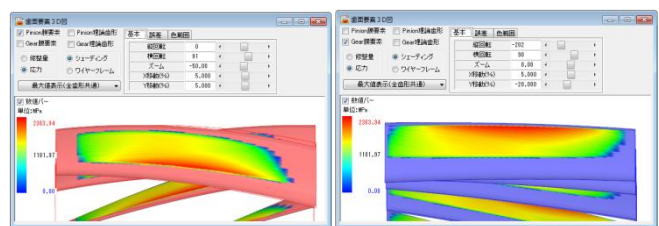
歯面応力解析結果を図22.19に示します。解析の結果、図22.19(a)はピッチ誤差を与えているため同じ歯面応力分布となっていないことが解ります。同じく(b)は、最大応力を全歯に示したものです。



(a)ピッチ誤差考慮 (b)全歯共通

図 22.19 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1817MPa$)

歯面全体応力分布を図22.20に示します。図22.21は、歯面応力の最大と最小を示したものであり、最大歯面応力はピニオン回転角 $\theta_p=14.247^\circ$ 時であることが解ります。



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 22.20 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2364MPa$)

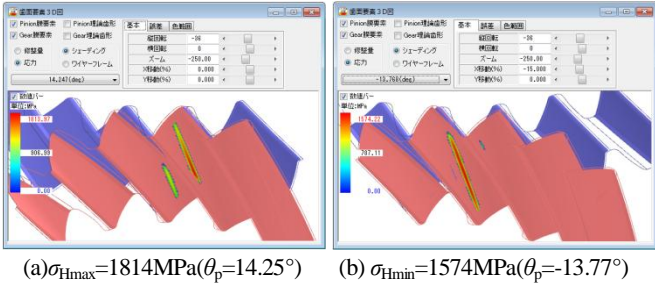
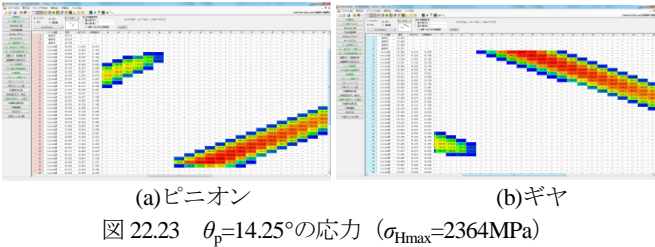
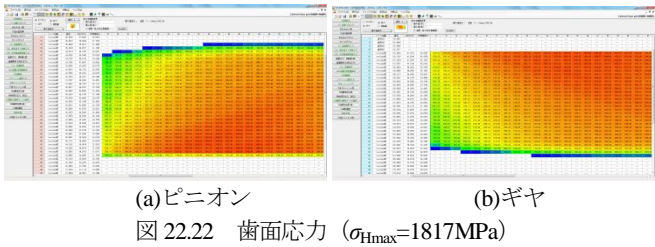


図 22.21 歯面応力の最大と最小

歯面全体の応力分布（セル表示）を図 22.22 に示します。例題の場合、歯幅方向に 98 個（歯幅面取り部含む）、歯たけ方向に 70 個（歯先面取り部含む）の領域の応力を表示しますので歯面位置における応力値が解ります。また、ここに表示している応力値は CSV ファイルで出力することができます。

各々の回転角時の応力は、図 22.23 のようにピニオン回転角に応じた応力分布を連続して表示することができますので応力変化と接触位置を把握することができます。



22.13 フラッシュ温度、摩擦係数、油膜厚さ 他

フラッシュ温度を計算するときの設定画面を図 22.24 に示します。ここでは、回転速度、歯面粗さの他に材料（熱伝導率）を選択します（図 22.25）。潤滑油の種類は鉱物油、合成油を選択することができますが、規格外の場合は、任意に動粘度や油の平均温度などを設定することができます。フラッシュ温度、摩擦係数、油膜厚さの計算結果を図 22.26~22.33 に示します。また、スカuffing発生確率、摩耗の発生確率を図 22.34 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|---------|
| 最大歯面応力 | σ_{Hmax} | MPa | 1658.358 | 3452.6 |
| トルク | T | Nm | 1600.0 | 3452.6 |
| 動力 | P | kW | 201.082 | 556.098 |
| 回転速度 | n | 1/min | 1200.000 | 556.098 |
| 周速 | v | m/s | 5.492 | |
| 歯面粗さ(最大高さ) | Rz | μm | 2.500 | 2.500 |
| 歯面粗さ(平均) | Ra | μm | 0.400 | 0.400 |
| 材料名 | | | --- | --- |
| 比重 | ρ | g/cm^3 | 7.870 | 7.870 |
| 比熱 | Cm | $\text{J/(g}\cdot^\circ\text{C)}$ | 461.000 | 461.000 |
| 熱伝導率 | λ | W/mK | 60.000 | 60.000 |
| 歯車温度 | GTC | $^\circ\text{C}$ | 70.000 | |
| 項目(油) | | | | |
| 油温度 | Otc | $^\circ\text{C}$ | 70.000 | |
| 油の種類 | | | 鉱物油(その他) | |
| ISOグレード | | | ISO VG 150 | |
| 動粘度(40 $^\circ\text{C}$) | | | 150 | |
| 油の平均温度 | MTC | $^\circ\text{C}$ | 227.000 | |
| 油の標準偏差温度 | SD | $^\circ\text{C}$ | 67.000 | |
| 絶対粘度 | μ_0 | cP | 27.779 | |
| 粘度圧 | α | $1/\text{MPa}$ | 0.01940 | |

図 22.24 フラッシュ温度設定画面

鉱物油(その他)
 鉱物油(その他)
 合成油(MIL-L-23689)
 合成油(その他)

ISO VG 150
 ISO VG 32
 ISO VG 46
 ISO VG 68
 ISO VG 100
 ISO VG 220
 ISO VG 320
 ISO VG 460
 ISO VG 680
 ISO VG 1000
 ISO VG 1500
 Other grade

図 22.25 材料と潤滑油

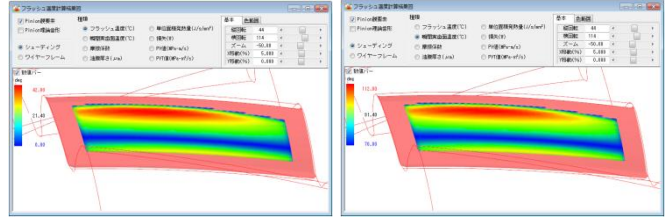


図 22.26 フラッシュ温度

図 22.27 瞬間実歯面温度

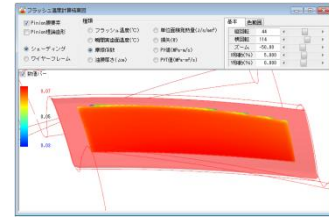


図 22.28 摩擦係数

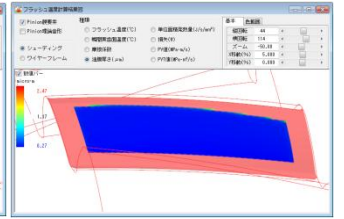


図 22.29 油膜厚さ

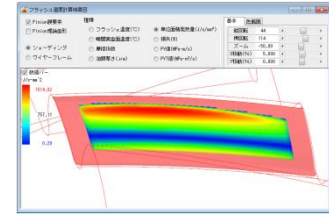


図 22.30 発熱量

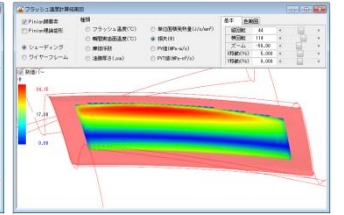


図 22.31 損失動力

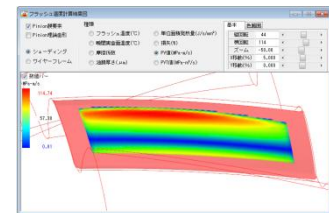


図 22.32 PV 値

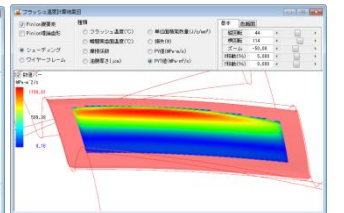


図 22.33 PVT 値

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------------|----------|----|--------|------|
| スカuffing発生確率 | η_s | % | <5 | |
| 摩耗の発生確率 | η_f | % | 5.00 | |
| 動力損失 | η_e | % | 0.74 | |

図 22.34 損傷確率

22.14 端部解析 (オプション)

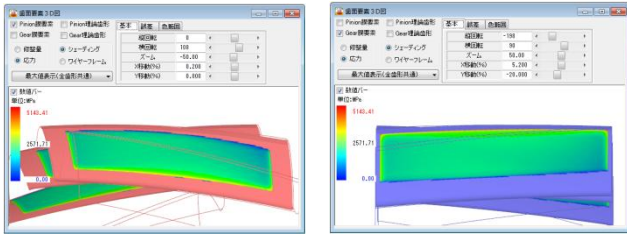
22.11~22.13 項ではインボリュート歯面について解析しましたが、ここでは歯先や側面部の端部解析（図 22.35）をした結果を示します。

解析の結果、図 22.36 のようにピニオン歯元とギヤ歯先に $\sigma_{Hmax}=4204\text{MPa}$ もの大きな応力が発生します。フラッシュ温度はインボリュート歯面の解析では図 22.26 のように歯先部で 42.8°C だったものが端部解析では図 22.37 のようにピニオン歯元で 172°C に大きく上昇していることが解ります。

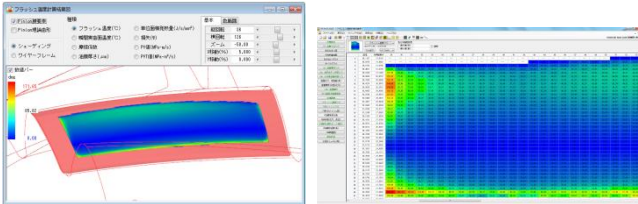
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|------------|------------|-----|------------|-----------|
| 最小歯率 | α_n | | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯車修形範囲(mm) | | | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯輪中央位置 | bn | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| トルク | T | Nm | 1600.0000 | 3452.6916 |
| 正面法線方向力 | F | N | 44419.2 | |
| ヤング率 | E | MPa | 205800.0 | 205800.0 |
| 弾性係数 | ν | | 0.3000 | 0.3000 |
| ピニオン部分数 | Np1 | | 20 | 20 |
| インボリュート部分 | Np2 | | 40 | 40 |
| 歯先_端部分割数 | Np3 | | 10 | 10 |
| 歯輪方向分割数 | Nb | | 40 | 40 |
| ピッチ誤差(μm) | | | 正→接触 | |
| 解析面 | | | Pinion | 左歯面 |
| | | | Gear | 右歯面 |

図 22.35 歯面設定(端部解析)

図 22.36 のようにピニオン歯元で 172°C に大きく上昇していることが解ります。



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 22.36 歯面応力 (端部解析, $\sigma_{Hmax}=5143MPa$)



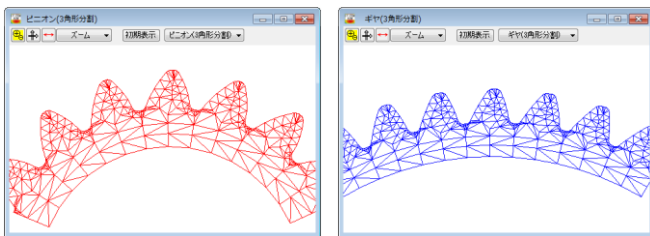
(a)歯形上表示 (b)セル表示
図 22.37 フラッシュ温度, $T_f=172(^\circ C)$

22.15 FEM 解析

FEM 解析するため図 22.38 でメッシュモデルを作成します。ここでは標準モデルでメッシュを作成しますが、設定の方法は歯形を精度で決める方法と歯形を分割数で決める方法の 2 通りがあります。メッシュ分割した歯形は、図 22.39 のように 2D メッシュモデルや図 22.40 の 3D メッシュモデルで確認することができます。また、3D-FEM メッシュ要素は座標と節点を図 22.41 のように表示することができます。



図 22.38 メッシュモデル設定



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 22.39 2D メッシュモデル

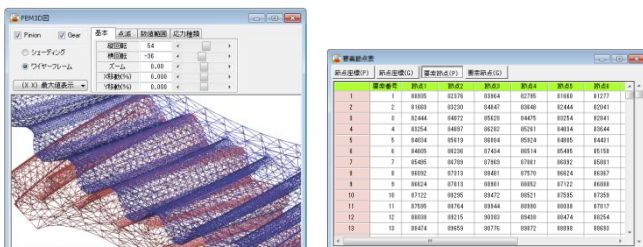


図 22.40 3D メッシュモデル 図 22.41 FEM メッシュ要素

メッシュモデルは図 22.42 のようにリム・ハブモデルとして生成することができますのでプラスチック歯車のような弾性率が小さい歯車には有効です。

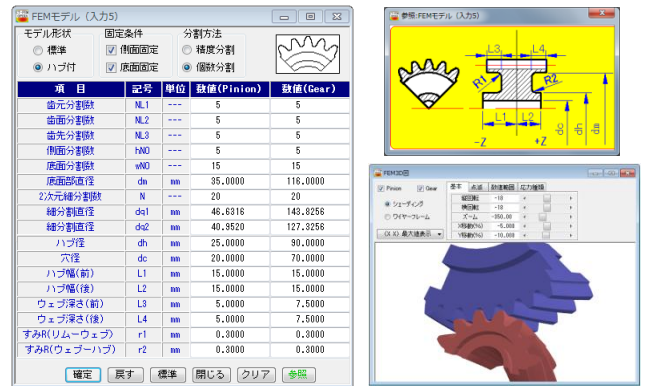


図 22.42 リム・ハブモデル

次に、図 22.38 で設定したメッシュモデルで FEM 解析をする例を以下に説明します。

図 22.18 の歯面解析設定で設定した角度 (-28.578°~36.102°) を 60 分割していますので歯面応力が最も大きい $\theta_p=14.247^\circ$ (図 22.21) の角度を選択し FEM 解析します。かみ合い角度内での曲げ応力の変化を知りたい場合は図 22.43 の□を全てチェックすれば 60 組の曲げ応力を計算することができます (解析数が多いため必要なかみ合い角度のみ選択し計算することが有効)。

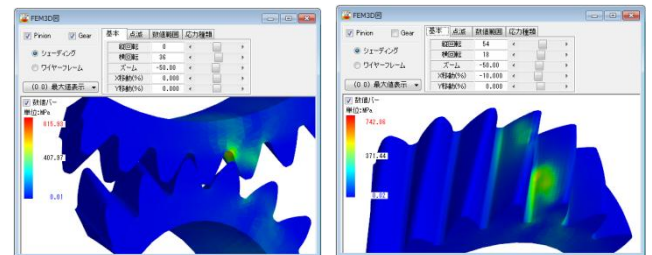
解析する項目は、図 22.45 に示す応力、変位そしてひずみの 3 種類です。FEM 解析結果を図 22.45~22.48 に示します。



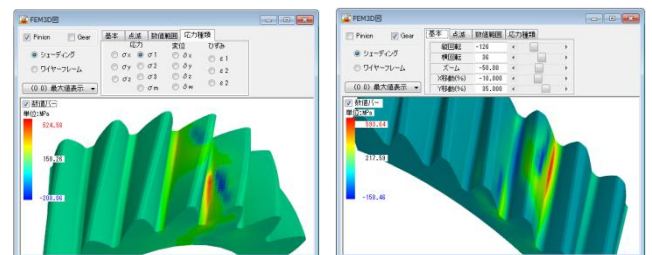
図 22.43 FEM 解析角度の設定



図 22.44 解析の種類



(a)1対歯車 (b)ピニオン $\sigma_{nmax}=743MPa$
図 22.45 σ_m (ミーゼス応力)



(a)ピニオン $\sigma_{1max}=525MPa$ (b)ギヤ $\sigma_{1max}=594MPa$
図 22.46 最大主応力

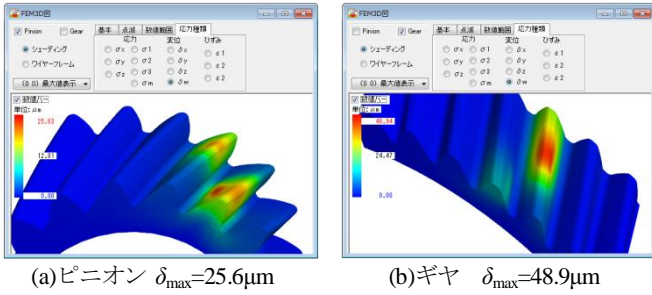


図 22.47 変位

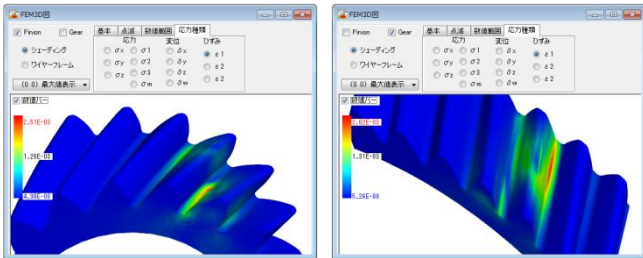


図 22.48 ひずみ

図 22.49 の解析結果一覧表でピニオンの最大主応力の最大値 $\sigma_{1max} = 525MPa$ の要素番号は 31695 ということが解りますので、この番号を図 22.50 の「点滅」に入力すると応力分布図 (○印中で ▲が点滅します) で確認することができます。

FEM 解析結果後、図 22.51 のように歯幅方向の任意の位置での応力を表示することができます。図 22.51 は歯幅中央位置 (zd=-3mm)における応力を示しています。

| 要素番号 | σ_1 | σ_2 | σ_3 | 主ひずみ1 | 主ひずみ2 | 主ひずみ3 |
|------|------------|------------|------------|--------|--------|--------|
| 1 | 423.97 | 139.86 | 91.99 | 139.24 | -13.84 | -7.91 |
| 2 | 31794 | 444.13 | 105.93 | 91.89 | -29.84 | -18.89 |
| 3 | 31894 | 495.83 | 145.92 | 78.15 | 292.54 | -9.16 |
| 4 | 31940 | 472.88 | 51.19 | 101.32 | 79.88 | -15.89 |
| 5 | 31795 | 413.87 | 98.89 | 78.01 | 169.31 | -14.81 |
| 6 | 31821 | 485.25 | 46.39 | 102.85 | 71.72 | -9.87 |
| 7 | 31897 | 375.59 | 142.17 | 82.83 | 187.85 | -8.57 |
| 8 | 31898 | 389.35 | 125.82 | 66.82 | 189.18 | -5.16 |
| 9 | 31793 | 412.72 | 88.48 | 82.17 | 169.41 | -8.37 |
| 10 | 31919 | 484.85 | 46.81 | 109.87 | 81.09 | -16.49 |
| 11 | 31796 | 405.89 | 97.89 | 75.81 | 189.24 | -18.89 |
| 12 | 31899 | 379.38 | 119.26 | 61.39 | 195.29 | -10.89 |

図 22.49 解析結果一覧

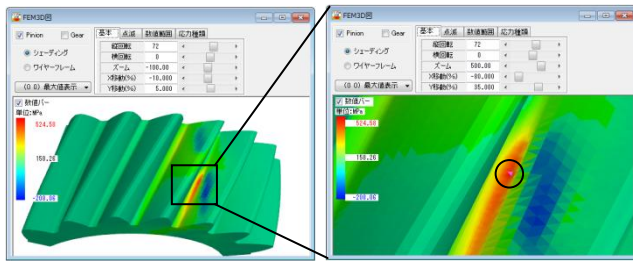
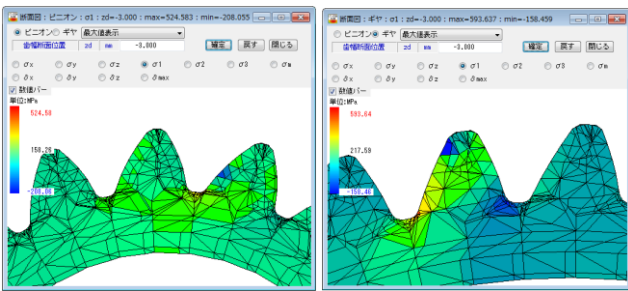


図 22.50 ピニオンの σ_{1max} の位置



(a) ピニオン (b) ギヤ

図 22.51 FEM 断面図

22.16 寿命時間

歯面応力解析および FEM 解析後に寿命時間を計算します。ここでは材料の歯面強さに対する許容応力値 $\sigma_{Hlim} = 2000MPa$ とした寿命時間を図 22.52 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-----------------------|-----------------|-------|----------|----------|
| 歯面最大応力 | σ_{Hmax} | MPa | 1815.988 | 1817.159 |
| 最大曲げ応力 (σ_1) | σ_1 | MPa | 524.583 | 539.637 |
| 回転速度 | n | 1/min | 1200.000 | 556.098 |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 2000.000 | 2000.000 |
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 400.000 | 400.000 |
| 過負荷の回数 | Ne | --- | 1 | 1 |
| 空化材料の有無 | --- | --- | 非空化材料 | --- |
| 使用状態 | --- | --- | 一般 | --- |

| 項目(歯面) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-----------|----|-----|----------|----------|
| 予想応力繰返し係数 | ZN | --- | 0.308 | 0.309 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | 6.85E+08 | 6.47E+08 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 9.23E+03 | 1.94E+04 |

| 項目(歯げ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-----------|----|-----|----------|----------|
| 予想応力繰返し係数 | ZN | --- | 1.311 | 1.484 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | 4.28E+05 | 1.52E+05 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 5.94E+00 | 4.54E+00 |

図 22.52 寿命時間

22.17 回転伝達誤差 (オプション)

図 22.18 の歯面解析設定画面で与えた回転角度内での回転伝達誤差を図 22.53 に、フーリエ解析結果を図 22.54 に示します。

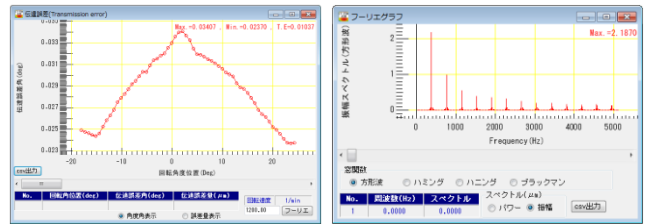


図 22.53 回転伝達誤差

図 22.54 フーリエ解析

22.18 内歯車の解析 (オプション)

「外歯車×内歯車」の解析結果を図 22.55~22.66 に示します。ピニオンの歯面修整 (図 22.14) もトルクも「外歯車×外歯車」の例 (図 22.12) と同じにしています。

| 項目 | 記号 | 左歯車 | 右歯車 |
|--------|---------|---------|---------|
| 圧力角 | alpha_n | 20.0000 | 20.0000 |
| 歯面修整係数 | rofl | 0.2200 | 0.2200 |
| 歯先修整係数 | rofa | 0.2500 | 0.2500 |

図 22.55 基準ラック

| 項目 | 記号 | 単位 | 値値(Pinion) | 値値(Gear) |
|----------|---------|-----|------------|----------|
| モジュール | mn | mm | 4.0000 | --- |
| 歯数 | z | --- | 19 | 55 |
| 圧力角(左) | alpha_n | deg | 20.0000 | --- |
| 圧力角(右) | alpha_n | deg | 17.0000 | --- |
| ねじれ角 | beta | deg | 28 | 0 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 86.0753 | 249.1654 |
| 歯面修整係数 | rofl | --- | 0.45000 | 0.30000 |
| 歯先修整係数 | rofa | --- | 0.25000 | 0.25000 |
| オーバーピン径 | dp | mm | --- | --- |
| オーバーピン径 | dm | mm | --- | --- |
| 転位量 | xm | --- | --- | --- |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 中心距離 | a | mm | 80.5000 | --- |
| 歯先円直径 | da | mm | 97.8753 | 249.5654 |
| 歯底円直径 | df | mm | 79.8753 | 261.5654 |
| 歯元円直径(左) | RfL | mm | 0.8980 | 0.8980 |
| 歯元円直径(右) | RfR | mm | 0.8980 | 0.8980 |
| 歯幅 | b | mm | 35.0000 | 30.0000 |

図 22.56 歯車諸元

| 項目 | 単位 | 値値(Pinion) | 値値(Gear) |
|-----------|---------|------------|-------------------------|
| 正面モジュール | mt | mm | 4.5000 |
| 正面圧力角 | alpha_t | deg | 39.1803(L) / 19.0990(R) |
| 基準円歯ねじれ角 | beta_b | deg | 23.8998(L) / 26.8768(R) |
| 基準円直径 | db | mm | 72.0410(L) / 81.3973(R) |
| 全歯厚 | h | mm | 9.0000 |
| 歯先修整係数 | rofl | --- | 0.45000 |
| 最小インポート直径 | dt | mm | 80.9894(L) / 82.2788(R) |
| 最大インポート直径 | dh | mm | 96.6753(L) / 96.6753(R) |
| 歯底角円歯厚 | sn | mm | 7.8727 |
| 正面歯厚 | st | mm | 8.9164 |
| オーバーピン径 | dp | mm | 7.0159 |
| 基準オーバーピン径 | dm | mm | 88.8378 |
| 設計オーバーピン径 | dm' | mm | 88.8378 |

図 22.57 寸法結果 1

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|--------------|-------------------|-----|--------------------------|---------------------------|
| 正面かみ合い圧力角 | α_n | deg | 32.0240(L) / 18.0193(R) | |
| かみ合いねじれ角 | β_n | deg | 27.8948 | |
| かみ合いピッチ円直径 | d_w | mm | 84.9722 | 245.3722 |
| 歯数比 | z_h | mm | 2.8947 | 0.3455 |
| 有効歯幅 | b_w | mm | 30.0000 | |
| クリアランス | ck | mm | 1.4451 | 1.4451 |
| 正面かみ合い率 | ϵ_α | --- | 0.8269(L) / 1.2164(R) | |
| 重なりかみ合い率 | ϵ_β | --- | 1.1208(L) / 1.1208(R) | |
| 全かみ合い率 | ϵ_γ | --- | 2.0477(L) / 2.3382(R) | |
| すべり率 | σ_1 | --- | -0.0418(L) / -0.1882(R) | 0.0386(L) / 0.1439(R) |
| すべり率 | σ_2 | --- | 0.1871(L) / 0.3486(R) | -0.2454(L) / -0.5304(R) |
| 正面法線バックラッシュ | j_t | mm | 0.3467(L) / 0.3915(R) | |
| バックラッシュ角度 | j_θ | deg | 0.5515 | 0.1905 |
| 最大接触曲径 | d_{ca} | mm | 86.6753(L) / 96.6753(R) | 256.7823(L) / 255.8544(R) |
| 最小接触曲径 | d_{ca} | mm | 83.5858(L) / 83.8565(R) | 244.5654(L) / 244.5654(R) |
| インボリュート干渉 | --- | --- | 発生しません。Left/発生しません。right | |
| ドリミング | --- | --- | 発生しません。Left/発生しません。right | |
| トロコイド干渉 | --- | --- | 発生しません。Left/発生しません。right | |
| フィレット(歯元部)干渉 | --- | --- | 発生しません。Left/発生しません。right | |

図 22.58 寸法結果 2

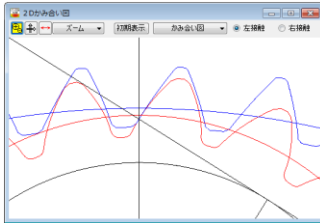


図 22.59 正面かみ合い図

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|-------------------|-----------|-----|------------|-----------|
| 歯幅中央位置 | b_n | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| トルク | T | Nm | 1800.0000 | 4631.5789 |
| 正面法線方向力 | F | N | 44419.2 | |
| 接線力 | E | MPa | 205800.0 | 205800.0 |
| ボアソ比 | λ | --- | 0.3000 | 0.3000 |
| 歯元部分割数 | $Nh1$ | --- | 20 | 10 |
| インボリュート部分 | $Nh2$ | --- | 40 | 40 |
| 歯先 歯部分割数 | $Nh3$ | --- | 10 | 20 |
| 歯幅方向分割数 | Nb | --- | 40 | 40 |
| ピッチ誤差 (μm) | 正一接触線 | | | |
| Pinion | | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Gear | | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

図 22.60 歯面要素設定

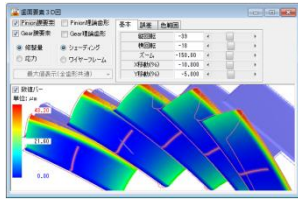


図 22.61 歯面要素 (修整)

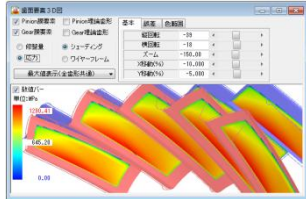
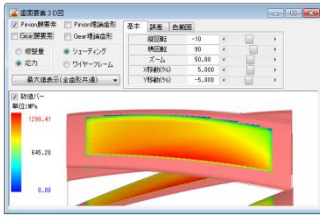
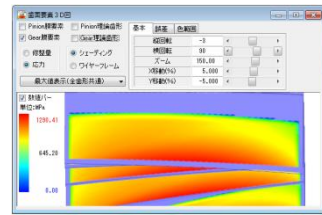


図 22.62 $\sigma_{Hmax}=1290MPa$



(a) ピニオン



(b) ギヤ

図 22.63 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1290MPa$)

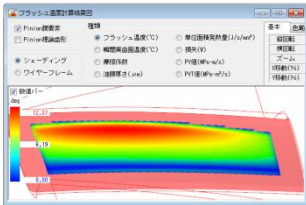


図 22.64 $T_f=12.4(^{\circ}C)$ フラッシュ温度

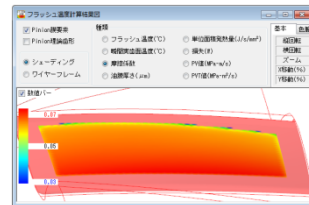
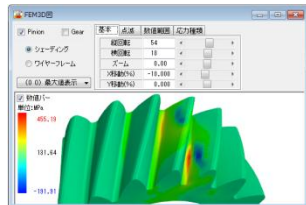
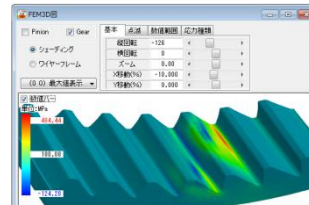


図 22.65 $\mu_{max}=0.070$ 摩擦係数



(a) ピニオン $\sigma_1=455MPa$



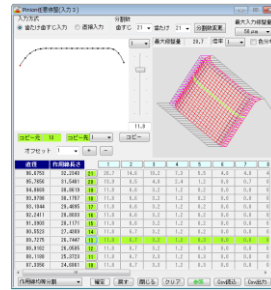
(b) ギヤ $\sigma_1=484MPa$

図 22.66 最大主応力

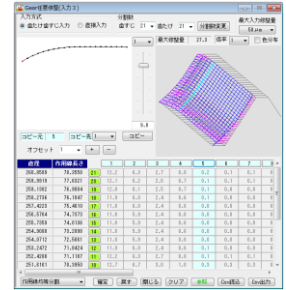
22.19 最適歯面修整量解析 (オプション)

図 22.14 のように歯面修整を一律に決めるのではなくトルク、ピッチ誤差そして軸角誤差を考慮したとき歯面応力が最小となる修整量を決めることができる機能です。設計条件下での負荷容量を大きくすることができます。

例として、図 22.3 歯車で図 22.11 のトルクとピッチ誤差、図 22.18 の軸角誤差の条件で計算 (4b)歯面+修整量解析 した最適歯面修整を図 22.67 および図 22.68 に示します。

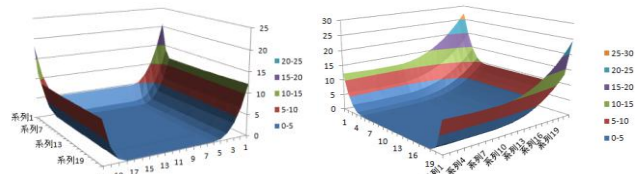


(a) ピニオン

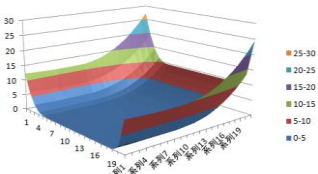


(b) ギヤ

図 22.67 最適歯面修整



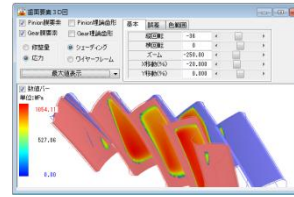
(a) ピニオン



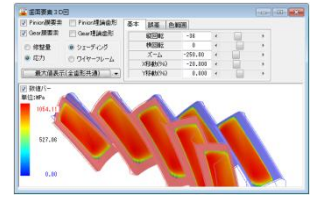
(b) ギヤ

図 22.68 最適歯面修整 (Excel 表示例)

次に、図 22.67 の歯形で解析した歯面応力の図 22.69 および図 22.70 は、図 22.20 の $\sigma_{Hmax}=2364MPa$ に比べ 28%低下し、図 22.71 のフラッシュ温度も図 22.26 に比べ $3.6^{\circ}C$ 低下しています。

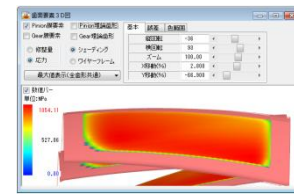


(a) ピッチ誤差考慮

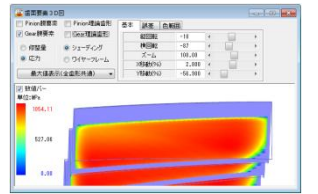


(b) 全歯共通

図 22.69 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1054MPa$)

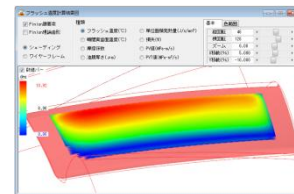


(a) ピニオン



(b) ギヤ

図 22.70 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1054MPa$)



$T_f=13.9(^{\circ}C)$

図 22.71 フラッシュ温度

※非対称歯形歯車の付録[H]および資料(Web)をご覧ください。

[23] Hob Chip (切粉形状シミュレーション)

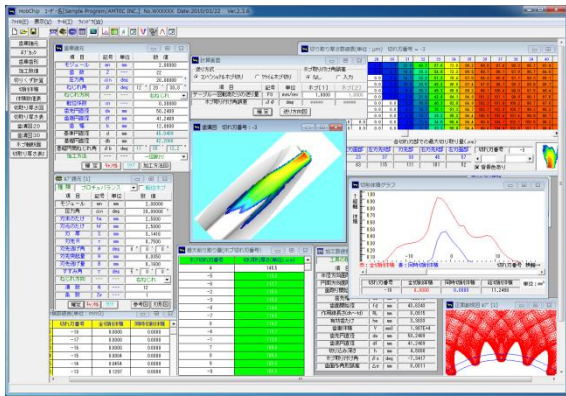


図 23.1 Hob Chip

23.1 概要

Hob Chip は、ホブ切削時における切粉の切取り形状や切取り厚さの計算や、ホブ切れ刃位置における切取り量をシミュレーションすることができるソフトウェアです。図 23.1 に全体画面を示します。

23.2 歯車諸元入力

歯車諸元を、図 23.2 に示します。加工方法は、図 23.3 に示すように「両歯面仕上げ」、「片歯面仕上げ」、「1 回削り」の 3 通りがありますが、本例では 1 回削りとして計算を進めます。加工歯厚は、「またぎ歯厚」、「オーバピン寸法」、「円弧歯厚」の内から選択します。本例では、図 23.4 のように、またぎ歯厚を 21.734mm として計算を進めます。



図 23.2 歯車諸元入力

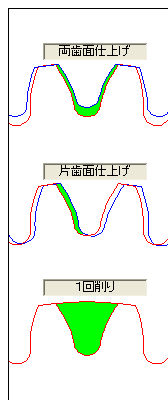


図 23.3 加工方法

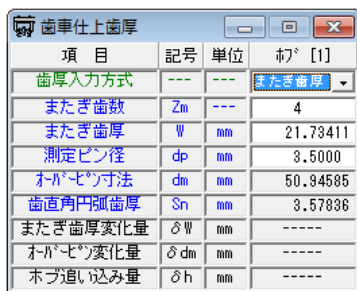


図 23.4 歯厚入力

23.3 ホブ諸元入力

ホブの種類は、「標準」、「セミトッピング」、「プロチュバランス」,

「プロチュバランスセミトッピング」と「転位ホブ」に対応しています。本例では「プロチュバランスホブ」を使用します。図 23.5 で設定するホブの各部寸法は、図 23.6 の[参考図](刃先部詳細)で、また、入力後の刃形形状は図 23.7 で確認することができます。

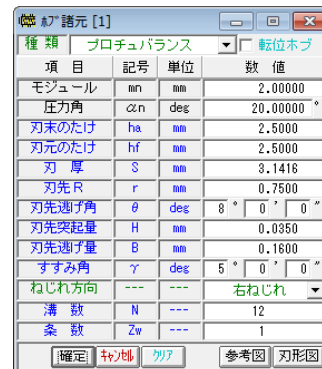


図 23.5 ホブ諸元入力

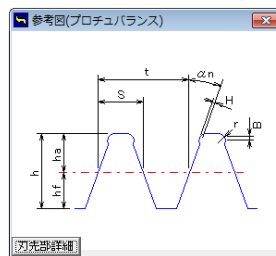


図 23.6 ホブ形状

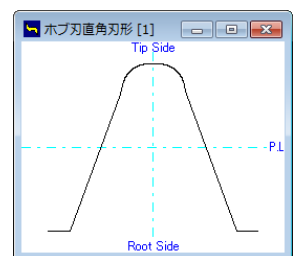


図 23.7 ホブ刃形図

23.4 歯形図

ホブ加工後の歯形を図 23.8 の歯形選択画面で歯形創成図(図 23.9)、歯形軌跡図(図 23.10)、歯形レンダリング(図 23.11)の作図ができます。これらの歯形は、図 23.5 で設定したホブを使用して作図したものであり図 23.10 の歯形軌跡図からも明らかなようにホブのコブ形状を考慮した歯形図となっています。

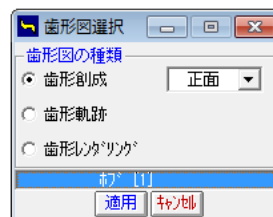


図 23.8 歯形図選択

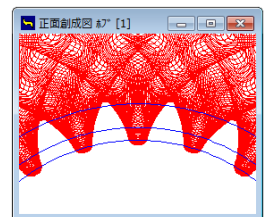


図 23.9 歯形創成図

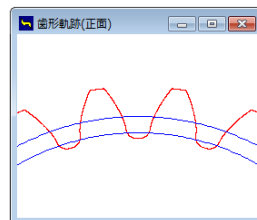


図 23.10 歯形軌跡図

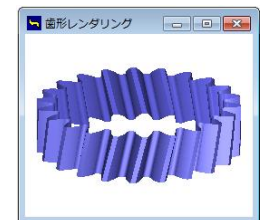


図 23.11 歯形レンダリング

ホブ加工後の歯車寸法を図 23.12 に示します。本例の場合、面取りホブでないため面取りは発生していません。また、インボリュート開始径(歯面開始径) 43.6343mm は、図 23.13 の歯形軌跡拡大図で確認することができます。

| 加工数値表 | | | |
|--------------|------------|-----------------|----------|
| 工具の種類 | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 半径方向面取り長さ | hp | mm | ---- |
| 円周方向面取り長さ | hk | mm | ---- |
| 面取り開始直径 | dh | mm | ---- |
| 歯先幅 | Sc | mm | 1.2510 |
| 歯面開始径 | fd | mm | 49.6343 |
| 作用線長さ(dh~fd) | RL | mm | 8.0915 |
| 有効歯たけ | he | mm | 3.3033 |
| 歯車体積 | V | mm ³ | 1.987E+4 |
| 歯先円直径 | da | mm | 50.2409 |
| 歯底円直径 | df | mm | 41.2409 |
| 切り込み深さ | h | mm | 4.5000 |
| ホブ取り付け角 | β_s | deg | -7.3417 |
| 歯面多角形誤差 | Δe | mm | 0.0011 |

図 23.12 ホブ加工数値表

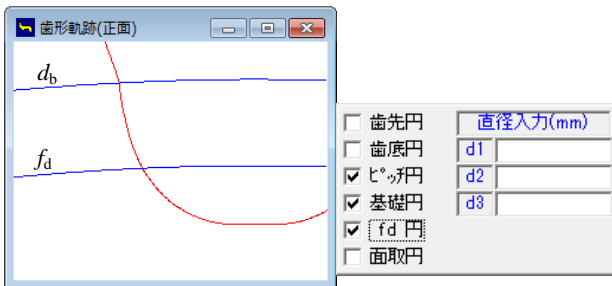


図 23.13 歯形軌跡拡大図

23.5 ホブ加工

23.5.1 ホブ加工条件

ホブ加工の送り方向と送り量を図 23.14 で設定します。本例ではコンベンショナルカットとし、送り量は 1mm/rev としています。ここでホブの取り付け角度を変更(オプション)し、切り屑の形状の変化を計算することもできます。(23.6 参照)

| 計算画面 | | | |
|--|---------------|--|------------------|
| 送り方式 | | ホブ取り付け角誤差 | |
| <input checked="" type="radio"/> コンベンショナルホブ切 <input type="radio"/> クライムホブ切 | | <input checked="" type="radio"/> なし <input type="radio"/> 入力 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | ホブ[1] ホブ[2] |
| テーブル回転あたりの送り量 | F0 | mm/rev | 1.0000 1.0000 |
| ホブ取り付け角誤差 | $\Delta \phi$ | deg | ***** ***** |

図 23.14 加工条件

23.5.2 切削体積

ホブ加工後の全切削体積と同時切削体積のグラフを図 23.15 に示します。このグラフは、横軸を切れ刃番号、縦軸を切削体積(mm³)にしたグラフです。同時切削体積とはホブの左右の角部が同時に切削(ワークと接触)するときの切削体積です。ここでの切削体積は、ある1つの切れ刃がホブ1回転あたりに1溝を削る体積です。

切れ刃番号は、ホブの創成中心刃を0として負側の番号は先行刃(創成中心刃より前に存在する切れ刃)を意味し、正側の番号は後続刃(創成中心刃より後に続く切れ刃)を意味します。本例の場合、切れ刃番号は-18から+17までを検討切れ刃としています。

図 23.15 のグラフより、本例の場合には切れ刃番号-2 の刃が全切削体積も同時切削体積も最大となります。図 23.16 に切削体積表を示します。

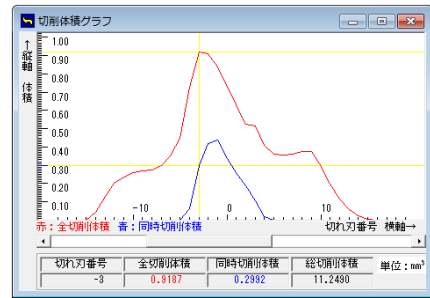


図 23.15 切削体積グラフ

| 体積数値表(単位: mm ³) | | | |
|-----------------------------|-------|--------|--------|
| 番号 | 切れ刃番号 | 全切削体積 | 同時切削体積 |
| 18 | -1 | 0.8382 | 0.4359 |
| 17 | -2 | 0.9116 | 0.4202 |
| 19 | 0 | 0.7332 | 0.3392 |
| 16 | -3 | 0.9187 | 0.2992 |
| 20 | 1 | 0.6296 | 0.2624 |
| 21 | 2 | 0.5231 | 0.1902 |
| 22 | 3 | 0.4165 | 0.1180 |

図 23.16 切削体積表

23.5.3 切り厚さ

図 23.15 の切削体積で最大となる切れ刃番号である-2に着目すると、切り厚形状と切り厚さは図 23.17 となり、最大切り厚さは 114.3 μ m となります。しかし、切り厚さが最大となるのは図 23.18 に示すように切れ刃番号が-5であり、その厚さは 121.3 μ m です。

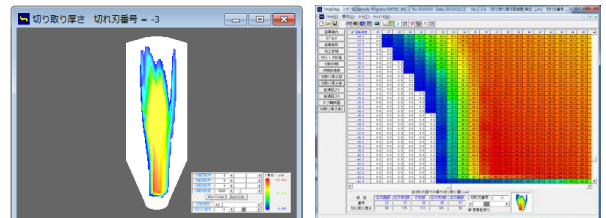


図 23.17 切り厚さ形状と数値(切れ刃番号-3)

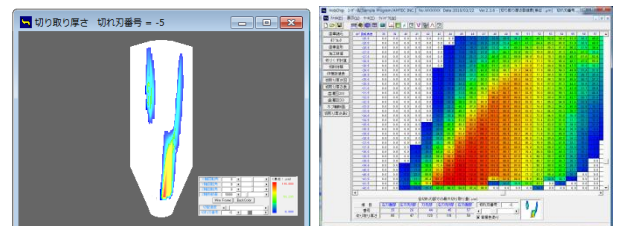


図 23.18 切り厚さ形状と数値(切れ刃番号-5)

23.5.4 歯溝図

図 23.19~23.26 に、歯溝を基準として切れ刃が削り取る形状を切れ刃番号-15 から+13 までを示します。切れ刃番号と切り屑(uncut chip)形状の変化が良く解ります。

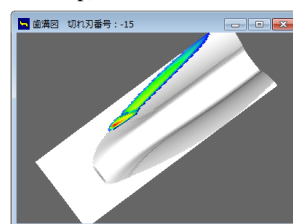


図 23.19 歯溝図(切れ刃-15)

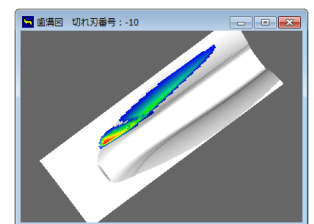


図 23.20 歯溝図(切れ刃-10)

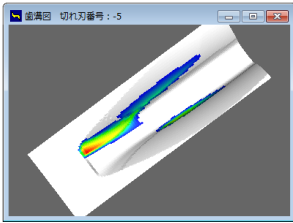


図 23.21 歯溝図(切れ刃-5)

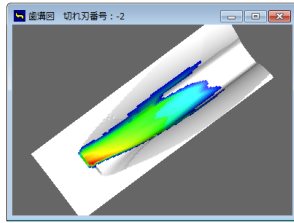


図 23.22 歯溝図(切れ刃-2)

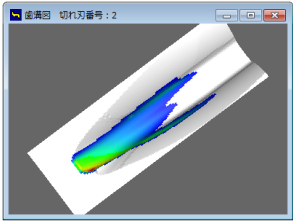


図 23.23 歯溝図(切れ刃+2)

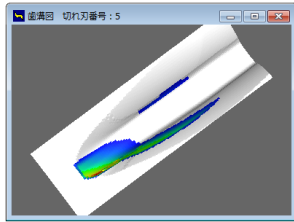


図 23.24 歯溝図(切れ刃+5)

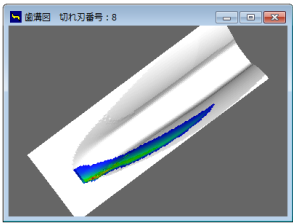


図 23.25 歯溝図(切れ刃+8)

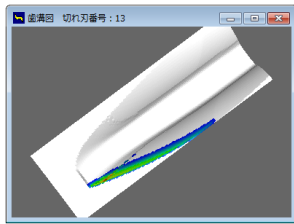


図 23.26 歯溝図(切れ刃+13)

23.5.5 ホブ刃形と切り粉の関係

切削体積が最大となる切れ刃番号-2において切り厚さの大きい切れ刃位置を図 23.27 で確認すると、表の最上段列に示すホブ座標番号の 35 番目となります。このホブ座標番号の 35 番目は、図 23.28 のホブ刃先の赤丸の点で示されます。また、切り厚さが最大となる切れ刃番号が-5 では、ホブ座標番号の 43 番目となります。従って、本例では、切り厚さと切削厚さから推測すると、この位置(図 23.28, 図 23.29)でホブの摩耗が大きくなることを予測することができます。

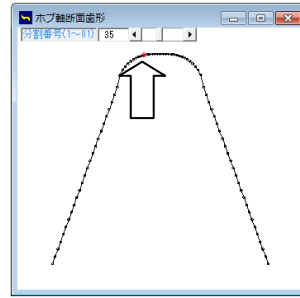


図 23.28 切れ刃-2

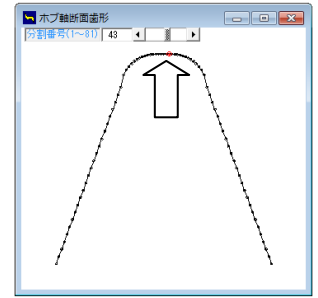


図 23.29 切れ刃+5

23.6 ホブ取り付け角度誤差 (オプション)

ホブに取り付け角度誤差を与えて切りくず計算をすることができます。誤差角度の入力範囲は ± 2 度ですが、大きい誤差角度になると計算できないことがありますので適度な誤差角度を入力する必要があります。

ホブの取り付け角度を変更することにより切り屑の形状が変化するためドライカットの切削に有効です。

ホブの取り付け角度を変更しても、はすば歯車のリードが変化することはありません。ただし、加工後の歯形は圧力角が変化します。また、転位ホブ歯切りとは異なるため入力した歯車寸法とはなりません。図 23.30 にホブ取り付け角度誤差の設定画面を示します。



図 23.30 ホブ取り付け角度誤差の設定

23.7 ソフトウェアについて

Hob Chip は、元九州大学工学研究院知能機械システム部門の梅崎先生が開発した「ホブ切りにおける切り厚さ数値解析プログラム」を計算プログラムとして使用しています。

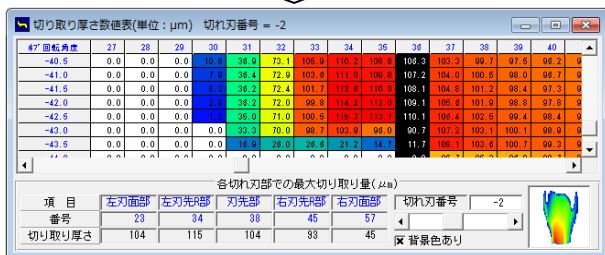
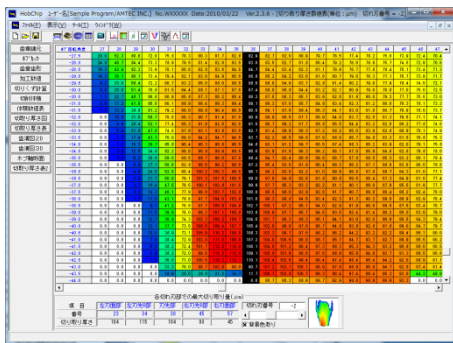


図 23.27 切り取り厚さ形状と数値(切れ刃番号-2)

[24]involute Σ (spur and helical 少歯数対応)

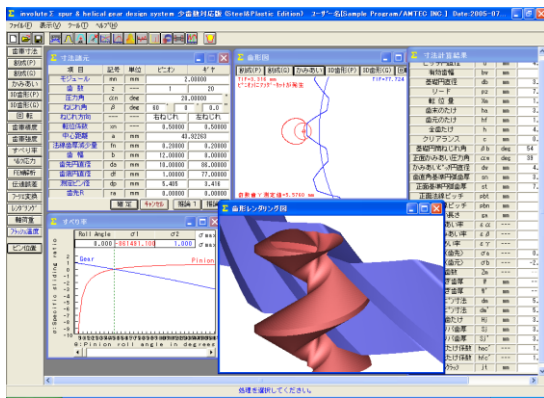


図 24.1 involute Σ (少歯数歯車)

24.1 概要

involute Σ (少歯数歯車) は、歯数を 1 枚, 2 枚の少歯数歯車に対応した設計が可能です。図 24.1 に全体画面を示します。

24.2 歯車寸法諸元

例題数値を図 24.2 としたときの寸法を図 24.3 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------|------------|-----|----------|----------|
| モジュール | m | mm | 2.00000 | |
| 歯数 | z | --- | 1 | 20 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 60° | 0° |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 転位係数 | xn | --- | 0.50000 | 0.50000 |
| 中心距離 | a | mm | 43.82263 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.20000 | 0.20000 |
| 歯幅 | b | mm | 12.00000 | 3.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 10.00000 | 88.00000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 1.00000 | 77.00000 |
| 測定ピッチ | dp | mm | 5.00000 | 4.00000 |
| 歯先R | ra | mm | 0.00000 | 0.00000 |

図 24.2 寸法諸元

| 寸法計算結果 | 記号 | 単位 | 値 |
|------------|-------------------|-----|---------------|
| 正面かみあい圧力角 | α_w | deg | 39° 22' 4" |
| かみあいピッチ円直径 | dw | mm | 4.1831 |
| 歯直角基準円弧歯厚 | sn | mm | 3.8695 |
| 正面基準円弧歯厚 | st | mm | 7.7391 |
| 正面法線ピッチ | pbt | mm | 10.1596 |
| 歯直角法線ピッチ | pbn | mm | 5.9049 |
| かみあい長さ | sa | mm | 4.3657 |
| 正面かみあい率 | ϵ_α | --- | 0.4297 |
| 重なりかみあい率 | ϵ_β | --- | 1.2405 |
| 全かみあい率 | ϵ_γ | --- | 1.6702 |
| すべり率 (歯先) | σ_1 | --- | n 7558 n 7840 |

図 24.3 寸法結果

24.3 歯形

歯形図を図 24.4~24.7 に示します。図 24.7 にかみ合い接触線を観察することができます。

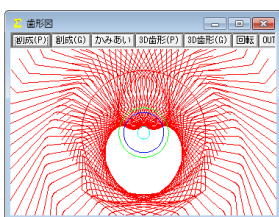


図 24.4 歯形創成

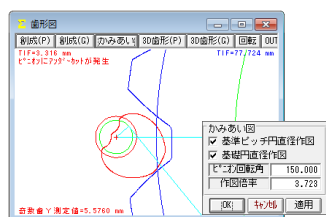


図 24.5 歯形かみ合い

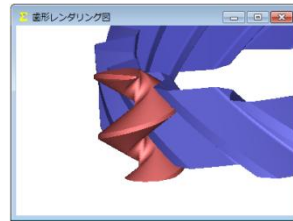


図 24.6 歯形レンダリング 1

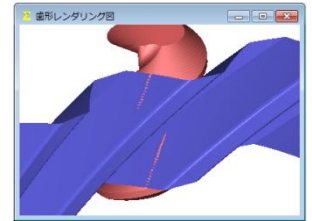


図 24.7 歯形レンダリング 2

24.4 すべり率とヘルツ応力グラフ

ピニオン歯数を 1 とすれば高減速比を得ることができますが、少歯数の場合、図 24.8 のようにピニオン歯元で非常に大きなすべりが発生します。また、図 24.9 のようにピニオンの歯元で急激なヘルツ応力が発生しますので慎重な設計が必要です。

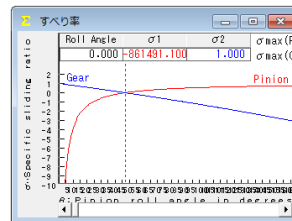


図 24.8 すべり率

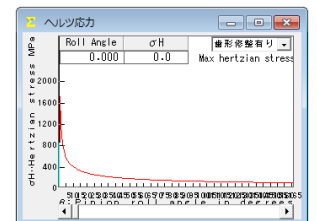


図 24.9 ヘルツ応力

24.5 ピニオン歯数 2 のかみ合い

ピニオン歯数を 2 としたときの歯形を図 24.10~24.13 に示します。

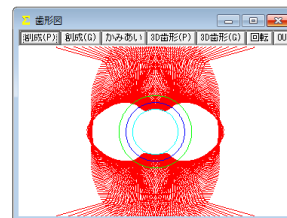


図 24.10 歯形創成

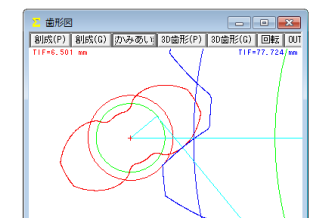


図 24.11 歯形かみ合い

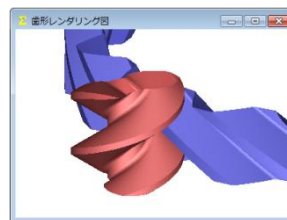


図 24.12 歯形レンダリング

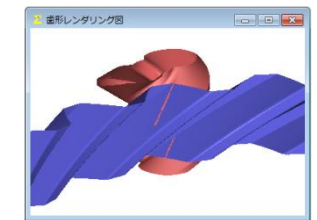


図 24.13 歯形レンダリング

24.6 内歯車 (ピニオン歯数 2 のかみ合い)

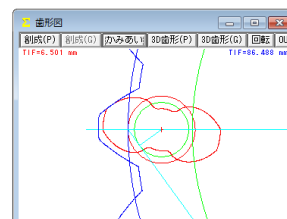


図 24.14 歯形かみ合い

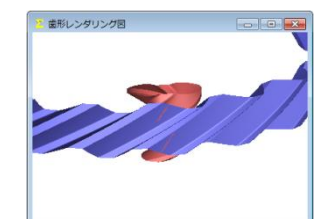


図 24.15 歯形レンダリング

※ 歯形出力 (2D-DXF, 3D-IGES), 強度計算等の説明は省略します。詳細は別途お問い合わせください。

[25] involute Gemma

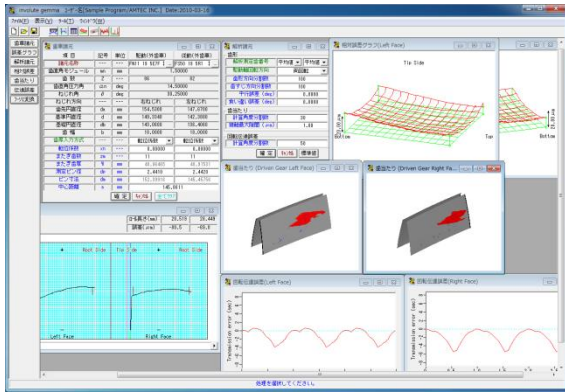


図 25.1 involute Gemma

25.1 概要

involute Gemma は、大阪精密機械(株)様の歯車測定機 CLP-35 / 65, GC-1HP)で測定した実データを使用して歯形相対誤差, 歯当たり, 回転伝達誤差をシミュレートすることができるソフトウェアです。図 25.1 に involute Gemma の画面を, 図 25.2 に CLP-35 の写真を示します。



図 25.2 歯車測定機(CLP-35:大阪精密機械(株)様ご提供)

25.2 歯車諸元設定

歯車諸元は, 図 25.4 の測定データ検索画面から選択します。検索項目は, 日付, 歯車の種類(外歯車, 内歯車), モジュール, 歯数, 圧力角, 歯幅などを検索することができます。駆動歯車と従動歯車の両歯車を選択して歯車諸元を確定することができますが, 歯厚と中心距離は任意に変更することができます。歯厚は, 転位係数, またぎ歯厚, オーバーピン寸法から選択して入力することができます。

図 25.5 に示すように従動歯車に理論歯車を設定することにより理論歯車とのかみ合いシミュレーションも可能です。

| 項目 | 記号 | 単位 | 駆動(外歯車) | 従動(外歯車) |
|----------|------------|-----|-----------|-----------|
| 諸元名称 | --- | --- | FFF95 | RSFR95 |
| 歯直角モジュール | m | mm | 1.50000 | |
| 歯数 | Z | --- | 86 | 82 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 14.50000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 30.25000 | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 歯先円直径 | da | mm | 154.5300 | 147.8700 |
| 基準円直径 | d | mm | 149.3940 | 142.3880 |
| 基礎円直径 | db | mm | 143.0600 | 136.4060 |
| 歯幅 | b | mm | 18.0000 | 18.0000 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 | 転位係数 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.00000 | 転位係数 |
| またぎ歯厚 | zm | --- | 11 | またぎ歯厚 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 48.36465 | ピン寸法 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 2.4410 | 2.4440 |
| ピン寸法 | dm | mm | 152.39916 | 145.54282 |
| 中心距離 | a | mm | 145.8611 | |

図 25.3 歯車諸元

| 選択項目 | 検索項目 | 数値 |
|---|-------|---------|
| <input checked="" type="checkbox"/> モジュール | 歯車の種類 | 外歯車 |
| <input type="checkbox"/> 歯数 | モジュール | 1.50000 |
| <input type="checkbox"/> 圧力角 | | |
| <input type="checkbox"/> ねじれ角 | | |
| <input type="checkbox"/> ねじれ角(少数点) | | |
| <input type="checkbox"/> ねじれ方向 | | |
| <input type="checkbox"/> 歯先円直径 | | |

図 25.4 測定データの検索

| 項目 | 記号 | 単位 | 従動歯車 |
|----------|------------|-----|----------|
| 歯車の種類 | --- | --- | 外歯車 |
| 歯直角モジュール | m | mm | 1.50000 |
| 歯数 | Z | --- | |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 14.50000 |
| ねじれ角 | β | deg | 30.25000 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| 転位係数 | xn | --- | |
| 歯先円直径 | da | mm | |
| 基準円直径 | d | mm | |
| 基礎円直径 | db | mm | |
| 歯幅 | b | mm | 18.00000 |

図 25.5 マスタギヤ設定画面

25.3 誤差グラフ

図 25.3 の「諸元名称」で読み込んだ歯形測定データ(歯形誤差, 歯すじ誤差)をグラフで表示することができます。誤差倍率も任意に拡大することができ, 測定番号を各々表示することができます。また, グラフ線上にマウスを置くと作用線長さ, 直径, 誤差を表示します。

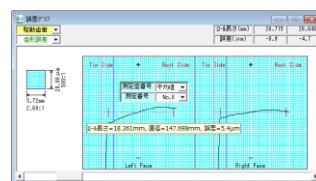


図 25.6 歯形誤差(駆動歯車)

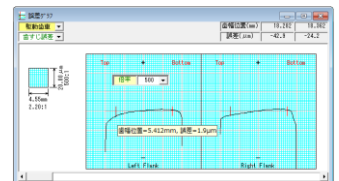


図 25.7 歯すじ誤差(駆動歯車)

25.4 解析諸元

シミュレーションをする際に必要な解析諸元を図 25.8 で設定します。例題の場合, 解析測定歯番号は平均値を使用し, 駆動軸回転方向は, 両回転, 右回転, 左回転の内, 両回転を選択します。

また、平行度誤差および食い違い誤差はともに0度とし、接触最大隙間を1 μm として歯当たりシミュレーションをします。



図 25.8 解析諸元

25.5 相対誤差

図 25.9 および図 25.10 に歯形の相対誤差を表示します。分割数は、Z 方向 X 方向ともに最大 30 分割の表示をすることができ、誤差倍率は任意に設定することができます。図 25.9 および図 25.10 の分割数は9 \times 15とし、誤差倍率を500倍として表示しています。

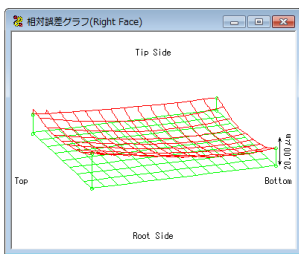


図 25.9 相対誤差(右歯面)

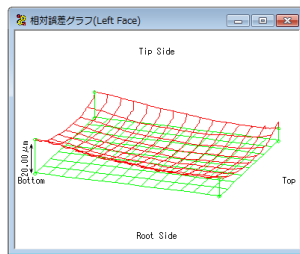


図 25.10 相対誤差(左歯面)

25.6 歯当たり

図 25.8 の解析諸元で歯当たりシミュレーションした結果、右歯面の歯当りを図 25.11 に、左歯面の歯当りを図 25.12 に示します。この歯当りは、歯幅の中央部よりやや左側に位置していますが、歯形誤差および歯すじ誤差グラフより妥当な位置であると判断することができます。また、歯当たり跡の面積は、図 25.8 の接触最大隙間数値を大きくすると広がります。

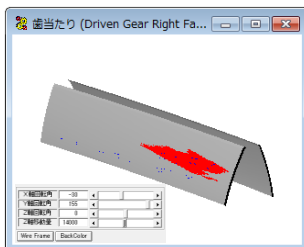


図 25.11 歯当たり(右歯面)

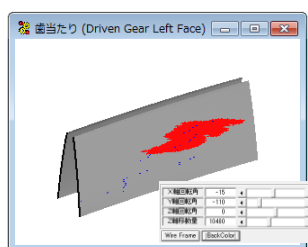
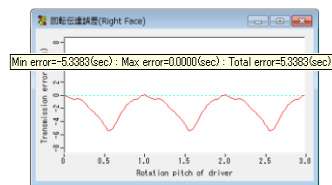


図 25.12 歯当たり(左歯面)

25.7 回転伝達誤差

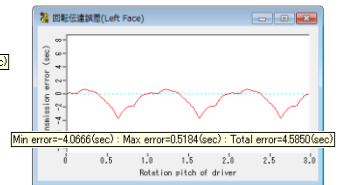
図 25.8 の解析諸元で回転伝達誤差を解析した結果、右歯面の回転伝達誤差は図 25.13 となり、伝達誤差は5.34(sec)となります。左歯面の回転伝達誤差は図 25.14 となり伝達誤差は4.59(sec)となります。また、縦軸の単位は(sec)または(μrad)を選択することができます。



(右歯面)

T.Error=5.34(sec)

図 25.13 回転伝達誤差



(左歯面)

T.Error=4.59(sec)

図 25.14 回転伝達誤差

歯車の全歯測定を行い、回転伝達誤差を解析した例を図 25.15 にそしてフーリエ解析した例を図 25.16 に示します。

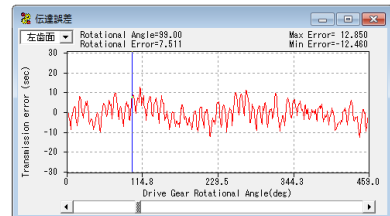


図 25.15 回転伝達誤差(全歯測定の場合)

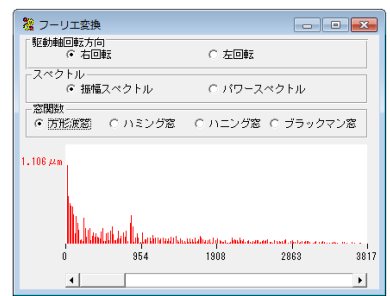
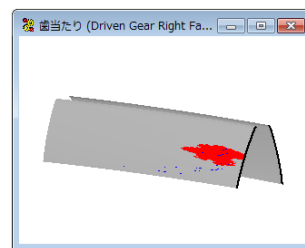


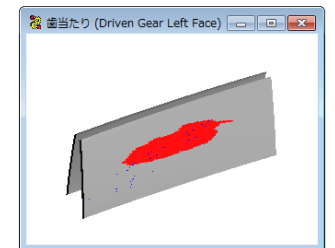
図 25.16 フーリエ解析(全歯測定の場合)

25.8 食い違い誤差を与えた場合の歯当たりと回転伝達誤差

図 25.8 の解析諸元で解析諸元の食い違い誤差を0.2度として解析した結果を図 25.17 および図 25.18 に示します。解析結果より、左歯面の歯当りは歯幅中央に移動し、回転伝達誤差は4.59(sec)から3.63(sec)に小さくなるのが解ります。

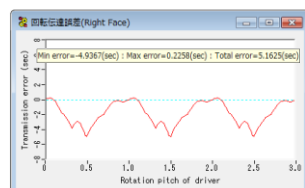


(右歯面)



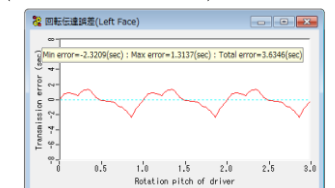
(左歯面)

図 25.17 歯当たり(食い違い誤差 0.2 度)



(右歯面)

T.Error=5.16(sec)



(左歯面)

T.Error=3.63(sec)

図 25.18 回転伝達誤差(食い違い誤差 0.2 度)

25.9 内歯車

図 25.19 の外歯車をマスタギヤとして内歯車の歯当たりと回転伝達誤差シミュレーションの結果を以下に示します。

図 25.20 に内歯車の歯形誤差グラフを、図 25.21 に歯すじ誤差グラフを示します。図 25.22～25.28 に解析諸元と解析結果を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 駆動(外歯車) | 従動(内歯車) |
|----------|------------|-----|----------|------------|
| 諸元名称 | --- | --- | ***** | インターナルギ... |
| 歯直角モジュール | mn | mm | | 1.34320 |
| 歯数 | Z | --- | 25 | 74 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | | 23.62000 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 歯先円直径 | da | mm | 39.3369 | 106.0000 |
| 基準円直径 | d | mm | 36.6505 | 108.4850 |
| 基礎円直径 | db | mm | 34.0613 | 100.8210 |
| 歯幅 | b | mm | 20.0000 | 20.0000 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 | 転位係数 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 4 | 11 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 14.48178 | 43.42122 |
| 漸進ピッチ | dp | mm | 2.2870 | 2.2820 |
| ピッチ法 | dm | mm | 39.69711 | 105.50774 |
| 中心距離 | a | mm | | 35.9175 |

図 25.19 歯車諸元

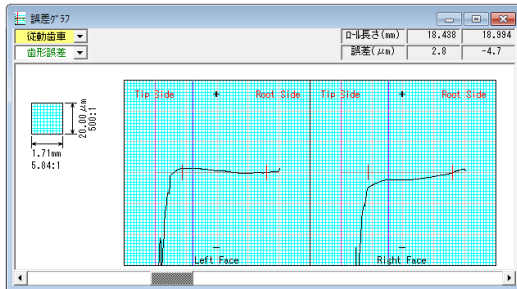


図 25.20 内歯車歯形誤差グラフ

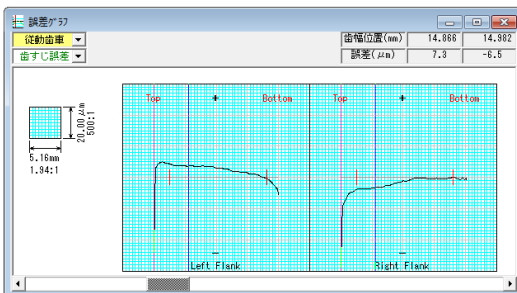


図 25.21 内歯車歯すじ誤差グラフ

| 解析諸元 | |
|--------------|---------|
| 解析測定歯番号 | 理論値 平均値 |
| 駆動軸回転方向 | 両回転 |
| 歯形方向分割数 | 100 |
| 歯すじ方向分割数 | 100 |
| 平行誤差 (deg) | 0.0000 |
| 食い違い誤差 (deg) | 0.0000 |
| 歯当たり | |
| 計算角度分割数 | 30 |
| 接触最大隙間 (μm) | 0.20 |
| 回転伝達誤差 | |
| 計算角度分割数 | 50 |

図 25.22 解析諸元

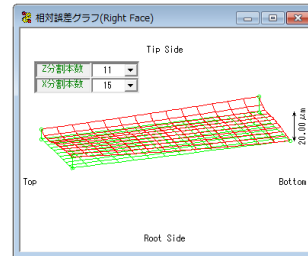


図 25.23 相対誤差(右歯面)

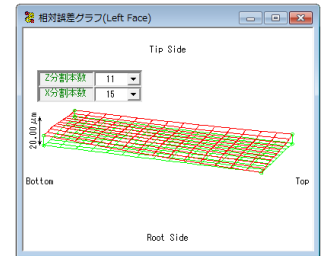


図 25.24 相対誤差(左歯面)

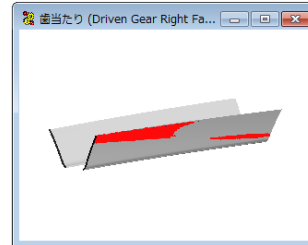


図 25.25 歯当たり(右歯面)

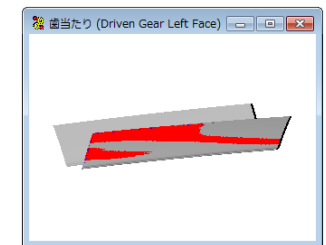


図 25.26 歯当たり(左歯面)

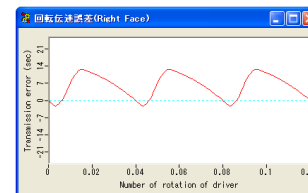


図 25.27 伝達誤差(右歯面)

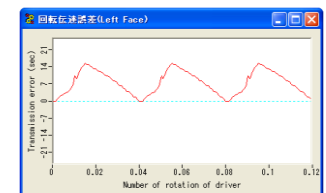


図 25.28 伝達誤差(左歯面)

25.10 解析データ管理

図 25.29 に示しますように解析結果をデータベースに保存することができます。また、図 25.30 で管理データ (名称, 歯車番号, 図面番号など) または歯車諸元 (モジュール, 歯数, 圧力角など) で検索することができます。

| 解析データの保存 | |
|----------|------------|
| 管理名称 | Sample |
| 歯車番号 | |
| 図面番号 | |
| 解析者 | |
| 日付 | 2010年3月16日 |
| 備考 | |

図 25.29 データ保存

| 解析データの管理 | |
|----------|--|
| 管理データ | 歯車諸元 |
| 検索項目 | <input type="radio"/> 管理名称 <input type="radio"/> 歯車番号 <input type="radio"/> 図面番号 <input type="radio"/> 解析者 <input type="radio"/> 備考 |
| * 検索条件 | <input type="text" value=""/> |
| 日付 | 2010年3月16日 ~ 2010年3月16日 |

図 25.30 データ管理

25.11 オプション

- ① 1 歯かみ合いにおける歯当たりと回転伝達誤差
- ② ワウ&フラッタと「音」
- ③ 周波数解析
- ④ 回転伝達誤差の CSV 出力
- ⑤ ピッチ誤差を考慮した歯当たりと回転伝達誤差
- ⑥ ...

25.12 その他

歯車測定機の測定プログラムによっては適応しない場合 (旧タイプの測定プログラム, 特殊仕様など) があります。

[26] CGR ラック & ピニオン設計システム

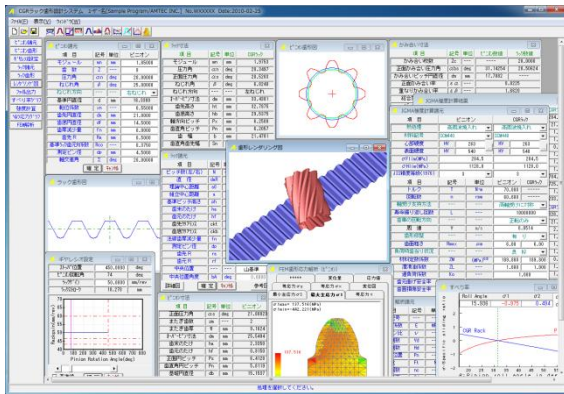


図 26.1 CGR ラック & ピニオン設計システム

26.1 概要

CGR(Constant Gear Ratio)ラック設計システムは、ギヤレシオに基づいて運動するピニオンとラックの歯形を生成し、強度計算、FEM歯形応力解析、すべり率グラフ、ヘルツ応力グラフを計算することができます。

26.2 ピニオンの諸元入力

ラックとかみ合うピニオンの諸元と、ラックを生成するためのピニオン諸元を入力します。図 26.2 にピニオン諸元の入力画面を、図 26.3 にピニオンの寸法を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン |
|--------------|------------|-----|----------|
| モジュール | m | mm | 1.85000 |
| 歯数 | Z | --- | 8 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 25.00000 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 16.3300 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.55000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 21.0000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 14.5000 |
| 歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 |
| 歯先 R | Ra | mm | 0.5000 |
| 基準ラック歯元 R 係数 | Rco | --- | 0.3750 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 4.5000 |
| 軸交差角 | Σ | deg | 20.00000 |

図 26.2 ピニオン諸元の設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン |
|----------|------------|-----|----------|
| 正面圧力角 | α_s | deg | 21.88023 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 2 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 9.1624 |
| オハベリ寸法 | dm | mm | 25.5494 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.3950 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 0.9150 |
| 正面円ピッチ | Ps | mm | 6.4128 |
| 歯直角円ピッチ | Pn | mm | 5.8119 |
| 基礎円直径 | db | mm | 15.1537 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 23.39896 |
| TIF 直径 | TIF | mm | 15.5779 |
| 歯直角歯先幅 | Sn | mm | 0.8869 |

図 26.3 ピニオンの寸法

26.3 ピニオン歯形図

ピニオン歯形図を図 26.4 に示します。図 26.5 は、歯形の部分拡大図です。

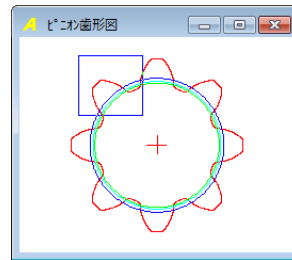


図 26.4 ピニオン歯形図

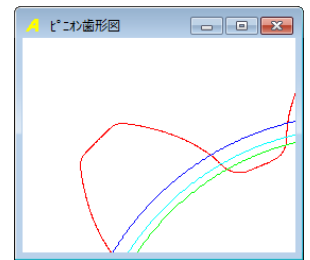


図 26.5 歯形拡大図

26.4 ギヤレシオ

ピニオンの回転角に対するラックゲイン(mm/rev)の数値を設定します。図 26.6 にギヤレシオの設定グラフです。例題の場合、ラックゲインは 50(mm/rev)ですが任意に設定することができます。

(1) ストップ位置の入力

ピニオンの最大回転角度がラック長です。

(2) 図中の一点鎖線は、①ころがり円がピニオン歯先円のときのストロークゲイン、②ころがり円がピニオン基準円のときのストロークゲイン、③ころがり円がピニオン基礎円のときのストロークゲインを示します。

(3) グラフ表示後、スクロールバーをスライドさせると上部にピニオン回転角とラックストローク値を表示します。

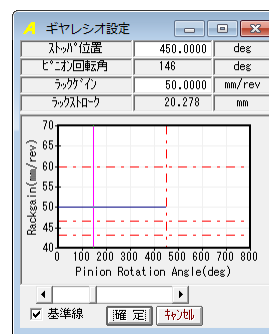


図 26.6 ギヤレシオ

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-----------|-----|-----|---------|
| ピッチ数(左/右) | N | --- | 10 / 10 |
| 直径 | dsR | mm | 35.0000 |
| 理論中心距離 | a0 | mm | 28.0000 |
| 結立中心距離 | a | mm | 28.0000 |
| 基準ピッチ高さ | ph | mm | 31.3175 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.4700 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.7800 |
| 歯先円半径 | ckt | mm | 0.4625 |
| 歯底円半径 | ckb | mm | 0.4625 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 3.090 |
| 歯先 R | ra | mm | 0.2500 |
| 歯底 R | rb | mm | 0.7000 |
| 中央位置 | --- | --- | 山基準 |
| 中央位置角度 | ba | deg | 0.0000 |

図 26.7 ラックの諸元設定

26.5 ラックの諸元設定

ラックの諸元設定画面を図 26.7 に示します。ラックの位置角度の設定によりラックの基準位置(ピニオン回転角 0° 位置)における中央断面の歯形が決まります。また、歯山または谷を選択することができます。図 26.8 にラック参考図を、図 26.9 にラック寸法の計算結果を示します。

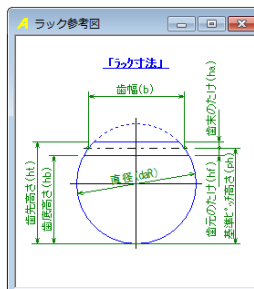


図 26.8 ラック参考図

| 項目 | 記号 | 単位 | CGRラック |
|--------|------------|-----|---------|
| モジュール | m | mm | 1.3753 |
| 圧力角 | α_n | deg | 28.3497 |
| 正面圧力角 | α_s | deg | 28.5203 |
| ねじれ角 | β | deg | 6.8240 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| オハベリ寸法 | dm | mm | 33.4381 |
| 歯先高さ | ht | mm | 32.7875 |
| 歯底高さ | hb | mm | 29.5375 |
| 軸方向ピッチ | Px | mm | 6.2500 |
| 歯直角ピッチ | Pn | mm | 6.2057 |
| 歯幅 | b | mm | 21.4781 |
| 歯直角歯先幅 | Sn | mm | 1.7295 |

図 26.9 ラック寸法

26.6 CGR ラックの歯形軌跡図

ラック歯幅中央断面の歯形軌跡図を図 26.10 に示します。

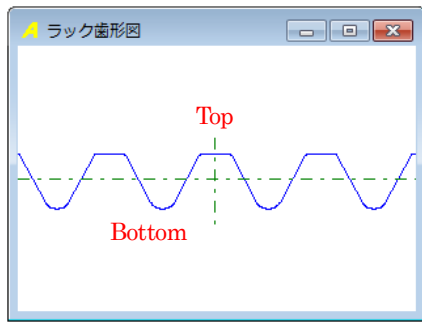


図 26.10 ラックの軌跡図

26.7 レンダリング図

歯形計算終了後、[レンダリング図]ボタンを押すと、ピニオンとラックの歯形かみあい図を表示します。レンダリング図は、座標軸の角度を変更することにより、視点を変えて観察することができます。

図 26.11 にピニオン上面から見たレンダリング図を示します。

また、図 26.12 のラック背面から見たレンダリング図には、かみあい接触線を観察することができます。図 26.11 の右に示すコントロールフォームで、

- ①座標軸の角度変更
- ②ズーム
- ③ワイヤフレーム、シェード表示切り換え
- ④背景色の設定
- ⑤ラックストロークチェック(ピニオンまたはラックの移動)の機能があります。

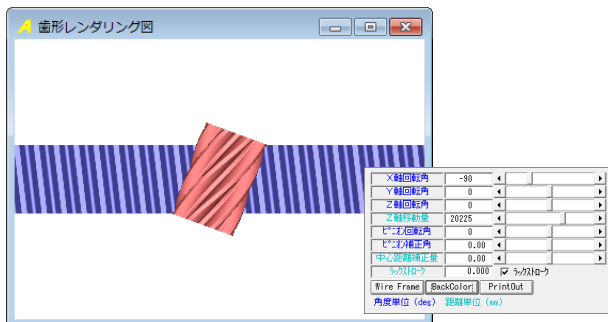


図 26.11 レンダリング(ピニオン上面から観察)

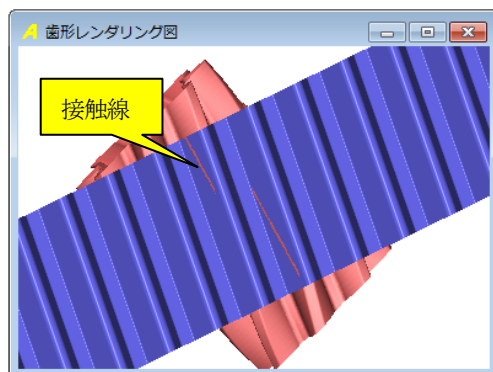


図 26.12 レンダリング(ラック背面から観察)

26.8 CAD ファイル出力

ピニオンと CGR ラックの歯形を DXF または IGES ファイルで出力することができます。図 26.13 にファイル出力設定を示します。CAD 作図例を、図 26.14、図 26.15 に示します。

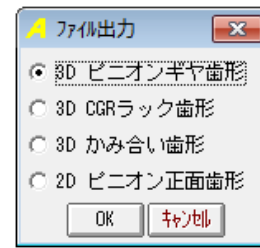
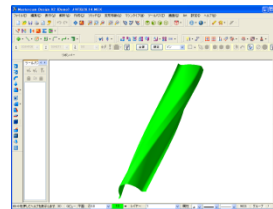
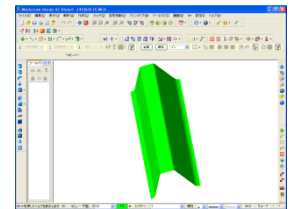


図 26.13 CAD ファイル出力



(ピニオン)

図 26.14 CAD 作図(IGES)



(ラック)

図 26.15 CAD 作図(IGES)

26.9 すべり率グラフ

ラックとピニオンのかみ合いにおけるすべり率グラフを図 26.19 に示します。

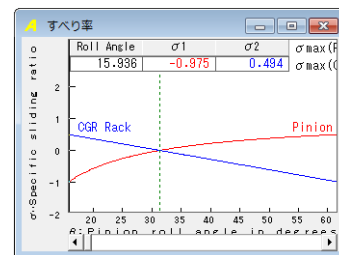


図 26.16 すべり率

26.10 強度計算

JGMA 強度計算に基づいた計算結果を図 26.17 に示します。

| JGMA強度計算諸元 | | | | |
|---------------|--------|----------------------|---------|---------|
| 項目 | ピニオン | | CGRラック | |
| 熱処理 | 高周波焼入れ | | 高周波焼入れ | |
| 材料記号 | SCM440 | | SCM440 | |
| 心部硬度 | HV | 263 | HV | 263 |
| 表面硬度 | HV | 540 | HV | 540 |
| σFlim(MPa) | 284.5 | | 284.5 | |
| σHlim(MPa) | 1128.0 | | 1128.0 | |
| JIS精度等級(1976) | 3 | | 3 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | CGRラック |
| トルク | T | N·m | 70.000 | ---- |
| 回転数 | n | rpm | 60.000 | ---- |
| 軸受け支持方法 | ---- | ---- | 両軸対称に付称 | |
| 寿命繰り返し回数 | L | ---- | 1000000 | |
| 歯車の回転方向 | ---- | ---- | 正転のみ | |
| 周速 | v | m/s | 0.0514 | |
| 歯形修整 | ---- | ---- | 有り | |
| 歯面粗さ | Rmax | μm | 6.00 | 6.00 |
| 負荷時歯当り状況 | ---- | ---- | 良好 | |
| 材料定数係数 | ZM | (MPa) ^{0.5} | 189.800 | 189.800 |
| 溝滑り係数 | ZL | ---- | 1.000 | |
| 過負荷係数 | Ko | ---- | 1.000 | |
| 歯元曲げ安全率 | SF | ---- | 1.200 | |
| 歯面接觸安全率 | SH | ---- | 1.150 | |

図 26.17 強度計算諸元

| JGMA強度計算結果 | | | | |
|------------|-----------------|-----|----------|-----------|
| 項目(曲げ) | 記号 | 単位 | ピニオン | CGRラック |
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 284.500 | 284.500 |
| 曲げ有効歯幅 | b' | mm | 23.328 | 21.478 |
| 歯形係数 | YF | --- | 1.691 | 1.359 |
| 荷重分布係数 | Y ϵ | --- | 0.937 | 1.024 |
| ねじれ角係数 | Y β | --- | 0.792 | 0.943 |
| 寿命係数 | KL | --- | 1.000 | 1.400 |
| 寸法係数 | KFx | --- | 1.000 | 1.000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.000 | 1.000 |
| 呼び円周力 | Ft | N | 8562.657 | 8784.804 |
| 許容円周力 | Ftlim | N | 9137.647 | 10725.229 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 1.067 | 1.221 |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 266.598 | 233.028 |
| 項目(面圧) | 記号 | 単位 | ピニオン | CGRラック |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 1128.000 | 1128.000 |
| 面圧有効歯幅 | bw | mm | 21.478 | 21.478 |
| 領域係数 | ZH | --- | 2.294 | 2.086 |
| 寿命係数 | KHL | --- | 1.000 | 1.300 |
| かみあい率係数 | Z ϵ | --- | 0.915 | 1.005 |
| 粗さ係数 | ZR | --- | 1.002 | 1.001 |
| 潤滑速度係数 | ZV | --- | 0.891 | 0.891 |
| 硬さ比係数 | ZW | --- | 1.000 | 1.000 |
| 荷重分布係数 | KH β | --- | 1.000 | 1.000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | 1.000 | 1.000 |
| 呼び円周力 | Fc | N | 8573.178 | |
| 許容円周力 | Fclim | N | 1679.942 | 2841.275 |
| 歯面強さ | Sfc | --- | 0.196 | 0.331 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 2548.196 | 1959.401 |

図 26.18 強度計算結果

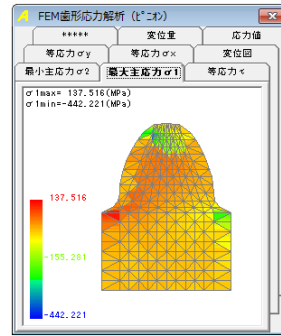


図 26.21 FEM 解析(P)

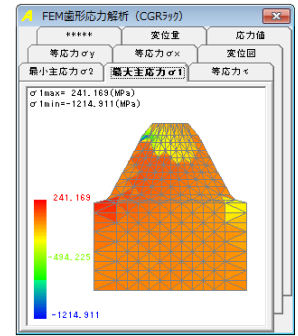


図 26.22 FEM 解析(R)

※強度計算は、AGMA2001-C95 規格にも対応可能です。別途お問い合わせ下さい。

26.11 ヘルツ応力グラフ

ラックとピニオンのかみ合いにおけるヘルツ応力グラフを図 26.19 に示します。

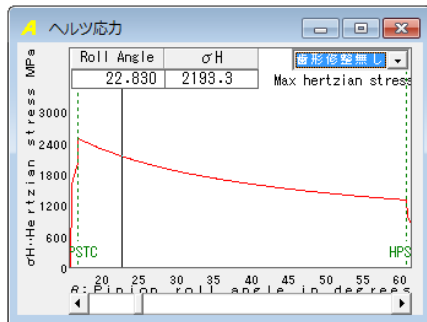


図 26.19 ヘルツ応力

26.12 FEM 歯形応力 (オプション)

ピニオンと CGR ラックの 2 次元 FEM 歯形応力解析をします。図 26.20 に FEM 設定画面を、図 26.21 および図 26.22 に応力分布図を示します。

| FEM 解析諸元 | | | | |
|----------|-------|-----|----------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | CGRラック |
| 材料記号 | --- | --- | SCM440 | SCM440 |
| 縦弾性係数 | E | MPa | 205800.0 | 205800.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.300 | 0.300 |
| 縦分割数 | Vd | --- | 12 | 12 |
| 横分割数 | Hd | --- | 22 | 20 |
| 荷重点位置 | Pn | --- | 2 | 2 |
| 荷重 | Ft | N | 8562.66 | 8784.80 |
| 色階調数 | nc | --- | 100 | |
| 変位倍率 | Sd | --- | 100 | |

図 26.20 FEM 解析諸元

[27]インポリュートスプライン寸法設計 (JIS B 1603)

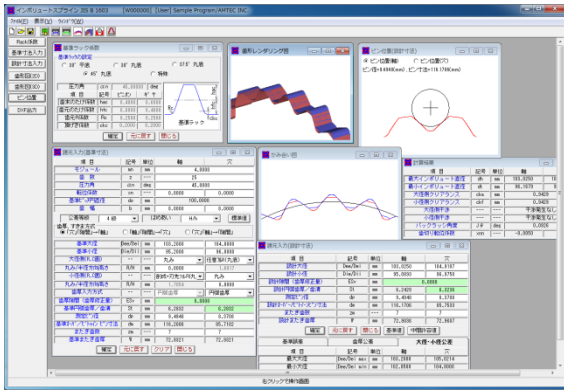


図 27.1 インポリュートスプライン(JIS B 1603)

27.1 概要

スプライン寸法設計は、JIS B 1603:1995 規格に基づいています。スプライン形状や、歯厚、はめ合い公差も容易に決めることができ、設計した歯形をCADデータに出力することもできます。図27.1に全体画面を示します。

27.2 基準ラック

図 27.2 に基準ラックの設定画面を示します。



図 27.2 基準ラック

27.3 諸元入力

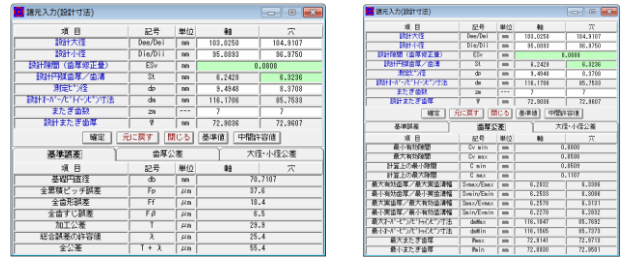
図 27.3 の諸元入力画面でモジュール、歯数、圧力角を入力し[標準値]をクリックすると全ての寸法を設定することができますが、任意に変更することもできます。歯先形状は、丸みおよび面取りのいずれかを選択することができます。スプラインの歯元形状はフィレット形状または任意 R を選択することができます。



図 27.3 諸元入力

27.4 スプライン寸法

図 27.3 で設定した諸元に基づき誤差の許容値、歯厚公差、大径、小径公差等を図 27.3 のように表示します。



(a) 誤差の許容値

(b) 歯厚公差



(c) 大径、小径公差



(d) 計算結果

図 27.3 スプライン寸法

27.5 歯形

図 27.4 に歯形を、図 27.5 にオーバーピン寸法(歯形とピンの位置)を示します。また、図 27.6 に歯形レンダリングを、図 27.7 に DXF ファイル出力画面を示します。

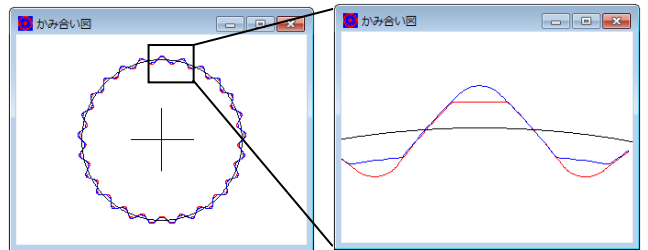
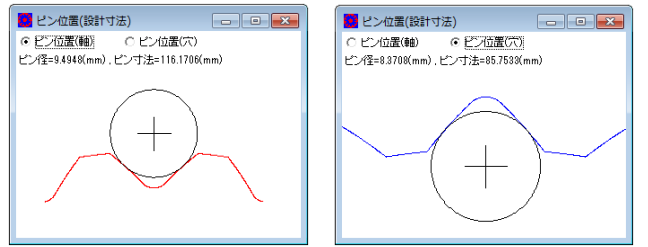


図 27.4 スプライン歯形



(a) 軸スプライン

(b) 穴スプライン

図 27.5 オーバーピン寸法

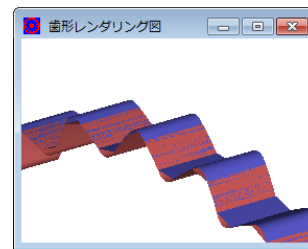


図 27.6 歯形レンダリング



図 27.7 ファイル出力

[28]傾斜ウォームギヤ設計システム

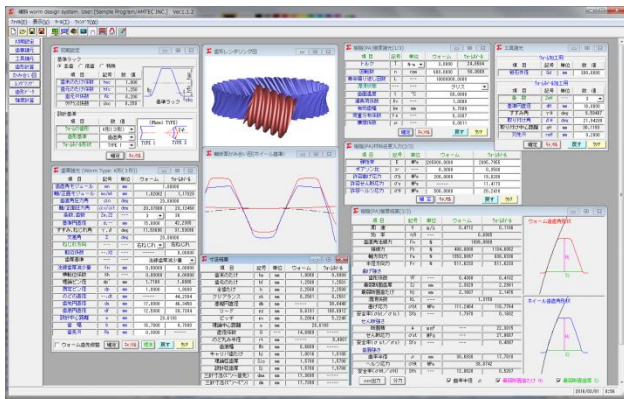


図 28.1 傾斜ウォームギヤ

28.1 概要

一般のウォームギヤは、90度直交型ですが、配置の制約からウォーム軸を若干傾けて取り付けなければならないことがあります。その場合、ホイールのねじれ角や歯形は大きく変わることになります。本ソフトウェアは、90度直交型以外のウォームギヤの寸法および歯形のCADデータ出力、3D歯形かみ合い、歯車寸法を計算・表示します。

28.2 基準ラック

図 27.2 に基準ラックの設定画面を示します。歯だけは並歯、低歯、特殊だけに対応しています。また、歯形基準は歯直角および軸断面方向基準を選択することができます。ウォームの形式は、A形(1形)、K形(3形:オプション)、I形(4形:オプション)に対応しています。

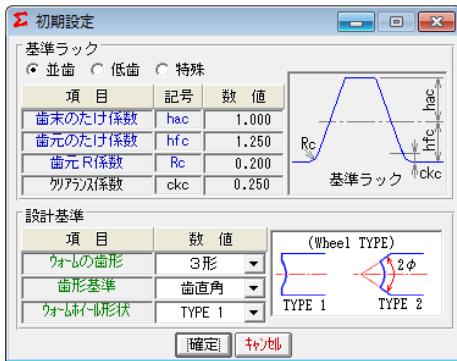


図 27.2 初期設定

28.3 歯車諸元設定

図 27.3 に歯車諸元の入力画面を示します。

- (1) 最大モジュールは 25 です。
- (2) ウォームの条数は 1~6 です。
- (3) 軸交差角を設定することができます。(±45度)
- (4) 歯厚基準は、法線歯厚減少量または横転位を選択することができます。
- (5) ウォームに歯先修整を与えることができます。
- (6) 強度計算は 28.6 項のように計算することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ウォールホイール |
|-----------|---------------------|-----|----------|----------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 1.00000 | |
| 軸/正面モジュール | mx/mt | mm | 1.02062 | 1.17329 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| 軸/正面圧力角 | α_x/α_t | deg | 20.37880 | 23.12458 |
| 条数, 歯数 | Zw, Z2 | --- | 3 | 36 |
| 基準円直径 | d, -- | mm | 15.0000 | 42.2385 |
| すずみ, ねじれ角 | γ, β | deg | 11.53696 | 31.53696 |
| 交差角 | Σ | deg | 20.00000 | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 転位係数 | --, X2 | --- | ---- | 0.00000 |
| 歯厚基準 | --- | --- | 法線歯厚減少量 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 | 0.00000 |
| 横転位係数 | Xh | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| 理論ピン径 | dp | mm | 1.7100 | 1.6888 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 1.8000 | 1.8000 |
| のどの直径 | --, dt | mm | ---- | 44.2384 |
| 歯先円直径 | da | mm | 17.0000 | 46.3450 |
| 歯底円直径 | df | mm | 12.5000 | 39.7384 |
| 設計中心距離 | a | mm | 28.6193 | |
| 歯幅 | b | mm | 16.7000 | 9.7000 |
| 歯先R | Ra | mm | 0.3000 | ---- |

図 28.3 歯車諸元

28.4 工具設定と寸法結果

ウォームホイール加工用のホブ諸元を設定します。ウォームが 3 型の場合、砥石直径を設定します。ホブの直径およびホブ取付角によりホイールの歯形は変化します。図 28.4 に工具諸元設定画面を、図 28.5 にウォームギヤの寸法を示します。

| ウォーム加工用 | | | | |
|-------------|------------|-----|----------|--|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 | |
| 砥石外径 | Gd | mm | 300.0000 | |
| ウォールホイール加工用 | | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 | |
| 条数 | ZwH | --- | 3 | |
| 基準円直径 | dH | mm | 18.0000 | |
| すずみ角 | γ H | deg | 9.59407 | |
| 取り付け角 | β H | deg | 21.94289 | |
| 取り付け中心距離 | aH | mm | 30.1193 | |
| 刃先R | raH | mm | 0.2000 | |

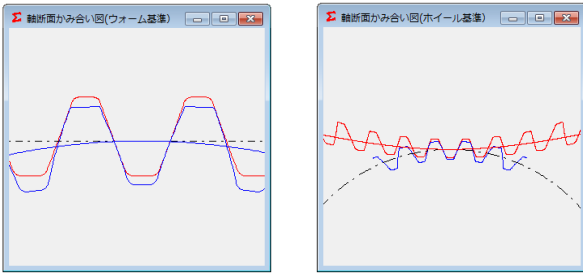
図 28.4 工具諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ウォールホイール |
|-------------|----------------------|-----|---------|----------|
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.0000 | 0.9999 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.2500 | 1.2501 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.2500 | 2.2500 |
| クリアランス | ck | mm | 0.2501 | 0.2501 |
| 基礎円直径 | db | mm | ---- | 38.8448 |
| リード | pz | mm | 9.6191 | 188.0912 |
| ピッチ | px | mm | 3.2064 | 5.2248 |
| 理論中心距離 | a | mm | 28.6193 | |
| 直径係数 | Q | --- | 14.6969 | ---- |
| のど丸み半径 | rt | mm | ---- | 8.0001 |
| 歯厚 | Wn | mm | 0.6609 | ---- |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 1.0016 | 1.0106 |
| 理論弦歯厚 | Sjo | mm | 1.5708 | 1.5706 |
| 設計弦歯厚 | SJ | mm | 1.5708 | 1.5706 |
| 三針寸法(ピン〜歯先) | dma | mm | 17.3699 | ---- |
| 三針寸法(ピン〜ピン) | dm | mm | 17.7999 | ---- |
| オガード寸法 | dinH | mm | ---- | 44.9362 |
| 歯直角かみ合い率 | ε_α | --- | 3.0239 | |

図 28.5 ウォームギヤの寸法

28.5 歯形

歯形かみ合い図を図 28.6 に、歯形レンダリングを図 28.7 および図 28.8 に示します。図 28.8 ではかみ合い接触線を歯面中央に確認することができます。



(a) ウォーム基準 (b) ホイール基準

図 28.6 歯形かみ合い

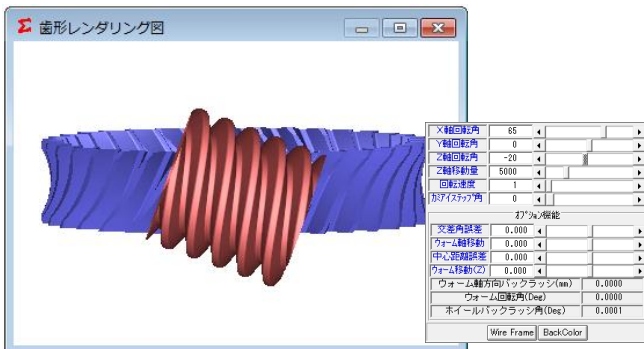


図 28.7 歯形レンダリング 1 と補助フォーム

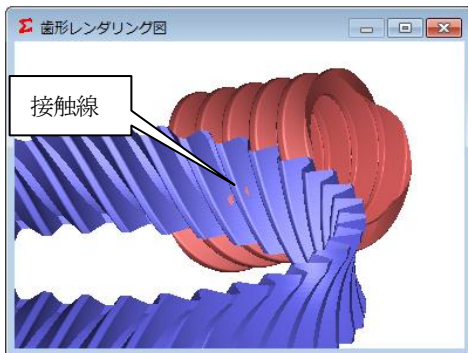


図 28.8 歯形レンダリング 2

28.6 CAD 作図例

生成した歯形を CAD データに出力することができます。図 28.9 に出力画面を、図 27.10~27.12 にウォームとホイールの CAD 作図例を示します。

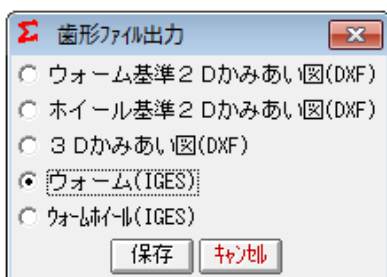
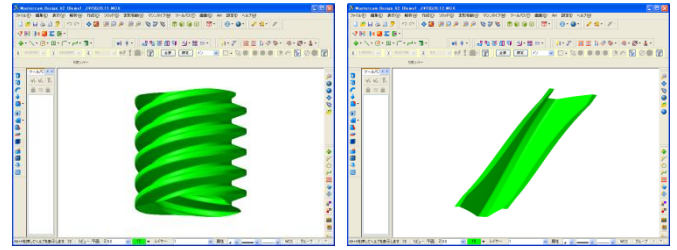


図 28.9 歯形データファイル出力



(a) Worm (b) Wheel

図 28.11 CAD 作図例(3D-IGES),

28.6 強度計算

トルク設定を図 28.12 で設定し、図 28.13 で材料に応じた許容応力を設定することにより図 28.14 のように強度結果を表示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
|----------|-----|-----|---------------|---------|
| トルク | T | N·m | 3.0000 | 24.8564 |
| 回転数 | n | rpm | 600.0000 | 50.0000 |
| 寿命繰り返し回数 | L | --- | 10000000.0000 | --- |
| 潤滑状態 | --- | --- | --- | ダリス |
| 歯面温度 | t | °C | 60.0000 | --- |
| 過負荷係数 | Kv | --- | 1.0000 | --- |
| 有効歯幅 | bw | mm | 9.7000 | --- |
| 荷重分布係数 | Yε | --- | 0.3307 | --- |
| 摩擦係数 | μ | --- | 0.0811 | --- |

図 28.12 トルク、回転数設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
|---------|----------------|-----|-------------|-----------|
| 弾性率 | E | MPa | 205800.0000 | 2095.7955 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.3000 | 0.3500 |
| 許容曲げ応力 | σ _b | MPa | 200.0000 | 19.0288 |
| 許容せん断応力 | σ _s | MPa | ----- | 11.4173 |
| 許容ヘルツ応力 | σ _H | MPa | 500.0000 | 20.2410 |

図 28.13 許容応力設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|
| 周速 | V | m/s | 0.4712 | 0.1106 |
| 効率 | η _R | --- | 0.6905 | --- |
| 歯面角法線力 | F _n | N | 1899.9998 | --- |
| 接線力 | F _t | N | 400.0000 | 1134.6052 |
| 軸方向力 | F _a | N | 1353.0097 | 838.6396 |
| 半径方向力 | F _r | N | 511.6293 | 511.6293 |
| 曲げ強さ | Y _F | --- | 0.4380 | 0.4102 |
| 歯形係数 | --- | --- | --- | --- |
| 最弱断面歯厚 | SJ | mm | 2.3829 | 2.2991 |
| 最弱断面歯たけ | HJ | mm | 2.1607 | 2.1476 |
| 潤滑係数 | KL | --- | --- | 1.3150 |
| 曲げ応力 | σ _{bt} | MPa | 111.2484 | 118.7764 |
| 安全率(σ _{bt} /σ _b) | SF _b | --- | 1.7978 | 0.1602 |
| せん断強さ | --- | --- | --- | --- |
| 断面積 | A | mm ² | --- | 22.3015 |
| せん断応力 | σ _{st} | MPa | --- | 27.8687 |
| 安全率(σ _{st} /σ _s) | SF _s | --- | --- | 0.4097 |
| 歯面強さ | --- | --- | --- | --- |
| 曲率半径 | ρ | mm | 30.6880 | 17.7010 |
| ヘルツ応力 | σ _{Ht} | MPa | --- | 38.8742 |
| 安全率(σ _{Ht} /σ _H) | SF _H | --- | 12.8620 | 0.6207 |

図 28.14 強度結果

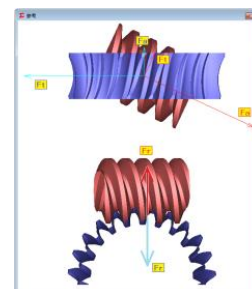


図 28.15 分力記号

[29] L-Niemann worm gear design system

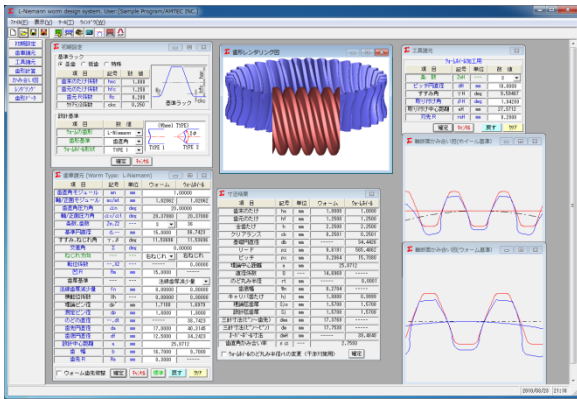


図 29.1 L-Niemann worm gear design system

29.1 概要

ウォームの歯形は、直線または凸歯形が多く使用されていますが、Niemann は凹歯形を提唱しました。そして台形ウォーム、インボリュートウォームおよび凸歯形ウォームに比較して凹円弧歯形のウォームの許容円周力はかなり大きくなることを Heyer は比較実験を行いこのことを証明しています。本ソフトウェアは、Niemann が提唱した歯形だけでなく任意に歯形半径を与えることができ、その歯形の CAD データ出力、3D 歯形かみ合い、歯車寸法を計算・表示します。

29.2 基準ラック

図 29.2 に基準ラックの設定画面を示します。歯だけは並歯、低歯、特殊だけに対応しています。また、歯形基準は歯直角および軸断面方向基準を選択することができます。

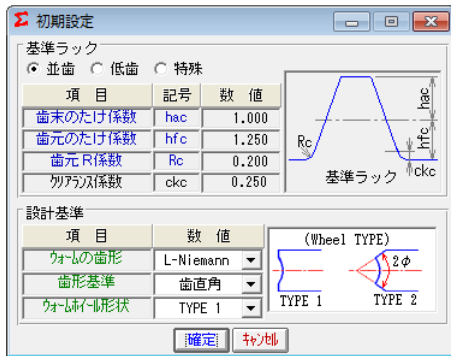


図 29.2 初期設定

29.3 歯車諸元設定

図 29.3 に歯車諸元の入力画面を示します。

- (1) 最大モジュールは 25 です。
- (2) ウォームの条数は 1~6 です。
- (3) 軸交差角を設定することができます。(オプション)
- (4) ウォームの凹半径を任意に与えることができます。
- (5) 歯厚基準は、法線歯厚減少量または横転位を選択することができます。
- (6) ウォームに歯先修整を与えることができます。

| 歯車諸元 (Worm Type: L-Niemann) | | | | |
|-----------------------------|---------------------|-----|----------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ウォームギヤ |
| 歯直角モジュール | | mm | 1.0000 | |
| 軸/正面モジュール | | mm | 1.02062 | 1.02062 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | |
| 軸/正面圧力角 | α_x/α_t | deg | 20.37880 | 20.37880 |
| 条数, 歯数 | Z_w, Z_2 | --- | 3 | 36 |
| 基準円直径 | $d, --$ | mm | 15.0000 | 36.7423 |
| すすみ, ねじれ角 | γ, β | deg | 11.53696 | 11.53696 |
| 交差角 | Σ | deg | 0.0000 | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 転位係数 | $--, X_2$ | --- | ---- | 0.0000 |
| 凹 R | R_m | mm | 15.0000 | ---- |
| 歯厚基準 | --- | --- | 法線歯厚減少量 | |
| 法線歯厚減少量 | f_n | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 横転位係数 | X_h | --- | 0.0000 | 0.0000 |
| 理論ピン径 | dp^* | mm | 1.7100 | 1.6979 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 1.8000 | 1.8000 |
| のどの直径 | $--, dt$ | mm | ---- | 38.7423 |
| 歯先円直径 | da | mm | 17.0000 | 40.3145 |
| 歯底円直径 | df | mm | 12.5000 | 34.2423 |
| 設計中心距離 | a | mm | 25.8712 | |
| 歯幅 | b | mm | 16.7000 | 9.7000 |
| 歯先 R | R_a | mm | 0.3000 | ---- |

図 29.3 歯車諸元

29.4 工具設定と寸法結果

ウォームホイール加工用のホブ諸元を設定します。ホブ取付角の標準値は軸方向ピッチを合わせた角度です。ホブの直径およびホブ取付角によりホイールの歯形は変化します。図 29.4 に工具諸元設定画面を、図 29.5 に L-Niemann ウォームギヤの寸法を示します。

| 工具諸元 | | | |
|-------------|------------|-----|---------|
| ウォームホイール加工用 | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 条数 | Z_wH | --- | 3 |
| 基準円直径 | dH | mm | 18.0000 |
| すすみ角 | γH | deg | 9.59407 |
| 取り付け角 | βH | deg | 1.94289 |
| 取り付け中心距離 | aH | mm | 27.3712 |
| 刃先 R | raH | mm | 0.2000 |

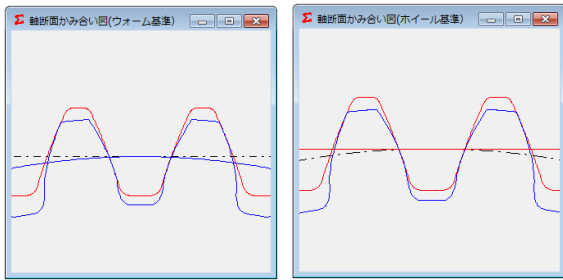
図 29.4 工具諸元

| 寸法結果 | | | | |
|--------------|----------------------|-----|---------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ウォームギヤ |
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.2500 | 1.2500 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.2500 | 2.2500 |
| クリアランス | ck | mm | 0.2501 | 0.2501 |
| 基礎円直径 | db | mm | ---- | 34.4426 |
| リード | p_z | mm | 9.6191 | 565.4862 |
| ピッチ | p_x | mm | 3.2064 | 15.7080 |
| 理論中心距離 | a | mm | 25.8712 | |
| 直径係数 | Q | --- | 14.6969 | ---- |
| のど丸み半径 | rt | mm | ---- | 8.0001 |
| 歯底厚 | W_n | mm | 0.2704 | ---- |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 1.0000 | 0.9999 |
| 理論弦歯厚 | S_j | mm | 1.5708 | 1.5708 |
| 設計弦歯厚 | S_j | mm | 1.5708 | 1.5708 |
| 三針寸法(ピッチ~歯先) | d_{ma} | mm | 17.3769 | ---- |
| 三針寸法(ピッチ~歯底) | d_m | mm | 17.7538 | ---- |
| ウォームの寸法 | dmH | mm | ---- | 39.4840 |
| 歯直角かみ合い率 | ε_α | --- | 2.7593 | |

図 29.5 L-Niemann ウォームギヤの寸法

29.5 歯形

歯形かみ合い図を図 29.6 に、歯形レンダリングを図 29.7 および図 29.8 に示します。図 29.8 ではかみ合い接触線を歯面中央に確認することができます。



(a) ウォーム基準 (b) ホイール基準

図 29.6 歯形かみ合い

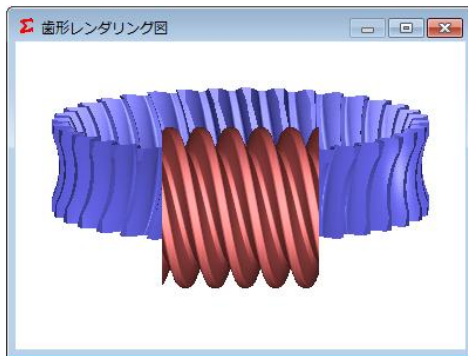


図 29.7 歯形レンダリング 1

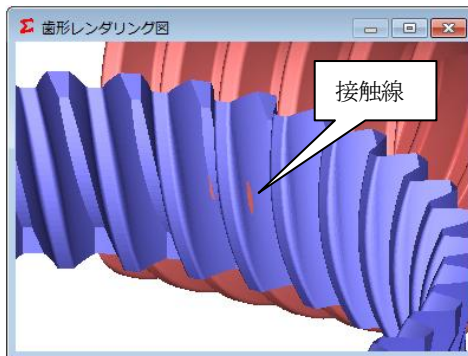


図 29.8 歯形レンダリング 2

29.6 CAD 作図例

生成した歯形を CAD データに出力することができます。図 29.9 に出画面を、図 29.10 にウォームとホイールの CAD 作図例 (IGES) を示します。

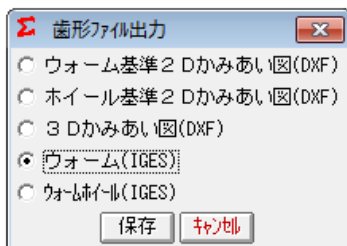
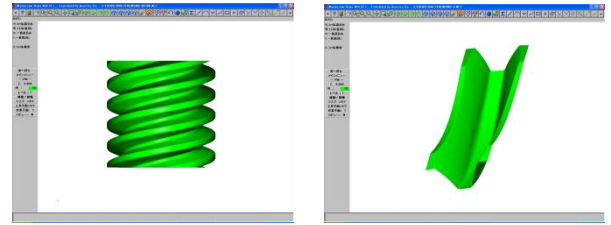


図 29.9 歯形データファイル出力



(a) ウォーム (b) ホイール

図 29.10 CAD 作図例(3D-IGES)

29.7 軸交差角対応 L-Niemann worm gear (オプション)

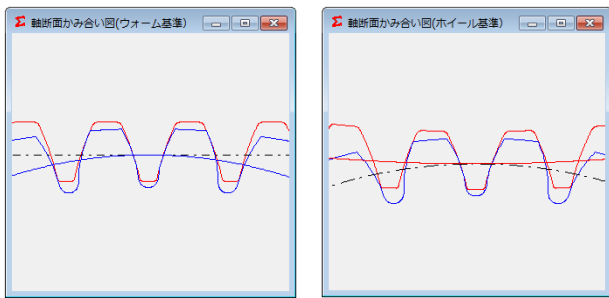
軸交差角を 20 度とした場合の設計例を図 29.11 および図 29.12 に示します。また、歯形図を図 29.13~29.15 に、CAD 作図例を図 29.16~29.17 に示します。軸交差角は ± 45 度まで入力可能です。

| 歯車諸元 (Worm Type: L-Niemann) | | | | |
|-----------------------------|---------------------|-----|----------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
| 歯直角モジュール | m_n | mm | 2.0000 | |
| 軸/正面モジュール | m_x/m_t | mm | 2.01008 | 2.13858 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 18.00000 | |
| 軸/正面圧力角 | α_x/α_t | deg | 18.08479 | 19.15889 |
| 条数, 歯数 | Z_w, Z_2 | --- | 1 | 35 |
| 基準円直径 | d, d_2 | mm | 20.0000 | 74.8501 |
| すすみ, ねじれ角 | γ, β | deg | 5.73917 | 20.73917 |
| 交差角 | Σ | deg | 15.00000 | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 転位係数 | x, x_2 | --- | ---- | 0.00000 |
| 凹 R | R_m | mm | 20.0000 | ---- |
| 歯厚基準 | --- | --- | 法線歯厚減少量 | |
| 法線歯厚減少量 | f_n | mm | 0.80000 | -0.80000 |
| 横転位係数 | x_h | --- | -0.42058 | 0.42058 |
| 理論ピン径 | d_p^* | mm | 3.3220 | 3.3447 |
| 測定ピン径 | d_p | mm | 3.0000 | 3.0000 |
| のどの直径 | d_f, d_t | mm | ---- | 78.8503 |
| 歯先円直径 | d_a | mm | 24.0000 | 82.3951 |
| 歯底円直径 | d_f | mm | 15.0000 | 69.8503 |
| 設計中心距離 | a | mm | 47.4251 | |
| 歯 幅 | b | mm | 32.8000 | 15.2000 |
| 歯先 R | R_a | mm | 0.2000 | ---- |

図 29.11 歯車諸元 1

| 寸法結果 | | | | |
|-------------|----------------------|-----|---------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
| 歯末のたけ | h_a | mm | 2.0000 | 2.0001 |
| 歯元のたけ | h_f | mm | 2.5000 | 2.4999 |
| 全歯たけ | h | mm | 4.5000 | 4.5000 |
| クリアランス | ck | mm | 0.4999 | 0.4999 |
| 基礎円直径 | d_b | mm | ---- | 70.7043 |
| リード | p_z | mm | 6.3149 | 583.7049 |
| ピッチ | p_x | mm | 6.3149 | 16.6773 |
| 理論中心距離 | a | mm | 47.4251 | |
| 直径係数 | Q | --- | 3.3499 | ---- |
| のど丸み半径 | r_t | mm | ---- | 9.0000 |
| 歯底幅 | W_n | mm | 1.4952 | ---- |
| キャリア歯たけ | h_j | mm | 2.0000 | 2.0001 |
| 理論弦歯厚 | S_{j0} | mm | 3.1416 | 3.1416 |
| 設計弦歯厚 | S_j | mm | 2.3004 | 3.9828 |
| 三針寸法(ピン~歯先) | d_{m3} | mm | 22.4528 | ---- |
| 三針寸法(ピン~ピン) | d_m | mm | 20.3056 | ---- |
| オグーナル寸法 | d_{mH} | mm | ---- | 80.3518 |
| 歯直角かみ合い率 | $\varepsilon \alpha$ | --- | 3.1098 | |

図 29.12 歯車寸法



(a) ウォーム基準 (b) ホイール基準
図 29.13 歯形かみ合い

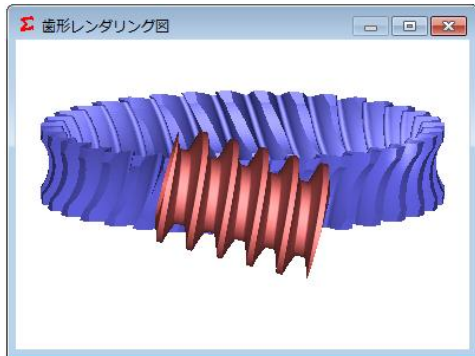


図 29.14 歯形レンダリング 1

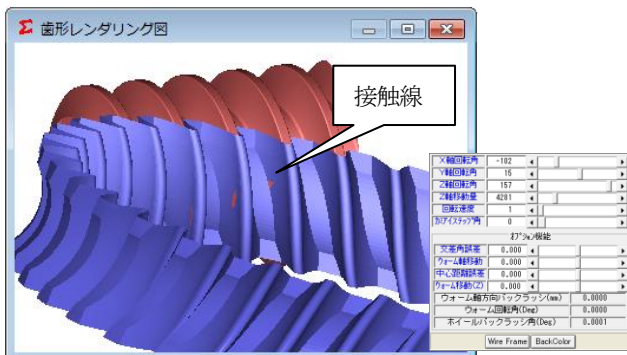
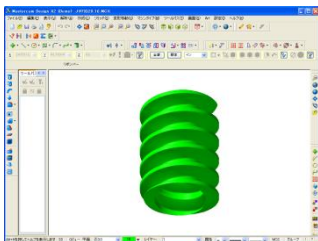
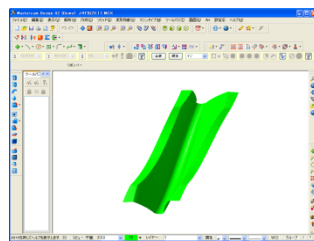


図 29.15 歯形レンダリング 2



ウォーム(3D-IGES)
図 29.16 CAD 作図例



ホイール(3D-IGES)
図 29.17 CAD 作図例

29.7 傾斜角度が-20度の設計例

軸交差角を-20度とした場合の諸元設定を図 29.18 に、工具諸元と寸法を図 29.18、図 29.20 にそして歯形レンダリングを図 29.21 に示します。ウォームねじれ方向と交差角を逆にすると接触線は同方向に比べ長くなっていることが解ります。

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
|-----------|---------------------|-----|----------|-----------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 1.00000 | |
| 軸/正面モジュール | mx/mt | mm | 1.02062 | 1.01101 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| 軸/正面圧力角 | α_x/α_t | deg | 20.37880 | 20.20246 |
| 条数, 歯数 | Zw, Z2 | --- | 3 | 36 |
| 基準円直径 | d, -- | mm | 15.0000 | 36.3963 |
| すすみ, ねじれ角 | γ, β | deg | 11.53696 | -8.46304 |
| 交差角 | Σ | deg | | -20.00000 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 転位係数 | --, X2 | --- | | 0.00000 |
| 凹R | Rm | mm | 15.0000 | |
| 歯厚基準 | --- | --- | 法線歯厚減少量 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 | 0.00000 |
| 横転位係数 | Xh | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| 理論ピッチ | dp' | mm | 1.71000 | 1.6987 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 2.0000 | 2.0000 |
| のどの直径 | --, dt | mm | | 38.3964 |
| 歯先円直径 | da | mm | 17.0000 | 38.9348 |
| 歯底円直径 | df | mm | 12.5000 | 33.8964 |
| 設計中心距離 | a | mm | | 25.6982 |
| 歯 幅 | b | mm | 16.7000 | 9.7000 |
| 歯先 R | Ra | mm | 0.3000 | |

図 29.18 歯車諸元 2

| 項目 | 記号 | 単位 | 数 値 |
|----------|------------|-----|-----------|
| 条 数 | ZwH | --- | 3 |
| 基準円直径 | dH | mm | 16.0000 |
| すすみ角 | γ H | deg | 10.80692 |
| 取り付け角 | β H | deg | -19.26996 |
| 取り付け中心距離 | aH | mm | 26.1982 |
| 刃先 R | raH | mm | 0.3000 |

図 29.19 工具諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
|-------------|----------------------|-----|---------|-----------|
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.0000 | 1.0001 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.2500 | 1.2500 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.2500 | 2.2500 |
| クリアランス | ck | mm | 0.2500 | 0.2500 |
| 基準円直径 | db | mm | | 34.1571 |
| リード | pz | mm | 8.6191 | -775.7791 |
| ピッチ | px | mm | 3.2064 | -21.5494 |
| 理論中心距離 | a | mm | | 25.6982 |
| 直径係数 | Q | --- | 14.6969 | |
| のど丸み半径 | rt | mm | | 7.0000 |
| 歯底幅 | Wn | mm | 0.2728 | |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 1.0000 | 1.0000 |
| 理論歯厚 | Sjo | mm | 1.5708 | 1.5708 |
| 設計歯厚 | SJ | mm | 1.5708 | 1.5708 |
| 三針寸法(ピン〜歯先) | dma | mm | 17.7893 | |
| 三針寸法(ピン〜ピン) | dm | mm | 18.5786 | |
| オグ〜寸法 | dmH | mm | | 38.8937 |
| 歯直角かみ合い率 | $\varepsilon \alpha$ | --- | | 2.7426 |

図 29.20 歯車寸法

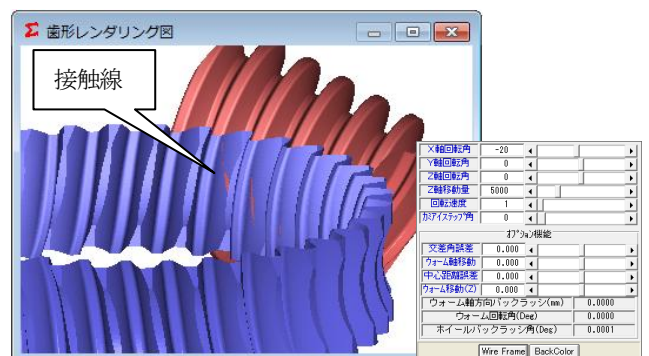


図 29.21 歯形レンダリング

[30] Tapered and crossed gear design system

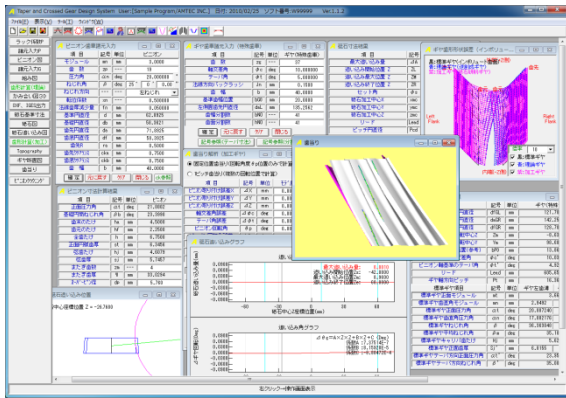


図 30.1 Tapered and crossed gear

30.1 概要

Tapered and crossed gear design system は、平行軸歯車の組み合わせではなく、軸交差角を持つインボリュート歯車を設計するソフトウェアです。ピニオンは修整を与えない歯車であり、これに軸角を持つ相手歯車の理論歯形の生成と、ねじ状砥石で研削することを前提として、砥石歯形の決定および砥石の運動を決め研削後の歯形を解析します。そして、ピニオン歯形と研削後の歯形またはギヤの理論歯形をかみ合わせることで、かみ合い接触線や歯当たりを確認することができます。図 30.1 に全体画面を示します。

30.2 歯車諸元入力

図 30.2 に、歯車諸元(ピニオン)の入力画面を、図 30.3 にピニオンの歯形を示します。諸元入力は、円筒歯車と同じです。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン |
|---------|----------------|-----|--------------|
| モジュール | m | mm | 3.0000 |
| 歯数 | z _p | --- | 19 |
| 圧力角 | α _n | deg | 20.000000 |
| ねじれ角 | β | deg | 25° 0' 0.00" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| 転位係数 | x _n | --- | 0.500000 |
| 法線歯厚減少量 | f _n | mm | 0.050000 |
| 基準円直径 | d | mm | 62.8925 |
| 基準円直径 | d _b | mm | 58.3821 |
| 歯先円直径 | d _a | mm | 71.8925 |
| 歯底円直径 | d _f | mm | 58.3925 |
| 歯先R | r _a | mm | 0.5000 |
| 歯先外円半径 | cka | mm | 0.7500 |
| 歯底外円半径 | ckb | mm | 0.7500 |
| 歯幅 | b | mm | 40.0000 |

図 30.2 歯車諸元入力

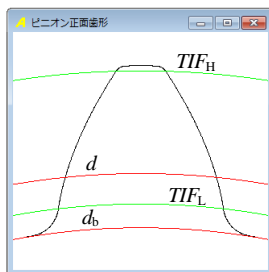


図 30.3 ピニオン歯形

30.3 ギヤ諸元の設定

図 30.4 に、ギヤ諸元の入力画面を示します。図 30.2 で与えたピニオンに、かみ合うギヤの諸元を設定します。ここで入力するバックラッシュは、一對歯車としてのバックラッシュです。図 30.3 で与えたピニオンの歯厚減少量を考慮してギヤの歯厚減少量を決定します。なお、入力諸元項目および基準歯幅位置は「記号参照」ボタンで確認することができます。

図 30.4 に、ギヤの歯形を決定する際に基準とする歯形分割数と歯幅分割数を示します。例題では歯形、歯幅ともに 41 分割とし

てピニオンとかみ合うギヤの理論歯形を計算します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ギヤ(特殊歯車) |
|-------------|-----------------|-----|-----------|
| 歯数 | z _g | --- | 37 |
| 軸交差角 | φ _c | deg | 10.000000 |
| テーパ角 | φ _t | deg | 5.000000 |
| 法線方向バックラッシュ | J _n | mm | 0.1500 |
| 歯幅 | b | mm | 40.0000 |
| 基準歯幅位置 | b _{G0} | mm | 20.0000 |
| 左側面歯先円直径 | d _{aL} | mm | 135.2582 |
| 歯幅分割数 | h _{N0} | --- | 41 |
| 歯面分割数 | h _{N0} | --- | 41 |

図 30.4 ギヤ歯車諸元入力

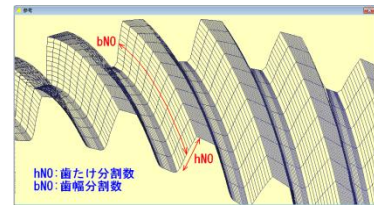
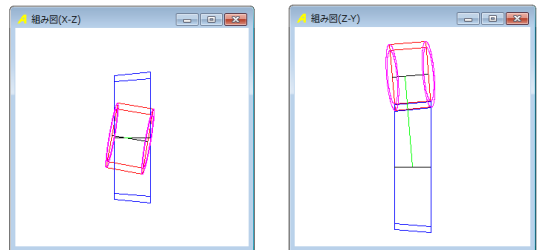


図 30.5 分割数

30.4 組み図

図 30.6 に歯車組図を示します。

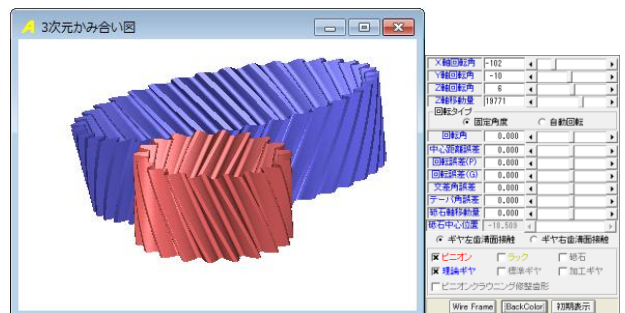


(a) X-Z 基準 (b) Z-Y 基準

図 30.6 組図

30.5 歯形レンダリング

図 30.7 に歯形レンダリング画面を示します。この画面のギヤの歯形は、理論歯形ですが、図 30.8 は研削後のギヤとピニオンのかみ合いです。図中に綺麗な接触線を確認することができます。表示画像は、コントロールフォームで回転角や観察位置を変更することができます。ねじ状砥石とギヤを研削している歯形レンダリング画面(図 30.9)では、ねじ状砥石とギヤの研削線を確認することができます。



ピニオンとギヤ(理論歯形)のかみ合い

図 30.7 歯形レンダリング 1

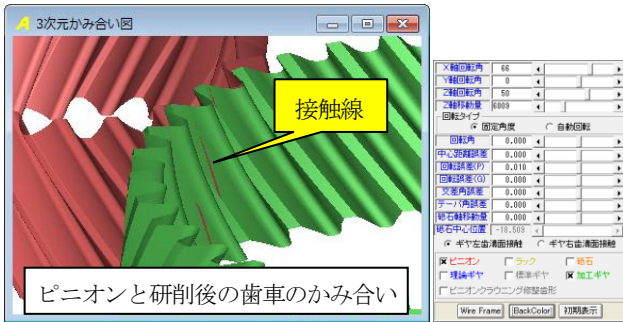


図 30.8 歯形レンダリング 2

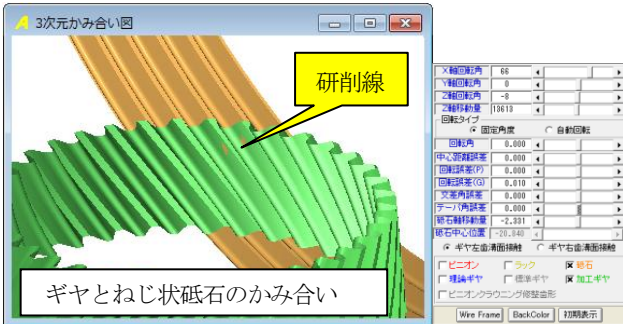


図 30.9 歯形レンダリング 3

30.6 砥石基準寸法入力

図 30.10 に、ねじ状砥石の設定画面を示します。ここでは、ねじ状砥石形状および加工基準を設定します。画面に示す「 Δ ギヤ回転」とは、ピニオン歯面とかみ合うギヤの歯面を研削する際、歯車（テーブル）に微小な回転調整を与える方法を採用することを意味します。また、砥石の追い込みは、歯車と砥石の軸間調整を行いギヤの歯面を仕上げます。

ピニオンにかみ合うギヤの理論歯形を、ねじ状砥石で研削するため図 30.10 の条件から砥石の歯形は図 30.11 に示す形状となり、砥石歯形は DXF ファイルで出力することができます。

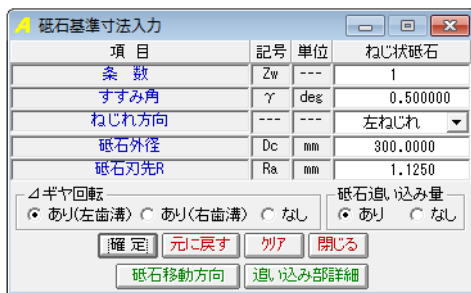


図 30.10 砥石設定

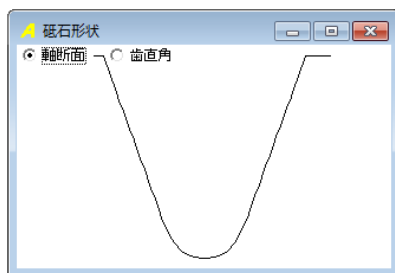


図 30.11 砥石歯形

30.7 砥石追い込み線図

図 30.12 に砥石の追い込み線図を示します。例題の場合、 Δ ギヤ回転（テーブル回転）と砥石と歯車の軸間調整を許可していますので両者の運動でギヤの歯面を仕上げます。また、図 30.12 の線図は、Z 方向位置（歯幅方向）が、-31.872mm のとき砥石追い込み量は、-0.0004mm でありテーブル規定の回転角に-0.0027(deg)を与え研削していることとなります。この線図と歯車および砥石の位置関係は、図 30.12 下方のスライドバーを移動することにより、図 30.13 のギヤと砥石の位置関係図で確認することができます。また、砥石の追い込み量とギヤの Δ 回転角は[CSV]ファイルに出力することができます。

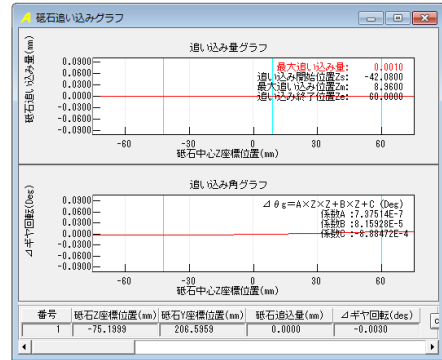


図 30.12 砥石追い込み線図

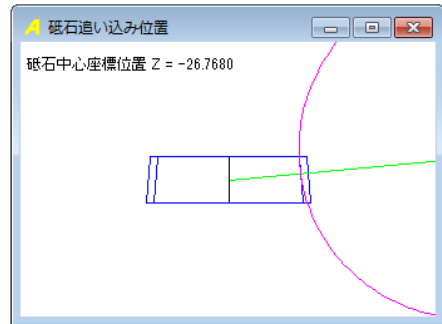


図 30.13 ギヤと砥石の位置関係

30.8 研削後の歯形

研削後の歯幅中央の歯形(No.21)を図 30.14 に示します。歯幅端部の歯形と、歯幅中央の歯形はわずかですが変化します。図 30.14 のピッチ円部を拡大すると理論歯形と加工後の歯形に 0.0044mm の差がありますが、理論歯形と研削後の歯形を重ねた図 30.15 に示すように両者の歯形は、ほぼ同じです。

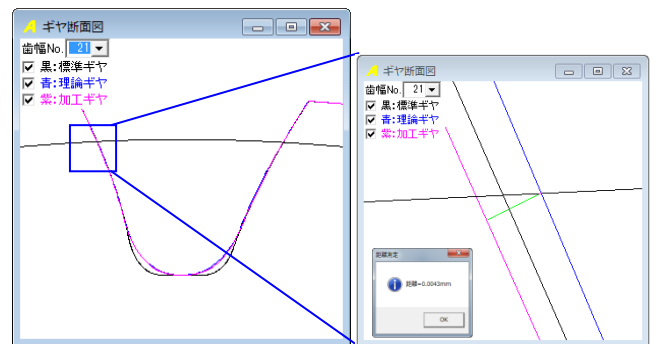


図 30.14 研削後の歯形と理論歯形(No.21)

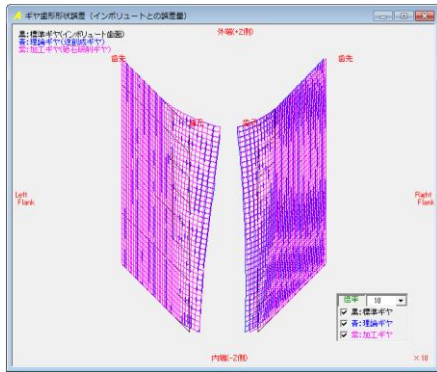


図 30.15 歯形(Topography)



図 30.18 歯当たり解析(接触数値)

30.9 歯当たり

歯当たり解析の設定画面を図 30.16 に、歯当たり解析結果を図 30.17 に示します。そして図 30.18 に接触距離を色分布表示した画面を示します。例題歯車の場合、この歯当たり解析結果から、平行軸はすば歯車のように両端部まで接触線を確認することができます。

以上のように、ねじ状砥石を図 30.12 の線図に従って研削すると、平行軸はすば歯車のように長い接触線を持つテーパギヤを設計（製造）することができます。また、ギヤの理論歯形を金型で製造する方法でも良好な歯当たりを持つ歯車が得られます。

30.10 歯形出力

歯形出力は、砥石歯形、理論歯形(ピニオン、ギヤ)そしてねじ状砥石で研削したギヤの歯形を DXF または IGES ファイルで出力することができます。図 30.19 に、ねじ状砥石で研削した歯形を 3D-IGES 出力し CAD で作図した例を示します。

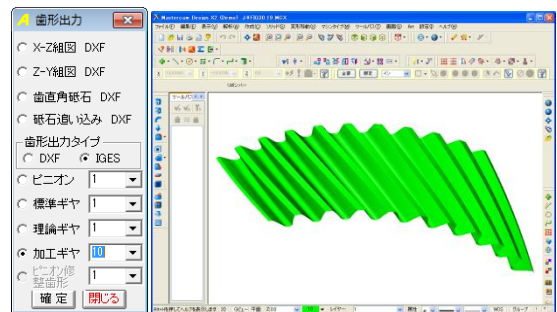


図 30.19 CAD 作図例(3D-IGES)

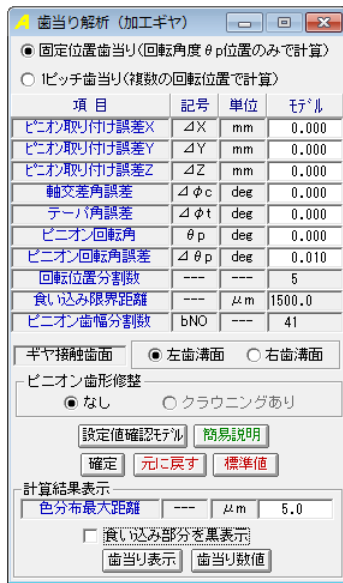
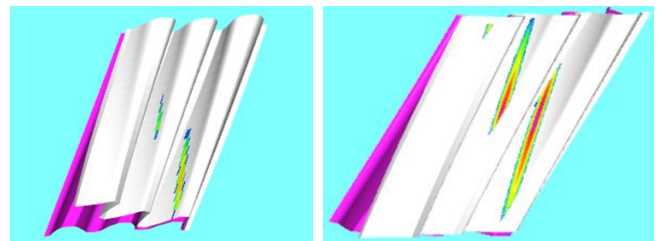


図 30.16 歯当たり解析(設定)

30.11 計算例

本ソフトウェアを用いて ASME DETC2003・PTG-48089 で発表された自動車用歯車（欧州メーカー）の歯当たりを検証すると図 30.20 のように B 社のほうが良好な歯当たりを有していることが解ります。



$m3, z1=27, z2=27, \alpha=20^\circ,$
 $\beta=28^\circ, \Sigma=8.0^\circ$

(a) A 社

(b) B 社

図 30.20 歯当たり確認

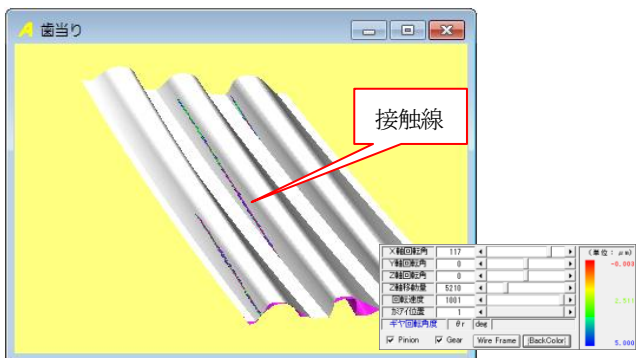


図 30.17 歯当たり解析(歯の接触)

[31]AGMA925-A03 (Scoring)

Effect of Lubrication on Gear Surface Distress

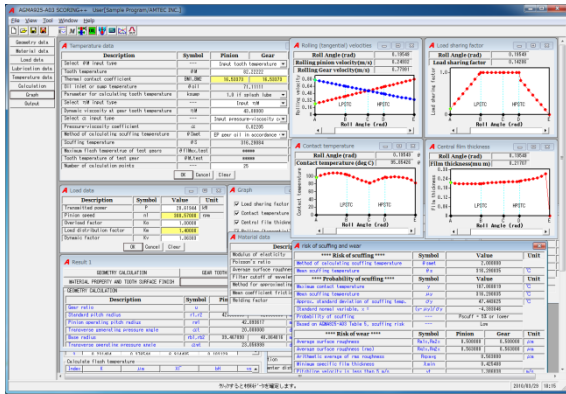


図 31.1 AGMA925-A03

31.1 概要

AGMA925-A03:2003:2003 の規格に基づいて歯車歯面損傷に対する潤滑効果を評価します。

(1)適用規格

AGMA925-A03 Effect of Lubrication on Gear Surface Distress

(2)歯車の種類

インボリュート平, はすば歯車 (外歯車, 内歯車)

31.2 歯車諸元入力

図 31.2 に歯車諸元入力の画面を示します。

歯車諸元入力は, AGMA925-A03 の [Annex A Flow chart for evaluating scuffing risk and oil film thickness] に基づいています。

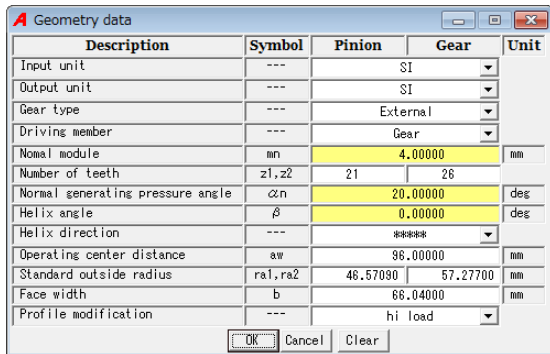


図 31.2 歯車諸元入力

31.3 材料データ設定

図 31.3 に材料データ設定画面を示します。

使用する材料, ヤング率, ポアソン比, 歯面粗さなどを設定します。

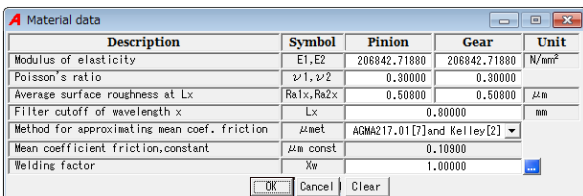


図 31.3 材料データ設定

31.4 荷重データ設定

図 31.4 に荷重データ設定画面を示します。

かみあいにおける伝達動力, 回転数及び係数を設定します。

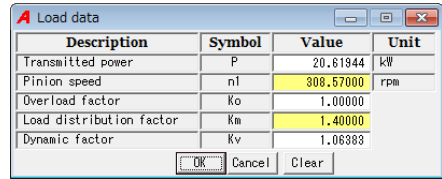


図 31.4 荷重データ設定

31.5 潤滑条件設定

図 31.5 に潤滑条件設定画面を示します。

歯車の潤滑条件として潤滑油の種類, ISO グレード番号を選択し設定します。

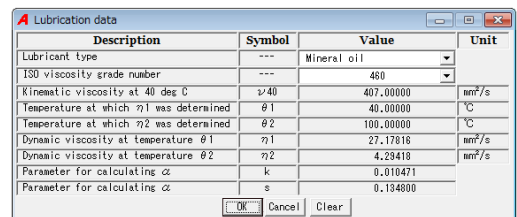


図 31.5 潤滑条件設定

31.6 温度条件設定

図 31.6 に温度条件設定画面を示します。

歯車の歯の温度, オイルの温度などの諸条件及び計算方式を設定します。

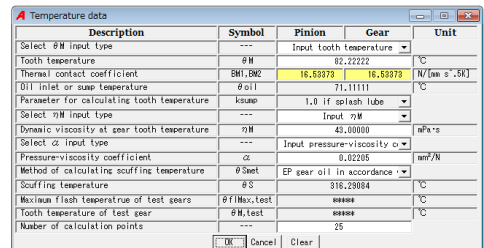


図 31.6 温度条件設定

31.7 計算結果 1(Geometry)

図 31.7 に Geometry 計算結果を示します。

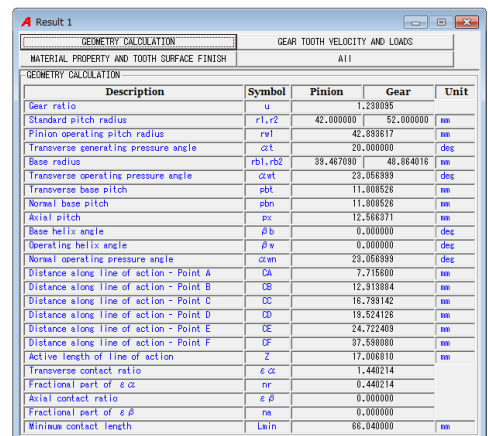


図 31.7 Geometry の計算結果

31.8 計算結果 1(Gear tooth velocity and loads)

図 31.8 に Gear tooth velocity and load 計算結果を示します。

| Description | Symbol | Pinion | Gear | Unit |
|-------------------------------|----------------------|--------------|------------|-------|
| Angular velocity | ω_1, ω_2 | 32.313375 | 26.059264 | rad/s |
| Operating pitch line velocity | v_t | | 1.386038 | m/s |
| Nominal tangential load | F_{tnom} | 14876.538066 | | N |
| Combined derating factor | K_D | | 1.489362 | |
| Actual tangential load | F_t | 22156.550486 | | N |
| Normal operating load | F_{mn} | 24980.176837 | | N |
| Normal unit load | w | | 354.530288 | N/mm |

図 31.8 Gear tooth velocity and load 計算結果

31.9 計算結果 1(Material property and tooth surface finish)

図 31.9 に Material property and tooth surface finish 計算結果を示します。

| Description | Symbol | Value | Unit |
|--|------------|---------------|-------------------|
| Reduced modulus of elasticity | E_r | 227293.630939 | N/mm ² |
| Average of pinion and gear average roughness | R_{avg} | 0.506000 | μm |
| Surface roughness constant | C_{Ravg} | 1.816720 | |
| Composite surface roughness at filter cutoff | σ_x | 0.718420 | μm |

図 31.9 Material property and tooth surface finish

31.10 計算結果 2

図 31.10 に計算結果 2 を示します。

各かみ合い点における Load sharing ratio, Flash temperature および Film thickness の数値を表で出力します。

| Index | ϕ (rad) | X_f | ρ_n (mm) | bH |
|-------|--------------|----------|---------------|----------|
| A | 0.195495 | 0.142857 | 8.132262 | 0.059822 |
| B | 0.327206 | 1.000000 | 8.478328 | 0.186102 |
| C | 0.425648 | 1.000000 | 8.239143 | 0.194840 |
| D | 0.494634 | 1.000000 | 8.385537 | 0.195806 |
| E | 0.626406 | 0.000000 | 8.466326 | 0.000000 |
| 1 | 0.195495 | 0.142857 | 8.132262 | 0.059822 |
| 2 | 0.213449 | 0.253701 | 8.536689 | 0.083275 |
| 3 | 0.921404 | 0.926444 | 8.414405 | 0.102194 |

| Index | K | μm | X_f | bH | vs |
|-------|----------|---------------|----------|----------|-----|
| A | 0.800000 | 0.103003 | 0.142857 | 0.059822 | 0.1 |
| B | 0.800000 | 0.103003 | 1.000000 | 0.186102 | 0.1 |

| Index | U | W | H_c | h_c (μm) |
|-------|--------------|----------|--------------|-------------------------|
| A | 1.507561e-11 | 0.000037 | 3.539779e-05 | 0.217080 |
| B | 1.184300e-11 | 0.000189 | 2.458782e-05 | 0.208464 |

図 31.10 計算結果 2

31.11 グラフ(Load sharing factor)

図 31.11 にグラフ(Load sharing factor)を示します。

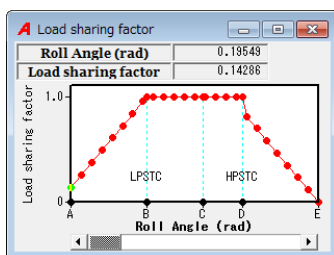


図 31.11 Load sharing factor

31.12 グラフ(Contact temperature)

図 31.12 にグラフ(Contact temperature)を示します。

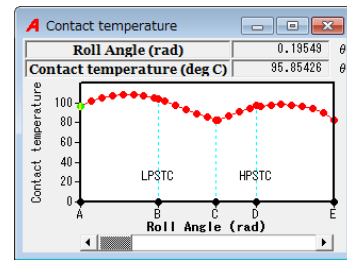


図 31.12 Contact temperature

31.13 グラフ(Central film thickness)

図 31.13 にグラフ(Central film thickness)を示します。

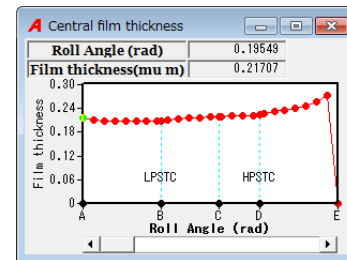


図 31.13 Central film thickness

31.14 グラフ(Rolling velocities)

図 31.14 にグラフ(Rolling velocities)を示します。

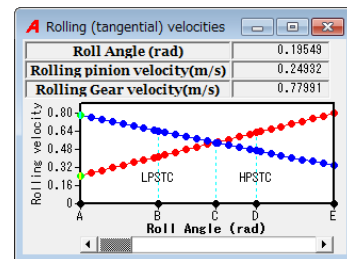


図 31.14 Rolling velocities

31.15 計算結果(Scuffing と摩耗の確率)

図 31.15 に Scuffing と摩耗の確率を示します。

| Symbol | Value | Unit |
|--|--------------------------|---------------------------------|
| Method of calculating scuffing temperature | θ_{smet} | 2.000000 |
| Mean scuffing temperature | θ_s | 316.230835 °C |
| Maximum contact temperature | y | 107.858819 °C |
| Mean scuffing temperature | μ_y | 316.230835 °C |
| Approx. standard deviation of scuffing temp. | σ_y | 47.448625 °C |
| Standard normal variable, x = | $(y - \mu_y) / \sigma_y$ | -4.393048 |
| Probability of scuffing | --- | $P_{scuff} = 5\%$ or lower |
| Based on AGMA325-A03 Table 6, scuffing risk | --- | Low |
| Average surface roughness | R_{a1x}, R_{a2x} | 0.508000 0.508000 μm |
| Average surface roughness (rms) | R_{q1x}, R_{q2x} | 0.563880 0.563880 μm |
| Arithmetic average of rms roughness | R_{avg} | 0.563880 |
| Minimum specific film thickness | λ_{min} | 0.425408 |
| Pitchline velocity is less than 5 m/s | v_t | 1.386038 m/s |
| Mean min. specific film thk. (eq. 110) | $\mu \lambda_{Min}$ | 0.215958 |
| Std. dev. of min. spec. film thk. (eq. 111) | $\sigma \lambda_{Min}$ | 0.112623 |
| Minimum specific film thickness | y | 0.425408 |
| Mean minimum specific film thickness | μ_y | 0.215958 |
| Standard deviation of the min. specific film | σ_y | 0.112623 |
| Standard normal variable, x = | $(y - \mu_y) / \sigma_y$ | 1.859753 |
| Probability of wear | --- | $P_{wear} = 5\%$ or lower |

図 31.15 Scuffing と摩耗の確率

※表示桁数は、規格に準じています。

[32]正弦歯形歯車設計システム

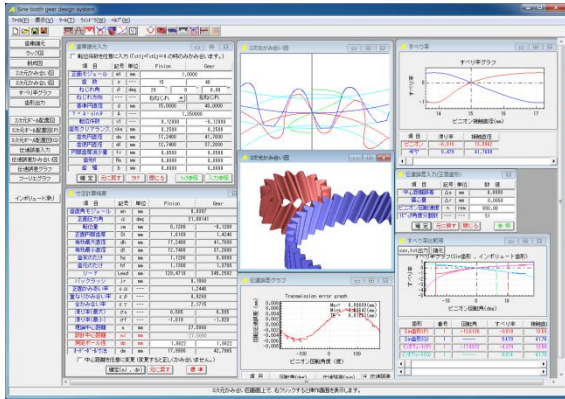


図 32.1 正弦歯形歯車設計システム

32.1 概要

古くからポンプギヤ用として提案されてきた正弦曲線で構成される歯形を基準ラックとする歯車（以下、正弦歯形歯車）は、インボリュート歯車に比べすべり率が小さいため動力損失が小さくなります。そのため、かみ合い時の摩擦発熱量が減少し、歯の温度上昇も押さえられると考えることができる。このことから、プラスチック歯車の温度上昇に伴うプラスチック材料の許容曲げ応力の低下も小さくなりプラスチック歯車の負荷容量も大きくなると期待できます。

また、正弦歯形歯車のかみ合いは、インボリュート歯車に比べ、かみ合い点における相対曲率が小さく、歯の幾何形状についても危険断面における歯厚が大きいことなどから歯面接触応力、歯元曲げ応力の低下をもたらす、負荷容量増加に有利に働くことも期待できます。以上の理由により用途によっては有効な歯形であると考えています。

32.2 歯車の種類と歯形

- (1) 歯車の種類 : 外歯車（平歯車およびはすば歯車）
- (2) 歯形 : 正弦曲線歯形

32.3 基準ラック

正弦歯形歯車の基準ラックを図 32.2 に示します。基準ラックの歯溝を切れ刃とするカウンタラック（ホブ等）が創成する歯形を歯数毎に求めることができ、このカウンタラックによって創成した正面歯形を基に成形研削も容易に可能です。

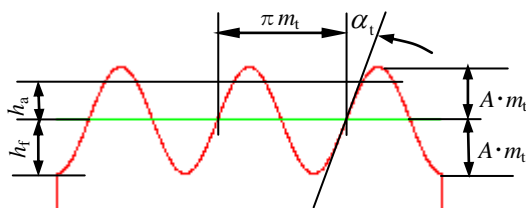


図 32.2 基準ラック（正面）

32.4 歯車諸元入力

図 32.3 に、歯車諸元の入力画面を示します。正弦歯形歯車の転位係数の和は常に 0 でなければなりません。



図 32.3 歯車諸元

32.5 歯車寸法

歯車寸法、かみ合い率、すべり率の計算結果を図 32.4 に示します。正弦歯形歯車のような非インボリュート歯車は、理論中心距離でのみ正しくかみ合いますが、本ソフトウェアでは故意に中心距離を変更することもできます。



図 32.4 歯車寸法

32.6 歯形

図 32.5 に正弦歯形歯車のかみ合いを示します。インボリュート歯車の場合、接触線は直線となりますが、正弦歯形歯車の接触線は S 字線となります。そのため、かみ合い始めの点 p からかみ合い終わりの点 q までが、かみ合い角度となります。従って、インボリュート歯車の場合、相手歯車の歯数が多くなるとかみ合い率は増加しますが、正弦歯形歯車のかみ合い率は、大きな増加はありません。図 32.6 の歯形レンダリングの歯面中央に接触線を確認することができます。また、図 32.7 および図 32.8 に CAD 作図例を示します。

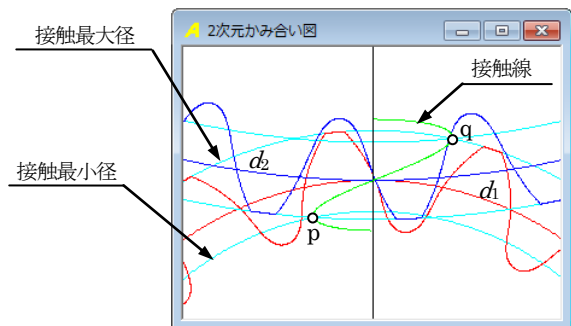


図 32.5 歯形

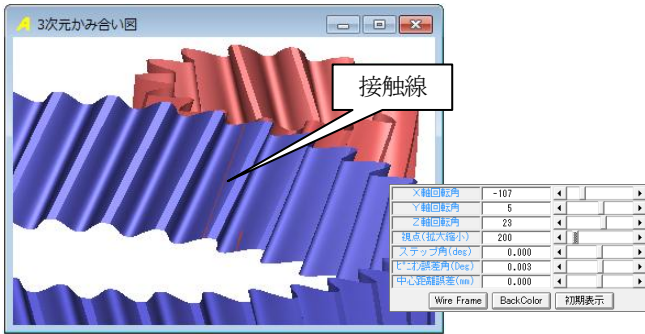


図 32.6 歯形レンダリング

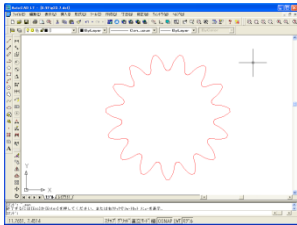


図 32.7 CAD 作図例(DXF)

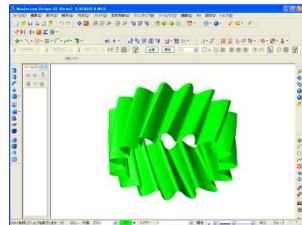


図 32.8 CAD 作図例(3D-IGES)

32.7 すべり率

図 32.9 に正弦歯形歯車のすべり率を、図 32.10 にインボリュート歯車のすべり率と正弦歯形歯車のすべり率を重ね合わせた図を示します。ただし、インボリュート歯車の諸元は正弦歯形歯車と同じとしています。

図 32.10 より、正弦歯形歯車(ピニオン)のすべり面積は、インボリュートに比べ 1/3.5 と小さく、正弦歯形歯車(ギヤ)のすべり面積は、1/1.90 と小さいことが解ります。

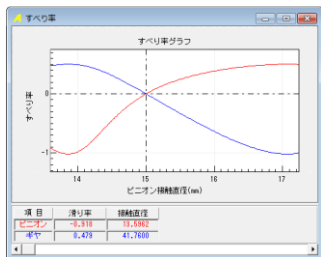


図 32.9 正弦歯形歯車のすべり率

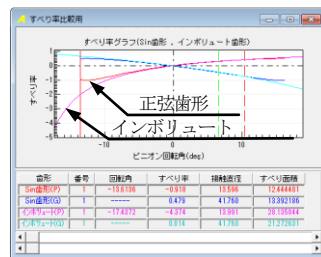


図 32.10 インボリュート歯車と正弦歯形歯車のすべり率

表 32.1 すべり面積

| | 最大すべり率 | すべり面積 |
|--------------|--------|-------|
| 正弦歯形歯車(P) | -0.918 | 12.4 |
| 正弦歯形歯車(G) | 0.479 | 13.4 |
| インボリュート歯車(P) | -10.1 | 43.4 |
| インボリュート歯車(G) | 0.910 | 25.7 |

32.8 かみ合い率の変化

インボリュート歯車(図 32.11)と正弦歯形歯車(図 32.12)のかみ合い率の変化を示します。ピニオンの歯数を 18 に固定してギヤの歯数を 18,25,30,50,100 と変化させたときのかみ合い率を図 32.13 および表 32.2 に示します。その結果、インボリュート歯車は、ギヤ歯数が増加するとともにかみ合い率も大きくなりますが、正弦歯形歯車は、ほとんど変化がありません。

図 32.11 インボリュート

図 32.12 正弦歯形歯車

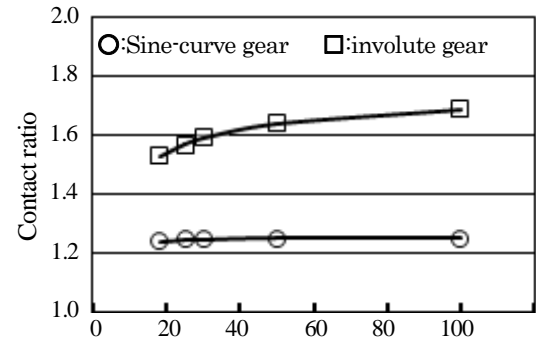


図 32.13 かみ合い率の変化

表 32.2 かみ合い率

| z_1 | z_2 | a | $\epsilon_{\alpha}(\text{Involute})$ | $\epsilon_{\alpha}(\text{Sine})$ |
|-------|-------|--------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 18 | 18 | 18.000 | 1.5298 | 1.2422 |
| 18 | 25 | 21.500 | 1.5707 | 1.2473 |
| 18 | 30 | 24.000 | 1.5916 | 1.2487 |
| 18 | 50 | 34.000 | 1.6422 | 1.2498 |
| 18 | 100 | 59.000 | 1.6911 | 1.2498 |

32.9 伝達誤差

伝達誤差解析結果を図 32.14 および図 32.15 に示します。

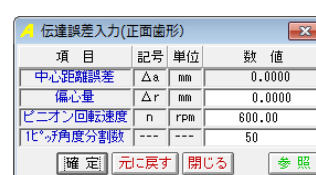


図 32.14 伝達誤差設定

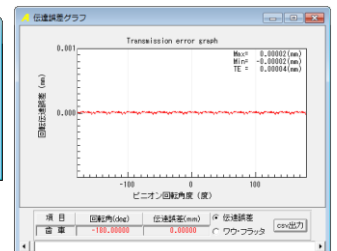


図 32.15 伝達誤差解析結果

32.10 さいごに

正弦曲線歯車の正面かみ合い率は、インボリュート歯車に比して小さいですが、すべり率がインボリュート歯車より小さいため発熱量の低下と効率向上が期待できます。

◆プラスチック歯車 ($m1, z48$) の実験例では同諸元のインボリュート歯車に比して効率が向上しています。詳細は、付録[E]をご覧ください。

[33] ピン&ラック設計システム

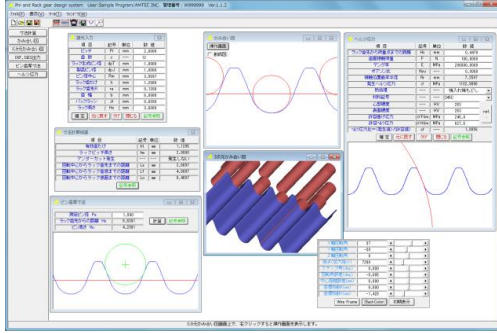


図 33.1 ピン&ラック設計システム

33.1 概要

ラック&ピニオンは、カタログ[19]のVGRラック、[26]のCGRラックがありますが、本ソフトウェアは、ピニオンをピン歯車としてかみ合うラックを生成することができます。

33.2 歯車諸元入力

図 33.2 に、歯車諸元の入力画面を示します。また、図 33.3 に寸法を示します。

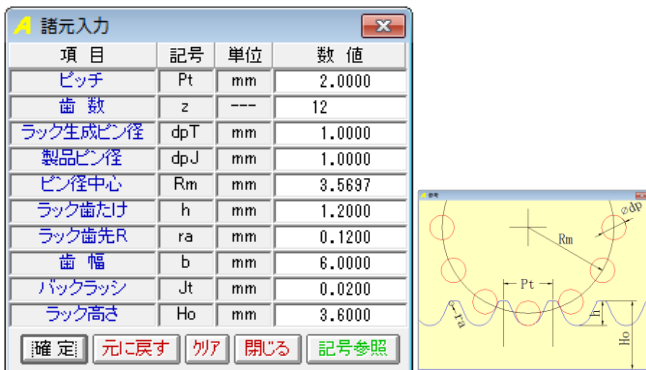


図 33.2 歯車諸元と記号



図 33.3 歯車寸法

33.3 歯形

図 33.2 でバックラッシを与えていますので図 33.4 では図中の右側のピンのみ接触しています。

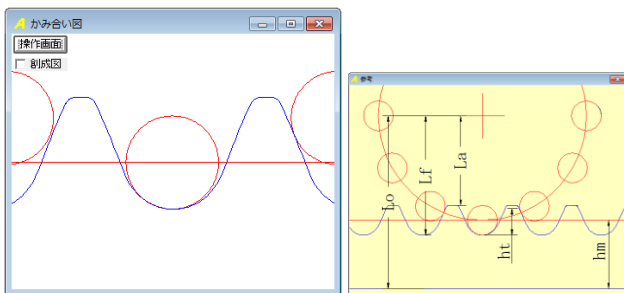


図 33.4 歯形

図 33.5 にラックのピン寸法を示します。図 33.2 に示す入力画面でラック歯形生成用ピン径と製品ピン径を同じとすることでバックラッシをゼロとするラックを得ることができます。

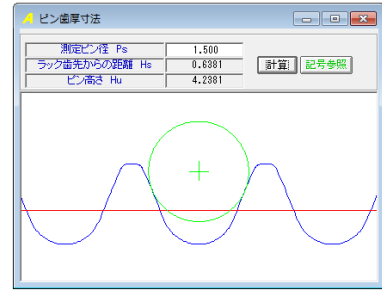


図 33.5 ピン寸法

33.4 強度計算

図 33.7 に強度結果を示します。

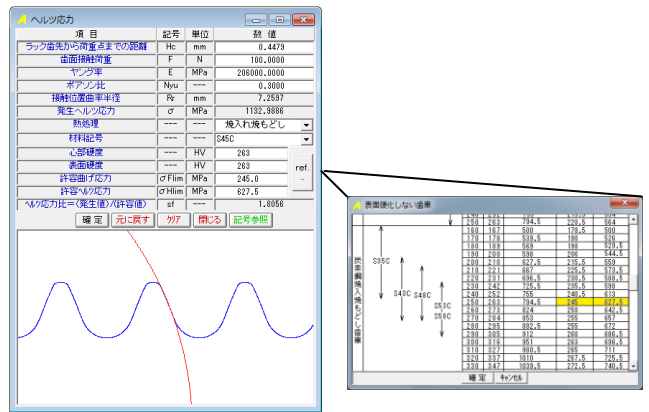


図 33.6 強度結果

33.5 CAD 作図例

図 33.7 にファイル出力設定を、図 33.8 に CAD 作図例を示します。



図 33.7 ファイル出力

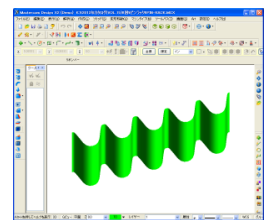


図 33.8 CAD 作図例

33.6 その他

ピン&ラックと同じくピニオンをピン歯車としたときの相手円筒歯車の歯形を生成するソフトウェアを図 33.9 および図 33.10 に示します (カタログ省略)。

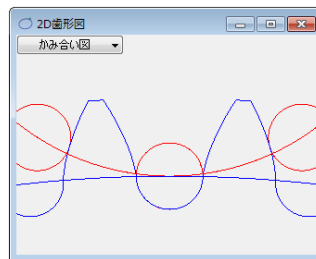


図 33.9 ピン歯車 2D

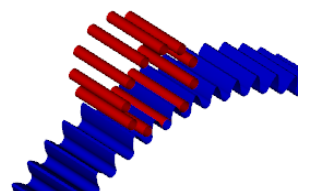


図 33.10 ピン歯車 3D

[34] Hypo-Trochoid gear design system

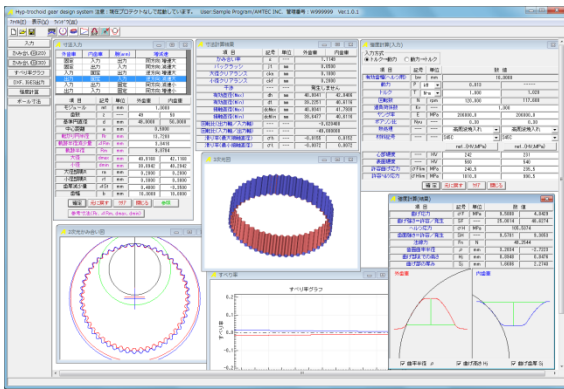


図34.1 Hypo-Trochoid gear design system

34.1 概要

Hypo-Trochoid gear design system は、トロコイド曲線歯車（外歯車×内歯車）を設計するソフトウェアです。かみ合い率はインボリュート歯形に比して数倍あり、歯形設計、歯のかみ合いを計算することができます。この歯車の歯形はトロコイド曲線であるため、すべり率はインボリュート歯形に比べて小さく、且つ、ほぼ一定であるため動力損失の低減に有効です。また、本例（図 34.3）のようにピニオンを自公転させてかみ合う歯車とすれば、1 対の歯車で高減速比（本例 $i=1/49$ ）とすることができます。

34.2 設計・歯形

内転トロコイド歯形を図 34.2 の考え方で生成します。ピッチ円半径 (R_p) に接しながら滑りなく転がり円半径 (R_r) を回転させ、運動する軌跡半径 (R_m) 上の 1 点が描く軌跡を歯形座標としています。なお、 $R_m=R_r$ とすると、内転サイクロイド曲線です。

歯数差を小さく (1~2 歯差) してピニオン (外歯車) の自公転を利用して速比を大きくすることができます。しかし、かみ合い率を 1 以上とする設計とするための数値を直接入力することは非常に困難であるため、本ソフトウェアではモジュールと歯数の入力後、かみ合い率を基準にして設計基準値を表示する機能を有しています。

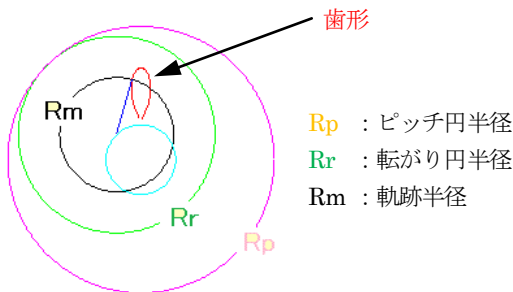


図 34.2 内転トロコイド歯形

34.3 寸法設定

本例では、ピニオンを自公転させてかみ合う歯形の生成例を示します。図 34.3 上部の青抜き枠の組み合わせ（外歯車；出力、内歯車；固定、腕；入力）として、モジュール 1、外歯車歯数 ($z_1=50$)、内歯車歯数 ($z_2=51$) としたとき、かみ合い率を満足させ、且つ、

内転トロコイド歯形の転がり円半径 (R_r) や軌跡半径 (R_m) を設定する場合、図 34.3 でモジュール、歯数入力後、

【参考寸法 (R_r , ΔR_m , d_{max} , d_{min})】

により設計基準値を決定することができます。図 34.4 は、最小かみ合い率を 3.0 としたときの組み合わせであり、この中から 11 番目の寸法を選択すると図 34.3 の紫色の項目は、図 34.5 に示す値となります。



図 34.3 寸法設定



図 34.4 寸法一覧



図 34.5 寸法設定

図 34.5 の大径部丸み半径 (r_a) や小径部の丸み半径 (r_f) そして歯厚減少量 (ΔSt) を与えることにより歯形や各部寸法が決まります。その結果を図 34.6 に示しますが、歯先 R を与えることにより、かみ合い率は $\epsilon=2.425$ に低下します。また、外歯車の歯厚を小さ

く (0.20mm) し、内歯車の歯厚を大きく (0.18mm) してバックラッシュ $j=0.02\text{mm}$ を与えています。回転比 (本例の場合 1/50) やクリアランス、干渉発生の有無を表示します。

| 寸法計算結果 | | | | |
|--------------|---------------|-----|------------|---------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 外歯車 | 内歯車 |
| かみ合い率 | ε | --- | | 2.4246 |
| バックラッシュ | jt | mm | | 0.0200 |
| 大径クリアランス | cka | mm | | 0.1000 |
| 小径クリアランス | ckf | mm | | 0.2000 |
| 干渉 | --- | --- | 発生しません | |
| 有効直径(Max) | dh | mm | 34.0433 | 35.2191 |
| 有効直径(Min) | dt | mm | 32.5267 | 33.7301 |
| 接触直径(Max) | dcMax | mm | 34.0433 | 34.9902 |
| 接触直径(Min) | dcMin | mm | 32.9116 | 33.7301 |
| 回転比(出力軸/入力軸) | --- | --- | -0.020000 | |
| 回転比(入力軸/出力軸) | --- | --- | -50.000000 | |
| 滑り率(最大接触直径) | σ_h | --- | -0.0635 | 0.0650 |
| 滑り率(最小接触直径) | σ_t | --- | -0.0192 | 0.0188 |

図 34.6 寸法計算結果

図 34.11 および図 34.12 に歯形レンダリングを示します。この図では図 34.3 で設定した歯車の組み合わせに応じて歯車が回転します。また、図 34.12 に示すように接触線を観察することができます。

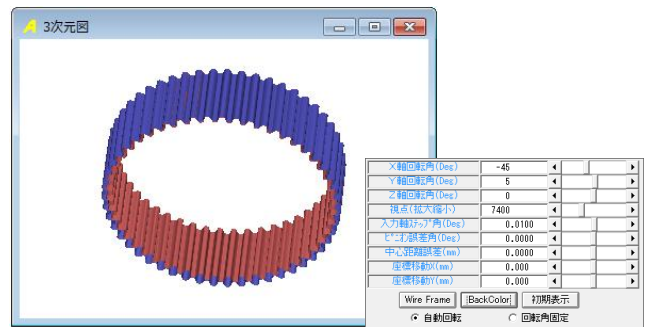


図 34.11 歯形レンダリング 1

34.4 歯形図

図 34.5 で設定した歯車諸元に基づき内転トロコイド歯形を生成し図 34.7 のように作図します。図 34.8 は、図 34.7 のかみ合い部 A の拡大図 (図中○の3歯が同時接触) であり、図 34.9 は同じく B の拡大図です。かみ合い図(2D)では、図 34.10 のように距離計測 (歯先間距離が 0.096mm) をすることができます。

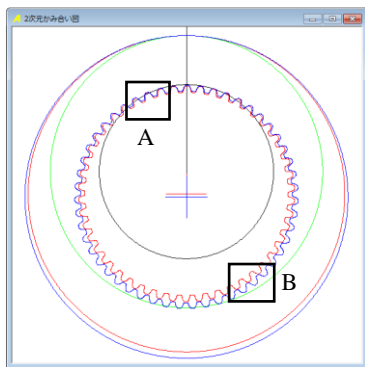


図 34.7 かみ合い (2D)

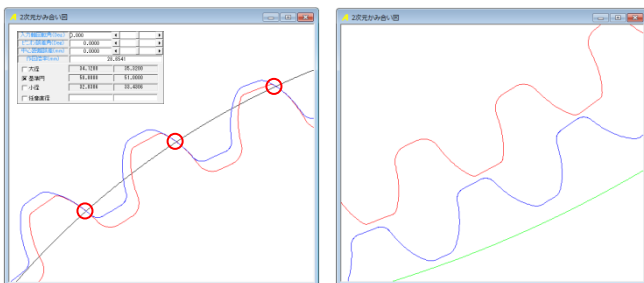


図 34.8 かみ合い(A)

図 34.9 かみ合い(B)

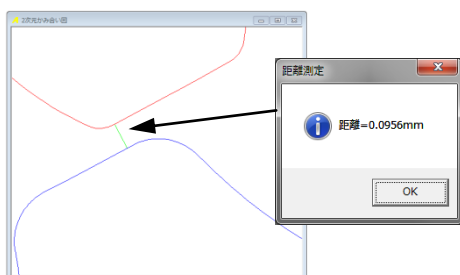


図 34.10 かみ合い (距離計測)

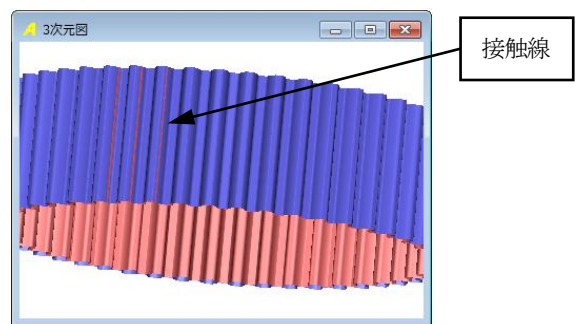


図 34.12 歯形レンダリング 2

34.5 オーバーボール寸法

生成した歯形の管理のためオーバーボール (ビットイン) 寸法を図 34.13 および図 34.14 のように計算することができます。

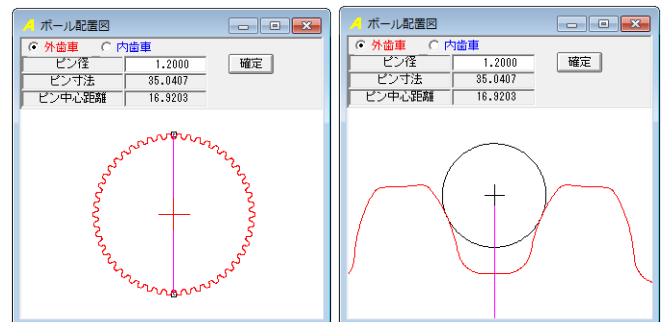


図 34.13 オーバーボール寸法 (外歯車)

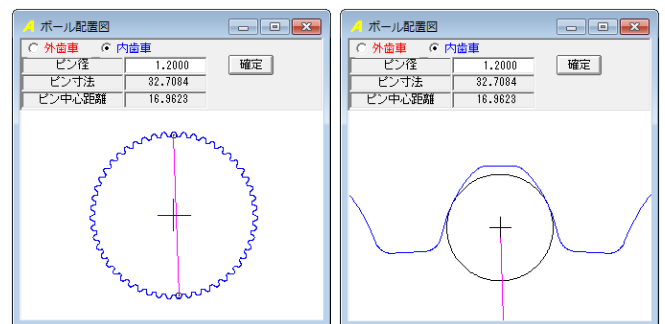


図 34.14 ボール寸法 (内歯車)

34.6 すべり率

本例の内転トロコイド歯形のすべり率は、図 34.6 の寸法計算

結果に示すように最大接触直径では $\sigma_h=0.0695$ であり、最小接触直径では $\sigma_c=0.0192$ で、歯形位置 (直径) におけるすべり率の変化は、図 34.15 で知ることができます。この図から本例の内転トロコイド歯形のすべり率は、ほぼ一定であることが解ります。

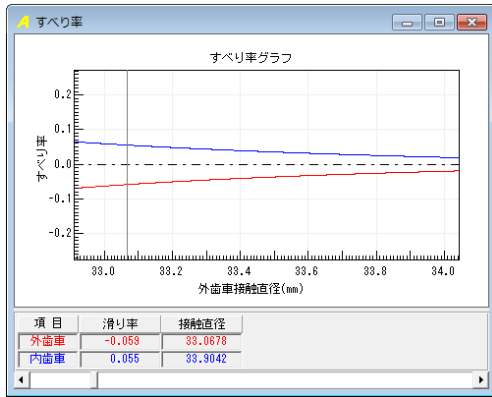


図 34.15 すべり率

34.7 強度計算

強度計算は、図 34.16 に示す強度設定画面でトルク、回転速度、過負荷係数等を入力します。材料の許容応力は、直接入力するか、または、図 34.16 の材料選択表を用いて設定することができます。



図 34.15 強度設定

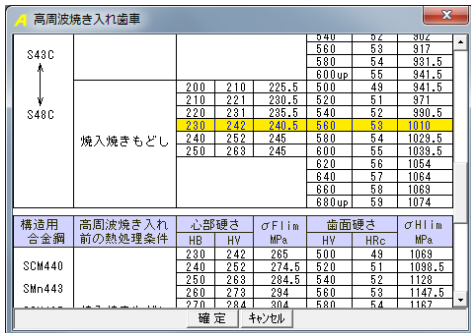


図 34.16 材料選択

歯の曲げ強さは、歯たけ中央位置における歯形の曲率半径を基本とします。また、最弱断面歯厚は 30 度接線法 (内歯は 60 度接線法) により決定し、歯先に荷重が作用するものとして歯元が発生する応力を計算します。さらに、曲率半径、曲げ高さそして最弱断面歯厚は、図 34.17 の歯形図で確認することができます。

歯面強さも曲げ強さと同様に歯たけの中央位置における歯形の曲率半径を基本とし、発生ヘルツ応力を計算します。曲げ強さおよび歯面強さは、材料の許容応力と発生する応力の比としていま

す。図 34.17 に強度計算結果例を示します。

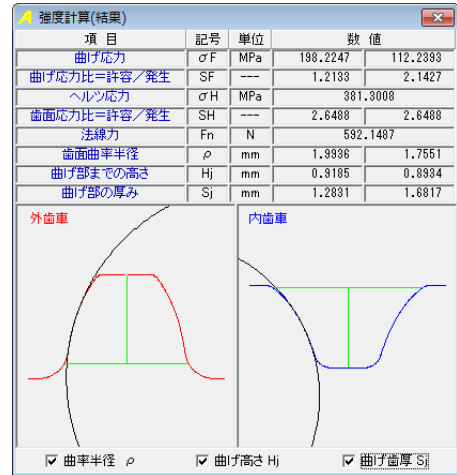


図 34.17 強度計算結果

34.8 歯形出力

生成した歯形は、図 34.18 の歯形出力機能により CAD ファイルとして出力することができます。作図例を図 34.19~34.20 に示します。

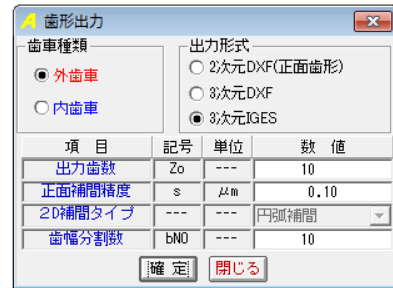
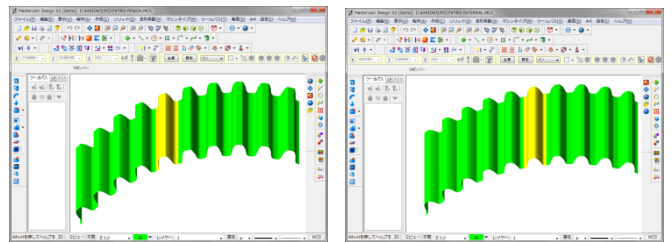
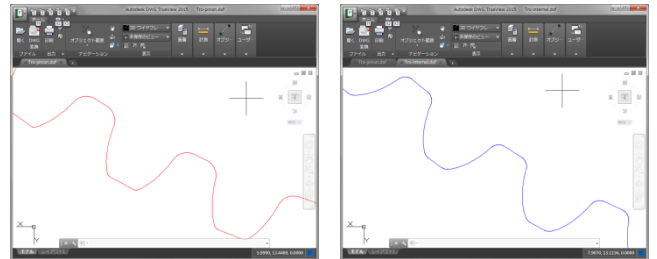


図 34.18 歯形出力



(a) 外歯車 (b) 内歯車

図 34.19 CAD 作図例(3D)



(a) 外歯車 (b) 内歯車

図 34.20 CAD 作図例(2D)

[35] K-H-V Differential gear design system

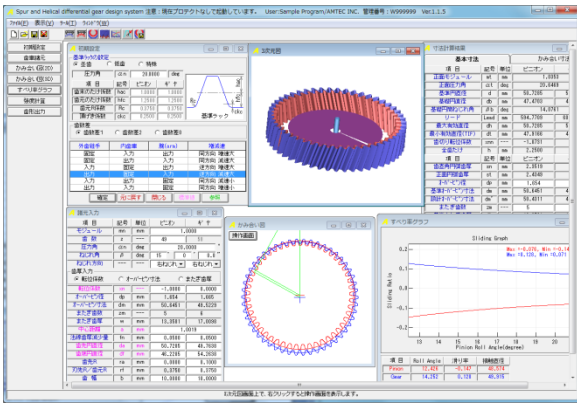


図35.1 K-H-V Differential gear design system

35.1 概要

K-H-V Differential gear design system は、インボリュート歯車の差動減速（増速）機構設計（歯数差 0, 1, 2 の 3 種類）ソフトウェアであり、歯形設計、歯のかみ合い、すべり率、強度計算をすることができます。歯数差が小さい場合、転位係数 0 の標準歯車で設計するとインボリュート干渉等が発生しますが、本ソフトウェアでは、かみ合い率が 1 以上で且つ、干渉が発生しない転位係数の組み合わせの歯車を計算することができます。なお、トロコイド曲線を有する差動歯車ソフトウェアは、カタログ[34]をご覧ください。

35.2 初期設定

図 35.2 に示すように、基準ラックの設定と歯数差（1 歯差、2 歯差、0 歯差）を選択し、次に、組み合わせ（腕の固定/入力/出力）を選択します（図 35.2）。歯数差が 0 の場合は、腕（arm）を固定として歯形を作図します。



図 35.2 初期設定

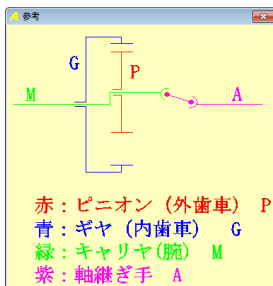


図 35.3 K-H-V 型減速機構

35.3 寸法設定

図 35.4 の m_n , z , α_n , β 入力後、転位係数 (x_n) の与え方は無数に存在しますので「参考値」補助機能を使用して、かみ合い率 1 以上で且つ、インボリュート干渉が発生しない組み合わせを図 35.5 に示します（図中の○印）。本例の場合、55 個を表示しますが、この中から No.27 の転位係数 ($x_n = -0.6$, 図中の●丸) を選択すると、図 35.7 ように諸元が決まります。

また、転位係数とかみ合い率そして歯車寸法は、図 35.6 の表からも選択することができます。



図 35.4 諸元設定 1



図 35.5 補助機能（転位係数とかみ合い率）

| 歯差 | 転位係数 | かみ合い率 | 中心距離 | 歯先円直径 | 歯根円直径 | 歯先円直径 | 歯根円直径 | 歯先円直径 | 歯根円直径 | 正面かみ合い率 |
|----|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 19 | -0.8000 | 0.3000 | 1.4020 | 51.1295 | 46.8295 | 50.2635 | 54.0635 | 54.0635 | 1.1577 | |
| 20 | -0.8000 | 0.4000 | 1.4016 | 51.1295 | 46.8295 | 50.5635 | 54.0635 | 54.0635 | 1.0551 | |
| 21 | -0.7000 | 0.1000 | 0.9202 | 51.8285 | 46.8285 | 49.9635 | 54.4635 | 54.4635 | 1.4520 | |
| 22 | -0.7000 | 0.2000 | 0.9614 | 51.8285 | 46.8285 | 50.1635 | 54.6635 | 54.6635 | 1.3379 | |
| 23 | -0.7000 | 0.3000 | 1.0019 | 51.8285 | 46.8285 | 50.3635 | 54.8635 | 54.8635 | 1.2081 | |
| 24 | -0.7000 | 0.4000 | 1.0420 | 51.8285 | 46.8285 | 50.5635 | 55.0635 | 55.0635 | 1.1270 | |
| 25 | -0.7000 | 0.5000 | 1.0816 | 51.8285 | 46.8285 | 50.7635 | 55.2635 | 55.2635 | 1.0304 | |
| 26 | -0.6000 | 0.2000 | 0.9202 | 51.8285 | 47.0285 | 50.1635 | 54.8635 | 54.8635 | 1.4076 | |
| 27 | -0.6000 | 0.3000 | 0.9614 | 51.8285 | 47.0285 | 50.3635 | 54.8635 | 54.8635 | 1.3002 | |
| 28 | -0.6000 | 0.4000 | 1.0019 | 51.8285 | 47.0285 | 50.5635 | 55.0635 | 55.0635 | 1.1784 | |
| 29 | -0.6000 | 0.5000 | 1.0420 | 51.8285 | 47.0285 | 50.7635 | 55.2635 | 55.2635 | 1.1012 | |
| 30 | -0.6000 | 0.6000 | 1.0816 | 51.8285 | 47.0285 | 50.9635 | 55.4635 | 55.4635 | 1.0081 | |
| 31 | -0.5000 | 0.3000 | 0.9202 | 51.7285 | 47.2285 | 50.3635 | 54.8635 | 54.8635 | 1.2680 | |
| 32 | -0.5000 | 0.4000 | 0.9614 | 51.7285 | 47.2285 | 50.5635 | 55.0635 | 55.0635 | 1.2696 | |
| 33 | -0.5000 | 0.5000 | 1.0019 | 51.7285 | 47.2285 | 50.7635 | 55.2635 | 55.2635 | 1.1680 | |
| 34 | -0.5000 | 0.6000 | 1.0420 | 51.7285 | 47.2285 | 50.9635 | 55.4635 | 55.4635 | 1.0770 | |
| 35 | -0.4000 | 0.4000 | 0.9202 | 51.8285 | 47.4285 | 50.5635 | 55.0635 | 55.0635 | 1.3327 | |
| 36 | -0.4000 | 0.5000 | 0.9614 | 51.8285 | 47.4285 | 50.7635 | 55.2635 | 55.2635 | 1.2383 | |
| 37 | -0.4000 | 0.6000 | 1.0019 | 51.8285 | 47.4285 | 50.9635 | 55.4635 | 55.4635 | 1.1420 | |

図 35.6 補助機能（No.27 の x_n と ϵ ）

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---|------------|-----|---------|---------|
| モジュール | mn | mm | 1.0000 | |
| 歯数 | z | --- | 49 | 50 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 15 | 0 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 歯厚入力 | | | | |
| <input checked="" type="radio"/> 転位係数 <input type="radio"/> オーバーク寸法 <input type="radio"/> またぎ歯厚 | | | | |
| 転位係数 | xn | --- | -0.6000 | 0.2000 |
| オーバーク径 | dp | mm | 1.654 | 1.674 |
| オーバーク寸法 | dm | mm | 51.6395 | 49.9088 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 5 | 7 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 13.6318 | 20.0987 |
| 中心距離 | a | mm | 0.9202 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.1000 | 0.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 51.5285 | 50.1638 |
| 歯底円直径 | df | mm | 47.0285 | 54.6638 |
| 歯先R | ra | mm | 0.0500 | 0.0500 |
| 刃先R/歯元R | rf | mm | 0.3750 | 0.3750 |
| 歯幅 | b | mm | 10.0000 | 10.0000 |

図 35.7 諸現設定 2

図 35.7 の諸元を [確定] すると図 35.8 および図 35.9 のようになります。本例の場合、トリミングが発生していますが、かみ合いには影響がないためそのまま計算を進めます。

| 基本寸法 | | | かみ合い寸法 | |
|-------------|------------|-----|----------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
| 正面モジュール | mt | mm | 1.0353 | |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 20.6469 | |
| 基準円直径 | d | mm | 50.7285 | 51.7638 |
| 基礎円直径 | db | mm | 47.4703 | 48.4391 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 14.0761 | |
| リード | Lead | mm | 594.7709 | 606.9091 |
| 最大有効直径 | dh | mm | 51.4671 | 54.2473 |
| 最小有効直径(TIF) | dt | mm | 48.2779 | 50.2372 |
| 歯切り転位係数 | xnn | --- | -0.7462 | 0.2000 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.2500 | 2.2500 |
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
| 歯直円弧歯厚 | sn | mm | 2.1140 | 1.7164 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 2.1886 | 1.7769 |
| オーバーク径 | dp | mm | 1.654 | 1.674 |
| 基準オーバーク寸法 | dm | mm | 51.6395 | 49.9088 |
| 設計オーバーク寸法 | dm' | mm | 51.3014 | 49.9088 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 5 | 7 |
| 基準またぎ歯厚 | W | mm | 13.6318 | 20.0987 |
| 設計またぎ歯厚 | W' | mm | 13.5318 | 20.0987 |

図 35.8 寸法

| 基本寸法 | | | かみ合い寸法 | | |
|---------------|-------------------|-----|-----------|---------|--------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン(出力) | ギヤ(固定) | 腕(入力) |
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 58.2376 | | |
| かみ合いねじれ角 | β_w | deg | 25.4693 | | |
| かみ合いベテリ円直径 | dw | mm | 90.1796 | 92.0200 | |
| 有効歯幅 | bw | mm | 10.0000 | | |
| クリアランス(大径) | ckh | mm | 0.6475 | | |
| クリアランス(小径) | ckt | mm | 0.6475 | | |
| 最大接触直径 | dja | mm | 51.4671 | 52.3760 | |
| 最小接触直径 | djt | mm | 48.3042 | 50.2372 | |
| 正面かみ合い率 | ϵ_α | --- | 1.3956 | | |
| 重なりかみ合い率 | ϵ_β | --- | 0.8238 | | |
| 全かみ合い率 | ϵ_γ | --- | 2.1594 | | |
| 滑り率(大径側) | σ_a | --- | -0.0571 | 0.0540 | |
| 滑り率(小径側) | σ_f | --- | -0.1104 | 0.0995 | |
| 正面法線方向バックラッシュ | jnt | mm | 0.1031 | | |
| バックラッシュ角 | j_θ | deg | 0.2490 | 0.2440 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン(出力) | ギヤ(固定) | 腕(入力) |
| 回転比 | Whi | --- | -0.0204 | 0.0000 | 1.0000 |
| 逆回転比(-1/Whi) | Uhi | --- | -49.0000 | 0.0000 | 1.0000 |
| トリミング | --- | --- | 発生する(注意) | | |
| インベリュート干渉 | --- | --- | 発生しない(安全) | | |
| トロコイド干渉 | --- | --- | 発生しない(安全) | | |
| フィレット部干渉 | --- | --- | 発生しない(安全) | | |

図 35.9 かみ合い寸法

35.4 歯形

歯車諸元(図 35.7) の歯形を図 35.10 のように作図することができます。図 34.11 は、かみ合い部 (A), (B) の拡大図です。また、図 35.12 のように距離計測も可能です。歯形レンダリング(図 35.13) は、歯車の組み合わせに応じて歯車が回転します。

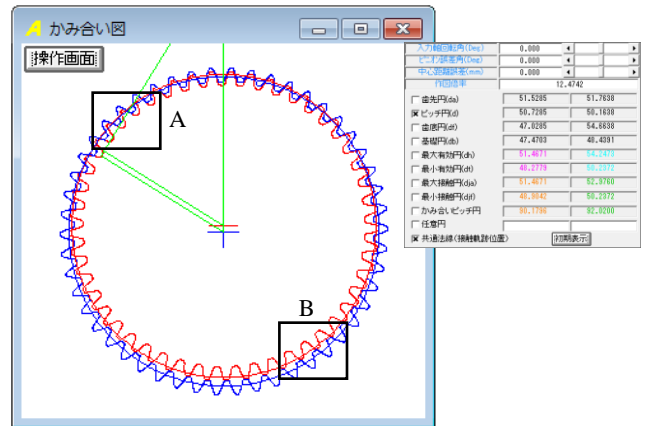


図 35.10 かみ合い図

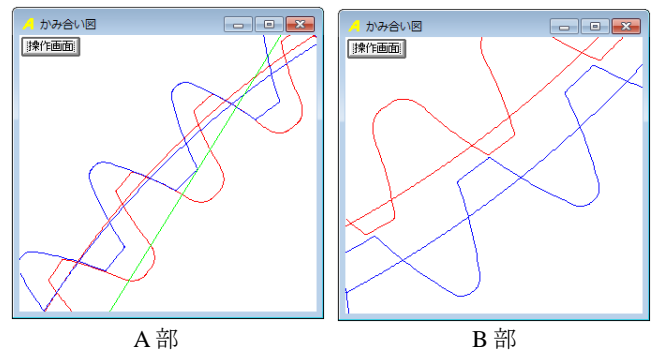


図 35.11 かみ合い図 (拡大)

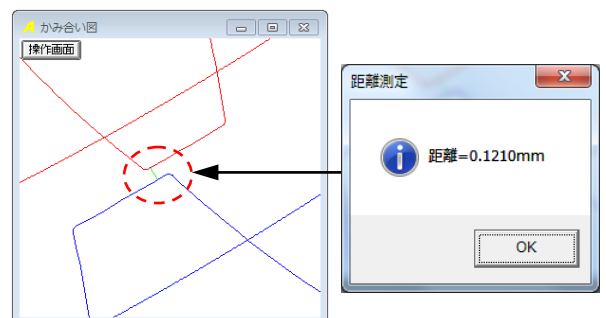


図 35.12 かみ合い図 (距離計測)

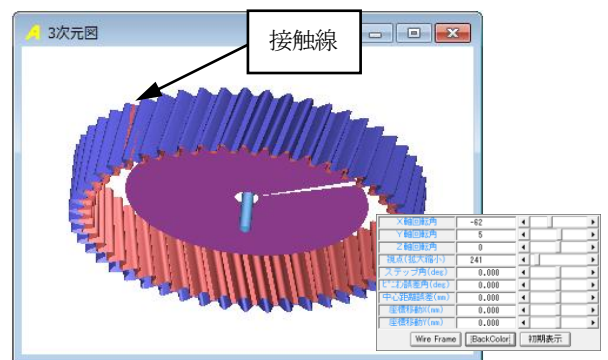


図 35.13 歯形レンダリング

35.5 すべり率

本例のすべり率は、図 35.9 の寸法計算結果に示していますが、歯形位置 (Roll angle) におけるすべり率の変化を図 35.14 で知ることができます。

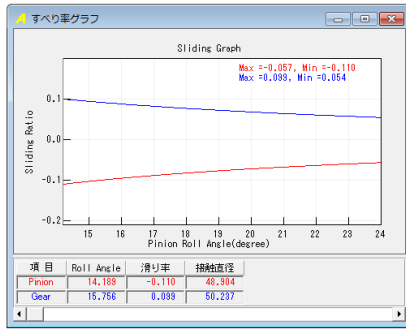


図 35.14 すべり率

35.6 強度計算

強度計算は、図 35.15 に示す強度設定画面で摩擦係数、トルク、回転速度を入力します。本例の場合、摩擦係数を 0.08、腕の入力トルクが 1(Nm)、回転速度が 1000min⁻¹ とすると [確定] ボタンによりピニオンとギヤのトルク、回転速度を計算し表示します。そして、図 35.16 の強度諸元 (材料、係数) 画面を表示します。材料選択は、図 35.17 の表から選択することもできますが、 σ_{Flim} 、 σ_{Hlim} を直接入力することもできます。図 35.18 に強度結果を示します。



図 35.15 強度計算 (動力設定)



図 35.16 強度計算 (強度諸元)

| 構造用合金鋼 | 心部硬度 | | σ_{Flim} MPa | 有効浸炭深さ | 歯面硬度 | | σ_{Hlim} MPa |
|--------|------|-----|------------------------|--------|------|--------|------------------------|
| | HB | HV | | | HV | HRc | |
| SCM415 | 220 | 231 | 333.5 | 比較的浅い | 580 | 54 | 1284.5 |
| | 230 | 242 | 353 | | 600 | 55 | 1314 |
| | 240 | 252 | 372.5 | | 620 | 56 | 1343.5 |
| | 250 | 263 | 392.5 | | 640 | 57 | 1353.5 |
| | 260 | 273 | 402 | | 660 | 58 | 1353.5 |
| | 270 | 284 | 417 | | 680 | 59 | 1353.5 |
| SCM420 | 290 | 305 | 441.5 | 720 | 61 | 1343.5 | |
| | 300 | 316 | 451 | 740 | 62 | 1333.5 | |
| | 310 | 327 | 461 | 760 | 63 | 1314 | |
| SNC420 | 320 | 337 | 470.5 | 780 | 63 | 1294.5 | |
| | 330 | 347 | 480.5 | 800 | 64 | 1275 | |
| | 340 | 358 | 490.5 | 820 | 64 | 1250 | |

図 35.17 材料選択

| 項目(曲げ) | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ(内) |
|---------|-----------------|-----|------------|------------|
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 431.500 | 431.500 |
| 曲げ有効歯幅 | b* | mm | 10.000 | 10.000 |
| 歯形係数 | YF | --- | 3.067 | 2.085 |
| 荷重分布係数 | Yε | --- | --- | 0.749 |
| ねじれ角係数 | Yβ | --- | --- | 0.875 |
| 寿命係数 | KL | --- | 1.000 | 1.000 |
| 寸法係数 | KFx | --- | 1.000 | 1.000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | --- | 1.145 |
| 呼び円周力 | Ft | N | 986.349 | --- |
| 許容円周力 | Ftlim | N | 1562.482 | 2320.439 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 1.584 | 2.350 |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 272.392 | 189.608 |
| 項目(面圧) | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ(内) |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 1353.500 | 1353.500 |
| 面圧有効歯幅 | bw | mm | --- | 10.000 |
| 領域係数 | ZH | --- | --- | 1.171 |
| 寿命係数 | KHL | --- | 1.000 | 1.000 |
| かみあい率係数 | Zε | --- | --- | 0.890 |
| 粗さ係数 | ZR | --- | 0.842 | 0.842 |
| 滑動速度係数 | ZV | --- | 0.984 | 0.984 |
| 硬さ係数 | ZW | --- | 1.000 | 1.000 |
| 荷重分布係数 | KHβ | --- | --- | 1.000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | --- | 1.086 |
| 呼び円周力 | Fc | N | 1753.412 | --- |
| 許容円周力 | Fclim | N | 567217.747 | 578793.578 |
| 歯面強さ | Sfc | --- | 323.494 | 329.751 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 75.253 | 74.536 |

図 35.18 強度結果

35.7 歯形出力

生成した歯形を、CAD データとして出力することができます。図 35.19 の歯形出力機能により出力した CAD データの作図例を図 35.20 および図 35.21 に示します。

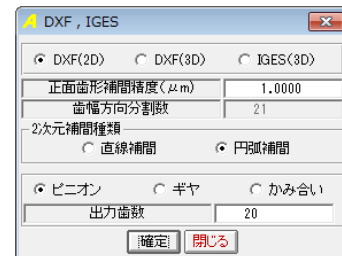


図 35.19 歯形出力

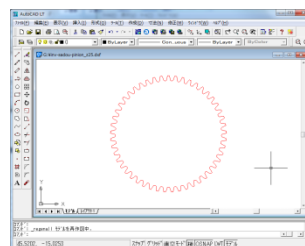


図 35.20 CAD 作図例 (2D)

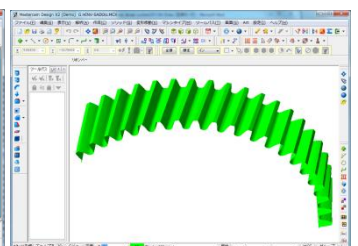


図 35.21 CAD 作図例 (3D)

35.8 歯数差 0 の設計例

2 段連結した歯車機構例 (K-H-V+0) を図 35.22 に示します。1 段目は 1 歯差の外・内歯車です (内歯固定, 外歯出力, 腕入力)。2 段目 (従動側) は 0 歯差の外・内歯車です。1 段目の外歯車と 2 段目の内歯車を連結すると, 入力軸と同じ軸上で出力することができます。

図 35.22 では 2 段目の 0 歯差の外歯車, 内歯車, 腕のいずれも固定していません。緑の従動側 (差動の外歯車+0 歯差の内歯車) と赤の外歯車 (出力) の回転比は同じです。従って, 差動歯車の減速比を同軸上で取り出すことができます。以下に 0 歯差歯車の設計例を示します。

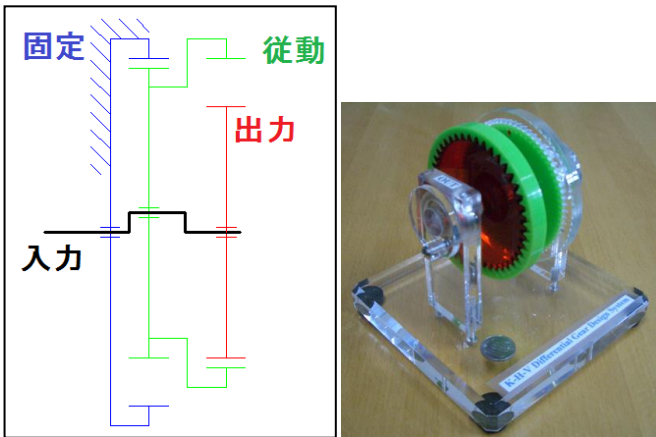


図 35.22 機構例 (1 段目差動, 2 段目 0 歯差)

図 35.2 の初期設定で, 歯数差 0 を選択します。次に, 図 35.23 の諸元設定でモジュール, 歯数, 圧力角, んじれ角を設定し, **参考値** により図 35.24 を表示します。そして適合する 25 個の中から No.25 を選択し, 図 35.23 の諸元を確定すると図 35.25 の歯形を得ることができます。図 35.25 のかみ合い部 C と反対側を拡大した歯形拡大図を図 35.26 に示します。また, 歯形レンダリングを図 35.27 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---|------------|-----|---------|---------|
| モジュール | mn | mm | 1.5000 | |
| 歯数 | z | --- | 30 | 30 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 0 | 0 |
| ねじれ方向 | --- | --- | --- | --- |
| 歯厚入力 | | | | |
| <input checked="" type="radio"/> 転位係数 <input type="radio"/> オーバピッチ法 <input type="radio"/> またぎ歯厚 | | | | |
| 転位係数 | xn | --- | -0.3000 | 1.4937 |
| オーバピッチ径 | dp | mm | 1.854 | 1.674 |
| オーバピッチ法 | dm | mm | 0.0000 | 47.9930 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 5 | 7 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 20.2493 | 30.9462 |
| 中心距離 | a | mm | 0.9202 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.1000 | 0.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 48.2570 | 44.0974 |
| 歯底円直径 | df | mm | 41.5070 | 50.8474 |
| 歯先R | ra | mm | 0.0500 | 0.0500 |
| 刃先R/歯元R | rf | mm | 0.5625 | 0.3750 |
| 歯幅 | b | mm | 10.0000 | 10.0000 |

図 35.23 諸元設定

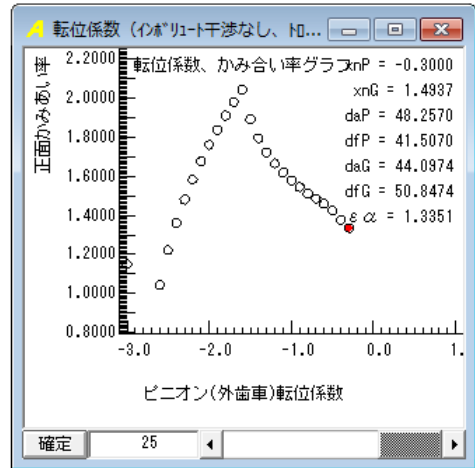


図 35.24 補助機能 (転位係数とかみ合い率)

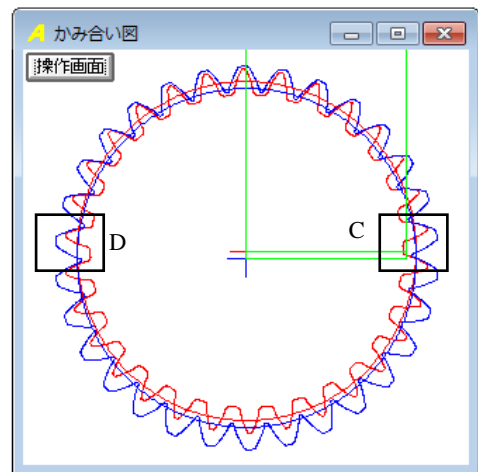


図 35.25 かみ合い図 (歯数差 0)

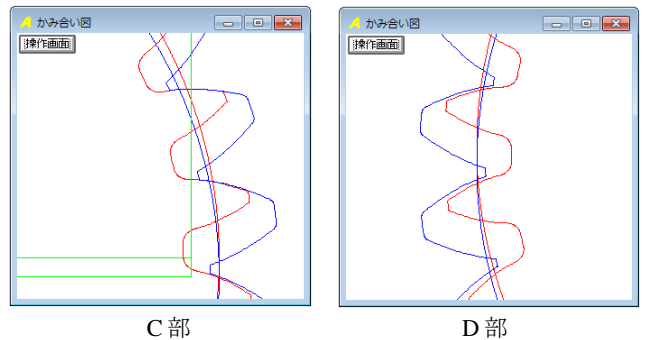


図 35.26 かみ合い図 (拡大)

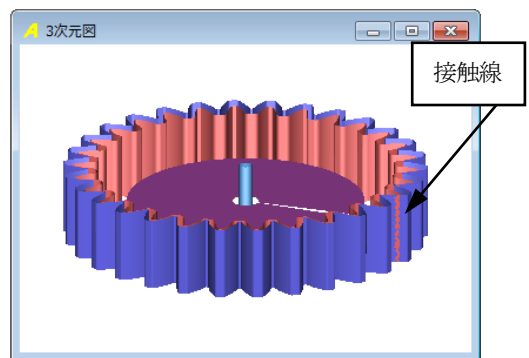


図 35.27 歯形レンダリング

[36] Double enveloping worm gear design system

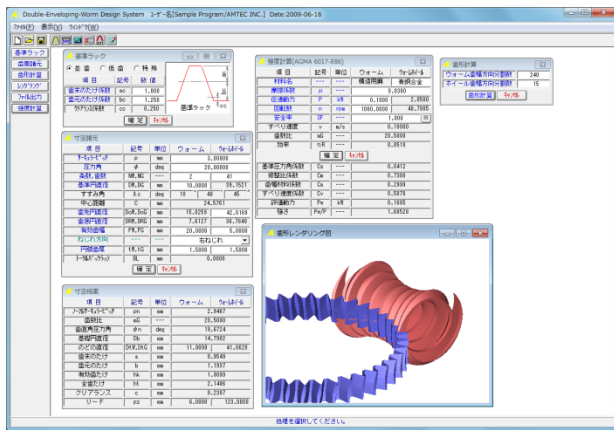


図 36.1 Double enveloping worm gear design system

36.1 概要

このウォームギヤは、ヒンドレーウォームギヤと呼ばれ鼓形ウォームギヤとして最も古い歴史を持ちます。ウォームホイールの中央断面とウォームは共に同じ歯形を持ち一般の円筒ウォームギヤに比して、かみ合い接触線が長くなることから歯面強さに対して有利です。本ソフトウェアは、歯車寸法、歯形計算、強度計算をすることができ、歯形は CAD データとして出力することができます。

36.2 基準ラック

図 36.2 に基準ラックの設定画面を示します。歯たけは並歯、低歯、特殊たけに対応しています。



図 36.2 初期設定

36.3 歯車諸元設定

図 36.3 に歯車諸元の入力画面を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ウォームホイール |
|----------|-------------|-----|----------|----------|
| サーキュラピッチ | p | mm | 3.00000 | |
| 圧力角 | ϕ | deg | 20.00000 | |
| 条数, 歯数 | NW, NG | --- | 2 | 41 |
| 基準円直径 | DW, DG | mm | 10.0000 | 39.1521 |
| すずみ角 | λc | deg | 10 | 48 / 45 |
| 中心距離 | C | mm | 24.5761 | |
| 歯先円直径 | DoW, DoG | mm | 15.8259 | 42.0169 |
| 歯底円直径 | DRW, DRG | mm | 7.6127 | 36.7648 |
| 有効歯幅 | FW, FG | mm | 20.0000 | 5.0000 |
| ねじれ方向 | --- | --- | | 右ねじれ |
| 円弧歯厚 | tW, tG | mm | 1.5000 | 1.5000 |
| トランスラック | BL | mm | 0.0000 | |

図 36.3 歯車諸元

入力する数値は、円筒ウォームギヤと同様です。

- (1) 最大サーキュラピッチは 1000mm
- (2) ウォームの条数は 1~10
- (3) 歯厚は、円弧歯厚を入力することができます。

図 36.4 に Double enveloping worm gear の寸法を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ウォームホイール |
|----------|----------|-----|---------|----------|
| サーキュラピッチ | p | mm | 2.9467 | |
| 歯数比 | mG | --- | 20.5000 | |
| 歯直角圧力角 | ϕn | deg | 19.6724 | |
| 基礎円直径 | Db | mm | 14.7902 | |
| のどの直径 | DtW, DtG | mm | 11.9099 | 41.0620 |
| 歯末のたけ | a | mm | 0.9549 | |
| 歯元のたけ | b | mm | 1.1937 | |
| 有効歯たけ | hk | mm | 1.9099 | |
| 全歯たけ | ht | mm | 2.1486 | |
| クリアランス | c | mm | 0.2387 | |
| リード | PZ | mm | 6.0000 | 123.0000 |

図 36.4 ウォームギヤの寸法

36.4 歯形

図 36.3 に示す Double enveloping worm gear の歯形を計算する際、図 36.5 のように歯形の分割数を設定し、この分割数に従って歯形を計算します。歯形レンダリングを図 36.6 および図 36.7 に示します。図中に歯のかみ合い接触線を確認することができます。



図 36.5 歯形計算の設定

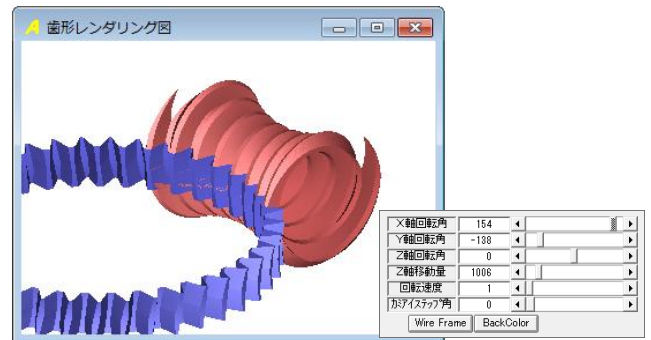


図 36.6 歯形レンダリング 1

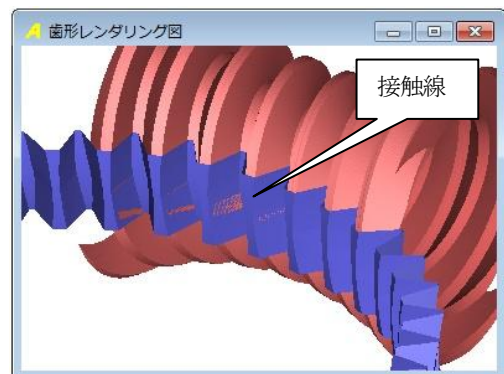


図 36.7 歯形レンダリング 2

36.5 CAD 作図例

生成した歯形を CAD データに出力することができます。ウォームとホイールの CAD 作図例 (IGES) を図 36.8 に示します。

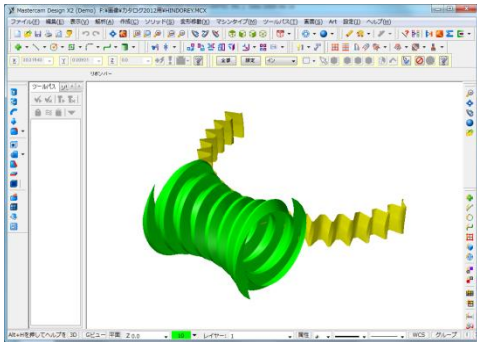


図 36.8 CAD 作図例(3D-IGES)

36.6 強度計算

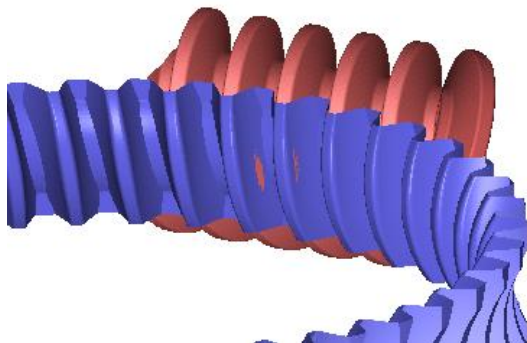
Double enveloping worm gear の強度計算は、AGMA 6035-A02 に基づいて計算します。強度計算画面を図 36.9 に示します。

| 強度計算(AGMA 6017-E86) | | | | |
|--|----------|-----|-----------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ウォールホイール |
| 材料名 | --- | --- | 構造用鋼 | 青銅合金 |
| 摩擦係数 | μ | --- | | 0.0300 |
| 伝達動力 | P | kW | 0.1000 | 2.0500 |
| 回転数 | n | rpm | 1000.0000 | 48.7805 |
| 安全率 | SF | --- | | 1.000 ※ |
| すべり速度 | v | m/s | | 0.10000 |
| 歯数比 | mG | --- | | 20.5000 |
| 効率 | ηR | --- | | 0.8518 |
| <input type="button" value="確定"/> <input type="button" value="キャンセル"/> | | | | |
| 基準圧力角係数 | C_s | --- | | 0.0412 |
| 修整比係数 | C_m | --- | | 0.7380 |
| 歯幅材料係数 | C_a | --- | | 0.2999 |
| すべり速度係数 | C_v | --- | | 0.5078 |
| 評価動力 | P_w | kW | | 0.1685 |
| 強さ | P_w/P | --- | | 1.68528 |

図 36.9 強度計算結果

36.7 円筒ウォームギヤとの比較

円筒ウォームギヤの接触線は、図 36.10 に示すようにホイールの歯幅方向に伸びています。しかし、Double enveloping worm gear の接触線は、図 36.7 に示すようにホイールの歯たけ方向に伸びています。更に、円筒ウォームギヤのかみ合い歯数は、2 歯の接触ですが、Double enveloping worm gear は、4 歯が接触しています。このことから、Double enveloping worm gear の歯の負荷容量は、円筒歯車より大きいと言えます。



$$m_n=0.955, z_1=2, z_2=41, \alpha=20^\circ, d_1=10$$

図 36.10 円筒ウォームギヤ

ウォームギヤは大きな滑りを伴うため歯面間の潤滑油膜の形成が重要です。円筒ウォームギヤは、図 36.10 の接触線からも解るように接触線とすべり方向が 0° に近いところもありますが、Double enveloping worm gear の接触線は歯面の滑り方向に対して、ほぼ直角です。そのため、潤滑油膜の保持に非常に有利です。

Double enveloping worm gear は、ウォームの歯幅を図 36.11 のように小さくしても 3 歯がかみ合いますのでコンパクトな設計が可能です。しかし、Double enveloping worm gear の形状は複雑であるため加工が容易ではありません。本来、Double enveloping worm gear は、専用機で加工されていますが、本ソフトウェアから生成する CAD データを用いてマシニングセンタで容易に加工することができます。

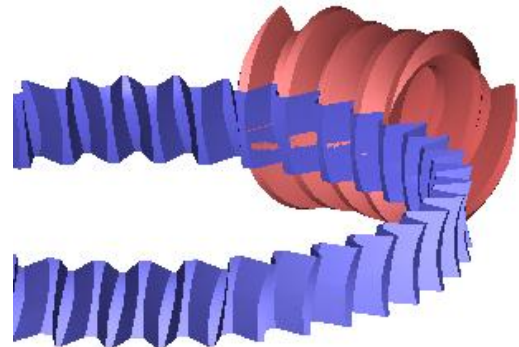


図 36.11 Double enveloping worm gear ($b_1=12, b_2=5$)

[37] 鼓形ウォーム&ヘリカルギヤ設計システム

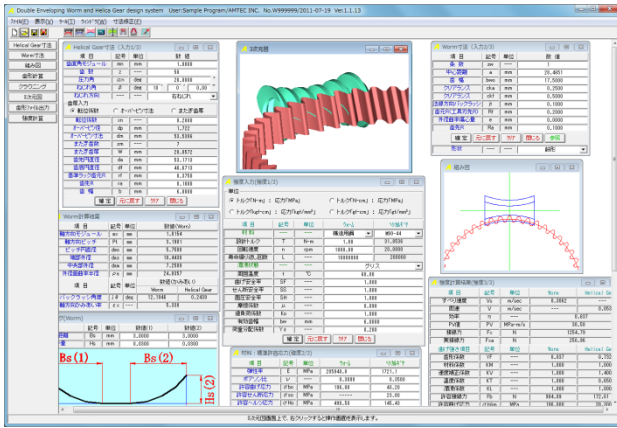


図 37.1 鼓形ウォーム&ヘリカルギヤ

37.1 概要

鼓形ウォームギヤは、ヒンドレーウォームギヤ(カタログ[36])に代表されますが、ホイール歯形の複雑さからヘリカルギヤをホイールとした鼓形ウォームギヤがあります。鼓形ウォームギヤは、円筒ウォームギヤに比して同時かみ合い歯数が多く、且つ、ホイールの歯たけ方向のかみ合い接触線を持つことから潤滑や歯面強さに対して非常に有利といえます。本ソフトウェアは、鼓形ウォーム×ヘリカルギヤを設計することができるソフトウェアです。

ウォームギヤの体系は、以下に示すように大別することができます。

- (1) 円筒ウォームギヤ
 - (1.1) 円筒ウォームギヤ, 24 頁
 - (1.2) Niemann worm gear, 99 頁
 - (1.3) ウォーム×ヘリカルギヤ, 19 頁
 - (1.4) LCCW ウォーム×ヘリカルギヤ, 119 頁
 - (1.5) 傾斜ウォームギヤ, 97 頁
- (2) 鼓形ウォームギヤ
 - (2.1) ヒンドレーウォームギヤ, 117 頁
 - (2.2) 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ, 119 頁
- (3) 内歯車ウォームギヤ
 - (3.1) 樽形ウォームギヤ, 127 頁

ウォームギヤと言えば、(1.1)の円筒ウォームギヤのことですが、ホイールがプラスチック歯車の場合、(1.1)円筒ウォームギヤの代用品として(1.2)の円筒ウォーム×ヘリカルギヤが大多数を占めます。しかし、この歯車は、点接触であるため負荷容量の増大を望むことができませんが、これを解決するのが(2.2)鼓形ウォーム×ヘリカルギヤであると考えています。鼓形ウォーム×ヘリカルギヤは、円筒ウォーム×ヘリカルギヤに対し、同時かみ合い歯数が多く(円筒ウォームの2~3倍)、また、歯たけ方向のかみ合い線接触であるため負荷容量は増大し、且つ、潤滑に有利です。なお、ホイールはインボリュートヘリカルギヤをそのまま用いることができ、円筒ウォームギヤの諸元や中心距離に合わせた設計が可能です。そのため、円筒ウォーム×ヘリカルギヤの中心距離を変更することなく円筒ウォームを鼓形ウォームに変更するだけで済みます。

本ソフトウェアは、上記(2.2) 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤの歯車寸法計算、歯形計算、強度計算をすることができ、歯形はCADデータとして出力することができます。

37.2 ヘリカルギヤ諸元入力

図 37.2にヘリカルギヤの諸元入力画面を示します。入力範囲は、 $0.1 \leq m_n \leq 50, 10 \leq z_2 \leq 500, 5^\circ \leq \alpha_n \leq 30^\circ, 0^\circ < \beta \leq 20^\circ$ です。図 37.2のヘリカルギヤ諸元を確定すると、寸法を図 37.3のように表示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---|------------|-----|------------------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 1.0000 |
| 歯数 | z | --- | 50 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.0000 ° |
| ねじれ角 | β | deg | 10 ° 0 ' 0.00 '' |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 歯厚入力 | | | |
| <input checked="" type="radio"/> 転位係数 <input type="radio"/> オーバピッチ法 <input type="radio"/> またぎ歯厚 | | | |
| 転位係数 | xn | --- | 0.2000 |
| オーバピッチ径 | dp | mm | 1.722 |
| オーバピッチ法 | dm | mm | 53.5388 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 7 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 20.0572 |
| 歯先円直径 | da | mm | 53.1713 |
| 歯底円直径 | df | mm | 48.6713 |
| 基準ラック歯元R | rf | mm | 0.3750 |
| 歯先R | ra | mm | 0.1000 |
| 歯幅 | b | mm | 8.0000 |

図 37.2 ヘリカルギヤ諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|------------|---------------|-----|----------|
| 正面モジュール | mt | mm | 1.0154 |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 20.2836 |
| 基準円直径 | d | mm | 50.7713 |
| かみ合いピッチ円直径 | dw | mm | 51.1713 |
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 21.4626 |
| 基礎円直径 | db | mm | 47.6229 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 9.3913 |
| リード | Lead | mm | 904.5856 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.2000 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.0500 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.2500 |
| Tif径 | Tif | mm | 49.3566 |

図 37.3 ヘリカルギヤ寸法

37.3 ウォーム諸元入力

図 37.4に鼓形ウォームの諸元入力画面を示します。条数の入力範囲は、 $1 \leq z_w \leq 3$ です。中心距離は、理論値の他に、円筒ウォーム×ヘリカルギヤで設計した中心距離を設定することも可能ですので軸間距離を変えることなく鼓形ウォーム×ヘリカルギヤに変更することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-------------|-----|-----|---------|
| 形状 | --- | --- | 鼓形 |
| 条数 | zw | --- | 1 |
| 中心距離 | a | mm | 28.4651 |
| 歯幅 | bwo | mm | 17.5000 |
| クリアランス | cka | mm | 0.2500 |
| クリアランス | ckf | mm | 0.5000 |
| 法線方向バックラッシュ | jt | mm | 0.1000 |
| 歯元R(工具刃先R) | Rf | mm | 0.2000 |
| 外径曲率偏心率 | e | mm | 0.0000 |
| 歯先R | Ra | mm | 0.1000 |

図 37.4 鼓形ウォーム諸元

図 37.5 に鼓形ウォーム寸法を示します。円筒ウォーム×ヘリカルギヤのかみ合い率 $\varepsilon = 1.71$ に対し、本例の鼓形ウォーム×ヘリカルギヤでは $\varepsilon = 5.34$ となり約 3 倍に増加します。また、諸元設定完了後、図 37.6 に組図を作図することができますので、鼓形ウォームの歯幅や全体のバランスを確認することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Worm) | |
|-----------|-----------------|-----|----------|--------|
| 軸方向モジュール | m_x | mm | 1.0154 | |
| 軸方向ピッチ | Pt | mm | 3.1901 | |
| 基準円直径 | dwo | mm | 5.7588 | |
| 端部外径 | das | mm | 10.4438 | |
| 中央部外径 | dam | mm | 7.2589 | |
| 外径面曲率半径 | ρ_a | mm | 24.8357 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(かみあい) | |
| バックラッシュ角度 | $j \theta$ | deg | 12.1946 | 0.2439 |
| 軸方向かみあい率 | ε_x | --- | 5.338 | |

図 37.5 鼓形ウォーム寸法

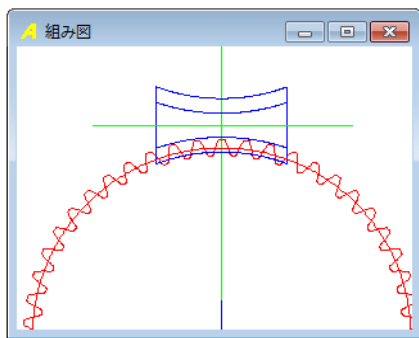


図 37.6 組み図

37.4 歯形計算

鼓形ウォームの歯形分割数を図 37.7 で設定します。ここで設定する分割数で生成する鼓形ウォームの歯形の細かさが決まります。また、ウォームにクラウニングおよびウォーム歯先修整を与える場合は、図 37.8 で設定することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------|-----|-----|-----|
| 歯幅方向分割数 | bNO | --- | 280 |
| 円周分割数 | hNO | --- | 180 |

図 37.7 鼓形ウォームの歯形計算の設定

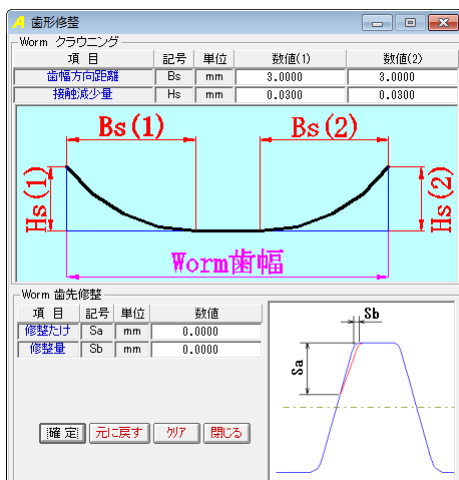


図 37.8 鼓形ウォームのクラウニングと歯先修整

歯形計算後の鼓形ウォームとヘリカルギヤの 3D かみ合いを図 37.9 および図 37.10 に示します。図 37.9 は、クラウニングを与えていないかみ合いのためウォームの両端部で接触線を観察することができます。一方、図 37.10 は、ウォームにクラウニング（解り易くするため大きなクラウニング）を与えているため 4 歯の接触線となっています。

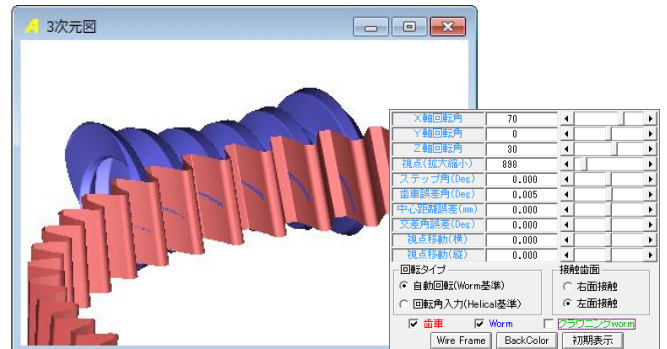


図 37.9 歯形レンダリング（理論ウォーム）

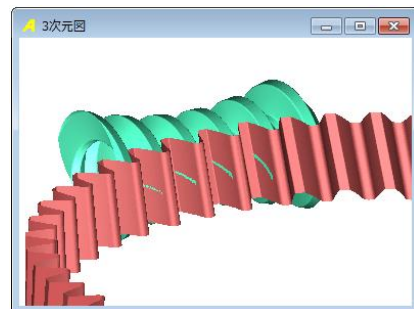


図 37.10 歯形レンダリング（クラウニング）

37.5 歯形出力

生成した歯形を CAD データとして出力することができます。図 37.11 で出力した歯形の作図例を図 3.7.12 に示します。

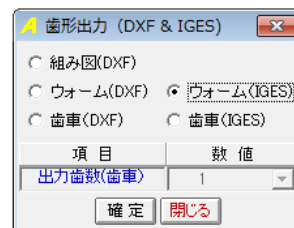
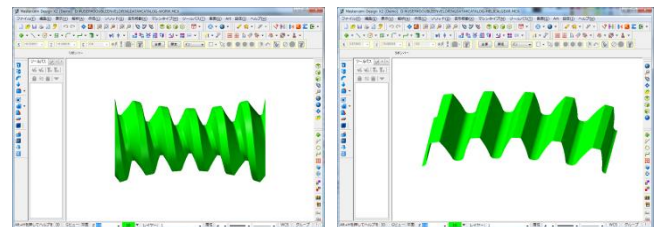


図 37.11 歯形出力



(a) Catalog-Worm.IGS (b) Catalog-HelicalGear.IGS
図 37.12 CAD 作図例(3D-IGES)

37.6 強度計算

鼓形ウォームとヘリカルギヤの強度計算画面を図 37.13~37.15 に示します。歯車材料は、図 37.13a に示すようにウォーム、ヘリカルギヤ共に 8 種類から選択することができます。また、図 37.14 では任意の許容応力値を設定することができます。

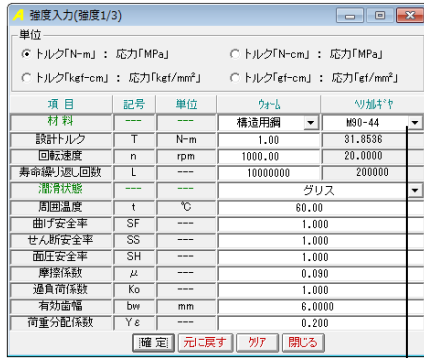


図 37.13 強度計算入力



図 37.13a 強度計算 (材料)

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical Gear |
|---------|---------------|-----|----------|--------------|
| 弾性率 | E | MPa | 205340.0 | 1721.1 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.3000 | 0.3500 |
| 許容曲げ応力 | σ_{bo} | MPa | 196.00 | 49.20 |
| 許容せん断応力 | σ_{so} | MPa | --- | 23.80 |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hc} | MPa | 490.50 | 145.43 |

図 37.14 許容応力の設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical Gear |
|---------|-----------------|-----------------|----------|--------------|
| すべり速度 | V_s | m/sec | 0.3062 | --- |
| 周速 | V | m/sec | --- | 0.0592 |
| 効率 | η | --- | --- | 0.837 |
| PV値 | PV | MPa·m/s | 30.58 | --- |
| 接線力 | F_x | N | 1254.79 | --- |
| 実接線力 | F_{xa} | N | 250.96 | --- |
| 曲げ強さ項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical Gear |
| 歯形係数 | YF | --- | 0.837 | 0.732 |
| 材料係数 | KM | --- | 1.000 | 1.000 |
| 速度補正係数 | KV | --- | 1.000 | 1.400 |
| 温度係数 | KT | --- | 1.000 | 0.850 |
| 潤滑係数 | KL | --- | 1.000 | 1.000 |
| 許容接線力 | F_b | N | 984.89 | 172.61 |
| 許容曲げ応力 | σ_{blim} | MPa | 196.000 | 39.300 |
| 発生曲げ応力 | σ_b | MPa | 49.942 | 57.140 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 3.925 | 0.688 |
| せん断強さ項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical Gear |
| せん断円周歯厚 | S_o | mm | --- | 2.039 |
| 円周歯幅 | S_b | mm | --- | 7.063 |
| 断面積 | S_{ab} | mm ² | --- | 6.599 |
| 許容接線力 | F_s | N | --- | 228.447 |
| 許容せん断応力 | σ_{slim} | MPa | --- | 23.800 |
| 発生せん断応力 | σ_s | MPa | --- | 26.145 |
| せん断強さ | Sfs | --- | --- | 0.910 |
| 歯面強さ項目 | 記号 | 単位 | Worm | Helical Gear |
| 積載係数 | ZH | --- | --- | 2.388 |
| 材料定数係数 | ZM | MPa | --- | 24.879 |
| 接触歯たけ | hm | mm | --- | 1.750 |
| 許容接線力 | F_h | N | 6054.316 | 532.225 |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 490.500 | 145.430 |
| 発生ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 99.869 | 99.869 |
| 歯面強さ | Sfh | --- | 24.125 | 2.121 |

図 37.15 強度結果

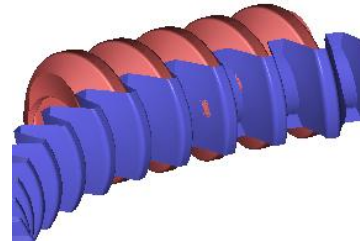
37.7 円筒ウォーム×ヘリカルギヤとの比較

図 37.16 の円筒ウォームギヤおよび図 37.17 の円筒ウォーム×ヘリカルギヤの歯当たり接触は 2 歯のかみ合いに留まっていますが、鼓形ウォーム×ヘリカルギヤの接触線は、図 37.10 および図 37.18 に示すように歯たけ方向に 4 歯（クラウニングを与えている）接触しています。このことから、鼓形ウォーム×ヘリカルギヤの歯の負荷容量は、接触線および接触歯数から考えて円筒ウォームギヤや円筒ウォーム×ヘリカルギヤより大きいと言えます。そのためウォームの歯幅を図 37.18 のように 12.5mm と小さくしても 3

～4 歯がかみ合いますのでコンパクトな設計が可能です。

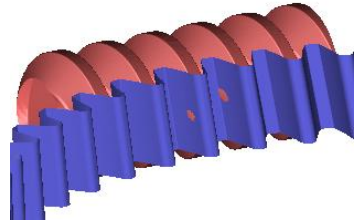
また、ウォームギヤは滑りを伴う運動のため歯面間の潤滑油膜の形成が重要です。円筒ウォームギヤの場合、歯当りは、ホイールの歯すじ方向に伸びるため歯当たりの回転方向の出口側の潤滑が危険な場合がありますが、鼓形ウォーム×ヘリカルギヤの接触線は歯面の滑り方向に対して、ほぼ直角です。そのため、潤滑油膜の保持に非常に有利です。

鼓形ウォームの歯形は複雑であるため円筒ウォームに比して加工が容易ではありませんが、本ソフトウェアから生成する CAD データを用いてマシニングセンタで容易に加工することができます。



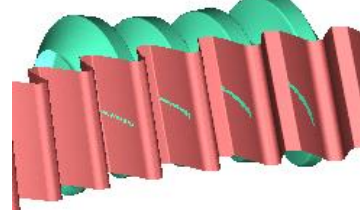
$$m_n=1, z_1=1, z_2=50, \alpha=20^\circ, d_1=5.76, \gamma=10^\circ, b_1=17.5$$

図 37.16 円筒ウォームギヤ



$$m_n=1, z_1=1, z_2=50, \alpha=20^\circ, d_1=5.76, \gamma=10^\circ, b_1=17.5$$

図 37.17 円筒ウォーム×ヘリカルギヤ

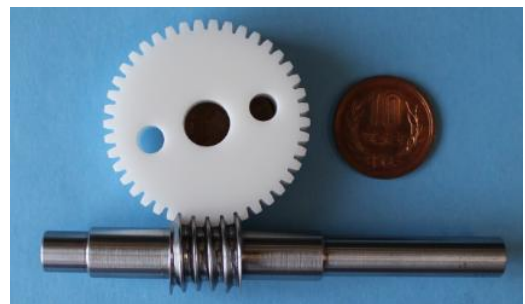


$$m_n=1, z_1=1, z_2=50, \alpha=20^\circ, d_1=5.76, \gamma=10^\circ, b_1=12.5$$

図 37.18 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ

37.8 鼓形ウォームの製作例

図 37.19 に示す鼓形ウォーム品は、インポリユートヘリカルギヤに合わせて設計し、マシニングセンタにより鼓形ウォームの歯形を加工したものです。なお、ヘリカルギヤは、プラスチック材料 (POM) のため歯厚を大きくしています。



$$m_n=1, z_1=1, z_2=42, \alpha_n=14.5^\circ, \beta=4.13^\circ$$

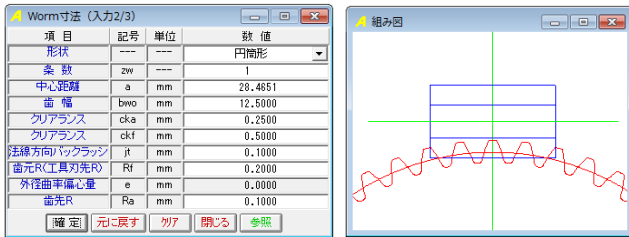
図 37.19 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ

37.9 歯たけ方向に線接触を持つ円筒ウォーム(オプション)

一般の円筒ウォーム(図 37.16 及び図 37.17) と以下に示す歯たけ方向に線接触を持つ円筒ウォームは、どちらも外径は円筒形状ですのでこれを区別するため、歯たけ方向に線接触を持つ円筒ウォームギヤを、**LCCW (Line Contact Cylindrical Worm Gear)** と名付けます。

上述した鼓形ウォームは両側面部でも接触するため同時かみ合い歯数は多くなりますが、同時かみ合い歯数が3以上あれば良いということであれば、外径を鼓形にする必要はなく円筒でも十分であると考えることができます。

そこで、図 37.4 の「形状」設定で、ウォームの形状を図 37.20 で円筒形として設定し、計算した結果を以下に示します。その結果、図 37.21 のようにウォームの外径は、円筒となり、歯当りは鼓形とほぼ同様に同時4歯接触していることが解ります。また、図 37.22 に示す円筒ウォームの CAD 作図例のように外径が円筒形であることから転造による製造が容易であると考えられます。



(a)ウォーム諸元 (b)組図
図 37.20 LCCW (線接触円筒ウォームギヤ)

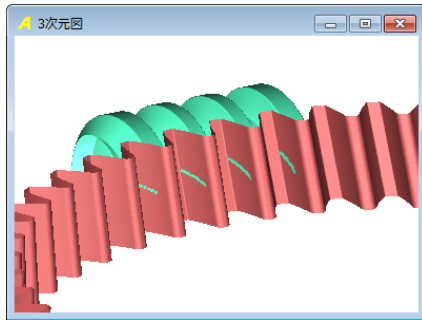


図 37.21 LCCW 歯形レンダリング

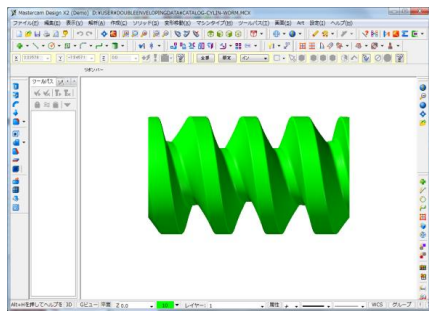


図 37.22 円筒ウォームの CAD 作図例

37.10 ホイールが平歯車の場合

ホイールを平歯車とした場合の計算例を図 37.23~37.25 に示します。ホイールがヘリカルギヤの場合、ホイールの歯幅中央に接触線を確認することができますが、ホイールが平歯車の場合には、接触線はホイール歯幅の下方に寄っていることが解ります。



図 37.23 平歯車諸元



図 37.24 ウォーム諸元

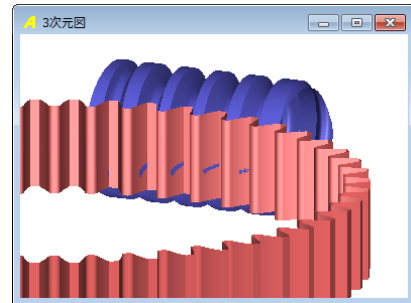


図 37.25 LCCW (ホイールが平歯車)

37.11 オプション

(1)LCCW, (2)歯当たり(予定)

37.12 LCCW に期待するもの

大型のウォームギヤも LCCW として製作できるものと考えていますが、小型でホイールがプラスチック歯車として使用される用途に期待しています。現在、図 37.17 に示す円筒ウォームとプラスチックヘリカルギヤは、自動車用の補機や小型モータ減速用として数多く使用されていますが、円筒ウォームとプラスチックヘリカルギヤは、点接触であるため大きな負荷容量を望むことができません。この円筒ウォームとプラスチックヘリカルギヤの負荷容量を大きくするために切削や射出成形によるプラスチックウォームホイール(図 37.16)が実用化されていることもありますが、ウォームホイールを射出成型で製造するためにはホイールの金型精度や多額のコストを要します。

そこで、インボリュートヘリカルギヤの諸元を変えずにそのまま用い、円筒ウォームを LCCW とすることにより歯車箱の大きさを変更することなく負荷容量の増大を望むことができます。

[38] UTS (常時伝達変速システム設計)

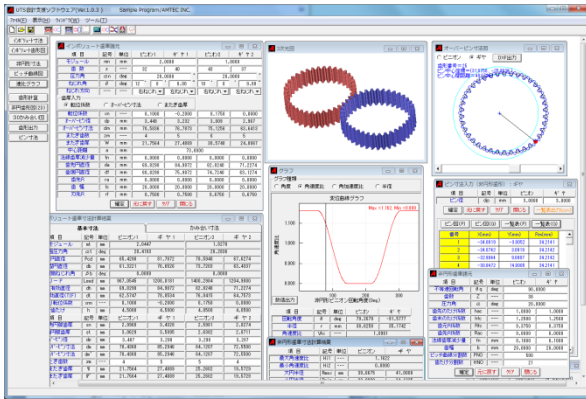


図38.1 UTS (常時伝達変速システム設計)

38.1 概要

UTS[Uninterrupted Transmission System] は、非円形歯車を用いた常時伝達変速システムです。

自動車などで広く使用されている歯車式変速機は、減速比を変える変速作業の際に駆動力を伝達できないという現象が発生するが、小森雅晴(京都大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻)は、変速前後の歯車の両方の形状を兼ね備えた非円形歯車を用いることにより、変速の際に生じる“駆動力抜け”をゼロにできる常時伝達変速システム UTS を開発した。

UTS は、このシステムを簡単に設計することができるソフトウェアです。

38.2 UTS の概要

図 38.2 に示す UTS の構造図において各クラッチを締結する

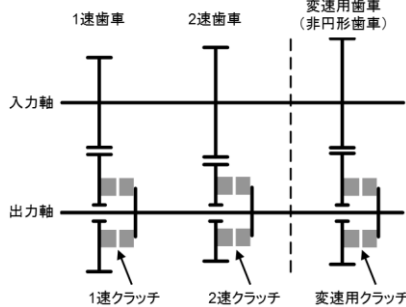


図 38.2 UTS の構造図

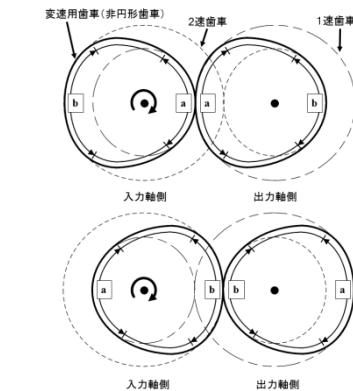


図 38.3 変速用歯車 (非円形歯車)

とそれに相当する歯車が入出力軸間に駆動力を伝える。変速用歯車の非円形歯車は、図 38.3 に示す形状を持ち、区間[a]では 1 速歯車と区間[b]では 2 速歯車と一致する。この非円形歯車が、図 38.3 上に示す区間[a]でかみ合う場合は、1 速歯車と同じかみ合い状態となり、同じ減速比となる。一方、図 38.3 下でかみ合う場合は、2 速歯車と同じ状態となる。図 38.3 の矢印方向に非円形歯車が回転する場合、1 速状態から 2 速状態に変化し、その後、1 速状態に戻る。

1 速から 2 速に変速する場合は、変速用歯車が区間[a]でかみ合い、1 速状態となるときに変速用クラッチを締結する。次に 1 速クラッチを解放し、変速用歯車だけが駆動力を伝達する状態とする。その後、回転が進むと、変速用歯車のかみ合いは、区間[a]から区間[b]に移り、1 速状態から 2 速状態に変化する。ここで 2 速クラッチを締結し、変速用クラッチを解放する。これにより 2 速状態となり 1 速から 2 速への変速プロセスが完了する。また、2 速から 1 速への変速も同様である。UTS は変速中でも変速用歯車が駆動力を伝達しているため、駆動力が抜けることがない。

◆UTS の効果

(1)加速性能を良くしつつ燃費も良くする

現在の歯車式変速機では変速時にタイヤに駆動力が伝わらないため無駄にエネルギーが消費されるとともに速度低下を引き起こすが、本システムでは変速時にも非円形歯車が駆動力を伝達しながら減速比を滑らかに変化させるためエネルギーを有効に利用でき、高い加速性能も実現できる。

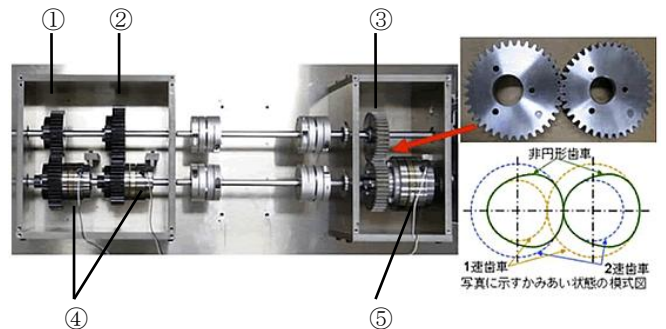
(2)正確な回転伝達が可能

現在の変速機では、変速時に入力軸と出力軸が遮断された空転状態となるため回転を正確に伝達することができない。しかし、本システムでは回転角度を正確に制御することが可能となるため、精密位置決め装置やロボットなど機械に正確な動作が要求される分野で本システムの応用が可能である。

(3) 変速システムの適用範囲の拡大

本変速システムであればこれまで変速機を使用できなかった分野でも利用可能であり、これにより駆動源の小型化や共通化、高い速度と大きな駆動力を実現できる。

図 38.4 に UTS の実験装置を示します。



①1 速歯車, ②2 速歯車, ③非円形歯車, ④1 速, 2 速クラッチ, ⑤変速用クラッチ

図 38.4 UTS の実験装置

38.3 初期設定

図 38.5 に示す初期設定では、基準ラック（並歯，低歯，特殊）を設定することができます。高歯の場合は、歯末のたけ係数，歯元のたけ係数そして適宜に歯元 R 係数を設定してください。



図 38.5 初期設定

38.4 インボリュート歯車の諸元設定

インボリュート歯車諸元（1速，2速）の設定画面を図 38.6 に示します。1速，2速歯車の中心距離は共通です。

図 38.6 のインボリュート歯車諸元確定後，図 38.7 および 図 38.8 に示すインボリュート歯車寸法の計算画面を表示することができます。また，インボリュート歯車の歯形かみ合いを図 38.9 に示します。



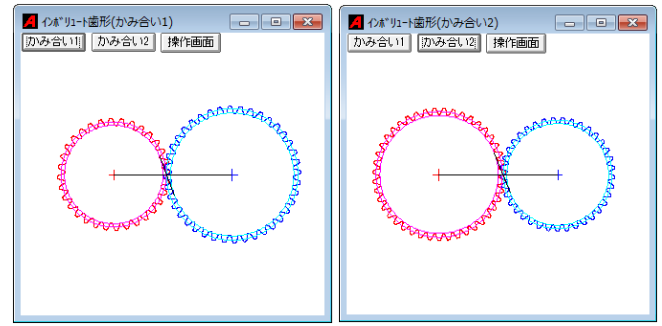
図 38.6 インボリュート歯車諸元



図 38.7 インボリュート歯車寸法（基本寸法）



図 38.8 インボリュート歯車寸法（かみ合い）



(a) 1速歯車 (b) 2速歯車

図 38.9 インボリュート歯車のかみ合い

38.5 非円形歯車の諸元設定

図 38.10 に非円形歯車の諸元設定画面を，また，図 38.11 に非円形歯車の寸法結果を示します。図 38.10 で設定する不等速回転角（ θ_q ）は，図 38.12 に示すように，2つの速比を滑らかに接続するための回転角度幅です。この範囲が大きいほど緩やかに回転比が変化します。これを基に決定した非円形歯車のピッチ曲線を図 38.13 に示します。



図 38.10 非円形歯車の諸元設定

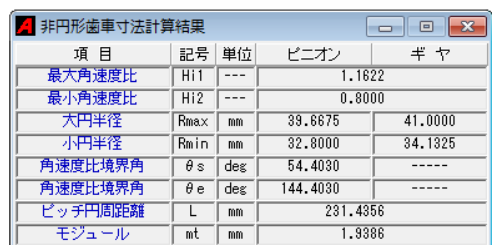


図 38.11 非円形歯車の寸法

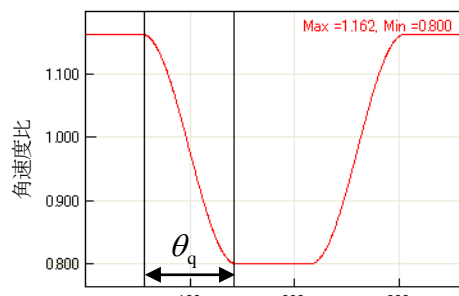


図 38.12 不等速回転角 (θ_q)，（角速度比グラフ）

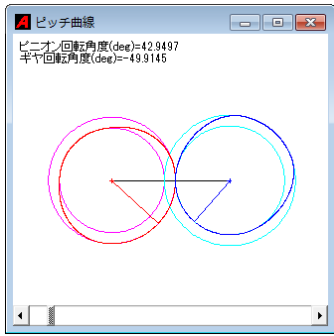


図 38.13 非円形歯車のピッチ曲線

38.6 速比グラフ

非円形歯車の速比グラフ(a)角度, (b) 角速度比, (c)角加速度比, (d)半径を図 38.14 に示します. なお, 変速切り換え可能範囲は, 図 38.15 に緑色で示す円筒歯車の範囲であり $\theta_s \sim \theta_e$ が, 角速度比が変化している部分です. この(b)角速度比から図 38.13 のピッチ曲線が決まりますので角速度比グラフが正しく描かれていることが重要です. また, ここで表示したグラフ数値は csv ファイルに出力することができます.

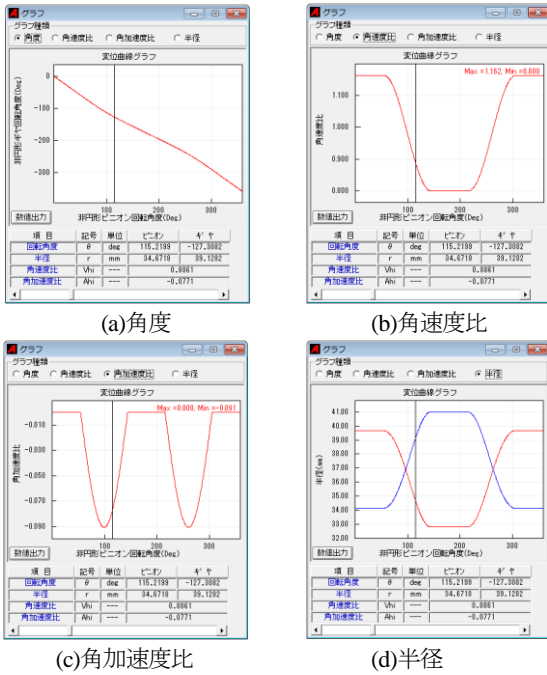


図 38.14 非円形歯車の速比グラフ

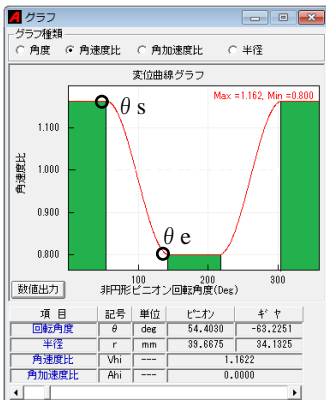


図 38.15 角速度比

38.7 非円形歯車の歯形図 (2D)

非円形歯車の歯形を図 38.16 のように表示することができます. また, 歯形の拡大や距離測定の機能もあり, 画面下のスクロールバーで歯車の回転角度を変更することができます.

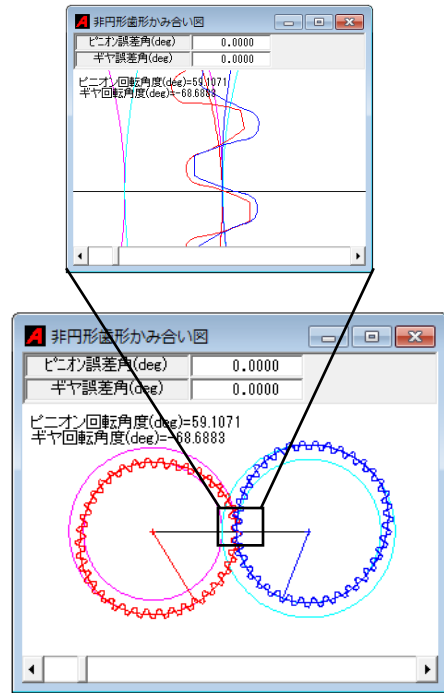


図 38.16 非円形歯車の歯形

38.8 歯形レンダリング

図 38.17 に非円形歯車の歯形レンダリングおよびコントロールフォームを示します. また, 図 38.18 は, 非円形歯車にピッチ円を描いています.

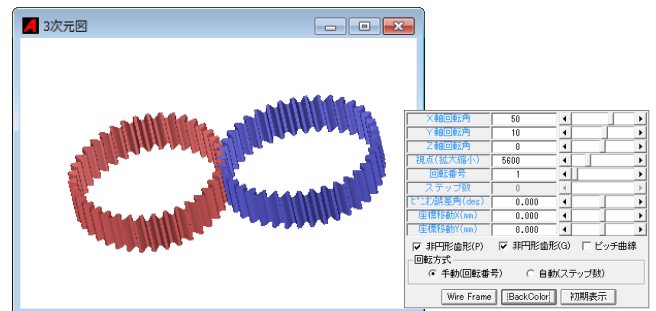


図 38.17 非円形歯車の歯形レンダリング

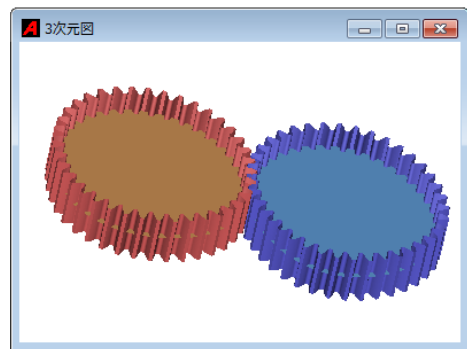


図 38.18 非円形歯車+ピッチ円

38.9 オーバーピン寸法

非円形歯車はそれぞれの歯形が異なりますので1歯ごとのオーバーピン寸法を図 38.19 に示します。また、図 38.20 に歯形とピンの位置を、また、図 38.21 にピン配置の CAD 作図例を示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピッチ | ギヤ |
|-----|----------------|----|--------|--------|
| ピン径 | d _p | mm | 3.0000 | 3.0000 |

| ピン図(P) | ピン図(G) | 一覧表(P) | 一覧表(G) |
|--------|----------|---------|---------|
| 番号 | X(mm) | Y(mm) | Rf(mm) |
| 1 | -34.9819 | -3.0052 | 34.2141 |
| 2 | -34.0742 | 3.0919 | 34.2142 |
| 3 | -32.9844 | 9.0907 | 34.2142 |
| 4 | -30.8472 | 14.8005 | 34.2141 |
| 5 | -27.7306 | 20.0406 | 34.2142 |
| 6 | -23.7331 | 24.6444 | 34.2141 |
| 7 | -18.9822 | 28.4653 | 34.2140 |
| 8 | -13.6345 | 31.3938 | 34.2267 |
| 9 | -7.9187 | 33.5195 | 34.4421 |
| 10 | -1.9704 | 34.8623 | 34.9180 |
| 11 | 4.1033 | 35.4009 | 35.6373 |
| 12 | 10.1933 | 35.1179 | 36.5673 |
| 13 | 16.1842 | 33.9945 | 37.6505 |
| 14 | 21.9395 | 31.9938 | 38.7937 |
| 15 | 27.2771 | 29.0624 | 39.8581 |

図 38.19 非円形歯車のオーバーピン寸法

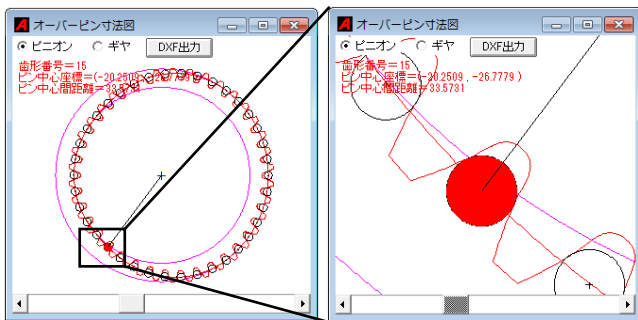


図 38.20 非円形歯車のオーバーピン寸法図

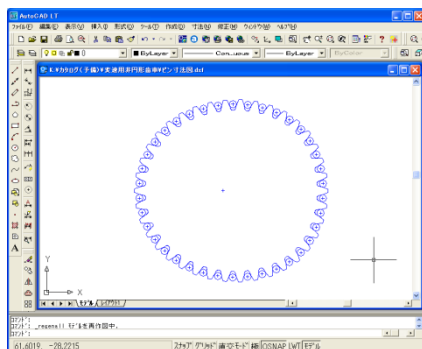


図 38.21 非円形歯車のオーバーピン CAD 作図例

38.10 歯形出力

非円形歯車の歯形を図 38.22 で出力することができます。CAD 歯形作図例を図 38.23 および図 38.24 に示します。



図 38.22 非円形歯車の歯形出力

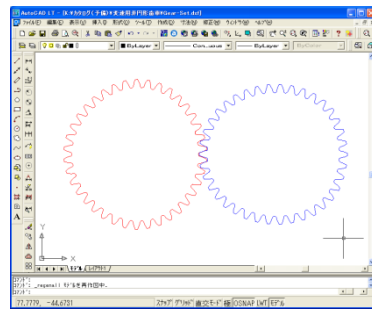


図 38.23 非円形歯車の CAD 作図例 (DXF)

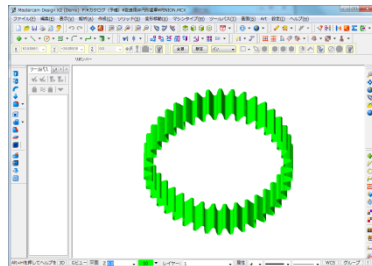


図 38.24 非円形歯車の CAD 作図例 (3D-IGES)

[39] 内歯ウォームギヤ設計システム

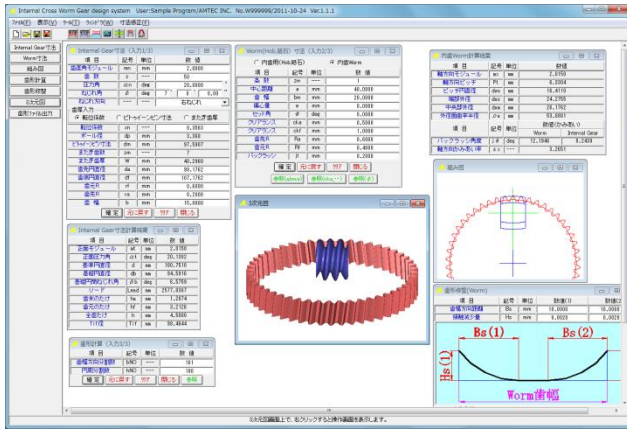


図 39.1 内歯ウォームギヤ設計システム

39.1 概要

ウォームギヤの体系は、以下に示すように分類することができます。この中で、(1)および(2)のホイールは外歯車ですが、本件のソフトウェアは、(3)の内歯車ウォームギヤです。なお、LCCW ウォームギヤは、カタログ[37]で示している「歯たけ方向に線接触を持つ円筒ウォームギヤ」のことで、

- (1) 円筒ウォームギヤ
 - (1.1) 円筒ウォームギヤ, 24 頁
 - (1.2) Niemann worm gear, 99 頁
 - (1.3) ウォーム×ヘリカルギヤ, 19 頁
 - (1.4) LCCW ウォーム×ヘリカルギヤ, 119 頁
 - (1.5) 傾斜ウォームギヤ, 97 頁
- (2) 鼓形ウォームギヤ
 - (2.1) ヒンドレーウォームギヤ, 117 頁
 - (2.2) 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ, 119 頁
- (3) 内歯車ウォームギヤ
 - (3.1) 樽形ウォームギヤ, 127 頁

内歯車ウォームギヤの樽形ウォームは、鼓形ウォームのように同時かみ合い歯数が多く、且つ、ホイールの歯たけ方向のかみ合い接触線を持つことから潤滑に対して非常に有利といえます。本ソフトウェアは、(3.1)樽形ウォームギヤを設計するソフトウェアですが、バックラッシュおよびクリアランスを0にすればホブやねじ状砥石の歯形として使用することができます。また、内はすば歯車の軸とウォーム軸を直交させることができる歯形とすることができますので、この樽形ウォーム（ホブ、砥石）の支持軸を内はすば歯車に接触させない位置に配置させることができます（ただし、ねじれ角の制限があります）。

これらを整理しますと

- (a) 本ソフトウェアは内歯車用樽形ウォームのソフトウェアですが、バックラッシュと歯先クリアランスを0にすることによりホブおよびねじ状砥石の刃形を生成することができます。
- (b) ウォーム（ホブ、砥石）の取り付け角を歯車のねじれ角に合わせることなく歯（刃）形を決定することができます。
- (c) ホブの取り付け角を、歯車の軸方向に対して直角にすることもできるため、ホブ（砥石）の切削時の移動は、内歯車の形状に遮られることなく内歯車を重ね合わせて複数個同時に加工することができます。

39.2 内歯車諸元入力

図 39.2に内歯車の諸元入力画面を示します。諸元の入力範囲は、 $0.1 \leq m_n \leq 50, 10 \leq z_2 \leq 500, 5^\circ \leq \alpha_n \leq 30^\circ, 0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$ です。図 39.2の内歯車諸元を確定すると、寸法を図 39.3のように表示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--|------------|-----|------------|
| 歯直角モジュール | m_n | mm | 2.0000 |
| 歯数 | z | --- | 50 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.0000 |
| ねじれ角 | β | deg | 7° 0' 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 歯厚入力 | | | |
| <input checked="" type="radio"/> 転位係数 <input type="radio"/> ピトインピン寸法 <input type="radio"/> またぎ歯厚 | | | |
| 転位係数 | x_n | --- | 0.3563 |
| ボール径 | d_p | mm | 3.368 |
| ピトインピン寸法 | d_m | mm | 97.5907 |
| またぎ歯数 | z_m | --- | 7 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 40.2360 |
| 歯先円直径 | d_a | mm | 98.1762 |
| 歯底円直径 | d_f | mm | 107.1762 |
| 歯元R | r_f | mm | 0.8000 |
| 歯先R | r_a | mm | 0.2000 |
| 歯幅 | b | mm | 15.0000 |

図 39.2 内歯車諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|------------|-----|-----------|
| 正面モジュール | m_t | mm | 2.0150 |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 20.1382 |
| 基準円直径 | d | mm | 100.7510 |
| 基礎円直径 | d_b | mm | 94.5916 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 6.5759 |
| リード | Lead | mm | 2577.8367 |
| 歯末のたけ | h_a | mm | 1.2874 |
| 歯元のたけ | h_f | mm | 3.2126 |
| 全歯たけ | h | mm | 4.5000 |
| Tif径 | Tif | mm | 98.4644 |

図 39.3 内歯車寸法

39.3 ウォーム諸元入力

図 39.4に内歯ウォーム（ホブ、砥石）の諸元入力画面を示します。条数の入力範囲は、 $1 \leq z_w \leq 3$ です。中心距離は、理論値の他に、任意に設定することも可能ですのでウォームの直径を変更することができます。また、偏心量を与えると図 39.5(a)に示すようにウォームの形状が変化し、ウォーム側面部で逃げを大きくすることができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------|--------|-----|---------|
| 条数 | z_w | --- | 1 |
| 中心距離 | a | mm | 40.0000 |
| 歯幅 | b_w | mm | 20.0000 |
| 偏心量 | e | mm | 0.0000 |
| セット角 | ϕ | deg | 0.0000 |
| クリアランス | cka | mm | 0.5000 |
| クリアランス | ckf | mm | 1.0000 |
| 歯先R | R_a | mm | 0.8000 |
| 歯元R | R_f | mm | 0.4000 |
| バックラッシュ | jt | mm | 0.2000 |

図 39.4 内歯樽形ウォーム諸元

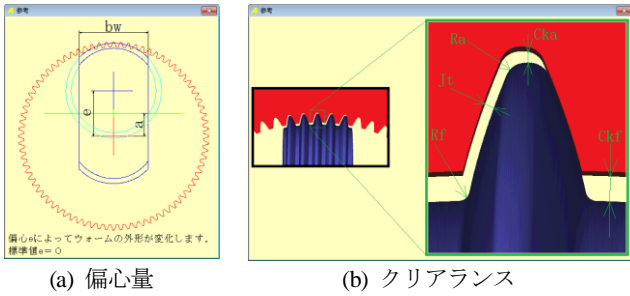


図 39.5 内歯-樽形ウォームの機能

図 39.6 に内歯-樽形ウォーム寸法を示します。また、諸元設定完了後、図 39.7 に組図を作図することができますので、樽形ウォームの歯幅や全体のバランスを確認することができます。

☑ **内歯用(Hob 砥石)** の計算例は、39.6 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---|-----------------|-----|---------|
| 軸方向モジュール | m _x | mm | 2.0150 |
| 軸方向ピッチ | Pt | mm | 6.3304 |
| 基準円直径 | d _{wo} | mm | 16.4110 |
| 端部外径 | d _{as} | mm | 24.2755 |
| 中央部外径 | d _{am} | mm | 26.1762 |
| 外径面曲率半径 | ρ _a | mm | 53.0881 |
| 項目 記号 単位 数値(かみあい) | | | |
| バックラッシュ角度 j θ deg Worm 12.1946 Internal Gear 0.2439 | | | |
| 軸方向かみあい率 | ε _x | --- | 3.2851 |

図 39.6 内歯-樽形ウォーム寸法

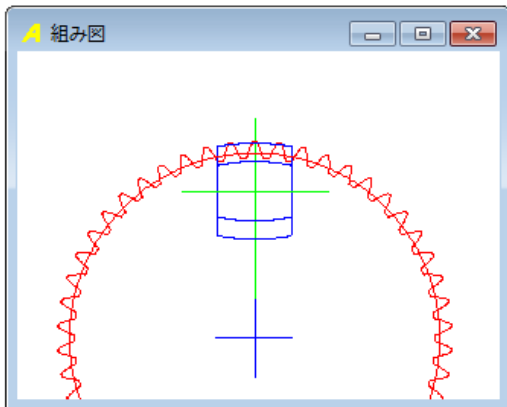


図 39.7 組図 (ウォームと内歯車)

39.4 歯形計算

樽形ウォームの歯形分割数を図 39.8 で設定します。ここで設定する分割数で生成する樽形ウォームの歯形の細かさが決まります。また、ウォームにクラウニングや歯先修整を与える場合は、図 39.9 で設定することができます。

歯形計算後の樽形ウォームと内歯車の 3D かみ合いを図 39.10 および図 39.11 に示します。図 39.11 の(a)は、理論歯形のかみ合いであるため明確に 3 同時かみ合い線を確認することができま

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------|-----|-----|-----|
| 歯幅方向分割数 | bNO | --- | 300 |
| 円周分割数 | hNO | --- | 300 |

図 39.8 樽形ウォームの歯形計算の設定

すが、図 39.11(b)は、図 39.9 でクラウニングを与えているため右端の接触線は薄く同時かみ合い接触線は 2.5 歯です。

なお、本例は、内歯車とウォームの軸角は図 39.4 で、セット角 $\phi=0^\circ$ としていますので 90° で組み立てることができるウォーム歯形ですが、内歯車のねじれ角に合わせた軸角としたウォームの歯形を生成することも可能です。

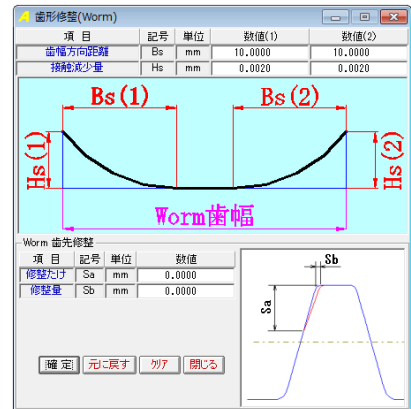


図 39.9 樽形ウォームのクラウニング

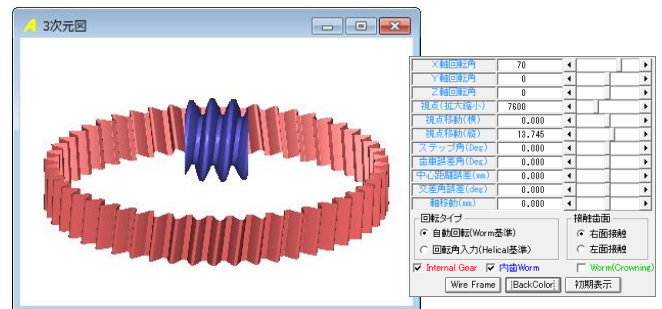
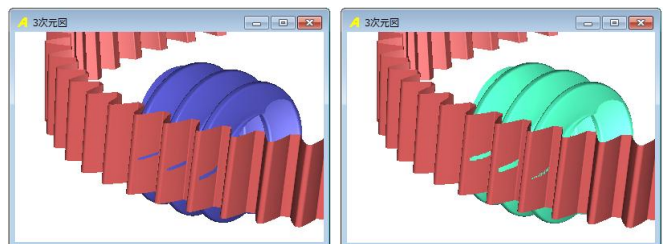


図 39.10 歯形レンダリング (理論ウォーム)



(a) 理論歯形 (b) クラウニング付ウォーム

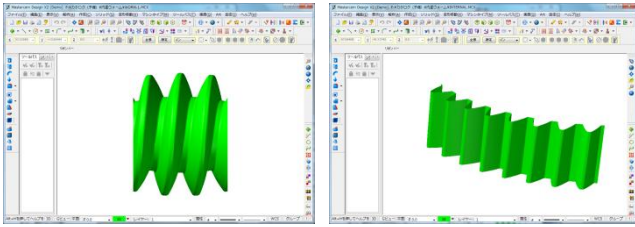
図 39.11 歯形レンダリング (接触線)

39.5 歯形出力

生成した歯形を CAD データとして出力することができます。図 39.11 の歯形を図 39.12 の歯形ファイル出力により作図した例を図 39.13 に示します。



図 39.12 歯形ファイル出力



(a) Worm.IGS (b) Internal Gear.IGS
図 39.13 CAD 作図例(3D-IGES)

39.6 ホブ(ねじ状砥石)

図 39.2 の内歯車を加工する内歯用ホブ(砥石)の諸元入力画面を図 39.14 に示します。条数の入力範囲は、 $1 \leq z_w \leq 3$ です。中心距離は、理論値の他に、任意に設定することも可能です。ホブの直径を変更することができます。ウォームの場合はクリアランスおよびバックラッシュを与えることができますが、ホブの場合は設定できません。

図 39.15 に内歯-樽形ホブ寸法を示します。また、諸元設定完了後、図 39.16 に組図を作図することができますので、樽形ホブの歯幅や全体のバランスを確認することができます。

| Worm(Hob,砥石) 寸法 (入力2/3) | | | |
|-------------------------|--------|--------|---------|
| 内歯用(Hob,砥石) | | 内歯Worm | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 条数 | zw | --- | 1 |
| 中心距離 | a | mm | 40.0000 |
| 歯幅 | bw | mm | 20.0000 |
| 偏心量 | e | mm | 0.0000 |
| セット角 | ϕ | deg | 0.0000 |
| クリアランス | cka | mm | --- |
| クリアランス | ckf | mm | 1.0000 |
| 歯先R | Ra | mm | 0.6000 |
| 歯元R | Rf | mm | 0.4000 |
| バックラッシュ | jt | mm | --- |

図 39.14 内歯-樽形ホブ諸元

| 内歯用(Hob,砥石) 計算結果 | | | |
|------------------|-----------------|----|---------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 軸方向モジュール | m _x | mm | 2.0150 |
| 軸方向ピッチ | PT | mm | 6.3304 |
| 基準円直径 | dwo | mm | 16.4110 |
| 端部外径 | das | mm | 25.2938 |
| 中央部外径 | d _{am} | mm | 27.1762 |
| 外径面曲率半径 | ρ_a | mm | 53.5881 |

図 39.15 内歯-樽形ホブ寸法

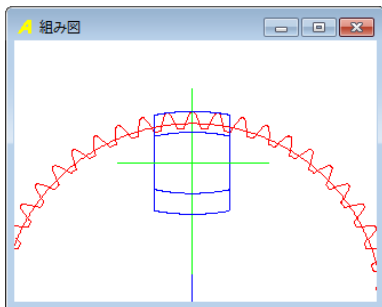


図 39.16 組み図 (ホブと内歯車)

39.7 歯形計算

樽形ホブの歯形分割数を図 39.17 で設定します。ここで設定する分割数で生成する樽形ホブの歯形の細かさが決まります。また、ウォームにはクラウニングを与えることができますが、ホブにはクラウニングを与えることができません。

| 歯形計算 (入力3/3) | | | |
|--------------|-----|-----|-----|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 歯幅方向分割数 | bNO | --- | 300 |
| 円周分割数 | hNO | --- | 300 |

図 39.17 樽形ホブの歯形計算の設定

図 39.18 に樽形ホブと内歯車およびコントロールフォームを示します。また、図 39.19 に示す拡大図では内歯車の歯面と歯先にホブの刃形接触線を確認することができます。

内歯車とホブの軸角は図 39.14 でセット角 $\phi=0^\circ$ としていますので歯車とホブの軸角を 90° で加工することができるホブの刃形です。

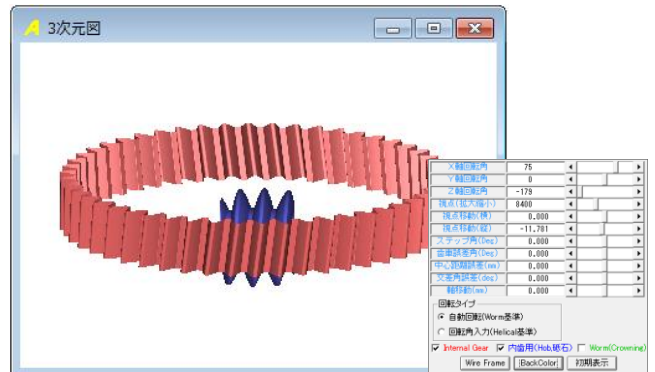


図 39.18 樽形ホブと内歯車

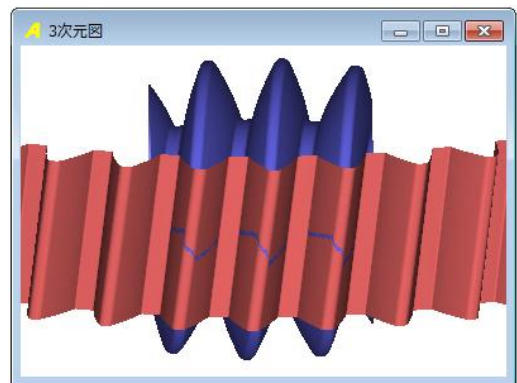


図 39.19 樽形ホブと内歯車 (拡大図)

図 39.10 は、ウォームセット角を $\phi=0^\circ$ としています。内歯車のねじれ角 ($\beta=15^\circ$) に合わせた作図例 ($\phi=15^\circ$) を図 39.20 に示します。ただし、ねじれ角とセット角は同じとする必要はありません。ウォームの歯形が成立する範囲であれば ϕ を自由に決めることができます。

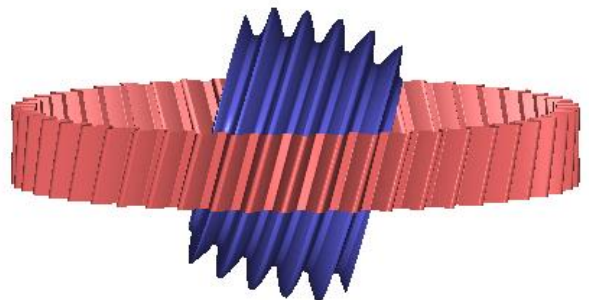


図 39.20 セット角 $\phi=15^\circ$ の例

[40] 多段減速歯車設計システム

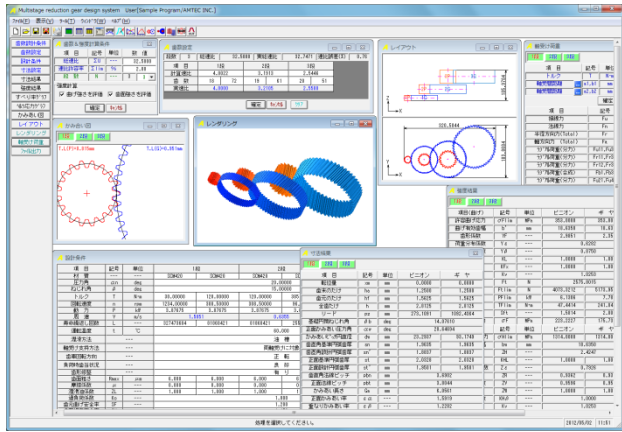


図 40.1 多段減速歯車設計システム

40.1 概要

減速機を設計する際、総減速比に対する減速段数とその歯数比を決め、寸法計算、強度計算、軸受荷重計算をするには計算が非常に面倒です。例えば、全ての歯車の計算を終えた後で、初期段の歯車の変更が生じた場合、後列の歯車を再度計算し直す必要が生じます。

本ソフトウェアは、総減速比、段数そして動力を設定することにより歯車寸法、歯車強度計算を一括で行うことができます。そして、歯車列の配置図を表示し、さらに歯車配置を自由に変更することができます。

40.2 歯数&強度計算条件

図 40.2 に歯数と強度計算条件の画面を示します。総減速比の入力範囲は、 $1 < \Sigma U < 10,000$ で、段数は 1~10 で設定することができます。また、強度計算を規準に歯車寸法を決定しますが、その際、曲げ強度と歯面強度の両方で歯車の大きさを決めることや曲げ強度あるいは歯面強度だけで歯車の大きさを決めることができます。本カタログでは $\Sigma U = 32.5$ 、3 段歯車の例を示します。

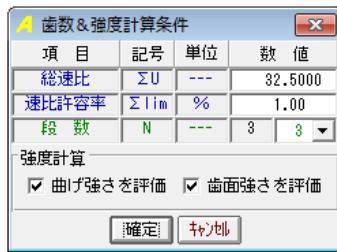


図 40.2 歯数と強度計算条件の設定

40.3 歯数設定

歯数設定は、総減速比と段数により自動計算 (AMTEC 独自のアルゴリズム) します。例題では、総減速比 32.50 に対し、計算による総減速比は 32.7 であり、その誤差は 0.76 % です。なお、自動計算により決まった歯数は任意に変更が可能です。



図 40.3 歯数設定

40.4 設計条件

図 40.4 に設計条件設定画面を示します。材料の設定は、図 40.5 に示すように「熱処理」に適応した材料の選択フォームを表示し、設定することができます。また、各段歯車の材料を設定した後は、図 40.6 のように材料一覧で確認することができます。

図 40.4 の場合、圧力角およびねじれ角は全段共通 (プロパティで設定: 図 40.24 参照) ですが、各段の歯車で任意に設定することができます。図 40.7 に各段歯車の圧力角とねじれ角を変更した例を示します。

運転温度および摩擦係数は、プラスチック歯車 (今後に対応予定) の強度計算のために設けていますので鋼歯車の場合は強度計算に影響しません。

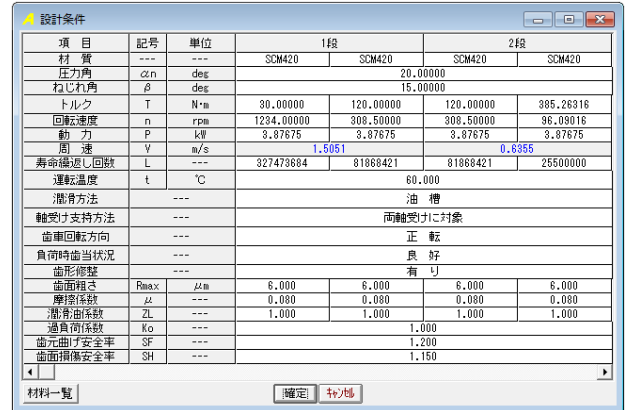


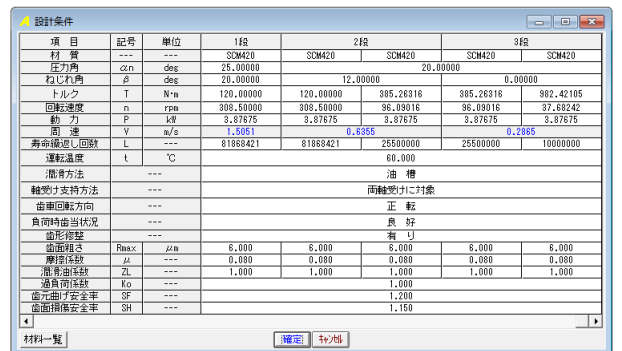
図 40.4 設計条件の設定 1



図 40.5 材料設定の例



図 40.6 材料一覧



(各段の圧力角とねじれ角を変更した例)

図 40.7 設計条件の設定 2

40.5 歯車寸法の設定

寸法結果 で、図 40.8 を表示します。ここで表示する歯車諸元は、上記で設定した減速比や動力などを規準にして強度計算を行い、安全率（本例の場合、曲げと歯面強さ）が満足する歯車諸元を自動計算し表示しています。

ここでは、モジュール、歯数、圧力角、ねじれ角、歯幅などを変更することができます。また、ここで表示している歯幅は強度計算を規準に自動決定した値のため整数ではありませんので製品の歯幅に変更可能です。今、歯幅を 18.6mm を 10mm に変更すると、再度強度計算を行い図 40.9 のように強度不足の数値を赤字で表示します。

例題の場合、1~3 段の歯車諸元数値を[確定]すると図 40.10 のように歯車寸法結果を表示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|------------|----------------------|-----|-----------|----------|
| モジュール | m | mm | 1.25000 | |
| 歯数 | z | --- | 18 | 72 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 15.00000 | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 23.2937 | 93.1749 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| 中心距離 | a | mm | 58.2343 | |
| 歯直線法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0750 | 0.0750 |
| 基準円直径 | db | mm | 21.7976 | 87.1904 |
| 歯先円直径 | da | mm | 25.7937 | 95.6749 |
| 歯底円直径 | df | mm | 20.1687 | 90.0499 |
| 歯幅 | b | mm | 18.6350 | 18.6350 |
| 基準円歯元R係数 | ro | --- | 0.3750 | 0.3750 |
| 歯先R | ra | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| クリアランス | c | mm | 0.3125 | 0.3125 |
| 法線方向トポグラフ | jn | mm | 0.1500 | |
| 全かみあい率 | ε_γ | --- | 2.8201 | |
| すべり率(歯先) | σ_a | --- | 0.5055 | 0.8296 |
| すべり率(歯元) | σ_b | --- | -4.8673 | -1.0223 |
| トルク | T | N·m | 30.0000 | 120.0000 |
| 回転速度 | n | rpm | 1234.0000 | 308.5000 |
| 曲げ強さ | sft | --- | 1.5814 | 2.0087 |
| 歯面強さ | sfc | --- | 1.0414 | 1.0414 |
| 材質 | --- | --- | SCM420 | SCM420 |

図 40.8 歯車寸法の設定 1

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|------------|----------------------|-----|-----------|----------|
| モジュール | m | mm | 1.25000 | |
| 歯数 | z | --- | 18 | 72 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 15.00000 | |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 23.2937 | 93.1749 |
| 転位係数 | xn | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| 中心距離 | a | mm | 58.2343 | |
| 歯直線法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0750 | 0.0750 |
| 基準円直径 | db | mm | 21.7976 | 87.1904 |
| 歯先円直径 | da | mm | 25.7937 | 95.6749 |
| 歯底円直径 | df | mm | 20.1687 | 90.0499 |
| 歯幅 | b | mm | 10.0000 | 18.6350 |
| 基準円歯元R係数 | ro | --- | 0.3750 | 0.3750 |
| 歯先R | ra | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| クリアランス | c | mm | 0.3125 | 0.3125 |
| 法線方向トポグラフ | jn | mm | 0.1500 | |
| 全かみあい率 | ε_γ | --- | 2.2510 | |
| すべり率(歯先) | σ_a | --- | 0.5055 | 0.8296 |
| すべり率(歯元) | σ_b | --- | -4.8673 | -1.0223 |
| トルク | T | N·m | 30.0000 | 120.0000 |
| 回転速度 | n | rpm | 1234.0000 | 308.5000 |
| 曲げ強さ | sft | --- | 0.8486 | 1.2126 |
| 歯面強さ | sfc | --- | 0.4650 | 0.4650 |
| 材質 | --- | --- | SCM420 | SCM420 |

図 40.9 歯車寸法の設定 2

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|------------|----------------------|-----|----------|-----------|
| 転位量 | xm | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.2500 | 1.2500 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.5625 | 1.5625 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.8125 | 2.8125 |
| リード | pz | mm | 279.1091 | 1092.4364 |
| 基礎円間ねじれ角 | β_b | deg | | 14.07610 |
| 正面かみあい圧力角 | α_w | deg | | 20.64694 |
| かみあいピッチ円直径 | dw | mm | 23.2937 | 93.1749 |
| 歯直線法線歯厚 | sn | mm | 1.9635 | 1.9635 |
| 歯直線法線歯厚 | sn' | mm | 1.8837 | 1.8837 |
| 正面基準円歯厚 | st | mm | 2.0328 | 2.0328 |
| 正面設計円歯厚 | st' | mm | 1.9501 | 1.9501 |
| 歯直線法線ピッチ | pbn | mm | | 3.6902 |
| 正面法線ピッチ | pbt | mm | | 3.8044 |
| かみあい長さ | Ga | mm | | 6.0561 |
| 正面かみあい率 | ε_α | --- | | 1.5919 |
| 重なりかみあい率 | ε_β | --- | | 1.2282 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 3 | 9 |
| 基準またぎ歯厚 | W | mm | 9.5733 | 32.7579 |
| 設計またぎ歯厚 | W' | mm | 9.4983 | 32.6829 |
| 測定ピッチ | dp | mm | 2.156 | 2.105 |
| 基準円ピッチ | dm | mm | 26.2665 | 96.0191 |
| 設計円ピッチ | dm' | mm | 26.0824 | 95.8095 |
| キャリア歯たけ | Hj | mm | 1.2888 | 1.2597 |
| 基準キャリア歯厚 | Sj | mm | 1.9615 | 1.9634 |
| 設計キャリア歯厚 | Sj' | mm | 1.8820 | 1.8836 |
| 基準円歯末のたけ | hao' | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 基準円歯元のたけ | hf'o' | --- | 1.2500 | 1.2500 |
| トポグラフ | jt | mm | | 0.1653 |

図 40.10 歯車寸法

40.6 強度計算結果

強度結果 で、図 40.11 に強度計算結果を表示します。なお、歯車強度計算は、JGMA401-01:1974,402-01:1975に基づいています。また、図 40.8 の歯車諸元は図 40.11 に示すように曲げ強さ、歯面強さ全てが満足する歯車諸元です。

各段歯車の強度結果は 1段 2段 3段 で選択することができます。

| 項目(曲げ) | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------|-----------------|-----|-----------|-----------|
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 353.0000 | 353.0000 |
| 曲げ有効歯幅 | b' | mm | 18.6350 | 18.6350 |
| 歯形係数 | YF | --- | 2.9851 | 2.3501 |
| 荷重分布係数 | Y ε | --- | | 0.6292 |
| ねじれ角係数 | Y β | --- | | 0.8750 |
| 寿命係数 | KL | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 寸法係数 | KFx | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | | 1.0253 |
| 呼び円周力 | Ft | N | | 2575.8015 |
| 許容円周力 | Ftlim | N | 4079.3212 | 5173.9595 |
| 許容馬力 | PFlim | kW | 6.1306 | 7.7871 |
| 許容トルク | TFlim | N·m | 47.4414 | 241.0415 |
| 曲げ強さ | Sft | --- | 1.5814 | 2.0087 |
| 歯元曲げ応力 | σ_F | MPa | 223.2227 | 175.7374 |
| 項目(面圧) | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 1314.0000 | 1314.0000 |
| 面圧有効歯幅 | bw | mm | | 18.6350 |
| 領域係数 | ZH | --- | | 2.4247 |
| 寿命係数 | KHL | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| かみあい率係数 | Z ε | --- | | 0.7926 |
| 粗さ係数 | ZR | --- | 0.9362 | 0.9362 |
| 潤滑速度係数 | ZV | --- | 0.9596 | 0.9596 |
| 硬さ係数 | ZW | --- | 1.0000 | 1.0000 |
| 荷重分布係数 | KH β | --- | | 1.0000 |
| 動荷重係数 | Kv | --- | | 1.0253 |
| 呼び円周力 | Fc | N | | 2575.8022 |
| 許容円周力 | Fclim | N | 2682.3126 | 2682.3126 |
| 許容馬力 | Pclim | kW | 4.0371 | 4.0371 |
| 許容トルク | Tclim | N·m | 31.2405 | 31.2405 |
| 歯面強さ | Sfc | --- | 1.0414 | 1.0414 |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 1287.6473 | 1287.6473 |

図 40.11 強度計算結果

40.7 すべり率とヘルツ応力のグラフ

インボリュート歯形の特徴としてかみ合いピッチ円ではころがり運動となりますが、これ以外ではすべりを伴う運動となります。各歯車段のすべり率とヘルツ応力の変化グラフを図 40.12 および図 40.13 に示します。

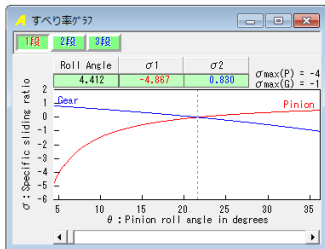


図 40.12 すべり率

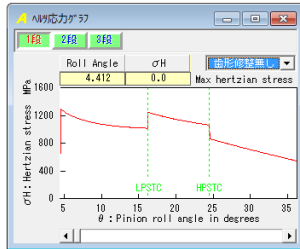


図 40.13 ヘルツ応力

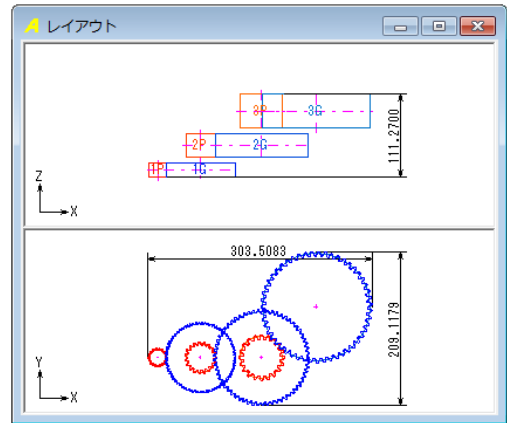


図 40.16 レイアウト 2

40.8 歯形かみ合い図

図 40.14 に各段歯車のかみ合い図を示します。コントロールフォームで歯車を回転させることもでき、また、距離計測もできます。

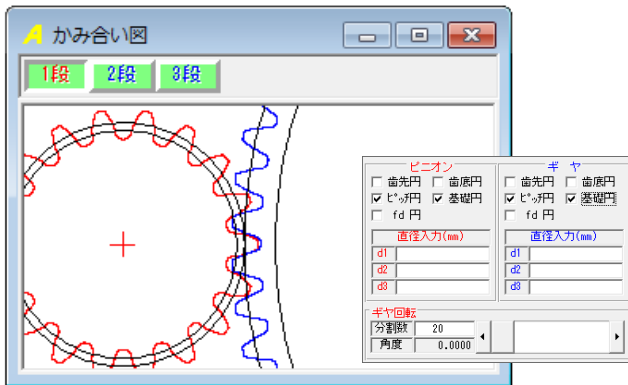


図 40.14 歯形かみ合い図

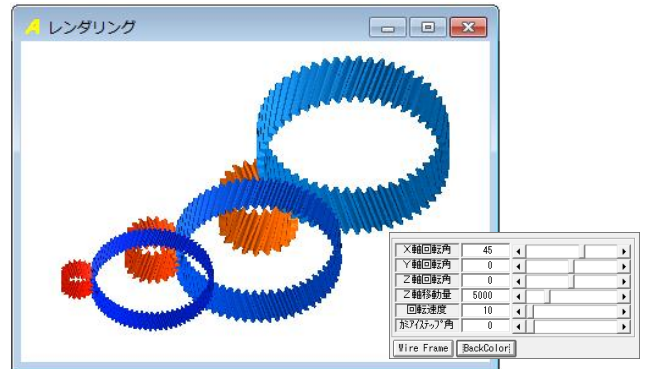


図 40.17 歯形レンダリング 1

40.9 歯形かみ合い図と歯形レンダリング

図 40.14 に各段歯車のレイアウトを示します。コントロールフォームにより寸法線や歯形を表示することができます。また、図 40.16 のように歯車を軸方向に移動して歯車側面に隙間を与えることや、歯車軸を Y 軸方向に移動することもできます。この歯形レンダリング (オプション) を図 40.17 に示します。

また、歯車軸を移動する処理は、小型の歯車装置 (小型モータ減速機等) に適しています。図 40.18 および図 40.19 に 8 段減速歯車を示します。

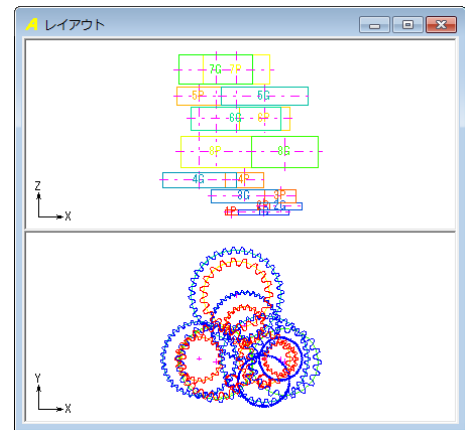


図 40.18 レイアウト 3 (8 段減速の例)

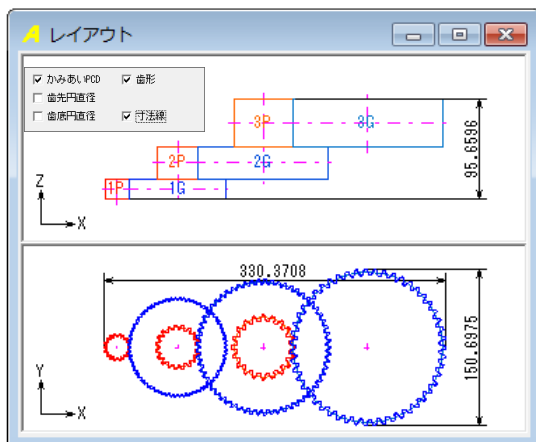


図 40.15 歯車のレイアウト 1

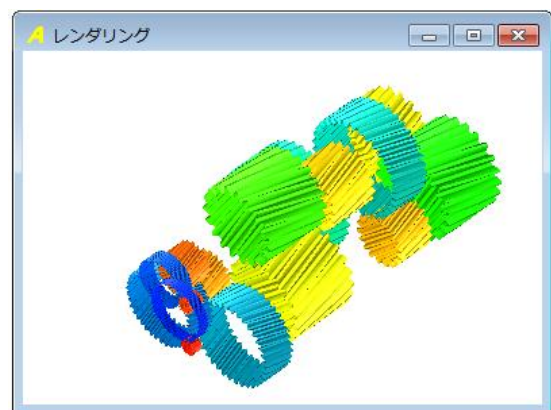


図 40.19 歯形レンダリング 2 (8 段減速の例)

40.10 軸受荷重 (オプション)

歯車に作用する荷重と、軸受けに作用する荷重を計算します。荷重の種類は、接線力、法線力など各軸受けに作用する荷重を20種類計算します。図 40.20 に計算結果を示します。

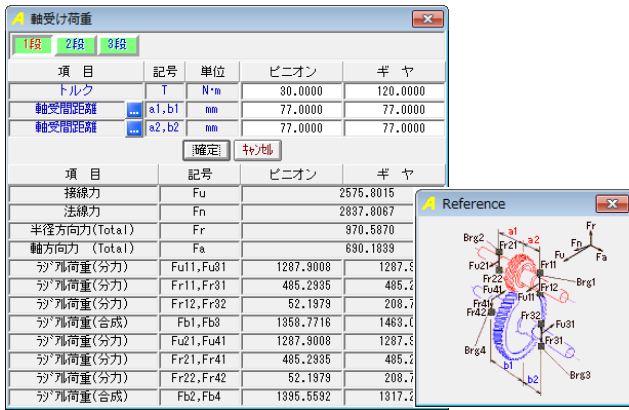


図 40.20 軸受荷重

40.11 プロパティ

(1)規準ラックと標準値

図 40.24 に規準ラックと標準値の設定画面を示します。歯幅の設定範囲や歯幅決定係数で減速機の大きさを決めることができます。

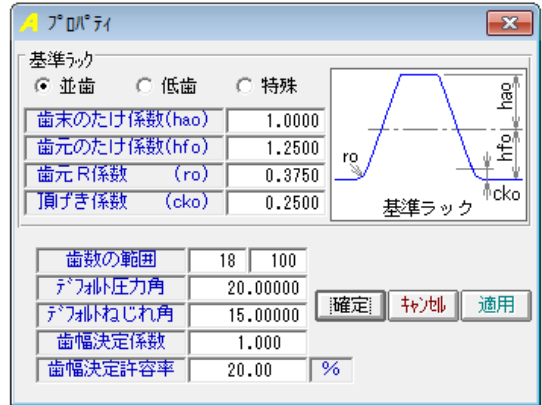


図 40.24 規準ラックと標準値

40.11 ファイル出力 (オプション)

生成した歯形とレイアウトは、図 40.21 で出力することができます。図 40.21 にレイアウトの CAD 作図例を、図 40.22 に歯車列の CAD 作図例を示します。



図 40.21 ファイル出力

(2)任意材料の登録

任意材料を図 40.25 で設定することができます。図 40.5 の材料選択で「任意材料」を選択することができます。



図 40.25 任意材料の設定

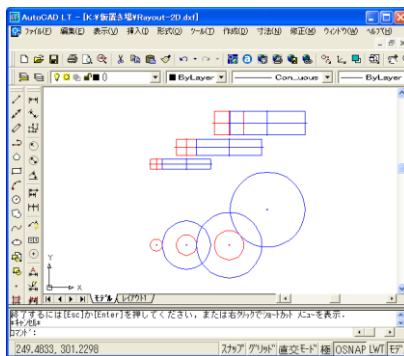


図 40.22 CAD 作図例 (レイアウト)

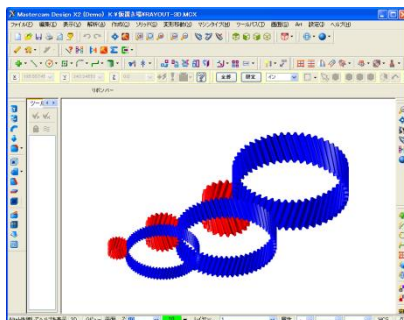


図 40.23 CAD 作図例 (歯車列)

[41] 内歯ねじ歯車設計システム

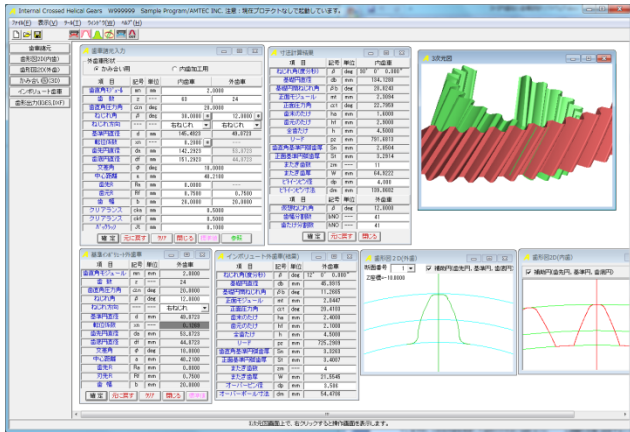


図 41.1 内歯ねじ歯車設計システム

41.1 概要

外歯車同士のねじ歯車対は、両歯車ともインボリュート歯形であればかみ合いは成立しますが、内歯車と外歯車に軸交差角を与え、ねじ歯車としてかみ合わせた場合、内歯車と外歯車がともにインボリュート歯形であれば歯面に大きな3次元干渉が発生するため、かみ合いが成立しません。しかし、本ソフトウェアは、内歯車と外歯車に任意の軸角を与えた場合であってもかみ合いが成立する外歯車の歯形を生成することができますので内歯ウォームギヤ(カタログ vol.15[39])と同様に外歯車を工具として扱うこともできます。また、本ソフトウェアは、内歯ウォームギヤと類似のものですが、内歯のねじ歯車として設計できるようにしたものです。

41.2 内歯ねじ歯車

図 41.2 に歯車諸元の入力画面を示します。諸元の入力範囲は、 $0.1 \leq m_n \leq 50$, $10 \leq z_2 \leq 999$, $5^\circ \leq \alpha_n \leq 40^\circ$, $0^\circ \leq \beta \leq 50^\circ$ です。転位係数入力後に[標準値]ボタンをクリックすると歯先円直径からバックラッシュまで標準値が入力されます。そして[確定]ボタンで図 41.3 を表示します。

図 41.4 に内歯ねじ歯車のかみ合いを示しますが、この外歯車の歯形はインボリュート歯形のため大きな3次元干渉が発生しています。しかし、3次元干渉を考慮した歯形のかみ合いは図 41.5 に示すように綺麗な接触線が表れています。そして、生成した外歯車の歯形はCADファイルに出力することができます。



図 41.2 内歯車諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | 内歯車 |
|-----------|------------|-----|-----------------------|
| ねじれ角(度分秒) | β | deg | $30^\circ 0' 0.000''$ |
| 基準円直径 | d | mm | 134.1280 |
| 基準円歯ねじれ角 | β_b | deg | 28.0243 |
| 正面モジュール | m_t | mm | 2.3094 |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 22.7959 |
| 歯末のたけ | h_a | mm | 1.6000 |
| 歯元のたけ | h_f | mm | 2.3000 |
| 全歯たけ | h | mm | 4.5000 |
| リード | p_z | mm | 791.6813 |
| 歯直角基準円弧歯厚 | S_n | mm | 2.8504 |
| 正面基準円弧歯厚 | S_t | mm | 3.2914 |
| またぎ歯数 | z_m | --- | 11 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 64.9222 |
| ピッチ円直径 | d_p | mm | 4.000 |
| ピッチ円寸法 | d_m | mm | 139.0682 |
| 項目 | 記号 | 単位 | 外歯車 |
| 仮想ねじれ角 | β_v | deg | 12.0000 |
| 歯幅分割数 | bNO | --- | 41 |
| 歯たけ分割数 | hNO | --- | 41 |

図 41.3 内歯車寸法

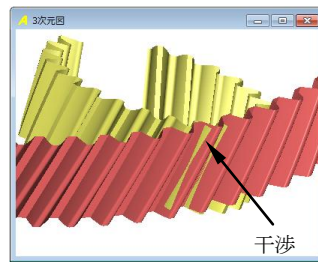


図 41.4 内歯ねじ歯車のかみ合い(外歯がインボリュート歯形)

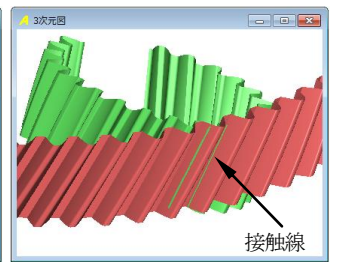


図 41.5 内歯ねじ歯車のかみ合い(干渉を考慮した外歯車歯形)

41.3 内歯ねじ歯車(工具)

(1) 図 41.2 のクリアランスやバックラッシュが0であれば外歯車を工具(または、ラッピング用歯車)と見立てることができます。本例では内歯車のねじれ角が 20° 、外歯車(工具)のねじれ角が 30° の歯車諸元を図 41.6 に示しますが、クリアランス cka は、歯車の歯先と工具の隙間を 0.5mm として与えています。また、本ソフトウェアではねじれ角から決まる交差角に対し $\pm 10^\circ$ の補正角度を与えることができますので本例では交差角を 15° としています。さらに、中心距離も任意に設定することができます。図 41.6 の[確定]ボタンを押すと図 41.7 の内歯車寸法を表示します。

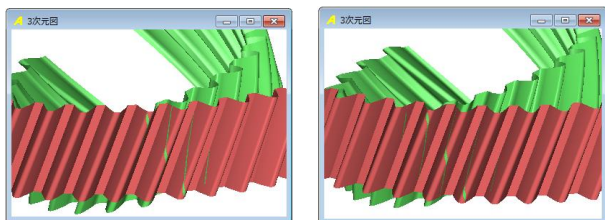


図 41.6 内歯車諸元(工具)

| 寸法計算結果 | | | |
|-----------|------------|-----|---------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 内歯車 |
| ねじれ角(度分秒) | β | deg | 20° 0' 0.000" |
| 基礎円直径 | db | mm | 125.0349 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 18.7472 |
| 正面モジュール | mt | mm | 2.1284 |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 21.1728 |
| 歯末のだけ | ha | mm | 1.6000 |
| 歯元のだけ | hf | mm | 2.9000 |
| 全歯だけ | h | mm | 4.5000 |
| リード | pz | mm | 1157.3607 |
| 歯直角基準円弧歯厚 | Sn | mm | 2.8504 |
| 正面基準円弧歯厚 | St | mm | 3.0333 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 9 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 52.5666 |
| ピッチ径 | dp | mm | 3.000 |
| ピッチ寸法 | dm | mm | 131.6942 |
| 項目 | 記号 | 単位 | 外歯車 |
| 仮想ねじれ角 | β_v | deg | 35.0000 |
| 歯幅分割数 | bNO | --- | 41 |
| 歯だけ分割数 | hNO | --- | 41 |

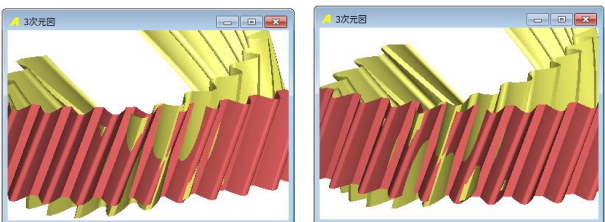
図 41.7 内歯車寸法

(2) 3次元干渉を考慮した外歯車(工具)の歯形と内歯車のかみ合いは、図 41.8 のように左右歯面において綺麗な接触線を確認することができます。もし、3次元干渉を考慮していない歯形であれば、図 41.9 のように大きな干渉が発生しますので、かみ合いません。



(a)右歯面 (b)左歯面

図 41.8 内歯ねじ歯車のかみ合い(干渉を考慮した外歯車)



(a)右歯面 (b)左歯面

図 41.9 内歯ねじ歯車のかみ合い(外歯がインボリュート)

(3) 図 41.10 に外歯車(工具)の断面歯形を示します。図 41.11 に外歯車を工具と見立てた加工後歯形(青色)と内歯(赤色)の重ね合わせ図を示します。また、正面歯形で確認すると図 41.12 のように綺麗に重なっていることが解ります。

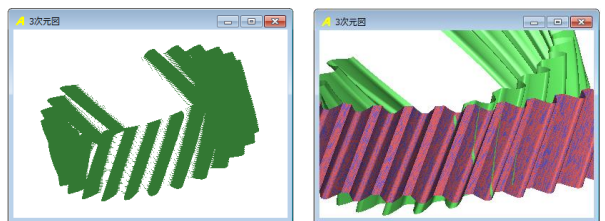


図 41.10 断面歯形

図 41.11 加工後歯形と内歯

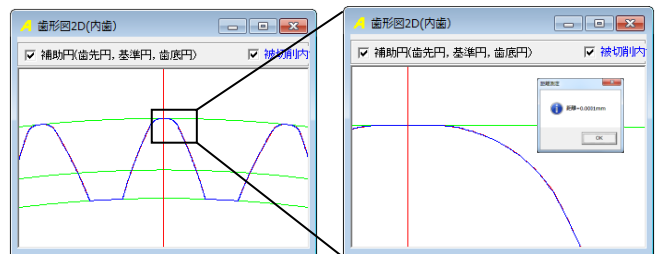
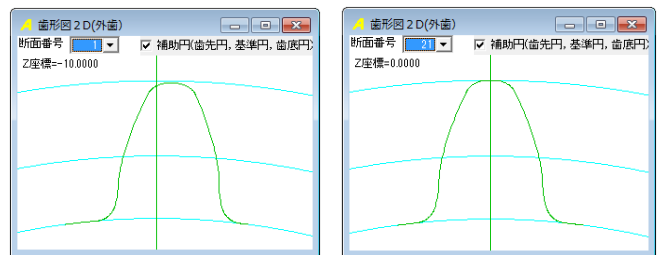


図 41.12 加工後歯形と内歯の重ね図と距離計測

(4) 外歯車(工具)の歯形を計算する際、歯幅方向に 41 分割としたため、断面 1 の歯形と歯幅中央の断面 21 の歯形を図 41.13 に示します。両者の違いは歯先円直径が異なり、また、断面 1 の歯形は、左右非対称歯形です。



(a)断面 1

(b)断面 21

図 41.13 外歯車(工具)の正面歯形

(5) 生成した歯形を CAD データとして出力することができます。図 41.14 の歯形出力により作図した 3D 歯形の例を図 41.15 に示します。また、外歯車(インボリュート)と断面 21 の歯形の重ね合わせを図 41.16 に示しますが、インボリュート歯形と工具歯形には大きな違いがあることが解ります。

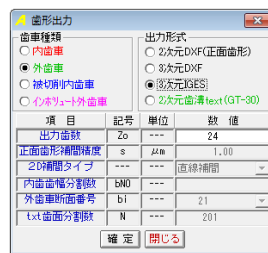


図 41.14 歯形出力

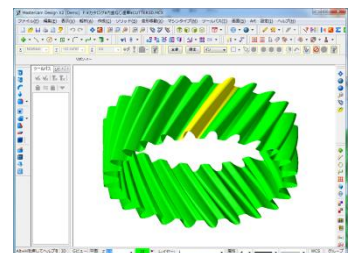


図 41.15 歯形(3D)

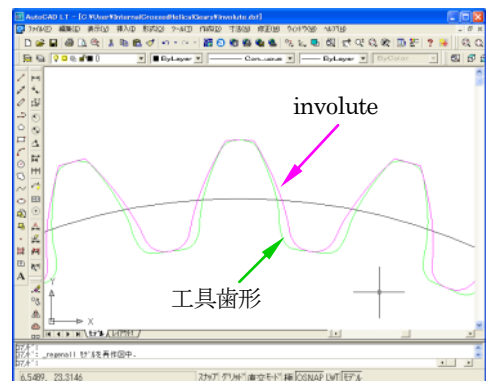
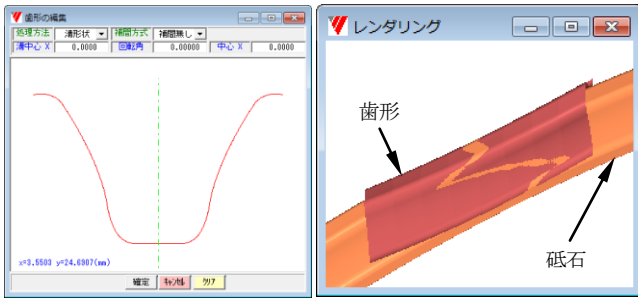


図 41.16 工具歯形(断面 21)とインボリュート歯形

(6) 生成した外歯車(工具)の歯形(断面 21 など)を研削する場合、図 41.14 の「2次元歯溝 text」で歯形ファイルを出力し、図 41.17 のように YASDA GT-30 (カタログ 116 頁, [104], 機械の紹介)で研削することができます。



(a) 砥石歯形(砥石径 250mm) (b) 歯形と砥石
図 41.17 成形研削(YASDA GT-30)

(7) 次に、外歯車(工具)の歯幅を1mm(図 41.6の外歯車の歯幅)としたときのかみ合いを図 41.18 に示します。また、外歯車(工具)を軸方向に移動したときの歯当たりを図 41.19 に示しますが、歯幅の位置の違いに関わらず同じ接触模様を示しています。

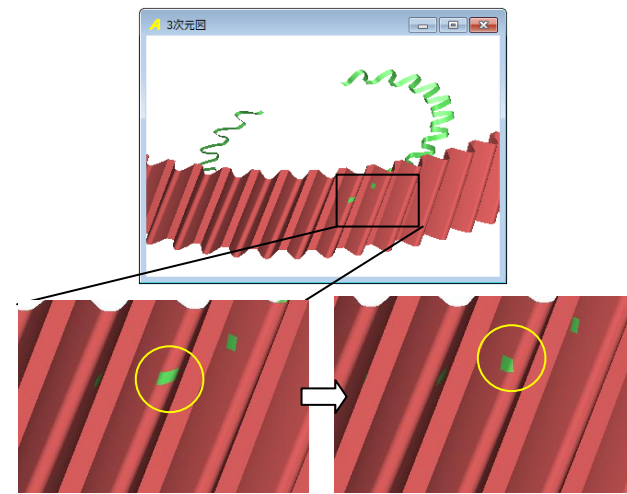
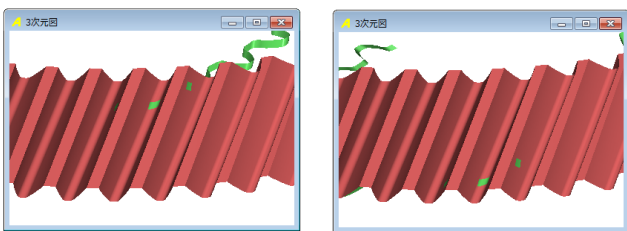


図 41.18 回転角を与えた場合の歯当たり



(a) 軸位置=+6mm (b) 軸位置=-6mm
図 41.19 軸方向に移動したときの歯当たり ($\theta_2=0^\circ$)

(8) 内歯車が平歯車の場合も、ほぼ歯車と同様に計算することができます。内歯ねじ歯車 ($m_n=2, z_1=130, z_2=35, \alpha=20, \beta=0, x_1=0.2, d_{a1}=256.8, d_{f1}=265.8$) のかみ合いを図 41.20 に示します。また、外歯車をインボリュート歯車とした場合のかみ合いを図 41.21 に、3次元かみ合いとコントロールフォームを示します。

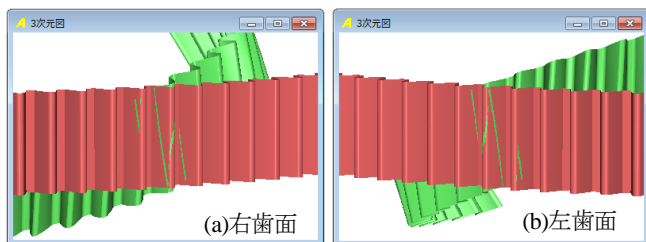


図 41.20 内歯ねじ歯車のかみ合い(干渉を考慮した外歯車)

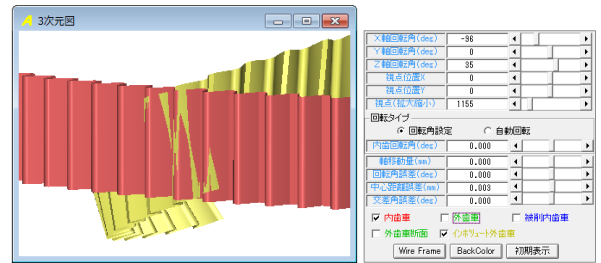


図 41.21 内歯ねじ歯車のかみ合い(外歯がインボリュート)

4.1.4 外歯車(工具)の測定(オプション)

図 41.16 に示す工具歯形(断面 21: 緑線)を図 41.17 のように成形研削した場合、歯形検査を行う必要があります。そこで、歯車測定機を用いて外歯車(工具)の各断面の歯形を測定する方法を以下に示します。

図 41.16 の工具歯形(断面 21)の歯形はインボリュート歯形に近い形状をしていますので m_n と β は設定値とし、 α_n が解れば歯車測定機で歯形誤差を測定することができます。その計算画面を図 41.22 に示します。

ただし、本例の場合、歯たけ中央の歯形はインボリュート歯形に一致していますが、歯先および歯元付近の外歯車(工具)歯形はインボリュート歯形と比較して約 $5\mu\text{m}$ の違いがあります。この歯形の違いは、図 41.23 に示すように距離計測で確認することができますので検査結果で配慮する必要があります。さらに、外歯車(工具)の歯先部は内歯車の歯底部を生成しますので外歯車(工具)の歯先部は除外する必要があります。なお、断面 21 は、左右対称歯形ですが、これ以外の断面は、図 41.24 に示すように左右非対称歯形です。

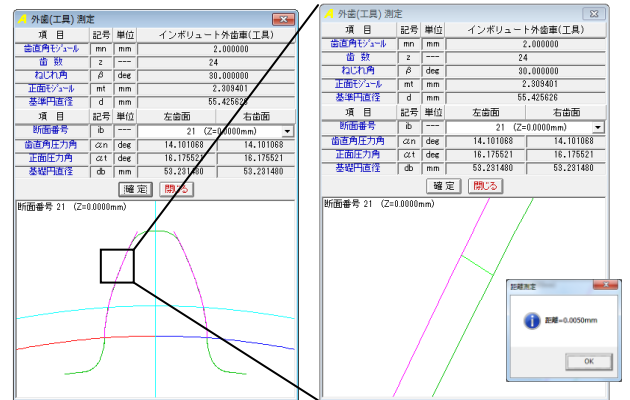
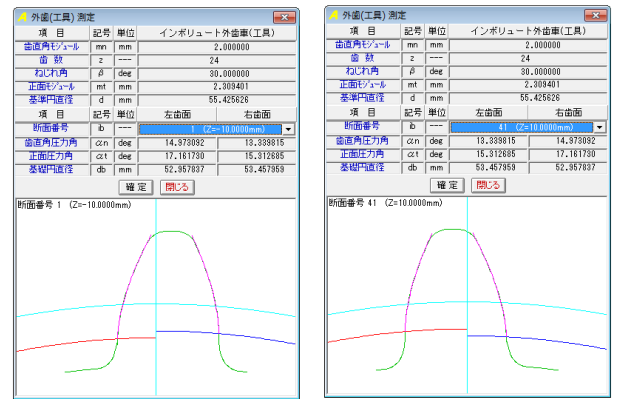


図 41.22 外歯車(工具)の測定

図 41.23 距離計測



(a) 断面 1

(b) 断面 41

図 41.24 外歯車(工具)の測定

[42] Skiving cutter design system

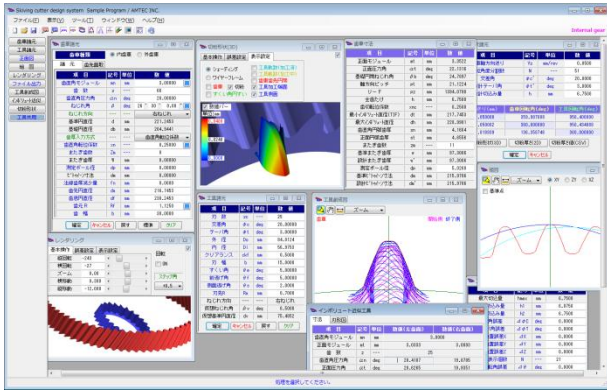


図 42.1 Skiving cutter design system

42.1 概要

円筒歯車（外歯車，内歯車）の歯切り工法の一つであるパワースカIVINGは1910年に特許が成立して100年が経過しましたが、近年、この工法が見直され国内外で専用機が上市されるようになりました。また、歯車加工も歯切り盤ではなく近年、マシニングセンタでスパイラルベベルギヤなどや特殊な歯車も加工されるようになってきました（カタログ(vol.16), 41 頁写真）。

パワースカIVINGは、工具の取り付け角（交差角，テーパ角）と工具の歯形さえ決まれば高機能のマシニングセンタで加工することができます。Skiving cutter design system は、歯車諸元と工具の取り付け角から工具（ピニオンカッタ）の歯形を生成することができるソフトウェアです。また、生成した刃形を近似インボリュート刃形として生成することができます。図 42.1 に全体画面を示します。

42.2 ソフトウェアの構成

Skiving cutter design system の構成を表 42.1 に示します。表中の○は基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

適応歯車：インボリュート平，はすば歯車（外歯車，内歯車）

表 42.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | 構成 |
|-----|-------------|-------|----|
| 1 | 歯車寸法 | 42.3 | ○ |
| 2 | 工具寸法 | 42.4 | ○ |
| 3 | 歯形（歯車，工具） | 42.5 | ○ |
| 4 | 組図（2D） | 42.6 | ○ |
| 5 | 歯形レンダリング | 42.7 | ○ |
| 6 | 歯形創成 | 42.8 | ○ |
| 7 | 歯形出力 | 42.9 | ○ |
| 8 | 近似インボリュート刃形 | 42.10 | ○ |
| 9 | 設計データ管理 | --- | ○ |
| 10 | 切り屑形状 | 42.12 | ◎ |
| 11 | 工具兼用 | 42.13 | ◎ |
| 12 | 面取り（R，C） | 42.14 | ◎ |

○：標準ソフトウェア

◎：オプション

42.3 歯車寸法

被削歯車を内歯車としたとき歯車諸元は図 42.2 および図 42.3 のように設定します。転位係数は、直接入力する方法と、またぎ歯厚，オーバーボール（ビトゥインボール）寸法があります。なお、外歯車の例を 42.11 に示します。



図 42.2 歯車諸元（内歯車の例）

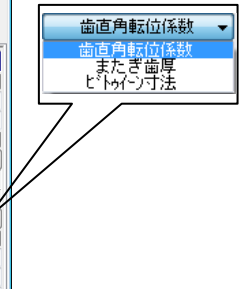


図 42.3 面取り設定

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|------------------|------------|-----|-----------|
| 正面モジュール | mt | mm | 3.3522 |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 22.1316 |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | 24.7897 |
| 軸方向ピッチ | pt | mm | 21.1224 |
| リード | pz | mm | 1394.0798 |
| 全歯たけ | h | mm | 6.7500 |
| 歯切転位係数 | xnc | --- | 0.2500 |
| 最小インボリュート直径(TIF) | dt | mm | 217.7453 |
| 最大インボリュート直径 | dh | mm | 228.9901 |
| 歯直円弧歯厚 | sn | mm | 4.1684 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 4.8556 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 11 |
| 基準またぎ歯厚 | w | mm | 97.3068 |
| 設計またぎ歯厚 | w' | mm | 97.3068 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.0260 |
| 標準ビトゥイン寸法 | dm | mm | 215.9706 |
| 設計ビトゥイン寸法 | dm' | mm | 215.9706 |

図 42.4 寸法

42.4 工具寸法

加工工具（ピニオンカッタ）の諸元を図 42.5 に示します。ここでは、歯車のねじれ角 26.5° に対し、加工時の公差角を $\phi_c=20^\circ$ としたときの例を示します。また、カッタの形状，位置，逃げ角の参考図を図 42.5a, 42.5b に示します。

本ソフトウェアでは、交差角 ϕ_c ，テーパ角 ϕ_t で工具を取り付け、図 42.2 の歯車を加工するときの工具刃形をすくい角や側面逃げ角を考慮して生成します。なお、はすば歯車加工時のピニオンカッタには、刃付け研磨が容易となるよう横すくい角（刃付け角）は与えないものとします。



図 42.5 工具諸元

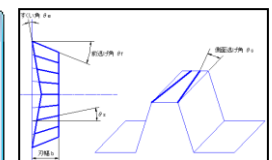


図 42.5a 逃げ角

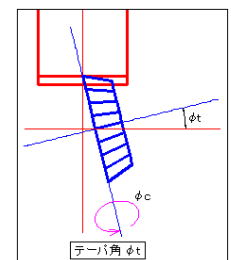


図 42.5b 位置

42.5 歯形 (歯車, 工具)

歯車歯形を図 42.6 に、ピニオンカッタの刃形を図 42.7 に示します。図 42.7 の青線刃形は、図 42.8 に示すピニオンカッタの加工端面の刃形であり水色線はピニオンカッタの上面の刃形を示します。歯形図には拡大、縮小、距離計測機能があります。

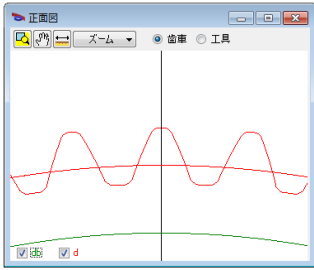


図 42.6 歯車歯形

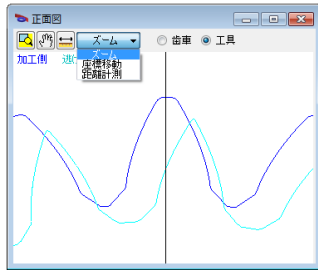


図 42.7 ピニオンカッタ

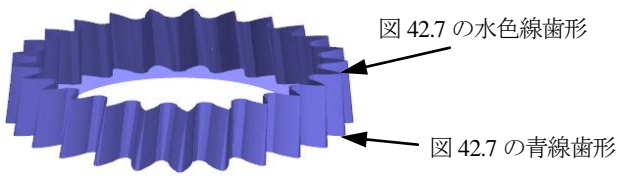
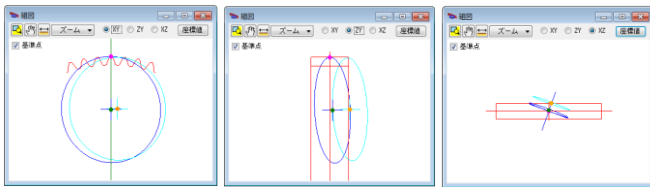


図 42.8 ピニオンカッタ (歯形レンダリング機能)

42.6 組図 (2D)

組図を図 42.9 に示します。加工座標値の工具ポイント(A, B, C) は図 42.10 に示すように歯車の中心を(0,0,0)原点としています。



(a) X-Y (b) Z-Y (c) X-Z
図 42.9 組図

| 工具ポイント座標 | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| 位置 | X座標 (mm) | Y座標 (mm) | Z座標 (mm) |
| A | 0.0000 | 115.1127 | 0.0000 |
| B | 0.0000 | 73.1841 | 2.1884 |
| C | 5.1303 | 73.9018 | 16.2745 |

図 42.10 加工座標値

42.7 歯形レンダリング

歯形レンダリング (図 42.12~42.15) では歯車とピニオンカッタのかみ合いを確認することができます。補助機能として工具の X,Y,Z 方向の移動や回転機能がありますので図 42.13 のように工具と歯車のかみ合い (切削) の関係を工具刃を回転させながら確認することができます。また、図 42.15 のようにピニオンカッタのみを表示することもできます。



図 42.11 歯形レンダリング



図 42.12 工具加工端面 (切り刃) と歯車

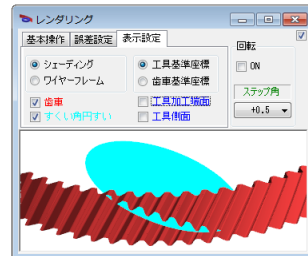


図 42.13 すくい角断面と歯車



図 42.14 ピニオンカッタ

42.8 歯形創成図

歯形創成図の設定画面を図 42.15 に示します。ここでは、粗加工時の工具切り込み量を 5mm、仕上げの切り込み量を 6.75mm としたときの歯形創成図を図 42.16 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|-----------------|-----|---------|
| 最大切込量 | hmax | mm | 8.7500 |
| 開始切込量 | h1 | mm | 5.0000 |
| 終了切込量 | h2 | mm | 6.7500 |
| 交差角誤差 | $\Delta \phi C$ | deg | 0.0000 |
| テーパー角誤差 | $\Delta \phi T$ | deg | 0.0000 |
| 工具位置誤差 X | ΔX | mm | 0.0000 |
| 工具位置誤差 Y | ΔY | mm | 0.0000 |
| 工具位置誤差 Z | ΔZ | mm | 0.0000 |
| 創成刃表示個数 | N | --- | 41 |
| 歯車回転角誤差 | $\Delta \theta$ | deg | 0.0000 |
| 設計交差角 | $\phi C'$ | deg | 20.0000 |
| 設計テーパー角 | $\phi T'$ | deg | 3.0000 |

図 42.15 歯形創成図設定

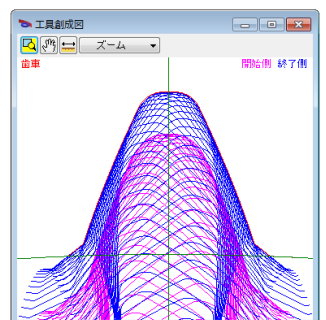


図 42.16 歯形創成

42.9 歯形ファイル出力

歯車歯形と工具刃形を DXF ファイルおよび IGES ファイルで出力することができます。図 42.17 に歯形出力設定画面を、図 42.18 に工具の CAD 作図例を示します。

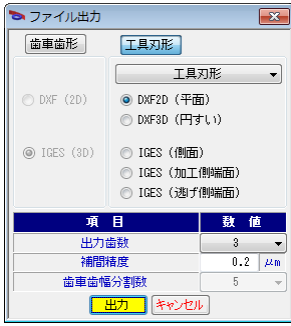
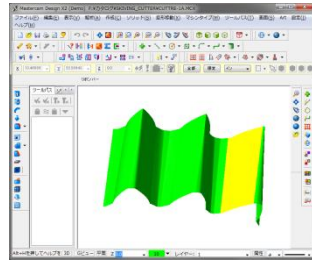
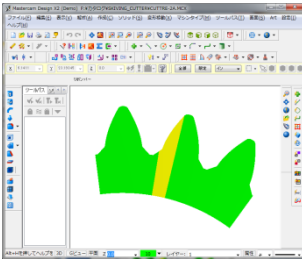


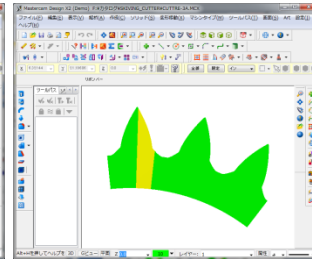
図 42.17 歯形出力設定



(a) 刃側面



(a) 刃 (前)



(b) 刃 (後)

図 42.18 CAD 作図例

42.10 近似インポリュート刃形

図 42.18 で生成した刃形をインポリュートとして近似することができますので、工具を発注（製造）する際、容易に扱えることができます。本例の図 42.18 の刃形は、図 42.19 のように左刃面の場合、圧力角は $\alpha_n=20.6265^\circ$ 、ねじれ角は $\beta=8^\circ 30'$ で近似することができます。近似した刃形と理論刃形との違いは、図 42.20 に示すようにカッタ刃先付近で 0.0007mm と僅かです。

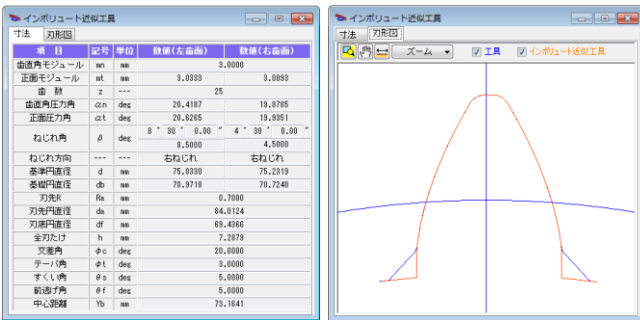


図 42.19 インポリュート近似刃形

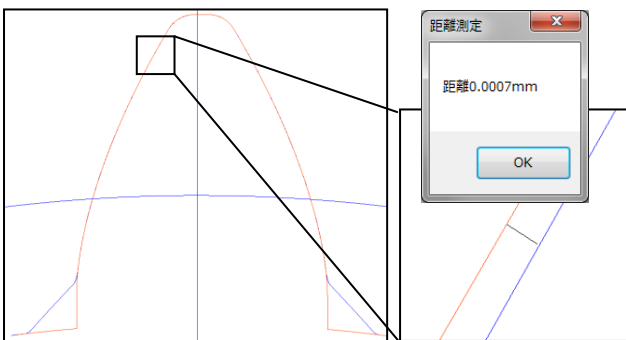


図 42.20 インポリュート近似刃形の違い (距離計測)

42.12 切り屑形状 (オプション)

図 42.21 の加工条件でスカイピング加工したときの切り屑形状を図 42.22~42.24 に示します。図 42.21 の加工条件では工具の送り量、交差角および切り込み量を任意に設定することができます。

す。図 42.22 および図 42.23 の切り屑形状は、工具の 1 刃が、切削を初めてから終わるまでの形状を示しています。図 42.24 は歯車とすくい面の状態を示し、図 42.25 は 2D 切削厚さを 100 倍で示しています。



図 42.21 加工条件

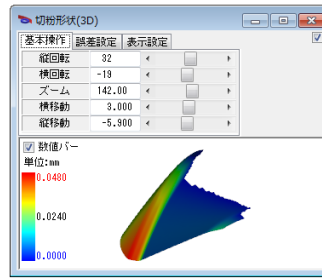


図 42.22 切り屑形状

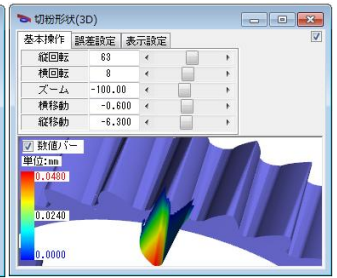


図 42.23 歯車と切り屑形状

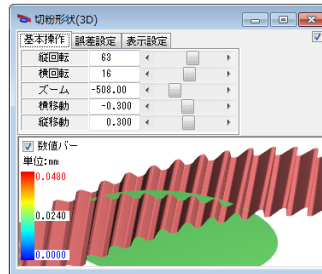


図 42.24 歯車とすくい面

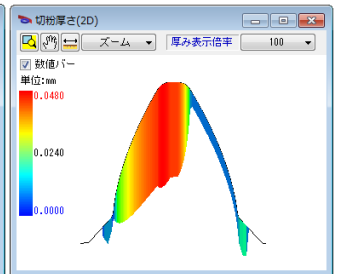


図 42.25 切削厚さ (100 倍)

図 42.21 加工条件の「切削厚さ値(csv)」で切り屑形状を図 42.24 のように csv ファイルに出力することができます。

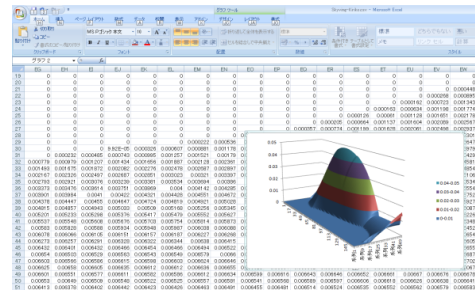


図 42.24 切削厚さ (csv)

42.13 工具兼用 (オプション)

図 42.18 の工具で図 42.2 と異なる歯車を加工するとき、この工具でどこまで兼用できるかを計算します。

図 42.25 の歯車は、図 42.2 の歯車のモジュールと圧力角は同じですが、歯数とねじれ角が異なります。また、工具の取り付け角を図 42.26 とすると図 42.27 および図 42.28 を表示することができます。そして、図 42.28 の□部分を拡大して歯車諸元 (図 42.25) の歯形との比較をすると図 42.29 のようにその差は $1.2\mu\text{m}$ である

ことが解ります。同様に左歯面を計測すると 0.7 μ m です。

以上に示したように対象歯車と異なる工具であっても交差角とテーパ角を調整することにより、歯形誤差を微小に抑えることができますので工具の兼用が可能です。ただし、本例の場合、極めて良く一致していますが、諸元や条件によっては良く一致しない場合もあります。そして、図 42.26 で設定したときの歯形レンダリング表示 (図 42.27) や、加工条件 (図 42.21) に基づく切り屑形状 (図 42.22) も解析することができます。

ここでは内歯車の例題を示しましたが、外歯車も同様に計算することができます。なお、工具兼用は図 42.30 のように第 2 画面で計算します。

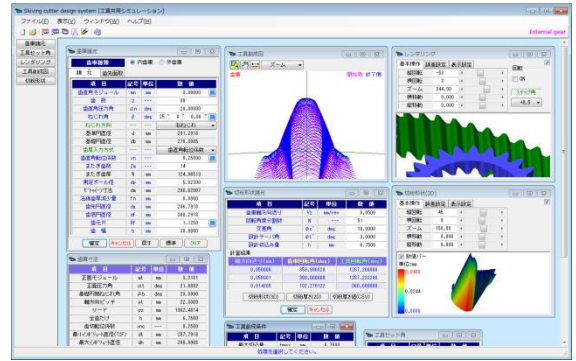


図 42.30 工具兼用画面

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|------------|-----|--------------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.00000 |
| 歯数 | z | --- | 88 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 25° 0' 0.00" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 291.2918 |
| 基準円直径 | db | mm | 270.3085 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 歯直角転位係数 |
| 歯直角転位係数 | xn | --- | 0.25000 |
| またぎ歯数 | Zm | --- | 14 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 124.98513 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.02300 |
| ピトマン寸法 | dm | mm | 288.02907 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 286.7918 |
| 歯底円直径 | df | mm | 300.2918 |
| 歯元 R | Rf | mm | 1.1250 |
| 歯幅 | b | mm | 30.0000 |

図 42.25 諸元 (工具兼用)

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|----------|-----|----------|
| 交差角 | ϕ_c | deg | 18.00000 |
| 設計テーパ角 | ϕ_t | deg | 3.00000 |

図 42.26 工具セット角

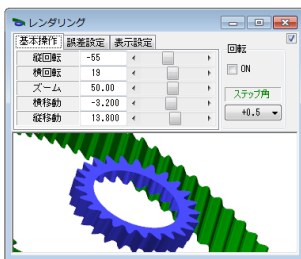


図 42.27 レンダリング

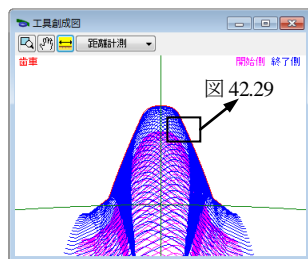


図 42.28 歯形創成

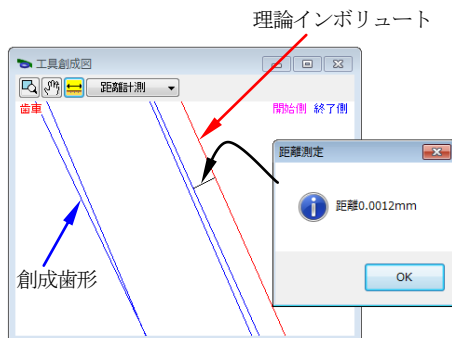


図 42.29 計測

42.14 外歯車の例

外歯車も内歯車同様、工具刃形状、切り屑形状、インポリュート近似刃形を計算します。計算例を図 42.31~42.43 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|------------|-----|--------------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.00000 |
| 歯数 | z | --- | 25 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 25° 0' 0.00" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 82.7593 |
| 基準円直径 | db | mm | 76.7922 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 歯直角転位係数 |
| 歯直角転位係数 | xn | --- | 0.25000 |
| またぎ歯数 | Zm | --- | 5 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 41.75623 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.30300 |
| オナー-キ-寸法 | da | mm | 91.50713 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 90.2533 |
| 歯底円直径 | df | mm | 76.7593 |
| 歯元 R | Rf | mm | 1.1250 |
| 歯幅 | b | mm | 30.0000 |

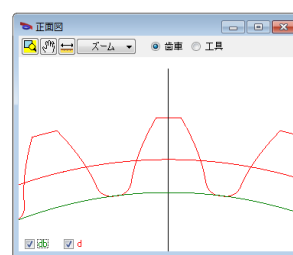
図 42.31 諸元 (面取りなし)

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-------------------|------------|-----|----------|
| 正面モジュール | mt | mm | 3.9101 |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 21.8902 |
| 基準円間ねじれ角 | β_b | deg | 23.9390 |
| 軸方向ピッチ | pt | mm | 22.3009 |
| リード | pz | mm | 557.5231 |
| 全歯たけ | h | mm | 8.7500 |
| 歯切転位係数 | xnc | --- | 0.2500 |
| 最小インポリュート直径 (TIF) | dt | mm | 78.0391 |
| 最大インポリュート直径 | dh | mm | 90.2533 |
| 歯直角円弧歯厚 | sn | mm | 5.2583 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 5.8019 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 5 |
| 基準またぎ歯厚 | w | mm | 41.7562 |
| 設計またぎ歯厚 | w' | mm | 41.7562 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 5.3030 |
| 基準オナー-キ-寸法 | dm | mm | 91.5071 |
| 設計オナー-キ-寸法 | dm' | mm | 91.5071 |

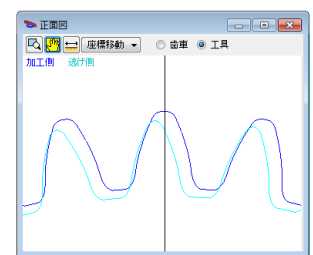
図 42.32 寸法

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------|------------|-----|-----------|
| 刃数 | zc | --- | 39 |
| 交差角 | ϕ_c | deg | -20.00000 |
| テーパ角 | ϕ_t | deg | 3.00000 |
| 外径 | Do | mm | 123.4552 |
| 内径 | Di | mm | 96.4181 |
| クリアランス | ckf | mm | 0.7500 |
| 刃幅 | b | mm | 10.0000 |
| すくい角 | θ_e | deg | 5.00000 |
| 前歯角 | θ_f | deg | 5.00000 |
| 側面歯角 | θ_s | deg | 2.0000 |
| 刃先 R | Ra | mm | 1.1250 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| 仮想ねじれ角 | β_v | deg | 5.0000 |
| 仮想基準円直径 | dv | mm | 117.4489 |

図 42.33 工具諸元



(a) 歯車歯形



(b) ピニオンカット

図 42.34 歯形

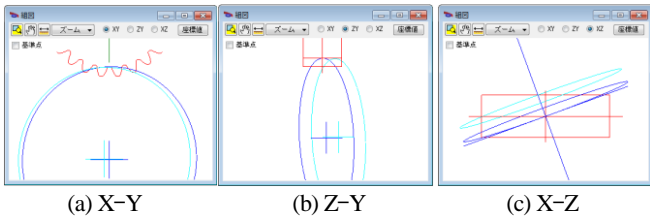


図 42.35 組図



図 42.36 歯形レンダリング



図 42.37 切り刃と歯車



図 42.38 すくい角断面と歯車

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------|------------------|-----|----------|
| 最大切込量 | h _{max} | mm | 6.7500 |
| 開始切込量 | h ₁ | mm | 6.0000 |
| 終了切込量 | h ₂ | mm | 6.7500 |
| 交差角誤差 | ΔφC | deg | 0.0000 |
| テーパ角誤差 | ΔφT | deg | 0.0000 |
| 工具位置誤差X | ΔX | mm | 0.0000 |
| 工具位置誤差Y | ΔY | mm | 0.0000 |
| 工具位置誤差Z | ΔZ | mm | 0.0000 |
| 創成刃表示個数 | N | --- | 31 |
| 歯車回転角誤差 | Δθ | deg | 0.0000 |
| 設計交差角 | φC' | deg | -20.0000 |
| 設計テーパ角 | φT' | deg | 3.0000 |

図 42.39 歯形創成図設定

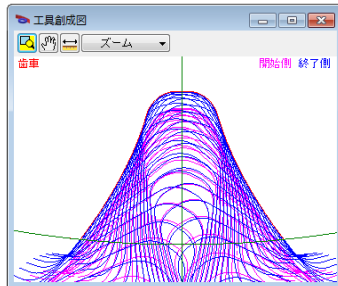
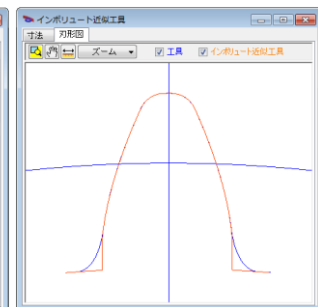


図 42.40 歯形創成

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(左歯面) | 数値(右歯面) |
|---------|----------------|-----|-------------|-------------|
| 歯車モジュール | m | mm | 3.0000 | |
| 歯数 | z | --- | 39 | |
| 歯面圧力角 | α _n | deg | 20.3157 | |
| 歯面圧力角 | α _t | deg | 20.4557 | |
| ねじれ角 | β | deg | 0° 0' 0.00" | 7° 0' 0.00" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左巻き | 右巻き |
| 基準歯径 | d | mm | 117.1508 | 117.4798 |
| 基準歯厚 | db | mm | 110.1223 | 110.4455 |
| 歯先半径 | Ra | mm | 1.1250 | |
| 歯先歯厚 | da | mm | 123.4562 | |
| 歯根歯厚 | df | mm | 109.2574 | |
| 全刃長 | h | mm | 7.5400 | |
| 交差角 | φ _c | deg | -20.0000 | |
| テーパ角 | φ _t | deg | 3.0000 | |
| すくい角 | θ _s | deg | 0.0000 | |
| 歯面圧力角 | φ _n | deg | 5.3000 | |
| 中心距離 | a | mm | 100.0197 | |

図 42.41 involute 近似刃形



| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------|------------------|--------|----------|
| 歯車軸方向送り | Vz | mm/rev | 0.0500 |
| 回転角度分割数 | N | --- | 51 |
| 交差角 | φ _c ' | deg | -20.0000 |
| 設計テーパ角 | φ _t ' | deg | 3.0000 |
| 設計切込量 | h | mm | 6.7500 |

| 計算結果 | | |
|-----------|-------------|-------------|
| 軸方向送り(mm) | 歯車回転角(deg) | 工具回転角(deg) |
| 0.050000 | -360.032298 | 230.789231 |
| -0.048396 | 360.000000 | -230.748537 |
| 0.078000 | -561.650368 | 360.000000 |

図 42.42 加工条件

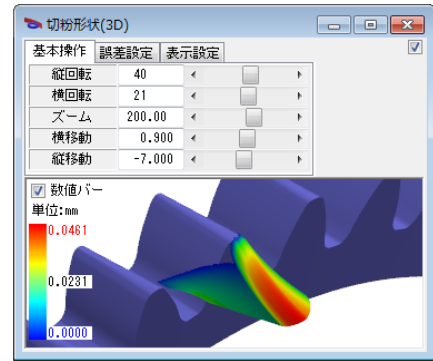


図 42.43 歯車と切り屑形状 (外歯車)

42.15 面取り C, R (オプション)

歯車の歯先面取りが必要な場合は、工具に面取り形状を与えることができます。図 42.2 の歯車諸元の面取り設定は、図 42.44 のように C 面, R 面を選択することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-------|-----|-----|--------|
| 歯先面取り | --- | --- | C面 |
| 歯先R | Ra | mm | 無し |
| たけ方向 | Cah | mm | R面 |
| 歯厚方向 | Caw | mm | C面 |
| | | | 0.5000 |

図 42.44 面取り設定

42.16 HELP 機能

操作方法を知りたい場合は[HELP]機能を使うことができます。図 42.45 で目次を選択することもできますし、図 42.46 のように不明な内容がある場合、その画面をアクティブとして[F1]を押すことで図 42.46 の説明画面を表示します。

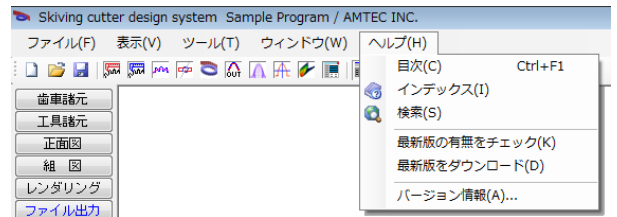


図 42.45 ヘルプ

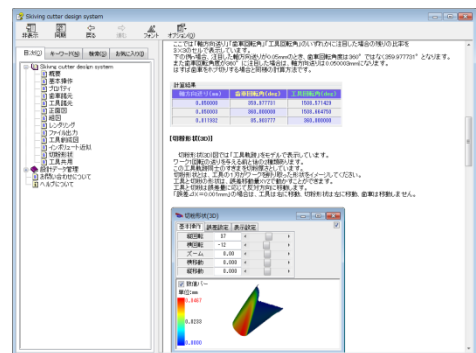


図 42.46 説明 (切り屑)

[43] 円弧歯すじ歯車設計システム



図 43.1 円弧歯すじ歯車設計システム

43.1 はじめに

円弧歯すじを持つ歯車はスラスト荷重がなく、歯の位置合わせ能力があり、かみ合い率を大きく（平歯車に対して）することができます。この歯車は古くから知られていますが広く採用されて来ませんでした。それは、図 43.2 の方法では歯すじの曲率は工具半径で決まるため自由度が制限されてしまうからだと推察することができます。例えば、小歯車と大歯車が同じ歯数であれば図 43.2 のカット直径は同じで良いのですが、歯数比が異なる場合は同じ工具を使用することができません。また、良好な歯当たりを得るためには大歯車に合わせた適切な直径（楕円となるので難しい）を持つ工具が必要です。

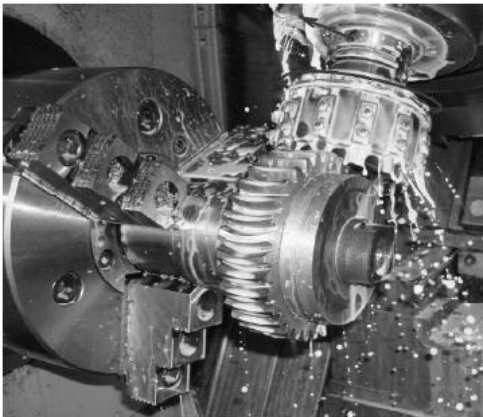


図 43.2 円弧歯すじ歯車の加工¹⁾

43.2 概要

本ソフトウェアでは円弧歯すじ（半径）を任意に設定することができますので図 43.2 のような歯すじ（平歯車に近い）ものから小さな曲率まで自由（歯幅に対する制限はあります）に設定することができます。また、円弧だけでなく V 字歯すじの歯形も生成する機能も有しています。更に、歯形修整、歯すじ修整機能を有していますので歯幅中央部のかみ合い（歯当たり）とすることもできます。

ソフトウェアで歯車諸元設定後は、正面かみ合い図、すべり率グラフ、かみ合いグラフを表示し、歯すじ入力、歯形・歯すじ修整入力（無修整も可能）をすると歯形を生成します。歯形レンダリングで、かみ合い接触線を確認することができます。そして、生成した歯形は DXF、3D-IGES ファイルで出力することができますのでマシニングセンタなどで容易に加工することができます。図 43.3 に全体画面を示します。

43.3 ソフトウェアの構成

円弧歯すじ歯車設計システムの構成を表 43.1 に示します。表中の○は基本ソフトウェアに含まれます。

適応歯車：インボリュート歯車（外歯車）

表 43.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | 構成 |
|-----|--------------|------|----|
| 1 | 歯車寸法 | 43.4 | ○ |
| 2 | 正面かみ合い図 | 43.5 | ○ |
| 3 | すべり率グラフ | 43.5 | ○ |
| 4 | かみ合いグラフ | 43.5 | ○ |
| 5 | 歯すじ曲線（円弧，V字） | 43.6 | ○ |
| 6 | 歯形修整，歯すじ修整 | 43.7 | ○ |
| 7 | 歯形レンダリング | 43.8 | ○ |
| 8 | 歯形出力 | 43.9 | ○ |
| 9 | 設計データ管理 | --- | ○ |

43.4 歯車寸法

歯車諸元は平・はすば歯車と同様で図 43.3 のように設定します。数値設定後、[確定]すると歯車寸法を図 43.4 のように表示します。ここでのかみ合い率は、正面かみ合い率を示しますが、図 43.8 で歯すじ曲線を設定した後で重なりかみ合い率を計算します。



図 43.3 諸元

| 項目(単体) | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|-------------|---------------------|-----|------------|----------|
| 基礎円直径 | db | mm | 61.0800 | 258.4155 |
| 全歯たけ | h | mm | 11.2500 | 11.2500 |
| 歯切転位係数 | xnc | --- | 0.2915 | 0.0000 |
| 最小インボリュート直径 | dt | mm | 61.1602 | 266.3973 |
| 最大インボリュート直径 | dh | mm | 78.1195 | 284.4163 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 8.9150 | 7.8540 |
| 項目(かみ合い) | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 21.5880 | |
| かみ合いピッチ円直径 | dw | mm | 65.8882 | 277.9118 |
| 歯数比 | zh | --- | 4.2308 | 0.2364 |
| 有効歯幅 | bw | mm | 50.0000 | |
| クリアランス | ck | mm | 1.3000 | 1.3000 |
| 正面かみ合い率 | ϵ_{α} | --- | | 1.3915 |
| すべり率 | σ_1 | --- | -2.6893 | 0.7285 |
| すべり率 | σ_2 | --- | 0.6228 | -1.6510 |
| 正面法線バックラッシ | Jt | mm | | 0.2817 |
| バックラッシ角度 | J θ | deg | 0.5285 | 0.1249 |
| 最大接触直径 | dja | mm | 78.1195 | 284.4163 |
| 最小接触直径 | djf | mm | 61.5540 | 269.8511 |

図 43.4 寸法

43.5 歯形図, すべり率

図 43.3 で設定した歯車の正面歯形は図 43.5 のように表示することができます。歯形の拡大や回転角度などは図 43.5 に示すコントロールフォームで操作することができます。

図 43.6 のかみ合いグラフは、ピニオンとギヤの作用線の関係を示すもので図 43.6 の歯形図と連動することができます。また、図 43.7 にすべり率グラフを示します。

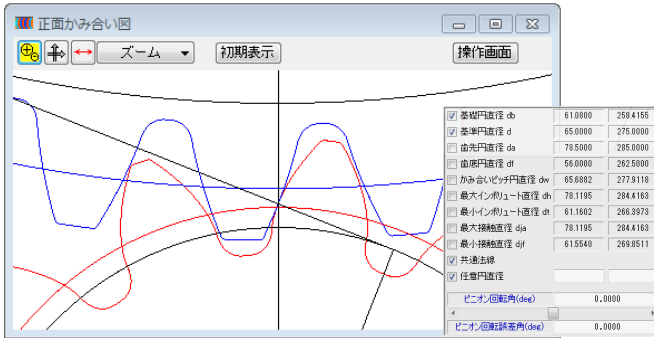


図 43.5 歯形



図 43.6 かみ合いグラフ

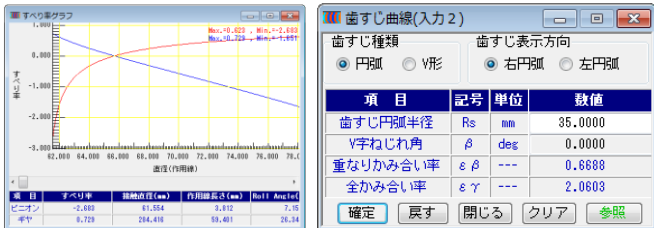


図 43.7 すべり率

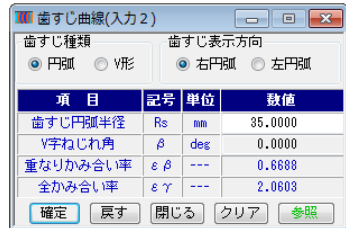
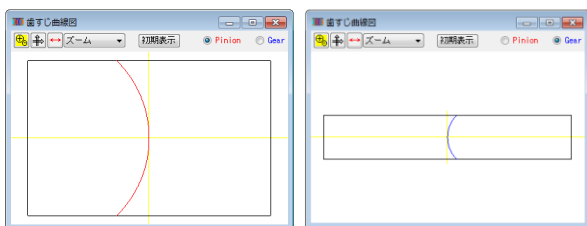


図 43.8 歯すじ曲線設定

43.6 歯すじ曲線

歯すじ曲線を図 43.8 で設定します。ここでは、歯すじの種類(円弧とV字の2種類)と円弧の方向(ピニオンを基準として歯車中心軸に対して右側に位置する場合、右円弧とする)を選択します。ここでは「円弧」を選択し、歯すじ半径を $R_s=35\text{mm}$ (歯すじ半径の最小値は $R_{\text{min}}=b/2$) とすると、重なりかみ合い率は $\epsilon_\beta=0.669$ となることから全かみ合い率は $\epsilon_\gamma=2.060$ となります。歯車正面を観察したときの円弧歯すじ図を図 43.10 に示します。また、歯すじ曲線をV形とすると、図 43.11 のように円弧 (R_s) とねじれ角 (β) を設定します。設定例と歯すじ曲線図を図 43.11 に示します。



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 43.10 歯すじ曲線図(円弧)

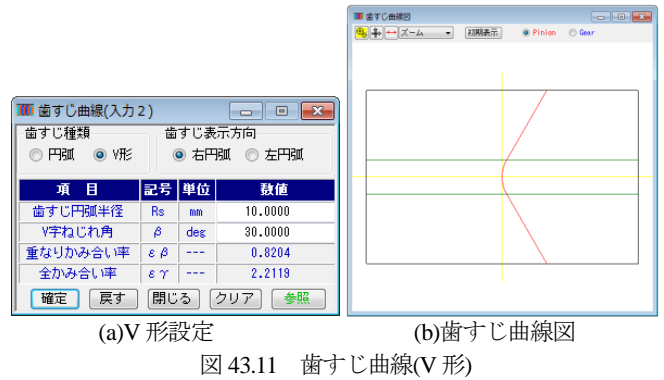


図 43.11 歯すじ曲線(V形)

43.7 歯形・歯すじ修整

歯形・歯すじ修整は、図 43.12 で選択し、歯形修整を図 43.13 で、歯すじ修整を図 43.14 で設定することができます。図 43.15 に歯形・歯すじ修整の参照図を示します。

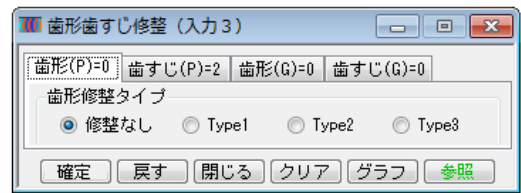


図 43.12 歯形・歯すじ修整



(a)Type1 (b)Type2 (c)Type3
図 43.13 歯形修整



(a)Type1 (b)Type2 (c)Type3
図 43.14 歯すじ修整

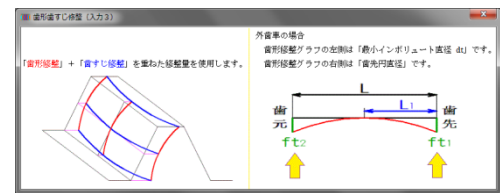


図 43.15 歯形・歯すじ修整の参照図

例として、図 43.14(b)のようにピニオンに歯すじ修整を与えたとき、図 43.14 の「グラフ」で図 43.16 を示しますので与えた修整量を確認することができます。

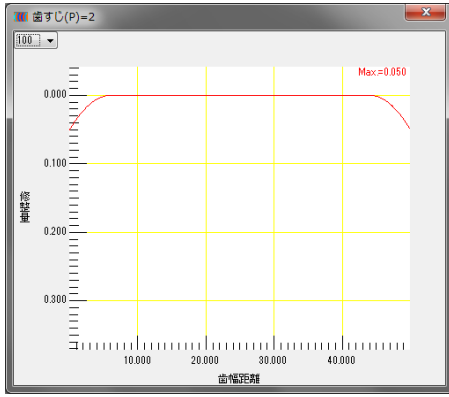


図 43.16 歯すじ修整 (100倍)

43.8 歯形レンダリング

図 43.17 の無修整の歯形レンダリングでは、歯幅両端まで接触線を確認することができますが、図 43.18 の歯すじ修整を与えた歯形では、歯幅両端部で接触線を認めることができません。また、図 43.19 では食い違い誤差 ($\angle \alpha = 0.02^\circ$) を与えた場合の歯形レンダリングでは接触線が歯幅の片方に寄っていることが解ります。図 43.20 に V 形歯すじの歯形レンダリングを示します。

歯形レンダリングでは、観察角度、回転角度、軸誤差、接触歯面を任意に設定することができます。また、自動回転機能で接触線を連続して観察することができます。

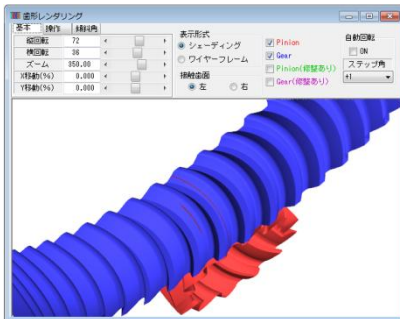


図 43.17 歯形レンダリング (無修整)

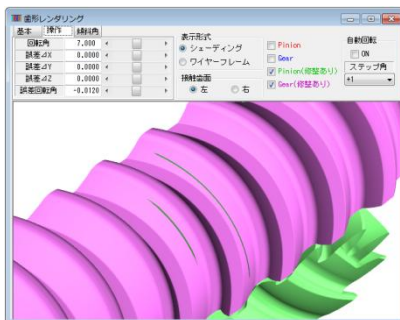


図 43.18 歯形レンダリング (歯すじ修整)

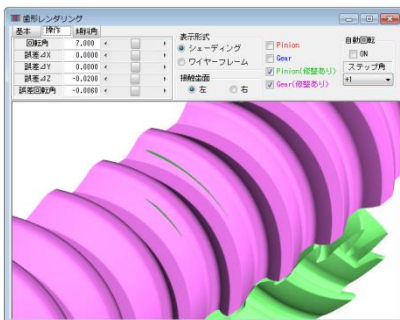


図 43.19 歯形レンダリング (軸角誤差=0.02°)

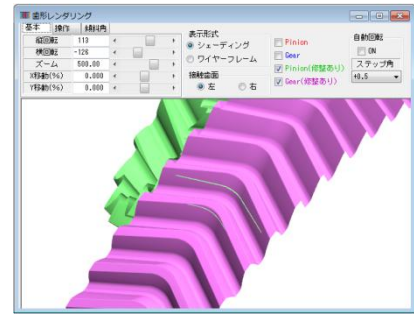


図 43.20 歯形レンダリング (V形)

43.9 歯形出力

図 43.21 に歯形ファイル出力設定画面を示します。ソフトウェアでは 2D-DXF と 3D-IGES ファイルを出力することができます。例として図 43.22 にピニオンの歯形を生成し、CAD で表示した図を示します。



図 43.21 歯形ファイル出力設定

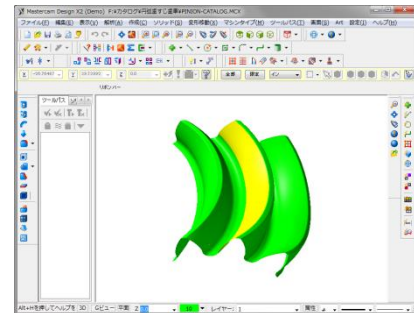


図 43.22 CAD 作図例 (ピニオン)

参考文献

- 1) A. N. Parshin, "Arched Toothed Cylindrical Gears Manufacture on CNC Lathes and Experience of their inculcation, "Thory and Pactice of Gearing", Russia, pp.151,2014

[44] SS-Worm gear design system

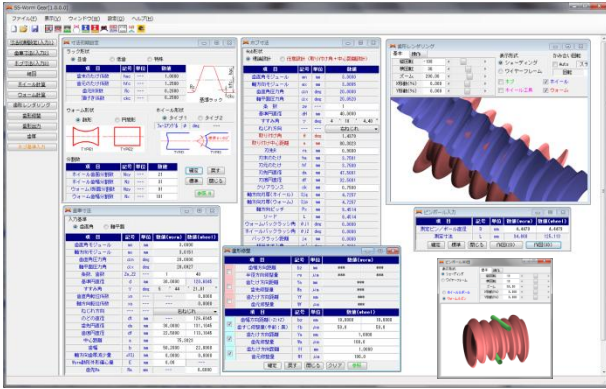


図 44.1 SS-Worm gear design system

44.1 概要

一般に使用されている円筒ウォームギヤは、図 44.35 のように接触歯数が少ないため大きな負荷容量を得ることができません。これを解決するため図 44.37 のようなヒンドレーウォームギヤや、図 44.39 のようにホイールをインボリュート歯形とした鼓形ウォームギヤがあります。しかし、ヒンドレーウォームギヤは、ウォームもホイールも歯形が特殊であり、また、図 44.40 ではかみ合い歯数を多くするということが可能ですが、ホイールの歯たけ方向の線接触ですから大きな歯面応力に耐えるには限度があります。

そこで、図 44.35 のホイールで、かみ合い歯数を多くできるウォームであれば、接触面積が広くすることができるため歯面負荷容量の増大を見込めることができます。このようなウォームギヤとして、ホブ加工を施したホイールとかみ合うウォームの歯形を持つ SS-Worm gear (Specific worm and Standard wheel) ソフトウェアを開発しました。図 44.1 にソフトウェアの全体画面を示します。

44.2 ソフトウェアの構成

SS-Worm gear design system の構成を表 44.1 に示します。表中の○は基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

表 44.1 ソフトウェアの構成

| No. | 項目 | 掲載項 | 構成 |
|-----|----------|-------|----|
| 1 | 初期設定 | 44.3 | ○ |
| 2 | 歯車寸法 | 44.4 | ○ |
| 3 | ホブ寸法 | 44.5 | ○ |
| 4 | 組図 | 44.6 | ○ |
| 5 | 歯形修整 | 44.7 | ○ |
| 6 | 歯形レンダリング | 44.8 | ○ |
| 7 | 歯厚 | 44.11 | ○ |
| 8 | 歯形出力 | 44.12 | ○ |
| 9 | ホブ基準入力 | 44.13 | ◎ |
| 10 | 回転伝達誤差 | 44.14 | ◎ |
| 11 | 設計データ管理 | — | ○ |

44.3 初期設定

図 44.2 に初期設定画面を示します。ここで設定するウォーム形状は、鼓形と円筒形を選択することができますが、この形状は、外形を表しているもので歯形ではありません。

歯形計算時の分割数は、図 44.2 の参考図のようにホイール歯面、ホイール歯幅、ウォーム断面、ウォーム歯幅の分割数を設定することができます。分割数を大きくすることで歯形を密に生成することができますが、その分、計算時間を要することになります。

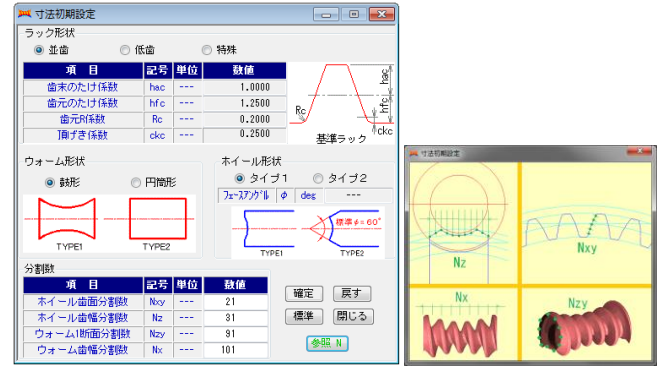


図 44.2 初期設定

44.4 歯車寸法

図 44.3 に歯車寸法の設定画面を示します。まず、入力基準は歯直角と軸平面基準を選択することができますが、ここでは、歯直角基準での例を示します。モジュールから歯厚減少量までは円筒ウォームと変わりはありません。

Worm 鼓形外形偏心量 (E) は、図 44.4 に示すようにウォームを鼓形とするとウォーム外形を調整するためのものです。



図 44.3 歯車寸法

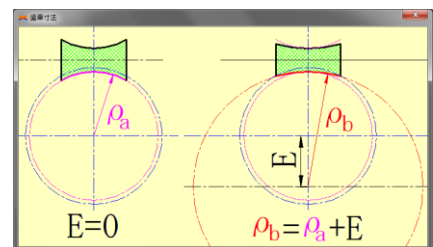


図 44.4 Worm 鼓形外形偏心量 (E)

44.5 ホブ寸法

ホイールの歯形を生成するためのホブを設定します。ホブ寸法は、図 44.5(a)のようにホブ条数とホブ基準円直径を設定することによりホブの取り付け角や取り付け中心距離が決まりますので、クリアランス (ホイールとホブ刃底) を変更するとホブの刃元のたけ、およびホブ刃底円直径が変化します。

一方、図 44.5(b)の任意設計では、取り付け角や取り付け中心距離を任意に設定することができますので、ホイールの歯形、歯すじを変更することができます。この操作により歯当たり調整をすることができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|---------------|-----|--------------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.0000 |
| 軸方向モジュール | mx | mm | 3.0085 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.0000 |
| 軸平面圧力角 | α_x | deg | 20.0520 |
| 変位 | zw | --- | 1 |
| 基準円直径 | dh | mm | 40.0000 |
| すずみ角 | γ | deg | 4° 18' 4.40" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 取り付け角 | θ | deg | 1.4379 |
| 取り付け中心距離 | a | mm | 80.3023 |
| 刃先R | ra | mm | 0.3000 |
| 刃末のたけ | ha | mm | 3.7501 |
| 刃元のたけ | hf | mm | 3.7500 |
| 刃先円直径 | da | mm | 47.5001 |
| 刃底円直径 | df | mm | 32.5001 |
| クリアランス | ck | mm | 0.7500 |
| 軸方向肉厚(ホイール) | Sjg | mm | 4.7257 |
| 軸方向肉厚(ウォーム) | Sjp | mm | 4.7257 |
| 軸方向ピッチ | Px | mm | 9.4514 |
| リード | L | mm | 9.4514 |
| ウォームバックラッシュ角 | θ_{j1} | deg | 0.0000 |
| ホイールバックラッシュ角 | θ_{j2} | deg | 0.0000 |
| バックラッシュ | ja | mm | 0.0000 |
| 相当すずみ角 | γ' | deg | 5.7381 |
| ホブ交差形状 | --- | --- | --- |
| のどの丸み半径 | rt | mm | 17.0001 |

(a)理論設計

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|---------------|-----|--------------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.0000 |
| 軸方向モジュール | mx | mm | 3.0085 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.0000 |
| 軸平面圧力角 | α_x | deg | 20.0520 |
| 変位 | zw | --- | 1 |
| 基準円直径 | dh | mm | 40.0000 |
| すずみ角 | γ | deg | 4° 18' 4.40" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 取り付け角 | θ | deg | 1.2000 |
| 取り付け中心距離 | a | mm | 80.3023 |
| 刃先R | ra | mm | 0.3000 |
| 刃末のたけ | ha | mm | 3.7501 |
| 刃元のたけ | hf | mm | 3.7500 |
| 刃先円直径 | da | mm | 47.5001 |
| 刃底円直径 | df | mm | 32.5001 |
| クリアランス | ck | mm | 0.7500 |
| 軸方向肉厚(ホイール) | Sjg | mm | 4.7183 |
| 軸方向肉厚(ウォーム) | Sjp | mm | 4.7183 |
| 軸方向ピッチ | Px | mm | 9.4866 |
| リード | L | mm | 9.4866 |
| ウォームバックラッシュ角 | θ_{j1} | deg | 0.0000 |
| ホイールバックラッシュ角 | θ_{j2} | deg | 0.0000 |
| バックラッシュ | ja | mm | 0.0000 |
| 相当すずみ角 | γ' | deg | 5.1689 |
| ホブ交差形状 | --- | --- | --- |
| のどの丸み半径 | rt | mm | 17.0001 |

(b)任意設計

図 44.5 ホブ寸法

44.6 組図

図 44.6 にホブとウォームとホイールの組図を、図 44.7 にホブとホイールのかみ合いを示します。また、図 44.8 にウォーム外形寸法(鼓形状)を示します。

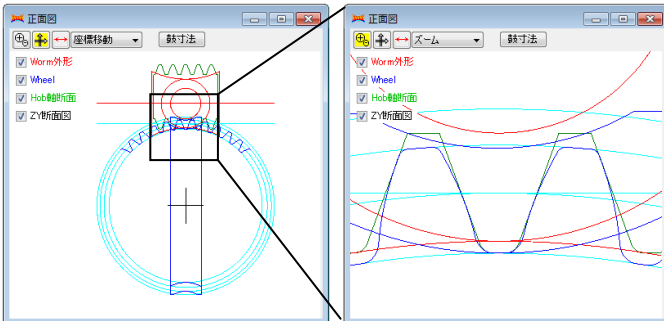


図 44.6 組図 (Hob, Worm, Wheel)

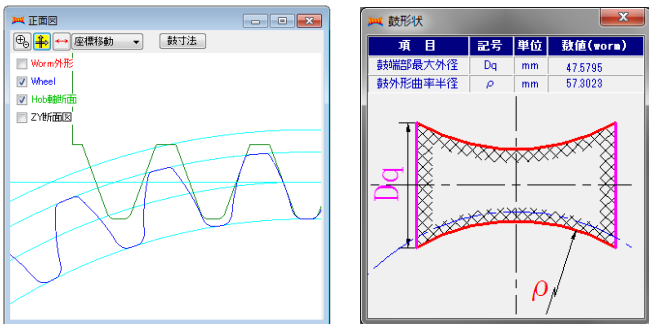


図 44.7 組図 (Hob, Wheel)

図 44.8 worm 寸法

44.7 歯形修整

歯の接触を 44.8 歯形レンダリングで確認し、歯当たりを調整したい場合に歯形修整を行います。歯形修整は、図 44.9 及び図 44.10 のようにウォームとホイールそれぞれに歯形方向、歯すじ方向の修整を設定することができます。

例えば、図 44.11 の A 部ではホイールの側端部まで接触していますが、これを図 44.9 でホイールの歯形修整、歯すじ修整を施すことにより図 44.13 のようにホイール歯幅中央に接触させることができます。また、歯面修整を与えないで歯当たりを調整する方法は、図 44.5(b)でホブの取り付け角を変更することで、歯当たり

位置を調整することが可能です。詳しくは 44.10 歯当たり調整をご覧ください。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(worm) | |
|---------------|----|---------|-----------|---------|
| 歯幅方向距離 | bw | mm | *** | *** |
| 半径方向修整量 | rw | μ m | *** | *** |
| 歯たけ方向距離 | Ya | mm | *** | *** |
| 歯先修整量 | Wa | μ m | *** | *** |
| 歯たけ方向距離 | Yf | mm | *** | *** |
| 歯元修整量 | Wf | μ m | *** | *** |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(wheel) | |
| 歯幅方向距離(-Z:+Z) | bw | mm | 10.0000 | 10.0000 |
| 歯すじ修整量(手前:奥) | fb | μ m | 50.0 | 50.0 |
| 歯たけ方向距離 | Ya | mm | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯先修整量 | Wa | μ m | 100.0 | 100.0 |
| 歯たけ方向距離 | Yf | mm | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯元修整量 | Wf | μ m | 100.0 | 100.0 |

図 44.9 歯形修整の設定

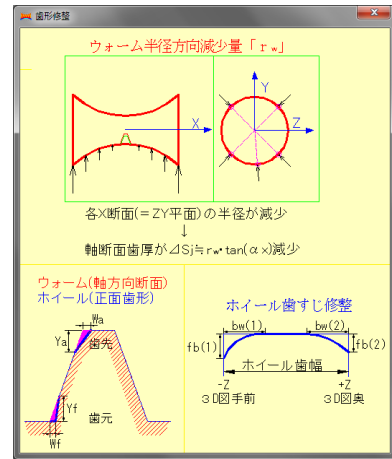


図 44.10 歯形修整の説明図

44.8 歯形レンダリング

歯形レンダリングでは、歯のかみ合いやホイール加工ホブを確認することができます。

無修整歯形の歯形レンダリングを図 44.11 に示しますが、この図の方向や拡大、縮小を図 51.12 で行うことができます。また、かみ合い誤差(X, Y, Z 軸)や回転誤差、そして交差角誤差を与え、そのときの歯当たりを確認することができます。また、図 51.12 の右上にある、かみ合い回転機能では、歯車を連続回転させることができますので、かみ合い変化を把握することができます。

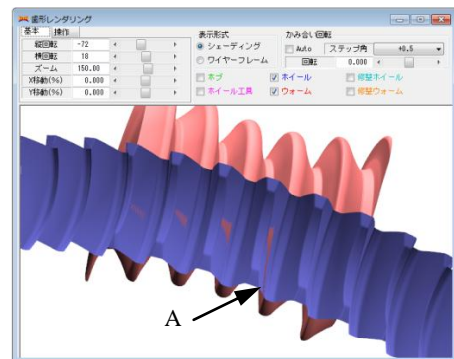


図 44.11 歯形レンダリング (無修整)

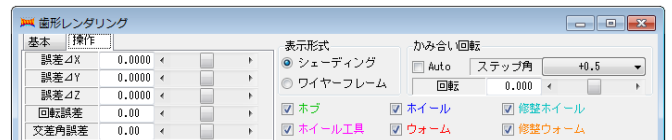
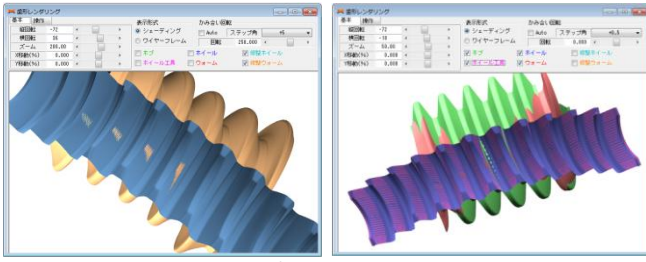


図 51.12 歯形レンダリング操作

歯形修整を与えたホイールとのかみ合いは、図 44.13(a)に示すようにホイール歯幅中央での歯当たりを呈しています。また、図 44.13(b)は、ウォームとホイール、そしてホイール加工用ホブ（運動軌跡）を全て表示したものです。

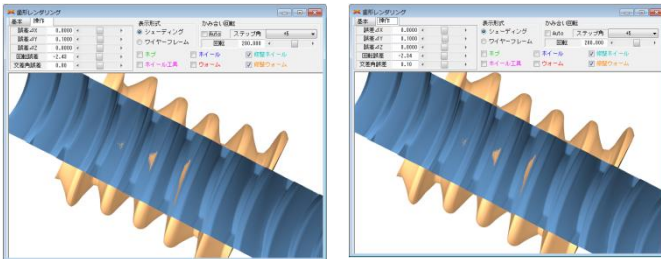


(a) $a=75.302\text{mm}$, $\Delta\phi=0^\circ$
 (b) ウォーム+工具
 図 44.13 歯形レンダリング

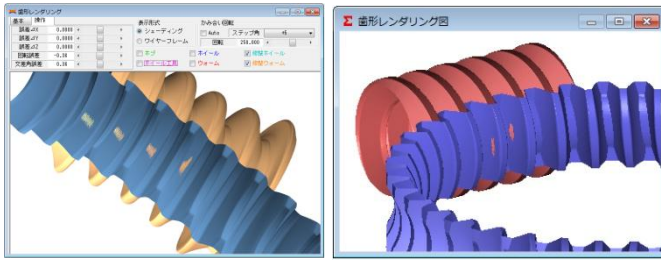
44.9 中心距離変化の影響

円弧系歯形は中心距離の変化に敏感であることから、図 44.13(a)のかみ合いが、中心距離変化および軸角変化に対し、どの程度影響を及ぼすかを確認します。

図 44.13(a)は、理論中心距離で且つ、軸角誤差 ($\Delta\phi$) が無い場合の歯当たりで 4~5 歯接触していますが、中心距離を $+0.1\text{mm}$ とした図 44.14(b)および図 44.15(b) ($\Delta a=+0.1\text{mm}$, $\Delta\phi=+0.1^\circ$) では 2~3 歯しか接触していません。しかし、図 44.15(a)のように軸角を $\Delta\phi=+0.36^\circ$ としても歯当たりには大きな変化はありません。このことより SS-Worm gear は、中心距離変化には敏感ですが、軸角誤差には鈍感であることが解ります。一方、図 44.15(b)の円筒ウォームギヤ（歯車諸元は図 44.3 と同じ、K 形ウォーム砥石直径=300mm）の接触歯数は、1~2 歯です。また、接触模様を見ると、円筒ウォームギヤは、ホイールの歯すじ方向ですが、SS-Worm gear は、ホイールの歯たけ方向の接触であるため、潤滑には有利な接触であると言えます。



(a) $a=a_0+0.1\text{mm}$, $\Delta\phi=0^\circ$
 (b) $a=a_0+0.1\text{mm}$, $\Delta\phi=+0.1^\circ$
 図 44.14 歯当たり 1



(a) $a=75.302\text{mm}$, $\Delta\phi=+0.36^\circ$
 (b) 円筒ウォーム ($\Delta\phi=0^\circ$)
 図 44.15 歯当たり 2

44.10 歯当たり調整（任意設計の例）

歯面修整を施さないで歯当たりを調整する方法として図 44.16 のようにホブ ($\phi 50\text{mm}$) の取り付け角を故意に $\theta=2^\circ$ として加工し、ウォームのみに歯形・歯すじ修整を与えた例を示します。

ウォームの歯形・歯すじ修整は、図 44.17 のようにウォームの右

側だけに修整（図 44.10 参照）を与えると、図 44.18 のようにホイールに歯面修整を与えたような歯当たりを得ることができます。

| ホブ寸法 | | | |
|--|---------------|-----|-----------------------|
| Hob形状 | | | |
| <input type="radio"/> 理論設計 <input checked="" type="radio"/> 任意設計（取り付け角+中心距離設計） | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.0000 |
| 軸方向モジュール | mx | mm | 3.0054 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.0000 |
| 軸平面圧力角 | α_x | deg | 20.0932 |
| 条数 | zw | --- | 1 |
| 基準円直径 | dH | mm | 50.0000 |
| すすみ角 | γ | deg | $3^\circ 26' 23.33''$ |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 取り付け角 | θ | deg | 2.0000 |
| 取り付け中心距離 | a | mm | 85.3023 |
| 刃先R | ra | mm | 0.9000 |
| 刃末のたけ | ha | mm | 3.7501 |
| 刃元のたけ | hf | mm | 3.7500 |
| 刃先円直径 | da | mm | 57.5001 |
| 刃底円直径 | df | mm | 42.5001 |
| クリアランス | ck | mm | 0.7500 |
| 軸方向刃厚(ホイール) | Sjg | mm | 4.7209 |
| 軸方向刃厚(ウォーム) | Sjp | mm | 4.7209 |
| 軸方向ピッチ | Px | mm | 3.4418 |
| リード | L | mm | 3.4418 |
| ウォームバックラッシ角 | θ_{j1} | deg | 0.0000 |
| ホイールバックラッシ角 | θ_{j2} | deg | 0.0000 |
| バックラッシ | ja | mm | 0.0000 |
| 相当すすみ角 | γ' | deg | 5.4998 |
| ホブ交差形状 | --- | --- | --- |
| のどの丸み半径 | rt | mm | 22.0001 |

図 44.16 ホブ寸法（任意設計）

| 歯形修整 | | | |
|-------------------------------------|---------------|----|----------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(worm) |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 歯幅方向距離 | bz | 1.0000 40.0000 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 半径方向修整量 | rW | 0.0 140.0 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 歯たけ方向距離 | Ya | 0.6750 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 歯先修整量 | Wa | 10.0 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 歯たけ方向距離 | Yf | *** |
| <input checked="" type="checkbox"/> | 歯元修整量 | Wf | *** |
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(wheel) |
| <input type="checkbox"/> | 歯幅方向距離(-Z:+Z) | bz | *** |
| <input type="checkbox"/> | 歯すじ修整量(手前:奥) | fb | *** |
| <input type="checkbox"/> | 歯たけ方向距離 | Ya | *** |
| <input type="checkbox"/> | 歯先修整量 | Wa | *** |
| <input type="checkbox"/> | 歯たけ方向距離 | Yf | *** |
| <input type="checkbox"/> | 歯元修整量 | Wf | *** |

図 44.17 ホイールの歯形・歯すじ修整

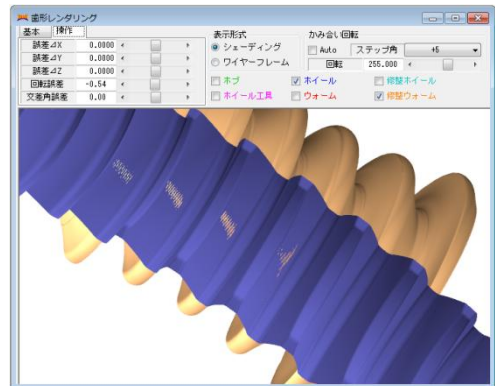


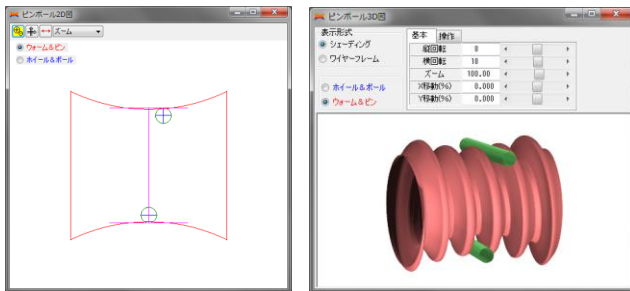
図 44.18 歯当たり 3 ($a=75.302\text{mm}$, $\Delta\phi=0$)

44.11 歯厚

SS-Worm gear の歯厚は、図 44.19 で計算することができます。測定ピン（球）は、標準値を表示しますが、任意に設定可能です。ウォームの歯厚測定には図 44.20(b)のようにピンを用い、ピンからピンまでの距離を計測します。また、ホイールは、図 44.21(b)のように球を用い球から球までの距離を計測します。

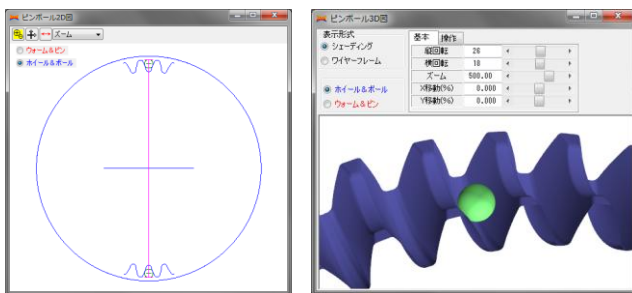
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(worm) | 数値(wheel) |
|------------|----|----|----------|-----------|
| 測定ピン/ボール直径 | D | mm | 5.0000 | 5.0000 |
| 測定寸法 | L | mm | 36.877 | 127.206 |

図 44.19 歯厚



(a) 2D 図 (b) 3D 図

図 44.20 歯厚 (ウォーム)



(a) 2D 図 (b) 3D 図

図 44.21 歯厚 (ホイール)

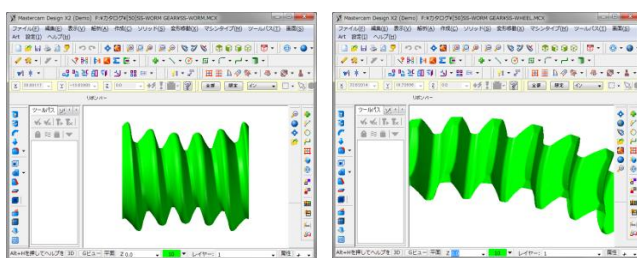
44.12 歯形出力

SS-Worm gear の歯形は図 44.22 の歯形出力フォームでウォームとホイールの歯形 (3D-IGES) を出力することができます。

図 44.23 に CAD 作図例を示します。また、ホブ歯形も 2D-DXF ファイルで出力することができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|----|-----|----|
| 出力ホイール歯数 | z | --- | 1 |

図 44.22 歯形出力フォーム



(a)SS-Worm (b) SS-Wheel

図 44.23 CAD 作図例 (3D-IGES)

44.13 ホブを基準とした設計 (オプション)

既存のホブで SS-Worm gear を設計する場合、図 44.24 でホブを

与えます。ここでは、例題として、ホイール (樹脂) とかみ合うウォームの例を示しますが、ホイールが樹脂でウォームが鋼のため強度バランスを考慮してホイールの歯厚を太く、ウォームの歯厚を薄くしています。

歯車寸法 (図 44.25) およびホブ寸法 (図 44.26) の設定は、標準設定方法と同じです。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------------|-----|-----|---------------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.0000 |
| 歯直角圧力角 | αn | deg | 12.0000 |
| 歯数 | z | --- | 1 |
| ピッチ円直径 | Pd | mm | 30.0000 |
| すずみ角 | γ | deg | 5° 44' 21.01" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 刃先円直径 | da | mm | 37.5001 |
| キョリ円径 | hd | mm | 3.7501 |
| キョリ円厚 | sj | mm | 3.5000 |
| 刃先R | ra | mm | 0.8000 |
| 全刃厚 | b | mm | 7.5002 |
| 項目(加工設定) | 記号 | 単位 | 数値 |
| worm/wheel 歯数 | z | --- | 1 |
| ウォーク外径(ホイール) | da | mm | 131.1045 |
| 外径からの距離 | hw | mm | 0.8000 |
| 取り付け角(右ねじれ+方向) | θ | deg | 0.0000 |
| のどの直径 | dt | mm | 126.6945 |
| のどの丸み半径 | rt | mm | 12.0001 |

図 44.24 既存ホブの設定

図 44.25 歯車寸法

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------------|-----|-----|---------------|
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.0000 |
| 軸方向モジュール | mx | mm | 3.0151 |
| 歯直角圧力角 | αn | deg | 12.0000 |
| 軸平面圧力角 | αx | deg | 12.0587 |
| 歯数 | z | --- | 1 |
| 基準円直径 | dh | mm | 30.0000 |
| すずみ角 | γ | deg | 5° 44' 21.01" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 取り付け角 | θ | deg | 0.0000 |
| 取り付け中心距離 | a | mm | 75.3023 |
| 刃先R | ra | mm | 0.8000 |
| 刃末のたけ | ha | mm | 3.7501 |
| 刃元のたけ | hf | mm | 3.7501 |
| 刃先円直径 | da | mm | 37.5001 |
| 刃底円直径 | df | mm | 22.4939 |
| クリアランス | ck | mm | 0.7501 |
| 軸方向円厚(ホイール) | SJg | mm | 3.5176 |
| 軸方向円厚(ウォーム) | SJp | mm | 3.5176 |
| 軸方向ピッチ | Px | mm | 9.4723 |
| リード | L | mm | 3.4723 |
| ウォームバックラッシュ角 | θj1 | deg | 0.0000 |
| ホイールバックラッシュ角 | θj2 | deg | 0.0000 |
| バックラッシュ | ja | mm | 0.0000 |
| 相当すずみ角 | γ' | deg | 5.7392 |
| ホブ交差形状 | --- | --- | --- |
| のどの丸み半径 | rt | mm | 12.0001 |

図 44.26 ホブ寸法

ここでは、ウォームの形状を、図 44.2 初期設定で円筒形としていますので、図 44.27 の組図や図 44.28 歯形レンダリングでウォームの外形は円筒形状となっています。また、図 44.29 に CAD 作図例を、図 44.30 および図 44.31 に歯厚計算結果を示します。

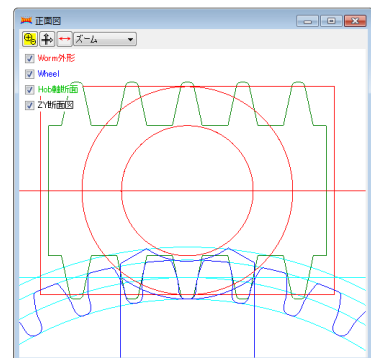
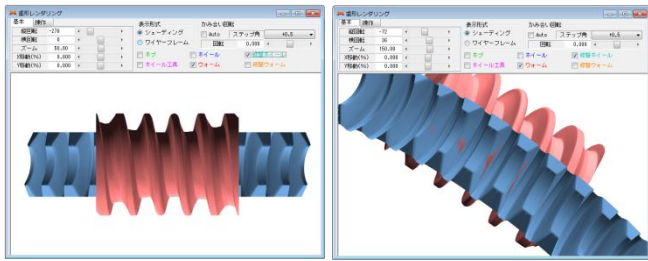


図 44.27 組図



(a)正面 (b)歯当たり

図 44.28 歯形レンダリング

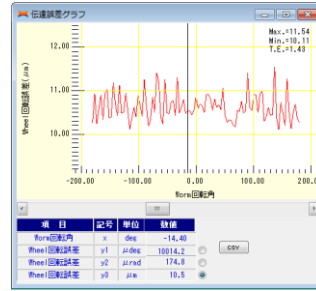
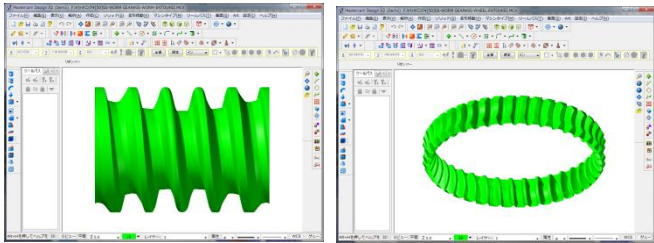


図 44.33 伝達誤差の設定



図 44.34 フーリエ解析

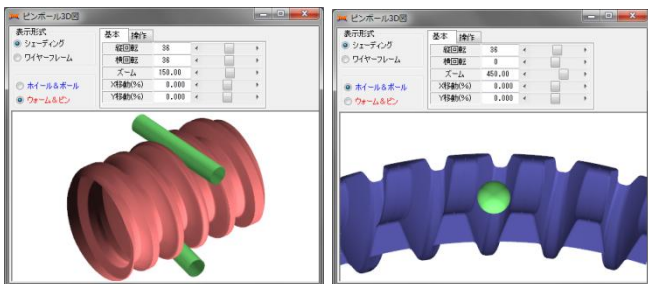


(a)SS-Worm (b) SS-Wheel

図 44.29 CAD 作図例

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(worm) | 数値(wheel) |
|------------|----|----|----------|-----------|
| 測定ピン/ボール直径 | D | mm | 6.0000 | 5.0000 |
| 測定寸法 | L | mm | 36.952 | 131.105 |

図 44.30 歯厚



(a)SS-Worm (b) SS-Wheel

図 44.31 歯厚

44.14 その他のウォームギヤ

ウォームギヤは、[44]SS-Worm gear の他に、図 44.35~44.42 のものがあり種々使い分けをすることができます。



図 44.35 円筒ウォームギヤ

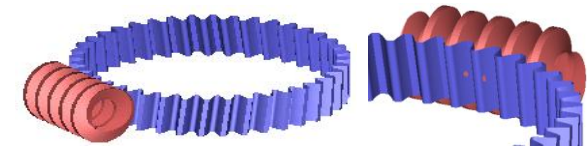


図 44.36 ウォーム×ヘリカルギヤ

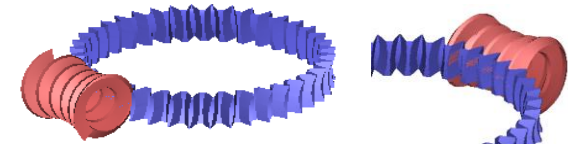


図 44.37 ヒンドレーウォームギヤ

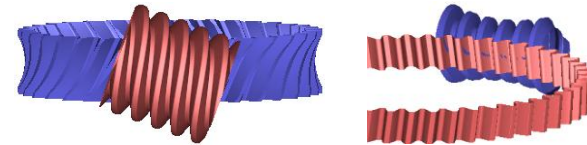


図 44.38 傾斜ウォームギヤ

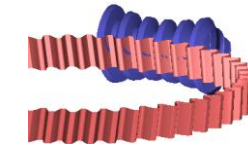


図 44.39 鼓形ウォーム

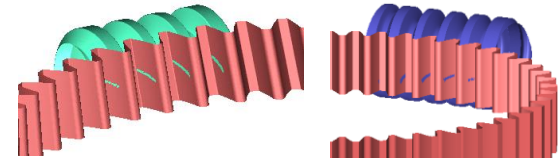


図 44.40 LCCW ウォーム×ヘリカルギヤ

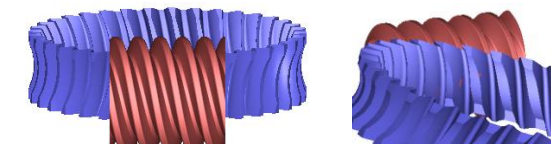


図 44.41 L-Niemann worm gear

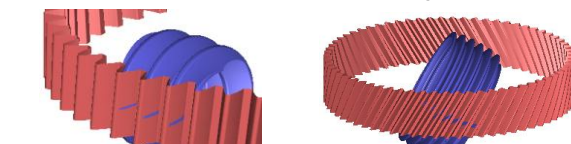


図 44.42 内歯ウォームギヤ

44.14 回転伝達誤差解析

SS-Worm gear の伝達誤差解析の設定を図 44.32 で行い、図 44.33 および図 44.34 のように回転伝達誤差、フーリエ解析をすることができます。

中心距離誤差と交差角誤差を共に 0 とした場合の回転伝達誤差は $TE=0.98\mu\text{m}$ ですが、図 44.32 のように中心距離を 0.03mm 離し、交差角誤差を $+0.01^\circ$ としたとき、回転伝達誤差は $TE=1.43\mu\text{m}$ となります。ただし、伝達誤差解析は、歯形の分割数に影響を受けるため図 44.2 の分割数を約 1.5 倍にして解析しています。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|----------------|-------|--------|
| 角度分割数 | N | --- | 100 |
| 中心距離誤差 | Δs | mm | 0.0300 |
| 交差角誤差 | $\Delta \beta$ | deg | 0.0100 |
| 回転数 | rpm | 1/min | 600.0 |

図 44.32 伝達誤差の設定

[45] CT-FEM Opera iii (歯車かみ合い応力解析)

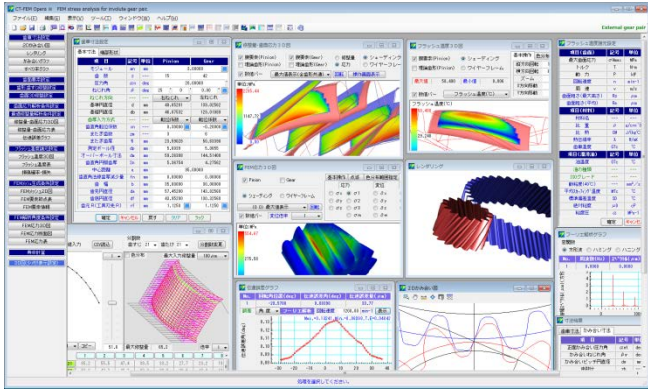
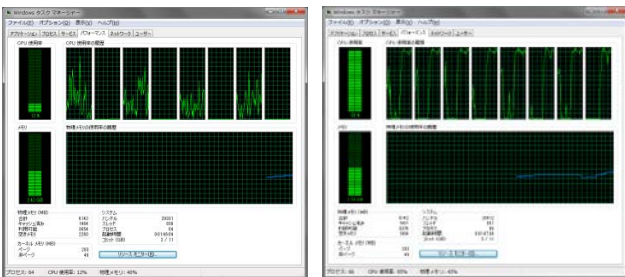


図 45.1 CT-FEM Opera iii

45.1 概要

2014年に発売したCT-FEM Operaは数々の検証を行い、数多くの実績を持つソフトウェアですが、今回、演算速度を上げるため並列処理プログラム化としたCT-FEM Opera iiiに生まれ変わりました。

例えば、 $m_n=2, z_1=z_2=20, \alpha=20^\circ, \beta=11^\circ, b_1=b_2=10$ の歯車を3D-FEM解析(要素数18335, 節点数29638)する場合、ピニオン回転角 $\theta_1=-9^\circ \sim +9^\circ$ を20分割して解析すると40個の歯車を計算することになるためCT-FEM Opera(旧)では1分45秒 $\times 40=70$ 分要します。しかし、CT-FEM Opera iii(新)では13分43秒で完了します。CPUの稼働状況は、図45.2のように並列処理をしていない場合は12%の稼働率ですが、並列処理をしている場合は95%です。ただし、比較に使用したコンピュータは、Microsoft Surface Pro3(CPU: Intel® Core™i7-4650UMemory, 8.0GB,2コア4スレッド 動作周波数1.70GHz ターボブースト時3.3GHz)です。



(a) 並列処理していない (b) 並列処理をしている
図 45.2 CPU稼働状況(タスクマネージャ)

CT-FEM Opera iiiは、歯面解析を充実させフラッシュ温度、摩擦係数、油膜厚さ、伝達誤差解析、フーリエ解析、スカuffィングや摩耗の発生確率そして寿命時間も計算することができます。また、歯面端部接触解析や最適歯面修整機能(組み立て条件下における歯面応力が最小となる歯面形状を生成)も付加していますので、端部損傷やトロコイド干渉による損傷や騒音が発生している歯車に適正な歯面修整を施すことにより解消することができます。また、アニメーション機能(応力や変位の動画)も追加していますので回転角度における応力や変位の変化を観察することができます。そのため、損傷が発生した歯車の諸元で解析すると応力分布現象を容易に把握することができますので、現状歯車の改善やユーザーへの説得には非常に有効です。更に、ソフトウェア使用時に不明な内容があれば[F1]キーを押すことでその説明が表示されますので初心者でも容易に使いこなすことができます。図45.1にソフトウェアの全体画面を示します。

歯面損傷実験の解析例を付録Iに、伝達誤差解析例を付録Jに、そして動力損失解析例を付録Kに示しますので是非ご覧ください。

45.2 ソフトウェアの構成

CT-FEM Opera iiiの構成を表45.1に示します。表中の○は、基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

適応歯車：インボリュート平、はすば歯車(外歯車, 内歯車)

表 45.1 ソフトウェアの構成

| 項目 | 機能 |
|---|----|
| <1>基準ラックの設定 | ○ |
| <2>歯車寸法 | ○ |
| <3>歯車かみ合い図 | ○ |
| <4>歯面修整 | ○ |
| <5>3D 応力分布 | ○ |
| <6>歯面評価 ⁽¹⁾ 摩擦係数, 油膜厚さ, 発熱量, 損失動力, PV 値, PVT 値 | ○ |
| <7>スカuffィング発生確率 ⁽¹⁾ | ○ |
| <8>摩耗発生確率 ⁽¹⁾ | ○ |
| <9>寿命時間 ⁽¹⁾ | ○ |
| <10>効率 ⁽¹⁾ | ○ |
| <11>3D-FEM 歯形応力解析 | ○ |
| <12>端部解析 | ◎ |
| <13>回転伝達誤差解析, フーリエ解析, CSV | ◎ |
| <14>内歯車 | ◎ |
| <15>最適歯面修整の生成機能 | ◎ |
| <16>歯形データ出力 | ◎ |
| <17>動的起振力解析[45.20項] | ◎ |

(1)樹脂歯車には対応していません。

45.3 基準ラックの設定(ツール, プロパティ)

図45.3に設定画面を示します。

- ・歯車の組み合わせ：外歯車×外歯車, 外歯車×内歯車
- ・基準ラック：並歯, 低歯, 特殊
- ・歯先円決定の方式：標準方式, 等クリアランス方式
- ・転位係数と中心距離の関係の選択
- ・並列処理を有効にするスイッチ
- ・歯形誤差の影響を考慮するスイッチ



図 45.3 基準ラック

45.4 歯車寸法設定

歯車寸法は、各部寸法, かみ合い率, すべり率, 歯厚などを計算します。アンダーカットが発生している歯車のかみ合い率は, TIF(True Involute Form)径を基準にかみ合い率を決定します。また, 歯先にC面や丸みがある場合はCまたはRを考慮したかみ合い率を算出します。

- (1)中心距離と転位係数の関係は、以下の3種類です。
 <1>転位係数をピニオンとギヤに与え中心距離を決定
 <2>中心距離を基準として各歯車の転位係数を決定
 <3>転位係数を無視して任意に中心距離を決定

- (2)転位係数の設定方式は、以下の4種類です。
 <1>転位係数を直接入力
 <2>またぎ歯厚を入力して転位係数を決定
 <3>オーバーボール寸法を入力して転位係数を決定
 <4>転位量を入力して転位係数を決定

転位係数の入力は、転位係数を直接入力方法以外に、歯厚を基準にして転位係数を逆算することもできます。図45.4に諸元設定画面を図45.5~45.6に寸法結果を示します。



(a) 歯車諸元 (b) 面取り

図 45.4 諸元設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------------|------------|-----|----------|-----------|
| モジュール | mt | mm | 3.31018 | |
| 正面圧力角 | α_t | deg | 21.88023 | |
| 基礎円歯ねじれ角 | β_b | deg | 23.39896 | |
| リード | pz | mm | 334.5139 | 936.6388 |
| 転位量 | xm | mm | 0.9000 | -0.6000 |
| 全歯たけ | h | mm | 6.7500 | 6.7500 |
| 最小心ボリット直径(TIF) | dt | mm | 46.6316 | 139.0264 |
| 最大心ボリット直径 | dh | mm | 56.8520 | 143.2256 |
| 正面法線ピッチ | pbt | mm | 8.6500 | |
| 正面円歯厚 | st | mm | 5.9224 | 4.7176 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 3 | 7 |
| 基準またぎ歯厚 | w | mm | 23.53028 | 59.49037 |
| 設計またぎ歯厚 | w' | mm | 23.53028 | 59.49037 |
| オーバーボール径 | dp | mm | 5.0000 | 5.0000 |
| 基準オーバーボール寸法 | dm | mm | 57.35700 | 144.49264 |
| 設計オーバーボール寸法 | dm' | mm | 57.35700 | 144.49264 |

図 45.5 寸法結果 1

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-------------|----------------------|-----|----------|----------|
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 22.85269 | |
| かみ合いねじれ角 | β_w | deg | 25.15362 | |
| かみ合いピッチ円直径 | dw | mm | 50.0000 | 140.0000 |
| 歯数比 | zh | --- | 2.8000 | 0.3571 |
| 有効歯幅 | bw | mm | 30.0000 | |
| クリアランス | ck | mm | 1.1112 | 1.1112 |
| 正面かみ合い率 | ε_α | --- | 1.1258 | |
| 重なりかみ合い率 | ε_β | --- | 1.3452 | |
| 全かみ合い率 | ε_γ | --- | 2.4708 | |
| すべり率(歯先) | σ_a | --- | 0.5659 | 0.4787 |
| すべり率(歯元) | σ_b | --- | -0.9193 | -1.3035 |
| 正面法線バックラッシュ | Jt | mm | 0.2797 | |
| バックラッシュ角度 | J θ | deg | 0.69561 | 0.24843 |
| 最大接触直径 | dja | mm | 56.8520 | 143.2256 |
| 最小接触直径 | djf | mm | 47.5086 | 135.2138 |

図 45.6 寸法結果 2

45.5 2D かみ合い図, レンダリング

図45.7に正面かみ合い図を示します。補助フォームで基準円直径や作用線を作図することができます。また、歯形を拡大することも計測するこ

もできます。また、歯形レンダリングを図45.8に示します。

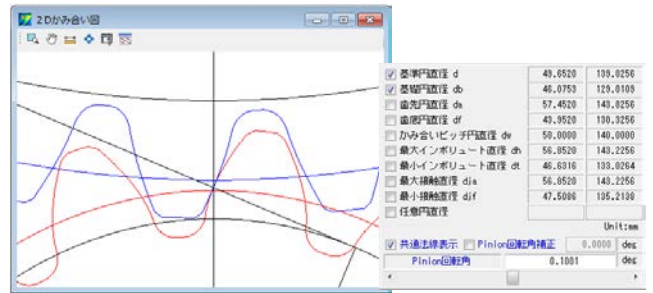


図 45.7 正面かみ合い図

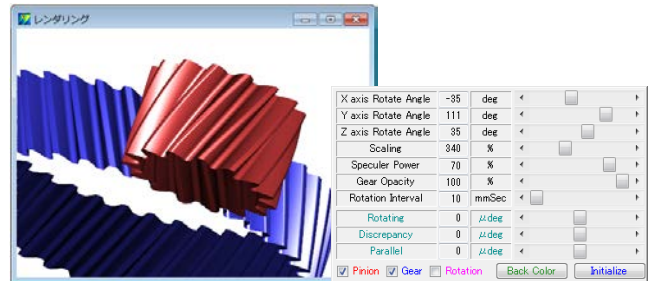


図 45.8 歯形レンダリング

45.6 かみ合いグラフおよびすべり率グラフ

図45.8にかみ合いグラフを示します。このグラフでは横軸にピニオンの作用線長さを、縦軸にギヤの作用線長さを示していますのでかみ合いの関係が良く解ります。図45.9の場合、ピニオンの接触直径が50.030mmのときギヤの接触直径は139.969mmです。また、そのときのピニオンの作用線長さは9.749.657mmで、ギヤは27.145mmです。さらに、図45.7の正面かみ合い図と連動させることができますので歯のかみ合いも把握することができます。

図45.10の回転角度計算(図45.9中の[回転角度計算]ボタン)は、接触直径、作用線長さ、ロールアングルそして回転角度の関係を計算するための補助計算機能です。また、図45.11にすべり率グラフを示します。

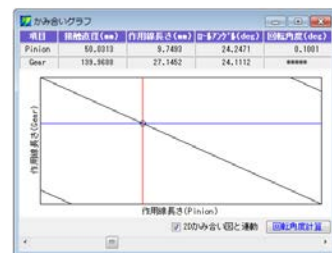


図 45.9 かみ合いグラフ

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|---------|----------|-----|------------|----------|
| 接触直径 | d | mm | 51.0000 | 139.9690 |
| 作用線長さ | L | mm | 10.9529 | 25.9632 |
| ロールアングル | ϕ | deg | 27.1893 | 23.0684 |
| 回転角度 | θ | deg | 3.0423 | ***** |

図 45.10 回転角度計算

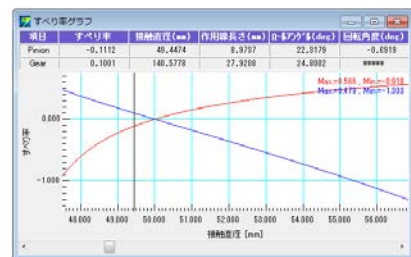


図 45.11 すべり率グラフ

45.7 歯面要素設定

図45.12に歯面要素設定画面を示します。ここではトルクとヤング率, ポアソン比そして歯形の分割数を設定します。ヤング率, ポアソン比をプラスチック材料とすることによりプラスチック歯

車も解析することができます。解析歯形は1歯、3歯、5歯を選択することができますので、例題歯車のように全かみ合い率が高い場合には5歯を選択します。また、ピッチ誤差を与えることができますので例題歯車では、ピニオンに6 μm のピッチ誤差を与えて解析する例を示します。



図 45.12 歯面要素設定

45.8 歯形歯すじ修整設定

定形の歯形修整および歯すじ修整は各々3種類 (Type1~3) あります。本例で与えるピニオンの歯形修整を図 45.13 に、歯すじ修整を図 45.14 に示します。ただし、ギヤは無修整とします。

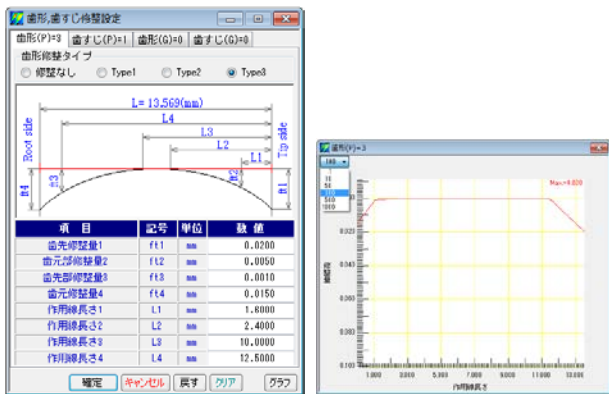


図 45.13 歯形修整とグラフ(x100)の例

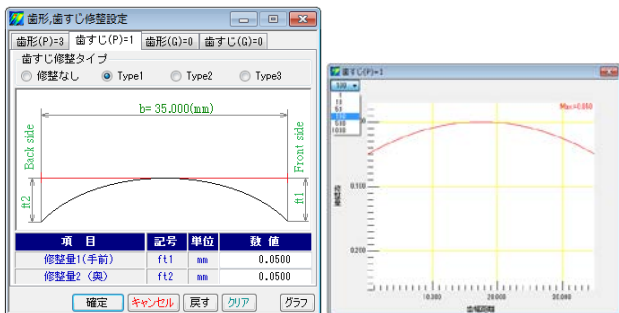
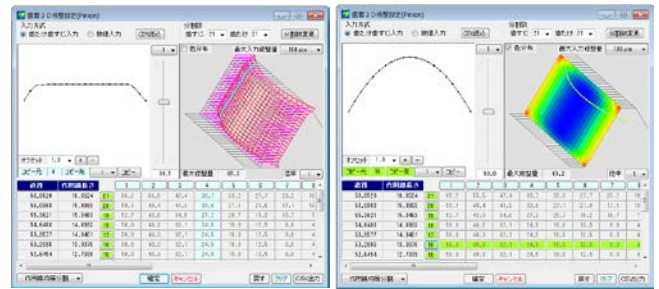


図 45.14 歯すじ修整とグラフ(x100)の例

45.9 歯面 3D 修整設定

3D 歯面修整は図 45.15 のように直接入力することもできますし、図 45.13 および図 45.14 で設定した修整を引き継ぐこともできます。図 45.15 は、図 45.13 と図 45.14 で設定した修整を 3D 表示したものです (ギヤは無修整のため省略)。また、この歯形を CSV ファイルで出力 [CSV出力] することも、歯車検査結果データ (CSV ファイル) を読み込む [CSV読み込] こともできます。

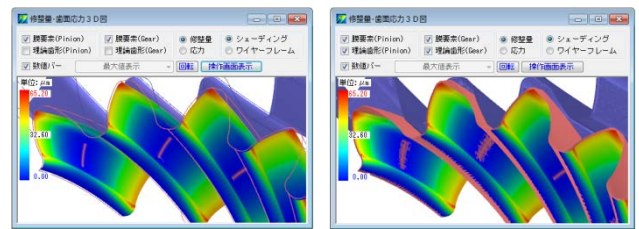


(a) 設定&表示画面 (b)色分布

図 45.15 歯面修整

45.10 修整量・歯面応力 3D 図

図 45.15 で設定した歯形を 3D 図で確認することができます。補助フォームで歯車を回転、ズームすることができます。中心距離誤差や組み立て誤差角度を与えたときの歯当たりを確認することができます。図 45.16(a)は歯面修整を持つ歯形を表示したもので、(b)は、それに理論歯形 (ピニオン赤色とギヤ青色) を重ねた合わせの図です。また、図 45.17 に歯面要素メッシュモデルを示します。



(a)歯面修整 (b) 歯面修整+理論歯形

図 45.16 歯面要素

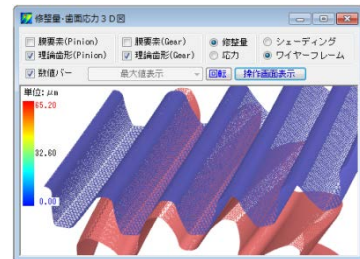


図 45.17 歯面要素メッシュモデル (図 45.12 での分割)

45.11 歯面応力解析条件設定

歯車諸元やトルクそして歯面修整を与えたときの歯面応力を解析します。解析角度範囲の設定は、1 ピッチ角度と最大接触角度の2種類あります (任意の角度設定は可能)。ここでは例題として図 45.18 のように開始角度 $\theta_s = -28.578^\circ$ 、終了角度 $\theta_e = 36.102^\circ$ (最大接触角度 $\theta_{max} = 64.68^\circ$) を 60 分割し、食い違い角誤差を $\phi_1 = 0.01^\circ$ 、平行度誤差を $\phi_2 = -0.001^\circ$ と想定し計算します。この軸角誤差は、負荷により軸受や歯車箱が歪んだときの誤差角であり、この原因により歯当たりが変化し応力分布に変化を生じさせます。

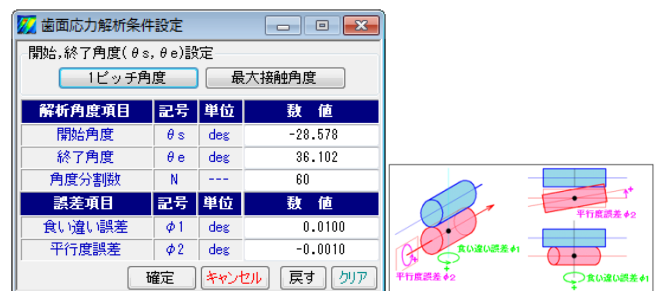
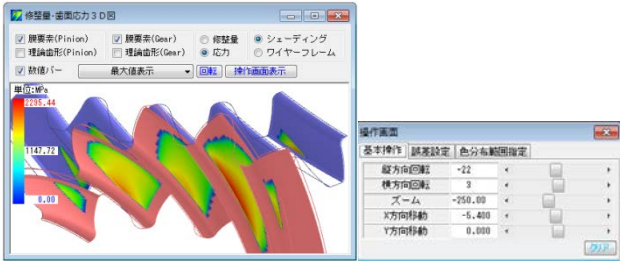


図 45.18 歯面解析設定画面と ϕ_1 と ϕ_2

45.12 歯面応力解析結果 (修整量・歯面応力 3D 図)

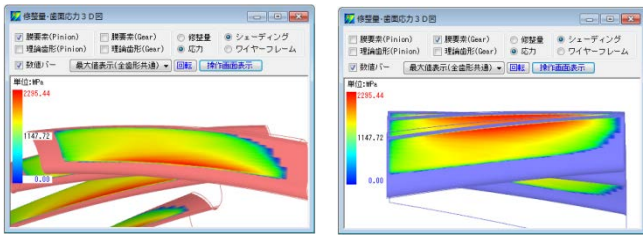
ピッチ誤差を図 45.12 で与えているため歯面応力解析結果は、図 45.19 のように歯によって応力分布が変わりますが、図 45.20 は、最大応力を全歯に示していますので全歯同じ応力分布です。

図 45.21 は、歯面応力の最大と最小を示したものであり、最大歯面応力はピニオン回転角 $\theta_p=14.177^\circ$ 時であることが解ります。



ピッチ誤差考慮, 補助フォーム

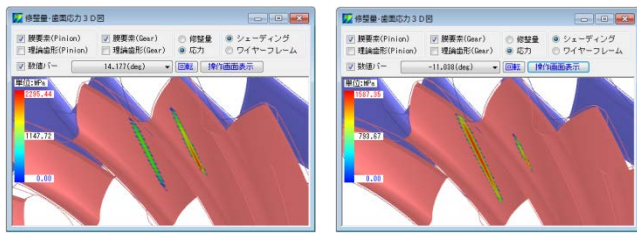
図 45.19 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2295MPa$)



(a)ピニオン

(b)ギヤ

図 45.20 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2295MPa$)



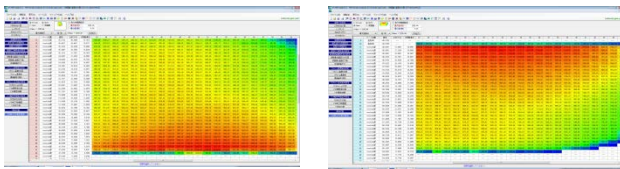
(a) $\sigma_{Hmax}=2295MPa(\theta_p=14.177^\circ)$

(b) $\sigma_{Hmin}=1587MPa(\theta_p=-11.04^\circ)$

図 45.21 歯面応力の最大値と最小値

歯面全体の応力分布 (セル表示) を図 45.22 に示します. ピニオンの場合, 歯幅方向に 98 個 (歯幅面取り部含む), 歯たけ方向に 90 個 (歯先面取り含む) の領域の応力を表示しますので歯面位置における応力値が解ります. また, ここに表示している応力値は CSV ファイル [CSV出力] で出力することができます.

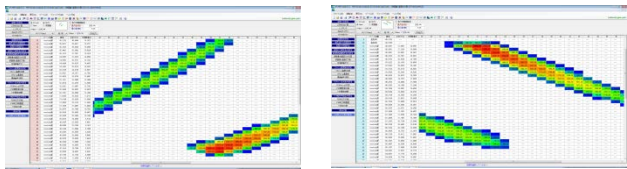
各々の回転角時の応力は, 図 45.23 のようにピニオン回転角に応じた応力分布を連続して表示することができますので応力変化と接触位置を把握することができます.



(a)ピニオン

(b)ギヤ

図 45.22 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2295MPa$)



(a)ピニオン

(b)ギヤ

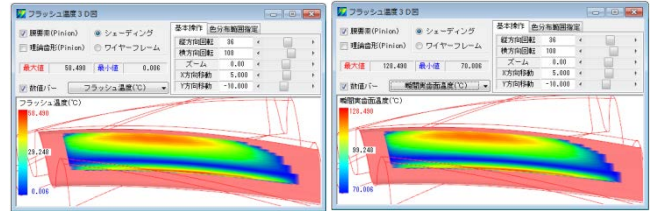
図 45.23 $\theta_p=14.177^\circ$ の応力 ($\sigma_{Hmax}=2295MPa$)

45.13 フラッシュ温度, 摩擦係数, 油膜厚さ 他

フラッシュ温度を計算するときの設定画面を図 45.24 に示します. ここでは, 回転速度, 歯面粗さの他に材料 (熱伝導率) を選択します (図 45.25). 潤滑油の種類は鉱物油, 合成油を選択することができますが, 規格外の場合は, 任意に動粘度や油の平均温度などを設定することができます. フラッシュ温度, 摩擦係数, 油膜厚さの計算結果を図 45.26~45.33 に示します. また, スカッフ発生確率, 摩耗の発生確率を図 45.34 に示します.



図 45.24 フラッシュ温度設定画面 図 45.25 材料と潤滑油

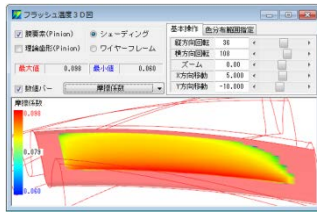


$T_{fl}=58.5(^\circ C)$

図 45.26 フラッシュ温度

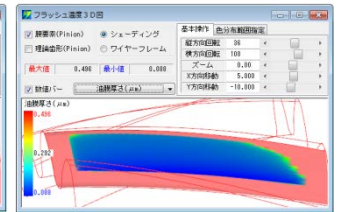
$T_{flB}=128.5(^\circ C)$

図 45.27 瞬間実歯面温度



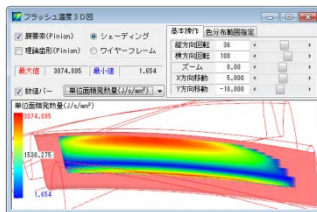
$\mu_{max}=0.098$

図 45.28 摩擦係数



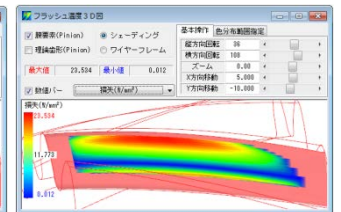
$\lambda_{min}=0.088(\mu m)$

図 45.29 油膜厚さ



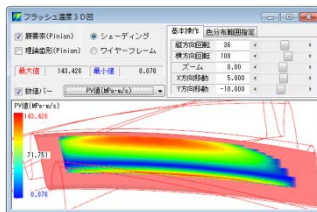
$J_{max}=3075(J/s/mm^2)$

図 45.30 発熱量



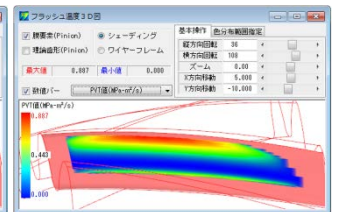
$W_{max}=23.5(W/mm^2)$

図 45.31 損失動力



$PV_{max}=143(MPa\cdot m/s)$

図 45.32 PV 値



$PVT_{max}=0.887(MPa\cdot m^2/s)$

図 45.33 PVT 値

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-------------|----------|----|-------|
| スカッフING発生確率 | η_s | % | < 5 |
| 摩耗の発生確率 | η_f | % | 24.95 |
| 動力損失 | η_e | % | 1.39 |

図 45.34 損傷確率

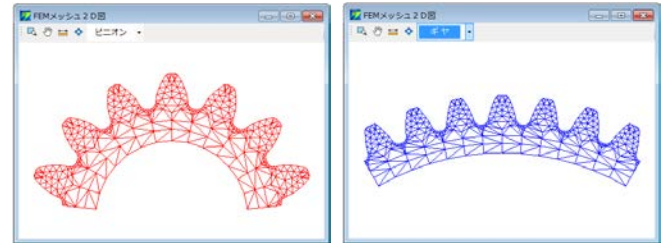
45.14 端部解析 (オプション)

45.11~45.14 項ではインポリュート歯面について解析しましたが、ここでは歯先や側面部の端部解析(図 45.35, 端部を $R=1.0\text{mm}$ と設定)をした結果を示します。

解析の結果, 図 45.36 のようにピニオン歯元とギヤ歯先に $\sigma_{H\max}=4075\text{MPa}$ もの大きな応力が発生します。フラッシュ温度はインポリュート歯面の解析では図 45.26 のように歯先部で 58.5°C だったものが端部解析では図 45.37 のようにピニオン歯元で 182°C に大きく上昇していることが解ります。

図 45.35 歯面要素設定 (端部解析)

図 45.38 メッシュモデル設定



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 45.39 2D メッシュモデル

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------------------|------------|-----|---------|--------|
| 最大面圧(線要素応力) | σ_h | MPa | 2295.44 | |
| 要素数 | | | 64497 | 53553 |
| 節点数 | | | 106875 | 88782 |
| 最大曲げ応力(σ_1) | σ_1 | MPa | 554.67 | 637.38 |
| 最大曲げ要素番号 | | | 37762 | 33212 |

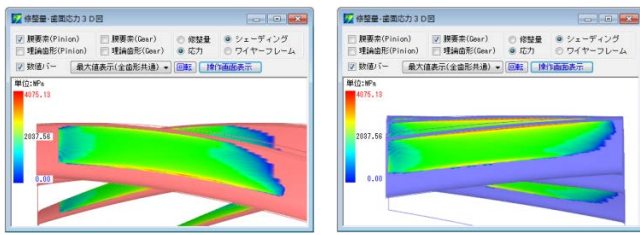
図 45.40 FEM 要素情報

| 節点番号 | X | Y | Z |
|------|---------|--------|---------|
| 1 | -20.728 | 0.097 | -15.441 |
| 2 | -20.728 | -0.000 | -15.111 |
| 3 | -20.728 | -0.000 | -15.004 |
| 4 | -20.728 | -0.070 | -15.000 |
| 5 | -20.728 | 0.071 | -15.004 |
| 6 | -20.728 | 0.097 | -15.000 |
| 7 | -20.728 | -0.102 | -15.006 |
| 8 | -20.728 | 0.101 | -15.000 |
| 9 | -20.728 | -0.000 | -15.613 |
| 10 | -20.728 | -0.102 | -15.003 |
| 11 | -20.728 | 0.101 | -15.111 |
| 12 | -20.728 | 0.099 | -15.270 |
| 13 | -20.728 | 0.101 | -16.471 |

図 45.41 要素節点表

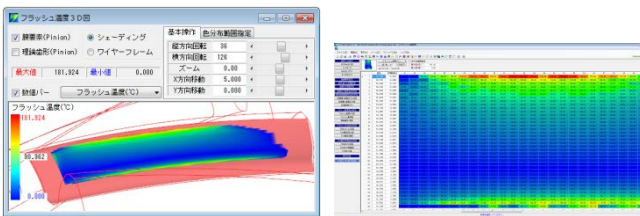
メッシュモデルは図 45.42 のようにリム・ハブモデルとして生成することができますのでプラスチック歯車のような弾性率が小さい歯車には有効です。

図 45.42 リム・ハブモデル



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 45.36 歯面応力 (端部解析, $\sigma_{H\max}=4075\text{MPa}$)



(a)歯形上表示 (b)セル表示

図 45.37 フラッシュ温度, $T_{fl}=182^\circ\text{C}$

45.15 FEM 解析

図 45.12 の解析条件で, FEM 解析するため図 45.38 でメッシュモデルを作成します。ここでは標準モデルでメッシュを作成しますが, 設定の方法は歯形を精度で決める方法と歯形を分割数で決める方法の 2 通りがあります。メッシュ分割した歯形は, 図 45.39 のように 2D メッシュモデルで確認することができます。また, 3D-FEM メッシュ要素は要素数と節点数を図 45.40 に, 節点座標を図 45.41 のように表示することができます。

次に, 図 45.38 で設定したメッシュモデルで FEM 解析をする例を以下に説明します。図 45.18 の歯面解析設定で設定した角度 ($-28.578^\circ \sim 36.102^\circ$) を図 45.43 のように設定して (角度飛ばし選択) FEM 解析します。この口のチェックには歯面応力が最も大きい $\theta_p=14.177^\circ$ (図 45.21) の角度も含めています。また, 60 分割全てを解析するとメモリ消費と時間を費やしますので必要な組み合わせの角度のみ選択し計算することが有効です。

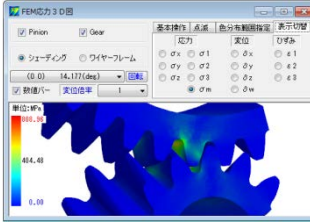
FEM で解析する項目は, 図 45.44 に示す応力と変位そしてひずみの 3 種類です。FEM 解析結果を図 45.45~45.49 に示します。変位図は, 図 45.48 のように 100 倍 (倍率選択: 1, 5, 10, 50, 100, 200, 500 倍) で表示することができます。



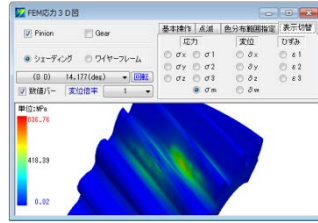
図 45.43 FEM 解析角度の設定



図 45.44 解析の種類

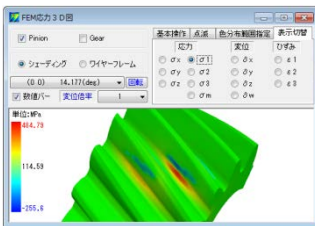


(a) 1 対歯車

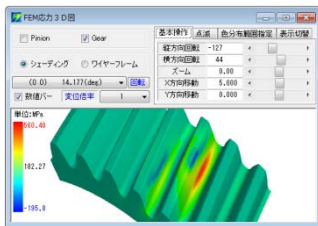


(b) ピニオン $\sigma_{1max}=837\text{MPa}$

図 45.45 σ_m (ミーゼス応力), $\theta_p=14.177^\circ$

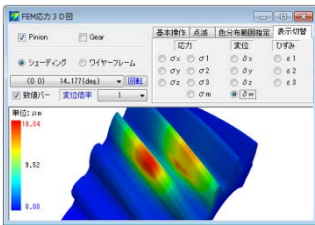


(a) ピニオン $\sigma_{1max}=485\text{MPa}$

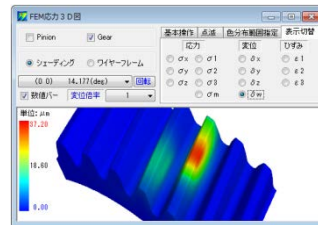


(b) ギヤ $\sigma_{1max}=560\text{MPa}$

図 45.46 最大主応力, $\theta_p=14.177^\circ$

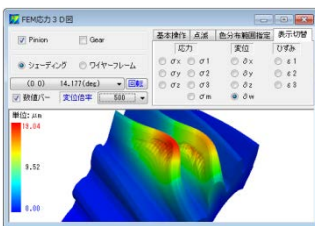


(a) ピニオン $\delta_{max}=19.0\mu\text{m}$

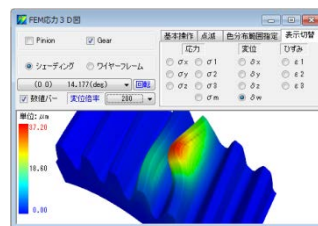


(b) ギヤ $\delta_{max}=37.2\mu\text{m}$

図 45.47 変位, $\theta_p=14.177^\circ$

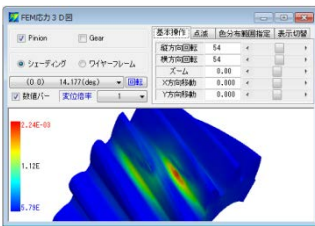


(a) ピニオン, 500 倍

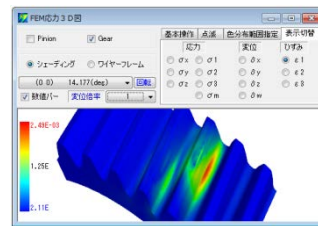


(b) ギヤ, 200 倍

図 45.48 変位 (拡大作図), $\theta_p=14.177^\circ$



(a) ピニオン $\epsilon_{1max}=2.24 \times 10^{-3}$



(b) ギヤ $\epsilon_{1max}=2.49 \times 10^{-3}$

図 45.49 ひずみ, $\theta_p=14.177^\circ$

図 45.43 ではピニオン回転角度を $\theta_p=-28.578 \sim 36.102^\circ$ (図 45.18) として解析していますのでこれを整理すると図 45.50 のようにピッチ誤差 (図 45.12, 6μm) を与えていることから歯元応力が大き

く変化していることが解ります。図 45.50 で最大値を示す角度は $\theta_p=20.75^\circ$ で、その最大応力は $\sigma_{1max(P)}=555\text{MPa}$ と $\sigma_{1max(G)}=638\text{MPa}$ です。この角度での解析一覧表を図 45.51 に示します。

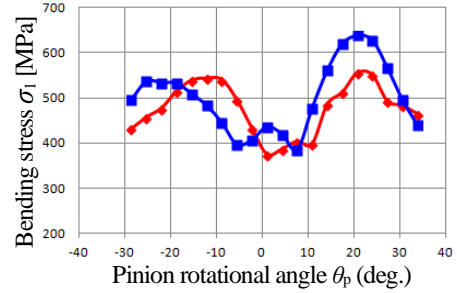


図 45.50 歯元応力変化

| 要素番号 | σx | σy | σz | σxy | σyz | σzx | σ1 | |
|------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 37761 | 483.50 | 188.82 | 184.76 | 193.41 | -31.89 | -25.76 | 544.67 |
| 2 | 37761 | 483.50 | 188.82 | 184.76 | 193.41 | -31.89 | -25.76 | 544.67 |
| 3 | 37762 | 487.13 | 91.59 | 191.44 | 195.80 | -33.62 | -40.35 | 547.84 |
| 4 | 37763 | 483.52 | 84.42 | 193.53 | 193.34 | -27.89 | -24.82 | 542.89 |
| 5 | 38117 | 482.48 | 172.57 | 184.89 | 228.34 | -4.93 | 8.82 | 541.56 |
| 6 | 37764 | 482.32 | 95.51 | 193.82 | 149.89 | -35.40 | -45.84 | 540.51 |
| 7 | 37765 | 478.80 | 134.63 | 192.19 | 199.45 | -22.80 | -17.52 | 539.27 |
| 8 | 38118 | 489.12 | 182.82 | 184.28 | 222.14 | -8.39 | 3.26 | 535.55 |
| 9 | 38115 | 392.20 | 176.23 | 187.88 | 229.89 | 8.66 | 21.48 | 539.39 |
| 10 | 37765 | 471.87 | 85.89 | 189.21 | 144.29 | -33.85 | -53.21 | 528.47 |
| 11 | 38116 | 388.37 | 188.37 | 186.78 | 222.37 | -2.72 | 16.44 | 526.85 |

図 45.51 解析結果一覧

解析結果一覧表でピニオンの最大主応力の最大値 $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$ の要素番号は 37762 ということが解りますので、この番号を図 45.52 の「点滅」に入力すると応力分布図 (○印中で▲が点滅します) で確認することができます。また、FEM 解析完了後、図 45.53 のように歯幅方向の任意の位置での応力を表示することができます。図 45.53 は歯幅中央断面位置 ($z=0\text{mm}$) における応力分布を示しています。参考のため、解析角度範囲における歯元応力分布を図 45.54 に示します。

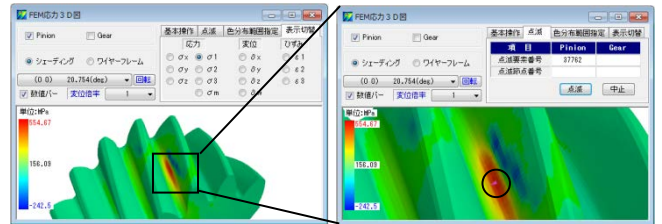
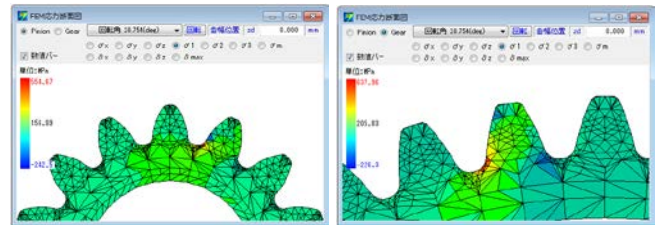


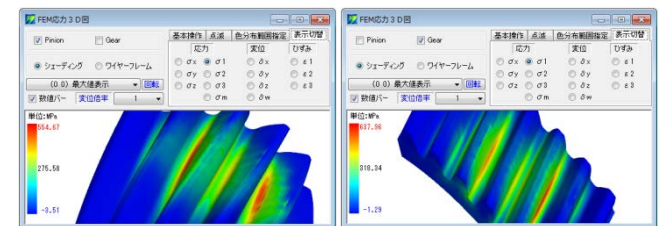
図 45.52 ピニオン σ_{1max} の位置, $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$



(a) ピニオン, $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$

(b) ギヤ, $\sigma_{1max}=638\text{MPa}$

図 45.53 FEM 断面図($z=0\text{mm}$)



(a) ピニオン $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$

(b) ギヤ $\sigma_{1max}=638\text{MPa}$

図 45.54 解析角度範囲における歯元応力

45.16 寿命時間

歯面応力解析および FEM 解析後に寿命時間を計算します。ここでは材料の歯面強さに対する許容応力値を $\sigma_{Hlim}=2000\text{MPa}$ 、曲げ強さに対する許容応力値を $\sigma_{Flim}=400\text{MPa}$ としたときの寿命時間を図 45.55 に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-----------------------|-----------------|-------|----------|----------|
| 歯面最大応力 | σ_{Hmax} | MPa | 2238.385 | 2295.440 |
| 最大曲げ応力 (σ_1) | σ_1 | MPa | 554.675 | 637.964 |
| 回転速度 | n | 1/min | 1200.000 | 428.571 |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 2000.000 | 2000.000 |
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 400.000 | 400.000 |
| 過負荷の回数 | Ne | --- | 1 | 1 |
| 材料の変化の有無 | --- | --- | 非変換材料 | --- |
| 使用状態 | --- | --- | 一般 | --- |
| 項目 (歯面) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 予想応力繰り返し係数 | ZN' | --- | 1.119 | 1.148 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | 1.34E+06 | 8.54E+05 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 1.86E+01 | 3.32E+01 |
| 項目 (曲げ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 予想応力繰り返し係数 | ZN' | --- | 1.887 | 1.595 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | 2.68E+05 | 8.26E+04 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 3.72E+00 | 3.22E+00 |

図 45.55 寿命時間

45.17 回転伝達誤差 (オプション)

図 45.18 の歯面解析設定画面で与えた回転角度内での回転伝達誤差を図 45.56 に、フーリエ解析結果を図 45.57 に示します。

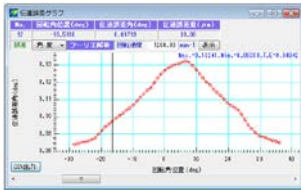


図 45.56 回転伝達誤差



図 45.57 フーリエ解析

45.18 最適歯面修整量解析 (オプション)

図 45.14 のように歯面修整を一樣に決めるのではなくトルク、ピッチ誤差そして軸角誤差を考慮したとき歯面応力が最小となる修整量を決めることができる機能です。適切な歯面修整を施すことにより発生する歯面応力を低減させることができます。

例として、図 45.4 歯車で図 45.58 のトルクで図 45.59 のように軸の食い違い誤差を $\phi_1=0.01^\circ$ 、平行度誤差を $\phi_2=0.001^\circ$ とし修整振り分け比を 0.5 としたとき歯面修整は図 45.60 のような歯面修整 (最適歯面修整で生成した歯面形状を微調整済み) を得ることができます。この歯面修整を基に歯面応力、フラッシュ温度、摩擦係数などを計算した結果を図 45.61~45.66 に、歯元応力を図 45.67 に、そして寿命時間を図 45.68 に示します。

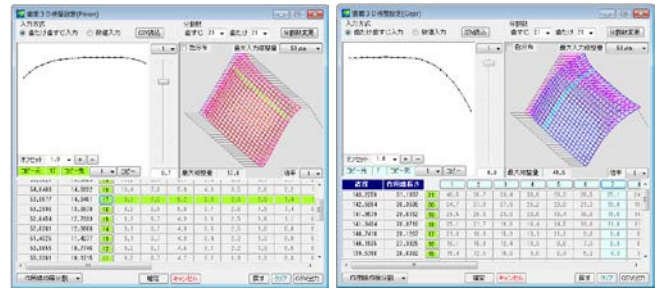
その結果、歯面応力は $\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$ (図 45.20) から $\sigma_{Hmax}=1637\text{MPa}$ に低下しているため歯面に対する寿命時間も大幅に延びています。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-------------------------|--------|-----|--------|------|
| 最小歯率 | ρ | --- | --- | --- |
| 歯元部分割数 | N | --- | 40 | 40 |
| 歯元部分割数 | N1 | --- | 40 | 40 |
| インボリュート部分割数 | N2 | --- | 40 | 40 |
| 歯先部分割数 | N3 | --- | 10 | 10 |
| 歯幅方向部分割数 | Nb | --- | 40 | 40 |
| ピッチ誤差 (μm) | | | | |
| Pinion | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Gear | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

図 45.58 トルク設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|---------------------------------|------------|-----|---------|--------|
| 食い違い誤差 | ϕ_1 | deg | 0.0100 | --- |
| 軸角ずれ量 ($0.5 b \sin \phi_1$) | Δv | mm | 0.0021 | --- |
| 平行度誤差 | ϕ_2 | deg | -0.0010 | --- |
| 歯先干渉量 ($0.5 d_n \sin \phi_2$) | Δu | mm | -0.0005 | --- |
| 1ピッチ角分誤差 | N | --- | 5 | --- |
| 繰り直し計算回数 | N | --- | 5 | --- |
| 修整量振り分け比 | γ | --- | 0.5000 | 0.5000 |
| 修整量 (下辺) | ftc | mm | 0.0001 | 0.0001 |
| 修整量 (左辺) | ftv | mm | 0.0001 | 0.0001 |
| 修整量 (右辺) | fte | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 修整量 (上辺) | ftn | mm | 0.0003 | 0.0005 |
| 修整比 (下辺) | N1a | --- | 0.8000 | 0.2400 |
| 修整比 (左辺) | N1v | --- | 0.8000 | 0.4417 |
| 修整比 (右辺) | N1e | --- | 0.4500 | 0.4417 |
| 修整比 (上辺) | N1n | --- | 0.1000 | 0.5800 |
| 修整量線タイプ | Du | --- | 中 | --- |

図 45.59 最適歯面設定



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 45.60 最適歯面修整

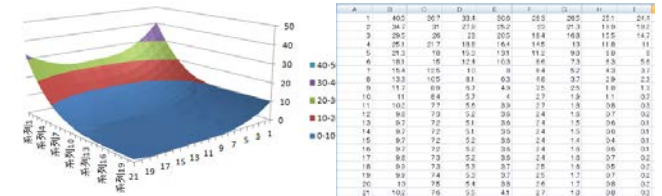
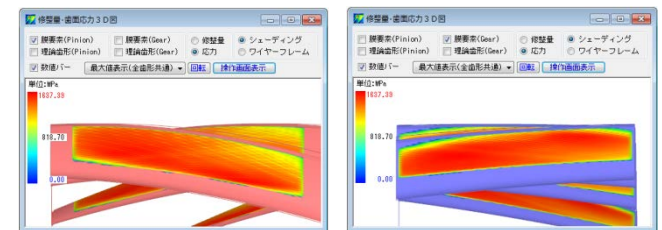
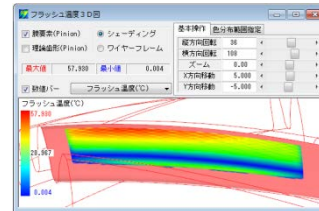


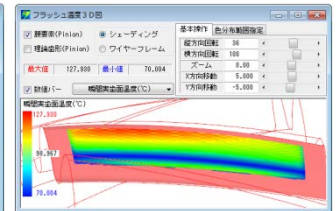
図 45.61 最適歯面修整 (Excel 表示例)



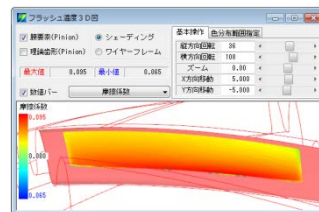
(a)ピニオン (b)ギヤ
図 45.62 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1637\text{MPa}$)



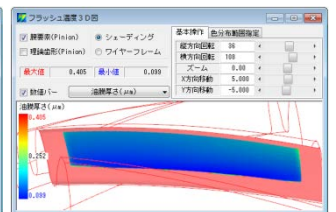
$T_n=57.9^\circ\text{C}$
図 45.63 フラッシュ温度



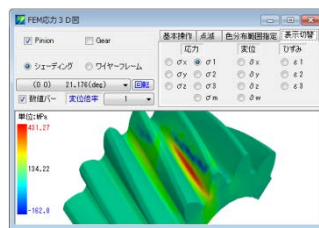
$T_{nb}=128^\circ\text{C}$
図 45.64 実歯面温度



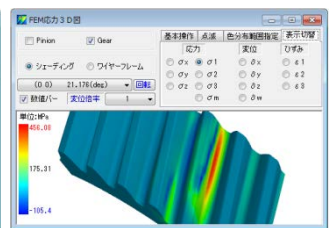
$\mu_{max}=0.095$
図 45.65 摩擦係数



$\lambda_{min}=0.099(\mu\text{m})$
図 45.66 油膜厚さ



(a)ピニオン $\sigma_{1max}=485\text{MPa}$



(b)ギヤ $\sigma_{1max}=560\text{MPa}$

図 45.67 最大主応力, $\theta_p=21.18^\circ$

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------------------|-----------------|-------|----------|----------|
| 歯面最大応力 | σ_{Hmax} | MPa | 1837.395 | 1830.865 |
| 最大曲げ応力(σ_1) | σ_1 | MPa | 431.274 | 458.083 |
| 回転速度 | n | 1/min | 1200.000 | 428.571 |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 2000.000 | 2000.000 |
| 許容曲げ応力 | σ_{Flim} | MPa | 400.000 | 400.000 |
| 過負荷の回数 | Nc | --- | 1 | 1 |
| 材料の空化の有無 | --- | --- | 非空化材料 | --- |
| 使用状態 | --- | --- | 一般 | --- |
| 項目(歯面) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 予想応力繰り返し係数 | ZN' | --- | 0.819 | 0.815 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | 1.00E+10 | 1.00E+10 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 1.39E+05 | 3.89E+05 |
| 項目(曲げ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 予想応力繰り返し係数 | ZN' | --- | 1.078 | 1.140 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | 2.21E+08 | 1.38E+08 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 3.07E+01 | 5.38E+01 |

図 45.68 寿命時間

45.19 内歯車の解析 (オプション)

「外歯車×内歯車」の解析結果を図 45.69~45.84 に示します。

図 45.69 基準ラック

図 45.70 歯車諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------------|------|-----|----------|-----------|
| 正歯モジュール | mt | mm | 3.21010 | --- |
| 基準圧力角 | at | deg | 21.80020 | --- |
| 長歯幅/かみ合い角 | atb | deg | 23.39980 | --- |
| リード | lt | mm | 304.5130 | 1226.5560 |
| 軸位置 | ax | mm | 0.30000 | 0.60000 |
| 全歯たけ | h | mm | 6.75000 | 6.75000 |
| 最小心径/ラック直径 (11F) | dlt | mm | 40.8818 | 177.8574 |
| 最大心径/ラック直径 | dht | mm | 58.8520 | 189.5183 |
| 正歯法線ピッチ | pbtl | mm | 8.58000 | --- |
| 正歯厚/歯厚 | et | mm | 6.3224 | 4.7178 |
| またぎ歯厚 | st | mm | 3 | 3 |
| 標準またぎ歯厚 | stn | mm | 23.59020 | 76.74651 |
| 設計またぎ歯厚 | stp | mm | 23.59020 | 76.74651 |
| オーバーホール径 | ob | mm | 5.00000 | 5.02001 |
| 基準オーバーホール径 | obn | mm | 59.24080 | 176.42784 |
| 設計オーバーホール径 | obp | mm | 59.24232 | 176.42789 |

図 45.71 寸法結果 1

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-------------|-----|-----|----------|-----------|
| 正面かみ合い角 | atm | deg | 19.86744 | --- |
| かみ合いねじれ角 | atv | deg | 24.69983 | --- |
| かみ合いピッチ直径 | dp | mm | 48.79800 | 176.75600 |
| 歯距比 | dr | mm | 2.98870 | 6.27270 |
| 歯厚 | br | mm | 38.80000 | --- |
| クリアランス | ck | mm | 1.65270 | 1.65270 |
| 正歯かみ合い係 | ca | --- | 1.8482 | --- |
| 重なりかみ合い係 | ca2 | --- | 1.3452 | --- |
| かみ合い係 | ca3 | --- | 2.3984 | --- |
| すべり率(歯先) | ca4 | --- | 0.3795 | 0.1030 |
| すべり率(歯根) | ca5 | --- | -0.1548 | -0.8118 |
| 正歯法線ラックラック | la | mm | 0.61932 | --- |
| バックラッシュ角 | lb | deg | 1.54000 | 0.40000 |
| 最大接触係数 | dia | mm | 54.35200 | 186.1575 |
| 最小接触係数 | dif | mm | 47.8108 | 177.8574 |
| インボリュート手番 | --- | --- | 発生しません。 | --- |
| 11F手番 | --- | --- | 発生しません。 | --- |
| トロコイド手番 | --- | --- | 発生しません。 | --- |
| フィレット(歯先)手番 | --- | --- | 発生しません。 | --- |

図 45.72 寸法結果 2

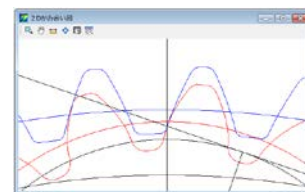


図 45.73 正面かみ合い図

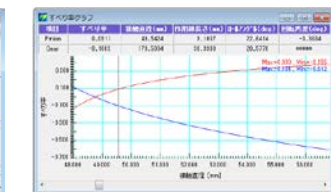


図 45.74 すべり率

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-------------|-----|-----|-----------|------------|
| 歯面要素設定 | --- | --- | --- | --- |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 最小曲率 | r | mm | --- | --- |
| 曲率半径範囲 | h | mm | --- | --- |
| 解析歯数 | --- | --- | --- | --- |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 歯面中央位置 | bx | mm | 0.00000 | 0.00000 |
| トルク | T | Nmm | 500.00000 | 1830.00000 |
| 正歯法線方向力 | F | N | 21769.8 | --- |
| ヤング率 | E | MPa | 205000.0 | 205000.0 |
| ポアソン比 | nu | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯面部分割数 | Np1 | --- | 40 | 10 |
| インボリュート部分割数 | Np2 | --- | 40 | 40 |
| 歯先/歯根部分割数 | Np3 | --- | 10 | 40 |
| 歯幅方向分割数 | Np4 | --- | 40 | 40 |
| ピッチ誤差(μm) | --- | --- | --- | --- |
| Pinion | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Gear | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

図 45.75 歯面要素設定

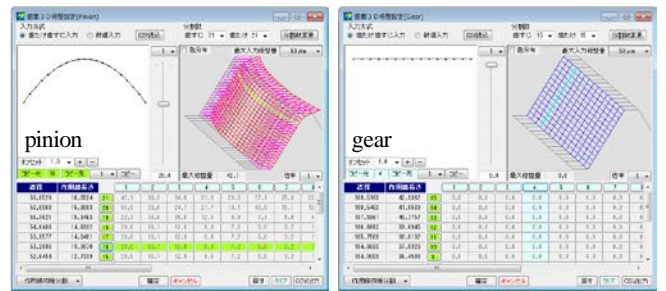


図 45.76 歯面修整

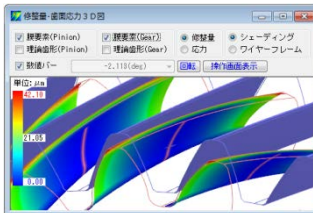


図 45.77 歯面要素 (修整)

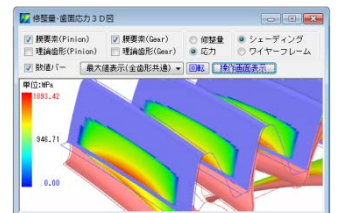


図 45.78 $\sigma_{Hmax}=1893MPa$

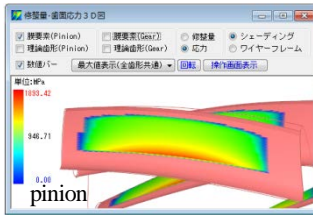
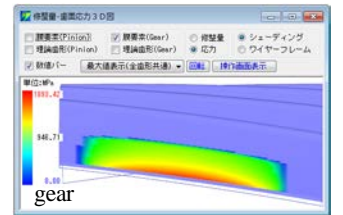
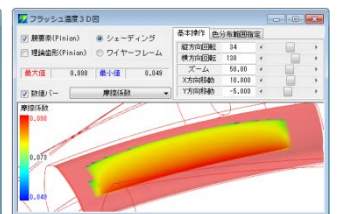


図 45.79 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1893MPa$)



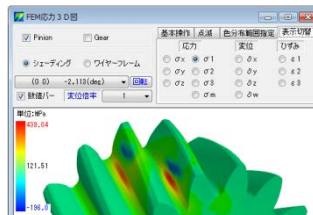
$T_f=15.9(^\circ C)$

図 45.80 フラッシュ温度

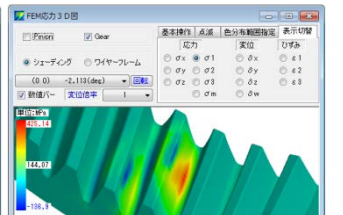


$\mu_{max}=0.098$

図 45.81 摩擦係数



(a) ピニオン $\sigma_{1max}=439MPa$



(b) ギヤ $\sigma_{1max}=425MPa$

図 45.82 最大主応力

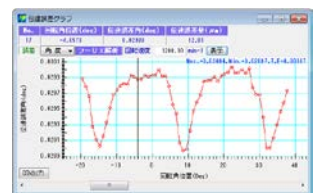


図 45.83 回転伝達誤差

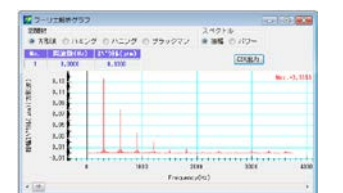


図 45.84 フーリエ解析

※1 図 45.15 で与えた歯形や最適歯面修整で生成した歯形をファイル出力 (3D-IGES) することができますので解析や加工に使用することができます。

※2 応力解析例を付録 [I] に、伝達誤差解析例を付録 [J] に、そして動力損失解析例を付録 [K] に示しますのでご覧ください。

45.20 動的起振力解析 (オプション)

高速回転機械の増加に伴い、歯車の動的挙動の解析が重要となってきたため、オプションとして動的起振力解析ソフトウェアを開発しました。はすば歯車は接触線が歯車軸に対して平行でないことから歯面の接触を3次元的に解析する必要があります。CT-FEM Operaiiiiでは図 45.85 のモデルに基づき振動解析を行い、図 45.86 のように Rotational (回転), Transverse (正面), Tilting (傾き), Axial (軸) の4種類の方向の振動加速度を出力します¹⁾。

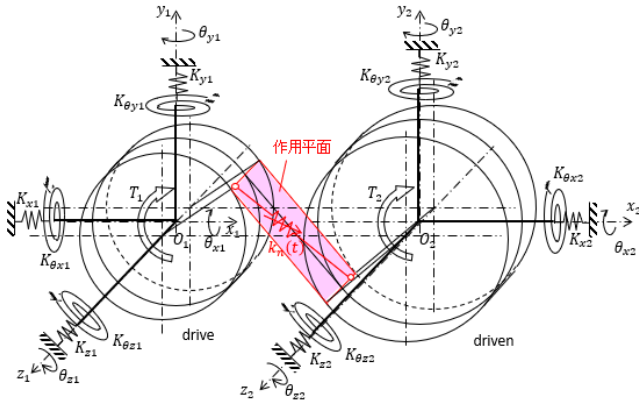


図 45.85 はすば歯車の12自由度振動解析モデル

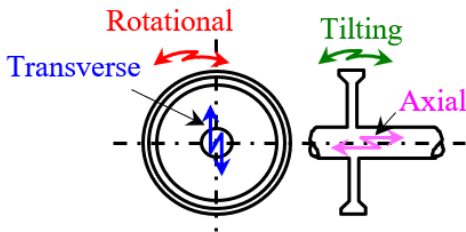


図 45.86 振動加速度成分

論文²⁾に示されている実験結果との比較で本ソフトウェアの解析結果の検証を以下に行い、その結果を図 45.87~45.103 に示します。図 45.87 の歯車諸元から図 45.90 までは基本ソフトウェアの操作と同様です。動的起振力解析を行うために図 45.91 の解析諸元で歯面間減衰比を設定しますが、ここでは鋼歯車対のため減衰比を $\zeta_g=0.07$ としています。ただし、プラスチック歯車の解析では

歯車寸法設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------------|------------|-----|-----------|-----------|
| モジュール | m | mm | 2.00000 | |
| 歯数 | z | --- | 52 | 52 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 30 | 0 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 120.08886 | 120.08886 |
| 基礎円直径 | db | mm | 110.70884 | 110.70884 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 | 転位係数 |
| 歯直角転位係数 | xn | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 9 | 9 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 52.37666 | 52.37666 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 3.3677 | 3.3677 |
| オーバーボール寸法 | dm | mm | 124.63951 | 124.63951 |
| 歯直角円弧歯厚 | sn | mm | 3.14159 | 3.14159 |
| 中心距離 | a | mm | 120.08886 | |
| 歯直角法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯幅 | b | mm | 20.00000 | 20.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 124.08886 | 124.08886 |
| 歯底円直径 | df | mm | 115.08886 | 115.08886 |
| 歯元 R(工具刃先 R) | rf | mm | 0.7500 | 0.7500 |

図 45.87 歯車諸元 (検討歯車 1)

別途減衰比を設定する必要があります。また、回転速度の上下限值と解析回転分割数、x, y, z 方向および回転方向 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 方向の減衰比を設定します。

歯面要素設定

端部接触解析設定
 端部解析有効 (端部曲率設定) 端部解析無効

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|--------|--------|----|--------|------|
| 最小曲率 | ρ | mm | --- | --- |
| 曲率修整範囲 | h | mm | --- | --- |

解析歯数
 1歯 3歯 5歯 7歯

解析箇所
 歯元+歯面+歯先 歯面のみ

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-------------|-------|-----|----------|----------|
| 歯幅中央位置 | bm | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| トルク | T | N*m | 147.0938 | 147.0938 |
| 正面法線方向力 | F | N | 2657.4 | |
| ヤング率 | E | MPa | 205939.7 | 205939.7 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.3000 | 0.3000 |
| 歯元部分割数 | Nh1 | --- | 20 | 20 |
| インボリュート部分割数 | Nh2 | --- | 40 | 40 |
| 歯先, 端部分割数 | Nh3 | --- | *** | *** |
| 歯幅方向分割数 | Nb | --- | 40 | 40 |

ピッチ誤差 (μm)

| | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | *** | 正:弱接触 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Pinion | *** | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | *** | |
| Gear | *** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | *** | 負:強接触 |

図 45.88 トルク, 要素などの設定

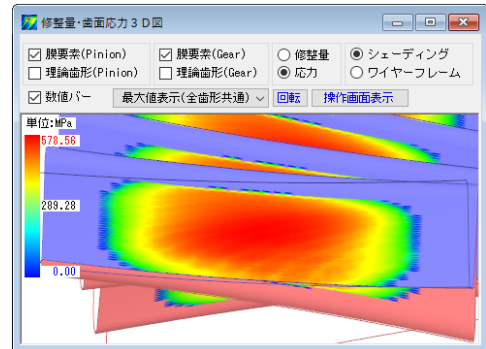


図 45.89 歯面応力, $\sigma_{Hmax}=579\text{MPa}$

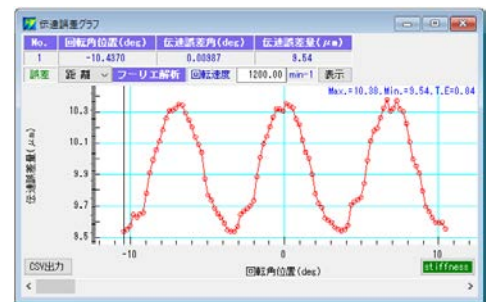


図 45.90 伝達誤差, TE=0.84 μm

動的起振力解析諸元

解析条件 歯車寸法 歯車軸寸法 軸受はね剛性

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|-----------|-------|--------------------------------|
| 歯面間減衰比 | ζ_g | --- | 0.07 |
| 回転速度(下限) | rL | min-1 | 700.00 |
| 回転速度(上限) | rH | min-1 | 3482.00 |
| 解析回転分割数 | rD | --- | 100 |
| 減衰比 方向 | x, y, z | | $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ |
| ζ | | | 0.05 0.03 0.03 0.07 |

図 45.91 動的起振力解析諸元 (解析条件)

動的起振力解析用に歯車寸法を図 45.92 のようにボス径, ボス幅および歯車材料の比重を設定します。歯車と同様に図 45.93 の

ように軸寸法を設定し、軸受のばね剛さ (KA, KB) を設定します。そして画面下の[確定]ボタンで計算を開始します。

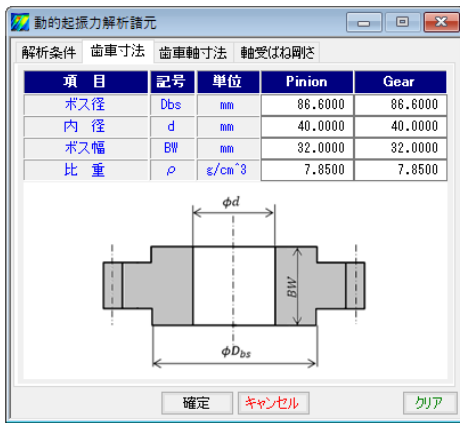


図 45.92 動的起振解析諸元 (歯車寸法)

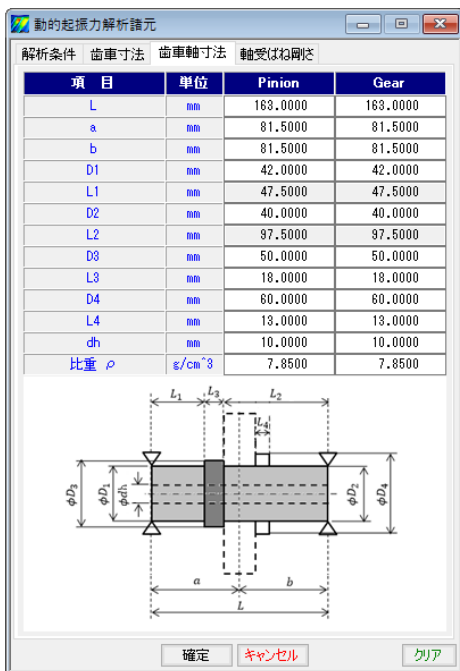


図 45.93 動的起振解析諸元 (軸寸法)

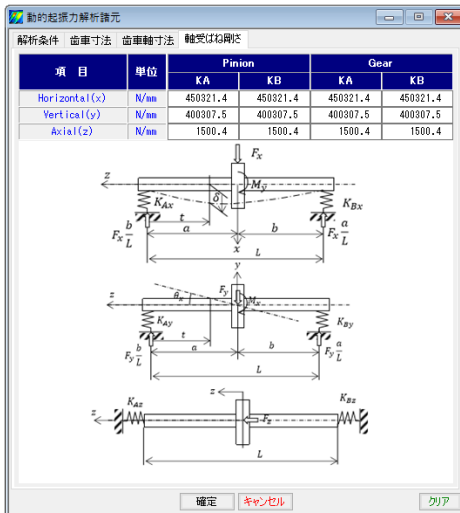


図 45.94 動的起振解析諸元 (軸受ばね剛さ)

動的起振解析後には、図 45.95~45.98 のように振動かみ合い

1 次成分表を表示することができ、円周方向の振動かみ合い 1 次成分グラフを図 45.99~45.102 に示します。そして、図 45.99 の画面上部にある [▶] ボタンで図 45.103 の音データグラフを表示し、その音を (1 次音) 聞くことができます。また、図 45.104 では回転速度に対応した小歯車と大歯車の音圧レベルグラフ (例題では同歯数のため重なっています) を表示します。

以上のように動的解析を行うことで振動・騒音の低減を図れる設計ツールとして非常に有効と考えます。解析結果の確認のため図 45.105 に論文の実験値と比較した結果を示しますが良く一致しています。なお、図 45.105 の Transverse と Tilting の東工大の実験結果は回転座標系での測定のため Z-1 次と Z+1 次に分かれて計測されますが、本解析は静止座標系での値となりますので Z 次として表示しています。



図 45.95 振動かみ合い 1 次成分表 1



図 45.96 振動かみ合い 1 次成分表 2

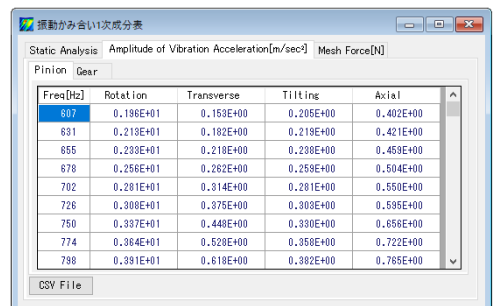


図 45.97 振動かみ合い 1 次成分表 3 (小歯車の例)



図 45.98 振動かみ合い 1 次成分表 4 (小歯車の例)

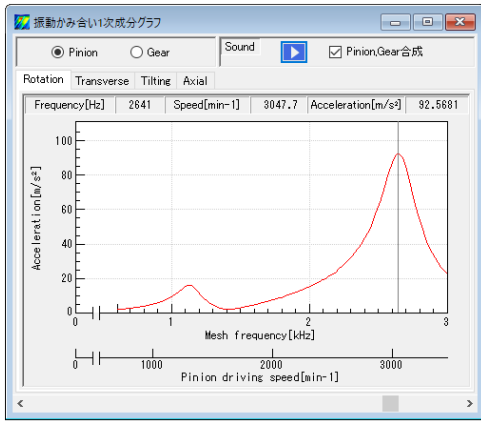


図 45.99 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Rotation)

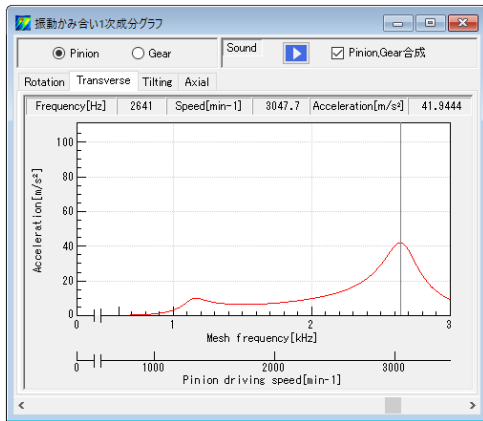


図 45.100 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Transvers)

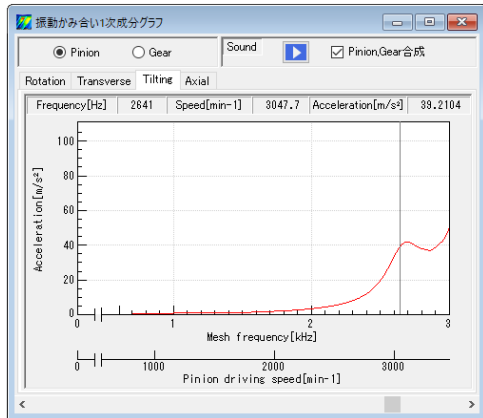


図 45.101 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Tilting)

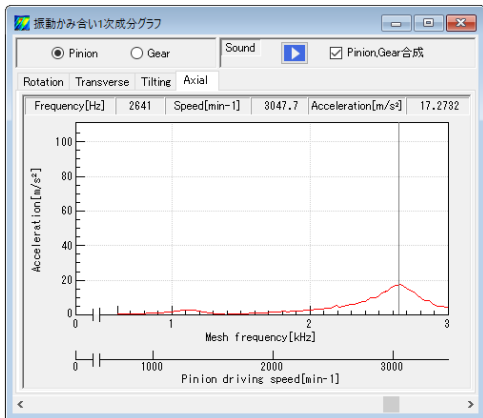


図 45.102 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Axial)

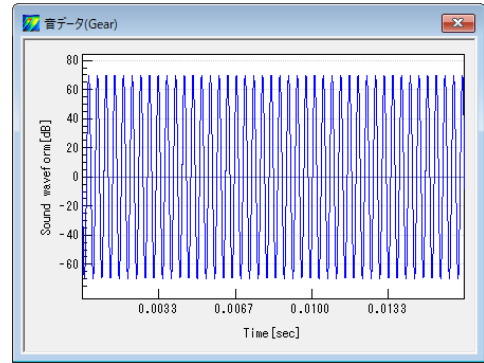


図 45.103 音波形グラフ (小歯車と大歯車の合成音)

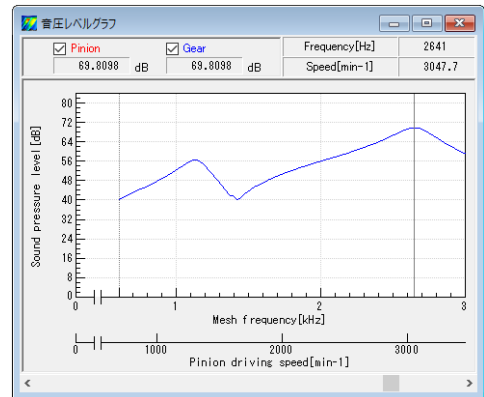


図 45.104 音圧レベルグラフ (小歯車と大歯車)

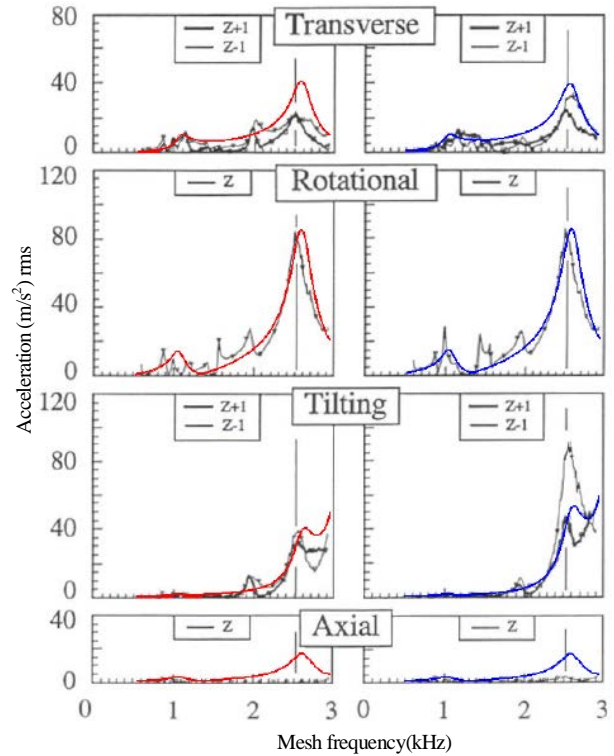


図 45.105 論文の実験値との比較

図 45.87～図 45.105 では同歯数の解析結果を示していますが、歯数の異なる解析結果例を図 45.106～45.109 に示します。

| 基本寸法 | | 端部形状 | |
|------------|------------|------|---------------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | |
| モジュール | m | mm | 2.00000 |
| 歯数 | z | --- | 45 59 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 30 0 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ 左ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 109.92305 138.25466 |
| 基準円直径 | db | mm | 96.80573 126.61196 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 転位係数 |
| 歯直角転位係数 | xn | --- | 0.00000 0.00000 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 8 10 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 46.17753 58.57579 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 3.3716 3.3647 |
| オーバーボール寸法 | dm | mm | 108.41975 140.74879 |
| 歯直角円弧歯厚 | Sn | mm | 3.14159 3.14159 |
| 中心距離 | a | mm | 120.08886 |
| 歯直角法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 0.00000 |
| 歯幅 | b | mm | 20.00000 20.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 107.92305 140.25466 |
| 歯底円直径 | df | mm | 98.92305 131.25466 |
| 歯元R(工具刃先R) | rf | mm | 0.7500 0.7500 |

図 45.106 検討歯車 2

| 基本寸法 | | 端部形状 | |
|------------|------------|------|--------------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | |
| モジュール | m | mm | 2.00000 |
| 歯数 | z | --- | 35 69 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 |
| ねじれ角 | β | deg | 30 0 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ 左ねじれ |
| 基準円直径 | d | mm | 80.82904 159.34867 |
| 基準円直径 | db | mm | 74.51657 148.90211 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 転位係数 転位係数 |
| 歯直角転位係数 | xn | --- | 0.00000 0.00000 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 6 12 |
| またぎ歯厚 | w | mm | 33.94777 70.80555 |
| 測定ボール径 | dp | mm | 3.3800 3.3615 |
| オーバーボール寸法 | dm | mm | 85.32885 163.84156 |
| 歯直角円弧歯厚 | Sn | mm | 3.14159 3.14159 |
| 中心距離 | a | mm | 120.08886 |
| 歯直角法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 0.00000 |
| 歯幅 | b | mm | 20.00000 20.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 84.82904 163.34867 |
| 歯底円直径 | df | mm | 75.82904 154.34867 |
| 歯元R(工具刃先R) | rf | mm | 0.7500 0.7500 |

図 45.108 検討歯車 3

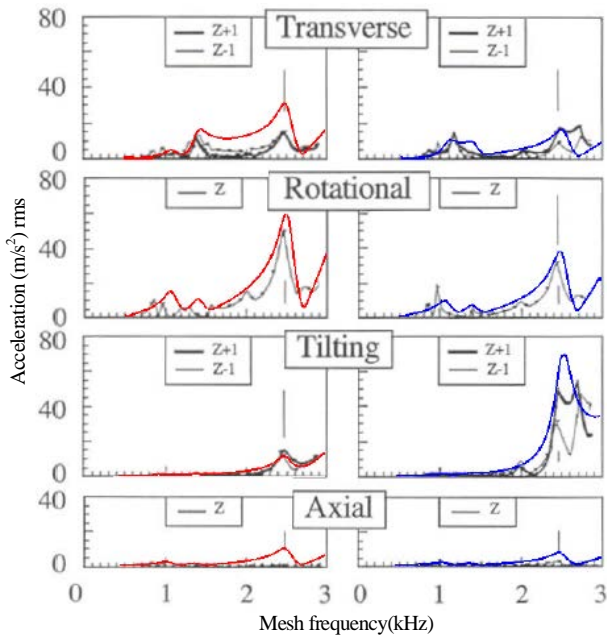


図 45.107 論文の実験値との比較

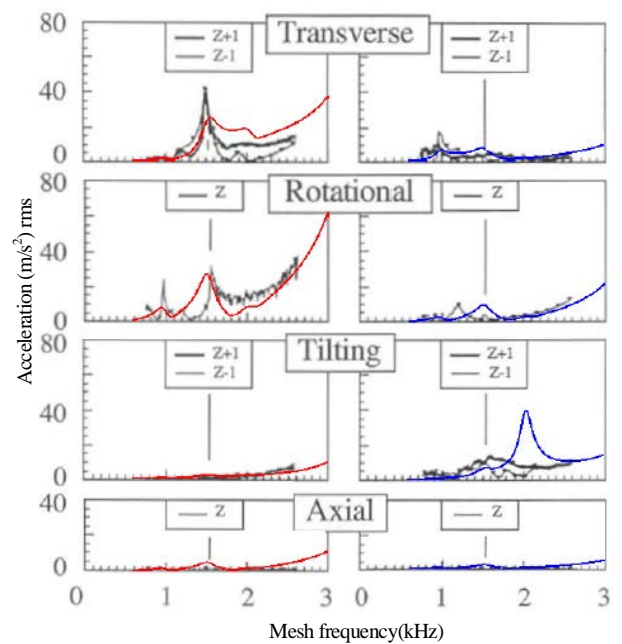


図 45.109 論文の実験値との比較

参考文献

- 1) Kunihiko MORIKAWA et al., " DYNAMIC VIBRATION ANALYSIS OF HELICAL GEAR SYSTEM", Proc., MPT2001(2001)
- 2) 王韶峰, 梅澤清彦, 北條春夫, 松村茂樹, はすば歯車系の振動解析 (第一報, 起振力を考慮した多自由度シミュレーションの開発), 機論 C 編, 62 巻 600 号 (1996.8), pp.3275-3282

[46] Linear bevel gear design system(IP-bevel gear)

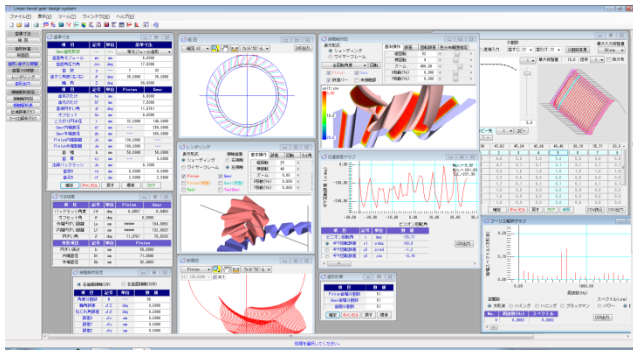
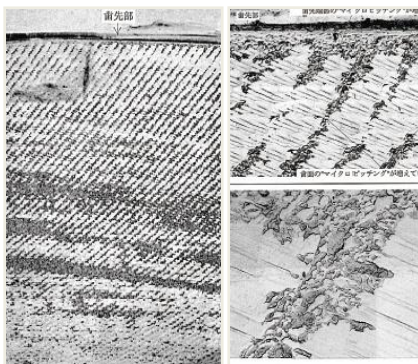


図 46.1 Linear bevel gear

46.1 概要

現在、ベベルギヤは Gleason 社や Klingelnberg 社の専用歯切り盤で加工されていますが、近年、球面インボリュート歯形（カタログ 10 頁，図 2.12 参照）を持つベベルギヤをマシニングセンタで加工することも一般化し、小形ベベルギヤの金型や大型ベベルギヤでは目新しいことではなくなっています。特に大型のベベルギヤでは専用歯切り盤が製造されていないことからマシニングセンタで加工せざるを得ない状況下にあります。

小さな歯車では、工具の摩耗も少なく、ツールパスを細かく運動させることができ、また金型では磨きをすることにより上質な歯面粗さを得ることができます。しかし、大型歯車の場合にはエンドミル工具を使用すると工具摩耗や切削（研削）状況などにより、目視観察では問題にならない歯面であっても運転後には図 46.2 のように歯面に鱗模様が生じてしまいマイクロピッチングが発生する原因となります。このような現象を回避するためには円盤状の砥石で歯面研削しなければなりません。



(応用科学研究所カタログより)

図 46.2 マシニングセンタ加工歯面のマイクロピッチングの例

スパイラルベベルギヤの場合、凸面側歯面は小さな直径を持つ円盤形砥石であれば研削することも可能（隣の歯に接触する可能性がある）ですが、凹面側歯面は研削することができません。

しかし、本ソフトウェアでは、円盤形砥石で歯面研削ができるよう大歯車の歯形と歯すじを直線として、これにかみ合う小歯車の歯形を決定しています（歯面修整も可）。そのため、大歯車の歯面研削はエンドミル形状の工具（スワーフ加工も含む）に比べ大幅な時間短縮が可能です。また、大歯車を内歯ベベルとすること、小歯車にオフセットを与えること、軸角を 90° 以外とすること、そして、小歯車の歯数を少歯数（1~5 歯）とすることができますので大減速で且つ、自由度の高い歯車対を設計することができます。すなわち、この Linear bevel gear は、「設計と加工の多様性」を持つ歯車であると言えます。

46.2 ソフトウェアの構成

Linear bevel gear design system の構成を表 46.1 に示します。表中の○は、基本ソフトウェアに含まれ、◎はオプションです。

表 46.1 ソフトウェアの構成

| 項目 | 掲載項 | 機能 |
|---------------|-------|----|
| <1>基準ラックの設定 | 46.3 | ○ |
| <2>歯車寸法 | 46.4 | ○ |
| <3>組図 | 46.5 | ○ |
| <4>断面図 | 46.7 | ○ |
| <5>歯形、歯すじ修整 | 46.8 | ○ |
| <6>歯面 3D 修整 | 46.9 | ○ |
| <7>レンダリング | 46.10 | ○ |
| <8>歯形出力 | 46.11 | ○ |
| <9>接触解析設定 | 46.12 | ○ |
| <10>接触解析図 | 46.12 | ○ |
| <11>接触解析表 | 46.12 | ○ |
| <12>伝達誤差グラフ | 46.13 | ○ |
| <13>フーリエ解析グラフ | 46.13 | ○ |
| <14>少歯数 | 46.14 | ◎ |

46.3 基準ラックの設定（ツール、プロパティ）

基準ラック（並歯、低歯、特殊）を図 46.3 で設定し、その基準ラックの形状を表示することができます。本例では、歯だけを「並歯」とし、圧力角を 17.5° とした例を示します。



図 46.3 基準ラックと形状

46.4 歯車寸法設定

図 46.4 に諸元入力画面を示します。Gear 歯形形状は、「等モジュール歯形」と「比モジュール歯形」の 2 種類があります。「等モジュール歯形」は、大歯車の歯形を内端部から外端部まで同じモジュールで生成しますが、「比モジュール歯形」(46.15 項参照)は、円すい距離に比例するモジュールで歯形を生成します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 基準寸法 | |
|-------------|------------|-----|----------|----------|
| Gear 歯形形状 | --- | --- | 等モジュール歯形 | |
| 歯直角モジュール | mn | mm | 8.0000 | |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 17.5000 | |
| 歯数 | z | --- | 7 | |
| 歯すじ角度(左/右) | β | deg | 35.0000 | |
| 軸角 | Σ | deg | 90.0000 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 歯末のたけ | ha | mm | 8.0000 | 8.0000 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 7.5000 | 7.5000 |
| 基準円すい角 | ϕ | deg | 11.9781 | 11.9781 |
| オフセット | Yo | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| ころがり円半径 | r | mm | 32.0000 | 140.0000 |
| Gear 内端直径 | di | mm | --- | 260.0000 |
| Gear 外端直径 | do | mm | --- | 360.0000 |
| Pinion 内端距離 | Js | mm | 130.0000 | --- |
| Pinion 外端距離 | Je | mm | 180.0000 | --- |
| 歯幅 | b | mm | 50.0000 | 50.0000 |
| 歯厚 | sj | mm | --- | 9.6000 |
| 法線バックラッシ | Jn | mm | 0.1000 | 0.1000 |
| 歯先 R | ra | mm | 0.6000 | 0.6000 |
| 歯元 R | rf | mm | 2.5000 | 2.5000 |

図 46.4 諸元

歯車寸法は、モジュール、圧力角、歯数、歯すじ角度、軸角を設定すれば、それ以下の歯末のたけ、歯元のたけなどの数値は、[TAB]キーで標準値を設定することができます。例題では、歯すじ角度を左右とも 35° としています。異なる角度を設定することもできます。また、本例では、ころがり円の標準値を使用するのではなくアンダーカットを避けるため、ころがり円を $r_1=32.00$ 、 $r_2=140.00$ としています。さらに、大歯車の内端直径と外端直径を変更することができますので歯幅位置での歯形使用範囲を自由に設定することができます。図 46.4 を[確定]すると、図 46.5 の寸法結果を表示します。寸法結果 1 のピニオン内端直径と外端直径は、歯形計算後の寸法結果 2 (図 46.11) に表示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-------------|-----|-----|---------|----------|
| バックラッシュ角度 | J θ | deg | 0.0087 | 0.0409 |
| オフセット角 | θ | deg | 0.0000 | |
| 外端円すじ距離 | La | mm | ***** | 184.0050 |
| 内端円すじ距離 | Lf | mm | ***** | 132.8925 |
| 円すじ角 | δ | deg | 11.9761 | 78.0239 |
| 外形項目 | | | | |
| 円すじ高さ | b | mm | 50.0000 | |
| 内端直径 | Dt | mm | ***** | |
| 外端直径 | Db | mm | ***** | |

図 46.5 寸法結果 1

46.6 歯形計算

本例では歯形を図 46.10 のように歯形分割数を 51 として計算します。計算結果後、図 46.11 の寸法結果 2 を表示します。

| 項目 | 数値 |
|-------------|----|
| Pinion歯幅分割数 | 51 |
| Gear歯幅分割数 | 51 |
| 歯面分割数 | 51 |

図 46.10 歯形計算の設定

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|-------------|-----|-----|---------|----------|
| バックラッシュ角度 | J θ | deg | 0.0087 | 0.0409 |
| オフセット角 | θ | deg | 0.0000 | |
| 外端円すじ距離 | La | mm | ***** | 184.0050 |
| 内端円すじ距離 | Lf | mm | ***** | 132.8925 |
| 円すじ角 | δ | deg | 11.9761 | 78.0239 |
| 外形項目 | | | | |
| 円すじ高さ | b | mm | 50.0000 | |
| 内端直径 | Dt | mm | 71.9890 | |
| 外端直径 | Db | mm | 82.4083 | |

図 46.11 寸法結果 2

46.5 組図

正面図を図 46.6 に、側面図を図 46.7 に、基準ラックを図 46.8 に示します。これらの図は、縮小、拡大、そして距離計測することができ、DXF ファイルを出力することができます。図 46.9 に CAD 作図例を示します。

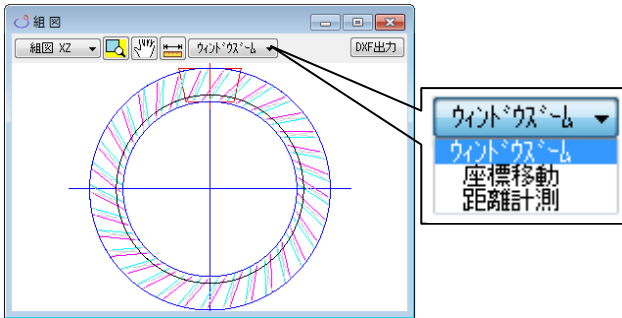


図 46.6 組図 (XZ)

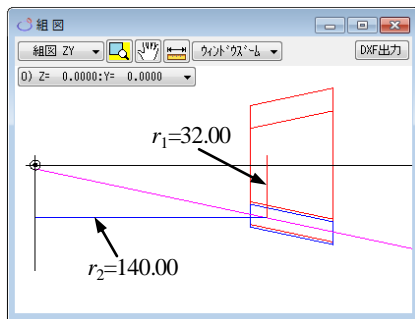


図 46.7 組図 (ZY)

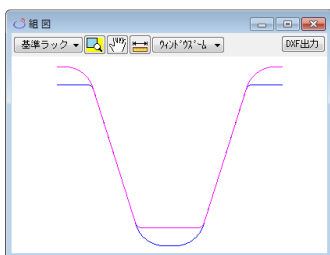


図 46.8 基準ラック

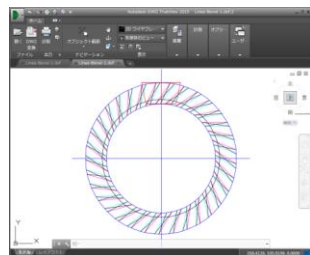
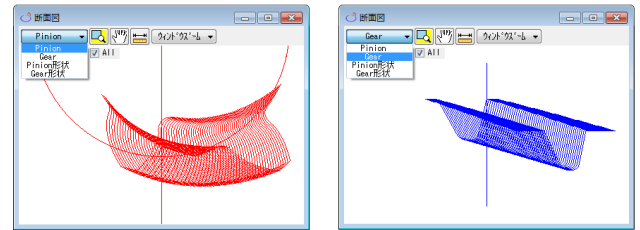


図 46.9 CAD 作図例

46.7 断面図

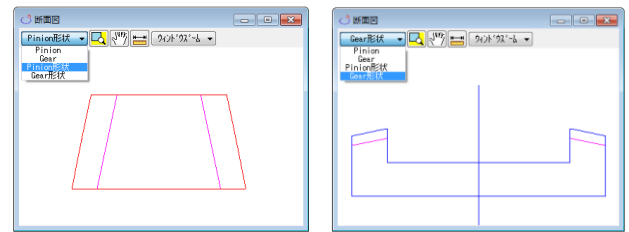
歯形断面を図 46.12 に形状断面を図 46.13 に示します。これらの図も縮小、拡大、そして距離計測することができます。



(a)Pinion

(b) Gear

図 46.12 断面図 (歯形)



(a)Pinion

(b) Gear

図 46.13 断面図

46.8 歯形、歯すじ修整

図 46.14 で定型の歯形修整量と歯すじ修整量を与えることができます。本例では図 46.15(b), Type2 のようにピニオンにのみ歯面修整 (図 46.15b) と歯すじ修整 (図 46.16) を与えギヤは無修整とします。ただし、ピニオン歯すじ修整図の Type1 と Type3 およびギヤの修整はピニオンと同様のため省略します。

| 歯形歯すじ修整 | | | |
|---|----------|---------|----------|
| 歯形(P)=0 | 歯すじ(P)=2 | 歯形(G)=0 | 歯すじ(G)=0 |
| 歯形修整タイプ | | | |
| <input checked="" type="radio"/> 修整なし <input type="radio"/> Type1 <input type="radio"/> Type2 <input type="radio"/> Type3 | | | |

図 46.14 歯形、歯すじ修整 (設定)

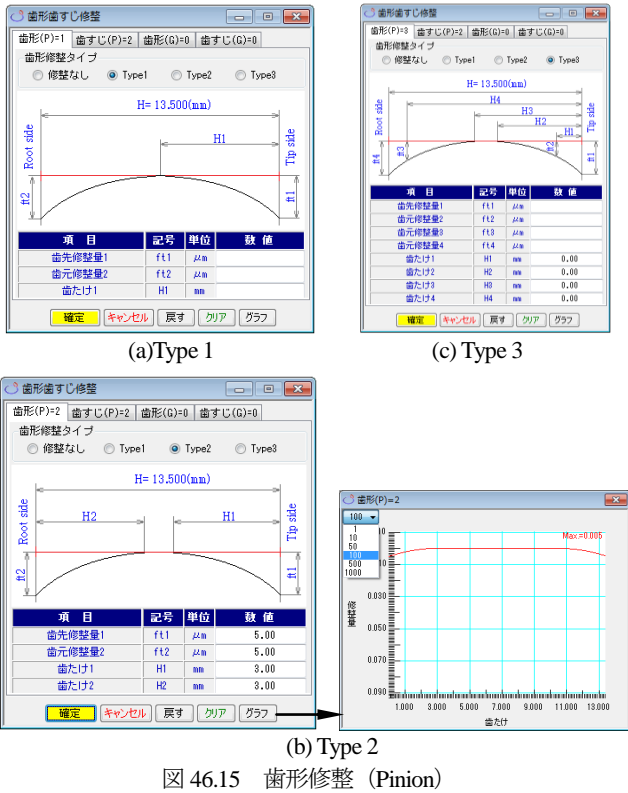


図 46.15 歯形修整 (Pinion)



図 46.16 歯すじ修整 (Pinion)

46.9 歯面 3D 修整

図 46.15 および図 46.16 で設定した歯面，歯すじ修整を図 46.17 のように 3 次元で表現することができます。また，この歯面修整の分割は任意に設定することができます。図 46.17 の画面で修整量の変更や倍率も変更することができます。また，**CSV出力** で歯面修整量を CSV 出力することができます。Excel で作成したデータを **CSV読み** で読み込むことができます。本例では定型の修整を 3 次元修整に引き継ぎましたが，直接 3 次元修整値を入力することができます。なお，ギヤは無修整のため省略します。

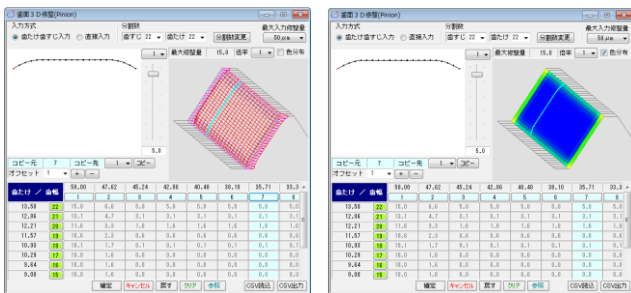


図 46.17 歯面修整 (Pinion)

46.10 レンダリング

生成した歯形を図 46.18 のように表示することができます。修整歯形に接触線を図 46.18(b)のように確認することができます。また，図を表示する際の機能は，図 46.19 のように組み立て誤差や回転角度 (誤差) を与えることができますので歯のかみ合いを容易に観察することができます。なお，この歯車の円すい形状は図 46.20 のように表すことができます。

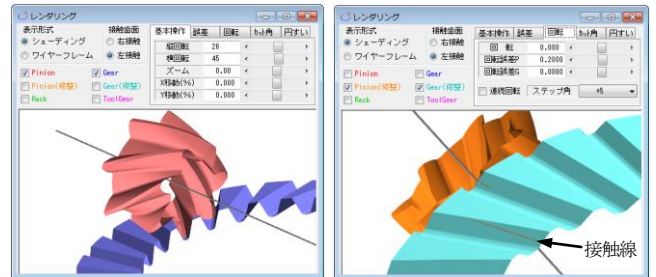


図 46.18 レンダリング



図 46.19 補助機能

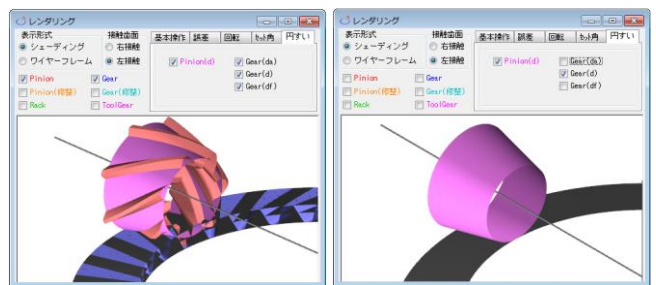


図 46.20 円すい

46.11 歯形出力

生成した理論歯形または，修整歯形を図 46.21 で 3D-IGES ファイルに出力することができます。出力歯数は任意に与えることができますので，ピニオンを全歯 (7 歯)，ギヤを 5 歯出力し，CAD で作図した例を図 46.22 に示します。

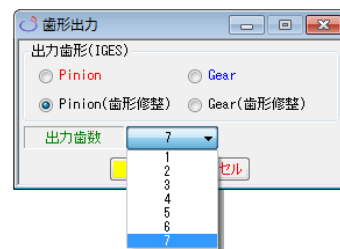


図 46.21 歯形出力

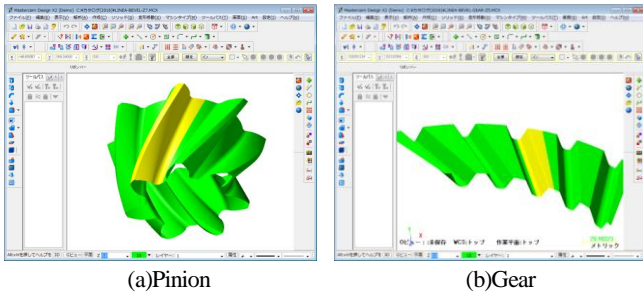


図 46.22 CAD 作図例

46.12 歯面接触解析

生成した歯形の接触距離やすべり速度、そして、すべり率を解析することができます。図 46.23 では 1 ピッチ角度の分割数（本例では 50）を設定し、組み立て誤差などを 0 とし、最大接触距離を 20 μm としたときの解析結果を図 46.24~46.27 に示します。

歯面修整を考慮して接触距離から全かみ合い率を計算します。本例では全かみ合い率は $\varepsilon_{\gamma}=2.12$ となります。また、図 46.24 の接触距離解析結果では、ピニオンに歯面修整を与えていますので歯先、歯元そして歯幅端部に接触距離が小さくなっていることが解ります。

接触距離やすべり速度、すべり率の解析後、図 46.27 のように回転させることができますので角度位置における数値を把握する

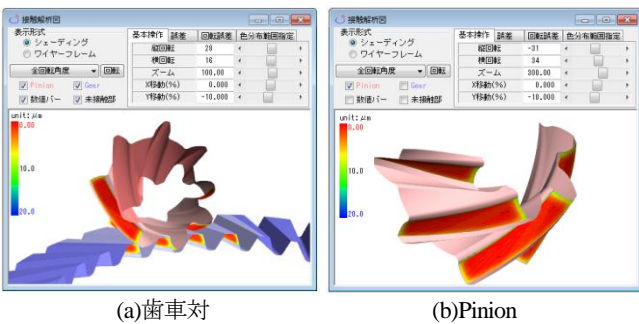
接触解析設定

右歯面接触(CW) 左歯面接触(CCW)

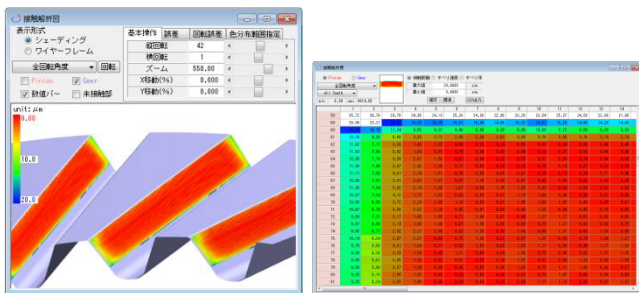
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|--------|------------------------|-------------------|---------|
| 角度分割数 | N | --- | 50 |
| 軸角誤差 | $\Delta\Sigma$ | deg | 0.0000 |
| ねじれ角誤差 | $\Delta\beta$ | deg | 0.0000 |
| 誤差X | Δx | mm | 0.0000 |
| 誤差Y | Δy | mm | 0.0000 |
| 誤差Z | Δz | mm | 0.0000 |
| 回転数 | n | min ⁻¹ | 600.000 |
| 最大接触距離 | L | μm | 20.00 |
| 全かみ合い率 | ε_{γ} | --- | 2.1200 |

確定 キャンセル 戻す クリア

図 46.23 接触解析の設定



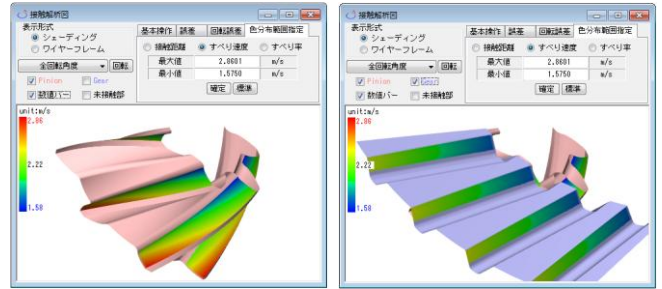
(a)歯車対 (b)Pinion



(c)Gear (d)接触解析表

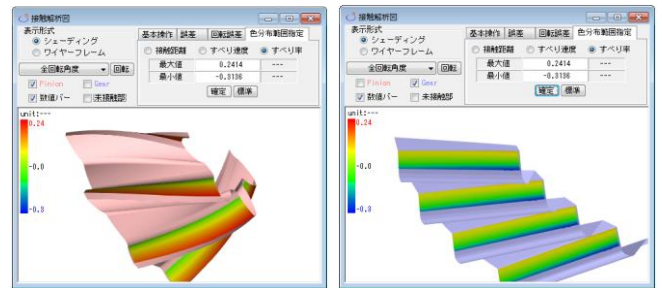
図 46.24 接触距離

ことができます。また、図 46.28 のように、数値範囲を指定して表示（例：2.50~2.87m/s）することもできます。図 46.28 では、すべり速度を示していますが、接触距離およびすべり率も同様に表示することができます。



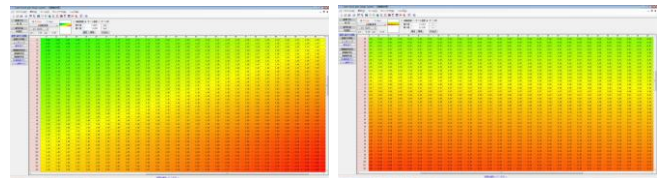
(a)Pinion (b)Gear

図 46.25 すべり速度



(a)Pinion (b)Gear

図 46.26 すべり率



(a)すべり速度 (b)すべり率

図 46.27 解析結果 (表)

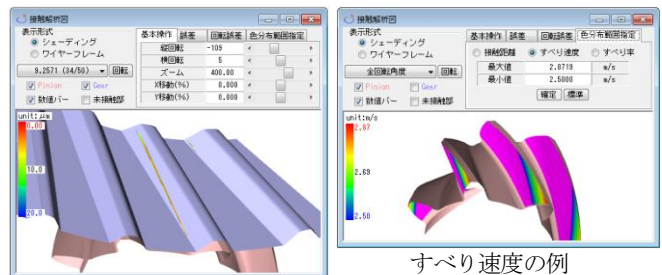


図 46.27 回転



すべり速度の例

図 46.28 色分布範囲指定

46.13 伝達誤差

伝達誤差解析結果を図 46.29 に、フーリエ解析結果を図 46.30 に示します。本例の歯車の伝達誤差は $TE=0.65\mu\text{m}$ であることが解ります。



図 46.29 伝達誤差

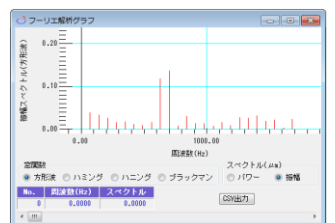


図 46.30 フーリエ解析

46.14 少歯数 (オプション)

ピニオン歯数を $z_1=2$, オフセットを 50mm としたときの計算例を図 46.31~46.38 に示します。本例の場合、ピニオンの歯形を内端側と外端側を揃えるため歯すじ角度は、ギヤ左歯面側を 45° 、右歯面側を 48° にしています。また、ピニオンの歯幅は、内端側と外端側を広くしてかみ合いに余裕を持たせています。

| 項目 | 記号 | 単位 | 基準寸法 | |
|-------------|------------|-----|----------|----------|
| Gear 歯形形状 | --- | --- | 等モジュール歯形 | |
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.0000 | |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 15.0000 | |
| 歯数 | z | --- | 2 | 55 |
| 歯すじ角度(左/右) | β | deg | 45.0000 | 48.0000 |
| 軸角 | Σ | deg | 90.0000 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 歯末のたけ | ha | mm | 3.0000 | |
| 歯元のたけ | hf | mm | 3.7500 | |
| 基準円すい角 | ϕ | deg | 2.0826 | |
| オフセット | Xo | mm | 50.0000 | |
| ころがり円半径 | r | mm | 12.0000 | 119.8510 |
| Gear 内端直径 | di | mm | 220.0000 | |
| Gear 外端直径 | do | mm | 260.0000 | |
| Pinion 内端距離 | Js | mm | 94.0000 | --- |
| Pinion 外端距離 | Je | mm | 125.0000 | --- |
| 歯幅 | b | mm | 31.0000 | 20.0000 |
| 歯厚 | sj | mm | --- | 4.7124 |
| 法線バックラッシ | Jn | mm | 0.0000 | |
| 歯先R | ra | mm | 0.3000 | 0.3000 |
| 歯元R | rf | mm | 1.1250 | 1.1250 |

図 46.31 諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------|------------|-----|---------|----------|
| バックラッシ角度 | J θ | deg | 0.0000 | 0.0000 |
| オフセット角 | θ | deg | 24.6570 | |
| 外端円すい距離 | La | mm | *** | 130.0859 |
| 内端円すい距離 | Lf | mm | *** | 110.0727 |
| 円すい角 | δ | deg | 2.0826 | 87.9174 |
| 外形項目 | 記号 | 単位 | Pinion | |
| 円すい高さ | b | mm | 31.0000 | |
| 内端直径 | Dt | mm | 28.9713 | |
| 外端直径 | Db | mm | 31.0256 | |

図 46.32 寸法結果

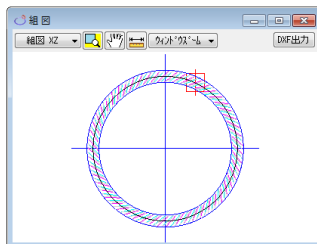


図 46.33 組図 (XZ)

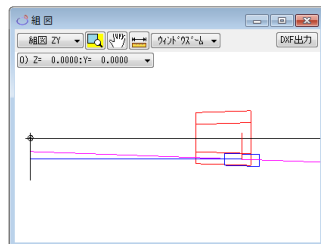


図 46.34 組図 (ZY)

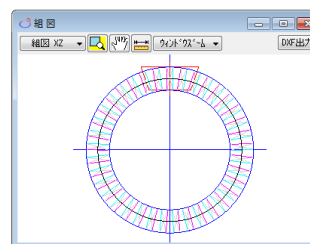


図 46.41 組図 (XZ)

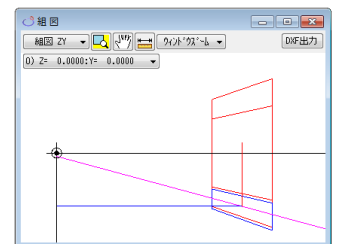


図 46.42 組図 (ZY)

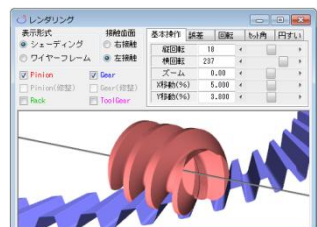


図 46.35 レンダリング



図 46.36 接触 ($\epsilon_v=3.49$)



図 46.43 レンダリング

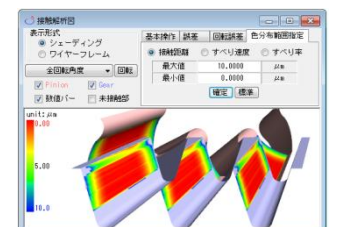


図 46.44 接触 ($\epsilon_v=1.57$)

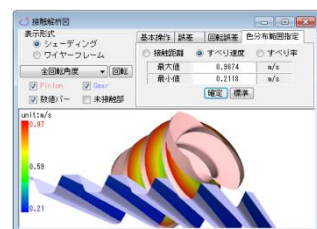


図 46.37 すべり速度

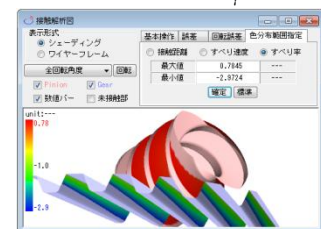


図 46.38 すべり率

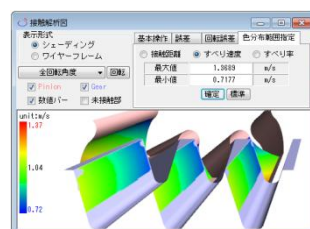


図 46.45 すべり速度

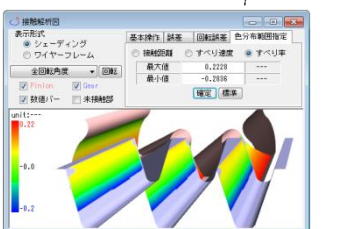


図 46.46 すべり率

46.15 比モジュール歯形

比モジュール歯形は、円すい距離に比例するモジュールで歯形を生成します。比モジュール歯形の計算例を図 46.39~46.46 に示します。比モジュール歯形の場合、歯すじ角度を与えることはできません。この機能は、すぐばかさ歯車の形状とほぼ同じで、ギヤの歯形を直線としてピニオンの歯形を生成しています。

| 項目 | 記号 | 単位 | 基準寸法 | |
|-------------|------------|-----|----------|---------|
| Gear 歯形形状 | --- | --- | 比モジュール歯形 | |
| 歯直角モジュール | mn | mm | 3.0000 | |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | |
| 歯数 | z | --- | 10 | 37 |
| 歯すじ角度(左/右) | β | deg | *** | *** |
| 軸角 | Σ | deg | 90.0000 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 歯末のたけ | ha | mm | 3.0000 | |
| 歯元のたけ | hf | mm | 3.7500 | |
| 基準円すい角 | ϕ | deg | 15.1240 | |
| オフセット | Xo | mm | 0.0000 | |
| ころがり円半径 | r | mm | 18.0000 | 55.5000 |
| Gear 内端直径 | di | mm | 93.0000 | |
| Gear 外端直径 | do | mm | 129.0000 | |
| Pinion 内端距離 | Js | mm | 46.5000 | --- |
| Pinion 外端距離 | Je | mm | 64.5000 | --- |
| 歯幅 | b | mm | 18.0000 | 18.0000 |
| 歯厚 | sj | mm | --- | 4.7124 |
| 法線バックラッシ | Jn | mm | 0.1000 | |
| 歯先R | ra | mm | 0.1000 | 0.1000 |
| 歯元R | rf | mm | 1.1250 | 1.1250 |

図 46.39 諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------|------------|-----|---------|---------|
| バックラッシ角度 | J θ | deg | 0.0279 | 0.1032 |
| オフセット角 | θ | deg | 0.0000 | |
| 外端円すい距離 | La | mm | *** | 66.8142 |
| 内端円すい距離 | Lf | mm | *** | 48.1684 |
| 円すい角 | δ | deg | 15.1240 | 74.8760 |
| 外形項目 | 記号 | 単位 | Pinion | |
| 円すい高さ | b | mm | 18.0000 | |
| 内端直径 | Dt | mm | 32.1164 | |
| 外端直径 | Db | mm | 44.5485 | |

図 46.40 寸法結果

46.17 内歯ベベル+オフセットの例

内歯ベベルにオフセットを与え、軸角を $\Sigma=110^\circ$ とした設計例(図46.47~46.55)と模型(図46.56)を示します。内歯車ベベルギヤでオフセットを持つ歯車は、従来のかさ歯車加工専用機では加工が不可能であったことから設計概念としても一般化していませんでした。しかし、**Linear bevel gear**は「設計と加工の多様性」を持っていますので自由な発想で設計することができます。



図 46.56 内歯ベベル+オフセットの模型

| 項目 | 記号 | 単位 | 基準寸法 | |
|------------|------------|-----|----------|----------|
| Gear歯形形状 | --- | --- | 等モジュール歯形 | |
| 歯直角モジュール | mn | mm | 2.5000 | |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | |
| 歯数 | z | --- | 7 | 34 |
| 歯すじ角度(左/右) | β | deg | 30.0000 | 30.0000 |
| 軸角 | Σ | deg | 110.0000 | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.5000 | --- |
| 歯元のたけ | hf | mm | 3.1250 | --- |
| 基準円すい角 | ϕ | deg | -8.2434 | --- |
| オフセット | xo | mm | 15.0000 | --- |
| ころがり円半径 | r | mm | 14.5000 | 50.0000 |
| Gear内端直径 | di | mm | --- | 100.0000 |
| Gear外端直径 | do | mm | --- | 124.0000 |
| Pinion内端距離 | Js | mm | 45.4805 | --- |
| Pinion外端距離 | Je | mm | 57.8422 | --- |
| 歯幅 | b | mm | 12.3617 | 12.0000 |
| 歯厚 | sj | mm | --- | 3.9270 |
| 法線バックラッシ | Jn | mm | 0.1000 | |
| 歯先R | ra | mm | 0.2500 | 0.2500 |
| 歯元R | rf | mm | 1.0000 | 1.0000 |

図 46.47 諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|----------|------------|-----|---------|---------|
| バックラッシ角度 | J θ | deg | 0.0238 | 0.1148 |
| オフセット角 | θ | deg | 17.4678 | --- |
| 外端円すい距離 | La | mm | *** | 82.6473 |
| 内端円すい距離 | Lf | mm | --- | 50.5220 |
| 円すい角 | ϕ | deg | 11.7568 | 38.2434 |
| 外形項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 円すい高さ | b | mm | 12.3617 | --- |
| 内端直径 | Dt | mm | 32.3922 | --- |
| 外端直径 | Db | mm | 37.8074 | --- |

図 46.48 寸法結果

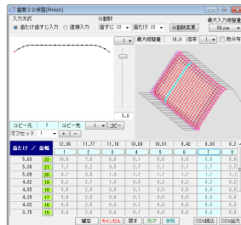


図 46.49 歯面修整

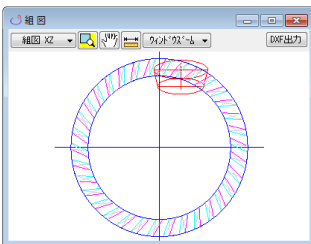


図 46.50 組図 (XZ)

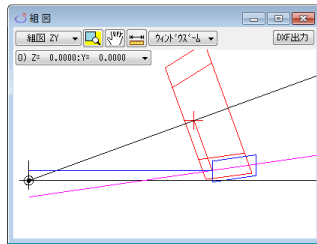


図 46.51 組図 (ZY)



図 46.52 レンダリング



図 46.53 接触 ($\epsilon_f=2.20$)

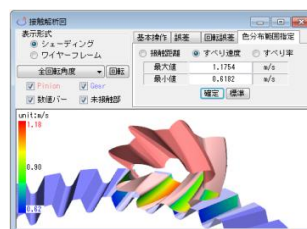


図 46.54 すべり速度

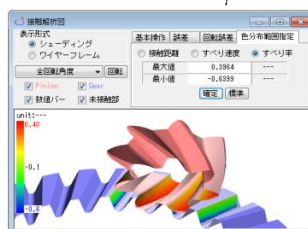


図 46.55 すべり率

46.18 まとめ

Linear bevel gearは「設計と加工の多様性」を持つことから、

- (1) ベベルギヤの外歯, 内歯, そしてオフセットも自由に設計することができます。そのため, 従来の考えにとらわれない歯車の使用や組み合わせが可能です (ex. $\Sigma=90^\circ$ で容積小)。
- (2) 歯形データさえあればマシニングセンタなどで加工が可能であるため歯車加工専用機の制約を受けません。そのため, ピニオンを少歯数歯車とすることも大歯車を内歯とすることもできます。
- (3) マシニングセンタなどの加工は一般化技術として定着しているため今後, 歯車加工専用機以外の加工法としての利用が進むとと考えています。
- (4) 大歯車の歯形および歯すじを直線としているため円盤形砥石での研削が加工です。このためエンドミル形工具(砥石)に比べ生産性が非常に高く, 加工面も上質となります。
- (5) スパイラルベベルを円盤形砥石で研削する場合, 図45.57のように砥石と歯面が干渉するため研削が困難(不可能)です。(図45.58の片テーパ形砥石でも研削は不可能)しかし, 図45.58の**Linear bevel gear**のピニオンは円盤形砥石で研削できることが解ります。
- (6) そもそも, スパイラルベベルの歯すじが, なぜ図45.57のようになっているのかということ, 円盤外部の平面に刃物を置き, これを運動させ歯形を作っているからであって, この歯すじ形状を当然のこととして我々は認識しています。しかし, 上述したように歯面を円盤形砥石で研削できるという大きな特徴を持つこの方式のベベルギヤは, 近い将来, 多くの採用が進むもの(特に大型歯車)と考えています。

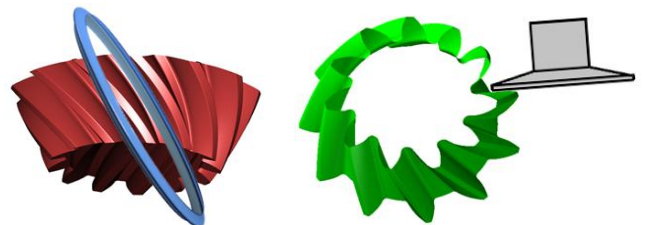


図 45.57 spiral bevel と円盤形砥石

図 45.58 **Linear bevel gear** のピニオンと片テーパ形砥石

Linear bevel gearは, IP-bevel gearの名称で2016年12月22日, 日刊工業新聞7面に, そして日経ものづくり誌¹⁾2017年5月号, 63~68頁に掲載されました(図45.59)。詳細は本誌をご覧ください。



図 45.59 日経ものづくり

1) 日経BP社, 日経ものづくり誌表紙

[47] Strain wave gearing design system



Fig.47.1 Strain wave gearing design system

47.1 Overview

Strain wave gearing design system is a software that generates wave gear tooth profile, based on basic rack or tool (hob). Meshing of the generated tooth profile and rendering can be displayed, and also 2D-DXF file output can be generated. Overall display is shown in Table 47.1.

47.2 Software configuration

Strain wave gearing design system configuration is shown in Table 47.1.

Table 47.1 Software Configuration

| No. | Item | Figure |
|-----|------------------------|--------|
| 1 | Basic rack | 47.3 |
| | Tool (HOB) | ---- |
| | Type of Ring | ---- |
| 2 | Tool dimension | ---- |
| 3 | Gear dimension | 47.4 |
| 4 | Tooth profile | 47.5 |
| 5 | Tooth modification | 47.6 |
| 6 | 2DTooth profile | 47.7 |
| 7 | Tooth rendering | 47.8 |
| 8 | FEM-Analysis | 47.9 |
| 9 | Hertzian stress | 47.10 |
| 10 | Output (Tooth profile) | 47.11 |
| 11 | Design-data management | 47.13 |

47.3 Basic Rack (Property)

Basic rack (cup type) is shown in Figure 47.2. As basic rack can be chosen between full depth tooth, low tooth and special tooth, Initialize is used to set up special tooth with $\alpha=25^\circ$, $h_{ac}=0.8$, $h_{fc}=1.05$, $r_c=0.375$. After basic rack is specified, actual basic rack can be displayed as shown by Figure 47.3, by clicking Tooth profile (Hob-based tooth profile is shown in Figure 47.12)

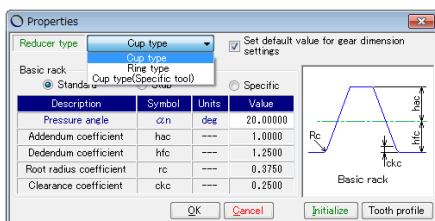


Fig.47.2 Basic rack (Cup type)

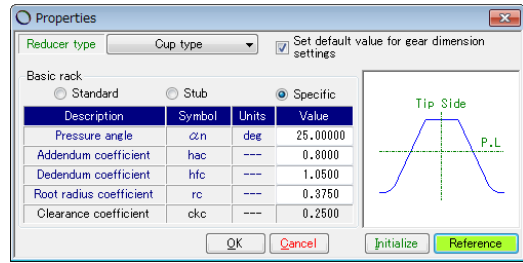


Fig.47.3 Property and basic rack (Cup type)

47.4 Dimension

Dimension display is shown in Figure 47.4 by using the example with $m_n=0.3$, $z_{FS}=100$, $z_{CS}=102$. Although the addendum modification coefficient is shown as $x_n=0.2$, it can be set to any value. Also, tip R can be defined all the way to the addendum pointed limit. In basic rack root R, the value specified in Figure 47.2 is taken as the standard value, but it can be defined all the way to the established limit of basic rack profile. The input range is shown below.

- Module : $0 < m_n < 10$
- Number of teeth : $10 < z_{FS} \leq 1000$, $z_{FS}+2 < z_{CS} \leq 1000$
- Profile shift : $-2 < x_n < +3$
- Face width : $0 < b < 1000$

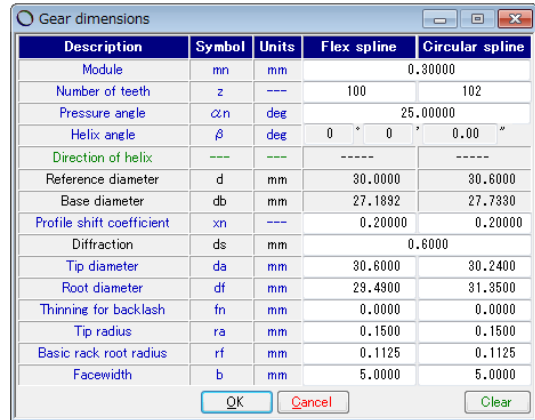


Fig.47.4 Gear dimensions

47.5 Tooth profile calculation

The tooth profile calculation setup display is shown in Figure 47.5. Flex spline thickness, device outer diameter and number of divisions for tooth profile calculation set-up can be specified. After setting the values, click OK to proceed to tooth profile calculation.

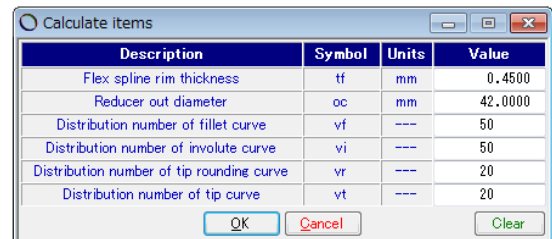


Fig.47.5 Tooth Profile Set-up

47.6 Tooth profile modification

Generated flex spline tooth profile can be modified as shown in Figure 47.6. Tooth profile can be specified either by line of action or diameter, while the magnification of the tooth profile modification can be selected from 50, 100, 200, 300, 400, 500, 1000.

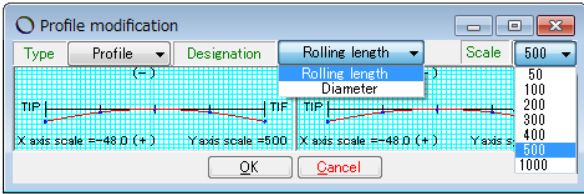


Fig.47.6 Tooth Profile Modification

The tooth profile modification can be applied by track-bar (shown at the center of Figure 47.7) and table-entry on the right hand side of the screen. In Figure 47.7, tooth profile is shown with 9 divisions, but it can be specified up to 50 divisions. Also, connection of the tooth profile can be spline (as shown by this example) or straight line connection. Moreover, numerical value can be entered into the template figure as shown in Figure 47.8.

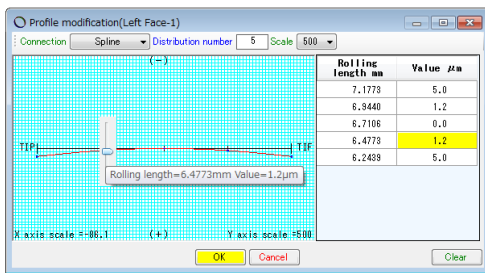


Fig.47.7 Profile modification setup

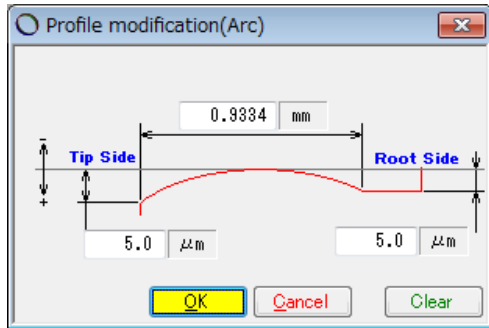


Fig.47.8 Profile modification setup (Template)

47.7 Tooth Profile Figure (2D)

Generated tooth profile can be displayed as shown in Figure 47.9. Enlarged sections [A] to [D] are shown in Figure 47.10. Also, distance can be measured as shown in Figure 47.11. Moreover, rotation-related tooth profile meshing can be checked by rotation Rotation in right hand corner of Figure 47.9.

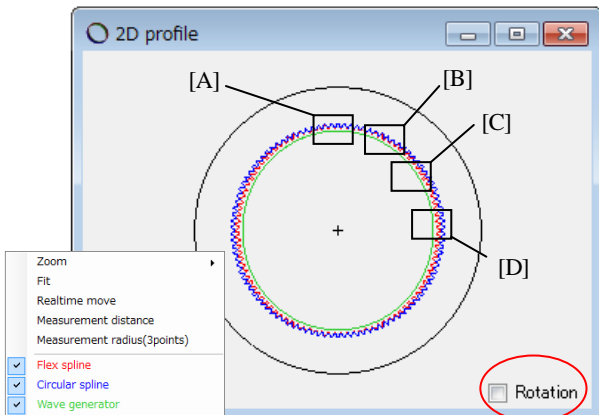
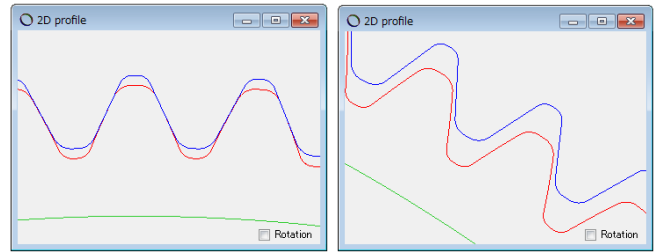
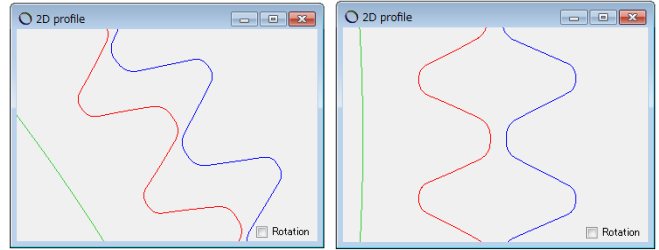


Fig.47.9 Tooth Profile & Supplemental Feature



(a) Section [A]

(b) Section [B]



(c) Section [C]

(d) Section [D]

Fig.47.10 Enlarged figure at each section

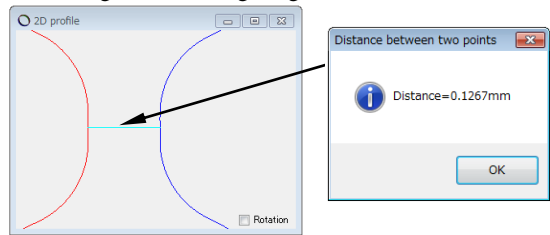


Fig.47.11 Distance measurement

47.8 Rendering

Tooth profile can be displayed as shown in Figure 47.12. This rendering can be enlarged, reduced and rotated by using Rotation .

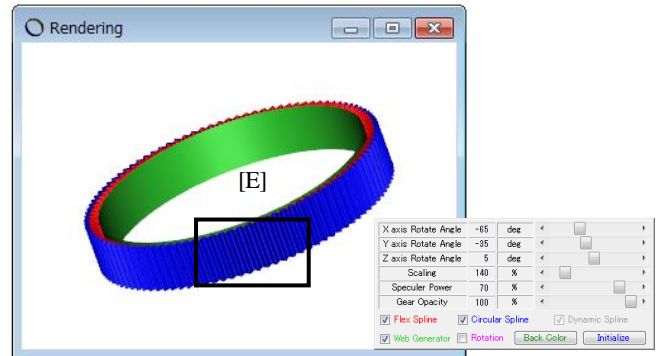


Fig.47.12 Rendering and supplemental form

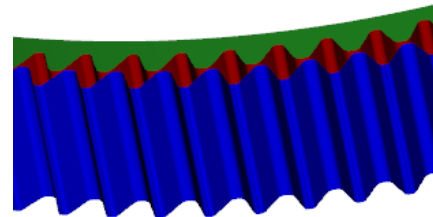


Fig.47.13 Rendering enlargement[E]

47.9 FEM Analysis (2D)

When load is applied to teeth, root stress in the teeth can be calculated. FEM analysis setup display is shown in Figure 47.14, but in FEM analysis, material is symbols only, as it is based on longitudinal elastic modulus and Poisson's ratio. Vertical division number and horizontal

division number can be specified arbitrarily. The position of the load (2 in the example: the second node from the tooth tip), less than 2 in the vertical division number can be specified. For the load applied in this case, please set the value per designer's intension.

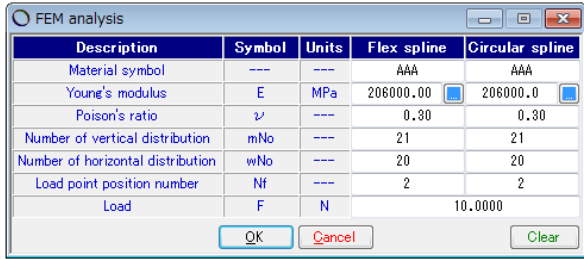


Fig.47.14 FEM analysis setup

FEM analysis results are shown in Figure 47.15 to 47.20. The analysis items are σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_1 , σ_2 , σ , δd , and flex spline max main stress is found to be $\sigma_{1max}=24.0\text{MPa}$ as shown in Figure 47.15. Also, displacement figure is shown in Figure 47.17 while stress summary (selective results only) is shown in Figure 47.18.

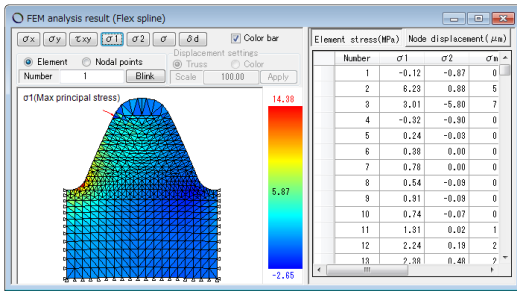


Fig.47.15 Flex Spline, $\sigma_{1max}=14.4\text{MPa}$

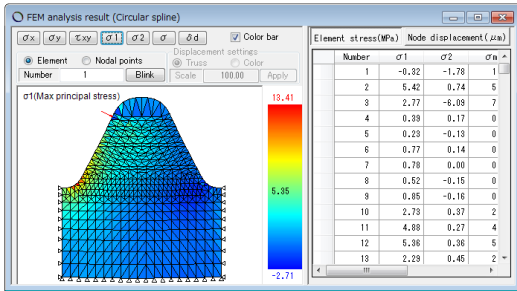


Fig.47.16 Circular spline, $\sigma_{1max}=13.4\text{MPa}$

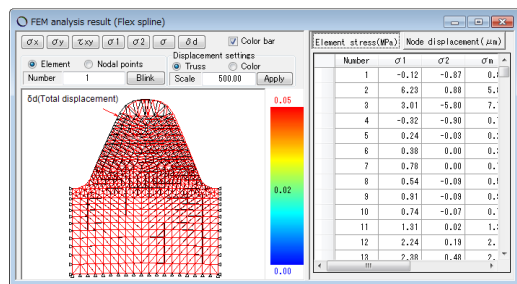


Fig.47.17 Flex Spline displacement, $\delta_{max}=0.08\mu\text{m}$

| Number | σ_1 | σ_2 | σ_m | σ_x | σ_y | τ_{xy} |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 468 | 14.38 | 1.22 | 13.81 | 8.18 | 7.42 | 6.57 |
| 501 | 13.53 | 0.08 | 13.48 | 6.23 | 7.38 | 6.70 |
| 953 | 12.47 | 1.40 | 11.84 | 8.52 | 5.35 | 5.30 |
| 1050 | 12.39 | 1.21 | 11.83 | 4.47 | 9.14 | 5.08 |
| 1117 | 11.61 | 0.92 | 11.45 | 8.68 | 3.27 | 4.96 |
| 1082 | 10.27 | 1.03 | 9.80 | 4.31 | 6.99 | 4.42 |
| 1087 | 10.15 | 0.72 | 9.81 | 2.72 | 8.16 | 3.86 |
| 920 | 9.27 | 1.59 | 8.58 | 5.07 | 5.79 | 3.82 |
| 498 | 9.23 | -0.19 | 9.33 | 6.53 | 7.51 | 4.96 |

Fig. 47.18 Stress Summary (selective results)

47.10 Tooth contact stress

The calculation of Hertzian stress acting on tooth surface is shown in Figure 47.19. The purpose of this feature is to compare the Hertzian stress due to tooth profile differences, so the load acting on one tooth should be designer's intended value.

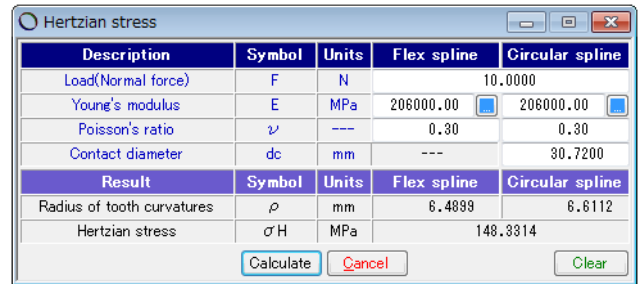


Fig.47.19 Hertzian Stress

47.11 Tooth profile output

The resulting F/S (perfect circle), F/S (ellipse) and C/S tooth profile output can be generated. F/S tooth profile output display is shown in Figure 47.20 while CAD drawing sample is shown in Figure 47.21.

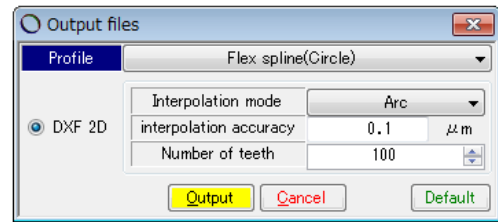


Fig.47.20 F/S Tooth profile output setup



(a) F/S(perfect circle) (b) F/S(Ellipse) (c) C/S

Fig.47.21 CAD Drawing sample

47.12 Tooth profile made by hob

47.12.1 Hob dimensions

When hob blade profile is known, the hob profile can be defined by selecting cup in reducer type property in Figure 47.32.

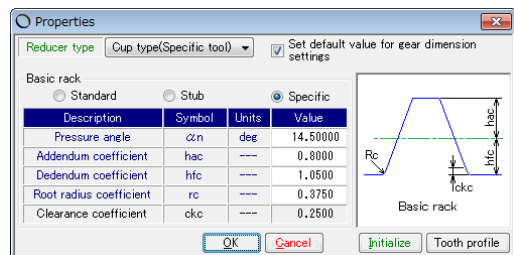


Fig.47.32 Property, Cup type (Special tool)

Hob dimension input sample is shown in Figure 47.33. In this sample, $\text{pitch}=0.9425$ is used to achieve module 0.3, but any value can be specified. After input entry, true hob profile can be displayed by clicking profile . The hob profile is based on gear front surface.

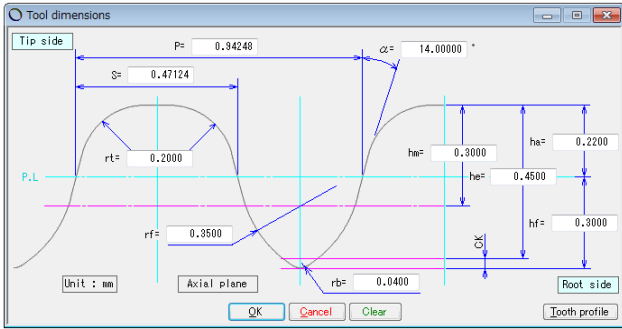


Fig.47.33 Hob dimensions

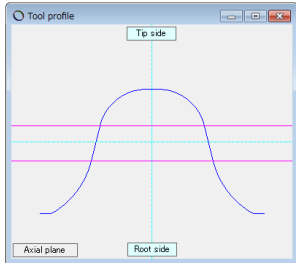


Fig.47.34 Hob profile

47.12.2 Gear Dimensions

In Figure 47.4, module was entered, but module, pressure angle and root diameter cannot be entered in Figure 47.35 because pitch is already entered in Figure 47.33 (background is grayed out).

| Description | Symbol | Units | Flex spline | Circular spline |
|---------------------------|----------------|-------|-------------|-----------------|
| Module | m | mm | | 0.30000 |
| Number of teeth | z | --- | 100 | 102 |
| Pressure angle | α_n | deg | | 14.00000 |
| Helix angle | β | deg | 0 | 0.00 |
| Reference diameter | d | mm | 30.0001 | 30.8001 |
| Profile shift coefficient | x _n | --- | 0.0000 | 0.0000 |
| Diffraction | d _s | mm | | 0.60000 |
| Tip diameter | d _a | mm | 30.4601 | 30.3001 |
| Root diameter | d _f | mm | 29.5601 | 31.2001 |
| Clearance | c | mm | 0.0700 | 0.0700 |
| Thinning for backlash | f _n | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| Facewidth | b | mm | 5.0000 | 5.0000 |
| Pin diameter | d _p | mm | 0.5000 | 0.5000 |

Fig. 47.35 Gear dimensions

47.12.3 Tooth profile

After gear dimensions are specified, tooth profile calculation is performed based on rim thickness and outer diameter as shown in Figure 47.36.

| Description | Symbol | Units | Value |
|---------------------------|--------|-------|---------|
| Flex spline rim thickness | tf | mm | 0.4500 |
| Reducer out diameter | oc | mm | 42.0000 |

Fig.47.36 Rim thickness and outer diameter

After tooth profile calculation is completed, transverse tooth profile can be displayed as shown in Figure 47.37. However, tooth profile modification cannot be performed when it is based on hob. Since C/S tooth profile is generated to mesh with F/S tooth profile, both gears are contacting without any gaps as shown in the enlarged view of [E] in

Figure 47.37. Also, there is 22μm of gap between tooth tips in [F], and there is 2.6μm of gap between teeth in [G]. The clearance is 0.07mm as shown in Figure 47.40, and F/S tip area is found to be arc-shape of 0.359mm as calculated in Figure 47.41. When gear is specified as over-pin, tooth profile and pin are contacting as shown in Figure 47.42, and F/S contact diameter is found to be $d_c=33.01$ mm.

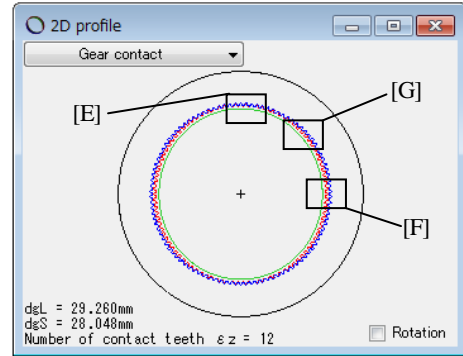


Fig.47.37 Tooth profile



(a) [E] section (b) [F] section

Fig. 47.38 Enlarged tooth profile

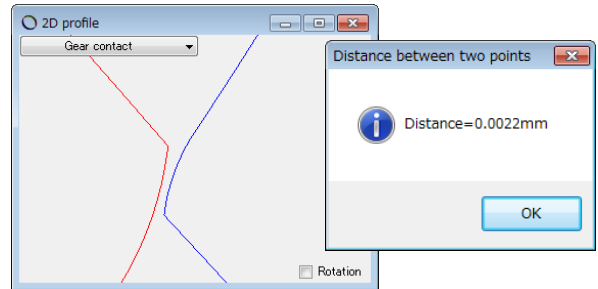


Fig.47.39 Enlarged tooth profile [G] section, distance measurement

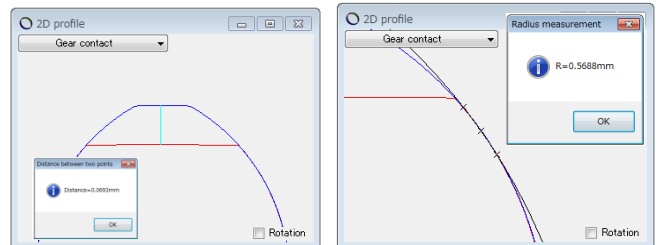
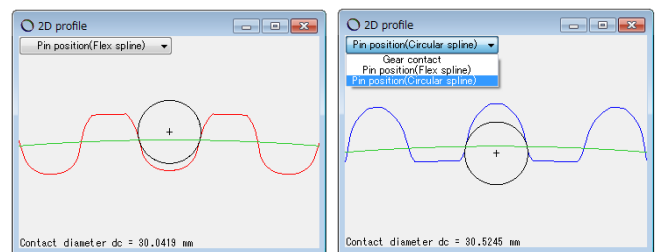


Fig.47.40 Distance measurement

Fig.47.41 Arc measurement



(a) F/S & Pin

(b) C/S & Pin

Fig.47.42 Pin positions

After tooth profile is generated, tooth profile rendering can be displayed as shown in Figure 47.43. This figure can be rotated just like 2D tooth profile, while changing observation angle in the supplemental form.

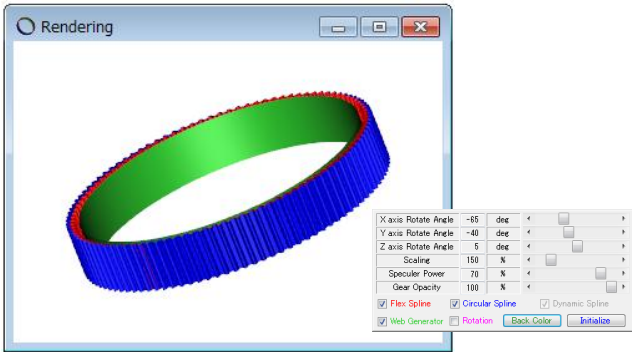


Fig.47.43 Rendering & supplemental form

47.12.4 FEM analysis & Hertzian stress

Analysis results are shown in Fig.47.44 to Fig. 47.47.

| Description | Symbol | Units | Flex spline | Circular spline |
|-----------------------------------|--------|-------|-------------|-----------------|
| Material symbol | --- | --- | A | A |
| Young's modulus | E | MPa | 206000.00 | 206000.00 |
| Poisson's ratio | ν | --- | 0.30 | 0.30 |
| Number of vertical distribution | mNo | --- | 21 | 21 |
| Number of horizontal distribution | wNo | --- | 20 | 20 |
| Load point position number | Nf | --- | 2 | 2 |
| Load | F | N | | 10.0000 |

Fig.47.44 FEM analysis setup

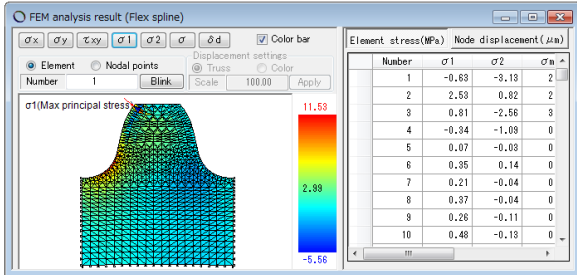


Fig.47.45 Flex spline, $\sigma_{1max}=11.5MPa$

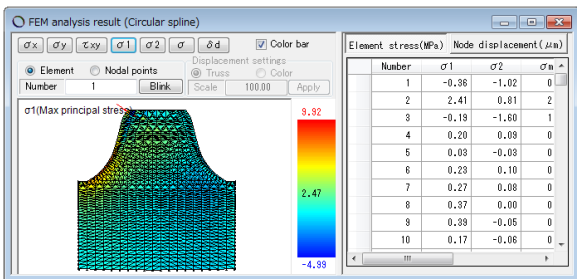


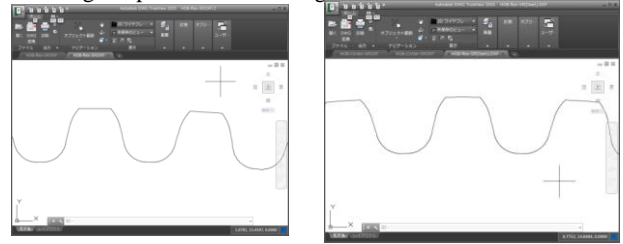
Fig.47.46 Circular spline, $\sigma_{1max}=472MPa$

| Description | Symbol | Units | Flex spline | Circular spline |
|----------------------------|------------|-------|-------------|-----------------|
| Load(Normal force) | F | N | | 10.0000 |
| Young's modulus | E | MPa | 206000.00 | 206000.00 |
| Poisson's ratio | ν | --- | 0.30 | 0.30 |
| Contact diameter | dc | mm | --- | 30.7200 |
| Result | Symbol | Units | Flex spline | Circular spline |
| Radius of tooth curvatures | ρ | mm | 3.7847 | 1.3832 |
| Hertzian stress | σ_H | MPa | | 266.8955 |

Fig.47.47 Hertzian stress

47.12.5 CAD drawing sample

Drawing samples are shown in Fig. 47.48 to Fig. 47.50.



F/S(circle) F/S(ellipse)

Fig.47.48 CAD drawing sample,

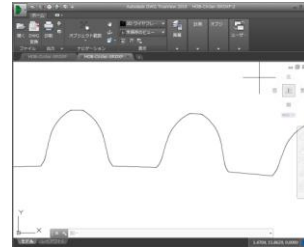


Fig.47.50 CAD drawing sample, C/S

47.13 Design data management

Design data can be managed as shown in Figure 47.51, while it can be also imported and exported as shown in Figure 47.52.

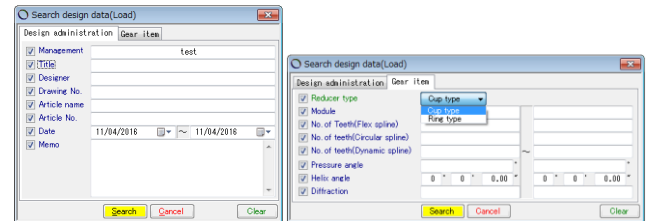


Fig.47.51 Design data management

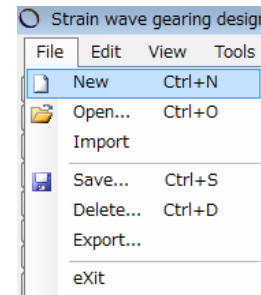


Fig.47.52 File management

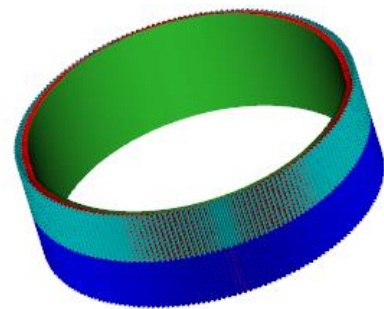


Fig.47.53 Ring type, $m=0.15$, $z_1=z_3=200$, $z_2=204$

◆日本語版カタログは別途お申しつけください。

[48] ウォーム加工用成形砥石歯形設計システム

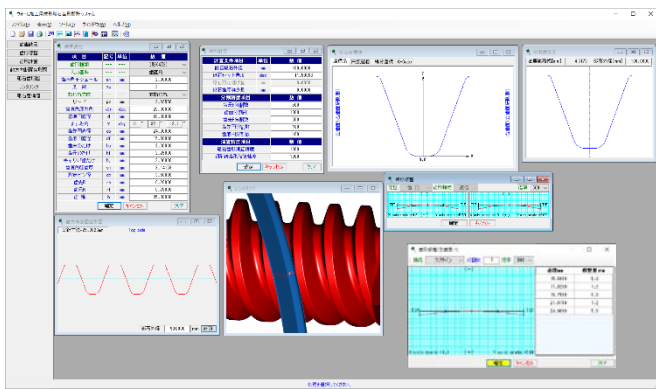


Fig. 48.1 ウォーム加工用成形砥石歯形設計システム

48.1 概要

本ソフトウェアは、ウォームを研削する場合の砥石形状を生成するソフトウェアです。ウォームの型式であるA, N, K, Iの他に歯面を凹面とするC形, L-Niemann歯形にも対応しています。

Niemann 歯形の研削は、砥石に凸面を与える加工方法ですが、これでは砥石形状に影響を受けるウォーム歯形となってしまいます。しかし、本ソフトウェアでは設計者が決定したウォーム歯形を得るために3次元干渉を考慮した砥石の形状を決定します。図48.1にソフトウェアの全体画面を示します。

48.2 諸元入力

基準ラックを図48.2で設定し、その後、図48.3でウォーム諸元を入力します。ウォーム歯形は5種類ありますが、ここではI形で説明しますが、 m, z_w, d を入力することで以後の値は[TAB]で標準値が入力されます。なお、L-Niemann 歯形（オプション）については48.7項をご覧ください。

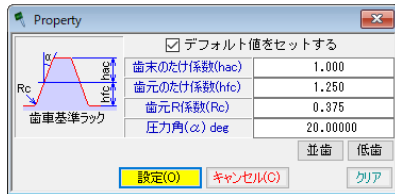


図 48.2 基準ラック



図 48.3 ウォーム諸元の設定

48.3 歯形修整

ウォームに歯形修整を与える場合、図48.4~48.6のように設定することができます。

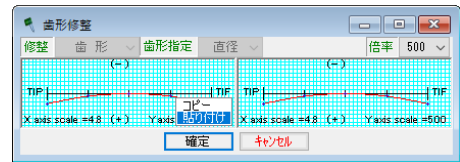


図 48.4 ウォーム歯形修整（左右歯面）

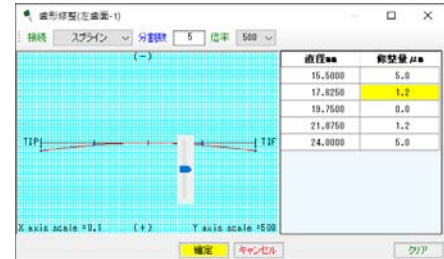


図 48.5 ウォーム歯形修整

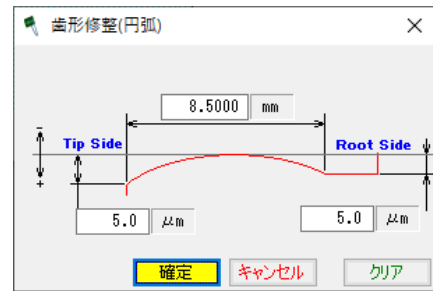


図 48.6 ウォーム歯形修整（クラウニング）

48.4 歯形生成

ウォーム歯形計算時には図48.7で砥石直径や砥石セット角などを設定します。砥石直径が変わると3次元干渉の影響で砥石形状が変わりますので正しい直径を入力する必要があります。また、砥石セット角の標準値は、ウォームすずみ角 (γ) としますが、セット角を変更した場合の砥石歯形を生成することも可能です。



図 48.7 歯形計算諸元

歯形修整を含めたウォームの軸方向断面歯形を図48.8に、無修整歯形と修整歯形を重ね合わせた歯形（歯先部）を図48.9に示します。また、ここでは距離計測も可能ですので図48.10では両者歯形の違いを計測した例を示しています。砥石が摩耗して90mm（100mmと同じ砥石歯形）となったとき図48.8右下にある砥石外径に砥石径を入力し再計算するとウォーム歯形は図48.11のように歯先部の片歯面の歯厚は0.0007mm大きくなります。なお、

図 48.8~48.11 では、歯形修整を含めた歯形を赤色線、無修整歯形を緑色線、研削後の歯形を青色線、そして、砥石径を任意に変更したときの歯形をピンク色線で示します。

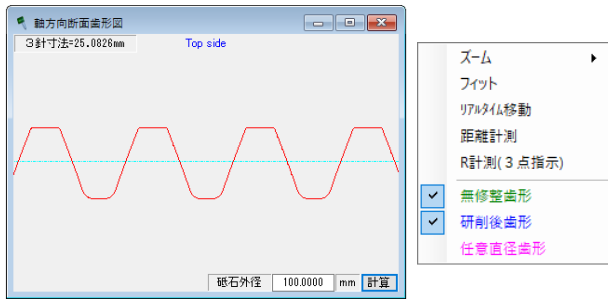


図 48.8 軸方向断面歯形と補助フォーム

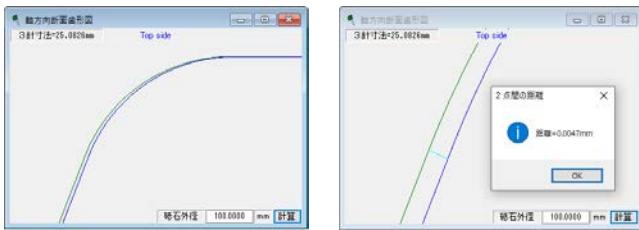


図 48.9 歯形重ね合わせ

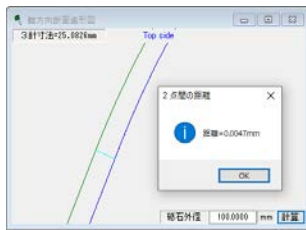


図 48.10 距離計測

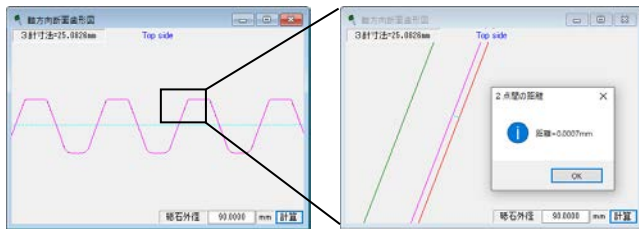


図 48.11 砥石径を 90mm としたときの歯形 (ピンク色)

48.5 砥石歯形

ウォーム研削用砥石歯形を図 48.12 に、また、ウォームと砥石を表示したレンダリングを図 48.13 に示します。図 48.13 では、砥石の位置などを変更することができますのでウォームとの接触状態を容易に把握することができます。

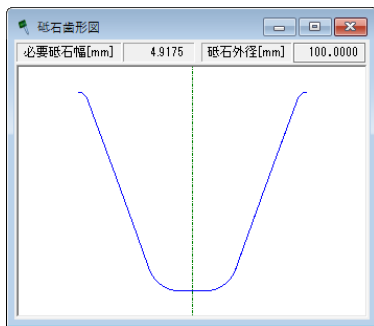


図 48.12 砥石歯形

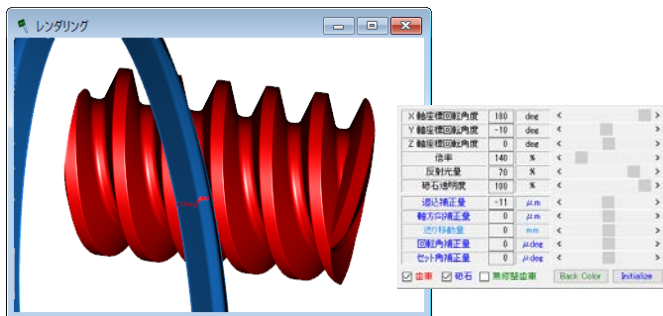


図 48.13 レンダリング

48.6 砥石座標

研削する砥石の座標系、座標および G-code を図 48.14~48.17 に示します。また、図 48.18 に CAD 作図例 (砥石歯形左歯面) を示します。右歯面は、図 48.15~48.17 で設定することができます。

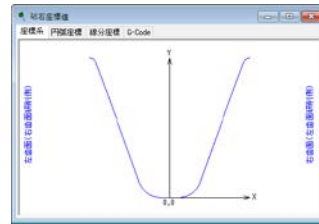


図 48.14 砥石歯形と座標系



図 48.15 砥石円弧座標



図 48.16 砥石線分座標



図 48.17 G-code

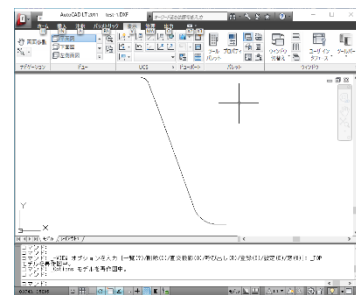


図 48.18 CAD 作図例 (砥石歯形左歯面)

48.7 L-Niemann 歯形 (オプション)

Niemann 歯形の研削は、砥石に凸面を与えることでウォーム歯形を凹面としているため砥石直径や歯車諸元によってウォームの凹形状が変わるため適当に調整が困難と推測できます。しかし、本ソフトウェア (L-Niemann 歯形) では、設計者が定めたウォームの凹面を得ることができる砥石形状を生成しますので設計時の歯当たりを正しく得ることができます。例として図 48.19 の諸元を持つ L-Niemann 歯形ウォームの砥石歯形の生成例を以下に示します。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|----------|-----|-----|--------------|
| 歯形種類 | --- | --- | L-Niemann |
| 入力基準 | --- | --- | 歯直角 |
| 歯直角モジュール | mn | mm | 2.00000 |
| 歯数 | z | --- | 1 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| リード | pz | mm | 6.31484 |
| 歯直角圧力角 | αn | deg | 22.50000 |
| 基準円直径 | d | mm | 20.00000 |
| すずみ角 | γ | deg | 5° 44' 21.0" |
| 歯先円直径 | da | mm | 24.00000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 16.00000 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 2.00000 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 2.00000 |
| キャリバ歯たけ | hj | mm | 2.00000 |
| 歯直角弦歯厚 | sn | mm | 3.14159 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 3.43700 |
| 歯先R | ra | mm | 0.20000 |
| 歯元R | rb | mm | 0.75000 |
| 歯幅 | b | mm | 34.70000 |
| 歯面凹半径 | Rm | mm | 20.00000 |

図 48.19 L-Niemann 歯形ウォーム

| 計算条件項目 | 単位 | 数値 |
|------------|-----|----------|
| 計算砥石外径 | mm | 100.0000 |
| 砥石セット角度 | deg | 5.73917 |
| 砥石刃元逃げ量 | mm | 0.0000 |
| 砥石歯厚減少量 | mm | 0.0000 |
| 分割精度項目 | | 数値 |
| 歯元R分割数 | | 500 |
| 歯面分割数 | | 1000 |
| 歯先R分割数 | | 500 |
| 歯先円分割数 | | 100 |
| 歯底円分割数 | | 100 |
| 演算精度項目 | | 数値 |
| 砥石歯形演算精度 | | 1000 |
| 研削前後歯形演算精度 | | 1000 |

図 48.20 歯形計算諸元

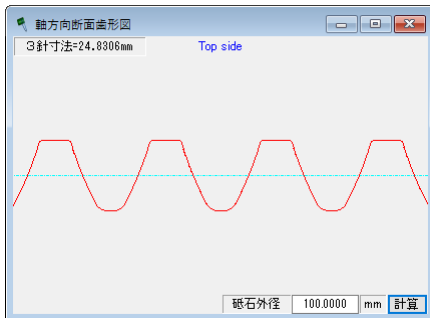


図 48.21 軸方向断面歯形

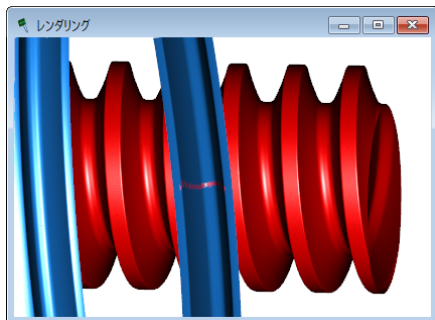


図 48.22 レンダリング

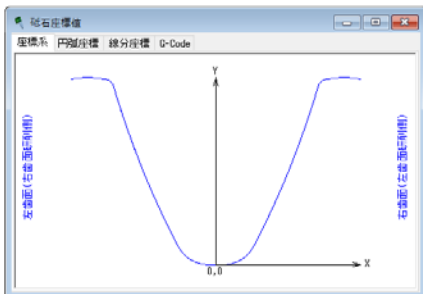


図 48.23 砥石歯形と座標系

| 項目 | 記号 | 単位 | Worm | Wheel |
|----------|---------------|-----|-----------|--------------|
| 歯形の種類 | --- | --- | L-Niemann | Worm Wheel-1 |
| 基準平面 | --- | --- | 歯直角平面 | 歯直角平面 |
| 歯直角モジュール | mn | mm | 2.00000 | 2.00000 |
| 歯直角圧力角 | α_n | deg | 22.50000 | 20.00000 |
| 条数/歯数 | z | --- | 1 | 40 |
| 基準円直径 | dm | mm | 20.0000 | 80.4030 |
| 交差角 | Σ | deg | 0.00000 | |
| 進み角 | γ_{m1} | deg | 5 | 44 |
| ねじれ角 | β | deg | 5 | 44 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ | 右ねじれ |
| 歯直角転位係数 | xn | --- | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | 法線歯厚減少量 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 模転位係数 | xh | --- | 0.0000 | 0.0000 |
| のど直径 | dt | --- | ***** | 84.4030 |
| 歯先円直径/外径 | da | mm | 24.0000 | 87.4030 |
| 歯底円直径 | df | mm | 15.0000 | 75.4030 |
| 中心距離 | a | mm | 50.20150 | |
| クリアランス | ck | mm | 14.5708 | 14.5708 |
| 歯幅 | b | mm | 35.0000 | 15.0000 |
| 測定ピッチ | dp | mm | 3.4200 | 3.4580 |
| 歯先R | ra | mm | 0.2000 | ----- |
| 基準ラック歯元R | rf | mm | 0.4000 | 0.4000 |
| 凹R | Ra | mm | 20.0000 | ----- |

図 48.24 L-Niemann ウォーム諸元

| 条件設定 | | 精度設定 | |
|-----------|---------------|------|-----------------|
| 項目(Worm) | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | mn | mm | 2.00000 |
| 圧力角 | α_n | deg | 22.50000 |
| 砥石外径 | OD | mm | ***** |
| 砥石凸R | Δr | mm | 20.0000 |
| 工具(Wheel) | | 記号 | 単位 |
| モジュール | mnc | mm | 1.99000 |
| 圧力角 | α_{nc} | deg | 21.79440 |
| 条数 | Zw | --- | 1 |
| 基準円直径 | dmc | mm | 20.0000 |
| 進み角 | γ_c | deg | 5 * 42' / 37.38 |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 取り付け角 | Σc | deg | 0.00000 |
| 取付中心距離 | ac | mm | 50.20464 |
| 刃末のたけ | hkc | mm | 2.5031 |
| 刃元のたけ | hfc | mm | 4.1982 |
| 刃厚 | sc | mm | 3.1259 |
| 刃先R | r | mm | 0.3980 |
| 溝数 | N | --- | 12 |
| のど丸み半径 | rt | --- | 8.0000 |

図 48.25 歯形計算 (ホイールは転位ホブ)

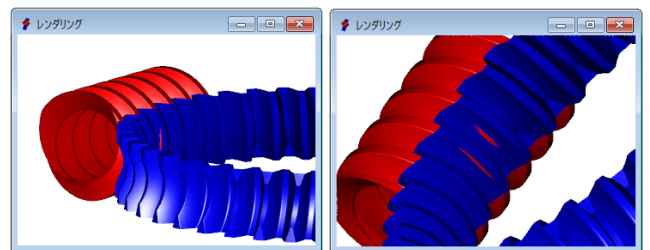


図 48.26 レンダリング

歯形修整や砥石座標の出力などは A, N, K, I 歯形と同様のため省略します。

48.8 L-Niemann ウォーム設計ソフトウェア

L-Niemann ウォーム設計ソフトウェアは、「ウォーム加工用成形砥石歯形設計システム」には含みませんが、L-Niemann ウォームの設計例として図 48.24~48.26 を示します。

詳しくは、L-Niemann ウォーム設計ソフトウェアのカタログをご覧ください。

[49]遊星歯車機構の起振力解析システム

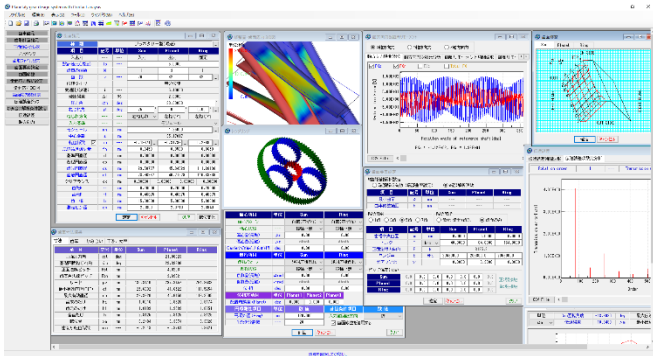


図 49.1 遊星歯車機構の起振力解析システム

49.1 概要

遊星歯車機構の起振力は、歯数の組み合わせや位相の影響を受けるため、間違った歯数の組み合わせとした場合には、高精度な歯車や高精度な組み立てとしても遊星歯車機構の起振力を抑えることはできません。また、それらに加えて歯形偏差や歯すじ偏差、そして負荷が作用したときの端部接触による影響も起振力に影響を及ぼしますので起振力は増加することになります。また、位相を最適とした組み合わせとした場合でも歯車精度や端部接触による影響を受けることになります。そして、コストなど種々考慮して設計した歯車機構がどれほど安定した遊星歯車機構であるかを知るためには起振力(値, 変化)を知ることが重要となります。

汎用 CAE ソフトウェアで遊星歯車装置の振動解析をする場合には、歯車やキャリアの起振力を基に解析する必要があります。

これらの問題を解決するために、**遊星歯車機構の起振力解析システム**では、位相や歯面偏差、そして歯の接触問題を考慮して遊星歯車機構の起振力を解析することができますのでこの起振力を使用することが有効な評価する手段と言えます。図 49.1 に遊星歯車機構の起振力解析システムの全体画面を示します。

49.2 適用

- (1) 型式 : プラネタリー, ソーラ, スター
- (2) 位相 : 同位相, 等分位相, カウンター位相, 不等配置
- (3) 歯形 : インボリュート歯形

49.3 プロパティ (基準ラック)

プロパティで、歯先円直径の決定方式、基準ラック、モジュールまたは中心距離基準、歯車精度、平均摩擦係数の設定をします。

図 49.2 にプロパティの画面を示します。

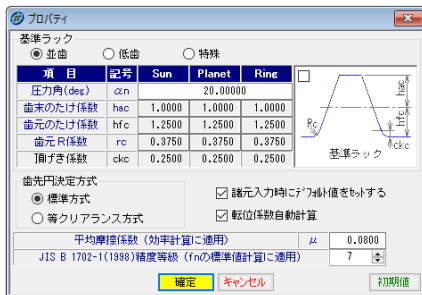


図 49.2 プロパティ

49.4 遊星歯車機構の選択

図 49.3 に示す遊星歯車タイプの選択をします(プラネタリー型, ソーラー型, スター型の増減速)。次に, 図 49.4 で遊星歯車諸元を設定します。

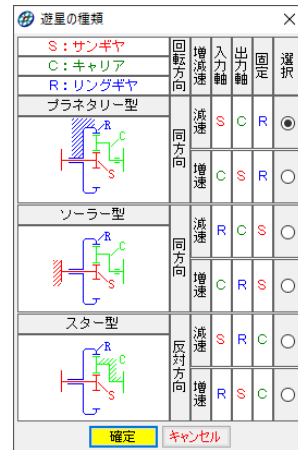


図 49.3 遊星歯車のタイプ



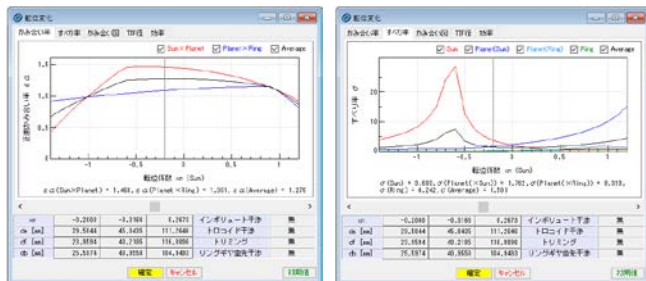
図 49.4 歯車諸元



図 49.5 歯数選択

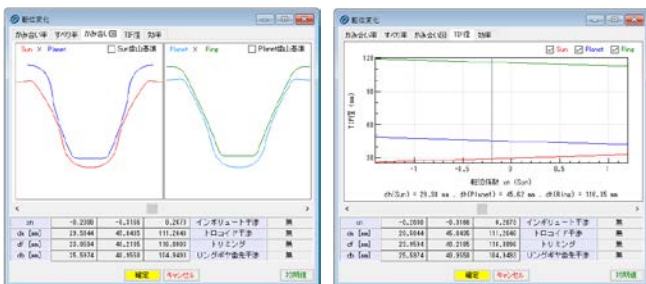
- (1) 遊星歯車の個数は, 1~6 です。
- (2) 歯数は, 直接入力する方式と, 速比から計算した歯数一覧(図 49.5) から選択する方式があります。図 49.5 では, 等分位相で速比誤差を 10% として計算した例を示しています。
- (3) 中心距離基準, モジュール基準, そして中心距離, モジュールを無関係に設定することができます。

- (4) 転位係数の計算は、モジュールと中心距離からバックラッシが0になるように計算します。
- (5) 法線歯厚減少量の入力値は、デフォルト値として JIS バックラッシ標準中間値の 1/2 を表示します。
- (6) 歯先円直径はプロパティで設定した基準ラックの歯たけと転位係数から標準値を計算しますが変更は可能です。
- (7) 外歯車の歯元部の形状は、基準ラックによる創成運動によって生成する歯形です。内歯車の歯元は、入力 R 接続です。
- (8) 歯車の歯先は R で作成することができます。
- (9) 転位係数は、1 種を変更すると残りの転位係数が連動して変化しますが、**転位係数** を **転位係数** のように を外すことで歯車それぞれ任意に転位係数を入力することができます。
- (10) 歯車諸元画面 (図 49.4) 右下にある **転位変化** では転位の変化に伴う「かみ合い率」、「すべり率」、「歯形」、「TIF 径」、そして「効率」を図 49.6 のように表示します。例えば、効率を基準として転位係数を決定する場合は、図 49.6 (e) の効率グラフを指針として転位係数を決定することができます。そして、図 49.6 (e) の画面のスライダーを移動し、適正値を確定することにより転位係数を図 49.4 の歯車諸元に移行することができます。



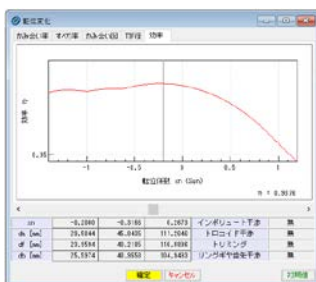
(a) かみ合い率

(b) すべり率

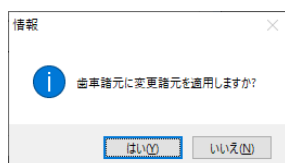


(c) 歯形

(d) TIF 径



(e) 効率



(f) 数値の適用

図 49.6 転位変化に伴う各値

49.5 歯車寸法

歯車諸元 (図 49.4) 確定後、各種計算結果を図 49.7~49.10 に示します。この画面で、寸法、歯厚、干渉の有無、効率、バックラッシなどの確認をすることができます。

| 項目 | 記号 | 単位 | Sun | Planet | Ring |
|--------------|------------|-----|----------|----------|----------|
| 正面圧力角 | α_t | deg | | 21.88023 | |
| 基礎円筒ねじれ角 | β_b | deg | | 23.38896 | |
| 正面法線ピッチ | Pbt | mm | | 4.0208 | |
| 歯直角法線ピッチ | Pbn | mm | | 3.6302 | |
| リード | pz | mm | 185.8410 | 287.3457 | 761.8489 |
| 最小有効直径 (TIF) | dt | mm | 25.6392 | 41.6522 | 111.5254 |
| 最大有効直径 | dh | mm | 29.3820 | 45.6150 | 116.3505 |
| 歯末のたけ | ha | mm | 1.0016 | 0.8526 | 0.9174 |
| 歯元のたけ | hf | mm | 1.8109 | 1.9539 | 1.8951 |
| 全歯たけ | h | mm | 2.8125 | 2.8125 | 2.8125 |
| 転位量 | xm | mm | -0.2484 | -0.3374 | 0.3326 |
| 歯切り転位係数 | xnc | --- | -0.2513 | -0.3764 | 0.3421 |

図 49.7 寸法

| 項目 | 記号 | 単位 | Sun | Planet | Ring |
|-----------|-----|-----|---------|---------|----------|
| 歯直角円弧歯厚 | sn | mm | 1.7348 | 1.6210 | 1.6522 |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 1.9141 | 1.7896 | 1.8230 |
| またぎ歯数 | zm | --- | 3 | 5 | 13 |
| 基準またぎ歯厚 | W | mm | 9.5188 | 17.0749 | 48.2534 |
| 設計またぎ歯厚 | W' | mm | 9.4736 | 17.0249 | 48.3184 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 2.0800 | 2.0710 | 2.0940 |
| 基準「ギ-ビ」寸法 | dm | mm | 28.8507 | 46.0705 | 110.9395 |
| 設計「ギ-ビ」寸法 | dm' | mm | 28.7226 | 45.9198 | 111.1292 |
| キャリア歯たけ | hj | mm | 1.0253 | 0.8656 | 0.9142 |
| 基準キャリア歯厚 | Sj | mm | 1.7818 | 1.6739 | 1.7214 |
| 設計キャリア歯厚 | Sj' | mm | 1.7341 | 1.6208 | 1.6451 |

図 49.8 歯厚

| 項目 | 記号 | 単位 | Sun | Planet | Ring |
|--------------|------------------------|-----|----------|---------------|----------|
| 正面かみ合い圧力角 | α_{wt} | deg | 18.88674 | | 24.52848 |
| かみ合い円筒ねじれ角 | β_w | deg | 24.57652 | | 25.43734 |
| かみ合いピッチ円直径 | dw | mm | 27.0540 | 43.2884 | 45.0178 |
| 有効歯幅 | bw | mm | 15.0000 | | 15.0000 |
| かみ合い長さ | ga | mm | 5.8696 | | 5.7764 |
| 近寄りかみ合い率 | $\varepsilon \alpha 1$ | --- | 0.7650 | | 1.2630 |
| 遠のきかみ合い率 | $\varepsilon \alpha 2$ | --- | 0.7048 | | 0.1736 |
| 正面かみ合い率 | $\varepsilon \alpha$ | --- | 1.4598 | | 1.4366 |
| 重なりかみ合い率 | $\varepsilon \beta$ | --- | 1.6143 | | 1.6143 |
| 全かみ合い率 | $\varepsilon \gamma$ | --- | 3.0741 | | 3.0509 |
| すべり率 (歯先側) | σ_a | --- | 0.6385 | 0.7880 | 0.0424 |
| すべり率 (歯元側) | σ_f | --- | -3.6739 | -1.7659 | -0.7260 |
| 正面法線方向バックラッシ | jnt | mm | 0.1095 | | 0.1253 |
| バックラッシ角度 | j θ | deg | 0.46338 | 0.28961 | 0.35059 |
| 入力軸線バックラッシ角度 | $\Sigma j \theta$ | deg | | 1.02482 (Sun) | |
| 最大接触直径 | dja | mm | 29.3820 | 45.6150 | 45.6150 |
| 最小接触直径 | djf | mm | 25.7379 | 41.7972 | 41.8348 |

図 49.9 寸法 (かみ合い)

| 項目 | Ring |
|--------------|---------|
| 効率 | 0.98552 |
| Ring gear 干渉 | |
| インボリュート干渉 | 発生しない |
| トロコイド干渉 | 発生しない |
| トリミング | 発生しない |
| 歯先干渉 | 発生しない |
| 回転比 | |
| Sun | 1.0000 |
| Planet | -0.3064 |
| Ring | 0.0000 |
| Carrier | 0.1961 |

図 49.10 効率、干渉

49.6 かみ合い図

歯車のかみ合いを図49.11および図49.12のように2次元図で表示します。操作画面によって、補助円や共通法線を表示することができますので歯面の接触位置の確認が容易です。歯車の回転角度を変え、拡大表示することができます。

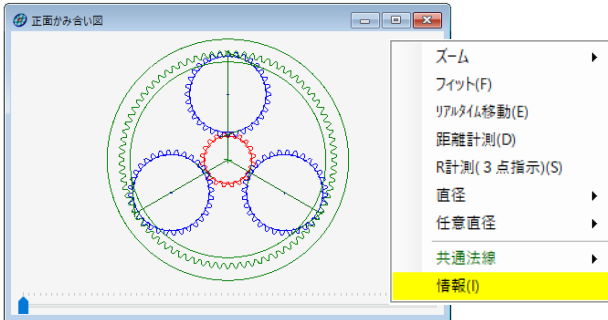
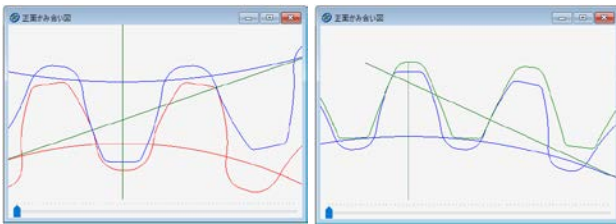


図 49.11 かみ合い図



(a) 太陽×遊星 (b) 遊星×内歯車

図 49.12 かみ合い図拡大

49.7 レンダリング

歯車3Dのかみ合いを図49.13のように表示することができます。X, Y, Z方向に回転させることができます。

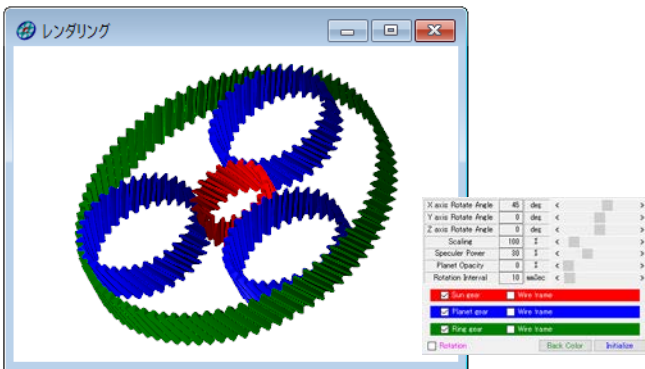


図 49.13 歯形レンダリング

49.8 歯形データファイル出力

生成した3種類歯車の歯形はファイル出力することができます。図49.14にCAD作図例を示します。

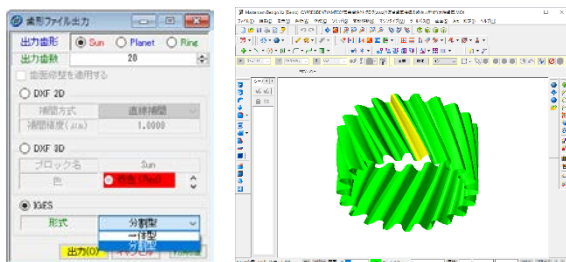


図 49.14 歯形データ出力とCAD作図例

49.9 歯面修整

歯面修整は、太陽歯車、遊星歯車、内歯車それぞれに施すことができます。修整の種類は、歯形修整、歯すじ修整、歯面修整の3種類ですが、実測した歯面データ(図49.18)を読み込む機能があり、図49.19で図49.15にデータを移行します。

本例では、図49.15~49.17のように遊星歯車に歯すじ修整のみ与えた例を示します。

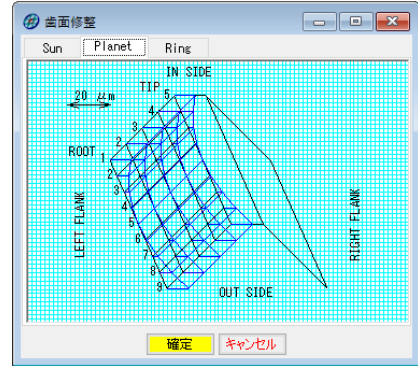


図 49.15 歯すじ修整の例(遊星歯車)

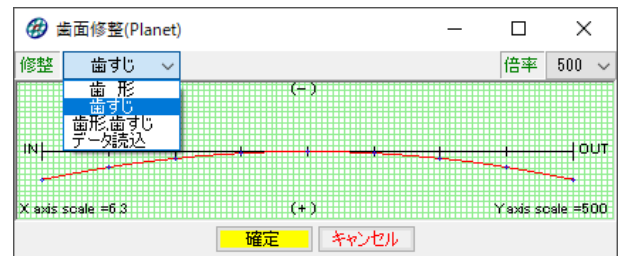


図 49.16 歯すじ修整の設定1



図 49.17 歯すじ修整の設定2

| 歯幅位置 | 修整量 |
|---------|------|
| 0.0000 | 10.0 |
| 1.8750 | 5.8 |
| 3.7500 | 2.5 |
| 5.6250 | 0.0 |
| 7.5000 | 0.0 |
| 9.3750 | 0.6 |
| 11.2500 | 2.0 |
| 13.1250 | 5.6 |
| 15.0000 | 10.0 |

図 49.18 歯面修整データの例(csv)

| No. | 作用線長さ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----|---------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 10.2000 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 2 | 9.9000 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 3 | 9.6000 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 4 | 9.3000 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 5 | 9.0000 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 6 | 8.6940 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 7 | 8.3880 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 8 | 8.0820 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 9 | 7.7760 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 10 | 7.4700 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |
| 11 | 7.1640 | 10.0 | 0.1 | 0.4 | 0.9 | 1.6 | 2.5 | 3.6 | 4.8 | 6.0 | 7.2 | 8.4 |

図 49.19 歯面修整実測データの読み込み

49.10 歯面応力解析設定

歯面応力解析は、CT-FEM Operaiiii (ソフトウェア[45]参照)の歯面膜要素を用いた解析機能を採用していますので図 49.20 のように、まず、端部解析の有効、無効を設定します。端部解析は、トロコイド干渉などの端部を解析する場合に使用します。次に、歯幅中央位置、トルク、ヤング率、ポアソン比、ピッチ偏差を設定し、図 49.21 で、かみ合い範囲角度と、食い違い誤差および並行度誤差を設定します。歯面応力解析結果を図 49.22~49.25 に示します。



図 49.20 歯面応力解析設定



図 49.21 歯面応力解析条件設定

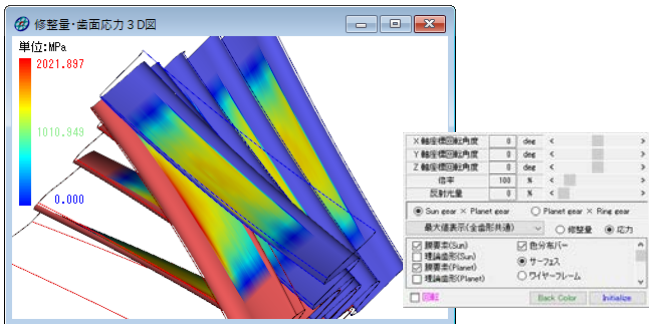


図 49.22 歯面応力 (太陽歯車×遊星歯車)

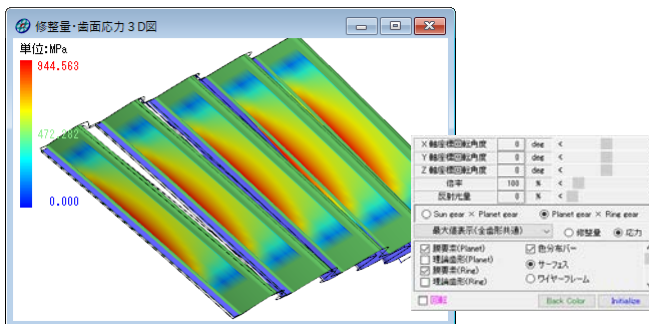


図 49.23 歯面応力 (遊星歯車×内歯車)

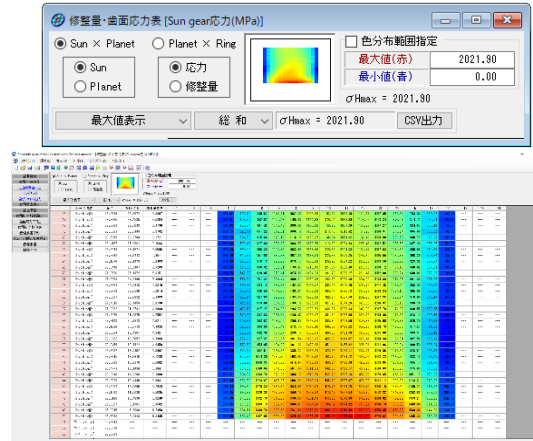


図 49.24 太陽の歯面応力 (太陽歯車×遊星歯車)

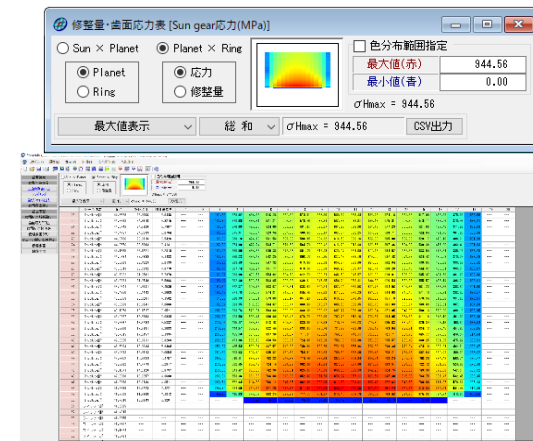
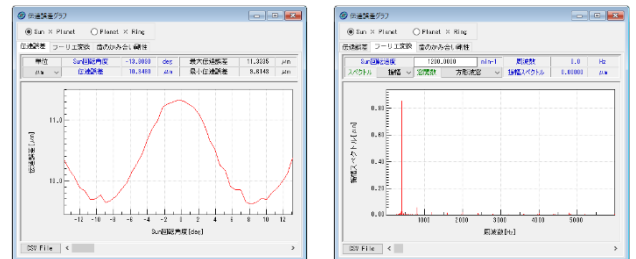


図 49.25 遊星の歯面応力 (遊星歯車×内歯車)

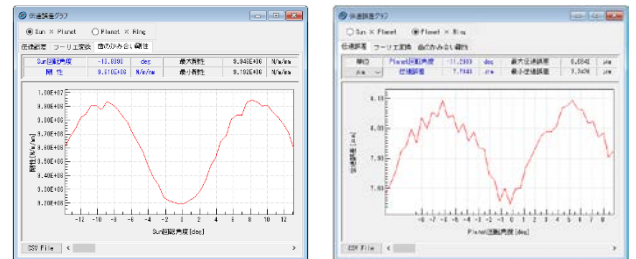
49.11 伝達誤差解析結果

伝達誤差解析結果を図 49.26 に示します。



(a) sun × planet, TE=1.72 μ m

(b) sun × planet, FFT



(c) sun × planet, 剛性

(d) planet × ring, TE=0.35 μ m

図 49.26 伝達誤差解析結果

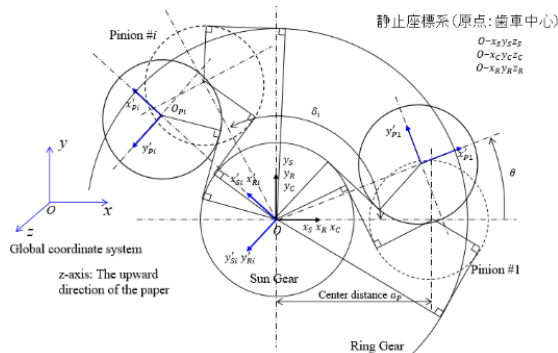
49.12 遊星歯車機構のかみ合い解析

かみ合い解析条件を図 49.27 のように設定します。ここでは、軸の偏心率、軸の倒れ量、位相、位置角度誤差、入力軸の回転角

向,そして,ここでは解析時の1ピッチ分割数を設定しています。また,遊星歯車構の座標系を図49.31に示します。



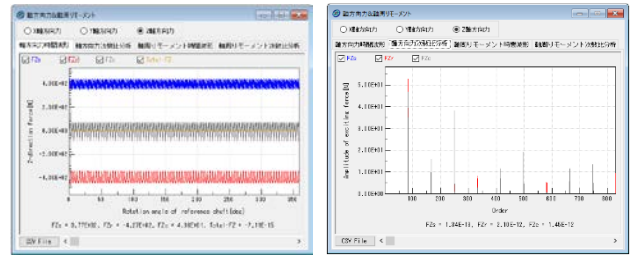
図 49.27 かみ合い解析条件設定



(z軸方向が歯車軸方向に対応)

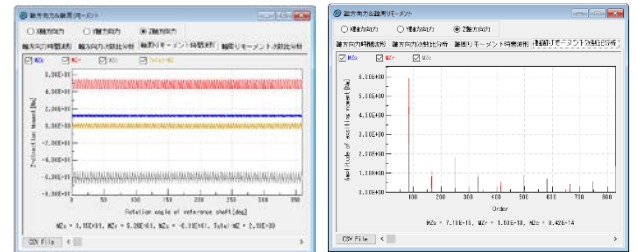
図 49.28 遊星歯車機構の座標系⁽¹⁾

解析結果は,遊星歯車機構の伝達誤差およびサンギヤs, キャリアc, リングギヤrに作用するX, Y, Z軸方向の力と各軸回りのモーメントを図49.29~49.31のように時間波形と次数比分析のスペクトルで表示します(Y軸方向力の表示は省略)。



(a) Z軸方向の力の時間波形

(b) 次数比分析

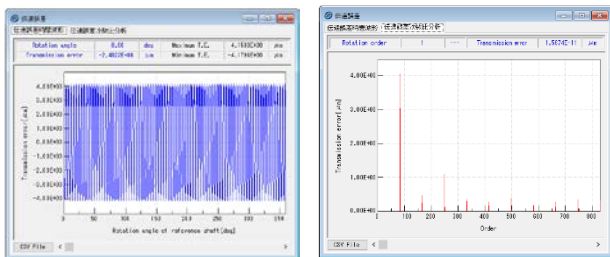


(c) Z軸周回モーメントの時間波形

(d) 次数比分析

図 49.31 各要素に作用するZ軸方向の力とモーメント

これらの解析値(時間波形および次数比分析)は,図49.32のようにcsvファイルとして出力することができます。



(a) 伝達誤差時間波形

(b) 次数比分析

図 49.29 遊星歯車機構の伝達誤差

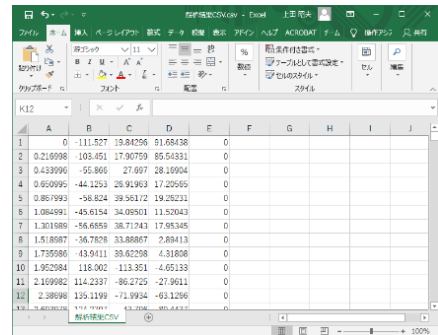
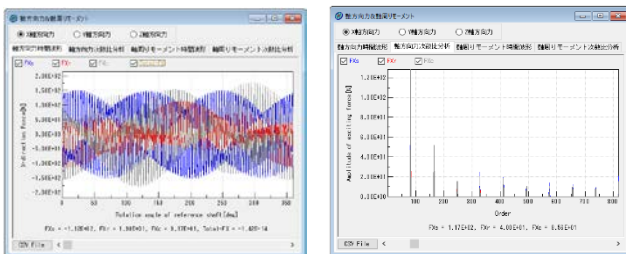


図 49.32 解析結果のデータ出力例

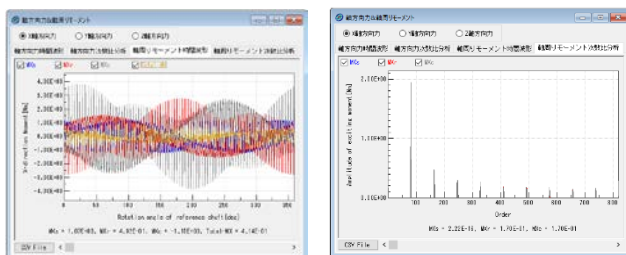
49.13 HELP 機能

操作方法を知りたい場合は,図49.33の[HELP]機能を使用することができます。



(a) X軸方向の力の時間波形

(b) 次数比分析



(c) X軸周回モーメント時間波形

(d) 次数比分析

図 49.30 各要素に作用するX軸方向の力とモーメント

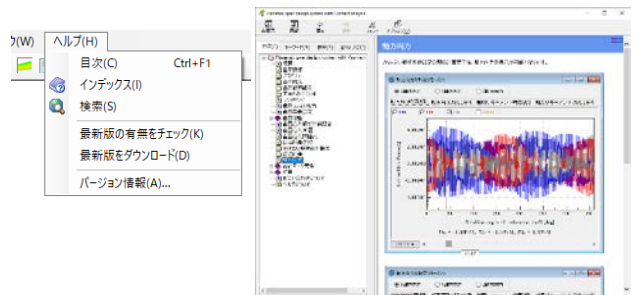


図 49.33 HELP 機能

49.14 遊星歯車機構の起振力解析例

遊星歯車機構の歯数の組み合わせの違いによる起振力解析例を 図 49.34~49.40 に示します。解析例 1 のかみ合い位相は、同位相であり解析例 2 は、等分位相です。なお、かみ合い解析条件設定は、図 49.27 と同じとしています。

(1) 解析例 1

| 種類 | 項目 | 記号 | 単位 | Sun | Planet | Ring |
|----------|------------|-----|-----|----------|----------|-----------|
| 入出力 | --- | --- | --- | 入力 | 出力 | 固定 |
| 設計速比(減速) | io | --- | --- | --- | 5.0000 | --- |
| 歯車の個数 | N | --- | --- | 1 | 3 | 1 |
| 歯数 | z | --- | --- | 21 | 31 | 81 |
| 位相タイプ | --- | --- | --- | 同位相 | | |
| 実速比(減速) | i | --- | --- | 4.85714 | --- | --- |
| 速比誤差 | Δi | % | --- | -2.8571 | --- | --- |
| 圧力角 | α_n | deg | --- | 20.00000 | --- | --- |
| ねじれ角 | β | deg | --- | 0 | 0 | 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 入力基準 | --- | --- | --- | モジュール | | |
| モジュール | mn | mm | --- | 1.25000 | --- | --- |
| 中心距離 | a | mm | --- | 31.87500 | --- | --- |
| 転位係数 | xn | --- | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | --- | 0.0430 | 0.0480 | 0.0620 |
| 基準円直径 | d | mm | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 基準円直径 | db | mm | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | --- | 28.75000 | 40.00000 | 38.75000 |
| 歯底円直径 | df | mm | --- | 23.12500 | 34.37500 | 104.37500 |
| クリアランス | ck | mm | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯先R | ra | mm | --- | 0.20000 | 0.20000 | 0.20000 |
| 歯元R | rf | mm | --- | 0.48875 | 0.48875 | 0.48875 |
| 歯幅 | b | mm | --- | 15.00000 | 15.00000 | 15.00000 |
| 測定ピン径 | dp | mm | --- | 2.1560 | 2.1310 | 2.0750 |

図 49.34 歯車諸元 (解析例 1)

端部接触解析設定
 端部解析有効 (端部曲率設定) 端部解析無効

| 項目 | 記号 | 単位 | Sun | Planet | Ring |
|--------|--------|----|-----|--------|------|
| 最小曲率 | ρ | mm | --- | --- | --- |
| 曲率修整輪回 | h | mm | --- | --- | --- |

解析歯数: 1歯 3歯 5歯 7歯

解析箇所: 歯+歯面+歯先 歯面のみ

| 項目 | 記号 | 単位 | Sun | Planet | Ring |
|---------|-------|-----|----------|----------|----------|
| 歯幅中央位置 | bm | mm | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 |
| トルク | T | N·m | 40.0000 | 57.1429 | 154.2858 |
| 正面法線方向力 | F | N | --- | \$248.2 | --- |
| ヤング率 | E | MPa | 205800.0 | 205800.0 | 205800.0 |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.3000 | 0.3000 | 0.3000 |

ピッチ偏差 (μm)
 Sun: 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
 Planet: 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
 Ring: 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0

正: 密接接触
 負: 空接接触

図 49.35 歯面応力解析設定 (解析例 1, 2 共通)

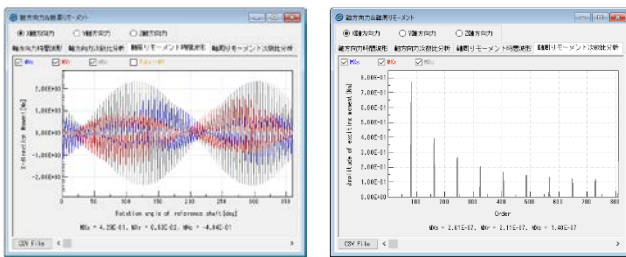


図 49.36 各要素に作用する X 軸方向の力とモーメント

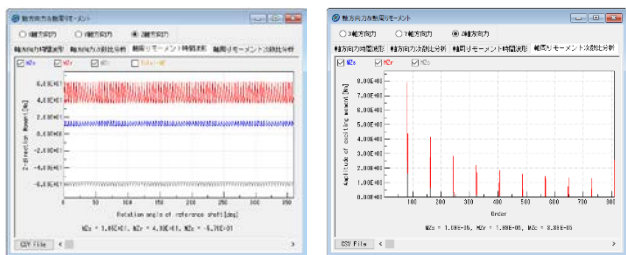


図 49.37 各要素に作用する Z 軸方向の力とモーメント

(2) 解析例 2

| 種類 | 項目 | 記号 | 単位 | Sun | Planet | Ring |
|----------|------------|-----|-----|----------|----------|-----------|
| 入出力 | --- | --- | --- | 入力 | 出力 | 固定 |
| 設計速比(減速) | io | --- | --- | --- | 5.0000 | --- |
| 歯車の個数 | N | --- | --- | 1 | 3 | 1 |
| 歯数 | z | --- | --- | 20 | 31 | 82 |
| 位相タイプ | --- | --- | --- | 等分位相 | | |
| 実速比(減速) | i | --- | --- | 5.10000 | --- | --- |
| 速比誤差 | Δi | % | --- | 2.0000 | --- | --- |
| 圧力角 | α_n | deg | --- | 20.00000 | --- | --- |
| ねじれ角 | β | deg | --- | 0 | 0 | 0.00 |
| ねじれ方向 | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 入力基準 | --- | --- | --- | モジュール | | |
| モジュール | mn | mm | --- | 1.25000 | --- | --- |
| 中心距離 | a | mm | --- | 31.87500 | --- | --- |
| 転位係数 | xn | --- | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | --- | 0.0430 | 0.0480 | 0.0620 |
| 基準円直径 | d | mm | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 基準円直径 | db | mm | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | --- | 27.50000 | 41.25000 | 100.00000 |
| 歯底円直径 | df | mm | --- | 21.87500 | 35.62500 | 105.62500 |
| クリアランス | ck | mm | --- | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯先R | ra | mm | --- | 0.20000 | 0.20000 | 0.20000 |
| 歯元R | rf | mm | --- | 0.48875 | 0.48875 | 0.48875 |
| 歯幅 | b | mm | --- | 15.00000 | 15.00000 | 15.00000 |
| 測定ピン径 | dp | mm | --- | 2.1560 | 2.1310 | 2.0750 |

図 49.38 歯車諸元 (解析例 2)

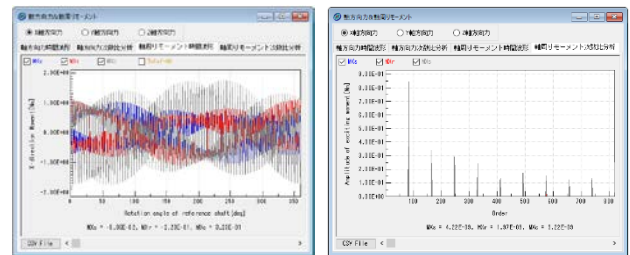


図 49.39 各要素に作用する X 軸方向の力とモーメント

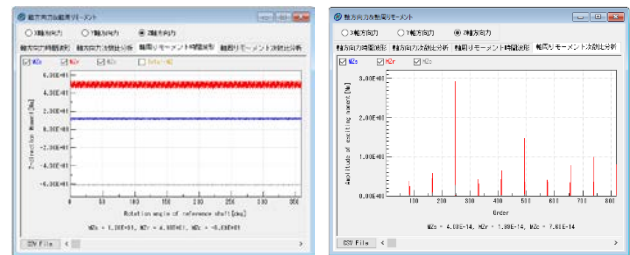


図 49.40 各要素に作用する Z 軸方向の力とモーメント

X 軸周りのモーメント (倒れ方向起振力) は、図 49.36 と図 49.39 の比較から等分位相の方が大きくなっています。一方、Z 軸周りのモーメント (回転方向起振力) は、図 49.37 と図 49.40 の比較から同位相の方が大きくなっています。また、同位相の遊星歯車では、図 49.36 と図 49.37 の比較から、どちらもかみ合い次数 $z=81$ 次とその高調成分でピークとなります。等分位相の遊星歯車では、図 49.39 と図 49.40 の比較から、Z 軸回りのモーメントはかみ合い次数 $z=82$ とその高調成分でピークを示しますが、X 軸周りのモーメントでは、 $z=83$ でピークを示しています。すなわち、この解析ソフトウェアは、遊星歯車特有のサイドバンド現象も解析することができます。ここでは、各軸回りのモーメントしか示していませんが、各軸方向の力に付いても同様の結果は得られます。

参考文献

- (1) 森川他, 遊星歯車のサイドバンド現象, 機論, Vol.80, No.815 (2014)

[101]その他ソフトウェアの作図例

図 101.1~101.13 のソフトウェアは本カタログでは詳しく説明していませんので別途お問い合わせください。

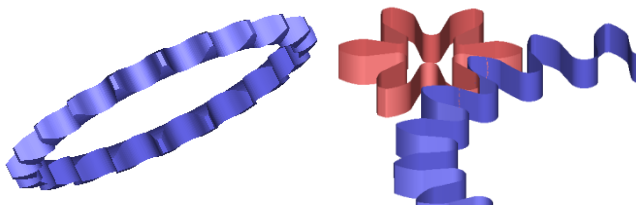


図 101.1 スプロケット

図 101.2 サイクロイド歯車

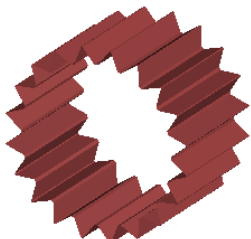
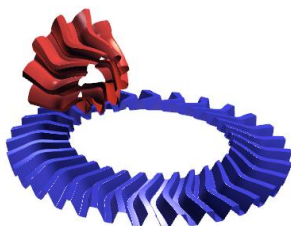


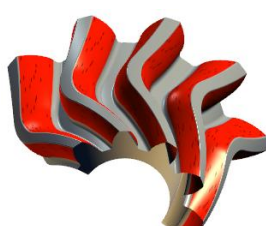
図 101.3 三角セレーション



図 101.4 円弧歯形歯車



(a)レンダリング



(b)歯当たり

図 101.5 ダブルスパイラルベベル(Soft No.[2]に一部記載)

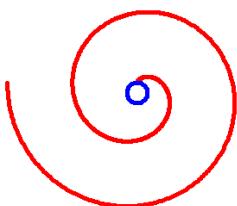
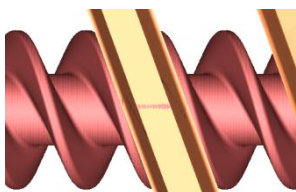


図 101.6 インボリュート曲線



図 101.7 ピニオンカッタ



I形(4形)砥石

図 101.8 ウォーム砥石

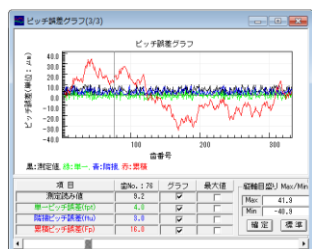


図 101.9 ピッチ誤差計算

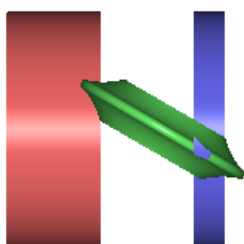
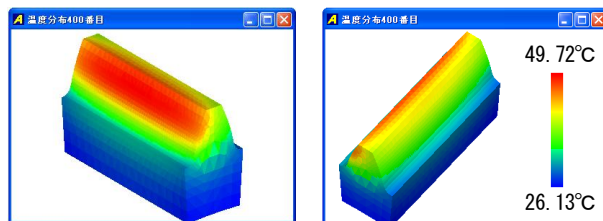


図 101.10 切り上げ距離



図 101.11 成形研削砥石



発熱・熱伝導解析ソフト(定常・非定常解析)

図 101.12 プラスチック歯車の温度分布図

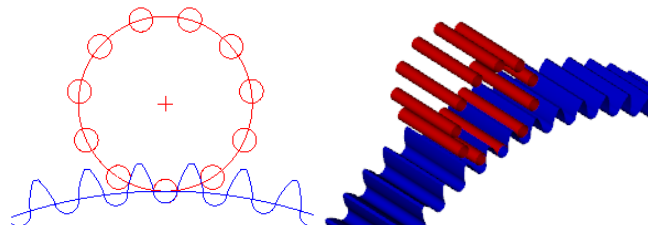
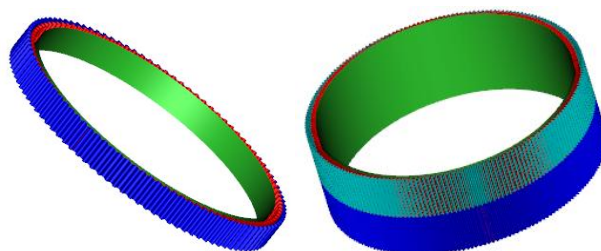


図 101.13 ピン歯車



(a) Cup type $z_1=100, z_2=102$ (b) Ring type, $z_1=z_3=200, z_2=204$

図 101.14 波動歯車の設計例

[102]歯車精度規格ソフトウェア

1998年3月20日にJIS B 1702-1,2(1998)が制定されことにより、JIS B 1702(1976)は廃止となりました。

永年に渡って親しんできた規格を、急激に新しい規格基準に変更することは色々な障害を伴うこととなりますが、いつまでも旧規格を使用し続けることはできません。設計者や製造担当者が困ることは、旧規格と新規格の相関関係であると予想することができるため、「歯車精度規格ソフトウェア」(図 102.1)を作成し無償配布することと致しました。旧規格から新規格に移行する際の手助けになれば幸いです。このソフトウェアは、弊社のホームページ(www.amtecinc.co.jp)からダウンロードすることができますのでご利用ください。

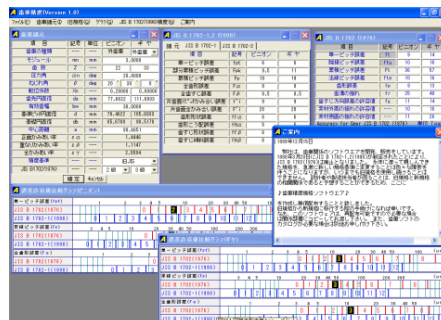


図 102.1 歯車精度規格

[103]動作環境

103.1 必要システム

表 103.1 動作環境

| | ソフトウェア番号 A [1], [2], [3], [4], [7], [8], [9], [13], [14], [20], [22], [31], [42]~[47] | ソフトウェア番号 B [5], [6], [10]~[12], [15]~[19], [21] [23]~[30], [32]~[41] |
|---------------|---|--|
| ①コンピュータ本体 | 1.6 GHz 以上 | 1 GHz 以上 |
| ②オペレーティングシステム | Windows® 7, Windows® 8, Windows® 8.1, Windows® 10 | |
| ③CD-ROM ドライブ | 必要 | |
| ④ディスプレイ | Windows®対応の解像度 1024×768 以上のディスプレイ | |
| ⑤実装メモリ | 2GB 以上 | 1GB 以上 |
| ⑥ハードディスク | 4GB 以上の空き領域 5400rpm 以上のハードディスク | 1GB 以上の空き領域 |
| ⑦マウスなど | Windows® 対応のマウスまたは他の適切なポインティングデバイスが必要 | |
| ⑧プリンタ | Windows®対応のプリンタが必要 | |
| ⑨ビデオボード | DirectX®10 以上に対応した ビデオボードが必要 | Open GL Ver.1.5 以上に対応した ビデオボードが必要 |

* Windows® 7, Windows® 8, Windows® 8.1, Windows® 10 は、米国 Microsoft 社の登録商標です。

* DXF ファイルのバージョンは、Release 12J です。

103.2 ネットワークでの使用について

歯車ソフトウェアをネットワーク上で複数台使用する場合（フローティングライセンス）、ソフトウェア番号 B（表 103.1）では別途対応させていただきますのでお問い合わせ（info@amtecinc.co.jp）ください。なお、ソフトウェア番号 A は現在のところフローティングライセンスには対応していません。

◆フローティングライセンスは、同一セグメント域での使用とさせていただきます。

さいごに

日々、歯車に関連したソフトウェアを開発し、種々取り揃えておりますが、更に充実したソフトウェアを開発する所存です。また、カタログに掲載していないソフトウェアもございます。お気づきの点やご意見、ご希望などがございましたら下記までご連絡くださいますようお願い申し上げます。

E-mail : info@amtecinc.co.jp

URL : www.amtecinc.co.jp

[104] 機械の紹介

104.1 歯車成形研削盤



最大直径=300mm

図 104.1 GT-30 ver II (YASDA)



最大直径=1300mm

図 104.2 GT-130 (YASDA, 外歯, 内歯)

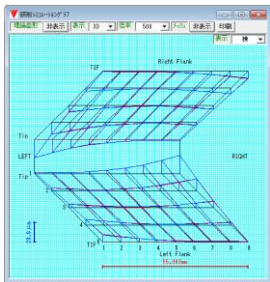


図 104.3 歯面修整

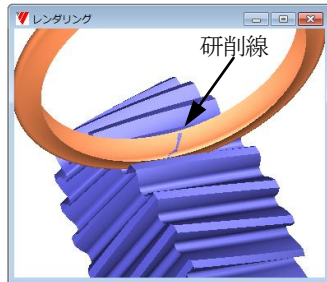


図 104.4 レンダリング(研削)

104.2 歯車成形研削盤 (GT30) による研削例

図 104.1 に示す歯車成形研削盤で、はずば歯車 ($m_n=3, z=20, \alpha=20, \beta=30, x_n=0.5, b=25$) に歯面修整 (図 104.5 : 最大修整量=100 μ m) を持つ歯車を研削した。この歯車の写真を図 104.6 に示す。この歯車の歯面は 1 パスで研削されていて歯元はトロコイコイド形状である。また、歯面粗さは Ra0.15~0.20 μ m, Rz0.89~1.55 μ m で歯車精度は JIS B 1702-1 N1 級 (累積ピッチ誤差 : 2.5 μ m) である。検査表を図 104.7~104.9 に示す。このように研削できるのは機械の性能は元より成形研削するためのソフトウェア、そしてこの精度に作り上げる歯車研削作業者の技量が必要であることは言うまでもない。なお、図 104.9 から解るようにピッチ誤差を検査して悪い歯面のみ再研削するようなことはしていない。

累積ピッチ誤差がこのような高精度 (2.5 μ m) で研削でき、歯元がトロコイコイド形状で、しかも大きな 3D 歯面修整が 1 パスで研削できる研削盤は国内外の研削盤について調査したが、図 104.1 および図 104.2 の研削盤が唯一の機械であった。

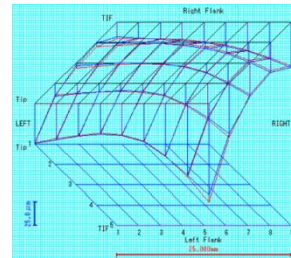


図 104.5 歯面修整



図 104.6 研削歯車

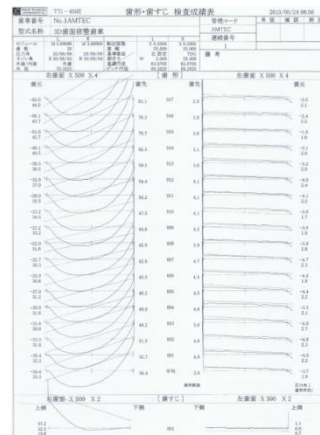


図 104.7 検査結果 (歯形)

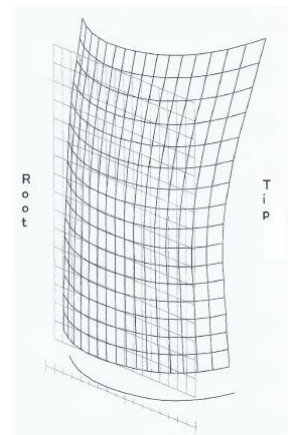


図 104.8 トポグラフ

表 104.1 成形研削システム

| | GT-30 | GT-130 |
|---------------------|-------|--------|
| インボリュート歯車成形研削システム | | |
| インボリュート歯車の歯面 3 次元修整 | ○ | ○ |
| 任意歯形歯車の成形研削システム | ○ | ○ |
| インボリュートねじ歯車成形研削 | ○ | × |
| ウォームのねじ面の成形研削 | ○ | × |
| 内歯車の成形研削 | × | ○ |

安田工業(株) www.yasda.co.jp
〒719-0303 岡山県浅口市郡里庄町浜中 1160
TEL 0865-64-2511 FAX 0865-64-4535



図 104.9 検査結果 (ピッチ誤差, 左歯面)

AMTEC www.amtecinc.co.jp

[付録 : A]

CT-FEM System によるはすば歯車の歯元応力解析例

A1. はじめに

機論(C 編)52 巻 479 号¹⁾「はすば歯車の実用歯元曲げ応力計算式」の 1983 頁, 図 8 の各種曲げ強度計算式による歯元応力と実験結果を比較したグラフに興味を持ち CT-FEM System²⁾で解析した. その結果, 実験値と極めて近い解析結果を得たのでここに報告する.

A2. 概要

図 A.1 に示すように ISO・DIN, BS, AGMA の強度計算と実験結果は, ほぼ同等の値となっている. しかし注目すべき点は, 強度計算結果では, ねじれ角が増加するにつれ応力値が小さくなっているが実験結果では, ねじれ角が増加するとともに応力値が大きくなり強度計算と逆の結果となっている.

理論歯形による「FEM-1」の解析結果は JSME とほぼ同等となったが, 他の強度計算結果や実験値よりも 4 割程度小さい. しかし歯車の誤差を考慮した「FEM-2」の解析結果は, 実験値とほぼ同じ応力値となり更にねじれ角による傾向も実験と同じ結果となった.

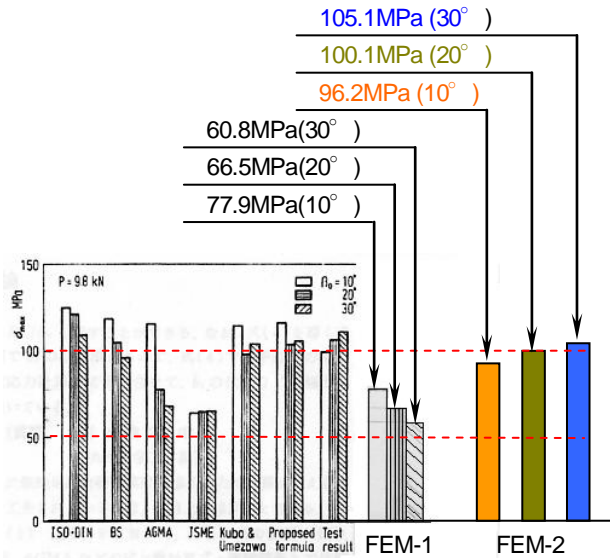


図 8 各種曲げ強度計算式による歯元応力の比較
図 A.1 実験結果と FEM 解析結果の比較

A3. 歯車諸元

原文³⁾には, 「歯元応力の測定に使用した歯車の諸元は表 A.1 であり, 歯車材料は SNC415, 浸炭焼入れ後研削したもので精度は (旧)JIS1 級であり, 静的負荷かみ合い試験機を用いて円周力 P=9.8kN のもて, はすば歯車の負荷かみ合い時の歯元応力をひずみゲージを用いて測定した.」とある.

「FEM-1」では理論歯形で解析を行い, 「FEM-2」では図 A.2, 図 A.3 に示す試験歯車の歯形誤差および歯すじ誤差⁴⁾を 3 種類の歯車に適用させた. また, ピッチ誤差の検査表が無いため(旧)JIS1 級の誤差許容値である 10 μ m として解析した. 更に, かみ合い位置は図 A.4 に示す通りである.

表 A.1 歯元応力測定に用いた歯車の諸元

| Gear sign | Mark | Unit | G.A | G.B | G.C |
|--------------------------|-------------------|------|----------|----------|----------|
| Tooth profile | --- | --- | Standard | Standard | Standard |
| Normal module | m _n | mm | 6 | 6 | 6 |
| Normal pressure angle | α_n | deg | 20 | 20 | 20 |
| Helix angle | β | deg | 10(R・L) | 20(R・L) | 30(R・L) |
| Number of teeth | z | --- | 36 | 36 | 36 |
| Pitch circle diameter | d | mm | 219.33 | 229.86 | 249.42 |
| Face width | b | mm | 40 | 40 | 40 |
| Transverse contact ratio | ϵ_α | --- | 1.63 | 1.53 | 1.37 |
| Overlap ratio | ϵ_β | --- | 0.37 | 0.73 | 1.06 |

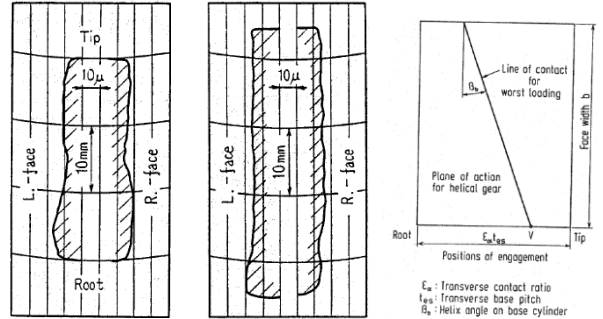


図 A.2 歯形誤差 図 A.3 歯すじ誤差 図 A.4 負荷位置

A4. FEM-1 の解析結果

「FEM-1」は, 理論歯形の解析である. 図 A.5~A.7 は設定画面であり, 図 A.8 と図 A.9 に, ねじれ角 10°の解析結果を, 図 A.10 と図 A.11 にねじれ角 30°の解析結果を示す. ねじれ角 20°は省略する.



図 A.5 諸元設定 図 A.6 メッシュ作成諸元

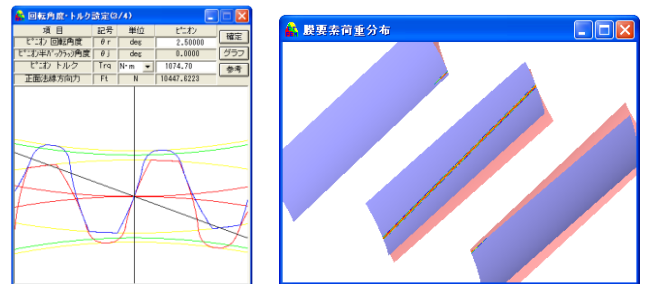


図 A.7 かみ合い 図 A.8 歯面(646.9MPa, $\beta=10^\circ$)

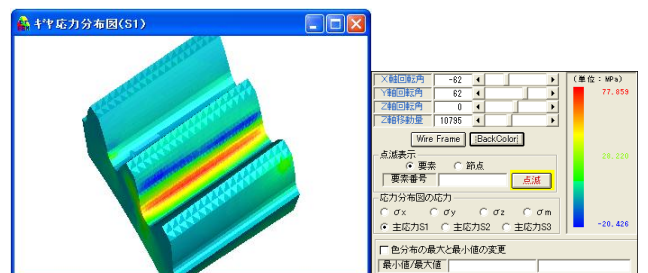


図 A.9 歯元最大引張応力(77.9MPa, $\beta=10^\circ$)

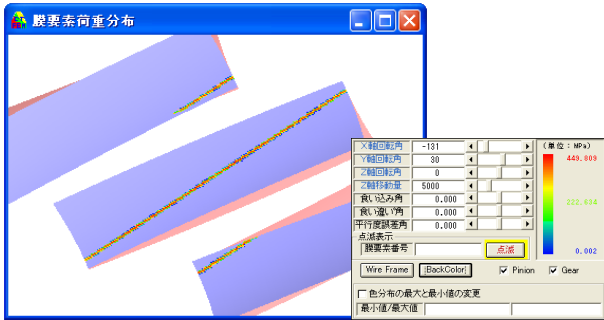


図 A.10 歯面応力(449.8MPa, $\beta=30^\circ$)

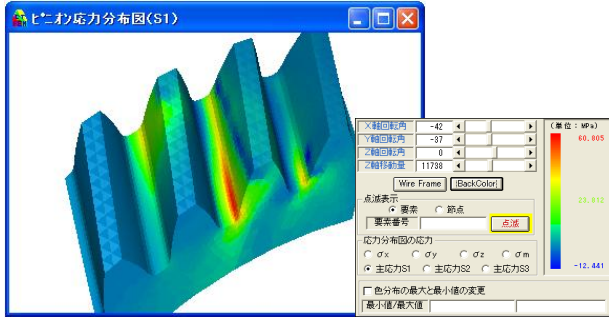


図 A.11 歯元最大引張応力(60.8MPa, $\beta=30^\circ$)

A5.1 ねじれ角 10° の解析結果

ねじれ角 10° の解析結果を図 A.14~A.18 に示す。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------|------------|-----|-----------|----------|
| モジュール | z | mm | 6.00000 | |
| 歯数 | z | | 36 | 36 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 10 | 0 |
| ねじれ方向 | β | | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 軸位係数 | xn | | 0.00000 | 0.00000 |
| 中心距離 | a | mm | 213.33215 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.2000 | 0.2000 |
| 歯幅 | b | mm | 40.0000 | 40.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 231.3321 | 231.3321 |
| 歯根円直径 | df | mm | 204.3321 | 204.3321 |

図 A.14 諸元設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ | 機能部の指定 |
|--------|------------|-----|----------|----------|----------|
| リム直径 | dm | mm | 174.3321 | 174.3321 | |
| 歯元分節数 | δ_1 | mm | 45.00 | 45.00 | ① 拘束なし |
| 歯面分節数 | δ_2 | mm | 30.00 | 30.00 | ② 拘束 |
| 歯先分節数 | δ_3 | mm | 60.00 | 60.00 | ③ 機能部の指定 |
| リム分節数 | NE | | 6 | 6 | |
| 2次元分節数 | | | 200 | 200 | |
| メッシュ率 | E | MPa | 205340 | 205340 | ④ 拘束なし |
| ポアソン比 | ν | | 0.3000 | 0.3000 | ⑤ 拘束 |

図 A.15 メッシュ

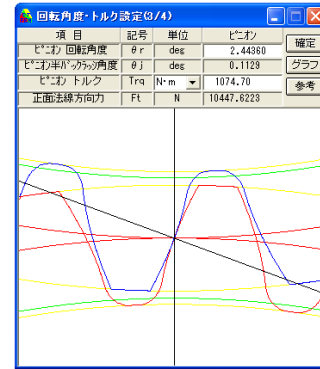


図 A.16 かみ合い

A5. FEM-2 の解析結果

「FEM-2」は、歯車の誤差を考慮した解析である。歯形誤差と歯すじ誤差は、図 A.2 および図 A.3 を読み取りピニオンとギヤの誤差を図 A.12 および図 A.13 のように設定した。

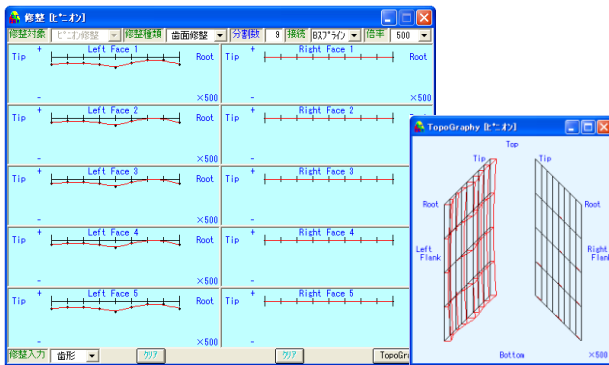


図 A.12 ピニオン歯形(反作用面は理論歯形)

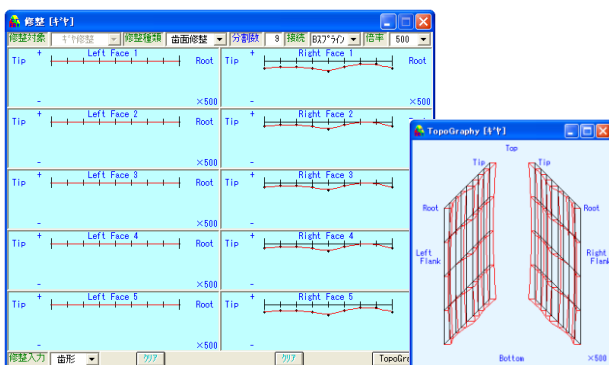


図 A.13 ギヤ歯形(反作用面は理論歯形)

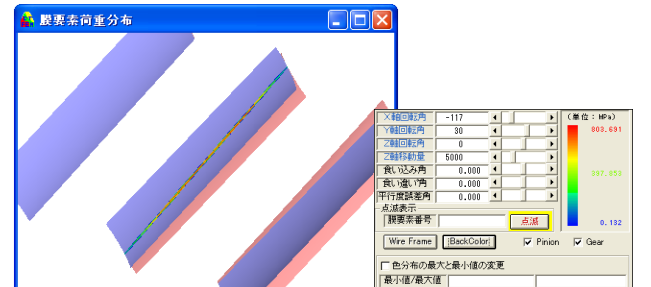


図 A.17 歯面応力(803.7MPa)

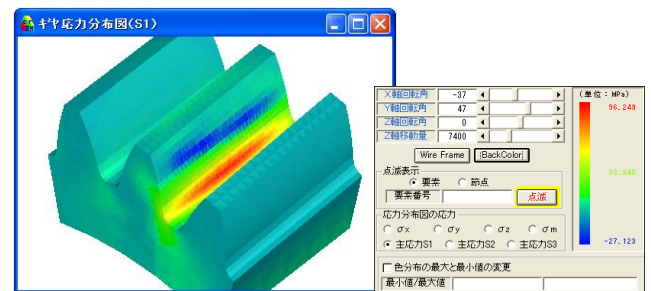


図 A.18 歯元最大引張応力(96.2MPa)

A5.2 ねじれ角 20° の解析結果

ねじれ角 20° の解析結果を図 A.19~A.23 に示す。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ |
|---------|------------|-----|-----------|----------|
| モジュール | z | mm | 6.00000 | |
| 歯数 | z | | 36 | 36 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.0000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 20 | 0 |
| ねじれ方向 | β | | 右ねじれ | 左ねじれ |
| 軸位係数 | xn | | 0.00000 | 0.00000 |
| 中心距離 | a | mm | 229.86240 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.2000 | 0.2000 |
| 歯幅 | b | mm | 40.0000 | 40.0000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 241.8624 | 241.8624 |
| 歯根円直径 | df | mm | 214.8624 | 214.8624 |

図 A.19 諸元設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ピニオン | ギヤ | 機能部の指定 |
|--------|------------|-----|----------|----------|----------|
| リム直径 | dm | mm | 184.8624 | 184.8624 | |
| 歯元分節数 | δ_1 | mm | 45.00 | 45.00 | ① 拘束なし |
| 歯面分節数 | δ_2 | mm | 30.00 | 30.00 | ② 拘束 |
| 歯先分節数 | δ_3 | mm | 60.00 | 60.00 | ③ 機能部の指定 |
| リム分節数 | NE | | 6 | 6 | |
| 2次元分節数 | | | 200 | 200 | |
| メッシュ率 | E | MPa | 205340 | 205340 | ④ 拘束なし |
| ポアソン比 | ν | | 0.3000 | 0.3000 | ⑤ 拘束 |

図 A.20 メッシュ

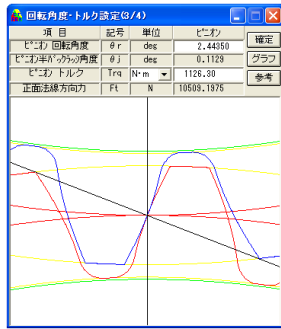


図 A.21 かみ合い

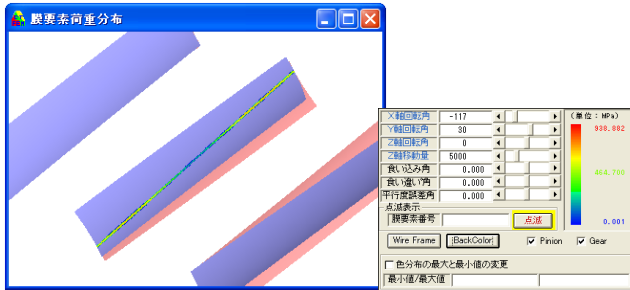


図 A.22 歯面応力(938.9MPa)

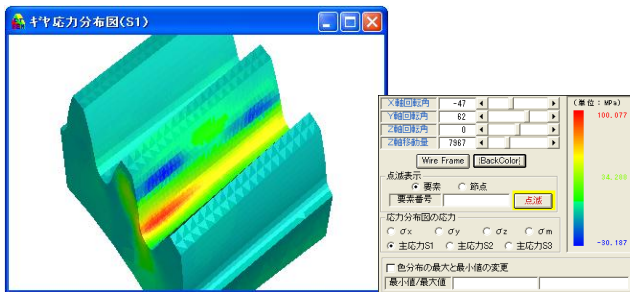


図 A.23 歯元最大引張応力(100.1MPa)

A5.3 ねじれ角 30° の解析結果

ねじれ角 30°の解析結果を図 A.24~A.28 に示す。

図 A.24 諸元設定

図 A.25 メッシュ

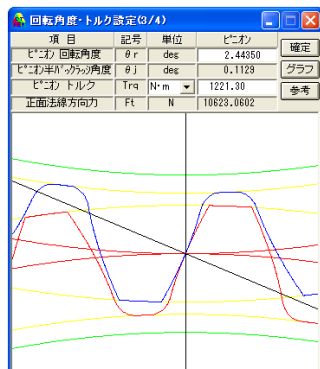


図 A.26 かみ合い

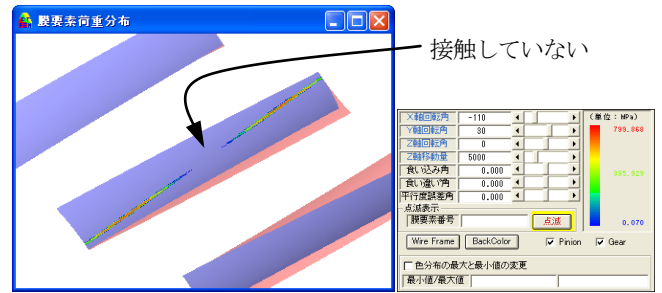


図 A.27 歯面応力(799.9MPa)

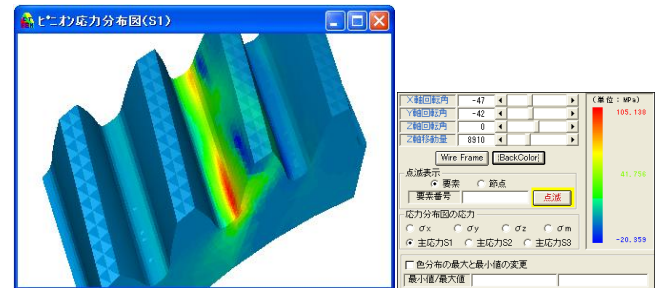


図 A.28 歯元最大引張応力(105.1MPa)

A6. まとめ

- (1) 誤差を考慮した「FEM-2」の解析結果と実験値は、ほぼ同じ応力値であり、更に、ねじれ角と応力値の傾向も同じ結果となった。
- (2) 理論歯形に歯形誤差とピッチ誤差を与えると、ねじれ角 30° の歯車では歯元応力は 1.7 倍にもなる。
- (3) 図 A.27 の $\beta=30^\circ$ では歯形・歯すじ誤差の影響により二段当りが顕著に現れていることが解る。

A7. その他

歯面修整を与え、更に軸角誤差を与えた場合の歯面応力も数%の誤差で解析することができた。(別報告)

参考文献など

- 1) 小田, 小出, 機論(C編)52巻479号(昭61-7), はすば歯車の実用歯元曲げ応力計算式
- 2) CT-FEM System Ver.3.0, アムテック, 歯車応力解析ソフトウェア
- 3) 小田, 島富, 機論(C編)621.833.2/6, 827 ページ
- 4) 小田, 島富, 機論(C編)621.833.2/6, 827 ページ, 図 3

[付録 : B]

Gear Navigation System によるホーニングシミュレーション

B1. はじめに

ホーニング加工において被削歯車と異なる諸元のドレスギヤや、バイアス修整等の複雑な修整を施したドレスギヤを使用する場合がありますが、正確に歯形が加工されるか否かは実際に加工してから検査をして判断しているのが現状である。

今回、被削歯車と諸元の異なるドレスギヤを用いたときの歯形を Gear Navigation System でシミュレーションした結果を報告する。

B2. Gear navigation system の概要

Gear Navigation System は、ホブカッタ、ピニオンカッタ、シェービングカッタ、ホーニングの各工具による歯車加工形状解析と、そのかみ合いのシミュレーションをすることができる。また、データベースによる工具管理機能を有し、条件に見合う工具を共用計算することにより検索することができる。

歯車加工シミュレーションは、歯面、歯元、歯先、面取り形状と各数値の計算、特にホーニングでは、歯形修整、歯すじ修整、歯面修整後の形状を解析グラフ表示することができる。更に、かみ合いシミュレーションでは、加工後の歯形をかみ合わせて歯当たりを観察することができる。図 B.1 に Gear Navigation System の画面を示す。

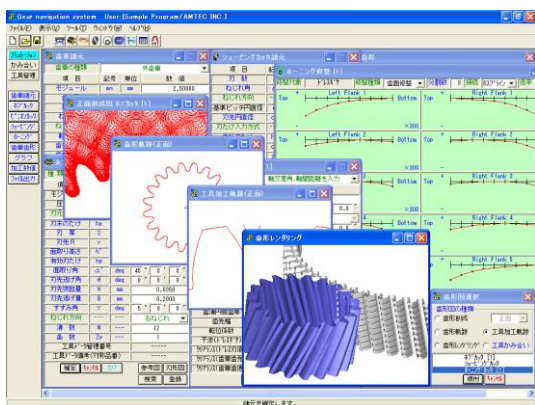


図 B.1 Gear Navigation System

B3. 加工手順

被削歯車は、モジュール 2.5、歯数 15、圧力角 20°、ねじれ角 30°のはずば歯車であり、歯車をホブ切削後にホーニング加工を行うものとした。ホーニング用砥石ドレス用のドレスギヤの歯数を、被削歯車と同じ 15 枚(ドレスギヤ S)の場合と、歯数を 29 枚(ドレスギヤ K)とした場合のシミュレーションを行う。

ドレスギヤには S、K ともに同じ歯面修整を与えホーニング砥石をドレスした後にホーニング加工した。

B4. 歯車とドレスギヤ諸元

被削歯車の歯車諸元を図 B.2 に、ホブ諸元を図 B.3 に示す。加工時の歯厚は、図 B.4 に示すようにホーニング仕上げ代は、またぎ歯厚で 0.1mm とし、ドレスギヤ S および K には図 B.7 の歯面

修整を与えている。

| 歯車諸元 | | | |
|----------|------------|-----|-----------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | m | mm | 2.50000 |
| 歯数 | Z | --- | 15 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 ° |
| ねじれ角 | β | deg | 30 ° 0 ' 0.0 " |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| 転位係数 | xn | --- | 0.60000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 51.3013 |
| 歯底円直径 | df | mm | 40.0513 |
| 歯幅 | b | mm | 10.0000 |
| 基準ピッチ円直径 | d | mm | 43.3013 |
| 基礎円直径 | db | mm | 39.9191 |
| 基礎円間ねじれ角 | β_b | deg | 28 ° 1 ' 27.6 " |

図 B.2 被削歯車諸元

| ホブカッタ諸元 [1] | | | |
|--------------|------------|-----|-------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| モジュール | m | mm | 2.50000 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 ° |
| 対末のたけ | ha | mm | 3.1250 |
| 対元のたけ | hf | mm | 3.1250 |
| 刃厚 | S | mm | 3.9270 |
| 刃先 R | r | mm | 0.9375 |
| すずみ角 | γ | deg | 5 ° 0 ' 0 " |
| ねじれ方向 | --- | --- | 右ねじれ |
| 溝数 | N | --- | 12 |
| 条数 | Zw | --- | 1 |
| 工具管理番号 | --- | --- | --- |
| 工具管理備考(対称品番) | --- | --- | --- |

図 B.3 ホブ諸元

| 歯車仕上歯厚 | | | | |
|-----------|-------------|-----|-----------|--------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | ホブカッタ [1] | ホーニングカッタ [1] |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | またぎ歯厚 | またぎ歯厚 |
| またぎ歯数 | Zm | --- | 4 | 4 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 27.60000 | 27.50000 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 5.0000 | 5.0000 |
| オーバーピン寸法 | dm | mm | 53.32810 | 53.12968 |
| 歯直円弧歯厚 | Sn | mm | 4.96885 | 4.86244 |
| またぎ歯厚変化量 | δW | mm | ----- | -0.1000 |
| オーバーピン変化量 | δdm | mm | ----- | -0.1984 |

図 B.4 加工歯厚

| ドレスギヤ諸元 [1] | | | |
|-------------|---------|-----|----------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 歯数 | Z | --- | 15 |
| ねじれ角 | β | deg | 30 ° 0 ' 0.0 " |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| 基準ピッチ円直径 | d | mm | 43.3013 |
| 基礎円直径 | db | mm | 39.9191 |
| 歯先円直径 | da | mm | 52.5513 |
| 歯底円直径 | df | mm | 35.8013 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | またぎ歯厚 |
| またぎ歯数 | Zm | --- | 4 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 27.50000 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 5.0000 |
| オーバーピン寸法 | dm | mm | 53.12968 |
| 歯幅 | b | mm | 10.0000 |
| ドレスリング外径 | dD | mm | 52.0000 |

図 B.5 ドレスギヤ(S)諸元

| ドレスギヤ諸元 [1] | | | |
|-------------|---------|-----|----------------|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
| 歯数 | Z | --- | 29 |
| ねじれ角 | β | deg | 30 ° 0 ' 0.0 " |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| 基準ピッチ円直径 | d | mm | 83.7158 |
| 基礎円直径 | db | mm | 77.1788 |
| 歯先円直径 | da | mm | 92.3658 |
| 歯底円直径 | df | mm | 78.2158 |
| 歯厚入力方式 | --- | --- | またぎ歯厚 |
| またぎ歯数 | Zm | --- | 5 |
| またぎ歯厚 | W | mm | 35.61749 |
| 測定ピン径 | dp | mm | 4.5200 |
| オーバーピン寸法 | dm | mm | 92.52484 |
| 歯幅 | b | mm | 10.0000 |
| ドレスリング外径 | dD | mm | 92.0000 |

図 B.6 ドレスギヤ(K)諸元

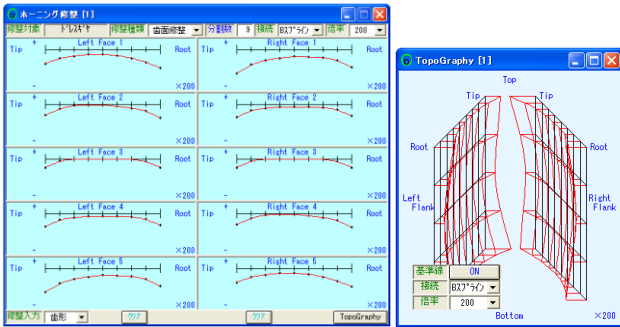


図 B.7 ドレスギヤの歯面修整とトポグラフ

表 B.2 歯形修整量の比較(μm)

| | ドレスギヤ(K) | | ホーニング後の歯形 | |
|------|----------|----|-----------|------|
| | 左面 | 右面 | 左面 | 右面 |
| 端面 1 | 18 | 33 | 15.4 | 26.0 |
| 端面 3 | 16 | 16 | 13.3 | 13.3 |
| 端面 5 | 33 | 18 | 26.0 | 15.4 |

B5. ホーニング砥石諸元

ホーニング砥石の諸元は 79 歯の 1 種類のみであるがドレスギヤが 2 種類あるためドレスギヤの軸間距離に違いがある。砥石の諸元とドレスギヤ(S, K)とホーニング砥石をかみ合わせた場合の数値表を図 B.8 および図 B.9 に示す。なお、図 B.8 および図 B.9 の軸間距離(ドレスギヤ)は、ねじ歯車のかみ合いを基準に計算した値を採用している。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|-----------|-----|-----|-------------|
| 歯数 | Z | --- | 79 |
| ねじれ角 | β | deg | 20° 0' 0.0" |
| ねじれ方向 | --- | --- | 左ねじれ |
| 軸交差角(トリス) | ΣD | deg | 10° 0' 0.0" |
| 軸間距離(トリス) | aD | mm | 83.4389 |
| 軸間距離(リク) | aR | mm | 78.0876 |
| 軸交差角(歯車) | Σ | deg | 10° 0' 0.0" |
| 軸間距離(歯車) | a | mm | 83.4389 |
| 基準ピッチ円直径 | d | mm | 210.1751 |
| 歯先円直径 | da | mm | 208.1752 |
| 歯根円直径 | df | mm | 219.4251 |
| 基準円直径 | db | mm | 195.9878 |
| 歯溝円直径 | Sn | mm | 4.8624 |
| 歯先幅 | S | mm | 2.2692 |
| 軽位係数 | xn | --- | 0.51402 |
| 干渉(トリス) | --- | --- | 発生しない |
| 刃先(トリス) | --- | --- | 2.7501 |
| 刃先(歯車) | --- | --- | 0.8250 |
| 刃先(歯車) | --- | --- | 0.8251 |

図 B.8 ホーニング砥石諸元(S)

図 B.9 ホーニング砥石諸元(K)

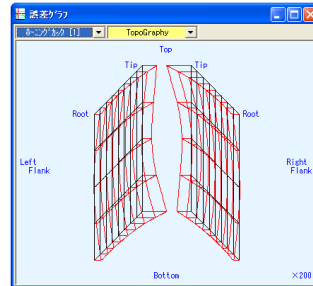


図 B.10 トポグラフ(S)

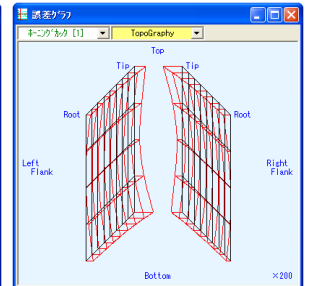


図 B.11 トポグラフ(K)

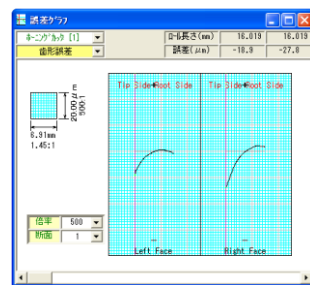


図 B.12 歯形グラフ 1(S)

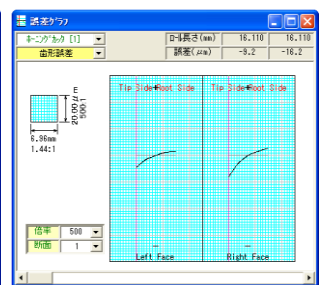


図 B.13 歯形グラフ 1(K)

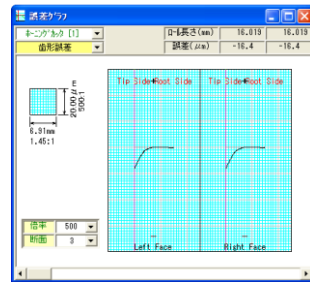


図 B.14 歯形グラフ 3(S)

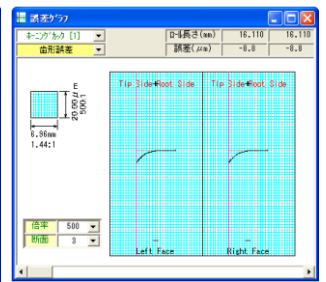


図 B.15 歯形グラフ 3(K)

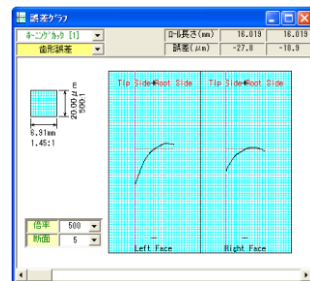


図 B.16 歯形グラフ 5(S)

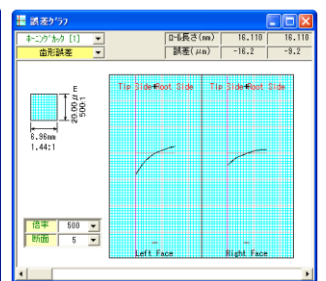


図 B.17 歯形グラフ 5(K)

B6. ホーニング加工後の歯形(修整量)

ホーニング加工後の被削歯車の歯形グラフを図 B.10~B.17 に示す。歯形グラフは、トポグラフの全階層の表示が可能であるが、今回の評価では 1,3,5 階層の歯形誤差を比較した。

ドレスギヤ(S)(K)と同じ修整量を与えてもドレスギヤの歯数によりホーニング後の歯形修整量に差が発生することが解る。表 B.1 は被削歯車と同じ諸元を持つドレスギヤを使用してホーニング加工した結果であり、この場合は、ホーニング加工後の歯形とドレスギヤ(S)の修整量はほぼ一致している。しかし、ドレスギヤ(K)では、表 B.2 に示すようにドレスギヤ修整量の 80%程度が被削歯車の修整量となる。

表 B.1 歯形修整量の比較(μm)

| | ドレスギヤ(S) | | ホーニング後の歯形 | |
|------|----------|----|-----------|------|
| | 左面 | 右面 | 左面 | 右面 |
| 端面 1 | 18 | 33 | 20.0 | 32.1 |
| 端面 3 | 16 | 16 | 16.6 | 16.6 |
| 端面 5 | 33 | 18 | 32.1 | 20.0 |

B7. 歯形シミュレーション

ホブ加工~ホーニング加工までの歯形シミュレーションを図 B.18~B.27 に示す。図 B.28 および図 B.29 は、ホーニング代を 1μm としたときの歯形レンダリングであり、接触線が顕著に現れている。

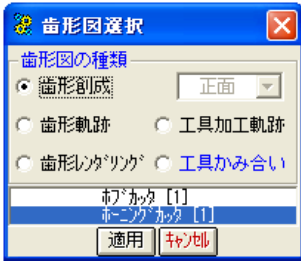


図 B.18 歯形図選択

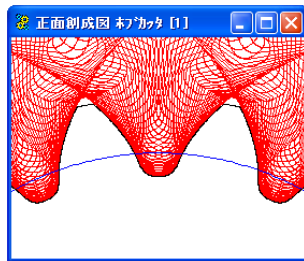
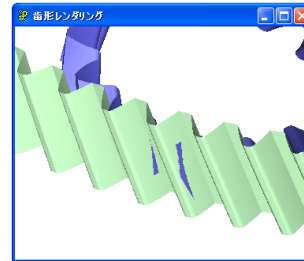


図 B.19 ホブ創成図 1



ホーニング代：片面 1 μ m

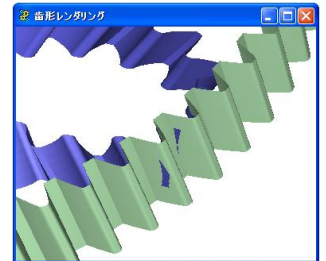


図 B.28 歯形レンダリング 3

図 B.29 歯形レンダリング 4

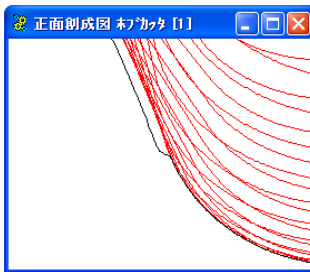


図 B.20 ホブ創成図 2
歯元付近の拡大

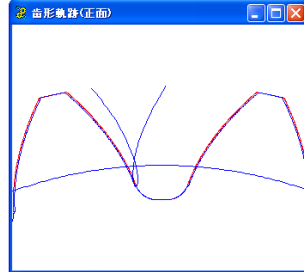


図 B.21 歯形軌跡 1

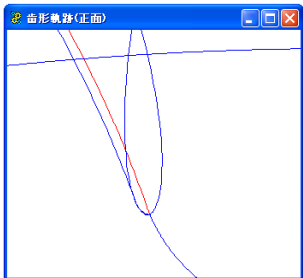


図 B.22 歯形軌跡 2
歯元付近の拡大

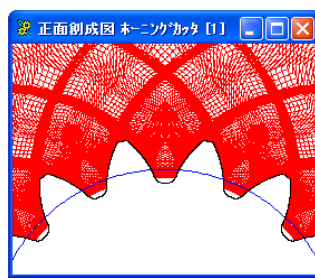


図 B.23 砥石創成図 1

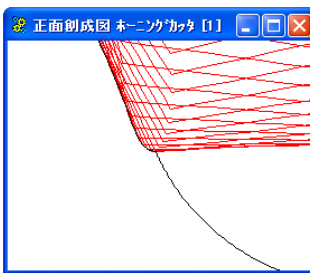
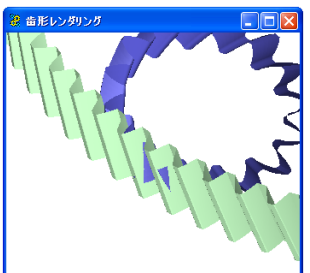


図 B.24 砥石創成図 2
歯元付近の拡大



図 B.25 歯形レンダリング



ホブ加工した歯車と砥石のかみ合い

ホーニング：片面 0.05mm

図 B.26 歯形レンダリング 1

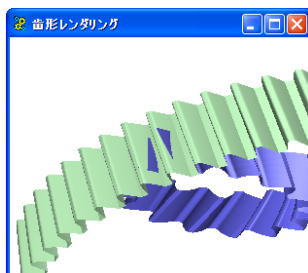


図 B.27 歯形レンダリング 2

B8. まとめ

被削歯車とドレスギヤを同じ諸元とした場合とドレスギヤの歯数を約2倍とした場合についてシミュレーションした。

その結果、同一諸元の場合は、ドレスギヤの修整量そのまま被削歯車に転写されているが、歯数を約2倍にした場合にはドレスギヤに与えた修整量の約80%が転写された結果となった。

本ソフトウェアでは、諸元を任意に変更してシミュレーションすることが可能であるため高価なドレスギヤの諸元および修整量の決定に有効であると考えている。

【付録 : C】

ゲート位置変形を考慮したプラスチック歯車の成形歯形

C1. はじめに

射出成形プラスチック歯車は一般に 3~6 点ゲートで成形されるが、主に分子配向や繊維配向の影響を受けてゲート領域とウェルド領域で収縮差がでるため成形後の歯車は真円にならない。特に繊維補強した材料を使用する場合はその傾向が強くなる。これはゲート数を多くしてもその傾向は同じでありゲート配置(数と位置)や肉盗み形状など度々金型を調整して精度を良くする方法を採用しているのが現状である。

このような非効率的な方法を解決するため1回目成形時の歯形を基本にして、その逆の変形歯形を与えれば収縮後の歯車が真円となると考え、逆変形歯形を与える機能を持つソフトウェア(GearPro Master)を開発した。本ソフトウェアを使用して成形実験した結果、非常に有効な結果が認められたのでここに報告する。

C2. 試験歯車

試験歯車の材質は、PPS/AF(アラミドファイバー)であり歯車諸元は表 C.1 に示す平歯車である。ゲート位置は図 C.1 に示すようにボス部に 3 点配置とした。

表 C.1 試験歯車諸元

| Gear Type | --- | --- | Spur / Standard |
|-----------------|----------|-----|-----------------|
| Module | mn | mm | 0.8 |
| Number of teeth | z | --- | 60 |
| Pressure angle | α | deg | 20 |
| Addendum Mod. | x_n | --- | 0 |
| Pitch diameter | d | mm | 48.00 |
| Tip diameter | d_a | mm | 50.00 |
| Root diameter | d_f | mm | 46.40 |
| Face width | b | mm | 10.2 |



表面 裏面

図 C.1 射出成形歯車

C3. 成形 1 回目の結果

1 回目の成形は、図 C.2 の両歯面かみ合い試験結果に示すように 3ヶ所のピークが顕著に現れ全かみ合い誤差は 73 μ m となっている。

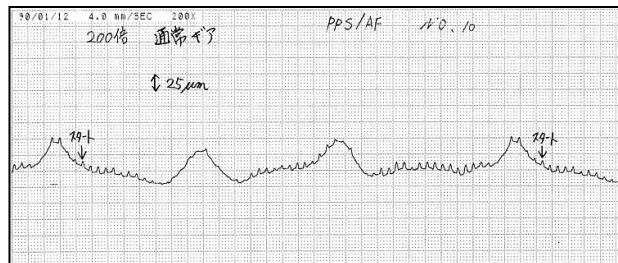


図 C.2 両歯面かみ合い試験結果(その 1)

全かみ合い誤差=73 μ m, 1 ピッチかみ合い誤差=25 μ m

C4. 成形 2 回目の準備

成形 1 回目の結果(図 3.1)を基準として全かみ合い誤差が低減するように金型の歯形を変更する。まず最初、図 C.2 のグラフを読み取り図 C.3 の真円度修整フォームの「修整量」に数値を入力する。このとき分割数は最大 360 まで設定可能であるが今回は 24 とした。また、真円度修整率は、逆に与えた修整量が全て戻るものと想定して 100%とし、逆歯すじ修整は設定しないものとした。

図 C.3 の真円度修整値を基準として図 C.4 の真円度修整[逆]とすることにより成形後の歯車が真円となる歯形を生成することができ、真円度修整[正]とすると図 C.3 の非円形の歯形を出力することができる。図 C.5 は、歯形レンダリングであり、青色が「逆歯形」、赤色が「理論歯形」を示している。次に図 C.3 の(A)部分の歯形を拡大した図 C.6 の赤線が「逆歯形」であり黒線が「理論歯形」である。図 C.6 の歯先部分(B)で逆歯形と理論歯形の差は 0.038mm であり歯底部分(C)の差は 0.041mm である。

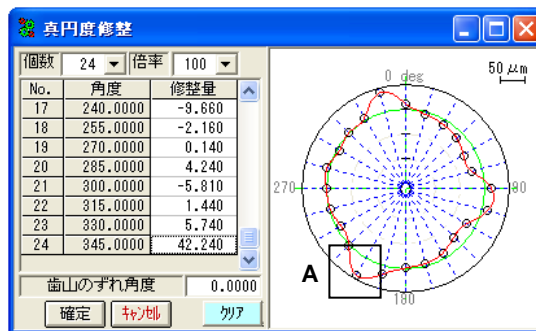


図 C.3 真円度修整

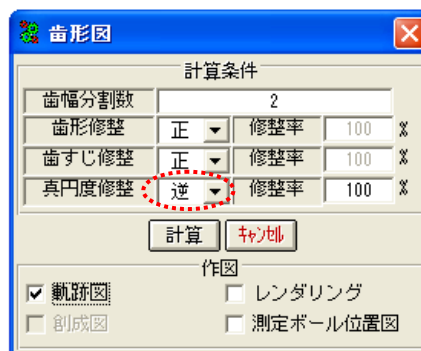


図 C.4 歯形図選択

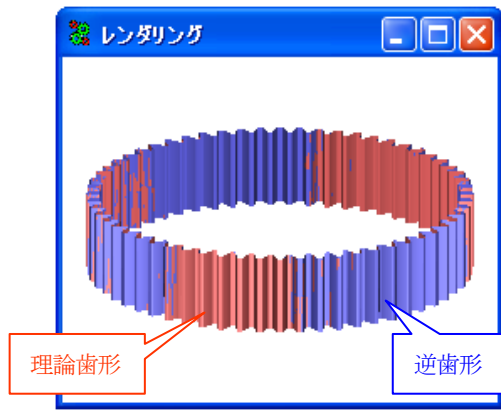


図 C.5 歯形レンダリング

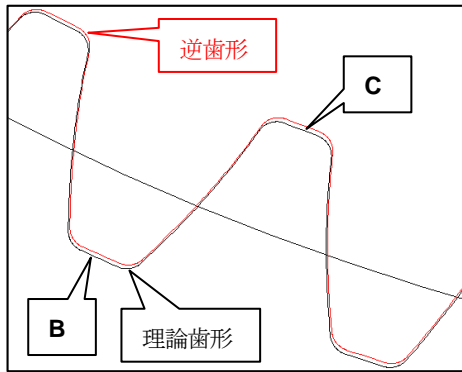


図 C.6 拡大歯形(図 C.3 の[A])

C5. 成形 2 回目の結果

図 C.6 の「逆歯形」で金型を製作し、射出成形した歯車の両歯面かみ合い試験結果を図 C.7 に示す。この結果、図 C.2 のゲート位置の 3ヶ所のピークは滑らかになり全かみ合い誤差は 73 μm から 42 μm に低減した。

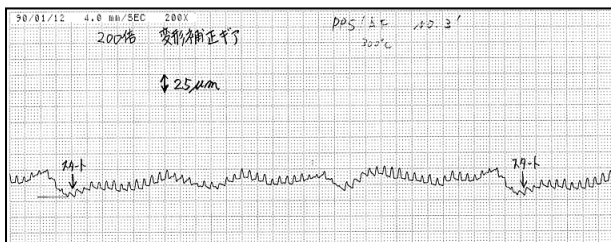


図 C.7 両歯面かみ合い試験結果(その 2)

全かみ合い誤差=42 μm , 1 ピッチかみ合い誤差=15 μm

C6. 成形前と成形後歯形の比較

図 C.7 は真円度修整前後の両歯面かみ合い試験グラフを重ね合わせたグラフであり、修整前のピーク(D~F)は修整後低減している。しかし、2 回目成形グラフの(D)部のピークが下がりすぎているため図 C.4 の修整率は 80~90%程度で良いかもしれない。

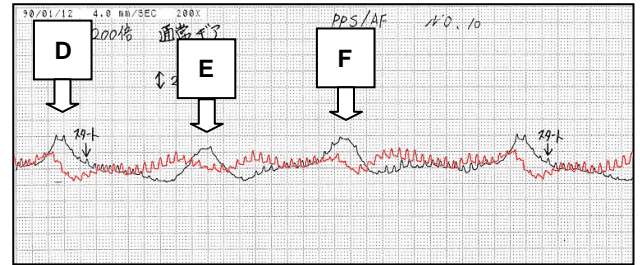


図 C.8 修整前後の両歯面かみ合い試験の重ね合わせ

表 C.2 修整前後の歯車誤差

| 誤差 | 記号 | 修整前 | 修整後 |
|------------|------------|-------|------|
| 全かみ合い | F_i'' | 73 | 42 |
| 1 ピッチかみ合い | f_i'' | 25 | 15 |
| 全歯形誤差(左) | F_α | 38.6 | 32.9 |
| 全歯形誤差(右) | F_α | 45.2 | 32.9 |
| 歯すじ誤差(左) | F_β | 43.9 | 31.7 |
| 歯すじ誤差(右) | F_β | 43.4 | 37.3 |
| 単一ピッチ誤差(左) | f_{pt} | 15.1 | 7.7 |
| 単一ピッチ誤差(右) | f_{pt} | 14.0 | 12.9 |
| 累積ピッチ誤差(左) | f_{ip} | 48.4 | 36.2 |
| 累積ピッチ誤差(右) | f_{ip} | 55.34 | 35.7 |

Unit: μm

C7. まとめ

- (1) 使用した金型の収縮率が PPS 材料(ファイバー入り)用ではないものを使用したため思ったほど効果は出ていないが、逆歯形法によって図 C.8 の D~F のピークがキャンセルされ成形による歯車精度が向上することが確認された。
- (2) 今回は、真円度修整において 24 分割して本法が有効であるか否かを評価したが分割をもっと細かくすることで更に精度が向上するものと思われる。
- (3) さらに、修整量を手入力するのではなく歯車試験機のデータ自動取り込みとすれば更に簡便に高精度歯車を製造できるものと考えている。

[付録 : D]

歯元応力解析例(最弱断面歯厚が同じ場合)

D1. はじめに

歯形係数は、歯元のフィレットカーブと 30 度接線の交点を最弱断面歯厚として決定するが、図 D.1 のようにフィレットカーブの最弱断面位置の R と単一 R が同じである場合、歯形係数は同じとなるため強度式では強さに差はでない。しかし、発生応力は歯元形状に違いがあるため同じとはならないはずである。ここでは、並歯、歯数 20 の歯車について歯元応力解析をした結果を示す。

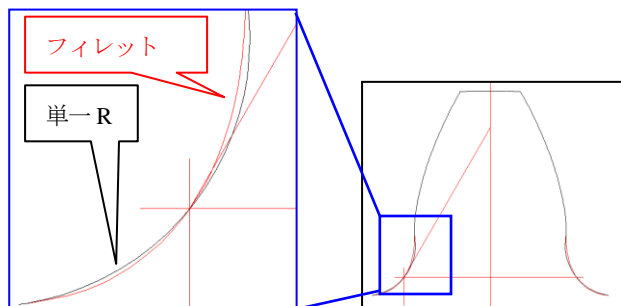


図 D.1 歯元形状 (フィレット形状と単一 R)

D2. 検討歯車

検討歯車の諸元を図 D.2 に、歯形かみ合いを図 D.3 に示す。

| 項目 | 記号 | 単位 | ピッチ | ギヤ |
|---------|------------|-----|----------|----------|
| モジュール | m | mm | 1.00000 | |
| 歯数 | z | | 20 | 20 |
| 圧力角 | α_n | deg | 20.00000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 0 | 0.0 |
| ねじれ方向 | | | | |
| 転位係数 | xn | | 0.00000 | 0.00000 |
| 中心距離 | a | mm | 20.00000 | |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.00000 | 0.00000 |
| 歯幅 | b | mm | 5.00000 | 5.00000 |
| 歯先円直径 | da | mm | 22.00000 | 22.00000 |
| 歯底円直径 | df | mm | 17.50000 | 17.50000 |
| 測定ピッチ径 | dp | mm | 1.800 | 1.800 |
| 歯先 R | ra | mm | 0.00000 | 0.00000 |

図 D.2 検討歯車



図 D.3 歯形かみ合い

基準ラックの歯元 R を 0.375 (ホブの刃先 $R_c = 0.375$) として創成運動させた歯形の最弱断面歯厚(30°接線法)は図 D.4 に示すように 1.9944 となり、P 点におけるフィレット R は 0.5319mm となる。次に、P 点を通る単一 R=0.5815 を持つ歯形を重ね合わせると単一 R とフィレットカーブとの差はごく僅かであるが最大で 0.0169mm の違いがある。

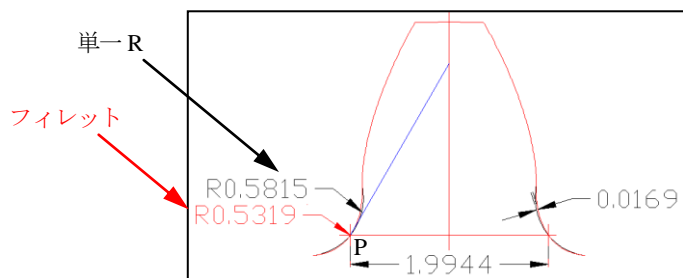
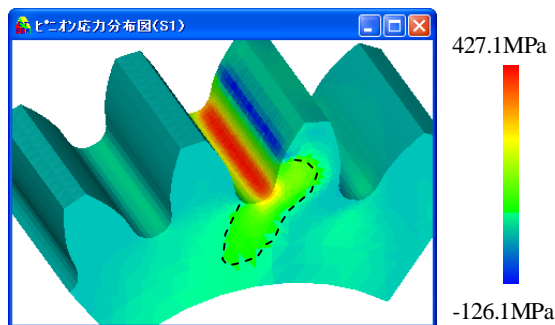


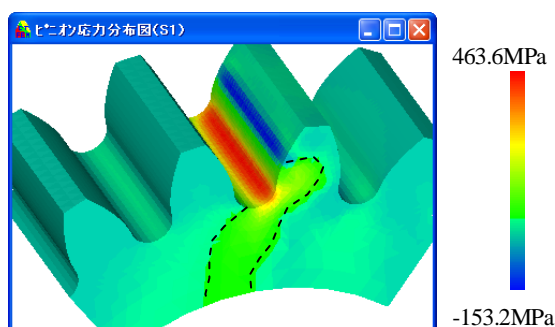
図 D.4 歯形

D3. 応力解析

CT-FEM System で応力解析 ($E=205800\text{MPa}$, $\nu=0.3$) をした。その結果を図 D.5 および図 D.6 に示す。



$S_1=427.1\text{MPa}$, トルク 10Nm
図 D.5 応力分布図 (フィレット)



$R=0.5815$, $S_1=463.6\text{MPa}$, トルク 10Nm
図 D.6 応力分布図 (単一 R)

D4 まとめ

- (1) フィレットカーブのほうが単一 R に比べて 8%程度発生応力が小さくなる。また、単一 R の応力は、リム部に伝播していることが解る(図 D.6 参照)。
- (2) 歯元曲線は創成運動を元にして簡単に得ることができるため単一 R で接続するメリットは無い。
- (3) 今回、歯数を 20 としたが、更に少ない歯数であればその差はより大きくなると思われる。

[付録 : E]

正弦歯形歯車の動力損失低減の可能性

E.1 緒言

1980年代初め頃よりAV機器などに盛んに使われ始めたプラスチック歯車は、鋼歯車の設計基準に倣ってインボリュート歯形が採用されている。プラスチック歯車を低トルク領域での動力伝達や回転伝達のみを目的とする場合はインボリュート歯形を採用することに全く異論は無い。しかしながら、ある程度大きなトルク領域での動力伝達に用いられた場合は、プラスチック材料の弾性率が鋼材料の1/70～1/100と小さいことに起因するかみ合い時の歯の大きな変形のため、幾何学的なインボリュート歯車のかみ合いから、鋼歯車に比べて大きく外れているものと思われる。したがって、インボリュート歯車の最大の長所の一つ、中心距離鈍感性の優位性はそれほど期待できず、インボリュート歯形に固執する必要はないのではないだろうか。一方、地球環境問題は言うに及ばず、機器の小型化や軽量化、多機能化に伴い、駆動系の電力配分が制限されている現状を考慮すると、たとえ僅かであってもエネルギー損失の低減が期待できるならば、インボリュート以外の歯形の採用も十分検討に値するものと思われる⁽¹⁾。

そこで、正弦曲線で構成される歯形を基準ラックとする歯車(以下、正弦歯形歯車[sine-rack gear]と呼ぶ)が、インボリュート歯車(直線ラック歯車)に比べ、すべり率が小さくなることに着目し、正弦プラスチック歯車による動力損失低減の可能性について検討する。さらに、動力損失が小さくなるとかみ合い時の発熱量が減少し、歯の温度上昇も押さえられる。したがって、温度上昇に伴うプラスチック材料の許容曲げ応力の低下も小さくなり、結果として、プラスチック歯車の負荷容量の増加も期待できる。また、同時に、正弦ラック歯車のかみ合いは、インボリュート歯車に比べ、かみ合い点における相対曲率が小さく、また、歯の幾何形状についても歯元のすみ肉部の歯厚が大きいことなどが歯面接触応力、歯元曲げ応力の低下をもたらす、負荷容量増加に有利に働くことも期待できる。本稿では、正弦歯形歯車の発熱や効率について検討し、運転試験を行い検証した結果について述べる。

E.2 正弦曲線で構成される基準ラック

本件では、正弦曲線で構成される基準ラック(正弦曲線基準ラックと呼ぶ)を図1のように定義する。データムは、歯形および歯底を構成する正弦曲線の対称軸に一致させ、ピッチを πm (m :正面モジュール)とする。歯末のたけ h_a を m 、頂げきを cm (c :頂げき係数0.25)として歯元のたけ h_f を $(1+c)m$ とする。また、正弦歯形歯車は、インボリュート歯車と異なり、幾何学的には中心距離を調整することによりバックラッシュを与えることができない。したがって、基準ラックの左右両歯面をそれぞれデータム線に沿って逆方向にシフトさせる(以後、横転位という)ことによって与える必要がある。そこで、歯厚減少量(これが基準円上のバックラッシュとなる)を $c_j m$ (c_j :歯厚減少係数と呼び0.1を標準とする)とする。このように定義し、図1のように座標系をとると、歯先面および歯底面部分を除いて、 θ (左歯面は $-1.5\pi m \leq \theta \leq 0$, 右歯面は、 $0 < \theta \leq 1.5\pi m$)をパラメータ($-\pi/2 \leq \theta \leq 2\pi$)

とすると基準ラック歯面の座標は、式(1)および式(2)で、また、データム線上の正面圧力角は、式(3)で表すことができる。

$$x = m(\theta/2 \pm c_j/2) \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

$$y = m(1+c) \cdot \sin(\theta + \pi/2) \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

$$\alpha = \pi/2 - \tan^{-1}(2h_f/m) \quad [\text{rad}] \quad (3)$$

ただし、式(1)の復号の上は左歯面、下が右歯面を表す。このように、歯元フィレット部を含めてそれぞれ一つの正則関数で表すことができることも一つの特徴であり、かみ合い機構解析が容易に行えることを示唆している。一方、歯数 z の基準円 d 、すなわち歯切りピッチ円直径を、これもインボリュート歯車に倣い正弦基準ラックのピッチを πm としているので、

$$d = z m \quad (4)$$

と定まる。正弦ラックでも、当然、転位は可能である。しかしながら、転位(rack shift)すると歯切りピッチ線がラックのデータムに一致しなくなる。従って、正弦曲線基準ラックはインボリュート歯車の基準ラックである直線歯形とは異なるため任意の歯切りピッチ線に対して対称となる歯形とはならない。そのため、対となる歯車の歯切りピッチ線の位置を一致させるためには対となる歯車の転位係数の和は常に0でなければならない。

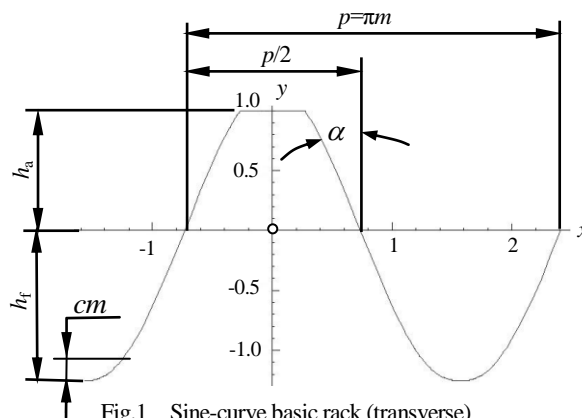


Fig.1 Sine-curve basic rack (transverse)

E.3 正弦歯形歯車とインボリュート歯車の歯形比較

表1に示すインボリュート歯車と正弦歯形歯車について歯形⁽²⁾の比較を行う。両歯車の諸元(m, z, d_a, d_f)を一致させるため正弦歯形歯車の歯元のたけ係数を $h_f=1.250$ とした。そのため正弦歯形歯車の圧力角は 21.801° である。なお、正弦歯形はインボリュート歯車と同様、正面を基準とする。インボリュート歯車と正弦歯形歯車は図2に示すように正弦歯形歯車のほうが歯元で 0.0951mm 大きく、歯先では 0.0686mm 小さい。また、基準円直径付近の歯厚は、直径 $d_x=48.250\text{mm}$ では正弦歯形歯車のほうが 0.0042mm 小さく $d_x=47.750\text{mm}$ では 0.0044mm 大きい。しかし、正弦歯形歯車の歯元のたけ係数を $h_f=1.3737$ として正弦歯形歯車の圧力角を 20° とした場合は $d_x=48.250\text{mm}$ でその差は 0.0002mm と微小である。

Table 1 Gear data

| Item | Pinion | Gear |
|-------------------------|---------------------|------|
| Tooth profile | involute(Sine-rack) | |
| Gear type | Standard / Spur | |
| Module [mm] | 1 | |
| Number of teeth | 48 | 48 |
| Pressure angle [deg] | 20(21.801) | |
| Reference diameter [mm] | 48.00 | |
| Tip diameter [mm] | 50.00 | |
| Root diameter [mm] | 45.50 | |
| Facewidth [mm] | 8.0 | |
| Center distance [mm] | 48.00 | |
| Backlash [mm] | 0.2 | |
| Contact ratio | 1.748 (1.258) | |

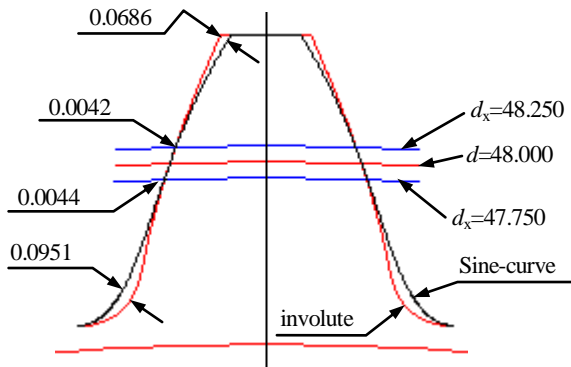


Fig.2 Tooth profiles (involute and sine-rack gear)

E.4 すべり率

かみ合う二つの歯車の歯面間に生じるすべり速度 v_s は、接触点の軌跡上の任意の点におけるそれら二つの仮想ラック（基準ラック）に対する相対速度 v_p 及び v_g の和で与えられる。したがって、すべり率 ξ_p 及び ξ_g は、それぞれ、

$$\xi_p = \frac{|\mathbf{v}_p + \mathbf{v}_g|}{|\mathbf{v}_p|} \quad (5)$$

および

$$\xi_g = \frac{|\mathbf{v}_p + \mathbf{v}_g|}{|\mathbf{v}_g|} \quad (6)$$

で与えられる。

表1の正弦歯形歯車とインボリュート歯車のすべり率を図3に示すが、インボリュート歯車の最大すべり率は、グラフの両端、すなわち、かみ合い始めと、かみ合い終り（ピニオン回転角 $\phi = \pm 6.22^\circ$ ）で最大値となるが、正弦歯形歯車は、かみ合い始めと、かみ合い終り（ピニオン回転角 $\phi = \pm 4.72^\circ$ ）ではなく、それより小さい $\phi = \pm 4.38^\circ$ で最大値を示す。また、インボリュート歯車と正弦歯形歯車のすべり率を比較すると、インボリュート歯車の最大すべり率は0.745であり、正弦歯形歯車の最大すべり率は0.371であるため正弦ラック歯車の最大すべり率はインボリュート歯車の50%である。

sine-rack (pinion) : $\xi_{1max} = -0.371, \xi_{2max} = 0.271$
 involute (pinion) : $\xi_{1max} = -0.745, \xi_{2max} = 0.427$

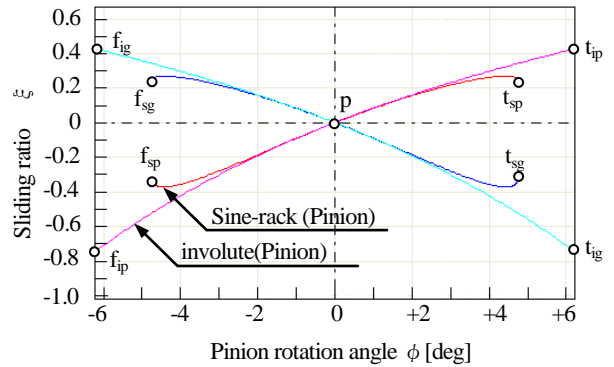


Fig.3 Sliding ratio of sine-rack gear and involute gear

E.5 かみ合い率

正弦ラック歯車のかみ合い率 ϵ_a は、図4に示すように

$$\epsilon_a = \frac{\widehat{B_p O_1 B_g}}{\theta_{z_i}} \quad (7)$$

で求められる。ただし、 θ_{z_i} は、歯数 z_i を用いて

$$\theta_{z_i} = \frac{2\pi}{z_i} \quad (8)$$

であり、 B_p, B_g は、それぞれピニオンおよびギヤの歯先と接触点軌跡の交点である。また O_1 は、ピニオンおよびギヤの回転中心である。

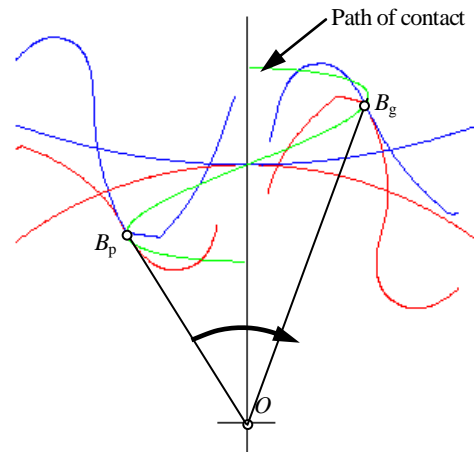


Fig.4 Contact on tooth tip position

図5は、ピニオンの歯数を18と固定してギヤ歯数を変化させたときのかみ合い率の変化の様子をインボリュート歯車のそれと比較して示したものである。値を見ると正弦ラック歯車のかみ合い率は、歯数にかかわらず大きく変化せず、インボリュート歯車のかみ合い率よりも小さくなるのが分かる。試みに、 $z_1 = z_2 = 999$ として計算したところ、その正面かみ合い率は $\epsilon = 1.258$ とほとんど変化しない。なお、かみ合い率の計算に用いる中心距離は、 $a = (d_1 + d_2)/2$ としている。

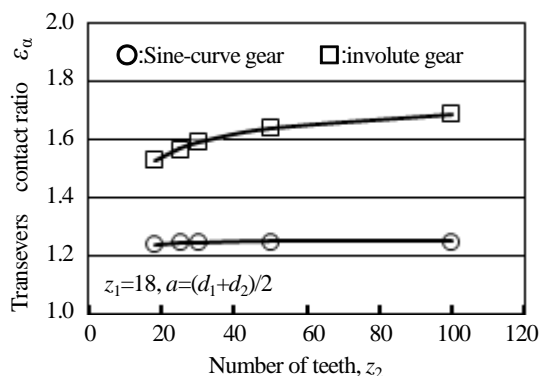


Fig.5 Contact ratio of sine-rack gear and involute gear

E.6 発熱量

プラスチック歯車の発熱³⁾は、負荷かみ合い時において歯面間の摩擦による発熱と材料が粘弾性体故のヒステリシス発熱を熱源とし、歯の温度は、負荷の大きさ、回転速度そして歯面間のすべり速度の影響を受け、運転時の平衡温度は、モジュール、歯幅そして回転速度による熱伝達係数により決まることになる。このことより、表1のインボリュート歯車および正弦歯形歯車の発熱量について検討すると、インボリュート歯車の発熱量は表2の計算条件下では図6に示すように摩擦発熱量は $3.59 \times 10^{-4} \text{ J/mm}$ であり、ヒステリシス発熱はピニオン、ギヤそれぞれ $1.59 \times 10^{-4} \text{ J/mm}$ であることから総発熱量は $6.77 \times 10^{-4} \text{ J/mm}$ となる。また、正弦歯形歯車の摩擦発熱は $1.79 \times 10^{-4} \text{ J/mm}$ であり、ヒステリシス発熱量は、かみ合い率が小さいためインボリュート歯車より多くなり $1.73 \times 10^{-4} \text{ J/mm}$ となる。このことより正弦歯形歯車の発熱量は $5.25 \times 10^{-4} \text{ J/mm}$ と見積ることができるため、正弦歯形歯車はインボリュート歯車の77.5%の発熱量であると推定することができる。そして、図6に示す発熱量と表2の計算条件から負荷運転時の歯の平衡温度を3次元発熱・熱伝導解析ソフトウェア⁴⁾で計算すると、図7に示すようにインボリュート歯車の歯面最大温度304.5Kに対し、正弦歯形歯車の歯面最大温度は302.9Kとなり1.6K低下することが分かる。

Table 2 Calculation conditions

| Item | Unit | Value |
|---------------------------|-----------------------|-----------|
| Material | ---- | POM-C |
| Room temperature | °C | 23 |
| Young modulus | MPa | 2550 |
| Poisson ratio | ---- | 0.35 |
| Specific torque | Nm/mm | 0.125 |
| Rotational speed | min ⁻¹ | 300 |
| Density | kg/cm ³ | 1410 |
| Thermal conductivity | N/s·K | 0.28 |
| Specific heat | J/(kg·K) | 1330 |
| Heat transfer coefficient | W/(m ² ·K) | 30.0 |
| Lubrication | ---- | No grease |

E.7 実験による検証

E.7.1 試験歯車および実験装置

表1および図8のインボリュート歯車および正弦歯形歯車（共に射出成形品、材料はポリアセタールコポリマ）を図9に示す動力吸収式歯車試験機と試験歯車を用いて運転試験を行った。

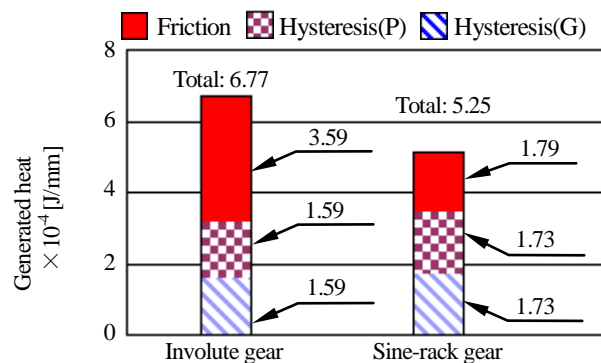


Fig.6 Specific heat generation on tooth surface

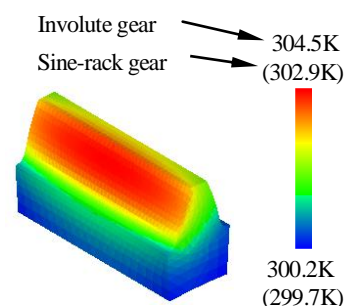
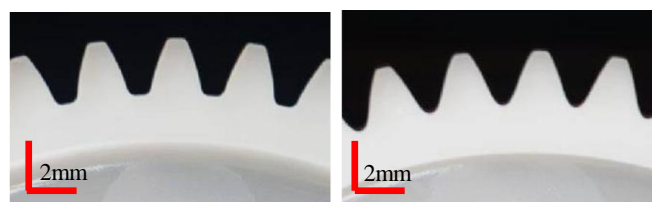


Fig.7 Temperature distribution

実験は、いずれの歯車に対しても負荷トルク 1Nm、回転速度 300 min⁻¹、バックラッシュ 0.2mm、無潤滑およびグリス潤滑の条件下で行った。運転中の歯の表面温度は赤外線放射温度計（キーエンス社製：IT2-02型）を用いて、上方と水平方向からの2ヶ所で測定した。また、効率計測のための駆動および被動軸のトルクはトルクメータ（小野測器社製：SS-200型）で測定した。



(a) involute (b) sine-rack gear

Fig.8 Test gears (Table 1)



Fig.9 Photographs of test rig and test gears

E.7.2 実験結果

無潤滑での歯面温度を図10に効率の測定結果を図11に示す。図7の温度上昇の計算では1.6K低下すると見積もったが、図10

の実験結果では正弦ラック歯車の温度上昇は、インボリュート歯車より2.4K 低下し、効率は図11のように0.4% 良くなっている。また、グリス潤滑の測定結果を図12および図13に示す。

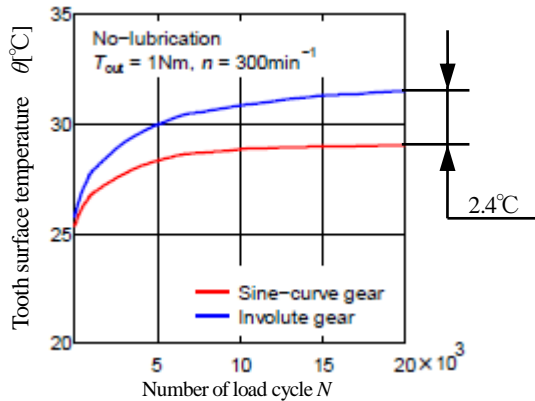


Fig.10 Change in tooth surface temperature (no-lubrication)

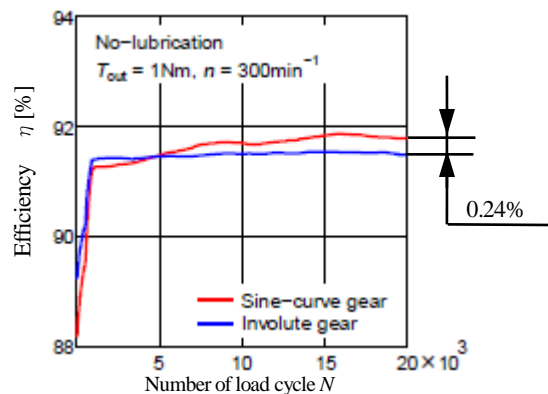


Fig.11 Change in tooth surface efficiency (no-lubrication)

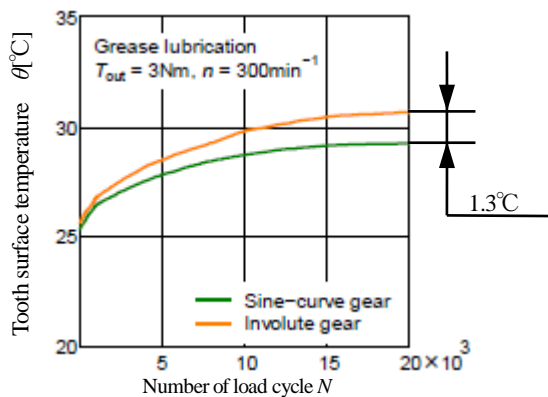


Fig.12 Change in tooth surface temperature (Grease lubrication)

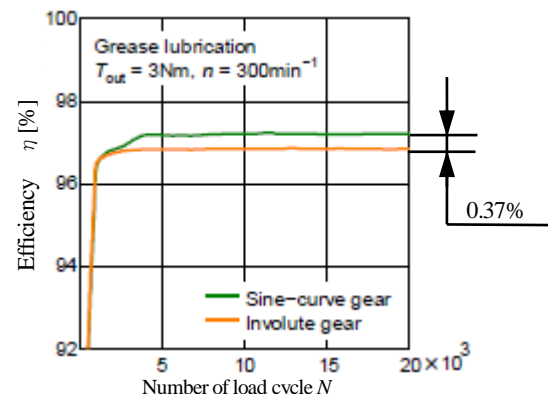


Fig.13 Change in tooth surface efficiency(Grease lubrication)

E.8 片歯面かみ合い試験

表1の正弦歯形歯車を鋼製歯車で製作(成形研削)し、中心距離を理論よりも+0.1mm 離れた48.100mm とし、図14の伝達誤差試験機(小笠原プレジジョン、MEATA-3型)で回転伝達誤差を評価した。その結果は図15に示すように、精度等級は、JIS N1 級(JIS B 1702-1:1998)であり非常に高精度であることが解る。

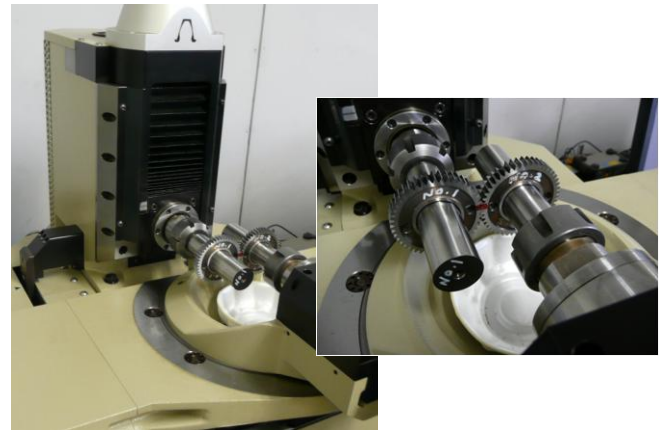


Fig.14 Transmission error measuring instrument

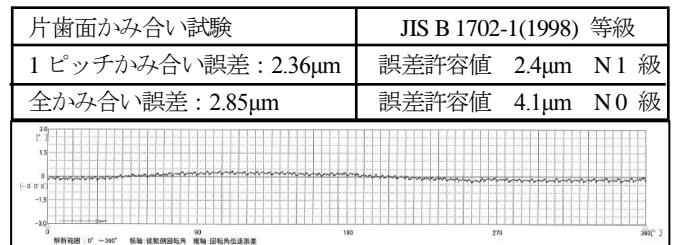


Fig.15 Test result (transmission error)

この歯車を正弦歯形歯車ソフトウェア(カタログ[32])で回転伝達誤差を解析($a=48.100$ mm)すると図16および図17のように評価することができる。

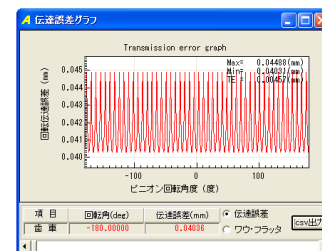


Fig.16 Transmission error analysis

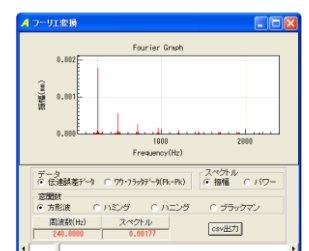


Fig.17 Fourier analysis

E.9 歯車検査

インボリュート歯形($m_n1, z=48, \alpha_n=21.801^\circ$)として計測した結果を図18に示す。この歯形誤差グラフは、インボリュート歯形を基準としているためS字のように表されるが、正弦歯形の座標値が既知であるため、インボリュート歯形との差異から JIS B 1757-2(球基準器又は円筒基準器を用いた歯形測定)のように考えることにより評価が可能である(図19参照)。

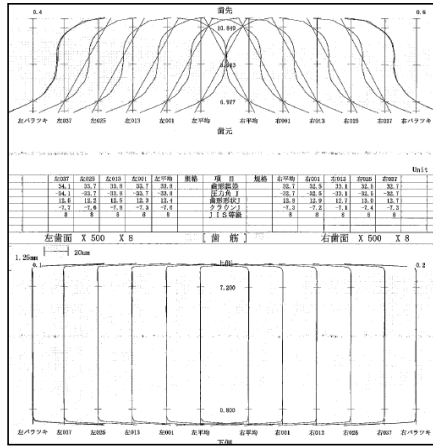


Fig.18 Gear inspection

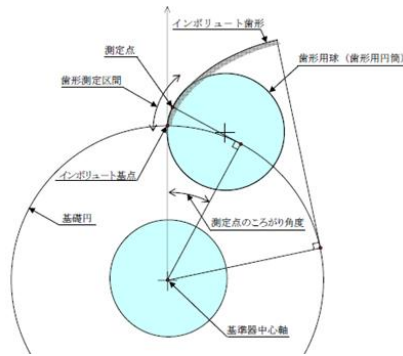


Fig.19 Gear inspection

E.10 正弦歯形はすば歯車の研削

正弦歯形はすば歯車 (図 20 参照) の研削は、図 21 のように正面歯形が既知であれば、成形研削盤 (カタログ[44.1]) により研削が可能である。図 22 に 3 次元干渉を考慮した成形研削用砥石形状を、図 23 に砥石と歯形の重ね合わせ図を示す。

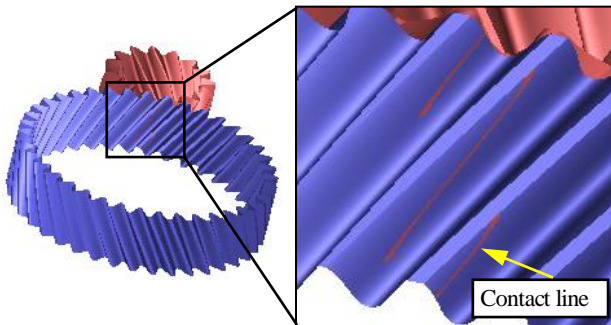


Fig.20 Helical sine gear ($m1, z_1=15, z_2=40, \beta 30^\circ$)

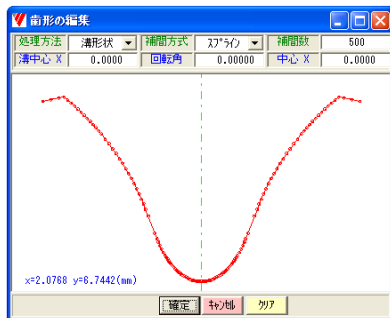


Fig.21 Tooth profile (transverse)

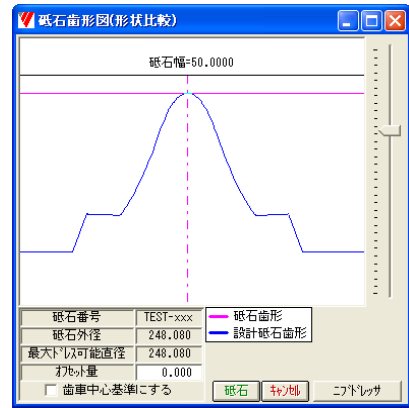


Fig.22 Tooth profile of grinding stone (normal)

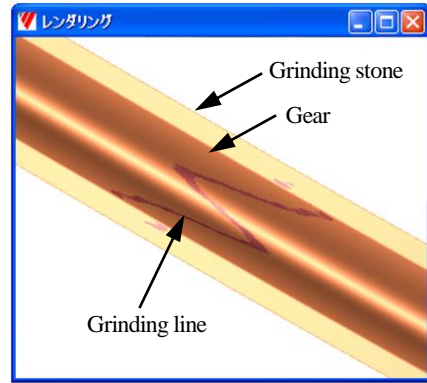


Fig.23 Tooth rendering

E.11 結言

- (1) 実験結果より潤滑の有無に関わらず正弦歯形歯車はインボリュート歯車より発熱量が小さいため動力損失を低減できる可能性を持つことが解った。
- (2) 本稿で示した実験結果は、初期実験のみであるため、今後は多くの実験数で検証する必要がある。また、中心距離変動に対する回転伝達誤差や、負荷容量の実験検証を計画している。

E.12 参考文献など

- (1) 上田昭夫, 吉原正義, 中村守弘, 森脇一郎, 正弦曲線で構成される歯形を基準ラックとするプラスチック歯車, 日本機械学会, 第 10 回機素潤滑設計部門 講演会講演論文集, pp.123-126
- (2) Gear Design Software Manual, Sine-Gear Design Software, (2009), アムテック
- (3) 上田昭夫, 吉原正義, 高橋秀雄, 森脇一郎, “プラスチック歯車のかみ合い発熱コンピュータシミュレーション” 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 73, No. 732(2007), p. 2361
- (4) 上田昭夫, 高橋秀雄, 中村守弘, 森脇一郎, “プラスチック歯車のかみ合い発熱コンピュータシミュレーション”, (歯の温度上昇に及ぼすモジュールと回転速度の影響), 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 75, No. 752(2009), p. 1074

[付録 : F]

遊星歯車設計のポイント

F1. はじめに

遊星歯車は、サンギヤと複数個のピニオンおよびリングギヤから成る一種のギヤシステムであり、各ピニオン位置のかみ合いに位相を持たせることで、振動あるいはノイズ特性をコントロールすることができる。このかみ合い位相は、サンギヤ歯数、リングギヤ歯数とピニオン個数によって決まる。

ここでは、かみ合い位相の種類とそれによる遊星歯車の振動騒音の特徴を整理して説明する。遊星歯車設計時の検討ポイントとして活用いただければ幸いである。

F2. 概要

遊星歯車機構は、シングルピニオン式遊星歯車(図 F1)とダブルピニオン式遊星歯車(図 F2)が基本となっている。自動車用自動変速機は、これらを組み合わせた複合遊星歯車として多段変速を実現している。この基本となるシングルピニオン式遊星歯車とダブルピニオン式遊星歯車について、サンギヤ歯数、リングギヤ歯数とピニオン個数とかみ合い位相の関係およびかみ合い位相と遊星歯車の起振力の関係を以下に整理する。なお、遊星歯車の起振力は、図 F3 に示すように回転方向(Rotational)、半径方向(transverse)、軸方向(Axial)と倒れ方向(Tilting)の 4 つの方向の成分を持つ。かみ合い位相によりこれら 4 つの方向の成分がそれぞれ影響を受けることになる。

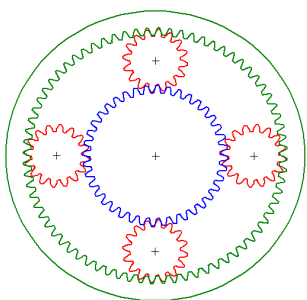


図 F1 シングルピニオン式遊星歯車

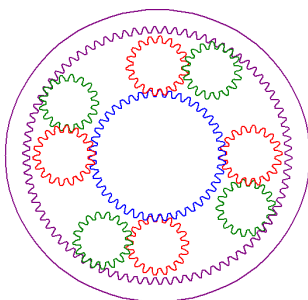


図 F2 ダブルピニオン式遊星歯車

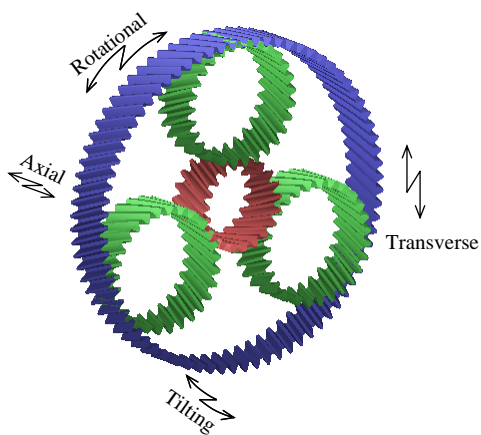


図 F3 遊星歯車の起振力成分

F3. 遊星歯車の基本運動式とギヤ比

本論に入る前に、遊星歯車の基本運動式とギヤ比について示す。遊星歯車の 3 つの回転要素の回転 (サンギヤ回転 N_s , キャリア回転 N_c , リングギヤ回転 N_r) は、次式により関係づけられる。これが基本運動式である。

①シングルピニオン式遊星歯車

$$(1 + \lambda)N_c = N_r + \lambda N_s \tag{F.1}$$

②ダブルピニオン式遊星歯車

$$(1 - \lambda)N_c = N_r - \lambda N_s \tag{F.2}$$

ここに、 λ はサンギヤ歯数 Z_s とリングギヤ歯数 Z_r の比で $\lambda = Z_s / Z_r < 1$ である。

式(F.1), (F.2)から 3 つの回転要素のいずれかを固定、いずれかを入力、残りを出力とすることでギヤ比が求まる。表 F.1 および表 F.2 は、シングルピニオン式遊星歯車とダブルピニオン式遊星歯車のギヤ比を運転条件に合わせて整理したものである。

F4. 遊星歯車の配置角

ピニオンの配置角 δ は、サンギヤ歯数 Z_s , リングギヤ歯数 Z_r と

表 F.1 シングルピニオン式遊星歯車のギヤ比一覧

| | Ring gear Carrier Sun gear N_1 N_2 | 条件 | | | 減速比 $i = N_i / N_o$ |
|---|---|-----------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| | | 駆動 | 従動 | 固定 | |
| A | | Sun gear | Carrier | Ring gear | $i = 1 + \frac{1}{\lambda}$ |
| B | | Carrier | Sun gear | Ring gear | $i = \frac{\lambda}{1 + \lambda}$ |
| C | | Sun gear | Ring gear | Carrier | $i = -\frac{1}{\lambda}$ |
| D | | Ring gear | Sun gear | Carrier | $i = -\lambda$ |
| E | | Carrier | Ring gear | Sun gear | $i = \frac{1}{1 + \lambda}$ |
| F | | Ring gear | Carrier | Sun gear | $i = 1 + \lambda$ |

表 F.2 ダブルピニオン式遊星歯車のギヤ比一覧

| | Ring gear Carrier Sun gear N_1 N_2 | 条件 | | | 減速比 $i = N_i / N_o$ |
|---|---|-----------|-----------|-----------|------------------------------------|
| | | 駆動 | 従動 | 固定 | |
| A | | Sun gear | Carrier | Ring gear | $i = 1 - \frac{1}{\lambda}$ |
| B | | Carrier | Sun gear | Ring gear | $i = -\frac{\lambda}{1 - \lambda}$ |
| C | | Sun gear | Ring gear | Carrier | $i = \frac{1}{\lambda}$ |
| D | | Ring gear | Sun gear | Carrier | $i = \lambda$ |
| E | | Carrier | Ring gear | Sun gear | $i = \frac{1}{1 - \lambda}$ |
| F | | Ring gear | Carrier | Sun gear | $i = 1 - \lambda$ |

ピニオン個数 k_p で決まる。その基本となるのが最小かみ合い角 θ_{min} で式(F.3)で表される。

$$\theta_{min} = \frac{360}{Z_s \pm Z_r} \quad (F.3)$$

ここに、符号+; シングルピニオン, -; ダブルピニオンである。ピニオンの配置角 δ は、最小かみ合い角 θ_{min} の整数倍となる。したがって、

$$\delta = n \cdot \theta_{min} = 360/k_p \quad (n \text{ は整数}), \text{ すなわち,}$$

$$\frac{Z_s \pm Z_r}{k_p} = n \quad (F.4)$$

のとき、ピニオンは等配置となる。

$$\frac{Z_s \pm Z_r}{k_p} \neq n \quad (F.5)$$

のとき、ピニオンは不等配置となる。

F5. かみ合い位相の定義

かみ合い位相とは、各ピニオン位置でのかみ合いのタイミングのずれのことである。たとえば、図 F.4 において、サンギヤの歯元とピニオン#1の歯先がかみ合っているとき(点 a)、 i 番目のピニオン# i もサンギヤの歯元とピニオンの歯先がかみ合っていれば(点 b')、かみ合いのタイミングのずれ、すなわち、かみ合い位相はないということになる。しかし、実際にはサンギヤの歯は等間隔に配置されているのでピニオン# i はサンギヤと点 b でかみ合うことになる。ピニオン# i の点 b でのかみ合いは、ピニオン#1の点 a のかみ合いに対して $\Delta\theta$ 進んでいることになる。

$$\Delta\theta = \delta_i - \theta_i = \delta_i - \frac{360}{Z_s} n_i \quad (n_i \text{ は整数}) \quad (F.6)$$

$$n_i = \text{int}\left(\frac{\delta_i}{360/Z_s}\right)$$

$\Delta\theta$ をサンギヤのピッチ $360/Z_s$ で正規化して、

$$\Delta P_i = \delta_i / \frac{360}{Z_s} - \text{int}\left(\delta_i / \frac{360}{Z_s}\right) \quad (\text{pitch}) \quad (F.7)$$

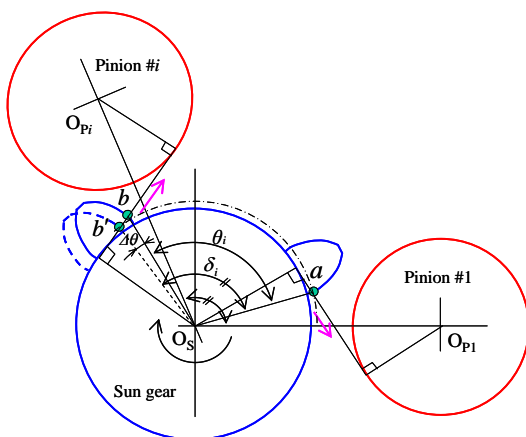


図 F.4 かみ合い位相の定義

となり、ピニオン#1のかみ合いに対する各ピニオンのかみ合いの位相 ΔP (pitch)を求めることができる。

図 F.4 とは逆方向にかみ合いが進行する場合は、ピニオン# i の点 b でのかみ合いは、ピニオン#1の点 a でのかみ合いに対して $\Delta\theta$ 遅れていることになる。言い換えると、

$$1 - \Delta\theta / \frac{360}{Z_s} \quad (\text{pitch})$$

進んでいることになる。よって、この場合のかみ合い位相 ΔP は、

$$\Delta P = 1 - \delta_i / \frac{360}{Z_s} + \text{int}\left(\delta_i / \frac{360}{Z_s}\right) \quad (\text{pitch}) \quad (F.8)$$

と表される。

なお、上記は、サンギヤとピニオンのかみ合いに置ける位相であるが、ピニオンとリングギヤのかみ合いにける各ピニオン位置での位相もこれと同一となる。

F6. かみ合い位相と起振力特性

各ピニオン位置でのかみ合いの位相は、サンギヤ歯数 Z_s 、リングギヤ歯数 Z_r とピニオン個数 k_p の設定で決まり、以下の5つのパターンに分類される。位相のパターンにより、回転方向(Rotational)、半径方向(Transverse)、軸方向(Axial)および倒れ方向(Tilting)それぞれの起振力特性が影響を受ける。

- ① ピニオン位置のかみ合いに位相差がない場合 (In phase); 位相差がなく各ピニオン位置でのかみ合いは同一のタイミングとなるので、回転方向および軸方向の起振力はピニオン個数倍となり、その変動成分は大きくなる。一方、半径方向および倒れ方向の起振力は釣り合うので、変動成分は小さくなる。この状態は以下のギヤ構成条件で作られされる。

$$(Z_s + Z_r) / k_p = \text{integer} \quad (\text{整数}) \quad \text{---} \quad \text{ピニオン等配置}$$

$$Z_s / k_p = \text{integer} \quad (\text{整数})$$

例: $Z_s = 33$, $Z_r = 75$, $k_p = 4$ の遊星歯車(図 F.5)

- ②各ピニオン位置でのかみ合いの位相が $1/k_p$ ピッチずつ順番に

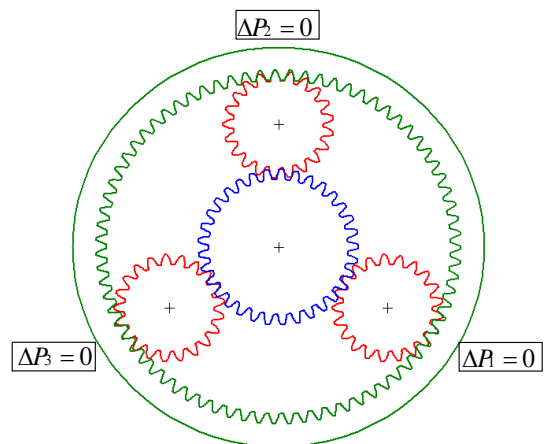


図 F.5 In phase(同位相)遊星歯車

ずれる場合 (Sequentially phased) ; 各ピニオン位置での噛み合いの位相が等間隔に順番にずれていくので、回転方向および軸方向の起振力は相殺され、その変動成分は小さくなる。一方、半径方向および倒れ方向の起振力は釣り合わなくなるので、その変動成分は大きくなる。この状態は以下のギヤ構成条件で作り出される。

$$(Z_s + Z_r)/k_p = \text{integer (整数)} \quad \text{--- ピニオン等配置}$$

$Z_s/k_p \neq \text{integer}$ で、小数点以下が $1/k_p$ or $1-1/k_p$

例 : $Z_s = 33, Z_r = 75, k_p = 4$ の遊星歯車 (図 F.6)

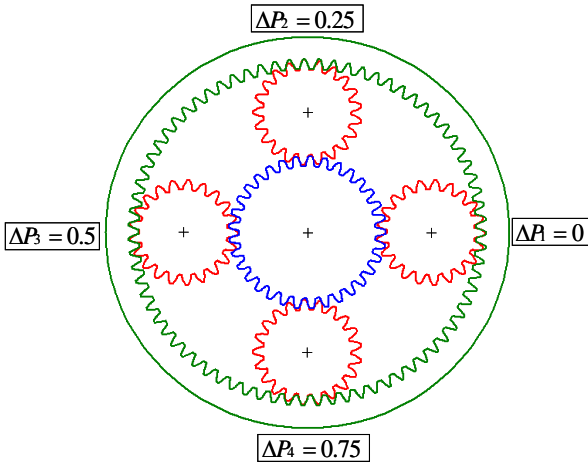


図 F.6 Sequentially phased 遊星歯車

③対向するピニオン位置の噛み合いは同位相、隣り合うピニオン位置の噛み合いの位相が $1/2$ ピッチずれる場合

(Counter phased) ; 隣り合うピニオン位置の噛み合いの位相が $1/2$ ピッチずれているので、回転方向および軸方向の起振力は隣り合うピニオン同士で相殺され、その変動成分は小さくなる。

また、半径方向および倒れ方向の起振力は対向するピニオン同士で相殺され、その変動成分は小さくなる。すなわち、すべての方向の起振力を小さくすることができる。ただし、対向するピニオン 2 個あるいは隣り合うピニオン 2 個での相殺のため、歯面誤差や組付け誤差により起振力の相殺度合いが影響を受けやすい。この状態は以下のギヤ構成条件で作り出される。

$$(Z_s + Z_r)/k_p = \text{integer (整数)} \quad \text{--- ピニオン等配置}$$

$Z_s/k_p \neq \text{integer}$ で、小数点以下が 0.5

例 : $Z_s = 30, Z_r = 74, k_p = 4$ の遊星歯車 (図 F.7)

④各ピニオン位置での噛み合いの位相が $2/k_p$ or $1-2/k_p$ ピッチずつ順番にずれる場合 (Optimum phase) ; ピニオン個数が 5 or 6 の場合この条件も存在する。

$k_p = 5$ の場合、回転方向、軸方向、半径方向および倒れ方向すべての起振力が、5 つのピニオン位置すべてでの噛み合いで相殺されるので、その変動成分を小さくすることができる。また、歯面誤差や組付け誤差による起振力の相殺度合いは影響されにくくなる。 $k_p = 6$ の場合、対向するピニオン位置の噛み合いは同位相となるので、3 つのピニオンの噛み合いで回転方向、軸方向、半径方向

および倒れ方向それぞれの起振力が相殺されることになる。これら状態は以下のギヤ構成条件で作り出される。

$$(Z_s + Z_r)/k_p = \text{integer (整数)} \quad \text{--- ピニオン等配置}$$

$Z_s/k_p \neq \text{integer}$ で、小数点以下が $2/k_p$ or $1-2/k_p$

例 : $Z_s = 37, Z_r = 78, k_p = 5$ の遊星歯車 (図 F.8)

例 : $Z_s = 38, Z_r = 82, k_p = 6$ の遊星歯車 (図 F.9)

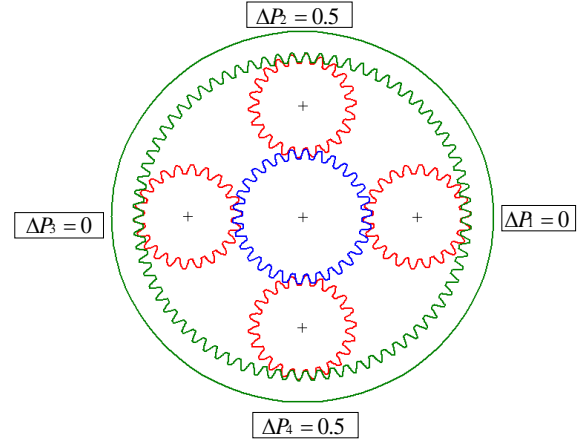


図 F.7 Counter phased 遊星歯車

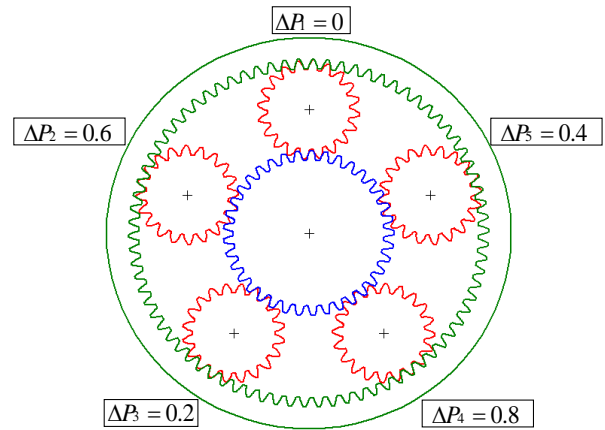


図 F.8 5 ピニオン遊星歯車の最適位相

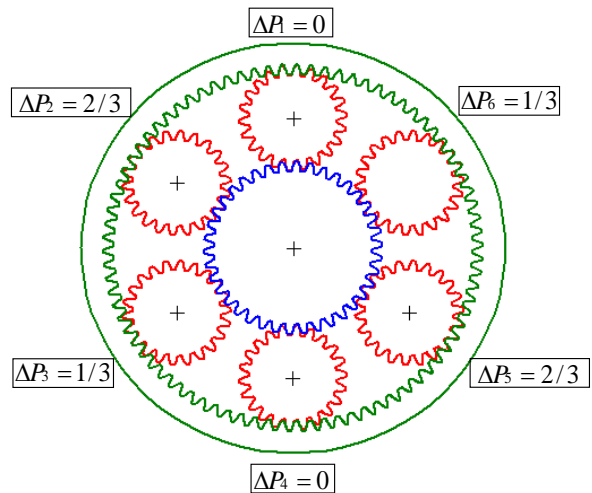


図 F.9 6 ピニオン遊星歯車の最適位相

⑤ピニオンが不等配置となる場合(Unequally spaced) ; ピニオンが不等配置になることで、各ピニオン位置におけるかみ合いに位相が生じる。各位相は、ギヤ構成条件によって異なるので、式(F.6), (F.7)によって求める。この位相差により、各方向の起振力はパターン①と②の中間的な特性を示すことになる。この状態は以下のギヤ構成条件で作りに出される。

$$(Z_s + Z_r) / k_p \neq integer \quad \text{--- ピニオン不等配置}$$

例 : $Z_s = 42$, $Z_r = 75$, $k_p = 4$ の遊星歯車(図 F.10)
最小かみ合い角 θ_{min} は、

$$\theta_{min} = \frac{360}{Z_s + Z_r} = \frac{360}{117} = 3.077$$

$$\therefore \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = 89.23^\circ, \delta_4 = 92.31^\circ$$

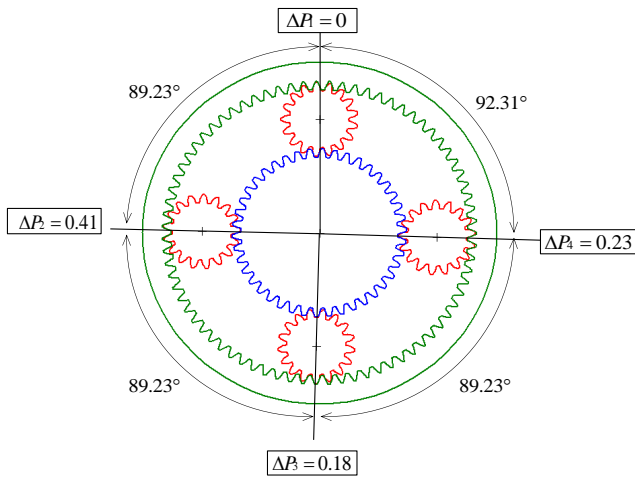


図 F.10 Unequally spaced 遊星歯車

F7. まとめ

以上、説明したかみ合い位相のパターンとそれによる起振力のコントロール状況をまとめると表 F.3 のようになる。

ギヤトレインの振動伝達特性に応じて、位相パターンを選択すれば、効果的なギヤノイズの低減が可能となる

たとえば、回転方向の起振力に対して振動伝達特性が敏感なギヤトレインに対しては、②の Sequentially phased 遊星歯車が有効であり、半径方向の起振力に対して敏感なギヤトレインに対しては①の In phase 遊星歯車が有効となる。

歯数の決定段階では、ギヤトレインの伝達特性が不明な場合が多い。このような場合には、各方向の起振力を相殺できる③の Counter phase 遊星歯車を選択するのも一つの方法である。

5 ピニオンあるいは 6 ピニオンが許されるのであれば、④の条件を満たす遊星歯車を選択したい。

表 F.3 かみ合い位相の起振力コントロール効果

| | Rotational, Axial | Transverse, Tilting |
|-----------------------|-------------------|---------------------|
| ① In Phase | × | ◎ |
| ② Sequentially phased | ◎ | × |
| ③ Counter phased | ○ | ○ |
| ④ Optimum phase | ◎ | ◎ |
| ⑤ Unequally spaced | △ | △ |

- ◎ ; すべてのピニオンのかみ合いで相殺
- ; 対向するピニオンと隣り合うピニオンのかみ合いで相殺
- △ ; 不等ピッチの位相で相殺
- × ; 相殺されずに増幅

(寄稿 森川 邦彦)

[付録 G] 歯車の歴史と和算

G.1 緒言

歯車の歴史についてアリストテレス (Aristoteles) はその著書「機械の問題」で、くさび、曲輪、ころ、車輪、滑車などとともに回転運動を伝達する青銅製や鉄製の歯車をあげている。これが記録に残っている歯車に関する最初の記事¹⁾と考えられる。また、アルキメデス (Archimedes) には歯車についてアリストテレスが言及していないウォームギヤについての業績もある。そして、図 G.1 に示すように 15 世紀後半にはレオナルド・ダ・ヴィンチ (Leonardo da Vinci) による歯車に関するスケッチで歯車の地位が確立したと言える。このように生まれた歯車が、技術的な変遷を経て現代に至っているが、本稿では歯車の歴史とともに現在の日本ではどの程度の歯車を作ることができるかについて述べる。

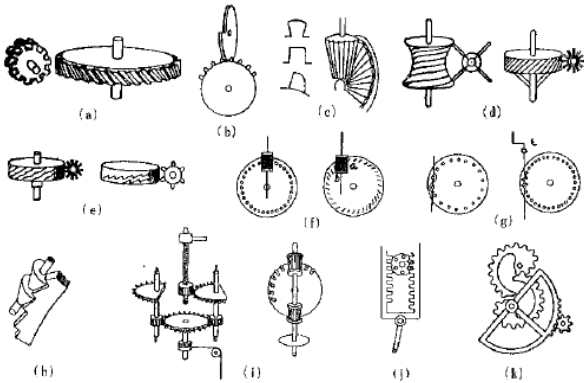


図 G.1 各種歯車装置のスケッチ²⁾

G.2 歯車の歴史

歯車歯形の第 1 世代は、原始的な歯車装置に見られる、いわゆるひっかかり歯車の時代であり第 2 世代は理論的には正しい歯形ではないが、経験によってかなり正確に回転運動を伝える歯形とピッチを持つ歯車が使用されていた世代であり 18 世紀頃まで続いた。第 3 世代は歯形の理論的研究が始まりサイクロイド歯形が用いられた時代である。デンマークの天文学者オラフ・レーマー (Olaf Roemer) が 1674 年に歯車が等速運動を行うには、エピサイクロイド歯形が適当であると提唱したのを最初に 1694 年にはフランスのフィリップ・ド・ライール (Philips de La Hire) がエピサイクロイドを論じた。またフランスのカミュ (M. Camus) は、時計歯車の歯形について研究し 1733 年にカミュの定理を発表している。これは今日、歯形のかみ合いに関する基本原理になっている。このことより 19 世紀中頃、イギリスのウイリス教授 (Robert Willis) は複合サイクロイド歯形を発表し交換性歯車が得られることを明らかにし、交換性複合サイクロイド歯車が広く世界に普及することになる。

インボリュート歯形はその普及が遅れるが 1765 年スイスの数学・物理学者レオンハルト・オイラー (Leonhard Euler) らによって次第にその長所が明らかにされ、特にウイリスによって圧力角 14.5° の標準歯車が選定され、次第にその優位性が認められるようになるが、本格的にサイクロイド歯形にとって代わって代表的歯形として優位を占めるに至るのは 20 世紀に入って創成歯切り法が開発され実用に及んでからのことである。これより第 4 世代に入る。創成方式によるホブ盤は 1835 年のウィットウォース (J. Whitworth) によるホブ盤の特許が最初の記録とされているが、その後、1900 年のファウター (Herman Pfauter) の差動歯車装置を持つ、はすば

歯車の歯切りが容易な万能ホブ盤が発表され、ここにホブ盤による円筒歯車の歯切り方式が圧倒的優位を占めるに至りインボリュート歯形が広く世界に普及することになる。

G.3 歯車と和算

1549 年(天文 12)にフランシスコ・デ・ザビエル (Francisco de Xavier) が周防国大内義隆に機械式時計を献上したのが最初の歯車機構と言われている。その後、1591 年にはローマ法王へ派遣した使節が帰朝した際、宣教師ワリヤニが秀吉に時計を献上し、1612 年にはメキシコ総督がスペイン製の置時計を献上した。この時計は、静岡県久能山東照宮に保存され、これが日本に現存する最古の時計である。そして、1600 年初期、津田助左衛門が時計を製作したのが日本最古の歯車製作記録である。このように歯車は、「時計」として伝来しているが、1775 年(安永 4)には若井源大衛門が歯車を利用した盃運人形を製作している。しかし上述したように欧州のような歯形についての研究はなされておらず、万年自鳴鐘を製作した「からくり義衛門」(田中久重)でさえ歯形はヤスリで製作していたようである。

一方、欧州の歯車の世界ではサイクロイド歯形が採用され、オイラーがインボリュート歯形を論じていることから歯車理論に関しては到底追いつくことができないほど遅れていたと言える。また、我が国においてホブ盤が開発されるのは 1936 年、濱井次郎による H70 ホブ盤³⁾まで待たなければならない。

次に、「スイス」、「時計」、「オイラー」というキーワードから我が国で創成歯切りに思い至ったかもしれない可能性について述べたい。オイラーと言えば 1737 年に発見したとされている式(1)に示す「円周率自乗の公式」があるが、これより 15 年も早く和算家の建部賢弘 (たけべかたひろ) が発見し、1722 年 (享保 7 年) 吉宗に綴術算経⁴⁾を献上している。この建部の考え方は西洋数学のロングバグ法と同等の累遍増約術という加速法を編み出し成し得たものであり小数点以下 41 桁まで正しい結果を求めている事実は驚嘆に値する。

$$\pi^2 = 9 \left(1 + \frac{1^2}{3 \cdot 4} + \frac{1^2 \cdot 2^2}{3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6} + \frac{1^2 \cdot 2^2 \cdot 3^2}{3 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 7 \cdot 8} + \dots \right) \quad (1)$$

$$\pi = 3.14159265358979323846264338327950288419746$$

時計歯車を製作するとき図 G.2 の「歯ざらえ機」(スイス製)という機械がある。これは、近江神宮の近江時計眼鏡宝飾専門学校で実際に使っているものを撮影したものである。図 G.2 のハンドルを回すことにより図 G.3 の歯車とカッタ (1 巻きホブのような形で歯車に応じた種類がある) が連動して回転するためヤスリなどで加工した歯溝にカッタの刃が入り込み歯の分割を正しくする装置、すなわちピッチ誤差除去装置と言えるものである。この加工を施すことにより時計歯車のピッチ精度は格段に向上する。この装置は、まさしくホブの創成加工原理そのものであり、スイス人のオイラーが、図 G.2 の機械を使っている時計職人を見たとき創成歯切り法を思いついたのではないだろうか。歴史に、もし、は禁句だが、我が国で時計を製作するとき、職人が図 G.2 のような機械を使っていてそれを建部賢弘が見ていたならば、もしかして創成歯切り法を日本人が発明したのではないだろうかと思いを巡らせている。

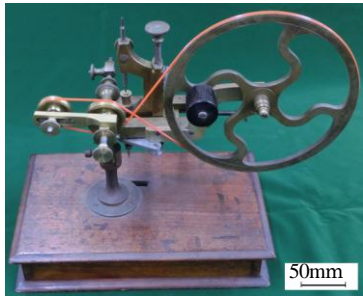


図 G.2 歯ざらえ機

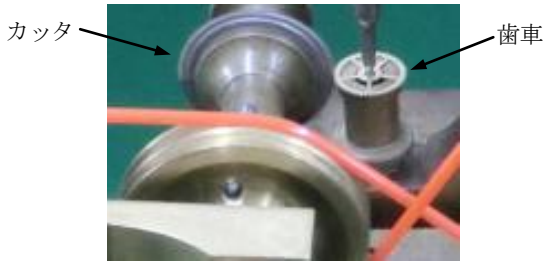


図 G.3 歯車と工具

欧州においてサイクロイドやインボリュート歯形論が盛んに研究されたが、我が国においてはどうかだろうか。江戸時代、和算が隆盛を極めた頃、数多くの算額が神社に奉納されている。その中にインボリュートやサイクロイドに関するものが無いかを調査した。その結果、1796年、岡山県備中国吉備郡真金村宮内 官幣中社吉備津神社拜殿(寛政八年丙辰春三月)にサイクロイド曲線に関する算額が図 G.4 のように奉納されていることが解った。この記述は、大阪中之島図書館で所有している社寺奉納算額集(巻の下)にあり、昭和17年、清水義雄が以下のように整理している。「“サイクロイド”ノ一端ト動円ガ“サイクロイド”ノ中点ニ於テ基線ニ垂直ナ直線ト基線ニ接スル時、動円ガ“サイクロイド”トノ交点ノ内、一端ヨリ近イ点マデノ距離 S ナルトキ、コノ円ニ外切シ“サイクロイド”ニ内切、基線ニ切スル円ノ直径近似値(d)ヲ求ム」。そして答日如左術とあり、式(2)で d を求めることができる。

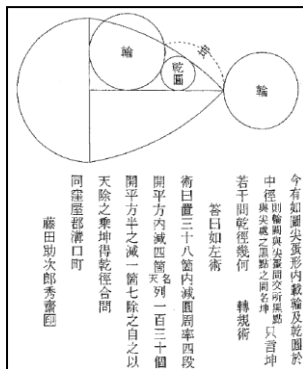


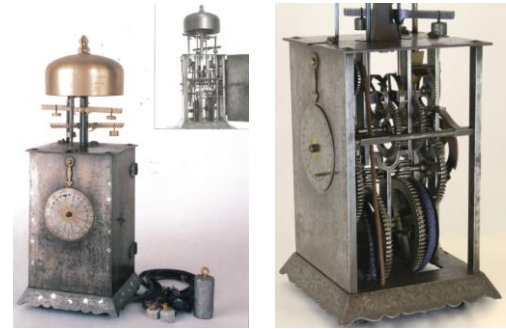
図 G.4 サイクロイドの算額

$$d = \frac{(67 - 2\sqrt{130})S}{98(\sqrt{38} - 4\pi - 4)} \quad (2)$$

このようにサイクロイドに関しては算額として残っているが、インボリュートに関しては残念ながら見つけ出すことができなかった。また、和算が天文学や暦に利用されたように機械要素や機構学にも利用されていたならば、また違った発展を遂げていたように思えてならない。いずれにしても和算の世界では歯形論が発展しなかったのは少し残念な気持ちが残る。なお、歯車に関する歴史に関しては一覧表⁵⁾に整理しているので参照されたい。

G.4 和時計に使用されている歯車の一例

1688年に三代目津田助左衛門信貴が製作した図 G.5 の二挺天符櫓時計(セイコーミュージアム所蔵)に使用されている歯車の一例を表 G.1 および図 G.6 に示すが、手作りとは思えないほど上質な歯車である。



三代目津田助左衛門信貴 製作 (1688年)

図 G.5 二挺天符櫓時計(セイコーミュージアム所蔵)

表 G.1 歯車諸元 (1 段目歯車)

| Item | unit | 1st gear pair | |
|--------------------|------|---------------|--------|
| | | pinion | gear |
| Gear type | --- | P1 | G1 |
| Gear No. | --- | 13 | 72 |
| Module | mm | 1.142 | |
| Number of teeth | --- | 13 | 72 |
| Pressure angle | deg | 18.5 | |
| Reference diameter | mm | 14.846 | 82.224 |
| Base diameter | mm | 14.079 | 77.975 |
| Tip diameter | mm | 16.00 | 84.8 |
| Root diameter | mm | 10.00 | 78.0 |
| Tip radius | mm | 0.50 | 0.30 |
| Bottom radius | mm | 0.40 | 0.45 |
| Face width | mm | 9.2 | 4.2 |
| Center distance | mm | 48.65 | |
| Contact ratio | --- | 0.307 | |
| Backlash | mm | 1.00 | |



図 G.6. Pinion(z=13)



図 G.7 Gear(z=72)

詳しくは、日本機械学会論文集 Vol. 83(2017) No. 847

「和時計から日本の歯車の源流を探る」をご覧ください。

https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjsme/83/847/83_16-00295/_pdf

計算機や工作機械がない時代でもこのようなことができたという技術への取り組みの本質を見直すきっかけになれば良いのではないかと考えています。

参考文献

- 1) 会田俊夫 他：歯車の設計(1), 大河出版, (1971), 1
- 2) 会田俊夫 他：歯車の設計(1), 大河出版, (1971), 4
- 3) (社)日本歯車工業会, 歯車技術の半世紀, その発達と 将来, 大日本印刷, 1993.58
- 4) 鳴海風, 江戸の天才数学者 -世界を驚かせた和算家たち-, 新潮選書, 2012, 87
- 5) 歯車ソフトウェアカタログ(vol.16), アムテック, (2014), 72-74

【付録 H】 非対称歯形歯車の特性

H.1 はじめに

非対称歯形歯車は、ギヤの大きさや材料を変更しないで負荷容量を増大させることができることから図 H.1 に示すロシア製 An-70 の contra propeller 駆動の 14000PS ターボプロップの遊星歯車装置に使用されており AirBus A400M の 1.4 倍の能力を有している。また、ヘリコプターのメインドライブギヤにも採用されている¹⁾。このように現在において用途は限定されているが、一般産業機械にも徐々に採用される機運がある。非対称歯形歯車は、創成歯切り加工も研削も可能なことから現在稼働中の歯車装置にも容易に置き換えが可能である。

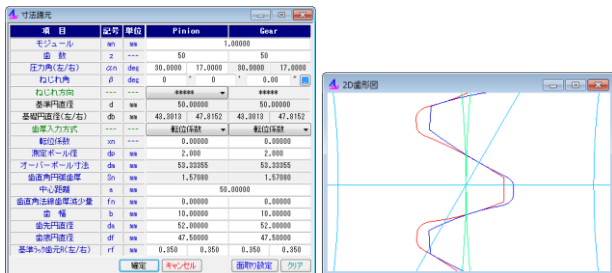
圧力角が 25°や 27°の歯車は、製鉄所の圧延機のような高負荷歯車装置には曲げ強度の向上から採用されているが、非対称歯形歯車は作用歯面に高圧力角(30°以上)を有する歯形である。両歯面を高圧力角の対称歯形とすると歯先尖りとなるため歯形が成立しない。そのため歯たけを保つためには必然的に非対称歯形にする必要がある。その一例を図 H2 に示す。この例では、作用側圧力角 $\alpha_{nR}=30^\circ$ 、反作用側圧力角 $\alpha_{nL}=17^\circ$ 、としている。高圧力角歯形は、標準圧力角(20°)に比べ、ヘルツ応力は大きく低下し、摩擦係数は小さく、すべり率は小さく、そしてフラッシュ温度を低く抑えることができる。しかし、この効果の代償として正面かみ合い率が低下したり軸受荷重が増加したりすることに留意する必要がある。これらの特性を持つ非対称歯形歯車のヘルツ応力、フラッシュ温度、曲げ応力などについて解析した結果について述べる。



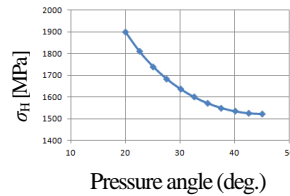
図H.1 An-70と遊星歯車機構¹⁾

H.2 高圧力角の効果

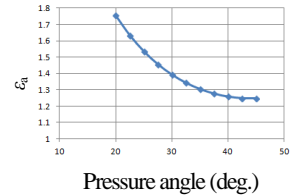
かみ合い圧力角を大きくすることでヘルツ応力などが、どのように変化するかを検討する。検討する歯車諸元は、モジュール $m=1$ 、歯数 $z_1=z_2=50$ 、ねじれ角 $\beta=0^\circ$ 、転位係数 $x_{n1}=x_{n2}=0$ 、歯幅 $b=10\text{mm}$ 、トルク $T=100\text{N}\cdot\text{m}$ 、回転速度 $n=1000\text{min}^{-1}$ とし、作用側圧力角 α_{nR} だけを 20~45°の範囲で変化させて計算した。反作用側歯面の圧力角 α_{nL} は無視している。その結果、図 H.3~H.6 に示すように、かみ合い圧力角 20° のとき $\sigma_H=1899\text{MPa}$ のヘルツ応力が圧力角 35° では、 $\sigma_H=1573\text{MPa}$ (1/1.21 倍) と低下し、すべり率も 1/3.3 倍小さくなっているが、正面かみ合い率は 1/1.34 低下するとともに軸受荷重 F は 1.9 倍に増すことに注意しなければならない。



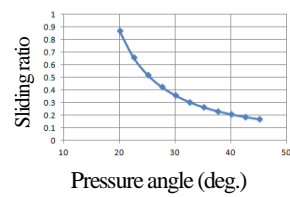
図H.2 非対称歯形歯車の諸元と歯形



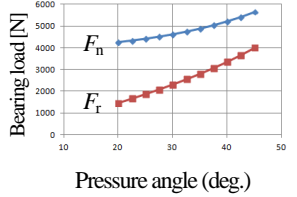
図H.3 ヘルツ応力の変化



図H.4 正面かみ合い率



図H.5 すべり率



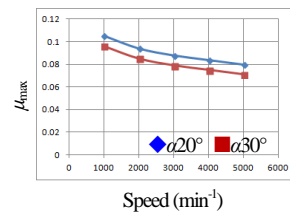
図H.6 軸受荷重

H.3 フラッシュ温度

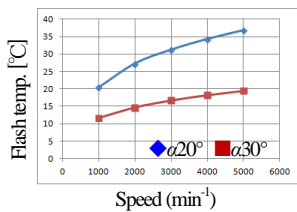
図 H.2 と同諸元で材料を SCM420 (熱伝達率 60.0W/mK)、潤滑油を ISO VG100、油温 70°C 、歯面粗さ $Rz2.5, Ra0.4$ 、回転速度 $1000 \sim 5000\text{min}^{-1}$ とし図 H.7 のように設定し、摩擦係数(松本の式)²⁾ およびフラッシュ温度³⁾ を計算すると図 H.8, H.9 のようにいずれも圧力角 $\alpha_n=20^\circ$ より $\alpha_{nR}=30^\circ$ のほうが有利であることが解る。また、回転速度 5000min^{-1} においてフラッシュ温度は 17.3°C 低くなる。また、図 H.10 に圧力角の違いによるフラッシュ温度分布⁴⁾ を示すが、 $\alpha_{nR}=30^\circ$ のほうが 9.7°C 低いことが解る。

| 動力、潤滑油設定(フラッシュ温度用) | | | | |
|---------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 最大歯面応力 | σ_{Hmax} | MPa | 1441.112 | |
| トルク | T | Nm | 100.0000 | 100.0000 |
| 動力 | P | kW | 10.472 | |
| 回転速度 | n | 1/min | 1000.000 | 1000.000 |
| 周速 | v | m/s | 2.618 | |
| 歯面粗さ(最大高さ) | Rz | μm | 2.500 | 2.500 |
| 歯面粗さ(平均) | Ra | μm | 0.400 | 0.400 |
| 材料名 | | --- | Cr鋼(1Cr) | Cr鋼(1Cr) |
| 比重 | ρ | g/cm^3 | 7.870 | 7.870 |
| 比熱 | CM | $\text{J/(g}\cdot^\circ\text{C)}$ | 461.000 | 461.000 |
| 熱伝導率 | λ | W/mK | 60.000 | 60.000 |
| 歯面温度 | GTC | $^\circ\text{C}$ | | 70.000 |
| 項目(油) | 記号 | 単位 | 数値 | |
| 油温度 | OTc | $^\circ\text{C}$ | 70.000 | |
| 油の種類 | | --- | 鉱物油(その他) | |
| ISOグレード | | --- | ISO VG 100 | |
| 動粘度(40 $^\circ\text{C}$) | | --- | 100 | |
| 油の平均温度 | MTc | $^\circ\text{C}$ | 214.000 | |
| 油の標準偏差温度 | SD | $^\circ\text{C}$ | 85.000 | |
| 絶対粘度 | μ_0 | μP | 20.379 | |
| 粘度圧 | α | 1/MPa | 0.01882 | |

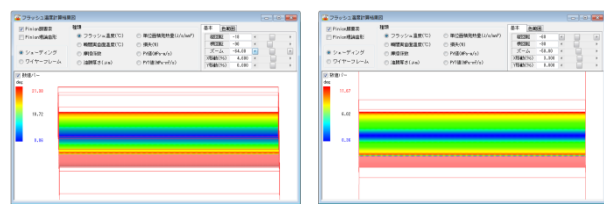
図H.7 フラッシュ温度条件設定



図H.8 摩擦係数



図H.9 フラッシュ温度



(a) $\alpha=20^\circ$, $T_{fmax}=21.4^\circ\text{C}$

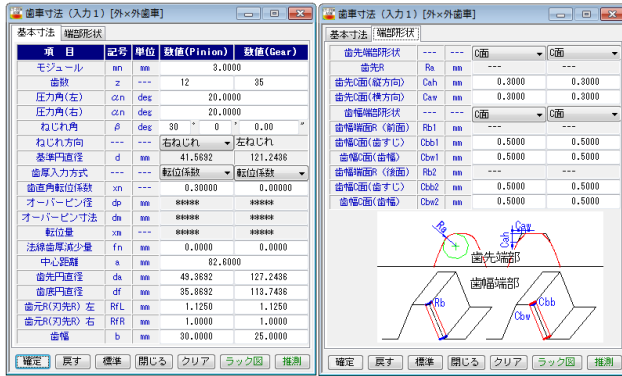
(b) $\alpha=30^\circ$, $T_{fmax}=11.7^\circ\text{C}$

図H.10 フラッシュ温度(1000min⁻¹)

H.4 高圧力角による負荷容量の向上

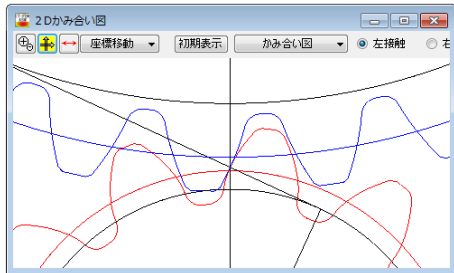
H.4.1 対称歯形歯車

対称歯形歯車 ($\alpha 20^\circ$) の歯車諸元とかみ合い歯形を図H.11および図H.12に示す。歯形修整については図H.13のようにピニオンに歯先修整とクラウンングを与え、ギヤには歯先修整のみ与えている。以下に、歯面応力、フラッシュ温度そして歯元応力を計算をした結果を示す。

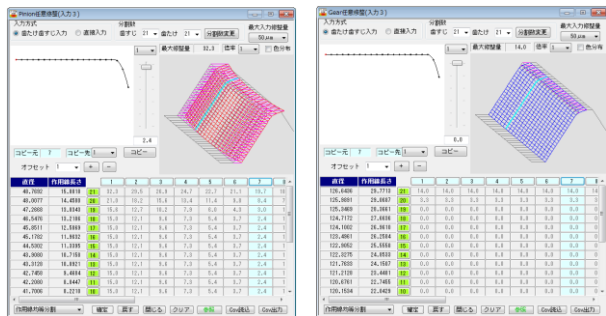


(a) 諸元 (b) 面取り設定

図H.11 歯車諸元



図H.12 かみ合い歯形



(a) ピニオン (b) ギヤ

図H.13 歯面修整

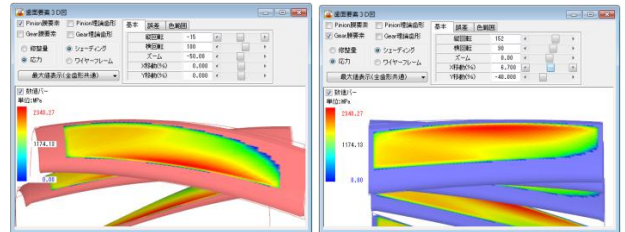


図H.14 歯面要素設定

解析条件は、図H.14のようにトルク300Nmとし、ピニオンに10 μm のピッチ誤差を与え、図H.15のように食い違い誤差0.02 $^\circ$ (平行度誤差0 $^\circ$)を与えている。歯面解析の結果を図H.16に、フラッシュ温度の設定と解析結果を図H.17およびH.18に示す。また、歯元曲げ応力(回転角 $\theta_p=23.52^\circ$)の解析結果を図H.19に、そして歯の変位(100倍)を図H.20に示す。



図H.15 歯面解析角度

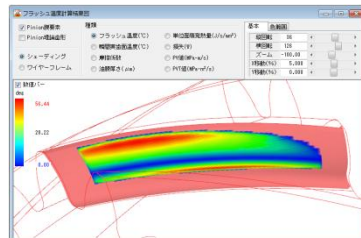


(a) ピニオン (b) ギヤ

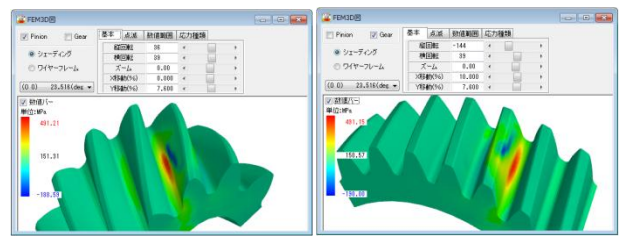
図H.16 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2348MPa$)



図H.17 フラッシュ温度計算の設定

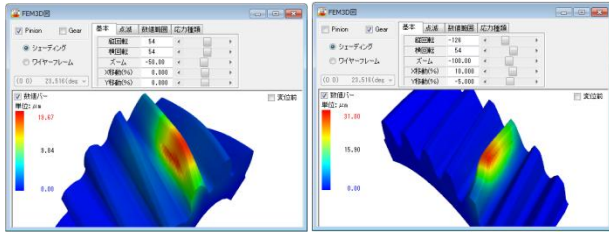


図H.18 フラッシュ温度 ($T_{fmax}=56.4^\circ C$)

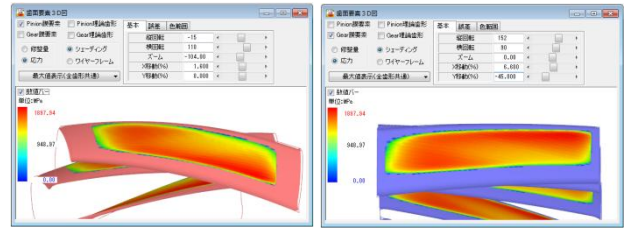


(a) ピニオン, $\sigma_{Imax}=491MPa$ (b) ギヤ, $\sigma_{Imax}=491MPa$

図H.19 歯元曲げ応力, $\theta_p=23.52^\circ$



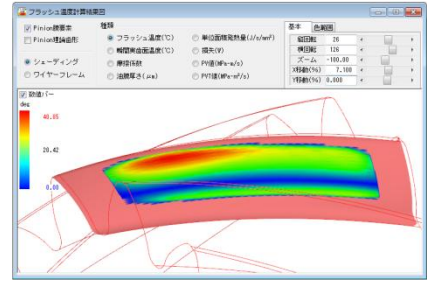
(a)ピニオン, $\delta_{\max}=19.7\mu\text{m}$ (b)ギヤ, $\delta_{\max}=31.8\mu\text{m}$
 図H.20 歯の変位 (100倍), $\theta_p=23.52^\circ$



(a)ピニオン (b)ギヤ
 図H.24 歯面応力 ($\sigma_{H\max}=1898\text{MPa}$)

H.4.2 非対称歯形歯車

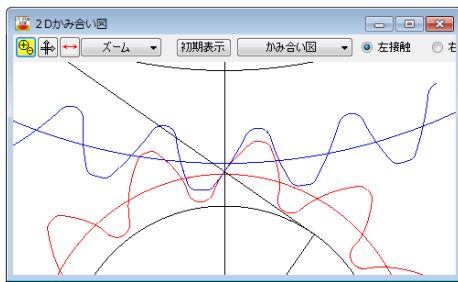
非対称歯形歯車の諸元を図H.21のように非対称圧力角(作用面 $\alpha_{nl}=30^\circ$, 反作用面 $\alpha_{nr}=17^\circ$)として与えたときの歯のかみ合いを図H.22に示す。図H.23は、歯面応力が最も小さくなる歯面修整をソフトウェア機能の「歯面+修整量解析」から求めたものである。この歯形で歯面応力解析をした結果を図H.24に、フラッシュ温度を図H.25に示す。なお、歯面要素設定およびフラッシュ温度計算の設定は、図H.14, 図H.17と同じである。また、歯元曲げ応力(ピニオン: 回転角 $\theta_p=-15.35^\circ$, ギヤ: $\theta_p=19.63^\circ$)の解析結果を図H.26に、そして歯の変位 (100倍) を図H.27に示す。



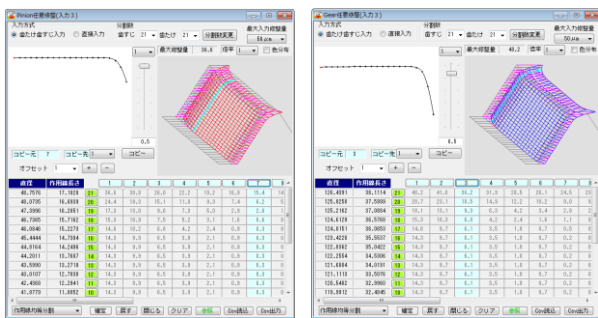
図H.25 フラッシュ温度 ($T_{f\max}=40.9^\circ\text{C}$)

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|-----------|------------|-----|------------|----------|
| モジュール | m | mm | 3.0000 | |
| 歯数 | z | | 12 | 35 |
| 圧力角(左) | α_l | deg | 30.0000 | |
| 圧力角(右) | α_r | deg | 17.0000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 30 | 0 |
| ねじれ方向 | | | 左ねじれ | 左ねじれ |
| 基準直径 | d | mm | 41.5682 | 121.2438 |
| 歯面修整量 | | | 修正係数 | 修正係数 |
| 歯面修整量 | xn | mm | 0.30000 | 0.00000 |
| オーバーピン径 | dp | mm | *** | *** |
| オーバーピン径 | dr | mm | *** | *** |
| 歯位置 | xa | mm | *** | *** |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 中心距離 | a | mm | 92.0000 | |
| 歯先円直径 | da | mm | 49.3692 | 127.2438 |
| 歯根円直径 | df | mm | 38.8692 | 119.2438 |
| 歯元R(刃先) 左 | RfL | mm | 1.1250 | 1.1250 |
| 歯元R(刃先) 右 | RfR | mm | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯幅 | b | mm | 30.0000 | 25.0000 |

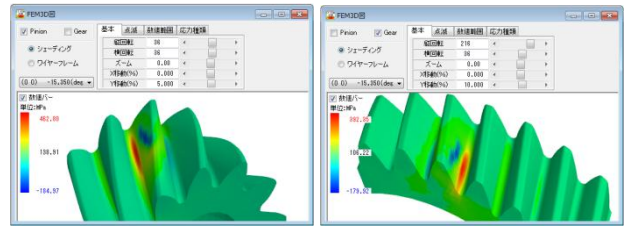
(a) 諸元 (b) 面取り設定
 図H.21 歯車諸元



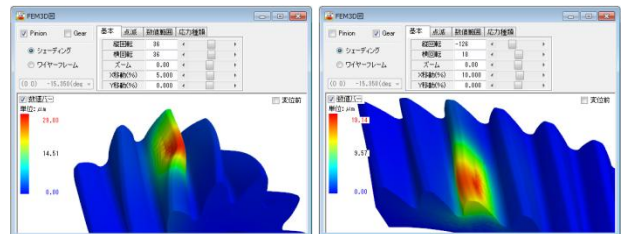
図H.22 かみ合い歯形



(a)ピニオン (b)ギヤ
 図H.23 歯面修整



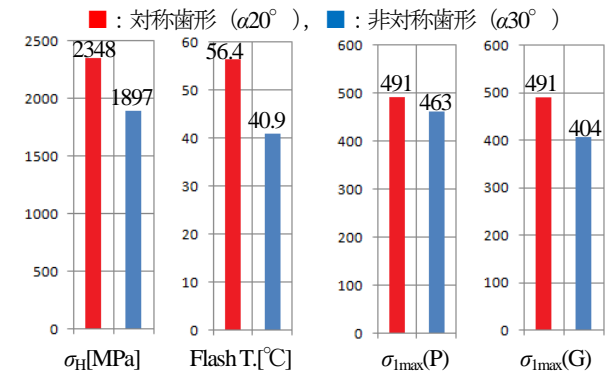
(a)ピニオン, $\sigma_{1\max}=463\text{MPa}$ (b)ギヤ, $\sigma_{1\max}=404\text{MPa}$
 図H.26 歯元曲げ応力



(a)ピニオン, $\delta_{\max}=29.0\mu\text{m}$ (b)ギヤ, $\delta_{\max}=19.10\mu\text{m}$
 図H.27 歯の変位 (100倍), $\theta_p=-15.35^\circ$

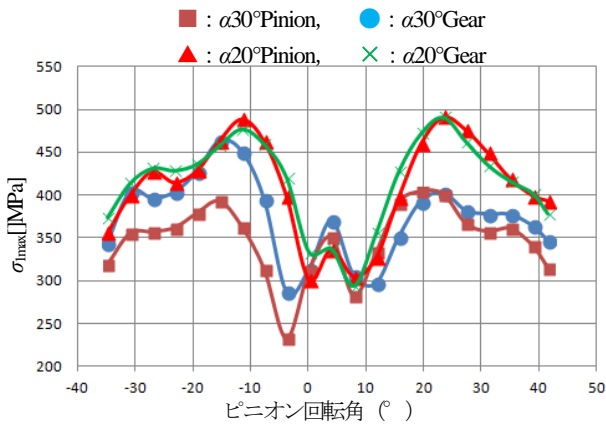
H.4.3 対称歯形歯車と非対称歯形歯車の比較

H.4.1項およびH.4.2項で計算した結果を図H.28に示す。これらと比較すると歯面応力, フラッシュ温度, そして歯元曲げ応力においても対称歯形より非対称歯形のほうが優位であることが解る。



図H.28 対称歯形と非対称歯形の比較

図H.29に、かみ合い角度範囲内(図H.15)での歯元曲げ応力(最大主応力の最大値: σ_{Imax})を示す。なお、回転角 $-10^\circ \sim +20^\circ$ 付近で応力が小さくなっているのは、図H.14でピッチ誤差(10 μm)を与えているためである。



図H.29 かみ合い角度範囲内の歯元応力 (σ_{Imax})

次に、寿命計算を図H.30に示すが、対称歯形($\alpha 20^\circ$)のピニオンの歯面寿命 $L(\alpha 20^\circ)=1.36 \times 10^6$ に対し非対称歯形($\alpha 30^\circ$)のピニオンの歯面寿命 $L(\alpha 30^\circ)=8.14 \times 10^8$ と大きく寿命が延びていることが解る。



(a) 対称歯形 ($\alpha 20^\circ$) (b) 対称歯形 ($\alpha 30^\circ$)
図H.30 寿命計算結果

H.5 まとめ

本例の非対称歯形($\alpha 30^\circ$)と、対称歯形($\alpha 20^\circ$)の歯面強さ、フラッシュ温度そして曲げ強さを比較すると

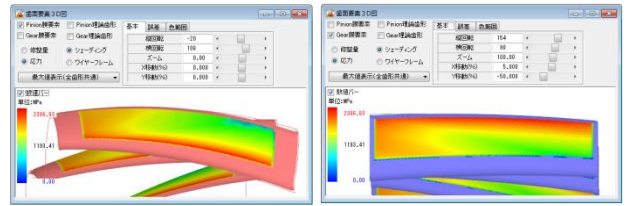
- (1) 歯面応力 : $\sigma_{Hmax}=1897/2348=1/1.24$
- (2) フラッシュ温度 : $Tf_{max}=56.4-40.9=15.5^\circ\text{C}$ 低下
- (3) ピニオン曲げ : $\sigma_{Imax}=463/491=1/1.07$
- (4) ギヤ曲げ : $\sigma_{Imax}=404/491=1/1.22$

のように非対称歯形のほうが優位であることが解る。ただし、対称歯形($\alpha 20^\circ$)の歯面修整は、単純なクラウニングと歯先修整を与えただけであり非対称歯形歯車の歯面修整とは大きく異なる。そのため、歯面応力やフラッシュ温度は歯面修整の効果も影響している。

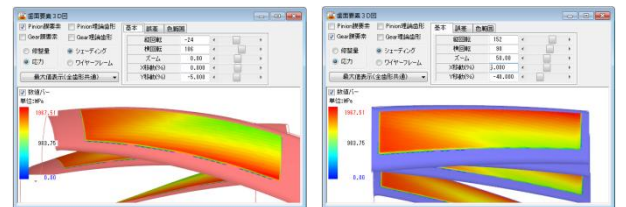
H.6 補足1(無修整歯形)

図H.11と図H.21の歯車で、歯面修整が無い歯車の歯面応力は、図H.31および図H.32のように対称歯形($\alpha 20^\circ$)のほうが1.2倍大きな応力が発生し、ピニオン歯元に大きな歯面応力が表れている。また、フラッシュ温度も図H.33のように対称歯形($\alpha 20^\circ$)のほうが 18°C 高い温度が発生し、その分布を見ると図H.33(a)ではピニオン

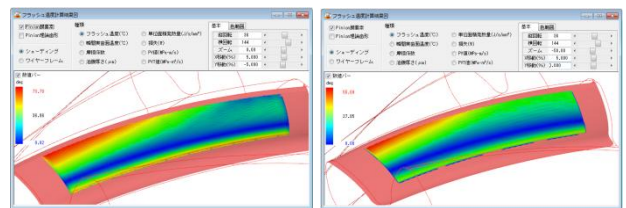
歯先に大きな発熱部があり、また、歯元では歯すじに沿って発熱していることが解る。これは、ピニオン歯元でトロコイド干渉が発生することを示唆している。



(a) ピニオン (b) ギヤ
図H.31 歯面応力 ($\alpha 20^\circ$, $\sigma_{Hmax}=2386\text{MPa}$)



(a) ピニオン (b) ギヤ
図H.32 歯面応力 ($\alpha 30^\circ$, $\sigma_{Hmax}=1968\text{MPa}$)



(a) $\alpha 20^\circ$, $Tf_{max}=73.7^\circ\text{C}$ (b) $\alpha 30^\circ$, $Tf_{max}=55.7^\circ\text{C}$
図H.33 フラッシュ温度

H.7 補足2(非対称歯形歯車の例)

非対称歯形歯車の例を図H.34に示す。この歯車対は、ロシアのAsymmetrical gears - some of the TV7-117S turboprop engine gearbox components and assembliesであり実際に稼働している歯車である。



図H.34 非対称歯形歯車の例⁹⁾

◆Webにも資料を掲載していますのでご覧ください。

参考資料

- 1) 久保愛三, 日本歯車工業会説明会資料(2012)
- 2) 松本将, 混合潤滑状態にある転がり-すべり接触面の摩擦係数推定式, トライボロジスト(日本トライボロジー学会誌), 56巻, 10号(2011-10) pp.632-638
- 3) AGMA2001-C95, Fundamental Rating Factors and Calculation Method for Involute Spur and Helical Gear Teeth, p.46
- 4) CT-FEM ASM, Gear design software, アムテック, (2014)
- 5) A.S. Novikov, V.V. Golovanov, D.V. Dorofeyev, "Design of Optimal Geometry, Stress, Stiffness, Vibration and Terminology of Asymmetrical and HCR Gears for Aircraft", IFToMM, pp.139, (2014)

[付録：I]

歯面解析例（損傷歯車）

I1. はじめに

歯車の歯面応力を解析するとき、近年、歯面修整が複雑化していることから歯面メッシュは、より細密化が必要とされる。そのためFEM-3D 詳細モデルで解析しようとするモデル作成、解析時間の問題から設計段階で使うには非現実的な解析法と言える。しかし、3D-FEM モデルと歯面膜要素⁽¹⁾を融合した解析法を採用することにより歯面修整を持つ歯車であっても短時間で容易に応力解析をすることが可能となる。

そこで、本編では歯形と歯幅方向をそれぞれ 17 断面の測定データで定義し、歯面粗さや潤滑油を考慮して歯面全域に渡っての摩擦係数や油膜厚さ、そしてフラッシュ温度などを計算した例を示す。更に、端部に着目した解析を行うことにより歯先端部やトロコイドかみ合い部のフラッシュ温度や端部を応力解析した例を示し、JGMA プロジェクトの A 歯車の実験による損傷写真と比較検証した。その結果、実際の歯面損傷状況に対応した結果が得られたので報告する。

I.2 歯車解析ソフトウェアの概要

歯車解析ソフトウェアの構成は 図 I.1 に示すように歯面応力、摩擦係数、フラッシュ温度、発熱量そして歯元曲げ応力などを解析することができる。歯のかみ合い時に作用する荷重は、図 I.2 のように歯の交差量⁽²⁾から決定している。

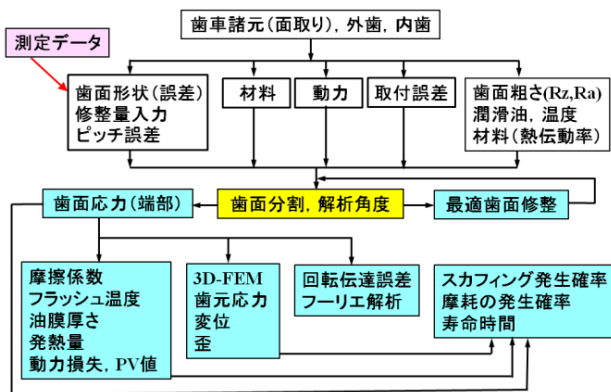


図 I.1 解析ソフトウェア (CT-FEM Opera) の構成

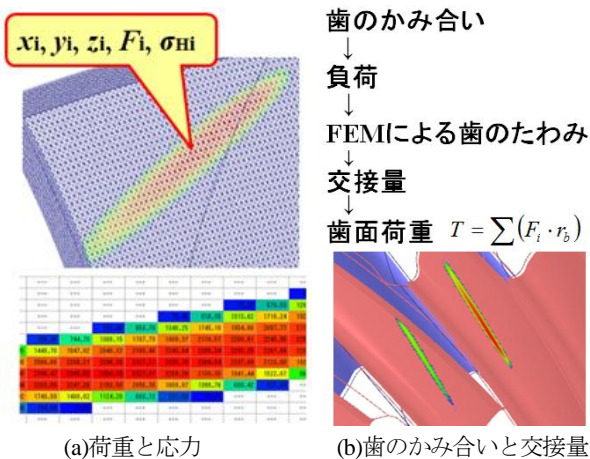


図 I.2 歯面荷重

歯面間の摩擦係数⁽³⁾は、式(I.1)~(I.3)に従って細分化した歯面位置で決定している。

$$f = f_L(1-\alpha) + f_s \cdot \alpha \tag{I.1}$$

$$\alpha = 0.5 \log D \tag{I.2}$$

$$D = (R_{z1} + R_{z2}) / h_0 \tag{I.3}$$

f_s : 境界潤滑部分の摩擦係数 (鉱油, $f_L=0.01$, $f_s=0.11$)

f : 摩擦係数 f_L : 流体潤滑負荷分担部分の摩擦係数

α : 接触域での境界潤滑部分の割合

D : 潤滑状態 ($1 < D$)

R_{z1}, R_{z2} : 歯面粗さの最大高さ

h_0 : 2 面間の弾性流体潤滑最小油膜厚さ (油温)

フラッシュ温度⁽⁴⁾の AGMA の基本式を式(I.5)~(I.7)に示すが、解析ソフトウェアで使用する際、摩擦係数は、式(I.7)を使うのではなく、式(I.1)で決定した f を細分化した歯面の位置に適用させる。また、材料の熱伝達係数 (λ_M) も使用する歯車材料で決定しなければならない。

$$t_f = K \cdot \mu_m \frac{X_\Gamma \cdot w_{Nr}}{B_M (b_H)^{0.5}} \left[(v_{r1})^{0.5} - (v_{r2})^{0.5} \right] \tag{I.5}$$

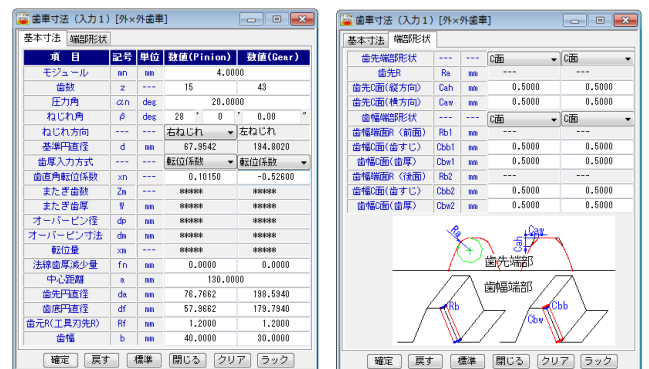
$$B_M = (\lambda_M \cdot \rho_M \cdot c_M)^{0.5} \tag{I.6}$$

$$\mu_m = 0.06 \frac{1.13}{1.13 - Ra} \tag{I.7}$$

K : flash temperature constant, μ_m : mean coefficient of friction
 X_Γ = load sharing factor, w_{Nr} ; normal unit load, v_{r1} ; rolling velocity of the pinion, v_{r2} ; rolling velocity of the gear, B_M ; thermal contact coefficient, b_H ; semi-width of Hertzian contact band, X_M ; thermal-elastic factor, λ_M ; heat conductivity, ρ_M ; density, c_M ; specific heat per unit mass

I.3 検討歯車諸元と歯面データ

検討する歯車⁽⁵⁾を図 I.3~図 I.7 に示す。歯面修整は、図 I.8 に示すように単純な歯形・歯すじ修整を持つ歯車である。



(a) 歯車諸元

(b) 面取り

図 I.3 歯車諸元と面取り

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 (Pinion) | 数値 (Gear) |
|-------------|-----|-----|-------------|-----------|
| 正面モジュール | mt | mm | 4.5303 | |
| 正面力角 | αt | deg | 22.4025 | |
| 薬指内径押し出し角 | β | deg | 26.1773 | |
| 薬指歯径 | dm | mm | 62.8256 | 180.1002 |
| 全歯径 | dh | mm | 3.4000 | 9.4000 |
| 歯切り歯径 | xmc | --- | 0.1015 | -0.5280 |
| 最小インボリュート歯径 | di | mm | 62.8425 | 184.2755 |
| 最大インボリュート歯径 | dH | mm | 75.7662 | 197.5940 |
| 歯面内径歯厚 | sn | mm | 6.5787 | 4.7516 |
| 歯面外径歯厚 | st | mm | 7.4509 | 5.3816 |
| またす歯厚 | zw | --- | 4 | |
| 基準またす歯厚 | v | mm | 42.8042 | 78.7486 |
| 設計またす歯厚 | v' | mm | 42.8042 | 78.7486 |
| オーバービジュ | dp | mm | 7.0338 | 6.6234 |
| 基準オーバービジュ | dv | mm | 78.2156 | 189.1173 |
| 設計オーバービジュ | dH' | mm | 78.2156 | 189.1173 |

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 (Pinion) | 数値 (Gear) |
|------------|-----|-----|-------------|-----------|
| 正面噛み合い力角 | αat | deg | 20.9799 | |
| 噛み合い押し出し角 | β | deg | 27.7503 | |
| 噛み合いピッチ円直径 | da | mm | 67.2414 | 182.7688 |
| 歯数比 | zh | --- | 2.8667 | 0.3488 |
| 有効歯幅 | br | mm | 98.0000 | |
| クリアランス | ck | mm | 1.7199 | 1.7199 |
| 正面噛み合い率 | cα | --- | 1.1769 | |
| 重なり噛み合い率 | cβ | --- | 1.1208 | |
| 全噛み合い率 | cγ | --- | 2.2976 | |
| すべり率 | σ1 | --- | -1.4815 | 0.5986 |
| すべり率 | σ2 | --- | 0.9955 | -1.4127 |
| 正面法線バックラッシ | Jt | mm | 0.2773 | |
| バックラッシ角 | Jβ | deg | 0.5058 | 0.1764 |
| 最大接触歯径 | dja | mm | 75.7662 | 197.5940 |
| 最小接触歯径 | djf | mm | 63.8492 | 186.3970 |

図 I.4 寸法

図 I.5 噛み合い寸法

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 |
|---------|----|-----|---------|
| 角度分割数 | N | --- | 60 |
| 開始回転角度 | θs | deg | -29.409 |
| 終了回転角度 | θe | deg | 34.638 |
| 食い違い角誤差 | φ1 | deg | 0.0200 |
| 平行度誤差 | φ2 | deg | -0.0060 |

図 I.12 解析角度

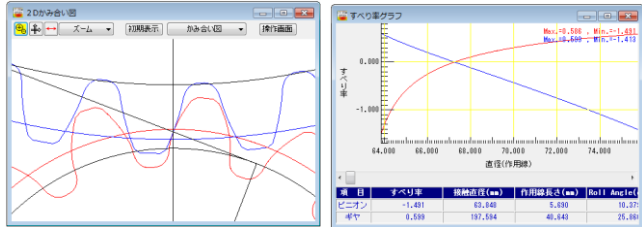


図 I.6 歯形

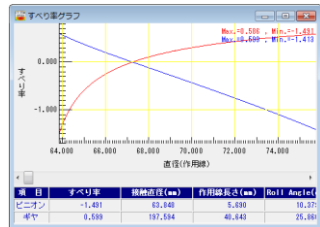


図 I.7 すべり率

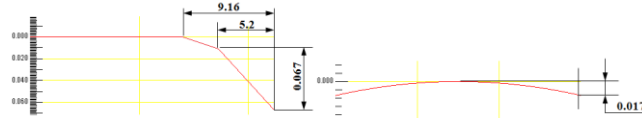


図 I.8 歯形・歯すじ修整 (設計値)

研削した歯形は、図 I.9 のように歯車測定機(大阪精密機械: CLP-35)で歯形方向(噛み合い最小径から歯先まで)、歯すじ方向それぞれ 17 本測定したデータである。ただし、ソフトウェア⁶⁾では噛み合い最小径からインボリュート開始径まで延長しているためデータ数は 23 となっている。この測定データをソフトウェアで読み込むと図 4.2.8d-10 のように表示することができる。ただし、ピニオンには歯面修整を与えず図 I.11 のようにピッチ誤差(17.9μm)のみ与えている。そして、図 I.11 でトルク、弾性率、ポアソン比を設定し、図 I.12 で軸の食い違い誤差(φ₁=0.02°)を与え歯面解析を行う。

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 97.77 | 94.9 | 91.3 | 88.6 | 85.9 | 84.7 | 41 | 62.7 | 62.2 | 62.4 | 63.3 | 64.9 | 66.1 | 60.4 |
| 2 | 47.8 | 44.5 | 41.4 | 38.7 | 36.5 | 34.9 | 32.8 | 32 | 32.2 | 32.3 | 32.9 | 34.8 | 36.1 | 30.4 |
| 3 | 89.3 | 85.1 | 81.8 | 79.2 | 76.8 | 75.4 | 29.5 | 29.7 | 29.7 | 29.7 | 30.7 | 32.5 | 34 | 28.6 |
| 4 | 27.5 | 26.2 | 25.2 | 25.5 | 25.9 | 26.1 | 14.6 | 13.9 | 14.4 | 15.1 | 15.9 | 16.8 | 17.8 | 12.9 |
| 5 | 22.3 | 19.4 | 16.4 | 13.9 | 11.7 | 10.2 | 8.9 | 8.5 | 9.5 | 9.7 | 11.3 | 13.1 | 15.1 | 9.4 |
| 6 | 20.7 | 17.7 | 14.7 | 12.2 | 10.2 | 8.7 | 7.4 | 7.1 | 7.9 | 8.1 | 9.7 | 11.5 | 13.4 | 8.2 |
| 7 | 17.4 | 14.4 | 11.4 | 9.4 | 7.9 | 6.7 | 5.7 | 5.4 | 5.9 | 6.1 | 7.1 | 8.3 | 9.6 | 6.1 |
| 8 | 15.7 | 12.7 | 9.7 | 7.7 | 6.4 | 5.4 | 4.5 | 4.2 | 4.5 | 4.7 | 5.4 | 6.3 | 7.3 | 4.7 |
| 9 | 15.1 | 12.1 | 9.1 | 7.1 | 5.8 | 4.8 | 3.9 | 3.6 | 3.9 | 4.1 | 4.8 | 5.6 | 6.4 | 4.1 |
| 10 | 15.2 | 12.2 | 9.2 | 7.2 | 5.9 | 4.9 | 4.0 | 3.7 | 4.0 | 4.2 | 4.9 | 5.6 | 6.3 | 4.2 |
| 11 | 15.6 | 12.6 | 9.6 | 7.6 | 6.3 | 5.3 | 4.4 | 4.1 | 4.4 | 4.6 | 5.3 | 6.0 | 6.7 | 4.5 |
| 12 | 15.7 | 12.7 | 9.7 | 7.7 | 6.4 | 5.4 | 4.5 | 4.2 | 4.5 | 4.7 | 5.4 | 6.1 | 6.8 | 4.6 |
| 13 | 15.6 | 12.6 | 9.6 | 7.6 | 6.3 | 5.3 | 4.4 | 4.1 | 4.4 | 4.6 | 5.3 | 6.0 | 6.7 | 4.5 |
| 14 | 16.1 | 13.1 | 10.1 | 8.1 | 6.8 | 5.8 | 4.9 | 4.6 | 4.9 | 5.1 | 5.8 | 6.5 | 7.2 | 4.9 |
| 15 | 17.5 | 14.5 | 11.5 | 9.5 | 8.2 | 7.2 | 6.3 | 6.0 | 6.3 | 6.5 | 7.2 | 7.9 | 8.6 | 5.6 |
| 16 | 16.8 | 13.8 | 10.8 | 8.8 | 7.5 | 6.5 | 5.6 | 5.3 | 5.6 | 5.8 | 6.5 | 7.2 | 7.9 | 5.3 |
| 17 | 17.3 | 14.3 | 11.3 | 9.3 | 8.0 | 7.0 | 6.1 | 5.8 | 6.1 | 6.3 | 7.0 | 7.7 | 8.4 | 5.8 |
| 18 | 17.5 | 14.5 | 11.5 | 9.5 | 8.2 | 7.2 | 6.3 | 6.0 | 6.3 | 6.5 | 7.2 | 7.9 | 8.6 | 5.9 |
| 19 | 17.7 | 14.7 | 11.7 | 9.7 | 8.4 | 7.4 | 6.5 | 6.2 | 6.5 | 6.7 | 7.4 | 8.1 | 8.8 | 6.1 |
| 20 | 17.9 | 14.9 | 11.9 | 9.9 | 8.6 | 7.6 | 6.7 | 6.4 | 6.7 | 6.9 | 7.6 | 8.3 | 9.0 | 6.3 |
| 21 | 17.3 | 14.3 | 11.3 | 9.3 | 8.0 | 7.0 | 6.1 | 5.8 | 6.1 | 6.3 | 7.0 | 7.7 | 8.4 | 5.8 |
| 22 | 17.2 | 14.2 | 11.2 | 9.2 | 7.9 | 6.9 | 6.0 | 5.7 | 6.0 | 6.2 | 6.9 | 7.6 | 8.3 | 5.7 |
| 23 | 17.1 | 14.1 | 11.1 | 9.1 | 7.8 | 6.8 | 5.9 | 5.6 | 5.9 | 6.1 | 6.8 | 7.5 | 8.2 | 5.6 |

図 I.9 歯形・歯すじ修整 (実測)

| 項目 | 値 (Pinion) | 値 (Gear) |
|-------------|------------|----------|
| 最小歯厚 (mm) | 0.0900 | 0.0900 |
| 歯車傾斜範囲 (mm) | | |

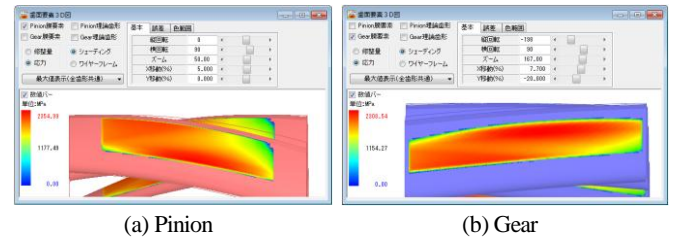
| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 (Pinion) | 数値 (Gear) | |
|-------------------|-----|-----|-------------|-----------|-----|
| 歯輪中心位置 | dm | mm | 6.0900 | 6.0900 | |
| トルク | T | Nm | 1400.0000 | 4019.3333 | |
| 正面法線力方向 | F | N | 44658.7 | | |
| ヤング率 | E | MPa | 205900.0 | 205900.0 | |
| ポアソン比 | ν | --- | 0.3000 | 0.3000 | |
| 歯元部分割数 | N#1 | --- | 40 | 40 | |
| インボリュート部分 | N#2 | --- | 40 | 40 | |
| 歯先・歯部分割数 | N#3 | --- | 10 | 10 | |
| 歯面方向分割数 | N#4 | --- | 80 | 80 | |
| ピッチ誤差 (μm) 正一接線誤差 | | | | | |
| Pinion | 0.0 | 0.0 | 17.9 | 0.0 | 0.0 |
| Gear | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

図 I.10 歯面データ(ギヤ)

図 I.11 設定

1.4 歯面応力の解析結果

図 I.12 に示すように最大接触角 (θ=64.107°) を 60 分割した角度で解析した結果、最大歯面応力は図 I.14 のように σ_{Hmax}=2355MPa である。

図 I.14 歯面応力, σ_{Hmax}=2355MPa

1.5 フラッシュ温度、摩擦係数、油膜厚さなど

図 I.17 でフラッシュ温度計算などに必要な項目を設定し、(a)フラッシュ温度、(b)摩擦係数、(c)油膜厚さ、そして(d)発熱量を計算した結果を図 I.18~I.21 に示す。

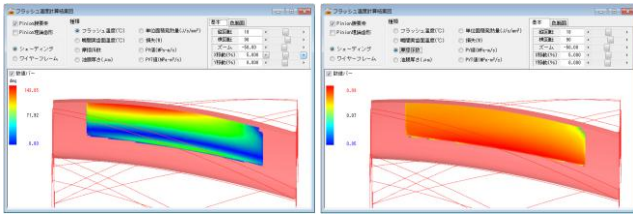
図 I.17(b)は、材料の熱伝導率を選択するための表であり、同じく(c)は、潤滑油の一覧表である。フラッシュ温度は、歯面粗さはもちろんのこと、材料の熱伝導率や潤滑油に大きく影響を受けるため正しく設定しなければならない。もし、検討している歯車(測定データ歯形)にピッチ誤差が無く、軸角誤差も無いとすれば、歯面応力は、図 I.20 のように最大ヘルツ応力は σ_{Hmax}=2113MPa に低下し、最大フラッシュ温度も T_{fmax}=112°C となり 32°C も低下することが解る。

材料選択

図 I.17 設定画面 (歯面粗さ、潤滑油)

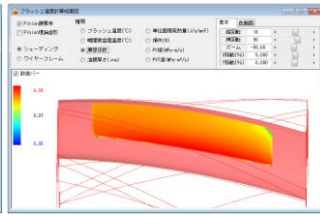
| ISO VG | AGMA Lube No. | Mean Squeezing Temperature °C | Standard Temperature Deviation °C | |
|--------|---------------|-------------------------------|-----------------------------------|----|
| 32 | -- | 351 | 177 | 53 |
| 46 | 1 | 372 | 189 | 56 |
| 68 | 2 | 395 | 202 | 59 |
| 100 | 3 | 418 | 214 | 63 |
| 150 | 4 | 441 | 227 | 66 |
| 220 | 5 | 464 | 240 | 70 |
| 320 | 6 | 486 | 252 | 73 |
| 460 | 7 | 507 | 264 | 76 |
| 680 | 8 | 530 | 277 | 80 |
| 1000 | 8A | 553 | 289 | 83 |
| 1500 | -- | 577 | 303 | 87 |

図 I.18 潤滑油⁷⁾



$T_{f\max}=144^{\circ}\text{C}$

図 I.19 フラッシュ温度



$\mu_{\max}=0.093$

図 I.20 摩擦係数

| 寿命計算 | | | | |
|----------------------|------------------|-------|----------|----------|
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| 歯面最大応力 | $\sigma_{H\max}$ | MPa | 2354.386 | 2346.954 |
| 最大歯げ応力(σ_1) | σ_1 | MPa | *** | *** |
| 回転速度 | n | 1/min | 1375.000 | 479.851 |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{Hlim} | MPa | 2100.000 | 2100.000 |
| 許容歯げ応力 | σ_{Flim} | MPa | *** | *** |
| 逆負荷の有無 | No | --- | 1 | --- |
| 硬化材料の有無 | --- | --- | 非硬化材料 | --- |
| 使用状態 | --- | --- | 一般 | --- |

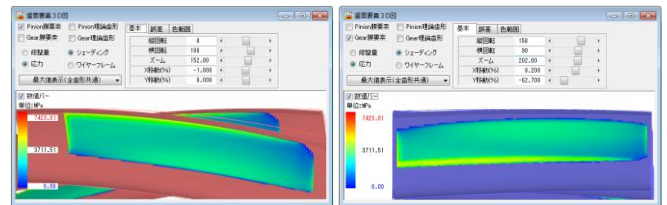
| 項目(歯面) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|-----|-----|----------|----------|
| 予想応力繰り返し係数 | ZN' | --- | 1.121 | 1.119 |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | 1.29E+08 | 1.37E+08 |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | 1.57E+01 | 4.73E+01 |

| 項目(歯げ) | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|-----|-----|--------|------|
| 予想応力繰り返し係数 | ZN' | --- | *** | *** |
| 予想寿命負荷回数 | Nc | --- | --- | --- |
| 予想寿命時間 | Lc | hrs | --- | --- |

図 I.21 寿命時間

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値(Pinion) | 数値(Gear) |
|-----------|-----------------|-----|----------------------|---------------------|
| 最小歯半(m) | | | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯半径差(mm) | | | 1.0000 | 1.0000 |
| 歯幅中央位置 | b _m | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| トルク | T | Nm | 1400.0000 | 4013.3333 |
| 正面法線方向力 | F | N | 44667.8 | |
| ヤング率 | E | MPa | 205800.0 | 205800.0 |
| ボアソン比 | ν | --- | 0.3000 | 0.3000 |
| 歯元部分割数 | N _{H1} | --- | 40 | 40 |
| インボリュート部分 | N _{H2} | --- | 40 | 40 |
| 歯先・歯部分割数 | N _{H3} | --- | 10 | 10 |
| 歯幅方向分割数 | N _b | --- | 80 | 80 |
| ピッチ誤差(μm) | 正→ 逆← | | 0.0 0.0 17.8 0.0 0.0 | 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 |

図 I.25 端部解析 (設定)



(a) Pinion

(b) Gear

図 I.26 歯面応力 (端部解析), $\sigma_{H\max}=7423\text{MPa}$

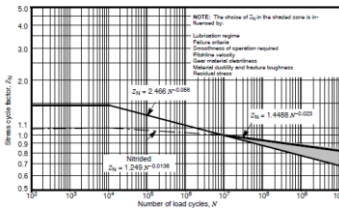


図 I.22 Pitting resistance stress cycle factor, $Z_N^{(8)}$

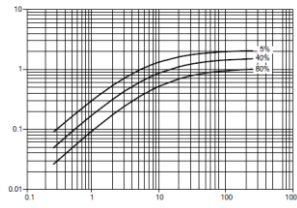


図 I.23 Probability of wear distress⁽⁹⁾, (%)

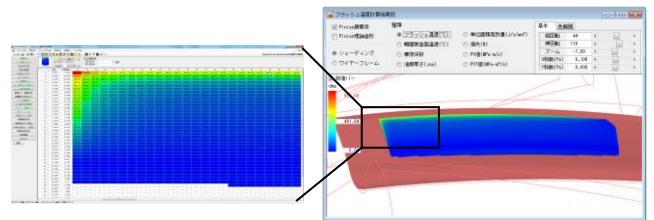


図 I.27 フラッシュ温度 (端部解析), $T_{f\max}=984^{\circ}\text{C}$

| 損傷確率&効率 | | | | |
|------------|----------|----|--------|-------|
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
| スカッピング発生確率 | η_s | % | | 36.11 |
| 摩擦の発生確率 | η_f | % | | 23.58 |
| 動力損失 | η_e | % | | 1.39 |

図 I.24 損傷発生確率

$$K_\alpha = \frac{T_{f\max} - M_{TC}}{S_D} \quad (1.8)$$

$T_{f\max}$: Flash temperature

M_{TC} : Mean scuffing temperature

S_D : Standard temperature deviation

I.8 歯面応力 (端部解析)

図 I.14 に示した歯面応力分布は、図 I.11 で設定したかみ合い歯面の応力解析であるため、歯先や側端部の応力解析はしていない。そのため、ここでは端部接触部分の応力や発生するフラッシュ温度について解析する。

図 I.25 の端部解析の設定において歯先および側端部の接触半径を 1mm と仮定して解析すると歯面応力 (端部) の最大接触応力は、図 I.26 のように $\sigma_{H\max}=7423\text{MPa}$ となる。また、フラッシュ温度は、図 I.27 のようにピニオンかみ合い終わり側の歯先部で $T_{f\max}=984^{\circ}\text{C}$ の高温となる。

I.9 解析と実験の比較

実験によるピニオン歯面の損傷写真 (図 I.28~I.30) と図 I.31 の解析結果を比較すると図 I.29 ギヤの歯面応力分布は歯元付近で大きく、また、損傷写真のかみ合い終わり側の歯先部の歯面の一部が溶けたような損傷は、図 I.27 のフラッシュ温度での歯先端部の $T_{f\max}=984^{\circ}\text{C}$ の温度分布と良く一致しているといえる。

次に、図 I.30 のギヤの損傷拡大写真と図 I.31 の解析結果を比較すると、かみ合い終わり側の歯元損傷位置とトロコイド損傷位置の実験結果と解析結果は良く一致している。また、図 I.30 の拡大写真では、歯元の一部で溶融している跡が見られるが、この損傷場所と図 I.31 の応力分布とは良く一致している。

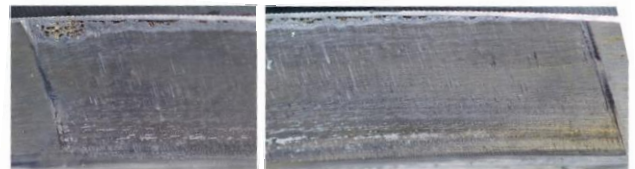


図 I.28 歯面損傷写真⁽¹⁰⁾ ($N_p=1 \times 10^6$, ピニオン歯面, 歯-14)



図 I.29 ギヤ歯面損傷⁽¹⁰⁾

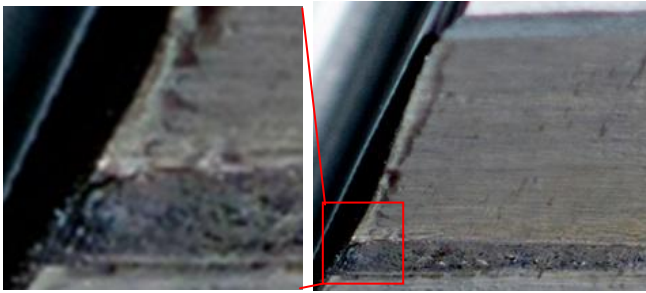
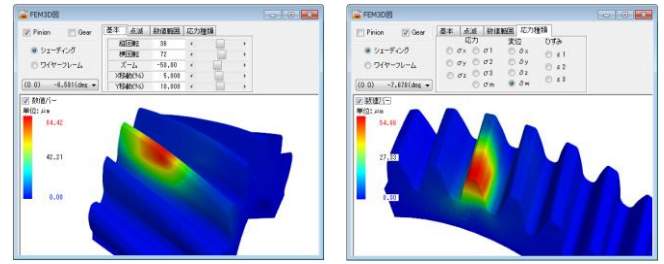


図 I.30 ギヤ歯面損傷端部拡大写真, 歯 14, $N_p=1.0 \times 10^6$



(a)ピニオン, $\delta_{\text{max}}=84.4\mu\text{m}$ (b)ギヤ, $\delta_{\text{max}}=54.7\mu\text{m}$

図 I.35 歯形変位 ($\theta_p=-7.68^\circ$)

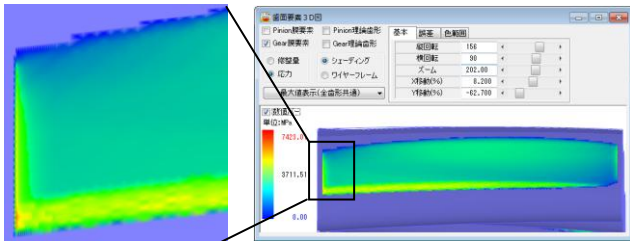


図 I.31 解析結果 (ギヤ), 端部解析, $\sigma_{\text{Hmax}}=7423\text{MPa}$

I.10 歯元応力解析

図 I.12 の解析角度 ($\theta=-29.41^\circ \sim 34.70^\circ$) の範囲で歯元応力 (最大主応力最大値 σ_{imax}) と歯形変位を図 I.32 および図 I.33 に示す。また, 最大値を示す $\theta_p=-7.68^\circ$ での歯元応力と変位を図 I.34 および図 I.35 に示す。

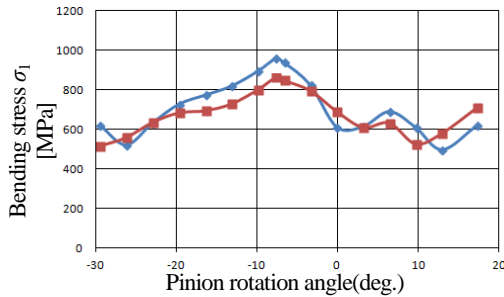


図 I.32 歯元曲げ応力 σ_{imax} (MPa)

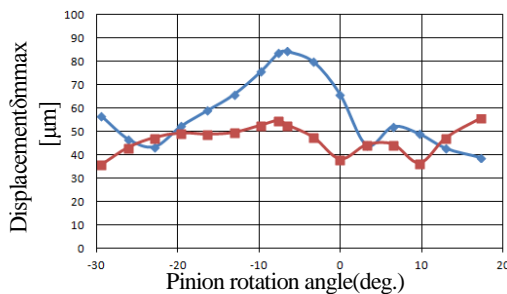
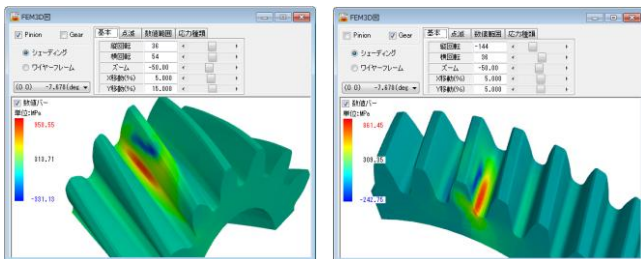


図 I.33 歯形変位 δ_{max} (μm)



(a)ピニオン, $\sigma_{\text{imax}}=959\text{MPa}$ (b)ギヤ, $\sigma_{\text{imax}}=861\text{MPa}$

図 I.34 歯元応力 ($\theta_p=-7.68^\circ$)

I.11 まとめ

- (1) 歯面応力分布と損傷写真そして寿命時間は良く一致したと言える。また, 測定データを使用することにより僅かな応力分布の違いも把握できた。
- (2) 強度計算式では, 歯形形状や軸誤差には対応できないため, 係数で処理しているのが実情である。従って, 歯車の真の実力を知るためには既に一般化した道具である解析ソフトウェアが有効である。

本稿は, 日本機械学会 RC261 に投稿した内容を編集したものであり, 検討した歯車は, 日本歯車工業会が実施したプロジェクトで実験したものである (掲載承認済)。

参考文献

- (1) Moriwaki, Finite element analysis of gear tooth stress with tooth flank film elements, VDI-2005 International Conference on Gears, (2005) p.39-53
- (2) 久保・梅沢, 誤差を持つ円筒歯車の荷重伝達特性に関する研究 (機論 43 巻 371 号, (1977), pp.2771-2783)
- (3) 松本将, 混合潤滑状態にある転がり-すべり接触面の摩擦係数推定式, トライボロジスト (日本トライボロジー学会誌), 56 巻, 10 号 (2011-10), pp.632-638
- (4) AGMA2001-C95, Fundamental Rating Factors Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, (1995), pp.46 - 47
- (5) 上田, RC261, 第 6 回分科会, WG2 関連報告, 歯車測定データを用いた応力解析 (測定技術の進歩が解析技術をこう変える)
- (6) CT-FEM Opera, 歯車応力解析ソフトウェア, アムテック, (2014)
- (7) AGMA2001-C95, Fundamental Rating Factors Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, TableA-3, Mineral Oil Mean Scuffing Temperature, (1995), p.50
- (8) AGMA2001-C95, Fundamental Rating Factors Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, (1995), p.37
- (9) AGMA2001-C95, Fundamental Rating Factors Calculation Methods for Involute Spur and Helical Gear Teeth, (1995), p.53
- (10) 久保, JGMA-ProjectX 報告, (2012)

カタログ(vol.18), [45] CT-FEM Operaiii をご覧ください。

[付録 : J]

伝達誤差解析例

J.1 実験装置

黒河, 有浦の研究「歯車の負荷時高精度かみ合い誤差測定に関する研究」⁽¹⁾の成果と CT-FEM Opera の解析結果を比較した。

実験装置は, 図 J.1 に示す動力循環式歯車運転試験機であり, 伝達誤差計測用のエンコーダは分解能 1 秒を有している。

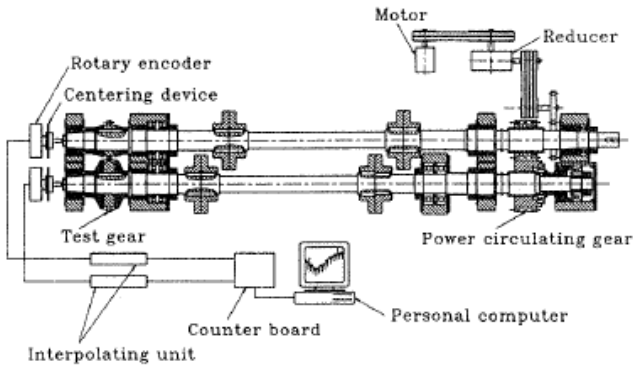


図 J.1 実験装置

J.2 実験結果と伝達誤差解析結果の比較

実験に供した歯車は図 J.2 の諸元を持つ歯車であり歯車精度は, JIS B 1702(1998)0 級の歯研削歯車である。伝達誤差は, 単位歯幅当たりの荷重を 8~784 (N/mm)として7種類の荷重を与え, そのときの伝達誤差を計測している。図 J.3 は 147(N/mm)の例を示している。

図 J.2 歯車諸元

図 J.3 トルク設定

CT-FEM Opera ソフトウェアで解析する際, 図 J.1 の試料歯車を支持する軸受間距離が 240mm あることから荷重が作用する際, 軸変位が発生することを想定し解析した。トルクと軸変位, そして伝達誤差の実験値と解析結果を表 J.1 および図 J.4 に示す。

図 J.4 の荷重 200(N/mm)より大きい領域では歯実験と解析は良く一致している。しかし, これより小さい領域では実験と解析結

表 J.1 伝達誤差解析結果

| No. | 単位荷重(N/mm) | トルク(Nm) | 実験値(sec) | 軸変位(sec) | 解析結果(sec) |
|-----|------------|---------|----------|----------|-----------|
| <1> | 8 | 18.7 | 4.0 | 7.42 | 0.76 |
| <2> | 98 | 229.5 | 4.7 | 8.06 | 5.94 |
| <3> | 147 | 344 | 5.6 | 12.1 | 6.62 |
| <4> | 196 | 459 | 7.9 | 16.1 | 7.13 |
| <5> | 392 | 918 | 8.8 | 32.1 | 9.11 |
| <6> | 637 | 1492 | 11.2 | 52.2 | 11.7 |
| <7> | 784 | 1836 | 13.0 | 64.1 | 13.2 |

果は一致していない。この理由は, 実験の荷重が 8(N/mm)において TE=4(sec) である理由は, 歯形誤差や歯面粗さが表れていると考えられる。

図 J.5 に実験結果と解析結果の伝達誤差を重ね合わせた図を示すが, 両者は良く一致した結果となっている。図中に示す赤色の縦線は, 実験の目盛 20sec に合わせている。

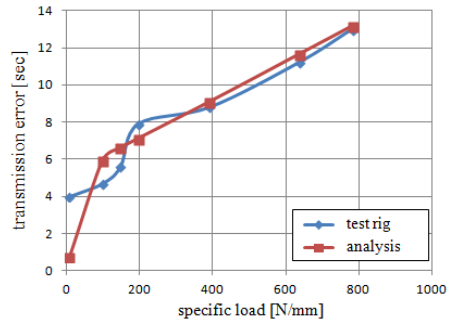


図 J.4 伝達誤差最大値 (実験と解析)

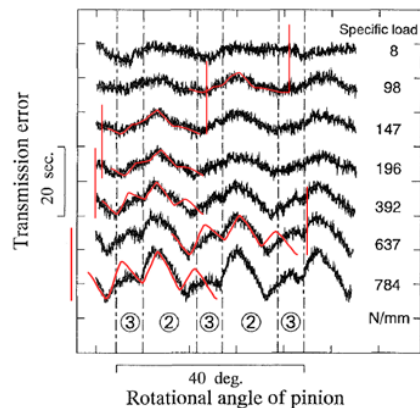


Fig.9 Transmission errors under several loads
図 J.5 伝達誤差 (実験と解析)

J.3 歯面形状と歯面粗さを考慮した伝達誤差

J.3.1 平歯車 (無修整)

実験に供した歯車諸元を図 J.6 に歯面形状を図 J.7 に示す。伝達誤差は, 単位歯幅当たりの荷重を 22~392 (N/mm)として7種類の荷重を与えている。伝達誤差解析をする際は, 歯面形状を図 J.8 のように与えた。実験と解析による伝達誤差結果を図 J.9 に示すが, 両者は良く一致している。

図 J.6 歯車諸元

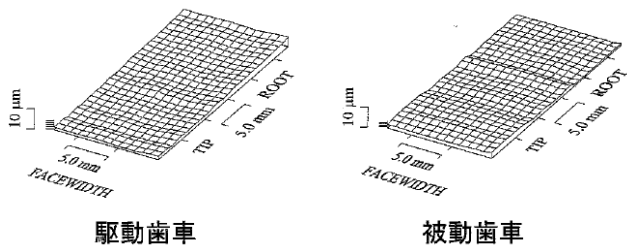
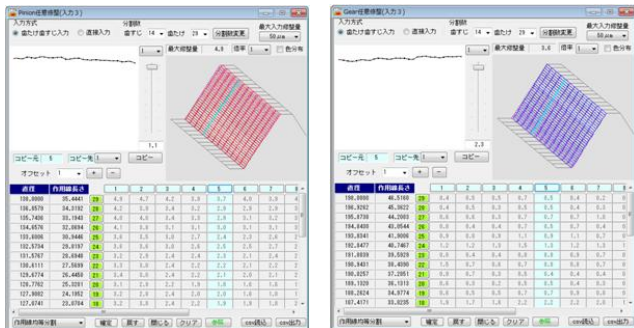


図 J.7 歯面形状



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 J.8 歯形誤差 (Excel データ読み込み)

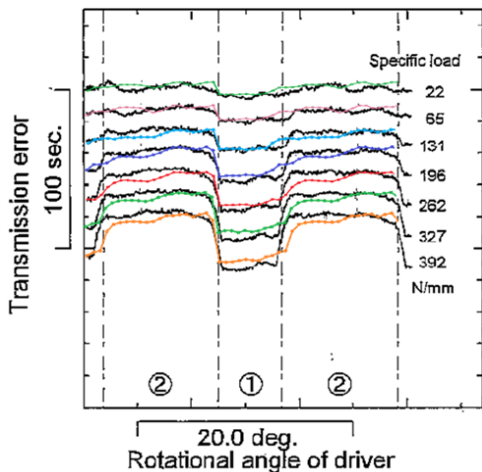


図 J.9 伝達誤差 (実験と解析)

J.3.2 平歯車 (歯先修整)

歯車諸元は、図 J.6 と同じであり、伝達誤差は、単位歯幅当たりの荷重を 22~654 (N/mm)として 11 種類の負荷を与えている。伝達誤差解析をする際は、歯面形状を図 J.10 のように与えた。実験と解析による伝達誤差結果を図 J.12 に示すが、両者は良く一致している。

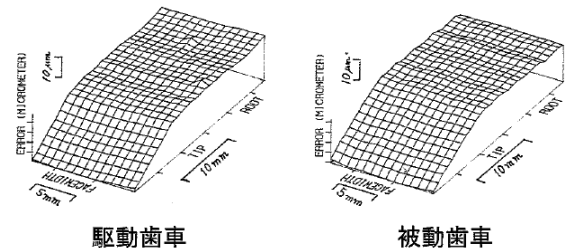
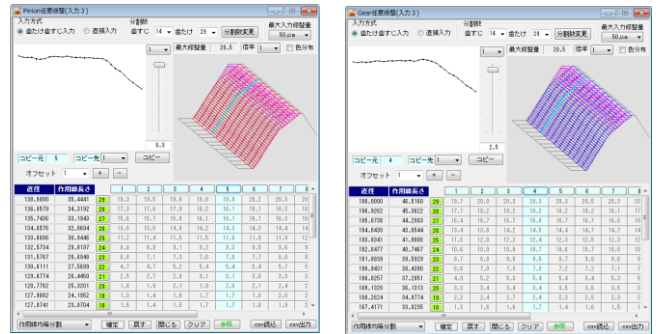


図 J.10 修整歯形



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 J.11 歯形誤差 (Excel データ読み込み)

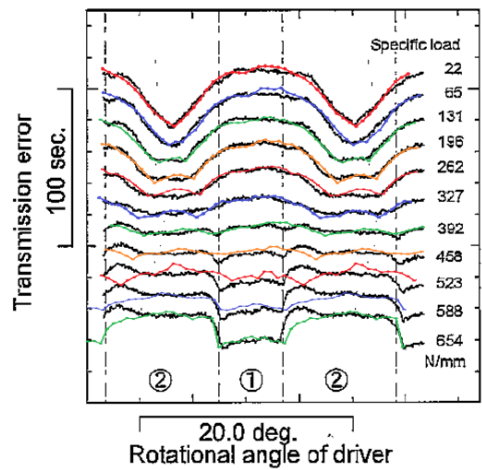


図 J.12 伝達誤差 (実験と解析)

J.3.3 はすば歯車 (無修整)

歯車諸元は、図 J.2 と同じであり、伝達誤差は、単位歯幅当たりの荷重を 8~650 (N/mm)として 16 種類の負荷を与えている。伝達誤差解析時の歯面形状を図 J.14 のように与えた。実験と解析による伝達誤差結果を図 J.15 に示すが、両者は良く一致している。また、図 J.16 に拡大波形を示すが、実験と解析結果は良く一致し

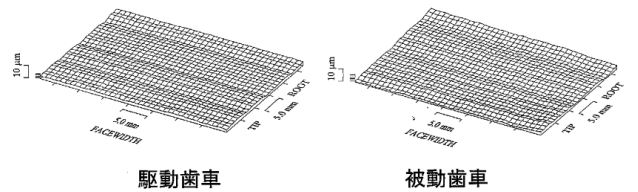
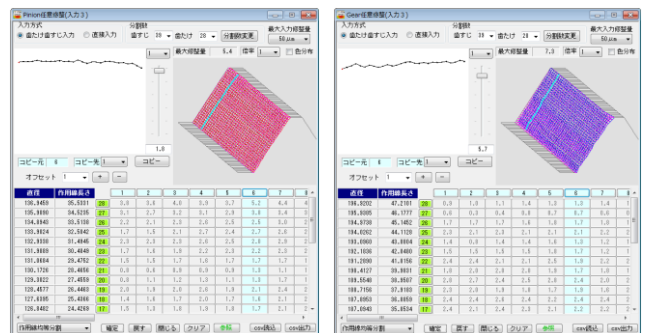


図 J.13 歯面形状



(a)ピニオン (b)ギヤ
図 J.14 歯形誤差 (Excel データ読み込み)

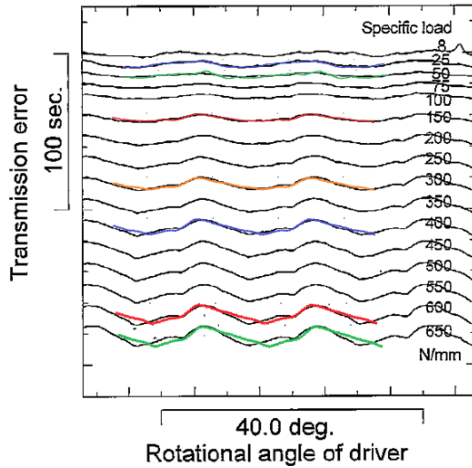


図 J.15 伝達誤差 (実験と解析)

ている。ただし、負荷による影響を考慮し表 J.2 のように食い違い誤差を与えている。

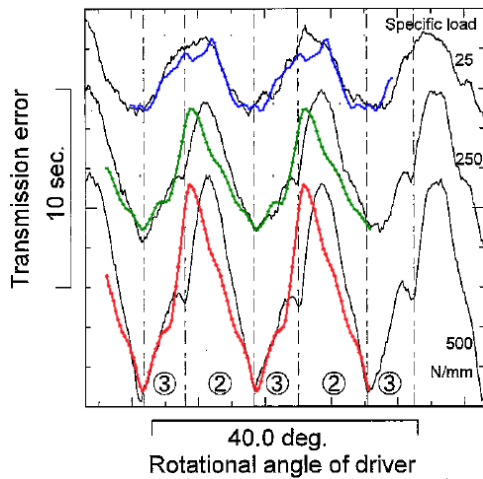


図 J.16 伝達誤差 (実験と解析)

表 J.2 伝達誤差解析結果

| N/mm | TE _{max} | | 食い違い φ ₁ (deg) |
|------|-------------------|-------|------------------------------|
| | 実験値(s) | 解析(s) | |
| 25 | 3.92 | 3.31 | 0.001 |
| 250 | 7.06 | 6.23 | 0.003 |
| 500 | 10.7 | 10.4 | 0.005 |

J.4 まとめ

- (1) 伝達誤差の実験と解析結果は、良く一致した。
- (2) ソフトウェア解析により、ほぼ確かな伝達誤差を予測することができた。

参考文献

- (1) 黒河, 有浦, 歯車の負荷時高精度かみ合い誤差測定に関する研究, 機論 C, 1998-7, pp.408-415
- (2) CT-FEM Opera, 歯車応力解析ソフトウェア, アムテック, (2014)

[付録: K] 動力損失解析例

K.1 概要

歯車の基礎と設計 (成瀬著)⁽¹⁾に掲載されている平歯車のかみ合い損失率と平均滑り速度との関係の実験を基に, CT-FEM Opera⁽²⁾で解析した。その結果を以下に示す。

| 項目 | 記号 | 単位 | 数値 (Pinion) | 数値 (Gear) |
|-----------|----|-----|-------------|-----------|
| モジュール | m | mm | 2.7500 | |
| 歯数 | z | | 33 | 33 |
| 圧力角 | αn | deg | 20.0000 | |
| ねじれ角 | β | deg | 0 | 0 |
| ねじれ方向 | | | 0 | 0 |
| 基礎円直径 | d | mm | 80.7500 | 80.7500 |
| 歯厚入り方式 | | | 転位係数 | 転位係数 |
| 歯厚入り係数 | xn | | 0.14100 | 0.14100 |
| またぎ歯数 | Za | | ***** | ***** |
| またぎ歯厚 | F | mm | ***** | ***** |
| オーバーピン径 | dp | mm | ***** | ***** |
| オーバーピン寸法 | da | mm | ***** | ***** |
| 転位量 | xm | | ***** | ***** |
| 法線歯厚減少量 | fn | mm | 0.0000 | 0.0000 |
| 中心距離 | a | mm | 81.5026 | |
| 歯先円直径 | da | mm | 97.0255 | 97.0255 |
| 歯底円直径 | df | mm | 84.6505 | 84.6505 |
| 歯元径(工具先径) | Rf | mm | 1.0313 | 1.0313 |
| 歯幅 | b | mm | 20.0000 | 20.0000 |

図 K.1 歯車諸元

| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear |
|------------|------------------|--------------------|------------|----------|
| 最大歯面力 | σ _{Hex} | MPa | 559,425 | |
| トルク | T | Nm | 300.00 | 300.00 |
| 動力 | P | kW | 65.245 | |
| 回転速度 | n | 1/min | 2000.000 | 2000.000 |
| 滑速 | v | m/s | 9.365 | |
| 歯面粗さ(最大高さ) | Rz | μm | 1.000 | 1.000 |
| 歯面粗さ(平均) | Ra | μm | 0.200 | 0.200 |
| 材料名 | | | Cr鋼(1Cr) | Cr鋼(1Cr) |
| 比重 | ρ | g/cm ³ | 7.870 | 7.870 |
| 比熱 | CM | J/(g°C) | 481.000 | 481.000 |
| 熱伝導率 | λ | W/mK | 60.000 | 60.000 |
| 歯面温度 | σTc | °C | 70.000 | |
| 油温度 | OTc | °C | 70.000 | |
| 油の種類 | | | 鉱物油(その他) | |
| ISOグレード | | | ISO VG 220 | |
| 粘度(40°C) | | mm ² /s | 220.000 | |
| 油の平均温度 | Mfc | °C | 240.000 | |
| 油の標準偏差温度 | SD | °C | 39.000 | |
| 絶対粘度 | μ | cP | 37.30 | |
| 粘弾性 | α | 1/MPa | 0.0246 | |

図 K.2 設定

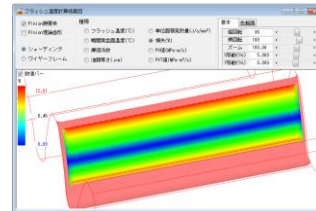


図 K.3 動力損失

図 K.4 損傷確率, 動力損失

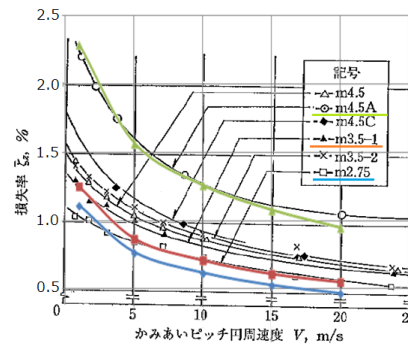


図 10.9 平歯車における平均摩擦係数と かみあいピッチ円周速度 V との関係 (試験歯車の諸元は表 10.3 参照)

| m | mm | 2.75 | 3.5 | 4.5 |
|----|-----|-------|--------|--------|
| z1 | --- | 33 | 26 | 16 |
| z2 | --- | 33 | 26 | 24 |
| α | deg | 20 | | |
| β | deg | 0 | | |
| x1 | --- | 0.141 | 0.0073 | 0.8635 |
| x2 | --- | 0.141 | 0.0073 | -0.500 |
| b | mm | 20 | | |
| a | mm | 91.5 | | |

図 K.6 実験と解析

K.2 まとめ

- (1) 図 K.6 のように実験結果と解析結果は良く一致している。
- (2) ソフトウェア解析により、ほぼ確かな動力損失を予測することができた。

参考文献

- (1) 成瀬, 「歯車の基礎と設計」, 養賢堂, 2001. P.132-133
- (2) CT-FEM Opera, 歯車応力解析ソフトウェア, アムテック, (2014)

カタログ(vol.18), [45] CT-FEM Operaiii をご覧ください。

[付録] 歯車に関する主要史実年表

| 西 暦 | 外 国 史 実 | | 和 暦 | 日本国内史実 |
|----------------------|----------------|--|--------------------------------------|--|
| 384～322 BC [古 代] | ギリシャ | アリストテレスが著書の中に歯車について記載した(世界最古の歯車の記事) | | |
| 287～212 BC | 中 国 | 古代中国で動力用歯車が使用されていたらしい | | |
| | ギリシャ | アルキメデスがウォームギヤと平歯車を組み合わせて巻上機を製作した | | |
| 400～200 BC 頃 | 中 国 | 中国山西黄河の沿岸から青銅製の歯車出土, 測量器や天体観測に使用 | | |
| 100 BC 頃 | エジプト アラブ | ヘロンが歯車について論文発表, 照準儀にウォーム歯車使用 | | |
| 46 BC 頃 | ローマ | ヴェイトルヴィウスが動力伝達用として使用する最初の歯車付水車を発表 | | |
| 50～200 [中 世] | ローマ | ローマ時代の遺跡から鉄製歯車出土, 現存する最も古い動力伝達用歯車 | | |
| 850 頃 | イタリア | 法王シルベスタ2世が歯車時計を発明したといわれる | [大和時代] 610 | 推古天皇時代に僧「曇徴」が水車を作った(日本書記) |
| 1000～1100 | イスラム | 天体観測器に歯車を使用 | 670 | 天智天皇時代に水車を利用して製鉄を行った(日本書記) |
| 1100～1200 | 中 国 | 宋代の渾儀, 指南車, 記里鼓車に歯車が使用された | | |
| 1200 年代 | スウェーデン | 古城から石製はすば歯車出土した | [平安時代] | |
| 1370 [15 世紀] | 西 欧 | ヨーロッパの各地で機械時計が製作され歯車を使用された | [鎌倉室町] | |
| 1430 頃 | フランス | パリの宮廷にピックが製作した機械時計が設置され現存している | | |
| 1484 | 西 欧 | 馬力利用の歯車装置付製粉機や箱形風車の歯車増速装置等の記録が残っている | | |
| 1452～1519 [16 世紀] | ドイツ | ワルテラスが天体観測に機械時計を利用(科学上の研究に機械時計を用いた最初の記録) | | |
| 1556 | イタリア | レオナルド・ダ・ヴィンチが各種の歯車装置を考案し機械要素としての歯車が確立した | [安土桃山] 天文 12(1549) 天文 20(1551) | 鉄砲が伝来し西欧との関係が始まった フランシスコ・ザビエルが周防国大内義隆に機械時計を献上した(日本に伝来した最初の歯車機構) |
| 1500 年代 | ドイツ | アグリコラが採鋳冶金に関する著書を出版, その中で多数の歯車装置について詳細説明をした | 天正 9(1591) | ローマ法皇へ派遣した使節が帰朝し宣教師フリヤニが秀吉に時計を献上した |
| 1637 | 西 欧 | 西欧各地に塔時計が普及した | [徳川時代] 慶長 11(1606) | 宣教師が家康に時計を献上した |
| | | | 慶長 17(1612) | メキシコ総督がスペイン製の置時計を献上, 静岡県久能山東照宮に現存, 日本に現存する最古の歯車 |
| 1655 | 中 国 (崇禎 10) | 明の学者宋応星が天工開物を出版, その中で歯車装置について説明 | 1600 年代初期 | 津田助左衛門が時計を製作, 日本最古の歯車製作記録 |
| 1600 年代後半 | ドイツ | シュテファンファルフレルが手動歯車装置付3輪車, 4輪車を製作 | | |
| 1674 | デンマーク | B. パスカルと G.W. ライブニッツが歯車式計算機械を考案した レーマーが歯車の等角速度運動を論じエピサイクロイド歯形を推奨した(歯形の理論的研究に関する最初の文献) | [徳川時代] 元禄 3(1690) | 人倫訓蒙図彙に時計の歯車を製作中の図がある. 歯車製作を示す日本最初の文献 |

| 西 暦 | 外 国 史 実 | | 和 暦 | 日本国内史実 |
|----------------|---------|---|--------------------------|---|
| 1694 [18世紀] | フランス | ライールがエピサイクロイド曲線を論じインボリュート曲線についても述べた | | |
| 1700年代初期 | スウェーデン | C.ポルハムが時計歯車歯切機械を製作(ストックホルム博物館に現存) | 正保 1(1704) | 徳川家光に懐中時計が献上された |
| 1724 | ドイツ | J.レオポルドが著書に各種の歯形と歯の寸法について記載 | 享保 11(1726) | 古今図書集成にオランダ風車(歯車装置付)の図がある |
| 1732 | フランス | J.ヴォサンソンが歯切用カッタを製作した. 現存最古の歯切工具 | | |
| 1733 | | M.カミュが歯車歯形について論文発表しエピサイクロイド歯形のかみ合いを詳しく述べた | | |
| 1740 | イギリス | ヒンドレー(時計製造業者)が鼓形ウォームを考案 | | |
| 1765 | スイス | L.オイラーが歯形の解析に関する論文を発表しインボリュート歯形を論じた | | |
| 1769 | イギリス | スメルトンが減速歯車付シリンダー中ぐり盤を製作した. またグラスゴウのキャロン鉄工所で鋳出歯車を製作した | 安永 4(1775) | 若井源大衛門が歯車を利用して盃運人形を製作した(現存) |
| 1781 | | J.ワットが蒸気機関の遊星歯車機構について英特許を取得した | | |
| 1785頃 | イギリス | J.ワットとJ.レニーが初めて歯車の曲げ強度計算を行なった | 寛政 8(1796) | 土佐・細川半蔵が機巧図彙を著し時計製作法に関連し歯車について詳しく述べた |
| 1800 | | H.マウズレーが換歯車付旋盤を製作した | 寛政 12(1800) | 伊能忠敬が地図作成に量程車を使用した, 時計の歯車機構利用の一例(現存) |
| 1807 | アメリカ | R.フルトンが最初の蒸気船にはずみ車駆動用歯車装置を採用 | | |
| 1818 | | E.ホイットニィがフライス盤を製作した | | |
| 1822 | イギリス | J.ウーズラムがはずば歯車について特許を取得した | 文政 5(1822) | 大蔵永常が農具便利論を出版しその中で牛力駆動歯車装置付水車を説明した |
| 1829 | アメリカ | クラベット・ソーン社が倣式歯切盤の特許を取得した | | |
| 1833 | | ブラウンシャープ社創立 | | |
| 1835 | イギリス | J.ウィットウォースがウォームホイールホブ盤の特許を取得 | 天保 7(1836) | 水戸斉昭が雲電機纂を編纂しその中でスプロケット式バケット水揚機を説明した |
| 1837 | | R.ウィリスがインボリュート歯車の利点, 中心距離の変化, 交換性歯車等を強調し, オドントグラフを発明, 圧力角 14.5° を採用しインボリュート歯車の実用化に大きく貢献した | | |
| 1839 | | ボドマーが, DP システムを創始した パフがウォームホイールの切削に初めてホブを使用した | 嘉永 3(1850) | 田中久重が万年自鳴鐘を完成した |
| 1850 | | E.サングが歯車の交換性に関する論文を発表した | | |
| 1853 | | ホワイトヘッドが歯車の切削に初めてホブを使用した | 嘉永 6(1853) 安政 3(1856) | ペルリが来航した オランダ人機械技術者が長崎製鉄所に技術指導に来日, 歯車製造技術も指導した |
| 1856 | ドイツ | C.シーレがホブによる歯切法を発明し英国の特許を取得した | 安政 3~5 (1856~1858) | 薩摩藩が大型木製歯車増速装置で織機を運転した |
| 1859 | ドイツ | ライネッカー社創立 | | |
| 1860 | イギリス | ダビッドブラウン, P&H 社創立 | | |

| 西 暦 | 外 国 史 実 | | 和 暦 | 日本国内史実 |
|------|---------------------|--|-------------------|---|
| 1865 | アメリカ | グリーンソン社創立 | 文久 3(1863) | 鹿児島集成館にオランダ製工作機械輸入 |
| 1866 | ドイツ | シース社創立 | 慶応 3(1867) | 横須賀造船所にフランス製工作機械を輸入した |
| 1872 | | ハーゲントルンが初めて平歯車とかさ歯車の創成歯切法を発表 | [明治時代] | |
| 1873 | アメリカ | ホップが初めて転位歯車方式を発表した | 明治 8(1875) | 田中久重が日本最初の民間機械工場を創立した |
| 1874 | | グリーンソンが倣式かさ歯車歯切盤を製作した | 明治 14(1881) | 大阪鉄工所が開業した |
| 1877 | | グールド・エバーハート社創立 自動歯切盤を製作した | | |
| 1882 | | ビルグラムがすぐばかさ歯車の創成歯切盤を製作した | 明治 22(1889) | 池貝鉄工所創立。民間工場として初の国産旋盤を製作し、換歯車も国産した |
| 1885 | ドイツ | ベンツがガソリン機関付3輪自動車製作 | 明治 27(1894) | 日清戦争勃発 |
| 1886 | アメリカ | W.ハークネスが歯車強度計算式に速度係数の考え方を入れた | 明治 30(1897) | 日本機械学会が創立され第1巻第1号の学会誌に井口の歯車の強さに関する論文が発表された |
| 1887 | | G.B.グラントが特許によりホブ盤を製作した | 明治 33(1900) | 溝口歯車歯切工場が創立された |
| 1892 | W.ルイスが歯車の曲げ強度計算式を発表 | | | |
| 1894 | ドイツ | ライネッカー社がホブ盤を製作した | 明治 37(1904) | 日露戦争勃発 |
| 1896 | アメリカ | フェロー社創立 | 明治 42(1909) | 唐津鉄工所創設 |
| 1897 | ドイツ | H.ファウターが差動装置付万能ホブ盤を発明した。これによりホブ盤が著しく進歩した | [大正時代] | |
| 1900 | | ファウター社創立 | 大正 3(1914) | 園池製作所設立 |
| 1908 | オーストリア | ヴィデキヤが歯面強さにヘルツの接触応力の考え方を導入した | 大正 6(1917) | 園池製作所が40インチホブ盤を製作した |
| 1908 | | スイス | M.マージが転位歯車方式を発表した | 大正 7(1918) |
| 1908 | イギリス | S.サンダーランドがやまば歯車形削盤について特許を取得した | 大正 9(1920) | 榎藤鉄工所が40インチホブ盤を製作した |
| 1909 | | C.A.パーソンが世界最初の減速歯車装置付タービン船を完成 | 大正 10(1921) | 溝口歯車工場にシース社製6メートル大型ホブ盤設置 |
| 1910 | アメリカ | ウェスチングハウス社で6000HP船用タービン減速歯車装置建造 | 大正 12(1923) | 唐津鉄工所が6フィートホブ盤を製作した |
| 1914 | スイス | マージ歯車研削盤1号機が完成した | 大正 14(1925) | 成瀬政男が歯形に関する論文を発表 |
| 1914 | | ミクロン社創立 | [昭和時代] | |
| 1914 | | DIN37“歯車の表示”が制定された | 昭和 4(1929) | 岡本工作機が歯車検査機を製作した |
| 1923 | ドイツ | クリンゲルンベルグ社設立 | 昭和 5(1930) | 岡本工作機が24インチ歯車研削盤製作 |
| 1923 | | DIN780“モジュール系列”が制定された | 昭和 6(1931) | 和栗明らが歯車の精度に関する論文を発表した |
| 1928 | アメリカ | E.バックinghamが“Spur Gear”を出版した | 昭和 7(1932) | 小野鑑正が歯車軸の振動に関する論文を発表した |
| 1932 | イギリス | BSS“平及びはすば歯車”規格が制定された | 昭和 12(1937) | JES B73 “インボリュート歯車歯形”が制定された |
| 1935 | アメリカ | J.O.アルメンがスコアリング強さの計算法を発表した | 昭和 13(1938) | 日本学術会議に歯車に関する研究分科会が発足した |
| 1942 | イギリス | H.E.メリットが“Gear”を出版した | 昭和 17(1942) | 日立精機、岡本工作機、唐津鉄工、大阪製鎖等がかさ歯車歯切盤、かさ歯車研削盤等が完成した |
| 1949 | アメリカ | E.バックinghamが“Analytical Mechanics of Gears”を出版 | 昭和 24(1949) | 中田 孝が転位歯車を出版 近畿歯車懇話会が創立された |
| 1954 | | D.W.ダッドレイが“Practical Gear Design”を出版した | | |
| 1960 | 西ドイツ | G.ニーマンが“Maschinenelemente”を出版 | 昭和 28(1953) | 仙波正荘が“歯車”第1巻を出版した |
| 1960 | | エッセンにて国際歯車会議開催 | 昭和 29(1954) | 成瀬政男が“歯車の話”を出版した |
| 1966 | | ミュンヘンにて歯車会議開催 | 昭和 35(1960) | JIS B1702 平歯車及びはすば歯車の精度規格制定 |
| 1969 | ハンガリー | ブタペストにて歯車会議開催 | | |