

## [58] 3K 遊星歯車設計システム

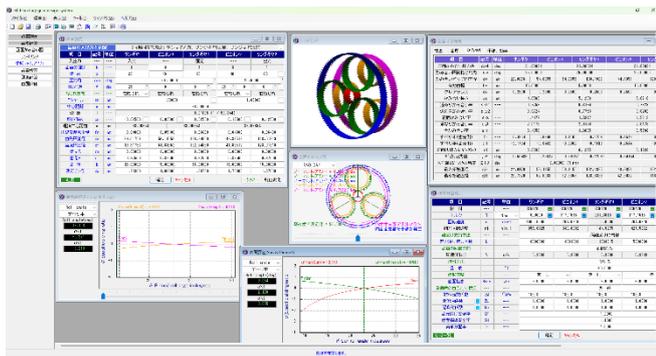


図 58.1 3K 遊星歯車

### 58.1 概要

3K 遊星機構は、ロシアのクドリヤフツェフ (Кудрявцев) や信州大学の両角宗晴教授が 50 年前に発表している遊星歯車機構であり低減速から高減速比を得ることができる遊星歯車機構ですが、歯数の配分や転位係数の調整で効率を良くすることができるため逆駆動機構として使用されることも増えています。本ソフトウェアでは、速比から歯数を決める機能があり、更に、すべり率、かみ合い率、効率のグラフと共に転位係数の変化に伴う歯形のかみ合いや干渉チェックも把握しながら転位係数を簡単に決めることができます。

### 58.2 プロパティ

基準ラックを図 58.2 で設定します。基準ラックの口にチェックを入れると基準ラックの寸法図を表示することができます。ここでは、並歯としたときの例を示します。また、遊星歯車の寸法設計基準を中心距離またはモジュールを基準とするのかを選択し、平均摩擦係数を設定します。



図 58.2 基準ラック

### 58.3 歯車諸元

図 58.3 の歯車諸元の設定の **歯車の入出力と固定** で遊星歯車のタイプを選択します。ここでは、図 58.4 の同方向減速を選択したときの例を示します。次に、遊星ピニオンの個数を入力し、歯数を入力しますが、歯数を直接入力することもできますし、図 58.5 の歯数組み合わせ機能を使用して歯数を決定することもできます。図 58.5 でピニオン個数、ギヤ比の範囲、歯数の上下限値を入力後、**歯数検索** を押すと歯数の組み合わせを高効率の順に表示します。そして、本例では、歯数の組み合わせ番号の 1 を選

択します。

歯数を図 58.3 のように決定した後は、ねじれ角を入力し転位係数を決定し (後述)、歯先円直径や歯底円直径を入力しますが、[TAB]を押すことで標準値を入力することができます。

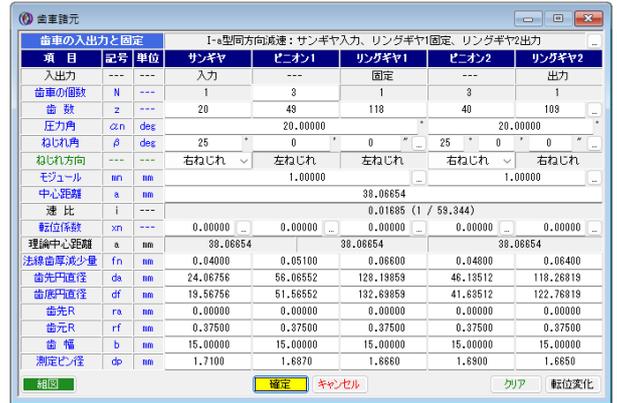


図 58.3 歯車諸元



図 58.4 3K 遊星歯車機構のタイプの選択



図 58.5 歯数の組み合わせ

転位係数の決め方は、図 58.3 の右下の **転位変化** を押すことで図 58.6~58.10 のグラフや図を表示します。画面下のスライドバーを移動することで転位係数を 0.025 ステップの値と歯形を表示します。効率を基準として転位係数を決定する場合は、図 58.10 の右下に表示する効率を参考にしてスライドバーを移動してください。

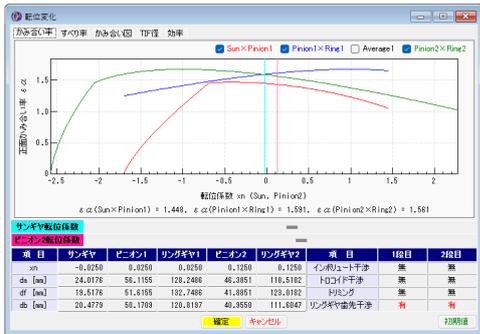


図 58.6 転位係数 (かみ合い率)

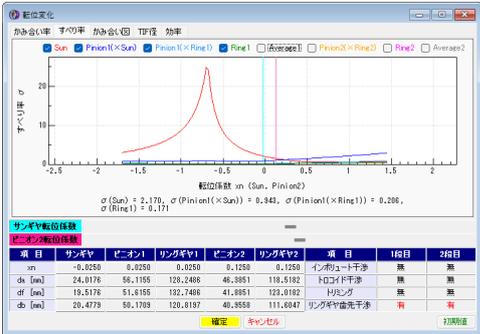


図 58.7 転位係数 (すべり率)

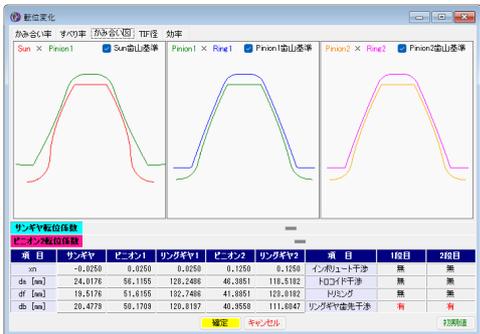


図 58.8 転位係数 (歯形)



図 58.9 転位係数 (TIF)



図 58.10 転位係数 (効率)

図 58.6~58.10 で決めた転位係数を採用する場合は、転位係数選択画面の[確定]で決めることができ図 58.11 のように歯車諸元入力画面に転位係数が入力されます。

図 58.11 の歯車諸元を[確定]すると図 58.12~58.15 のように歯車寸法、歯厚、かみ合い値、そして、干渉やかみ合い効率 (96.6%) の計算結果を表示します。なお、図 58.15 の最小直径干渉で「発生している」と表示しているのは、内歯車の第 4 の干渉です。詳細は、58.4 歯形図で説明します。



図 58.11 歯車諸元 (転位係数確定)



図 58.12 歯車寸法

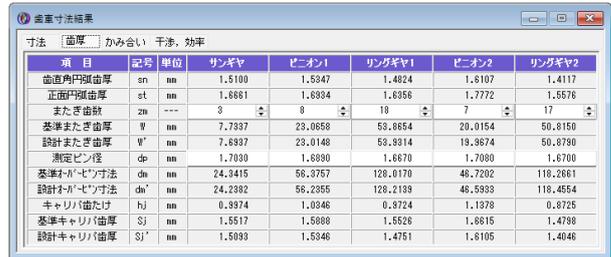


図 58.13 歯厚



図 58.14 かみ合い

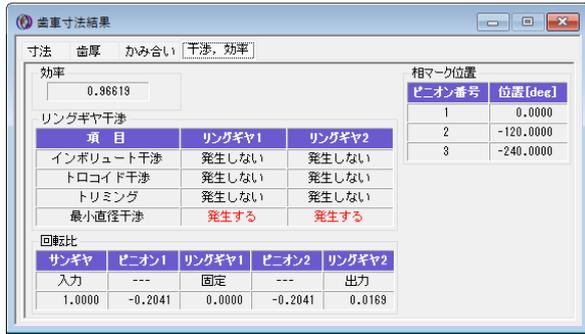


図 58.15 干渉, 効率

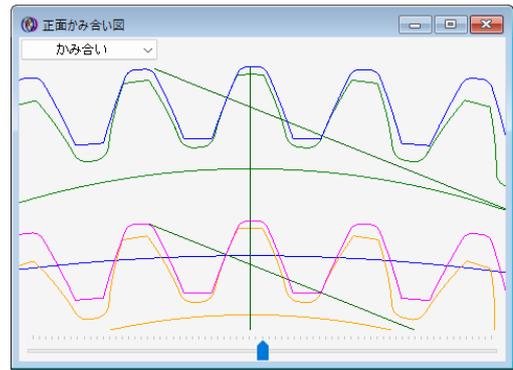


図 58.19 かみ合い図 (ピニオンと内歯)

#### 58.4 歯形

図 58.11 で確定した歯車の歯形を生成するため図 58.16 の条件で計算します。

歯車のかみ合いを図 58.17 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、拡大表示することもできます。また、画面下のスライダーで歯車を自公転させることができます。

図 58.15 の最小直径干渉は、図 58.20 のように内歯の歯先がピニオンの歯元と干渉 (1 $\mu$ m) していることがわかります。これは、歯先 R=0.03mm を与えることで解消します。

歯形項目	記号	サンギヤ	ピニオン1	リングギヤ1	ピニオン2	リングギヤ2
フレット分割数	vuf	30	30	30	30	30
インボリュート分割数	vui	50	50	50	50	50
面取り部分分割数	vur	15	15	15	15	15
歯先円分割数	vut	10	10	10	10	10
歯すじ分割数	hul	18	18	18	18	18

図 58.16 歯形計算諸元

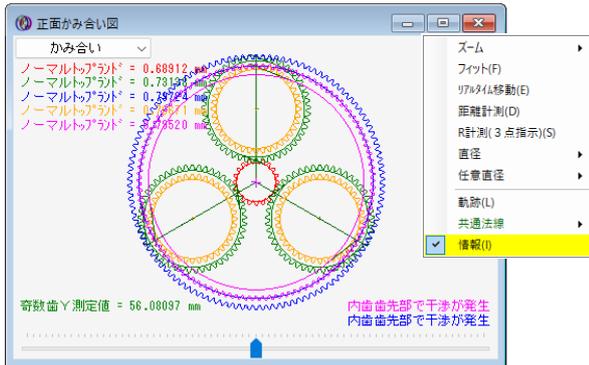


図 58.17 歯形図

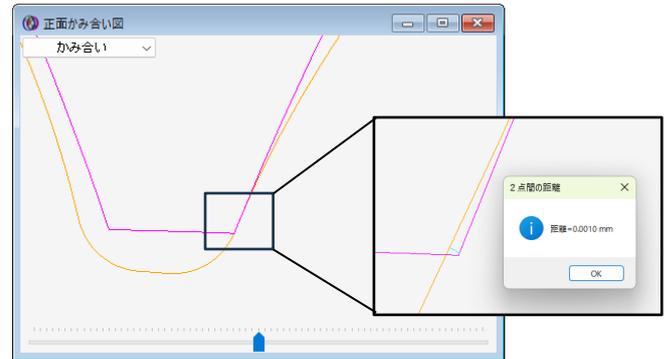


図 58.20 ピニオン 2 と内歯 2 のかみ合いと干渉

#### 58.5 レンダリング

歯車のかみ合いを図 58.21 のように 3 次元図で表示することができます。また、コントロールフォームで観察角度の変更や歯車を自公転させることができます。

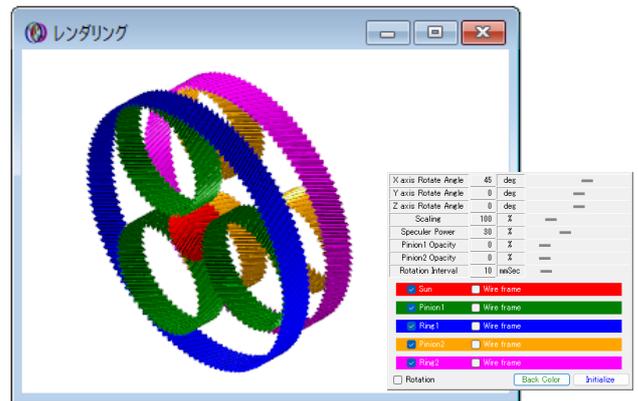


図 58.21 レンダリング

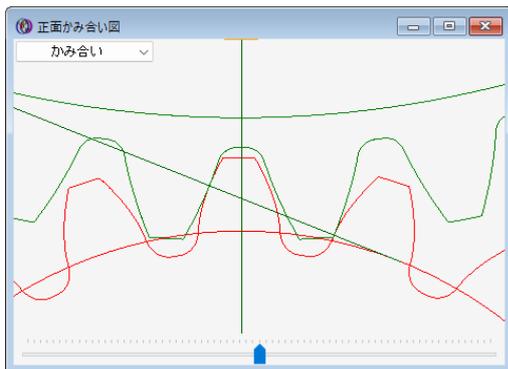


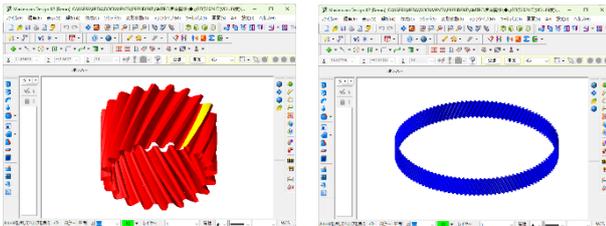
図 58.18 かみ合い図 (太陽と第 1 ピニオン)

#### 58.6 歯形ファイル出力

生成した歯形は、図 58.22 の歯形ファイル出力で出力できます。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、歯先部に分割して出力します。図 58.23 および図 58.24 に CAD 作図例を示します。



図 58.22 歯形ファイル出力



(a) 太陽歯車 (b) 内歯車 1

図 58.23 CAD 作図例 (3D-IGES)

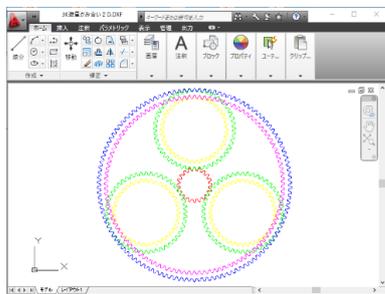


図 58.24 CAD 作図例 (2D-DXF)

### 58.7 歯面修整

歯面修整は、(1)歯形修整、(2)歯すじ修整、(3)歯面歯すじ修整、そして(4)データ読み込みの機能があり、ここでは、歯形修整の例を図 58.25 に示します。この歯形を得るためには図 58.26 で「歯形」を選択すると図 58.27 のように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。また、図 58.28 のように外部で作成した csv ファイルを読み込む機能もあります。

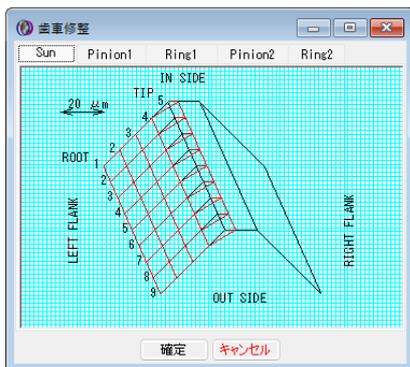


図 58.25 トポグラフ

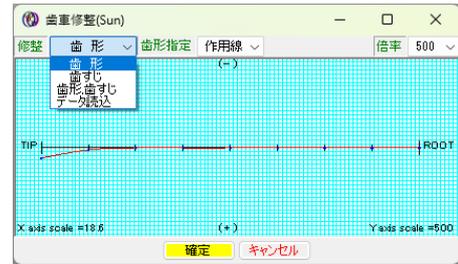


図 58.26 歯形修整



図 58.27 歯形修整

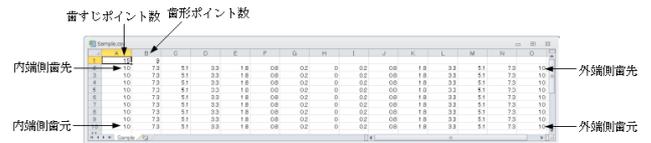


図 58.28 歯面修整データ (csv)

修整歯形を施した歯形は、図 58.29 のように確認することができます。

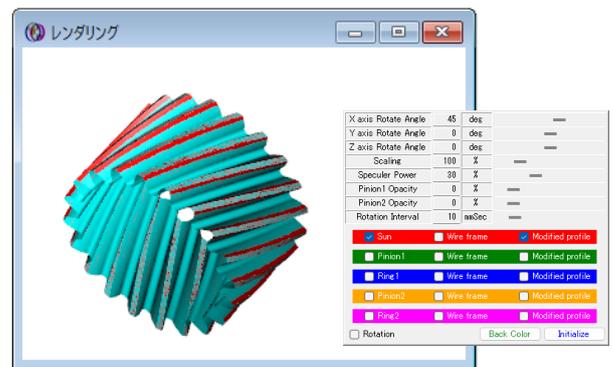


図 58.29 レンダリング (理論歯形と修整歯形)

### 58.8 強度計算

図 58.30 の強度諸元設定画面と図 58.31 で、金属材料と樹脂材料を選択することができます。鋼材料の場合、図 58.32 のように許容応力の  $\sigma_{Flim}$  と  $\sigma_{Hlim}$  を表中から選択することができます。また、樹脂材料も任意材料 (オプション) で設定することができます。図 58.33 に入力した材料一覧を示します。トルク単位は「N・m」、「N・cm」、「kgf・m」、「kgf・cm」、「gf・cm」から選択することができます。トルク、回転速度は入力側、出力側のどちらでも入力可能です。

強度計算結果画面を図 58.34 および図 58.35 に示します。強度計算は効率やかみ合い率を考慮し、鋼歯車は JGMA401-01:1974、JGMA401-02:1975 に基づき強度計算を行い、樹脂材料の応力値は、温度、寿命などを考慮した材料の実験値を採用しています。

項目	記号	単位	サンギヤ	ピニオン1	リングギヤ1	ピニオン2	リングギヤ2
材料	---	---	SCM420	SCM420	SCM420	SCM420	SCM420
トルク	T	Nm	5,000	112,1515	281,6910	112,1515	281,6910
回転速度	n	min-1	3000,0000	612,2449	0,0000	612,2449	50,5523
相対回転速度	n	min-1	2565,2174	1047,0275	434,7828	1282,6087	470,8621
軸荷支持方法	---	---	---	---	両軸受けに支持	---	---
寿命繰り返し回数	L	---	10000000	4081839	1894915	5000000	1834862
歯面の回転方向	---	---	---	---	正転のみ	---	---
周速(相対)	Y	m/s	2,9840	2,9840	2,9840	1,0047	0,80769
潤滑方法	---	---	---	---	油槽	---	---
温度	t	°C	---	---	60,0000	---	---
歯形修整	---	---	無し	---	無し	---	無し
歯面粗さ	Rmax	μm	8,0000	6,0000	6,0000	6,0000	6,0000
負荷時の歯当たり状況	---	---	---	---	良好	---	---
材料定数係数	ZM	1/MPa	189,8	189,8	189,8	189,8	189,8
潤滑油係数	ZL	---	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
油質係数	Ko	---	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
歯元曲げ安全率	SF	---	---	---	1,2000	---	---
歯面損傷安全率	SH	---	---	---	1,1500	---	---
荷重分配率	Tf	---	---	---	1,0000	---	---

図 58.30 強度諸元入力

項目	記号	単位	サンギヤ	ピニオン1	リングギヤ1	ピニオン2	リングギヤ2
許容ヘルツ応力	$\sigma_{Hlim}$	MPa	1843,5000	1843,5000	1843,5000	1843,5000	1843,5000
有効歯幅	bw	mm	15,0000	15,0000	15,0000	15,0000	15,0000
接触係数	ZH	---	2,3038	2,3038	2,3038	2,3038	2,3038
材料定数係数	ZM	1/MPa	189,8000	189,8000	189,8000	189,8000	189,8000
かみ合い率係数	Zε	---	0,8311	0,8311	0,7926	0,8003	0,8003
寿命係数	KHL	---	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
粗さ係数	ZR	---	0,9261	0,9261	0,9261	0,9261	0,9261
潤滑速度係数	ZV	---	0,9739	0,9739	0,9739	0,9739	0,9739
硬さ比係数	ZW	---	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
荷重分布係数	KHβ	---	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
動荷重係数	Kv	---	1,1964	1,1964	1,1964	1,1964	1,1964
弾性係数	E	MPa	*****	*****	*****	*****	*****
歯元円周力	Fc	N	151,0513	1444,5622	1442,3659	1769,5887	1589,1762
許容円周力	Fclim	N	1651,6675	1651,6675	10713,8613	7924,0320	7924,0320
歯面粗さ	Sfc	---	10,9345	1,1434	7,4290	4,4779	4,9863
ヘルツ応力	$\sigma_H$	MPa	406,2923	1256,4479	492,9495	684,8933	601,6592

図 58.35 強度計算結果 (歯面)

種類	金属材料
項目	サンギヤ
熱処理	浸炭焼き入れ
材料記号	SCM420
心部硬度	HV 305
表面硬度	HV 720
$\sigma_{Flim}$	MPa 441,500
$\sigma_{Hlim}$	MPa 1843,500

図 58.31 材料設定

熱処理	構造用合金鋼	心部硬度	心部硬さ	$\sigma_{Flim}$	有効浸炭深さ	歯面硬さ	$\sigma_{Hlim}$
305	SCM415	HB	HV	MPa		HV	HRC
720	SCM420	220	231	333,5		5,80	5,4
441,5	SCM420	230	242	353		6,00	5,5
1843,5	SCM420	240	252	372,5		6,20	5,6
	SCM420	250	263	392,5		6,40	5,7
	SCM420	260	273	402		6,60	5,8
	SCM420	270	284	417		6,80	5,9
	SCM420	280	295	431,5		7,00	6,0
	SCM420	290	305	441,5		7,20	6,1
	SNC420	300	316	451		7,40	6,2
	SNC420	310	327	461		7,60	6,3
	SNC420	320	337	470,5		7,80	6,3
	SNC420	330	347	480,5		8,00	6,4
	SNC420	340	358	490,5		8,20	6,4
	SNC420	350	369	500		8,40	6,5

図 58.32 材料選択

項目	記号	単位	サンギヤ	ピニオン1	リングギヤ1	ピニオン2	リングギヤ2
種類	---	---	金属材料	金属材料	金属材料	金属材料	金属材料
材料記号	---	---	SCM420	SCM420	SCM420	SCM420	SCM420
熱処理	---	---	浸炭焼き入れ	浸炭焼き入れ	浸炭焼き入れ	浸炭焼き入れ	浸炭焼き入れ
心部硬度	---	---	305(HV)	305(HV)	305(HV)	305(HV)	305(HV)
表面硬度	---	---	720(HV)	720(HV)	720(HV)	720(HV)	720(HV)
$\sigma_{Flim}$	---	---	441,500	441,500	441,500	441,500	441,500
$\sigma_{Hlim}$	---	---	1843,500	1843,500	1843,500	1843,500	1843,500

図 58.33 材料一覧

項目	記号	単位	サンギヤ	ピニオン1	リングギヤ1	ピニオン2	リングギヤ2
許容曲げ応力	$\sigma_{Flim}$	MPa	441,5000	441,5000	441,5000	441,5000	441,5000
有効歯幅	b	mm	15,0000	15,0000	15,0000	15,0000	15,0000
歯形係数	YF	---	2,7296	2,3592	2,0850	2,3441	2,0650
荷重分布係数	Yε	---	0,6907	0,6907	0,6293	0,6405	0,6405
ねじれ角係数	Yβ	---	0,7817	0,7817	0,7817	0,7817	0,7817
寿命係数	KL	---	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
寸法係数	KFε	---	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
動荷重係数	Kv	---	1,1964	1,1964	1,1964	1,0005	1,4019
速度修正係数	KVo	---	*****	*****	*****	*****	*****
温度係数	KT	---	*****	*****	*****	*****	*****
潤滑係数	KL0	---	*****	*****	*****	*****	*****
材質係数	KM	---	*****	*****	*****	*****	*****
歯元円周力	FL	N	151,0513	1444,5622	1442,3659	1769,5887	1589,1762
許容円周力	Fclim	N	3091,5095	3075,5138	4491,1972	4640,6200	3759,2942
歯面粗さ	Sfc	---	20,4688	2,4752	3,1130	2,6224	2,3656
歯元曲げ応力	$\sigma_F$	MPa	21,5717	178,3727	141,7895	168,3551	186,6364

図 58.34 強度計算結果 (曲げ)

## 58.9 歯面評価

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 に基づく計算結果です。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 58.36 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 58.37~58.42 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。また、図 58.39 の油膜厚さから摩擦の発生確率を図 58.40 の接触温度からスカuffingの発生確率を計算します。

項目	記号	単位	サンギヤ	ピニオン1	リングギヤ1	ピニオン2	リングギヤ2
歯車の温度	Gtc	°C	---	60,000	---	---	---
油の温度	Tc	°C	---	40,000	---	---	---
油の種類	---	---	---	鉱物油	---	---	---
ISOグレード	---	---	---	ISO VG 150	---	---	---
回転速度 (40 °C)	---	mm/s	---	150	---	---	---
平均速度	Mtc	°C	---	227,000	---	---	---
摩擦係数温度	μ0	---	---	97,000	---	---	---
結晶粒度	μ0	μm	---	95,64	---	---	---
粘度	ν	mm²/s	---	0,02085	---	---	---
なみ歯面粗さ (Ra)	Ra	μm	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
摩擦係数の方式	---	---	---	一定値	---	---	---
摩擦係数	μ0	---	---	0,0600	---	---	---
歯形修整	---	---	無し	無し	無し	無し	無し
計算ポイント数	---	---	---	100	---	---	---

図 58.36 歯面評価 (設定)

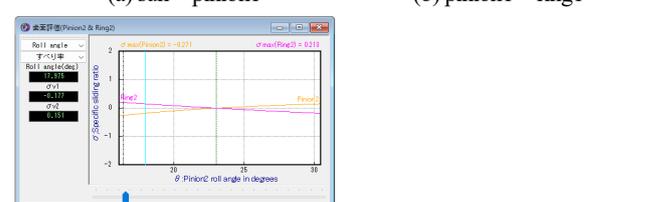
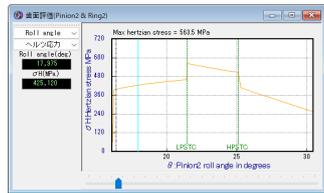


図 58.37 すべり率



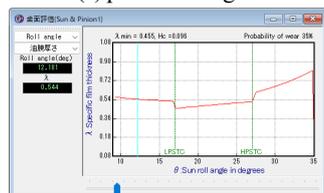
(a) sun x pinion1

(b) pinion1 x ring1

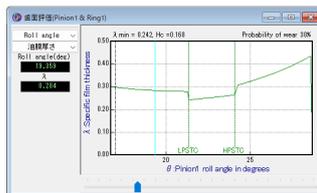


(c) pinion2 x ring2

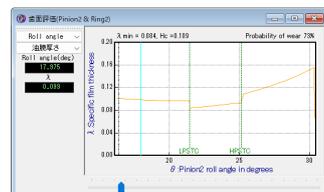
図 58.38 ヘルツ応力



(a) sun x pinion1

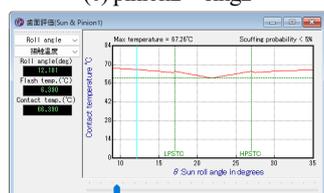


(b) pinion1 x ring1

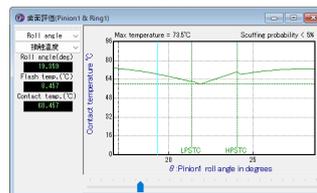


(c) pinion2 x ring2

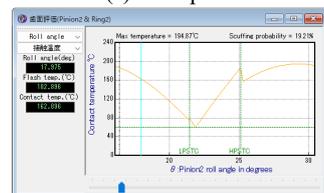
図 58.39 油膜厚さ



(a) sun x pinion1

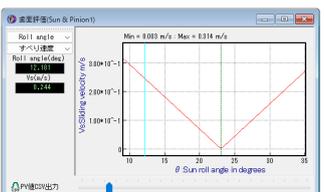


(b) pinion1 x ring1

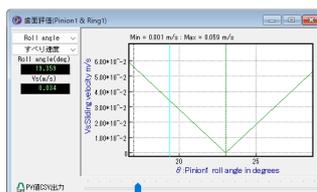


(c) pinion2 x ring2

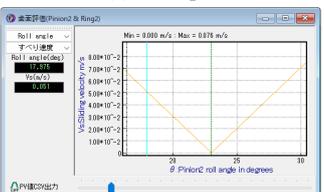
図 58.40 接触温度 (歯車温度+フラッシュ温度)



(a) sun x pinion1

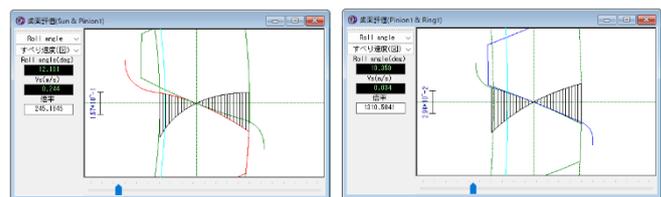


(b) pinion1 x ring1



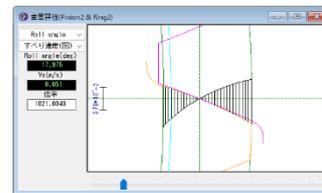
(c) pinion2 x ring2

図 58.41 すべり速度 1



(a) sun x pinion1

(b) pinion1 x ring1



(c) pinion2 x ring2

図 58.42 すべり速度 2

## 58.10 高減速比の設計例

図 58.3 では速比は  $i=59.3$  の例を示しましたが、ここでは、速比を  $i=105.4$  の例を示します。歯数の選定は図 58.5 で求め転位係数の決定は、図 58.10 の効率を基準に決定しています。図 58.43 の歯車諸元では、減速時の効率は  $\eta_1=98.01\%$  であり逆駆動時 (図 58.4 で同方向増速) の効率は、 $\eta_2=97.99\%$  です。

歯車諸元								
I-a型同方向減速：サンギヤ入力、リングギヤ1固定、リングギヤ2出力								
項目	記号	単位	サンギヤ	ピニオン1	リングギヤ1	ピニオン2	リングギヤ2	
入出力	---	---	入力	---	---	---	出力	
歯車の個数	N	---	1	3	1	3	1	
歯数	z	---	21	96	213	79	196	
圧力角	$\alpha_n$	deg	20.00000				20.00000	
ねじれ角	$\beta$	deg	0				25	
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	左ねじれ	左ねじれ	右ねじれ	右ねじれ	
モジュール	m	mm	1.00000				1.00000	
中心距離	a	mm	64.54781				64.54781	
速比	i	---	0.00949 (1 / 105.412)				---	
転位係数	$x_n$	---	0.12500	-0.12500	-0.12500	0.15000	0.15000	
理論中心距離	a	mm	64.54781				64.54781	
法線歯厚減少量	fn	mm	0.02000	0.03000	0.04000	0.03000	0.03000	
歯先円直径	da	mm	25.42034	107.67428	233.20000	89.46686	215.00000	
歯底円直径	df	mm	20.32034	103.17428	237.28950	84.96686	219.06207	
歯先R	ra	mm	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	
歯先R	rf	mm	0.37500	0.37500	0.37500	0.37500	0.34260	
歯幅	b	mm	20.00000	20.00000	20.00000	20.00000	20.00000	
測定ピッチ	dp	mm	1.74400	1.67300	1.68500	1.63200	1.67100	

図 58.43 歯車諸元 (高減速の例)

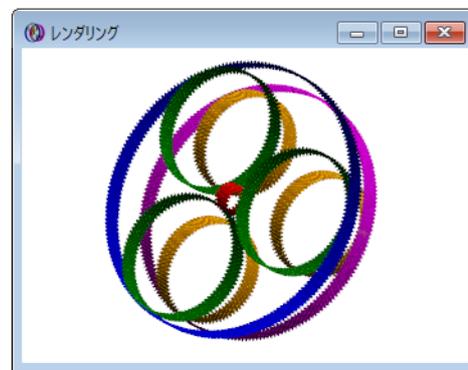


図 58.44 レンダリング (i=105.4 の例)

※ [5]遊星&不思議遊星と[49]遊星歯車の起振力解析ソフトもご覧ください。

※ ステップドピニオン式遊星歯車は、[54]をご覧ください。