

## [5] Planetary gear and Mechanical paradox Gear design system

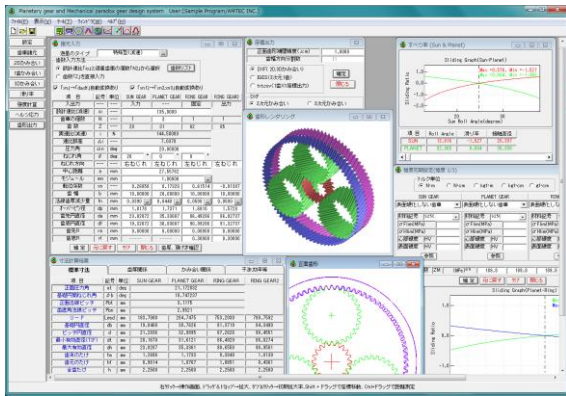


図 5.1 遊星&不思議遊星歯車設計ソフトウェア

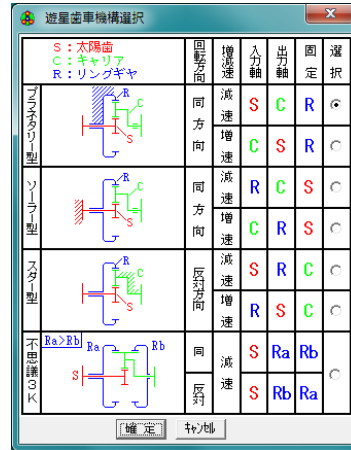


図 5.3 遊星歯車のタイプ

### 5.1 概要

いままでのPlanet AGITOは、「遊星&不思議遊星歯車設計ソフトウェア」に変わりました。

「遊星&不思議遊星歯車設計ソフトウェア」は、遊星歯車と不思議遊星を簡単に設計できるソフトです。歯数の組み合わせや最適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, ソーラ, 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 初期設定

初期設定で、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に寸法初期設定の画面を示します。



図 5.2 寸法初期設定

### 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, 不思議 3K の増減速)。



図 5.4 諸元入力



図 5.5 歯数一覧

- (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) 歯先円直径は寸法初期設定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 の諸元入力補助画面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。

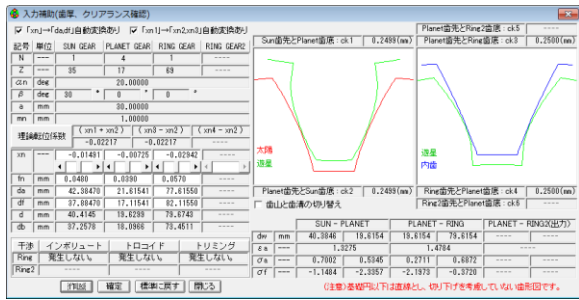


図 5.6 諸元入力補助

## 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、バックラッシュの確認をすることができます。



図 5.8 結果(歯厚関係)

図 5.7 結果(標準寸法)



図 5.10 結果(干渉、効率等)

図 5.9 結果(かみ合い)

## 5.6 歯形作図

### 5.6.1 歯形図(2D)

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。

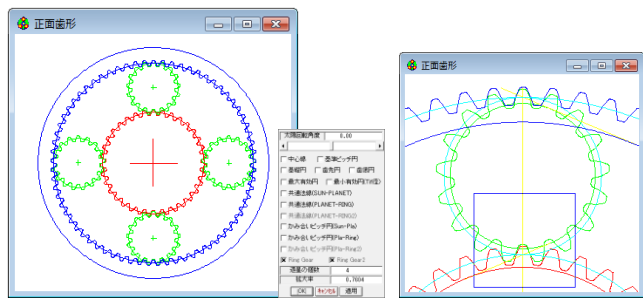


図 5.11 2D かみ合い図

図 5.12 かみ合い拡大

### 5.6.2 一歯かみ合い図

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ア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。

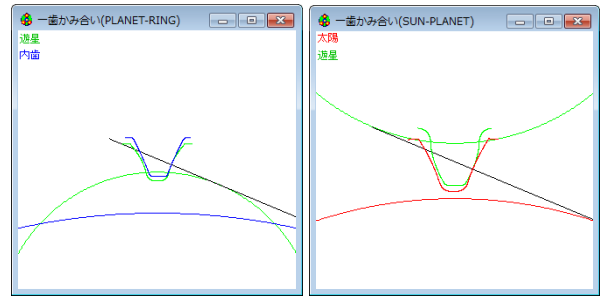


図 5.13 一歯かみ合い図

### 5.6.3 歯形図(3D)

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。

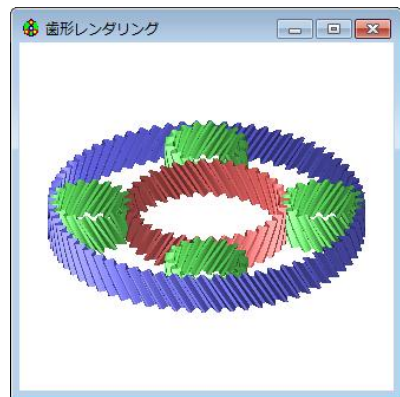


図 5.14 歯形レンダリング

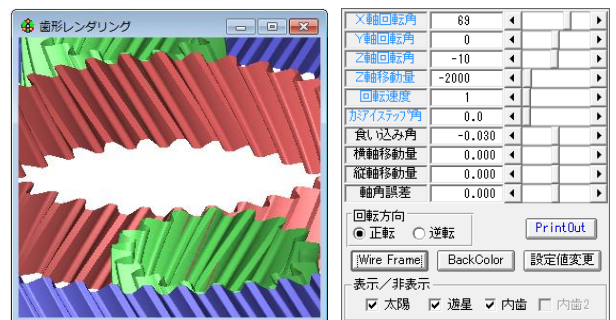


図 5.15 拡大図

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、各ロール角度(または直径)によるすべり率を表示します。

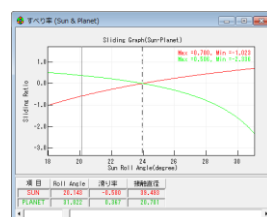


図 5.17 すべり率グラフ

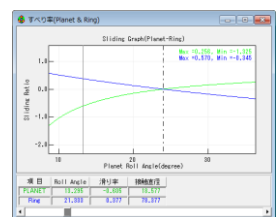


図 5.18 すべり率グラフ

5.8 歯車強度

5.8.1 強度初期設定

強度初期設定画面(図 5.19)で、金属材料と樹脂材料を選択することができます。許容応力の  $\sigma_{Flim}$  と  $\sigma_{Hlim}$  を表中(図 5.20)から選択します。または任意数値を入力することができます。

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。



図 5.19 強度初期設定

Table showing material selection for S15C and S15CK, listing properties like HB, HV, sigma\_Flim, sigma\_Hlim, and surface hardness. Includes a comparison note '比較的浅い'.

図 5.20 鉄材料の許容値選択例

5.8.2 強度諸元入力

強度諸元入力画面(図 5.21)に各種数値を入力します。トルク、回転数は入力、出力のどちらでも設定可能です。



図 5.21 強度諸元入力

5.8.3 強度計算結果

図 5.22 と図 5.23 に強度計算結果画面を表示します。強度計算は、効率やかみ合い率も考慮しています。金属歯車は JGMA401-01:1974, JGMA401-02:1975 に基づき強度計算を、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。

Table 5.22: Strength calculation results for bending stress (歯根強さ). Columns include gear type and stress values for different materials.

図 5.22 強度計算結果(曲げ)

Table 5.23: Strength calculation results for surface stress (歯面強さ). Columns include gear type and stress values for different materials.

図 5.23 強度計算結果(歯面)

5.9 ヘルツ応力グラフ

ヘルツ応力グラフを図 5.24 および図 5.25 に示します。かみ合いが 2 点接触と 1 点接触のヘルツ応力の違いを確認することができます。



図 5.24 ヘルツ応力(太陽)



図 5.25 ヘルツ応力(遊星)

5.10 その他

- (1) 歯車の歯形を出力することができます。
● DXF ファイル : 2D, 3D 全歯かみ合い状態
● IGES ファイル : 3D(1 歯)
● TXT ファイル : 2次元 1 歯座標
(2) 寸法計算結果, 強度計算結果, 2D 図, すべり率グラフ, ヘルツ応力グラフを印刷することができます。
(3) 設計データを保存し, 読み込みができます。

5.11 不思議遊星(3K 型)

太陽, 遊星, 内歯 2 個の合計 4 つを使用した場合, 減速比を大きくする機構として不思議遊星歯車機構がよく知られていますが不思議遊星歯車は計算が非常に面倒です。しかし, 本ソフトウエアを使用することにより簡単に不思議遊星歯車を設計することができます。

入力は太陽歯車, 固定は内歯車 1, 出力は内歯車 2 のタイプの 3K 形のみを対象としています。内歯車 1 と内歯車 2 の歯数の大小によって, 同方向減速と逆方向減速が決まります。以下に設計例を示します。

5.11.1 歯車諸元の設定

- (1) 寸法初期設定画面で, モジュール基準を選択します。
(2) 図 5.3 の遊星歯車のタイプで遊星歯車機構のタイプを 3K 不思議型を選択し, 図 5.26 の不思議遊星諸元に進みます。
(3) 設計減速比を 135, 遊星歯車の個数を 3 個と入力します。
(4) 歯数一覧画面を表示し, 適切と思われる歯数の組み合わせを選択します。(図 5.27 参照)

このときの選択条件として

- 実速比と設計速比の誤差
● 歯数が小さすぎず, 大きすぎない
● 内歯車の歯数 z3, z4 の間に「z1+2x z2」の関係があるなどを考慮し選択します。

ここでは例として z1=20, z2=31, z3=82, z4=85 を選択します。
(5) 次に Tab キーを押し順に alpha 20, beta 20, m1 を入力します。モジュールを入力した時点で, 図 5.2 初期設定の基準ラックに基づいて標準の中心距離と転位係数と歯先円直径と歯底円直径が決まります。

- (6) 中心距離が 27.6686mm のために目的に応じて変更します。(中心距離基準入力の場合はモジュールの標準値を計算しますので, その後 JIS 規格のモジュールに後から変更することがで



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 の諸元入力補助画面を表示します。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、問題がないためそのまま歯車寸法を確定します。

図 5.26 不思議遊星諸元入力

図 5.27 歯数一覧

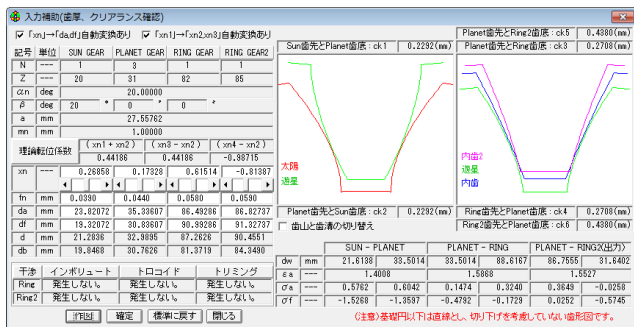


図 5.28 諸元入力補助

(8) 図 5.29~5.31 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 歯厚寸法

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。

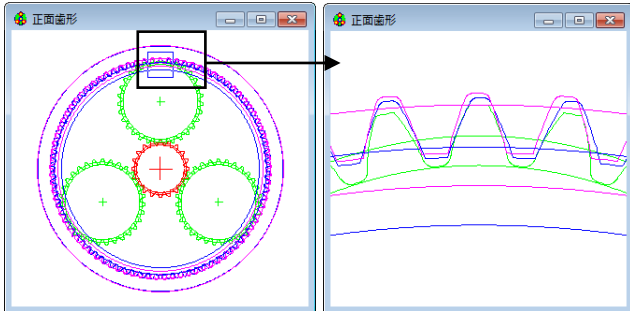


図 5.33 かみ合い図

図 5.34 部分拡大

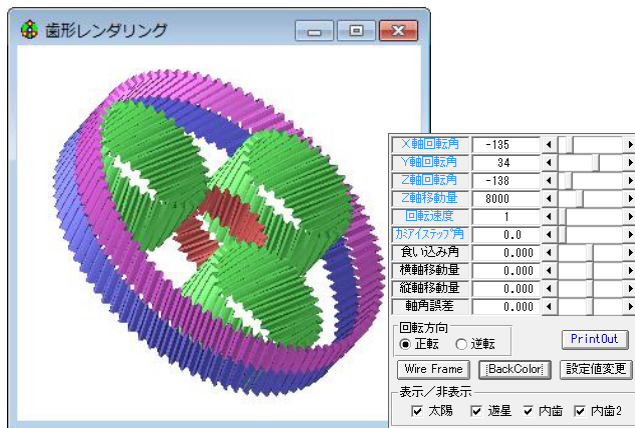


図 5.35 歯形レンダリング(減速比 144)

### 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。

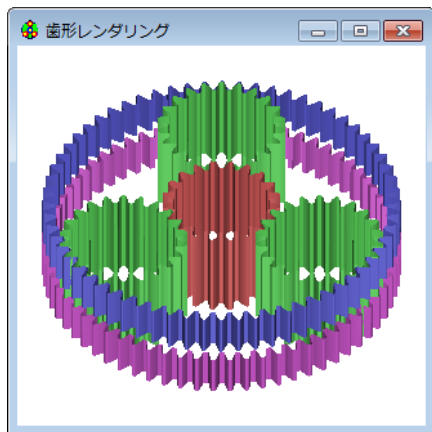


図 5.36 歯形レンダリング(平歯車, 減速比 93.8)

### 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。

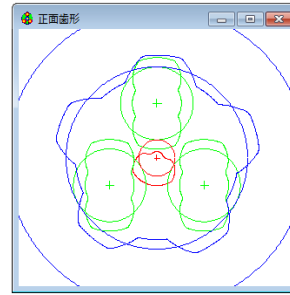


図 5.37 少歯数例(2D)



図 5.38 少歯数例(3D)

### 5.13 ダブルピニオン (オプション)

ダブルピニオンの設計例を以下に示します。

諸元入力 (ダブルピニオン)

遊星のタイプ: プラネタリー型(減速)

歯数入力方法:  設計速比「io」と遊星歯車の歯数「N2」から選択  歯数「Z」を直接入力

「xn1」→「dad1」自動変換あり  「xn1」→「xn2,xn3」自動変換あり

項目	記号	単位	SUN GEAR	PLANET	PLANET2	RING GEAR
入出力	---	---	入力	出力	出力	固定
設計速比(減速)	io	---	---	---	---	---
歯車の歯数	N	---	1	3	3	1
歯数	Z	---	18	12	13	51
実速比(減速)	i	%	---	-1.89333	---	---
速比誤差	$\Delta i$	---	---	0.0000	---	---
圧力角	$\alpha_n$	deg	---	20.00000	---	---
ねじれ角	$\beta$	deg	---	20	0	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	---	---
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	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
オーバーク径	dp	mm	3.5000	3.5000	3.5000	3.5000
歯先円直径	da	mm	26.48162	18.51812	19.81484	65.80000
歯底円直径	df	mm	20.85662	12.83412	14.18984	71.10741
歯先R	ra	mm	0.10000	0.10000	0.10000	0.20000
歯底R	rf	mm	---	---	---	0.35000

確定 元に戻す カタ 閉じる 歯厚・剛さ確認

図 5.39 諸元設定

寸法計算結果

標準寸法	歯厚関係	かみ合い関係	干渉効率等			
項目	記号	単位	SUN GEAR PLANET GEAR PLANET GEAR2 RING GEAR			
正面圧力角	$\alpha_t$	deg	21.172832	---	---	---
基礎円間ねじれ角	$\beta$	deg	18.747237	---	---	---
正面法線ピッチ	Pbt	mm	3.8969	---	---	---
歯面法線ピッチ	Pbn	mm	3.8902	---	---	---
リード	Lead	mm	206.8716	137.7810	149.2628	585.5694
基礎円直径	db	mm	22.8277	14.8851	16.1255	63.2617
ピッチ円直径	d	mm	23.3440	15.9627	17.2929	67.8413
最小有効直径(11F)	dt	mm	22.3868	14.8937	16.1289	66.0833
最大有効直径	dh	mm	26.3877	18.4364	19.7294	70.7175
歯末のたけ	ha	mm	1.2688	1.2782	1.2610	1.0207
歯元のたけ	hf	mm	1.5437	1.5343	1.5515	1.8330
全歯のたけ	h	mm	2.8125	2.8125	2.8125	2.8537
転位量	xm	mm	0.0188	0.0282	0.0110	0.0705
歯切転位係数	xnc	---	-0.1019	-0.0944	-0.1082	0.1784

図 5.40 寸法

寸法計算結果

標準寸法	歯厚関係	かみ合い関係	干渉効率等			
項目	記号	単位	SUN GEAR PLANET GEAR PLANET GEAR2 RING GEAR			
歯面円弧歯厚	sn	mm	1.8708	1.8776	1.8651	1.8057
正面円弧歯厚	st	mm	1.9908	1.9981	1.9848	1.9216
またぎ歯数	zm	---	3	2	2	7
基準またぎ歯厚	W	mm	3.6145	5.8054	5.8145	25.1002
設計またぎ歯厚	W'	mm	3.5145	5.7054	5.7145	25.2002
オーバーク径	dp	mm	3.5000	3.5000	3.5000	3.5000
基準トノメータ寸法	dm	mm	31.0395	22.8283	24.0361	0.0000
設計トノメータ寸法	dm'	mm	30.8580	22.6623	23.8677	0.0000
キャリア歯のたけ	Hj	mm	1.3048	1.3326	1.3106	1.0137
基準キャリア歯厚	Sj	mm	1.3754	1.3801	1.3682	1.3120
設計キャリア歯厚	Sj'	mm	1.8684	1.8746	1.8625	1.7988

図 5.41 歯厚

標準寸法		歯厚関係		かみ合い関係		干渉効率等	
項目	記号	単位	SUN GEAR	PLANET GEAR	PLANET GEAR2	PLANET2 And RING	
正面かみ合い圧力角	avt	deg	21.5154		21.5154	21.5153	
かみ合いねじれ角	βw	deg	20.0431		20.0431	20.0431	
かみ合いピッチ円直径	dw	mm	24.0000	16.0000	16.0000	17.3333	66.0000
有効歯幅	bw	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		5.4229
近寄りかみ合い率	ea1	---	0.8428		0.8429		0.8429
遠のきかみ合い率	ea2	---	0.8751		0.8429		0.7407
正面かみ合い率	ez	---	1.3179		1.2857		1.3316
歪なかみ合い率	ezβ	---	1.3064		1.3064		1.3064
全かみ合い率	ezγ	---	2.6244		2.5321		2.6300
滑り率(歯先側)	σra	---	0.3955	0.7676	0.8957	0.3103	0.3204 0.8929
滑り率(歯元側)	σrf	---	-3.3033	-14.4604	-11.2336	-7.7490	-0.3397 -0.4690
正面法線方向バックラッシュ	jnt	mm	0.2112		0.2112		0.2112
バックラッシュ角度	jθ	deg	1.0939	1.6259	1.6259	1.5008	1.5009 0.3826
入力軸回転バックラッシュ角度	Σjθ	deg				3.2510 (Sun)	
最大接触速度	dja	mm	26.3877	18.4364	18.4364	19.7294	19.7294 66.8929
最小接触速度	djf	mm	22.6474	14.8975	14.9039	16.1817	16.1840 66.0693

図 5.42 かみ合い

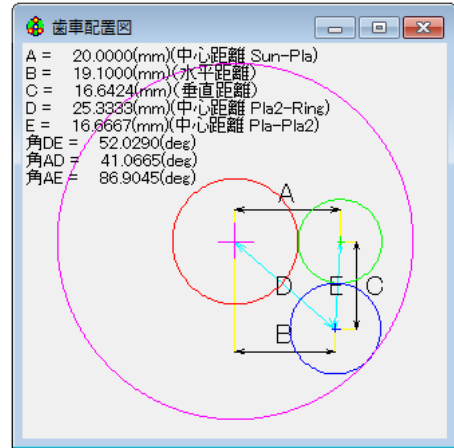


図 5.46 歯車の配置

標準寸法		歯厚関係		かみ合い関係		干渉効率等	
回転比率		SUN	PLANET	PLANET2	CARRIER	RING	
		1.0000	-2.8636	1.5944	-0.5455	0.0000	
効率		0.9248					
RING GEAR 干渉							
項目		RING					
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。					
ドリミング		発生しない。					
クリアランス(mm)							
Sun歯先とPlanet歯底		0.3121 (mm)					歯車配置図
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Ring2歯底		0.3130 (mm)					
Ring2歯先とPlanet歯底		0.4717 (mm)					

図 5.43 干渉&効率

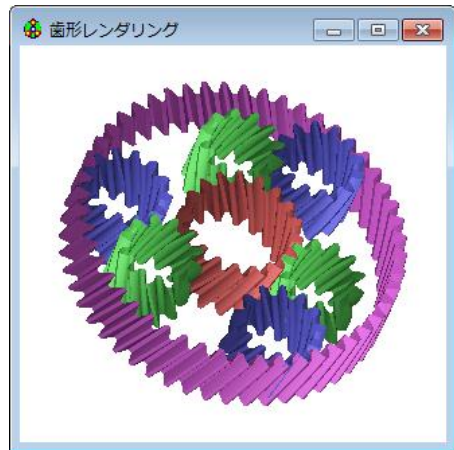


図 5.47 歯形レンダリング

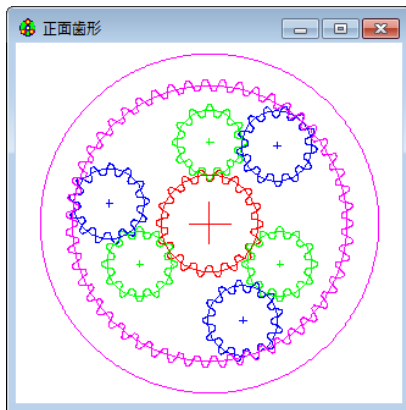


図 5.44 かみ合い 1(2D)

曲げ強さ		歯面強さ				
項目(曲げ強さ)	記号	単位	SUN GEAR	PLANET GEAR	PLANET GEAR2	RING GEAR
許容曲げ応力	σFlim	MPa	315.7000	329.3500	322.7000	140.7000
歯面有効歯幅	b	mm	15.0000	15.0000	15.0000	15.0000
歯形係数	YF	---	2.9455	3.8347	3.9171	2.0650
荷重分布係数	Yβ	---	0.7588	0.7778	0.7778	0.7186
ねじれ角係数	Yβ	---	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	KFz	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
動荷重係数	Kv	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
速度補正係数	KVo	---	---	---	---	---
温度係数	KT	---	---	---	---	---
歯質係数	KLo	---	---	---	---	---
材質係数	KH	---	---	---	---	---
呼び円周力	Ft	N	1388.8890	1362.1706	1332.4998	1821.3256
許容円周力	Ftlim	N	2648.9515	2388.8287	2345.1874	1777.7809
曲げ強さ	SFL	---	1.9070	1.7170	1.7800	1.3465
歯元曲げ応力	σF	MPa	165.9517	181.8186	183.3532	104.5745

図 5.48 強度結果(曲げ)

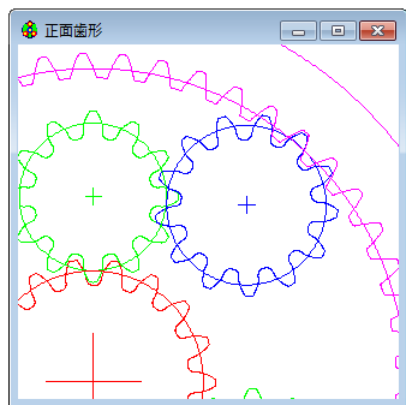


図 5.45 かみ合い 2(2D 拡大)

曲げ強さ		歯面強さ				
項目(歯面強さ)	記号	単位	SUN GEAR	PLANET GEAR	PLANET GEAR2	RING GEAR
許容ヘルツ応力	σHlim	MPa	1333.5000	1284.4999	1314.0000	615.0000
歯面有効歯幅	bw	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	---	60.6088	60.6088	60.6088	60.6088
かみ合い率係数	Zε	---	0.8711	0.8819	0.8819	0.8477
寿命係数	KHL	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
粗さ係数	ZR	---	0.9109	0.9067	0.9067	0.8364
滑り速度係数	ZV	---	0.9103	0.9103	0.9103	0.8914
硬さ比係数	ZW	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
荷重分布係数	KHβ	---	1.2132	1.4048	1.3506	1.0106
動荷重係数	Kv	---	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
弾性係数	E	---	---	---	---	---
呼び円周力	Fc	N	1392.1371	1365.3566	1335.6165	1824.4158
許容円周力	Fclim	N	724.8814	494.1532	529.5810	268.5005
歯面強さ	sfH	---	0.8207	0.3619	0.3365	0.2027
ヘルツ応力	σH	MPa	1847.9937	2151.7624	2086.7286	1143.7915

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。