

### [3] involuteΣ(Worm Gear Design)

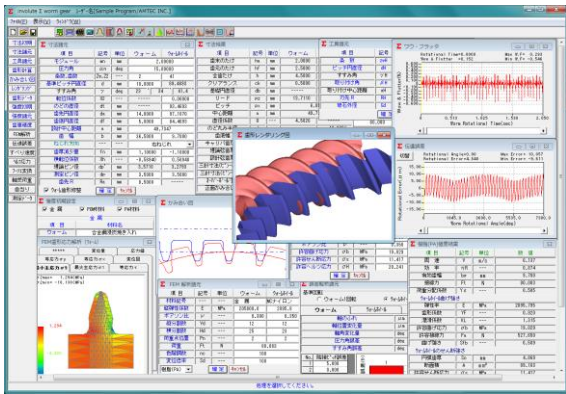


図 3.1 involuteΣ(Worm Gear Design)

#### 3.1 概要

involuteΣ(Worm Gear Design)は、ウォームギヤ(ウォーム×ウォームホイール)の設計ソフトウェアです。ウォームとヘリカルギヤの組み合わせは involuteΣ(Worm and Helical Gear Design)をご使用ください。

#### 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 3.1 ソフトウェアの構成

項目	頁	適用
<1>基準ラックの設定	15	○
<2>ウォーム歯形(1形)	15	○
<3>ウォーム歯形(3,4形)	15	◎
<4>工具(ホブ)設定	15	○
<5>歯形計算(標準)	16	○
<6>歯形計算(干渉)	16	◎
<7>歯車寸法	16	○
<8>歯車かみ合い図(DXF)	16	○
<9>歯形レンダリング(表示)	16	◎
<10>歯形レンダリング(取付け誤差設定)	16	◎
<11>歯形レンダリング(バックラッシュ角)	16	◎
<12>歯形データファイル(DXF)	16	○
<13>歯形データファイル(3D-IGES)	16	◎
<14>歯車強度計算(金属)	16	○
<15>歯車強度計算(POM)	16	○
<16>強度歯車計算(PA)	17	◎
<17>歯車精度	---	○
<18>2D-FEM 歯形応力解析	17	◎
<19>回転伝達誤差解析	17	◎
<20>すべり速度	18	◎
<21>ヘルツ応力	18	◎
<22>フーリエ解析	18	◎
<23>設計データ管理	---	○
<24>歯当たり解析	18	◎
<25>軸受け荷重	18	○
<26>軸間距離変動解析	18	◎
<27>ウォーム歯形修整	15	◎
<28>ウォームホイール測定データ	---	◎

#### 3.3 アイコンボタン

アイコンは、[寸法][歯形][強度][FEM][伝達]など 18 種類あります。



#### 3.4 基準ラックの設定

寸法初期設定では、①基準ラックの選択(並歯, 低歯, 特殊), ②ウォーム歯形(1形, 3形, 4形), ③歯形基準(軸直角, 歯直角), ④ウォームホイールの形状を選択します。図 3.2 に初期設定画面を示します。



図 3.2 寸法初期設定

#### 3.5 寸法設定

図 3.3 に寸法諸元の設定画面を示します。のどの丸み半径, 歯先円直径, 歯底円直径, 中心距離を変更することができます。また, 歯厚減少量と横転位係数の関係は, いずれか一方を入力することにより決定します。

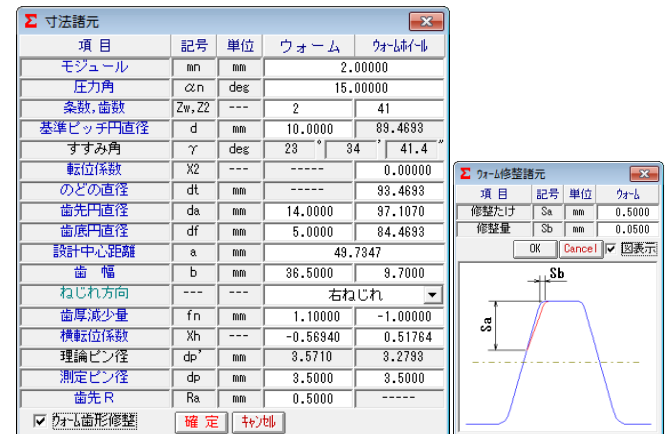


図 3.3 寸法諸元設定とウォーム歯形修整

#### 3.6 工具設定と寸法計算結果

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。3 形ウォームの歯形は砥石の直径により変化します。図 3.4 に工具諸元設定画面を, 図 3.5 にウォームギヤの寸法を示します。



図 3.4 ホブ諸元設定

項目	記号	単位	ウォーム	ウォームホイール
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
クリアランス	ck	mm	0.5000	0.5000
基礎円直径	db	mm	-----	85.8748
リード	pz	mm	13.7110	-----
ピッチ	px	mm	-----	6.8555
中心距離	a	mm	-----	49.7347
直径係数	q	---	4.5826	-----
のど丸み半径	rt	mm	-----	13.0001
歯底幅	Wn	mm	-----	1.8018
キャリア歯たけ	hj	mm	2.0395	2.0292
理論弦歯厚	Sj0	mm	3.1416	3.1411
設計弦歯厚	Sj	mm	2.0028	4.1764
三針寸法(ピッチ〜歯先)	dma	mm	12.8644	-----
三針寸法(ピッチ〜歯)	dm	mm	11.7287	-----
オーガナル寸法	dmh	mm	-----	97.4491
正面かみ合い率	$\varepsilon \alpha$	---	-----	1.7090

図 3.5 ウォームギヤ寸法

### 3.7 歯形計算

#### (1) 標準歯形解析

図 3.4 で与えたホブでホイールの歯形を計算します。

#### (2) 干渉解析

すすみ角が大きい場合には、ウォームとホブのリードが異なるため歯当りが歯面中央に接触することがありません。干渉解析は、干渉部分を除去するためのホブ刃形を解析します。詳しくは 3.20 ホブ刃形解析例をご覧ください。

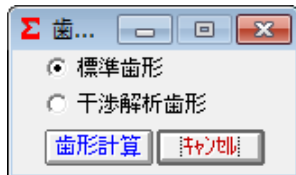


図 3.6 歯形計算

### 3.8 かみ合い図

ウォーム軸方向中央断面の歯形を図 3.7 に示します。この平面図で歯形が食い込んでいない場合でも、中心部以外の歯面で干渉している場合があります。干渉や組み立て誤差による歯当りは、3.9 の歯形レンダリングで確認することができます。

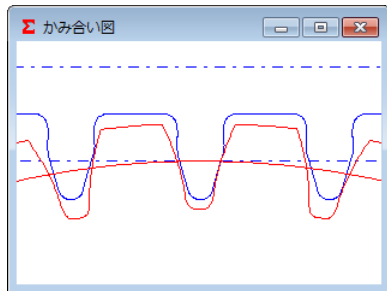


図 3.7 かみ合い図 (軸中央断面)

### 3.9 歯形レンダリング

図 3.7 で干渉がない歯形でも歯形レンダリングでは、図 3.8 および図 3.9 のようにホイール歯面で大きく干渉をしていることが解ります。図 3.10 に、歯形レンダリングのコントロールフォーム

フォームを示します。X,Y,Z 軸回転角で観察角度を変更することができ、Z 軸移動量で図の拡大、縮小が可能です。また、ウォームの軸角やウォーム軸位置のずれによるかみ合いを観察することができます。

コントロールフォームの機能 1 は、①ウォーム軸角調整、②ウォーム軸位置、③中心距離の調整ができ、コントロールフォームの機能 2 は、バックラッシュ角度を表示します。

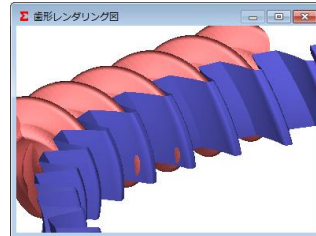


図 3.8 歯形レンダリング(左)

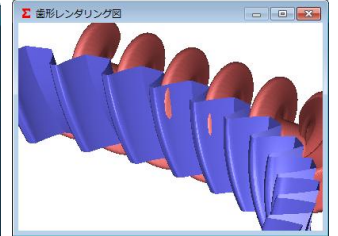


図 3.9 歯形レンダリング(右)

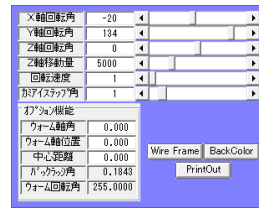


図 3.10 コントロールフォーム

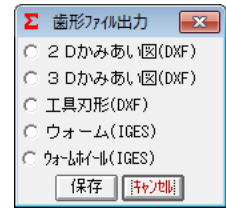
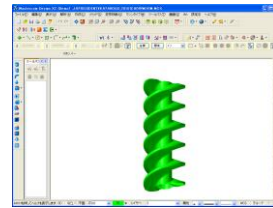


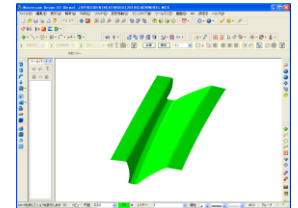
図 3.11 歯形ファイル

### 3.10 歯形データファイル

ウォームとホイールの歯形は、図 3.11 に示すように 4 種類の歯形 CAD データファイルを出力することができます。図 3.12 は、ウォームとホイール歯形の CAD 作図例です。



(a) Worm



(b) Wheel

図 3.12 CAD 作図例(IGES)

### 3.11 強度計算初期設定

ウォームホイールの材料を図 3.13 で選択することができます。図 3.14 に金属材料の選択画面を示します。

金属歯車の強度計算は、JGMA405-01:1978 に基づいて計算します。樹脂歯車の曲げ強度計算は、Lewis の式を基本とし、歯面強さはヘルツの式の応力に基づいて計算します。

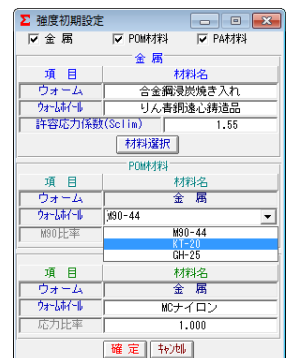


図 3.13 強度初期設定(材料選択)

ウオームホイール	ウオーム	ScLim	Vlim
りん青銅遠心鋳造品	合金鋼 H B 4 0 0	1.95	30.0
	合金鋼 H B 2 5 0	1.12	10.0
	合金鋼 浸炭層入れ	1.27	30.0
りん青銅チル鋳物	合金鋼 H B 4 0 0	1.05	20.0
	合金鋼 H B 2 5 0	0.88	10.0
	合金鋼 浸炭層入れ	1.05	30.0
りん青銅砂型鋳物 または 鍛造品	合金鋼 H B 4 0 0	0.84	20.0
	合金鋼 H B 2 5 0	0.70	10.0
	合金鋼 浸炭層入れ	0.84	20.0
アルミニウム青銅	合金鋼 H B 4 0 0	0.67	15.0
	合金鋼 H B 2 5 0	0.56	10.0
	合金鋼 H B 2 5 0	0.42	5.0
黄銅 普通鋳鉄	鍛造品	0.63	2.5

Vlim: 焼付限界滑り速度(m/s)

図 3.14 金属材料の選択

### 3.12 強度計算

図 3.15 に樹脂(PA)材料(オプション)の強度設定画面を示します。図 3.16 に樹脂材料, 図 3.17 に金属材料の強度計算結果を示します。

項目	記号	単位	ウオーム	ウォール
トルク	T	N·cm	20,000	358,247
回転数	n	rpm	600,000	29,268
寿命繰り返し回数	L	---	10000000	---
潤滑状態	---	---	---	---
潤滑状態	---	---	---	---
周囲温度	t	°C	60,000	---
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	---
摩擦係数	$\mu$	---	0,0500	---

図 3.15 樹脂(PA)の強度諸元設定

項目	記号	単位	数値
周速	V	m/s	0.187
効率	$\eta R$	---	0.874
有効歯幅	bw	mm	9.700
接線力	Ft	N	80.083
荷重分配係数	$\gamma_s$	---	0.585
<b>ウォール曲げ強さ</b>			
弾性率	E	MPa	2095.795
歯形係数	YF	---	0.884
潤滑係数	KL	---	1.315
許容曲げ応力	$\sigma_b$	MPa	19.029
許容接線力	Fa	N	507.106
曲げ強さ	Sfb	---	6.392
<b>ウォールのせん断強さ</b>			
円弧歯厚	So	mm	4.759
断面積	A	mm <sup>2</sup>	87.164
許容せん断応力	$\sigma_s$	MPa	11.417
許容接線力	Fs	N	829.293
せん断強さ	Sfs	---	10.355
<b>ウォールの歯面強さ</b>			
ヘルツ応力	$\sigma_H$	MPa	19.909
許容ヘルツ応力	$\sigma_{Hlim}$	MPa	20.241
歯面強さ	Sfh	---	1.034

図 3.16 樹脂(PA)の強度結果

項目	記号	単位	数値
滑り速度	$v_s$	m/s	0.343
効率	$\eta R$	---	0.847
領域係数	Zo	---	0.792
滑り速度係数	Kv	---	0.637
回転速度係数	Kn	---	0.630
呼び接線力	Ft	N	77.625
許容接線力	Ft lim	N	1609.191
歯面強さ	Sfc	---	20.730

図 3.17 金属の強度結果

### 3.13 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 3.18 に FEM 解析の設定画面では縦弾性係数, ポアソン比, 分割数および荷重の数値変更をすることができます。図 3.19 と図 3.20 にウォームとホイールの FEM 解析結果を示します。

項目	記号	単位	ウォーム	ウォール
材料記号	---	---	金属	MCナイロン
縦弾性係数	E	MPa	205800.0	2095.8
ポアソン比	$\nu$	---	0.300	0.350
縦分割数	Vd	---	12	12
横分割数	Hd	---	25	23
荷重点位置	Pn	---	2	2
荷重	Ft	N	---	80.083
色階調数	nc	---	---	100
変位倍率	Sd	---	---	100

図 3.18 FEM 解析の設定

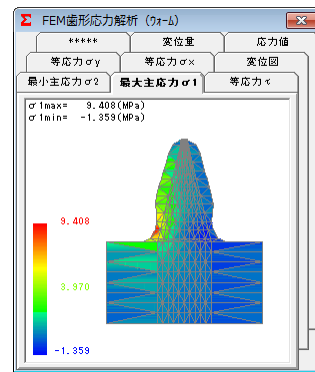


図 3.19 ウォーム( $\sigma_1$ )

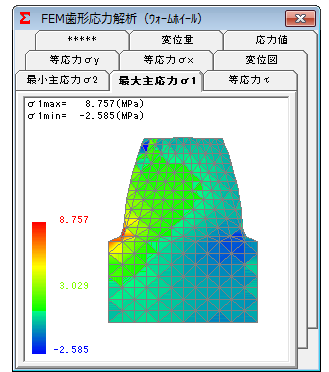


図 3.20 ホイール( $\sigma_1$ )

### 3.14 伝達誤差解析

図 3.21 および図 3.22 に伝達誤差解析の設定画面を示します。ウォームとホイールにピッチ誤差, 軸の振れを与え, ウォームを1回転させたときの回転伝達誤差解析結果を図 3.23 に, ワウフラッタを図 3.24 に示します。次に, ホイールを1回転させたときの回転伝達誤差解析結果を図 3.25 に, ワウフラッタを図 3.26 に示します。

項目	単位	値
ウォーム	$\mu m$	0.00
軸位置公差	$\mu m$	0.00
軸傾斜公差	deg	0.00000
歯すき面公差	deg	0.00000

図 3.21 誤差設定(ウォーム)

項目	単位	値
ウォーム	$\mu m$	0.00
ホイール	$\mu m$	0.00
ピッチ誤差入力方法	---	最大値設定
ピッチ誤差最大値	$\mu m$	5.00
歯すき面公差	deg	0.00000

図 3.22 誤差設定(ホイール)

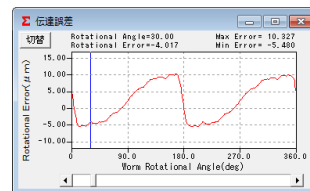


図 3.23 回転伝達誤差 1

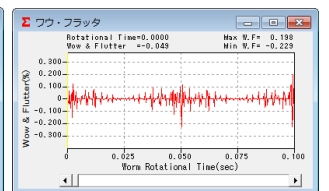


図 3.24 ワウフラッタ 1

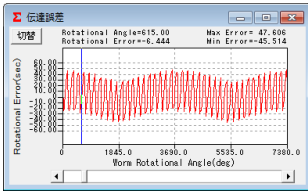


図 3.25 回転伝達誤差 2

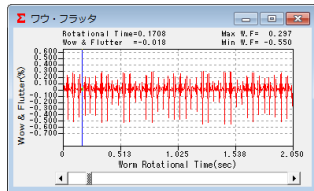


図 3.26 ワウ・フラッタ 2

### 3.15 周波数解析

ウォームを1回転させたときの周波数解析結果を図 3.27 に、ホイールを1回転させたときの周波数解析結果を図 3.28 に示します。

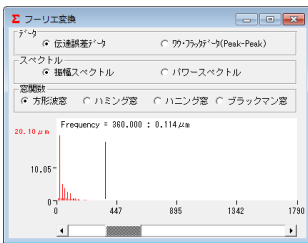


図 3.27 フーリエ解析 1

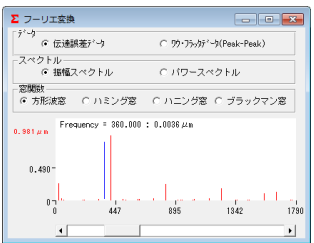


図 3.28 フーリエ解析 2

### 3.16 ヘルツ応力変化とすべり速度

ウォームを1回転させたとき、歯面に発生するヘルツ応力を図 3.29 に、その時のすべり速度グラフを図 3.30 に示します。このグラフは、伝達誤差解析後に有効です。

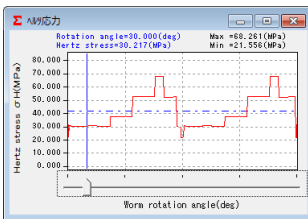


図 3.29 ヘルツ応力

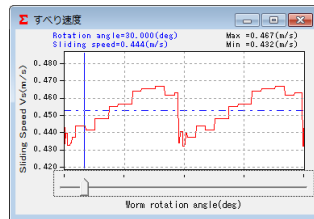


図 3.30 すべり速度

### 3.17 軸間距離変動

両歯面かみ合い試験機のようにウォームとホイールの歯面を押しつけ合いながら回転させたときの中心距離変動をシミュレートします。その結果を図 3.31 (円グラフ) および図 3.32 (折れ線グラフ) に示します。

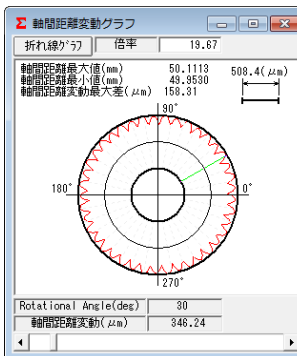


図 3.31 中心距離変動 1



図 3.32 中心距離変動 2

### 3.18 軸受け荷重

軸受け荷重の設定画面を図 3.33 に、計算結果を図 3.34 に示します。

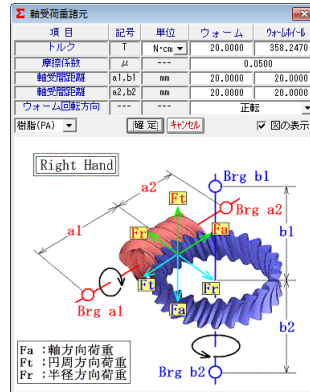


図 3.33 軸荷重の設定

項目	記号	単位	ウォーム	ホイール
トルク	T	N·cm	20,000	358,247
摩擦係数	μ	---	0.0500	---
軸受半径	a1, b1	mm	20,000	20,000
軸受半径	a2, b2	mm	20,000	20,000
ウォーム回転方向	---	---	正転	---

軸受け荷重結果				
＜ウォーム、ホイールに加わる力＞				
項目	記号	単位	ウォーム	ホイール
円周方向に加わる力	Ft	N	40,000	80,083
軸方向に加わる力	Fs	N	80,083	40,000
半径方向に加わる力	Fr	N	23,954	23,954

＜ウォーム側 軸受けに加わる力＞				
項目	記号	単位	Brg a1	Brg a2
スラスト荷重	Fsa	N	80,083	80,083
Ft のラジアル荷重成分	Fra1	N	20,000	20,000
Fr のラジアル荷重成分	Fra2	N	11,977	11,977
Fs のラジアル荷重成分	Fra3	N	-10,010	10,010
ラジアル荷重合力	Fra	N	20,898	23,728

＜ホイール側 軸受けに加わる力＞				
項目	記号	単位	Brg b1	Brg b2
スラスト荷重	Fsb	N	40,000	40,000
Ft のラジアル荷重成分	Frb1	N	11,977	11,977
Fr のラジアル荷重成分	Frb2	N	40,041	40,041
Fs のラジアル荷重成分	Frb3	N	-44,785	44,785
ラジアル荷重合力	Frb	N	51,784	69,428

図 3.34 計算結果

### 3.19 歯当たり解析

ウォームの歯当たり解析例を以下に示します。図 3.35 の、歯当たり解析設定で種々設定が可能です。回転位置分割数は 3~20 を設定することができますが、本例では 4 として図 3.3 歯車の歯当たりを解析しています。図 3.36 は、ウォームとホイールの歯当たりを示しますが、図 3.37~3.40 に 1/4 ピッチの歯当たり 4 種類を示します。ただし、歯当たり解析は、歯のたわみとピッチ誤差は考慮していません。

図 3.8 の歯形レンダリングと図 3.36 の歯当たり紋様が若干異なります。この理由は、本例ではホイールの歯形レンダリングの歯形分割数の 2 倍 (最大 5 倍) の細かさで歯当たり解析をしているためです。

項目	記号	単位	モデル
ホイール回転角度	$\theta r$	deg	0.0000
ホイール操作角度	$\theta s$	deg	0.0000
ウォーム角度誤差 X	$\Delta \phi x$	deg	0.0000
ウォーム角度誤差 Y	$\Delta \phi y$	deg	0.0000
ウォーム角度誤差 Z	$\Delta \phi z$	deg	0.0000
ウォーム取り付け誤差 X	$\Delta X$	mm	0.0000
ウォーム取り付け誤差 Y	$\Delta Y$	mm	0.0000
ウォーム取り付け誤差 Z	$\Delta Z$	mm	0.0000
ウォーム座標細分割数	---	---	0
ホイール座標細分割数	---	---	1
食い込み限界距離	---	$\mu m$	200
回転位置分割数	---	---	4

設定値確認モデル 解析 歯当たり表示 歯当たり数値

ピッチ歯当たり (複数の回転位置で計算)

固定位置歯当たり (回転角度  $\theta r$  位置のみで計算)

色分布最大距離 ---  $\mu m$  200

図 3.35 歯当たり解析設定

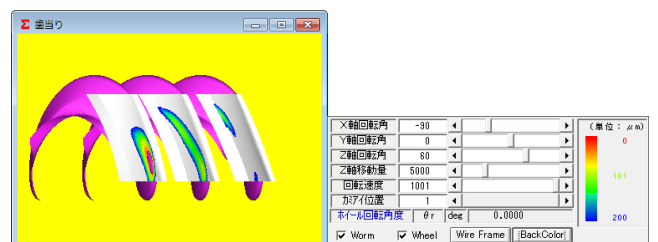


図 3.36 歯当たり (ウォーム&ホイール)



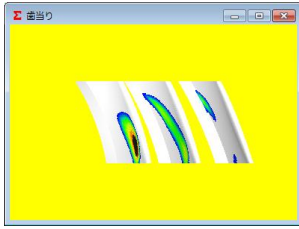


図 3.37 歯当たり 1

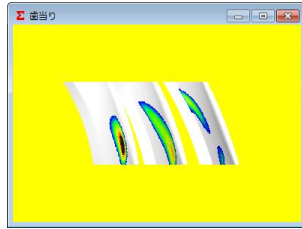


図 3.38 歯当たり 2

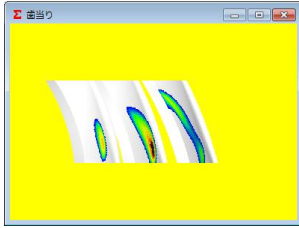


図 3.39 歯当たり 3

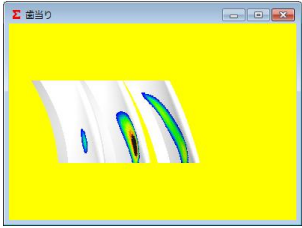


図 3.40 歯当たり 4

図 3.36 の色階調で歯当たり量を確認することができますが、更に、図 3.35 の[歯当たり数値]で図 3.41 のように詳細な歯当たり数値を確認することができます。画面下のコントロールバーで回転位置（本例の場合 1~4）での歯当たりを表示します。

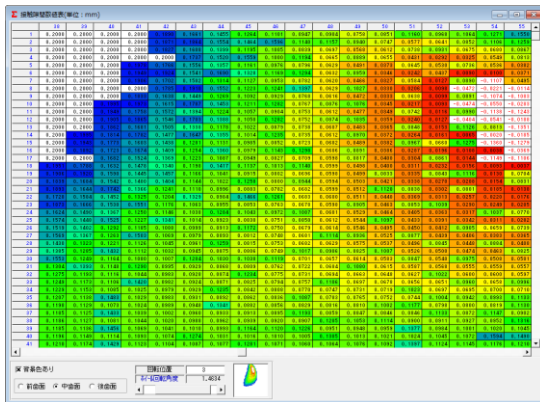


図 3.41 歯当たり数値

### 3.20 ホブ刃形解析例<sup>1)</sup>

#### 3.20.1 はじめに

ウォームとウォームホイールのかみあい時の歯当りは、ウォームの歯形およびウォームホイールを加工するホブの影響を受け、特にウォームのすずみ角が大きい場合やウォームとホブの直径差が大きいと歯当りは大きく偏ることになる。この原因は、ウォームとホブのリード差が原因であり正しい歯当たりを得るためにはホブの歯形を修正することにより解決することができる。以下に、本ソフトウェアを使用して、ウォームギヤの歯当たりとバックラッシュについて検討した結果を示す。

#### 3.20.2 検討歯車

検討歯車の諸元を表 3.2 に示す。ウォームのピッチ円直径 12mm に対し、ウォームホイールを加工するホブ(図 3.42)のピッチ円直径は 36mm のため、軸方向ピッチを合わせるために、ホブのセット角は


	Normal module = 1.8mm
	Number of starts = 1
	Pitch circle dia. = 36mm
	Lead angle = 2.86598deg
	Hob set angle = 14.5916deg
	Hob tip radius = 0.2mm

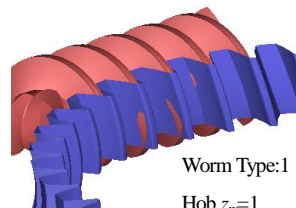
図 3.42 ホブ寸法

表 3.2 ウォームギヤ諸元

Item	Symbol	Unit	Worm	Wheel
Worm type	---	---	1 and 4	
Module	$m_n$	mm	1.8	
Pressure angle	$\alpha_n$	deg	14.5	
Number of starts	$z_w$	---	2	---
Number of teeth	$z$	---	---	40
Pitch circle dia.	$d$	mm	12.000	75.4765
Lead angle	$\gamma$	deg	17.4576	
Addendum modification coefficient	$x_n$	---	---	0.2
Center distance	$a$	mm	44.0983	
Tooth thinning for backlash	$f_n$	mm	0.871	-0.871

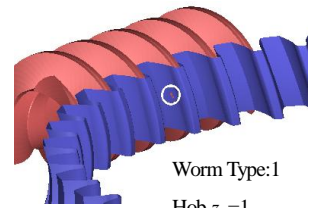
#### 3.20.3 歯形レンダリング

1 形ウォームとウォームホイールの歯形レンダリングを図 3.43 および図 3.44 に示す。無修整ホブの場合、3 箇所大きな干渉が発生しているが、修整ホブを使用した場合は、干渉が無く歯面中央付近のかみ合いとなる。



Worm Type:1  
Hob  $z_w=1$   
(無修整ホブ)

図 3.43 歯形レンダリング



Worm Type:1  
Hob  $z_w=1$   
(修整ホブ)

図 3.44 歯形レンダリング

#### 3.20.4 ホブの直径とバックラッシュの関係

無修整ホブの直径を 12mm から 100mm まで変化させたときのバックラッシュ変化量を図 3.45 に示す。この場合、ホブ直径が 18mm で最も多くの干渉が発生し、ホブ直径が大きくなるに従い干渉量は少なくなる。修整ホブ(図 3.47)によるバックラッシュ変化量は、図 3.46 に示すように大きく改善されほぼ一定となる。

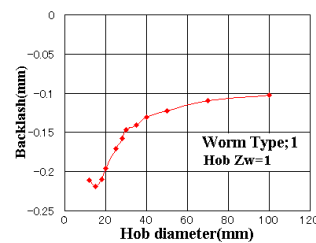


図 3.45 ホブ直径とバックラッシュの関係 1

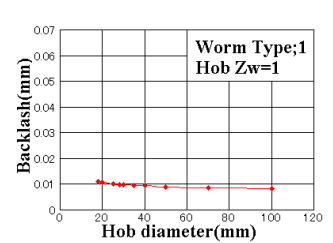


図 3.46 ホブ直径とバックラッシュの関係 2

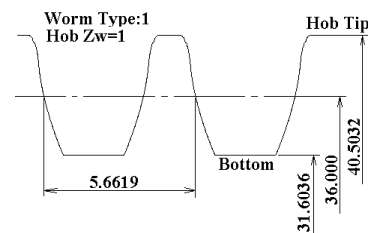


図 3.47 修整ホブ刃形

1) MPT2001-Fukuoka, アムテック(2001)より抜粋