

[3] involuteΣ(Worm Gear Design)

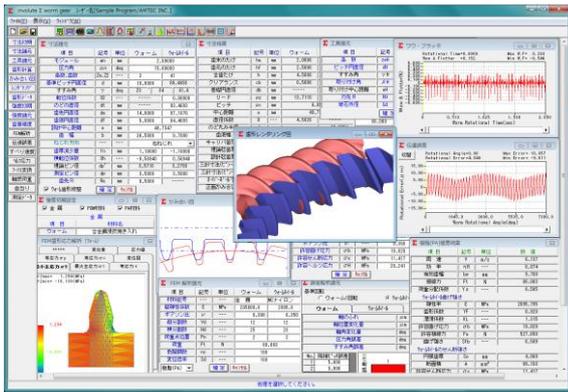


図 3.1 involuteΣ(Worm Gear Design)

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。

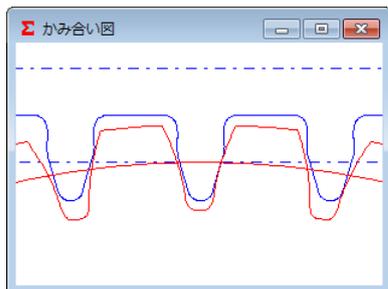


図 3.7 かみ合い図 (軸中央断面)

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。

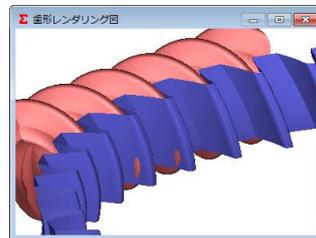


図 3.8 歯形レンダリング(左)

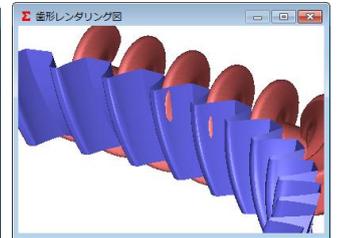


図 3.9 歯形レンダリング(右)



図 3.10 コントロールフォーム

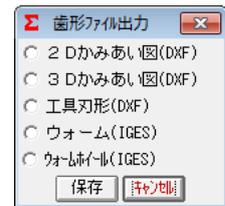
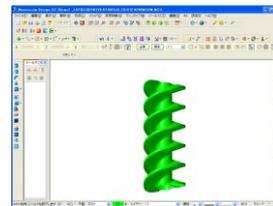


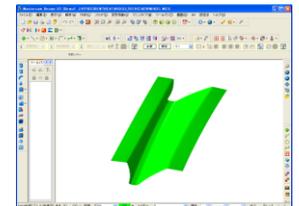
図 3.11 歯形ファイル

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。

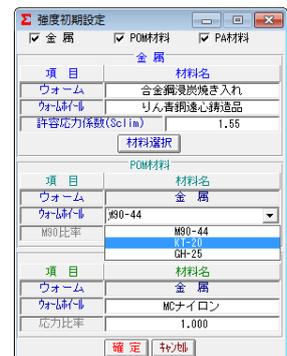


図 3.13 強度初期設定(材料選択)

| 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 浸炭鋼 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 浸炭鋼 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 浸炭鋼 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 | --- | --- | グリス | --- |
| 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 | μ | --- | 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 | ηR | --- | 0.874 |
| 有効歯幅 | bw | mm | 9.700 |
| 接線力 | Ft | N | 80.083 |
| 荷重分配係数 | γ_s | --- | 0.585 |
| ウォール曲げ強さ | | | |
| 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 | σ_b | MPa | 19.029 |
| 許容接線力 | Fa | N | 507.106 |
| 曲げ強さ | Sfb | --- | 6.392 |
| ウォールのせん断強さ | | | |
| 円弧歯厚 | So | mm | 4.759 |
| 断面積 | A | mm ² | 87.164 |
| 許容せん断応力 | σ_s | MPa | 11.417 |
| 許容接線力 | Fs | N | 829.293 |
| せん断強さ | Sfs | --- | 10.355 |
| ウォールの歯面強さ | | | |
| ヘルツ応力 | σ_H | MPa | 19.909 |
| 許容ヘルツ応力 | σ_{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 | ηR | --- | 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 | ν | --- | 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

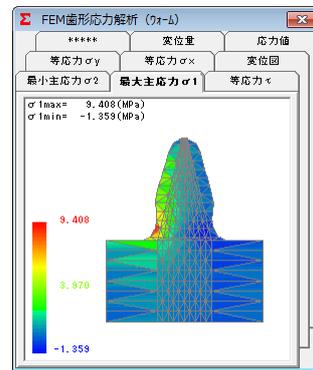


図 3.19 ウォーム(σ_1)

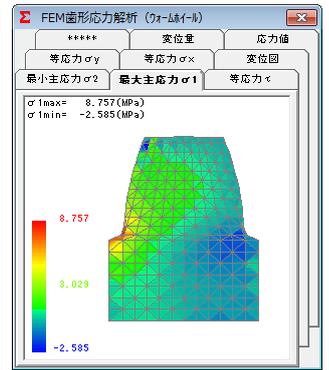


図 3.20 ホイール(σ_1)

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 | 値 |
|-------|---------|
| ウォーム | 0.00 |
| ホイール | 0.00 |
| 軸位置公差 | 0.00000 |
| 軸傾斜公差 | 0.00000 |
| 歯面再研磨 | 0.00000 |

図 3.21 誤差設定(ウォーム)

| 項目 | 値 |
|-----------|---------|
| ウォーム | 0.00 |
| ホイール | 0.00 |
| ピッチ誤差入力方法 | 最大値設定 |
| ピッチ誤差最大値 | 0.00000 |
| 歯面再研磨 | 0.00000 |

図 3.22 誤差設定(ホイール)

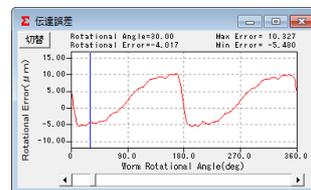


図 3.23 回転伝達誤差 1

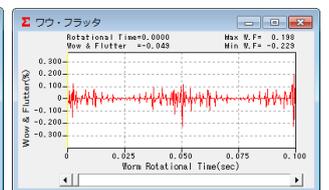


図 3.24 ワウフラッタ 1

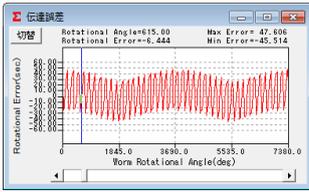


図 3.25 回転伝達誤差 2

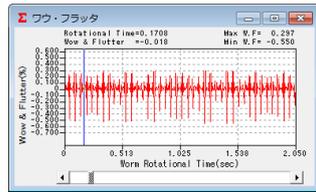


図 3.26 ワウ・フラッタ 2

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。

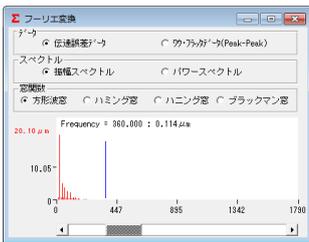


図 3.27 フーリエ解析 1

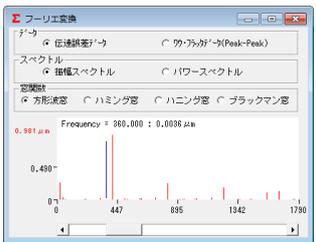


図 3.28 フーリエ解析 2

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。

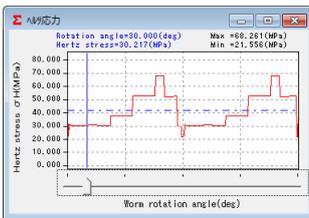


図 3.29 ヘルツ応力

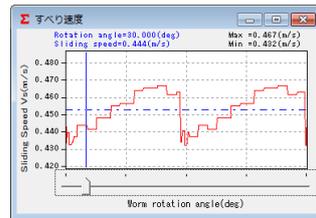


図 3.30 すべり速度

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。

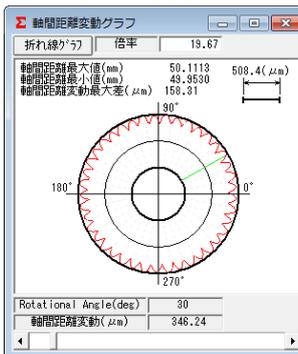


図 3.31 中心距離変動 1

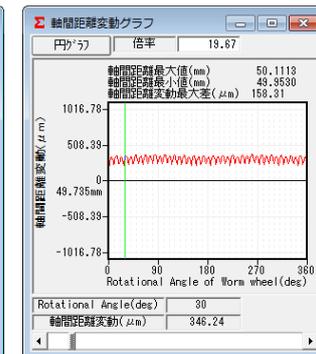


図 3.32 中心距離変動 2

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。

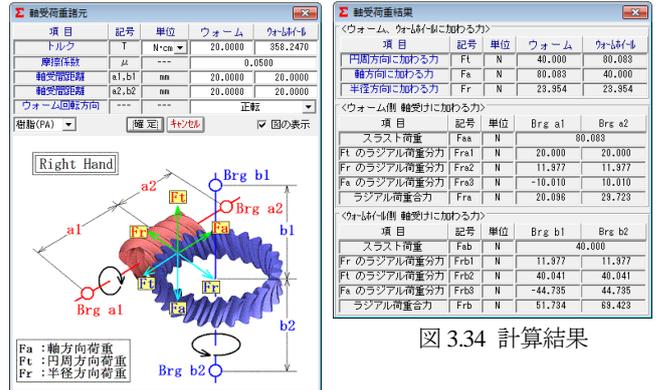


図 3.33 軸荷重の設定

| 項目 | 記号 | 単位 | ウォーム | ホイール |
|---------------|--------|------|--------|----------|
| トルク | T | N·cm | 20,000 | 358,2470 |
| 摩擦係数 | μ | --- | 0.0500 | --- |
| 軸受荷重距離 a1, b1 | a1, b1 | mm | 20,000 | 20,000 |
| 軸受荷重距離 a2, b2 | a2, b2 | mm | 20,000 | 20,000 |
| ウォーム回転方向 | --- | --- | 正転 | --- |

| 軸受荷重結果 | | | | |
|------------------|----|----|--------|--------|
| ＜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 |
| 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 | 20,088 | 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 |
| Ft のラジアル荷重成分 | Frb1 | N | 11,977 | 11,977 |
| Ft 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 | 89,428 |

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。



図 3.35 歯当たり解析設定

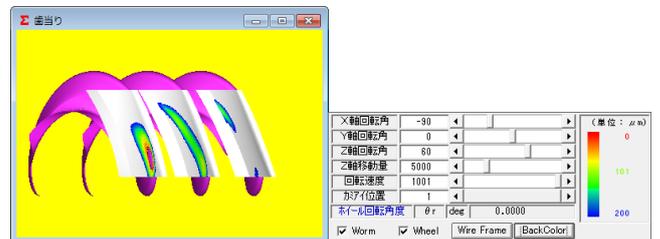


図 3.36 歯当たり(ウォーム&ホイール)

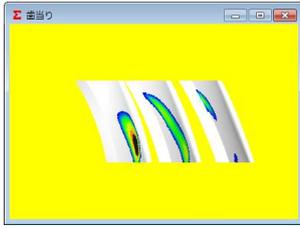


図 3.37 歯当たり 1

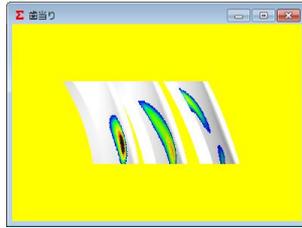


図 3.38 歯当たり 2

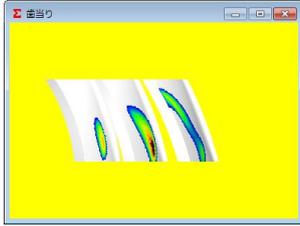


図 3.39 歯当たり 3

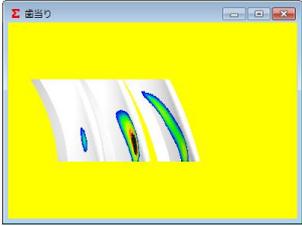


図 3.40 歯当たり 4

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。

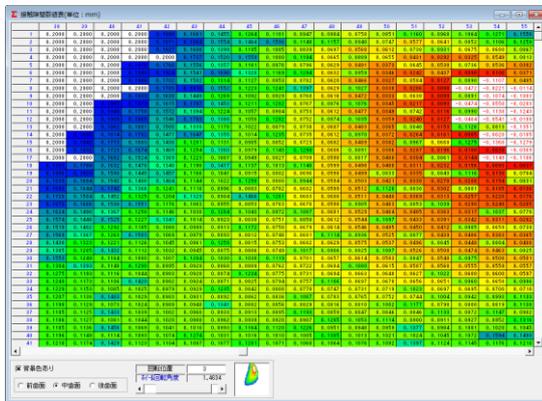


図 3.41 歯当たり数値

3.20 ホブ刃形解析例¹⁾

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 |

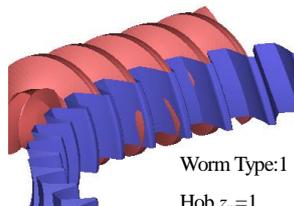
図 3.42 ホブ寸法

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 | α_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 | γ | 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 |

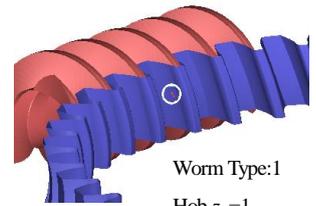
3.20.3 歯形レンダリング

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 箇所に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。

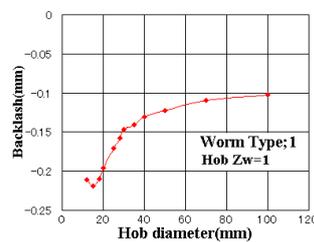


図 3.45 ホブ直径とバックラッシュの関係 1

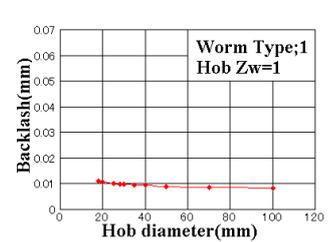


図 3.46 ホブ直径とバックラッシュの関係 2

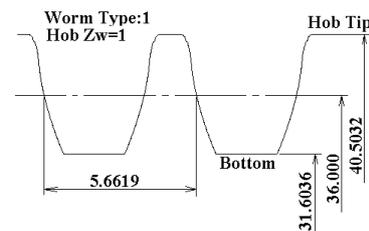


図 3.47 修整ホブ刃形

1) MPT2001-Fukuoka, アムテック(2001)より抜粋