[45] CT-FEM Opera iii (歯車かみ合い応力解析)



🗵 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、 $m_n=2, z_1=z_2=20, a=20^\circ, \beta=11^\circ, b_1=b_2=10$ 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** では 1 分 45 秒×40=70 分要します. しかし, **CT-FEM Opera** ii では CPU 数が 4 個(コア数 2) を持 つ PC であれば 40 個計算しても 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、使 用したコンピュータは、Microsoft Surface Pro3 (CPU: Intel[®] CoreTM i7-4650U, Memory, 8.0GB です.



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、スカッフィン 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 | トウェフ | アの構成 |
|--------|----|------|------|
|--------|----|------|------|

| 項 目 | 機能 |
|-------------------------------|---------|
| <1>基準ラックの設定 | 0 |
| <2>歯車寸法 | 0 |
| <3>歯車かみ合い図 | 0 |
| 〈4〉歯面修整 | 0 |
| <5>3D 応力分布 | 0 |
| <6>歯面評価(1) | |
| 摩擦係数,油膜厚さ,発熱量, | 0 |
| 損失動力, PV 値, PVT 値 | |
| <7>スカッフィング発生確率 ⁽¹⁾ | 0 |
| 〈8〉摩耗発生確率(1) | 0 |
| <9>寿命時間 ⁽¹⁾ | 0 |
| <10>効率(1) | 0 |
| <11>3D-FEM 歯形応力解析 | 0 |
| <12>端部解析 | 0 |
| <13>回転伝達誤差解析,フーリエ解析,CSV | 0 |
| <14>内歯車 | 0 |
| 〈15〉最適歯面修整の生成機能 | \odot |
| <16>歯形データ出力 | 0 |

(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



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>オーバーピン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.



図 45.4 諸元設定

| 💯 寸法結果 | | | | | | |
|-----------------|-----|-----|----------|-----------|--|--|
| 「黄車寸法」かみ合い寸法 | | | | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear | | |
| 正面モジュール | mt | mm | 3 | .31013 | | |
| 正面圧力角 | αt | deg | 21.88023 | | | |
| 基礎円筒ねじれ角 | βb | deg | 23.39896 | | | |
| リード | PZ | mm | 334.5139 | 936.6388 | | |
| 転位量 | ×m | mm | 0.9000 | -0.6000 | | |
| 全歯たけ | h | mm | 6.7500 | 6.7500 | | |
| 最小心ボリュート直径(TIF) | dt | mm | 46.6316 | 133.0264 | | |
| 最大インボリュート直径 | dh | mm | 56.8520 | 143.2256 | | |
| 正面法線ビッチ | pbt | mm | 9.6500 | | | |
| 正面円弧歯厚 | st | mm | 5.9224 | 4.7176 | | |
| またぎ歯数 | ZM | | 3 | 7 | | |
| 基準またぎ歯厚 | w | mm | 23.59028 | 59.49037 | | |
| 設計またぎ歯厚 | w' | mm | 23.59028 | 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

| 🖌 寸法結果 | | | | - • • | |
|--------------|-----------------|-----|---------|----------|--|
| 歯車寸法(かみ合い寸法) | | | | | |
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear | |
| 正面かみ合い圧力角 | awt | deg | 22. | 85269 | |
| かみ合いねじれ角 | Aw deg 25.15362 | | | | |
| かみ合いビッチ円直径 | dw | 000 | 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 | εα | | 1.1256 | | |
| 重なりかみ合い率 | εβ | | 1.3452 | | |
| 全かみ合い率 | εγ | | 2.4708 | | |
| すべり率(歯先) | σa | | 0.5659 | 0.4787 | |
| すべり率(歯元) | σb | | -0.9183 | -1.3035 | |
| 正面法線バックラッシ | Jt | mm | 0.2797 | | |
| バックラッシ角度 | Jθ | deg | 0.69561 | 0.24843 | |
| 最大接触直径 | dja | 00 | 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、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.





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 6μm のピッチ誤差を与え て解析する例を示します.



45.8 歯形歯すじ修整設定

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 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.







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読込 こともできます.



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、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)を重ねた合わせた図です.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 θ_{s} =-28.578°,終了角度 θ_{e} =36.102°(最 大接触角度 θ_{max} =64.68°)を60分割し、食い違い角誤差を ϕ_1 =0.01°, 平行度誤差を ϕ_1 =-0.001°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.

| 💋 歯面応力解析条(| 特設定 | | - • • | |
|------------|------------|-----|-----------|---------------|
| 開始,終了角度(θ: | s,θe)誤 | 定 | | |
| 1ビッチ角 | 腹 | 日本 | 大接触角度 | |
| 解析角度項目 | 記号 | 単位 | 数 値 | |
| 開始角度 | θs | deg | -28.578 | |
| 終了角度 | θe | deg | 36.102 | |
| 角度分割数 | N | | 60 | |
| 誤差項目 | 記号 | 単位 | 数 値 | |
| 食い違い誤差 | <i>ф</i> 1 | deg | 0.0100 | |
| 平行度誤差 | φ2 | deg | -0.0010 | ★い違い読差+1 |
| | 確定 | キャン | 2ル 戻す クリア | 平行度誤差 #2 食い違い |

図 45.18 歯面解析設定画面と φ1 と φ2

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 θ₀=14.177°時であることが解ります.



| | 操作画面 | x |
|--------------|----------------------------|----|
| | 基本操作] 誤差設定 色分布範囲指定 | |
| | 縦方向回転 -22 < | ÷. |
| | ▶ 横方向回転 3 < | ٠ |
| | ズーム -250.00 イ | ۴ |
| | X方向移動 -5.400 < | ۰ |
| | Y方向移動 0.000 < | |
| 1 | | 7 |
| ピッチ誤差考慮, | 補助フォーム | |
| 図 45.19 歯面応力 | $(\sigma_{Hmax}=2295 MPa)$ | |





(h)ギヤ

(a)ピニオン

図 45.20 歯面応力 (σ_{Hmax}=2295MPa)





(a) σ_{Hmax} =2295MPa(θ_{p} =14.177°) (b) σ_{Hmin} =1587MPa(θ_{p} =-11.04°) 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.



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 フィング発生確率、摩耗の発生確率を図 45.34 に示します.



PV_{max}=143(MPa-m/s) 図 45.32 PV 値

図 45.33 PVT 値

| 🚺 損傷確率・損失 🔹 📼 🔳 | | | | | | |
|-----------------|-------|-----|-------|--|--|--|
| 項目 | 記号 | 単位 | 数 値 | | | |
| スカッフィング発生確率 | ηs | % | < 5 | | | |
| 摩耗の発生確率 | ηf | % | 24.95 | | | |
| 動力損失 | ηe | % | 1.39 | | | |
| 図 4 | 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 45.35、端部を R=1.0mm 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 σ_{Hmax}= 4075MPa 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 45.26 のように歯先部で 58.5℃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℃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 45.36 歯面応力(端部解析, σ_{Hmax}=4075MPa)



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.



図 45.38 メッシュモデル設定



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 45.41

要素節点表

図 45.40 FEM 要素情報



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°~36.102°)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□のチェックには歯面応力が最も大き い θ_P=14.177°(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かみ 合い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.



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, 6 μ m) 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 θ_p =20.75°で,その最大応力は $\sigma_{\text{Imax}(P)}$ =555MPa と $\sigma_{\text{Imax}(G)}$ =638MPa です.この角度での解析一覧表を図 45.51 に示します.



解析結果一覧表でピニオンの最大主応力の最大値 σ_{Imax}= 555MPa 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(zd=0mm)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.





(a)ピニオン σ_{1max}=555MPa
(b) ギヤ σ_{1max}=638MPa
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 σ_{Him}=2000MPa,曲 げ強さに対する許容応力値を σ_{Flim} =400MPaとしたときの寿命時間 を図 45.55 に示します.



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.



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様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 $\phi_2=-0.001^\circ$ として 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 45.61~45.65 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 σ_{Hmax} =2295MPa (図 45.20) から σ_{Hmax} = 1637MPa 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.







| 💹 寿命計算 👘 💼 🔤 🔤 | | | | | | |
|-----------------|---------------------|-------|----------|----------|--|--|
| 項目 | 記号 | 単位 | Pinion | Gear | | |
| 歯面最大応力 | $\sigma_{\rm Hmax}$ | MPa | 1637.395 | 1630.665 | | |
| 最大曲げ応力(σ1) | σ1 | MPa | 431.274 | 456.083 | | |
| 回転速度 | n | 1/min | 1200.000 | 428.571 | | |
| 許容ヘルツ応力 | σHlim | MPa | 2000.000 | 2000.000 | | |
| 許容曲げ応力 | σFlim | MPa | 400.000 | 400.000 | | |
| 通負荷の回数 | Ne | | 1 | | | |
| 材料の窒化の有無 | | | 非窒化材料 | | | |
| 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 | No | | 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 | No | | 2.21E+06 | 1.38E+06 | | |
| 予想寿命時間 | Lo | hrs | 3.07E+01 | 5.38E+01 | | |
| 計算 キャンセル 戻す クリア | | | | | | |
| 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.



確定 キャンセル 標準 戻す クリア

図 45.75 歯面要素設定



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.