

[45] CT-FEM Opera iii (歯車かみ合い応力解析)

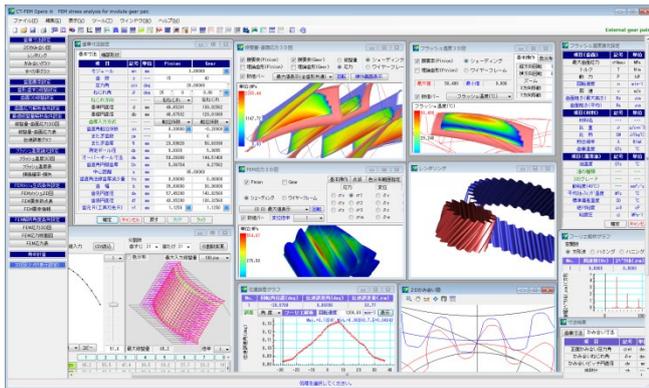
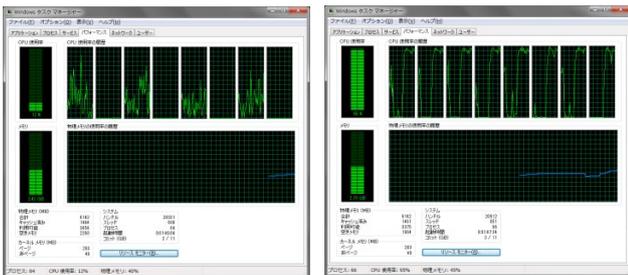


図 45.1 CT-FEM Opera iii

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、 $m_n=2, z_1=z_2=20, \alpha=20^\circ, \beta=11^\circ, b_1=b_2=10$ 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(旧)では1分45秒 $\times 40=70$ 分要します。しかし、CT-FEM Opera iii(新)では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、比較に使用したコンピュータは、Microsoft Surface Pro3(CPU: Intel® Core™i7-4650U Memory, 8.0GB, 2コア4スレッド 動作周波数1.70GHz ターボブースト時3.3GHz)です。



(a) 並列処理していない (b) 並列処理をしている

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uff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、はずば歯車(外歯車, 内歯車)

表 45.1 ソフトウェアの構成

項目	機能
<1>基準ラックの設定	○
<2>歯車寸法	○
<3>歯車かみ合い図	○
<4>歯面修整	○
<5>3D 応力分布	○
<6>歯面評価 ⁽¹⁾ 摩擦係数, 油膜厚さ, 発熱量, 損失動力, PV 値, PVT 値	○
<7>スカuffィング発生確率 ⁽¹⁾	○
<8>摩耗発生確率 ⁽¹⁾	○
<9>寿命時間 ⁽¹⁾	○
<10>効率 ⁽¹⁾	○
<11>3D-FEM 歯形応力解析	○
<12>端部解析	◎
<13>回転伝達誤差解析, フーリエ解析, CSV	◎
<14>内歯車	◎
<15>最適歯面修整の生成機能	◎
<16>歯形データ出力	◎
<17>動的起振力解析[45.20項]	◎

(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



図 45.3 基準ラック

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



図45.5 寸法結果1



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ます。また、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。

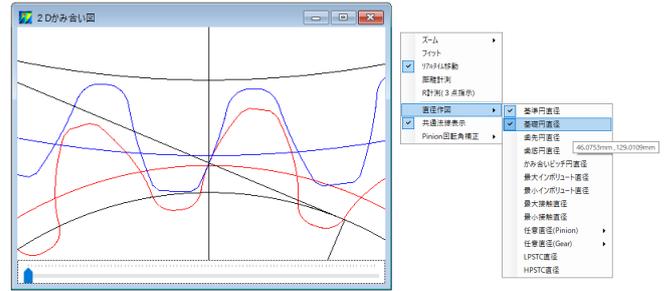


図45.7 正面かみ合い図

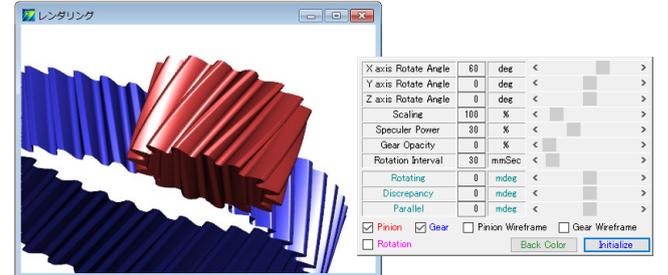


図45.8 歯形レンダリング

45.6 かみ合いグラフおよびすべり率グラフ

図45.9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9.749mm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。



図45.9 かみ合いグラフ

項目	記号	単位	数値(Pinion)	数値(Gear)
接触直径	d'	mm	51.0000	139.9687
作用線長さ	L	mm	10.9323	25.9822
ロールアングル	ϕ	deg	27.1888	23.0604
回転角度	θ	deg	3.0423	*****

図45.10 回転角度計算

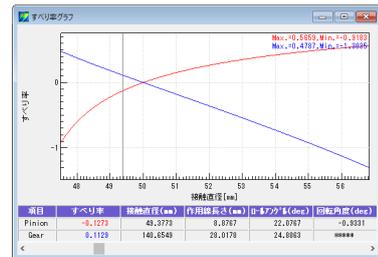


図45.11 すべり率グラフ

45.5 2D かみ合い図, レンダリング

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

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高い場合には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6 μm のピッチ誤差を与えて解析する例を示します。



図 45.12 歯面要素設定

45.8 歯形歯すじ修整設定

定形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。

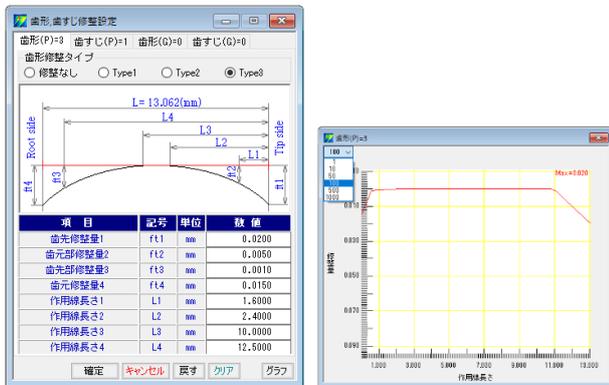


図 45.13 歯形修整とグラフ(x100)の例

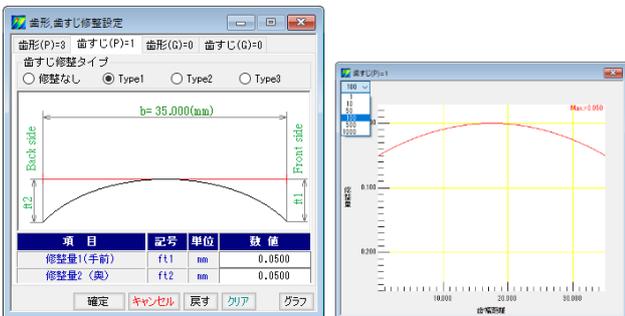
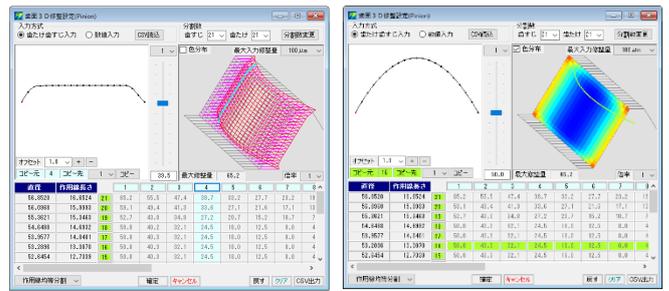


図 45.14 歯すじ修整とグラフ(x100)の例

45.9 歯面 3D 修整設定

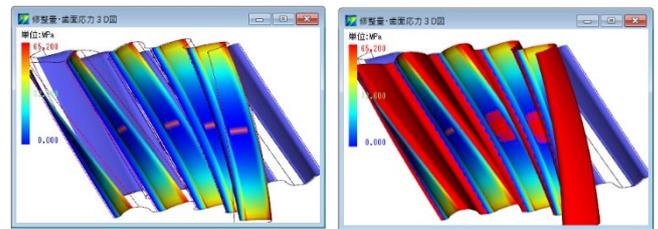
3D 歯面修整は図 45.15 のように直接入力することもできますし、図 45.13 および図 45.14 で設定した修整を引き継ぐこともできます。図 45.15 は、図 45.13 と図 45.14 で設定した修整を 3D 表示したものです (ギヤは無修整のため省略)。また、この歯形を CSV ファイルで出力 [CSV出力] することも、歯車検査結果データ (CSV ファイル) を読み込む [CSV読込] こともできます。



(a) 設定&表示画面 (b)色分布
図 45.15 歯面修整

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ます。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

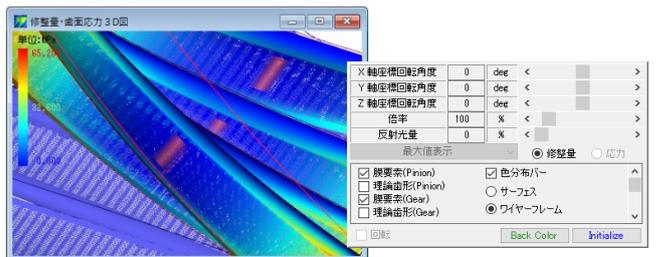


図 45.17 歯面要素メッシュモデル (図 45.12 での分割)

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 $\theta_s = -28.578^\circ$ 、終了角度 $\theta_e = 36.102^\circ$ (最大接触角度 $\theta_{max} = 64.68^\circ$) を 60 分割し、食い違い角誤差を $\phi_1 = 0.01^\circ$ 、平行度誤差を $\phi_2 = -0.001^\circ$ 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。

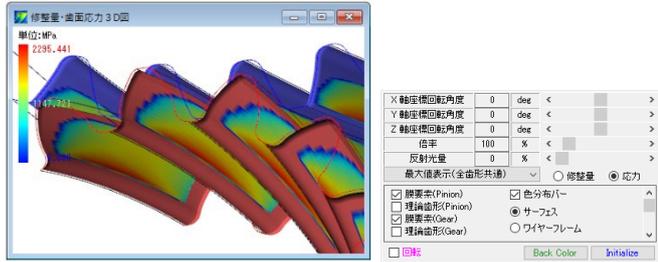


図 45.18 歯面解析設定画面と ϕ_1 と ϕ_2

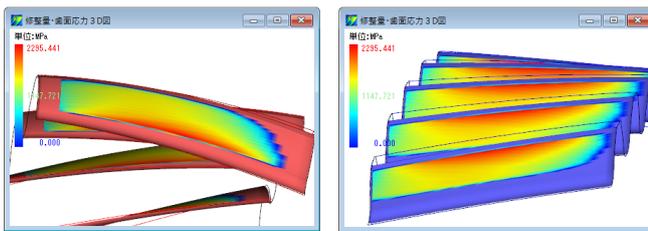
45.12 歯面応力解析結果（修整量・歯面応力 3D 図）

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 $\theta_p=14.177^\circ$ 時であることが解ります。

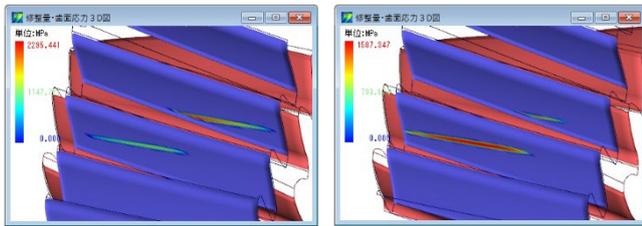


ピッチ誤差考慮，補助フォーム
図 45.19 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$)



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 45.20 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$)

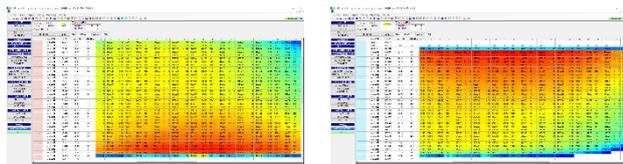


(a) $\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}(\theta_p=14.177^\circ)$ (b) $\sigma_{Hmin}=1587\text{MPa}(\theta_p=-11.04^\circ)$

図 45.21 歯面応力の最大値と最小値

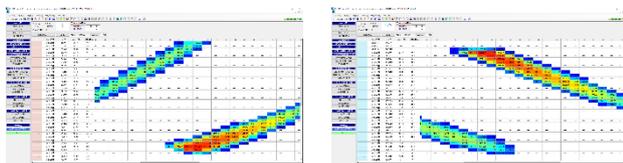
歯面全体の応力分布（セル表示）を図 45.22 に示します。ピニオンの場合、歯幅方向に 98 個（歯幅面取り部含む）、歯たけ方向に 90 個（歯先面取り含む）の領域の応力を表示しますので歯面位置における応力値が解ります。また、ここに表示している応力値は CSV ファイル「CSV出力」で出力することができます。

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。



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 45.22 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$)



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 45.23 $\theta_p=14.177^\circ$ の応力 ($\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$)

45.13 フラッシュ温度、摩擦係数、油膜厚さ 他

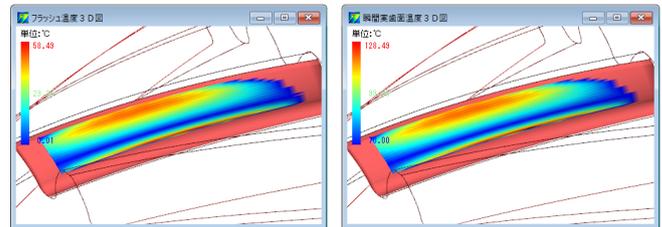
フラッシュ温度を計算するときの設定画面を図 45.24 に示します。ここでは、回転速度、歯面粗さの他に材料（熱伝導率）を選択します（図 45.24a）。潤滑油の種類は鉱物油、合成油を選択することができますが、規格外の場合は、任意に動粘度や油の平均温度などを設定することができます。また、図 45.25 のように潤滑油物性を設定することができます。ピニオン歯面のフラッシュ温度、摩擦係数、油膜厚さなどの結果を図 45.26~45.33 に示します。



図 45.24 フラッシュ温度設定画面 図 45.24a 材料と潤滑油



図 45.25 潤滑油特性の例（オプション）

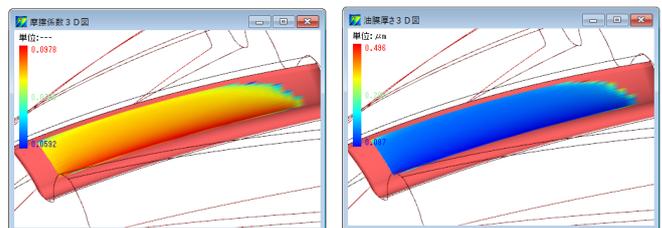


$T_{ff}=58.5(^\circ\text{C})$

$T_{fB}=128.5(^\circ\text{C})$

図 45.26 フラッシュ温度

図 45.27 瞬間実歯面温度



$\mu_{max}=0.098$

$\lambda_{min}=0.087(\mu\text{m})$

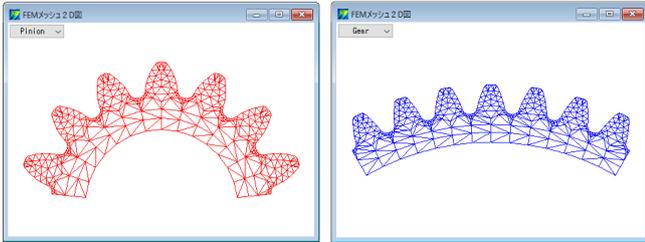
図 45.28 摩擦係数

図 45.29 油膜厚さ

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



(a)ピニオン (b)ギヤ

図 45.39 2D メッシュモデル

項目	記号	単位	Pinion	Gear
最大面圧(総要素応力)	σ_h	MPa	2285.44	
要素数	---	---	64497	53553
節点数	---	---	108875	98782
最大曲げ応力(σ_1)	σ_1	MPa	554.67	637.96
最大曲げ要素番号	---	---	37762	39212

図 45.40 FEM 要素情報

節点座標(P)	節点座標(Q)	要素節点(P)	要素節点(Q)
1	2	1	2
2	3	2	3
3	4	3	4
4	5	4	5
5	6	5	6
6	7	6	7
7	8	7	8
8	9	8	9
9	10	9	10
10	11	10	11
11	12	11	12
12	13	12	13
13	14	13	14

図 45.41 要素節点表

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。

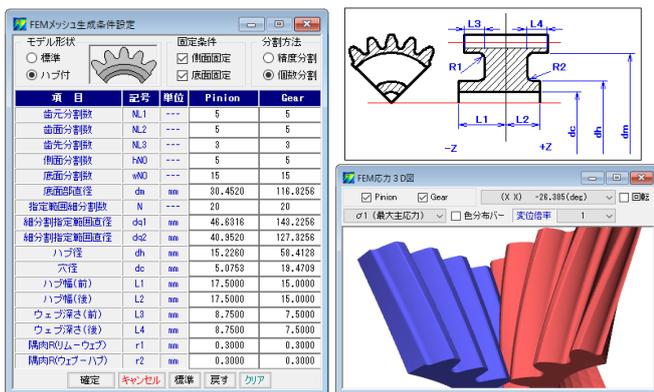


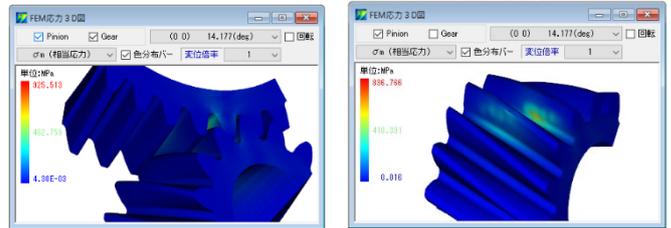
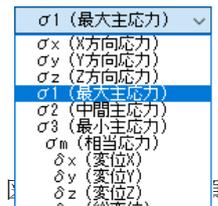
図 45.42 リム・ハブモデル

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 $\theta_p=14.177^\circ$ (図 45.21) の角度も含まれています。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組み合わせの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。

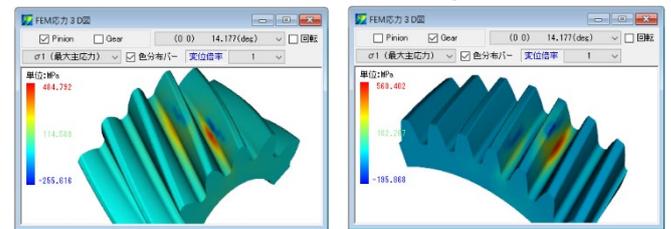


図 45.43 FEM 解析角度の設定



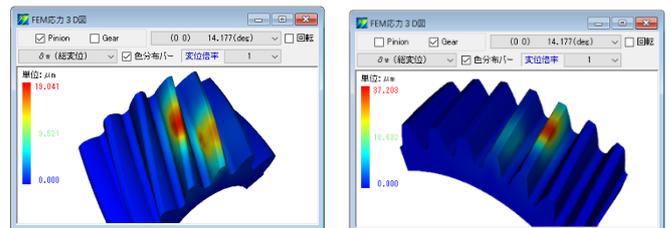
(a) 1 対歯車 (b) ピニオン $\sigma_{max}=837\text{MPa}$

図 45.45 σ_m (ミーゼス応力), $\theta_p=14.177^\circ$



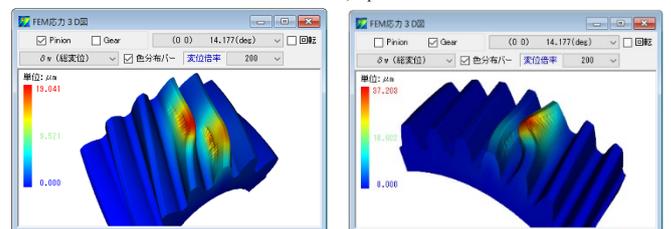
(a) ピニオン $\sigma_{1max}=485\text{MPa}$ (b) ギヤ $\sigma_{1max}=560\text{MPa}$

図 45.46 最大主応力, $\theta_p=14.177^\circ$



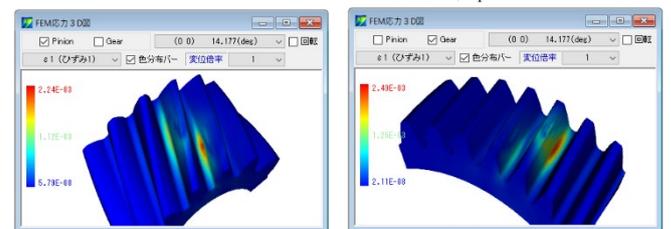
(a) ピニオン $\delta_{max}=19.0\mu\text{m}$ (b) ギヤ $\delta_{max}=37.2\mu\text{m}$

図 45.47 変位, $\theta_p=14.177^\circ$



(a) ピニオン (b) ギヤ

図 45.48 変位 (拡大作図, 200 倍), $\theta_p=14.177^\circ$



(a) ピニオン $\epsilon_{1max}=2.24 \times 10^{-3}$ (b) ギヤ $\epsilon_{1max}=2.49 \times 10^{-3}$

図 45.49 ひずみ, $\theta_p=14.177^\circ$

図 45.43 ではピニオン回転角度を $\theta_p=-28.578 \sim 36.102^\circ$ (図 45.18) 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

タッチ誤差 (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 $\theta_p=20.75^\circ$ で, その最大応力は $\sigma_{1max(P)}=555\text{MPa}$ と $\sigma_{1max(G)}=638\text{MPa}$ です. この角度での解析一覧表を図 45.51 に示します.

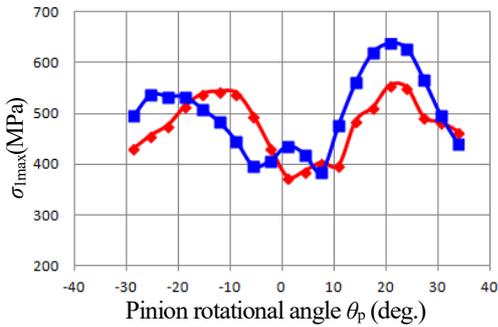


図 45.50 歯元応力変化

要素番号	σ_x	σ_y	σ_z	τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{zx}	σ_1	σ_2	σ_3
1	37762	459.50	100.82	139.17	159.41	0.76	10.81	554.67	139.35
2	37763	501.53	88.56	142.32	141.55	-0.87	3.92	550.57	141.07
3	37761	486.39	95.79	191.96	181.85	0.33	11.50	547.90	139.23
4	37763	501.55	82.21	142.42	132.61	-1.81	0.95	547.85	138.42
5	37763	487.19	93.59	135.67	155.80	0.24	8.03	547.84	135.35
6	37767	497.44	78.11	138.80	135.69	-1.05	1.38	544.84	134.86
7	47163	135.44	444.36	152.05	189.82	16.37	13.39	543.15	148.31
8	37760	489.32	94.42	128.39	190.94	1.39	13.00	542.89	129.38
9	47164	132.50	440.60	148.17	190.94	15.15	11.49	542.81	143.65
10	47165	138.05	438.85	164.50	190.45	14.60	10.82	542.29	148.86
11	38117	402.66	172.57	118.43	228.34	-1.81	12.87	541.56	128.14
12	47519	68.39	517.37	133.33	181.76	37.00	20.09	541.46	139.38
13	47570	79.19	514.14	139.17	186.22	37.86	18.81	541.05	149.60

図 45.51 解析結果一覧

解析結果一覧表 (図 45.51) でピニオンの最大主応力の最大値 $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$ 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 45.52a 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 ($z_d=0\text{mm}$) 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.

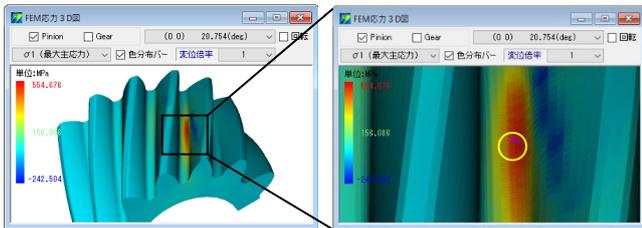


図 45.52 ピニオン σ_{1max} の位置, $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$,

補助フォーム

X 軸座標回転角度 0 deg < >

Y 軸座標回転角度 0 deg < >

Z 軸座標回転角度 0 deg < >

倍率 100 % < >

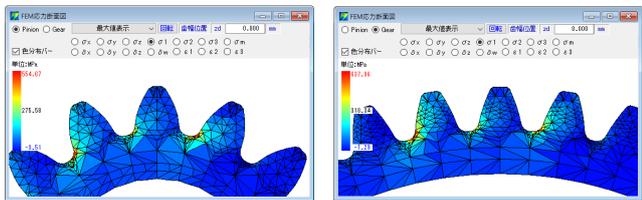
反射光量 0 % < >

σ_1 (最大主応力) (0.0) 20.754(deg)

項目	Pinion	Gear	点滅
点滅要素番号	37762		点滅
点滅節点番号			中止

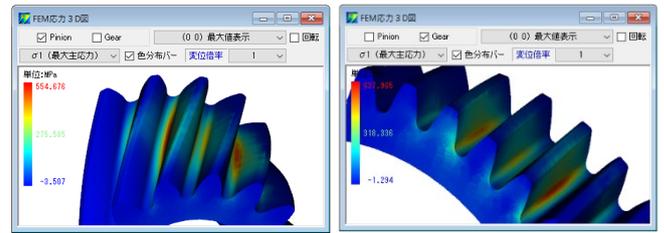
Back Color Initialize

図 45.52a 補助フォーム

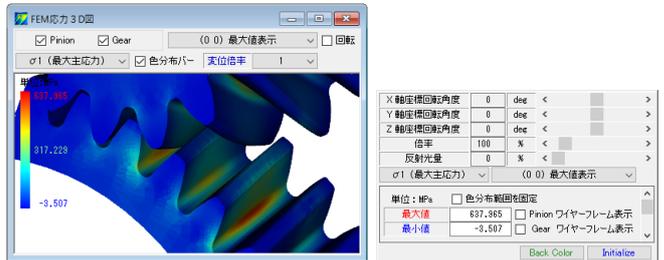


(a) ピニオン, $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$ (b) ギヤ, $\sigma_{1max}=638\text{MPa}$

図 45.53 FEM 断面図($z_d=0\text{mm}$)



(a) ピニオン $\sigma_{1max}=555\text{MPa}$ (b) ギヤ $\sigma_{1max}=638\text{MPa}$



(c) 一對歯車, σ_1

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 $\sigma_{Hlim}=2000\text{MPa}$, 曲げ強さに対する許容応力値を $\sigma_{Flim}=400\text{MPa}$ としたときの寿命時間を図 45.55 に示します.

項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯面最大応力	σ_{Hmax}	MPa	2238.365	2295.440
最大曲げ応力(σ_1)	σ_1	MPa	554.675	637.364
回転速度	n	1/min	1200.000	428.571
許容ヘルツ応力	σ_{Hlim}	MPa	2000.000	2000.000
許容曲げ応力	σ_{Flim}	MPa	400.000	400.000
過負荷の回数	Nc	---	1	---
材料の硬化の有無	---	---	非硬化材料	---
使用状態	---	---	一般	---
項目(名前)	記号	単位	Pinion	Gear
予想応力繰り返し係数	ZN'	---	1.119	1.148
予想寿命負荷回数	Nc	---	1.34E+06	8.54E+05
予想寿命時間	Lc	hrs	1.86E+01	3.32E+01
項目(曲げ)	記号	単位	Pinion	Gear
予想応力繰り返し係数	ZN'	---	1.887	1.595
予想寿命負荷回数	Nc	---	2.69E+05	8.28E+04
予想寿命時間	Lc	hrs	3.72E+00	8.22E+00

図 45.55 寿命時間

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.

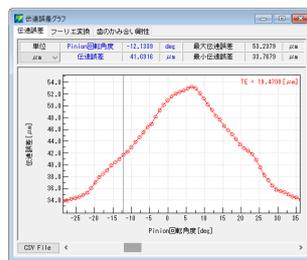


図 45.56 回転伝達誤差

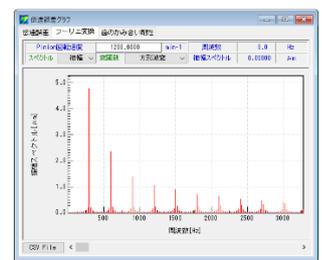


図 45.57 フーリエ解析

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樣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45.61~45.66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。

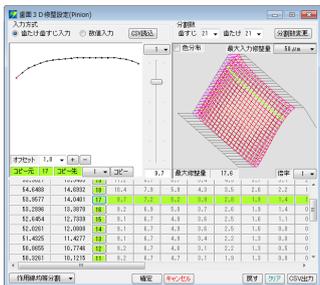
その結果、歯面応力は $\sigma_{Hmax}=2295MPa$ (図45.20) から $\sigma_{Hmax}=1637MPa$ に低下しているため歯面に対する寿命時間も大幅に伸びています。

項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯面中央位置	bx	mm	0.0000	0.0000
トルク	T	N·m	500.0000	1400.0000
正面歯面方向力	F	N	21738.8	
フィッティング	E	mm	20500.0	20500.0
ボア比	β	---	0.3000	0.3000
歯元部分割数	Mx1	---	40	40
インボリュート部分割数	Mx2	---	40	40
歯先幅部分割数	Mx3	---	10	10
歯幅方向部分割数	Nx	---	40	40
ピッチ誤差 (μm)				
Pinion			0.0	6.0
Gear			0.0	0.0

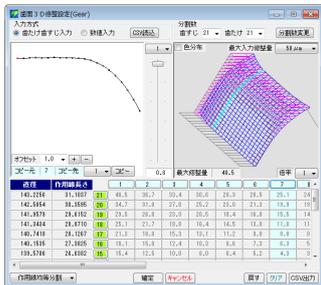
図 45.58 トルク設定

項目	記号	単位	Pinion	Gear
新しい歯面	φ1	deg	0.0100	
新歯面傾き(0.5 b sinφ1)	Δv	mm	0.0081	
平行度誤差	φ2	deg	-0.0010	
歯先干渉量(0.5 da sinφ2)	Δu	mm	-0.0005	
1ピッチ角度分割数	N	---	5	
繰り返し計算回数	N	---	5	
修整量振り分け比	α	---	0.5000	0.5000
修整量(下辺)	fts	mm	0.0081	0.0081
修整量(左辺)	ftv	mm	0.0081	0.0081
修整量(右辺)	fte	mm	0.0088	0.0088
修整量(上辺)	fteu	mm	0.0028	0.0205
修整量(下辺)	Hts	---	0.8000	0.2483
修整比(左辺)	Hiv	---	0.4500	0.4417
修整比(右辺)	Hie	---	0.4500	0.4417
修整比(上辺)	Hiu	---	0.1000	0.5838
修整比(下辺)	Hid	---	中	中

図 45.59 最適歯面設定



(a) ピニオン



(b) ギヤ

図 45.60 最適歯面修整

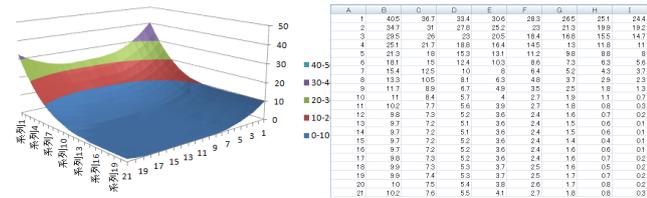
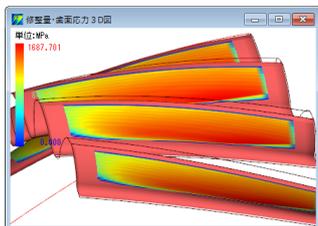
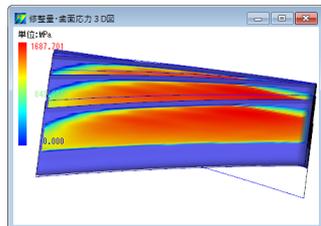


図 45.61 最適歯面修整 (Excel 表示例)



(a) ピニオン



(b) ギヤ

図 45.62 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1688MPa$)

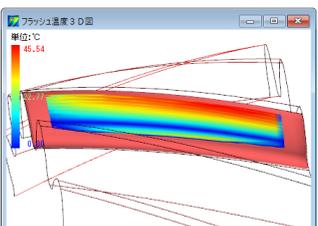


図 45.63 フラッシュ温度 $T_H=45.5(C)$

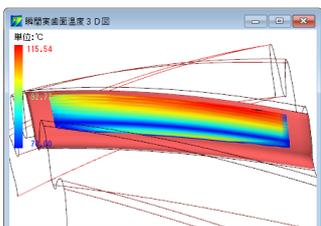


図 45.64 実歯面温度 $T_{HB}=116(C)$

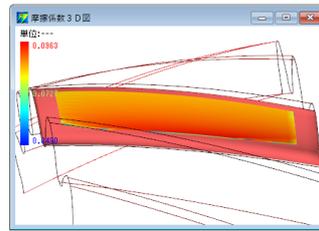


図 45.65 摩擦係数 $\mu_{max}=0.096$

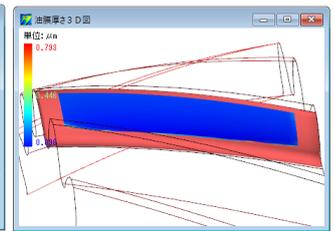
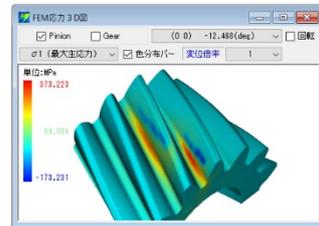
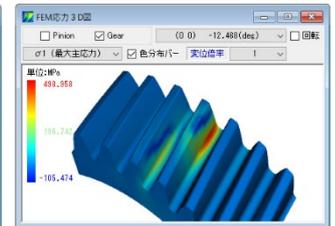


図 45.66 油膜厚さ $\lambda_{min}=0.098(\mu m)$



(a) ピニオン $\sigma_{1max}=373MPa$



(b) ギヤ $\sigma_{1max}=499MPa$

図 45.67 最大主応力, $\theta_p=-12.468^\circ$

項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯面最大主応力	σ_{Hmax}	MPa	1688.837	1687.701
最大歯根応力	σ_1	MPa	378.222	498.957
回転速度	n	1/min	1200.000	428.571
許容ヘルツ応力	σ_{Hlim}	MPa	2000.000	2000.000
許容歯根応力	σ_{Flim}	MPa	400.000	400.000
過負荷の有無	Ne	---	1	1
材料の硬化の有無	---	---	非硬化材料	---
使用状態	---	---	一般	---
項目(歯元)	記号	単位	Pinion	Gear
予想歯根繰り返し係数	ZN'	---	0.843	0.844
予想寿命負荷回数	Nc	---	1.00E+10	1.00E+10
予想寿命時間	Lc	hrs	1.39E+05	3.89E+05
項目(歯元)	記号	単位	Pinion	Gear
予想歯根繰り返し係数	ZN'	---	0.939	1.247
予想寿命負荷回数	Nc	---	1.31E+09	6.51E+05
予想寿命時間	Lc	hrs	1.82E+04	2.53E+01

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。

項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯元入力係数	hao	---	1.0000	1.0000
歯元出力係数	hao	---	1.2500	1.2500
歯元係数	ro	---	0.3750	0.3750
歯元係数	cko	---	0.2500	0.2500

図 45.69 基準ラック

項目	記号	単位	Pinion	Gear
モジュール	m	mm	3.00000	
歯数	z	---	15	55
圧力角	α	deg	20.00000	
ねじれ角	β	deg	0.00000	
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	右ねじれ
基準円直径	d	mm	45.00000	165.00000
基準円歯距	db	mm	46.07500	168.94286
歯元入力係数	hao	---	0.300000	0.200000
歯元出力係数	hao	---	0.300000	0.200000
またぎ歯数	z	---	3	8
またぎ歯厚	w	mm	23.53028	78.74651
測定ボール径	db	mm	5.6039	5.0201
オートボール径	db	mm	58.26388	176.42784
歯面中心距離	Sn	mm	5.38754	4.27562
中心距離	a	mm	65.00000	65.00000
歯面法線傾角減少量	fn	mm	0.000000	0.000000
歯幅	b	mm	30.00000	30.00000
歯先円直径	da	mm	51.45200	177.25740
歯根円直径	df	mm	43.52000	180.75740
歯元 R(工具刃先 R)	rf	mm	1.1250	1.1250

図 45.70 歯車諸元

項目	記号	単位	Pinion	Gear
正面モジュール	mt	mm	3.31018	
正面圧力角	αt	deg	21.88028	
基準円ねじれ角	β	deg	28.38888	
リード	ps	mm	334.5139	1226.5500
歯位置	xa	mm	0.8000	0.8000
全歯たけ	h	mm	6.7500	6.7500
最大小円弧直径(TIF)	dt	mm	46.8318	177.8574
歯先円直径	da	mm	56.8520	188.5168
正面歯根ピッチ	pd	mm	8.6500	
正面歯根ピッチ	pd	mm	5.3924	4.7176
またぎ歯数	z	---	3	8
またぎ歯厚	w	mm	23.53028	78.74651
設計またぎ歯厚	w'	mm	23.53028	78.74651
オートボール径	db	mm	5.6039	5.0201
基準オートボール径	db	mm	58.26388	176.42784
設計オートボール径	db'	mm	58.26322	176.42788

図 45.71 寸法結果 1

項目	記号	単位	Pinion	Gear
正面のみ合い圧力角	αvt	deg	18.9874	
かみ合いねじれ角	β	deg	24.80088	
かみ合い TIF 円弧直径	dt	mm	46.7500	178.7500
歯幅比	zb	---	0.4667	0.2571
有効歯幅	bs	mm	14.0000	14.0000
クラランス	ck	mm	1.6527	1.6527
正面のみ合い率	εα	---	1.0462	
歯先のみ合い率	εβ	---	1.8462	
全のみ合い率	εγ	---	2.8934	
すべり率(歯先)	σβ	---	0.3785	0.1838
すべり率(歯元)	σβ	---	-0.1546	-0.1116
正面歯根円クラランス	JK	mm	6.8192	6.8192
バックラッシュ角	Jβ	deg	1.54000	0.42000
最大歯根傾角	αa	deg	58.8820	185.1570
最大歯根傾角	αf	deg	47.8100	177.0574
インボリュート準準	---	---	発生しません	
トロイダク	---	---	発生しません	
トロイダク(歯先)	---	---	発生しません	
フィレット(歯元)	---	---	発生しません	

図 45.72 寸法結果 2

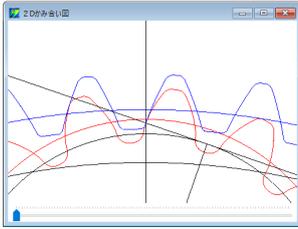
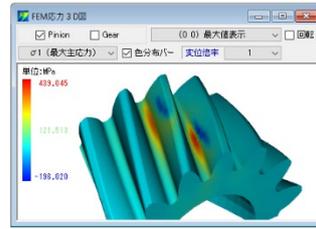


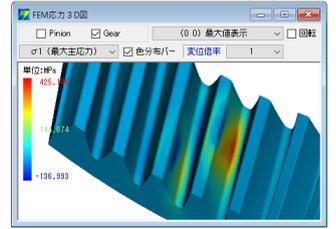
図 45.73 正面かみ合い図



図 45.74 すべり率



(a) ピニオン $\sigma_{1max}=439MPa$



(b) ギヤ $\sigma_{1max}=425MPa$

図 45.82 最大主応力

歯要素設定

端部接触解析設定
 端部解析有効 (端部曲率設定) 端部解析無効

項目	記号	単位	Pinion	Gear
最小曲率	ρ	mm	---	---
曲率半径範囲	h	mm	---	---

解析歯数
 1歯 3歯 5歯 7歯

解析箇所
 歯元+歯面+歯先 歯面のみ

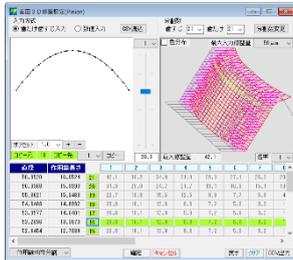
項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯幅中央位置	bm	mm	0.0000	0.0000
トルク	T	Nm	500.0000	1893.3333
正面法線方向力	F	N	21703.8	---
ヤング率	E	MPa	205000.0	205000.0
ポアソン比	ν	---	0.3000	0.3000
歯元部分割数	Nh1	---	40	10
インボリュート部分割数	Nh2	---	40	40
歯先、端部分割数	Nh3	---	10	40
歯面方向割数	Nb	---	40	40

ピッチ誤差 (μm)

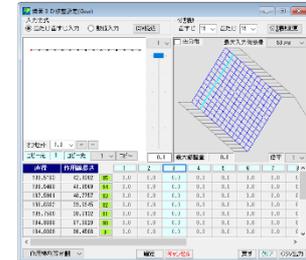
	Pinion	Gear	正:受排他
Pinion	0.0	0.0	0.0
Gear	0.0	0.0	0.0

ボタン: 確定 キャンセル 標準 戻す クリア

図 45.75 歯要素設定



(a) ピニオン



(b) ギヤ

図 45.76 歯面修整

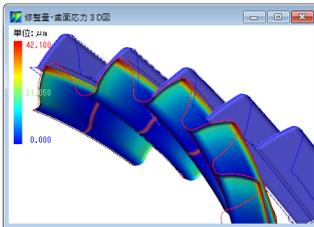


図 45.77 歯面要素 (修整)

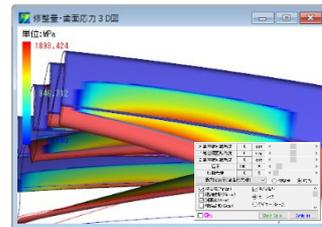
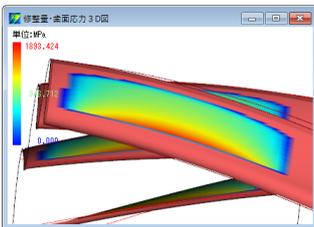
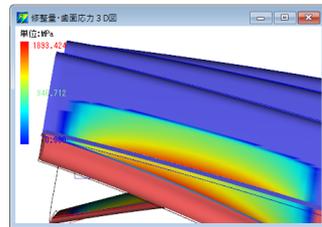


図 45.78 $\sigma_{Hmax}=1893MPa$

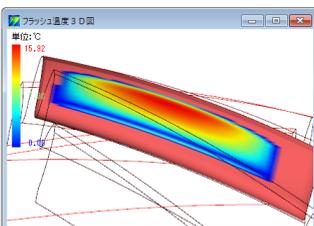


(a) ピニオン



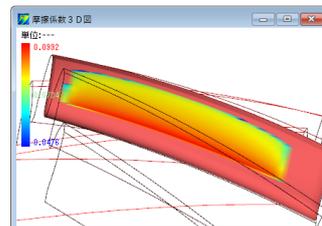
(b) ギヤ

図 45.79 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1893MPa$)



$T_f=15.9(C)$

図 45.80 フラッシュ温度



$\mu_{max}=0.099$

図 45.81 摩擦係数

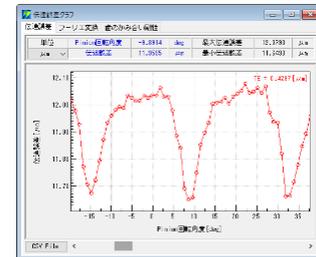


図 45.83 回転伝達誤差



図 45.84 フーリエ解析

※1 図 45.15 で与えた歯形や最適歯面修整で生成した歯形をファイル出力 (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。

45.20 動的起振力解析 (オプション)

高速回転機械の増加に伴い、歯車の動的挙動の解析が重要となってきているため、オプションとして動的起振力解析ソフトウェアを開発しました。まずは歯車は接触線が歯車軸に対して平行でないことから歯面の接触を3次的に解析する必要があります。CT-FEM Opera iii では図 45.85 のモデルに基づき振動解析を行い、図 45.86 のように Rotational (回転), Transverse (正面), Tilting (傾き), Axial (軸) の4種類の方向の振動加速度を出力します¹⁾。

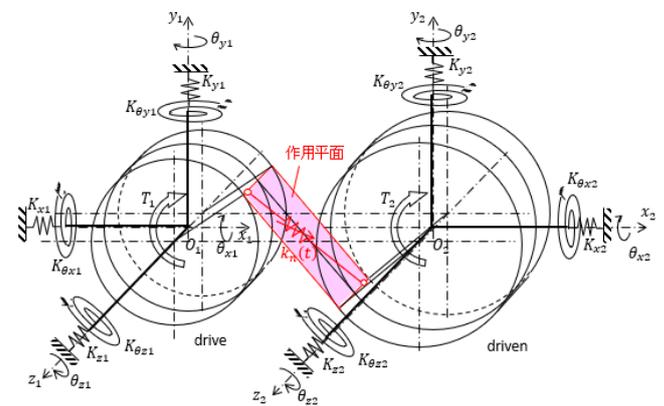


図 45.85 はすば歯車の12自由度振動解析モデル

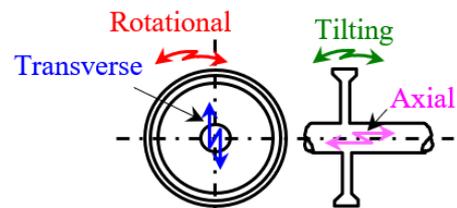


図 45.86 振動加速度成分

論文²⁾に示されている実験結果との比較で本ソフトウェアの解

析結果の検証を以下に行い、その結果を図 45.87~45.103 に示します。図 45.87 の歯車諸元から図 45.90 までは基本ソフトウェアの操作と同様です。動的起振力解析を行うために図 45.91 の解析諸元で歯面間減衰比を設定しますが、ここでは鋼歯車対のため減衰比を $\xi_g=0.07$ としています。ただし、プラスチック歯車の解析では別途減衰比を設定する必要があります。また、回転速度の上下限值と解析回転分割数、x, y, z 方向および回転方向 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 方向の減衰比を設定します。



図 45.87 歯車諸元 (検討歯車 1)



図 45.88 トルク、要素などの設定

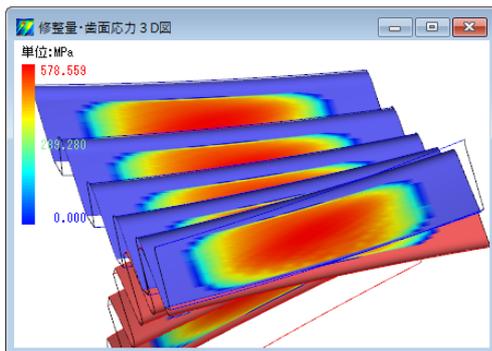


図 45.89 歯面応力, $\sigma_{Hmax}=579\text{MPa}$

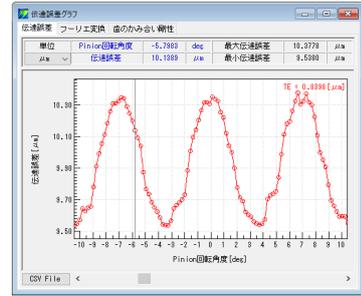


図 45.90 伝達誤差, $TE=0.84\mu\text{m}$



図 45.91 動的起振力解析諸元 (解析条件)

動的起振力解析用に歯車寸法を図 45.92 のようにボス径、ボス幅および歯車材料の比重を設定します。歯車と同様に図 45.93 のように軸寸法を設定し、軸受のばね剛さ (KA, KB) を設定します。そして画面下の[確定]ボタンで計算を開始します。

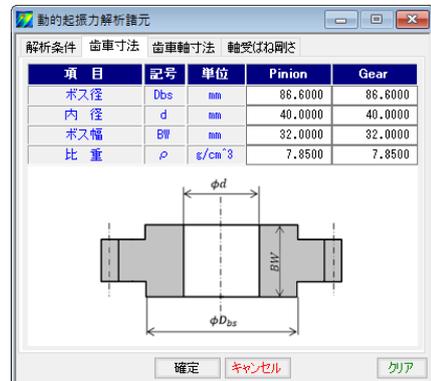


図 45.92 動的起振力解析諸元 (歯車寸法)

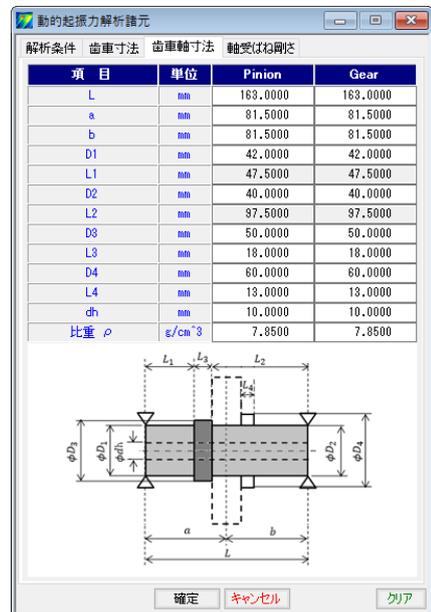


図 45.93 動的起振力解析諸元 (軸寸法)

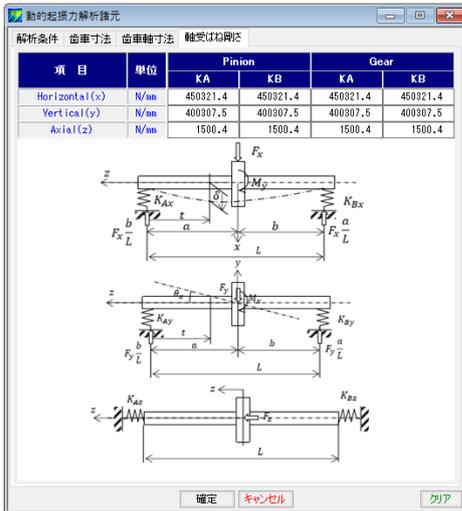


図 45.94 動的起振力解析諸元 (軸受ばね剛さ)

動的起振力解析後には、図 45.95~45.98 のように振動かみ合い 1 次成分表を表示することができ、円周方向の振動かみ合い 1 次成分グラフを図 45.99~45.102 に示します。そして、図 45.99 の画面上部にある ボタンで図 45.103 の音データグラフを表示し、その音を (1 次音) 聞くことができます。また、図 45.104 では回転速度に対応した小歯車と大歯車の音圧レベルグラフ (例題では同歯数のため重なっています) を表示します。

以上のように動的解析を行うことで振動・騒音の低減を図れる設計ツールとして非常に有効と考えます。解析結果の確認のため図 45.105 に論文の実験値と比較した結果を示しますが良く一致しています。なお、図 45.105 の Transverse と Tilting の文献²⁾の実験結果は回転座標系での測定のため Z-1 次と Z+1 次に分かれて計測されますが、本解析は静止座標系での値となりますので Z 次として表示しています。



図 45.95 振動かみ合い 1 次成分表 1

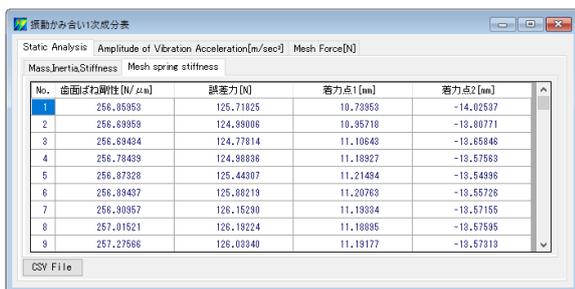


図 45.96 振動かみ合い 1 次成分表 2

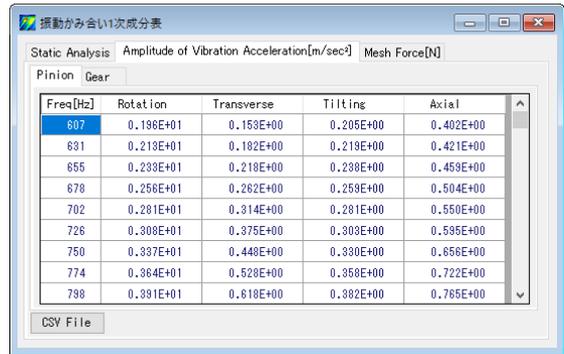


図 45.97 振動かみ合い 1 次成分表 3 (小歯車の例)

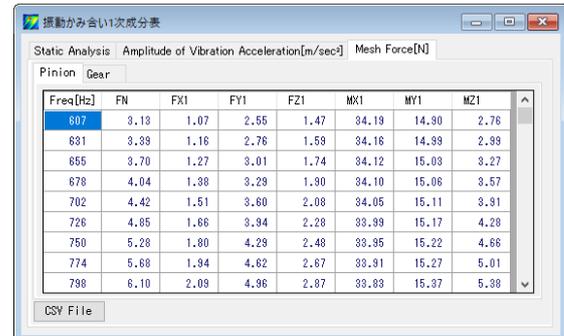


図 45.98 振動かみ合い 1 次成分表 4 (小歯車の例)

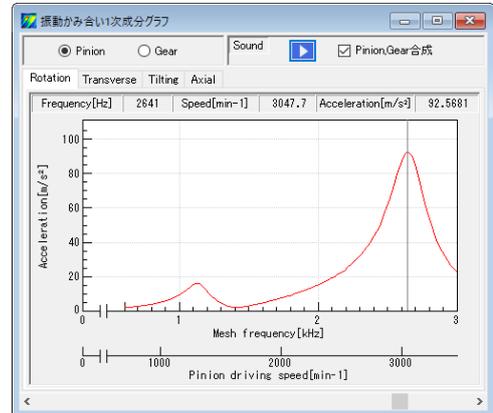


図 45.99 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Rotation)

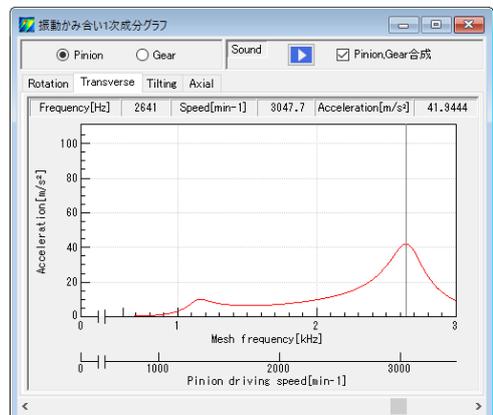


図 45.100 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Transvers)

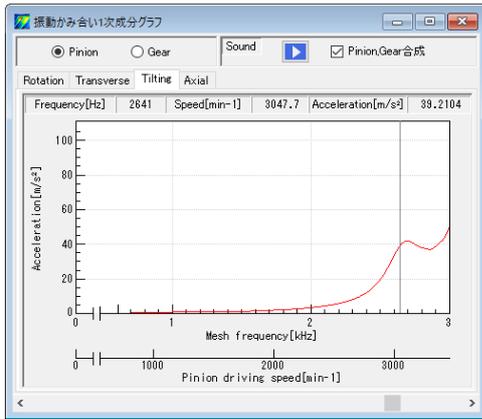


図 45.101 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Tilting)

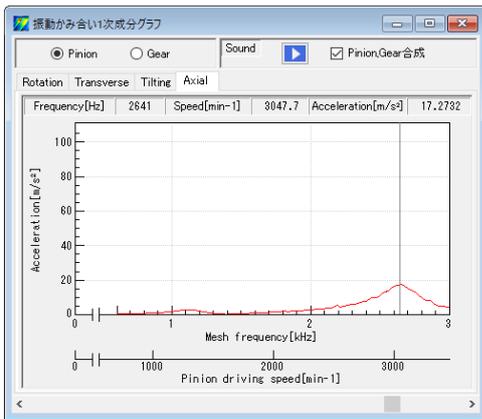


図 45.102 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Axial)

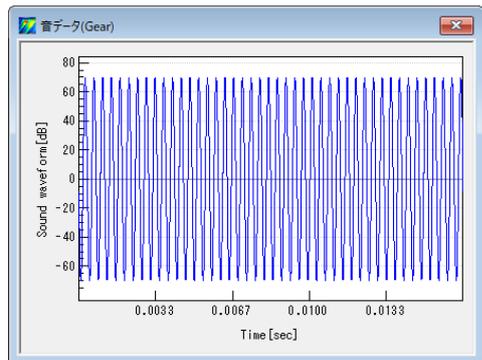


図 45.103 音波形グラフ (小歯車と大歯車の合成音)

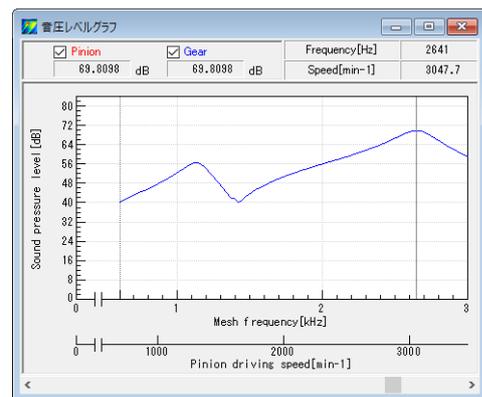


図 45.104 音圧レベルグラフ (小歯車と大歯車)

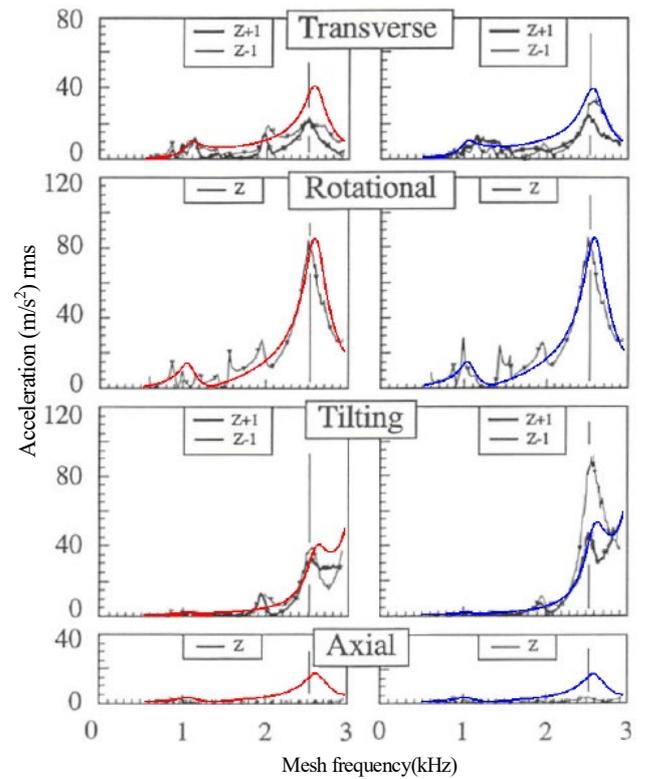


図 45.105 論文の実験値との比較

図 45.87～図 45.105 では同歯数の解析結果を示していますが、歯数の異なる解析結果例を図 45.106～45.109 に示します。

歯車寸法設定					
基本寸法 端部形状					
項目	記号	単位	Pinion	Gear	
モジュール	mn	mm	2.00000		
歯数	z	---	45	59	
圧力角	α_n	deg	20.00000		*
ねじれ角	β	deg	30	0	*
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	左ねじれ	
基準円直径	d	mm	109.92305	136.25466	
基準円直径	db	mm	95.80573	125.61195	
歯厚入力方式	---	---	転位係数	転位係数	
歯直角転位係数	xn	---	0.00000	0.00000	
またぎ歯数	zm	---	8	10	
またぎ歯厚	W	mm	46.17753	58.57579	
測定ボール径	dp	mm	3.3716	3.3647	
オーバーボール寸法	dm	mm	108.41975	140.74879	
歯直角円弧歯厚	Sn	mm	3.14159	3.14159	
中心距離	a	mm	120.08886		
歯直角法線歯厚減少量	fn	mm	0.00000	0.00000	
歯幅	b	mm	20.00000	20.00000	
歯先円直径	da	mm	107.92305	140.25466	
歯底円直径	df	mm	98.92305	131.25466	
歯元R(工具刃先R)	rf	mm	0.7500	0.7500	

図 45.106 検討歯車 2

歯車寸法設定					
基本寸法 端部形状					
項目	記号	単位	Pinion	Gear	
モジュール	mn	mm	2.00000		
歯数	z	---	35	69	
圧力角	α_n	deg	20.00000		*
ねじれ角	β	deg	30	0	*
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	左ねじれ	
基準円直径	d	mm	80.82904	159.34867	
基準円直径	db	mm	74.51557	146.90211	
歯厚入力方式	---	---	転位係数	転位係数	
歯直角転位係数	xn	---	0.00000	0.00000	
またぎ歯数	zm	---	6	12	
またぎ歯厚	W	mm	33.94777	70.80555	
測定ボール径	dp	mm	3.3800	3.3615	
オーバーボール寸法	dm	mm	85.32885	169.84156	
歯直角円弧歯厚	Sn	mm	3.14159	3.14159	
中心距離	a	mm	120.08886		
歯直角法線歯厚減少量	fn	mm	0.00000	0.00000	
歯幅	b	mm	20.00000	20.00000	
歯先円直径	da	mm	84.82904	169.34867	
歯底円直径	df	mm	75.82904	154.34867	
歯元R(工具刃先R)	rf	mm	0.7500	0.7500	

図 45.108 検討歯車 3

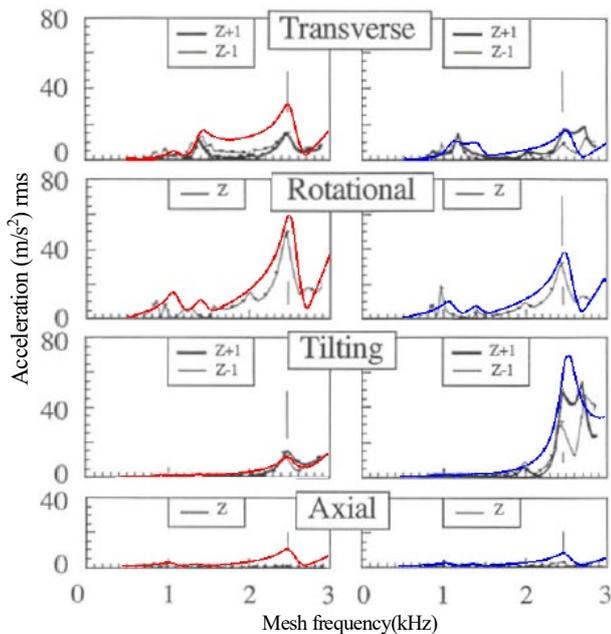


図 45.107 論文の実験値との比較

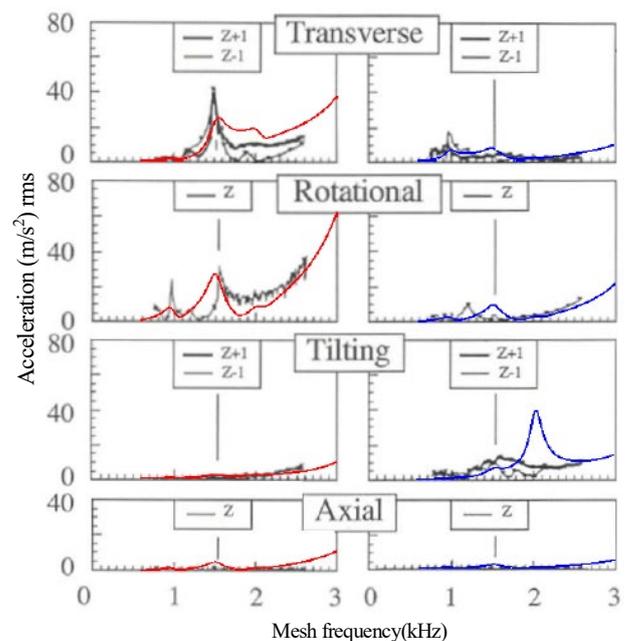


図 45.109 論文の実験値との比較

参考文献

- 1) Kunihiko MORIKAWA et al., " DYNAMIC VIBRATION ANALYSIS OF HELICAL GEAR SYSTEM", Proc., MPT2001(2001)
- 2) 王韶峰, 梅澤清彦, 北條春夫, 松村茂樹, はすば歯車系の振動解析 (第一報, 起振力を考慮した多自由度シミュレーションの開発), 機論 C 編, 62 巻 600 号 (1996.8), pp.3275-3282