

[45] CT-FEM Opera iii (歯車かみ合い応力解析)

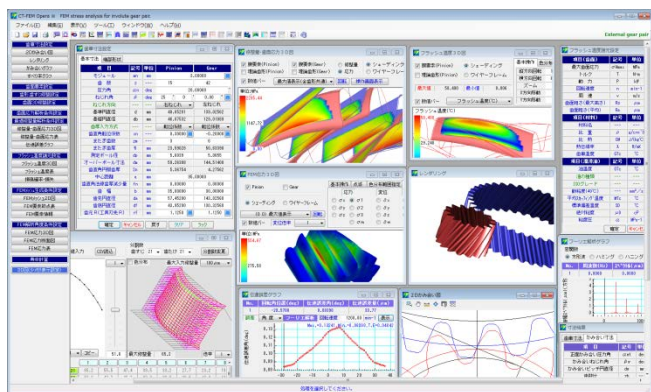
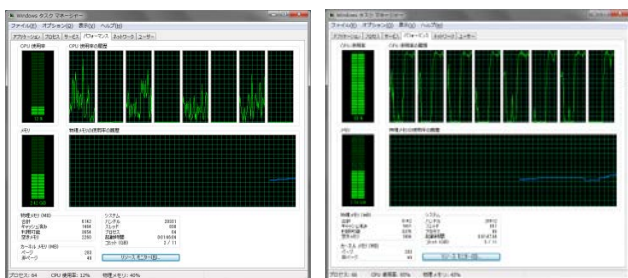


図 45.1 CT-FEM Opera iii

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uffing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uffing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 $\times$ 外歯車, 外歯車 $\times$ 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

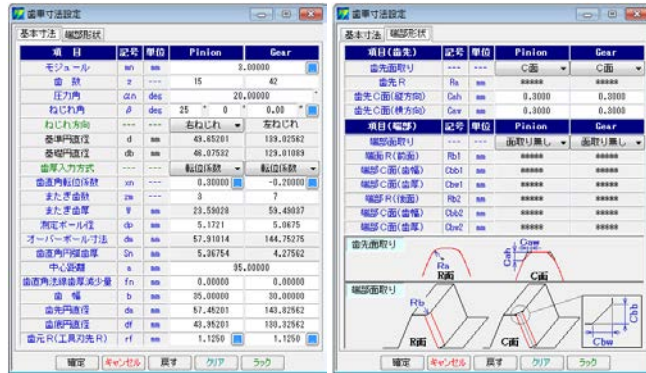
歯車寸法は、各部寸法、かみ合い率、すべり率、歯厚などを計算します。アンダーカットが発生している歯車のかみ合い率は、TIF (True Involute Form) 径を基準にかみ合い率を決定します。また、歯先にC面や丸みがある場合はCまたはRを考慮したかみ合い率を算出します。

- (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。



(a) 歯車諸元

(b) 面取り

図 45.4 諸元設定

項目	記号	単位	Pinion	Gear
正面モジュール	mt	mm	3.31013	
正面圧力角	α_t	deg	21.89023	
基礎円間ねじれ角	β_b	deg	23.39896	
リード	pz	mm	334.5139	936.6388
転位量	xm	mm	0.9000	-0.6000
全歯たけ	h	mm	6.7500	6.7500
最小ピッチ円直径(TIF)	dt	mm	46.6316	139.0264
最大ピッチ円直径	dh	mm	56.8520	143.2256
正面法線ピッチ	pbt	mm	3.6500	
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	
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

項目	記号	単位	Pinion	Gear
正面かみ合い圧力角	α_{wt}	deg	22.85269	
かみ合いねじれ角	β_w	deg	25.15362	
かみ合いピッチ円直径	dw	mm	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	ε_{α}	---	1.1258	
重なりかみ合い率	ε_{β}	---	1.3452	
全かみ合い率	ε_{γ}	---	2.4708	
すべり率(歯先)	σ_a	---	0.5659	0.4787
すべり率(歯元)	σ_b	---	-0.9183	-1.3035
正面法線バックラッシュ	Jt	mm	0.2797	
バックラッシュ角度	J θ	deg	0.69561	0.24843
最大接触直径	dja	mm	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。

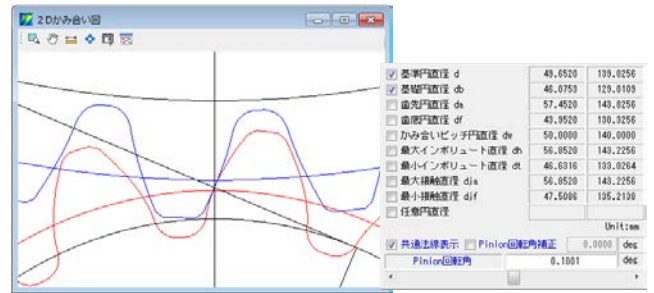


図 45.7 正面かみ合い図

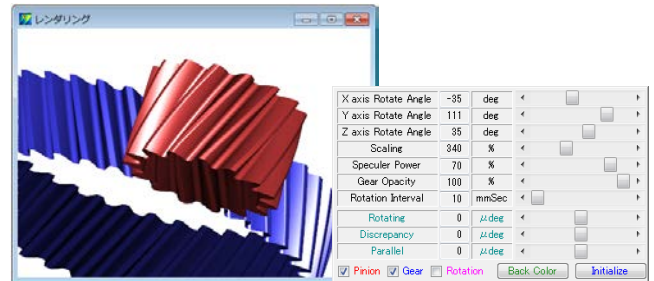


図 45.8 歯形レンダリング

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。

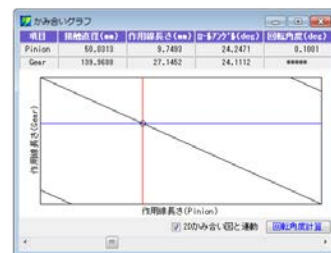


図 45.9 かみ合いグラフ

項目	記号	単位	数値(Pinion)	数値(Gear)
接触直径	d	mm	51.0000	139.9690
作用線長さ	L	mm	10.9329	25.9632
ロールアングル	ϕ	deg	27.1693	23.0684
回転角度	θ	deg	3.0423	0.0000

図 45.10 回転角度計算

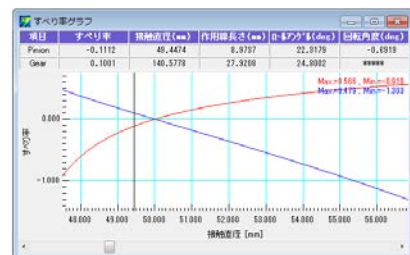


図 45.11 すべり率グラフ

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 μ mのピッチ誤差を与えて解析する例を示します。

項目	記号	単位	Pinion	Gear
最小歯厚	ρ	mm		
歯厚修整範囲	h	mm		
解析歯数			1歯	5歯
解析箇所			歯元+歯面+歯先	歯面のみ
歯幅中央位置	bm	mm	0.0000	0.0000
トルク	T	N・m	500.0000	1400.0000
正面法線方向力	F	N	21703.6	
ヤング率	E	MPa	205800.0	205800.0
ポアソン比	ν		0.3000	0.3000
歯元部分割数	Nh1		20	20
インボリュート部分割数	Nh2		40	40
歯先部分割数	Nh3		10	10
歯幅方向分割数	Nb		40	40
ピッチ誤差 (μ m)			0.0	0.0
Pinion			0.0	0.0
Gear			0.0	0.0
			正: 密接触	負: 疎接触

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。

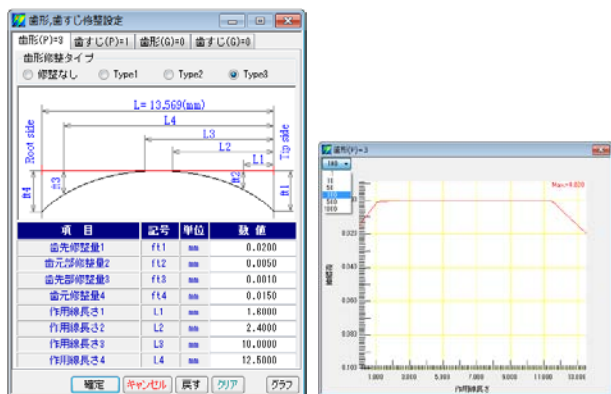


図 45.13 歯形修整とグラフ($\times 100$)の例

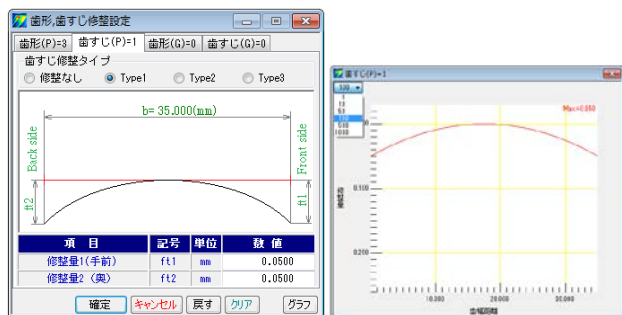
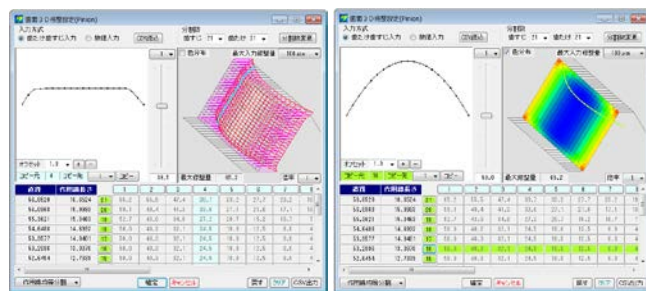


図 45.14 歯すじ修整とグラフ($\times 100$)の例

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。



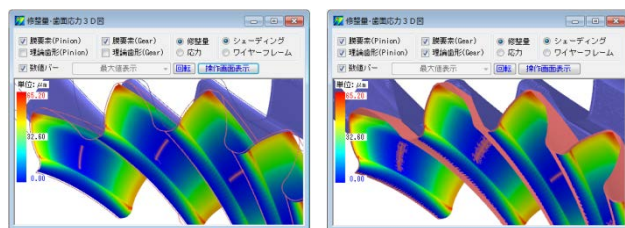
(a) 設定&表示画面

(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

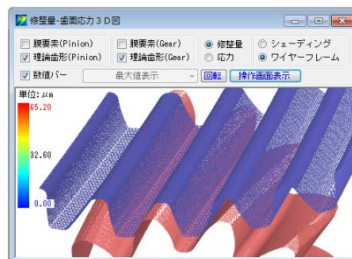


図 45.17 歯面要素メッシュモデル (図 45.12 での分割)

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。

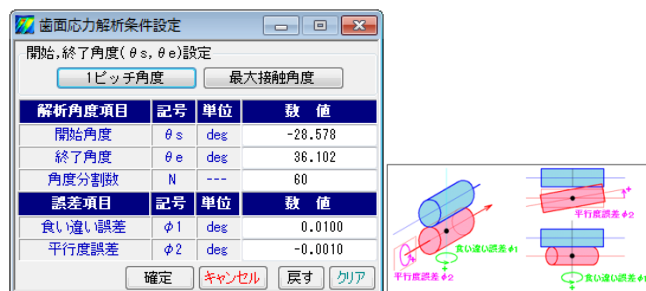
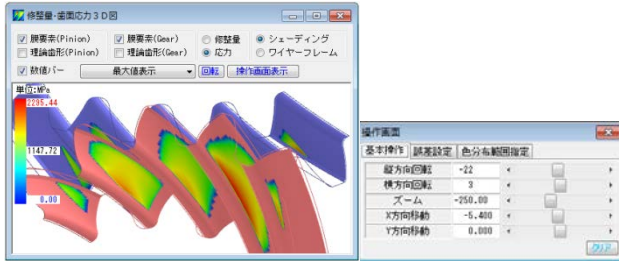


図 45.18 歯面解析設定画面と ϕ_1 と ϕ_2

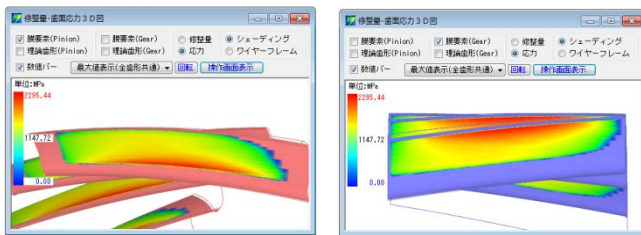
45.12 歯面応力解析結果（修整量・歯面応力 3D 図）

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。

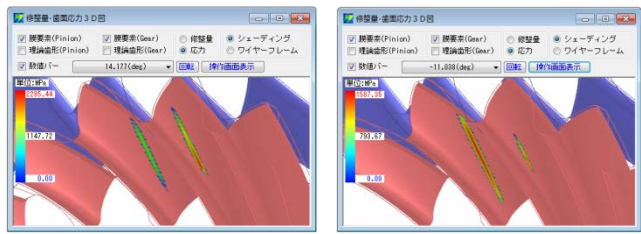


ピッチ誤差考慮，補助フォーム
図 45.19 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$)



(a) ピニオン (b) ギヤ

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

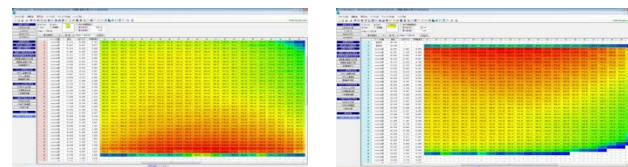


(a) $\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}(\theta_p=14.177^\circ)$ (b) $\sigma_{Hmin}=1587\text{MPa}(\theta_p=-11.04^\circ)$

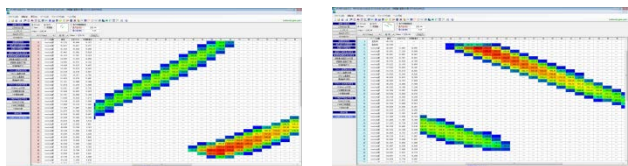
図 45.21 歯面応力の最大値と最小値

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 ($\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$)



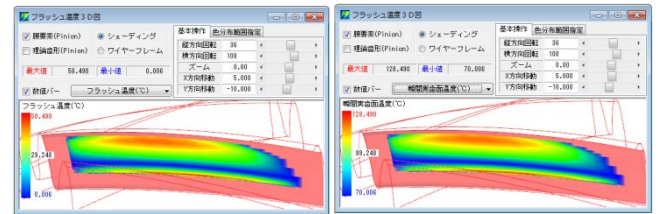
(a) ピニオン (b) ギヤ
図 45.23 $\theta_p=14.177^\circ$ の応力 ($\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$)

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 45.25）。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uffing発生確率、摩耗の発生確率を図 45.34 に示します。

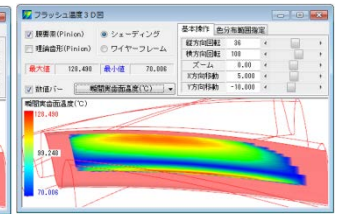


図 45.24 フラッシュ温度設定画面 図 45.25 材料と潤滑油



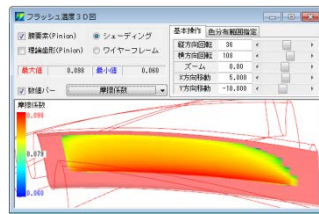
$T_H=58.5(^\circ\text{C})$

図 45.26 フラッシュ温度



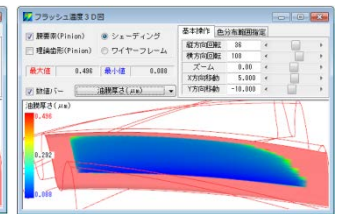
$T_{HB}=128.5(^\circ\text{C})$

図 45.27 瞬間実歯面温度



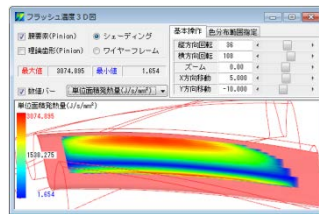
$\mu_{max}=0.098$

図 45.28 摩擦係数



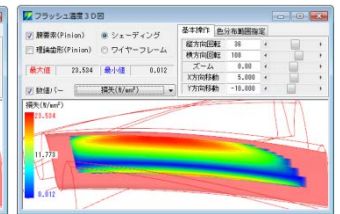
$\lambda_{min}=0.088(\mu\text{m})$

図 45.29 油膜厚さ



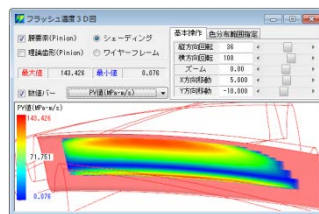
$J_{max}=3075(\text{J/s/mm}^2)$

図 45.30 発熱量



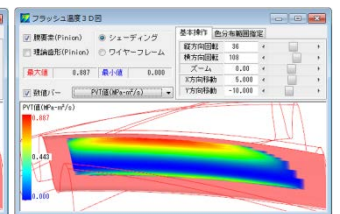
$W_{max}=23.5(\text{W/mm}^2)$

図 45.31 損失動力



$PV_{max}=143(\text{MPa}\cdot\text{m/s})$

図 45.32 PV 値



$PVT_{max}=0.887(\text{MPa}\cdot\text{m}^2/\text{s})$

図 45.33 PVT 値

項目	記号	単位	数 値
スカuffing発生確率	η_s	%	< 5
摩耗の発生確率	η_f	%	24.95
動力損失	η_e	%	1.39

図 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 $R=1.0\text{mm}$ 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 $\sigma_{H\max}=4075\text{MPa}$ 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°C 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°C 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) の詳細な設定画面。左側には「端部解析有効 (端部曲率設定)」と「端部解析無効」の切り替えがあり、現在は「有効」が選択されている。中央には「解析歯数」の選択があり、「1歯」「3歯」「5歯」があり、「5歯」が選択されている。右側には「解析箇所」の選択があり、「歯元+歯面+歯先」「歯面のみ」があり、「歯元+歯面+歯先」が選択されている。下部には「歯面要素設定」の表があり、項目として「歯幅中央位置」「トルク」「正面法線方向力」「ヤング率」「ポアソン比」「歯元部分割数」「インボリュート部分割数」「歯先部分割数」「歯幅方向分割数」があり、それぞれにPinionとGearの値が設定されている。また、「ピッチ誤差 (μm)」の値も設定されている。

図 45.35 歯面要素設定 (端部解析)

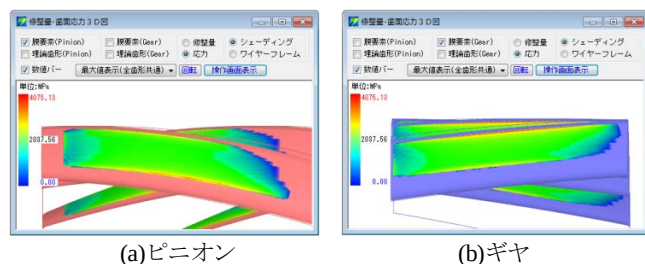


図 45.36 歯面応力 (端部解析, $\sigma_{H\max}=4075\text{MPa}$)

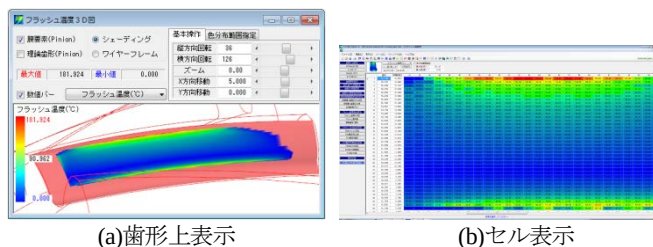


図 45.37 フラッシュ温度, $T_{fl}=182(^\circ\text{C})$

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 のスクリーンショット。上部には「モデル形状」の選択があり、「標準」「ハブ付」があり、「標準」が選択されている。右側には「固定条件」の選択があり、「側面固定」「底面固定」があり、「側面固定」が選択されている。下部には「分割方法」の選択があり、「精度分割」「個数分割」があり、「個数分割」が選択されている。中央には「メッシュモデル設定」の表があり、項目として「歯元分割数」「歯面分割数」「歯先分割数」「側面分割数」「底面分割数」「指定範囲端分割数」「端分割指定範囲直径」「端分割指定範囲直径」があり、それぞれにPinionとGearの値が設定されている。

図 45.38 メッシュモデル設定

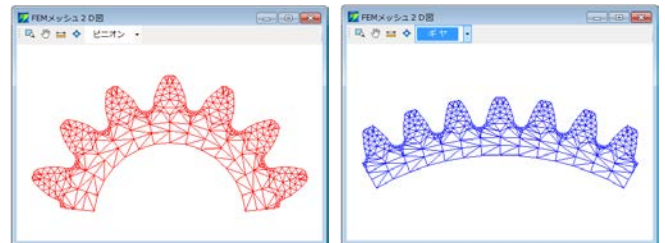


図 45.39 2D メッシュモデル

図 45.40 FEM 要素情報 のスクリーンショット。FEM要素情報の表。項目として「最大面圧 (接触応力)」「要素数」「最大曲げ応力 (σ_1)」「最大曲げ要素番号」があり、それぞれにPinionとGearの値が設定されている。

図 45.40 FEM 要素情報

図 45.41 要素節点表 のスクリーンショット。要素節点表の表。項目として「節点番号」「節点座標 (X)」「節点座標 (Y)」「節点座標 (Z)」があり、それぞれに値が設定されている。

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。

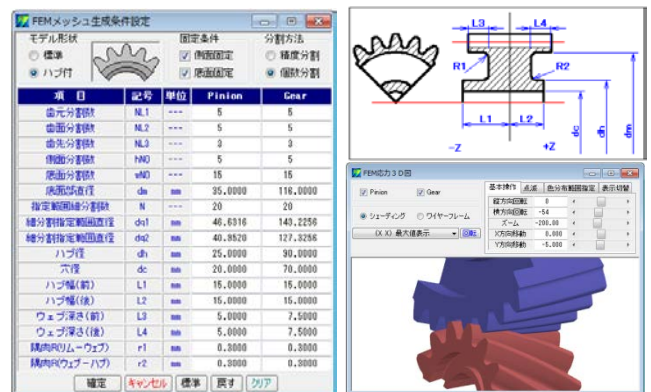


図 45.42 リム・ハブモデル

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 ($-28.578^\circ \sim 36.102^\circ$) 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。この口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。

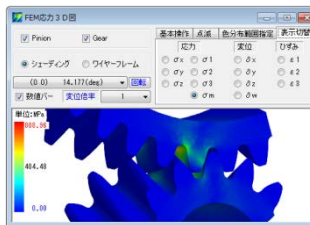
FEM で解析する項目は、図 45.44 に示す応力と変位そしてひずみの3種類です。FEM 解析結果を図 45.45~45.49 に示します。変位図は、図 45.48 のように 100 倍 (倍率選択: 1, 5, 10, 50, 100, 200, 500 倍) で表示することができます。



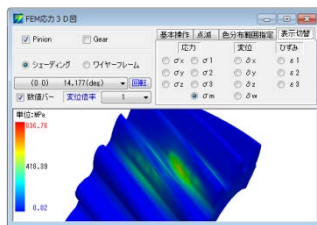
図 45.43 FEM 解析角度の設定



図 45.44 解析の種類

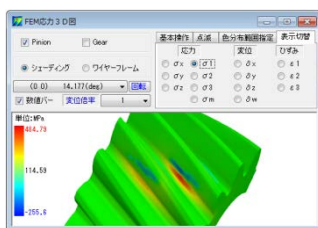


(a) 1 対歯車

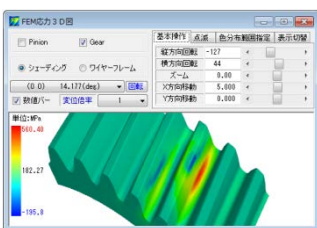


(b) ピニオン $\sigma_{\max}=837\text{MPa}$

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

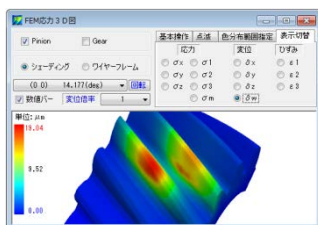


(a) ピニオン $\sigma_{1\max}=485\text{MPa}$

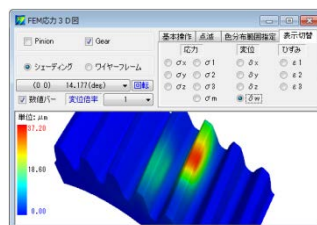


(b) ギヤ $\sigma_{1\max}=560\text{MPa}$

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

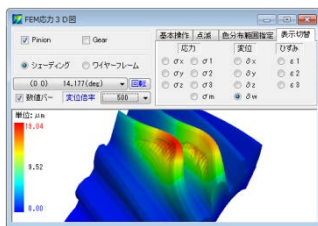


(a) ピニオン $\delta_{\max}=19.0\mu\text{m}$

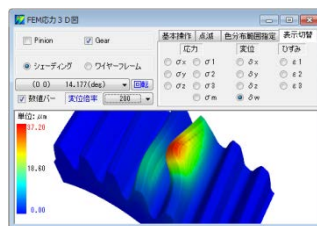


(b) ギヤ $\delta_{\max}=37.2\mu\text{m}$

図 45.47 変位, $\theta_p=14.177^\circ$

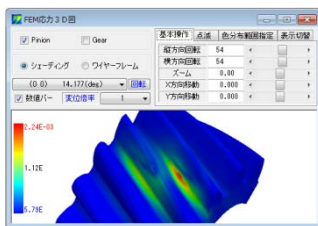


(a) ピニオン, 500 倍

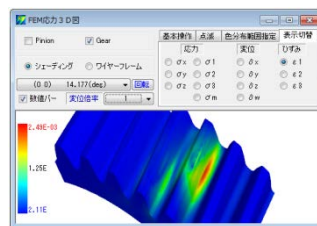


(b) ギヤ, 200 倍

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



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



(b) ギヤ $\epsilon_{1\max}=2.49 \times 10^{-3}$

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 のようにピッチ誤差 (図 45.12, $6\mu\text{m}$) 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 $\sigma_{1\max(P)}=555\text{MPa}$ と $\sigma_{1\max(G)}=638\text{MPa}$ です. この角度での解析一覧表を図 45.51 に示します.

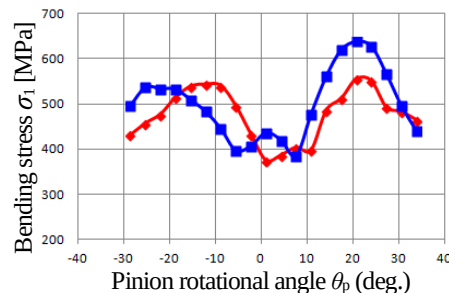


図 45.50 歯元応力変化

要素番号	σx	σy	σz	τxy	τyz	τzx	σ₁
37761	482.50	109.82	104.76	109.41	-31.89	-35.76	554.67
37762	486.38	95.79	127.34	161.85	-28.68	-28.38	547.88
37763	487.13	91.59	131.44	155.80	-33.62	-40.35	547.84
37769	489.32	84.42	125.53	169.34	-27.89	-26.82	542.88
38117	482.84	172.52	164.89	226.34	-4.93	8.82	541.56
37764	482.52	95.51	133.32	149.89	-35.40	-45.84	540.53
37765	478.80	104.60	126.19	169.45	-22.80	-17.52	538.27
38118	489.12	182.82	184.28	222.14	-8.30	3.26	535.55
38115	392.20	175.23	187.88	229.88	8.68	21.40	535.39
37765	471.87	85.89	129.21	144.29	-33.35	-53.21	533.47
38116	388.37	168.37	186.78	222.37	-2.72	16.44	526.85
37974	480.76	95.76	125.53	159.34	-27.89	-26.82	542.88

図 45.51 解析結果一覧

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

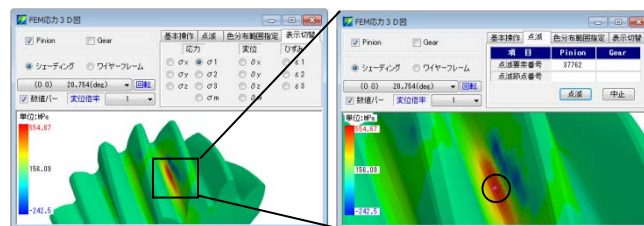
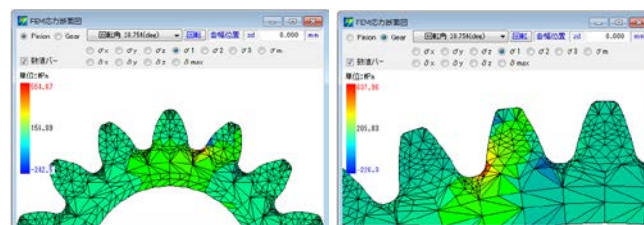


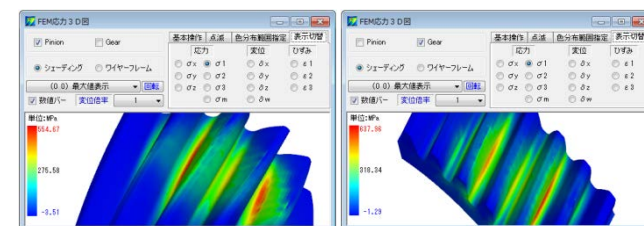
図 45.52 ピニオン $\sigma_{1\max}$ の位置, $\sigma_{1\max}=555\text{MPa}$



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

(b) ギヤ, $\sigma_{1\max}=638\text{MPa}$

図 45.53 FEM 断面図 ($z_d=0\text{mm}$)



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

(b) ギヤ $\sigma_{1\max}=638\text{MPa}$

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	2238.385	2295.440
最大曲げ応力 (σ_1)	σ_1	MPa	554.675	637.964
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	---
材料の強化の有無	---	---	非強化材料	---
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	Z_N	---	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	Z_N	---	1.387	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	3.22E+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。

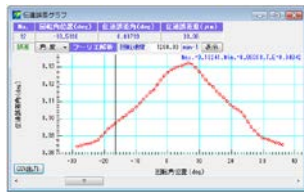


図 45.56 回転伝達誤差



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。

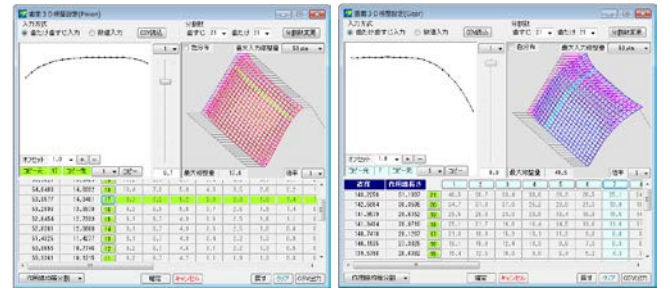
その結果、歯面応力は $\sigma_{Hmax}=2295\text{MPa}$ (図 45.20) から $\sigma_{Hmax}=1637\text{MPa}$ に低下しているため歯面に対する寿命時間も大幅に延びています。

項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯面中央位置	mm	mm	0.0000	0.0000
トルク	T	Nm	500.0000	1400.0000
正面主線方向力	F	N	21703.6	---
ヤング率	E	MPa	206000.0	206000.0
ポアソン比	ν	---	0.3000	0.3000
歯元部分割数	Np1	---	40	40
インボリュート部分割数	Np2	---	40	40
歯先、歯部分割数	Np3	---	10	10
歯幅方向分割数	Np4	---	40	40
ピッチ誤差 (μm)	---	---	0.0	0.0
Pinion	0.0	0.0	0.0	0.0
Gear	0.0	0.0	0.0	0.0

図 45.58 トルク設定

項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯先、歯部分割数	Np1	---	40	40
インボリュート部分割数	Np2	---	40	40
歯先、歯部分割数	Np3	---	10	10
歯幅方向分割数	Np4	---	40	40
ピッチ誤差 (μm)	---	---	0.0	0.0
Pinion	0.0	0.0	0.0	0.0
Gear	0.0	0.0	0.0	0.0

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

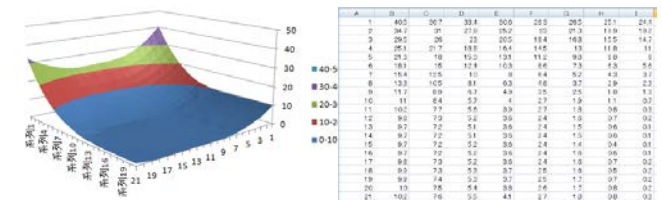
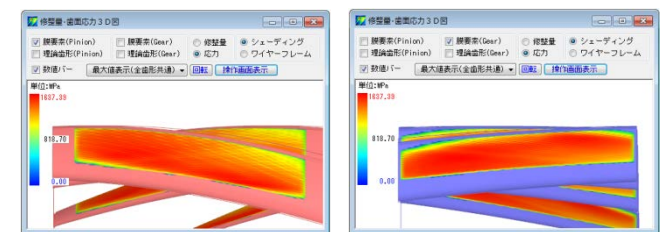


図 45.61(b)の CSV出力

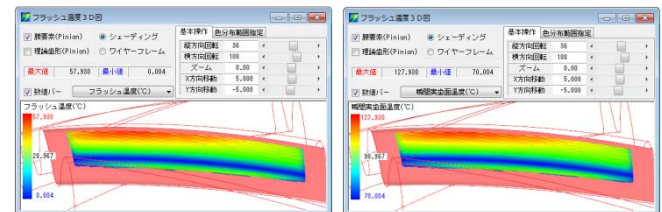
図 45.61 最適歯面修整 (Excel 表示例)



(a) ピニオン

(b) ギヤ

図 45.62 歯面応力 ($\sigma_{Hmax}=1637\text{MPa}$)

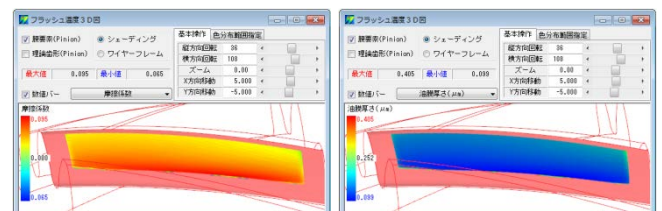


$T_n=57.9(^{\circ}\text{C})$

図 45.63 フラッシュ温度

$T_{nB}=128(^{\circ}\text{C})$

図 45.64 実歯面温度

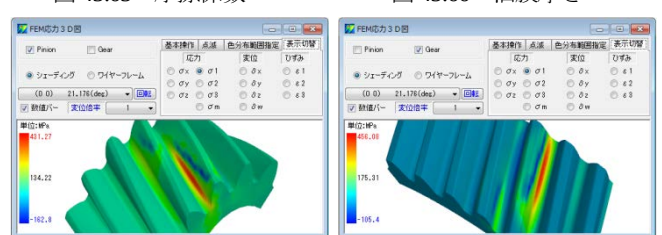


$\mu_{max}=0.095$

図 45.65 摩擦係数

$\lambda_{min}=0.099(\mu\text{m})$

図 45.66 油膜厚さ



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

(b) ギヤ $\sigma_{1max}=560\text{MPa}$

図 45.67 最大主応力, $\theta_p=21.18^\circ$

項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯面最大応力	$\sigma_{H\max}$	MPa	1637.395	1630.685
最大当量応力(σ1)	σ_1	MPa	481.274	456.093
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
許容歯面応力	σ_{H1}	MPa	400.000	400.000
過負荷の回数	Ne	---	1	---
材料の硬化の有無	---	---	非硬化材料	---
使用状態	---	---	一般	---
項目(歯面)	記号	単位	Pinion	Gear
予想歯面繰返し係数	Z_N	---	0.819	0.815
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(歯根)	記号	単位	Pinion	Gear
予想歯根繰返し係数	Z_N	---	1.078	1.140
予想寿命負荷回数	Nc	---	2.21E+06	1.38E+06
予想寿命時間	Lc	hrs	3.07E+01	5.38E+01
計算	計	ヤシヤセル	戻す	リカ

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。



図 45.69 基準ラック



図 45.70 歯車諸元



図 45.71 寸法結果 1



図 45.72 寸法結果 2

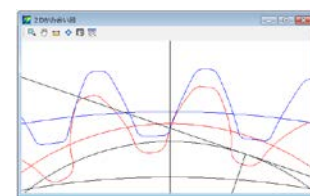


図 45.73 正面かみ合い図

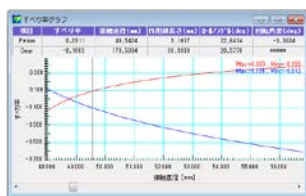


図 45.74 すべり率

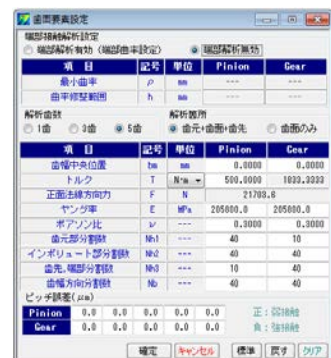


図 45.75 歯面要素設定

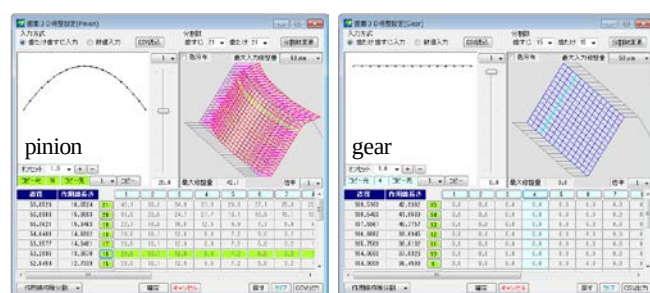


图 45.76 菌面修整

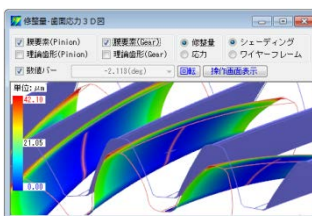


图 45.77 齿面要素 (修整)

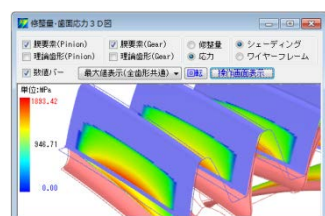


图 45.78 $\sigma_{H\max}=1893\text{MPa}$

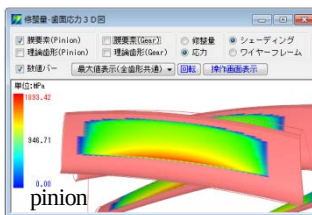
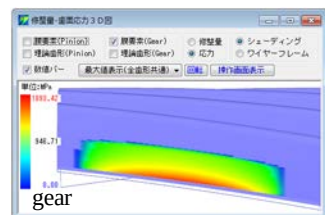
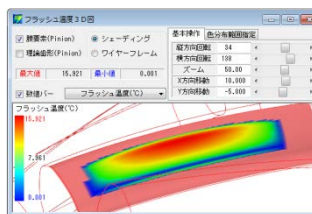


图 45.79 齿面应力 ($\sigma_{H\max}=1893\text{MPa}$)



$T_{fl}=15.9(^{\circ}C)$
フラッシュ温度



$\mu_{\max}=0.098$

図 45.81 摩擦係数

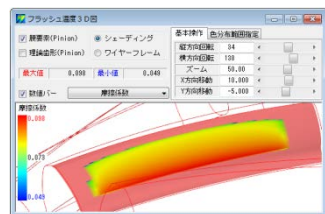
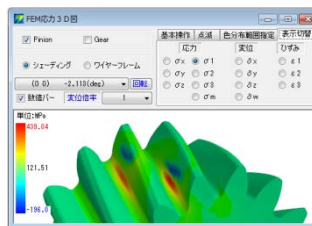
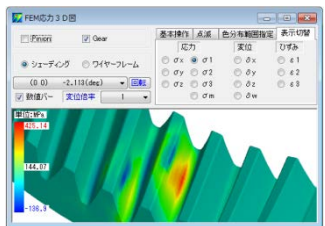


図 45.82 最大主応力



(a) ピニオン $\sigma_{1\max}=439\text{MPa}$



(b) $\sigma_{1\max}=425\text{MPa}$

※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たため、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。はすば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 Operaiiii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⁾。

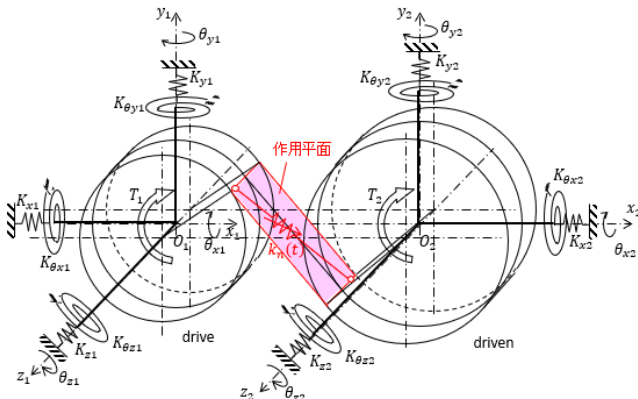


図 45.85 はすば歯車の12自由度振動解析モデル

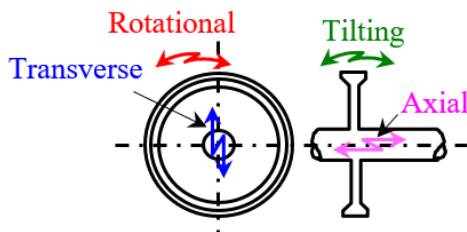


図 45.86 振動加速度成分

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 $\zeta_g=0.07$ としています。ただし、プラスチック歯車の解析では

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	m	mm	2.00000	
歯数	z	---	52	52
圧力角	α_n	deg	20.00000	
ねじれ角	β	deg	30	0.00
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	左ねじれ
基準円直径	d	mm	120.08886	120.08886
基準円直径	db	mm	110.70884	110.70884
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	---	9	9
またぎ歯厚	w	mm	52.37666	52.37666
測定ボール径	dp	mm	3.3677	3.3677
オーバーボール寸法	dm	mm	124.63951	124.63951
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	124.08886	124.08886
歯底円直径	df	mm	115.08886	115.08886
歯元R(工具刃先R)	rf	mm	0.7500	0.7500

図 45.87 歯車諸元 (検討歯車 1)

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 θ_x , θ_y , θ_z 方向の減衰比を設定します。

歯面要素設定					
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	---	---	
曲率修整範囲	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	N·m	147.0938	147.0938	
正面法線方向力	F	N	2657.4	2657.4	
ヤング率	E	MPa	205939.7	205939.7	
ポアソン比	ν	---	0.3000	0.3000	
歯元部分割数	Nh1	---	20	20	
インポリート部分割数	Nh2	---	40	40	
歯先、端部分割数	Nh3	---	***	***	
歯幅方向分割数	Nb	---	40	40	
ピッチ誤差 (μm)					
Pinion	***	1.0	1.0	1.0	1.0
Gear	***	0.0	0.0	0.0	0.0
正: 弱接触 負: 強接触					
確定 キャンセル 標準 戻す クリア					

図 45.88 トルク、要素などの設定

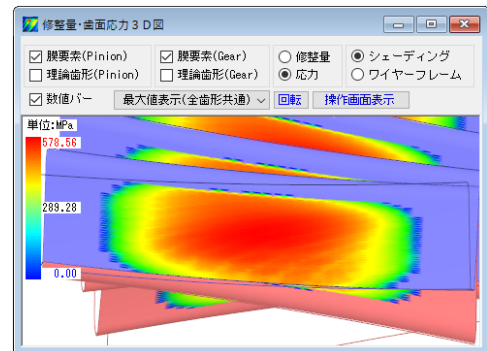


図 45.89 歯面応力, $\sigma_{Hmax}=579\text{MPa}$

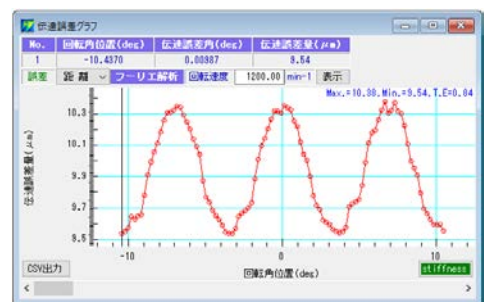


図 45.90 伝達誤差, $TE=0.84\mu\text{m}$

動的起振力解析諸元				
解析条件 歯車寸法 歯車軸寸法 軸受はね剛性				
項目	記号	単位	数値	
歯面間減衰比	ζ_g	---	0.07	
回転速度(下限)	rL	min-1	700.00	
回転速度(上限)	rH	min-1	3482.00	
解析回転分割数	rD	---	100	
減衰比 方向	x, y, z		$\theta_x, \theta_y, \theta_z$	
ζ	0.05	0.03	0.03	0.07

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。

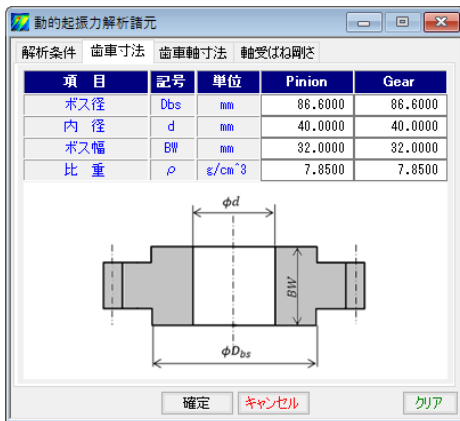


図 45.92 動的起振力解析諸元 (歯車寸法)

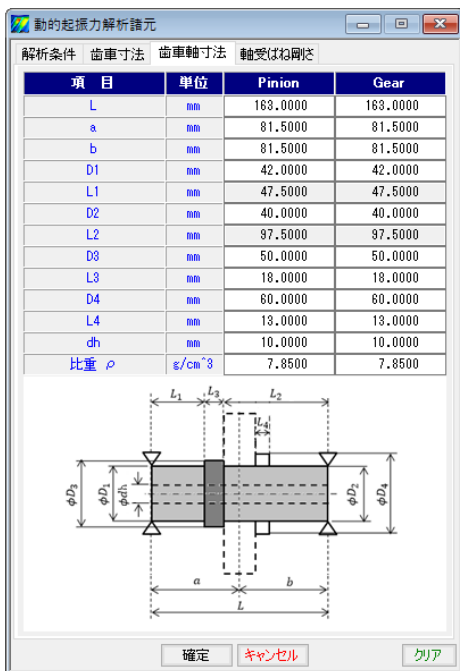


図 45.93 動的起振力解析諸元 (軸寸法)

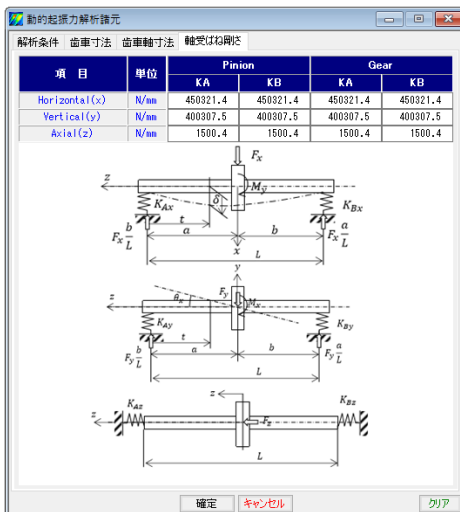


図 45.94 動的起振力解析諸元 (軸受ばね剛さ)

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 の東工大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

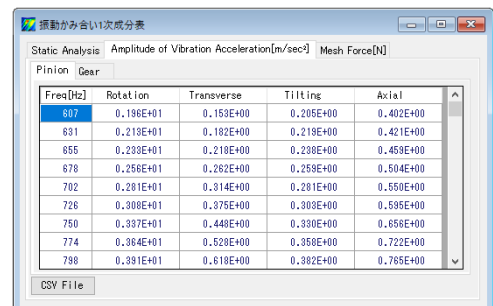


図 45.97 振動かみ合い 1 次成分表 3 (小歯車の例)

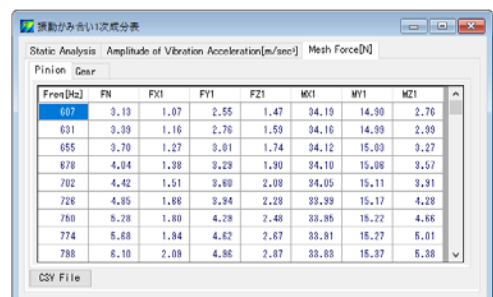


図 45.98 振動かみ合い 1 次成分表 4 (小歯車の例)

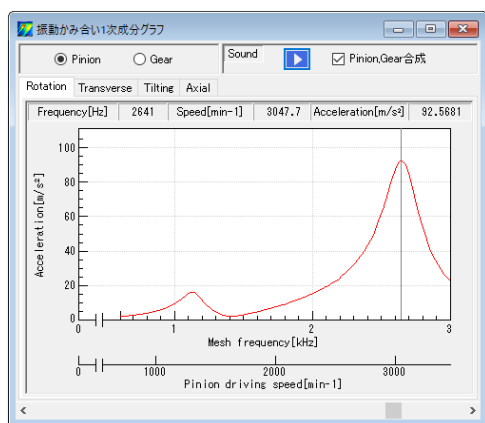


図 45.99 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Rotation)

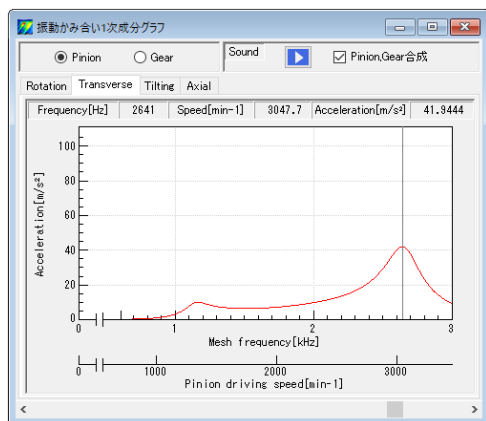


図 45.100 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Transverse)

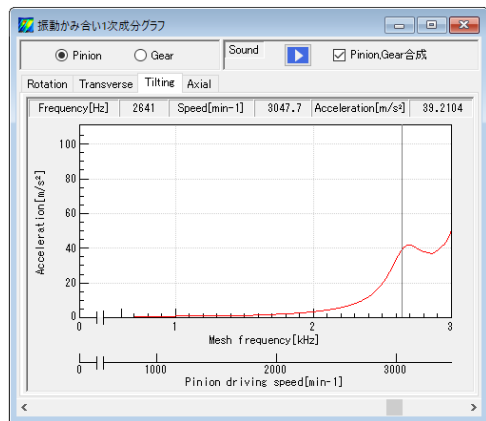


図 45.101 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Tilting)

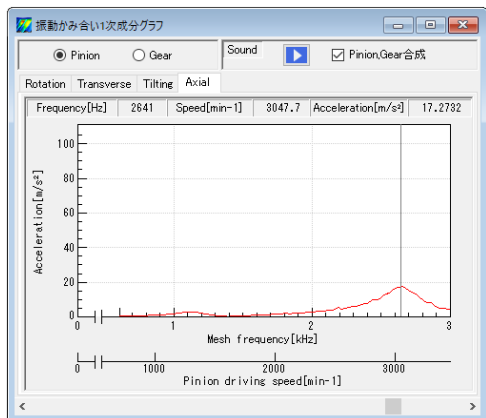


図 45.102 振動かみ合い 1 次成分グラフ (Axial)

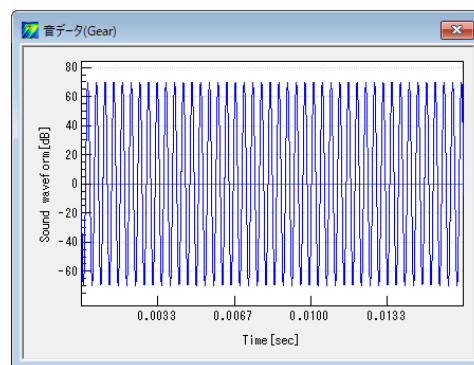


図 45.103 音波形グラフ (小歯車と大歯車の合成音)

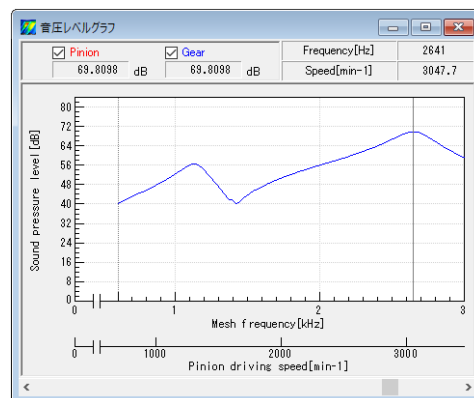


図 45.104 音圧レベルグラフ (小歯車と大歯車)

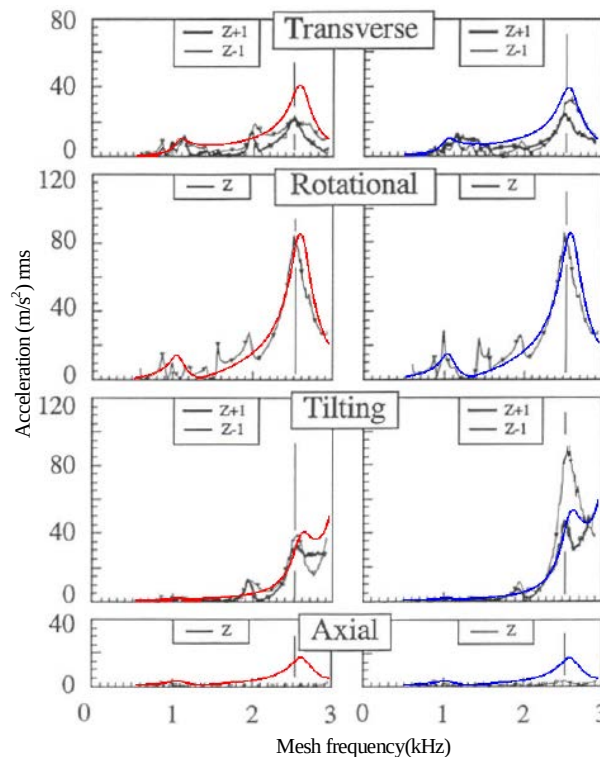


図 45.105 論文の実験値との比較

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	m	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

確定 キャンセル 戻す クリア ラック

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	m	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	148.90211
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	163.84158
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	163.34867
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

確定 キャンセル 戻す クリア ラック

図 45.108 検討歯車 3

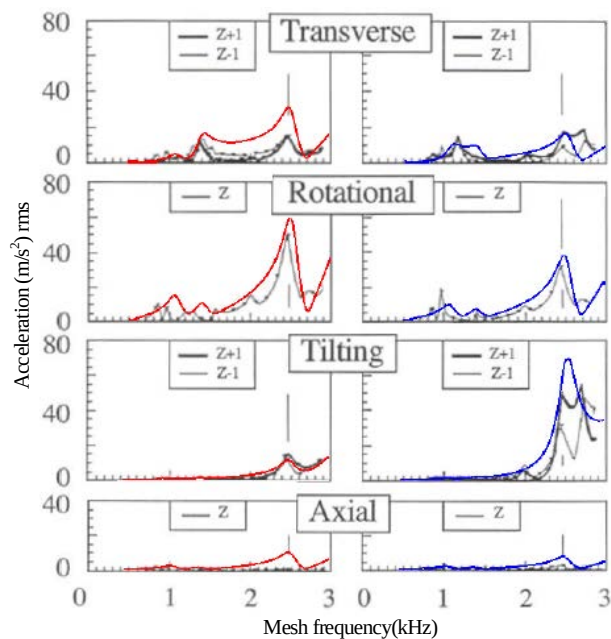


図 45.107 論文の実験値との比較

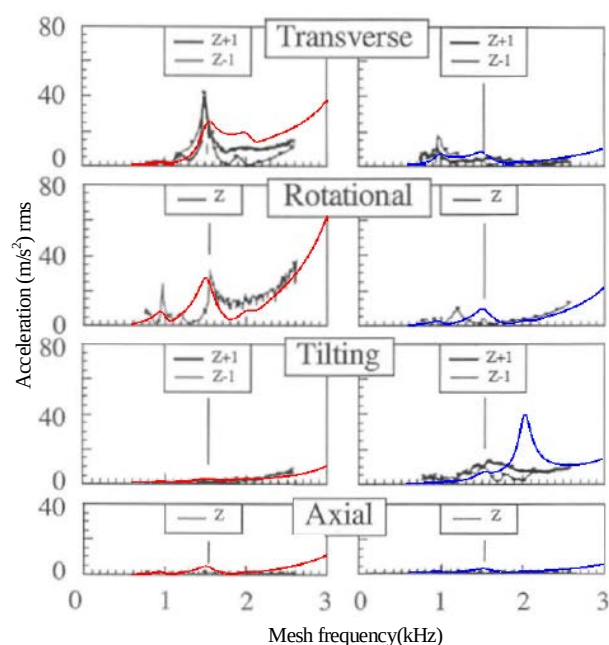


図 45.109 論文の実験値との比較

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