[2] involute Σ iii (bevel gear design system)

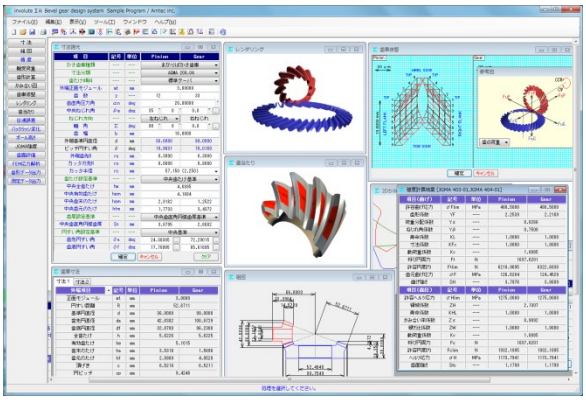


図 2.1　involute Σ iii (bevel gear design system)

2.1　概要

involute Σ iii (bevel gear design)は，かさ歯車の寸法，強度（鋼，樹脂），組図，軸荷重，歯面修整，伝達誤差，歯面評価，FEM 解析，歯形データおよび測定データ等の機能を備えており，効率よく的確に設計することができます．

本ソフトウェアは，今までオプション扱いしていた機能も一部，基本ソフトウェアに含めました．新機能として，5 軸加工機で製作するする場合の生産性を考慮した歯車も追加しました(2.26 項，2.27 項参照)．図 2.1 に全体画面を示します．

2.2　ソフトウェアの構成

involute Σ iii (bevel gear)の構成を表 2.1 に示します．表中の○は基本ソフトウェアの機能で◎はオプション機能です．

表 2.1　ソフトウェアの構成

No.	項　　目	掲載項	構成
1	寸法	2.4	○
2	精度	2.5	○
3	軸受荷重	2.22	○
4	組図	2.6	○
5	かみ合い図	2.8	○
6	歯形レンダリング	2.9	○
7	バックラッシ変化	2.12	○
8	ボール高さ	2.13	○
9	強度計算(鋼) JGMA403-01, 404-01	2.19	○
10	強度計算(樹脂)	2.21	○
11	強度計算(鋼) AGMA2003-B97	2.20	◎
12	歯車修整（歯形，歯すじ） および歯当たり	2.10 2.11	◎
13	伝達誤差解析	2.15	◎
14	歯面評価	2.23	◎
15	FEM 歯形応力解析	2.24	◎
16	歯形データ出力（すぐば）	2.14	◎
17	歯形データ出力（まがりば+ゼロールギヤ）	2.14	◎
18	測定データ出力（大阪精密機械）	2.16	◎
19	測定データ出力（Carl Zeiss）	2.16	◎
20	歯形出力時の歯幅延長	2.14	◎
21	スキュー平面歯形（New）	2.26	◎
22	HP^2-bevel gear（New）	2.27	◎

2.3　寸法設定（プロパティ）

かさ歯車の種類，寸法分類を以下に示します．また，図 2.2 に例題歯車の設定画面を示します．

(1)かさ歯車の種類

すぐばかさ歯車，まがりばかさ歯車，ゼロール

(2)寸法分類

(2.1)すぐばかさ歯車

- 標準
- 平行頂げき
- ANSI/AGMA 2005-D03
- AGMA 208.03（最小歯数 7 歯対応）
- グリーソン式自動車用

(2.2)まがりばかさ歯車

- ANSI/AGMA 2005-D03
- AGMA 209.04
- グリーソン式（1960）
- グリーソン式（11 歯以下）

(2.3)ゼロールベベルギヤ

- ANSI/AGMA 2005-D03
- AGMA 202.03

(3)歯たけの傾斜は，標準テーパ，等高歯，デュープレックステーパ，TRL に対応しています(AGMA).

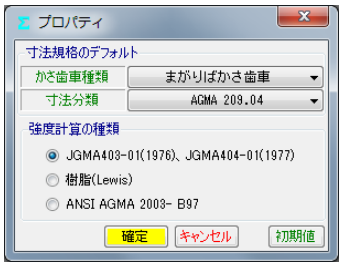


図 2.2　プロパティ

2.4　寸法

モジュール，歯数を入力することにより標準値が入力されます．軸角は標準90°で入力範囲はΣ=60°～160°且つ，冠歯車（ピッチ円すい角最大90°未満）に対応しています．

図2.3　寸法諸元入力画面

図2.3では，モジュール，歯数，軸角を設定すると，選択した寸法規格に基づき標準値が入力されます．また，入力操作において以下のような機能があります．

(1) プロパティでは，歯車の種類を設定していますが，図2.3の歯車諸元でも変更することができます．

(2) 歯たけ，歯厚および円すい角の設定基準は，外端基準または中央基準の選択をすることができます．

(3) 歯先および歯底円すい角は，図2.4のように60進と10進を変換できる機能があります．

(4) 図2.5には外端部の数値を表示していますが，中央部，内端部の寸法も表示することができます．図2.6の寸法結果2にかみ合い率等を示します．

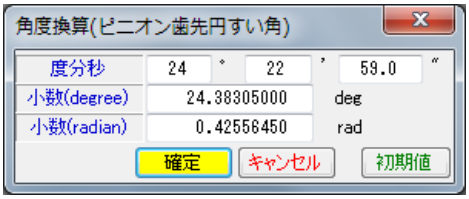


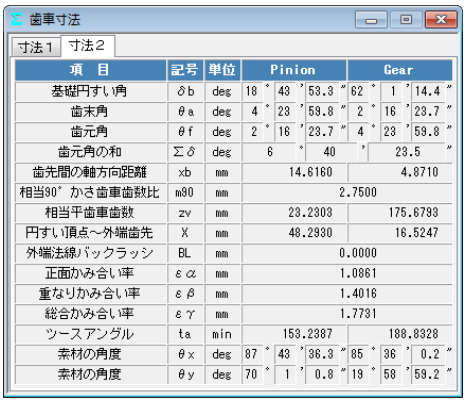
図2.4　角度変換

歯車寸法

寸法1　寸法2

外端項目	記号	単位	Pinion	Gear
正面モジュール	mt	mm	3.0000	
円すい距離	R	mm	52.6711	
基準円直径	d	mm	36.0000	99.0000
歯先円直径	da	mm	42.6382	100.0729
歯底円直径	df	mm	32.0700	96.2300
全歯たけ	h	mm	5.6226	5.6225
有効歯たけ	he	mm	5.1015	
歯末のたけ	ha	mm	3.5318	1.5698
歯元のたけ	hf	mm	2.0909	4.0528
頂げき	c	mm	0.5210	0.5211
円ピッチ	cp	mm	9.4248	
正面円弧歯厚	St	mm	5.5841	3.8406
正面円弧歯厚減少量	ft	mm	0.0000	0.0000
弦歯厚	sj	mm	3.1692	2.8354
キャリパ歯たけ	hj	mm	3.5975	1.5767

図2.5　寸法結果1



歯車寸法

寸法1　寸法2

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
基礎円すい角	δb	deg	18 ° 43 ' 53.3 "	62 ° 1 ' 14.4 "
歯末角	θa	deg	4 ° 23 ' 59.8 "	2 ° 16 ' 23.7 "
歯元角	θf	deg	2 ° 16 ' 23.7 "	4 ° 23 ' 59.8 "
歯元角の和	Σδ	deg	6 ° 40 ' 23.5 "	
歯先間の軸方向距離	xb	mm	14.6160	4.8710
相当90°かさ歯車歯数比	m90	mm	2.7500	
相当平歯車歯数	zv	mm	23.2303	175.6793
円すい頂点～外端歯先	X	mm	48.2930	16.5247
外端法線バックラッシ	BL	mm	0.0000	
正面かみ合い率	εα	mm	1.0861	
重なりかみ合い率	εβ	mm	1.4016	
総合かみ合い率	εγ	mm	1.7731	
ツースアングル	ta	min	153.2387	188.8328
素材の角度	θx	deg	87 ° 43 ' 36.3 "	85 ° 36 ' 0.2 "
素材の角度	θy	deg	70 ° 1 ' 0.8 "	19 ° 58 ' 59.2 "

図2.6　寸法結果2

2.5　精度

図2.7に，かさ歯車の精度(JIS B 1704:1978)を示します．

かさ歯車精度　JIS B 1704

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
精度等級	---	---	2	3
単一ピッチ誤差(±)	ft	μm	15	28
隣接ピッチ誤差	ftu	μm	19	36
累積ピッチ誤差(±)	Ft	μm	59	110
歯溝のふれ	fr	μm	32	67

図2.7　かさ歯車精度（JIS B 1704）

2.6　組図

図2.8～2.11のように組立距離やボス径を設定し作図することができます．作図機能として拡大，距離計測などがあり，図2.8で面取り加工を「する」にすると小端部に面取りを与えた形状（図2.9）とすることができます．図2.10に軸角60°を，図2.11に軸角160°の組図例を示します．

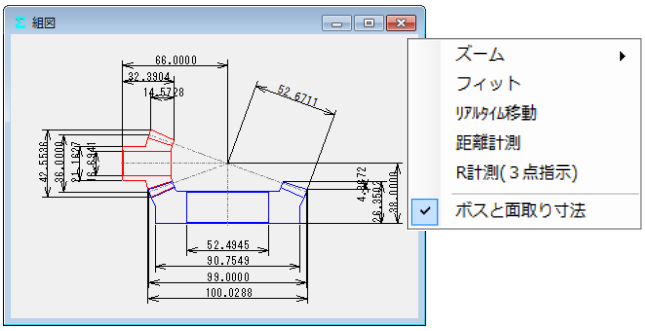
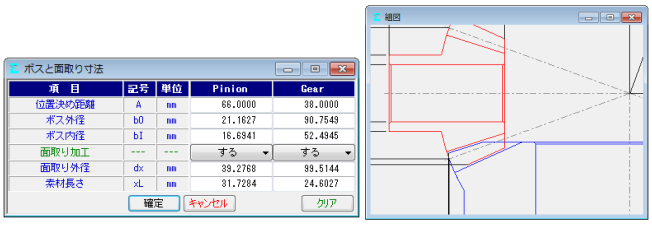


図2.8　組図1



ボスと面取り寸法

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
位置決め距離	A	mm	68.0000	38.0000
ボス外径	b0	mm	21.1627	90.7549
ボス内径	bI	mm	16.6941	52.4945
面取り加工	---	---	する	する
面取り外径	dx	mm	39.2768	99.5144
素材長さ	xL	mm	31.7284	24.6027

確定　キャンセル　クリア

図2.9　ボスと面取りの寸法設定と面取り図

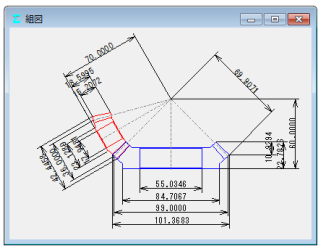


図2.10　軸角Σ=60°の例

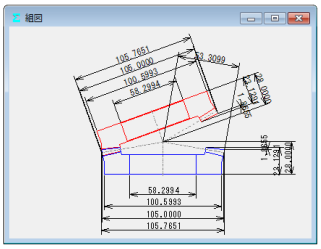


図2.11　Σ=160°の例

2.7　かさ歯車の歯形

involute Σ iii(bevel gear design)で生成する歯形は，図2.12に示す**球面インボリュート**であり，歯元は**球面トロコイド**曲線です．そのため，デファレンシャルベベルギヤなどの歯数の少ない歯車であっても正しいかみ合いを示します．

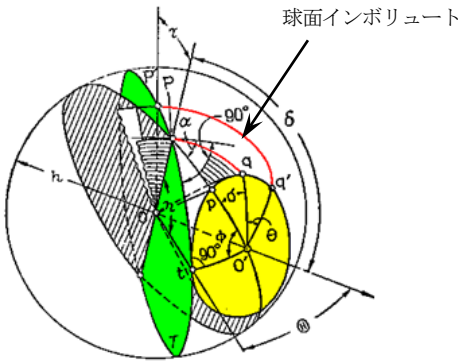
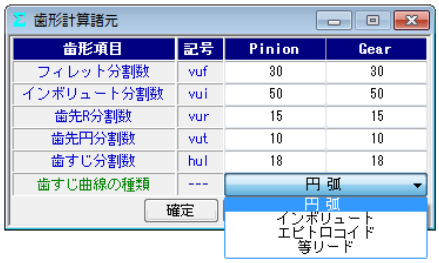


図 2.12　球面インボリュート歯形

歯形計算条件を図2.13に示します．また，まがりばかさ歯車の歯すじ（図2.14）は,「円弧」,「インボリュート」,「エピトロコイド（図2.15）」,「**等リード**」を選択することができます．歯すじ

を「**等リード**」とすることで金型から一定のリードで抜くことも可能ですし，大形歯車でも組み立てが容易です．



歯形項目	記号	Pinion	Gear
フィレット分割数	vuf	30	30
インボリュート分割数	vui	50	50
歯先R分割数	vur	15	15
歯先円分割数	vut	10	10
歯すじ分割数	hul	18	18
歯すじ曲線の種類	---	円 弧	

図2.13　歯形計算諸元

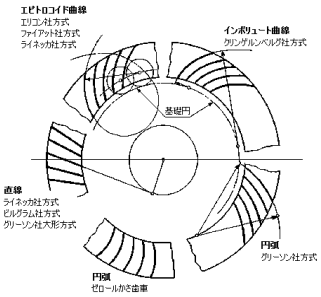


図2.14　歯すじ曲線

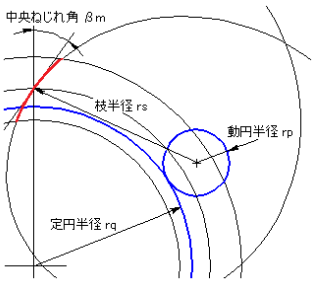


図2.15　エピトロコイド曲線

2.8　かみ合い図

正面歯形の作図機能として拡大，距離計測などがあり，外端，中央，内端部の歯形を表示します．

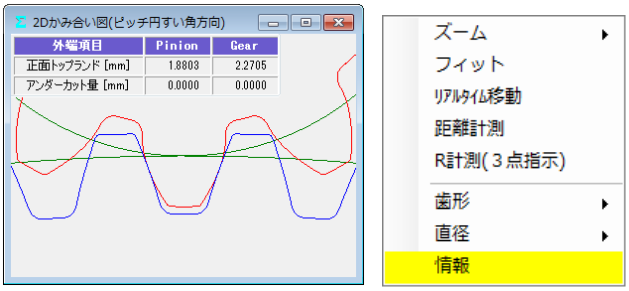


図2.16　歯形（外端），ピッチ円すい角方向

2.9　歯形レンダリング

歯形レンダリングを図2.17に示します．コントロールフォームで歯車の表示角度を変更でき，図の大きさを変えることもできます．また，歯面接触を確認するため角度変換した状態を図2.18に示します．ここでは，ピニオンを「水平」，「垂直」に移動することができますので誤差を与えたときのかみ合い接触線を容易に把握することができます．

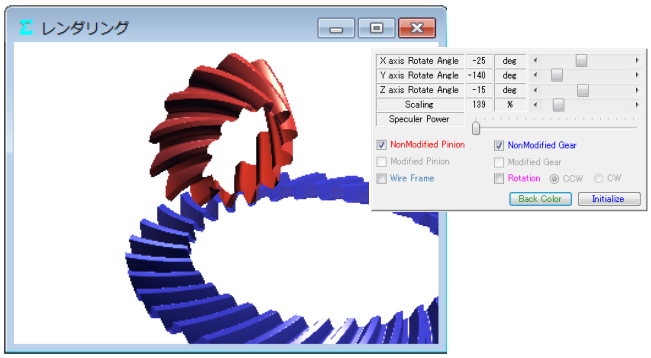


図2.17　歯形レンダリング1とコントロールフォーム

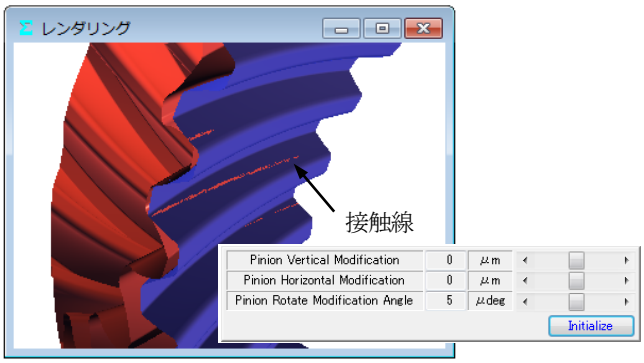


図2.18　歯形レンダリング2（無修整歯形の例）

2.10　歯形・歯すじ修整（オプション）

歯形修整，歯すじ修整をする場合，図2.19～2.23に示すように修整を与えることができます．図2.21では修整する指定点数（最大=50）を入力することができ，図2.22のように円弧パターンで入力することもできます．

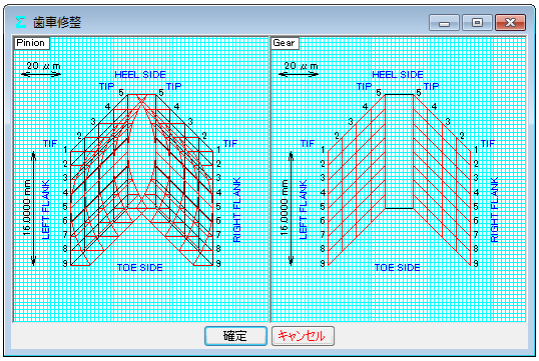


図2.19　歯形・歯すじ修整トポグラフ

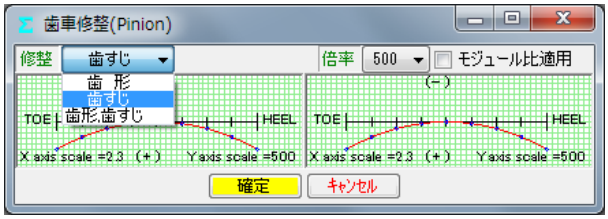


図2.20　歯すじ修整の例

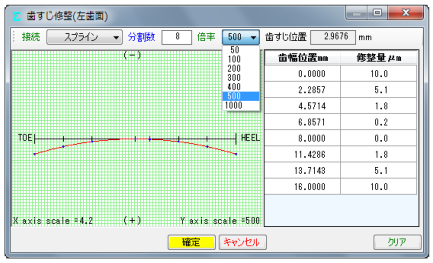


図2.21　歯すじ修整の入力1

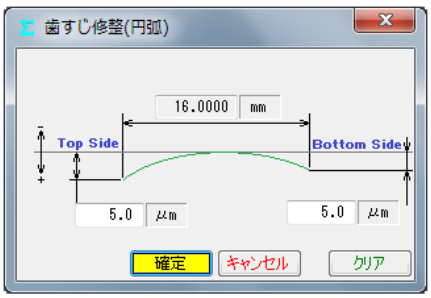


図2.22　円弧パターンの入力

歯形1本，歯すじ1本の修整の例を図2.23に示します．

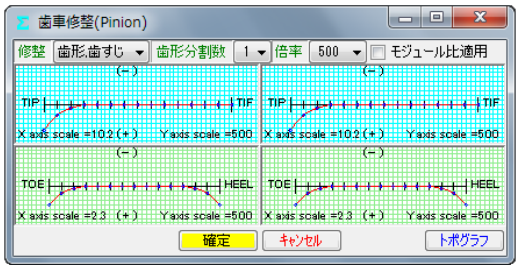


図2.23　歯形・歯すじ修整の入力

歯形断面分割を5，歯すじ1としたときの修整とトポグラフの例を図2.24に示します．トポグラフでは，歯形と歯すじの分割数をそれぞれ最大50まで設定することができます．

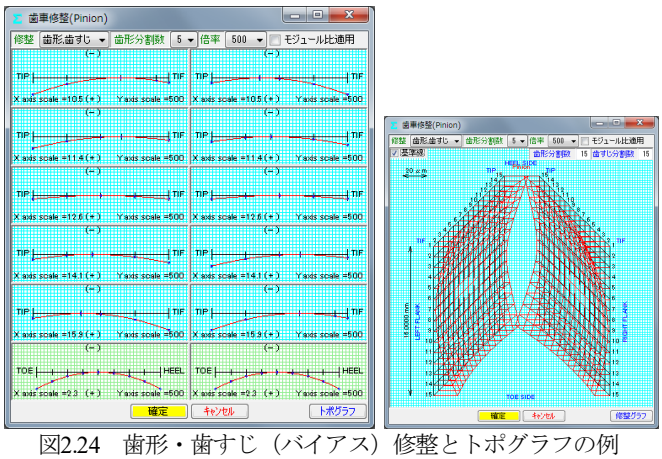
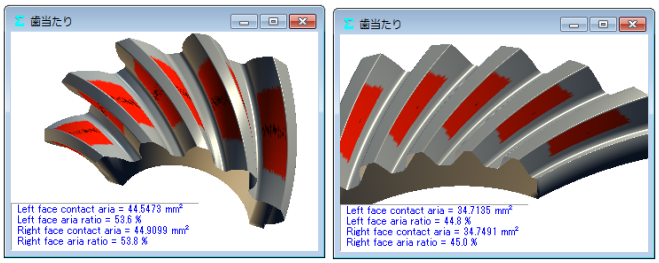


図2.24　歯形・歯すじ（バイアス）修整とトポグラフの例

2.11　歯当たり（オプション）

歯形・歯すじ修整を与えた歯車（無修整歯形を含む）の歯当たりを表示することができます．図2.25の歯当たり設定では取り付け誤差，接触最大クリアランス（光明丹厚さ）を設定することができます．例として図2.19の修整を与えたときの歯当たりを図2.26に示します．

図2.25　歯当たり設定



(a)ピニオン　　(b)ギヤ

図2.26　歯当たり

2.12　バックラッシ変化

図2.24の歯形・歯すじ修整を有する歯車のバックラッシの変化を図2.27に示します．図2.27よりこの歯車のキックアウトは0.2μmであることが解ります．

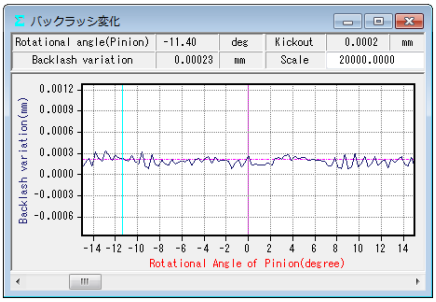
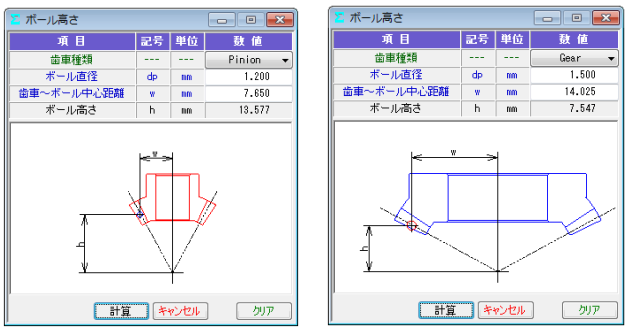


図2.27　バックラッシ変化

2.13　ボール高さ

歯厚管理をするため歯幅の中央付近にボールを配置し，その時のボール高さを計算（すぐばかさ歯車のみ）します．製造時の歯厚管理に適しています．図 2.28 に，かさ歯車のボール高さの例を示します．



(a)ピニオン　　(b)ギヤ

図2.28　ボール高さ

2.14　歯形データ出力（オプション）

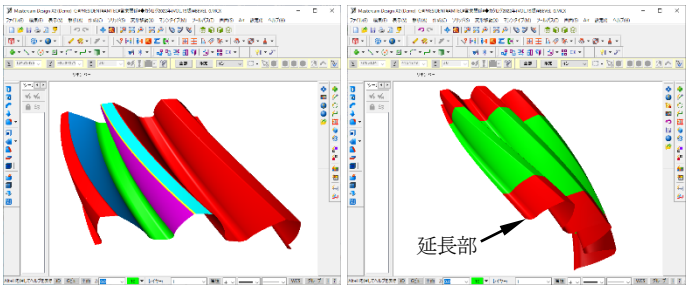
歯形・歯すじ修整を与えた歯形（無修整歯形を含む）をCADデータで出力することができます．図2.29で歯形ファイル条件を設定し，図2.31のように3D-IGESファイルを出力することができます（3D-DXFも出力可能）．また，かみ合い歯形の3D-IGESや図2.30のように組図の2D-DXFファイルを出力することができます．なお，図2.30で歯形の分割数を変更することができます．

3D-IGESファイル歯形生成時，歯幅を延長して出力したい場合は，図2.29(b)で対応可能です．CAD作図例を図2.31(b)に示します．

(a) 設計歯幅　　(b) 設計歯幅+歯幅延長

図2.29　歯形ファイルの設定

図2.30　歯形ファイルの設定（分割数）



(a) 設計歯幅　　(b) 設計歯幅と延長歯幅

図2.31　CAD作図例（ピニオン；分割型の例）

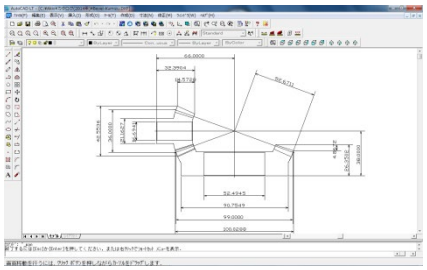


図2.32　CAD作図例（組図）

2.15　伝達誤差解析（オプション）

図2.19の歯形で無負荷における回転伝達誤差解析を行った例を以下に示します．取り付け誤差を図2.33のように与え，ピニオンのピッチ誤差（歯番号6のみ）として5μmを与えています．

図2.33　回転伝達誤差解析の設定

伝達誤差，ワウ・フラッタ，フーリエ解析の計算結果を図2.34～2.36に示します．図2.35のワウ・フラッタではこのグラフ波形を音で確認することができます（グラフ右上の Sound ▶ ）．

ピッチ誤差の設定は図2.37および図2.38 に示すように最大値で入力することも歯の誤差を個々に入力することもできます．

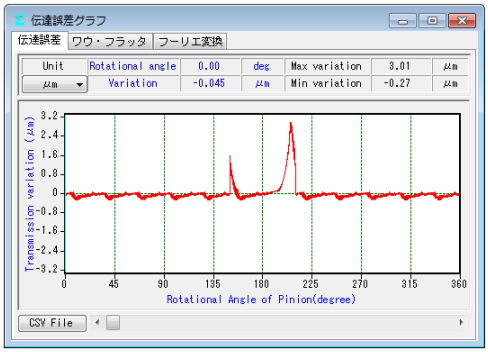


図2.34　伝達誤差結果

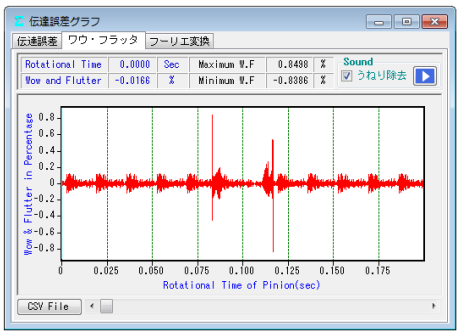


図2.35　ワウ・フラッタ

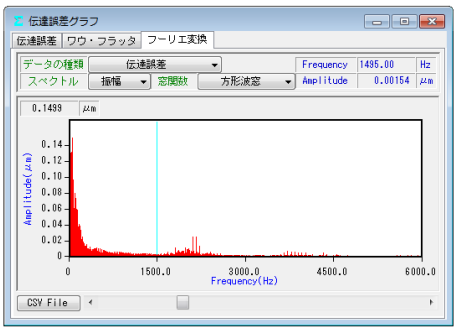


図2.36　フーリエ解析

図2.37　ピッチ誤差の設定（最大値設定）

図2.38　ピッチ誤差の設定（全歯値設定）

2.16　歯形測定データ出力（オプション）

Carl Zeiss 三次元測定機と大阪精密機械測定機の 2 種類の測定データ出力機能があります．

(1)三次元測定機（Carl Zeiss）用測定データ出力の概要

図 2.39 に測定データの設定画面を示します．歯形分割数と歯面の測定逃げ量および測定基準距離を設定することにより測定点座標と法線ベクトルをファイルに出力します．

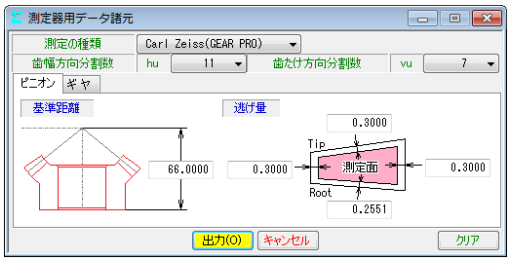


図2.39　測定データの設定（Carl Zeiss）

(2)大阪精密機械測定機の測定データ出力の概要

図2.40の測定データの設定をすることにより測定ノミナルデータをファイルに出力します．「測定機(HyB-35･65)は，測定歯面を「点」ではなく「線」で測定するため精密な測定をすることができます．3 次元測定機のような格子点ではなく，線で歯のエッジまで測定することにより，騒音や振動の原因となる微妙な形状誤差をキャッチし，歯車の精度を追求します．」(大阪精密機械㈱様カタログより転載)

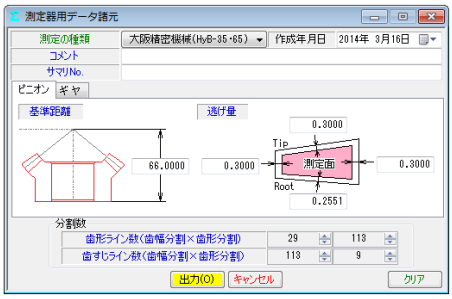


図2.40　測定データの設定（大阪精密機械）

2.17　測定例 1

involuteΣiii(bevel gear design)で，かさ歯車測定用の歯形データと測定ベクトルを出力して Carl Zeiss 社の 3 次元測定機のベベルギヤ測定用ソフトウェア(*GearPro-Bevel*[1])で読み込み，表示した例を図 2.41～2.43 に示します．

*1)：「*GearPro*は，ドイツ・カール ツァイス社(Carl Zeiss IMT GmbH)の製品です．」

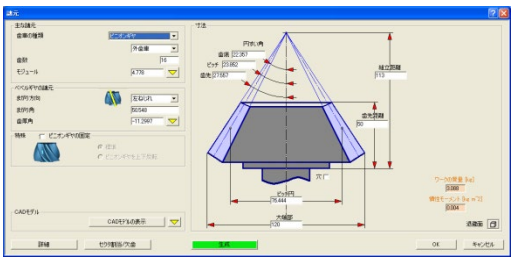


図 2.41　ベベルギヤ諸元（Carl Zeiss）

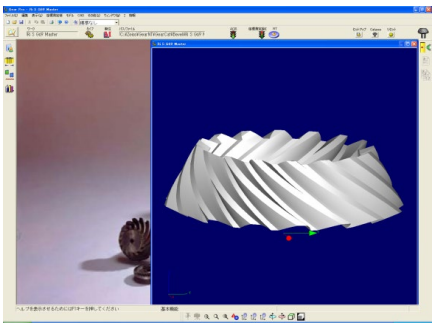
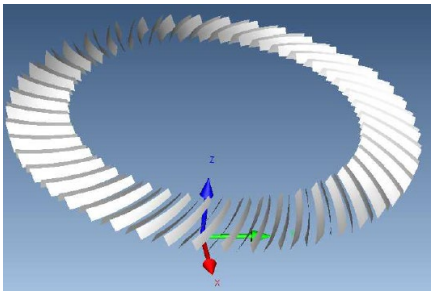


図 2.42　ベベルギヤ測定用画面（Carl Zeiss）



$m6, z_1=11, z_2=45, \alpha=20°, \Sigma=90°$

図 2.43　歯形測定点およびベクトルデータ（Carl Zeiss）

2.18 測定例 2

involuteΣiii(bevel gear design)でベベルギヤ測定用の歯形データと法線ベクトルを出力して大阪精密機械測定機(HyB-35･65)で測定した例を図 2.44 に示します．

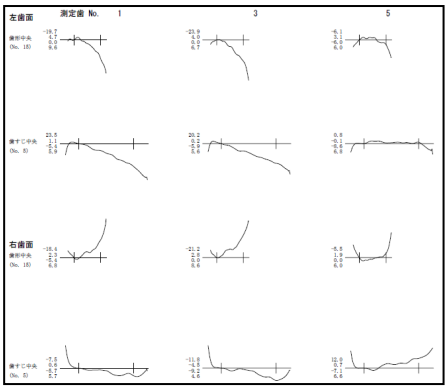


図 2.44　ストレートベベル歯形・歯すじ測定例

2.19 歯車強度計算（JGMA）

JGMA 403-01:1976(曲げ)，404-01:1977(面圧)に基いて計算します．

(1)動力設定：トルク設定（MN･m, kN･m, N･m, N･cm, N･mm, kgf･m, kgf･cm, gf･cm）と回転速度，クラウニングの有無などの設定画面を図 2.45 に示します．

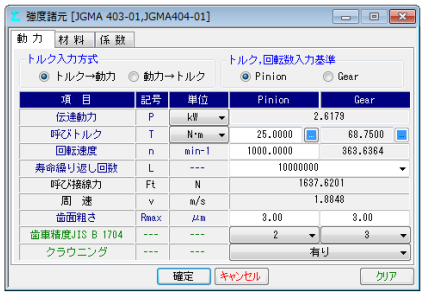


図2.45　動力設定

(2)材料設定：図 2.46 の材料設定で許容応力等を設定します．　材料の選択は，図 2.47 の中から硬度を参考にして材料の許容応力値を決定します．また，材料記号，材料の許容応力値（σ_{Flim}, σ_{Hlim}）および硬度は，任意に入力することができます．

図2.46　材料設定

図2.47　材料選択

(3)係数設定：強度計算の係数設定画面を図2.48に示します．係数は補助フォームを表示しますのでその中から選択することも，直接入力することもできます．強度計算結果を図2.49に示します．

図2.48　強度計算の係数設定

項目(曲げ)	記号	単位	Pinion	Gear
許容曲げ応力	σFlim	MPa	480.5000	480.5000
歯形係数	YF	---	2.2539	2.2169
荷重分配係数	Yε	---	0.8266	
ねじれ角係数	Yβ	---	0.7500	
寿命係数	KL	---	1.0000	1.0000
寸法係数	KFx	---	1.0000	1.0000
動荷重係数	Kv	---	1.0885	
呼び円周力	Ft	N	1637.6201	
許容円周力	Ftlim	N	6218.9695	6322.6838
歯元曲げ応力	σF	MPa	126.5284	124.4529
曲げ強さ	Sft	---	3.7976	3.8609
項目(面圧)	**記号**	**単位**	**Pinion**	**Gear**
許容ヘルツ応力	σHlim	MPa	1275.0000	1275.0000
領域係数	ZH	---	2.1307	
寿命係数	KHL	---	1.0000	1.0000
かみ合い率係数	Zε	---	0.9092	
硬さ比係数	ZW	---	1.0000	1.0000
動荷重係数	Kv	---	1.0885	
呼び円周力	Fc	N	1637.6201	
許容円周力	Fclim	N	1932.1895	1932.1895
ヘルツ応力	σH	MPa	1173.7941	1173.7941
歯面強さ	Sfc	---	1.1799	1.1799

図2.49　強度計算結果

2.20 歯車強度計算（AGMA）（オプション）

AGMA 2003-B97:1997 に基いて計算します．図 2.2 のプロパティで強度計算「AGMA 2003-B97」を選択します．ここでは，図 2.51 の歯車についての強度計算例を図 2.52～2.56 に示します．

図 2.50　寸法諸元

図 2.51　強度諸元

図 2.52　強度計算結果（面圧）

図 2.53　強度計算結果（曲げ：ピニオン凹）

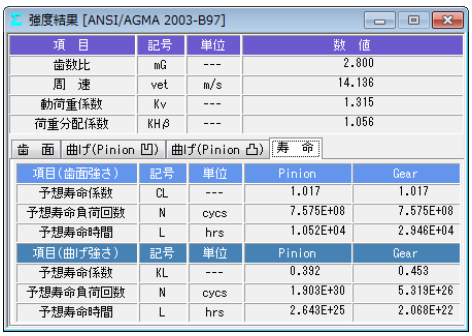


図 2.54　寿命計算結果

Geometry factor [ANSI/AGMA 2003-B97]

Geometry factor I | Geometry factor J (Pinion Concave) | Geometry factor J (Pinion Convex)

Item	Symbol	Unit	Pinion	Gear
Geometry factor for Pitting resistance	ZI	---	0.112	
Mean cone distance	Rm	mm	284.487	
Addendum angle	θα1,2	deg	3.471	1.786
Mean addendum	ham1,2	mm	14.645	6.257
Location constant	k'	---	0.139	
Mean transverse diametral pitch	Pm	mm	0.078	
Outer transverse circular pitch	Pe	mm	47.124	
Mean normal base pitch	Pmbn	mm	30.851	
Mean normal circular pitch	Pmn	mm	32.831	
Mean transverse pitch radius	rmpt1,2	mm	101.602	796.562
Mean normal pitch radius	rmpn1,2	mm	151.417	1187.109
Mean normal base radius	rmbn1,2	mm	142.285	1115.518
Mean normal outside radius	rmne1,2	mm	166.062	1193.366
Length of mean normal addendum action	gαn1,2	---	33.835	17.944
Length of action in mean normal section	gαn	---	51.780	
Transverse contact ratio	εα	---	1.191	
Intermediate variable	Kz	---	0.363	
Face contact ratio	εβ	---	1.764	
Modified contact ratio	εo	---	2.128	
Mean base spiral angle	βmb	deg	32.615	
Length of action within the contact ellipse	gη	mm	65.228	
Mean normal profile radius of curvature at pitch ...	ρm1,2	mm	48.979	383.992
Assumed locations of critical point on tooth for ...	yI	---	-0.408	
-----	gηI	mm	65.223	
Distance along path of action in mean normal se...	gyo	---	13.705	
Profile radius of curvature at point fI	ρ1,2	mm	62.684	370.287
Relative radius of profile curvature	ρyo	mm	53.609	
Length of the line of contact	gc	mm	66.860	
Inertia factor	Zi	---	1.000	
-----	g'ηI	mm	66.698	
Load sharing ratio	εNI	---	0.935	

図 2.55　幾何係数（I）

Geometry factor [ANSI/AGMA 2003-B97]

Geometry factor I | Geometry factor J (Pinion Concave) | Geometry factor J (Pinion Convex)

Item	Symbol	Unit	Pinion	Gear
Geometry factor for bending	YJ1,2	---	0.254	0.287
Mean dedendum	hfm1,2	mm	8.869	17.257
Assumed locations of critical point on tooth for ...	yJ	---	0.000	
Length of action within the contact ellipse	gη	mm	65.228	
Determination of point of load application for max	y3	---	31.832	19.947
Distance from mean section to center of pressure	go"	mm	7.822	7.822
Sum of gear and pinion mean normal pitch radii	Σrmpn	mm	1338.526	
Normal pressure angles at point of load applicati...	αL1,2	deg	24.777	19.368
One half of angles subtended by normal circular	ζh1,2	deg	2.868	0.403
Normal pressure angles at point of load applicati...	αh1,2	deg	21.909	18.964
Distances from pitch circle to point of load appli...	Δryo1,2	mm	1.945	-7.568
Tool or cutter tip edge radii used to produce	ρao1,2	mm	4.000	4.000
Tooth fillet radii in mean section at the tooth root	rmf1,2	mm	4.152	4.146
Tooth strength factor	XN1,2	---	14.185	18.449
Tooth form factors excluding stress concentra	Y1,2	---	0.754	0.892
Stress concentration and stress correction factor	Yf1,2	---	2.114	2.326
Empirical constant used in stress correction for...	H	---	0.180	
Empirical exponent used in stress correction for...	L	---	0.150	
Empirical exponent used in stress correction for...	M	---	0.450	
Tooth form factors for gear and pinion	YP,YG	mm	0.356	0.426
-----	g'ηJ	---	66.679	
Load sharing ratio	εNJ	---	0.936	
Inertia factor	Yi	---	1.000	
Projected length of instantaneous line of contact	gK	mm	56.322	
Toe increments of face width (effective)	Δb'i1,2	mm	36.210	36.210
Toe increments of face width	Δbi1,2	mm	36.210	36.210
Heal increments of face width (effective)	Δb'e1,2	mm	17.111	17.111
Heal increments of face width	Δbe1,2	mm	17.111	17.111
Effective face width	b'1,2	mm	74.900	72.747

図 2.56　幾何係数（J：ピニオン凹）

動力とトルクの関係を計算する補助機能画面を図2.57に示します．

定格伝達動力の計算

トルク,回転数入力基準　◉ Pinion　○ Gear

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
呼びトルク	T	N·m	7958.1000	22282.6815
回転速度	n	min-1	1200.0000	428.5714
定格伝達動力	P	kW	1000.0000	

確定　キャンセル　数値クリア

図 2.57　補助機能

2.21 歯車強度計算（樹脂歯車）

樹脂歯車の曲げ強さは Lewis の式，歯面強さは Hertz の式で計算します．図 2.2 のプロパティで「樹脂」を選択します．ここでは, 図 2.58 のすぐばかさ歯車についての強度計算例を図 2.59 および図 2.60 に示します．

樹脂材料の許容応力値は，温度，寿命を考慮した樹脂材料の実験値を使用しています．適応材料は，M90，KT20，GH25，ナイロンです．これ以外の材料は, M90 比率係数（共通物性値との比）で計算することができます．

寸法諸元

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
かさ歯車種類	---	---	すぐばかさ歯車	
寸法分類	---	---	AGMA 208.03	
歯たけ傾斜	---	---	-----	
外端正面モジュール	mt	mm	1.00000	
歯　数	z	---	18	33
歯直角圧力角	αn	deg	20.00000	
中央ねじれ角	βm	deg	0 ° 0 ' 0.0 "	
ねじれ方向	---	---	-----	-----
軸　角	Σ	deg	90 ° 0 ' 0.0 "	
歯　幅	b	mm	5.6385	
外端基準円直径	d	mm	18.0000	33.0000
ピッチ円すい角	δ	deg	28.6105	61.3895
外端歯先R	ra	mm	0.1000	0.1000
カッタ刃先R	ro	mm	0.1200	0.1200
カッタ半径	rc	mm	0.000 (0.000)	
歯たけ設定基準	---	---	外端歯たけ基準	
外端全歯たけ	ho	mm	2.2380	
外端有効歯たけ	heo	mm	2.0000	
外端歯末のたけ	hao	mm	1.3231	0.6769
外端歯元のたけ	hfo	mm	0.9149	1.5611
歯厚設定基準	---	---	外端正面円弧歯厚基準	
外端正面円弧歯厚	St	mm	1.8060	1.3356
円すい角設定基準	---	---	外端基準	
歯先円すい角	δa	deg	33.35865	64.17626
歯底円すい角	δf	deg	25.82374	56.64135

確定　キャンセル　クリア

図 2.58　寸法諸元

樹脂強度諸元 [Lewis]

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
材料記号	---	---	M90-44	M90-44
M90倍率	---	× M90	*****	M90-44 / KT-20 / GH-25 / ナイロン
トルク	T	N·cm	10.000	
回転数	n	rpm	300.000	
寿命繰り返し回数	L	---	10000000.000	
周　速	V	m/s	0.283	
潤滑状態	---	---	グリス	
歯車周囲温度	Te	℃	60.000	
過負荷係数	Ko	---	1.000	
歯元曲げ安全率	SF	---	1.200	
歯面損傷安全率	SH	---	1.150	
弾性係数	E	MPa	1721.067	1721.067

確定　キャンセル　クリア

図 2.59　強度諸元（樹脂歯車）

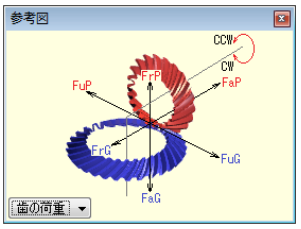
樹脂強度結果 [Lewis]

項目(曲げ)	記号	単位	Pinion	Gear
許容曲げ応力	σFlim	MPa	25.7780	26.6426
歯形係数	YF	---	0.6133	0.6970
速度補正係数	Kv	---	1.3977	
温度係数	KT	---	0.6500	
潤滑係数	KL	---	1.0000	
材質係数	KM	---	0.7500	
呼び円周力	Ft	N	13.0719	
許容円周力	Ftlim	N	63.1407	74.1622
歯元曲げ応力	σb	MPa	5.3368	4.6960
曲げ強さ	Sft	---	4.8303	5.6734
項目(面圧)	**記号**	**単位**	**Pinion**	**Gear**
許容面圧応力	σHlim	MPa	54.7190	63.2217
呼び円周力	Fc	N	13.0719	
許容円周力	Fclim	N	29.6890	34.3023
ヘルツ応力	σH	MPa	20.9500	20.9500
歯面強さ	Sfc	---	2.2712	2.6241

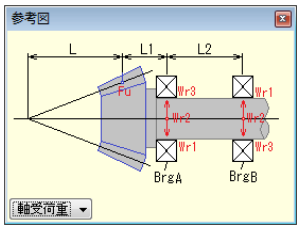
図 2.60　強度結果（樹脂歯車）

2.22　軸受荷重

歯と軸受に作用する荷重の計算をします．図 2.61 に歯に作用する荷重の方向と軸受位置の参考図を示します．図 2.62 でトルクと軸受距離を入力することにより軸受荷重を表示します．

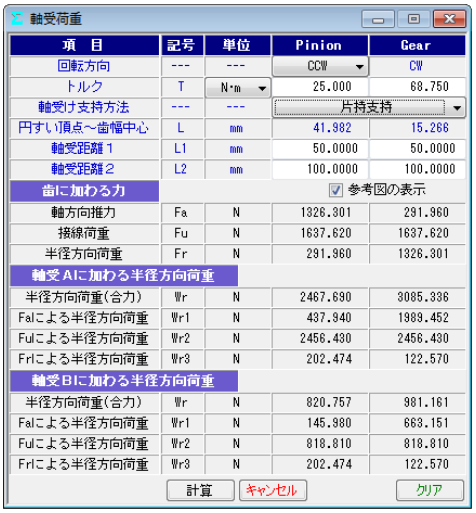


(a) 歯に作用する荷重の方向



(b)軸受位置

図 2.61　参考図



軸受荷重

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
回転方向	---	---	CCW	CW
トルク	T	N･m	25.000	68.750
軸受け支持方法	---	---	片持支持	
円すい頂点～歯幅中心	L	mm	41.982	15.266
軸受距離１	L1	mm	50.0000	50.0000
軸受距離２	L2	mm	100.0000	100.0000
歯に加わる力			参考図の表示	
軸方向推力	Fa	N	1326.301	291.960
接線荷重	Fu	N	1637.620	1637.620
半径方向荷重	Fr	N	291.960	1326.301
軸受Aに加わる半径方向荷重				
半径方向荷重(合力)	Wr	N	2467.690	3085.336
Faによる半径方向荷重	Wr1	N	437.940	1989.452
Fuによる半径方向荷重	Wr2	N	2456.430	2456.430
Frによる半径方向荷重	Wr3	N	202.474	122.570
軸受Bに加わる半径方向荷重				
半径方向荷重(合力)	Wr	N	820.757	981.161
Faによる半径方向荷重	Wr1	N	145.980	663.151
Fuによる半径方向荷重	Wr2	N	818.810	818.810
Frによる半径方向荷重	Wr3	N	202.474	122.570

計算　キャンセル　クリア

図 2.62　軸受荷重

2.23　歯面評価（オプション）

強度計算終了後，図 2.63 の歯面評価グラフ設定画面で歯形修整の有無，駆動歯車の種類，計算ポイント数を入力するとすべり率グラフ（図 2.64）とヘルツ応力グラフ（図 2.65）を表示します．

歯面評価グラフ諸元

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
歯車の温度	GTc	℃	70.000	
油の温度	Tc	℃	40.000	
油の種類	---	---	鉱物油	
ISOグレード	---	---	ISO VG 320	
動粘度(40℃)	---	mm²/s	320	
平均温度	Mtc	℃	252.000	
標準偏差温度	SD	℃	41.000	
絶対粘度	μo	cP	53.48	
粘度圧	α	mm²/N	0.02156	
なじみ歯面粗さ(Ra)	σ1, σ2	μm	0.400	0.400
摩擦係数の方式	---	---	一定値	
摩擦係数	μm	---	0.0600	
歯形修整	---	---	有り	
駆動歯車	---	---	Pinion	
計算ポイント数	---	---	100	

確定　キャンセル　クリア

図 2.63　歯面評価グラフ

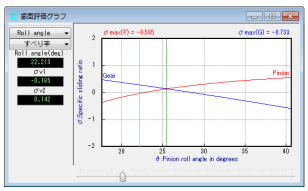


図 2.64　すべり率

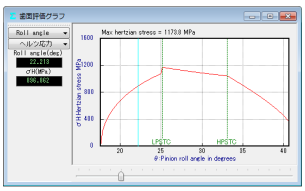


図 2.65　ヘルツ応力

2.24　FEM 歯形応力解析（オプション）

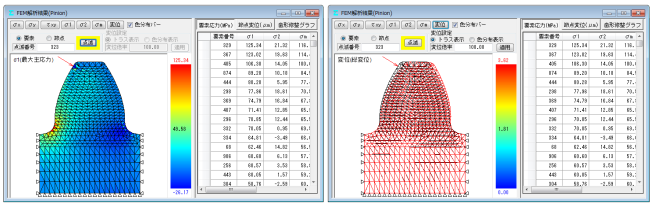
図2.66 に示すFEM 解析の設定画面で縦弾性係数，ポアソン比，分割数および荷重位置そして荷重を入力することにより 5 種類の応力（σ_x ,σ_y ,せん断応力 τ，主応力 σ_1 ,σ_2）を計算します．歯車強度計算と共に歯に作用する実応力を評価する事ができますので歯車強度の信頼性を高めることができます．図 2.67 に最大主応力 σ_1 と変位図を示します．

FEM解析諸元

項　目	記号	単位	Pinion	Gear
計算位置	---	---	中　央	
材料記号	---	---	SCM420	SCM420
縦弾性係数	E	MPa	206000.0	206000.0
ポアソン比	ν	---	0.30	0.30
縦分割数(歯面部)	nNO	---	21	21
横分割数	wNO	---	21	21
荷重点位置	Nf	---	2	2
荷　重	F	N	1637.6201	

確定　キャンセル　クリア

図 2.66　FEM 解析の設定



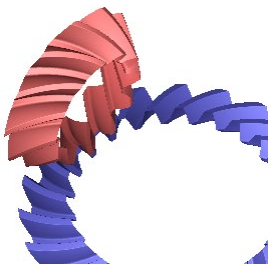
(a) ピニオン，σ_1　　(b)　ピニオン，変位

図 2.67　FEM 解析結果

2.25　歯車作図例

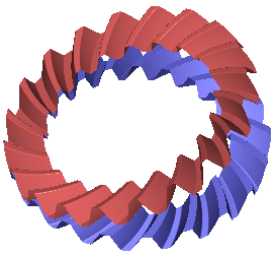
まがりばかさ歯車の歯すじを等リードで出力した歯形を図 2.68 に，軸角が 160°　の例を図 2.69 に示します．デファレンシャルベベルギヤのように歯数が少ない歯車であっても球面インボリュート歯形であるため正しい歯当たりを示します．

歯形データを使用して，ボールエンドミルで機械加工した例を図 2.71 に示します．また，図 2.72 に光造形モデルの写真を示します．



$m2, z_1$=12, z_2=23, β=35°, Σ=90°

図 2.68　等リードスパイラル



$m2, z_1$= z_2=20, β=35°, Σ=160°

図 2.69　軸角 160°スパイラル

図 2.71　歯車加工例

$m1$,$z28$, α20°, β35°

図 2.72　光造形モデル

2.26　大歯車；スキュー平面歯形（オプション）

5 軸加工機で歯車を加工する場合，曲面よりも平面の方が，加工能率が良いため大歯車の歯面を平面とし，小歯車は，これに共役面を持つ歯面を生成しています．

図 2.3 の歯車で，大歯車の歯すじを図 2.73 のように「スキュー（ギヤ直線歯）」を選択することで歯形を生成することができます．生成した歯形を確認すると大歯車の歯形は図2.74 のように直線であり歯すじも図2.75 のように直線となっていることが分かります．

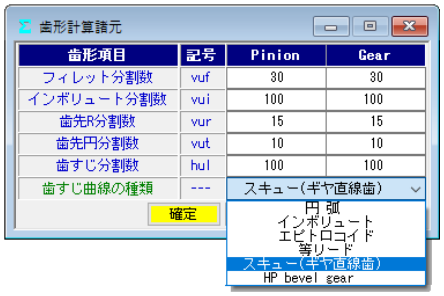


図 2.73　歯形計算諸元

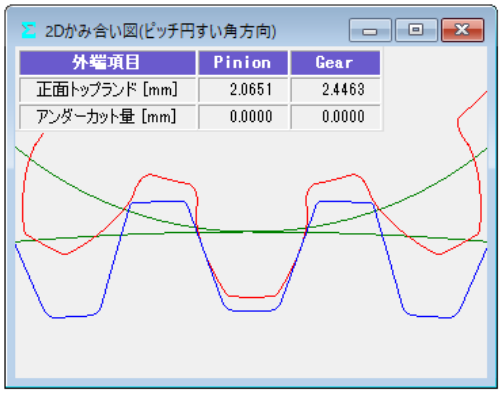
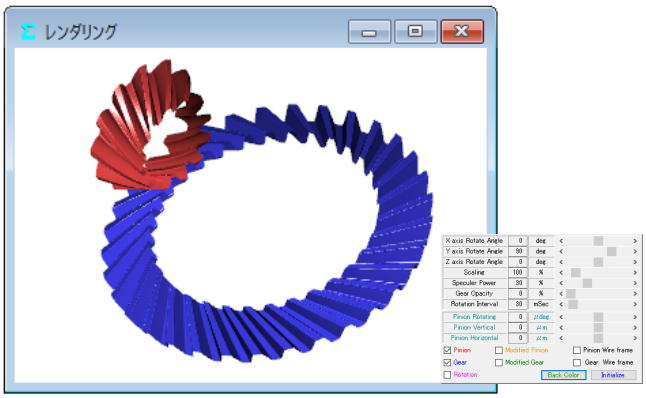


図 2.74　歯形（外端）



m=3, z_1=12, z_2=33, α20°, β=35°, b=16

図 2.75　レンダリング

歯面修整は，図2.24 と同様に施すことができますが，ここでは，小歯車に単純な歯すじ修整（図 2.76）のみ施した例を示します．

小歯車に歯すじ修整を施すことで図2.77 のレンダリングおよび図2.78 の歯当たり解析のように歯幅中央部での接触を確認することができます．図 2.76 では大歯車を無修整としていますが，修整は可能です．

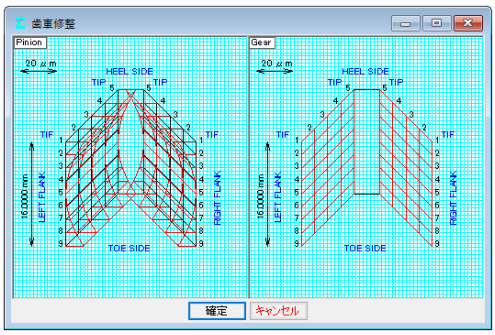


図 2.76　歯すじ修整（小歯車），大歯車は無修整

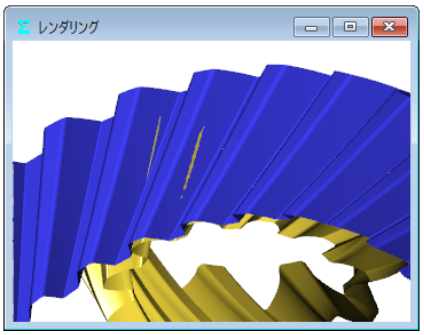
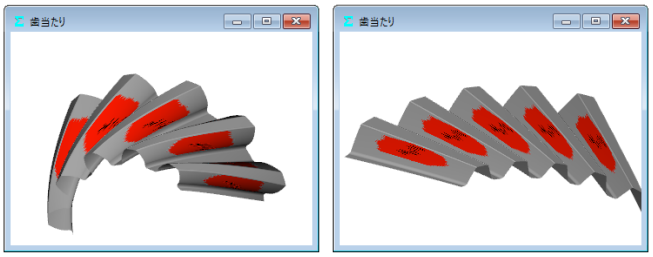


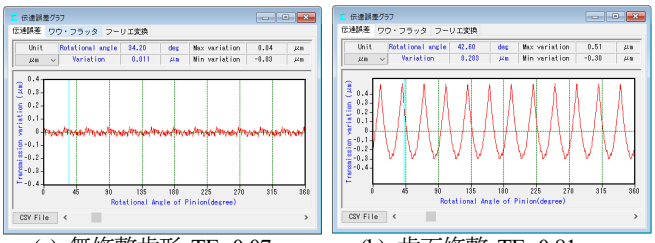
図 2.77　レンダリング（小歯車歯すじ修整）



(a)小歯車　　(b)大歯車

図 2.78　歯当たり

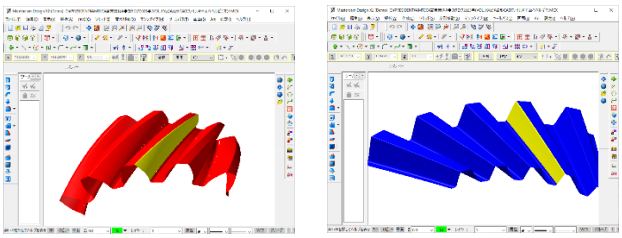
伝達誤差は図 2.79 のように無修整歯形の場合，TE=0.07μm であり図 2.76 の歯面修整を施した場合は TE=0.81μm です．



(a) 無修整歯形, TE=0.07μm　　(b) 歯面修整, TE=0.81μm

図 2.79　伝達誤差

歯形出力は図 2.29 と同様の手順で CAD データファイルを出力することができます．作図例を図 2.80 に示します．また，測定データも図 2.39 測定データの設定（Carl Zeiss）と同様です．



(a)小歯車　　(b)大歯車

図 2.80　CAD 作図例

2.27 HP²-bevel gear（オプション）

〈等リードスパイラルで大歯車の歯形が直線のかさ歯車〉

5 軸加工機で歯車を加工する場合，歯形が直線のほうが加工し易く，また，工具の共用も容易です．このことから大歯車の歯形を直線とし，且つ，歯すじをリード一定（等リード）のスパイラルベベルを **HP²-bevel gear**（High performance, High production-rate bevel gear）とします．

このリードが一定という特徴は，加工においても，また，組み立てにおいても非常に有用です．

歯形の生成は，図 2.3 の歯車の場合，図 2.81 の「HP² bevel gear」を選択することで歯形を生成することができます．この歯形を確認すると大歯車の歯形は図 2.82 のように直線であり，歯すじは，図 2.83 のように，スパイラルベベルとなっていることが分かります．

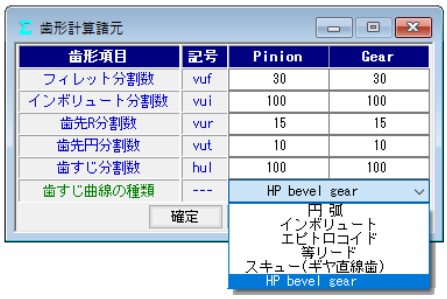


図 2.81　歯形計算諸元

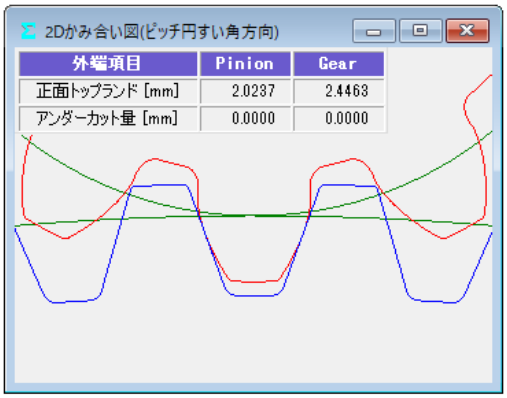
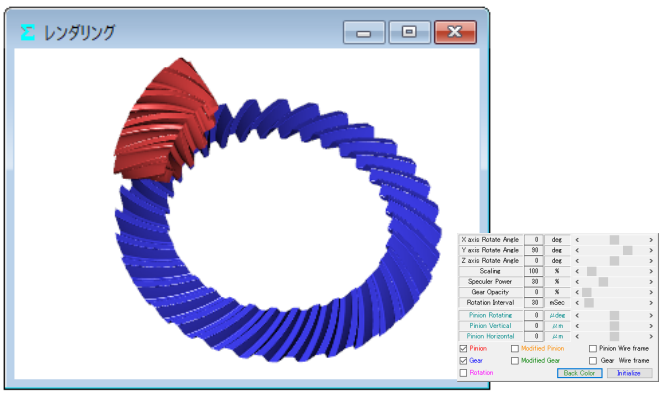


図 2.82　歯形（外端）



m=3, z_1=12, z_2=33, α20°, β=35°, b=16

図 2.83　レンダリング

歯面修整は，図2.24 と同様に施すことができますが，ここでは，小歯車に単純な歯すじ修整（図 2.84）のみ施した例を示します．

小歯車に歯すじ修整を施すことで図 285 のレンダリングおよび図2.86 の歯当たり解析のように歯幅中央部での接触を確認することができます．図 2.84 では大歯車を無修整としていますが，修整は可能です．

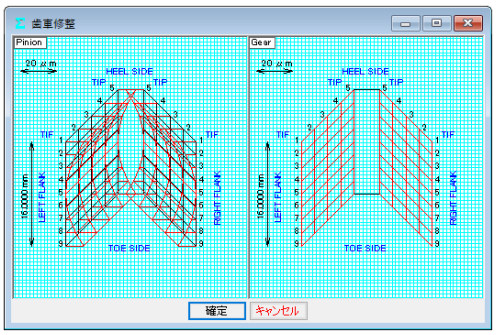


図 2.84　歯すじ修整（小歯車），大歯車は無修整

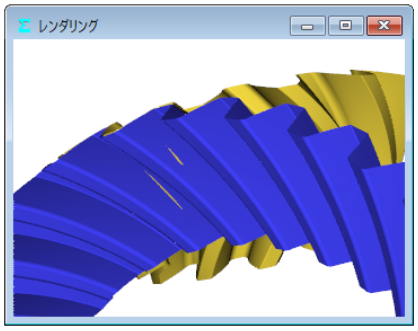
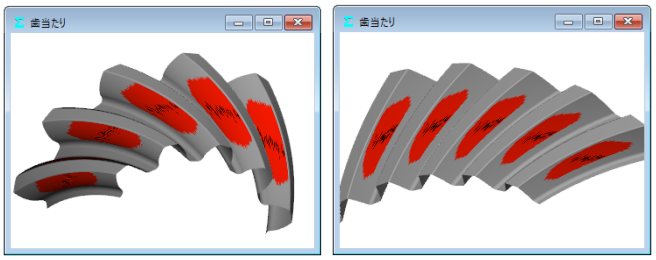


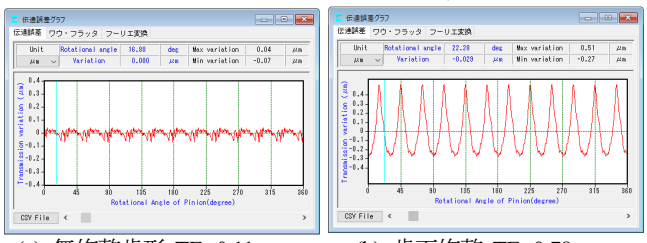
図 2.85　レンダリング（小歯車歯すじ修整）



(a)小歯車　　(b)大歯車

図 2.86　歯当たり

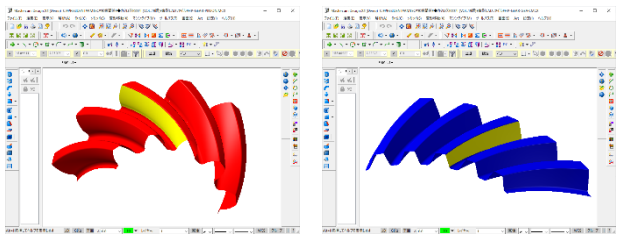
伝達誤差は図 2.87 のように無修整歯形の場合，TE=0.11μm であり図 2.84 の歯面修整を施した場合は TE=0.78μm です．



(a) 無修整歯形, TE=0.11μm　　(b) 歯面修整, TE=0.78μm

図 2.87　伝達誤差

歯形出力は図 2.29 と同様の手順で CAD データファイルを出力することができます．作図例を図 2.88 に示します．また，測定データも図 2.39 測定データの設定（Carl Zeiss）と同様です．

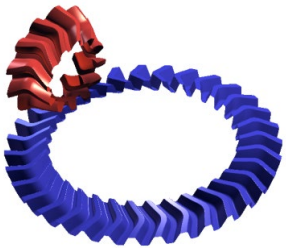


(a)小歯車　　(b)大歯車

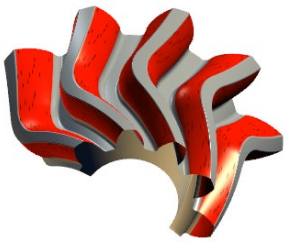
図 2.88　CAD 作図例

2.28 特殊かさ歯車

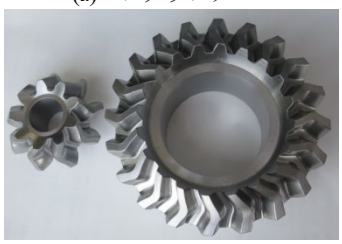
ソフトウェアの標準機能ではありませんが，図2.89のようなダブルスパイラルベベルギヤの歯形も生成することができます．この歯形に関しては別途お問い合わせください．



(a)レンダリング



(b)歯当たり

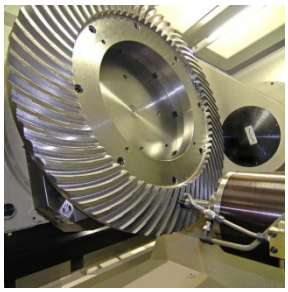


(c)加工例

(d) 3Dプリンタ製

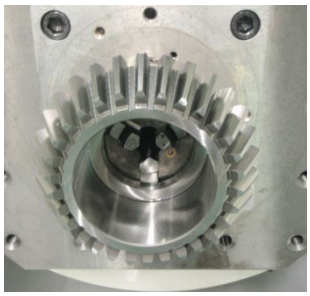
図2.89　ダブルスパイラルベベルギヤ

2.29　マシニングセンタによるベベルギヤの加工例



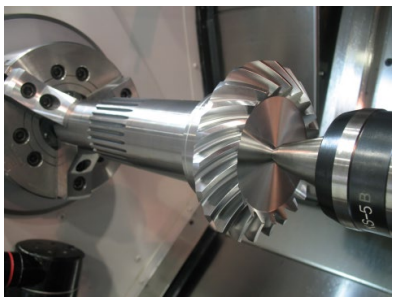
m15, z65, α20°, β=35°, d=975.0（三井精機工業(株)様ご提供）

図 2.90　スパイラルベベルギヤ加工例, HU80A-5X（JIMTOF2008）



D500（m5, z30, α20°, β=0°）((株)牧野フライス製作所様　ご提供)

図 2.91　ストレートベベルギヤ加工例



m6, z22, α20°, β=35°, d=132，複合加工機 MULTUS B300C

（オークマ 株式会社様　ご提供)

図 2.92　スパイラルベベルギヤ加工例

YBMVi40（m5, z20, α20°, β=35°, d=100.0）

（安田工業 株式会社様　ご提供)

図 2.93　スパイラルベベルギヤ加工例

HERMLE C-50U（m10, z47, α20°, β=35°, d=470）

（愛知産業 株式会社様　ご提供)

図2.94　スパイラルベベルギヤ加工例

NMV3000 DCG（m4, z40, α20°, β=35°, d=160）

（DMG 森精機 株式会社様　ご提供)

図 2.95　スパイラルベベルギヤ加工例

（GMT-630，大鳥機工 株式会社様　ご提供)

図 2.96　ブリスク加工例