

[44] SS-Worm gear design system

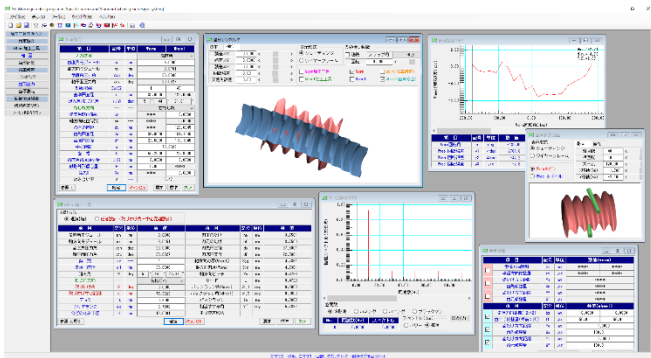


図 44.1 SS-Worm gear design system

44.1 概要

一般に使用されている円筒ウォームギヤは、図 44.35 のように接触歯数が少ないため大きな負荷容量を得ることができません。これを解決するため図 44.37 のようなヒンドレーウォームギヤや、図 44.39 のようにホイールをインボリュート歯形とした鼓形ウォームギヤがあります。しかし、ヒンドレーウォームギヤは、ウォームもホイールも歯形が特殊であり、また、図 44.40 ではかみ合い歯数を多くするということが可能ですが、ホイールの歯たけ方向の線接触ですから大きな歯面応力に耐えるには限度があります。

そこで、図 44.35 のホイールで、かみ合い歯数を多くできるウォームであれば、接触面積が広くすることができるため歯面負荷容量の増大を見込めることができます。このようなウォームギヤとして、ホブ加工を施したホイールとかみ合うウォームの歯形を持つ SS-Worm gear (Specific worm and Standard wheel) ソフトウェアを開発しました。図 44.1 にソフトウェアの全体画面を示します。

44.2 ソフトウェアの構成

SS-Worm gear design system の構成を表 44.1 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。

表 44.1 ソフトウェアの構成

No.	項 目	掲載項	構成
1	初期設定	44.3	○
2	歯車寸法	44.4	○
3	ホブ寸法	44.5	○
4	組図	44.6	○
5	歯形修整	44.7	○
6	歯形レンダリング	44.8	○
7	歯厚	44.11	○
8	歯形出力	44.12	○
9	ホブ基準入力	44.13	◎
10	回転伝達誤差	44.14	◎
11	設計データ管理	---	○

44.3 初期設定

図 44.2 に初期設定画面を示します。ここで設定するウォーム形状は、鼓形と円筒形を選択することができますが、この形状は、外形を表しているもので歯形ではありません。

歯形計算時の分割数は、図 44.2 の参考図のようにホイール歯面、ホイール歯幅、ウォーム断面、ウォーム歯幅の分割数を設定することができます。分割数を大きくすることで歯形を密に生成することができますが、その分、計算時間を要することになります。

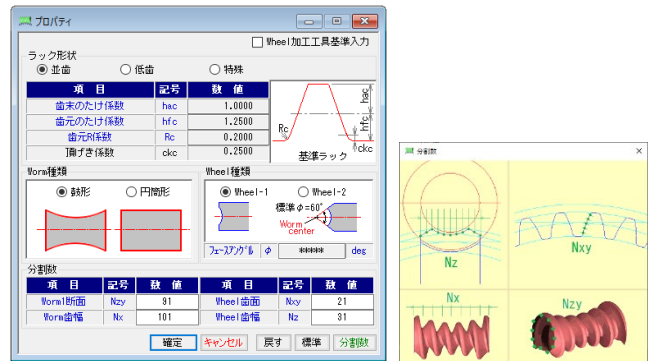


図 44.2 初期設定

44.4 歯車寸法

図 44.3 に歯車寸法の設定画面を示します。まず、入力基準は歯直角と軸平面基準を選択することができますが、ここでは、歯直角基準での例を示します。モジュールから歯厚減少量までは円筒ウォームと変わりはありません。

Worm 鼓形外形偏心量 (E) は、図 44.4 に示すようにウォームを鼓形とするとウォーム外形を調整するためのものです。

項 目	記号	単位	Worm	Wheel
入力基準	---	---	歯直角	
歯直角モジュール	m	mm	3.0000	
軸方向モジュール	m _x	mm	3.0151	
歯直角圧力角	α _n	deg	20.0000	
軸平面圧力角	α _x	deg	20.0927	
条数/歯数	Z _w /Z ₂	---	1	40
基準円直径	d	mm	30.0000	120.6045
進み角/ねじれ角	γ/β	deg	5	44
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	
歯直角転位係数	x _n	---	0.0000	0.0000
軸方向転位係数	x _a	---	0.0000	0.0000
のどの直径	d _t	mm	126.6045	126.6045
歯先円直径	d _a	mm	36.0000	131.1045
歯底円直径	d _f	mm	22.5000	113.1045
中心距離	a	mm	75.3023	
歯 幅	b	mm	50.2000	22.8000
歯直角歯厚減少量	ΔS _j	mm	0.0000	0.0000
鼓形外形偏心量	E	mm	0.00	0.0000
歯先R	R _a	mm	0.0000	0.0000
かみ合い率	ε	---	5.47	

図 44.3 歯車寸法

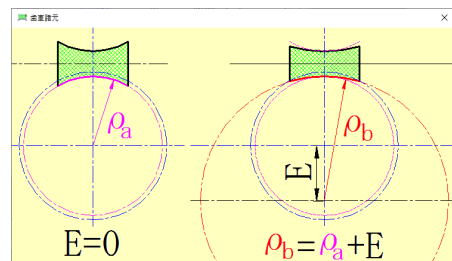


図 44.4 Worm 鼓形外形偏心量 (E)

44.5 ホブ寸法

ホイールの歯形を生成するためのホブを設定します。ホブ寸法は、図 44.5(a)のようにホブ条数とホブ基準円直径を設定することによりホブの取り付け角や取り付け中心距離が決まりますので、クリアランス (ホイールとホブ刃底) を変更するとホブの刃元のたけ、およびホブ刃底円直径が変化します。

一方、図 44.5(b)の任意設計では、取り付け角や取り付け中心距離を任意に設定することができますので、ホイールの歯形、歯すじを変更することができます。この操作により歯当たり調整をすることができます。

設計方法: 理論設計 (任意設計 (取り付け角+中心距離設計))

項目	記号	単位	数値	項目	記号	単位	数値
歯面角モジュール	mn	mm	3.0000	刃先のたけ	ha	mm	3.7501
軸方向モジュール	mx	mm	3.0151	刃先のたけ	hf	mm	3.7500
歯面角圧力角	αn	deg	20.0000	刃先円直径	da	mm	37.5001
軸平面圧力角	αx	deg	20.0927	刃底円直径	df	mm	22.5001
条数	z	---	1	軸方向円厚 (Wheel)	Sjg	mm	4.7381
基準円直径	dh	mm	30.0000	軸方向円厚 (Worm)	Sjp	mm	4.7381
進み角	γ	deg	5° 44' 21.01"	軸方向ピッチ	Px	mm	9.4723
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	リード	L	mm	9.4723
取り付け角	θ	deg	0.0000	バックラッシュ角 (Worm)	θj1	deg	0.0000
取り付け中心距離	a	mm	75.3023	バックラッシュ角 (Wheel)	θj2	deg	0.0000
刃先	ra	mm	0.9000	バックラッシュ	ja	mm	0.0000
クリアランス	ck	mm	0.7500	相当すみ角	γ'	deg	5.7392
のどの丸み半径	rt	mm	12.0001	ホブ交差形状	---	---	---

参照 刃厚 Sj

(a)理論設計

設計方法: 任意設計 (取り付け角+中心距離設計)

項目	記号	単位	数値	項目	記号	単位	数値
歯面角モジュール	mn	mm	3.0000	刃先のたけ	ha	mm	3.7501
軸方向モジュール	mx	mm	3.0151	刃先のたけ	hf	mm	3.7500
歯面角圧力角	αn	deg	20.0000	刃先円直径	da	mm	37.5001
軸平面圧力角	αx	deg	20.0927	刃底円直径	df	mm	22.5001
条数	z	---	1	軸方向円厚 (Wheel)	Sjg	mm	4.7381
基準円直径	dh	mm	30.0000	軸方向円厚 (Worm)	Sjp	mm	4.7381
進み角	γ	deg	5° 44' 21.01"	軸方向ピッチ	Px	mm	9.4723
ねじれ方向	---	---	右ねじれ	リード	L	mm	9.4723
取り付け角	θ	deg	0.0000	バックラッシュ角 (Worm)	θj1	deg	0.0000
取り付け中心距離	a	mm	75.3023	バックラッシュ角 (Wheel)	θj2	deg	0.0000
刃先	ra	mm	0.9000	バックラッシュ	ja	mm	0.0000
クリアランス	ck	mm	0.7500	相当すみ角	γ'	deg	5.7392
のどの丸み半径	rt	mm	12.0001	ホブ交差形状	---	---	---

参照 刃厚 Sj

(b)任意設計
図 44.5 ホブ寸法

44.6 組図

図 44.6 にホブとウォームとホイールの組図を、図 44.7 にホブとホイールのかみ合いを示します。また、図 44.8 にウォーム外形寸法 (鼓形状) を示します。

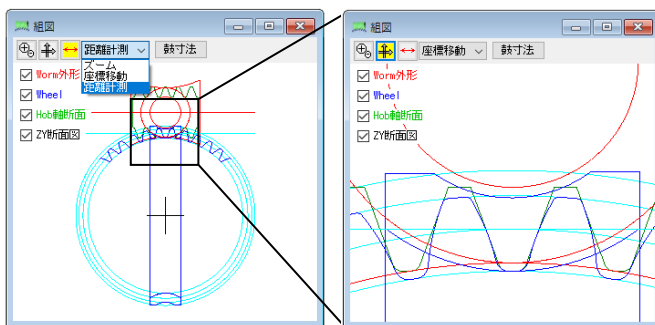


図 44.6 組図 (Hob, Worm, Wheel)

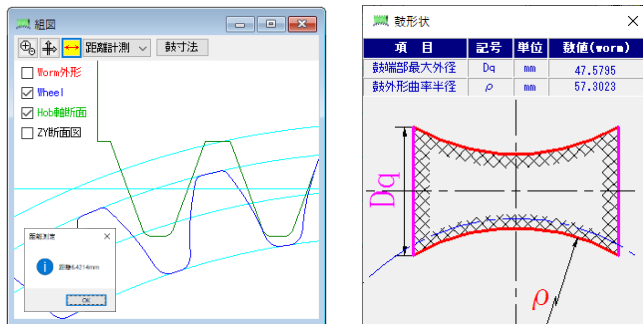


図 44.7 組図 (Hob, Wheel) 計測

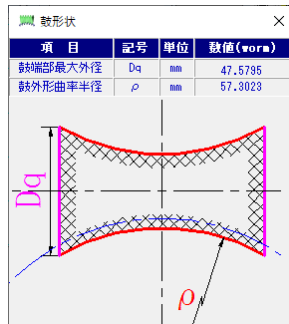


図 44.8 worm 寸法

44.7 歯形修整

歯の接触を 44.8 歯形レンダリングで確認し、歯当りを調整したい場合に歯形修整を行います。歯形修整は、図 44.9 及び図 44.10 のようにウォームとホイールそれぞれに歯形方向、歯すじ方向の修整を設定することができます。

例えば、図 44.11 の A 部ではホイールの側端部まで接触していますが、これを図 44.9 でホイールの歯形修整、歯すじ修整を施す

ことにより図 44.13 のようにホイール歯幅中央に接触させることができます。また、歯面修整を与えないで歯当たりを調整する方法は、図 44.5(b)でホブの取り付け角を変更することで、歯当たり位置を調整することが可能です。詳しくは 44.10 歯当たり調整をご覧ください。

歯車修整

項目	記号	単位	数値 (worm)
歯幅方向距離	bz	mm	10.0000
半径方向修整量	rw	μm	50.0
歯たけ方向距離	Ya	mm	1.0000
歯先修整量	Wa	μm	100.0
歯たけ方向距離	Yf	mm	1.0000
歯元修整量	Wf	μm	100.0

項目	記号	単位	数値 (wheel)
歯幅方向距離 (-Z: +Z)	bz	mm	10.0000
歯すじ修整量 (手前: 奥)	fb	μm	50.0
歯たけ方向距離	Ya	mm	1.0000
歯先修整量	Wa	μm	100.0
歯たけ方向距離	Yf	mm	1.0000
歯元修整量	Wf	μm	100.0

確定 キャンセル 戻る クリア 参照

図 44.9 歯形修整の設定

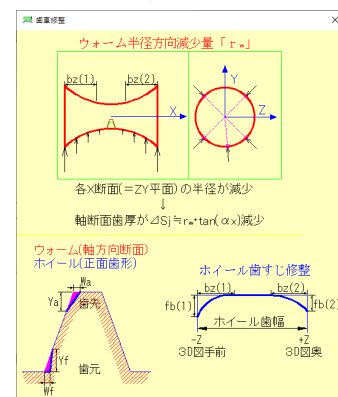


図 44.10 歯形修整の説明図

44.8 歯形レンダリング

歯形レンダリングでは、歯のかみ合いやホイール加工ホブを確認することができます。

無修整歯形の歯形レンダリングを図 44.11 に示しますが、この図の方向や拡大、縮小を図 51.12 で行うことができます。また、かみ合い誤差 (X, Y, Z 軸) や回転誤差、そして交差角誤差を与え、そのときの歯当りを確認することができます。また、図 51.12 の右上にある、かみ合い回転機能では、歯車を連続回転させることができますので、かみ合い変化を把握することができます。

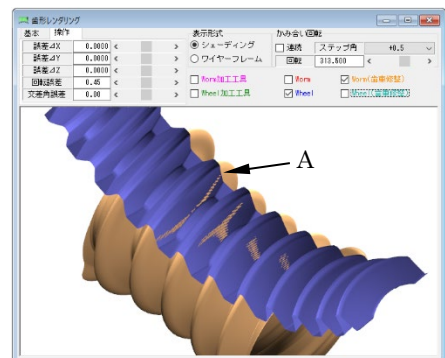


図 44.11 歯形レンダリング (無修整)

歯形レンダリング操作

基本	操作	表示形式	かみ合い回転
誤差 ΔX	0.0000	① シェーディング	連続
誤差 ΔY	0.0120	② ワイヤフレーム	ステップ角
誤差 ΔZ	0.0000	③ ホブ加工工具	回転
回転誤差	0.00	④ ホブ加工工具	0.000
交差角誤差	0.00	⑤ ホブ加工工具	0.000

Worm (歯車修整) Wheel (歯車修整) Wheel (歯車修整)

図 51.12 歯形レンダリング操作

歯形修整を与えたホイールとのかみ合いは、図 44.13(a)に示すようにホイール歯幅中央での歯当たりを呈しています。また、図 44.13(b)は、ウォームとホイール、そしてホイール加工用ホブ（運動軌跡）を全て表示したものです。

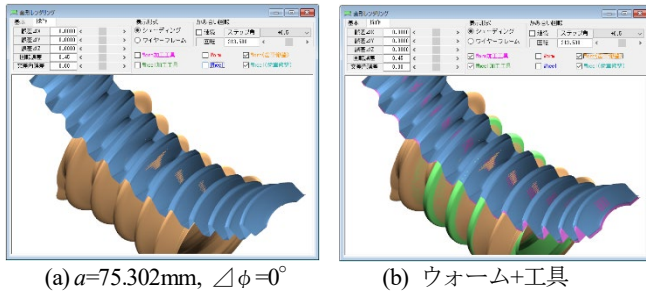


図 44.13 歯形レンダリング

44.9 中心距離変化の影響

円弧系歯形は中心距離の変化に敏感であることから、図 44.13(a)のかみ合いが、中心距離変化および軸角変化に対し、どの程度影響を及ぼすかを確認します。

図 44.13(a)は、理論中心距離で且つ、軸角誤差 ($\angle\phi$) が無い場合の歯当たりで 4~5 歯接触していますが、中心距離を +0.1mm とした図 44.14(b)および図 44.14(b) ($\angle a=+0.1\text{mm}$, $\angle\phi=+0.1^\circ$) では 2~3 歯しか接触していません。しかし、図 44.15(a)のように軸角を $\angle\phi=+0.36^\circ$ としても歯当たりには大きな変化はありません。このことより SS-Worm gear は、中心距離変化には敏感ですが、軸角誤差には鈍感であることが解ります。一方、図 44.15(b)の円筒ウォームギヤ（歯車諸元は図 44.3 と同じ、K 形ウォーム砥石直径=300mm）の接触歯数は、1~2 歯です。また、接触模様を見ると、円筒ウォームギヤは、ホイールの歯すじ方向ですが、SS-Worm gear は、ホイールの歯たけ方向の接触であるため、潤滑には有利な接触であると言えます。

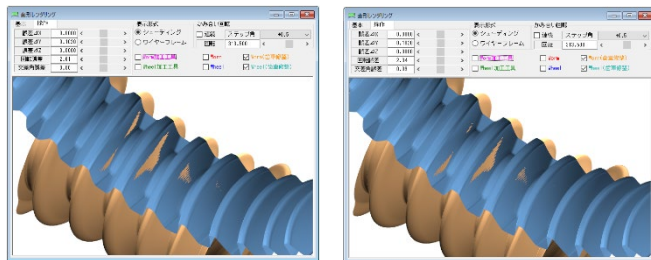


図 44.14 歯当たり 1

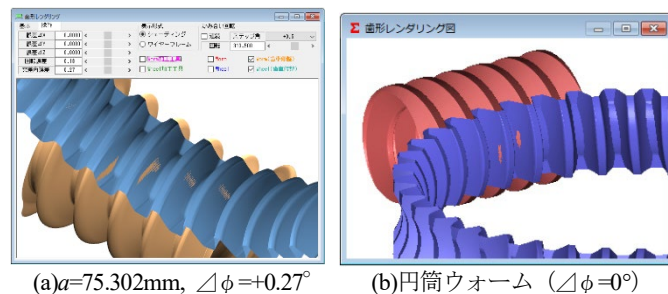


図 44.15 歯当たり 2

44.10 歯当たり調整（任意設計の例）

歯面修整を施さないで歯当たりを調整する方法として図 44.16 のようにホブ（φ50mm）の取り付け角を故意に $\theta=2^\circ$ として加工し、ウォームのみに歯形・歯すじ修整を与えた例を示します。

ウォームの歯形・歯すじ修整は、図 44.17 のようにウォームの右

側だけに修整（図 44.10 参照）を与えると、図 44.18 のようにホイールに歯面修整を与えたような歯当たりを得ることができます。



図 44.16 ホブ寸法（任意設計）



図 44.17 ホイールの歯形・歯すじ修整

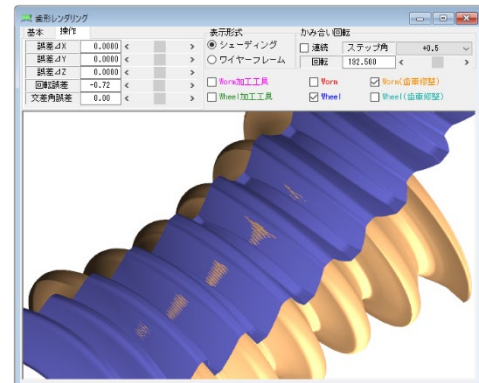


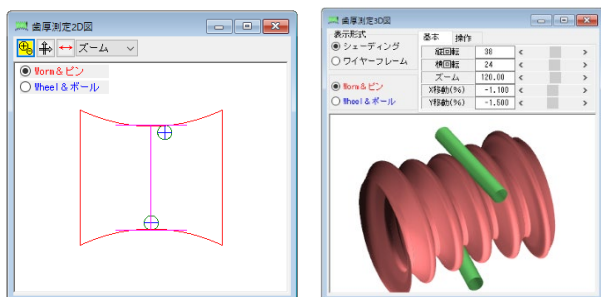
図 44.18 歯当たり 3 ($a=75.302\text{mm}$, $\angle\phi=0^\circ$)

44.11 歯厚

SS-Worm gear の歯厚は、図 44.19 で計算することができます。測定ピン（球）は、標準値を表示しますが、任意に設定可能です。ウォームの歯厚測定には図 44.20(b)のようにピンを用い、ピンからピンまでの距離を計測します。また、ホイールは、図 44.21(b)のように球を用い球から球までの距離を計測します。

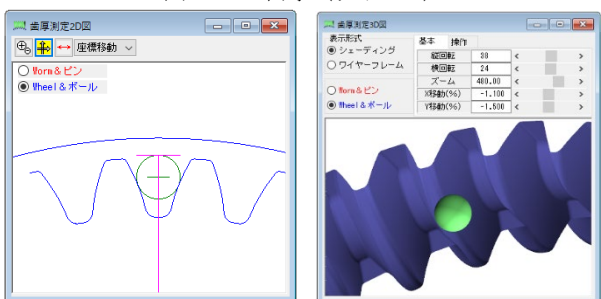


図 44.19 歯厚



(a) 2D 図 (b) 3D 図

図 44.20 歯厚 (ウォーム)



(a) 2D 図 (b) 3D 図

図 44.21 歯厚 (ホイール)

44.12 歯形出力

SS-Worm gear の歯形は図 44.22 の歯形出力フォームでウォームとホイールの歯形 (3D-IGES) を出力することができます。

図 44.23 に CAD 作図例を示します。また、ホブ歯形も 2D-DXF ファイルで出力することができます。

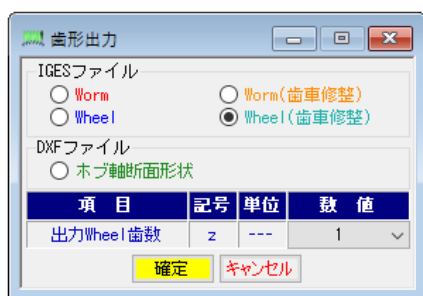
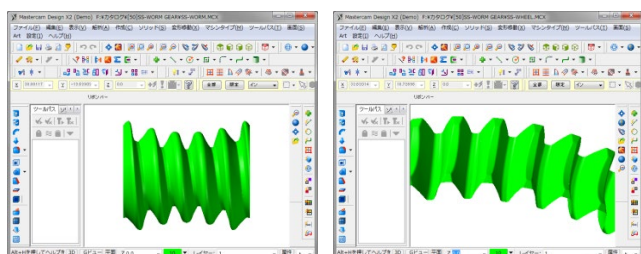


図 44.22 歯形出力フォーム



(a)SS-Worm (b) SS-Wheel

図 44.23 CAD 作図例 (3D-IGES)

44.13 ホブを基準とした設計 (オプション)

既存のホブで SS-Worm gear を設計する場合、図 44.2 の初期設定で ☒ Wheel加工工具基準入力 とし、図 44.24 でホブ寸法を入力します。ここでは、例題として、ホイール (樹脂) とかみ合うウォームの例を示しますが、ホイールが樹脂でウォームが鋼のため強度バランスを考慮してホイールの歯厚を太く、ウォームの歯厚を薄くしています。歯車寸法 (図 44.25) およびホブ寸法 (図 44.26) の設定は、標準設定方法と同じです。



図 44.24 既存ホブの設定



図 44.25 歯車寸法

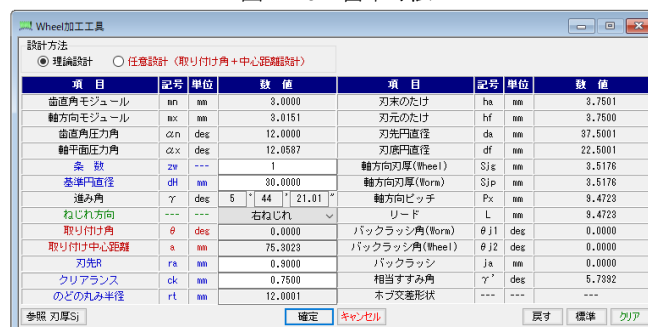


図 44.26 ホブ寸法

ここでは、ウォームの形状を、図 44.2 初期設定で円筒形としていますので、図 44.27 の組図や図 44.28 歯形レンダリングでウォームの外形は円筒形状となっています。また、図 44.29 に CAD 作図例を、図 44.30 および図 44.31 に歯厚計算結果を示します。

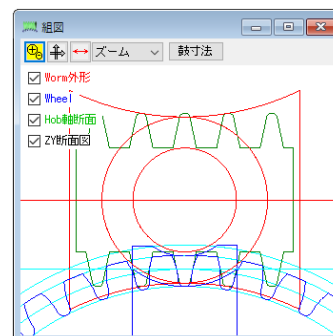
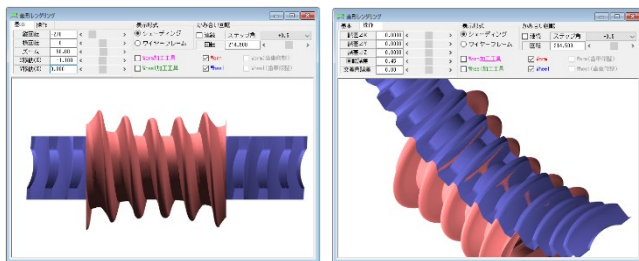


図 44.27 組図



(a)正面 (b)歯当たり

図 44.28 歯形レンダリング

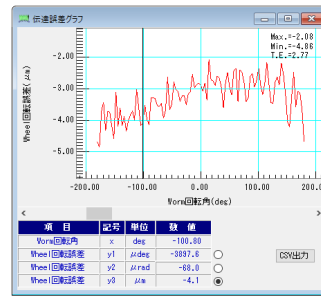


図 44.33 伝達誤差の設定

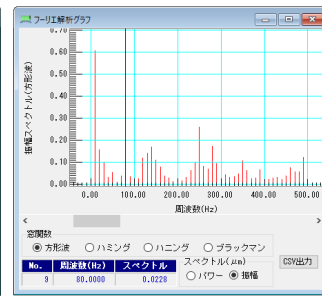
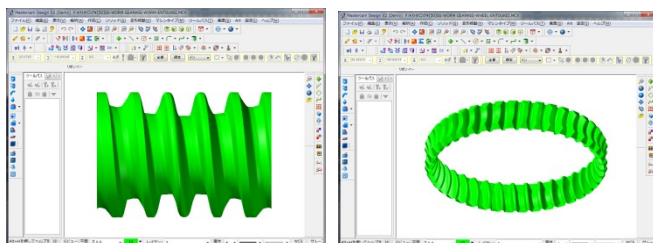


図 44.34 フーリエ解析

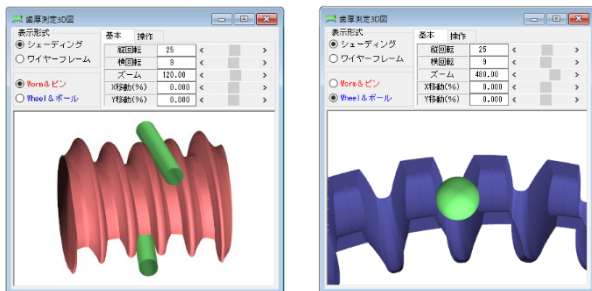


(a)SS-Worm (b) SS-Wheel

図 44.29 CAD 作図例

歯厚測定				
項目	記号	単位	数値(worm)	数値(wheel)
測定ピン/ボール直径	D	mm	6.0000	6.0000
測定寸法	L	mm	36.952	134.780
作図(2D) 作図(3D) 確定 キャンセル 標準				

図 44.30 歯厚



(a)SS-Worm (b) SS-Wheel

図 44.31 歯厚

44.14 回転伝達誤差解析

SS-Worm gear の伝達誤差解析の設定を図 44.32 で行い、図 44.33 および図 44.34 のように回転伝達誤差、フーリエ解析をすることができます。

中心距離誤差と交差角誤差を共に 0 とした場合の回転伝達誤差は $TE=0.98\mu\text{m}$ ですが、図 44.32 のように中心距離を 0.03mm 離し、交差角誤差を $+0.01^\circ$ としたとき、回転伝達誤差は $TE=1.43\mu\text{m}$ となります。ただし、伝達誤差解析は、歯形の分割数に影響を受けるため図 44.2 の分割数を約 1.5 倍にして解析しています。


回転伝達誤差(歯形修整なし)

☒ 左接触(時計回り)
 ☐ 右接触(反時計回り)

項 目	記 号	単 位	数 値
角度分割数	N	---	100
中心距離誤差	Δa	mm	0.0000
交差角誤差	$\Delta \beta$	deg	0.0000
回転数	rpm	1/min	600.0

図 44.32 伝達誤差の設定

44.14 その他のウォームギヤ

ウォームギヤは、[44]SS-Worm gear の他に、図 44.35～44.42 のものがあり種々使い分けをすることができます。

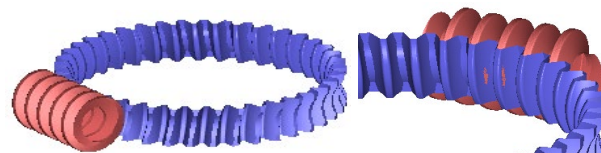


図 44.35 [3] 円筒ウォームギヤ

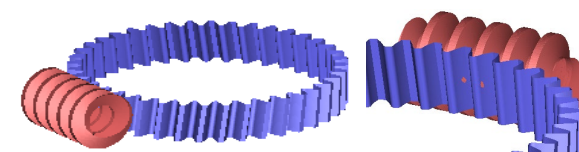


図 44.36 [3] ウォーム×ヘリカルギヤ

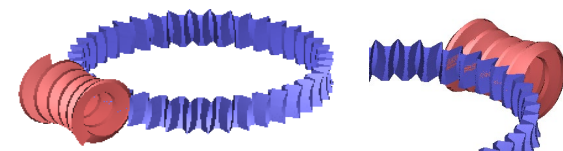


図 44.37 [36] ヒンドレーウォームギヤ

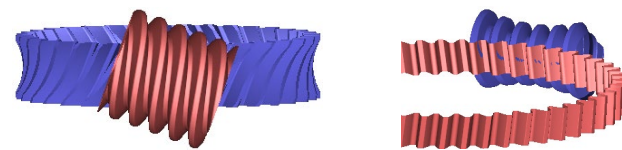


図 44.38 [28] 傾斜ウォームギヤ

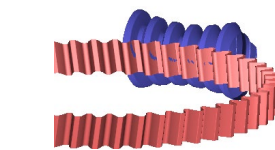


図 44.39 [37] 鼓形ウォーム

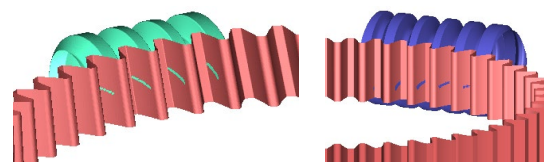


図 44.40 [37] LCCW ウォーム×ヘリカルギヤ

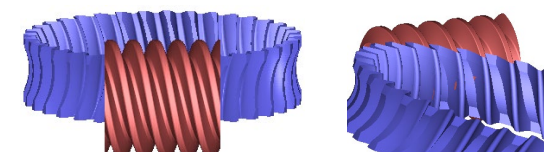


図 44.41 [28] L-Niemann worm gear

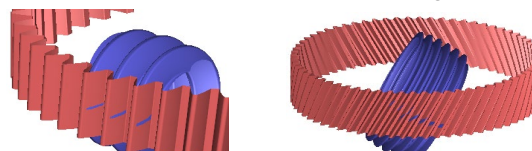


図 44.42 [39] 内歯ウォームギヤ