

[44] SS-Worm gear design system

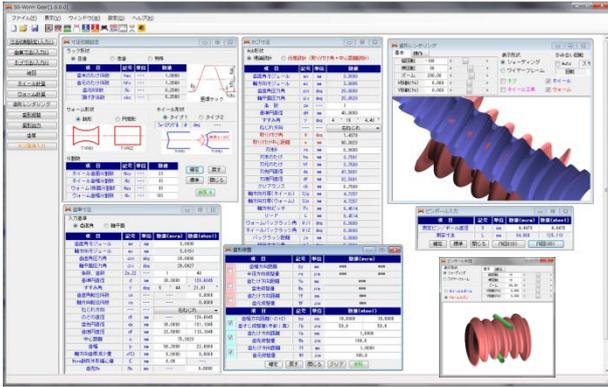


図 44.1 SS-Worm gear design system

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 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。

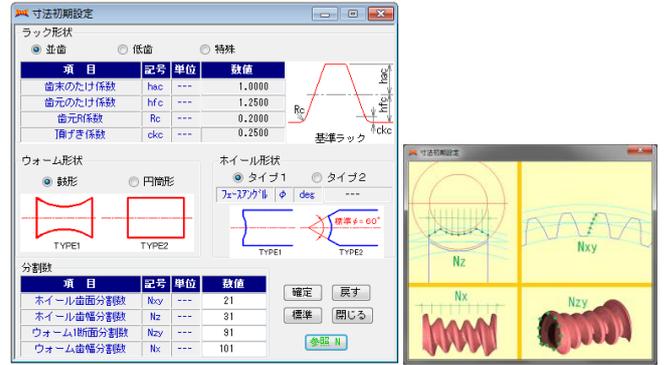


図 44.2 初期設定

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。



図 44.3 歯車寸法

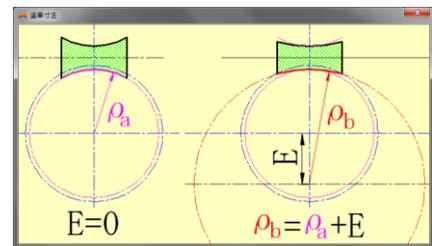


図 44.4 Worm 鼓形外形偏心量 (E)

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。

項目	記号	単位	数値
歯面角モジュール	mn	mm	3.0000
軸方向モジュール	mx	mm	3.0085
歯面角圧力角	α_n	deg	20.0000
軸平面圧力角	α_x	deg	20.0520
変位	zw	---	1
基準円直径	dh	mm	40.0000
すずみ角	γ	deg	4° 18' 4.40"
ねじれ方向	---	---	右ねじれ
取り付け角	θ	deg	1.4379
取り付け中心距離	a	mm	80.3023
刃先R	ra	mm	0.3000
刃末のたけ	ha	mm	3.7501
刃元のたけ	hf	mm	3.7500
刃先円直径	da	mm	47.5001
刃底円直径	df	mm	32.5001
クリアランス	ck	mm	0.7500
軸方向肉厚(ホイール)	Sjg	mm	4.7187
軸方向肉厚(ウォーム)	Sjp	mm	4.7257
軸方向ピッチ	Px	mm	9.4514
リード	L	mm	9.4514
ウォームバックラッシュ角	$\theta j1$	deg	0.0000
ホイールバックラッシュ角	$\theta j2$	deg	0.0000
バックラッシュ	ja	mm	0.0000
相当すずみ角	γ'	deg	5.7381
ホブ交差形状	---	---	---
のどの丸み半径	rt	mm	17.0001

(a)理論設計

項目	記号	単位	数値
歯面角モジュール	mn	mm	3.0000
軸方向モジュール	mx	mm	3.0085
歯面角圧力角	α_n	deg	20.0000
軸平面圧力角	α_x	deg	20.0520
変位	zw	---	1
基準円直径	dh	mm	40.0000
すずみ角	γ	deg	4° 18' 4.40"
ねじれ方向	---	---	右ねじれ
取り付け角	θ	deg	1.2000
取り付け中心距離	a	mm	80.3023
刃先R	ra	mm	0.3000
刃末のたけ	ha	mm	3.7501
刃元のたけ	hf	mm	3.7500
刃先円直径	da	mm	47.5001
刃底円直径	df	mm	32.5001
クリアランス	ck	mm	0.7500
軸方向肉厚(ホイール)	Sjg	mm	4.7188
軸方向肉厚(ウォーム)	Sjp	mm	4.7188
軸方向ピッチ	Px	mm	9.4886
リード	L	mm	9.4886
ウォームバックラッシュ角	$\theta j1$	deg	0.0000
ホイールバックラッシュ角	$\theta j2$	deg	0.0000
バックラッシュ	ja	mm	0.0000
相当すずみ角	γ'	deg	5.1689
ホブ交差形状	---	---	---
のどの丸み半径	rt	mm	17.0001

(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。

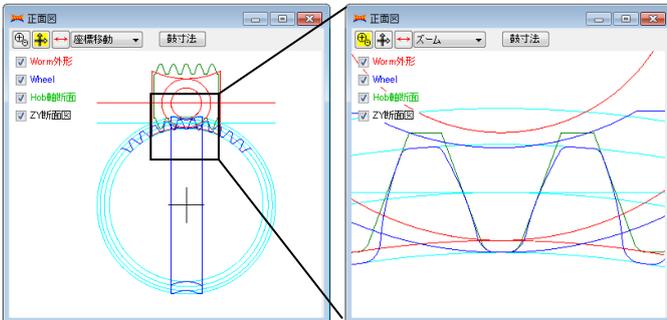


図 44.6 組図 (Hob, Worm, Wheel)

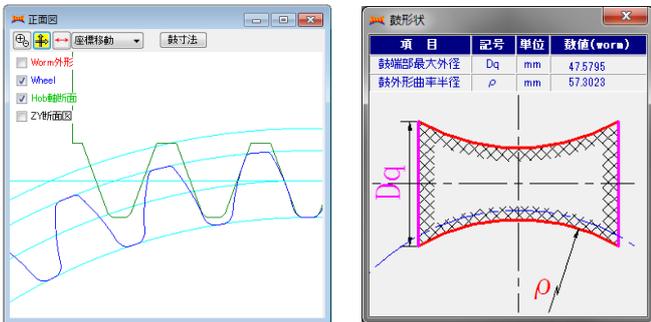


図 44.7 組図 (Hob, Wheel)

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、歯当た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。

項目	記号	単位	数値(worm)	
歯幅方向距離	bw	mm	***	***
半径方向修整量	rw	μ m	***	***
歯たけ方向距離	Ya	mm	***	***
歯先修整量	Wa	μ m	***	***
歯たけ方向距離	Yf	mm	***	***
歯元修整量	Wf	μ m	***	***
項目	記号	単位	数値(wheel)	
歯幅方向距離(-Z:+Z)	bw	mm	10.0000	10.0000
歯すじ修整量(手前:奥)	fb	μ m	50.0	50.0
歯たけ方向距離	Ya	mm	1.0000	1.0000
歯先修整量	Wa	μ m	100.0	100.0
歯たけ方向距離	Yf	mm	1.0000	1.0000
歯元修整量	Wf	μ m	100.0	100.0

図 44.9 歯形修整の設定

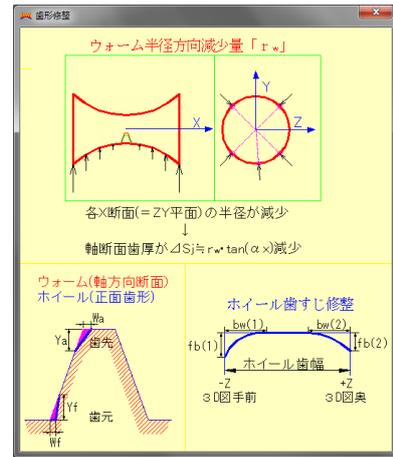


図 44.10 歯形修整の説明図

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、そのときの歯当た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。

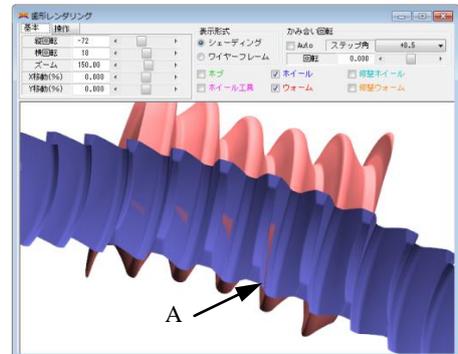


図 44.11 歯形レンダリング(無修整)

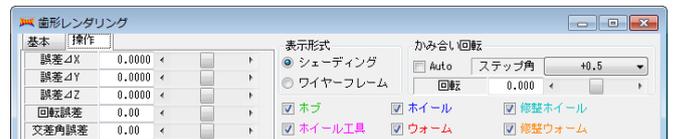
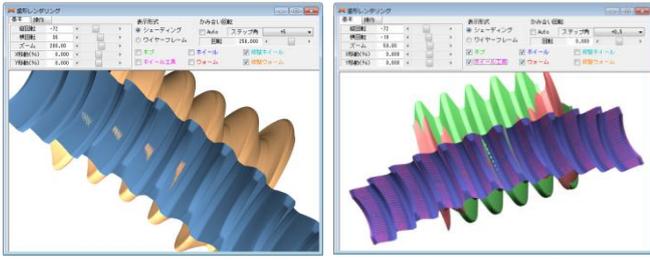


図 51.12 歯形レンダリング操作

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。

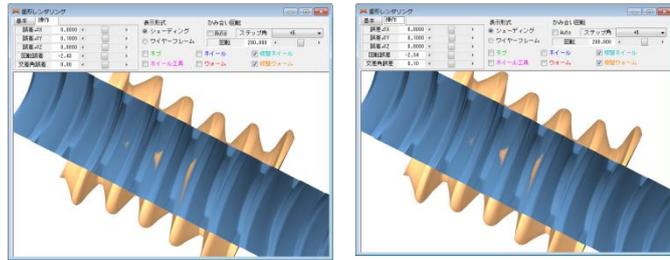


(a) $a=75.302\text{mm}$, $\Delta\phi=0^\circ$
 (b) ウォーム+工具
 図 44.13 歯形レンダリング

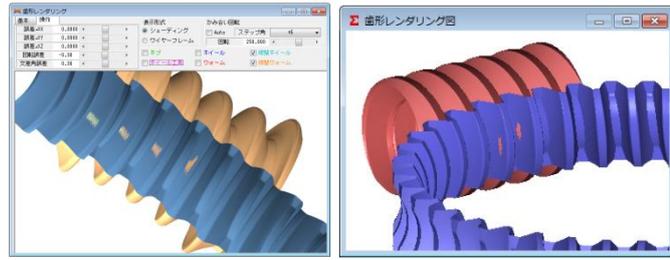
44.9 中心距離変化の影響

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 ($\Delta\phi$) 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 $+0.1\text{mm}$ とした図 44.14(b)および図 44.15(b) ($\Delta a=+0.1\text{mm}$, $\Delta\phi=+0.1^\circ$) 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 $\Delta\phi=+0.36^\circ$ 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。



(a) $a=a_0+0.1\text{mm}$, $\Delta\phi=0^\circ$
 (b) $a=a_0+0.1\text{mm}$, $\Delta\phi=+0.1^\circ$
 図 44.14 歯当たり 1



(a) $a=75.302\text{mm}$, $\Delta\phi=+0.36^\circ$
 (b) 円筒ウォーム ($\Delta\phi=0^\circ$)
 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 ($\phi 50\text{mm}$) 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。

ホブ寸法

Hob形状
 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
歯直角モジュール	mn	mm	3.0000
軸方向モジュール	mx	mm	3.0054
歯直角圧力角	α_n	deg	20.0000
軸平面圧力角	α_x	deg	20.0932
条数	zw	---	1
基準円直径	dH	mm	50.0000
すすみ角	γ	deg	$3^\circ 26' 23.33''$
ねじれ方向	---	---	右ねじれ
取り付け角	θ	deg	2.0000
取り付け中心距離	a	mm	85.3023
刃先R	ra	mm	0.9000
刃末のたけ	ha	mm	3.7501
刃元のたけ	hf	mm	3.7500
刃先円直径	da	mm	57.5001
刃底円直径	df	mm	42.5001
クリアランス	ck	mm	0.7500
軸方向刃厚(ホイール)	Sjg	mm	4.7209
軸方向刃厚(ウォーム)	Sjp	mm	4.7209
軸方向ピッチ	Px	mm	3.4418
リード	L	mm	3.4418
ウォームバックラッシ角	θ_{j1}	deg	0.0000
ホイールバックラッシ角	θ_{j2}	deg	0.0000
バックラッシ	ja	mm	0.0000
相当すすみ角	γ'	deg	5.4998
ホブ交差形状	---	---	---
のどの丸み半径	rt	mm	22.0001

確定 戻す 標準 閉じる クリア 参照 刃厚SJ

図 44.16 ホブ寸法（任意設計）

歯形修整

項目	記号	単位	数値(worm)	
<input checked="" type="checkbox"/> 歯幅方向距離	bz	mm	1.0000	40.0000
<input checked="" type="checkbox"/> 半径方向修整量	rW	μm	0.0	140.0
<input checked="" type="checkbox"/> 歯たけ方向距離	Ya	mm	0.6750	
<input checked="" type="checkbox"/> 歯先修整量	Wa	μm	10.0	
<input checked="" type="checkbox"/> 歯たけ方向距離	Yf	mm	***	
<input checked="" type="checkbox"/> 歯元修整量	Wf	μm	***	

項目	記号	単位	数値(wheel)	
<input type="checkbox"/> 歯幅方向距離(-Z:+Z)	bz	mm	***	***
<input type="checkbox"/> 歯すじ修整量(手前:奥)	fb	μm	***	***
<input type="checkbox"/> 歯たけ方向距離	Ya	mm	***	
<input type="checkbox"/> 歯先修整量	Wa	μm	***	
<input type="checkbox"/> 歯たけ方向距離	Yf	mm	***	
<input type="checkbox"/> 歯元修整量	Wf	μm	***	

確定 戻す 閉じる クリア 参照

図 44.17 ホイールの歯形・歯すじ修整

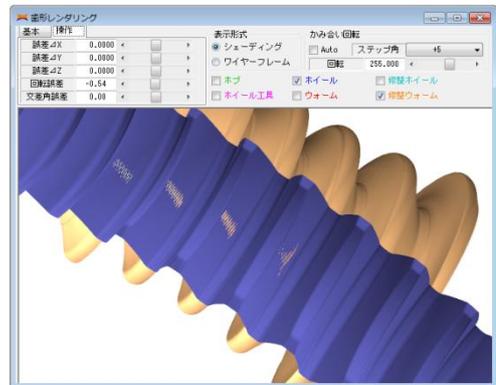


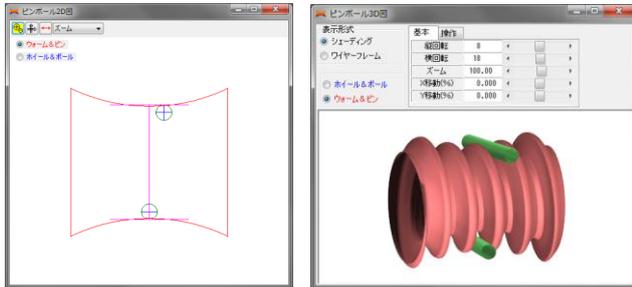
図 44.18 歯当たり 3 ($a=75.302\text{mm}$, $\Delta\phi=0^\circ$)

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。

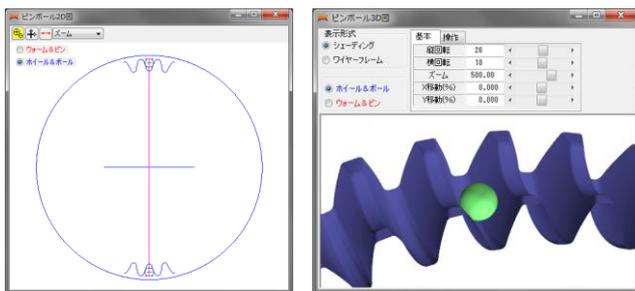
項目	記号	単位	数値(worm)	数値(wheel)
測定ピン/ボール直径	D	mm	5.0000	5.0000
測定寸法	L	mm	36.877	127.206

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)

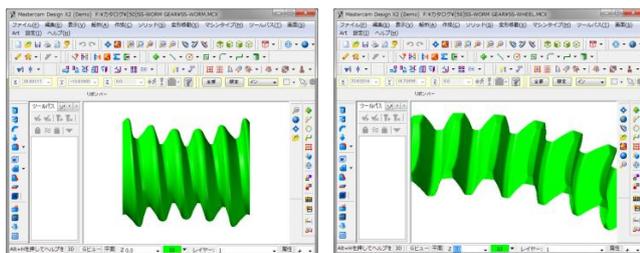
44.12 歯形出力

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。

項目	記号	単位	数値
出力ホイール歯数	z	---	1

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 44.24 でホブを

与えます。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。

項目	記号	単位	数値
歯直角度	αn	deg	12.0000
軸方向モジュール	mx	mm	3.0151
歯直角度	αx	deg	12.0587
歯直角度	α	deg	12.0587
すずみ角	γ	deg	5° 44' 21.01"
ねじれ方向	---	---	右ねじれ
刃先円直径	da	mm	37.5001
キヤリ円径	df	mm	22.4939
キヤリ円厚	hf	mm	3.7501
刃先円厚	ra	mm	0.8000
全刃厚	b	mm	7.5002
項目(加工設定)	記号	単位	数値
worm/wheel 歯数	z	---	1
worm/wheel 歯数	z	---	40
ワーク外径(ホイール)	da	mm	131.1045
外径からの距離	hw	mm	0.8000
取り付け角(右ねじれ+方向)	θ	deg	0.0000
のどの直径	dt	mm	126.6945
のどの丸み半径	rt	mm	12.0001

図 44.24 既存ホブの設定

図 44.25 歯車寸法

項目	記号	単位	数値
歯直角度	αn	deg	12.0000
軸方向モジュール	mx	mm	3.0151
歯直角度	αx	deg	12.0587
歯直角度	α	deg	12.0587
すずみ角	γ	deg	5° 44' 21.01"
ねじれ方向	---	---	右ねじれ
取り付け角	θ	deg	0.0000
取り付け中心距離	a	mm	75.3023
刃先R	ra	mm	0.8000
刃先のたけ	ha	mm	3.7501
刃元のたけ	hf	mm	3.7501
刃先円直径	da	mm	37.5001
刃底円直径	df	mm	22.4939
クリアランス	ck	mm	0.7601
軸方向円厚(ホイール)	SJg	mm	3.5176
軸方向円厚(ウォーム)	SJp	mm	3.5176
軸方向ピッチ	Px	mm	9.4723
リード	L	mm	3.4723
ウォームバックラッシュ角	θj1	deg	0.0000
ホイールバックラッシュ角	θj2	deg	0.0000
バックラッシュ	ja	mm	0.0000
相当すずみ角	γ'	deg	5.7392
ホブ交差形状	---	---	---
のどの丸み半径	rt	mm	12.0001

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。

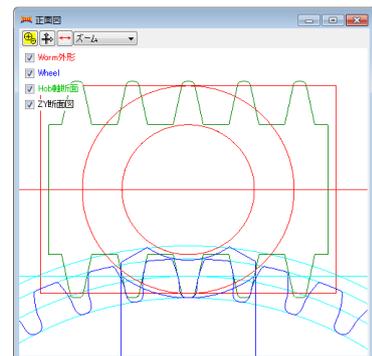
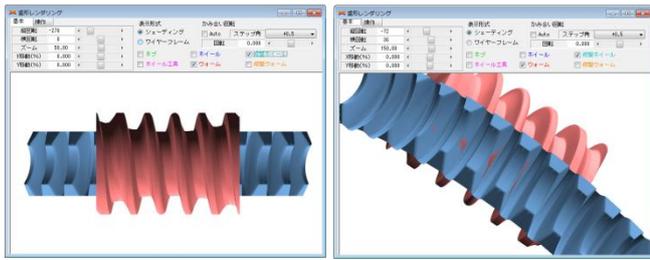


図 44.27 組図



(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

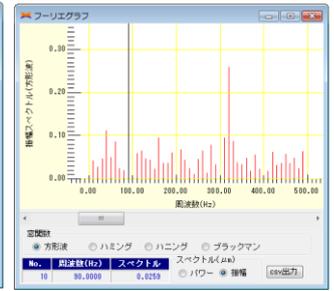
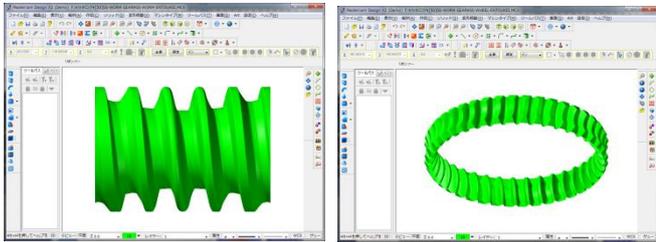


図 44.34 フーリエ解析

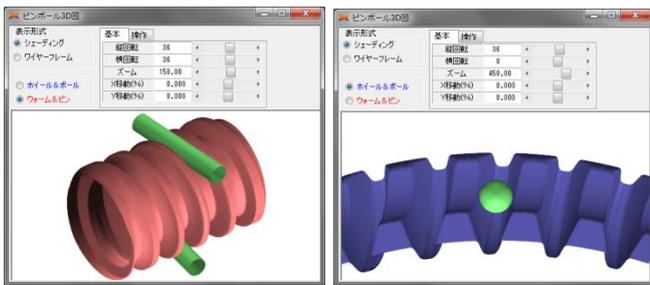


(a)SS-Worm (b) SS-Wheel

図 44.29 CAD 作図例

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	5.0000
測定寸法	L	mm	36.952	131.105

図 44.30 歯厚



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

図 44.31 歯厚

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。

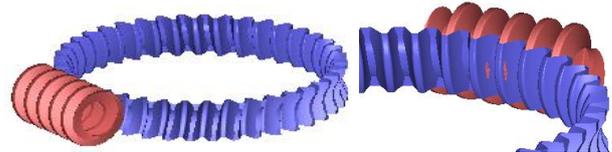


図 44.35 円筒ウォームギヤ

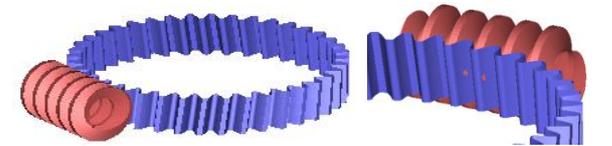


図 44.36 ウォーム×ヘリカルギヤ

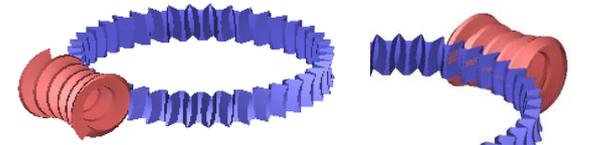


図 44.37 ヒンドレーウォームギヤ

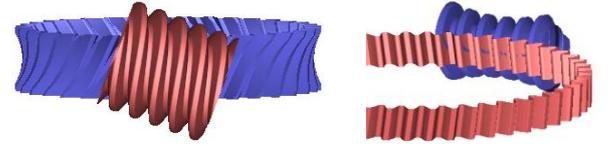


図 44.38 傾斜ウォームギヤ

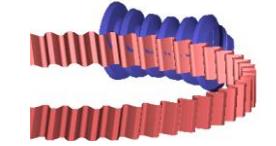


図 44.39 鼓形ウォーム

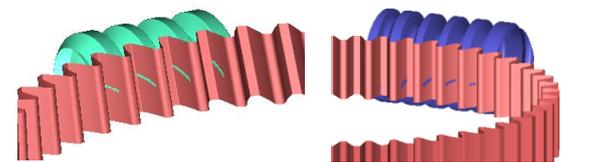


図 44.40 LCCW ウォーム×ヘリカルギヤ

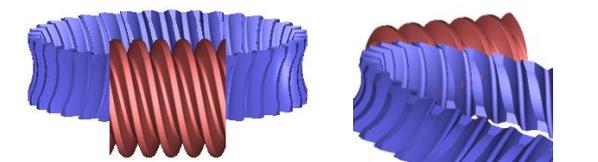


図 44.41 L-Niemann worm gear

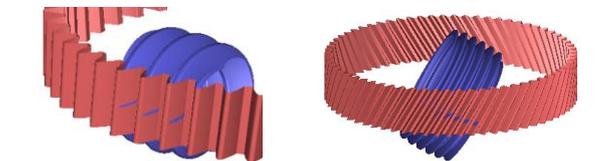


図 44.42 内歯ウォームギヤ

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 でを行い、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。

項目	記号	単位	数値
角度分割数	N	---	100
中心距離誤差	Δs	mm	0.0300
交差角誤差	$\Delta \beta$	deg	0.0100
回転数	rpm	1/min	600.0

図 44.32 伝達誤差の設定