

[37] 鼓形ウォーム&ヘリカルギヤ設計システム

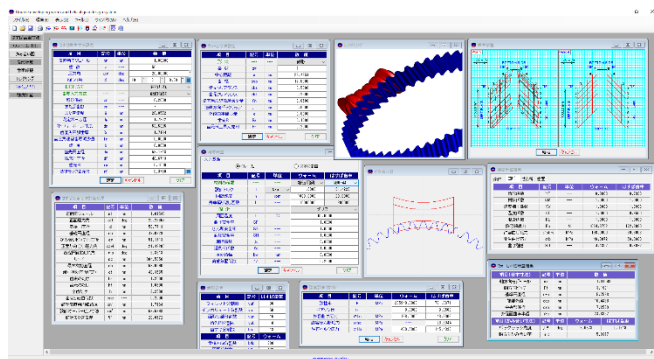


図 37.1 鼓形ウォーム&ヘリカルギヤ

37.1 概要

鼓形ウォームギヤは、ヒンドレーウォームギヤ(カタログ[36])に代表されますが、ホイール歯形の複雑さからヘリカルギヤをホイールとした鼓形ウォームギヤがあります。鼓形ウォームギヤは、円筒ウォームギヤに比して同時かみ合い歯数が多く、且つ、ホイールの歯たけ方向のかみ合い接触線を持つことから潤滑や歯面強さに対して非常に有利といえます。本ソフトウェアは、鼓形ウォーム×ヘリカルギヤを設計することができるソフトウェアです。

ウォームギヤの体系は、以下に示すように大別することができます。

- (1) 円筒ウォームギヤ
 - (1.1) 円筒ウォームギヤ, 26 頁
 - (1.2) Niemann worm gear, 127 頁
 - (1.3) ウォーム×ヘリカルギヤ, 26 頁
 - (1.4) LCCW ウォーム×ヘリカルギヤ, 153 頁
 - (1.5) 傾斜ウォームギヤ, 127 頁
- (2) 鼓形ウォームギヤ
 - (2.1) ヒンドレーウォームギヤ, 151 頁
 - (2.2) 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ, 153 頁
- (3) 内歯車ウォームギヤ
 - (3.1) 樽形ウォームギヤ, 162 頁

ウォームギヤと言えば、(1.1)の円筒ウォームギヤのことですが、ホイールがプラスチック歯車の場合、(1.1)円筒ウォームギヤの代用品として(1.2)の円筒ウォーム×ヘリカルギヤが大多数を占めます。しかし、この歯車は、点接触であるため負荷容量の増大を望むことができませんが、これを解決するのが(2.2)鼓形ウォーム×ヘリカルギヤであると考えています。鼓形ウォーム×ヘリカルギヤは、円筒ウォーム×ヘリカルギヤに対し、同時かみ合い歯数が多く(円筒ウォームの2~3倍)歯たけ方向のかみ合い線接触であるため負荷容量は増大し、且つ、潤滑に有利です。なお、ホイールはインボリュートヘリカルギヤをそのまま用いることができ円筒ウォームギヤの諸元や中心距離に合わせた設計が可能です。そのため、円筒ウォーム×ヘリカルギヤの中心距離を変更することなく円筒ウォームを鼓形ウォームに変更するだけで済みます。

本ソフトウェアは、上記(2.2) 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤの歯車寸法計算、歯形計算、強度計算をすることができ、歯形はCADデータとして出力することができます。

37.2 ヘリカルギヤ諸元入力

図 37.2 にヘリカルギヤの諸元入力画面を示します。入力範囲は、 $0.1 \leq m_n \leq 50$, $10 \leq z_2 \leq 500$, $5^\circ \leq \alpha_n \leq 30^\circ$, $0^\circ \leq \beta \leq 20^\circ$ です。

図 37.2 のヘリカルギヤ諸元を確定すると、寸法を図 37.3 のように表示します。

項目	記号	単位	数 値
歯直角モジュール	m_n	mm	1.00000
歯 数	z	---	50
圧力角	α_n	deg	20.00000
ねじれ角	β	deg	10 * 0 ' 0.00 "
ねじれ方向	---	---	右ねじれ
歯厚入力方式	---	---	転位係数
転位係数	x_n	---	0.2000
またぎ歯数	z_m	---	7
またぎ歯厚	ψ	mm	20.0572
測定ボール径	d_p	mm	1.7222
オーバーボール寸法	d_m	mm	53.5395
歯直角円弧歯厚	S_n	mm	1.7164
歯直角法線歯厚減少量	f_n	mm	0.0000
歯 幅	b	mm	6.0000
歯先円直径	d_a	mm	53.1713
歯底円直径	d_f	mm	48.6713
歯先R	r_a	mm	0.1000
基準ラック歯元R	r_f	mm	0.3750

図 37.2 ヘリカルギヤ諸元

項目	記号	単位	数 値
正面モジュール	m_t	mm	1.01543
正面圧力角	α_t	deg	20.28356
基準円直径	d	mm	50.7713
基礎円直径	d_b	mm	47.6229
かみ合いピッチ円直径	d_w	mm	51.1713
正面かみ合い圧力角	α_{wt}	deg	21.46265
基礎円間ねじれ角	β_b	deg	9.3913
リード	p_z	mm	904.5858
最大有効直径	d_h	mm	53.0596
最小有効直径(TIF)	d_t	mm	49.3565
歯末のたけ	h_a	mm	1.2000
歯元のたけ	h_f	mm	1.0500
全歯たけ	h	mm	2.2500
歯切り転位係数	x_{nc}	---	0.2000
設計歯直角円弧歯厚	s_n'	mm	1.7164
設計オーバーピン寸法	d_m'	mm	53.5393
設計またぎ歯厚	ψ'	mm	20.0572

図 37.3 ヘリカルギヤ寸法

37.3 ウォーム諸元入力

図 37.4 に鼓形ウォームの諸元入力画面を示します。条数の入力範囲は、 $1 \leq z_w \leq 3$ です。中心距離は、理論値の他に、円筒ウォーム×ヘリカルギヤで設計した中心距離を設定することも可能です。なので軸間距離を変えることなく鼓形ウォーム×ヘリカルギヤに変更することができます。

項目	記号	単位	数 値
形 状	---	---	鼓形
条 数	z_w	---	1
中心距離	a	mm	28.4651
歯 幅	b_{w0}	mm	17.5000
歯先クリアランス	c_{ka}	mm	0.5000
歯元クリアランス	c_{kf}	mm	0.2500
歯直角法線歯厚減少量	f_n	mm	0.0500
法線方向バックラッシ	j_t	mm	0.0500
外径曲率偏心率	e	mm	0.0000
歯先R	R_a	mm	0.1000
歯元R(工具刃先R)	R_f	mm	0.2000

図 37.4 鼓形ウォーム諸元

図 37.5 に鼓形ウォーム寸法を示します。円筒ウォーム×ヘリカルギヤのかみ合い率 $\varepsilon=1.71$ に対し、本例の鼓形ウォーム×ヘリカルギヤでは $\varepsilon=5.34$ となり約3倍に増加します。また、諸元設定完了後、図 37.6 に組図を作図することができますので鼓形ウォームの歯幅や全体のバランスを確認することができます。



ウォーム寸法計算結果

項目(基本寸法)	記号	単位	数 値	
軸方向モジュール	m_x	mm	1.01543	
軸方向ピッチ	Pt	mm	3.1901	
基準円直径	dwo	mm	5.7588	
端部外径	das	mm	10.4438	
中央部外径	dam	mm	7.2589	
外径面曲率半径	ρ_a	mm	24.8357	
項目(かみ合い寸法)	記号	単位	ウォーム	はすば歯車
バックラッシュ角度	j_θ	deg	6.0973	0.1219
軸方向かみ合い率	ε_x	---	5.3377	

図 37.5 鼓形ウォーム寸法

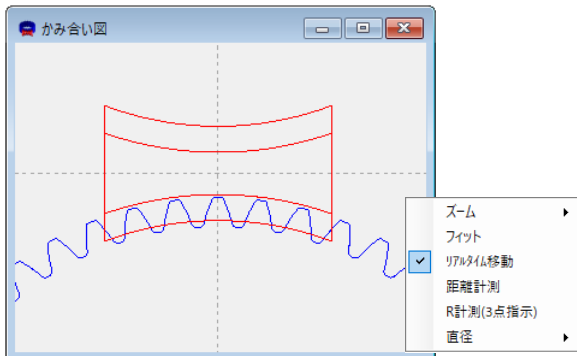


図 37.6 組図

37.4 歯形計算

鼓形ウォームの歯形分割数を図 37.7 で設定します。ここで設定する分割数で生成する鼓形ウォームの歯形の細かさが決まります。また、ウォームにクラウニングおよびウォーム歯先修整を与える場合は、図 37.8 で設定することができます。

歯形計算		
項目	記号	はすば歯車
フィレット分割数	vuf	30
インポリュート分割数	vui	50
面取り部分分割数	vur	15
歯先円分割数	vut	10
歯すじ分割数	hul	18
項目	記号	ウォーム
歯幅方向分割数	bNo	280
円周分割数	hNo	180

図 37.7 鼓形ウォームの歯形計算の設定

37.5 歯形修整

歯すじ修整を施した例を図 37.8～37.10 に示します。この歯形を得るためには図 37.9 の歯すじ修整を数値入力でも与えることができますが、右側の図のようにパターン化した歯形に数値を入力して与えることもできます。

図 37.10 では画面上部のコンボボックスで「歯形」、「歯すじ」、「歯形・歯すじ」を選択することができ、ヘリカルギヤでは歯形の歯たけ方向は作用線で指定することができます。左右歯面が同じ修整であれば反対歯面に修整歯形をコピーすれば左右歯面同じ修整歯形となります。また、歯形修整の倍率は最大 1000 倍で設定することができます。

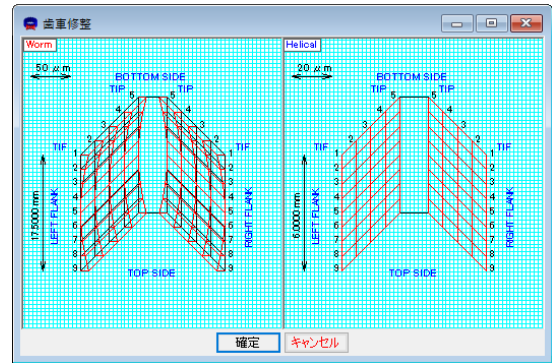


図 37.8 鼓形ウォームのクラウニングと歯先修整

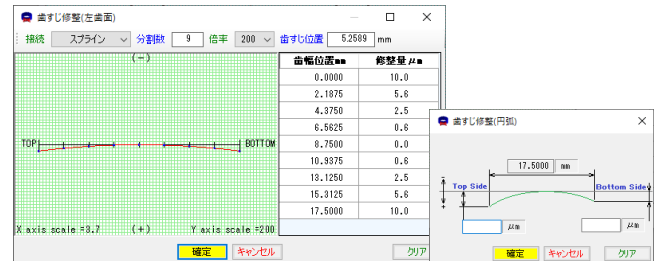


図 37.9 歯すじ修整 1

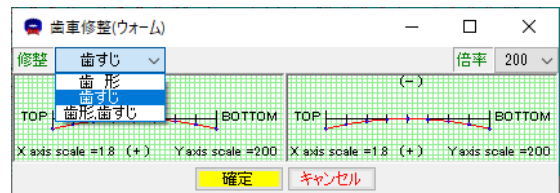


図 37.10 歯すじ修整 2

37.6 レンダリング

歯形計算後の3Dかみ合いを図 37.9 および図 37.10 に示します。図 37.11 は、クラウニングを与えていないかみ合いのためウォームの両端部で接触線を観察することができます。一方、図 37.12 は、ウォームにクラウニング(図 37.8)を与えているため4歯の接触線となっています。

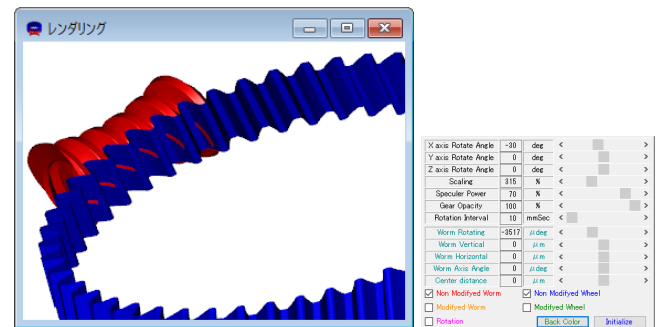


図 37.11 歯形レンダリング (理論ウォーム)

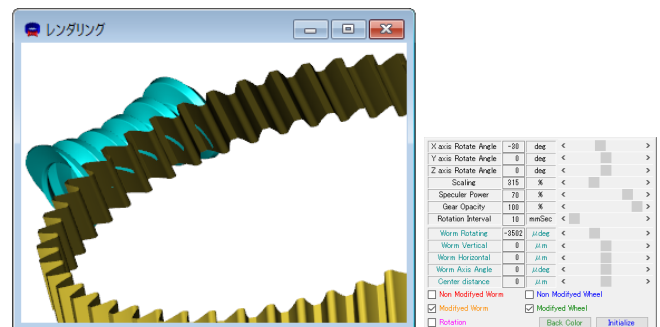


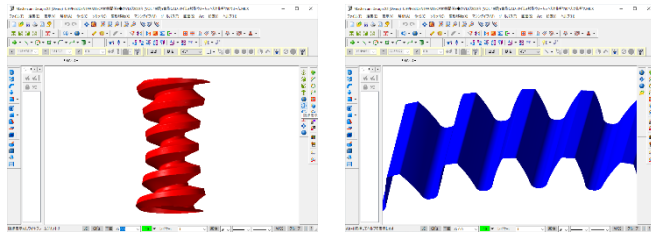
図 37.12 歯形レンダリング (クラウニング)

37.7 歯形ファイル出力

生成した歯形を CAD データとして出力することができます。図 37.13 で出力した歯形の作図例を図 37.14 に示します。



図 37.13 歯形ファイル出力



(a) worm (b) helical gear

図 37.14 CAD 作図例 (3D-IGES)

37.8 強度計算

強度計算画面を図 37.15～37.20 に示します。歯車材料は、ウォーム、ヘリカルギヤ共に 8 種類から選択することができ、且つ、任意材料記号を設定することができ、任意材料の許容応力を設定することができます。



図 37.15 強度計算入力



図 37.16 強度計算 (材料)



図 37.17 強度計算 (条件)

項目	記号	単位	ウォーム	はすば歯車
歯形係数	YF	---	0.8800	0.7320
材料係数	KM	---	1.0000	1.0000
速度補正係数	KV	---	1.0000	1.3996
温度係数	KT	---	1.0000	0.6500
潤滑係数	KL	---	1.0000	1.0000
許容接線力	Fb	N	1034.8752	172.6080
許容曲げ応力	σ_{blim}	MPa	196.0000	39.3006
発生曲げ応力	σ_b	MPa	46.8872	56.3669
曲げ強さ	Sft	---	4.1802	0.6972

図 37.18 強度計算 (曲げ)

項目	記号	単位	ウォーム	はすば歯車
せん断円弧歯厚	So	mm	2.0386	---
円周歯幅	Sb	mm	7.0628	---
断面積	Sab	mm ²	9.5986	---
許容接線力	Fs	N	228.4895	---
許容せん断応力	σ_{slim}	MPa	23.8044	---
発生せん断応力	σ_s	MPa	25.7915	---
せん断強さ	Sfs	---	0.9230	---

図 37.19 強度計算 (せん断)

項目	記号	単位	ウォーム	はすば歯車
領域係数	ZH	---	2.9884	---
材料定数係数	ZM	$\sqrt{\text{MPa}}$	24.8786	---
接触歯たけ	hm	mm	1.7500	---
許容接線力	Fh	N	6054.4308	532.2634
許容ヘルツ応力	σ_{Hlim}	MPa	490.5000	145.4939
発生ヘルツ応力	σ_H	MPa	99.1849	99.1849
歯面強さ	Sfh	---	24.4561	2.1500

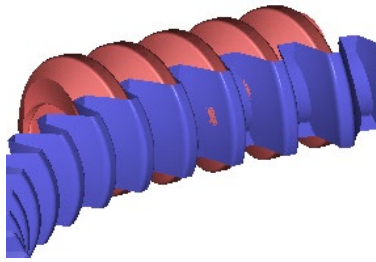
図 37.20 強度計算 (歯面)

37.9 円筒ウォーム×ヘリカルギヤ対との比較

図 37.20 の円筒ウォームギヤおよび図 37.21 の「円筒ウォーム×ヘリカルギヤ」の歯当たり接触は 2 歯のかみ合いに留まっていますが、「鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ」の接触線は、図 37.12 および図 37.22 のように歯たけ方向に 4 歯が同時接触しています。このことから、「鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ」の歯の負荷容量は、接触線および接触歯数から考えて円筒ウォームギヤや「円筒ウォーム×ヘリカルギヤ」より大きいと言えます。そのためウォームの歯幅を図 37.22 のように 12.5mm と小さくしても 3～4 歯がかみ合いますのでコンパクトな設計が可能です。

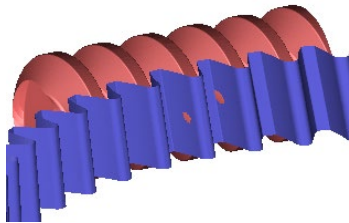
また、ウォームギヤは大きな滑りを伴う運動のため歯面間の潤滑油膜の形成が重要です。円筒ウォームギヤの場合、歯当たりは、ホイールの歯すじ方向に伸びるため歯当たりの回転方向の出口側の潤滑が危険な場合がありますが、「鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ」の接触線は歯面の滑り方向に対して、ほぼ直角です。そのため潤滑油膜の保持に非常に有利です。

鼓形ウォームの歯形は複雑であるため円筒ウォームに比して加工が容易ではありませんが、本ソフトウェアから生成する CAD データを用いてマシニングセンタで容易に加工することができます。



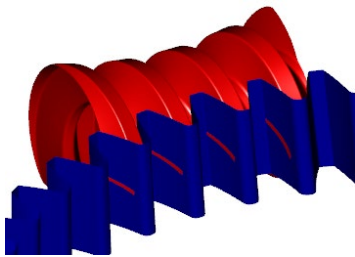
$m_n=1, z_1=1, z_2=50, \alpha=20^\circ, d_1=5.76, \gamma=10^\circ, b_1=17.5$

図 37.20 円筒ウォームギヤ



$m_n=1, z_1=1, z_2=50, \alpha=20^\circ, d_1=5.76, \gamma=10^\circ, b_1=17.5$

図 37.21 円筒ウォーム×ヘリカルギヤ

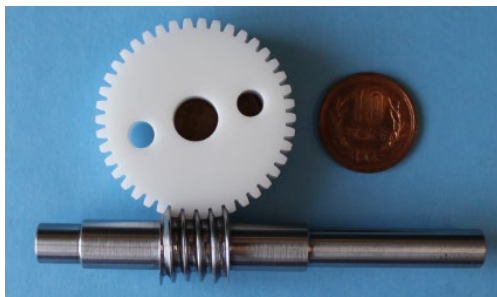


$m_n=1, z_1=1, z_2=50, \alpha=20^\circ, d_1=5.76, \gamma=10^\circ, b_1=12.5$

図 37.22 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ

37.10 鼓形ウォームの製作例

図 37.23 に示す鼓形ウォームは、既存のインボリュートヘリカルギヤに合わせて設計し、マシニングセンタにより鼓形ウォームの歯形を加工したものです。なお、ヘリカルギヤは、プラスチック材料（POM）のため歯厚を大きくしています。そして、この歯車対の運転試験を実施しています。



$m_n=1, z_1=1, z_2=42, \alpha_n=14.5^\circ, \beta=4.13^\circ$

図 37.23 鼓形ウォーム×ヘリカルギヤ

37.11 円筒ウォーム形状（オプション）

円筒ウォーム（図 37.20 及び図 37.21）と以下に示す歯たけ方向に線接触を持つ円筒ウォームは、どちらも外径は円筒形状のためこれを区別するため、歯たけ方向に線接触を持つ円筒ウォームギヤを、**LCCW（Line Contact Cylindrical Worm Gear）**と名付けます。

上述した鼓形ウォームは両側面部でも接触するため同時かみ合い歯数は多くなります。しかし、同時かみ合い歯数が3以上あれば良いということであれば、外径を鼓形にする必要はなく円筒でも問題はないと考えることができます。

図 37.4 の「形状」設定で、ウォームの形状を図 37.24 で円筒形として設定し、計算した結果を以下に示します。その結果、図 37.25 のようにウォームの外径は円筒となり、歯当たりは鼓形とほぼ同様と同時に4歯接触していることが解ります。また、図 37.27 に示す LCCW ウォームの CAD 作図例のように外径が円筒形であることから転造による製造が容易（歯面は難しい）であると考えられます。

ウォーム寸法設定			
項目	記号	単位	数 値
形 状	---	---	円筒形
条 数	ZW	---	1
中心距離	a	mm	28.4651
歯 幅	bwo	mm	17.5000
歯先クリアランス	cka	mm	0.5000
歯元クリアランス	ckf	mm	0.2500
歯直角法線歯厚減少量	fn	mm	0.0500
法線方向バックラッシュ	jlt	mm	0.0500
外径曲率偏心量	e	mm	0.0000
歯先R	Ra	mm	0.1000
歯元R(工具刃先R)	Rf	mm	0.2000

図 37.24 LCCW（外径が円筒ウォーム）

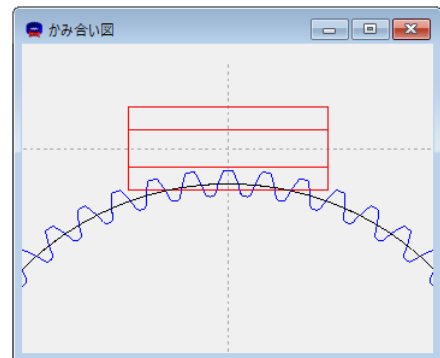


図 37.25 LCCW 組図（外径が円筒ウォーム）

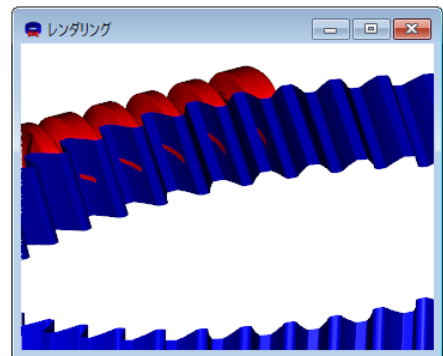


図 37.26 LCCW 歯形レンダリング

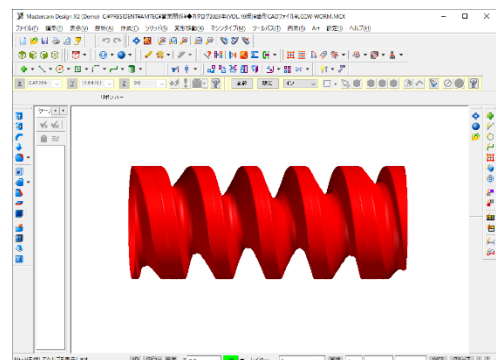


図 37.27 円筒ウォームの CAD 作図例

37.12 ホイールが平歯車の場合

ホイールを平歯車とした場合の計算例を図 37.28～37.34 に示します。ホイールを平歯車とすることで製造も容易となり、また、スラスト荷重もなくなることから非常に有用と考えられます。

項目	記号	単位	数 値
歯直角モジュール	m_n	mm	2.00000
歯 数	z	---	50
圧力角	α_n	deg	20.00000
ねじれ角	β	deg	0 0 0.00
ねじれ方向	---	---	*****
歯厚入力方式	---	---	転位係数
転位係数	x_n	---	0.0000
またぎ歯数	z_m	---	8
またぎ歯厚	ψ	mm	33.8740
測定ボール径	d_p	mm	3.3830
オーバーボール寸法	d_o	mm	104.5300
歯直角円弧歯厚	S_n	mm	3.1416
歯直角法線歯厚減少量	f_n	mm	0.0000
歯 幅	b	mm	20.0000
歯先直径	d_a	mm	104.0000
歯底直径	d_f	mm	95.0000
歯先R	r_a	mm	0.0000
基準ラック歯元R	r_f	mm	0.7500

確定 キャンセル クリア

図 37.28 平歯車諸元

項目	記号	単位	数 値
正面モジュール	m_t	mm	2.00000
正面圧力角	α_t	deg	20.00000
基準円直径	d	mm	100.0000
基礎円直径	d_b	mm	93.9693
かみ合いピッチ円直径	d_w	mm	100.0000
正面かみ合い圧力角	α_{wt}	deg	20.00000
基礎円筒ねじれ角	β_b	deg	0.0000
リード	p_z	mm	∞
最大有効直径	d_h	mm	104.0000
最小有効直径(TIF)	d_t	mm	98.6271
歯末のたけ	h_a	mm	2.0000
歯元のたけ	h_f	mm	2.5000
全歯たけ	h	mm	4.5000
歯切り転位係数	x_{nc}	---	0.0000
設計歯直角円弧歯厚	s_n'	mm	3.1416
設計オーバーボール寸法	d_o'	mm	104.5300
設計またぎ歯厚	ψ'	mm	33.8740

図 37.29 歯車寸法

項目(基本寸法)	記号	単位	数 値
軸方向モジュール	m_x	mm	2.00000
軸方向ピッチ	P_t	mm	6.2832
基準円直径	d_{wo}	mm	2.0000
端部外径	d_{as}	mm	29.3808
中央部外径	d_{am}	mm	29.0000
外径面曲率半径	ρ_a	mm	48.5000

項目(かみ合い寸法)	記号	単位	ウォーム	はすば歯車
バックラッシュ角度	j_θ	deg	6.0973	0.1219
軸方向かみ合い率	ε_x	---	5.3979	

図 37.30 ウォーム諸元

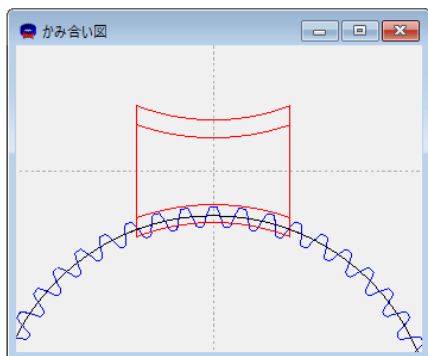


図 37.31 組図

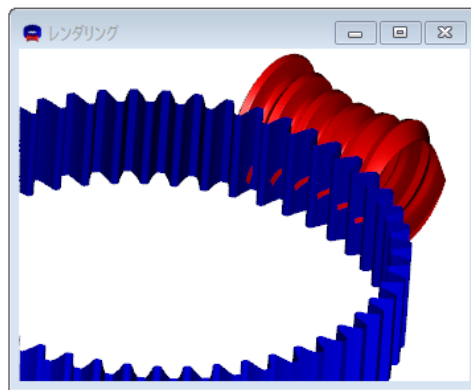


図 37.32 ウォーム諸元

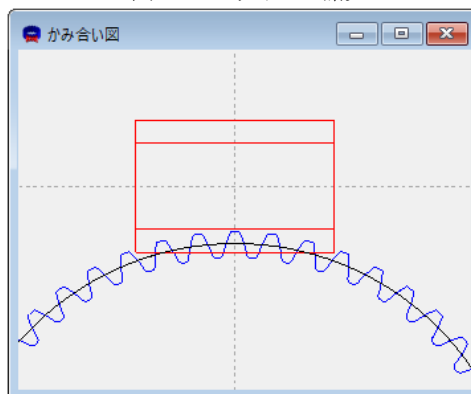


図 37.33 LCCW 組図 (外径が円筒ウォーム)

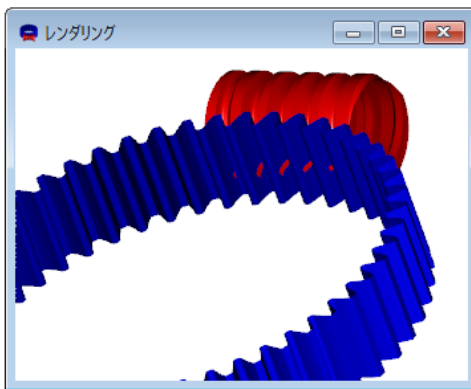


図 37.34 LCCW (ホイールが平歯車)

37.13 LCCW に期待するもの

大型のウォームギヤも LCCW として製作できるものと考えていますが、小型でホイールがプラスチック歯車として使用される用途に期待しています。現在、図 37.21 に示す円筒ウォームとプラスチックヘリカルギヤは、自動車用の補機や小型モータ減速用として数多く使用されていますが、円筒ウォームとプラスチックヘリカルギヤは点接触であるため大きな負荷容量を望むことができません。この円筒ウォームとプラスチックヘリカルギヤの負荷容量を大きくするためインボリュートヘリカルギヤの諸元を変えずにそのまま円筒ウォームを LCCW とすることにより歯車箱の大きさを変更することなく負荷容量の増大を望むことができると考えています。