

[46] Linear bevel gear design system(IP-bevel gear)

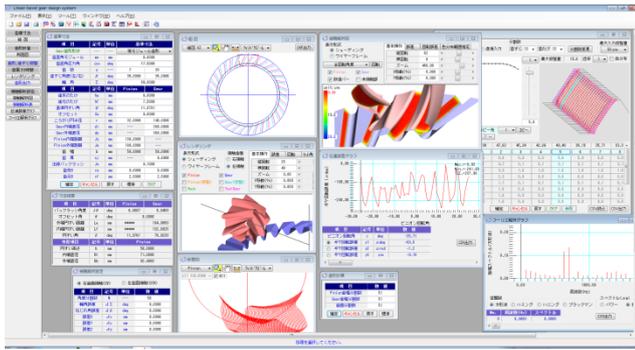
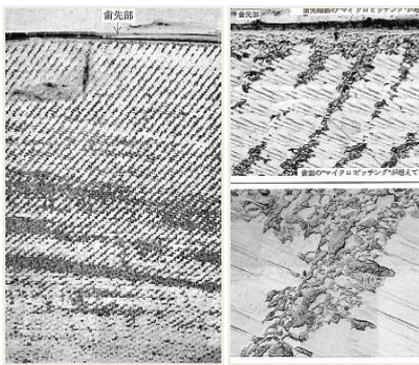


図 46.1 Linear bevel gear

46.1 概要

現在、ベベルギヤは Gleason 社や Klingelnberg 社の専用歯切り盤で加工されていますが、近年、球面インボリュート歯形（カタログ 10 頁，図 2.12 参照）を持つベベルギヤをマシニングセンタで加工することも一般化し、小形ベベルギヤの金型や大型ベベルギヤでは目新しいことではなくなっています。特に大型のベベルギヤでは専用歯切り盤が製造されていないことからマシニングセンタで加工せざるを得ない状況下にあります。

小さな歯車では、工具の摩耗も少なく、ツールパスを細かく運動させることができ、また金型では磨きをすることにより上質な歯面粗さを得ることができます。しかし、大型歯車の場合にはエンドミル工具を使用すると工具摩耗や切削（研削）状況などにより、目視観察では問題にならない歯面であっても運転後には図 46.2 のように歯面に鱗模様が生じてしまいマイクロピッチングが発生する原因となります。このような現象を回避するためには円盤状の砥石で歯面研削しなければなりません。



(応用科学研究所カタログより)

図 46.2 マシニングセンタ加工歯面のマイクロピッチングの例

スパイラルベベルギヤの場合、凸面側歯面は小さな直径を持つ円盤形砥石であれば研削することも可能（隣の歯に接触する可能性がある）ですが、凹面側歯面は研削することができません。

しかし、本ソフトウェアでは、円盤形砥石で歯面研削ができるよう大歯車の歯形と歯すじを直線として、これにかみ合う小歯車の歯形を決定しています（歯面修整も可）。そのため、大歯車の歯面研削はエンドミル形状の工具（スワーフ加工も含む）に比べ大幅な時間短縮が可能です。また、大歯車を内歯ベベルとすること、小歯車にオフセットを与えること、軸角を 90° 以外とすること、そして、小歯車の歯数を少歯数（1~5 歯）とすることができますので大減速で且つ、自由度の高い歯車対を設計することができます。すなわち、この Linear bevel gear は、「設計と加工の多様性」を持つ歯車であると言えます。

46.2 ソフトウェアの構成

Linear bevel gear design system の構成を表 46.1 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 46.1 ソフトウェアの構成

項目	掲載項	機能
<1>基準ラックの設定	46.3	○
<2>歯車寸法	46.4	○
<3>組図	46.5	○
<4>断面図	46.7	○
<5>歯形、歯すじ修整	46.8	○
<6>歯面 3D 修整	46.9	○
<7>レンダリング	46.10	○
<8>歯形出力	46.11	○
<9>接触解析設定	46.12	○
<10>接触解析図	46.12	○
<11>接触解析表	46.12	○
<12>伝達誤差グラフ	46.13	○
<13>フーリエ解析グラフ	46.13	○
<14>少歯数	46.14	◎

46.3 基準ラックの設定（ツール、プロパティ）

基準ラック（並歯、低歯、特殊）を図 46.3 で設定し、その基準ラックの形状を表示することができます。本例では、歯たけを「並歯」とし、圧力角を 17.5° とした例を示します。



図 46.3 基準ラックと形状

46.4 歯車寸法設定

図 46.4 に諸元入力画面を示します。Gear 歯形形状は、「等モジュール歯形」と「比モジュール歯形」の 2 種類があります。「等モジュール歯形」は、大歯車の歯形を内端部から外端部まで同じモジュールで生成しますが、「比モジュール歯形」(46.15 項参照)は、円すい距離に比例するモジュールで歯形を生成します。

項目	記号	単位	基準寸法	
Gear 歯形形状	---	---	等モジュール歯形	
歯直角モジュール	mm	mm	8.0000	
歯直角圧力角	α_n	deg	17.5000	
歯数	z	---	7	
歯すじ角度(左/右)	β	deg	35.0000	
軸角	Σ	deg	90.0000	
項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯末のたけ	ha	mm	8.0000	8.0000
歯元のたけ	hf	mm	7.5000	7.5000
基準円すい角	ϕ	deg	11.9781	11.9781
オフセット	Yo	mm	0.0000	0.0000
ころがり円半径	r	mm	32.0000	140.0000
Gear 内端直径	di	mm	---	260.0000
Gear 外端直径	do	mm	---	360.0000
Pinion 内端距離	Js	mm	130.0000	---
Pinion 外端距離	Je	mm	180.0000	---
歯幅	b	mm	50.0000	50.0000
歯厚	sj	mm	---	9.6000
法線バックラッシ	Jn	mm	0.1000	0.1000
歯先 R	ra	mm	0.6000	0.6000
歯元 R	rf	mm	2.5000	2.5000

図 46.4 諸元

歯車寸法は、モジュール、圧力角、歯数、歯すじ角度、軸角を設定すれば、それ以下の歯末のたけ、歯元のたけなどの数値は、[TAB]キーで標準値を設定することができます。例題では、歯すじ角度を左右とも 35° としています。異なる角度を設定することもできます。また、本例では、ころがり円の標準値を使用するのではなくアンダーカットを避けるため、ころがり円を $r_1=32.00$ 、 $r_2=140.00$ としています。さらに、大歯車の内端直径と外端直径を変更することができますので歯幅位置での歯形使用範囲を自由に設定することができます。図 46.4 を[確定]すると、図 46.5 の寸法結果を表示します。寸法結果 1 のピニオン内端直径と外端直径は、歯形計算後の寸法結果 2 (図 46.11) に表示します。

項目	記号	単位	Pinion	Gear
バックラッシュ角度	J θ	deg	0.0087	0.0409
オフセット角	θ	deg	0.0000	
外端円すじ距離	La	mm	*****	184.0050
内端円すじ距離	Lf	mm	*****	132.8925
円すじ角	δ	deg	11.9761	78.0239
外形項目				
円すじ高さ	b	mm	50.0000	
内端直径	Dt	mm	*****	
外端直径	Db	mm	*****	

図 46.5 寸法結果 1

46.6 歯形計算

本例では歯形を図 46.10 のように歯形分割数を 51 として計算します。計算結果後、図 46.11 の寸法結果 2 を表示します。

項目	数値
Pinion歯幅分割数	51
Gear歯幅分割数	51
歯面分割数	51

図 46.10 歯形計算の設定

項目	記号	単位	Pinion	Gear
バックラッシュ角度	J θ	deg	0.0087	0.0409
オフセット角	θ	deg	0.0000	
外端円すじ距離	La	mm	*****	184.0050
内端円すじ距離	Lf	mm	*****	132.8925
円すじ角	δ	deg	11.9761	78.0239
外形項目				
円すじ高さ	b	mm	50.0000	
内端直径	Dt	mm	71.9890	
外端直径	Db	mm	82.4083	

図 46.11 寸法結果 2

46.5 組図

正面図を図 46.6 に、側面図を図 46.7 に、基準ラックを図 46.8 に示します。これらの図は、縮小、拡大、そして距離計測することができ、DXF ファイルを出力することができます。図 46.9 に CAD 作図例を示します。

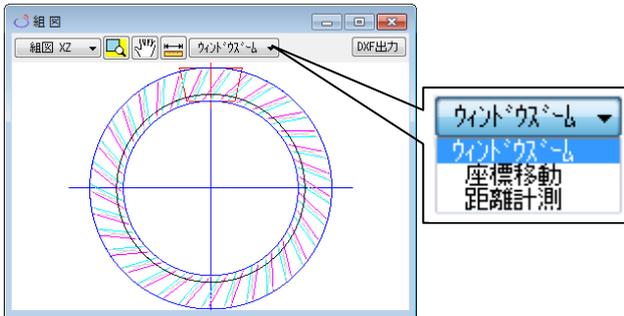


図 46.6 組図 (XZ)

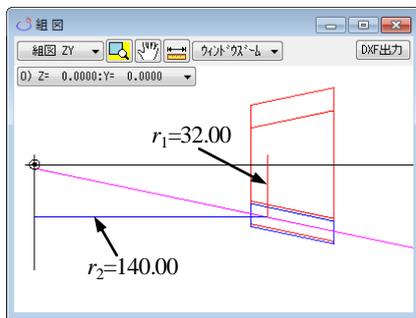


図 46.7 組図 (ZY)

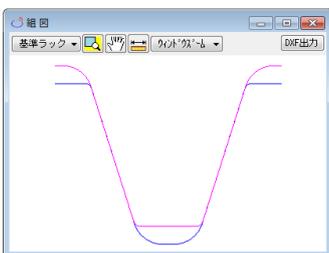


図 46.8 基準ラック

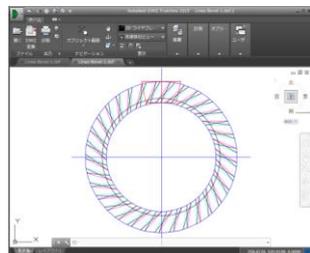
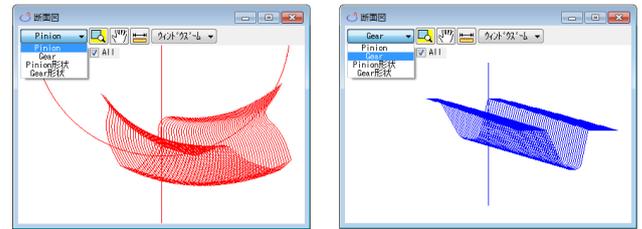


図 46.9 CAD 作図例

46.7 断面図

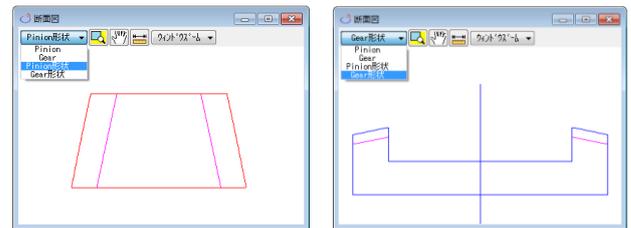
歯形断面を図 46.12 に形状断面を図 46.13 に示します。これらの図も縮小、拡大、そして距離計測することができます。



(a)Pinion

(b) Gear

図 46.12 断面図 (歯形)



(a)Pinion

(b) Gear

図 46.13 断面図

46.8 歯形、歯すじ修整

図 46.14 で定型の歯形修整量と歯すじ修整量を与えることができます。本例では図 46.15(b), Type2 のようにピニオンにのみ歯面修整 (図 46.15b) と歯すじ修整 (図 46.16) を与えギヤは無修整とします。ただし、ピニオン歯すじ修整図の Type1 と Type3 およびギヤの修整はピニオンと同様のため省略します。

歯形歯すじ修整			
歯形(P)=0	歯すじ(P)=2	歯形(G)=0	歯すじ(G)=0
歯形修整タイプ			
<input checked="" type="radio"/> 修整なし <input type="radio"/> Type1 <input type="radio"/> Type2 <input type="radio"/> Type3			

図 46.14 歯形、歯すじ修整 (設定)

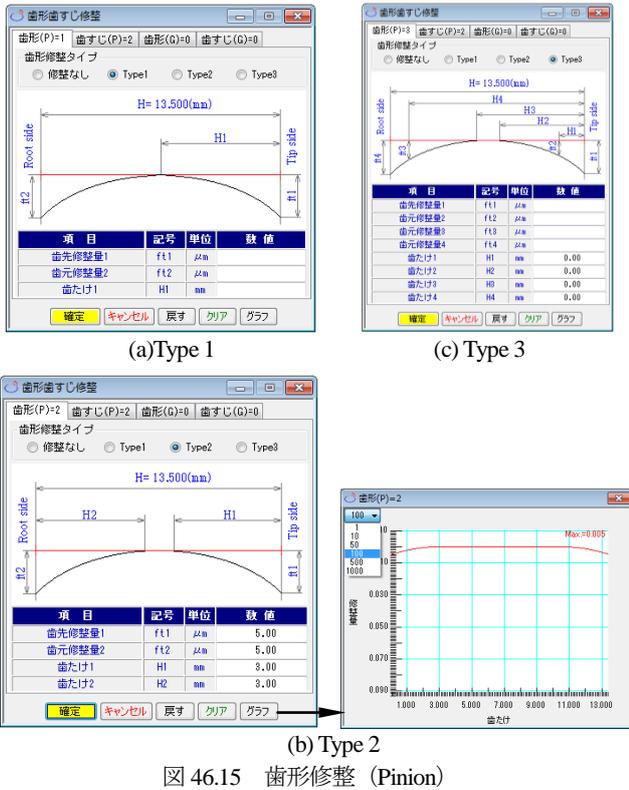


図 46.15 歯形修整 (Pinion)



図 46.16 歯すじ修整 (Pinion)

46.9 歯面 3D 修整

図 46.15 および図 46.16 で設定した歯面，歯すじ修整を図 46.17 のように 3 次元で表現することができます。また，この歯面修整の分割は任意に設定することができます。図 46.17 の画面で修整量の変更や倍率も変更することができます。また，**CSV出力** で歯面修整量を CSV 出力することができます。Excel で作成したデータを **CSV読み** で読み込むことができます。本例では定型の修整を 3 次元修整に引き継ぎましたが，直接 3 次元修整値を入力することができます。なお，ギヤは無修整のため省略します。

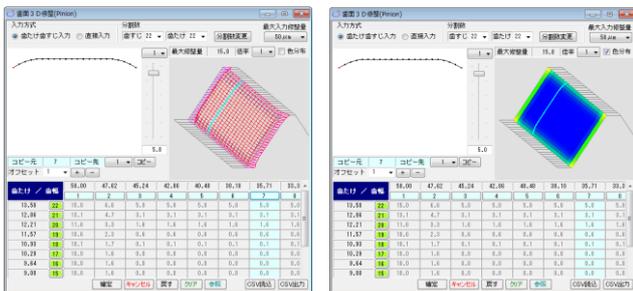


図 46.17 歯面修整 (Pinion)

46.10 レンダリング

生成した歯形を図 46.18 のように表示することができます。修整歯形に接触線を図 46.18(b)のように確認することができます。また，図を表示する際の機能は，図 46.19 のように組み立て誤差や回転角度 (誤差) を与えることができますので歯のかみ合いを容易に観察することができます。なお，この歯車の円すい形状は図 46.20 のように表すことができます。

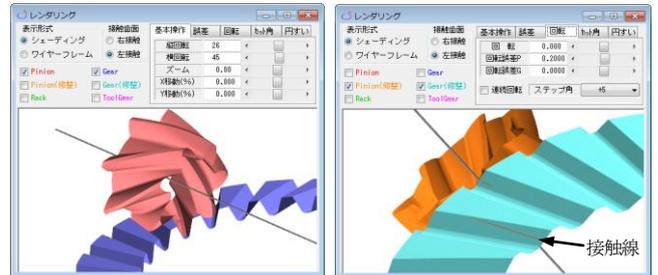


図 46.18 レンダリング



図 46.19 補助機能

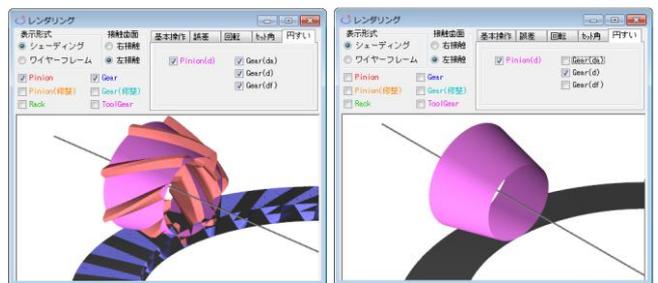


図 46.20 円すい

46.11 歯形出力

生成した理論歯形または，修整歯形を図 46.21 で 3D-IGES ファイルに出力することができます。出力歯数は任意に与えることができますので，ピニオンを全歯 (7 歯)，ギヤを 5 歯出力し，CAD で作図した例を図 46.22 に示します。



図 46.21 歯形出力

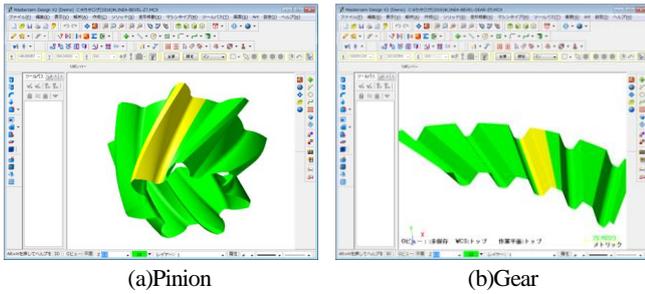


図 46.22 CAD 作図例

46.12 歯面接触解析

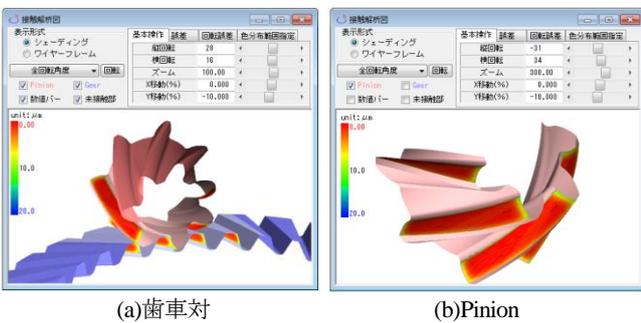
生成した歯形の接触距離やすべり速度、そして、すべり率を解析することができます。図 46.23 では 1 ピッチ角度の分割数 (本例では 50) を設定し、組み立て誤差などを 0 とし、最大接触距離を 20 μm としたときの解析結果を図 46.24~46.27 に示します。

歯面修整を考慮して接触距離から全かみ合い率を計算しますので本例では全かみ合い率は $\varepsilon_{\gamma}=2.12$ となります。また、図 46.24 の接触距離解析結果では、ピニオンに歯面修整を与えていますので歯先、歯元そして歯幅端部に接触距離が小さくなっていることが解ります。

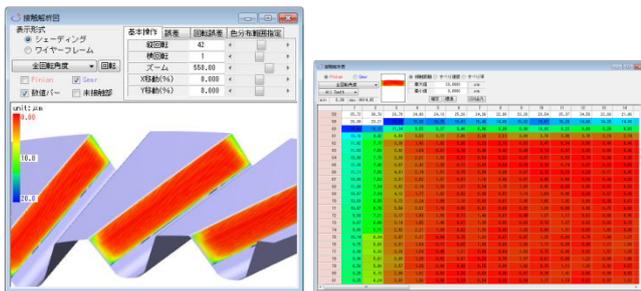
接触距離やすべり速度、すべり率の解析後、図 46.27 のように回転させることができますので角度位置における数値を把握する

接触解析設定			
右歯面接触(CW)		左歯面接触(CCW)	
項目	記号	単位	数値
角度分割数	N	---	50
軸角誤差	$\Delta\Sigma$	deg	0.0000
ねじれ角誤差	$\Delta\beta$	deg	0.0000
誤差X	Δx	mm	0.0000
誤差Y	Δy	mm	0.0000
誤差Z	Δz	mm	0.0000
回転数	n	min ⁻¹	600.000
最大接触距離	L	μm	20.00
全かみ合い率	ε_{γ}	---	2.1200

図 46.23 接触解析の設定



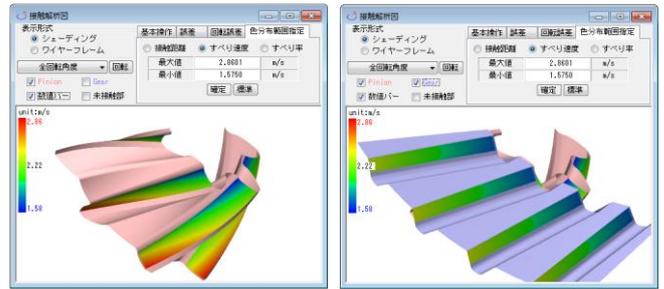
(a)歯車対 (b)Pinion



(c)Gear (d)接触解析表

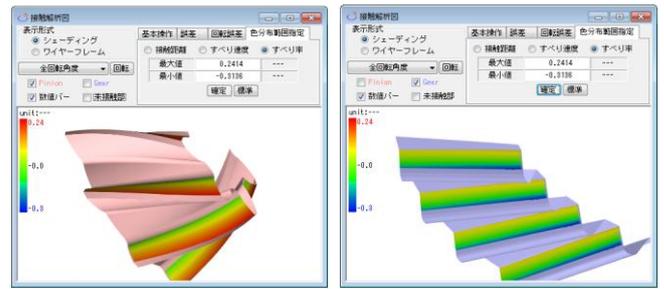
図 46.24 接触距離

ことができます。また、図 46.28 のように、数値範囲を指定して表示 (例: 2.50~2.87m/s) することもできます。図 46.28 では、すべり速度を示していますが、接触距離およびすべり率も同様に表示することができます。



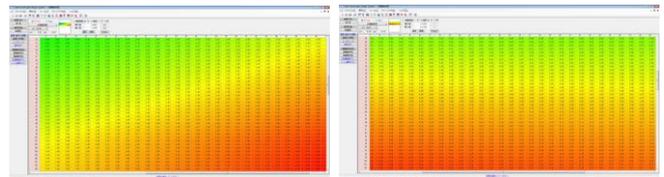
(a)Pinion (b)Gear

図 46.25 すべり速度



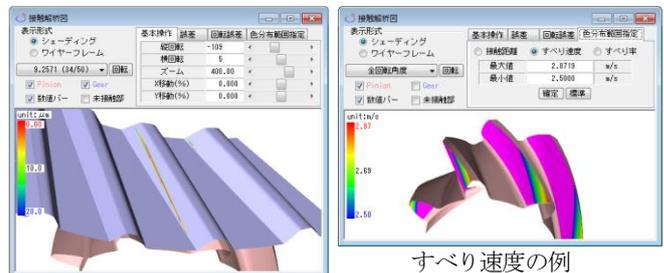
(a)Pinion (b)Gear

図 46.26 すべり率



(a)すべり速度 (b)すべり率

図 46.27 解析結果 (表)



(a)Pinion (b)Gear

図 46.27 回転

図 46.28 色分布範囲指定

46.13 伝達誤差

伝達誤差解析結果を図 46.29 に、フーリエ解析結果を図 46.30 に示します。本例の歯車の伝達誤差は $TE=0.65\mu\text{m}$ であることが解ります。



図 46.29 伝達誤差

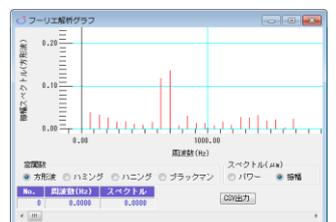


図 46.30 フーリエ解析

46.14 少歯数 (オプション)

ピニオン歯数を $z_1=2$, オフセットを 50mm としたときの計算例を図 46.31~46.38 に示します。本例の場合、ピニオンの歯形を内端側と外端側を揃えるため歯すじ角度は、ギヤ左歯面側を 45° 、右歯面側を 48° にしています。また、ピニオンの歯幅は、内端側と外端側を広くしてかみ合いに余裕を持たせています。

項目	記号	単位	基準寸法	
Gear 歯形形状	---	---	等モジュール歯形	
歯直角モジュール	mn	mm	3.0000	
歯直角圧力角	α_n	deg	15.0000	
歯数	z	---	2	
歯すじ角度(左/右)	β	deg	45.0000 / 48.0000	
軸角	Σ	deg	90.0000	
項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯末のたけ	ha	mm	3.0000	---
歯元のたけ	hf	mm	3.7500	---
基準円すい角	ϕ	deg	2.0826	---
オフセット	Xo	mm	50.0000	---
ころがり円半径	r	mm	12.0000	119.8510
Gear 内端直径	di	mm	---	220.0000
Gear 外端直径	do	mm	---	260.0000
Pinion 内端距離	Js	mm	94.0000	---
Pinion 外端距離	Je	mm	125.0000	---
歯幅	b	mm	31.0000	20.0000
歯厚	sj	mm	---	4.7124
法線バックラッシ	Jn	mm	---	0.0000
歯先R	ra	mm	0.3000	0.3000
歯元R	rf	mm	1.1250	1.1250

図 46.31 諸元

項目	記号	単位	Pinion	Gear
バックラッシ角度	J θ	deg	0.0000	0.0000
オフセット角	θ	deg	24.6570	---
外端円すい距離	La	mm	***	130.0859
内端円すい距離	Lf	mm	***	110.0727
円すい角	δ	deg	2.0826	87.9174
外形項目	記号	単位	Pinion	
円すい高さ	b	mm	31.0000	
内端直径	Dt	mm	28.9713	
外端直径	Db	mm	31.0256	

図 46.32 寸法結果

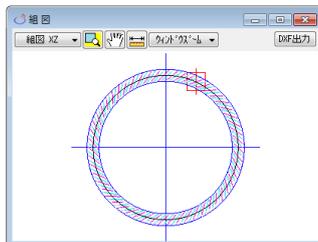


図 46.33 組図 (XZ)

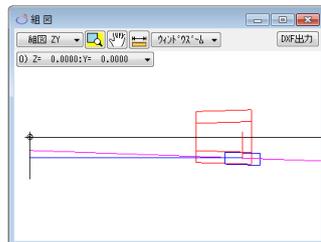


図 46.34 組図 (ZY)

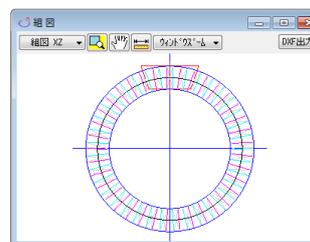


図 46.41 組図 (XZ)

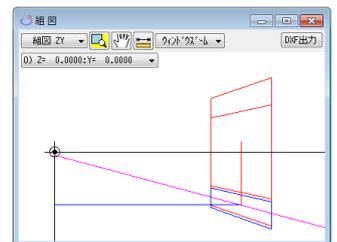


図 46.42 組図 (ZY)

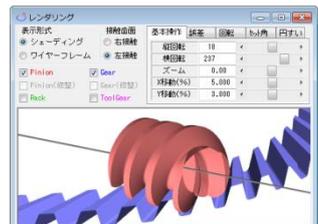


図 46.35 レンダリング



図 46.36 接触 ($\epsilon_g=3.49$)

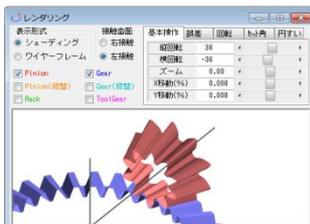


図 46.43 レンダリング

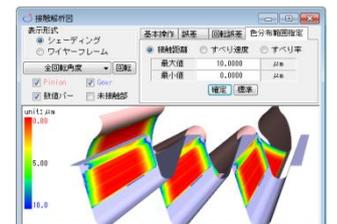


図 46.44 接触 ($\epsilon_g=1.57$)



図 46.37 すべり速度



図 46.38 すべり率

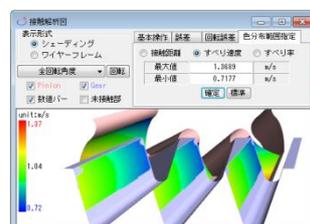


図 46.45 すべり速度

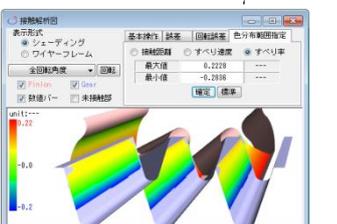


図 46.46 すべり率

46.15 比モジュール歯形

比モジュール歯形は、円すい距離に比例するモジュールで歯形を生成します。比モジュール歯形の計算例を図 46.39~46.46 に示します。比モジュール歯形の場合、歯すじ角度を与えることはできません。この機能は、すぐばかき歯車の形状とほぼ同じで、ギヤの歯形を直線としてピニオンの歯形を生成しています。

項目	記号	単位	基準寸法	
Gear 歯形形状	---	---	比モジュール歯形	
歯直角モジュール	mn	mm	3.0000	
歯直角圧力角	α_n	deg	20.0000	
歯数	z	---	10	
歯すじ角度(左/右)	β	deg	***	
軸角	Σ	deg	90.0000	
項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯末のたけ	ha	mm	3.0000	---
歯元のたけ	hf	mm	3.7500	---
基準円すい角	ϕ	deg	15.1240	---
オフセット	Xo	mm	0.0000	---
ころがり円半径	r	mm	18.0000	55.5000
Gear 内端直径	di	mm	---	93.0000
Gear 外端直径	do	mm	---	129.0000
Pinion 内端距離	Js	mm	46.5000	---
Pinion 外端距離	Je	mm	64.5000	---
歯幅	b	mm	18.0000	18.0000
歯厚	sj	mm	---	4.7124
法線バックラッシ	Jn	mm	---	0.1000
歯先R	ra	mm	0.1000	0.1000
歯元R	rf	mm	1.1250	1.1250

図 46.39 諸元

項目	記号	単位	Pinion	Gear
バックラッシ角度	J θ	deg	0.0279	0.1032
オフセット角	θ	deg	0.0000	---
外端円すい距離	La	mm	***	66.8142
内端円すい距離	Lf	mm	***	48.1684
円すい角	δ	deg	15.1240	74.8760
外形項目	記号	単位	Pinion	
円すい高さ	b	mm	18.0000	
内端直径	Dt	mm	32.1164	
外端直径	Db	mm	44.5485	

図 46.40 寸法結果

46.17 内歯ベベル+オフセットの例

内歯ベベルにオフセットを与え、軸角を $\Sigma=110^\circ$ とした設計例(図46.47~46.55)と模型(図46.56)を示します。内歯車ベベルギヤでオフセットを持つ歯車は、従来のかさ歯車加工専用機では加工が不可能であったことから設計概念としても一般化していませんでした。しかし、**Linear bevel gear**は「設計と加工の多様性」を持っていますので自由な発想で設計することができます。



図 46.56 内歯ベベル+オフセットの模型

項目	記号	単位	基準寸法	
Gear歯形形状	---	---	等モジュール歯形	
歯直角モジュール	mn	mm	2.5000	
歯直角圧力角	α_n	deg	20.0000	
歯数	z	---	7	34
歯すじ角度(左/右)	β	deg	30.0000	30.0000
軸角	Σ	deg	110.0000	
項目	記号	単位	Pinion	Gear
歯末のたけ	ha	mm	2.5000	---
歯元のたけ	hf	mm	3.1250	---
基準円すい角	ϕ	deg	-8.2434	---
オフセット	x_o	mm	15.0000	---
ころがり円半径	r	mm	14.5000	50.0000
Gear内端直径	di	mm	---	100.0000
Gear外端直径	do	mm	---	124.0000
Pinion内端距離	Js	mm	45.4805	---
Pinion外端距離	Je	mm	57.8422	---
歯幅	b	mm	12.3617	12.0000
歯厚	sj	mm	---	3.9270
法線バックラッシ	Jn	mm	0.1000	
歯先R	ra	mm	0.2500	0.2500
歯元R	rf	mm	1.0000	1.0000

図 46.47 諸元

項目	記号	単位	Pinion	Gear
バックラッシ角度	J θ	deg	0.0238	0.1148
オフセット角	θ	deg	17.4678	---
外端円すい距離	La	mm	***	82.6473
内端円すい距離	Lf	mm	---	50.5220
円すい角	ϕ	deg	11.7568	38.2434
外形項目	記号	単位	Pinion	Gear
円すい高さ	b	mm	12.3617	---
内端直径	Dt	mm	32.3922	---
外端直径	Db	mm	37.8074	---

図 46.48 寸法結果

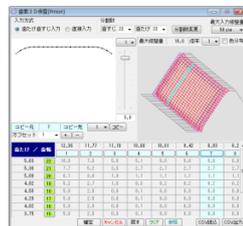


図 46.49 歯面修整

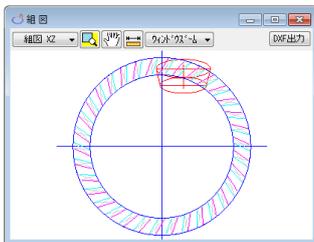


図 46.50 組図 (XZ)

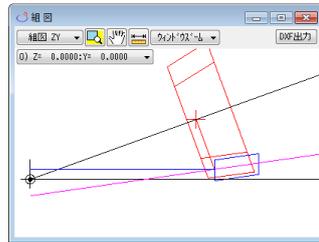


図 46.51 組図 (ZY)



図 46.52 レンダリング



図 46.53 接触 ($\epsilon_f=2.20$)



図 46.54 すべり速度



図 46.55 すべり率

46.18 まとめ

Linear bevel gearは「設計と加工の多様性」を持つことから、

- (1) ベベルギヤの外歯、内歯、そしてオフセットも自由に設計することができます。そのため、従来の考えにとらわれない歯車の使用や組み合わせが可能です (ex. $\Sigma=90^\circ$ で容積小)。
- (2) 歯形データさえあればマシニングセンタなどで加工が可能です。そのため、歯車加工専用機の制約を受けません。そのため、ピニオンを少歯数歯車とすることも大歯車を内歯とすることもできます。
- (3) マシニングセンタなどの加工は一般化技術として定着しているため今後、歯車加工専用機以外の加工法としての利用が進むと考えています。
- (4) 大歯車の歯形および歯すじを直線としているため円盤形砥石での研削が加工です。このためエンドミル形工具(砥石)に比べ生産性が非常に高く、加工面も上質となります。
- (5) スパイラルベベルを円盤形砥石で研削する場合、図45.57のように砥石と歯面が干渉するため研削が困難(不可能)です。(図45.58の片テーパ形砥石でも研削は不可能)しかし、図45.58の**Linear bevel gear**のピニオンは円盤形砥石で研削できることが解ります。
- (6) そもそも、スパイラルベベルの歯すじが、なぜ図45.57のようになっているのかということ、円盤外部の平面に刃物を置き、これを運動させ歯形を作っているからであって、この歯すじ形状を当然のこととして我々は認識しています。しかし、上述したように歯面を円盤形砥石で研削できるという大きな特徴を持つこの方式のベベルギヤは、近い将来、多くの採用が進むもの(特に大型歯車)と考えています。

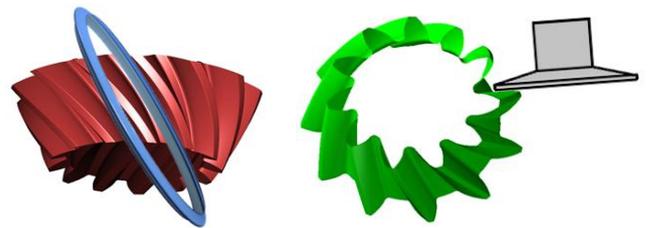


図 45.57 spiral bevel と円盤形砥石

図 45.58 **Linear bevel gear** のピニオンと片テーパ形砥石

Linear bevel gearは、IP-bevel gearの名称で2016年12月22日、日刊工業新聞7面に、そして日経ものづくり誌¹⁾2017年5月号、63~68頁に掲載されました(図45.59)。詳細は本誌をご覧ください。



図 45.59 日経ものづくり

1) 日経BP社、日経ものづくり誌表紙