

等高歯ハイポイドギヤに関する研究* (第2報, 歯切り条件と歯当たりパターン)

伊藤 紀 男*¹, 野村 和 弘*²

Equi-Depth Tooth Hypoid Gear Using Formate Gear Cutting Method (2nd Report, Cutting Conditions and Tooth Bearing Pattern)

Norio ITO and Kazuhiro NOMURA

In general, a hypoid gear and a spiral bevel gear for cars are made up of a formate gear and a generated pinion. The tooth shape is tapered tooth. Much practice is required to obtain excellent tooth bearing of the tapered tooth. If we convert a tapered tooth to an equi-depth tooth, it is thought that we could easily obtain practical tooth bearing. To date, however, there is no paper that theoretically analyzes tooth bearing of the equi-depth tooth and actually demonstrates it. Therefore the tapered tooth is still used in cars. Thus, we have studied the gear cutting method of the equi-depth tooth hypoid gear. The tooth surface of the hypoid pinion is generated by the 3rd gear member. In such a case, it is useful to apply the cutting pitch cone instead of the pitch cone and to change the generating shaft angle to the tooth bearing development of a hypoid gear. In this report, we present the relationships between the cutting pitch angle or the generating shaft angle and the tooth bearing pattern compared with a tapered tooth.

Key Words: Gear, Hypoid Gear, Equi-Depth Tooth, Formate Gear, Tooth Bearing, Cutting Pitch Cone, Generating Shaft Angle, Bias Bearing

1. 緒 言

一般に, 自動車用のハイポイドギヤやまがりばかさ歯車は, ギヤは成形歯切りされ, ピニオンは創成歯切りされる。得られる歯の形はこう配歯である。著者の1人は, すでに自動車用歯車の量産の中心となっているこう配歯成形歯切り法を, 等高歯の成形歯切り法に適用させるための諸元の算出法や問題点などについて明らかにしてきた⁽¹⁾。

一方, ハイポイドギヤやまがりばかさ歯車の歯当たりに関して, 歯の形を等高歯にすれば, はじめから立派に当たりがつく⁽²⁾とか, 歯当たりの調整がこう配歯と比較にならないほど敏速, 確実に行うことができる⁽³⁾などといわれてきた。しかし, そのことに関して, 理論的に歯当たり解析を行い, こう配歯との比較において, それを明確に示したものはない。そのため現在においても, 歯切りや歯当たりの調整が複雑であるといわれるこう配歯が, 依然として主流をなしているのである。

そこで本報では, 第1報⁽¹⁾で得られた修正設計諸元をもとに, これまで高橋らによって明らかにされてきた歯当たり解析法⁽⁴⁾を用いて, 成形歯切りによる等高歯の歯当たりシミュレーションを行い, 得られた歯当たりパターンの特徴について考察する。歯当たりの特徴は, こう配歯の歯切りに用いられる歯当たりディベロップ法⁽⁵⁾を, 等高歯の歯切りにも適用し, 歯当たりがどのように変化するかについて調べる。特に, 等高歯の歯切りに大きな影響を与えると考えられるカット径や, こう配歯のバイアス変化に利用される歯切りピッチ円すい角や創成軸角が, 等高歯の歯当たりによどのような影響を与えるのかについて考察する。

2. 歯当たり解析法

等高歯ハイポイドギヤの歯当たりは, ギヤの歯切り基準点が駆動側と被動側の両歯面上にあるため, それぞれの歯面について考察しなければならない⁽¹⁾。

図1は, ハイポイドギヤの歯当たりシミュレーションを行うための解析手順を示す。まず, ピニオン, ギヤの基本諸元より, それぞれのピッチ円すいを求める。次に, フェイスミルカット⁽⁶⁾を用いてギヤを成形歯切りし, 得られる円すい状のギヤ歯面 x_2 を求める。求められたギヤ歯面と2次の線接触をなす曲面, すなわち

* 平成5年10月2日 第71期全国大会において講演, 原稿受付 平成6年4月6日。

¹ 正員, 富山大学工学部 (〒930 富山市五福 3190)。

² 学生員, 富山大学大学院。

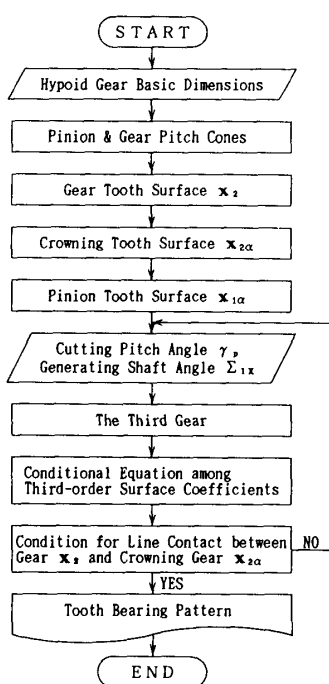


図1 歯当たりパターン解析手順

クラウニング歯面 x_{2a} を求め、それと接線接触かみ合いをなすピニオン歯面 x_{1a} を決定する。ピニオン歯面を創成するための第3の歯車は、フェイスミルカッタの回転によって歯面は構成され、ピニオンの歯切りピッチ円すい角 γ_p や創成軸角 Σ_{ix} を適当に変化させて決定することができる。 γ_p や Σ_{ix} は歯当たり調整に利用される歯切り条件である。次に、三次歯面の接触に関する3次の歯面係数⁽⁴⁾間の関係式を利用して、それら歯面係数を順次決定する。最後に、ギヤ歯面 x_2 とクラウニング歯面 x_{2a} の線接触に関する三次歯面の条件式が満足されているかどうかを確認し、それが満足されていれば歯当たりパターンを描かせる。ピニオンとギヤの歯当りは、ギヤ歯面 x_2 とクラウニング歯面 x_{2a} の静的な接触状態によって決定する。ここでは、それら両歯面間のすきまが、1~5 μm までを1 μm 間隔の等隙間線図として描かせる。得られた等隙間線図を歯当たりパターンという。

3. 歯当りに影響を与える因子

等高歯ハイポイドギヤの歯当りに影響を与える因子は、こう配歯と同様に無数に考えられる。そのおもなものには、歯のこう配、ギヤカッタ径、創成軸角、ギヤ歯切り方式などが挙げられる。ここでいう歯のこう配とは、歯すじ方向と歯面の主方向との傾きで、その傾きの程度と歯当たりの関係については、いまだ明確にはされていない。カッタ径は歯当りに影響を与え

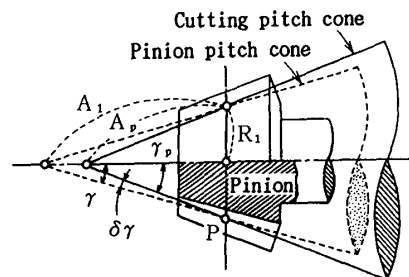


図2 ピニオン歯切りピッチ円すい

ることは明らかだが、これも歯当たりの基本形に対してどのような変化を及ぼし、またディベロップの難易にどのような影響を与えるかについては不明である。創成軸角はバイアス角の変化に影響を与えるだけでなく、歯当たりが両端部に移動した場合の歯当たり長さに影響を与える。しかし、最適な創成軸角が存在するかどうかについては明確ではない。ギヤの歯切り方式についても、成形法と創成法によって歯当りは異なり、創成の場合はオフセットの与え方によっても歯当りは変化する。さらに、これらの因子は相互に影響を及ぼし合いながら、複雑に歯当りに変化を与えるため、経験に頼ったディベロップでは、その修整結果の予測におのずと限界が生ずることになる。

そこでここでは、これらの因子のうち、ギヤのカッタ径とバイアス変化に大きな役割を果たす歯切りピッチ円すいと創成軸角について考え、それらの変化が等高歯の歯当たりパターンにどのような影響を与えるかについて考察する。

3.1 歯切りピッチ円すいの影響 ハイポイドギヤの諸元が与えられると、ピッチ点Pを通る一对のピッチ面は決定する。ピニオンが、相手ギヤとは異なる第3の歯車と点Pでかみあうとき、第3の歯車との間で定まるピニオンのピッチ面は、はじめのピッチ面とは異なるものであってもよい。このようにして定まるピニオンのピッチ面が歯切りピッチ面であり、それに外接するピッチ円すいが歯切りピッチ円すいである。

図2には、ピニオンピッチ面に外接する二つのピッチ円すいが示されている。図1で、第3の歯車によって創成歯切りされるピニオン歯面 x_{1a} は、クラウニング歯面 x_{2a} とは線接触かみ合いをなすが、ギヤ歯面 x_2 とは点接触かみ合いをなす。そこで、ギヤ歯面 x_2 の相手歯面となるピニオン歯面を x_1 とすると、歯面 x_{1a} と歯面 x_1 はまったく同じ歯面となる。言い換えると、基本諸元から求められるピッチ角が γ のピニオンピッチ面上に、歯面 x_1 が歯付けされ、さらにそれとは異なるピッチ角 γ_p をもつピッチ面上に、ピッチ

円半径 R_1 は変えないで、同じ歯面 x_1 がそのまま歯付けされるということである。 A_1 は当初のピニオンピッチ円すい距離であり、 A_p は歯切りピッチ円すいのピッチ円すい距離である。ピッチ角の変化 $\delta\gamma$ に伴い、歯面 x_1 のねじれ角 ψ_1 や圧力角 ϕ はそれぞれ ϕ_p 、 ϕ_x に変化する。このときの歯切りピッチ円すい上のピッチ平面が歯切りピッチ平面である。以上のことから、次のような関係式が得られる⁽⁷⁾。

$$R_1 = A_p \sin \gamma_p \dots\dots\dots (1)$$

$$\gamma_p = \gamma + \delta\gamma \dots\dots\dots (2)$$

$$\sin \phi_p = (\sin \phi_1 - \tan \delta\gamma \tan \phi) / t_p \dots\dots\dots (3)$$

$$\sin \phi_p = \sin \delta\gamma \sin \phi_1 \cos \phi + \cos \delta\gamma \sin \phi \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} t_p &= \sqrt{t_x^2 + t_y^2 + t_z^2} \\ t_x &= -\tan \delta\gamma \tan \phi \cos \phi_1 \\ t_y &= \tan \delta\gamma \cos \phi_1 \\ t_z &= \tan \delta\gamma \tan \phi \sin \phi_1 - 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ピニオンを創成歯切りする際のカッタの描く歯面、すなわち第3の歯車の歯面を x_p と表し、そのときのピッチ円すい3要素⁽⁸⁾を (A_x, Γ_x, ψ_x) 、歯面の3要素⁽⁸⁾を $(\rho_p, \tau_p, \delta_p)$ 、創成軸角を Σ_{1x} とする。一方、ピニオン歯面 x_{1a} の歯面3要素を $(\rho_p, \tau_p, \delta_p)$ とすると、これら二つの歯面 x_p 、 x_{1a} の間には、次のような軸角および歯すじ曲率、そして2歯面の接触線が歯すじ方向に対してなす角 σ_x に関して、次式が成立する⁽⁹⁾。

$$\cos \Sigma_{1x} = -\sin \gamma_p \sin \Gamma_x + \cos \gamma_p \cos \Gamma_x \cos (\phi_p - \phi_x) \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{1}{\frac{1}{\rho_p} - \rho_x} - \frac{1}{\frac{1}{\rho_{2p}} - \rho_x} = \frac{1}{q_x} \dots\dots\dots (7)$$

$$\tan \sigma_x = \frac{\frac{1}{\rho_p} - \rho_x}{\frac{1}{\tau_p} - \lambda_x} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

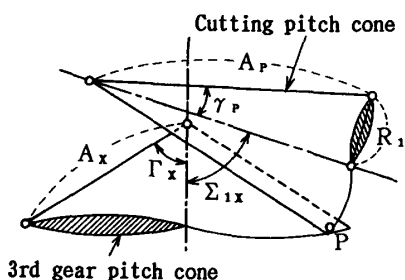


図3 第3の歯車と創成軸角

$$\left. \begin{aligned} p_x &= \frac{-\nu_x \sin \phi + \nu_y \cos \phi}{\tan \phi_p - \tan \phi_x} \\ q_x &= \frac{\sec \phi_p \sec \phi_x}{(\tan \phi_p - \tan \phi_x)^2} \left\{ \left(\frac{\sin \phi_p}{A_x} - \frac{\sin \phi_x}{a_p} \right) \right. \\ &\quad \left. \times \cos \phi + \nu_z \cos (\phi_p - \phi_x) \sin \phi \right\} \\ \lambda_x &= \frac{\nu_x}{\tan \phi_p - \tan \phi_x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} \nu_x &= \frac{\tan \phi_p}{A_p \tan \gamma_p} + \frac{\tan \phi_p}{A_x \tan \Gamma_x} \\ \nu_y &= \frac{1}{A_p \cos \phi_p} - \frac{1}{A_x \cos \phi_x} \\ \nu_z &= \frac{1}{A_p \tan \gamma_p} - \frac{1}{A_x \tan \Gamma_x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

これにより、歯切りピッチ円すい角 γ_p が与えられると、第3の歯車のピッチ円すい3要素は決定される。このことから、図1で3次の歯面係数に関する計算が可能となり、目的とする等高歯の歯当たりパターンが得られることになる。

3.2 創成軸角の影響

図3は、ピニオン創成用第3の歯車のピッチ円すいとピニオンの歯切りピッチ円すいを示したものである。二つの円すいの軸のなす角が創成軸角 Σ_{1x} である。創成軸角 Σ_{1x} は、3.1節で述べたように歯切りピッチ円すい角と同様に、歯当たりパターンの計算過程で独立に与えることができる。創成軸角の変化は、歯切り段取りにおけるピニオンのルート角セッティングに相当し、歯当たりの傾きを表すバイアス角や歯すじ曲率に影響を与える。こう配歯の場合は、設計上の軸角(一般的には、90°)よりも小さい値で歯切りすると、歯当たりが得やすいといわれている。

4. 等高歯歯当たりパターン

表1は、具体例として取上げた乗用車用ハイポイドギヤの基本諸元である。フェイスミルカッタによってギヤを成形歯切りする場合、ギヤ歯面の歯すじ曲率に関係のあるカッタ径は、こう配歯と同様に、7.5インチのものを基準として考える。カッタ径を変化させる

表1 ハイポイドギヤの基本諸元

Combination	n/N	8/35
Shaft Angle	Σ	90 deg
Gear Pitch Dia.	D	190 mm
Gear Face Width	F	28 mm
Pinion Offset	E	30 mm
Standard Cutter Dia.	2r.	190.5 mm
Blade Pressure Angle	ϕ_s	19 deg

場合は最大12インチのものから、最小はインボリュート曲線の曲率半径に近い3.5インチのものまでについて検討した。

4.1 バイアス角の変化 図4は、成形歯切り法によって等高歯を歯切りする場合のカッタ径 $2r_c$ とバイアス角 α の関係を駆動側(Drive side)、被動側(Coast side)歯面について求めたものである。横軸にはカッタ径をインチで表し、縦軸にはバイアス角 α を度(deg)で表す。図4中には、考察点Pにおける歯面の接平面であるyz平面とバイアス角 α の符号のとり方が示してある。z軸は歯すじ方向である。このとき計算に用いた創成軸角 Σ_{ix} の値は 88° である。これより、駆動側歯面に対して被動側歯面は、カッタ径によるバイアス角の変化の影響が小さいことがわかる。また、両歯面とも歯当りはバイアスイン⁽¹⁰⁾の傾向を示している。 Σ_{ix} の値を変化させた場合も、ほぼ同様の傾向が得られている。

図5は、歯切りピッチ円すい角の変化 $\delta\gamma$ とバイアス角 α の関係を示したものである。横軸には $\delta\gamma$ が度で、縦軸にはバイアス角 α が示してある。 $\delta\gamma$ の符号は式(2)によって定められる。ここでも駆動側歯面と被動側歯面について示し、それぞれにはカッタ径をパラメータとして、その変化が示してある。このときの創成軸角の値は、図4の場合と同様に 88° で計算している。こう配歯の場合は、 $\delta\gamma$ の変化に対して、 α の値は大きく変化し、 $\delta\gamma$ はバイアス修整に有効な因子であった⁽⁹⁾。しかし、等高歯の場合は駆動側、被動側歯面ともに α の変化が小さく、 $\delta\gamma$ によるバイアス修整が難しいことがわかる。図5の駆動側歯面には、比較的バイアス傾向の小さいカッタ径3.5インチの結果が破線で示してあるが、実際には歯当たりパターンが悪

く、バイアス角の値からだけでは、歯当たりの評価ができないという例である。この場合の歯当たりパターンは後述の図7に示されている。

図6は、カッタ径を変化させた場合の創成軸角 Σ_{ix} とバイアス角 α の関係を示したものである。横軸には Σ_{ix} が度で、縦軸にはバイアス角 α が示してある。駆動側では、 Σ_{ix} が約 89° 以下では、 α の値に大きな変化は見られない。被動側でも、 α の値の大きさに違いはあるが、同じような傾向を示している。駆動側、被動側ともに Σ_{ix} が 90° 付近に近づくと、バイアス角はいくぶん増大し、バイアス傾向は弱まるが、歯当たりの形に乱れが生じる。 Σ_{ix} がそれより大きな値になると、三次歯面の接触条件を満たす α の値が得られない。以上のことより、 Σ_{ix} の実用的な値の範囲ではこう配歯に

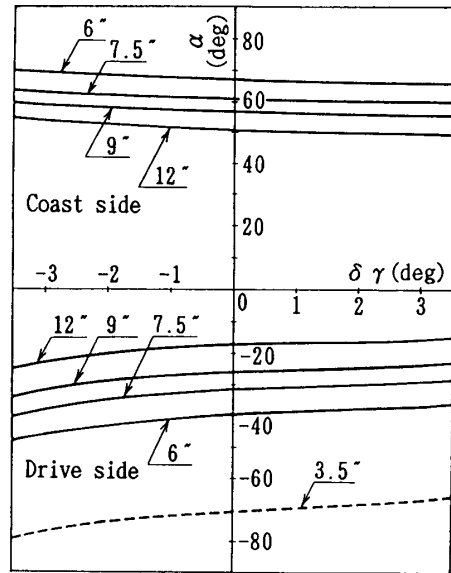


図5 ピッチ円すい角とバイアス角変化

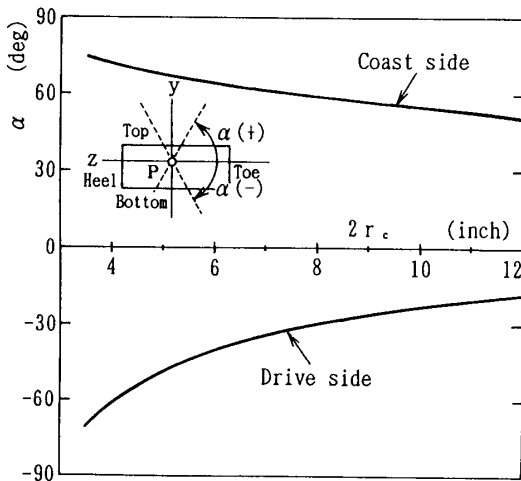


図4 カッタ径とバイアス角変化

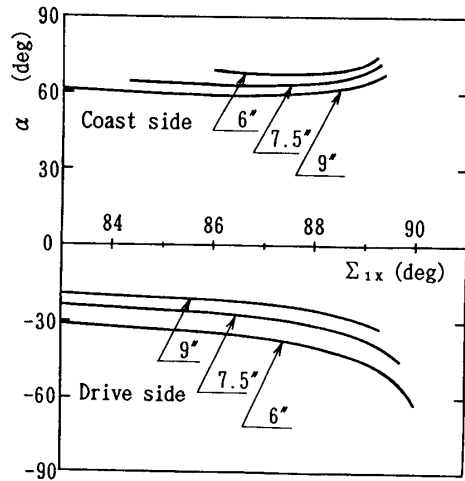


図6 創成軸角とバイアス角変化

比較して、 α の変化の幅が狭いといえる⁽¹¹⁾。

4・2 歯当たりパターン 歯当たりパターンの具体例として、ここでは、カッタ径との関係についてのみ示す。創成軸角の値はここでも 88° とし、歯切りピッ

チ円すい角も $\gamma_p = \gamma$ として計算した。

図7(a)~(f)は、それぞれカッタ径を変化させた場合の駆動側歯面の歯当たりパターンである。各歯面上の yz 座標は、図4の中で示したものと同一座標で

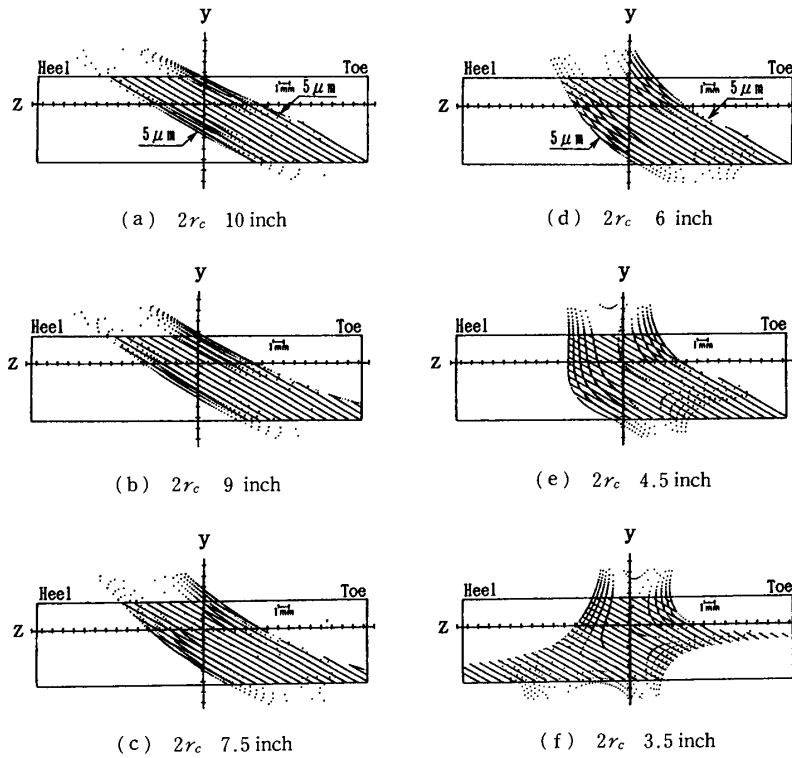


図7 駆動側歯面の歯当たりパターンとカッタ径効果

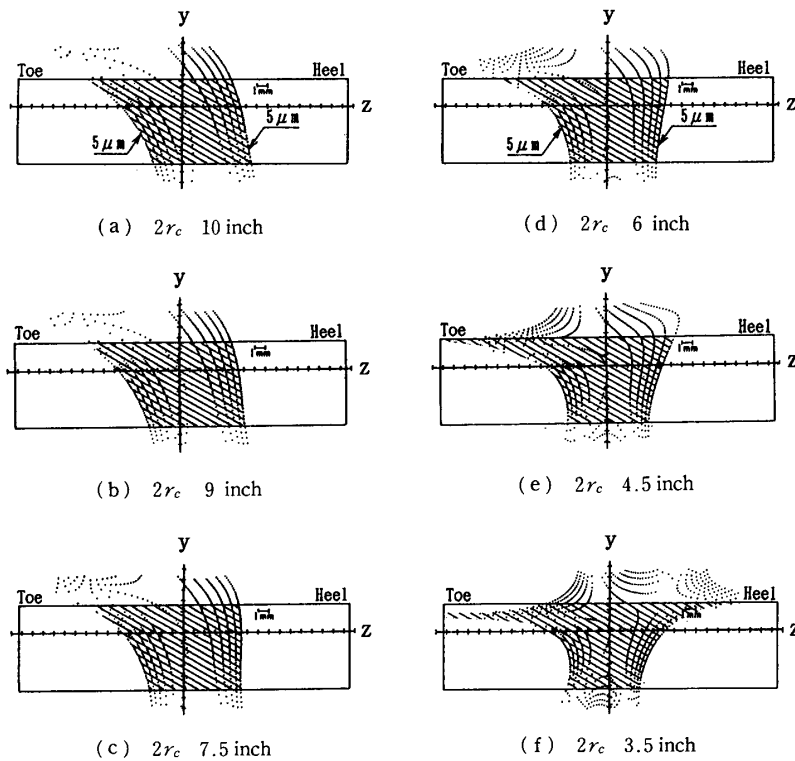


図8 被動側歯面の歯当たりパターンとカッタ径効果

ある。図4の結果からもわかるように、駆動側の歯当たりはバイアスインの傾向を示し、かみあい率の点で有利であるといえる。カット径の大きい10インチの場合は、特にバイアス傾向が強い。逆に、カット径をインポリュート曲線の曲率半径の値に近づけていくと、バイアス傾向は弱まるが、3.5インチになると歯当たりの形は乱れてくる。このことは、4・1節で述べたように、バイアス角の値だけでは判断のつかないことである。

図8(a)～(f)は、被動側歯面の歯当たりパターンである。被動側でもバイアスインの傾向を示し、バイアスの傾向は駆動側歯面に比べて緩やかであることがわかる。しかし、歯当たりの形状から判断すると、カット径は4.5インチぐらいが限界であり、それよりも小さくなると歯当たりが不安定になる。

以上のように、カット径と歯当たりパターンに関する今回の具体例から判断すると、歯当たりは駆動側、被動側ともにバイアスインの傾向がある。しかしその反面、カット径によるバイアス角の調整の幅は狭く、歯当たりの制御が困難であるということになる。このことは、熱処理ひずみなどによる歯当たり修整が難しいということで、この点では、従来のこう配歯に比べて問題が残される。

5. 結 論

本論文は、フェイスミルカットを用いたグリーソン方式によって、等高歯ハイポイドギヤを成形歯切りした場合の歯当たりパターンについて考察した。その結果、次のような結論を得た。

(1) 成形歯切り法による等高歯ハイポイドギヤの歯当たりパターンは、バイアスイン傾向にある。

(2) バイアスは被動側歯面に比べ、駆動側歯面に強く現れる。

(3) 歯当たりパターンは、カット径の値によって大きな影響を受ける。しかし、カット径が等高歯の歯すじにふさわしいインポリュート曲線に近い曲率半径になると、カット径は極端に小さくなり、実用上無理が生じる。

(4) 歯切りピッチ円すい角や創成軸角の変化に対して、バイアス角の変化は小さく、こう配歯に比べ、歯当たり修整が困難である。

最後に、本研究を進めるにあたり、いろいろとご教示を賜った福井工業大学教授高橋幸一先生に深く感謝の意を表す。

文 献

- (1) 伊藤・高橋, 機論, 61-582, C(1995).
- (2) 和栗, 歯車の設計・製作とその耐久力, (1980), 89, 養賢堂.
- (3) 例えば, 後藤, 機論, 20-90(1954), 92.
- (4) 高橋・伊藤, 機論, 50-456, C(1984), 1439.
- (5) 例えば, Gleason Works, *Calculating Instructions FOR-MATE Hypoid Gears.*, HFT-116(1956).
- (6) 例えば, Dudley, D. W., *Gear Handbook*, (1962), 20-24, McGRAW-HILL.
- (7) 高橋・伊藤・ほか2名, 機論, 56-528, C(1990), 2203.
- (8) 高橋・伊藤, 機論, 49-443, C(1983), 1246.
- (9) 例えば, 高橋・伊藤・ほか2名, 機論, 56-528, C(1990), 2203.
- (10) 例えば, Gleason Works, *Testing and Inspecting Bevel and Hypoid Gears*, (1982), 10-1.
- (11) 高橋・伊藤, 機論, 51-462, C(1985), 381.