

## 擬仮想冠歯車を用いたクリンゲルンベルグ方式曲がり 歯傘歯車の歯切り法\*

岩本安弘<sup>\*1</sup>, 田村久司<sup>\*2</sup>, 谷藤克也<sup>\*2</sup>

### Method of Cutting Klingelnberg Spiral Bevel Gears by Using Pseudo-Complementary Crown Gear

Yasuhiro IWAMOTO<sup>\*3</sup>, Hisashi TAMURA and Katsuya TANIFUJI

<sup>\*3</sup> Design Department, Omiya Plant, NICO Company, Niigata Engineering Co., LTD.,  
1-405-3 Yoshinocho, Kita-ku, Saitama-shi, Saitama, 331-0811 Japan

A new method to cut the spiral bevel gears of Klingelnberg cyclopalloid system is proposed. The feature of the cutter used in this method is the straight cutting edge whose extension line does not pass through the cutter axis. The blade having a cutting edge can be made easily and its rake face can be reground to sharpen the cutting edge with an ordinary surface grinding machine. In the method, the pinion is generated with a complementary crown gear and the gear is generated with a newly introduced Pseudo-complementary crown gear. The pseudo-complementary crown gear is the generating gear whose pitch plane is not tangent to the pitch cone of work gear. The tooth (tool) surface of each crown gear is made up with the above mentioned cutter. The availability of the method is confirmed by trial gear manufacturing.

**Key Words:** Machine Element, Gear, Bevel Gear, Spiral Bevel Gear, Klingelnberg Spiral Bevel Gear, Gear Cutting Method

#### 1. 緒 言

曲がり歯傘歯車は歯切り工程でメッシング・スタン  
ド上の歯当たり出し作業を必ず行う。クリンゲルン  
ベルグ社はサイクロパロイド方式曲がり歯傘歯車の歯  
当たり出し作業に関する手順書を用意しているが、それ  
は大まかな指針でしかなく、最終的には熟練作業者の  
技能に頼っているのが実状である。しかし、熟練作業  
者にとってもこの作業は容易ではなく、少なくとも  
1~2回の試行歯切りを行い、満足すべき歯当たりを得  
るまでに多くの時間を費やしている。

クリンゲルンベルグ方式曲がり歯傘歯車は等高歯で  
あるから、こう配歯のグリーンソン方式曲がり歯傘歯車  
よりも良好な歯当たりが得やすい<sup>(1)</sup>と一般に考えら  
れているが、やはり熟練作業者の技能に依存してい  
る。

本研究は、クリンゲルンベルグ・サイクロパロイド  
方式曲がり歯傘歯車の歯切りにおいて、熟練作業者に

よる歯当たり出し作業が必要となる原因は歯切り方式  
そのものに起因していることを明らかにするととも  
に、それを回避するための新しい歯切り法を提案し、  
歯切り実験によりその有用性を確かめたものである。

#### 2. 仮想冠歯車歯(刃)面

2章ではクリンゲルンベルグ・サイクロパロイド方  
式歯切り法で歯当たり出し作業が必要となる原因を明  
らかにする。ここでは、左ねじれピニオン凸歯面と右  
ねじれギヤ凹歯面をそれぞれ創成歯切りするためのピ  
ニオン歯切り用仮想冠歯車凹歯(刃)面とギヤ歯切り用  
仮想冠歯車凸歯(刃)面の関係について述べる。反対側  
歯(刃)面間についても、また、ねじれ方向が逆の場合  
についても全く同じことがいえる。本報では仮想冠歯  
車歯面を刃面ということにする。

2・1 カッタの外刃と内刃 歯すじがトロコイド  
曲線である仮想冠歯車の上記凹、凸各刃面は、カッ  
タ・ヘッドに取付けた内側ブレード、外側ブレードと  
称される各ブレードの直線切り刃それぞれが仮想冠歯  
車空間に描く軌跡面である<sup>(2)</sup>。そして、被削歯車歯面  
間に相対的にクラウニングを与えるために、図1に示  
すように、ギヤ歯切り用の外側切れ刃  $a'b'$  [以下、  
O. B(Outer Blade)という] のカッタ軸  $z_c$  まわりの旋

\* 原稿受付 2002年11月18日。

\*<sup>1</sup> 正員, (株)新潟鉄工所ニコカンパニー大宮工場(☎330-8646  
さいたま市吉野町1-405-3)。

\*<sup>2</sup> 正員, 新潟大学工学部(☎950-2181 新潟市五十嵐二の町  
8050)。

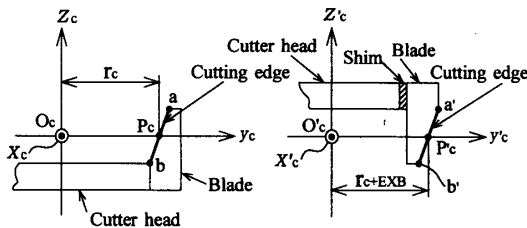
E-mail: y-iwamoto@niigata-converter.co.jp

回半径をピニオン歯切り用の内側ブレード切れ刃  $\overline{ab}$  [以下, I. B (Inner Blade という)] のそれよりもわずかに大きくする。これはカット半径といわれる I. B の旋回半径  $r_c$  よりも O. B のそれをシム挿入によって EXB (Expansion B) だけ増すことによって実現される。図 1 において,  $O_c-x_c y_c z_c$ ,  $O'_c-x'_c y'_c z'_c$  はそれぞれ I. B., O. B 取付用カット・ヘッドに設定した座標系で,  $z_c, z'_c$  はカット軸である。原点  $O_c, O'_c$  をカット中心という。クリンゲルベルグ・サイクロパロイド方式では直線切れ刃  $\overline{ab}, \overline{a'b'}$  はそれぞれ  $x_c=0, x'_c=0$  の平面上にある。すなわち切れ刃はカット軸を含む平面(含軸平面)に乗るように決められている。

**2.2 刃面の干渉** 図 2 に, 仮想冠歯車ピッチ平面上に設置したカット位置すなわち  $O_c-x_c y_c z_c, O'_c-x'_c y'_c z'_c$  の位置を示す。そして, この状態を基準位置・状態とする。図 2 で,  $O-xyz$  は仮想冠歯車に設定した座標系で,  $z$  軸は仮想冠歯車軸,  $y$  軸はピッチ面創成母線<sup>(3)</sup>である。  $z=0$  の平面がピッチ平面である。  $\overline{OP}$  の長さは平均円すい距離  $R_m$  である。また, カット軸  $z_c, z'_c$  まわりの各切れ刃の旋回運動は, 各カットに固着している転がり円  $R, R'$  がピッチ平面上に設定した基礎円  $Q, Q'$  上をそれぞれ転がるときの転がり運動として実現される。この転がり運動は切れ刃に切削速度を与えるが, 同時に, 切れ刃が  $O-xyz$  に対して描く運

動軌跡すなわち刃面を形成するためのものでもある。なお, 点  $P_c, P'_c$  の軌跡はトロコイド曲線になる。  $\beta$  は点  $P$  におけるトロコイド曲線の接線とピッチ面創成母線 ( $y$  軸) とのなす角でねじれ角を与える。

さて, 図 2 において紙面垂直方向の奥行きを考える。図 1 に示す切れ刃上の点  $P_c, P'_c$  が点  $P$  に位置する基準状態のときの切れ刃の運動は, 転がり円筒  $R, R'$  と基礎円筒  $Q, Q'$  それぞれの接点である瞬間中心(線)  $S, S'$  まわりの瞬間的回転運動と考えることができる。したがって, 点  $P_c, P'_c$  の運動方向  $\overline{PS}(\overline{PS}')$  に垂直で同じ方向  $v$  になる。しかし, 図 2 の詳細を示した図 3(a), (b) で, I. B 上の点  $a$  の運動方向  $v_1$  と O. B 上の点  $a'$  のそれ  $v'_1$  は瞬間中心の位置がそれぞれ  $S, S'$  と異なるため, 図 3(a) に誇張して示すように, 運動方向は若干ではあるが異なる。点  $b, b'$  の運動方向  $v_2, v'_2$  についても同じことがいえるが, 異なり方が逆になる。このことと, クラウニングを与えるための I. B と O. B の旋回半径差のことを考え合わせると, 各切れ刃の軌跡面すなわち刃面の関係は図 3(c) に示すように互いに干渉関係にあることになる。機構学的



(a) Inner blade (I. B) (b) Outer blade (O. B)

Fig. 1 Cutting edge of blade

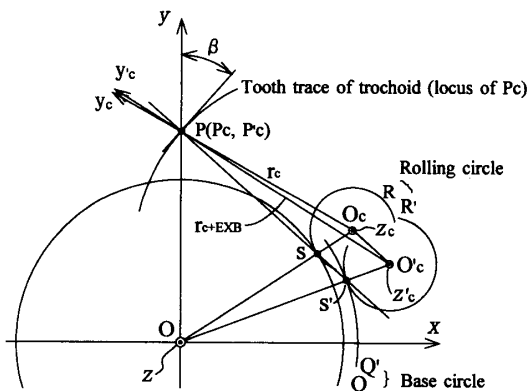
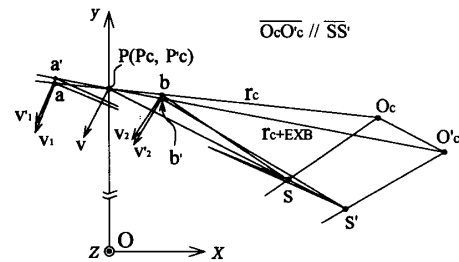
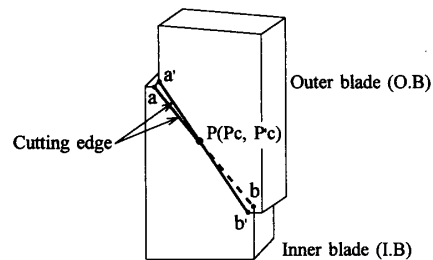


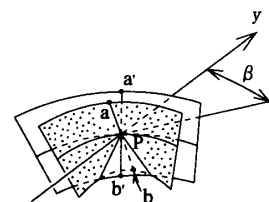
Fig. 2 Tooth trace of complementary crown gear



(a) Velocities and instantaneous centers



(b) Cutting edge



(c) Interference

Fig. 3 Interference between tool surfaces

には両刃面は干渉のない点接触か線接触の関係になければならないところ、実際は図3(c)に示すようになっているために歯切りした歯面対では良好な歯当たりが出しにくくなっているのである。

瞬間中心を用いて歯切り諸元を決定するサイクロパロイド方式において、クラウニングを施すためにI.BとO.Bの間にカット半径EXBを設けるが、それによる刃面間の干渉が歯当たり出し作業を必要とする主要原因である。クリンゲルベルグ社はこれの対策として直線切れ刃を曲率半径の大きな円弧に変更しているが、それによって今度は切れ刃の厳しい精度管理が必要になると同時に歯切盤の精度の問題も浮上してくる。

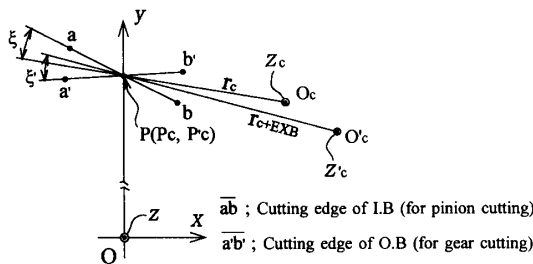
グリーソン方式曲がり歯傘歯車で歯当たり出し作業が必要になる原因はこう配歯にあったが、クリンゲルベルグ・サイクロパロイド方式ではクラウニング付与がその原因である。そして、両方式ともそれらが刃面間にわずかな干渉を生じるからであるが、結局は歯

切り法に係わる原理的なものである。グリーソン方式曲がり歯傘歯車に関するこの問題の解決法として準仮想冠歯車を用いる歯切り法が報告されている<sup>(4)</sup>。

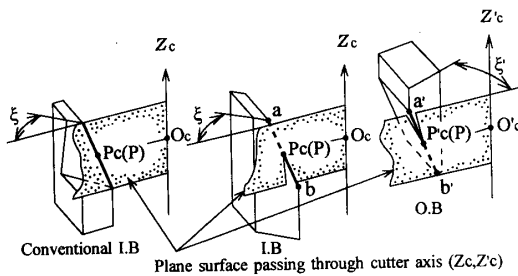
3. 擬仮想冠歯車

サイクロパロイド方式における刃面間の干渉の原因は、切れ刃直線を含軸平面に乗せるとともにO.BにEXBを与えたために、切れ刃 $\overline{ab}$ と $\overline{a'b'}$ とが図3(a),(b)に示すように交差したことにある。そこで切れ刃 $\overline{ab}$ と $\overline{a'b'}$ が含軸平面に乗るという制約を解き、含軸平面を貫くようにする。すなわち図4(a),(b)に示すように配置すれば、切り刃の交差の仕方は図3と逆になり、刃面間の干渉は図4(c)に示すような干渉になる。当然、点Pにおいて両刃面法線はわずかに一致しない。そこで $\overline{a'b'}$ の形成する刃面(以下O.B刃面という)に、点Pを通りx軸に平行な軸まわりに微小角 $\Delta$ まわして傾ける自由度とねじれ角を変更して $\beta'$ とする自由度を与えて刃面法線に2自由度を付加する。そして、 $\overline{ab}$ の形成する刃面(以下I.B刃面という)の法線に一致させるならば、両刃面は点Pにおいて相対全曲率が正で、かつ非常に小さな値の点接触をする。したがって、それらの刃面で歯切りされた歯面どうしも点Pで必ずかみあうから、歯当たりもそのまわりに現れることになる。反対側刃面間すなわちピニオン歯切り用凸刃面とギヤ歯切り用凹刃面についても微小傾け角の値と傾ける方向、そしてねじれ角 $\beta'$ の値は図4(c)の場合と同じになる。これより、ピニオンの凹凸両歯面をI.B刃面、O.B刃面それぞれのねじれ角 $\beta, \beta'$ の仮想冠歯車でこれまでどおりに歯切りし、次いで刃面だけが角度 $\Delta$ 傾いている上記刃面でギヤ凹凸両歯面を歯切りすればよいことがわかる。刃面が角度 $\Delta$ 傾いている仮想冠歯車を従来の歯切盤で実現することは不可能であるが、思想上、このようにして得た歯車対はクラウニングと歯形修整が施されたものになる。

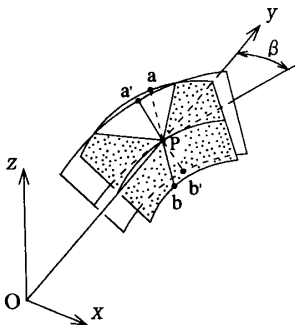
サイクロパロイド方式歯切盤にはカット傾け機構がない<sup>\*\*1</sup>。よって、刃面を微小角 $\Delta$ 傾けることができないが、ギヤブランクをピッチ円すい角( $\eta$ )どおりに傾けずに、図5に示すように $(\eta + \Delta)$ 傾けて歯切盤に取付けるならば、相対的にブランクに対して刃面が角度 $\Delta$ だけ傾いたことになる。ただし、図の状態ではブランクピッチ円すい上で平均円すい距離 $R_m$ にある円Cはピッチ線(y軸)上で距離 $R_m$ にある点Pを通らないから、円Cが点Pを通るようにブランクをy,z軸



(a) Cutting edges of proposed method



(b) Blades with cutting edge



(c) Tool surfaces (loci of cutting edges)

Fig. 4 Tool surfaces (loci of cutting edges)

\*\*1 テーパシムによる切れ刃圧力角変更機構とは意味が異なる。

方向にそれぞれ  $\delta_y, \delta_z$  平行移動する(図6)。このようにすれば点P近傍ではO, B刃面はギヤブランクに対して相対的に角度  $\Delta$  傾いていることになり、さらにはI, B刃面と相対全曲率の小さな点接触をしていることになる。したがって歯切りされた歯車の歯当たり模様は点Pを中心に現れ、歯当たり出し作業は理論的には不要になる。さらに、被削歯車歯面の数式表示も可能になる<sup>(2)</sup>。

さて、微小角  $\Delta$  が決まれば  $\delta_y, \delta_z$  は次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \delta_y &= R_m - R_m \cos \Delta \approx 0 \\ \delta_z &= R_m \sin \Delta \approx R_m \cdot \Delta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

また、図5, 6からわかるように点Pにおける相対速度は零でなければならないから、角度  $\Delta$  傾いた仮想冠歯車とギヤの角速比は  $1/\sin \eta$  で変わらない。

図6に示すように、取付け角が  $(\eta + \Delta)$ 、ピッチ円すい頂点が  $(0, \delta_y, \delta_z)$  にあるブランクに対して、角速比  $1/\sin \eta$  で創成歯切りする歯切盤すなわち仮想冠歯車を、刃面も含めて、本研究では擬仮想冠歯車(Pseudo-complementary crown gear)ということにする。

ところで、以上の考え方を従来の直線切れ刃を用いた歯切り法に適用すると  $\Delta, (\beta - \beta')$  が歯切盤に設定できないほどに小さな値となる。また、後述するように歯当たりはより強い片当たりとなる。

さて、O, B刃面を微小角  $\Delta$  傾けてその面法線をI, B刃面法線に一致させることが可能になったのは、一つには切れ刃  $\overline{ab}$  と  $\overline{a'b'}$  が含軸平面を貫くようにしたためであるが、これによって切れ刃すくい面をカット軸に平行にすることができるようになる。図4(b)の左図は従来のブレード切れ刃であるが、中央図および右図がこれの説明図でもある。図4(a), (b)にはすくい角  $\xi, \xi'$  が示してある。すくい面がカット軸に平行にできたことでブレードの製作も研ぎ直しも簡単になる<sup>(5)(6)</sup>。

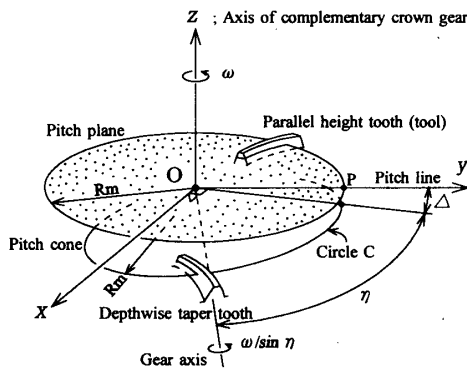


Fig. 5 Inclination of gear blank

以上より、クリンゲルンベルグ・サイクロパロイド方式曲がり歯傘歯車の歯切りにおいて本研究で提案する擬仮想冠歯車を用いる歯切り法は、ねじれ角の異なるI, B, O, B刃面をもつ仮想冠歯車で一方の歯車を従来どおりに歯切りし、他方の歯車についてはその仮想冠歯車を用いて、ピッチ円すい角より微小角  $\Delta$  だけ大きな角度(Machine root angle)でブランクを(歯切盤に)取付けたのち、 $\Delta$  によってブランクがピッチ平面あるいはカットから離れた分だけブランクを追い込んで歯切りする方法である。ただし、普通には  $\Delta$  は負であるから上述のこととは逆になる。この歯切り法で得る歯車対は一方の歯車は等高歯で、他方の歯車は識別できない程度のこう配歯になる。歯面対には歯形修整とクラウニングが施される。

4. 歯切り設計

本歯切り法は、図4(a), (b)に示される切れ刃をもつカットを用い、かつ、歯当たり中心点、例えば点PでI, B刃面とO, B刃面の単位面法線が一致するように一方の刃面の傾け角  $\Delta$  とねじれ角  $\beta'$  を求め、それより擬仮想冠歯車を定める方法であると要約できる。以下、歯切り設計法を具体的に示す。

4.1 切れ刃と刃面 図4(b)に示されるI, B切れ刃  $\overline{ab}$  は、図1(a)に示す  $\overline{ab}$  を点P<sub>c</sub>を通り  $z_c$  軸に平行な軸のまわりにすくい角相当角  $\xi$  をまわしたものであるから、それを  $O_c-x_c y_c z_c$  で列ベクトル  $X_c$  で示すと次のように表される。以下、ベクトルはすべて列ベクトルとする。

$$X_c(\lambda) = \begin{pmatrix} \cos(-\xi) & -\sin(-\xi) & 0 \\ \sin(-\xi) & \cos(-\xi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \lambda \tan \gamma \\ \lambda \end{pmatrix}$$

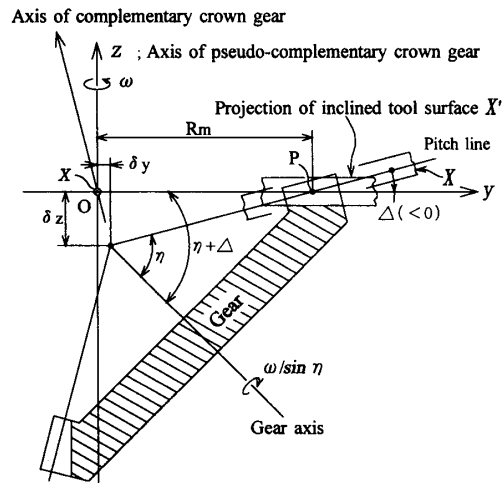


Fig. 6 Pseudo-complementary crown gear and (work) gear

$$+ \begin{pmatrix} 0 \\ r_c \end{pmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\lambda$ は切れ刃直線を表すためのパラメータ、 $\gamma$ は切れ刃の傾き角で圧力角に相当する(図7)。また、O.B切れ刃 $\overline{a'b'}$ を $X'c(\lambda)$ で示すと、それは式(2)において $(-\xi) \rightarrow \xi'$ 、 $\lambda \rightarrow \lambda'$ 、 $\gamma \rightarrow \gamma'$ 、 $r_c \rightarrow r_c + EXB$ と書き換えたものになる。ここで $(-\xi) \rightarrow \xi'(>0)$ とするのはすくい角を考えてのことである。

さて、O-xyzにおいてI.B刃面を $X$ で示すと、 $\nu$ を刃面表示パラメータとして<sup>(2)</sup>、

$$X(\nu, \lambda) = C(\theta_1)X_c(\lambda) + D(\nu) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $C(\theta_1)$ はz軸まわりの回転に関する座標変換行列であり、次のように示される。また、仮想冠歯車軸とカッタ中心の距離であるマシン・ディスタンスを $M_d$ 、転がり円Rの半径を $r$ 、平均円すい距離を $R_m$ 、ねじれ角を $\beta$ とすると、 $\theta_1$ は次式で示される。なお、後述のように、本研究では $M_d$ を $\beta$ の関数と考えることにする。

$$\left. \begin{aligned} C(\theta_1) &= \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \theta_1(\nu) &= \nu M_d(\beta) / r + \theta_0 \\ \cos \theta_0 &= (R_m^2 + r^2 - M_d(\beta)^2) / 2r_c R_m \\ D(\nu) &= M_d(\beta) \begin{pmatrix} -\sin(\nu - \theta_0) \\ \cos(\nu - \theta_0) \\ 0 \end{pmatrix} \\ \cos \theta_0 &= \{M_d(\beta)^2 + R_m^2 - r^2\} / 2R_m M_d(\beta) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

刃面の単位面法線ベクトル $N$ は

$$N(\nu, \lambda) = \frac{\partial X}{\partial \lambda} \times \frac{\partial X}{\partial \nu} \Big/ \left| \frac{\partial X}{\partial \lambda} \times \frac{\partial X}{\partial \nu} \right| \dots\dots\dots (5)$$

O.B刃面 $X'(\nu', \lambda')$ とその単位面法線 $N'(\nu', \lambda')$ も同様にして求められるが、 $R_m, r_c$ 以外の諸元はI.Bと

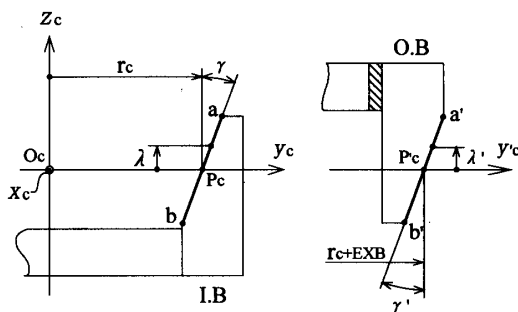


Fig. 7 Parameters of cutting edge

O.Bとでそれぞれ異なるから、O.Bに関する各諸元については「'」をつけて区別する。また、上述のように $X'$ のねじれ角 $\beta'$ は $X$ のねじれ角 $\beta$ と異なるものとし、かつ、 $\beta'$ を未知とする。そして、 $N'$ をx軸まわりに微小角 $\Delta$ (未知)まわして $N$ と一致させる。これより、点Pにおいては $\nu=0, \lambda=0, \nu'=0, \lambda'=0$ であるから、

$$N(0, 0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta & -\sin \Delta \\ 0 & \sin \Delta & \cos \Delta \end{pmatrix} N'(0, 0; \beta') \dots\dots\dots (6)$$

式(6)のx成分より $\beta'$ が $\Delta$ に無関係にきまる。また、 $N(0, 0), N'(0, 0; \beta')$ のy, z成分をそれぞれ $n_y, n_z, n'_y, n'_z$ とすれば、式(6)のy, z成分の商より $\Delta$ が $\beta'$ の関数として次のように求められる。

$$\Delta(\beta') = \tan^{-1}(n_z/n_y) - \tan^{-1}\{n'_z(\beta')/n'_y(\beta')\} \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、法線一致の条件より $\beta'$ と $\Delta$ が決まり、擬仮想冠歯車が完全に決まる。

4.2 歯切り設計法

本説で示す設計法の考え方は基本的にはクリンゲルンベルグ社の考え方と同じであるが、本歯切り法を実行するときの便を考慮して基礎から述べる。サイクロパロイド方式は普通、内刃基準で歯切り設計されているので、本法もそのようにする(外刃基準にすることもできる)。まずI.B刃面を定める。

(i) 軸直角モジュール $m_s$ と平均円すい距離 $R_m$ との関係は、被削歯車ピッチ円すい角を $\eta_1$ 、歯数を $Z_1$ とすると、

$$m_s = 2R_m \sin \eta_1 / Z_1 \dots\dots\dots (8)$$

(ii)  $R_m$ における $m_s$ と歯直角モジュール $m_n$ の関係は、その点におけるねじれ角を $\beta$ とすると、

$$m_n = m_s \cos \beta \dots\dots\dots (9)$$

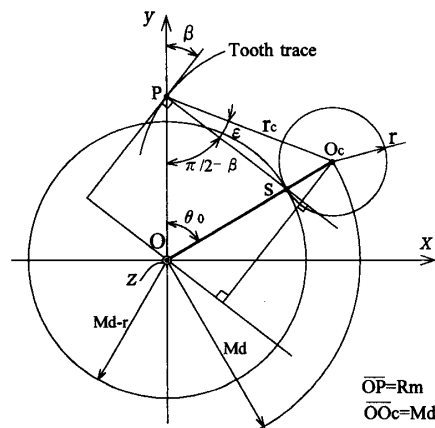


Fig. 8 Determination of machine distance  $M_d$

$m_n$  で歯(刃)の丈を決める。簡単のため、本歯切り法では歯末の丈  $h_a$  を  $m_n$ 、全歯丈  $h$  を  $2.25m_n$  とする。

(iii) 仮想冠歯車歯数  $Z_p$  は

$$Z_p = 2\pi R_m / \pi m_s = 2R_m / m_s \dots\dots\dots(10)$$

(iv) マシン・ディスタンス  $M_d$  を求める。まず、図8を参照すれば、 $\overline{PS}$  と  $\overline{PO_c}$  のなす角を  $\epsilon$  とすると、 $(M_d - r)/r = R_m \cos \beta / r_c \sin \epsilon$  の関係がある。一方、カッタ口数を5とすると  $(M_d - r)/r = Z_p/5$  となるから、

$$R_m \cos \beta / r_c \sin \epsilon = 2R_m / 5m_s$$

したがって

$$\epsilon(\beta) = \sin^{-1} \{ 5m_s \cos \beta / 2r_c \} \dots\dots\dots(11)$$

この角度  $\epsilon$  は切れ刃すくい角  $\xi$  [図4(a), (b)参照] とともに実質的なすくい角を決める。式(11)より  $\epsilon$  の値が決まると  $M_d, r$  および図8に示した長さ  $\overline{PS}$  などすべてが決まる。

$$\left. \begin{aligned} M_d(\beta) &= \sqrt{R_m^2 + r_c^2 - 2R_m r_c \cos(\pi/2 - \beta + \epsilon)} \\ r(\beta) &= 5M_d m_s / (5m_s + 2R_m) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

O, B 刃面についても同様であるが、 $\beta'$  を未知、 $r_c$  を  $r_c + EXB$  とすることだけが異なる。

以上より、表1, 2に示す諸元の被削歯車およびカッタが決まると、式(8)~(12)、式(2)~(7)そして式

Table 1 Dimensions of gear

	Pinion	Gear
Number of teeth	17	36
Pitch cone angle	25.278°	64.722°
Direction of spiral	Left	Right
Diameter of pitch circle	120	254.1
Mean cone distance	$R_m$	121.5
Tooth width	$b$	38
Spiral angle	$\beta$	35°
Nominal module	$m_n$	5
Addendum	$h_a$	5
Whole depth	$h$	11.25

Table 2 Cutter dimensions

Cutter radius	$r_c$	100
I. B rake angle	$\xi$	15°
O. B rake angle	$\xi'$	8°
I. B pressure angle	$\gamma$	21°
O. B pressure angle	$\gamma'$	21°
Nominal module	$m_n$	5
End relief angle		3°
	$EXB$	4

(1)によってピニオン歯切り用仮想冠歯車とギヤ歯切り用擬仮想冠歯車が決まる。しかし、これをクリンゲルンベルグ・サイクロパロイド歯切盤で実現するにはカッタ中心  $O_c$  の位置と、 $O_c$  に対する  $O_c'$  の相対位置を定めなければならない。サイクロパロイド歯切盤ではそれらの位置を TAU ( $\tau$ )、DELTA  $M$  ( $\Delta M$ )、ECCENTRICITY SETTING ( $EXZ$ , Expansion  $Z$ ) で定めている。図9を用いて  $\tau, \Delta M, EXZ$  の求め方を以下に示す。

$\tau, \Delta M, EXZ$  がすべて零のときに、点Oにある  $O_c, O_c'$  を点A(説明略)のまわりに角度  $\tau$  まわして点B(動径  $M_d$ , 偏角  $\theta$ )、 $\theta = \pi/2 - \theta_0$ 、に移動する。次に、 $O_c'$  だけを  $\overline{AB}$  方向に距離  $EXZ$  移動したのち、点Bまわりに角度  $\Delta M$  まわして指定点  $D(M_d', \theta')$ 、 $\theta' = \pi/2 - \theta_0'$ 、に移す。

これより次式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} M_d/2 &= 200 \sin(\tau/2) \\ M_d e^{i\theta} + EXZ e^{i\theta} \cdot i \cdot e^{-i\tau/2} \cdot e^{-i\Delta M} &= M_d' e^{i\theta'} \\ \theta &= \pi/2 - \theta_0, \theta' = \pi/2 - \theta_0' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

ここに 200 mm は機械定数、 $e$  は自然対数の底、 $i = \sqrt{-1}$  である。式(13)より  $\tau, \Delta M, EXZ$  が求められる。表1, 2に示した諸元を用いて計算した結果を表3に示す。

4.3 刃面間のすき間

刃面  $X(\nu, \lambda)$  は仮想冠歯車軸まわりを、刃面  $X'(\nu', \lambda')$  は仮想冠歯車軸に対して角度  $\Delta$  傾いている擬仮想冠歯車軸まわりを回転しつつそれぞれピニオン凸歯面とギヤ凹歯車を創成(図6参照)する。回転角を創成角ということにすれば、創成角  $\Psi$  が零の基準状態では両刃面は点Pで点接触しており、干渉していない。しかし、 $X, X'$  の各旋回中心軸は異なるから、創成が進行すれば  $X, X'$  に干渉

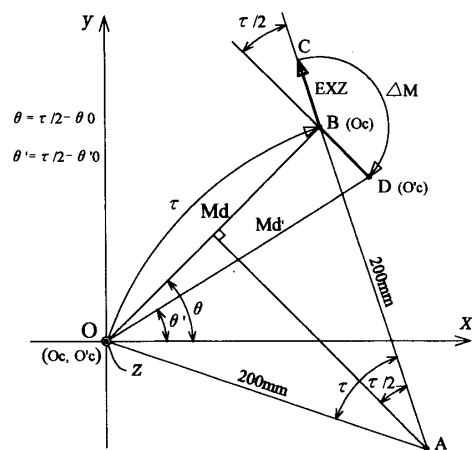


Fig. 9 Determination of  $\tau, \Delta M, EXZ$

の生じる可能性は十分にある。それを調べる目的で創成が±1/2ピッチ進行したときの両刃面間のすき間  $t$  を求めた。創成角が  $\Psi$  のときの両刃面間と面法線の間には次の関係が成立する。

$$C(\Psi)\{X(\nu, \lambda) + tN(\nu, \lambda)\} = A(\Delta)C(\Psi)X'(\nu, \lambda) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta z \end{pmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

3本のスカラ式からなる式(14)において、いろいろな  $(\nu, \lambda)$  の値を与えて  $X$  上の点を指定すれば、その点におけるすき間  $t$  が  $\nu, \lambda$  とともに求められる。図10に  $\Psi = \pm\pi/Z_p$  (±1/2ピッチ相当角) および  $\Psi = 0$  の

ときのすき間  $t$  を示す。  $\Psi = -\pi/Z_p$  のときには  $z < 0$  の領域に、  $\Psi = \pi/Z_p$  のときには  $z > 0$  の領域に干渉が生じている。しかし、その創成角のときには干渉の生じていない部分に歯面創成線が現れるから、すなわち  $\Psi = -\pi/Z_p$  のときにはI.B刃先側  $z > 0$  に、  $\Psi = \pi/Z_p$  のときにはI.B刃先側  $z < 0$  に創成線が現れるから、  $X'$  によってギヤ歯面は相対的に余分に深く削られて歯形修整効果が生じていることになる。

以上より、理論的には擬仮想冠歯車を用いる歯切り法は有用であることがわかる。

なお、従来のカッタを用いた歯切り法の場合には、擬仮想冠歯車を用いると創成線の現れる領域に干渉が生じ、歯切りした歯車対はより強い片当たりになる。

Table 3 Machine settings

		Pinion	Gear
Inclination of psuedo-c. gear	$\Delta$	—	0.81°
Work draw	$\delta z$	—	1.72
Machine root angle	$\eta_1, \eta_2 - \Delta$	25.28°	63.91°
Delta M	$\Delta M$	155.21°	351.12°
Spiral angle	(convex) $\beta$		35°
	(concave) $\beta'$		35.25°
Transverse module (at point P)	$m_s$		6.104
Machine distance	(convex) $M_d$		115.86
	(concave) $M'd$		116.50
Angle	(convex) $\theta_o$		49.76°
	(concave) $\theta'o$		51.77°
Number of teeth (crown gear)	$Z_p$		39.812
Angle	$\epsilon$		7.18°
Radius of rolling circle	$r$		12.927
Tau	$\tau$		33.673°
Eccentricity - setting	EXZ		4.12

5. 歯切り実験

本研究の歯切り法の有用性を確認するために、表1~3に示した諸元に基づいて歯切り実験を行った。図11にカッタとブレードを、図12に歯切りした歯車対を示す。ギヤ歯先側に歯当たりが生じているが、これはマシン・ルート角  $(\eta - \Delta)$  の設定が小さかったか、ワーク引戻し量  $(\delta z)$  が不足か、あるいは切れ刃傾き角  $\gamma$  が小さいかのいずれかがその原因として考えられ

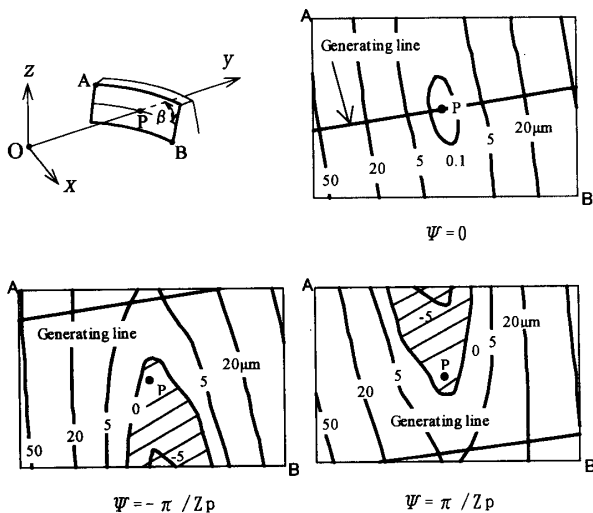


Fig. 10 Clearance between tool surfaces

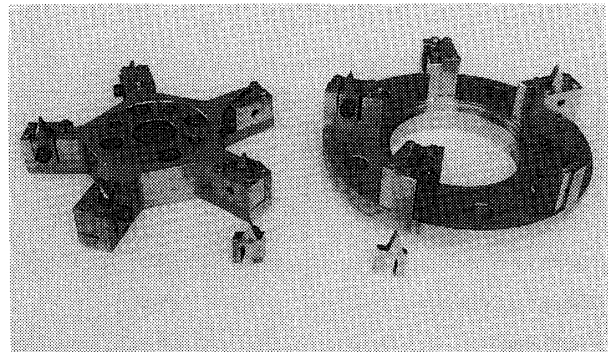


Fig. 11 Cutters and blades (for right hand spiral)

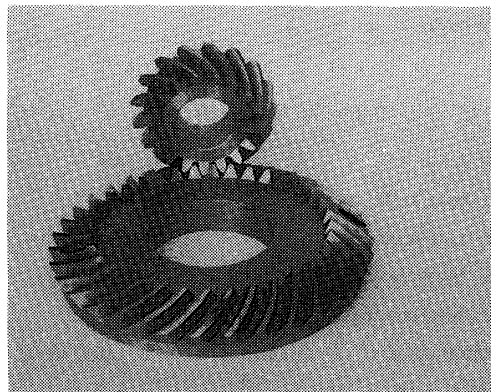


Fig. 12 Manufactured gears

る。その誤差量を定量的に把握するための歯面三次元測定<sup>(7)(8)</sup>を計画しているため、歯切りしたままの状態にしてある。クリンゲルンベルグ社の手順書によれば、この歯当たり模様は歯車の圧力角がわずかに小さいときに現れるとされているが、 $(\eta-\Delta)$ か $\delta_z$ を「適当」に増せば修整できる。しかし、そのような修整歯切りは本研究の目的とするところではなく、修整項目とその定量的修整量を求めて、それに基づいて修整歯切りして設計どおりの歯車対を得ようとするのが本研究の真の目的であることを付言しておく。

## 6. 結 言

本研究では、クリンゲルンベルグ・サイクロパロイド方式曲がり歯傘歯車の歯切り法に関して、従来の方法で歯当たり出し作業が必要になる理由を明らかにした。つぎに、それを必要としない新歯切り法を提案し、歯切り実験によりその有用性を確認した。

新歯切り法で用いるカッタは直線切れ刃を有し、その切れ刃直線はカッタ軸を含む平面を貫くように配置したものである。このようにすることによってカッタ・ヘッドおよびブレードの製作が簡単になり、ブレード研ぎ直しも普通の平面研削盤で可能になる。

このようなカッタを用いる本歯切り法において従来の方法と異なる点は以下のようなものである。(1)対をなす一方の歯車は従来どおり仮想冠歯車の考え方で歯切りする。(2)他方の歯車の歯切り用擬仮想冠歯車を決定する。そのためには歯当たり中心点、例えば平均円す

い距離においてこの擬仮想冠歯車刃面法線が(1)の仮想冠歯車刃面法線と一致するように、ねじれ角 $\beta'$ 、擬仮想冠歯車軸傾け角 $\Delta$ そしてブランク引き戻し量 $\delta_z$ を、カッタ諸元および被削歯車諸元から理論的に求める。(3)他方の歯車の歯切りではマシン・ルート角をピッチ円すい角より微小角 $\Delta$ だけ小さく取付けるが、それによるブランクのカッタの接近を相殺するようにブランクを $\delta_z$ だけ引き戻す。このときの歯切盤は被削歯車に対して仮想冠歯車にならないから、本研究ではこれを擬仮想冠歯車と名づけた。

以上のように、本歯切り法は歯当たり中心点が指定でき、かつ、カッタが用意できれば直ちに実行できる方法である。

終わりに、本研究の遂行にあたりカッタ・ヘッドの設計・製作および歯切り実験を引き受けて下さった(株)長岡歯車製作所・市野之彬部長に感謝する。また、カッタ・ブレードを製作していただいた新潟大学工学部・高崎操文部科学技官にお礼申し上げる。

## 文 献

- (1) 歯車便覧編集委員会編, 歯車便覧, (1962), 859, 日刊工業新聞社.
- (2) 岩本安弘・田村久司, 機論, 67-662, C (2001), 3250-3257.
- (3) Merritt, H. E., *Gears*, (1954), 40, SIR ISAAC PITMAN & SONS.
- (4) 田村久司・田中謙吾, 機論, 58-547, C (1992), 876-882.
- (5) 金子克・ほか2名, 機論, 66-643, C (2002), 959-965.
- (6) 金子克・田村久司, 機論, 67-654, C (2001), 515-520.
- (7) 道脇宏和・ほか3名, 機論, 64-627, C (1998), 4388-4394.
- (8) 川崎一正・ほか3名, 機論, 65-639, C (1999), 4476-4483.