

ハイポイドギヤの歯切り誤差検出法*

川崎 一正^{*1}, 田村 久司^{*1}

A Method for Detection of Errors in Hypoid Gear Cutting

Kazumasa KAWASAKI and Hisashi TAMURA

A method for the detection of the errors in hypoid gear cutting is proposed. The coordinates of the points on the gear tooth surface are measured using a coordinate measuring machine and a geometrical gear tooth surface is estimated by the method of least squares so that the surface can fit the data of coordinate measurements. This geometrical surface is implicitly defined from machine settings on a Gleason hypoid generator and the surface usually differs from the designed surface because of machine setting errors. The purpose of this method is to detect the machine setting errors. The coordinates of the points on the gear tooth surface were measured and the errors were detected using this method. Furthermore, the detected errors were compensated and corrective cutting was carried out. As a result, a gear tooth surface close to the designed one could be obtained. The validity was confirmed by observing the contact pattern for a pair of gears.

Key Words: Measurement, Gear, Hypoid Gear, Method of Least Squares, Machine Setting Error, Gleason Hypoid Generator, Coordinate Measuring Machine

1. 緒 言

工作物の検査または測定は、その寸法・形状などが要求どおりに仕上がっているか否かを確かめるために加工作業中あるいは加工終了後に行われる⁽¹⁾。加工作業中の検査・測定は加工作業にフィードバックする目的で行われ、加工終了後のそれは工作物の合否を判定するために行われる。歯車などの検査・測定についても同じであるが、歯面が複雑なために測定しようとする量を直接求めることが一般に困難であり、間接測定にならざるを得ない⁽²⁾。

曲がり歯傘歯車、鼓形ウォームあるいはハイポイドギヤのように歯面が三次元的に複雑な曲面の場合、歯面の曲率とねじり率はいたるところで異なり一様でないために、その検査・測定がむずかしい。そこで、歯当たり試験、回転角伝達誤差あるいは騒音試験などによって歯車対を検査・測定し、合否を判定している。このような合否判定方法は現実には簡便な方法であろうと考えるが、検査・測定結果を直接歯切り作業へフィードバックすることは困難であり、現状は検査・測

定結果を参考にしつつ経験と勘に基づく試行錯誤的歯切り作業が行われている。

この改善を目指して著者の一人は、三次元の複雑な曲面である歯車歯面を三次元測定機で測定しその結果の歯切り作業へのフィードバックの可能な検査方法を提案し、それを曲がり歯傘歯車の検査に適用した⁽³⁾。それは、歯切りの際に誤差が生じていると考えられる要因(誤差要因ということにする)の誤差を歯車歯面上の点の座標測定値群から間接測定により検出しようとしたものである。その後、その考え方を鼓形ウォームの検査に適用してその有効性を確認したが⁽⁴⁾、数多くある歯切り時の誤差のうち検出を要するものとしてどれを選ぶべきかその選定法にあいまいさがあった。提案した検査法が実用に供せられるためには、誤差要因の選定を適切に行う必要がある。本報は、この選定法を示すとともに、提案の検査法を既報の歯切法⁽⁵⁾によるハイポイドギヤに適用して歯切り時の誤差を検出しようとしたものである。

ハイポイドギヤを歯切りするとき、工具を決められた位置に正しく取付ける必要があるが、その取付けには誤差を伴う。そのような工具で歯車を歯切りすると、その工具取付け位置に対応してただ一つの歯面が得られるから、その歯面は工具取付け位置の関数として数

* 平成5年4月1日 第70期通常総会講演会において講演、原稿受付 平成5年5月19日。

*1 正員、新潟大学工学部(〒950-21 新潟市五十嵐二の町 8050)。

式表示できる。そこで、その歯面の座標測定値群に最もよく適合するように、工具取付け位置の関数として表されている歯面を最小二乗法によって推定する。この推定歯面に対応する工具取付け位置と設計上のそれとの差を工具取付け位置誤差と考える。この誤差を補正して修正歯切りを行えば、設計どおりのハイポイドギヤ歯面が得られるであろう。

2. 歯切り誤差検出法

本章では先に報告した検査法⁽³⁾⁽⁴⁾をギヤ歯面に適用した場合について述べるが、ピニオン歯面についても同じように適用できる。

ギヤ軸を z_g 軸とするギヤに固着した座標系 $O_g - x_g y_g z_g$ で、ギヤ歯面を二つのパラメータ u_g, θ_g で表示する[図5(b)参照]。また、工具取付け位置・姿勢などは歯切盤に一たび設定されたのちは歯切作業中に変動しないから、それらを表すパラメータ C_1, C_2, \dots, C_k は歯面表示式中に定数で表されている。よって、ギヤ歯面 X_g とその単位面法線 N_g は次に示されるベクトル式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X_g &= X_g(u_g, \theta_g; C_1, C_2, \dots, C_k) \\ N_g &= N_g(u_g, \theta_g; C_1, C_2, \dots, C_k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

定数 C_1, C_2, \dots, C_k の値は実際の歯切り時における値であり、設計値と異なっている場合には誤差があることになる。よって、パラメータ C_1, C_2, \dots, C_k に対応するものはすべて誤差要因になる。そこで、誤差要因 C_1 とか C_1 の誤差などと表現することにする。

式(1)で示されるギヤ歯面を三次元測定機上におく。このとき、図1に示すように、ギヤに固着した座標系 $O_g - x_g y_g z_g$ の原点 O_g と z_g 軸がそれぞれ三次元測定機の座標系 $O_t - x_t y_t z_t$ の原点 O_t と z_t 軸に一致するように設定する。この設定は簡単に実現できる。しかし、歯車本体に x_g 軸が明示されていないために x_g

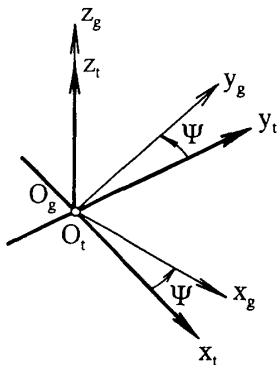


図1 三次元測定機座標系 $O_t - x_t y_t z_t$ とギヤ座標系 $O_g - x_g y_g z_g$

軸と x_t 軸とは一致させることができず、一般に未知なる角度 Ψ をなすとしなければならない。歯面とその面法線 X_g, N_g を $O_t - x_t y_t z_t$ で表し、それぞれ X_t, N_t とすると

$$\left. \begin{aligned} X_t &= C(\Psi) X_g \\ N_t &= C(\Psi) N_g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C は z_t 軸まわりの回転に関する座標変換行列であり、以下の内容をもつ。

$$C(\Psi) = \begin{pmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

なお、式(2)の変換を行った後でも、 X_t, N_t の z 成分には Ψ が含まれない。

図2は、半径 r_0 の球状測子と歯面 X_t とが点 Q_t で点接触している状態を示している。 $O_t - x_t y_t z_t$ において球状測子の中心 P_t の座標を表す位置ベクトル P は

$$P = X_t + r_0 N_t \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 P は列ベクトルであり

$$P = (P_x, P_y, P_z)^T \dots\dots\dots (5)$$

一方、球状測子の中心 P_t の座標が三次元測定機で測定される。座標測定値 (M_x, M_y, M_z) を列ベクトル M で表す。

$$M = (M_x, M_y, M_z)^T \dots\dots\dots (6)$$

ここで、直角座標系で表示されている P と M を、 z_t 軸を円筒軸(z 軸)とする円筒座標系 $O - r\theta z$ に変換する(図3)。

$$\left. \begin{aligned} P &= (P_r, P_\theta, P_z)^T \\ M &= (M_r, M_\theta, M_z)^T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

この変換により、 P の r 成分に Ψ が含まれなくなる。

さて、球状測子の中心を示す位置ベクトル P とその測定値 M のそれぞれの r, z 成分を等しくおけば式(8)を得る。そして、式(8)より歯面上の点 Q_t を表す

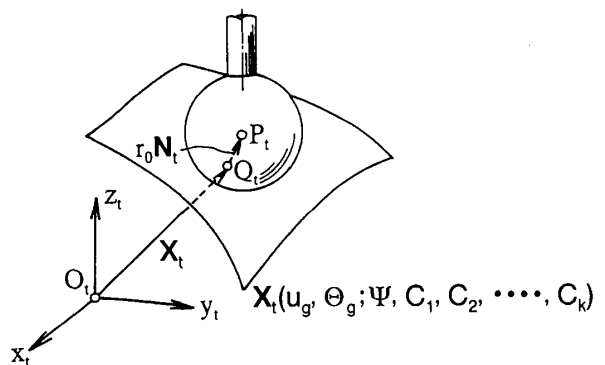


図2 ギヤ歯面の測定状態

パラメータ u_θ, θ_θ が, Ψ に無関係に, C_1, C_2, \dots, C_k の関数として決定できる.

$$\left. \begin{aligned} M_r - P_r(u_\theta, \theta_\theta; C_1, C_2, \dots, C_k) &= 0 \\ M_z - P_z(u_\theta, \theta_\theta; C_1, C_2, \dots, C_k) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

この u_θ, θ_θ を用いて P の θ 成分 P_θ を計算し, これと M_θ を比較する. Ψ が既知でしかも歯切り時に誤差がなければ P_θ と M_θ は等しくなるが, そうでない場合には一般に残差 E が生じる.

$$E = M_\theta - P_\theta(u_\theta, \theta_\theta; \Psi, C_1, C_2, \dots, C_k) \dots\dots\dots (9)$$

いま, ギヤ歯面上で任意の n 個の点の座標を測定する. i 番目の測定値 $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ に対する残差を E_i とすると, n 個の E_i がすべて零になるような $\Psi, C_1, C_2, \dots, C_k$ は一般にはない. そこで E_i の二乗和 F を最小にするような $\Psi, C_1, C_2, \dots, C_k$ を, すなわち最小二乗法により $\Psi, C_1, C_2, \dots, C_k$ を求めることにする. F は

$$F = \sum_{i=1}^n E_i^2 \dots\dots\dots (10)$$

ところでギヤ歯面 X_i は複雑な曲面であるため, また歯面存在領域は工具が削りだすことのできる全曲面のごく一部であるため, さらに工具取付け位置・姿勢などの誤差要因の誤差は小さいために, C_1, C_2, \dots, C_k の誤差のうちいくつかの影響は歯面に対して同じように現れる場合がある. そのような場合, 要因間の独立性が失われていることになる. 一方, C_1, C_2, \dots, C_k の誤差には歯面に対して大きな影響を与えるものと小さな影響を与えるものとが混在し, 前者のために後者が埋没する場合がある. このように独立性が失われたり誤差の影響が埋没する場合, C_1, C_2, \dots, C_k の誤差すべてを求めることは困難になる⁽³⁾⁽⁴⁾. そこで, 誤差要因の選定が必要になる. 選定法については次章で述べる.

さて, C_1, C_2, \dots, C_k のうち例えば C_1 を選定したとすると, C_1 と角度 Ψ (図1)とを求めなければならない. F を最小にする C_1 と Ψ は式(11)を解くことによって求めることができる.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial C_1} &= 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \Psi} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

3. 誤差要因の選定法

本報では, 簡単のため誤差要因 C_1, C_2, \dots, C_k のうち歯面に対して最も大きな影響を与える要因にのみ誤差があると考え, それ以外のものは設計値どおりであると考えてことにする. 歯切り時の C_1, C_2, \dots, C_k の誤差が歯面にどの程度の影響を与えるかは次のようにして調べることができる.

まず, C_1 の誤差 ΔC_1 が歯面に与える影響を知るには, C_1 に誤差のない歯面 $X_i(u_\theta, \theta_\theta; C_1)$ と誤差のある歯面 $X_i(u_\theta^*, \theta_\theta^*; C_1 + \Delta C_1)$ の二つの歯面を考え, 後者が前者に対してどの程度その位置を変えたかを調べればよい. ΔC_1 は適当な微小値とする. 位置変化は歯面間に生じたすきまの大きさで評価する.

歯面 $X_i(u_\theta, \theta_\theta; C_1)$ と歯面 $X_i(u_\theta^*, \theta_\theta^*; C_1 + \Delta C_1)$ を円筒座標系 $O-r\theta z$ で表す. この $O-r\theta z$ は2章で球状測子の中心の座標を表示したのと同じ座標系である. 歯面 $X_i(u_\theta, \theta_\theta; C_1)$ 上に適当な一点を定め, すなわち適当な u_θ, θ_θ を定め, この点の r, z 成分 S_r, S_z と等しい成分をもつ点を歯面 $X_i(u_\theta^*, \theta_\theta^*; C_1 + \Delta C_1)$ 上に求める. すなわち $u_\theta^*, \theta_\theta^*$ を求める. そして, C_1 に誤差のない歯面と誤差を与えた歯面の θ 成分 S_θ を比較し式(12)に示す残差 E^* を求める (図4). この E^* に ΔC_1 の影響が現れる.

$$E^* = S_\theta(u_\theta^*, \theta_\theta^*; \Psi^*, C_1 + \Delta C_1) - S_\theta(u_\theta, \theta_\theta; C_1) \dots\dots\dots (12)$$

同様に歯面存在領域内の歯面上に多数の点を適当に定め, i 番目の点における E^* を E_i^* とし, E_i^* の二乗和 F^* を求める [式(10)参照]. そして, $\partial F^* / \partial \Psi^* = 0$ を満足する Ψ^* を定める. この Ψ^* を用いて再度 E^*, F^*

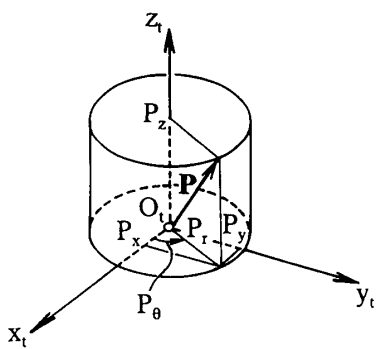


図3 円筒座標系への変換

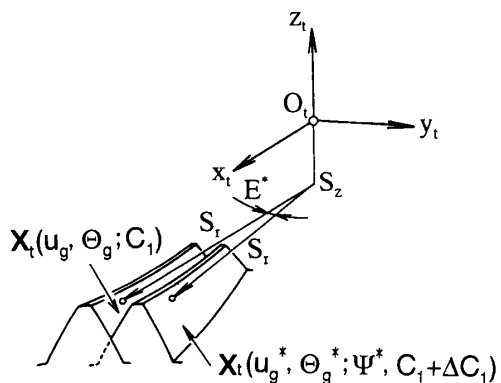


図4 二つの歯面間のすきま

を求める。\$F^*\$ の値は \$\Delta C_1\$ の大きさによって変わるから、単位の誤差量あたりに換算する。

$$C_{c1} = \frac{\sqrt{F^*/n}}{\Delta C_1} \dots\dots\dots(13)$$

\$C_{c1}\$ は \$C_1\$ の単位の誤差量あたりの影響の程度を表すものであるから、\$C_{c1}\$ を \$C_1\$ の影響係数ということにする。同様にして \$C_2, C_3, \dots, C_k\$ の影響係数を求め、\$C_{c2}, C_{c3}, \dots, C_{ck}\$ とする。なお、要因 \$C_1, C_2, \dots, C_k\$ の中には長さで表されるものと角度で表されるものがあるが、これらの次元が異なると影響係数の次元も異なるから、影響係数の大きさを比較するときには、角度を表す要因については適当な回転半径を乗じて長さに換算しておく必要がある。

さて、影響係数の最も大きい誤差要因について誤差を求めればよいが、それが一個だけではなく複数個存在する場合がある。そして、複数個の要因が互いに独立でなく、それらが歯面に対して同じような影響を及ぼす場合がある。そのようなときには、要因間の独立性を調べる必要がある。要因間の独立性は、\$C_1\$ と \$C_2\$ を例にとり、次のようにして調べることができる。

本法は残差の二乗和 \$F\$ を最小にする \$C_1, C_2\$ を求めることであるから、次式を解くことが必要になる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial C_1} &= 0 \\ \frac{\partial F}{\partial C_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

式(14)は一般に超越方程式になるから、これを解析的に解くことは困難であり、逐次近似により数値解を求めることになる。そのとき、次式で示される初期値 \$C_1, C_2\$ の修正量 \$\delta C_1, \delta C_2\$ を未知数とする二元連立1次方程式を解かなければならない。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 F}{\partial C_1^2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \delta C_1 + \frac{\partial^2 F}{\partial C_1 \partial C_2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \delta C_2 &= - \frac{\partial F}{\partial C_1} \Big|_{C_1, C_2} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial C_1 \partial C_2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \delta C_1 + \frac{\partial^2 F}{\partial C_2^2} \Big|_{C_1, C_2} \cdot \delta C_2 &= - \frac{\partial F}{\partial C_2} \Big|_{C_1, C_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

連立方程式(15)のヤコビの行列式 \$|J|\$ は

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 F}{\partial C_1^2} & \frac{\partial^2 F}{\partial C_1 \partial C_2} \\ \frac{\partial^2 F}{\partial C_1 \partial C_2} & \frac{\partial^2 F}{\partial C_2^2} \end{vmatrix} \dots\dots\dots(16)$$

\$C_1\$ と \$C_2\$ が独立でないと式(16)の \$|J|\$ は零になる。これより、\$|J|\$ が零に近い非常に小さな値であれば、\$C_1\$ と \$C_2\$ は従属性が強いことになる。よって、\$|J|\$ の大小で \$C_1\$ と \$C_2\$ の独立性の程度が判定できる。ヤコビの行列式 \$|J|\$ の大小を明確にするため、\$\partial^2 F / (\partial C_1 \partial C_2) = \mu\$ とおき、\$|J|\$ を次のように変形する。

$$|K| = \begin{vmatrix} \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial C_1^2} & 1 \\ 1 & \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial^2 F}{\partial C_2^2} \end{vmatrix} \dots\dots\dots(17)$$

\$|K|\$ の絶対値が1に対して十分小さければ、\$C_1\$ と \$C_2\$ は従属関係にあるとみなすことができる。このことは \$C_1\$ と \$C_2\$ は歯面に対して同じような影響を与えることを意味し、おのおのの誤差量を特定することができなくなることを示している。すなわち、式(15)の解が求められなくなることがこれに対応している。この場合、\$C_1\$ か \$C_2\$ のいずれか一方に誤差があるとしてよい。どちらに誤差があるとするかは、歯切り作業にフィードバックすることを考えると、調節しやすいほうに誤差があるとすべきである。一方、\$|K|\$ の絶対値が1に対して小さくなければ \$C_1\$ と \$C_2\$ は独立関係にあるとみなせるから、\$C_1\$ と \$C_2\$ の両方の誤差を求めることができる。

なお、影響係数の大きい要因が三つ以上存在する場合、それぞれ二つについて独立性の判定を行い、どの要因を選定するかを決める。

以上のような方法で工具取付け位置・姿勢などの誤差要因を選定し、選定した誤差要因の誤差を最小二乗法によって求める。

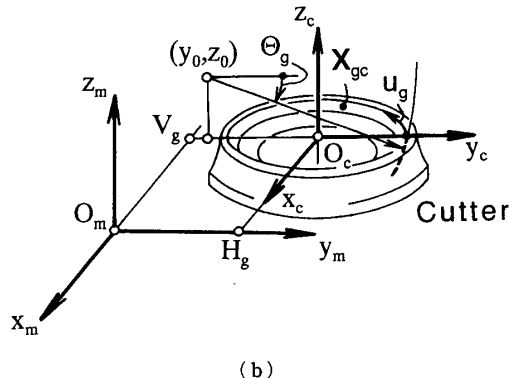
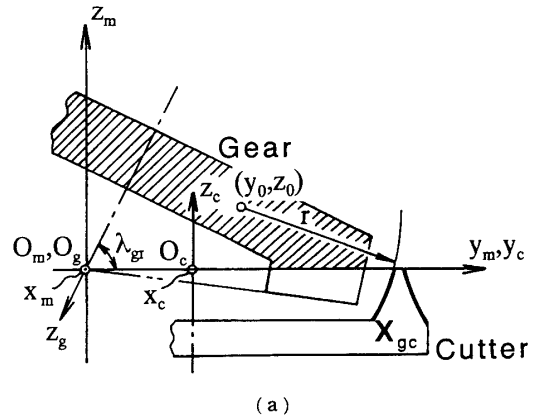


図5 ギヤの歯切り

4. 選定法のハイポイドギヤへの適用

既報の歯切法によるハイポイドギヤ⁽⁵⁾では、(リング)ギヤは成形歯切りした曲がり歯傘歯車である。図5(a)にギヤの歯切方法を示す。O_m-x_my_mz_mは歯切盤に設定した座標系で、O_mはマシンセンタ、x_m, y_m, z_mの各座標軸はそれぞれV, H, クレードル軸に一致している。z_c軸はカッタ軸でクレードル軸に平行である。O_cはカッタ中心で、その位置は(V_g, H_g, O)にあり[(図5(b))], これを列ベクトルD_gで表す。z_g軸はギヤ軸で、O_gはギヤ歯底円すい頂点、λ_{gr}はギヤ歯底円すい角である。環状フライスカッタの内・外両切れ刃は、グリーンソン方式では直線であるが、既報ではそれらを曲率半径の大きな円弧にしている。よって、カッタをその軸まわりに回転させたとき、切れ刃の形成する曲面(カッタ刃面)は円すい面ではなく、それに近い回転面になる。これを擬円すい面と呼ぶ。ギヤ凸歯面歯切用カッタ刃面X_{gc}は擬円すい面で、これはカッタに固着した座標系O_c-x_cy_cz_cで次式で表される。

$$X_{gc}(u_g, \theta_g) = \begin{pmatrix} -r \cos \theta_g \sin u_g - y_0 \sin u_g \\ r \cos \theta_g \cos u_g + y_0 \cos u_g \\ -r \sin \theta_g + z_0 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

ここに、rはカッタ切れ刃の円弧曲率半径、u_g, θ_gはカッタ刃面を表すパラメータ、y₀, z₀はO_c-x_cy_cz_cでx_c=0なる平面内での円弧曲率中心の座標である(図

5)。

ところでギヤ歯面はカッタ軸を傾けないで成形歯切りされるから、ギヤ凸歯面はO_m-x_my_mz_mでX_{gc}+D_gで表される。これをギヤに固着した座標系O_g-x_gy_gz_gに座標変換し、X_gで表す。X_gに含まれているV_g, H_g, y₀, z₀, rなどが2章のC₁, C₂, …, C_kに対応する。

次に、ギヤ凸歯面歯切り時の誤差要因を選定する。このとき、カッタ中心の座標V_g, H_gを極座標系における動径に相当するラジアルスライド量R_{sg}(=√V_g²+H_g²)と偏角に相当するカッタ中心旋回角A_{sg}[=tan⁻¹(H_g/V_g)]とで表しておく。また、ワークとカッタの相対的な位置・姿勢関係は変わらないので、どちらか一方のみを考えればよい。

以上のことを考慮し、表1に示す諸元のハイポイドギヤについてギヤ凸歯面歯切り時の誤差要因の影響係数を計算した。計算結果を表2に示す。表2中のC_{z0}はギヤ歯切り時のカッタ中心O_cのz座標Z_gの影響係数である。Z_gの設計値は零である。表2より、R_{sg}とy₀の影響係数がほかのそれよりも大きくほぼ同オーダーである。そこで、R_{sg}とy₀の独立性を調べるため、3章で示した|K|を計算した。その結果|K|=0.028で、その絶対値は1に比べて十分小さい。よって、R_{sg}とy₀は従属関係にあるとみなせるので、これらのうちどちらか一方には誤差がないとする。本研究では

表 1 ハイポイドギヤ諸元 (mm)

	Gear	Pinion
Number of teeth	41	7
Spiral angle	33° 01'	47° 47'
Module	3	
Pinion offset	18	

表 2 ギヤ凸歯面に関する影響係数

C _{Rsg}	2.2×10 ⁻³
C _{Asg}	2.2×10 ⁻⁴
C _{Zg}	4.3×10 ⁻⁴
C _{λgr}	2.2×10 ⁻⁴
C _{y0}	1.2×10 ⁻³
C _{z0}	4.3×10 ⁻⁴

表 3 ギヤ凸歯面測定結果

Gear No.	n	Results					Design value
		Ψ(deg)	F(rad ²)	σ _E (rad)	Δt(mm)	R _{sg} (mm)	R _{sg} (mm)
①	24	98° 23'	4.9×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁴	9.8×10 ⁻³	70.146	70.342
②	28	113° 11'	4.6×10 ⁻⁷	1.3×10 ⁻⁴	8.9×10 ⁻³	70.458	
③	20	259° 05'	1.7×10 ⁻⁷	9.3×10 ⁻⁵	6.4×10 ⁻³	70.353	

表 4 ピニオン凹歯面測定結果

n	Results					Design value
	Ψ(deg)	F(rad ²)	σ _E (rad)	Δt(mm)	R _{sp} (mm)	R _{sp} (mm)
25	193° 05'	3.7×10 ⁻⁶	3.8×10 ⁻⁴	7.2×10 ⁻³	70.547	70.592

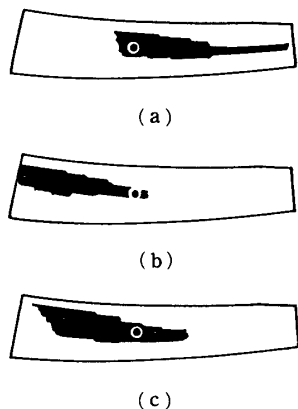


図6 ギヤ凸歯面上での歯当たり

調節しにくい y_0 には誤差がないとし、 R_{sg} に誤差があるとこれを検出することにした。

ピニオン凹歯面歯切り時の誤差要因についても同様にして調べた結果、ラジアルスライド量 R_{sp} を検出することになった。

5. 実 験

本法の有効性を確認するため、表1に示すハイポイドギヤの測定実験を行った。ギヤ凸歯面の測定結果を表3の①欄に示す。表中の n は測定点の数である。本実験では測定誤差の影響を避けるために n を20点以上とした。残差 E_i の二乗和 F は非常に小さくなっているが、これは radian を単位とする角度(偏角)についての二乗和であることによる。また $\sigma_E = \sqrt{F/n}$ で、測定データのばらつきの程度を示す。 σ_E が小さいことは、誤差要因の選定が正しく行われ、測定値によく適合する歯面が推定されたことを意味するが、 σ_E も F に関係しているから必然的に非常に小さくなる。よって、これが小さいからという理由で、ただちに測定値によく適合する歯面が推定されたという判断はできない。そこで、推定歯面に対する測定値群の平均的な差(ばらつきの程度)を歯車軸を軸とする円の周方向距離 Δt で表し、表3中に示した。 Δt が $10 \mu\text{m}$ 以下であることより、誤差要因の選定が正しく行われ、測定値によく適合する歯面が推定されたと考えている。測定結果より、 $R_{sg} = 70.342 \text{ mm}$ で歯切りすべきところ、 $R_{sg} = 70.146 \text{ mm}$ で歯切りされていたことがわかる。そこで、ラジアルスライド量 R_{sg} を 0.196 mm (実際には 0.20 mm) 増加させて修正歯切りを行った。修正歯切り後の測定結果を表3の②欄に示す。これによると、 $R_{sg} = 70.458 \text{ mm}$ で歯切りされていたことになり、何らか

の原因で過修正になったと考えられる。そこで、 R_{sg} を 0.116 mm (実際には 0.12 mm) 減少させて再度修正歯切りを行った。その測定結果を表3の③欄に示す。これによると $R_{sg} = 70.353 \text{ mm}$ で、ギヤは正しく歯切りされていると判断した。

ピニオン凹歯面の測定も行った。その結果をギヤ凸歯面と同様にして表4に示す。測定結果より、 $R_{sp} = 70.592 \text{ mm}$ で歯切りすべきところ $R_{sp} = 70.547 \text{ mm}$ で歯切りされていることから、ピニオンの歯切り誤差は小さく、正しく歯切りされていると判断した。

さて、正しく歯切りされたピニオン凹歯面と測定結果①, ②, ③に対応するギヤ凸歯面をそれぞれかみ合せてみた。そのときのギヤ凸歯面上での歯当たりスケッチ結果を図6に示す。(a)~(c)はそれぞれ測定結果①, ②, ③のギヤ凸歯面に対応している。図中の「 \cdot 」は歯の中央部に定めた設計上の歯当たりの中心点である⁶⁾。修正歯切りにより歯当たりが歯の中央部に移っている。これにより、修正歯切りの効果がわかる。

以上より、歯切り誤差が検出できたものとする。

6. 結 言

ハイポイドギヤを歯切りするとき、工具を決められた位置に正しく取付ける必要があるがその取付けには誤差を伴う。歯切り時の工具取付け位置に関するいろいろな誤差はそれぞれ程度の差はあるにしても、歯面に何らかの影響を及ぼしているはずである。本報では、そのような考え方にに基づき、ハイポイドギヤ歯面を測定して工具取付け位置誤差を検出する方法と誤差要因の選定法を示した。

本報で示した検出法は、歯車歯面上の多数点の座標を三次元測定機で測定して、その測定値群に最もよく適合するように工具取付け位置の関数として表されている歯面を最小二乗法によって推定することにより、工具取付け位置誤差を検出するものである。そして、検出した誤差を歯切り作業にフィードバックし、設計どおりのハイポイドギヤ歯面を得ることを目的としている。

本研究では、実際のハイポイドギヤ⁶⁾について誤差要因の選定と測定を行い、検出した誤差を補正して修正歯切りを行った。そして、歯切りした歯車について歯当たりを調べる方法で、本法の有効性を確かめることができた。

最後に、測定・歯切実験にご協力いただいたスズキ(株)竹内慎一課長、羽田芳智主任ならびに(株)長岡歯車製作所市野之彬部長にお礼申し上げる。

文 献

- (1) 築添, 精密測定学, (1968), 3, 養賢堂.
 - (2) 青木, 精密測定, 1(1957), 4, コロナ社.
 - (3) 田村, 機論, 52-478, C(1986), 1798.
 - (4) 大矢・ほか2名, 機論, 58-547, C(1992), 864.
 - (5) Kawasaki, K. and Tamura, H., *JSME Proc. MPT'91*, (1991), 692.
-