

クリンゲルンベルグ方式曲がり歯傘歯車の検査法に関する研究*

田村久司*¹, 川崎一正*¹, 中野悦宏*²Method for Inspection of Spiral Bevel Gears
in Klingenberg Cyclo-Palloid System

Hisashi TAMURA, Kazumasa KAWASAKI and Yoshihiro NAKANO

The pair of spiral bevel gears fabricated by Klingenberg's cyclo-palloid method can be expected to have a good contact pattern because the gear tooth surfaces are fundamentally conjugate. In practice, however, the first gear pair having a good contact pattern is difficult to obtain because of the machine setting errors such as tool setting errors and workpiece setting errors in gear cutting. In this paper, an inspection method for detecting the machine setting errors in spiral bevel gear cutting in a Klingenberg cyclo-palloid system is proposed. In this method, the coordinates of many points on the gear tooth surface are measured using a coordinate measuring machine and a geometrical gear tooth surface expressed as the functions of the machine settings is estimated by the method of least squares so that the surface can fit the measured data. The deviations of the estimated machine settings from the design values are considered to be the machine setting errors. The machine setting errors in gear cutting were detected using this method and corrective cutting which compensated for the errors was carried out. Consequently, more accurate gear could be obtained.

Key Words: Measurement, Gear, Inspection, Spiral Bevel Gear, Klingenberg Cyclo-Palloid System, Method of Least Squares, Machine Setting Error, Coordinate Measuring Machine

1. 緒 言

近年我が国において需要が増大しつつある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⁽¹⁾⁽²⁾は、原理的には共役な歯車で対を構成することができる。しかし実際には、歯切りの際に生じるいろいろな誤差のために1回の歯切りでそのような歯車を得ることができず、現状では、歯当たり調整歯切りを行い、希望する歯車を得ている。歯当たり調整歯切りは、歯当たり模様を観察しつつ試行錯誤的に行われるから、結局現場の技能に依存することになる。

このような歯当たり調整歯切りの現場依存性の解消を目指して著者の一人は、歯車歯面を三次元座標測定機(以下、三次元測定機という)で測定して得た結果から歯切り時の誤差を検出する検査法を提案した⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。そして既報⁽⁵⁾では、歯切り時に誤差が生じているであろうと考えられる多くの要因(誤差要因)のうちどの要因を選ぶべきかその選定法を示すとともに、それをハイポイドギヤに適用して歯切り時の誤差を検

出した。ところがこの誤差要因選定法を表題の歯車に適用したところ、ハイポイドギヤの場合と異なりその有効性が認められなかった。すなわち、既報の誤差要因選定法では、歯面誤差に与える各要因の単位誤差量あたりの影響の度合いを影響係数と呼び、影響係数の大きい要因を検出すべき誤差要因としていたが、その要因に誤差がない場合には、この選定法を適用しても効果のないことがわかった。既報では、偶然にも影響係数の大きな要因に誤差があったため期待どおり満足すべき結果を得ていたことが判明したのである。

そこで本報では、新たに歯面上の点の三次元座標測定値群から実際に誤差がある要因を見出すための選定法を示す。そして、これまでに提案してきた検査法を表題の歯車の歯切り誤差検出に適用したので、それについて報告する。

2. 検査法の概要

曲がり歯傘歯車を歯切りするとき、工具を決められた位置に正しく取付ける必要があるが、普通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。本研究では、そのような考え方に基づいて、曲がり歯傘歯

* 平成5年8月20日 東北支部米沢地方講演会において講演、原稿受付 平成5年12月28日。

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

² 学生員、新潟大学大学院。

車歯面を三次元測定機で測定し、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幾何学的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、設計どおりの曲がり歯傘歯車歯面が得られるであろう。

3. 曲がり歯傘歯車の検査

図1に示すように、三次元測定機上に傘歯車をおく。このとき、歯車に固着した座標系 $O_g-x_gy_gz_g$ の原点 O_g と車軸 z_g 軸はそれぞれ三次元測定機の座標系 $O_m-x_my_mz_m$ の原点 O_m と z_m 軸に一致するようにおくことができるが、歯車がその軸まわりにいかなる角度回転した状態でおかれているかは不明である。この未知なる角度を Φ とする。

図2は、半径 r_0 の球状測子と歯面 X_m とが点 Q_m で点接触している状態を示している。 $O_m-x_my_mz_m$ において球状測子の中心 P_m の座標を表す位置ベクトル $P(P_x, P_y, P_z)$ は、幾何学的には歯面の式 X_m とその単位面法線 N_m を用いて次式で示される。

$$P = X_m + r_0 N_m \dots\dots\dots (1)$$

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

ここで、直角座標系で表示されている列ベクトル P と M を、 z_m 軸を円筒軸とする円筒座標系 $O_m-r_m\theta_mz_m$ に変換する(図3)。

$$\left. \begin{aligned} P &= (P_r, P_\theta, P_z)^T \\ M &= (M_r, M_\theta, M_z)^T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

この変換により、 P の各成分 (P_r, P_θ, P_z) は次のように示される⁽⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} P_r &= P_r(\nu, \psi; C_1, C_2, \dots, C_k) \\ P_\theta &= P_\theta(\nu, \psi; \Phi, C_1, C_2, \dots, C_k) \\ P_z &= P_z(\nu, \psi; C_1, C_2, \dots, C_k) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ν, ψ は歯面を表示するためのパラメータである。また、 C_1, C_2, \dots, C_k は工具取付け位置・姿勢などを表すパラメータで、これらは歯切り作業中に変化しないから定数となる。歯切り時におけるこれらの値が設計値と異なるときに、歯切り誤差があることになる。

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_m, z_m 成分を等しくおけば次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} M_r - P_r(\nu, \psi; C_1, C_2, \dots, C_k) &= 0 \\ M_z - P_z(\nu, \psi; C_1, C_2, \dots, C_k) &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)より、形式的には歯面上の点 Q_m を表すパラメータ ν, ψ を、 Φ と無関係に、 C_1, C_2, \dots, C_k の関数として決定できる。

この ν, ψ を用いて P の θ_m 成分 P_θ を計算し、これと M_θ との差を残差 E とする。

$$E = M_\theta - P_\theta(\Phi, C_1, C_2, \dots, C_k) \dots\dots\dots (5)$$

いま、歯車歯面上で任意の n 個の点の座標を測定する。 i 番目の測定値 $M_i (i=1, 2, \dots, n)$ に対応する残差を式(5)より求め、これを E_i とする。そして E_i の

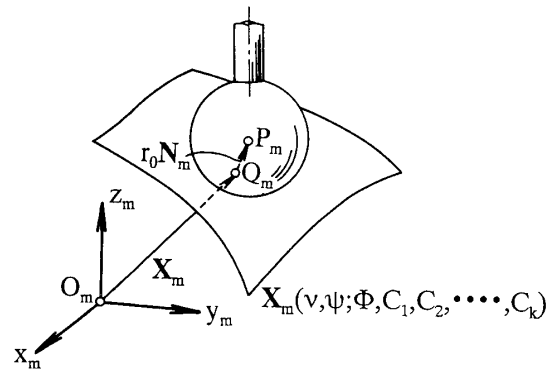


図2 歯車歯面の測定状態

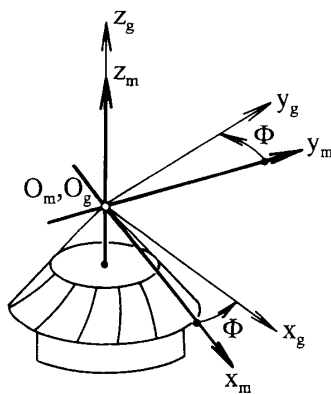


図1 三次元測定機座標系 $O_m-x_my_mz_m$ と歯車座標系 $O_g-x_gy_gz_g$

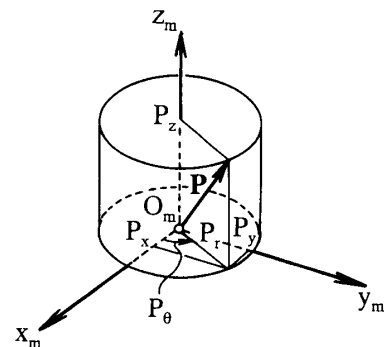


図3 円筒座標系への変換

二乗和を最小にするような Φ , C_1 , C_2 , ..., C_k を求めることにする。すなわち、最小二乗法により Φ と実際のマシンセッティング C_1 , C_2 , ..., C_k を求めることになる。これが提案の検査法である。

E_i の二乗和 F は

$$F = \sum_{i=1}^n E_i^2 \dots\dots\dots (6)$$

ところで、実際の歯車歯面は幾何学的歯面と比較するとごく一部の領域に偏在しているため、また歯車歯面は複雑な創成曲面であるため、さらに歯切り時の工具取付け位置・姿勢などの誤差要因の誤差は小さいため、(1) 要因 C_1 , C_2 , ..., C_k の誤差のうちいくつかは歯面に対して同じような影響を及ぼす場合と、(2) C_1 , C_2 , ..., C_k の誤差のうち歯面に対して大きな影響を与えるものとわずかな影響しか与えないものとが混在し、大きな影響を与えるもののなかに小さな影響しか与えないものが埋没してしまう場合との二つおりの場合がある。このような場合、 C_1 , C_2 , ..., C_k の誤差すべてを求めることは困難になる。既報⁽⁵⁾ では、前者については要因間の独立性という概念で、後者については要因の影響係数という概念で評価した。そして、これら二つの評価基準に基づいて数多くある誤差要因のうちから検出すべき要因を選定した。

さて、要因 C_1 , C_2 , ..., C_k のうちたとえ C_1 が検出されるべき誤差要因であったとすると、 F を最小にする C_1 と Φ (図1参照) を式(7)から求めることができる。

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial C_1} = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \Phi} = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

4. 誤差要因の選定法

既報⁽⁵⁾ では、誤差要因 C_1 , C_2 , ..., C_k のうちどの要因の誤差が歯面に対して最も大きな影響を与えるかをあらかじめ調べておき、最も大きな影響を与える要因のみに誤差があるとしてこれを検出した。ところが緒言で述べたように、あらかじめ選定した要因に誤差がなくそのほかの要因に誤差がある場合、選定した要因の誤差を推定しても、その誤差を考慮に入れた幾何学的歯面は座標測定値群によく適合した歯面とはならない。すなわち、適合精度があまりよくない。そのようなときには、検出した要因の値と設計値とを比較しそれを補正して修正歯切りを行っても、設計どおりの歯面を得ることができない。設計どおりの歯面を得るにはやはり、実際に誤差のある要因を見つけ、それを補正しなければならない。そこで本研究では、歯面測定

値群から検出すべき誤差要因を次のようにして見つける。

まず、式(7)より C_1 と Φ を求める。次に、 C_2 と Φ を求める。 C_3 以下についても同様にして求める。このようにして求めた要因に対応する幾何学的歯面が測定値群によく適合しているかどうかを評価するために、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、これをそれぞれの要因について計算する。 Δt は

$$\Delta t = S_r \sqrt{\frac{F}{n}} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 S_r は歯車の平均半径であり、平均円すい距離を R_m 、ピッチ円すい角を η とすれば、 $S_r = R_m \sin \eta$ で計算される。 Δt が小さいということは、測定値群によく適合する幾何学的歯面が推定されたことを意味するから、 Δt を適合精度とみなすことができる。そこで、適合精度がよくなる要因を見つけ、それに誤差があるとする。既報ではこの当然とも思える考え方が欠けていた。

ところで、そのほかの要因にも誤差がある場合は次のようにする。まず、適合精度 Δt が最も小さくなる要因の値を求め、次いでその値のもとで、ほかの各要因についてそれぞれその値と Φ の値および Δt の値を求める。もし、 Δt の値がさらに小さくなれば、その要因にも誤差があることになる。 Δt が小さくならなければ、最初に Δt の値を最も小さくした要因にのみ誤差があることになる。

以上のような方法で、 Δt の値が小さくなる誤差要因を見出し、その要因に誤差があると考え、その要因の値と設計値とを比較し、誤差要因の誤差を求める。これが本報で提案している誤差要因の選定法である。

5. クリンゲルンベルグ 曲がり歯傘歯車の歯面

本法では、被測定歯車歯面 X_m とその単位面法線ベクトル N_m の数式表示が必要になる。そこで本章では X_m と N_m を導く。

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は、歯すじがトロコイド曲線である仮想冠歯車によって創成歯切りされるから、その歯(刃)面の式から被測定歯車歯面の式を導くことができる。ここでは仮想冠歯車凹刃面に関して考察するが、凸刃面についても同じことがいえる。

図4に、仮想冠歯車のピッチ平面上に半径 q の固定円 Q とその上を転がる半径 r の転がり円 R を示す。

O-xyz は仮想冠歯車に固着した座標系で、z 軸は仮想冠歯車軸である。y 軸はピッチ線⁽⁶⁾(Pitch surface generator)に一致するように定める。転がり円 R が固定円 Q 上を転がるとき、円 R に固着した描点 P のピッチ平面上に描く軌跡はトロコイド曲線になる。このトロコイド曲線を歯すじとする仮想冠歯車歯(刃)面の式を導くため、円 R に固着したカッタ座標系 $O_c-x_c y_c z_c$ を導入する。 $\overline{OO_c}$ は Machine distance であり、これを M_d で表す。被削歯車の歯数を Z_b 、カッタヘッドの口数(Number of starts of cutter head)を Z_w とすると、円 R、Q の半径 r 、 q はそれぞれ

$$r = \frac{Z_w M_d \sin \eta}{Z_b + Z_w \sin \eta}, \quad q = M_d - r \quad \dots\dots\dots (9)$$

図5に、カッタ座標系 $O_c-x_c y_c z_c$ とカッタを示す。 r_c はカッタ半径、 γ は切れ刃の圧力角、 λ は切れ刃直線を表すパラメータである。これよりカッタ切れ刃直線 X_c は $O_c-x_c y_c z_c$ で次式で表すことができる。

$$X_c(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 \\ r_c + \lambda \tan \gamma \\ \lambda \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ところで、クリンゲルンベルグサイクロパロイド方式のハードカット用カッタの切れ刃は曲率半径の大きな円弧になっている。この場合の切れ刃曲線の式として、式(10)と似た既報⁽⁵⁾の式をそのまま用いることができる。

さて、 X_c が O-xyz に対して描く軌跡面 X は、 ν をカッタ旋回角として(図6)

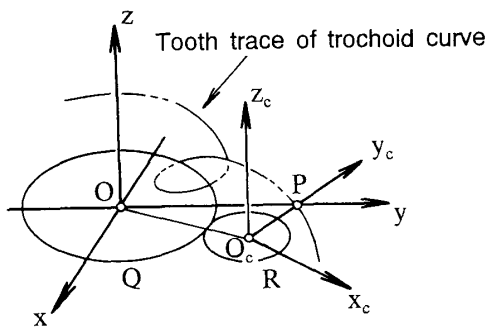


図4 仮想冠歯車の歯すじ

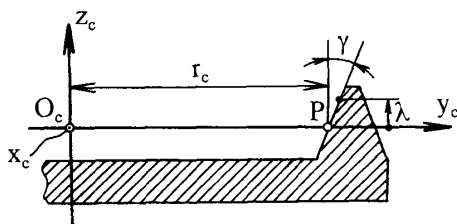


図5 カッタの切れ刃形状

$$X(\nu, \lambda) = C(\theta_1) X_c(\lambda) + D(\nu) \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_0 &= (M_d^2 + R_m^2 - r_c^2) / 2M_d R_m \\ \cos \theta_0 &= (R_m^2 + r_c^2 - M_d^2) / 2R_m r_c \\ \theta_1(\nu) &= M_d \nu / r + \theta_0 \\ D(\nu) &= \begin{bmatrix} -M_d \sin(\nu - \theta_0) \\ M_d \cos(\nu - \theta_0) \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

また、 C は z 軸まわりの回転に関する座標変換行列であり、次の内容をもつ。

$$C(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式(11)の X は ν 、 λ をパラメータとする切れ刃 X_c の軌跡面を表すが、クリンゲルンベルグ方式曲がり歯傘歯車の歯切りにおいてはこれをトロコイド曲線を歯すじとする仮想冠歯車刃面の式としてよい。 X の単位法線ベクトルを N とする。

X を刃面とする仮想冠歯車が z 軸まわりを回転しつつ被削歯車歯面を創成する。このとき仮想冠歯車の回転角を創成角ということにし、 ϕ で表す。創成角が ϕ の瞬間、 X 、 N を静止空間に固着した座標系 O-XYZ で表し、それぞれ X_ϕ 、 N_ϕ とすると

$$\left. \begin{aligned} X_\phi(\nu, \lambda; \phi) &= C(\phi) X(\nu, \lambda) \\ N_\phi(\nu, \lambda; \phi) &= C(\phi) N(\nu, \lambda) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし、O-XYZ は $\phi=0$ のとき O-xyz と一致するように定められているものとする。 X_ϕ 上の任意の点での仮想冠歯車と被削歯車の相対速度を $W(X_\phi)$ とすると、創成条件式は

$$N_\phi(\nu, \lambda; \phi) \cdot W(\nu, \lambda; \phi) = 0 \quad \dots\dots\dots (15)$$

これより、形式的ではあるが、

$$\lambda = \lambda(\nu; \phi) \quad \dots\dots\dots (16)$$

を求め、これを式(14)に代入すると、仮想冠歯車刃面上の創成線の式 $X_\phi(\nu, \lambda(\nu; \phi); \phi)$ と創成線上の単

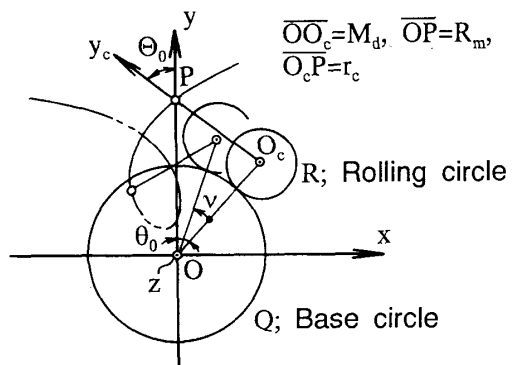


図6 切れ刃の軌跡

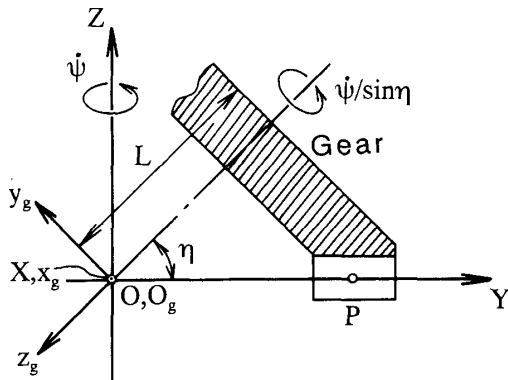


図7 静止座標系 O-XYZ と歯車座標系 $O_g-x_gy_gz_g$

位面法線ベクトルの式 $N_\psi(\nu, \lambda(\nu; \psi); \psi)$ とが得られる。

さて、創成線 X_ψ を図7の被削歯車に固着した座標系 $O_g-x_gy_gz_g$ で表し、これを X_g とする。このとき、 $O_g-x_gy_gz_g$ は基準の位置から角度 $-\psi/\sin \eta$ だけ回転しているから

$$X_g(\nu, \psi) = C^{-1} \left(\frac{-\psi}{\sin \eta} \right) A^{-1} \left(\frac{\pi}{2} + \eta \right) X_\psi(\nu, \psi) \dots\dots\dots (17)$$

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

$$A \left(\frac{\pi}{2} + \eta \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \left(\frac{\pi}{2} + \eta \right) & -\sin \left(\frac{\pi}{2} + \eta \right) \\ 0 & \sin \left(\frac{\pi}{2} + \eta \right) & \cos \left(\frac{\pi}{2} + \eta \right) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (18)$$

式(17)で ν, ψ を歯面表示パラメータとみなせば、 X_g が被測定歯車歯面の式になる。 X_g の単位法線ベクトル N_g は

$$N_g(\nu, \psi) = C^{-1} \left(\frac{-\psi}{\sin \eta} \right) A^{-1} \left(\frac{\pi}{2} + \eta \right) N_\psi(\nu, \psi) \dots\dots\dots (19)$$

この X_g と N_g を三次元測定機の座標系 $O_m-x_my_mz_m$ で表示したものが式(1)の X_m, N_m である。また、 M_d, r_c, γ, η などが式(3)の C_1, C_2, \dots, C_k に対応し、これらの値が設計値と異なっている状態で歯切りが行われた場合、歯切り誤差が生じていることになる。

6. 検査結果

本報で提案する誤差要因の選定法と既報の検査法とを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検査に適用する。検査対象とした歯車の諸元を表1に示す。歯切り時のカッタ諸元およびカッタ取付け位置・姿勢などを表すマシンセッティングに関する

表1 曲がり歯傘歯車諸元

Gears		Miter
Number of teeth	Z_b	31
Module		3.4031mm
Spiral angle		$35^\circ 0'$
Hand of spiral		Left hand
Pitch cone angle	η	$45^\circ 0'$
Mean cone distance	R_m	91.07mm

表2 カッタとマシンセッティングに関する諸元

Cutter radius	r_c	55.00mm
Cutter blade module		3.60mm
Number of starts of cutter head	Z_w	5
Pressure angle	γ	$20^\circ 0'$
Base circle radius	q	74.62mm
Machine distance	M_d	83.13mm
Mounting distance	L	101.00mm

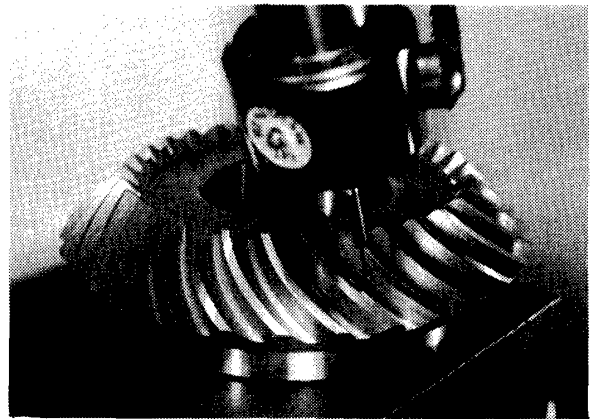


図8 三次元測定機による検査実験

諸元を表2に示す。歯面測定には半径 $r_0=0.997$ mm の球状測子を使用した。歯面測定の様子を図8に示す。なお本実験では、測定中の偶然誤差の影響を避けるために測定点の数 n を20点以上(26点)とした。

クリンゲルンベルグ方式曲がり歯傘歯車では、次のような誤差要因が考えられる。歯切盤に関しては Machine distance M_d 、カッタに関してはカッタ半径 r_c と圧力角 γ 、ワークに関してはピッチ円すい角 η 、Mounting distance L (図7)および O-XYZ における歯車軸の X 軸方向のオフセット量 l_x である。

これらの誤差要因のうち、誤差があるとする要因を選定するため、歯面測定値群よりそれぞれの要因の誤

表 3 検査結果

Error factor	Error	Φ (deg)	Δt (μ m)
M_d	0.094mm	55° 18'	8.9
r_c	-0.334mm	55° 17'	22.6
γ	7'	55° 17'	23.1
η	7'	55° 22'	14.2
L	-0.250mm	55° 20'	3.7
l_x	-0.258mm	55° '04'	4.4

表 4 $\Delta L = -0.250$ mm のときの検査結果

Error factor	Error	Φ (deg)	Δt (μ m)
M_d	-0.002mm	55° 20'	3.6
r_c	-0.031mm	55° 20'	3.6
γ	2'	55° 20'	3.5
η	0'	55° 20'	3.6
l_x	0.0mm	55° 20'	3.7

表 5 修正歯切り後の検査結果

Error factor	Error	Φ (deg)	Δt (μ m)
L	0.004mm	54° 59'	3.1

差と Φ の値および適合精度 Δt の値を求めた。その結果を表 3 に示す。表 3 より、上述の誤差要因のうち Δt の値を最も小さくする要因は Mounting distance であるから、Mounting distance が $L + \Delta L = 101.00 - 0.25 = 100.75$ mm であるとしたときの幾何学的歯面が測定値群に最もよく適合していると判断することができる。すなわち $L = 101.00$ mm で歯切りすべきところ、 $\Delta L = -0.25$ mm の誤差を含んだ状態で歯切りされていたことがわかる。ところで、この歯切実験においては Δt を小さくする要因は Mounting distance であることが見出されたが、その以外の要因に誤差があるかどうかはいまだ不明である。そこで今度は、 $L = 100.75$ mm としてそのほかの要因 M_d , r_c , γ , η , l_x の誤差とそれぞれに対応する Φ の値および適合精度 Δt の値とを求めてみた。その結果を表 4 に示す。 Δt の値は表 3 の L の Δt とほとんど変わっていない。これより、 M_d , r_c , γ , η , l_x すべてに誤差がなく、Mounting distance L のみに誤差があると考えてよいことになる。そこで、L を 0.25 mm 増加させて修正歯切りを行い、

その歯車歯面を測定して得た歯面測定値群から L の誤差 ΔL と Φ を求めてみた。その結果を表 5 に示す。表より、適合精度 Δt の値が修正歯切り前と同程度に小さくなっていることがわかる。また、検出した ΔL の値は 0.004 mm で無視できる程度に小さいことから、歯車歯面は正しく歯切りされていると判断でき、修正歯切りの効果がわかる。

以上より、本検査法の有効性が確かめられたものと考ええる。

7. 結 言

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は原理的には共役な歯車で対を構成することができるが、歯切りの際に生じるいろいろな誤差のために 1 回の歯切りでそのような歯車を得ることができない。そのため、現場技能者の経験と勘に基づく歯当たり調整歯切りを行い希望する歯車を得ているのが現状である。

本報は、これの改善を目的として、歯車歯面上の座標測定値群から歯面を創成歯切りする際の工具取付け位置誤差を検出することを試みたものである。本研究は、工具取付け位置誤差を検出し、これを歯切り作業にフィードバックすることにより設計どおりの歯車歯面を得ることを目的としている。

本研究では、実際にクリンゲルンベルグ方式曲がり歯傘歯車の歯面を測定して、その測定値群から工具取付け位置に関するいろいろな誤差要因を評価し、その結果から実際に誤差があると考えられる要因を見出すことができた。そして、その要因の誤差を検出し、その誤差を補正して修正歯切りを行った。その結果、設計どおりの歯車歯面を得ることができた。

終わりに、検査・歯切実験にご協力いただいた(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) Litvin, F. L., *Theory of Gearing*, NASA Reference Publication 1212, (1989), 352, NASA Lewis Research Center, Cleveland, Ohio.
- (2) Townsend, D. P., *Dudley's Gear Handbook Second Edition*, (1991), 20-42, McGraw-Hill.
- (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) 川崎・田村, 機論, 59-567, C(1993), 3513.
- (6) Merritt, H. E., *Gears (3rd ed.)*, (1954), 40, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd., London.