

三次元座標測定機によるはすば歯車の測定*

田村久司*¹, 劉宗先*², 川崎一正*¹

Measurement of Helical Gear Using Coordinate Measuring Machine

Hisashi TAMURA, Zong-Xian LIU and Kazumasa KAWASAKI

A method for inspecting a helical gear using a coordinate measuring machine (CMM) is proposed. In the method, the coordinates of a large number of points on the tooth surface of the gear are measured at random using a CMM. The method is based on the idea that the pitch error, profile error, pressure angle error, and spiral angle error can be calculated from the measured coordinates because the information on various errors of the gear is included in the measured coordinates. For calculation of each error, the tooth surface is described as a function of each error item and then the values for the items are estimated from all of the measured coordinates by the method of least squares. The difference between the estimated value for the item and the corresponding design value is the error of the item. From the results of experiments, it is clarified that each error of a helical gear can be estimated using a widespread CMM instead of a specially designed measuring machine for gears.

Key Words: Measurement, Machine Element, Gear, Helical Gear, Method of Least Squares, Gear Inspection, Coordinate Measuring Machine, Pitch Error, Profile Error

1. 緒 言

JIS ではインポリュートはすば歯車の精度・等級を決める項目としてピッチ誤差, 歯形誤差, 歯すじ方向誤差および歯みぞの振れ(偏心)の4項目を規定している⁽¹⁾. これらの誤差測定は, 以前は各項目ごとに専用の装置を用いて行われていたが, 現在は1台のCNC歯車測定機ですべての測定が行われている. しかし, その測定原理は以前と同様に歯車歯面の二次元的形状認識に基づくものであって, 歯面本来の姿である三次元的な形状認識に基づいているものではない.

本研究で提案する測定法は, はすば歯車歯面を空間に広がるインポリュートねじ面としてとらえ, 歯面上の多数点の座標を三次元座標測定機で測定する方法であって, 著者らが傘歯車やハイポイドギヤの製作誤差検出に用いた方法⁽²⁾⁽³⁾をはすば歯車の誤差測定に応用したものである. すなわち, はすば歯車歯面上の多数点の座標測定を行い, その座標測定値群に各種誤差情報が含まれていると考え, その中から目的とする誤差

を検出しようとするものである. 誤差の検出は, まず理論インポリュートねじ面を検出しようとする誤差項目の関数として数式表示しておき, 次に座標測定値群に最もよく合致するように最小二乗法によって理論ねじ面の誤差項目の値を推定し, 最後にその推定値と設計値との差を誤差とする, という方法で行う.

現在わが国において広く普及している三次元座標測定機は, 高精度な座標測定が可能で測定簡便性・万能性を考えると, 少量の歯車測定の場合にはCNC歯車測定機の代替機として有効に利用できるものと思われる. 本研究の真の目的はその可能性を探ることにある.

2. はすば歯車の数式表示

歯直角方式のはすば歯車においてモジュールを m_n , 歯数を z_0 , 工具圧力角を α_n , 基礎円筒上ねじれ角を β_g とすれば, 誤差の生じる可能性のあるものは α_n と β_g である. このことを念頭において基礎円筒半径 r_g を求めると⁽⁴⁾

$$r_g = 0.5z_0m_n \cos \alpha_n / \cos \beta_g \dots\dots\dots (1)$$

式(1)は r_g が α_n と β_g の関数であることを示している. さて, r_g と β_g を用いてインポリュートねじ面であるはすば歯車歯面の式を, 歯車の中心軸(偏心を考

* 1995年3月18日 北陸信越支部第32期総会講演会において講演, 原稿受付 1996年4月26日.

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

*² 准員, 新潟大学大学院.

え、歯車軸と区別する)をZ軸とする歯車固着の座標系O-XYZで表示し、それを列ベクトル $X=(X, Y, Z)^T$ で示すと、 ϕ と θ を図1に示す曲面表示パラメータとして、

$$\left. \begin{aligned} X(\phi, \theta) &= r_g \{ (\cos \phi + \phi \sin \phi) \cos \theta \\ &\quad - (\sin \phi - \phi \cos \phi) \sin \theta \} \\ Y(\phi, \theta) &= r_g \{ (\cos \phi + \phi \sin \phi) \sin \theta \\ &\quad + (\sin \phi - \phi \cos \phi) \cos \theta \} \\ Z(\theta) &= r_g \theta \cot \beta_g \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここで ϕ, θ はZ軸に関して右まわりを正とする。歯面 X の単位面法線ベクトルを $N=(N_x, N_y, N_z)^T$ とすると

$$\left. \begin{aligned} N_x(\phi, \theta) &= \cos \beta_g \sin(\phi + \theta) \\ N_y(\phi, \theta) &= -\cos \beta_g \cos(\phi + \theta) \\ N_z &= \sin \beta_g \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

図1に示した歯面を1番めの歯面とし、それから反時計回りに数えて j 番めの歯面 X_j とその単位面法線ベクトル N_j は X, N をZ軸まわりに角度 $[2\pi(j-1)/z_0]$ ラジアンだけ回転したものであるから(図2), j を既知, C をZ軸まわりの回転に関する座標変換行列として

$$\left. \begin{aligned} X_j &= C(\Phi_j) X(\phi, \theta) \\ N_j &= C(\Phi_j) N(\phi, \theta) \\ C(\Phi_j) &= \begin{bmatrix} \cos \Phi_j & -\sin \Phi_j & 0 \\ \sin \Phi_j & \cos \Phi_j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \Phi_j &= 2\pi(j-1)/z_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

なお、歯面のねじれ方向が図1と逆の左ねじれの場合には式(2), (3)において β_g を $-\beta_g$ に置き換えればよい。また右ねじれ歯車の場合で X と反対側の歯面すなわち左歯面 X' とその単位面法線ベクトル N' は式(2), (3)において ϕ, θ をそれぞれ $-\phi', \theta'$ に置き換え、かつ次の座標変換をすればよい。

$$\left. \begin{aligned} X' &= C(\chi) X(-\phi', \theta') \\ N' &= C(\chi) N(-\phi', \theta') \\ X'_j &= C(\Phi_j) X' \\ N'_j &= C(\Phi_j) N' \\ \chi &= \pi/z_0 + 4x_n \tan \alpha_n / z_0 + 2 \operatorname{inv} \alpha_s \\ \sin \alpha_s &= \sin \alpha_n / \cos \beta_g \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

式(5)で χ は基礎円筒上の歯厚角⁽⁵⁾, x_n は歯直角転位係数, α_s は軸直角工具圧力角である⁽⁴⁾。また X'_j, N'_j は j 番めの左歯面とその単位面法線ベクトルを表す。

3. はすば歯車の位置

三次元座標測定機の座標系を $O_m-X_m Y_m Z_m$ とし、 Z_m 軸は鉛直であるとする。三次元座標測定機にはすば歯車をセットする。このとき歯車の中心軸であるZ軸は正しく鉛直であると考え、このことは簡単に実現できるが歯車固着の座標系O-XYZの原点Oの座標 $(X_0, Y_0, 0)$ およびX軸と X_m 軸とのなす角 Φ が不明である(図3)。すなわち、測定機座標系におけるはすば歯車の中心位置を示す X_0, Y_0 とX軸方向を示す Φ の三つが不明である。まずこれらを決定しな

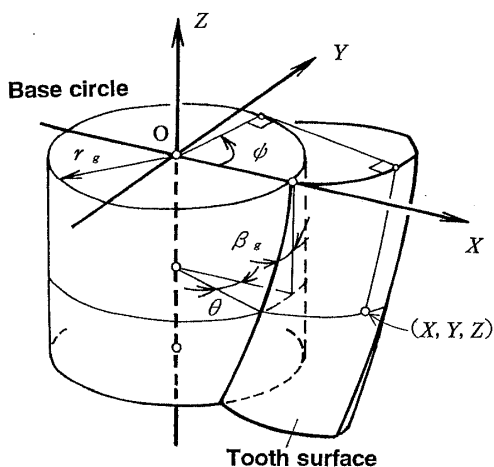


Fig. 1 Tooth surface of helical gear

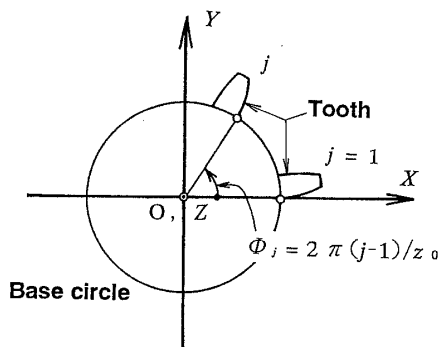


Fig. 2 Tooth surface of number j

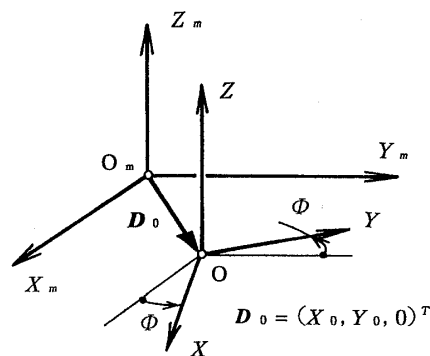


Fig. 3 Relationship between two coordinate systems

ければならない。

歯車の中心 O の決定に際しては歯車軸あるいは歯車軸穴を用いることができない。偏心があるからである。そこで z_0 枚の歯面全体から X_0, Y_0, Φ を推定することにする。そのために任意の 1 枚の(例えば右)歯面を基準歯面を選び、それを 1 番めの歯面 ($j=1$) とし、それから順に z_0 番めまでの歯面をそれぞれ 1 歯面につき、 i 個の任意点の座標測定を行う。そして測定値 M_{ji} を得る。以下、簡単のため $i=1$ の場合について述べることにする。そうすると M_{ji} は M_j と表してもよい。図 4 は歯面 X_j と半径 R の測子が点 P で接触している状態を示す。測子中心の座標 $M_j=(M_{xj}, M_{yj}, M_{zj})^T$ が座標測定値になる。図 4 より、 j を既知として

$$\left. \begin{aligned} M_j - D_0 &= C(\Phi_j + \Phi) \{ X(\phi_j, \theta_j) \} \\ &+ RN(\phi_j, \theta_j) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

$$D_0 = (X_0, Y_0, 0)^T$$

これを、 Z 軸を円筒軸とする円筒座標に変換して、

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{(M_{xj} - X_0)^2 + (M_{yj} - Y_0)^2} \\ = \sqrt{P_x^2(\phi_j, \theta_j) + P_y^2(\phi_j, \theta_j)} \\ M_{zj} &= P_z(\theta_j) \\ \tan^{-1} \left[\frac{M_{yj} - Y_0}{M_{xj} - X_0} \right] &= \Phi_j + \Phi \\ &+ \tan^{-1} \left\{ \frac{P_y(\phi_j, \theta_j)}{P_x(\phi_j, \theta_j)} \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} P_x(\phi_j, \theta_j) &= X(\phi_j, \theta_j) + RN_x(\phi_j, \theta_j) \\ P_y(\phi_j, \theta_j) &= Y(\phi_j, \theta_j) + RN_y(\phi_j, \theta_j) \\ P_z(\theta_j) &= Z(\theta_j) + RN_z \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

式(7)の最初の 2 本の式から点 P の位置を示す ϕ_j と θ_j が Φ に無関係に求められる。これが円筒座標に変換した効果である。 ϕ_j と θ_j は X_0, Y_0 の関数になっ

ている。この ϕ_j, θ_j を式(7)の最後の式に代入すれば Φ が求められるが、一般に測定歯面 j が変わると不変であるべき Φ の値も微妙に変わるし、 X_0, Y_0 の真値が不明の状態では Φ の値を定めても意味がない。そこで z_0 枚の歯面全部を測定し、その測定値群に最もよく合致するような X_0, Y_0, Φ を最小二乗法によって求める。すなわち各測定値ごとに式(7)の最後の式の両辺の差を求め、これを残差とし、全測定値について残差の二乗和を計算し、これを最小にするような X_0, Y_0, Φ を求める。 j 番めの歯面の測定値を (M_{xj}, M_{yj}, M_{zj}) とし、それに対応するパラメータ ϕ, θ と残差をそれぞれ ϕ_j, θ_j, E_j で表せば、 $\phi_j(X_0, Y_0), \theta_j(X_0, Y_0)$ であることを考慮に入れて

$$\left. \begin{aligned} E_j(X_0, Y_0, \Phi) &= \Phi_j + \Phi \\ &+ \tan^{-1} \left\{ \frac{P_y(\phi_j, \theta_j)}{P_x(\phi_j, \theta_j)} \right\} - \tan^{-1} \left[\frac{M_{yj} - Y_0}{M_{xj} - X_0} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

残差 E_j に対して最小二乗法を適用すれば

$$\left. \begin{aligned} F &= \sum E_j^2(X_0, Y_0, \Phi) \\ \partial F / \partial X_0 &= 0 \\ \partial F / \partial Y_0 &= 0 \\ \partial F / \partial \Phi &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

連立方程式(10)を解くことによって X_0, Y_0, Φ が求められる。式(10)の最後の式は次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \sum \left[\tan^{-1} \left[\frac{M_{yj} - Y_0}{M_{xj} - X_0} \right] \right. \\ &\left. - \tan^{-1} \left\{ \frac{P_y(\phi_j, \theta_j)}{P_x(\phi_j, \theta_j)} \right\} - \Phi_j \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

以上のようにして定めた X_0, Y_0, Φ はピッチ誤差、圧力角誤差およびねじれ角誤差の影響をほとんど受けないと考えてよい。その理由は各誤差が小さいことのほかに、各歯のピッチ誤差は無秩序であり全体として平均化されていると考えられることと、圧力角とねじれ角は各歯ごとに異なることなく一様であると考えられることから、座標測定値群 M_j ($j=1, 2, \dots, z_0$) 全体に関してはそれらの誤差の影響がないとしてよいからである。

4. 誤差測定法

三次元座標測定機の座標系で歯車の中心位置 D_0 とその姿勢 Φ が判明したので、その状態の歯車について誤差測定をする。

4.1 偏心 JIS では歯車の偏心を歯みぞの振れで表しているが、ここでは歯面が創成されたときの歯車ブランク回転中心(3章での歯車の中心 O)と歯車軸(ボス穴)中心とのずれを偏心とする。歯車軸中心ある

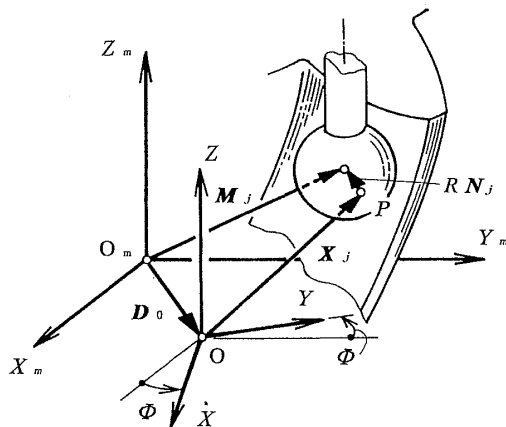


Fig. 4 Measuring state of tooth surface

いはボス穴中心の座標は従来の方法で簡単に求められる。歯車軸(ボス穴)中心座標を $(X_s, Y_s, 0)$ とすれば、偏心量 E_{cc} は

$$E_{cc} = \sqrt{(X_0 - X_s)^2 + (Y_0 - Y_s)^2} \dots\dots\dots (12)$$

4.2 累積ピッチ誤差 3章で得た X_0, Y_0, Φ および測定値群 M_j ($j=1, 2, \dots, z_0$)を用いる。すなわち累積ピッチ誤差の測定作業は4.1節で終わっているのである。また X_0, Y_0 をそのまま用いるため、偏心の影響を受けない状態の累積ピッチ誤差が求められる。基準にした1番めの歯面から数えて j 番めの歯面は、理論的には1番めの歯面を z 軸まわりに角度 $2\pi(j-1)/z_0$ ラジアン回転して位相を進めた位置にある筈であるが、ピッチ誤差のためそれよりも $\Delta\Phi_j$ だけ位相のずれた位置にある。すなわち式(6)の Φ_j に未知量 $\Delta\Phi_j$ を加えて

$$\Phi_j = 2\pi(j-1)/z_0 + \Delta\Phi_j \dots\dots\dots (13)$$

これより、式(6)は次のように表せる。

$$M_j - D_0 = C\{\Phi + 2\pi(j-1)/z_0 + \Delta\Phi_j\} \times \{X(\phi_j, \theta_j) + RN(\phi_j, \theta_j)\} \dots\dots (14)$$

式(14)は未知数 $\phi_j, \theta_j, \Delta\Phi_j$ を含む3本のスカラ式から成立している。3章と同じように式(14)を円筒座標に変換すれば容易に $\Delta\Phi_j$ を求めることができる。この $\Delta\Phi_j$ に r_g を乗じたものが j 番めの歯面の累積法線ピッチ誤差であり、 $r_g/\cos \alpha_s$ を乗じたものが累積円ピッチ誤差である。 α_s は軸直角圧力角で、式(5)で計算される。

ところでJISでは円ピッチ誤差を単一、隣接そして累積の各ピッチ誤差を規定している。単一ピッチ誤差は $r_g(\Delta\Phi_{j+1} - \Delta\Phi_j)/\cos \alpha_s$ で、隣接ピッチ誤差は $r_g(\Delta\Phi_{j+1} - 2\Delta\Phi_j + \Delta\Phi_{j-1})/\cos \alpha_s$ で計算される。

4.3 圧力角誤差とねじれ角誤差 本節以降の測定には、一つの歯みぞを形成している左右両歯面と測子とが干渉しないように、球状測子の直径と姿勢を決めておくものとする。このとき、三次元座標測定機の原点に対し測子中心座標が変わらないように測子の原点補正をするものとする。そうすれば3章で得た X_0, Y_0 の値を用いることができる。 Φ の値は本節の測定によって改めて求めるものとする。なぜならば3章で求めた Φ は図3に示した基準の歯に関する X 軸と測定機 X_m 軸とのなす角度で、全歯の測定値から定めた平均値であり、本節の測定歯面に関する Φ ではないからである。

任意の1枚の(右)歯面 X を選び、できるだけその歯面全体に及ぶように多数点の座標測定を行い、測定値群 M_i ($i=1, 2, \dots, n$)を得る。そして歯面 X の式

(1), (2)において工具圧力角 α_n 、基礎円筒上のねじれ角 β_g 、歯面 X の方位角 Φ が未知なる定数であると考えて、歯面表示パラメータは ϕ_i, θ_i である。図4を参照して、 M_i と X の関係を示せば

$$M_i = C(\Phi)\{X(\phi_i, \theta_i; \alpha_n, \beta_g)\} + RN(\phi_i, \theta_i; \alpha_n, \beta_g) + D_0 \dots\dots\dots (15)$$

3章では X_0, Y_0, Φ を求めたが、それと全く同じ考え方によって、式(15)から未知定数 α_n, β_g, Φ を求めることができる。求めた α_n, β_g とその設計値との差 $\Delta\alpha_n, \Delta\beta_g$ が誤差になる。JISでは圧力角誤差を規定していないが、一般には歯形誤差曲線からそれを読取っているようである。基礎円筒上のねじれ角誤差はJISの歯すじ方向誤差に対応させることができる。従来の歯すじ方向誤差測定では、ピッチ円筒の付近の歯面のねじ線の理論ねじ線からの振れを検出して誤差曲線を描き、この誤差曲線からピッチ円筒上の歯すじ方向誤差を得ている。

4.4 歯形誤差 測子の姿勢を変えずに4.3節の歯面について歯形誤差測定を行うものとする。そうすると X_0, Y_0, Φ の値として4.3節の値がそのまま使用できる。JISでは歯形誤差を軸直角断面における実際の歯形と理論インボリュート曲線とのずれと規定しているが、従来の歯形誤差測定では偏心と圧力角誤差の影響を含んだ形で全円周の約90°ずつ4箇所歯形測定をしており、得られた歯形誤差曲線から偏心の影響、圧力角誤差の影響そして正しいインボリュート曲線からのずれによる誤差を分離して読取っている。本測定法では4.3節までに求めた $\alpha_n, \beta_g, X_0, Y_0, \Phi$ を用いることによりJISで定めた歯形誤差が直接求められる。インボリュートねじ面ではその単位法線ベクトルの Z 成分は一定値 $\sin \beta_g$ である[式(3)参照]。したがって測子の Z 方向移動を拘束して歯面を測定すれば、球状測子と歯面の接触点は常に一定の軸直角断面内にあり、それから離れることはないから、JISで定めた歯形誤差が都合よく簡単に測定できる。歯形測定では歯先から歯元に至るまで歯形方向に満遍なくできるだけ多数点の座標測定をするように心掛ける必要がある。ただし、歯形検査範囲が指定されている場合には検査範囲外の測定値を除外するものとする。本法では設計値ではなく、実測値 α_n, β_g から決まる理論インボリュート曲線と実歯形の差を歯形誤差と考える。その差を歯形法線方向距離で考えると、それは歯車中心まわりの歯形微小回転角 $\Delta\Phi$ で表すことができる(図5)。 i 番めの測定値を M_i 、その点における $\Delta\Phi$ を $\Delta\Phi_i$ とすれば、それらと理論曲線 X との関係は

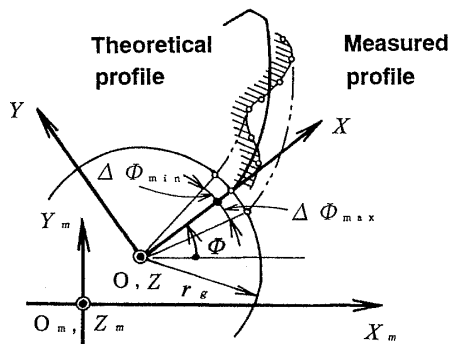


Fig. 5 Measurement of tooth profile error

$$M_i = C(\Phi + \Delta\Phi_i) \{ X(\psi_i, \theta_i) + RN(\psi_i, \theta_i) \} \dots\dots\dots (16)$$

$$\theta_i = \text{Const}$$

測定点の数を n とすれば、式(16)より n 組の $(\Delta\Phi_i, \psi_i)$ が求められる。そして n 個の $\Delta\Phi_i$ のうちで最大と最小の値の差(絶対値の和)を求め、それに r_g を乗じたものが歯形誤差になる。

4.5 転位係数(歯みぞの幅あるいは歯厚) 標準歯車と転位歯車の相違を左右両歯面の関係からみるとそれは単に歯みぞ幅の増減だけである。よって歯みぞ幅の増減から転位係数を知ることができる。いま、4.3節、4.4節での右歯面と歯みぞを構成している1歯前の左歯面につき、その歯面上の任意の1点を測定する。そして測定値 M' を得る。 M' と式(5)で示される左歯面 $X'(\psi', \theta', \chi)$ およびその単位面法線ベクトル N' とは次の関係にある。

$$M' = C(\Phi - 2\pi/z_0 + \chi) \{ X(-\psi', \theta') - RN(-\psi', \theta') \} \dots\dots\dots (17)$$

式(17)より χ に含まれる x_n と ψ', θ' を求めることができる。

5. 測定実験

本研究で提案する測定法の有効性を確かめるためにはすば歯車を測定し、その結果と従来のCNC歯車検査機による測定結果とを比較する。軸穴付の被測定歯車の諸元を表1に示す。測定には半径 $R=0.997$ mmの球状測子を用いた。使用した三次元座標測定機は最小読取り値 $1 \mu\text{m}$ 、精度 $(3+3L/1000) \mu\text{m}$ 、繰返し精度 $1 \mu\text{m}$ である。

ところで本測定法は座標測定値群によく一致するような理論歯面を推定することを基本としているが、その理論歯面と各座標測定値は一般に一致せずわずかに隔たっており、本研究ではそれを残差で表している。各座標測定値について残差(絶対値)が小さければ高精

Table 1 Dimensions of helical gear

Module	m_n	2.5 mm
Pressure angle	α_n	20°
	α_s	$(21^\circ 27' 49'')$
Number of teeth	z_0	49
Pitch circle dia.	d_0	132.331 mm
Base circle dia.	$2r_g$	123.154 mm
Helix angle	β_0	$22^\circ 13' 28''$
	β_g	$(20^\circ 49' 10'')$
Shifting coefficient of profile	x_n	0
Tooth width		35 mm
Heat treatment		Carburizing
Tooth surface finish		Grinding
Direction of spiral		Right hand

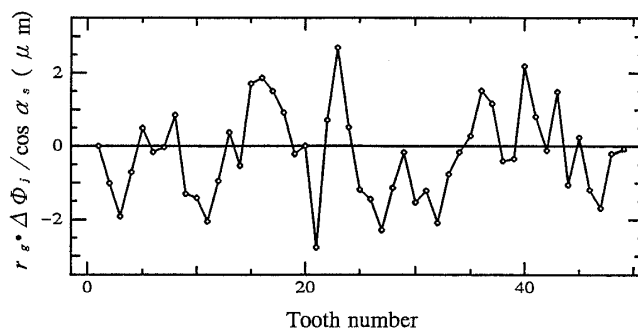


Fig. 6 Accumulative circular pitch error

度で理論歯面が推定されていることになる。そこで、各残差の絶対値の平均的な値を考え、それを推定精度とすることができる。既報⁽²⁾ではこれを適合精度と称し、 Δt で表した。

5.1 偏心の測定 球状測子の支持棒をほぼ鉛直にし、歯車の歯幅端近傍の右歯面に測子をほぼ鉛直方向から近づけて一つの歯面につき1回ずつ49枚の全歯面について座標測定した。その結果、偏心量 $E_{cc}=1.5 \mu\text{m}$ を得た。適合精度は $\Delta t=1.7 \mu\text{m}$ であった。適合精度 $1.7 \mu\text{m}$ は後述の α_n, β_g の測定における $1.0 \mu\text{m}$ よりも劣っているが、これは測子(Renishaw社製タッチプローブ)と歯面の接触点が測子上で 360° 変化することによる測子の指向性と測定範囲が広がったことと原因があるのではないかと考えている。

5.2 累積ピッチ誤差の測定 偏心測定で得た測定データ(座標測定値群)をそのまま用いる。この誤差計算には5.1節で得た歯車中心の座標値 $(X_0, Y_0, 0)$ を使用し、偏心の影響を除いた。測定結果を図6に示す。偏心の影響が現れていないことがわかる。累積円ピッチ誤差 $5.5 \mu\text{m}$ という結果を得る。

5.3 圧力角誤差とねじれ角誤差の測定 任意の1枚の右歯面について、測子と左右両歯面とが干渉しないように測子支持棒の姿勢を決め、かつ測子の原点

補正を行ったのち、その歯面上の点を無作為に 20 点選んで測定した。そして 4 章で示した方法に従って計算処理し、 α_n , β_g を求めた。計算処理過程で判明した偶然誤差と思われる測定値すなわち残差 E_i が特別に大きくなる測定値を破棄した。また、三次元座標測定機上で歯車位置を 2 回変えて測定を繰返し、測定結果の再現性を確かめた。その結果を表 2 に示す。最後の 2 回の測定では偏心がないものと考え、軸穴中心を歯車中心と考えて計算処理をした。表 2 より圧力角誤差 $\Delta\alpha_n$ とねじれ角誤差 $\Delta\beta_g$ はそれぞれ 26.3 ± 3.1 秒、 7.4 ± 0.3 秒となり、結果の再現性は良好であるとしてよいであろう。このときの適合精度は $\Delta t = 1.0 \mu\text{m}$ 以下で非常に高精度で理論歯面が推定されていることがわかる。繰返し精度が $1 \mu\text{m}$ であるこの測定機で $\Delta t = 1.0 \mu\text{m}$ 以下で理論歯面が推定でき、かつ測定結果の再現性が良好であることより三次元座標測定機によるはすば歯車の測定の可能性は十分にあるものと考えられる。

この測定では歯みぞの幅、歯面のねじれ、球状測子の大きさおよび測子支持棒の向きなどの関係で歯底近くの歯面上の点の座標測定ができなかった。三次元座標測定機による歯車の測定では小径の測子がどうしても必要になる。

5.4 歯形誤差の測定 5.3 節の歯面について歯形測定を行った。測定結果を図 7 に示す。球状測子径がモジュールに比べて大きすぎたため歯元部分の歯形を測定することができなかった。測定に慎重を要する歯元部分の歯形誤差が急激に大きくなっているが、これを除くと歯形誤差は $2.6 \mu\text{m}$ となる。

5.5 転位係数の測定 歯形測定した右歯面と対向している左歯面を測定した。その結果、転位係数

x_n は 0.0038 となった。

5.6 測定結果の比較 5.5 節までに得た測定結果と CNC 歯車測定機(大阪精密製 CLP-35 型)で測定した結果とを比較して表 3 に示す。表中の C 欄は CNC 歯車測定機による測定結果であり、P 欄は本法の測定結果である。ねじれ角誤差以外はほぼ一致した値になっている。三次元座標測定機による測定は慎重な手動操作で行ったが、測定の誤りと考えられる測定値は除外してある。

6. 測定者

等級が 0~2 級程度のはすば歯車ではその許容誤差は、累積ピッチ誤差を除き、約 $10 \mu\text{m}$ 以下と非常に厳しく、ややもすると三次元座標測定機の精度に近づいてくる。このような場合、測定者の測定技術が測定結果に大きな影響を及ぼすようになる。本研究ではこれを確かめる目的で、三次元座標測定機による測定にある程度習熟した二人の測定者と一人の未習熟者を選び、おのおのに同一の歯車につき偏心、累積ピッチ誤差ならびにプローブの原点補正を含む圧力角とねじれ角誤差の測定を依頼した。その結果を表 4 に示す。二人の習熟者はほぼ同じ結果になるが、未習熟者は注意深く測定しても誤差が大きく現れ、適合精度も悪い。これより高精度な歯車を測定する場合にはある程度の習熟者による慎重な測定が望まれることがわかる。

7. 結 言

広く普及している三次元座標測定機の測定の万能

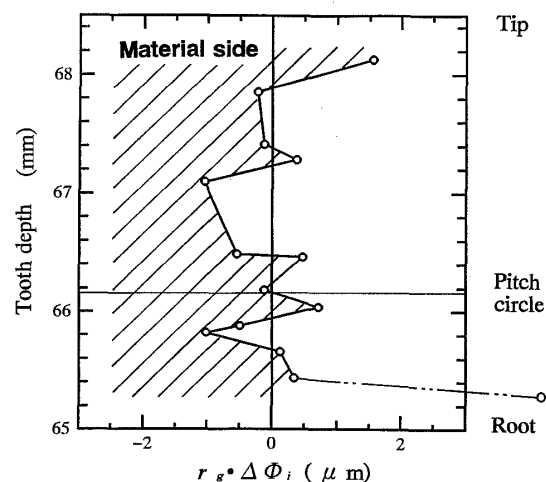


Fig. 7 Profile error

Table 2 Reproducibility of measurement

Measurement No.	1	2	3
Number of measuring points	23	22	15
Pressure angle error $\Delta\alpha_n$ (sec.)	29.4	23.2	29.1
Helix angle error $\Delta\beta_g$ (sec.)	7.7	7.0	7.5
Δt (μm)	1.0	1.0	0.8

Table 3 Comparison of results measured by conventional method and proposed method

	C	P	Δt
Accumulative pitch error	$5.4 \mu\text{m}$	$5.5 \mu\text{m}$	} $1.7 \mu\text{m}$
Eccentricity E_{cc}	$3.5 \mu\text{m}$	$1.5 \mu\text{m}$	
Profile error	$2.5 \mu\text{m}$	$2.6 \mu\text{m}$	} $1.0 \mu\text{m}$
Helix angle error $\Delta\beta_g$	21.6 sec.	12.6 sec.	
Pressure angle error	$\Delta\beta_g$	7.7 sec.	
	$\Delta\alpha_s$	32.9 sec.	
	$\Delta\alpha_n$	29.4 sec.	
Shifting coefficient of profile x_n	—	0.0038	—

Table 4 Comparison of results measured by skilled workers and non-skilled worker

	Skilled workers				Non-skilled worker	
	1	Δt	2	Δt	3	Δt
Accumulative pitch error Eccentricity E_{cc}	5.5 μ m 1.5 μ m	} 1.7 μ m	6.4 μ m 1.6 μ m	} 1.8 μ m	10.6 μ m 3.6 μ m	} 2.8 μ m
Helix angle error $\Delta \beta_g$ Pressure angle error $\Delta \alpha_n$	7.7 sec. 29.4 sec.	} 1.0 μ m	6.8 sec. 26.4 sec.	} 1.1 μ m	-1.2 sec. -6.9 sec.	} 1.5 μ m

性・簡便性と高精度な座標測定とに着目し、比較的複雑な曲面から成るはすば歯車の三次元座標測定機による測定法を示した。この測定法の測定作業は非常に簡単で、測定機上に被測定歯車を設置したのち、測定項目に従って歯面上の任意点の座標を無作為に測定するだけでよい。本研究は要するにそのようにして得た歯面座標測定値群の電子計算機による計算処理法であると極論できる。したがって本法を利用することは測定データの電子計算機への取込みと、本文に示した方法に基づいてその計算処理プログラムを作成・実行することである。これによってはすば歯車の誤差が検出でき、精度検査が可能になる。本法の実用可能性と有用性は三次元座標測定機による測定実験結果と専用の歯

車測定機による測定結果とを比較することによって確かめられた。なお、本法の応用として平歯車、円すい歯車⁽⁶⁾の測定が可能である。

終わりに、本研究にご協力くださった(株)長岡歯車製作所の市野之彬技術部長にお礼申し上げる。

文 献

- (1) JIS B1752-1989.
- (2) 田村久司・ほか2名, 機論, 60-575, C(1994), 2450-2455.
- (3) 川崎一正・田村久司, 機論, 59-567, C(1993), 3513-3519.
- (4) 石川二郎, 改訂機械要素(2), (1976), 189, コロナ社.
- (5) 文献(4)の173ページ.
- (6) 三留謙一, 機論, 48-430, C(1982), 852-859.