歯形検査機の精度について*

林 巖** 石川 二郎** 林 輝**

On the Accuracy of the Tooth Profile Testers

Iwao HAYASHI, Jiro ISHIKAWA, Teru HAYASHI

The authors tried to measure a helical gear with a several kinds of profile testers and compared these results. Also we examined experimentally the transmission errors in the friction drive between base circle cylinder and straight edge of a base circle type profile tester. Moreover we theoretically investigated measured errors due to the inclination of the center spindle of the tester, the position errors of feeler and the run out of base circle cylinder.

In consequence we got following results.

(1) The deviations of $2\mu\text{m}$ — $6\mu\text{m}$ appeared in the values of tooth profile error and they correspond to 0 grade—3 grade of JIS. And $3\mu\text{m}$ — $14\mu\text{m}$ appeared in the values of lead error and they correspond to 0 grade—5 grade of JIS.

(2) The transmission errors due to the unexpected happenings such as slip was not observed. It is revealed that the movement is accurately transmitted from the straight edge to the base circle.

(3) Measuring error due to the run out of a base circle can be minimized by setting the direction of the vector of the run out parallel to the straight edge.

(4) In some cases the values of spiral angle error due to the inclination of the center spindle become several minutes. These values can be obtained with formula (4).

(5) The length of tooth profile is due to accuracy of feeler position in the radial direction. The values of pressure angle error can be estimated within 4% by setting the feeler in the accuracy of $\pm 0.01\text{ mm}$.

1. 緒 言

たくさんの歯車を測定して結果を比較する場合、それぞれの歯車の測定に用いた歯形検査機で一つの歯車を測定した時、それらの記録結果が同じになることが前提となるが、実際にはそれらが違うことが従来から指摘されていた。しかしこれまでこの研究が行なわれていなかったので、現状を把握するためには歯マスタ歯車を用いて実際に測定を行ない、その結果について検討を行なった。

つぎに基礎円板式歯形検査機で誤差の原因と考えられるもののうち、最も大切な基礎円板と直定規の摩擦伝動について、(1)基礎円板の回転角と直定規の移動量の絶対値を測定して伝達誤差を求める方法と、細部の伝達誤差を知るために(2)ベルト伝動を正として比較測定によって伝達誤差を求める方法の二つで実験を行ない、摩擦伝動の伝達誤差について検討を行なった。

歯形検査機における基礎円板外径誤差、偏心誤差、拡大装置の寸法誤差、接触子の位置誤差、また歯車のアーバに傾きがある場合の測定誤差についてはこれまでも解析が行なわれている^{1), 2), 3), 4)}。筆者らはさらに、接触子に位置誤差がある場合に歯形の記録長さに増減が生じ圧力角に誤差を生ずること、歯形検査機のセンタ自体に偏位がある場合にねじれ角誤差が生ずること、および測定器の精度の観点から基礎円板の偏心誤差について検討した。

2. 歯形検査機の現状

2.1 歯形検査機数機種による測定

日本2社(基礎円板式と基礎円調節式)と、カールマール、カールツァイス、クリンゲンベルグ(以上基礎円調節式)、マーグ(基礎円板式)の4社について表1に示すA社製はすばマスタ歯車を用いて測定を行なった。A社製マスタ歯車を図1に示す。アーバは歯車に焼バメされている。測定位置は歯すじ誤差についてはピッチ円上、歯形誤差については歯幅の中央とした。その結果を図2、(1)~(4)に示す。図中番号の1, 2, 3, 4は90

*原稿受付 昭和45年2月28日。昭和44年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和44年10月11日)にて発表。

**正 会 員 東京工業大学精密工学研究所(東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

表 1 使用した歯車の諸元

歯数	Z	30
歯直角モジュール	m_n	2.5
工具圧力角	α_c	20°
基礎円筒上ねじれ角	β_g	$20^\circ 21' 48''$
ピッチ円筒上ねじれ角	β_0	$21^\circ 44' 04''$
基礎円筒直径	D_g	75.1754

図 1 供試用A社製マスタ歯車

度ずつ異なる点の歯を表す。このうち(1)の歯形誤差と(3)の歯すじ方向誤差は JIS に規定されているものであるが、さらに歯形検査機の種類による違いをはっきりさせるために、歯先と歯元の歯形誤差を圧力角誤差、上端面と下端面の歯すじ方向誤差をねじれ角誤差として比較した。図中A, B 社は基礎円板式, C, D, E, F 社は基礎円調節式歯形検査機である。なお, A, B, C, F 社は恒温室で温度管理されており, D, E 社は工作機械見本市に出品されていたもので、専用のボックス中に設置されていた。

2.2 測定結果の検討

図 2 の結果が、歯形検査機による違いかどうかを調べるために、高精度のA社製基礎円板式歯形検査機 1 台を用いてつぎの各項についての記録結果の違いを求めた。

(a) 測定者が異なる場合 (個人誤差)

被験者 13 人に歯車測定の手順を最初から行なわせ、歯形と歯すじを記録した。その結果、歯形誤差で 3μ 、歯すじ方向誤差で 2μ 、圧力角誤差とねじれ角誤差で 5μ の違いが現われた。

(b) 繰返し誤差

被験者 2 人を選び、測定を 10 回繰返してもらった。その結果、それぞれ 1.7μ と 2.0μ の違いを示した。

(c) 基礎円板押付圧とフィーラ押付圧による誤差 3 kg, 8 kg, 13 kg の基礎円板押付圧, 50 g, 70 g, 100 g, 150 g のフィーラ押付圧で測定を行なった。その結果、最大 3μ の違いを示した。

(d) フィーラの形状と大きさによる誤差

円錐形フィーラ (2.0ϕ , 1.75ϕ , 1.50ϕ , 1.25ϕ) と球形フィーラ (2.50ϕ , 1.25ϕ) で測定を行なった。その結果、最大 3.2μ の違いが現われた。

以上の (a)~(d) の結果から普通 $2\sim 3\mu$ の差があり、このうち個人誤差が最も大きく 5μ になる場合もあることがわかる。図 2 の結果ではこれらよりも大きな差を示

図 2 各社歯形検査機による測定結果

表 2 各社歯形検査機による等級の比較

歯形検査機		JIS の等級			
		歯 形		歯 す じ	
		右歯面	左歯面	右歯面	左歯面
A社	No. 1	0	0	3	0
	No. 2	1	2	3	0
	No. 3	1	2	3	0
	No. 4	1	2	5	0
B社		1	1	5	0
C社		2	2	2	0
D社		3	1	0	2
E社		3	1	4	0
F社	No. 1	2	2	—	—
	No. 2	2	2	—	—

図 3 歯形誤差と歯すじ方向誤差の実測例

している。したがってこれらは歯形検査機によって現われたものと考えられる。

つぎに(1)の歯形誤差と(3)の歯すじ方向誤差を比較すると、各歯番に現われる歯形誤差の傾向はよく似た傾向を示すが、歯すじ方向誤差はあまり顕著な傾向を示していない。これはほぼ歯車の歯すじを測定する場合、フィーラの動きに上下の歯すじ方向の動きが加わり誤差要因が増えるためと考えられる。

また、(1)と(3)から JIS B1702 の表 6、表 8 から許容誤差を求め等級を比較すると表 2 のようになる。一つの歯車ででありながら歯形誤差で 0~3 級、歯すじ方向誤差で 0~5 級もの大きな違いとなった。歯形誤差の 0 級と 3 級、歯すじ方向誤差の 0 級と 5 級の実測例を図 3 に示す。また、A、B 社は評価が似ているが、C、D、E 社は若干異なっており、特に A 社と B 社では逆の評価となっている。

3. 基礎円板と直定規の摩擦伝動について

つぎに基礎円板式歯形検査機で最も重要な基礎円板と直定規間の摩擦伝動の伝達誤差について実験による検討を行なった。

図 4 基礎円板の回転角と直定規の移動量の絶対値の測定装置

図 5 基礎円板と直定規の伝達誤差 (絶対値測定による)

3.1 実験方法、実験装置およびその結果

3.1.1 基礎円板の回転角と直定規の移動量の絶対値の測定

図 4 に示すように、ポリゴンミラ (12 面鏡) とオートコリメータ (最小目盛 0.5 秒) を用いて 30° ごとに基礎円板の回転角を設定し、その時の直定規の移動量をブロックゲージ (A 級) と、マイクロゲージ (ヨハンソン社製、フルレンジ 50 μ 、最小目盛 0.5 μ) を用いて測定した。この時歯形検査機とオートコリメータの相対運動によって基礎円板の回転角の読みに誤差が入るのを防ぐために、装置全体を大きなコンクリート台上に置いた。この実験では基礎円板が 180° 回転すると直定規が可動限界に達するので、基礎円板を 60° 戻して基礎円板と直定規を離し、さらに直定規を元の位置まで戻して、あらためてそこで接触させ一方向で 3 回転させて行なった。なお基礎円板押付圧は 3 kg、8 kg、13 kg の三種に変えて行なった。

測定結果を図 5 に示す。

3.1.2 ベルト伝動との相対誤差の測定

図 6 に実験装置を示す。歯形検査機のフィーラ台上に平行ばね (厚 0.1 mm、ばね用りん青銅) でアルミの直方体ブロックを支え、それを基礎円板と同軸に固定した

リファレンスサークルに巻きつけたスチールバンド(幅 6 mm, 厚 0.1 mm, 鋼)で駆動し, 直定規と直方体ブロックの相対変位をデルタミニコムで測定した。基礎円板は直径が 70 ϕ , 105 ϕ , 140 ϕ のものを用い, 基礎円押付圧を 3 kg, 8 kg, 13 kg に変えて行なった。測定結果を図 7 に示す。なお記録結果が三角波様になったのは, リファレンスサークルと基礎円板を同軸で研削して同径に仕

上げたため, スチールバンドの厚さが伝達誤差に含まれ, さらに直定規が 15 mm 移動するごとに駆動方向を切換えたためである。実際の歯形検査機は手動式であるが本実験ではシンクロナスマータで駆動し, XY レコーダで記録した。

3.2 実験結果の検討

3.2.1 基礎円板の回転角と直定規の移動量の絶対値測定の結果について

図 8 の(1)は基礎円板押付圧が 3 kg で基礎円板を 1 回転させた後逆転したものである。この結果を往と復のそれぞれについて始点を重ねて図示すると図 8 の(2)になる。この図で対応する曲線(○—●, △—▲, □—■; 直定規上の位置が同じ)はまったく形が同じであり, 測定誤差を考慮すれば完全に一致する。したがって直定規と基礎円板の接触する点が決まっていれば, 常に同じ結

A: 誤差検出用デルタミニコム B: チールバンド C: リファレンスサークル D: 平行ばね(厚 0.1 mm) E: 基礎円板 F: 直定規

図 6 ベルト伝動との比較実験装置

図 8 基礎円板を 1 回転させた時の伝達誤差(絶対値測定)

図 7 ベルト伝動との比較測定による伝達誤差

図 9 偏心による伝達誤差

果を示すことになり、また伝達誤差と角度の間に規則性が見られることから、直定規と基礎円板の間にはスリップなどの偶然の原因による伝達誤差はないと考えられる。

また、図 8 の(2)に現われた差は、それぞれの測定点の直定規に対する位置は同じであることから、基礎円板に起因するものと考えられる。

つぎに同一方向で 3 回転させた時の図 7 の結果に注目すると、その伝達誤差の波形が全体として正弦曲線に近いことに気付く。この原因として、基礎円板の偏心があげられる。

まず理論的に基礎円板に偏心がある場合の伝達誤差を求めてみる。

図 9 のように偏心 e があり、偏心ベクトルが θ の位置から $d\theta$ 回転したとする。移動長さを x とすれば、

$$x = \int dx \\ = \int dx_1 + \int dx_2$$

$dx_1 = e \cos \theta d\theta$, $dx_2 = r_g d\theta$ を代入して x を求めると、

$$x = r_g \cdot \theta + e \sin \theta$$

ゆえに伝達誤差 Δx は、

$$\Delta x = x - r_g \cdot \theta \\ = e \sin \theta$$

となる。すなわち基礎円板の偏心による伝達誤差は、偏心の大きさに等しい振幅をもち、偏心ベクトルが直定規に平行になった時に累積の誤差が最大になる。また、基礎円板を単位回転角当りの伝達誤差は、偏心ベクトルが直定規に垂直な方向を中心として回転する場合に最大となり、直定規に平行な方向を中心として回転する場合に最小となる。

実際に A 社製歯形検査機の基礎円板の偏心は 4.5μ で

図 10 一歯測定するのに必要な基礎円板回転角

図 11 ベルト伝動との比較測定装置の模式図

ほぼ図 5 の測定結果の振幅と一致し、また、最大最小の点も理論と一致するので、図 5 の大きなうねりは基礎円板の偏心によるものと考えられる。

つぎに一歯測定するのに必要な基礎円板の回転角を求めると図 10 のようになる。一般の実用歯車の歯数はだいたい 20 枚以上であるから、一歯測定するには基礎円板が 30° 回転すれば十分であることがわかる。したがって図 5 を回転角を 30° にかぎって調べると、大きいところで $2 \sim 3 \mu$ 、偏心ベクトルが直定規に平行になっている小さいところでは 1μ 以内である。

したがって一般に偏心ベクトルが直定規に平行な位置で測定すれば、基礎円板の偏心による伝達誤差を最も小さくでき、本実験の場合には 1μ 以内に行うことができる。

3.2.2 ベルト伝動との比較実験の結果について

図 7 の測定結果と実際の伝達誤差について検討する。

図 6 の実験装置を図 11 のように模式化する。

直定規と基礎円板との間のスリップ、弾性変形などで

x_1 に誤差が生じつぎのようになったとする.

$$x_1 + \Delta x_1 = r_g \cdot \theta \quad (1)$$

($x_1, \Delta x_1, \theta$: 時間の関数)

マス m の力のつり合いから,

$$m \ddot{x}_2 + k_1(x_2 - x_1) = k_2(r_g \cdot \theta - x_2) \quad (2)$$

$$\text{また,} \quad x_2 - x_1 = y \quad (3)$$

(1), (2), (3) から x_2 を消去し, $d/dt \equiv s$ とし, Δx_1 について整理すると,

$$\Delta x_1 = 1/\omega_2^2 \cdot (s^2 x_2) + (1 + k_1/k_2)y$$

ただし, $\omega_1^2 \equiv k_1/m, \omega_2^2 \equiv k_2/m$

ここで実験装置について $(1 + k_1/k_2), 1/\omega_2^2 \cdot (s^2 x_2)$ を求めてみると,

$$1/\omega_2^2 \cdot (s^2 x_2) = 0.19 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$k_1/k_2 = 0.84 \times 10^{-5}$$

となる. したがって Δx_1 は y にほぼ等しいと考えてよい. すなわち図 7 の測定結果をそのまま伝達誤差と考えてよい.

図 7 のベルト伝動との比較実験の結果では, スリップなどの偶然の原因による伝達誤差はみられず, ほぼ $\pm 0.5 \mu$ 以内で正確に伝達されていることがわかる.

以上の二つの実験結果から, 基礎円板式歯形検査機では, 直定規と基礎円板との間に偶然の原因による伝達誤差はなく, 一歯測定するのに必要な基礎円板回転角 30° 以内の範囲では, 基礎円板の偏心が直定規に平行な位置で測定すれば, 偏心による伝達誤差を最も小さくすることができ, 本実験の例では, 約 5μ の偏心があったが, 1μ 以上の歯形誤差は識別できることがわかった.

4. 歯形検査機のセンタ軸の偏位から生ずるねじれ角誤差

センタの中心線が一致していない場合, 歯形誤差とねじれ角誤差に見かけの誤差が現われるが, このうち比較的大きなねじれ角誤差について理論的に求める.

まずセンタ軸に偏位がある場合の基礎円板の回転角と歯車の回転角の関係を調べる. この場合基礎円板を固定してある軸からケレで歯車の軸が駆動されるとする.

偏位による歯車軸の傾斜角を α とし, 基礎円板が θ 回転したとして, 歯車軸の回転角の誤差 $\Delta\theta$ を求めると,

$$\Delta\theta = \alpha^2/4 \cdot \sin 2\theta$$

となる. これは α の二次の微小量であるから省略してもよく, 基礎円板と歯車の回転角は同じと考えてよい.

つぎにセンタ軸に偏位があるために, 測定始めの点と測定終りの点では, フィーラが接触する点の半径が異なる. インボリュート曲線上のこの異なる二つの半径に対応する点の間の距離のインボリュート曲線の法線方向の

図 12 センタに偏位がある場合の測定点の半径 r_2

図 13 センタの偏位から現われる歯すじ方向誤差

長さ (ねじれ角誤差に含まれてくる) Δl を求めると,

$$\Delta l = (\delta/r_g)^2 \cdot r_g \theta$$

ただし δ : 半径の差

となる. これも δ の二次の微小量なので省略して, センタ軸が偏位している場合見かけ上現われるねじれ角誤差は, 基礎円と異なる半径上の歯すじを, 歯車が傾いた状態で測定するものとして求める.

図 12 から歯車が θ 回転した後のフィーラが接触している歯面上の半径 r_2 を求めると, α の二次以上の項を省略して,

$$r_2 = r_g - (h - l) \alpha \cos \beta$$

となる. 前述のようにこの r_2 なる半径の円筒上の歯すじを測定すると考える.

つぎに歯車軸が垂直軸から α 傾いて, 直定規を含む垂直平面内の傾きを α_y として, 右ねじれの場合のフィーラによって記録される誤差 x を求めれば,

$$x = (S' \sin \alpha_y + l) \tan (\beta_g' - \alpha_y) - S' \cos \alpha_y$$

ただし β_g' : 半径 r_2 の円筒上のねじれ角

$$\begin{cases} \beta_g' = \beta_g - \Delta\beta_g \\ S' = (1 - h - l/r_g \cdot \cos \beta \cdot \alpha) \tan \beta_g \\ \tan \beta_g' = r_2/r_g \cdot \tan \beta_g \end{cases}$$

の関係を用いて整理すると、

$$\frac{x}{y} = \left\{ -\frac{h-l}{r_g} \cdot \tan \beta_g \cdot \alpha_x + \alpha_g \right\}$$

ただし α_x : 直定規に垂直な平面内の傾き角となる。これに相等するねじれ角誤差は、

$$\Delta\beta_g = x/y \cdot \cos^2 \beta_g$$

$$\therefore \Delta\beta_g = -\left\{ \frac{h-l}{r_g} \tan \beta_g \cdot \alpha_x \pm \alpha_y \right\} \begin{pmatrix} \text{右ねじれ} \\ \text{左ねじれ} \end{pmatrix} \quad (4)$$

である。上式を用いて A 社製歯形検査機で現われる見かけのねじれ角の一例を示すと表 3 のようになる。

5. フィーラの位置が正しくない場合の歯形の記録長さの増減 - 歯直角方式転位はすば歯車について

図 14 からフィーラが $\pm\delta$ ずれた場合の歯形の記録長さ $A'B'$ ($A''B''$) を求めると、

$$\begin{aligned} A'B' = m_s \left[\sqrt{\left\{ \frac{z}{2} + (1+x) \cos \beta_0 \right\}^2 - \left(\frac{z}{2} \cos \alpha_s + \frac{\delta}{m_s} \right)^2} \right. \\ \left. - \sqrt{\left\{ \frac{z}{2} - (1-x) \cos \beta_0 \right\}^2 + \left(\frac{(1-x) \cos \beta_0}{\tan \alpha_s} \right)^2} \right. \\ \left. - \left(\frac{z}{2} \cos \alpha_s + \frac{\delta}{m_s} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

となる。ただし

m_s : 軸直角モジュール

Z : 歯数

x : 歯直角転位係数

β_0 : 基準ピッチ円筒上ねじれ角

α_s : 軸直角工具圧力角

δ : 偏位量

である。図 15 は $m=1$, $\alpha_c=20^\circ$ の標準平歯車について求めたものである。

圧力角誤差は記録された歯形の傾斜によって評価され

表 3 A 社製歯形検査機による見かけのねじれ角誤差の一例

基礎円板押付圧	偏位角 β	センタの偏位 ε	A 社製マスタ歯車を測定する場合			
			α_x	α_y	見かけのねじれ角誤差	
					右ねじれ	左ねじれ*
0 kg	130°	74.03 μ	-0.156×10^{-3}	0.186×10^{-3}	-0.073 分	+1.051 分
3	140°	76.21 μ	-0.191×10^{-3}	0.160×10^{-3}	+0.115 分	+1.081 分
8	140°	78.94 μ	-0.198×10^{-3}	0.166×10^{-3}	+0.119 分	+1.121 分
13	140°	79.40 μ	-0.199×10^{-3}	0.167×10^{-3}	+0.120 分	+1.128 分

(* A 社製マスタ歯車は右ねじれであるが左ねじれとした場合の値)

るために、フィーラのずれによって歯形の記録長さが増減すると、圧力角誤差に相等する歯形の傾斜が異なって現われ、圧力角誤差の算定に誤差が含まれてくる。この誤差の許容値は用途に応じて決められるが、図 15 から ± 0.01 mm の精度で設定すれば、約 4% 以内の誤差に収めることができ、すなわち、 $\Delta\alpha$ を圧力角誤差とすれば、

$$\delta = (\Delta\alpha) \leq 4\%$$

にすることができ、一般には無視できる程度の値となり十分であると考えられる。

図 14 フィーラが δ ずれた場合の歯形の記録長さ

図 15 歯形の記録長さ

6. 結 論

以上のことからつぎの結論が得られた。

- (1) 歯形検査機によって記録結果に違いがみられ、本実験では歯形誤差 $2 \sim 6 \mu$ 、圧力角誤差 $5 \sim 8 \mu$ 、歯すじ方向誤差 $3 \sim 13 \mu$ 、ねじれ角誤差 $5 \sim 14 \mu$ の差を示した。また JIS の等級を比較すると一つの歯車でありながら歯形誤差で 0~3 級、歯すじ方向誤差で 0~5 級もの大きな相違を示した。
- (2) 基礎円板式歯形検査機の直定規と基礎円板の摩擦伝動にはスリップなどの偶然の原因による伝達誤差はみられず、一般に一歯測定するのに必要な基礎円板回転角 30° 以内では、基礎円板の偏心ベクトルを直定規に平行にして測定すれば、基礎円板の偏心による伝達誤差を最小にすることができる。本実験では 1μ 以内で伝達することができそれ以上の歯形誤差は識別できることがわかった。
- (3) 歯形検査機のセンタ軸の中心がずれている場合、ねじれ角に見かけ上の誤差が現われ、その大きさは式(4)

から求めることができる。

- (4) フィーラが正しい位置からずれていると歯形の記録長さに増減が生じ、実際の圧力角誤差より違ってくる。フィーラを $\pm 0.01 \text{ mm}$ の精度で設定すれば約 4% 以内の誤差すなわち $\delta(\Delta d) \leq 4\%$ の無視できる程度の誤差に収めることができる。

謝 辞

本研究を始めるに当って適切な助言を与えて下さった機械振興協会の鋤柄重雄氏、ならびに歯車の測定に御協力下さった関係各社の方々に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 工作機械研究会訳：ベルト平歯車の測定法，理工学出版（昭 19），p. 25, p. 155~p. 168.
- 2) Ishikawa, Hayashi: Measurement of large gear, Bull. of the Tokyo Institute of Technology, B No. 5 (1959) p. 21~38.
- 3) 仙波：歯車，2 巻，日刊工業（1954）p. 375~381.
- 4) 会田，寺内，小田：歯形検査における歯車中心軸の傾きに基づく測定誤差について，精密機械 27, 4 (1961) 205.