複数の3点法を用いた円形部品の断面形状と 回転精度を同時に測定する方法*

園 崎 昭 八** 藤 原 晴 夫***

Simultaneous Measurement of Cylindrical Parts Profile and Rotating
Accuracy Using Multi-Three-Points-Method

Shouhachi Sonozaki and Haruo Fujiwara

On the direct measurement of roundness of cylinder, the reading of the indicator generally includes the rotating error of the measuring system. However the measurement system of roundness using a vee block and indicator has no rotating errors in the readings. The most serious disadvantage of this arrangement lies in the difficulty of establishing the actual shape of the circular parts by the readings of the dial indicator, which will depend on the used angle of the vee block and on the number of lobes present on the circular part. But this disadvantage will be now improved by applying this arrangement procedure since the calculated or analyzed values of the readings will be able to establish the actual shape of the circular parts if the values will be selected suitably. The selected angles of the vee block are used 60° , 90° , 120° , 135° and 180° in this experiment. By this procedure the standard shape will be able not only to measure but also to know the rotating accuracy of the measuring system.

Key words: roundness, vee block, multi-three-points-method, electric micrometer, rotating accuracy.

1. 緒 言

円形部品の断面形状を測定するには一般的には半径法が使用され^{1)~5)}、この方法が理にかなっており、非常に便利で、単純な方法であるために広く普及しているが、その欠点として、取付け時の偏心、測定時の回転誤差が測定値に含まれる。そのために高精度の測定になればなるほど装置の回転精度を測定したり⁶⁾、高くする必要がある。その回転精度の大きさは現在では真円度測定機において約 $0.025\mu\text{m}$ といわれている。

この回転誤差を含まない測定法の1つとして、3点法真円度測定法^{7)~9)}(以下3点法という)があり、これで得られた測定値は回転誤差を全く含まないものとすることができるが、半径法で得られるような測定値とはならず、これとは意味が異なったものとなる。

すなわち円形部品の断面形状のすべての成分を示すものではないのである。しかしこの3点法を複数に利用し、それらの測定値を3点法の理論に基づき、適当な成分だけを取り出して演算処理すれば、回転誤差を検出しないという長所を生かして半径法で得られると同じような測定値とすることができる。

さらに演算処理によって得られた測定形状を基準として利用すれば、回転装置のその測定時の回転誤差も求められる。そのときの測定精度は3点法で使用する長さ測定器の精度とそれらの相対的角度配置の精度による。これらのことについて以下に報告する。

* 原稿受付 昭和62年12月12日、昭和62年度
精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月
14日)にて発表

** 正会員 高松工業高等専門学校(高松市勅使町355)

*** 正会員 徳島大学工学部(徳島市南常三島町2-1)

Fig.1 Measuring principle of the Three Points Method

2. 測定原理

図1はVブロックの上に被測定円筒を載せて、それを1回転したときの測定値 $Y(\alpha)$ から真円度を求めようとするいわゆる3点法の原理を示すものである。ここで得られる測定器の振れ $Y(\alpha)$ については一般的に式(1)¹⁰⁾で与えられる。

すなわち

$$Y(\alpha) = \{1 + 1/\sin(\theta/2)\} a. - L + \sum_{n=2}^{\infty} \{1 + \cos n(90^\circ + \theta/2) / \sin(\theta/2)\} C_n \cos(n\alpha + \phi_n) \quad (1)$$

ただし、 α は試料の回転角、 θ はVブロックの開き角、 $a.$ は断面形状の平均円の半径、 L は測定器が最小値を示す位置の高さ、 n は試料断面の山数(周波数)、 C_n は山数 n をもつ断面形状成分の振幅、 ϕ_n は位相角をそれぞれ示す。

ここで第1項と第2項は定数であり第3項以下が変化する真円度あるいは断面形状に関係がある。そしてこの第3項以下についても

$$f = 1 + \frac{\cos n(90^\circ + \theta/2)}{\sin(\theta/2)} \quad (2)$$

の値により円筒の断面形状の中で検出できる形状成分と検出できない成分が存在する。すなわち $f = 0$ では検出されず f の大きさに応じた検出能力で断面形状成分が検出されることになる。従って3点法においてはこの f の値が大きな意味をもつことになる。

そこでこの f の値について具体的に示すと表1¹⁰⁾になる。この表からたとえば $\theta = 60^\circ$ では $n = 2$ (たと

Table 1 Calculation of $f = 1 + \frac{\cos n(90^\circ + \theta/2)}{\sin(\theta/2)}$

$\theta \backslash n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
60°	0	0	3	0	0	3	0	0	3
90°	0	1	2	0.4142	2	1	0	2.4142	0
120°	0	1.5744	1	0.4226	2	0.1547	2	0.4226	1
135°	0	1.7654	0.5858	1	1.4142	0.2346	2	0.0824	2
180°	0	2	0	2	0	2	0	2	0

えば楕円のような形)

や $n = 4$ (たとえば4角円) に対しては $f = 0$ であるから検出能力がなく、図1の測定器の指示は変化しないが $n = 3$ (たとえば三角円) では $f = 3$ だから実際の断面形状の3倍の感度で検出する能力があることを示すのである¹¹⁾。

以下同様に説明される。 Fig.2 Arrangement of the

electric micrometers

量や回転精度に関する

ものについて考えると、これはすべて $f = 0$ であるので全く検出されない。この方法を適当に組み合わせることで $n = 2$ からある大きさの高次のものまでをすべて高感度で検出するように測定子を配置し、それらから得られる値を適切に演算処理する。そうすれば回転誤差は検出することなく表面形状のみを検出できる。

図1のVブロックの角 θ が $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ および 180° に相当するように各測定器を図2に示すように配置すれば、MとA1とA2との組合せから周波数(山数)が3の倍数の成分のすべてが非常に感度よく(倍率 $f = 3$) 検出できる。つぎにMとE1との組合せから、2の倍数の成分のすべてが倍率 $f = 2$ で求められることになる。以上の2つの組合せでは求められない成分について考えると、たとえば5, 7, 11, 13, 19, ... などになるが、これらはMとB1とB2との組合せから求めることができる。しかしたとえば6, 18, 24, ... などは重複して求めてしまうことになるので、それらの成分は1つ分除去するようにしなければならない。このようにしてM, A1, A2, の組合せとM, E1の組合せでは求められない成分、および重複する成分を他の測定器の組合せで補ったり除去したりして、ある適当な大きさの周波数成分までそれぞれ1回ずつ合成すれば、試料の断面形状が回転誤差の影響なしに求められる。

いま、 $m, a_1, a_2, b_1, b_2, c_1, c_2, d_1, d_2$, および e_1 はこれらの大文字で示された測定器から得られる測定値を示すものとして、試料の断面形状の各回転位置における計算値を与える計算式が式(3)である。

$$F(\alpha) = a/3 + b/2 + (-b) + c/2 + (-c/2.154700) + d/2 + e/2 \quad (3)$$

ただし、この式の各項には次の値を代入するものとする。

すなわち

$a/3$ の a には、

$$a = m + a_1 + a_2 - \bar{a} \quad (4)$$

a の平均値を $\bar{a}$ とする。

$b/2$ の b には、

$$b = m + \sqrt{2}/2 (b_1 + b_2) \quad (5)$$

の値から得られるフーリエ解析の周波数が 5, 11, 13, 19, 29, 35, 37, 43, 53, 59, 61, 67, 77, 83, 85, 91 のものだけについて合成した値。

$-b$ の b には、上の b の周波数成分のうち 6, 18, 30, 42, 54, 66, 78, 90 のものだけについて合成した値。

$c/2$ の c には、

$$c = m + \sqrt{3}/3 (c_1 + c_2) \quad (6)$$

の値から得られるフーリエ解析の周波数が 7, 17, 31, 41, 55, 65, 79, 89 のものだけについて合成した値。

$-c/2.154700$ の c には、上の c の周波数成分のうち 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84, 96 のものだけについて合成した値。

$d/2$ の d には、

$$d = m + 0.5412 (d_1 + d_2) \quad (7)$$

の値から得られるフーリエ解析の周波数が 23, 25, 71, 73 のものだけについて合成した値。

$e/2$ の e には、

$$e = m + e - \bar{e} \quad (8)$$

e の平均値を $\bar{e}$ とする。

ただしこの式の条件は周波数成分 100項まででそのうち 47, 49, 95, 97 は求められない。

この方法で求めた形状を基準にして回転装置の回転誤差を求めることもできる。

したがって被測定物が小さく、図2のような形では寸法的に測定器を配置できない場合や、内面の測定の場合においては、測定器Mの測定軸と方向が一致した位置に別の測定器(測定子)を働かせて、その測定値

(a) Rotary table

(b) Optical index head (Leitz)

Fig.3 Set up of the measuring device

から偏心項と、この方法で求められた回転誤差を除去すれば、目的が達せられる。

3. 測定装置および実験

図3が図2を具体化したものであり、長さ測定器は1目盛が $0.1 \mu\text{m}$ の電気マイクロメータ(三豊製作所)、回転装置は工作機械用円テーブルとライツ光学的精密割出し台の2つを使って、直径約 200 mm の円筒表面(図4)を測定した。表面の加工は旋削と超仕上の2種類である。試料円筒は 1° ずつ回転させて各測定器の読みを求めてその値を式(3)に代入して各回転位置の計算値を求めた。長さ測定器を図2の配置に保持するための保持具(図5)を製作したが、その保持角度の精度は3次元測定機(三豊製作所)で測定して表2のようであった。

Table 2 Angle errors

θ	$\Delta \theta$
60°	-0.13°
90°	0.39°
120°	0.36°
135°	0.10°

Fig.4 Cylindrical specimen

Fig.5 Holder of the electric micrometers

4. 測定結果

4.1 工作機械用円テーブルによる測定結果

図4に示す試料を図3に示した円テーブルの上に乗せて、平面測定子をもった電気マイクロメータで円筒形状を測定し、図6の結果を得た。この試料円筒の最大ひずみは約 $6\mu\text{m}$ である。これは電気マイクロメータ(M)1個による測定値を式(3)の各項に相当するように値をシフトさせたものを使って計算値を求めている。これは式(3)の計算値の誤差について吟味するためにに行った基礎的な測定実験である。

この試料円筒に含まれている周波数成分の振幅を求めると、第2項が $0.5417\mu\text{m}$ 、第60項が $0.0199\mu\text{m}$ 、第100項が $0.0102\mu\text{m}$ と小さくなっていた。

旋削加工された円筒を図2に示す測定器群で測定し図7の結果を得た。

4.2 精密割出し台による測定結果

旋削試料円筒を精密割出し台(Leitz社)に取り付け、図2に示す測定器群で測定し、図8の結果を得た。

mは測定器Mのみによる測定値を、Fは式(3)による計算値を、そしてNOISEは $\{(m-F) - \text{偏心項}\}$ をそれぞれ示すものである。

5. 考察

5.1 計算式(3)の吟味について

図6は測定器Mのみによる測定値を測定器A1, A2などによる測定値となるように、適当にシフトさせて

Fig.6 Test of the formula(3)

Fig.7 Roundness errors and rotating errors in the specimen (by rotary table)

Fig.8 Roundness errors and rotating errors in the specimen (by optical index head)

測定器による測定値を作り、それらを合成したもので計算した値Yがどうなるかを示したものである。両者の形状は良く一致していると思われる。他の (m-F), NOISE などから判断しても式 (3) は形状を表すものとして十分利用できることが分かる。ここで、このNOISE に値が存在するのは測定器D1とD2の値が 0.5° ずれたことと計算誤差とが考えられる。

Fig.9 Polar diagrams of roundness errors

5. 2 形状測定について

式 (3) で求められた計算値を円形チャートに記録して、この試料円筒の形状と考えられるかどうかを真円度測定機 (Talyrond) による測定結果と比較してみるとよく一致している。ただ Talyrond は測定試料の傾きによって精円に測定することがある。

この場合の電気マイクロメータの測定子の先端は平面であるが、円筒表面のひずみが小さいので、測定値の形状誤差への影響は非常に少ない。ひずみの大きい場合は球面測定子による測定値から、図2の測定器群で求められた回転誤差を除けば正しい形状が求められる。また同じ試料円筒を異なる回転装置、工作機械用の円テーブル (図7) と精密割出し台 (図8) を使って測定した結果を比較してもその形状はよく一致しているので、この方法によれば回転精度に関係なく形状測定ができると考えられる。(図9)

5. 3 回転装置の回転精度について

式 (3) により求められた値は回転誤差を含まないものであるということが図6に示す結果 (NOISE) によってわかったので、この計算値を図2に示す測定器Mのみから得られる測定値mから除去すれば、それが回転誤差を示すものと考えられる。すなわち回転精度が求められることになる。図に示されたNOISE のグラフがこれに相当する。

ただ、この NOISE の値には計算誤差、測定器の取付誤差、さらに各測定器の器差、読み取り誤差などが含まれていると考えられるので、これが回転精度だけを表すものではないが、図7、図8の違いによって、2つの回転装置にはその回転精度が異なっていたことが理解できる。

5. 4 測定器の配置について

図2に示す配置は図1における θ の値が $60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ および 180° に相当するが、これらの値によって利用される倍率 f の値は0または1以上であり、測定感度が高く、形状の周波数成分に対する周期が短くなり、計算式 (3) を拡張するにも便利である。他の角度位置におくことも考えられるが、周波数 100 項までを採るならばこれで十分であろう。

なおここでは角 θ の2等分線の方に測定器Mを配置し、それを基準に形状を求めている。それ以外の方向に配置した場合についての式²⁾も考えられるが、それを適用して式 (3) で求められなかった 47 と 49 の成分を図2の配置で求めることは不可能である。それは測定器を追加して $\theta = 52.5^\circ$ の位置におけば $f = 2$ で求められる。さらにこのように10個の測定器を使っていることから非常に多くの組合せ測定値が得られると考えられるが、本方法以外では計算式 (3) が簡単なものとならず、目的達成が困難になる。

5. 5 測定器の測定軸方向の零点調整について

図2の M と A1 と A2 から得られる測定値 a は式 (4) で計算されるから、たとえば a_1 に最初の零点調整誤差 δa_1 が存在しても、この δa_1 は $\bar{a}$ の中に含まれるため、 a には零点調整誤差は含まれなくなる。他の測定値 m と a_2 についても同様である。そして M と E1 の場合についても同様である。つぎに M と B1 と B2 から得られる測定値 b は、式 (5) の値から求められるフーリエ級数のある周波数成分だけを考えるのであるから、測定値 m と b_1 と b_2 とに含まれる不変的な誤差 (零点調整誤差) は全く含まれないことになる。同じ理由が他の測定器 C1, C2, D1, D2 に適用される。結論として零点調整は問題にならない。

5. 6 測定器の配置の相対角度について

図2の M, A1, A2 に関して、A1 に角度誤差 $\delta \theta$ があるときの測定値 a は

$$a = m + a_2 + a_1 \{ 1 - (\sqrt{3}/8) \cdot \delta \theta \} - \bar{a}$$

となり、測定誤差 δa は

$$\delta a = (\sqrt{3}/8) \cdot \delta \theta \cdot a_1 \quad (9)$$

Fig.10 Spectrum of the cylindrical surface cut by a single point tool

となる。この誤差を $0.1 \mu\text{m}$ にするためには a の最大値を 1 mm とすれば、 $\delta \theta$ は約 $95''$ となる。さらに式 (3) では $a/3$ として扱うので、3 倍の角度調整でよいことになり、それは約 $5'$ となる。他の測定器についてはこの場合より大きい角度であるから、角度調整はゆるくてよい。

5. 7 測定器の相対角度誤差による倍率 f の変化について

倍率 f は式 (2) で与えられ、半角誤差 $\delta(\theta/2)$ による倍率変化 δf は式 (2) を微分することによって求められる。

すなわち

$$\frac{-\delta f}{f} = \frac{n \sin n(90^\circ + \theta/2)}{\sin(\theta/2)} + \frac{\cos n(90^\circ + \theta/2) \cos(\theta/2)}{\sin^2(\theta/2)} \quad (10)$$

となる。

この式 (10) の第 2 項は使用する角 θ の関係で 4 より大きくなる心配はないが、第 1 項は n のために大きくなる可能性がある。この項について具体的数値を代入して、その大きさを確かめると以下ようになる。

すなわち $\theta = 60^\circ$ 、 $n = 30$ 、 $\delta(\theta/2) = 0.5^\circ = 0.5 \cdot \pi/180 \text{ rad}$ のとき、 $\delta f = 0.55$ となる。

しかし $\delta(\theta/2)$ はさらに小さくして、 $0.05^\circ = 3'$ 程度の高精度にすることは困難でないのだから倍率誤差も小さくできる。

5. 8 試料円筒形状の周波数成分について

ここでは周波数成分を 100 項までとしているが、一般的にはどのくらい高次数まで考えねばならないか調査する必要がある。この旋削による試料円筒の山数 (周波数) 成分を 100 項まで求めたものが図 10 である。

6. 結 論

- (1) 3 点法真円度測定法を複数に利用して円筒の形状測定をすれば、回転装置の回転誤差を含まない形状測定ができる。すなわち、回転装置の回転精度には関係なく精密な円筒形状測定ができる。
- (2) 測定された形状を基準にして回転装置の形状測定時の回転誤差を求めることができる。
- (3) 形状測定時の回転誤差を除去することにより小径の円筒形状や内面形状の測定が精密に行える。
- (4) 半円のような完全な円形でないものでも、それを乗せている回転台の回転誤差を求めることができるので、それらの形状測定もできる。

この研究に対して、特にフーリエ解析の計算プログラムで協力していただきました豊橋技術科学大学助教授石原弘一氏、高松高専助教授 山内庄司氏、さらに測定装置の製作に携わって下さいました高松高専の技官佐藤吉春氏、金本勝行氏、佃芳行氏、寺嶋昇氏に厚く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) K. Nunome, M. Tsukamoto, T. Yatagai and H. Saito: Interferometer for Measuring the Surface Shape of a Ball Bearing Raceway, Appl. Opt., 24, 22, (1985) 3791.
- 2) P. E. Klingsporn: Use of a Laser Interferometric Displacement-measuring System for Non-contact Positioning of a Sphere on a Rotation Axis through its Center and for Measuring the Spherical Contour, Appl. Opt., 18, 16, (1979) 2881.
- 3) J. A. Lipa and G. J. Siddall: High Precision Measurement of Gyro Rotor Sphericity, Prec. Eng., 2, 3, (1980) 123.
- 4) 小松 聡: 非球面形状測定に関する基礎的研究, ELAN, 04 (1987) 66.
- 5) 塚田忠夫: 形状測定の現状と問題点, 機械技術, 33, 15 (1985) 50.
- 6) J. B. Bryan: A New Instrument for Axis Rotation Metrology, Ann. CIRP, 34, 1, (1985) 439.
- 7) 青木保雄, 大園成夫: 3 点法真円度測定法の一展開, 精密機械, 32, 12 (1986) 831.
- 8) 米津栄: V ブロック式真円度測定法, 精密機械, 19, 8 (1953) 307.
- 9) A. J. T. Scarr: Metrology and Precision Engineering, McGraw-Hill, New York, (1967).
- 10) 和田 尚: 精密測定演習, 産業図書 (1967).
- 11) 園崎昭八, 藤原晴夫: 真円度向上のための円筒加工法, 精密機械, 43, 10 (1977) 1167.