ソフトウェアデータムによる真円形状測定*

—1 本の変位センサを用いる簡便な測定法の提案—

花岡浩毅** 山崎 宏*** 宇田 豊† 島田尚一† 清野 慧††

Measurement of Roundness-Error Profile Applied Software Datum Method
- A Convenient Method for Factory Site using Single Displacement Sensor -

Hiroki HANAOKA, Hiroshi YAMAZAKI, Yutaka UDA, Shoichi SHIMADA and Satoshi KIYONO

In the field of roundness-error measurement, a lot of methods applying the software datum are well known, such as the reversal method, the 3-point method, and the multi-step method, etc. However, some of these methods are not practically used at factory site due to complicate data acquisition and expensive sensor system. In this paper, the merits and demerits of various software datum were examined. Based on the results, a new method convenient for factory site was proposed combining the specimen sifting method using single displacement sensor with the data interpolation method by superimposing of phase sifted discrete profile data. Sufficient data density equivalent to the reversal method and multi-step method is obtained by the method proposed. The radial profile measured by the method is coincided with that by a commercial roundness measuring machine.

Key words: roundness, profile, metrology, roundness measurement, software datum, data density

1. 緒 言

反転法, 3 点法, マルチステップ法等と呼ばれる方法で構築されたソフトウェアデータム (以下 S データムと略記) を基準に用いた真円形状測定法は多く知られている^{1)~3)}。なお, ここでいう真円形状とは, 真円からの偏差の形状, すなわち真円度の元になる回転角を変数とする関数を意味する。しかし, それら S データムは, 生産現場ではあまり実用されていないように思う。その原因として, 手数が多くて面倒である, 複数のセンサが必要となりコストがかかりすぎる, 種々の方法の得失が判らない, などがあげられる。使用するセンサを 1 本に限っても, 反転法, 多点法, マルチステップ法がある。多点法の代表である 3 点法を 1 本のセンサで実施して, 高い能力があることを実証した研究がある⁴⁾。しかし, この手法は, センサをシフトするための治具が必要で, 生産現場向きではないと思われる。

本研究は, 生産現場で必要とされる少なくとも 10 次の回転周波数まで測定できること, 現場の技術者が簡便に利用できる方法であること, 工作機械等の繰返し運動精度の範囲内で最高の精度を期待できること, 真円度測定機に比べて遜色のないデータ密度を持っていること, などの条件を満足できる実用技術の開発を目的としている。本報では, 各種 S データムの得失を比較検討した結果を踏まえて, 試料形状の差分を得る新しいシフト法と, データ密度を上げるための新しいデータ処理法を提案する。

2. 1 本の変位センサで構築できる S データム

2.1 半径法

図 1 (a) は, 半径法による真円形状または回転運動誤差を測定する際の試料と回転軸とセンサの配置を示す。後の図と関連させるため, ●で試料と回転軸の位相関係を示す。軸の半径方向運動誤差の x , y 方向成分はそれぞれ $E_x(\theta)$, $E_y(\theta)$ で, 試料の真円形状は $f(\theta)$ で表されるものとする。そのとき, センサの出力は, オフセット等を省略して次式で表される。

$$m_1(\theta) = f(\theta) + E_{x1}(\theta) \quad (1)$$

変数の添字は, 各要素の配置状態との関連を示している。

2.2 直径法

図 1 (b) は図 1 (a) のセンサを, 軸方向のオフセットも無く, 正確に 180° 反転した位置に置いた状態を示す。このときのセンサ出力は次式で与えられる。

$$m_2(\theta) = f(\theta + \pi) - E_{x2}(\theta) \quad (2)$$

真円形状は, 式(1), (2)の和から,

$$m_1(\theta) + m_2(\theta) = f(\theta) + f(\theta + \pi) + \{E_{x1}(\theta) - E_{x2}(\theta)\} \\ = D(\theta) + \Delta E_x(\theta) \quad (3)$$

となるので, 試料直径 $D(\theta)$ の変化を示す θ の関数となり, その基準の誤差は $\Delta E_x(\theta)$ となる。このとき, 運動に繰返し誤差がなければ $\Delta E_x(\theta) = 0$ となり, $D(\theta)$ の測定基準にとって完全な S データムとなる。また, 運動誤差の測定のために両式の差を求めると,

$$\{m_1(\theta) - m_2(\theta)\}/2 = \{E_{x1}(\theta) + E_{x2}(\theta)\}/2 + \{f(\theta) - f(\theta + \pi)\}/2 \\ = E_{x\text{mean}}(\theta) + \Delta D(\theta) \quad (4)$$

となる。これは, 直径に θ の関数として変化がなければ, 理想の真円を基準とした半径法と同じ結果になることを示している。

2.3 反転法

図 1 (c) は図 1 (b) の状態からさらに試料を 180° 回転して配置した場合, 図 1 (a) との関係で言えば, センサと試料と一緒に反転した状態を示す。このときのセンサ出力は, 反転が理

* 原稿受付 平成 25 年 12 月 8 日

掲載決定 平成 26 年 3 月 31 日

** 正 会 員 ㈱ハーモニック・ドライブ・システムズ徳高工場 (長野県安曇野市穂高牧 1856-1)

*** ㈱ハーモニック・ドライブ・システムズ徳高工場 (長野県安曇野市穂高牧 1856-1)

† 正 会 員 大阪電気通信大学 (大阪府寝屋川市初町 18-8)

†† 正 会 員 精密測定研究所 (宮城県仙台市青葉区片平 1-2-35)

想的に行われれば次式のようになる。

$$m_3(\theta) = f(\theta) - E_{x3}(\theta) \quad (5)$$

式(1)と式(5)から、次の関係を得る。

$$\{m_1(\theta) + m_3(\theta)\}/2 = f(\theta) + \Delta E_x(\theta)/2 \quad (6)$$

$$\{m_1(\theta) - m_3(\theta)\}/2 = E_{x\text{mean}}(\theta) \quad (7)$$

となる。したがって、式(6)から、真円形状は2回の運動繰返し誤差の半分の誤差を含むだけのSデータにより、半径法で測定されることになる。また、式(7)から、運動誤差の反転前後2回の平均は1次的な誤差の入らないSデータで測定されることになる。

2.4 回転シフト型2点法

2.4.1 試料のシフトによる差分計測

図1(d)は図1(a)の状態から試料を角度 ϕ だけ回転させた状態を示す。このときのセンサ出力は、次式で与えられる。

$$m_4(\theta) = f(\theta - \phi) + E_{x4}(\theta) \quad (8)$$

式(1), (8)より、

$$m_1(\theta) - m_4(\theta) = f(\theta) - f(\theta - \phi) + \Delta E_x(\theta) \quad (9)$$

$$m_4(\theta + \phi) - m_1(\theta) = E_{x4}(\theta + \phi) - E_{x1}(\theta) \quad (10)$$

となる。式(9)から、真円形状の間隔 ϕ での差分を得るためのSデータは繰返し誤差 ΔE_x を持つことが判る。また式(10)から、繰返し誤差を無視すると、誤差のないSデータの下で回転運動誤差の間隔 ϕ での差分が得られる。厳密には、得られた差分には、運動の繰返し誤差の間隔 ϕ での差分が誤差として加わる。

2.4.2 センサのシフトによる2点法と3点法

センサのみをシフトして3か所での測定をすると3点法が成立する。図1(a)の測定結果と、次式で与えられる図1(e)の2番目、3番目のセンサ位置での出力も用いる。

$$m_5(\theta) = f(\theta + \phi) + E_{x5}(\theta)\cos(\phi) + E_{y5}(\theta)\sin(\phi) \quad (11)$$

$$m_6(\theta) = f(\theta - \phi) + E_{x6}(\theta)\cos(\phi) - E_{y6}(\theta)\sin(\phi) \quad (12)$$

これらと式(1)を用いて、 x 方向の運動誤差 $E_x(\theta)$ を消去する形で、隣り合うセンサの差動出力は次式で与えられる。

$$\mu_1(\theta) = m_5(\theta) - m_1(\theta)\cos(\phi) \quad (13)$$

$$\mu_2(\theta) = m_1(\theta)\cos(\phi) - m_6(\theta) \quad (14)$$

形状の2階差分に相当する $\Delta\mu(\theta)$ は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta\mu(\theta) &= \mu_1(\theta) - \mu_2(\theta) \\ &= f(\theta + \phi) - 2f(\theta)\cos(\phi) + f(\theta - \phi) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\phi = 2\pi/N$ として、 $\theta_k = (k-2) \cdot (2\pi/N)$, ($k = 1 \sim N$)とおく。さらに $\theta_1 = -\phi$, $\theta_2 = 0$ で $f(\theta) = 0$ の初期値を与えて、次のような漸化式を得る。

$$f(\theta + \phi) = \Delta\mu(\theta) - \{f(\theta - \phi) - 2f(\theta)\cos(\phi)\} \quad (16)$$

試料のシフトでは2点法が成立したが、センサのシフト法では、厳密には2点法が成立しない。式(11), (12)の出力から差分を求めると次式のようになり、明らかに y 方向の運動誤差が残る。

$$\begin{aligned} m_5(\theta) - m_6(\theta) &= f(\theta + \phi) - f(\theta - \phi) \\ &\quad + \{E_{y5}(\theta) + E_{y6}(\theta)\}\sin(\phi) \end{aligned} \quad (17)$$

例えば、センサ間隔 $2\phi = 20^\circ$, 10° を選ぶと、このSデータには y 方向の運動誤差成分が各々35%, 17%程度残ることになる。

2.4.3 センサと試料をシフトする運動誤差の差分測定

運動成分を試料に固定した座標で見ると、すなわち角位置 θ での半径方向成分 $E_r(\theta)$ とそれに直交する方向に分けて考えると、運動誤差測定のためのSデータが成立する。図1(d)において試料とともにセンサを同じ量 ϕ だけシフトすると、1番目、2番目のセンサ位置でそれぞれ式(18), 式(19)が得られる。

$$m_7(\theta) = f(\theta) + E_{r1}(\theta) \quad (18)$$

$$m_8(\theta) = f(\theta) + E_{r2}(\theta + \phi) \quad (19)$$

両式の差分を採ると次のように θ 方向の運動誤差 $E_r(\theta)$ に関して、間隔 ϕ での差分が得られる。

$$\begin{aligned} m_8(\theta) - m_7(\theta) &= E_{r2}(\theta + \phi) - E_{r1}(\theta) \\ &\equiv E_r(\theta + \phi) - E_r(\theta) \end{aligned} \quad (20)$$

$E_r(\theta)$ がわかると、次のように $E_x(\theta)$, $E_y(\theta)$ が求まる。

$$E_x(\theta) = E_r(\theta)\cos(\theta) \quad (21)$$

$$E_y(\theta) = E_r(\theta)\sin(\theta) \quad (22)$$

なお、 $\phi = 2\pi/N$ として、このシフトを $N-1$ 回続けて全データの和を採るとマルチステップ法が成立する。

2.5 差分データからの形状復元

目的形状の差分を測定して、その測定結果から元の詳細なデータを復元する方法として逆フィルタリング法がある。シフト間隔 ϕ として、2回の測定の出力を次のように表す。

$$m_a(\theta) = f(\theta + \phi/2) + E_x(\theta)\cos(\phi/2) \quad (23)$$

$$m_b(\theta) = f(\theta - \phi/2) + E_x(\theta)\cos(\phi/2) \quad (24)$$

運動誤差を消去して得る差動出力は、

$$m(\theta) = m_a(\theta) - m_b(\theta) = f(\theta + \phi/2) - f(\theta - \phi/2) \quad (25)$$

Fig.1 Principle of various measuring methods

ここで、角周波数 ω (1 回転を基本周期とする波の数) を用いて入力形状を $f(\theta) = e^{i\omega\theta}$ とすると、

$$m(\theta) = f(\theta)(e^{i\omega\phi/2} - e^{-i\omega\phi/2}) \\ = f(\theta)H_\phi(\omega) \quad (26)$$

このように真円形状の関数 $f(\theta)$ の間隔 ϕ での差分出力と元の関数との間には、 ϕ と角周波数 ω で決まる一定の関係がある。式(26)の $H_\phi(\omega)$ を周波数伝達関数と呼ぶ。この場合の伝達関数 $H_\phi(\omega)$ は、オイラーの公式を用いて次のように表せる。

$$H_\phi(\omega) = (e^{i\omega\phi/2} - e^{-i\omega\phi/2}) = 2i\sin(\omega\phi/2) \quad (27)$$

差分の伝達関数が判ると、一回転分の差分データのフーリエ級数を求めて、そのフーリエ成分ごとに伝達関数の逆数を掛けて元の関数のフーリエ成分を知ることができる。その結果を逆フーリエ変換すると求める元の関数が求められる。差分等の演算をフィルタリング操作と考えると、この復元操作を逆フィルタリングと呼ぶ。この時、伝達関数の逆数をかけるが、式(27)のように伝達関数の絶対値が小さくなる周波数成分がある。この周波数成分を修正すると、この成分に含まれる偶然誤差の部分も拡大されてしまう。この弱点を緩和するには、差分間隔が基本周期または全測定長の整数等分になることを避けるとよい。

ϕ の選び方は、求める形状の周波数構成と演算処理の簡便さを考慮して任意に決めることができる。逆フィルタリング法では、 ϕ は 360° を等分割する角度を選ぶ理由はない。式(27)から判るように、非等分割であれば伝達関数がゼロになる周波数成分は真円形状の構成要素には無くなる。しかし、伝達関数の絶対値が 0.2 以下になる周波数の復元をする場合は、繰返し測定の平均を採るなどして偶然誤差の低下を計るとよい。回転走査なので、繰返し測定回数の増加は容易である。

2.6 各 S データムの得失

直径法は、センサのみを反転移動することで成立するという意味では、最も簡便な S データムの構築法である。しかし、一般の工作機械の回転軸において対向位置にセンサを設置する空間が確保できるかどうかという問題がある。また、2つのセンサの位置で考えると偶数次の波は同位相となり、奇数次の波は逆位相となる。従って、真円形状 $f(\theta)$ に含まれる奇数次の波は式(3)では常にゼロとなる。また、回転運動誤差を求めるための式(4)では $f(\theta)$ 中の奇数次の波が残ってしまう。

反転法は試料もセンサも反転する必要がある、手順はやや複雑になる。空間的には直径法と同様の問題が残る。反転前後のデータの単純な平均や差の半分を採るだけで済むデータ処理の簡便さは魅力的である。構築される S データも、真円形状と運動誤差の 2 回の平均値を求めるため精度は高い。強いて言えば、反転法の能力を最大限に発揮するには、反転前後で形状の同じ位置を測定するために、センサと試料を注意深く反転する必要がある。工作機械上で反転する場合を想定すると、試料の角位置はエンコーダで決めるとして、センサの角位置や、反転前後の軸方向の測定点高さが同じになる(すなわち走査円が同じになる)ように設定するのはそれほど簡単ではない。

試料シフト型 2 点法は、直径法と同様の簡便さを持ち、しかも空間的な拘束を受けにくい。式(9)、(10)は、真直形状測定の場合の逐次 2 点法の基礎式と同様である。このことから、シフト間隔の 1% 程度の誤差は、伝達関数から判断して、結果に重大な誤差をもたらさない⁹⁾。また、センサを固定していることで、差分における運動誤差除去能力は高い。

センサシフト型 2 点法は、直径法と同様にデータ収録手順は簡単である。しかし、式(17)に示すように y 方向の運動誤差が

S データに誤差として加わる。それを 10% 以下にするためには、センサ間隔は高々 5° に制限しなければならない。このとき、低周波成分に対する感度が悪くなるという欠点が見れる。

センサを 3 か所に置く 3 点法は、3 本のセンサが利用できるときに威力を発揮する。センサ 1 本での 3 点法の場合は、試料シフト法の簡便さと精度にかなわない。また、3 点法は 2 回差分を採る段階で測定対象の量の変化が小さくなってしまう。センサの能力に余裕がないと、特に低周波の形状成分に関しては感度が低下して測定しにくい。

3. 高密度データが得られる新しい試料シフト型 2 点法

前章で述べたように試料シフト型 2 点法は、比較的簡便に高い精度を実現できるが、データ密度は低い欠点がある。もし、回転走査によりデータを取得するならば、逐次 2 点法で位相の異なる逐次折線群を得ることは容易である。このようにして得た逐次折線群を合理的な基準の下に重ね合わせ、補間により高密度のデータを生成する新しいデータ処理方法を併用し、試料シフト型 2 点法(以下シフト法)を考案した。

試料シフト角 $\phi = 2\pi/N$ として $k\phi$ ($k = 0 \sim N-1$) のデータを得ると、式(9)の運動誤差を省略して次の漸化式で元の形状上の間隔 ϕ での点を得られる。ただし、 $f(0) = 0$ とする。

$$f(k\phi + \phi) = f(k\phi) + \{m_4(k\phi) - m_1(k\phi)\} \\ (k = 0 \sim N-1) \quad (28)$$

サンプリング間隔を ϕ/M (M は整数) とすれば、位相の異なる M 本の逐次折線が得られる。この M 本の逐次折線を重ね合わせて補間する基準に、正弦波の等分割点での平均値の性質を使う。真円形状は、有限フーリエ級数に展開して考えることができる。そこで、1 回転を N 等分するサンプリング点を、

$$x_k = x_0 + k/N, \quad (k = 1 \sim N) \quad (29)$$

また、 n 次の周波数(1 回転に n 山の波)を持つ成分を次式で表す。

$$y_n = A\sin(2\pi nx) + B\cos(2\pi nx) \quad (30)$$

n/N が整数のときは、 N 点全てで y_n の位相が同じになるので 1 回転を等分する N 点での y_n の平均値 $y_{n\text{ave}}$ は、

$$y_{n\text{ave}} = A\sin(2\pi n\phi_0) + B\cos(2\pi n\phi_0) \quad (31)$$

となる。すなわち $y_{n\text{ave}}$ は一定値で、その値は、 $n x_0$ で決まる。

n/N が非整数のときは、 k 番目での位相が $2\pi n(k/N)$ となり、 n 次の波に一周期の中に逐次折線の節点が均等に配置され、 y_n の平均値には次の関係が成立する。

$$y_{n\text{ave}} = 0 \quad (32)$$

従って、 x_0 が一回転に相当する、 $x_0 \sim x_0 + 1$ の間を連続的に変化すると、 N 等分した点での平均値 $y_{n\text{ave}}$ は、 $n = m \cdot N$ (m は整数) の n 次成分のみが一回転に n 回同じ変化を繰り返す正弦波として現れる。この特異成分を除いて平均値がゼロになる性質は、真円形状測定におけるマルチステップ法で利用されている性質であり、合成の基準としても有効である。

試料シフト角 ϕ は、1 周期を等分割するように選ぶ必要がある。例えば、 $\phi = 30^\circ$ を選べば、1 回転を 12 等分する間隔での差分が得られる。その差分を逐次加えると真円形状が離散的な点を結ぶ折線として求まる。図 2 にシフト法による処理過程の例を示す。サンプリング間隔が 3° で、シフト間隔 $\phi = 30^\circ$ の逐次 2 点法の折線を、初期値をゼロとして描くと図 2 (a) のようになる。さらに、各逐次折線の平均高さをゼロとなるように初期値に高さ方向のオフセットを与えたのが同図 (b) である。もちろんデータ収録の間隔を密にすると形状も密度の高いデー

タで表すことができる。ただし、この平均値ゼロの性質は、シフト間隔の波長をもつ周波数成分とその整数倍の次数の成分で成立しない。そのため関連付けの過程で、12次とその整数倍次の高調波成分の存在は誤差要因として残る。

シフト法を用いて構築される真円形状の精度は、生産現場で問題にする周波数範囲では、反転法と同程度の精度が期待できる。データ処理は直径法や反転法に比べて煩雑だが、計算機を利用すれば大きな障害ではない。運動誤差を求めるためのセンサと試料の同時シフトも同様である。狭い空間範囲の利用で x, y の2方向の運動誤差を測定できるのは魅力的である。

4. 検証実験

4.1 実験方法

前章までの検討を踏まえ、直径法、反転法、本研究で新たに提案したシフト法の3種類のSデータ構築法について同一装置で測定評価を実施した。図3に測定システムの概略を示す。実験では、回転テーブルとしてダイレクトドライブモータを用い、変位センサとして分解能 $0.01\mu\text{m}$ の電気マイクロメータを用いた。測定は、テーブルの出力軸上に被測定円板を設置し、測定対象物の外周へ変位センサを接触させ、テーブル回転と同期させて変位センサの値を取得して行う。実験では回転速度を6rpmに設定し、データ取得は60Hzに設定した。その際、ノイズの影響を除去するため0.15sec幅で移動平均処理を行った。

各Sデータ構築法の得失を吟味するため、形状の異なる3種類の試料で評価した。各試料は外周形状を円形状、2次優位形状（以下楕円形状と呼ぶ）、3次優位形状（以下三角形と呼ぶ）に加工した。これら試料の市販真円度測定機による測定結果を図4に示す。なお、シフト法ではシフト角を 30° に設定した。

4.2 実験結果

一般に上述のSデータは、センサを1つで実現するためには、繰返し走査測定をする必要がある。従って、走査運動の繰返し誤差がSデータの精度を決める。予め、図1(a)の状態ではセンサと試料を配置して、繰返し走査測定をすると、図5のようになった。計算でテーブル回転に同期した成分を取り除くと、2回転の周期性を持つ誤差が確認できる。これはテーブルに組み込まれた転がり軸受の転動体の影響であると推測できる。そこで、本実験では、回転を奇数回転、偶数回転と区別してデータ処理を行うことにした。一般に、繰返し性が不足する場合は、 K 回転分のデータを平均して、もう一度 K 回転の平均値を比べて、必要な繰返し性が確認されれば、 K 回転分の平均値を基本データとする必要があるが、ここでは図5のように十分な繰返し性が認められるので、 $K=1$ としてデータ処理をした。

実験では、テーブル上への試料設置の際に可能な限り心ずれを生じないように配慮したが、完全に心ずれを除去できないため計算により1次の誤差を除去した。このようにして、各Sデータ構築法により求めた各試料の形状を図6に示す。

5. 考察

直径法では真円形状に含まれる奇数次の波は常にゼロとなり、理論的に等径ひずみ円を正しく測定できない。実際の測定においても図6(c)で見られるとおり、三角形形状試料では三角形の形状成分が抜け落ちていることが確認できる。一方、反転法とシフト法の結果はほぼ重なりっており、真円度測定機の結果とよく一致している。この結果より、シフト法で得た逐次折線に合成法を適用した結果は、精度の上で反転法と十分比肩できること

がわかる。これは楕円形状や三角形の試料についても言えるので、顕著な特定の高周波成分を含まない限り、真円形状は10次成分までを使えば十分表現できる。これは生産現場でいわれ

(a) 10 profiles obtained with different starting angle

(b) Superimposed profile

Fig.2 Procedure of data interpolation by sifting method

Fig.3 Experimental measuring system

Fig.4 Error profile measured by a commercial measuring machine

Fig.5 Repeatability of radial figure profile

ている、10 次までの成分が含まれれば、ほとんどの場合の必要は満たせる、ということを表付けている。

シフト法では、例えば図 7 の三角形状試料のフーリエ変換結果に示すように、試料のシフト角に起因する誤差成分が完全に欠落してしまう。本実験では、シフト角を $\phi = 30^\circ$ に設定したので、 $360/30=12$ 次とその高調波成分の形状成分が抜け落ちる。ただし、これらの特異成分（12, 24, 36 次）を除くと反転法の結果と良い一致を示している。これら 2 つの方法と比べて、反転法は理論上欠落する形状成分が存在せず、全ての試料において正しく形状評価が出来ている。なお、シフト法における特異成分の欠落という欠点を克服するためには、異なる 2 つのシフト角で測定して、データを補完する方法が考えられる。

生産現場での使用を考慮すると、実際の工作機械内などでは、センサ位置を反転設置できない場合も想定される。シフト法は、作業者に近い側で位置を固定したセンサによりデータ取得が可能であるため作業性に優れる。また、実際の形状には高次の重要な形状誤差成分が含まれないことが多く、シフト角を適切に選択することで 1 回の測定で十分な結果が得られると考えられる。データの扱いも比較的容易であるため、提案した合成法を用いるシフト法は生産現場向きの測定手法であるといえる。

以上の検討をもとに、センサ 1 本で実施する各手法の得失をまとめると表 1 のようになる。なお、使いやすさには、データ収録プロセスでの試料やセンサのハンドリング等の手順の多少、センサ配置の空間的拘束性を重視した。データ処理は、PC と準備された処理プログラムを利用することを前提として、使いや

Fig.7 Difference in amplitude of various frequency components among the different methods

Table 1 Characteristics of software datum method for roundness measurement

Method		Accuracy	Usability
Diametric method		Poor	Good
Reversal method		Enough	Good
2-point method	Sensor sift	Poor	Best
	Sample sift	Enough	Best
	Hybrid	Enough	Good
3-point method		Enough	Good

すさの判定の重要なファクターとしなかった。また、センサよりも試料の回転シフトが容易であるという、生産現場の判断を加味している。精度については、10 次以下の回転周波数成分が正しく得られるかどうかを判断理由にした。

6. 結 言

真円形状測定の S データ構築法として、データ密度を向上するデータ処理法を試料シフト型 2 点法に併用した新しいシフト法を提案し、簡便で高い精度が得られる生産現場向けの方法として有効性を確認した。結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 提案の合成法を併用することで、シフト法が反転法と同等のデータ密度を実現可能であることを示した。
- (2) 欠落周波数の最低次数が比較的低い、シフト角が 30° （最低次欠落周波数が 12 次）の場合でも、一般の円形状試料では反転法と遜色ない精度で真円形状が得られる。
- (3) シフト法は、空間的理由などのためにセンサシフトが難しい場合、反転法に代わる現場向きの測定法になりえる。
- (4) シフト法でシフト角に起因する形状成分の欠落が問題となる場合には、異なる 2 つのシフト角で測定してデータを補完することができる。

参 考 文 献

1) 清野：ソフトウェアデータを用いた形状評価，精密工学会誌，**61**，8（1995），1059。
2) 後藤ほか：真円度測定機の誤差特性の解析，精密機械，**44**，10（1978），1265。
3) 塚田ほか：円筒形状測定における系統的誤差の補正とその評価，設計製図，**23**，9（1988），291。
4) Eric R. Marsh et al. : A comparison of reversal and multiprobe error separation, Precision Engineering, **34**，1（2010），85。
5) 清野ほか：平面のうねり形状の測定に関する研究（第 2 報），精密工学会誌，**54**，3（1988），513。

Fig.6 Difference in error profile obtained by different methods