

## 三次元測定機を用いたボールプレート測定における不確かさ算出について

機械材料科 機械スタッフ 大澤洋文 木野浩成\* 柳原 亘

## Estimation of Measurement Uncertainty for Ballplate with the CMM

Hirofumi Oosawa, Hironari Kino and Wataru Yanagihara

We participated in the round robin test on ballplate calibration with Intellectual Infrastructure Committee, one department committee belonging to Council of Promotion for Industrial Technology Collaboration. Ballplate was measured with a CMM, and with stepgauge using substitution and reversal method. And then, we estimated the Measurement Uncertainty.

## 1. はじめに

三次元測定機は、対象ワーク上に空間軸を設定し、得られた座標値を演算することにより、対象ワークの寸法や形状を三次元的に測定する装置である。マイクロメータやノギスといった、一般的な測定器具では困難な精密測定を、比較的簡単に、かつ能率的に行うことが出来るため、現在では多くの生産現場に普及しており、製品の精度検査の要となっている。そのため、三次元測定機による測定においてトレーサビリティを確保し、測定値の信頼性を高めるためには、測定の不確かさを評価することが必要不可欠である。

今回、産業技術連携推進会議知的基盤部会計測分科会形状計測研究会で実施された「2008年度ボールプレート持ち回り測定」に参加した。その中で、当センターの三次元測定機を用いて、反転法や長さ標準を用いた補正を行い、より高精度にボールプレートを測定した場合の不確かさを算出した。

## 2. 測定

## 2.1 持ち回り試験

ボールプレートは、三次元測定機のチェック、あるいは、幾何学誤差を算出するゲージとしてドイツを中心として世界中で広く使用されているが、ユーザがボールプレートを使用するに当たり、ボールプレートに出来る限り正確な校正値を付与することが必要である。

ボールプレートの校正は、過去2回の持ち回り試験で校正手法も確立されているが、同時に長さ標準を用いた補正の仕方に影響されやすいことも分かっている。3回目である今回の持ち回り測定では、長さ標準にステップゲージを用いてその影響を確認した。本試験は、当センターを含め、5機関の参加者間でボールプレートとステップゲージを持ち回り、「2008年度ボールプレート持ち回り測定Protocol」<sup>1)</sup>に従い実施された。

なお、本文中の定義のない用語・記号は計測における不確かさの表現のガイド (Guide to expression of uncertainty in measurement : GUM)<sup>2)</sup>による。

## 2.2 測定対象物及び測定量

## (1) ボールプレート

測定対象のボールプレートを図1に示す。また、その仕様は表1のとおりである。

## (2) 測定量

図1におけるボール1を原点、ボール5をX軸上、ボール21をXY平面状にあると仮定した物体座標系に対して、25個のボールの中心座標値を測定した。X軸の正方向はボール1からボール5に向かう方向であり、Y軸はそれに垂直で、ボール1からボール21に向かう方向を正方向とする。X座標、Y座標は、独立に評価した。Z座標値は、今回対象外とした。

\*) 現 繊維高分子材料スタッフ

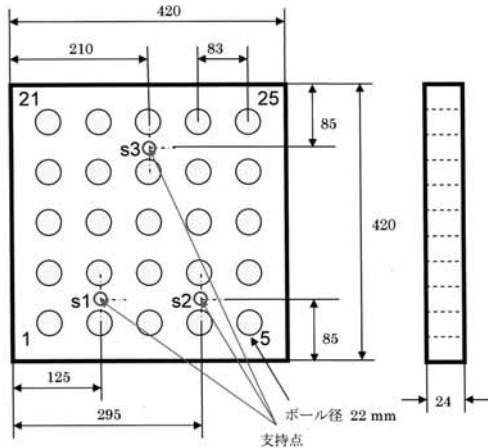


図1 ボールプレート

表1 ボールプレートの仕様

KOBA社製ボールプレート (シリアル番号: 970930)	
サイズ	420mm
最大測定長さ	332mm
呼びボールピッチ	83mm
20°Cにおける熱膨張係数	$11.5 \times 10^{-6} / (K)$
熱膨張係数の不確かさ	$1 \times 10^{-6} / (K)$

2.3 測定環境

測定はすべて、室温 $20 \pm 1^\circ C$ の恒温室で行った。

2.4 使用機器

(1) 三次元測定機

測定に使用した三次元測定機を図2に示す。また、その仕様は表2のとおりである。



図2 三次元測定機

表2 三次元測定機の仕様

機器名	Carl Zeiss社製 UPMC850CARAT	
20°Cにおける測定精度	1軸 (U1)	$0.5+L/900 \mu m$
	空間 (U3)	$0.8+L/600 \mu m$
仕様プローブ	シャフト長	50mm
	先端球径	8mm

(L: 測定長さmm)

(2) ステップゲージ

補正に用いた長さ標準であるステップゲージを図3に示す。また、その仕様は表3のとおりである。

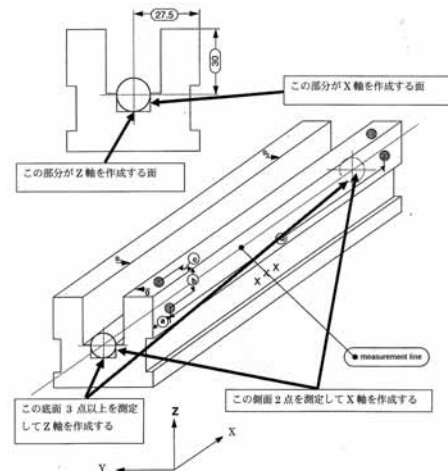


図3 ステップゲージ

表3 ステップゲージの仕様

KOBA社製ステップゲージ(シリアル番号: 200412S232)	
最大測定長さ	620 mm (20 mmごとに校正値を与えられている)
20°Cにおける熱膨張係数	$11.5 \times 10^{-6} / (K)$
熱膨張係数の不確かさ	$1 \times 10^{-6} / (K)$
校正値の不確かさ	$U=2 \times (0.18^2 + (0.75L)^2)^{0.5} nm (k=2)$

(3) 温度計

温度測定には、最小目盛 $0.01^\circ C$ の高精度サーミスタ温度計、D642 (TAKARA TERMISTOR株式会社製) を使用した。

2.5 測定方法

(1) ワークの固定

ボールプレートとともに持ち回った支持台に乗せ、自重のみで固定した。

支持台はボールプレートと図1のS1、S2、S3の3点で接触し、その接触点上面はそれぞれ円錐、V溝、平面であるため、キネマティックに支持できる。

また、物体座標系のX軸及びY軸を、目視により

【報告】

三次元測定機の機械座標系と平行になるようにおいた。

(2) プロービング点

図4のように、ボールプレートの球の極1点と赤道上の4点を測定し、その5つのデータから計算される最小二乗球の中心座標をボールの中心とした。

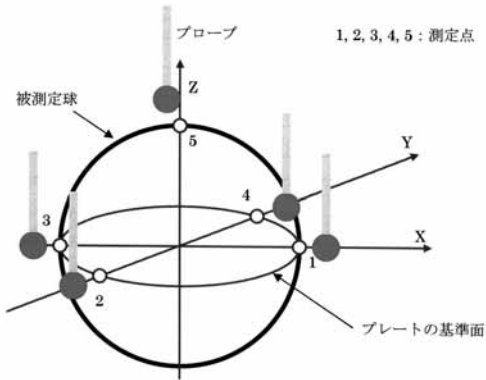


図4 プロービング点

(3) 測定計画

測定は、図5に示す4つのプレートポジション(D0、DZ、DY、DX)において、それぞれ2種類の測定順序(Forward、Backward)で行った。また、ポジションごとに長さ標準の測定を行い、測定結果を補正した。以上を作業員2名(A、B)で各5回(N1~N5)ずつ実施した。

作業員ごとに、ボール1からボール25まで各ボールで上の40個の測定結果の平均をとり、測定値とした。

(4) プレートポジション

図5に示すように水平面における4ポジションで反転法による測定を行った。

ポジションD0はボールプレートの基準ポジションであり、ボールプレートのXYZ軸をそれぞれ三次元測定機の機械座標系のXYZ軸に目視であわせた。

ポジションDZは、基準ポジション(D0)に対してボールプレートを三次元測定機の機械座標系のZ軸の周りに180度回転させた姿勢とした。

ポジションDYは、基準ポジション(D0)に対してボールプレートを三次元測定機の機械座標系のY軸の周りに180度回転させた姿勢とした。

ポジションDXは、基準ポジション(D0)に対

してボールプレートを、三次元測定機の機械座標系のX軸の周りに180度回転させた姿勢とした。

4つの測定値の差は、三次元測定機の誤差そのものを表している。これら4つの平均が反転法による測定結果となり、三次元測定機を持つ誤差特性が互いにキャンセルされ、より高精度な測定結果を得ることができる。

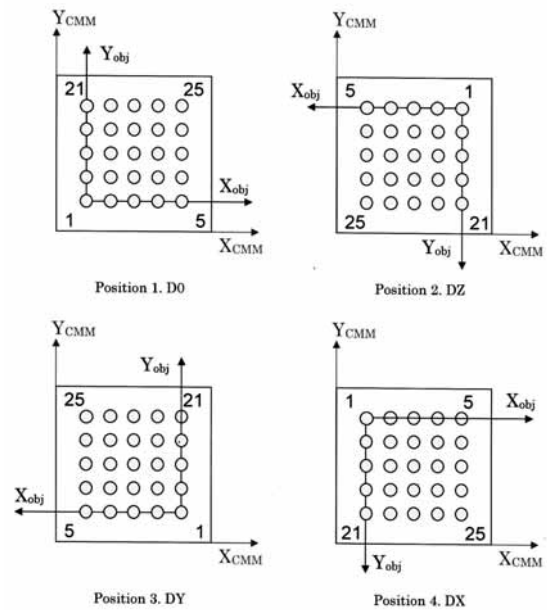


図5 プレートポジション

(5) 測定順序

4つのプレートポジションでの各ボールの測定は、図6に示すように渦巻状に行った。物体座標系の原点から開始し、X軸の正方向に続き、プレートの周辺から中央に向かって中心13番のボールまで順に測定をした(Forward測定)。その後Forward測定と逆の順序をたどり、中心のボールから原点のボールまで全てのボールを再び測定した(Backward測定)。

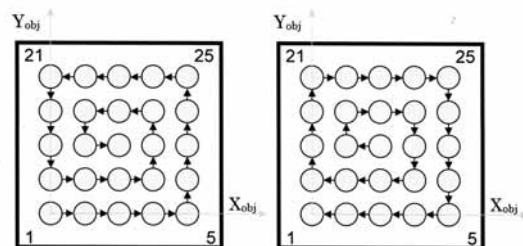


図6 測定順序

(6) 長さ標準を用いた補正

各プレートポジションの測定後に、今回長さ標準としたステップゲージの測定を行った。

ステップゲージの0点を、ボールプレートの原点となる1番のボール付近にあわせ、目視でボールプレートのX軸と平行になるように設置した。

ステップゲージ上に図3に示す座標系を設定し、0から20mmおきに620mmまで測定を行った。

次に、Y軸方向に同様に設置し、測定を行った。

得られたステップゲージの測定結果を校正値と比較し、その差と測定長さとの関係を一次関数で近似し、傾きをスケールファクターとした。このスケールファクターを用いて、プレートポジションごとにボールの中心座標をX座標、Y座標で独立に補正した。

また、ステップゲージの校正値は20°Cの時のものであり、ボールプレートとステップゲージの熱膨張係数の差及び、ボールプレートとステップゲージの温度差が微小なことから、本補正を持って、ボールプレートの測定結果の温度補正とみなした。

(7) 測定のモデル式

三次元測定機を用いた、ボールプレートのボール中心位置 (y) の測定のモデル式を、次の式に表す。

$$y = x \tag{1}$$

ここでxは、作業員A、Bの測定値の平均（最終測定値）である。

また、(1)式に測定誤差等を考慮した測定のモデルは次の式になる。

$$x = \mu + \varepsilon_m + \varepsilon_s + \varepsilon_o \tag{2}$$

$\mu$  : 真値、 $\varepsilon_m$  : 三次元測定機測定にかかる変動、  
 $\varepsilon_s$  : 長さ標準を用いた補正に関する変動、  
 $\varepsilon_o$  : その他の要因に関する変動

3. 結果

3.1 温度測定

室温1箇所、ステップゲージ1箇所、固定用ベース面1箇所、試験期間中、測定間隔1時間で3日間温度測定をした。その結果は表4のとおりであった。

3.2 不確かさの算出

不確かさの推定はGUMに基づいて行った。本測

表4 温度測定結果

ボールプレート	平均温度	20.01°C
	最大温度	20.03°C
	最低温度	19.98°C
ステップゲージ	平均温度	20.05°C
	最大温度	20.07°C
	最低温度	20.02°C
ボールプレートとステップゲージの最大温度差		0.06°C

定の不確かさは、測定長さL(mm)に依存しない項と、依存する項に分けられる。それぞれ評価し、最後にすべての要因の二乗和平方根をとり、合成不確かさとして求めた。

また、以下に述べる要因3、要因4の分散分析には、産総研より配布された計算プログラム「AIST-ANOVA」を用いた。

3.2.1 長さに依存しない項

(1) 要因1 ステップゲージを用いた校正の不確かさ： $u_1$

ステップゲージの測定点全てについて、測定結果と校正値との比較から得られた補正用近似一次関数からの残差を求め、その最大値の95%区間内で測定値が矩形分布していると仮定した。

95%値は、A-X軸 $0.41 \mu\text{m}$ （測定者AによるX軸方向の結果をA-Xと表す。以下同様）、A-Y軸 $0.44 \mu\text{m}$ 、B-X軸 $0.43 \mu\text{m}$ 、B-Y軸 $0.51 \mu\text{m}$ であることから、その最大値を採用すると、

$$u_1 = 0.51 / \sqrt{3} = 0.29 (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

(2) 要因2 三次元測定機に起因する不確かさ： $u_2$

測定機の1軸精度(U1)の定数項内で、矩形分布していると仮定すると、

$$u_2 = 0.5 / \sqrt{3} = 0.29 (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

(3) 要因3 ステップゲージ測定の繰返しに起因する不確かさ： $u_3$

ステップゲージの測定結果から繰返しに起因する不確かさを分散分析で求めた。

繰返しの標準偏差は、A-X軸 $0.30 \mu\text{m}$ 、A-Y軸 $0.14 \mu\text{m}$ 、B-X軸 $0.35 \mu\text{m}$ 、B-Y軸 $0.22 \mu\text{m}$ であり、その最大値を採用すると、

$$u_3 = 0.35 / 1 = 0.35 (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

(4) 要因4 ボールプレート測定の繰返しに起因す

## 【報告】

る不確かさ： $u_4$

ボールプレートの測定結果から、繰返しに起因する不確かさを分散分析で求めた。

繰返しの標準偏差は、A-X軸 $0.26\mu\text{m}$ 、A-Y軸 $0.16\mu\text{m}$ 、B-X軸 $0.17\mu\text{m}$ 、B-Y軸 $0.17\mu\text{m}$ であり、その最大値を採用すると、

$$u_4 = 0.26 / 1 = 0.26 (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

(5) 要因5 作業者の差に起因する不確かさ： $u_5$

作業者AとBの測定値を比較し、その最大差内で矩形分布していると仮定した。

最大差は、X軸 $0.6\mu\text{m}$ 、Y軸 $0.2\mu\text{m}$ であることから、X軸の値を採用し、

$$u_5 = 0.6 / \sqrt{3} = 0.35 (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

### 3.2.2 長さに依存する項

(1) 要因6 ステップゲージの校正の不確かさ：

$u_6(x)$

ステップゲージの校正値に付随する不確かさは、2.4項で記述のとおり、

$$u_6(x) = (0.18^2 + (0.75L)^2)^{0.5} \times 10^{-3} (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

(2) 要因7 ボールプレートの熱膨張係数の不確かさ： $u_7(x)$

ステップゲージおよびボールプレートの熱膨張係数に付随する不確かさは、2.4項で記述のとおり $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ である。また、測定の結果、ボールプレートの温度変化は $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以内であり、その間で矩形分布していると仮定すると、

$$u_7(x) = L \times 0.05 \text{ } ^\circ\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} / \sqrt{3} \\ = 0.029 \times 10^{-3} L (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

(3) 要因8 ボールプレートとステップゲージの温度測定の違いの不確かさ： $u_8(x)$

ボールプレートとステップゲージの温度変化測定の結果から、温度差の最大は $0.06 \text{ } ^\circ\text{C}$ であり、その間で矩形分布していると仮定すると、

$$u_8(x) = L \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.06 \text{ } ^\circ\text{C} / \sqrt{3} \\ = 0.40 \times 10^{-3} L (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

(4) 要因9 ボールプレートとステップゲージの熱膨張係数の差の不確かさ： $u_9(x)$

ボールプレートとステップゲージともに、熱膨張係数は $11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ であり、熱膨張係数の不確

かさは $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ であるため、その差は検討不要ほど微小と判断した。

(5) 要因10 ボールプレートの温度測定の不確かさ：

$u_{10}(x)$

使用した温度計の最小目盛りが $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$ なので、不確かさが生じて最大 $0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$ で、その間を矩形分布していると仮定すると、

$$u_{10}(x) = L \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.05 \text{ } ^\circ\text{C} / \sqrt{3} \\ = 0.331 \times 10^{-3} L (\mu\text{m}) \text{ となる。}$$

### 3.2.3 不確かさ算出式

モデル式に不確かさの伝播則を適用すると、今回の測定の不確かさ $u_c^2(y)$ は次式となる。

$$u_c^2(y) = u^2(x) = u_m^2(x) + u_s^2(x) + u_e^2(x) \quad (3)$$

$u_m$ ：三次元測定機測定に起因する不確かさ、

$u_s$ ：長さ標準を用いた補正に起因する不確かさ、

$u_e$ ：その他の要因に起因する測定の不確かさ

ここで、

$$u_m^2(x) = u_4^2 + u_5^2$$

$$u_s^2(x) = u_1^2 + u_3^2 + u_6^2(x) + u_7^2(x) + u_8^2(x)$$

$$+ u_9^2(x) + u_{10}^2(x)$$

$$u_e^2(x) = u_2^2 \text{ なので、}$$

$$u_c^2(y) = u_4^2 + u_5^2 + u_1^2 + u_3^2 + u_6^2(x) \\ + u_7^2(x) + u_8^2(x) + u_9^2(x) + u_{10}^2(x) + u_2^2$$

となる。

### 3.3 最終結果と合成標準不確かさの算出

最終測定値を表5に示す。

また、そのときの不確かさをバジェット表にまとめたものを表6に示す。この結果、当センターの三次元測定機を用いて、作業者AまたはBが、ステップゲージを用いた長さの補正と反転法を実施した際のボールプレートの測定における不確かさは、次のとおり表すことができる。

$$U^2 = 0.29^2 + 0.29^2 + 0.35^2 + 0.26^2 + 0.35^2$$

$$+ ((0.18^2 + (0.75L)^2) / 1000^2 + (0.029 \times 10^{-3} L)^2 + (0.40 \times 10^{-3} L)^2 + (0.331 \times 10^{-3} L)^2$$

$$= 0.51 + 0.83 \times 10^{-6} L^2 \mu\text{m} \text{ より、合成標準不確かさは、}$$

$$u(L) = (0.72^2 + 0.91^2 \times 10^{-6} L^2)^{0.5}$$

例えば、 $L = 0,100,332 \text{ (mm)}$  では、不確かさは以下のとおり見積もることができる。

【報告】

- L= 0 mm 1.44 μm (k= 2)
- L=100mm 1.45 μm (k= 2)
- L=332mm 1.56 μm (k= 2)

4. まとめ

本研究を通して、当センターの三次元測定機での測定において、測定戦略を考慮することで、不確かさを数 μmに抑えることが可能であることを確認できた。その際、不確かさに大きく影響を与える要因として、温度測定に起因する不確かさがあることが分かった。

また、2005年度に参加した持ち回り試験<sup>3)</sup>と比較したところ、測定戦略が類似であっても、算出者によって不確かさの推定も考え方も異なることが確認できた。測定の不確かさを参照するときには、その値だけでなく、算出法も確認する必要がある。

謝辞

本研究は、知的基盤部会計測分科会『2008年度ボールプレート持ち回り測定』によって行いました。

本持ち回り測定において貴重な助言を頂いた、計量標準総合センター (NMIJ/AIST) 大澤尊光氏、長野県工業技術総合センター田中敏幸氏、広島県立総合技術研究所/西部工業技術センター山下弘之氏、熊本県産業技術センター川村浩二氏に感謝します。

参考文献

- 1) 知的基盤部会/計測分科会/形状計測研究会：2008年度ボールプレート持ち回り測定Protocol (final), 計量標準総合センター, (2008)

- 2) 飯塚幸三：ISO国際文書計測における不確かさの表現のガイド, 日本規格協会, 146-154 (1996)
- 3) 山田浩文他：『ボールプレート持ち回り比較』参加報告, 浜松工業技術センター研究報告書, (2005)

表5 ボールプレート測定値

ボール番号	ボールの中心座標 (mm)	
	X	Y
1	0.0000	0.0000
2	82.9980	0.0001
3	166.0035	0.0007
4	249.0009	0.0003
5	332.0070	0.0000
6	0.0021	83.0012
7	82.9992	83.0011
8	166.0057	83.0012
9	249.0040	83.0013
10	332.0100	83.0011
11	0.0049	166.0021
12	83.0011	166.0023
13	166.0080	166.0028
14	249.0069	166.0028
15	332.0131	166.0020
16	0.0054	249.0005
17	83.0020	249.0005
18	166.0082	249.0001
19	249.0070	249.0005
20	332.0141	249.0006
21	0.0068	332.0018
22	83.0041	332.0012
23	166.0100	332.0003
24	249.0073	332.0000
25	332.0142	332.0008

表6 不確かさのバジェットシート

要因	要因の大きさ	感度係数	不確かさ	
<b>長さに依存しない項</b>				
要因1	ステップゲージ (以下SG) の校正の不確かさ	0.51 (μm)	1/√3	0.29 (μm)
要因2	三次元測定機に起因する不確かさ	0.5 (μm)	1/√3	0.29 (μm)
要因3	SG校正測定における繰返しの標準偏差	0.35 (μm)	1	0.35 (μm)
要因4	5回のボールプレート (以下BP) 測定結果を平均化した繰返しの標準偏差	0.26 (μm)	1	0.26 (μm)
要因5	作業者の差による不確かさ	0.6 (μm)	1/√3	0.35 (μm)
<b>長さに依存する項</b>				
要因6	SGの校正の不確かさ			$(0.18^2 + (0.75L)^2)^{0.5} \times 10^{-3} (\mu m)$
要因7	BPの熱膨張係数の不確かさ	$L \times 1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.05^\circ\text{C}$	1/√3	$0.029 \times 10^{-3} L (\mu m)$
要因8	BPとSGの温度差の不確かさ	$L \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.06^\circ\text{C}$	1/√3	$0.40 \times 10^{-3} L (\mu m)$
要因10	温度測定の不確かさ	$L \times 11.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 0.05^\circ\text{C}$	1/√3	$0.331 \times 10^{-3} L (\mu m)$