

CMMによるボールプレートの値付け校正*

和合 健**、米倉 勇雄**

座標測定機（以下、CMM と略）の高精度測定を確立するために、計測分科会形状計測研究会の共同研究として 16 機関によるボールプレートの値付けを目的とする持ち回り測定を行った。CMM を使用した反転法によりボールプレートに値付けを行った結果、参照機関との差は平均値で X 軸が $0.4\mu\text{m}$ 、Y 軸が $0.2\mu\text{m}$ となり $1\mu\text{m}$ 以下の値付けができる。測定の不確かさは測定長さ 332mm の場合で $U(k=2)=1.03\mu\text{m}$ を算出した。

キーワード：CMM、ボールプレート、校正、値付け、不確かさ

Calibration to Indicate Reference Values for Ball Plate Using CMM

WAGO Takeshi and YONEKURA Isao

Round robin test was performed for purpose of calibration to indicate reference values for Ball Plate. Joint experiment was to participate among member of Form Measurement Working-group located under Measurement Division Party as 16 institutions in order to develop high precision measurement by CMM (Coordinate measuring machine). Calibration was performed reversed method using CMM as a result, ball plate values on mean were difference from between reference organization and IIRI (Iwate Industrial Research Institute) that X axis as $0.4\mu\text{m}$ and Y axis as $0.2\mu\text{m}$, therefore difference values were less than $1\mu\text{m}$ and able to suit calibration on IIRI. Measurement uncertainty was calculated $U(k=2)=1.03\mu\text{m}$ in case of measurement length as 332mm.

key words : CMM, Ball Plate, calibration, indication of reference values, uncertainty

1 緒 言

CMM に関する測定の不確かさ算出方法が現在 ISO のワーキンググループで検討されており、特に ISO15530-3 及び-4 は校正されたアーティファクトを使用して CMM の測定の不確かさを求める方法である。

世界的な標準器としてのアーティファクトは PTB（ドイツ物理工学研究所）が考案したボールプレートが認められている。ボールプレートはアーティファクト（人工物）であり上位測定機器により値付け校正を行う必要がある。ボールプレートの値付け校正では、CMM の測定での不確かさを含めた値付け校正に関わる不確かさを求めることが必要になる。

今回、CMM による高精度測定の実現のために、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の共同研究として表 1 に示す地方公設試及び民間企業等の 16 機関によるボールプレートの値付けを目的とする持ち回り測定を行った。ボールプレートの値付けは CMM を使用した反転法により行い、値付けでの不確かさを算出して参照機関に対する測定技能の一致度を評価した。

表 1 参加機関

国立研究所	
1. NMIJ/AIST	9. 鳥取県産業技術センター
公設試及び財団法人	10. 広島県立東部工業技術センター
2. 岩手県工業技術センター	11. 山口県産業技術センター
3. 福島県ハイテクプラザ	12. (財)機械振興協会
4. 群馬県立群馬産業技術センター	企業
5. 埼玉県産業技術総合センター	13. (株) ミットヨ
6. 東京都立産業技術研究所	14. (株) 東京精密
7. 静岡県浜松工業技術センター	15. 日本電産トーソク (株)
8. 石川県工業試験場	16. (株) 浅沼技研

表 2 CMM の主な仕様

型式	UPMC550-CARAT
メーカー	Carl Zeiss
モデルタイプ	門移動型
操作方式	CNC
プローブ方式	平行バネ差動トランス
測定範囲	550×500×450mm
最大許容指示誤差	$MPE_E = 0.8 + L/600\mu\text{m}$

2 実験装置及び測定技法

持ち回り測定には、図 1 に示すレッター社製のボールプレートを使用した。

* 地域新生コンソーシアム研究開発事業

** 電子機械技術部



図1 ボールプレート

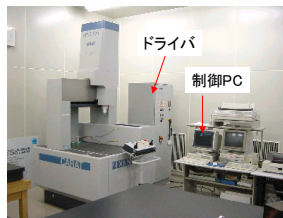


図2 CMMの全景

ボールプレートの大きさは $420 \times 420 \times 24$ mmで、球径 22mmの鋼球が均等に 83mmピッチで 25 個配置されている。ボールプレートの線膨張係数は $11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ である。CMMのスケール補正ではボールステップゲージを使用した。ボールステップゲージはNMIJ/AISTが考案した長さ標準器であり、球径 20mmのセラミック球が均等 83mmピッチで 7 個が一直線上に配置されている。ボールステップゲージは、NMIJ/AISTを参照機関として、参照機関から提示された値によりCMMのスケール誤差を補正するために使用する。当所では、表2及び図2に仕様と形状を示すZeiss製UPMC550-CARATを使用した。当CMMは平成6年3月に導入した装置で、Zeiss製3軸フリープローブが装備され、制御PCがDOSからUNIXに切り替わった最初のCMMである。

この実験の3ヶ月前にJCSS認定事業者の(株)東精エンジニアリングによりメンテナンス及び国家標準にトレーサブルなブロックゲージを使用した感度補正校正が行われている。実験で使用したCMMについて、この機種の現行機との大きな違いはマクロ機能が無く基本的にはCNC機ではあるが、CNCティーチングは作業者が行うMotorized manual方式という点である。そのためCNCプログラム作成において 45° 方向プロービングを手動で行うためプロービング誤差が生じる恐れがある。

3 実験方法

ボールプレートの測定物座標系は図3に示すとおりball11、ball15、ball21で平面基準、ball11、ball15で軸基準、ball11でXYZ軸のゼロ点とした。

測定方法は、ball11からball25までの25個の球に対して球の赤道を均等 90° 分割で4点、球の極を1点の測定点数が合計5点の球測定を行い、各球の球中心座標を求める。各球の測定順番は予め決められており、図4のとおり最初にball11からball15の方向、次にball15からball25の方向、次にball25からball21の方向の順で反時計回り方向へ渦巻き状に測定し、ボールプレートの中心に位置するball13まで測定する。

続けてball13から測定軌跡を逆にたどりball11まで同様に25球を測定し、全体で25球 $\times$ 2回の50個の測定値が得られる。渦巻き状に測定することで広範囲かつ時間を与えた測定が効率的に実施され、温度や幾何学的誤差など多くの誤差が測定に付与される。ボールプレートの球の真球度やCMMの幾何学的誤差を除くために反転法を用いる。反転法を用いることでこれらの誤差が平均化さ

れ球の中心座標値のみが抽出できる。

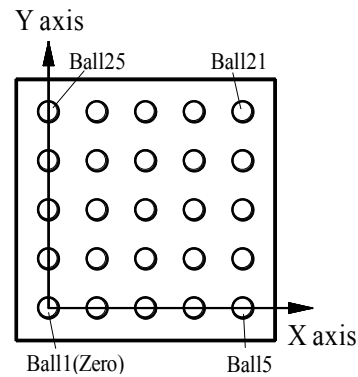


図3 測定物座標系

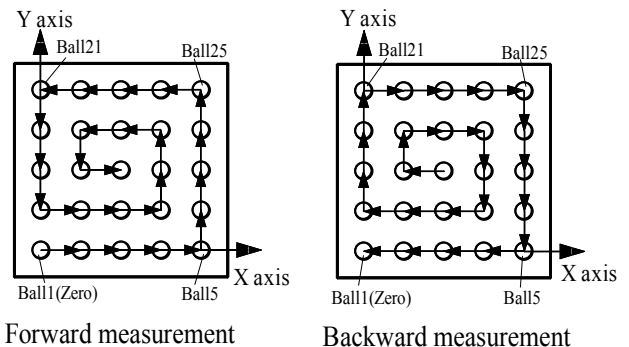


図4 球の測定順序

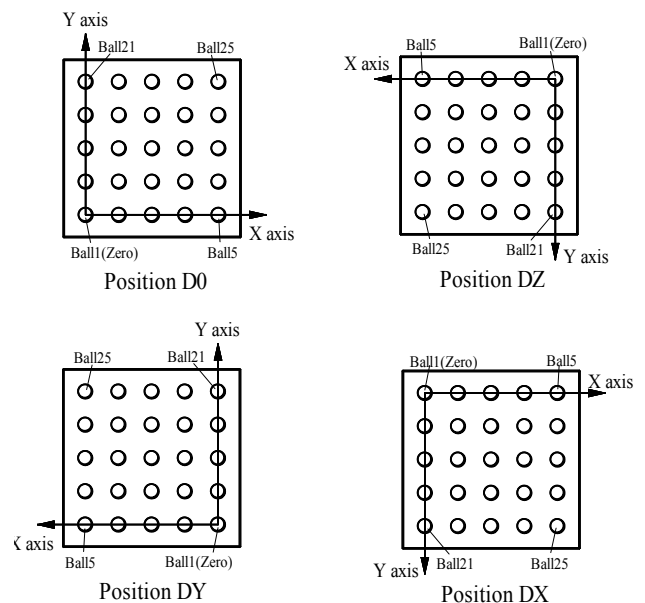


図5 反転法による測定物座標系の変化

ボールプレートは反転法を用いるために図5に示す4形態の設置方法で測定する。通常位置となるポジションD0、ポジションD0からZ軸を中心軸に 180° 回転したポジションDZ、ポジションD0からY軸を中心軸に 180° 回転したポジションDY、ポジションD0からX軸を中心軸に 180° 回転したポジションDXの4形態で測定を行いテーブル状の設置位置を図6、図7に示す。

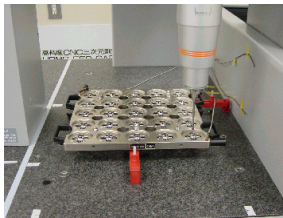


図 6 測定状況（正面）



図 7 測定状況（側面）

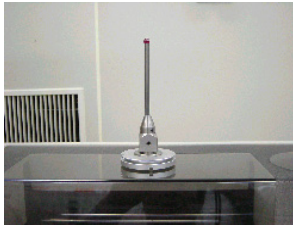


図 8 使用したスタイラス

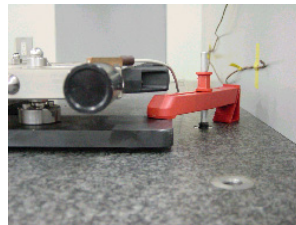


図 9 クランプによる固定

使用するスタイラスや定義した測定方法を実現するためのプログラミングは作業者の判断に任せる。当機関で使用したスタイラス長さは図 8 に示す 85mm、チップ径は $\phi 8\text{mm}$ である。ボールプレートの固定方法は図 9 のとおり補助プレートをクランプにより CMM テーブルに固定する。ボールプレートは 3 個の治具球による三点支持で補助プレート上に自重で位置決めされ、十分に固定される。ボールステップゲージによる CMM のスケール誤差の補正を行うタイミングは、ボールプレート測定後にボールステップゲージを測定し、反転法により平均化したボールプレートの座標値に対して補正した。

4 環境温度

CMM によるすべての測定では CMM に付属する温度補正機能を使用した。温度測定は横河電機製 DA100 を使用し CMM 周辺の 3 点を測定し、その結果を表 3 に示す。CMM が設置されている測定室の温度は JIS に基づき $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度制御は $50 \pm 10\%\text{RH}$ の設定である。

測定室の大きさは $7 \times 12 \times \text{高さ } 4\text{m}$ で、CMM は測定室の角に壁を背にして設置されている。CMM の真上に空調の吹き出し口、CMM の背側の壁に吸い込み口がある。温度は全体的に 1°C の幅で変動している。CMM 上部と CMM 下部で変動幅が大きく、CMM 上部では変動幅は 1.2°C 、CMM 下部では変動幅は 0.7°C となった。

表 3 に示すテーブル付近では変動幅は 0.4°C で安定しており、温度の平均値は 21.3°C となり JIS で規定する 20°C から 1.3°C の偏りがある。 20°C からの 1.3°C の偏りは CMM の温度補正機能で補正する。CMM 上部と CMM 下部で温度変動が大きい原因は CMM の背側と壁の間が風の通り道となっており、直接送風の影響を受けるためと思われる。

表 3 テーブル上の温度変化

(unit: $^\circ\text{C}$)	
Max	21.5
Min	21.1
Range	0.4
Mean	21.3

5 実験結果及び考察

図 11、図 12 により行ったボールステップゲージによるスケール補正値を表 4 に示す。

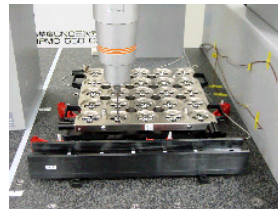


図 11 ボールステップゲージによるスケール校正（X 軸）



図 12 ボールステップゲージによるスケール校正（Y 軸）

表 4 ボールステップゲージによるスケール校正結果

Member	Sphere No.	X axis of CMM			Y axis of CMM		
		X	Y	Z	X	Y	Z
IIRI	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	82.9989	-0.0020	-0.0050	82.9986	-0.0019	-0.0047
	3	165.9985	-0.0012	-0.0134	165.9979	-0.0009	-0.0133
	4	248.9964	-0.0008	-0.0133	248.9958	-0.0003	-0.0132
	5	331.9954	0.0000	0.0000	331.9946	0.0000	0.0000
AIST-std	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	82.9990	-0.0041	-0.0059	82.9990	-0.0041	-0.0059
	3	165.9984	-0.0052	-0.0136	165.9984	-0.0052	-0.0136
	4	248.9964	-0.0011	-0.0131	248.9964	-0.0011	-0.0131
	5	331.9952	0.0000	0.0000	331.9952	0.0000	0.0000
Difference	1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	2	-0.0001	0.0021	0.0009	-0.0004	0.0022	0.0012
	3	0.0001	0.0040	0.0002	-0.0005	0.0043	0.0003
	4	0.0000	0.0003	-0.0002	-0.0006	0.0008	-0.0001
	5	0.0002	0.0000	0.0000	-0.0006	0.0000	0.0000

当機関の CMM による反転法を用いたボールプレートの 25 個の球中心座標は表 5 のとおりである。

Z 座標値はスケール校正を行っていないため参考値と見なす。他機関の値と比較したところ各軸の差は $1\mu\text{m}$ 以内であり良好な結果となり、当機関の CMM が $1\mu\text{m}$ 未満の座標値を示すボールプレートの値付け校正に使用できることを確認した。

図 13 に X 軸におけるボールステップゲージのスケール補正値によるボールプレートの補正結果を示す。X 軸のスケール補正量は最大で $0.2\mu\text{m}$ でありボールプレートの X 座標値に対して大きな補正は行われていない。

ボールプレートの ball12、ball17、ball112 で参照機関との差が大きい。この 3 球はスケールが 83mm の同じ位置であり、何らかの繰り返し誤差が働いているものと考えられるが正確な原因は不明である。Y 軸のスケール補正値によるボールプレートの Y 座標値の補正は、図 14 のとおり感度補正が良好に行われ参照機関との差が小さくなる方向に補正が働いた。

表5 ボールプレートの値付け結果

No.	Ball plate coordinate after reverse method calculation and measured by IIRI-CMM			Compensation values is Ball step gauge measured by IIRI-CMM			Final result of Ball plate coordinate is compensated by Ball step gauge measured using IIRI-CMM		
	X	Y	Z	X of CMM	Y of CMM	Z of CMM	X	Y	Z
1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	82.9978	-0.0026	0.0042	-0.0001	0.0000	0.0000	82.9979	-0.0026	0.0042
3	165.9995	-0.0019	0.0145	0.0001	0.0000	0.0000	165.9994	-0.0019	0.0145
4	249.0021	-0.0028	0.0110	0.0000	0.0000	0.0000	249.0021	-0.0028	0.0110
5	332.0037	0.0001	-0.0002	0.0002	0.0000	0.0000	332.0035	0.0001	-0.0002
6	0.0078	82.9992	-0.0087	0.0000	-0.0004	0.0000	0.0078	82.9996	-0.0087
7	83.0053	83.0021	0.0072	-0.0001	-0.0004	0.0000	83.0054	83.0025	0.0072
8	166.0037	83.0032	0.0181	0.0001	-0.0004	0.0000	166.0036	83.0036	0.0181
9	249.0031	83.0006	0.0203	0.0000	-0.0004	0.0000	249.0032	83.0010	0.0203
10	332.0035	83.0033	0.0266	0.0002	-0.0004	0.0000	332.0033	83.0037	0.0266
11	0.0175	166.0031	-0.0067	0.0000	-0.0005	0.0000	0.0175	166.0036	-0.0067
12	83.0118	165.9992	-0.0031	-0.0001	-0.0005	0.0000	83.0119	165.9997	-0.0031
13	166.0039	166.0030	0.0211	0.0001	-0.0005	0.0000	166.0038	166.0035	0.0211
14	249.0076	165.9985	0.0225	0.0000	-0.0005	0.0000	249.0077	165.9990	0.0225
15	332.0110	166.0020	0.0328	0.0002	-0.0005	0.0000	332.0108	166.0025	0.0328
16	0.0216	248.9965	0.0152	0.0000	-0.0006	0.0000	0.0216	248.9971	0.0152
17	83.0094	248.9918	0.0110	-0.0001	-0.0006	0.0000	83.0095	248.9924	0.0110
18	166.0133	249.0003	0.0163	0.0001	-0.0006	0.0000	166.0132	249.0009	0.0163
19	249.0149	248.9935	0.0392	0.0000	-0.0006	0.0000	249.0149	248.9941	0.0392
20	332.0107	248.9990	0.0425	0.0002	-0.0006	0.0000	332.0106	248.9996	0.0425
21	0.0450	331.9703	-0.0002	0.0000	-0.0006	0.0000	0.0450	331.9709	-0.0002
22	83.0109	331.9897	0.0285	-0.0001	-0.0006	0.0000	83.0110	331.9903	0.0285
23	166.0086	331.9846	0.0389	0.0001	-0.0006	0.0000	166.0085	331.9852	0.0389
24	249.0129	331.9782	0.0222	0.0000	-0.0006	0.0000	249.0129	331.9789	0.0222
25	332.0168	331.9849	0.0415	0.0002	-0.0006	0.0000	332.0167	331.9855	0.0415

6 測定の不確かさの算出

6-1 長さに依存しない項

プロービング誤差やCMMの幾何誤差が長さに依存しない誤差であり、これらの誤差はすでにCMM測定での不確かさに含まれると考えた。ボールプレートの値付けを目的とすれば、各機関における不確かさの数値比較が重要であり、ボールプレートの最大測定長さ332mmでの不確かさを算出することが必要と思われる。

ここでは、CMM測定での不確かさからプロービング誤差とCMMの幾何誤差は分離せずに長さに依存する誤差に含める。他の長さに依存しない項では、ボールプレートの球形状を含めた安定性が特に重要な因子になると思われる。安定性評価では温度・湿度等の環境からの影響と経時変化があげられる。安定性評価は、継続的なボールプレートの座標測定と温度・湿度変化の環境影響を与えた実験を行い求める必要がある。

6-2 長さに依存する項

6-2-1 各因子の標準不確かさの算出

【要因1】温度環境の標準不確かさ

CMMの温度補正機能を使用しているので20℃からの温度のかたよりは補正されている。温度変動の分布幅の±0.2℃を限界とする矩形分布とする。

$$\sigma(\theta) = \delta_{\theta} / \sqrt{3} = 0.2 / \sqrt{3} = 0.1154$$

【要因2】ボールプレートとブロックゲージの線膨張係数の差による不確かさ

ボールプレートの線膨張係数は $11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ でありブロックゲージの線膨張係数 $11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ の差にプロ

ックゲージの線膨張係数の不確かさ $1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ を加えた値を最大幅とする矩形分布を標準不確かさとする。

$$\sigma(\delta_{\alpha\text{BP}}) = [11.5 \times 10^{-6} - 11.5 \times 10^{-6}] / 2 + 1 \times 10^{-6} / 3 \\ = 5.773 \times 10^{-7}$$

測定長さをL[mm]とすると、

$$\sigma(\text{BP}_{\alpha}) = (L \times 10^{-3}) \cdot \sigma(\theta) \cdot \sigma(\delta_{\alpha\text{BP}}) \\ = (L \times 10^{-3}) \times 0.1154 \times 5.773 \times 10^{-7} \\ = 6.66 \times 10^{-11} \cdot L \quad [\text{m}]$$

(Lの単位はmm)

【要因3】CMM測定における標準不確かさ

測定長さ毎に座標測定での標準偏差を求め標準不確かさとする。測定長さと標準不確かさの散布図から線形式を求める。

$$\sigma(\text{ECMM}) = f(L, \text{球1の標準偏差}, \text{球2の標準偏差}, \dots, \text{球25の標準偏差}) \\ = 4.38 \times 10^{-10} \cdot L + 3.79 \times 10^{-7} \quad [\text{m}]$$

(Lの単位はmm)

6-2-2 合成標準不確かさの算出

合成標準不確かさ $\sigma_c(L)$ を求める。

$$(\text{各項の2乗和}) = (6.66 \times 10^{-11} \cdot L)^2 \\ + (4.38 \times 10^{-10} \cdot L)^2 \\ + (3.79 \times 10^{-7})^2 \quad [\text{m}]$$

$$\sigma_c(L) = 4.43 \times 10^{-4} \cdot L + 0.37 \quad [\mu\text{m}]$$

(Lの単位はmm)

拡張不確かさはゲージの最大長さ332mmを測定長さLとすると、 $U(k=2) = 1.03 \mu\text{m}$ と算出された。

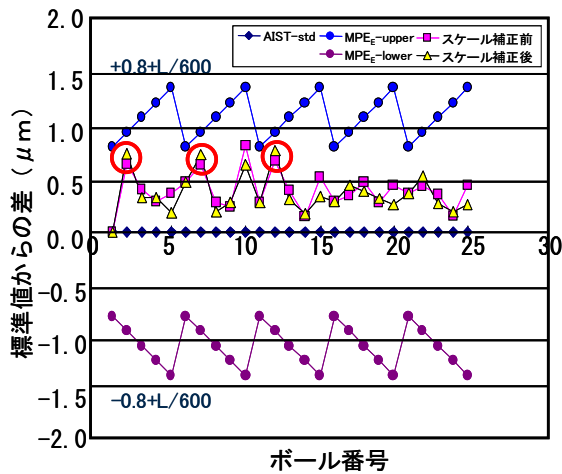


図 13 スケール校正後のボールプレート校正値の変化 (X 軸)

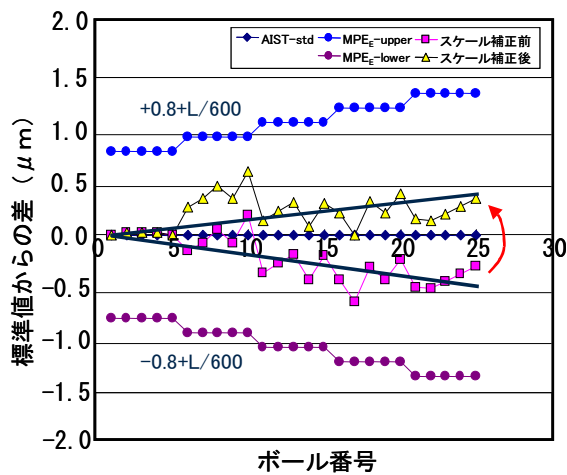


図 14 スケール校正後のボールプレート校正値の変化 (Y 軸)

7 En 数の算出

参照機関との測定技能水準の一致度を評価するために ISO/IEC GUIDE 43-1 で規定する En 数を式(1)から求める。

$$En = \frac{|x - X|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (1)$$

X 、 U_{ref} は参照機関が提示する値、と不確かさ、 x 、 U_{lab} は各機関が示す値と不確かさである。

判定基準は、 $|En| \leq 1$ を一致、 $|En| > 1$ を不一致とした。その結果、すべての球番号で En 数が 1 以下であり参照機関と測定技能が一致した。

8 結 言

当機関の CMM によりボールプレートの値付け校正を行い以下の点が明らかとなった。

- (1) ボールステップゲージによりスケール誤差を求めた結果、スケール誤差の最大値は X 軸で $0.2 \mu\text{m}$ 、Y 軸で $-0.6 \mu\text{m}$ となり当機関の CMM は良好な測定状態である。
- (2) ボールプレートの値付けをした結果、参照機関との差は平均値で X 軸が $0.4 \mu\text{m}$ 、Y 軸が $0.2 \mu\text{m}$ となり、当機関の CMM が $1 \mu\text{m}$ 以下の座標値が要求されるボールプレートの値付けに使用できることを確認した。
- (3) ボールプレートの値付けに関する測定の不確かさは測定長さ 332mm の場合で $U(k=2)=1.03 \mu\text{m}$ を算出した。
- (4) 参照機関との測定技能水準の一致度を En 数により評価した結果、すべての球番号で En 数が 1 以下となり参照機関と測定技能が一致した。

この実験を行ったことにより、岩手県工業技術センターはボールプレートの値付けが行える技能水準を有することが確認出来た。今後は、この実験で得られたサブミクロン台の測定誤差の抽出技術を依頼試験や研究開発において活用し、信頼性の高い測定実施に役立てる。

文 献

- 1) BIPM、IEC、IFCC、ISO、IUPAC、IUPAP、OIML、Guide to the expression of uncertainty in measurement、ISO(1993)
- 2) JIS Z 7440-2:2003 製品の幾何特性仕様 (GPS) 一座標測定機 (CMM) の受入検査及び定期検査 第 2 部：寸法測定、日本規格協会
- 3) ISO 15530-3：座標測定機の不確かさ算出 (比較測定による方法)
- 4) ISO 15530-4：座標測定機の不確かさ算出 (計算機シミュレーションによる方法)