幾何学ゲージ持ち回り比較の問題*

—ボールプレート2国間国際比較を通して—

大澤 尊光** 高辻 利之** 黒澤 富蔵**

Problems of a Round-robin Comparison of Geometrical Gauges

—Conclusions from Two Bilateral Comparisons —

Sonko OSAWA, Toshiyuki TAKATSUJI and Tomizo KUROSAWA

All sort of measurements ought to be traceable to the standard. The equivalence of the standards used in different places is ascertained by round-robin comparisons. In the comparisons of the geometrical quantities, physical gauges (artifacts) are circulated and measured by all participants, and the measurement results are compared. The important matter is the shape and the dimension of the artifact do not change throughout the circulation. In this paper, the calibration procedure of the ball-plate and the estimation of the measurement uncertainty are studied. Finally, problems on the round-robin comparisons mainly about the stability of the artifact are discussed according to our experiences of international comparisons of a ball-plate.

Key words: coordinate measuring machine, ball-plate calibration, bilateral comparison, traceability

1. 緒 言

国際貿易、商業などのグローバル化に伴い、品質管理と計測の重要性が認識されてきている。そのような状況の中で各国国家計量標準機関 (NMI) で発行する校正証明書の相互承認 (Mutual Recognition Arrangement) を認める条件として、計量標準の国際的な同等性を技術面で証明するために国際比較が国際度量衡委員会を中心に計画実施されている。それを受け長さ諮問委員会は基幹比較としてブロックゲージ、長尺ゲージ、ポリゴン、直径、三次元測定機 (CMM) によるステップゲージ、ボールバー及びボールプレート、ポアプレートの6項目を選んだ。ここでは、CMMによるボールプレートの比較に関して述べる。

CMMは互いに直交する案内と案内の移動量を求めるスケール及び検出器としてのプロービングシステムを持ち、それぞれの移動量からプローブの三次元座標を求める測定機で、任意の物体の寸法、形状、位置、姿勢を決めることができる万能測定機で国内外の製造メーカ等で数多く使用されている。しかし、その構造上の問題から測定機の校正ならびに測定の不確かさを算出することが非常に困難である。日本においてその精度評価¹⁾にブロックゲージ、ステップゲージなどのアーティファクトがよく用いられる。新しい試みとして、計量研究所 (以下、NRLM) では、長年、レーザ追尾方式による校正装置の開発^{2,3)}を行ってきているが、まだ精度的に劣っている。また、測定の不確かさに関しては、品質管理という面から年々必要性が増してきている。CMMが測定した物体に対して不確かさを明示できない以上、測定機としての機能を果たすことができない。そこで、現在 ISO のテクニカルグループ TC213 内におかれているワーキンググループ WG10 において、その規格化を急いでいる。測定の不確かさを算出

するためには、測定機の幾何学誤差や指示誤差などをあらかじめ算出しておく必要がある。現在、CMMの幾何学誤差を簡易に算出できる手法としてボールプレートを用いた手法がある。ボールプレートは、2次元アレイ状に球が基板に配置されており、その球の中心座標が一意に決まっているアーティファクトである。今後、CMMの標準化、トレーサビリティ体系を整える際に校正されたボールプレートの供給が不可欠であると考えられ、国内においてもボールプレート校正、持ち回り測定がしばしば行われると予想される。トレーサビリティとは、ユーザの持つ計測器の不確かさが校正というプロセスを経て国家標準と切れ目なくつながることを意味している。今回の国際比較では、ボールプレートの値付け、つまり校正がテーマである。本論文では、ボールプレートの校正法、オーストラリア、ポーランドとの2国間ボールプレート校正值比較の結果と国際比較で発生する問題について考察する。

2. ボールプレートの校正法

2.1 ボールプレート

ボールプレートは、スチール製の基盤上に球 (鋼球もしくはセラミック球) を5×5のアレイ状に配置したものである。現在、市販品としてドイツの2社 (Koba, Retter) で製造されている。ブロックゲージやステップゲージは、1次元的に評価するアーティファクトであるのに対し、ボールプレートは、1回の測定で2次元 (例えば XY 平面) の評価に適するので、これを立てた状態で利用すると YZ 平面、ZX 平面、つまり3次元空間を評価できる。

2.2 校正法

ブロックゲージは、直接長さ標準にトレーサブルな光源を用いた干渉計によって値付けされるが、ボールプレートの校正の場合は CMM を用いる。ここで、CMM の校正ツールであるボールプレートの値付けに CMM を用いるという矛盾が

* 原稿受付 平成12年6月14日

** 正会員 計量研究所 (つくば市梅園1-1-4)

Fig. 1 Four plate positions used for the swing round method

Fig. 2 Two sequences for one plate position

生じることとなる。これは高精度な CMM による反転測定、それと同時に長さ標準にトレーサブルなゲージ等（ブロックゲージ、ステップゲージやレーザ干渉計）を用いてスケールの補正を行い、値付けを行うことによって解決される。この測定法により一般に使用されている CMM の持つ精度以上の校正が可能となる。

ボールプレートの値付けには、一般的に反転法を用いる。図 1 に示すような 4 種類の位置で測定を行う。それぞれの位置で図 2 のような渦巻き状に測定を行い、時計回りと反時計回りに各球の中心位置を求め平均することで、測定中の温度ドリフトなどによる測定値のヒステリシスを除去できる。図 1 の 4 種類の位置で測定を行い、平均化すると、CMM のもつピッチング、ヨーイング、ローリング、真直度、直角度等の幾何学誤差を除去することができる。ただし、スケールの傾斜による誤差のみがこの手法では取り除くことができないため、ブロックゲージ、ステップゲージやレーザ干渉計を用いてこれを補正する必要がある。一般的にボールプレートの校正では、ブロックゲージをボールプレートの横に並べ、測定前後にブロックゲージを測定してスケールに対し補正を施している。この手法には、いくつかの問題点がある。1 つは、スケールの補正を 1 本のブロックゲージ測定で行うことにある。例えば、通常、高精度な CMM はスケールの補正テーブルを数 mm 間隔ごとに $0.1 \mu\text{m}$ 単位などであらかじめ保有している。ブロックゲージ測定の際、その補正テーブルのデータ

Fig. 3 Differences between NRLM values and NML values

がたまたま異なっている位置にて測定を行った場合、ボールプレート測定結果に補正が間違ってしまう可能性がある。もう 1 つは、ブロックゲージを測定するのとボールプレートを測定するのでは、プロービングの測定戦略が異なることである。つまり、ボールプレートでは、球の赤道 4 点と北極 1 点の計 5 点を測定し、最小二乗法により中心座標を求め、その中心間距離を算出するためプロービング誤差がキャンセルされる。それに対して、ブロックゲージでは、両端 1 点ずつのプロービングから距離を算出するためプロービング誤差が測定値に寄与しやすい。NRLM では、この件に関して現在、研究を行っている⁴⁾⁵⁾。

3. ボールプレート校正比較

3.1 オーストラリアとの比較⁶⁾

3.1.1 NRLM における測定

1998 年 10 月にオーストラリア国立計測研究所（以下、NML）との間で 2 国間比較を行った。使用したボールプレートは、NML が製作したものである。サイズは $400 \times 400 \text{ mm}$ 、直径 25 mm の鋼球が 70 mm ピッチで、 5×5 に配置されている。測定は、反転法とブロックゲージによる比較法を用いた。ブロックゲージは、X、Y 軸にそれぞれ 1 本ずつ（ 300 mm 、 400 mm ）配置され、反転法による測定前と測定後に測定した。測定は、合計 3 回行い、その平均値を最終的な値としている。それぞれ測定時の温度変化は $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ を越えなかった。プローブは、直径 8 mm 、長さ 40 mm のものを使用した。

3.1.2 NML における測定

NRLM で測定する前に NML において同様の手法によりボールプレートの測定を終了している。測定は、3 人のオペレータが 1 回ずつ計 3 回行っている。測定環境は NRLM に比べ良く、各測定での温度差は $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内である。プローブは、直径 5 mm 、長さ 50 mm のものを使用している。図 3 は NRLM 値と NML 値との差を表示したものである。ここでは、NML 値を参照値とし、ボール No.1 を原点として、位置ずれがある場合は矢印でその大きさと方向を示している。一目盛は $2.5 \mu\text{m}$ である。

Table 1 Uncertainty components of NRLM and NML

Sources of uncertainty	Magnitude (NRLM)	Type of distribution (NRLM)	Resulting deviation (NRLM) [μm]	Magnitude (NML)	Type of distribution (NML)	Resulting deviation (NML) [μm]
Uncertainty of thermometer calibration	0.1 K	Rect.	0.7	0.05 K	Rect.	0.3
Uncertainty of the temperature of the gauge blocks	0.2 K	Rect.	1.3	0.05 K	Rect.	0.3
Uncertainty of the temperature of the ball plate	0.2 K	Rect.	1.3	0.05 K	Rect.	0.3
Uncertainty of the temperature of the scales installed in the CMM	0.2 K	Rect.	1.0	0.05 K	Rect.	0.2
Uncertainty of the thermal expansion coefficients of steel	0.5E-6 /K	Rect.	0.06	0.5E-6 /K	Rect.	0.01
Uncertainty of the thermal expansion coefficients of glass	1.0E-6 /K	Rect.	0.1	1.0E-6 /K	Rect.	0.03
Measurement uncertainty of gauge blocks by CMM	1.0 μm	Norm.	1.0	0.45 μm	Norm.	0.45
Uncertainty due to the deformation of the ball plate	0.3 μm	Rect.	0.2	0.3 μm	Rect.	0.2
Uncertainty of the measurement of the gauge blocks	0.3 μm	Norm.	0.3	0.17 μm	Norm.	0.17
Uncertainty of the calculation of the ball center position	0.3 μm	Rect.	0.2	0.2 μm	Rect.	0.2
Uncertainty of the sphericity of the balls	0.3 μm	Rect.	0.2	0.3 μm	Rect.	0.2
Uncertainty due to digitization of scale readings	0.05 μm	Rect.	0.03	0.05 μm	Rect.	0.03
Uncertainty due to the sphericity of the probe	0.2 μm	Rect.	0.1	0.2 μm	Rect.	0.1
Uncertainty due to the geometric errors of CMM	0.3 μm	Rect.	0.2	0.3 μm	Rect.	0.2
Uncertainty due to the condition of the balls	0.5 μm	Rect.	0.3	0.5 μm	Rect.	0.3

Total uncertainty $U_{\text{NRLM}} : 0.5 + 2.4L$ ($k=2$) Total uncertainty $U_{\text{NML}} : 0.5 + 0.8L$ ($k=2$)Table 2 Evaluation of En numbers (NRLM and NML)

Ball No.	En number	
	X	Y
1	0.00	0.00
2	0.27	0.00
3	0.38	-0.28
4	0.45	0.00
5	0.60	0.00
6	0.00	0.69
7	0.00	0.69
8	0.38	0.55
9	0.34	0.55
10	0.40	0.27
11	-0.28	1.01
12	0.14	0.89
13	0.38	0.76
14	0.45	0.8
15	0.50	0.89
16	0.00	1.13
17	0.00	1.13
18	0.38	1.02
19	0.23	1.02
20	0.40	1.58
21	-0.14	1.40
22	0.00	1.50
23	0.13	1.60
24	0.34	1.50
25	0.30	1.60

3.1.3 測定の不確かさ

表 1 に NRLM ならびに NML の不確かさを示す。不確かさについては、計測における不確かさの表現のガイド⁷⁾に従い算出している。また、今回の比較では、NML の不確かさ見積り法に従っている。表 1 から NRLM において、ゲージ本体、スケール、ブロックゲージの温度測定に関する不確かさ、つまり温度依存項の不確かさが非常に大きいことがわかる。この原因は、CMM 本体と熱源であるコントローラ、電源、コンピュータ等が同一の室内に配置されており、温度制御が良くなかったことによる環境的な要因にある。また、スケールの温度測定では、三次元測定機に標準で備え付けられている温度計を利用したためその校正の不透明さによる要因もある。最終的な拡張不確かさは、NRLM が $0.5+2.4L$ [μm] (L は、測定長さで単位は m)、NML が $0.5+0.8L$ [μm] である。ここで、包含係数 $k=2$ である。

3.1.4 結果の考察

国際比較では、その値の評価に En 数というものを使用する。 En 数は以下の式のように与えられる⁸⁾。

$$En = (x_1 - x_2) / \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (1)$$

ここで、 U_1 、 U_2 は算出した不確かさ。 x_1 、 x_2 は測定値である。この En 数が 1 を超えなければその比較が満足のいく結果であったことを示している。表 2 に今回の比較における En 数の計算結果を示す。この表から、Y 座標の En 数が 1 を超えてしまっており、満足のいく結果ではなかった。

今回の比較測定では、NRLM における温度環境が整っておらず、温度による影響が不確かさに大きく寄与している。測定値の X 値に関しては、ほぼ NML 値と一致しているが、Y 軸方向に関して長さに比例して値が大きくなっていることがわかる。これは、Y 軸のスケール補正の値が適切でなかった、もしくは、スケールの温度測定に起因して生じたものと考えられる。今回の測定では、1 つのブロックゲージを測定し、スケールの補正値を決定しているため、このような差異が生じたものと考えられる。したがって、スケールの補正には、長さの異なる数本のブロックゲージもしくはステップゲージを用いる方が良い。また、被測定物の温度測定には、所内校正を行った温度計を利用したが、スケールの温度測定には、三次元測定機に標準で備え付けられている温度計を利用している。そのため測定環境の不整備に加え温度測定における不透明さも誤差の要因となっている。

3.2 ポーランドとの比較

3.2.1 NRLM における測定

1999 年 3 月にポーランド標準研究所 (以下、GUM) の所有する KOBA 製のボールプレート (420x420 mm) を用いて 2 国間比較を行った。測定は、前回のオーストラリアとの比較で得た結果をもとに反転法と長さの異なるブロックゲージ (100, 200, 300, 400, 500 mm) を用いてスケール補正を行った。はじめに、反転法にて測定を行い、その後、CMM 上にブロックゲージを配置して、X、Y 軸に関してブロックゲージ測定を行った。前回 NML との比較時と比べ、CMM 本体

Table 3 Uncertainty components of NRLM and GUM

Sources of uncertainty	Magnitude (NRLM)	Type of distribution (NRLM)	Resulting deviation (NRLM)	Magnitude (GUM)	Type of distribution (GUM)	Resulting deviation (GUM)
Short term reproducibility	0.5 μm	Rect.	0.3 μm	0.5 μm	Rect.	0.3 μm
Drift of temperature in object	0.05 K	Rect.	0.3 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	---	---	---
Nonlinearity of the position error of the CMM	---	---	---	0.4 μm	Rect.	0.23 μm
Drift of temperature in CMM	0.15 K	Rect.	0.7 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	---	---	---
Uncertainty of the difference of thermal expansion coefficients of the length standard and the ball-plate	---	---	---	0.3 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	Rect.	0.2 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$
Thermal deformation of the plate during measurement	---	---	---	0.4 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	Rect.	0.25 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$
Uncertainty of temperature probe indication	---	---	---	0.4 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	Rect.	0.25 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$
Deviation from linearity of the CMM's errors of position	0.2 μm	Norm.	0.2 μm	---	---	---
Uncertainty of the gauge block length	0.02 + 0.17 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	Norm.	0.02 + 0.17 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	0.15 + 0.2 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	Norm.	0.15 + 0.2 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$
Uncertainty of the length comparison (probing uncertainty, dirt)	0.5 μm	Rect.	0.3 μm	---	---	---
Uncertainty of the temperature difference during the length comparison	0.05 K	Rect.	0.3 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	---	---	---
Uncertainty of the thermal expansion coefficient	10 ⁻⁶ /K	Rect.	0.5 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}/\text{m}$	---	---	---
Dirt (not significantly detectable)	0.7 μm	Rect.	0.4 μm	---	---	---

Total uncertainty $U_{\text{NRLM}} : 0.6 + 1.0L$ ($k=2$)Total uncertainty $U_{\text{GUM}} : 0.8 + 0.9L$ ($k=2$)

Fig.4 Differences between NRLM values and GUM values

部とコントローラ、電源、コンピュータ等を別の部屋に分離し、熱の影響を減らした。そのため各測定におけるゲージの温度差は、0.05 $^{\circ}\text{C}$ 以下であった。また、スケールの温度測定に使用する温度計も所内で校正を行い温度測定における不透明さをなくした。プローブは、直径 8 mm、長さ 40 mm のも

のを使用した。

3.2.2 GUM における測定

1999 年 6、8 月に GUM では、合計 3 回の測定をそれぞれ異なるプローブで行った。使用されたプローブは、直径 3, 6, 8 mm である。それぞれの測定は、最大で 0.7 μm ばらついている。経験的にも、ボールプレートの測定では、たわみ量の少ない太く短いスタイラスが良いとされ、NRLM と同じ条件で比較するため、直径 8 mm プローブによる結果を採用した。このときの温度変化は、0.05 $^{\circ}\text{C}$ 以内で安定している。また、X, Y 軸にはボールプレートの最大中心間距離と同じ 332 mm のブロックゲージを 1 本ずつ配置し、測定前後にブロックゲージを測定し、スケールの補正を行っている。

3.2.3 測定の不確かさ

表 3 に NRLM ならびに GUM の不確かさを示す。不確かさについては、計測における不確かさの表現のガイドならびに DKD (ドイツキャリブレーションサービス) ガイドライン⁹⁾に従い算出した。最終的な拡張不確かさは、NRLM が $0.6 + 1.0L$ [μm]、GUM が $0.8 + 0.9L$ [μm]である。ここで、包含係数 $k=2$ である。今回の測定では、測定室の温度環境を改善し、スケールに対する温度計も校正した結果、温度に起因する不確かさが減少したことが表 3 からわかる。また、今回の比較では、それぞれの研究所で不確かさの項目を選定し、算出している。そのため共通

でない項目については空白となっている。基本的に不確かさの項目は似ているが最後の「ほりり」という項目が GUM にはない。これは、測定が正確に行われたとしても原因がよくわからないが値がずれることがあるという経験的な不確かさの項目である。我々も経験的にこの項目に対して、0.7 μm と大きな値をとっている。

前回行った NML との比較では、不確かさの項目は彼らに従い、細かく項目を選定し不確かさを算出した。また今回は、DKD ガイドラインに従い不確かさを算出している。それぞれの項目を比べてみると、例えば、線膨張係数の項目においては、NML との比較の際には、スチール (ボールプレート、ブロックゲージ) の線膨張係数の不確かさ、またガラス (スケール) の線膨張係数の不確かさという 2 項目に分けているが、今回は線膨張係数の不確かさという項目にし、スチールのための不確かさを見積もっている。これは、GUM も同様である。スケールの線膨張係数の不確かさは、測定機の指示誤差の項目に含まれている。また、NML との比較では、考えられる不確かさ項目をすべて列挙して算出しているのに対して今回の比較では、測定値のばらつきに対しての項目として短時間における再現性による不確かさがあげられている。短時間における再現性には、測定子の真球度やボールプレートの球の真

Table 4 Evaluation of En numbers (NRLM and GUM)

Ball No.	En number	
	X	Y
1	0.00	0.00
2	0.11	-0.10
3	0.03	0.40
4	-0.04	0.00
5	0.08	0.00
6	-0.60	0.27
7	-0.21	0.54
8	-0.30	0.68
9	0.45	0.81
10	1.64	-0.27
11	0.05	0.66
12	-0.26	0.33
13	-0.10	0.04
14	1.13	-0.57
15	1.33	-0.41
16	-0.15	0.45
17	0.42	0.15
18	0.89	-0.30
19	1.13	-0.53
20	0.98	-0.15
21	0.75	0.80
22	0.96	0.28
23	1.05	0.21
24	1.02	0.07
25	0.85	0.14

Fig. 5 Differences between NRLM values and PTB values

球度，プロービングの再現性などが含まれる。

このように不確かさの算出は，測定者自身が項目を選定し，その見積もりを行うため，項目に統一性がない。我々も今後，不確かさに関してさらなる検討をしていく必要がある。

3.2.3 測定結果の考察

NRLM と GUM の測定値を比較すると図 4 のようになる。この図から，2 μm 以上の差が確認できる。NML との比較のときと同様に En 数を計算した。表 4 は，その結果である。この表から X 軸の 6 ヶ所で 1 を超えていることがわかる。また，ボール No.10 では，1.64 と大きくはずれている。我々が行ってきた過去のボールプレート測定でこのように大きな差が生じたことがなく，また，値のずれ方も系統的でない。そこで，ドイツ物理工学研究所（PTB）の校正結果を参照した。その結果を図 5 に示す。ここで，PTB の校正の不確かさは， $0.6+0.9L$

Fig. 6 Differences between recalibration results and previous calibration results

Fig. 7 Differences between recalibration values of PTB and GUM

[μm]，プレートの中央に配置されている球の値は，レーザ干渉計で測定されているため， $0.3+0.6L$ [μm]と不確かさが小さくなっている。この図から NRLM 値は，PTB 値とよく一致していることが分かる。最大でも 0.3 μm の差であり，En 数においても最大 0.25 であった。そこで，GUM の測定結果がずれていると推測できる。この食い違いは，測定機の幾何学的な誤差や温度による系統的なものではないと判断でき，原因がはっきりとしないため PTB に再校正を依頼した。前回の校正値と今回行った校正値との違いを図 6 に示す。この図から明らかに以前の校正値から値が変わってしまったことがわかる。次にポーランドの測定結果と PTB 再校正値を比較した結果を図 7 に示す。この図から GUM の測定値が PTB 再校正値とほぼ一致していることがわかる。またここで，En 数を求めてみると最大，X 軸方向で 0.53，Y 軸方向で 1.54 であった。Y 方向で 1 を超えているが長さが長くなるにつれて大きくなっているため系統的な誤差であると考えられる。つまり，NRLM で測定した後何らかの原因で値が変わってしまったと推測できる。再校正後，測定を行った PTB よりボールプレートを取り出す際に使用する 4 本のバーのうち 1 本が変形していたとの報告を受けた。今回の比較でボールプレートのようなアーティファクトによる国際比較では，所見によるきずや変形などの確認も重要な項目であることが確認できた。ま

た、この結果から GUM での測定は、1999 年 6 月に行われたものであるが、その後、2000 年 4 月に PTB で再校正されるまでの間、ボールプレート の値は変化することなく一定であったと考えられる。つまり、変形が生じたとしてもその後、再校正を行えば値は一定であり、ゲージとしての役割を十分に果たすことが確認できた。また、PTB 値と比較して GUM の Y 軸方向の結果が長さ に比例して大きくなっていることが図 7 からわかる。これは、スケールへの補正値が異なっていたためにこのような結果が生じたと考えられる。つまり、我々が主張する 1 本のブロックゲージのみでスケールの補正を行う危険性がここでも生じたわけである。

4. 結 言

ボールプレートについて 2 回にわたる 2 国間国際比較を行った。その結果、測定法、不確かさ算出法について考察し、得られた結論は以下のとおりである。

- (1) スケール補正には、1 本のブロックゲージではなく長さの異なる数本のブロックゲージもしくはステップゲージ、レーザ干渉計などを用いて行うことが望ましい。
- (2) 測定戦略、環境状態の違いは、測定値に大きな影響を及ぼす。
- (3) 測定前後における所見、傷や変形の調査は重要である。
- (4) ボールプレートは、何らかの原因で変形した後も再校正を行えばゲージとしての役割を果たす。
- (5) 不確かさは、その見積もりに関して各国で議論がなされている。「計測における不確かさの表現のガイド」に従い算出しているが各国とも統一性がなく今後、検討が必要である。

今後、国際比較を行う際、その測定戦略や環境状態、アーティファクトの状態など細かく記録することが非常に重要で

あり、パイロットラボとなる場合、本論文で示したようなことが十分起こりうることを考慮してスケジュールや国際技術手順書 (Technical protocol) の作成を行う必要がある。また、今後国内において行われるボールプレート校正、幾何学ゲージの持ち回り測定において今回の経験が生かされることを望む。

参 考 文 献

- 1) JIS B 7440-2, (1997).
- 2) T. Takatsuji, M. Goto, T. Kurosawa, Y. Tanimura and Y. Koseki: The First Measurement of a Three-dimensional Coordinate by Use of a Laser Tracking Interferometer System based on Trilateration, *Measurement Sci. Technol.*, **9** (1998) 38.
- 3) T. Takatsuji, M. Goto, A. Kirita, T. Kurosawa and Y. Tanimura: The Relationship between the Measurement Error and the Arrangement of Laser Trackers in Laser Trilateration, *Measurement Sci. Technol.*, **11** (2000) 477.
- 4) 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 野口宏徳: 一次元ボールプレートの開発, 1999 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 437.
- 5) 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 野口宏徳: 干渉測定による一次元ボールプレートの値付け, 2000 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 616.
- 6) R. Yin, T. Takatsuji, S. Osawa, C. Sona and T. Kurosawa: Initial Performance Check of NRLM's CMM using NML's 300mm Ball-plate, *Bull. of NRLM*, **49**, 2 (2000) 153.
- 7) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO (1993).
- 8) ISO, IEC, Guide 43 Proficiency testing by interlaboratory comparisons -Part 1 and 2, ISO (1996).
- 9) PTB, Guideline for the DKD Calibration of Test Plates, Draft, (1992).