

CMM性能評価ゲージの不確かさ算出*

和合 健**、米倉 勇雄**

我々は、使用者が現場においてISO10360-2及びJIS Z 9090¹⁹⁹¹に基づいてCMMを校正することの出来るゲージを考案・試作した。それは、くさび形の斜面に大小の複数球を配置した三角形型である。ゲージは形状が単純で、測定が容易でかつ経年変化が少ないという設計理念を満足させた。試作したゲージの不確かさについて算出した結果、その拡張不確かさ $U(k=2)$ は $1.72\mu\text{m}$ であった。
キーワード：CMM、ゲージ、校正、性能評価、不確かさ

Calculation of Uncertainty of CMM Gauge for Performance Evaluation

WAGO Takeshi and YONEKURA Isao

The newly designed wedge-shaped gauge was manufactured experimentally according to ISO 10360-2 and JIS Z 9090¹⁹⁹¹ for CMM calibration at a working place. Spheres of several sizes are situated on the slanted surface of the gauge. Design concepts included simplicity, ease of measurement, and small secular change. We assessed the precision of the experimentally manufactured gauge: its expanded uncertainty $U(k=2)$ was $1.72\mu\text{m}$.

keywords:CMM,gauge,calibration,evaluationofperformance,uncertainty

1 緒 言

製品の高機能化に伴い、それらを構成する部品には高い寸法精度が要求されている。これらの部品製造に使用される工作機械の加工精度の進歩は著しく、現状では $\pm 2\mu\text{m}$ 台の寸法公差を高い確度で達成できる。しかし、加工精度が向上している反面、その値を保証する測定技術が加工精度に追いつかない状況が多々見られる。特に、三次元測定機（以下、CMM）は容易に立体形状の寸法測定が行える反面、その融通性による測定誤差の影響が大きい。通常の製造現場で使用されている汎用 CMM では測定精度が $\pm 5\mu\text{m}$ 程度であり、精密金型など高精度機械加工品の加工公差を下回る。また、測定精度が $\pm 1\mu\text{m}$ m 以下の高精度 CMM は装置価格が高額になり一般企業への導入は難しい。そこで現有 CMM を使用してより正確な測定を行うために校正、誤差分離、補正の方法について開発を進めている。

ここでは CMM の使用者校正による性能評価¹⁾²⁾を容易かつ正確に行うため、そこで使用されるゲージの製作において有効な設計データを構築し、ゲージ製作指針として提示することを目的とした。

2 ゲージの要素設計

2 - 1 ゲージの特徴

新たに試作したゲージは図 1 に示すとおり頂角を 30° 、 60° 、 90° としたくさび型であり W.A.ゲージ（和合 - 阿部ゲージの略、以下単にゲージ）という。くさび型の斜面に球を配置したことで大きな測定長さを確保し、球の空間配置が容易に出来る。くさび型の長辺・短辺を接地面として使い分けることでゲージの Z 高さが 300mm 及び 460mm となり、測定範囲の異なる CMM に対応できる。材質の選定により小型軽量化となりシンプルで作業性が良く、可搬用取手により CMM への積載性及び測定中のゲージ姿勢変更での操作性にも優れている。塊型（ブロック型）としたことで図 2 に示す CMM の空間軸とゲージの空間軸の為す角度により反転法を利用し案内軸の直角度評価に使用できる。ゲージの基準面は表 1 に示すとおり長辺で $1.4\mu\text{m}$ 、短辺で $1.0\mu\text{m}$ の平面度に仕上げられており反転法の使用に十分対応できる。高精度 CMM の直角度評価を行った結果、表 2 のとおり CMM の XZ 面で 0.0001° 、YZ 面で 0.0004° の

* 超高精度金型測定技術（第 1 報）（地域新生コンソーシアム研究開発事業）

** 電子機械技術部

値は十分小さくゲージの製作精度の高さが検証された。ゲージは斜面に球径の異なる2種類の球を配置したことで、ISO10360-2で規定する接触角の違いによるスタイラスチップの接触安定性及び曲面接触でのプロービング誤差が評価できる。図3に示す方法で実験を行った結果、表3に示すとおりプローブ機構が3軸開放プロービング方式の場合では標準値からの偏差は $1.1\mu\text{m}$ と小さい。しかし、2軸固定1軸開放プロービング方式の場合では接触角が小さくなる $1/2\text{inch}$ 球の場合で標準値からの偏差は $12.5\mu\text{m}$ と大きい。2種類の球を配置したゲージ設計の目的が実験により検証された。

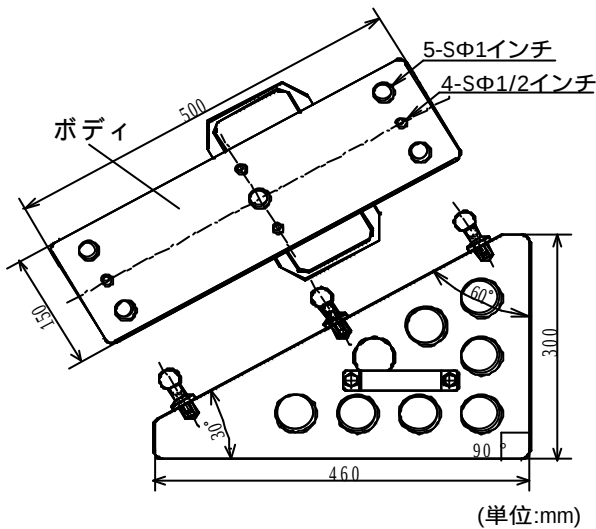


図1 ゲージの設計形状

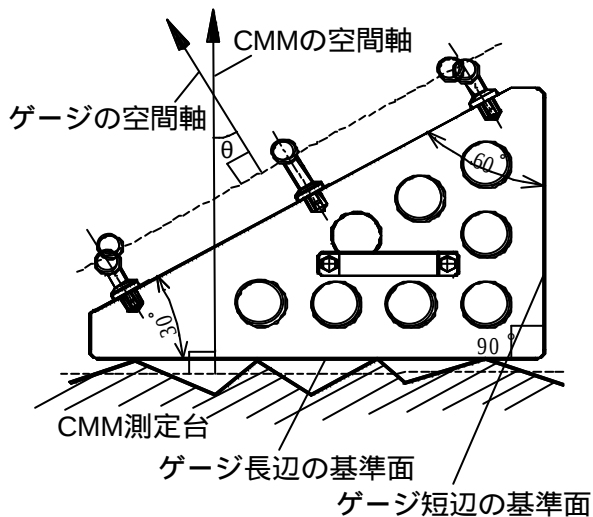


図2 反転法による直角度測定

表1 ゲージ基準面の平面度

ゲージの基準面	平面度	(単位: mm)	
		測定値のばらつき: σ	基準面の広さ
ゲージの長辺	0.0014	0.0002	460 × 150
ゲージの短辺	0.0010	0.0001	300 × 150

表2 反転法による直角度測定結果

CMMの座標平面	ゲージを置く向き	ゲージとCMMの 為す角度	(単位: 度)
			直角度
XZ座標面	X+ 方向	-30.0052	0.0001
	X- 方向	-30.0051	
YZ座標面	Y+ 方向	-30.0057	0.0004
	Y- 方向	-30.0053	

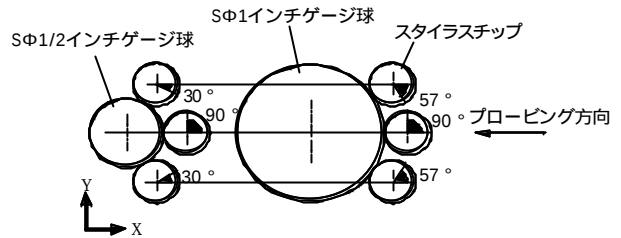


図3 プロービング時に球とスタイラスチップが為す接触角

表3 プロービングに起因するCMM測定誤差

プローブの種類	球径の種類	(単位: mm)			
		球径の測定値 A	球径の標準値 B	測定値と標準 値の差 B-A	測定値のばら つき: σ
3軸フリー プローブ	Sφ1インチ	25.4014	25.4003	0.0011	0.0012
	Sφ1/2インチ	12.6989	12.6995	-0.0006	0.0006
2軸固定1フリー プローブ	Sφ1インチ	25.3935	25.4003	-0.0069	0.0013
	Sφ1/2インチ	12.6870	12.6995	-0.0126	0.0019

2-2 球の選定

ゲージの球は真球度 $0.08\mu\text{m}$ を使用した。球の材質は高炭素クロム軸受鋼鋼材で線膨張係数 $11.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、硬さは1inch球、 $1/2\text{inch}$ 球ともHRC62以上である。

2-3 本体の設計

ISO 10360-2では測定長さに起因する累積誤差を抽出するため大きな測定長さを要求している。ゲージの大型化に伴う操作性向上のために、ゲージ本体は密度 $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ の花崗岩(御影石)を使用し鉄と比較して $1/3$ の軽量化ができた。

2-4 シャフトの設計

図4に示すシャフトによる保持は、広角範囲のプロービングを実現した。シャフトの材質はグラファイトとした。グラファイトの線膨張係数は $3.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、ヤング率は $106 \times 10^{10}\text{Pa}$ であり鉄(線膨張係数 $11.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、ヤング率 $20.1 \times 10^{10}\text{Pa}$)と比較して熱的、機械的特性に優れている。

2-5 シャフトの本体への固定

シャフトを本体へ固定する方法は、図5に示す円筒ブッシュを本体に埋設しネジ締めにより接合する。ブッシュの材質はSUS303で線膨張係数 $11.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。本体とブッシュの接合は球とシャフトの接合で使ったエポキシ系接着剤により 0.1mm の厚みで接着した。

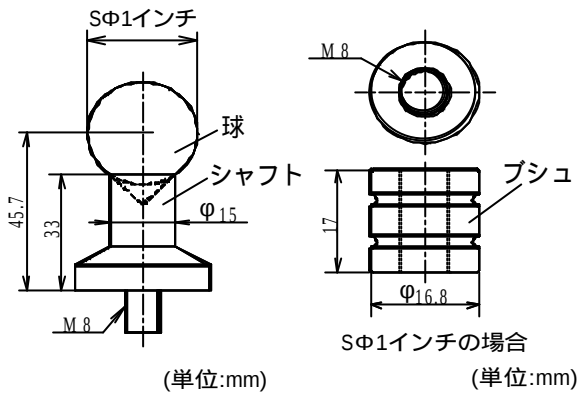


図4 シャフトの設計

図5 プシュの設計

2 - 6 球の固定

熱応力による球の変形を防止するためにエポキシ系接着剤により球を固定した。接着強度は実験を行った結果、引張強さの平均値が 1inch 球で 1519N、1/2inch 球で 515N を示し十分に大きい。この接着剤の線膨張係数は $60 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。

3 ゲージの値付けの不確かさの算出

指示精度の優れた CMM を標準機として、開発したゲージを校正する場合のゼロ点球と各球との中心間距離の値付けの不確かさを求めた³⁾。校正室の温度環境は、校正作業での 8 回の平均値から 20.25 ± 0.16 である。使用した CMM は Zeiss 製 UPMC550-CARAT である。

3 - 1 関数モデル

表 4 のバジェット表により抽出した不確かさ成分からゲージの校正に関するモデル式は式(1)で示される。L はゲージの値、M は CMM の測定値、 $s(E)$ は合成標準不確かさである。

$$L = M \pm 2s(E) \quad (1)$$

また、合成標準不確かさは式(2)で示される。

$$s_c^2(E) = s^2(G) + s^2(C_a) + s^2(P_h) + s^2(P_a) + s^2(A_{1a}) + s^2(F_a) + s^2(F_b) + s^2(R) + s^2(B_a) + s^2(A_{2a}) + s^2(D_a) + s^2(E_{CMM}) + s^2(Y) \quad (2)$$

ここで、G は標準器の誤差、 C_a は CMM スケールの線膨張係数に起因する誤差、 P_h は球の真球度の誤差、 P_a は球の線膨張係数に起因する誤差、 A_{1a} は球とシャフトの接着剤の線膨張係数に起因する誤差、 F_a はシャフトの線膨張係数に起因する誤差、 F_b はシャフトの弾性変形量による誤差、R はシャフトとプシュの接合での応力歪み量による誤差、 B_a はプシュの線膨張係数に起因する誤差、 A_{2a} はプシュと本体の接着剤の線膨張係数に起因する誤差、 D_a は本体の線膨張係数に起因する誤差、 E_{CMM} は CMM の測定誤差、Y は経年変化による誤差である。

表 4 バジェット表³⁾

構成要素	不確かさの要因	要因記号	評価タイプ
ブロックゲージ	比較校正	$\sigma(G)$	B
CMMスケール	熱膨張係数	$\sigma(C_a)$	B
球	真球度	$\sigma(P_h)$	A
	ブロックゲージと構成要素の熱膨張係数の差	$\sigma(P_a)$	B
球とシャフトの接合	ブロックゲージと構成要素の熱膨張係数の差	$\sigma(A_{1a})$	B
シャフト	ブロックゲージと構成要素の熱膨張係数の差	$\sigma(F_a)$	B
	応力たわみ量	$\sigma(F_b)$	A
シャフトとプシュの接合	ひずみ量	$\sigma(R)$	A
プシュ	構成要素とブロックゲージとの熱膨張係数の差	$\sigma(B_a)$	B
プシュと本体の接合	ブロックゲージと構成要素の熱膨張係数の差	$\sigma(A_{2a})$	B
本体	ブロックゲージと構成要素の熱膨張係数の差	$\sigma(D_a)$	B
CMM	W.A.ゲージ測定でのCMMの測定誤差	$\sigma(E_{CMM})$	A
W.A.ゲージの全構成要素	経年変化量	$\sigma(Y)$	A

3 - 2 各成分の標準不確かさの評価

3 - 2 - 1 ブロックゲージの標準不確かさ

CMM の校正に用いたブロックゲージの標準不確かさを式(3)により求める。ブロックゲージの比較校正での不確かさの要因は、標準器の校正値の不確かさ $s(L_{sGB})$ 、寸法差測定での不確かさ $s(d_{GB})$ (平均値での不確かさ・ランダム効果での不確かさ・系統効果での不確かさ)、両ゲージの熱膨張係数の差による不確かさ $s(d_{aGB})$ 、両ゲージの温度差による不確かさ $s(d_{TGB})$ 、標準器の経年変化による不確かさ $s(Y_{GB})$ からなる。ここでは、ゲージの最大測定長さからブロックゲージの長さ 414mm、JCSS 認定事業者での校正室温度環境の一例より 20 から温度差 0.14 として標準不確かさを求めた。

$$\begin{aligned} s^2(G) &= s^2(L_{sGB}) + s^2(d_{GB}) + s^2(d_{aGB}) + s^2(d_{TGB}) + s^2(Y_{GB}) \\ &= 2.25 \times 10^{-4} + 7.569 \times 10^{-5} + 1.129 \times 10^{-3} + 5.991 \\ &\quad \times 10^{-3} + 1.00 \times 10^{-4} \\ &= 7.520 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$s(G) = 0.087 \mu\text{m}$$

3 - 2 - 2 CMM スケールの線膨張係数の標準不確かさ

校正室の温度環境は 20 からの偏差が 0.25、分布範囲が ± 0.16 であり、中心値 20.25 ± 0.16 を限界とする矩形分布とし式(4)により標準不確かさ $s(?)$ を求める。ここで、? は 20 からの温度差、 d_T は温度変動幅とする。

$$\begin{aligned} s(?) &= [?^2 + (d/\sqrt{3})^2]^{1/2} = [0.25^2 + (0.16/\sqrt{3})^2]^{1/2} \\ &= 0.267 \end{aligned} \quad (4)$$

CMM スケールの材質はゼロデュアで線膨張係数による標準不確かさは $\pm 0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ を分布幅とする矩形分布として式(5)、式(6)により求める。ここで、 a_c は CMM

スケールの線膨張係数の分布幅、D はゲージの最大測定長さとする。

$$s(a_c) = 0.05 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 2.886 \times 10^{-8} \quad (5)$$

$$s(C_a) = D \cdot s(?) \cdot s(a) = 0.414 \times 0.267 \times 2.886 \times 10^{-8} = 0.003 \mu\text{m} \quad (6)$$

3-2-3 球とブロックゲージの線膨張係数の差による標準不確かさ

CMM はブロックゲージにより校正されており、かつスケールの線膨張係数が 0 に等しいと見なせることから直接ブロックゲージとの線膨張係数の差が不確かさに現れると推測した。P は球径、 da_p は球とブロックゲージの線膨張係数の差としてブロックゲージの線膨張係数の不確かさ 1×10^{-6} を加えた値を最大幅とする矩形分布とし式(7)、式(8)より求める。

$$s(da_p) = [(11.5 \times 10^{-6} - 11.5 \times 10^{-6})/2 + 1 \times 10^{-6}] / \sqrt{3} = 5.773 \times 10^{-7} \quad (7)$$

$$s(P) = P \cdot s(?) \cdot s(da_p) = 0.0254 \times 0.267 \times 5.773 \times 10^{-7} = 0.004 \mu\text{m} \quad (8)$$

3-2-4 シャフトのブローイング圧による弾性変形の標準不確かさ

シャフトのブローイング圧による弾性変形の標準不確かさを式(9)、式(10)より求める。ブローイング圧の不確かさは電子天秤にブローイングしその測定値から標準偏差を求めた結果、 $9.24 \times 10^{-4} \text{N}$ と算出された。片持ち梁構造で 1inch 球ではシャフト末端から球中心までの梁の長さは 45.7mm、梁の外径は 15.0mm となる。

$$s(F_D) = (W \cdot l) / (3 \cdot E_I \cdot I_x) = (0.000924 \times 0.0457) / (3 \times 1.06 \times 10^{12} \times 2.48 \times 10^{-9}) = 1.116 \times 10^{-5} \mu\text{m} \quad (9)$$

$$\text{ここで、} I_x = p \cdot d_i^4 / 64 = 3.14 \times 0.015^4 / 64 = 2.48 \times 10^{-9} \quad (10)$$

F_D は弾性変形量、W は加重、l は梁の長さ、 E_I はヤング率、 I_x は断面二次モーメント、 d_i は梁の直径である。

3-2-5 本体とブロックゲージの線膨張係数の差による標準不確かさ

本体とブロックゲージの線膨張係数の差による標準不確かさを式(11)、式(12)より求める。ゲージの最大測定長さは 414mm、本体の線膨張係数は $4 \cdot 10 \times 10^{-6}$ の幅があり、ブロックゲージからの差の大きい値を用いる。ここで D はゲージの最大測定長さ、 da_D は本体とブロックゲージの線膨張係数の差とし矩形分布とする。

$$s(da_D) = [(11.5 \times 10^{-6} - 4 \times 10^{-6})/2 + 1 \times 10^{-6}] / \sqrt{3} = 2.742 \times 10^{-6} \quad (11)$$

$$s(D) = D \cdot s(?) \cdot s(da_D) = 0.414 \times 0.267 \times 2.742 \times 10^{-6} = 0.30 \mu\text{m} \quad (12)$$

3-2-6 CMM の測定による標準不確かさ

ゼロ点球と各球との中心間距離の値付けの不確かさに対する CMM の測定による標準不確かさを求める。球測定は、CNC 自動測定による極 3 点赤道軸方向 4 点 $\times 2$ 回の計 11 点とし、繰返し 3 回、反復 5 回を行い

合計 120 個のゼロ点球から各球までの中心間距離を得た。ここで反復は CMM 測定台上のゲージの設置位置を移動させ、時間を隔てた場合とした。その結果を図 6 に示す。図中の点は各球毎の任意の基準値からの偏差の平均値で、点の分布幅はゼロ点球から各球までの中心間距離の標準偏差である。CMM の測定による標準不確かさは、式(13)に示すとおりゼロ点球から各球までの中心間距離の標準偏差の平均値とした。平均値は各球の標準偏差の 2 乗を加算し、球の個数で除算した後の平方根とした。

$$s(E_{CMM}) = (a \text{ 球の標準偏差} + b \text{ 球の標準偏差} + \dots + h \text{ 球の標準偏差}) \text{の平均値} \\ = [(0.22^2 + 0.25^2 + \dots + 0.46^2) / 8]^{1/2} \\ = 0.37 \mu\text{m} \quad (13)$$

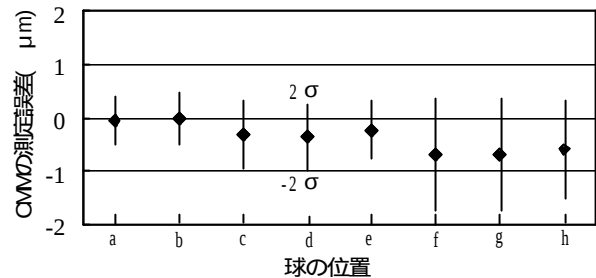


図6 ゲージ測定によるCMMの測定誤差

3-2-7 経年変化による標準不確かさ

ゲージの経年変化による標準不確かさは、1 年間のゼロ点球から各球までの中心間距離の標準偏差の 2 乗から 3-2-6 による CMM の測定による標準不確かさの 2 乗を減算し、球の個数で除算した後の平方根とした。図 7 はゲージの経年変化を示したもので、図中の点は任意の基準値からの偏差の平均値である。以上から経年変化による標準不確かさを式(14)に示す。

$$s(Y) = (a \text{ 球の経年変化} + b \text{ 球の経年変化} + \dots + h \text{ 球の経年変化}) \text{の平均値} \\ = [\{(0.87^2 - 0.22^2) + (0.85^2 - 0.25^2) + \dots + (0.64^2 - 0.46^2)\} / 8]^{1/2} = 0.71 \mu\text{m} \quad (14)$$

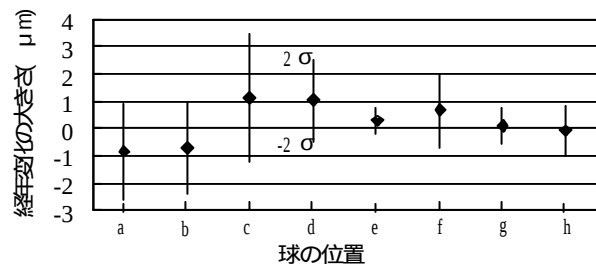


図7 1年間の経年変化の大きさ

4 合成標準不確かさ

以上の結果から表5に示す不確かさ成分ごとの標準不確かさが得られる。

表5 不確かさ成分の結果

要因記号	標準不確かさ $u(x_i)$	感度係数 $f / \partial x_i \equiv c_i$	長さへの変換 (μm) $u_i(y) \equiv c_i u(x_i)$	二乗項 $u_i(y)^2$
$\sigma(G)$	$0.087 \mu m$	1	0.087	0.007569
$\sigma(C_a)$	$2.886 \times 10^{-8} /$	$D \cdot \sigma(\theta)$	0.003	0.000009
$\sigma(P_h)$	$0.041 \mu m$	1	0.041	0.001681
$\sigma(P_a)$	$5.773 \times 10^{-7} /$	$P \cdot \sigma(\theta)$	0.004	0.000016
$\sigma(A_{1a})$	$1.457 \times 10^{-5} /$	$A_1 \cdot \sigma(\theta)$	0.019	0.000358
$\sigma(F_a)$	$3.002 \times 10^{-6} /$	$F \cdot \sigma(\theta)$	0.026	0.000700
$\sigma(F_D)$	$1.116 \times 10^{-5} \mu m$	1	0.000	0.000000
$\sigma(R)$	-	-	-	-
$\sigma(B_a)$	$6.062 \times 10^{-7} /$	$B \cdot \sigma(\theta)$	0.003	0.000008
$\sigma(A_{2a})$	$1.457 \times 10^{-5} /$	$A_2 \cdot \sigma(\theta)$	0.0004	0.00000015
$\sigma(D_a)$	$2.742 \times 10^{-6} /$	$D \cdot \sigma(\theta)$	0.30	0.0900
$\sigma(E_{CMM})$	$0.37 \mu m$	1	0.37	0.1369
$\sigma(Y)$	$0.71 \mu m$	1	0.71	0.5041

二乗和 $\sigma_c(E) = 0.7413 \mu m^2$

合成不確かさ $\sigma_c(E) = 0.861 \mu m$

拡張不確かさ $U(k=2) = 1.72 \mu m$

) $\sigma(R)$ は $\sigma(Y)$ に含まれることとした

4-1 拡張不確かさの決定

得られた合成標準不確かさに包含係数 $k=2$ を乗じてCMMを標準とするゲージの校正における拡張不確かさを式(15)に示す。

$$U(k=2) = 2 \times s(E) = 2 \times 0.861 = 1.72 \mu m \quad (15)$$

5 考 察

CMMの性能評価に使用するゲージは、CMMの測定長さ起因する累積誤差を評価するためにゲージの大型化が要求される。本体の材質に鉄を用いた場合は、ブロックゲージとの線膨張係数の差が小さくその不確かさは小さくなる、一方、鉄の密度は $7.8 g/cm^3$ で重量は $80.7 kg$ となり可搬性が悪くなる。そこで、ゲージの目的が使用者校正での活用なので材質を密度 $2.7 g/cm^3$ で重量が $28.2 kg$ の花崗岩として取扱容易性を重視した。

球を支持するシャフトに使用したグラファイトは熱的、機械的性質に優れており、プロービング圧によるたわみ量を小さくすることができる。また球の材質をブロックゲージと同一としたことにより、ブロックゲージとの線膨張係数の差による不確かさが小さくなる。球とシャフトの接合をエポキシ系接着剤による接着としたことで、接合強さは十分目的を満たし、接合原理による熱ま

たは機械的な応力による球の形状精度低下への影響は無い。

CMMの測定による不確かさは、CMMによりゲージを多数回測定した時の標準偏差として求めた。アーティファクトの校正ではアーティファクト自体を測定対象物として測定した場合の測定機器の誤差がアーティファクトの不確かさに含まれる。ここでは、2種類9個の球を立方空間の対角線に配置したことで、最大長さ $414 mm$ 時のCMMの測定による不確かさが求められた。つまりアーティファクトの校正で信頼性の高い不確かさを求めるためには、CMMの校正も同様のアーティファクトを用いて校正を行いCMMの測定誤差を求めることが重要である。

経年変化による不確かさは高精度CMMによる値付け校正を定期的に行うことにより排除できる。その場合拡張不確かさは $U(k=2) = 2 \times 0.487 = 0.97 \mu m$ と求められ $1 \mu m$ 以下の良好な値となった。

6 結 言

- (1) ゲージの拡張不確かさは $U(k=2) = 1.72 \mu m$ となった。
- (2) 1年間における経年変化の不確かさが $0.71 \mu m$ と算出され十分小さい。
- (3) ゲージはくさび型にしたことでゲージのZ高さが $300 mm$ または $460 mm$ の2種類が設定できる。
- (4) 2種類の球径によりプロービング時の接触角による誤差が求められる。
- (5) 高精度CMMによる校正を定期的に行う場合は経年変化による不確かさは排除され、ゲージの拡張不確かさは $U(k=2) = 0.97 \mu m$ となる。

今後は、試作したゲージの信頼性を更に高めるため、標準値を与えるとともに経年変化を追跡調査することが課題である。

文 献

- 1) ISO 10360-2^{:1994} (Coordinate metrology - Part2: Performance assessment of coordinate measuring machines)、ISO(1994)
- 2) JIS Z 9090^{:1991} (測定 - 校正方式通則)、日本規格協会
- 3) BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, Guide to the expression of uncertainty in measurement, ISO(1993)