

# ホールプレートの校正法とそれによる座標測定機の性能評価\*

和合 健\*\*、池 浩之\*\*

高精度座標測定機を使用して、環境温度に依存しない低熱膨張特性を有する低熱膨張セラミックス製ホールプレートへの目盛り付け方法を試み、その不確かさを求めた。さらに、ホールプレートを利用した座標測定機の性能検査を行い、その検査様式を示した。その結果、低熱膨張セラミックス製ホールプレートの校正値の不確かさは、測定長さ 350mm では  $U(k=2)=444\text{nm}$  と算出され、ブロックゲージなど温度膨張材の場合と比較して温度膨張に起因する因子の不確かさが排除できるため不確かさが小さく算出された。

**キーワード：座標測定機、ホールプレート、低熱膨張セラミックス、性能検査、値付けの不確かさ**

## Holeplate Calibration and Performance of Coordinate-Measuring Machine incorporating Holeplates

Takeshi Wago and Hiroyuki Ike

After calibrating holeplates using a reverse method based on a high-precision coordinate-measuring machine (CMM), we calculated the uncertainty in calibration. The CMM performance is demonstrated by comparing the measured dimensions of holeplates against its design values. The result allowed us to calculate the uncertainty in calibration of holeplates made from ceramics with a low thermal-expansion coefficient. For a measurement length of 350 mm, an uncertainty  $U(k=2) = 444 \text{ nm}$  was obtained, which is less than that obtained with materials with normal coefficients of thermal expansion (e.g., gauge block).

**key words : coordinate-measuring machine, holeplate, low coefficient of thermal expansion ceramics, evaluation of performance, uncertainty of calibration**

### 1 緒言

ホールプレート（以下、HP という）は、二次元的に円筒を配置した標準器であり、座標測定機（以下、CMM という）の精度検査や補正テーブル作成に使用されている。HP は低膨張ガラス、インバー合金及び炭素繊維を筐体として測定要素の円筒穴を機械加工で仕上げたものや、円筒ブッシュを埋め込んだものなどが提案・市販されていた。しかしながら、円筒ブッシュを埋め込んだものでは値付け精度の問題点、個々の材料の筐体においても経年変化、難加工性などの多くの問題点を有していた。ここで使用した HP は低熱膨張セラミックスを筐体としたもので、機械加工性が良好、経年変化が小さい、かつ比剛性（ヤング率／密度）が高く大型 HP（□500 mm 以上）へも対応可などの優れた特性を有している。

HP は CMM の性能検査や校正での有効性が高く、広く日本国内の製造産業で稼働する CMM に適用することで CMM の検査及び校正技術が向上すると予想される。HP を広く普及させるためには、全国の公設試において HP

の値付け校正ができること、HP を使用した検査方法技術が蓄積されていることが必要になる。

ここでは、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、パイロットラボが示したプロトコルに従い、HP の値付け校正と HP を使用した性能検査を実施した。特に、環境温度に依存しない低熱膨張特性を有する低熱膨張セラミックス製 HP が示す校正値の不確かさの大きさ及びその算出方法、さらに、CMM の性能検査を実施するための治具による固定方法やワーク座標系の設定方法などを把握し、その検査様式を示した。

### 2 実験方法

実験に使用した CMM は UPMC550-CARAT (Carl Zeiss)、ソフトウェアの OS は Windows XP、CMM のソフトウェアのバージョンは UMESS-LX Ver1.0、最終メーカー校正日は平成 25 年 1 月 22 日である。CMM は門移動型の構造でプローブはパラレルツイン式の 3D プロービングが行え

\* 平成 24 年度 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（共同研究）

\*\* ものづくり基盤技術第 2 部（現 素形材技術部）

るプローブである。CMMの指示誤差は  $MPEE=0.8+L/600$   $\mu\text{m}$  (Lは測定長さmm) である。相互測定での測定期日は平成25年2月4日～3月1日、グループはAグループ、HP No.1 である。トレーサビリティの道筋は、国家標準→ホールステップゲージ→HP である。

### 3 HPへの値付け

#### 3-1 固定方法

プロトコルではHPとホールステップゲージ(以下、HSG)の二つのゲージの固定の制限として、直接CMMテーブルに固定してはいけないことを指示している。他のゲージ固定に関する指示事項は、付属の支持台の使用は必須ではないこと、熱によるゲージの膨張を阻害しない固定方法にすることのみを指示している。ここでは、写真1に示すとおり、CMMテーブルの上に補助石定盤を置き、その上にT型治具を置いた構造とした。補助石定盤は自重のみで位置が固定できると予想して直接的にCMMテーブルとネジ止等の固定は行わなかった。付属のT型治具は写真1のとおり補助石定盤に2箇所をクランプで固定した。反転法による測定で、反転後の位置の再現性を確保するために写真2のとおりCMMテーブルに付き当て板を2箇所設置した。

#### 3-2 測定物座標系

HPの値付けを行うためには、そこで使用するCMMに正確な目盛を与えることが必要であり、その目盛補正方法は国家標準にトレーサブルな寸法標準器を利用して行われる。ここでは、その寸法標準器としてHSGを用いてCMMの目盛校正を実施した。このHSGによるCMMの目盛校正がHPへの値付けにおいて最大の要点であると考えた。

HSGにより行った目盛校正値をHP測定へ適切に受け渡すためには、HP測定での測定物座標系(以下、WCS)のX軸(回転軸)とHSG測定でのWCSのX軸(回転軸)をほぼ一致させる必要がある。ここでは二つのゲージのX軸を揃える方策として補助石定盤の-Y側端面を利用した。この補助石定盤の端面をCMMの機械座標系(以下、MCS)に揃えて配置することで、この補助石定盤の端面を利用して二つのゲージ間のX軸を容易に揃えることができると考えた。そこでT型治具と補助石定盤の-Y端面をプレートに付き当てて揃えた。CMMテーブル上の2箇所の付き当て板に補助石定盤を押しつけて、T型治具の-Y端面のY軸方向の出入りを図1に示す点1と点2の位置で測定した。その結果、機械座標系で点1がY0mm、点2が-0.0578mmとなりY軸方向の出入りは0.0578mmであった。次にHPは反転法を利用することから、補助石定盤上にT型プレートを固定したままでZ軸を回転中心として補助石定盤を180°回転させ、CMMテーブル上の付き当て板に補助石定盤を押し当てた状態で図2に示す点3と点4のY座標を測定したところ、点3はY322.3953mm、点4はY323.7826mmとなりY軸方向の出入りは1.3873mmであった。



写真1 T型治具の固定方法



写真2 CMMテーブル上の付き当て板

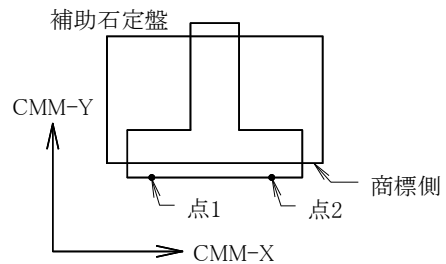


図1 T型治具のY軸出入り測定(回転前)

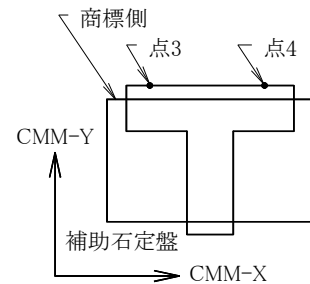
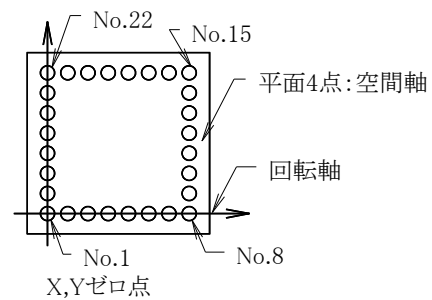


図2 T型治具のY軸出入り測定(回転後)



Zゼロ点:平面からZ-15mm

図3 HPのWCS

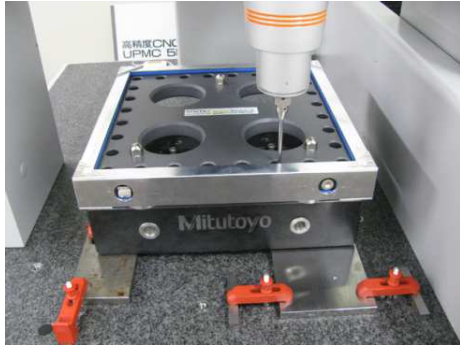


写真3 D0の姿勢



写真4 HSGのX軸の姿勢

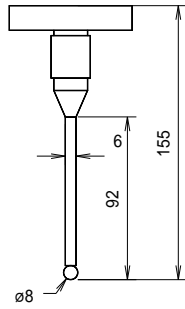


図4 使用したスタイラス



写真5 HSGのY軸の姿勢

HP測定でのWCSは図3のとおり空間軸はHPの上端面を平面4点測定した時の法線ベクトルとし、回転軸(X軸)はNo.1円とNo.8円で成す直線、X、Y軸のゼロ点はNo.1円の中心座標、Z軸のゼロ点はHPの上端面からZ-15mm平行移動させたHPの中立面上の点とした。

### 3-3 反転法による測定

HPは写真3に示すD0、DX、DY、DZの4通りの姿勢で測定した。測定方法はNo.1→No.8→No.15→No.22→No.1の順によるForward方向、続いてNo.1→No.22→No.15→No.8→No.1の順によるBackward方向となる行きと帰りを1セットとして測定し、繰り返しは無しとした。ただし、HP測定でのCMMの測定の不確かさを求めるためにD0のみ繰り返し5回の測定をした。NCプログラム作成では、ボールプレートの時とは異なる外側1列の配列のためにループを入れ子にする必要が無かったために容易にNCプログラムが作成できた。

NCプログラムはD0、DZ用とDX、DY用に1個ずつ用意し、座標系変換DI1711でD0が1、DZが3、DYが7、DXが5を設定することでこの二つのNCプログラムのみで測定対応ができた。1姿勢あたりのForward + Backward測定に要する測定時間は22分であった。スタイラスは図4に示す鉛直下向きのφ8mmチップの赤色ルビーを使用した。

### 3-4 HP測定での温度変動

HP測定中の温度はCMM内蔵温度計の検知部をCMMテーブル上に接触させて測定した。D0、DX、DY、DZの4姿勢の測定を通しての温度の平均値は19.23℃、変動幅は0.1℃であった。HPの線膨張係数がほぼ0/℃であるため、HP測定で温度補正は行わなかった。

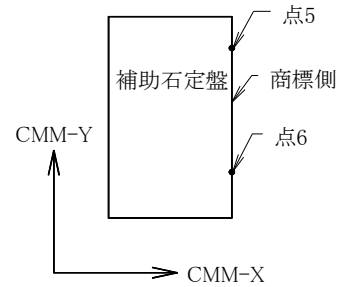


図5 HSGのX軸出入り測定

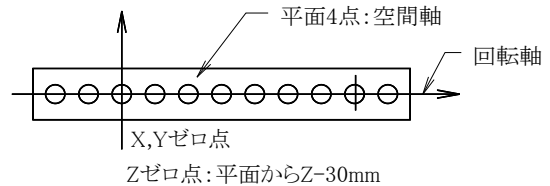


図6 HSGのWCS

## 4 ホールステップゲージによる目盛校正

### 4-1 固定方法

HSGは写真4のとおり補助石定盤上に付属の平行ブロックを敷き、その上にHSGを置いた。HSGの固定方法は、自重に加えて2個のVブロック挟み込む方法とし、クランプ等で固定しなかった。

### 4-2 測定物座標系

HSGの設置要点はHPと回転軸方向が一致するように設置することである。X軸方向の設置では、写真4のとおりCMMテーブル上の付き当りに押し当てた補助石定盤の-Y端面を起点として、長さ150mmの平行ブロックを利用してMCSのX軸に揃えた。Y軸方向の設

置では写真5のとおり補助石定盤を90°回転させてCMMテーブル上の付き当てに押し当てて、長さ75mmのブロックゲージを利用した補助石定盤の基準端面からの長さを一定に揃えて、HSGのY軸方向の向きがMCSに一致するようにした。ここで補助石定盤の右側端面のX座標を図5に示す点5と点6の位置で測定したところ、点5がX269.6867mm、点6がX270.1251mmでありX軸方向の出入りは0.4384mmであった。HSGのWCSは図6のとおり空間軸は上端面で平面4点測定の方法線ベクトルとし、回転軸は左側から3個目の円と10個目の円の成す直線とし、X、Y軸のゼロ点は左側から3個目の円の中心座標、Z軸のゼロ点は上端面からZ-30mm平行移動させた中立面上の点とした。

4-3 HSGの測定

HSGの測定はX-50mmの穴から右に10個目までの穴を円測定し、繰り返しは5回とした。Y軸上に置いた時も同様である。測定時間はX軸、Y軸とも20分を要した。スタイラスは図4に示す鉛直下向きのφ8mmチップの赤色ルビーを使用した。

4-4 HSG測定での温度変動

HSG測定中の温度はCMM内蔵温度計の検知部をCMMテーブル上に接触させて測定した。HSG測定中の温度の平均値は19.3℃、変動幅は0℃であった。HSGの線膨張係数がほぼ0/℃であるため、HSG測定で温度補正は行わなかった。

4-5 値付けの不確かさの算出

(1) 長さに依存しない項

- σ(CMM) : CMMの測定の不確かさ (Aタイプ)  
→HP測定の繰り返しの標準偏差: D0姿勢、112円(行き帰り、XY) × 繰り返し5回
- σ(Mcali) : HSGの値付けの不確かさ (Bタイプ)  
→パイロットラボの提示値(k=2)

(2) 長さに依存する項

- σ(bias) : CMMの偏りの不確かさ (Aタイプ)  
→この因子は目盛補正をしているのでバジェット表か

表1 ホールプレートの値付け測定結果

ホール番号	ホール中心の座標(mm)	
	X	Y
1	0.0000	0.0000
2	50.0000	0.0001
3	99.9993	-0.0006
4	149.9981	-0.0004
5	199.9969	0.0001
6	249.9954	-0.0003
7	299.9879	-0.0006
8	349.9918	0.0000
9	349.9917	50.0014
10	349.9916	100.0019
11	349.9898	150.0013
12	349.9891	200.0025
13	349.9883	250.0049
14	349.9881	300.0056
15	349.9879	350.0075
16	299.9865	350.0089
17	249.9876	350.0093
18	199.9885	350.0098
19	149.9906	350.0103
20	99.9914	350.0110
21	49.9989	350.0115
22	0.0016	350.0119
23	0.0014	300.0099
24	0.0014	250.0085
25	0.0022	200.0069
26	0.0034	150.0068
27	-0.0009	100.0036
28	-0.0008	50.0017

表2 ホールステップゲージを使用して求めた

CMMの目盛誤差

X軸_CMM			Y軸_CMM		
測定値	標準値	誤差	測定値	標準値	誤差
-50.0005	-50.0000	-0.0005	-50.0005	-50.0000	-0.0005
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
49.9976	49.9975	0.0001	49.9976	49.9975	0.0001
99.9937	99.9934	0.0003	99.9938	99.9934	0.0004
149.9919	149.9916	0.0003	149.9920	149.9916	0.0003
199.9919	199.9917	0.0002	199.9920	199.9917	0.0003
249.9909	249.9908	0.0000	249.9910	249.9908	0.0002
299.9899	299.9896	0.0003	299.9898	299.9896	0.0001
349.9898	349.9896	0.0002	349.9897	349.9896	0.0001
399.9912	399.9913	-0.0002	399.9912	399.9913	-0.0002

表3 バジェット表

長さに依存しない項

記号	不確かさ要因	値	確率分布	序数	標準不確かさ	感度係数	標準不確かさ (mm)
σ(CMM)	CMMの測定の不確かさ	4.96E-05	-	1	4.96E-05	1	4.96E-05
σ(Mcali)	HSGの値付けの不確かさ	4.00E-04	正規	2	2.00E-04	1	2.00E-04

長さに依存する項

記号	不確かさ要因	値	確率分布	序数	標準不確かさ	感度係数	1mm当たりの標準不確かさ (mm)
σ(bias)	CMMの偏りの不確かさ	0.00E+00	F分布	1	0.00E+00	L	0.00E+00
σ(GB)	GBの表示値の不確かさ	4.70E-04	正規	2	2.35E-07	L	2.35E-07
σ(T_digit)	温度計の量子化の不確かさ	5.00E-02	矩形	1.732	2.89E-02	L × α	5.77E-10
σ(α)	HSGの線膨張係数の不確かさ	2.00E-08	矩形	1.732	1.15E-08	L × Δt	1.15E-09

$$U(k=2) = 2 \times (0.00021^2 + (2.35 \times 10^{-7} L)^2)^{0.5} \text{ mm}$$

$$U(k=2) = 444 \text{ nm} \text{ (L=350 mm)}$$

ら除いた。必要であればHSG測定のプロット式の不確かさ $u_m$ により算出する（CMM軸に平行な2姿勢）。

$$u_m = \pm \sqrt{F_f^1(0.05) \frac{M^2}{M_1^2 + M_2^2 + \dots + M_k^2} V_e} \quad (1)$$

ここで、 $F_f^1(0.05)$  は自由度 $f$ のF分布の5%の値、 $M$  はHSGの標準値、 $V_e$ は誤差分散である。

- $\sigma(\text{GB})$  : GBの表示値の不確かさ (Bタイプ)  
→ GBの校正証明書 ( $k=2$ )
  - $\sigma(\text{T\_digit})$  : 温度計の量子化の不確かさ (Bタイプ)  
→ 最小目盛 $0.1^\circ\text{C}$ の矩形分布
  - $\sigma(\alpha)$  : HSGの線膨張係数の不確かさ (Bタイプ)  
→ メーカーの提示値 $\pm 0.02 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$ 、矩形分布
- 以上の算出方法により値付けの不確かさを算出した。

#### 4-6 実験結果及び考察

表1にHPの測定結果、表2にHSGを使用して求めたCMMの目盛誤差、表3にHPの値付けの不確かさを示す。表1の値は反転法D0、DX、DY、DZによる4姿勢で平均値を算出し、その値に表2の目盛誤差を補正した結果である。また、表1の値の分布する範囲が表3で示す拡張不確かさ $U(k=2)$ である。ちなみに、測定長さが350mm時の不確かさは444nmとなる。表3のバジェット表への不確かさの配置は低熱膨張材型標準器を使用したCMMの中間点検の論文<sup>1)</sup>を参考にした。表3のバジェット表から長さに依存しない項のHSGの値付けの不確かさが大きく影響していた。通常の標準器の校正ではブロックゲージなど温度膨張材料が多くを占め、その場合では温度膨張に起因する不確かさの影響から不確かさが大きく算出される傾向が見られるが、ここでの低熱膨張材型標準器の場合ではこの因子が無視できるため不確かさが小さく算出された。

### 5 ホールプレートによるYZ面の検査

#### 5-1 測定の目的

HPを使用してCMMのYZ平面の検査を行い、測定範囲内の測定精度を求める。

#### 5-2 固定方法

HPを利用したCMMのYZ面の検査をした。HPの固定方法は付属治具を利用してYZ面上に平行にHPを直立させた。写真6、7のとおりCMMテーブル上に付き当て板を2箇所設置して、それに押し当ててHPをMCSに揃えた。ZX面におけるX軸方向の出入りを図7の2箇所測定したところ、点7がX239.9809mm、点8がX240.4564mmから0.4755mmであった。XY面におけるX軸方向の出入りは点9がX240.3008mm、点10がX240.0838mmから0.2170mmであった。付属治具を含むHPは自重による設置方法として、クランプ等で直接CMMテーブルに固定することはしなかった。

#### 5-3 測定物座標系



写真6 HPのYZ面の姿勢1



写真7 HPのYZ面の姿勢2

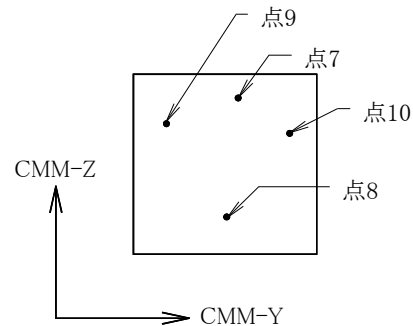


図7 直立姿勢での出入り測定

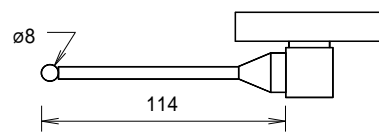


図8 使用したスタイラス

表4 YZ面の誤差

	XY 面内	YZ 面内	ZX 面内
xTx [um/m]	0.0	--	0.0
yTy [um/m]	0.0	-0.3	--
zTz [um/m]	--	0.5	0.0
xWy [urad]	0.0	--	--
yWz [urad]	--	-0.3	--
xWz [urad]	--	--	0.0

HPの向きはNo.1円からNo.8円に向かう方向を+Y方向として設置し、空間軸の方向は+Xとした。WCSは3.ホールプレートへの値付けと同等とした。

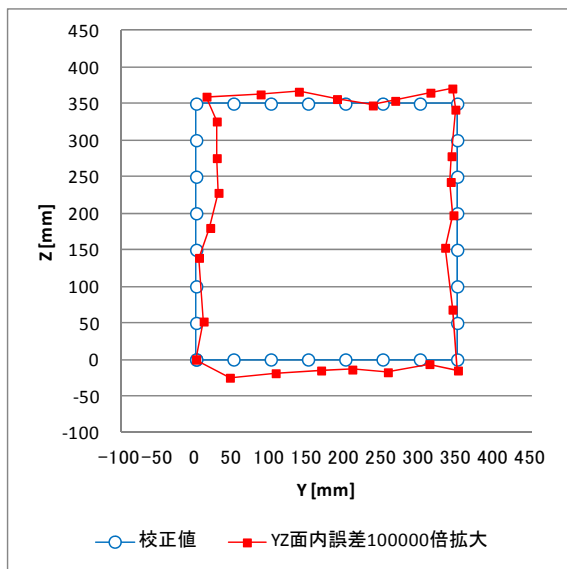


図9 YZ面の誤差

#### 5-4 YZ面のHP測定

Forward+Backward 測定を繰り返し無しで行い、測定時間は20分であった。スタイラスは図8に示す-X方向横方向のφ8mmチップの赤色ルビーを使用した。

#### 5-5 YZ面のHPの測定での温度変動

測定中の温度の平均値は19.3℃、変動幅は0℃であった。YZ面の測定では、HPの線膨張係数がほぼ0/℃であるため温度補正は行わなかった。

#### 5-6 実験結果及び考察

表4と図9にYZ面の誤差を示す。ここで使用したHPの校正値は表1を使用した。つまり、HPを校正したCMMとYZ面を検査したCMMは同じものであり、今後表1の校正値の客観的な検証を要する。表4よりYZ面内の誤差はY軸方向で $-0.3\mu\text{m}/\text{m}$ 、Z軸方向で $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ となり検査長さ1mでの指示誤差 $2.4\mu\text{m}$ を大きく下回った。また、Z軸に対するY軸の直角度誤差は $-0.3\mu\text{rad}$ となり非常に小さい。XY面及びZX面は検査を実施していないため数値は0を示している。また、図9から誤差の分布傾向は規則性は見られず、ランダムに分布する誤差

であることからCMMの校正及び仕様の分解能に依存する誤差であると思われる。このことから、現状でのCMMの状態は高精度測定に対応できる良い状態であることがわかった。

## 6 結 言

低熱膨張セラミックス製ホールプレートを使用して、高精度CMMによりホールプレートの値付け校正を行い校正方法の様式化と値付けの不確かさを算出した。また、校正値を与えたホールプレートを使用してCMMの性能検査方法を試した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 高精度CMMで反転法により値付け校正した。トレーサビリティを付与するための標準器はホールステップゲージを使用した。その結果、校正値の不確かさは測定長さ350mmでは $U(k=2)=444\text{nm}$ と算出され、ブロックゲージなど温度膨張材料に比較して低熱膨張材料の場合では温度膨張に起因する因子が排除された結果、校正値の不確かさが小さく算出される効果が見られた。
- (2) ホールプレートを使用したCMMの性能検査を試した。YZ面にホールプレートを立てる姿勢では、低熱膨張セラミックスの比重が鉄の1/3の特性効果により軽量で操作性が容易であった。性能検査で得られた結果は、YZ面内での誤差はY軸方向で $-0.3\mu\text{m}/\text{m}$ 、Z軸方向で $0.5\mu\text{m}/\text{m}$ となり検査長さ1mでの指示誤差 $2.4\mu\text{m}$ を大きく下回り、CMMが良好な状態であることが確認できた。

## 文 献

- 1) 和合健、ほか:座標測定機の間時点検手法の考察、精密工学会誌、Vol.79、No.3、p241-247 (2013)

## 謝 辞

本研究は、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行われた。実験を行うにあたり本共同研究に参加されたNMIJ/AIST、公設試及び企業の研究員の方々には貴重なご指導を頂き、この場を借りて感謝を表す。