

ボールディメンジョンゲージの持ち回りによる 座標測定機の性能検査*

和合 健**、堀田 昌宏**、飯村 崇**

東北6県公設試の共同実験としてボールディメンジョンゲージ (BDG) の持ち回りによる座標測定機の性能検査を行った。その実験方法は、ISO/TS 15530-3:2004 (校正されたワークまたは標準の使用) に従い、座標測定の不確かさを算出する方法である。その結果、岩手県工業技術センターの場合では、誤差限界とバジェット表による不確かさはメーカーが提示する指示誤差とほぼ同等な結果が算出された。

キーワード：不確かさ、座標測定機、ボールディメンジョンゲージ、性能検査

Evaluation of Performance of CMM on Round Robin Test using BDG

WAGO Takeshi, HOTTA Masahiro and IIMURA Takashi

Round robin test on an evaluation of performance of Coordinate Measuring Machine(CMM) were experimented using a Ball Dimension Gauge(BDG) by Tohoku 6 prefectures public research institute as joint experiment. The uncertainty of the coordinate measuring was calculated according to ISO/TS 15530-3:2004 (Use of calibrated workpieces or standards). As a result, both uncertainties of limit of error and budget table to calculate by Iwate Industrial Research Institute(IIRI) experiment were almost equal to indicated error of manufacturing company of CMM pointed.

key words : uncertainty, Coordinate Measuring Machine, Ball Dimension Gauge, evaluation of performance

1 緒 言

東北地域においては自動車製造メーカーの工場立地が進み、自動車産業の集積化が促進されている。また、秋田県をはじめとして航空機に関する産業集積化の可能性も検討されている。自動車製造では品質管理の重要性が非常に高く、そこでは高度な測定技術が要求されている。このような背景において我々は、地域イノベーション創出共同体形成事業において(地独)岩手県工業技術センターをパイロットラボとして、(地独)青森県産業技術センター八戸地域研究所、秋田県工業技術センター、宮城県産業技術総合センター、山形県工業技術センター、福島県ハイテクプラザの東北6県の共同実験として標記テーマに取り組んだ。この目的は、第一がISO規格では座標測定機(以下、CMMという)の性能検査の概要しか示されていないことから、実用的な検査用標準器を含めた検査方法を提案すること。第二が各県のCMM測定における測定技能の一致度を評価し、東北各県公設試のCMM測定技能の向上を図ることである。ここでは、岩手県で行った分の実験内容及び結果について述べる。

2 実験方法

2-1 装置の説明

実験に使用したCMMはCarl Zeiss製で型式はUPMC550-CARAT、ソフトウェアはUMESS-LX Ver1.0である。導入年は平成6年3月でありH18年3月に制御PCをWindowsにレトロフィットした。最終校正日は平成20年3月14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るプローブである。CMMの指示誤差は $MPE_E=0.8+L/600\mu\text{m}$ (Lは測定長さmm)である。

2-2 Traceability pathの説明

CMMのトレーサビリティは2年に1回の周期で(株)東精エンジニアリングがメーカー校正を行っている。そのため、機械単体では(株)東精エンジニアリングが持つトレーサビリティにより国家標準まで繋がる。ユーザで行うトレーサビリティへの取り組みは、誤差の小さい測定が要求された場合に年1回の周期で校正しているブロックゲージを標準器に使用して目盛誤差を補正している。校正されたブロックゲージを標準値として使用すること

* 地域イノベーション創出共同体形成事業

** 材料技術部

でユーザ校正による国家標準へトレーサビリティが繋がっていると解釈している。

2-3 プロトコル

プロトコルはパイロットラボから示され、ISO/TS 15530-3:2004 (校正されたワークまたは標準の使用) に従い、式(1)により測定の不確かさを算出するものである。

$$U = k \times \sqrt{u_{cal}^2 + u_p^2 + u_w^2} + |b| \quad (1)$$

ここで、 U_{cal} は標準器の校正での不確かさ、 U_p は測定手順における不確かさ、 U_w は測定物の線膨張係数等の物性値及び製造過程で与えられた形状や表面粗さ等に関する不確かさ、 b は系統誤差となる。

(1) 入出力関係

図2に示したボールディメンジョンゲージ (以下、BDG という) の標準値を入力とし、CMM の測定値を出力とした時に図1に示す誤差因子とした外乱による変動 $L_1 \sim L_3$ の差が小さく、一次比例の線形式のばらつきが小さくかつ感度が大きい関係が良い測定が行われていると判定する。基本機能の入出力の関係を表すゼロ点比例式を式(2)、測定の悪さ程度を評価する測定の SN 比を式(3)に示す。

$$y = \beta M \quad (2)$$

$$\eta = \beta^2 / \sigma^2 \quad (3)$$

ここで、 y は CMM の測定値(mm)、 M は BDG の標準値 (mm)、 β は感度、 η は測定の SN 比(db)、 β^2 は信号の効果、 σ^2 は誤差分散である。

(2) 因子及び水準

標示因子は使用条件や試験条件の測定誤差への影響の程度を調べるために設定する因子である。本実験では標示因子として誤差を発生させる原因となり得る諸条件を意図的に取り上げる。誤差因子は、校正により修正不可能な誤差として設定する因子を指す。信号因子は式(4)における M を指し、CMM による測定値 y を変化させる原因系を指す。

(3) 標示因子

標示因子は CMM の測定で不確かさの発生が経験的に指摘されている因子を内側と外側の割付により設定した。表1に内側の標示因子を示す。因子 A のプロービング方向はタッチトリガ式プローブ及びパラレルツイン式プローブの 2 軸固定 1 軸自由モードにおいて 45°方向のプロービング時にプロービング誤差の発生が指摘されている。因子 B のスタイラスの向きは W.A.ゲージ (以下、WAG という) による CMM の性能検査や計測分科会等で誤差が指摘されている。因子 C の BDG の位置は CMM テーブル上の測定位置に関する誤差を検査する。表2に外側の標示因子を示す。因子 E のプロービングの領域は、狭い範囲で球全体を推測できる測定ができれば能率向上や部分球測定に対応できる。

(4) 誤差因子

誤差因子はばらつき要因となる測定の繰り返しを表3のとおり 3 水準を設定した。

(5) 信号因子

信号因子は図2に示すゼロ球と各球の球間距離として 5 水準を設定した。

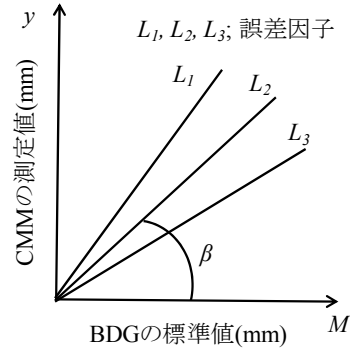


図1 入出力関係の定義

表1 内側の標示因子

因子		水準	
		1	2
A	プロービング方向	軸方向、ただし極に1点以上あること	第1水準以外、ただし測定点数は同等のこと
B	スタイラスの向き	鉛直下向き	第1水準以外
C	BDGの位置	X _{CMM} 軸またはY _{CMM} 軸に平行であること	第1水準以外、ただしCMMの軸に平行でないこと

表2 外側の標示因子

因子		水準	
		1	2
E	プロービングの領域	半径の領域	半径/3の領域

表3 誤差因子

因子		水準		
		1	2	3
N	測定の繰り返し	1回目	2回目	3回目

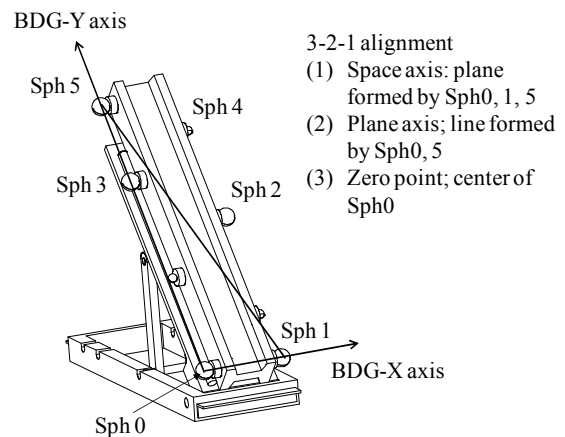


図2 BDG における測定物座標系と球番号

表4 割付表

No.	内側の標示因子			E) 外側の標示因子							
				E ₁ : 半径の領域				E ₂ : 半径/3の領域			
	A)	B)	C)	N) 測定の繰り返し		S/N	N) 測定の繰り返し		S/N		
			N ₁	N ₂	N ₃	η(db)	N ₁	N ₂	N ₃	η(db)	
1	軸方向	下	軸平行								
2	軸方向	以外	以外								
3	以外	下	以外								
4	以外	以外	軸平行								

A) プロービング方向
 B) スタイルスの向き
 C) BDGの位置
 E) プロービングの領域

(6) 直交表への割付け

因子の割付けは、直交表 L₄ を使用し表4のとおり各因子を割り付けた。

2-4 測定技法の説明

実験ではプロトコルに従い行い、CMM の構造やソフトウェアの制限からプロトコルを外れる測定方法は無かった。球測定点数は、極2点赤道3点の合計5点とした。赤道3点とした理由は BDG の姿勢とスタイルスの向きにより 90°ずらした時に赤道4点を取得出来ない組み合わせがあったため最小点数に合わせたためである。内側の標示因子の設定は、次の A)、B)のとおりとした。A) プロービング方向はプロトコルの指示どおりで水準1がCMM 軸に平行な方向、水準2が基本的にはCMM 軸に45°方向とし45°が実現できない場合はできるだけ45°に近くなる角度でプロービングした。プロービングはSTEP コマンドを使用せずすべて手動で行った。B)スタイルスの向きを図3に示す。水準1は鉛直下向きとして

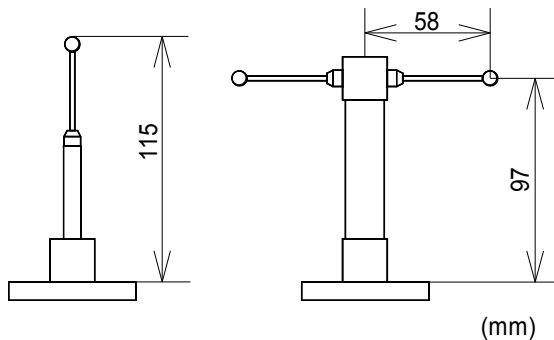


図3 スタイルスの構成

φ5mm のチップでスタイルス長さ 35mm、延長シャフトの直径φ11で長さ40mmと接続して合計したスタイルス長さは皿の表面からチップ中心まで115mmである。水準2はCMM 軸のX軸上に平行になるようにしてX+方向とX-方向の2本のスタイルスを鉛直軸に90°の向きに取り付けた。スタイルスはφ5mmのチップで長さは35mmである。延長シャフトは外径φ20mmで長さ60mmを使用しており、スタイルスの鉛直下向き方向の皿の表面からチップ中心までの長さは97mmである。水準1と2とも延長シャフトの材質はアルミニウム製とした。C)BDGの位置は水準1がCMM 軸に平行な姿勢として

いるが、実験No.1がX軸に平行、実験No.4がY軸に平行とした。水準2は横向きのスタイルスの向きがBDG 筐体に干渉しないことに注意してCMM 軸と平行ではない姿勢を見つけて設定した。外側の標示因子の水準2は目分量で半径/3の領域と判断して測定した。誤差因子の測定の繰り返しはCNC プログラムをティーチングブレイバックで作成してティーチング後の自動測定により繰り返し1回目～3回目の測定を行った。JISで規定する20°Cからのかたよりによる熱膨張長さは測定後にオフラインで補正した。ブロックゲージ測定によるCMMの目盛誤差補正は行わなかった。

2-5 測定中の温度測定の方法

測定中の温度変動を表5及び図4に示す。温度の測定方法は、CMM 定盤上に置いた目量が0.1°Cのデジタル温度計を使用してCNC 測定をスタートする時点で目視で確認してノートに書き込む方式で温度を測定した。1回の自動測定時間は実験番号No.4が最長で10分であり、その時間内での大きな温度変動は無かった。

表5 温度の変動

項目	平均値	変動幅
温度(°C)	20.0	0.3
湿度(%RH)	49.7	15.0

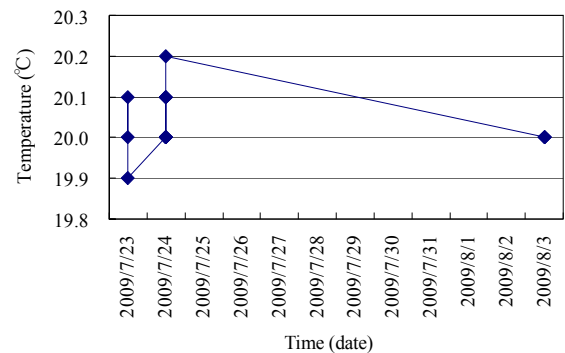


図4 温度の変動

3 実験結果及び考察

3-1 測定のSN比による評価

測定のSN比及び誤差限界を表6、測定のSN比の要因効果図を図5に示す。外側の標示因子としたプロービングの領域は半径/3が半径領域よりもSN比が高くなった。これは真球度が良好な球の場合は、半径/3の領域の測定のみで十分に球全体を推測できる測定が行えることを示している。因子毎にSN比の大きな水準はA)プロービング方向で軸方向、B)スタイルスの向きでここでは90°横向き、C)BDGの位置でCMM 軸と平行でない位置となった。因子内の水準間のSN比の差は因子Cの水準1で3.2db、水準2で4.3dbとなり他の因子は3db未満であった。測定のSN比は3dbで有意と判定するため因子C)BDGの位置は有意と判定され、測定物の姿勢によ

り測定の不確かさが変わることが明らかとなった。誤差限界の全実験番号での平均値は 1.62 μm となった。指示誤差は $0.8+L/600\mu\text{m}$ (L は測定長さ mm)であり信号因子 M5 の 441mm を代入すると $E=1.54\mu\text{m}$ となり BDG を使用して CMM の指示誤差を検査した結果ほぼ同等の値が算出された。

表6 測定のSN比及び誤差限界

No.	Internal indicative factor			E) External indicative factor			
	A)	B)	C)	E ₁	E ₂	E ₁	E ₂
				$\eta(\text{db})$	$\eta(\text{db})$	$3/\sqrt{\eta}(\mu\text{m})$	$3/\sqrt{\eta}(\mu\text{m})$
1	1	1	1	63.4	64.5	2.0	1.8
2	1	2	2	69.2	70.1	1.0	0.9
3	2	1	2	64.5	66.4	1.8	1.4
4	2	2	1	64.0	63.3	1.9	2.1

- A) プロービング方向
- B) スタイルスの向き
- C) BDGの位置
- E) プロービングの領域

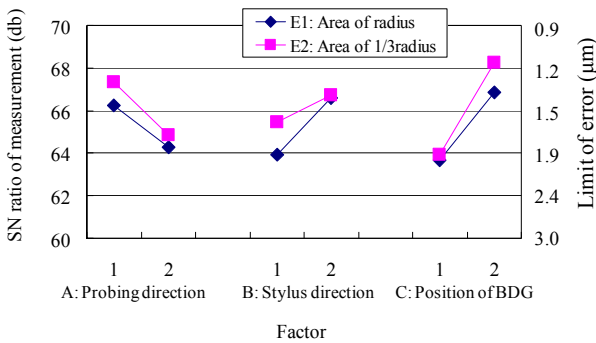


図5 測定のSN比の要因効果図

3-2 分散分析によるCMM測定の不確かさの算出

分散分析により算出した因子毎の分散を表7に示す。因子毎の分散から各因子の不確かさ σ を求め、表8に示すバジェット表に配列した。長さに依存しない項は5種類の因子とした。長さに依存する項は不確かさまたは感度係数で長さを示す L の項がある因子として3種類の因子とした。特にBDGの位置はCMMの測定範囲内でBDGの位置を変えて行った因子であることから測定長さに依存する誤差が抽出されていると判断して長さに依存する項とした。長さに依存する項の感度係数 b は式(4)で算出した。座標測定の不確かさは式(5)から求めた。

$$b = u_{leh} / L_{max} \tag{4}$$

$$U(k=2) = \sqrt{a^2 + b^2 \cdot L^2} \times 2 \tag{5}$$

ここで、 b は長さに依存する項の不確かさの感度係数、 u_{leh} は長さに依存する項の不確かさ(mm)、 L_{max} は信号因子の最大値(mm)でありここではM5の441mm、 U は座標測定での拡張不確かさ(mm)、 a は長さに依存しない項の不確かさ(mm)、 L は測定長さ(mm)である。バジェット表によりCMM測定の不確かさを算出した結果、不確かさはE1で $L=441\text{mm}$ の時に $U(k=2)=0.00151\text{mm}$ 、E2で $L=441\text{mm}$ の時に $U(k=2)=0.00155\text{mm}$ となった。 $L=441\text{mm}$ 時の指示誤差は $E=1.54\mu\text{m}$ であり、バジェット表で算出した不確かさと指示誤差 E がほぼ同等に算出された。

表7 分散分析表

Factor	f	S	V	F	$E(V)$
A	1	1.86E-08	1.86E-08	0.1	$\sigma_e^2 + 60\sigma_A^2$
B	1	2.35E-05	2.35E-05	85.4	$\sigma_e^2 + 60\sigma_B^2$
C	1	1.29E-06	1.29E-06	4.7	$\sigma_e^2 + 60\sigma_C^2$
N	2	3.35E-06	1.67E-06	6.1	$\sigma_e^2 + 40\sigma_N^2$
E	1	2.17E-06	2.17E-06	7.9	$\sigma_e^2 + 60\sigma_E^2$
M	4	1.53E+06	3.83E+05	1.39.E+12	$\sigma_e^2 + 24\sigma_M^2$
e	109	3.00E-05	2.75E-07	-	σ_e^2
T	119	1531952	-	-	

表8 バジレット表

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 (長さの単位)
u_A	プロービングの方向	0.000000	-	1	0.000000	1	0.000000
u_B	スタイラスの向き	0.000626	-	1	0.000626	1	0.00063
u_E	プロービングの領域	0.000190	-	1	0.000190	1	0.00019
u_N	測定の繰り返し	0.000204	-	1	0.000204	1	0.00020
u_M	標準値の値付け	0.00061	正規	2	0.000305	1	0.00031
							0.000750

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	標準不確かさ (長さの単位)
u_C	BDGの位置	0.000147	-	1	0.000147	1	0.00015
u_a	GBとBDGの線膨張係数の差	0.000001	矩形	$\sqrt{3}$	0.0000003	$L \cdot \Delta t$	0.00000
u_t	温度計の量子化誤差	0.05	矩形	$\sqrt{3}$	0.0288675	$L \cdot \alpha$	0.00014
							0.000200

(1) E1 の時

$$\text{拡張不確かさ } U(k=2) = (a^2 + b^2 \cdot L^2)^{0.5} \times 2 = \{0.000725^2 + (4.537\text{E-}07)^2 \cdot L^2\}^{0.5} \times 2$$

$L=441\text{mm}$ の時、 $U(k=2)=1.51\mu\text{m}$

(2) E2 の時

$$\text{拡張不確かさ } U(k=2) = (a^2 + b^2 \cdot L^2)^{0.5} \times 2 = \{0.000750^2 + (4.537\text{E-}07)^2 \cdot L^2\}^{0.5} \times 2$$

$L=441\text{mm}$ の時、 $U(k=2)=1.55\mu\text{m}$

4 結 言

ボールディメンジョンゲージの持ち回りによる座標測定機の性能検査を行った結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) 測定の SN 比から誤差限界を求めた結果、全実験番号での平均値は $1.62\mu\text{m}$ となった。製造者が示す指示誤差は信号因子 M5 の 441mm では $E=1.54\mu\text{m}$ でありその差は $0.08\mu\text{m}$ となりほぼ同等の値となった。
- (2) バジレット表により CMM 測定の不確かさを算出した結果、不確かさは E1 の $L=441\text{mm}$ の時に $U(k=2)=1.51\mu\text{m}$ 、E2 の $L=441\text{mm}$ の時に $U(k=2)=1.55\mu\text{m}$ となった。製造者が示す指示誤差は信号因子 M5 の 441mm では $E=1.54\mu\text{m}$ でありその差は $0.03\mu\text{m}$ となりほぼ同等の値となった。
- (3) 測定の SN 比の要因効果図から因子 C)BDG の位置で因子内の水準間の SN 比の差が E1 及び E2 とともに 3db を超え有意と判定された。

- (4) 分散分析表では因子 B)スタイラスの向きが $V_B=2.35 \times 10^{-5} \text{mm}^2$ となり分散が最も大きく、分散比も 85.4 となり次に大きい分散比が因子 E)プロービングの領域の 7.9 であり、特出していた。
- (5) プロービングの領域では半径/3 の領域でプロービングした場合でも半径領域の場合と比較して測定の SN 比は変わらない。本 CMM は球測定で狭い測定領域でも測定の SN 比が高い測定が行える。

謝 辞

本研究は H20～H21 年度地域イノベーション創出共同体形成事業で東北 6 県の共同実験として行いました。共同研究者の(地独)青森県産業技術センター八戸地域研究所の中居久明氏、秋田県工業技術センターの加藤勝氏、宮城県産業技術総合センターの久田哲弥氏及び和嶋直氏、山形県工業技術センターの長岡立行氏、福島県ハイテクプラザの吉田智氏に感謝を申し上げます。