

三次元測定機の高度利用技術に関する研究

Studies on the Advanced Use Technology of CMM.

ボールプレート測定による三次元測定機の不確かさ比較

Uncertainty Comparison of the CMM by Ball Plate measurement.

木村勝典

Katsunori Kimura

マニュアル型及び CNC 型の三次元測定機について、ボールプレートを用いた測定の不確かさ比較を行い、不確かさに影響を及ぼす要因と影響度を明らかにした。

About the Manual type and the CNC type CMM, uncertainty comparison of measurement that used the Ball Plate was performed then the factor and effect of degree that affects uncertainty clarified.

1. はじめに

製品の寸法評価に利用されている測定機として三次元測定機（以下CMM）があり、高精度な測定が行えることが特徴である。しかし、CMMで測定したデータにも不確かさ¹⁾が存在している。不確かさを小さくすることがより高精度な測定を行う上では重要となる。

CMMには各軸の真直度、直交する軸同士の直角度、ヨーイング及びピッチング等 21 個の幾何学誤差が存在している。また測定子のプロービング誤差、繰返し誤差および測定戦略等により、多くの誤差要因が存在している。これらを全て把握することは容易ではない。

本研究ではCMMの幾何学誤差を効率的に測定できるボールプレートを用いて、マニュアル型及びCNC型の2機種のカMMによる測定の不確かさを算出し、比較した。既にCMMの幾何学誤差についてマニュアル型では、測定値のばらつきを2 μm 以下に低減できることを確認している²⁾。また、過去の国際比較の結果などから、高精度型では $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 程度³⁾とされているが、測定環境や測定機の状態によっては異なることも考えられる。そのため、タイプや測定精度の異なる2つのCMMで反転法を用い、測定結果の不確かさを定量的に見積もると共に、測定機の違いによる不確かさに影響を及ぼす要因を明らかにした。

2. 測定機及びゲージ

2.1 測定機

測定機の概要を表1に、外観図を図1に示す。

表1 測定機の概要

○ マニュアル型	
マニュアル式三次元測定機 (Mitsutoyo 製)	
型 式	Microcord A221 (門移動型)
指示精度	(4+8L /1000) μm
○ CNC型	
高精度三次元測定機 (Zeiss 製)	
型 式	UPMC 550 CARAT (門移動型)
指示精度	(0.5+L /900) μm



マニュアル型



CNC型

図1 CMM外観

2.2 長さ標準

長さの標準にトレーサブルな測定を行うため、マニュアル型においては、表2に示す校正されたゲージを用いた。CNC型においては、事前の測定機保守の際に使用したブロックゲージ（以下 BG）を用いてそれぞれスケール誤差の補正を行った。

表2 長さ標準

マニュアル型	
ブロックゲージ	ミットヨ製スチール
呼び寸法	50, 100, 200 mm
線膨張係数	10.9×10^{-6} (/K) : 20°Cにおいて
CNC型	
ブロックゲージ	東京精密製スチール
呼び寸法	100, 200, 300, 400, 500 mm
線膨張係数	11.5×10^{-6} (/K) : 20°Cにおいて

2.3 ボールプレート

測定に使用したボールプレートの概要を表3、外観を図2、そして寸法を図3に示す。

表3 ボールプレートの概要

名 称	ボールプレート（レッター社製）
サ イ ズ	420 mm（最大測定長さ 332 mm）
線膨張係数	11.5×10^{-6} (/K) : 20°Cにおいて



図2 ボールプレート外観

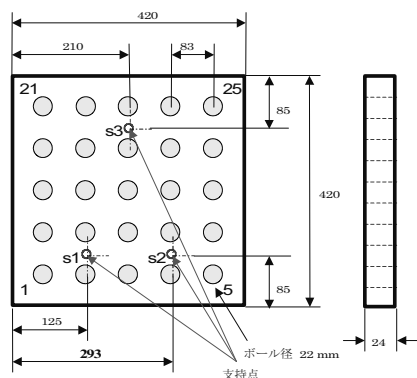


図3 ボールプレート寸法

3. 測定手順

3.1 ブロックゲージの測定

測定回数を10とし、その平均値を測定値とした。しかし、マニュアル型についてはCNC型の倍以上測定時間がかかるため、測定データのドリフトを抑えることからこの測定を2回行った。そして、温度補正後に校正値との差を求めた。マニュアル型では3つのBG、CNC型では5つのBG測定データより最小二乗直線を求め、各ボールまでの測定長さに応じてスケール補正を行った。測定ポイントはブロックゲージ端面の両端及び中央付近の任意の場所とした。

3.2 座標系

測定物の座標系については図4に示すように、ボール1の中心を原点、ボール5の中心をX軸上、ボール21の中心をXY平面にあると仮定した物体座標系を使用した。各ボールに対しては、赤道上付近の任意のポイント4点及び極1点の計5点測定を行うこととした。X軸の正方向はボール1からボール5に向かう方向であり、Y軸はそれに垂直でほぼボール1からボール21に向かう方向を正方向とした。そして物体座標系の原点に対する25個のボールのX、Y、及びZ中心座標値を求めた。それから、ボール1、5、及び21で再度物体座標系を作成し、各ボールの中心位置を求めた。ただしZ座標値は長さの標準にトレーサブルな測定が行えないため、参考値とした。

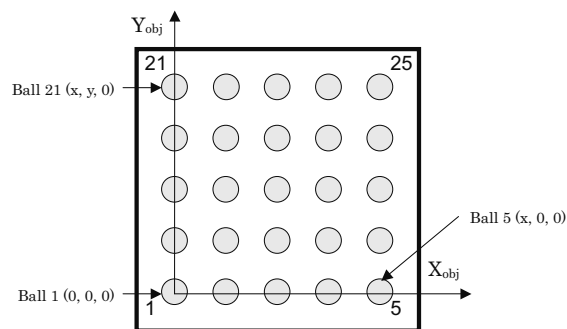


図4 ボールプレートの座標系

しかし、マニュアル型においてはこの方法で測定を行うと1Position当たり測定に数時間を要する。その

ため測定中の温度変化及び測定機のドリフト等の影響を考慮し、仮の物体座標系を作成せずに各ボールの中心位置を求めた。

3.3 測定戦略

ボールプレートは支持台とともに廻した。支持台はボールプレートと3つの接触点を持ち、その上面はそれぞれ円錐、V溝、平面でキネマティックに支持し固定した。またプレートポジションは、最初にセットした状態からX、Y、Z軸にそれぞれ反転させてセットすることとし、計4ポジションとした。

測定順序は1回につき4つのプレートポジションでかつ各ポジションにおいて渦巻き状に行きと帰りの2回測定を行い計8回の測定とし、これを2回繰り返した。ボール測定のプロービング点は赤道上を90° 間隔で4点と頂点1点の計5点測定とした。

その他測定戦略については、ボールプレートの反転法測定に準じて行った⁴⁾。

3.4 温度補正

測定は20°C±1°Cに調整された測定室で行った。ボールプレートおよびBGの温度は、測定室に十分放置してあることから測定室内同一温度とした。温度計測器はCMM定盤上のゲージ近傍に配置し、測定時に温度計測器の表示値を一定時間毎に読み取り、その読み取り値の平均値を測定時のボールプレートおよびBGの温度とした。

4. 結果と考察

4.1 ボールプレート測定結果

マニュアル型およびCNC型のCMMで求めた測定結果の比較を行った。ボールプレート25個の球位置についてX、Y座標値と参照値との差を図5、6に示す。図の中の(M)がマニュアル型、(C)がCNC型で測定したデータである。参照値には(独)産業技術総合研究所(以下産総研)で測定された同一のボールプレート測定結果を用いた。Z座標値は参考値であるために比較の対象とはしなかった。

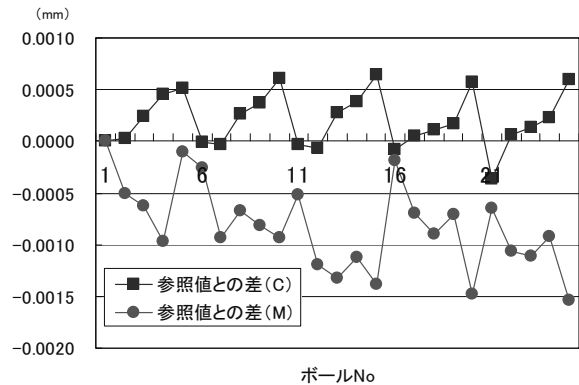


図5 X座標値の差

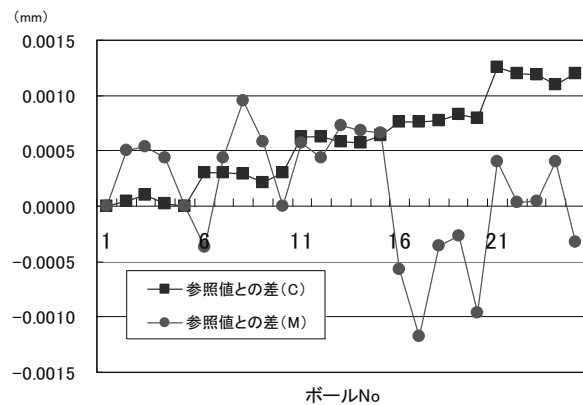


図6 Y座標値の差

図5、6より、マニュアル型においては測定結果と参照値との差が、X軸方向で1.5 μm前後、Y軸方向では±1 μm程度に収まっており、指示精度を考えれば非常に良い結果が得られた。

CNC型ではX、Y軸方向で原点からの距離に比例して参照値との差が大きくなっている。X軸方向で0.5 μm程度、Y軸方向で1 μm程度と良好な結果ではあるが、測定機の指示精度を考えると差が大きかったと言える。

原因として長さ標準にトレーサブルな測定を行うために実施したBG測定結果反映の影響が存在していると推測している。それは、マニュアル型ではボールプレート測定と同時にBG測定を実施したが、CNC型では測定機の不調からボールプレート測定時と同時にBG測定を行うことが出来なかった。そのため、測定時のスケール補正を、マニュアル型では反映すること

が出来たが、CNC型では反映することが出来なかったのではないかと考えられる。また、本測定においては、ボールプレートの測定結果は球測定で求めた中心座標値であるが、長さ標準はBGを用いた端面同士の点測定による2点間距離であり、測定方法の違いによる影響も加わったと考えられる。

しかし、CMMの指示精度に関わらず反転法測定を実施することで、測定結果として同程度の結果を得ることが確認できた。

4.2 反転法の結果

それぞれの測定機で行った反転法の効果について、各ポジションでの測定データのばらつきが、どの程度低減できるか調べた。図7、8にマニュアル型およびCNC型の各ボールにおける最大差を示す。また、図9にそれぞれのタイプで反転法により求めた値の差を示す。マニュアル型については、全体的にばらつきが大きく2～7 μm までの範囲にある。最大差がX方向で8.3 μm 、Y方向で7.8 μm であった。CNC型については、マニュアル型に比べればかなり差が小さく1 μm 前後にばらついているのがわかる。最大差がX方向で1.7 μm 、Y方向で1.6 μm であった。

そして、反転法によってマニュアル型では2回の測定結果の差は1 μm 以下に収まっており、ばらつきは約1/8に軽減されている。CNC型では2回の測定結果の差はほとんどが0.1 μm 以下であり最大でも0.18 μm であったため、こちらはばらつきが約1/10に軽減されている。マニュアル型では反転法を用いることによりばらつきを1/5程度に軽減できることを確認していたが²⁾、今回の結果ではさらに軽減が図れることがわかった。マニュアル型は手動式であるために、測定者の技量や習熟度が測定に影響することは知られているところであるが、今回は習熟度の向上が寄与した結果、ばらつきを抑えることができたのではと考えられる。CNC型のばらつきの軽減割合は、過去の国際比較のデータや産総研における測定結果と同様の割合であり³⁾、高精度型CMMの幾何学誤差はこれらと同程度の水準であるとの結果を得ることができた。

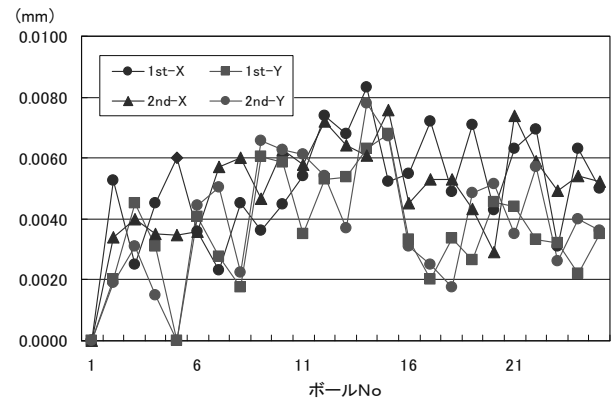


図7 マニュアル型測定結果

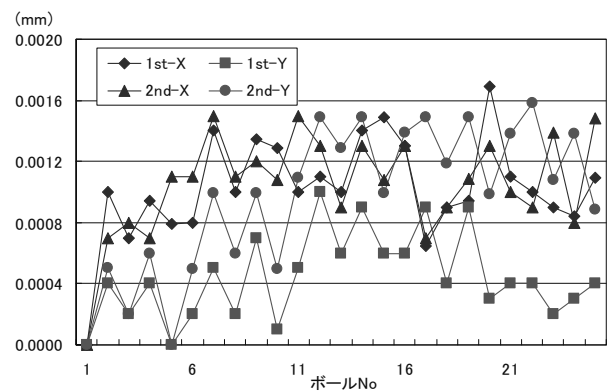


図8 CNC型測定結果

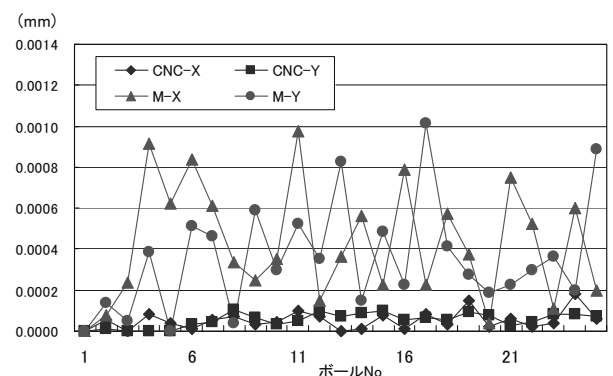


図9 反転法測定結果の差

4.3 ボールプレート測定の不確かさ

測定における不確かさ要因については、

- 1) プロービングの不確かさ
- 2) 幾何学誤差による不確かさ
- 3) 環境による不確かさ (温度・湿度等・気圧等)
- 4) 測定戦略による不確かさ

- 5) 測定物の固定方法等による不確かさ（固定力や測定物の変形）
- 6) 測定物自身による不確かさ（表面粗さ、形状誤差等）
- 7) 参照標準による不確かさ
- 等様々な要因が考えられるが、今回の測定結果に対してGUM¹⁾に準じて算出を行った。

4.3.1 不確かさの項目

不確かさの項目については、長さに依存しない項および長さに依存する項の2項目に分けて算出した。

I 長さに依存しない項

測定戦略や測定物自身による不確かさとして以下の項目について求めた。

- ① BG繰り返し測定の不確かさ
- ② BG校正の不確かさ
- ③ ボールプレート繰り返し測定による不確かさ
- ④ ボールプレート球測定による不確かさ

II 長さに依存する項

長さに依存する項は以下の3つの項目に分けて求めた。

- ① 温度測定による不確かさ
 - 1) 温度変化による不確かさ
 - 2) ボールプレート測定時の温度計読み取りの不確かさ
 - 3) ボールプレート測定時の温度計校正の不確かさ
 - 4) ボールプレートの線膨張係数の不確かさ
- ② CMMの幾何学誤差による不確かさ
- ③ 長さ標準のトランスファー
 - 1) BG測定時の温度変化による不確かさ
 - 2) BG測定時の温度計読み取りの不確かさ
 - 3) BG測定時の温度計校正の不確かさ
 - 4) BGの線膨張係数の不確かさ

汎用型および高精度型によるボールプレート測定結果から求めた不確かさを表4に示す。

表4 不確かさ結果

(nm)		
不確かさ項目	汎用型	高精度型
I 長さに依存しない項の合成不確かさ	6007.8	759.68
① ブロックゲージ繰り返し測定の不確かさ	4906.4	289.0
② ブロックゲージの校正の不確かさ	42.2	196.7
③ ボールプレート繰り返し測定による測定位置の不確かさ(再現性)	3375.3	560.5
④ ボールプレート球測定による不確かさ	791.6	375.3
II 長さに依存する項の合成不確かさ	2.032	1.167
① 温度測定の不確かさ	0.784	0.996
1) 温度変化による不確かさ	0.664	0.664
2) ボールプレート測定時の温度計読み取りの不確かさ	0.332	0.332
3) ボールプレート測定時の温度計校正の不確かさ	0.230	0.664
4) ボールプレートの線膨張係数の不確かさ	0.106	0.000
② CMMの幾何学誤差による不確かさ	1.807	0.294
③ 長さ標準のトランスファー	0.497	0.533
1) ブロックゲージ測定時の温度変化による不確かさ	0.315	0.332
2) ブロックゲージ測定時の温度計読み取りの不確かさ	0.315	0.332
3) ブロックゲージ測定時の温度計校正の不確かさ	0.218	0.230
4) ブロックゲージの線膨張係数の不確かさ	0.106	0.106

4.4 不確かさ比較

表4より、それぞれの測定機における合成標準不確かさは以下の式により表される。

$$\text{合成標準不確かさ} : u_c(l) = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot l^2$$

a : 長さに依存しない項の合成不確かさ

b : 長さに依存する項の合成不確かさ

l : 測定長さ (mm)

ここで、長さに依存する項の不確かさは、マニュアル型・CNC型において大きな差は現れていない。今回測定した最大測定長さ 332 mm におけるその影響度の差は約 0.04 μm と極めて小さいことが確認できた。温度測定の不確かさにおいては、測定室内の温度変化が小さく安定していたことから、その影響が抑えられたものである。また長さ標準のトランスファーとして利用したBGも温度変化が小さいことから不確かさが小さかった。CMMの幾何学誤差については、値は約6倍マニュアル型の方が大きい、その影響度は実際の測定では無視できる程度であった。

逆に長さに依存しない項の影響度が大きかったことが確認できる。BGの繰り返し測定の不確かさについては、長さの異なるBGをX軸方向およびY軸方向での繰り返し測定を行い、全BG測定結果の標準偏差二乗和の平方根として求めた値である。マニュアル型の方が測定者の技能や習熟度が影響するところであるが、タッチングが手動であるために安定しないことと、プロービング誤差も加わりばらつきが大きかったと思われる。

次にボールプレート繰り返し測定による測定位置の不確かさについては、各測定ポジションにおける合計8データの標準偏差を求め、その中で最も値の大きかったデータを不確かさとした。これもBGの測定の時と同様の理由でばらつきが大きかったと考えられる。ただし、どちらの測定機も不確かさの値が指示誤差の範囲と同程度であったことから、測定機の持つ能力を發揮した測定が行えた事も確認できた。

以上のことから、マニュアル型では測定の不確かさを抑えるためには、測定者による差を抑えるとともに、一定の測定圧・決まった測定箇所での測定等によるデータ検出の安定性を上げることで、プロービング誤差を小さくできれば、不確かさも抑えられると言える。

またCNC型では、温度変化の小さい安定した測定環境で測定できれば、測定戦略等の違いによる影響も考えられるが、測定機の持つ能力を十分に發揮することができるものと思われる。

5. おわりに

マニュアル型およびCNC型において反転法を用いたボールプレート測定における不確かさ比較を行った。

- 1) 測定機の持つ幾何学誤差をマニュアル型で約 1/8 の 1 μm 以下、CNC型で約 1/10 の 0.2 μm 以下にまで低減できることがわかった。
- 2) マニュアル型測定においては測定の習熟度の向上によって、不確かさを小さくすることができる。
- 3) 安定した温度環境での測定においては、長さに依存する項の不確かさは、無視できる程小さい。
- 4) 不確かさに最も影響を与える要因は、繰り返し測定値のばらつきの程度であった。

謝 辞

本研究は、(独)産業技術総合研究所が実施した計測分科会主催の「第2回ボールプレート持ち回り測定」に参加した結果である。ボールプレートを提供していただいた(財)機械振興協会技術研究所に感謝いたします。また、この持ち回り測定に参加した以下の機関の方に感謝します。(独)産業技術総合研究所 高辻利之氏、山梨県工業技術センター 米山陽氏、富山県工業技術センター 吉田勉氏、京都府中小企業総合センター坂之上悦典氏、佐賀県産業技術センター 田中徹氏。この研究は、日本自転車振興会から競輪の収益の一部である機械工業振興資金の補助を受けた設備を利用して研究したものです。

文 献

- 1) 飯塚幸三;計測における表現のガイド,日本規格協会(1996).
- 2) 木村勝典;鳥取県産業技術センター研究報告 No8, p. 37-42(2005).
- 3) 大澤尊光他;座標測定機用二次元幾何ゲージ校正に関する技術情報,産総研計量標準モノグラフ第8号, p. 20(2005).
- 4) 第2回ボールプレート持ち回り比較 Protocol Final, 知的基盤部会 計測分科会 形状計測研究会(2005).