

# 自己診断ゲージによる CMM の誤差評価

機械技術部 岩本 竜一，市来 浩一

## Estimating Errors of CMM by Self-disgnosis Gauge

Ryuichi IWAMOTO and Koichi ICHIKI

三次元測定機 (Coordinate Measuring Machine 以下, CMM) の誤差評価のために, 機械金属連合部会計測分科会幾何形状評価研究会において, 工業技術院計量研究所 (現 独立行政法人 産業技術総合研究所計測標準計測部門長さ計測科幾何標準研究室) の提案による CMM 自己診断ゲージ<sup>1)</sup>を用いた持ち回り試験に参加し, 反復法による誤差評価を行った。この結果, 角度および球中心座標値から求めた測定機誤差から, 各軸毎の指示誤差の大きさと方向を把握できた。また, 角度および球中心座標値のいずれのデータを用いても同じ傾向を示すことが分かった。さらに, メーカーの精度検査データと比較し, CMM 自己診断ゲージによる誤差診断評価の有効性を確認できた。

### 1. 緒言

鹿児島県工業技術センターでは, 平成11年2月に高精度のCMMを導入した。このCMMは, 納入時にJIS B 7440-2:1997に準拠したメーカーの検査要領に基づく受入検査を実施して以降, 年1回のメーカーの精度検査によって精度管理を行いながら試験研究や依頼試験に使用している。しかし, CMMの誤差評価は複雑であるため, ほとんどのユーザーにおいて, 精度管理は上記のような定期点検に依存しているのが実状である。今回, 幾何形状評価研究会で実施されているCMM誤差診断のための自己診断ゲージによる持ち回り測定に参加し, ユーザーの立場から誤差評価を行ったので, この結果について報告する。



図1 CMM設置状況

### 2. CMMおよび測定室環境

#### 2.1 CMMの概要

測定に使用したCMMの仕様は表1の通りである。設置状況を図1に示す。

#### 2.2 測定室環境

測定を行った精密測定室の概要を表2に示す。また, 図2に精密測定室およびCMM設置場所のレイアウトを, さらに図3に測定室温度変動を示す。

表1 CMM仕様

型式	(株)ミットヨ LEGEX707 門固定テーブル移動形
測定範囲(X,Y,Z)	700 × 700 × 600mm
指示精度	$E = 0.48 + L / 1000 \mu m$
プロービング精度	$R = 0.8 \mu m$ (PH10M + TP7M)
精度保証温度範囲	20 ± 2
精度保証温度勾配	0.5 / h, 1 / day

表2 精密測定室概要

場所	本館管理研究棟 1階(昭和 62年 12月 ~)
構造	断熱壁, 単独空調(常時) 天井吹き出し 10ヶ所 壁面吸い込み 2ヶ所
温度	20 ± 1
湿度	50 ~ 65 %

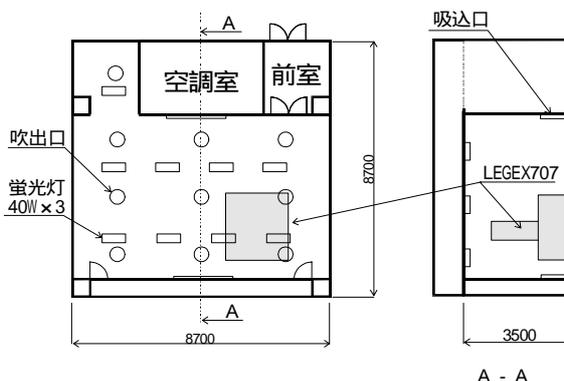


図2 測定室レイアウト

実際の測定は、測定室内の測定機類の中でCMMのみ電源投入した上で無人状態で行った。柴田の報告<sup>2)</sup>により、照明の熱による影響が遅れて発生することが考えられるため、照明は測定開始前から長時間点灯させている。

3. CMM自己診断ゲージ

持ち回り測定に使用したCMM自己診断ゲージを図4に示す。測定前に上記の測定室環境で、十分温度ならしを行った。ゲージの固定は、測定中の微動を抑えられるよう工夫された専用ジグ<sup>3)</sup>を用いた。

- 本体サイズ：450×570×60mm（御影石）
- 測定部：直径1インチ球（セラミック）10個
- 重量：約30Kg

4. 測定方法

測定方法は、持ち回り測定の実施要領<sup>4)</sup>による。この実施要領は、計量研究所にてCMM自己診断ゲージの共通的な測定方法について示したものである。以下に、実施要領に規定されていない細かな測定条件等について述べる。

4.1 測定条件

測定条件は表3の通りである。今回は、直径8mmのルビー球スタイラスを使用したため、球の赤道4点を測定する際、CMMゲージ本体とわずかに干渉する。このため、赤道からオフセットさせて球測定を行った。直径8mmのスタイラスを使用した理由は次項で述べる。

また、CMM導入時に測定室の温度環境を確認した結果、天井付近と床面付近で上下方向に約1.5の温度勾配があることが既知であるので、スケール温度補正と空間補正を有効とした。なお、これらの補正は通常の使用状態でも有効としている。

4.2 測定手順

4.2.1 プロブおよびスタイラス選択

当センターのCMMは、HTP-SとPH10Mの2種のタッチシグナルプロブと、倣いプロブMPP-5の合計3種のプロブヘッドを選択できる。この中で最もプロービング精度の高いHTP-Sを使用するのが適当であるが、プロブヘッドの直径が大きく、ゲージ本体との干渉を避けるためにスタイラスの首下長さを延長する必要があるため、測定精度の悪化が懸念された。そこで、実施要領で指示されている首下長さ50mmのPH10Mと首下長さを延長したHTP-Sでマスターボールを測定し、そのばらつきを比較したが有意差は無かった。よって、実施要領の指示を実現できるPH10Mを使用した。

首下長さを50mmにするためには、エクステンションパーを用いる必要がある。エクステンションパーにはアルミニ

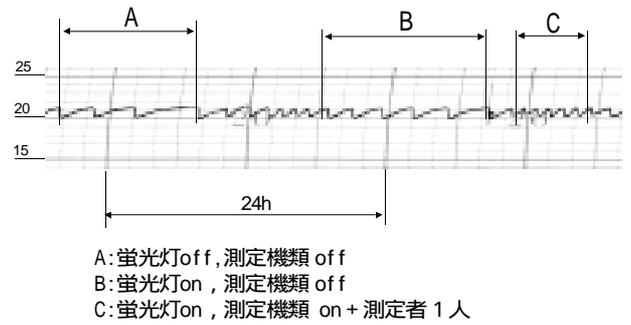


図3 測定室温度の変動

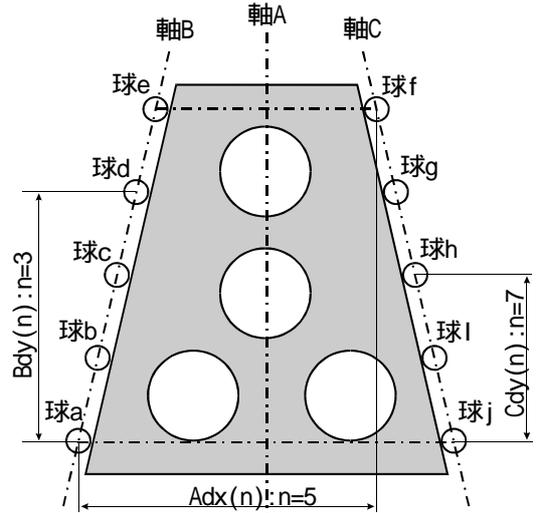


図4 CMM自己診断ゲージ

表3 測定条件

プロービング	プログラムによる CNC 自動測定
プローブシステム	RENISHAW PH10M + TP7M
スタイラス構成	スタイラスセンタ (SC5) + 8 mm ルビー球スタイラス(PS3-6C) 5 個
プローブ移動速度	100mm/sec ( 3 軸合成速度 )
アプローチ速度	1mm/sec
スケール温度補正	有効
空間補正	有効
測定物温度補正	無効
供給エア温度	20 ± 0.1

表4 1 の温度変化によるスタイラス長の伸び

	線膨張係数 <sup>5)</sup>	全長	伸び(計算値)
アルミニウム	23 × 10 <sup>-6</sup>	50mm	1.15 μm
セラミック	7.7 × 10 <sup>-6</sup>	50mm	0.38 μm

ウム製とセラミック製が用意されており、図3に示した測定室の温度変動を考慮すると、表4に示す通り、アルミニウム製では1の温度上昇に対し約1μm伸びることが推定され、CMMの指示精度(E値)から見ても無視することができない。

このことから線膨張率および熱伝導率が小さく、かつ剛性の高いセラミック製を選択することが適当である。そこでスタイラス全長の中でセラミック部分の長さが最も長いスタイラス（PS3-6C）を選択したが（ジョイントのためのネジ部はアルミニウム製）、このスタイラスの直径は8mmであるため、実施要領の指示（5mm）と異なるばかりでなく、前述の通り球の赤道を測定すると干渉してしまう。そこで、直径1インチのマスターボールを赤道から約5mmオフセットして測定し、プローブ径補正値のばらつきを調べたが有意差が無かった。よって、赤道を測定しないことによって生じる誤差よりも、温度変化に伴うスタイラスの伸縮によって生じる誤差の方が大きいと判断し、表3に示すスタイラス構成を決定した。

4.2.2 プローブ径補正

前項で述べたプローブシステムを用い、プローブ径補正の要領でマスターボールを繰り返し測定した。この結果について図5.1~5に示す。

図に示す通り、下向きスタイラスの変動は小さいが、時間経過とともに、前向きスタイラスがCMMマシン軸のX軸プラス方向に、後向きスタイラスがX軸マイナス方向に、右向きスタイラスがY軸プラス方向に、左向きスタイラスがY軸マイナス方向に約15μm変動していることが分かる。この変動は、いずれのスタイラスでも約1時間続き、約

1.5時間で安定した。プローブヘッドPH10Mの水平方向回転角度を変えてマスターボールの測定を行った場合でも同様であった。

このことから、図5に示す変動はPH10Mの首振り機構の位置決め精度誤差によるものではなく、図6に示す通り、スタイラスが取付ネジの締め付け方向とは反対方向に回転することによるものと考えられる。この回転は、途中でタッチ信号信号を入れた場合でも、そのまま放置した場合でも同様であった。確認のため、メーカーの測定室（温度変動：約0.1℃）において全く同じ測定を実施したところ、同様の現象が発生した。したがって、この原因は、測定室温度などの環境の違いによるものではなく、検出器（TP7M）に起因するもの、あるいは取付ネジの残留応力によるものなどが考えられる。

この現象が発生している状態で測定を行うと、CMM自己診断ゲージが回転方向に移動しているか、あるいはCMM本体の直角度に問題があるようなデータとなってしまう。以上の理由から、スタイラスを取付て約1.5~2時間放置した後に、マスターボールを測定し、スタイラスの回転が止まったことを確認することとした。その後、再度、マスターボールを繰り返し測定した。このようにして下向きスタイラスで測定した結果を図7に示す。

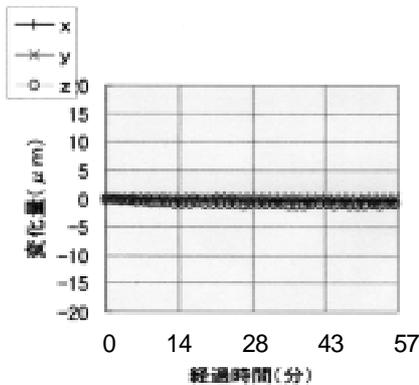


図5.1 下向きスタイラス

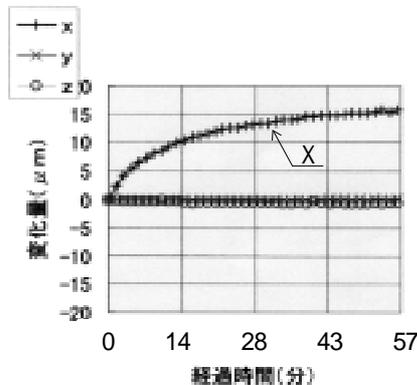


図5.2 前向きスタイラス

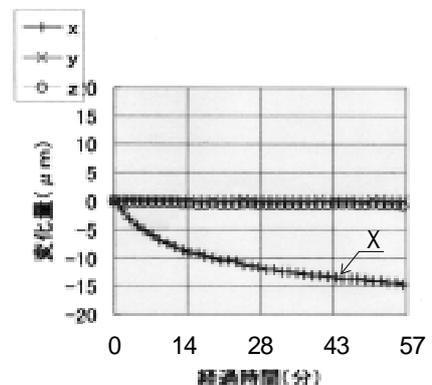


図5.3 後向きスタイラス

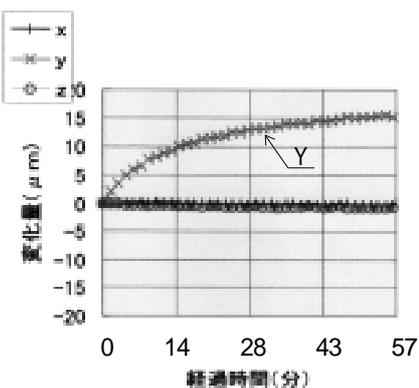


図5.4 右向きスタイラス

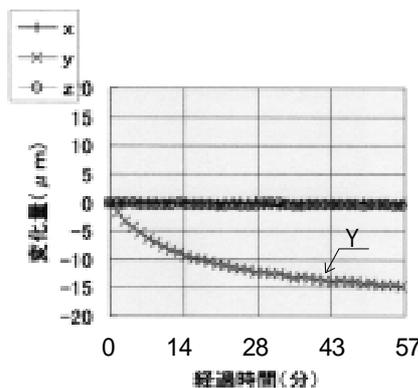


図5.5 左向きスタイラス

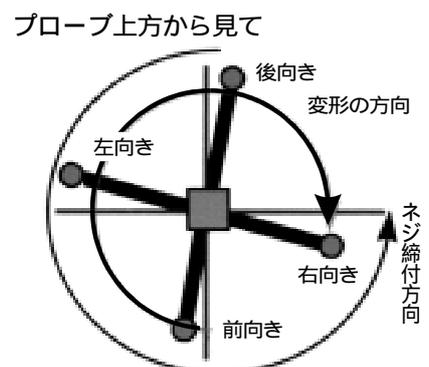


図6 スタイラス回転

図より、回転が止まった後でも、スタイラスが測定室温度の変化とともに微動し、これが累積していることが分かる。また、この微動の累積は、他のスタイラスの測定結果から、図8に示す通り左右のスタイラスはほとんど変化せず、前向き・下向き・後向きのスタイラスが左右スタイラス軸を回転中心として手前側に回転するような動きであることが分かった。この動きが、具体的にどの部位からどのような原因で発生しているかは突き止められなかったが、同様の測定をメーカーの測定室で行った結果(図9)、12時間の連続測定で約0.5 $\mu$ m程度のばらつきに収まることから、図3、7に示した測定室の温度あるいは空調の風などが原因と考え、図10に示すように、CMMの周囲をシートでカバーし送风口からの風が直接当たらないようにした上で、プローブ本体およびマスターボールのベース部などを断熱材でカバーする対策を取った。この対策後のマスターボールの測定結果を図11に示す。まだ、微動そのものはあるものの、PH10M周辺の温度変化は図7の平均温度の変化に比較して小さく、微動の累積をかなり小さくすることが出来た。以上のことから出来るだけ頻繁にプローブ補正を行うこととした。

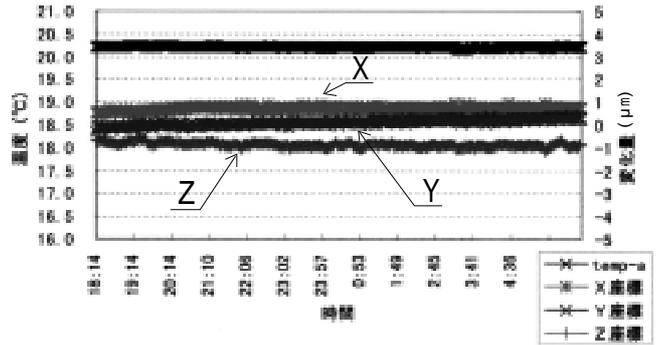


図9 下向きスタイラスによるマスターボール測定結果



図10 測定環境改善対策

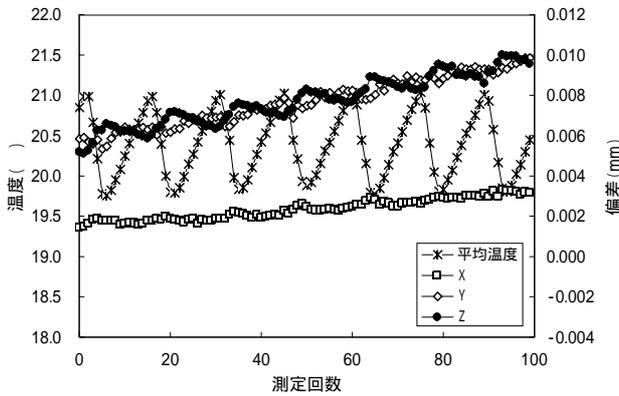


図7 下向きスタイラスによるマスターボール測定結果

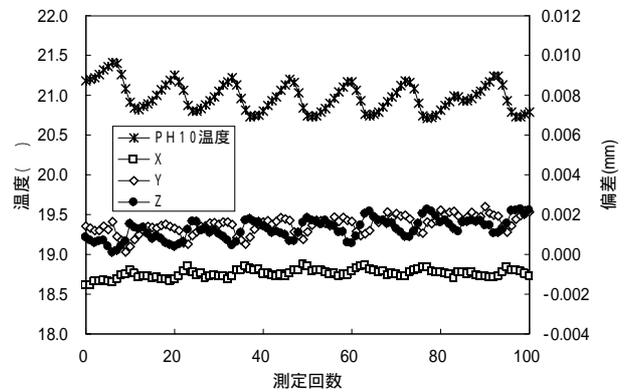


図11 下向きスタイラスによるマスターボール測定結果 (対策後)

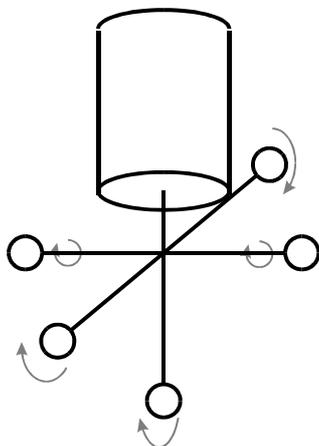


図8 温度変化に伴うスタイラスの微動

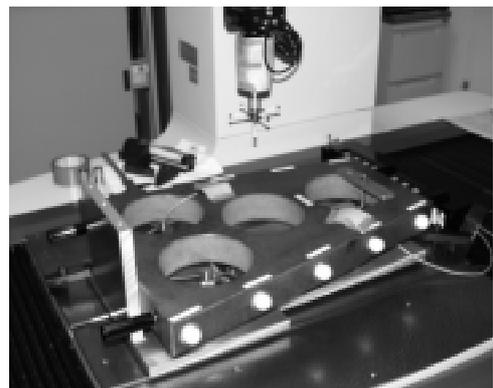


図12 ルーチン測定状況

4.2.3 座標系設定

座標系の設定は、図4中の球a, e, f, jを用いて基準平面を設定し、この平面上に球a, eと球f, jの中線と球a, jの交点を基準面上に投影した点を原点として、各軸の設定を行った。

4.2.4 ルーチン測定

図4のCMM自己診断ゲージはXY平面上に立てて測定することによりZX, YZ平面での誤差評価も行えるが、当センターのCMMのZ軸ストローク不足により測定できなかったため、ゲージセットの位置はXY平面内の2水準のみである。他にCMMゲージのセット方向、測定平面、測定方向、繰り返しについて、各2水準づつルーチン測定を行った。ルーチン測定状況を図12に示す。

5. 測定結果および考察

5.1 球径

実施要領に記載されている球径値を信号因子とし、CMMゲージのセット方向(0°, 90°), 測定平面(表, 裏), 測定方向(行き, 戻り), 測定の繰り返し(1回目, 2回目)をすべて誤差因子としてゼロ点比例式のSN比を求め、解析を行った<sup>6),7)</sup>。この結果を表5に示す。また、誤差因子毎に解析した結果を図13.1~4に示す。球径のSN比は平均で約79dbと高いレベルであった。

表5 球径のSN比(全体) 単位db

球	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	mean
SN比	80	78	82	82	79	79	79	76	78	75	79

また、宮嶋や澤近らの報告<sup>8),9)</sup>で述べられている「球径のSN比は球aからの距離と相関がある」という傾向は見られなかった。これは、球径の測定誤差が、測定室の温度変化に伴うプローブ補正值のばらつきの中に埋もれているためと考えられる。この点については、今後、さらに検討する必要がある。

誤差因子毎のSN比の解析結果から、特にいずれかの因子が球径の測定値に影響を与えているという傾向は見られない。分散分析も行ったが、有意差は見られなかった。

5.2 球間距離

実施要領に記載されている球間距離を信号因子とし、CMMゲージのセット方向(0°, 90°), 測定平面(表, 裏), 測定方向(行き, 戻り), 測定の繰り返し(1回目, 2回目)をすべて誤差因子としてゼロ点比例式のSN比を求め、解析を行った。この一例としてCMMゲージのセット方向別について解析した結果を図14に示す。

図よりCMMゲージのセット方向に関係なく、図4中のAdx(n)と、B,Cdy(n)の傾向が明らかに異なっていることが分かる。B,Cdy(n)のSN比がCMM本体のXまたはY方向

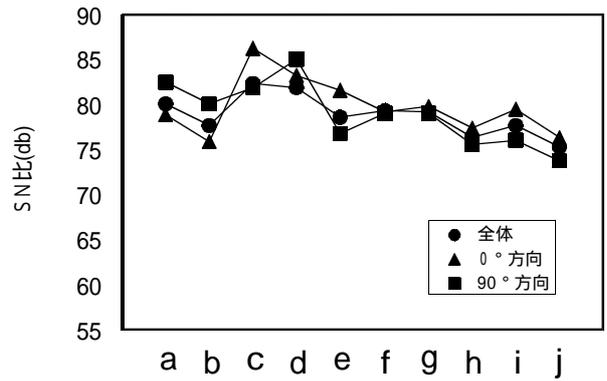


図13.1 球径のSN比(セット方向)

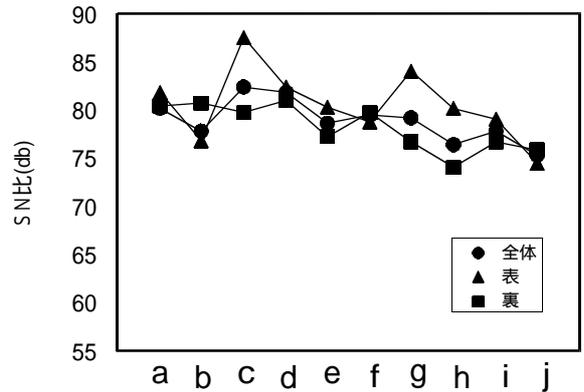


図13.2 球径のSN比(測定平面)

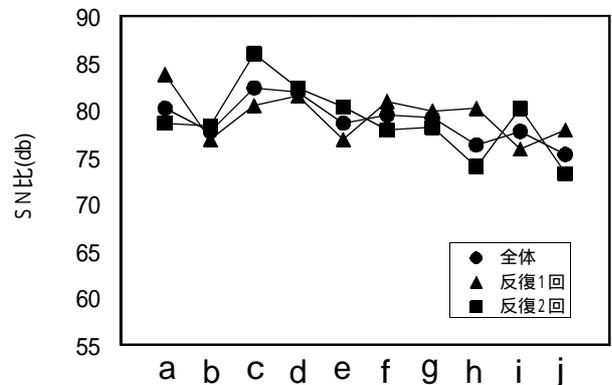


図13.3 球径のSN比(測定方向)

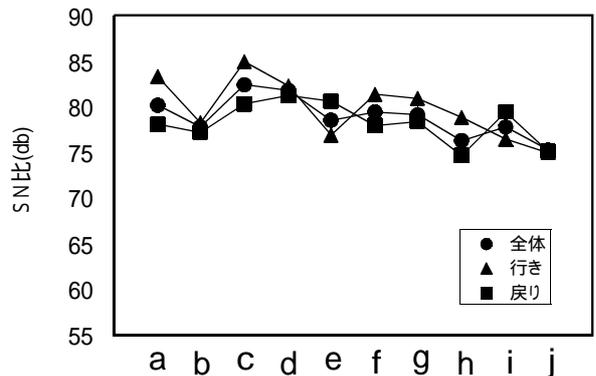


図13.4 球径のSN比(繰り返し)

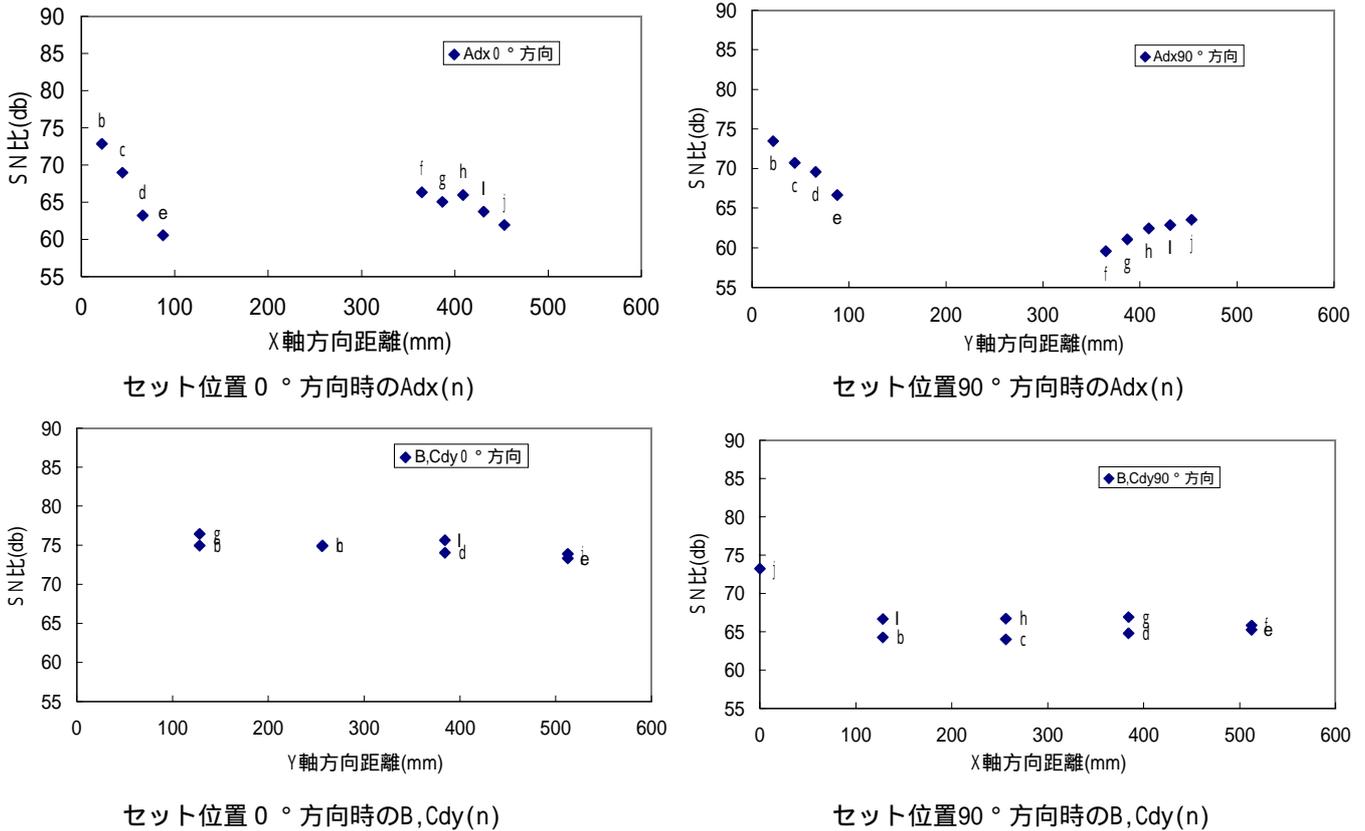


図14 球体の位置とSN比の関係

距離に関係なくほぼ一定の値を示していることに対し、Adx(n)のSN比は座標差によって異なる傾向を示している。これは他の誤差因子（測定平面，測定方向，繰り返し）についても同様であった。

以上のことから、Adx(n)とB,Cdy(n)との間で、SN比の傾向が異なる原因としては、別の誤差要因があると推定した。これを図15に示す。図に示す通り、今回の持ち回り測定で生じる誤差因子として、新規に4水準（2×2）を設定し、それぞれに測定モードが存在すると仮定した。

この中のひとつは、前述したプローブ径補正のばらつきによるものである。温度対策を行った後でも、プローブは図8に示すような微動が残っている。つまり、CMMのX軸方向のスタイラスに比べ、Y軸方向のスタイラスは微動が大きくなり、当然、測定値に影響を及ぼすはずである。

次に、Adx(n)とB,Cdy(n)を測定する場合のスタイラスの接触方式の違いが考えられる。例えば、CMMゲージを0°方向にセットしてAdx(n)を測定する場合、球の半球部からX方向の球中心座標から求めることになる。この場合、球頂点（1点）の測定誤差がX方向の球中心座標に及ぼす影響は大きいと考えられる。これに対し、B,Cdy(n)を測定する場合、Y軸方向座標はCMMのYZ平面に投影され、それぞれの測定誤差は相殺される。ここで、前者を端面方向測定、後者をはさみ方向測定と呼ぶこととする。

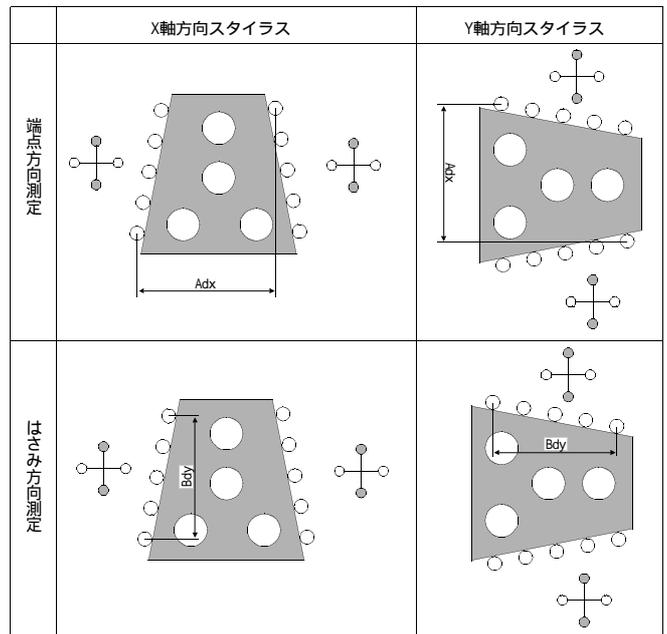


図15 測定モード

以上の仮定のもと、再度、図14について検討する。この仮定によると、X軸方向スタイラスを用いてはさみ方向測定を行う場合が、最も精度良く測定できるはずである。この条件は「セット位置0°方向時のB,Cdy(n)」が当てはまる。SN比の算出結果も、図から明らかな通り、測定距離に関係なくほぼ75dbで一定の値を示し、一番精度良く測定できている。同じくはさみ方向測定で、微動しているY軸

方向スタイラスを用いた測定結果である「セット位置90°方向時のB,Cdy(n)」は、約10db低いSN比であるがほぼ一定の値を示している。一方、端面方向測定では、X、Y方向のどちらのスタイラスを用いてもSN比の変動が大きい。さらに、軸B側と軸C側では、SN比の傾向が異なる。これは、端面方向測定のばらつきに加え、異なるスタイラスを用いることによるばらつきを含んだためと考えられる。はさみ方向測定では、異なるスタイラスを用いた場合の誤差は球赤道円の4点測定によって相殺されてしまうか、あるいは軸B側と軸C側で異なるレベルでSN比が一定になるといことが推定できる。

X軸およびY軸方向スタイラスを用いることによって生じる誤差は、当センター測定室の環境によるものであるため、持ち回り測定を行った他の機関に当てはめることは出来ないが、端面およびはさみ方向測定による誤差は、生じる可能性があると考え、宮嶋や澤近の報告データを、この点から検討した結果、同様の結果であることが窺われた。詳細についてはさらに検討する必要がある。

端面およびはさみ方向測定の違いによって有意差があるとすると、これは2つの問題を提起している。1つは、ユーザー側から見た問題である。球測定は球の半球部分を測定する場合がほとんどであるが、赤道円と直交する軸方向の中心座標値は他の方向に比べ測定精度が落ちることが予想されるため、この方向の座標値に測定精度が要求される場合、必ず多点測定をするなどの対策が必要であるということである。2つめは、今回の持ち回り測定の目的である自己診断ゲージを用いたユーザーによるCMMの誤差評価という観点からの問題である。端面方向測定およびはさみ方向測定などのプロービングの違いによって、測定結果として得られた球中心座標値に含まれる誤差が異なるとすると、CMMの誤差診断データとして解析する際に、不適當が生じる可能性があるということである。しかし、このことはプロービング方法やCMMゲージ形状の変更などで対応できると考えられる。

5.3 反復法による機械誤差の算出

5.3.1 軸Bおよび軸Cの角度による評価

表6に軸B、Cの角度測定結果を示す。それぞれ4回の測定の平均値を用いて(1)式により、機械誤差の角度による評価を行った。これを表7に示す。

$$[機械誤差] = ( \quad ) / 2 \quad (1)$$

ここで  
 : 表面セットでの軸Aと軸Bのなす角度  
 : 裏面セットでの軸Aと軸Bのなす角度  
 (軸Cについても同じ)

表6 軸B、Cの角度測定結果 (単位: deg)

セット方向		行き・1	戻り・1	行き・2	戻り・2	
0°方向	表	軸B	9.67945	9.67942	9.67944	9.67941
		軸C	-9.79434	-9.79432	-9.79431	-9.79432
	裏	軸B	9.67949	9.67949	9.67954	9.67952
		軸C	-9.79423	-9.79426	-9.79422	-9.79421
90°方向	表	軸B	9.67961	9.67962	9.67957	9.67956
		軸C	-9.79413	-9.79422	-9.79422	-9.79419
	裏	軸B	9.67937	9.67942	9.67943	9.67940
		軸C	-9.79439	-9.79438	-9.79432	-9.79433

表7 角度から求めた測定機誤差 (単位: deg)

セット方向	軸B	軸C	平均
X軸方向	0.00009	0.00009	0.00009
Y軸方向	0.00004	0.00005	0.00005

角度から求めた測定機誤差は、X軸方向に比べ、Y軸方向の方が良い結果となった。同型のCMMを用いた澤近、大西ら<sup>9),10)</sup>の報告でも同様の傾向を示しており、Y軸のみ他の軸から独立して移動する門固定型の特徴と考えられる。誤差の大きいX軸の場合でも、角度誤差0.00009degは約1μm程度の誤差に相当(フルストローク700mm)し、表1で示した指示精度(E = 0.48 + L/1000)を満足している。

5.3.2 球体中心座標による評価

CMMゲージを90°方向にセットしたとき、反転の基準線をX座標軸(軸A)と考え、軸Bを構成する球aから球eのX座標軸からの距離(LまたはL')を用いて(2)式により機械誤差を算出した。この算出結果の一例を表8に示す。

$$[機械誤差] = (L - L') / 2 \quad (2)$$

ここで L : 表面セット時の反転基準軸と球の距離  
 L' : 裏面セット時の反転基準軸と球の距離

表8 機械誤差の算出結果(セット方向90°, 軸B)

球	A軸からの距離		Y = (L - L')/2
	L(mm)	L'(mm)	
a	226.53135	226.53139	-0.00002
b	204.66269	204.66303	-0.00017
c	182.83776	182.83841	-0.00033
d	160.97464	160.97586	-0.00061
e	139.09325	139.09500	-0.00088

表8のデータを用いて、球aと球eを結ぶ平行線で挟まれた範囲によりX軸方向の真直度を求めた。この結果を図16に示す。また、軸Cについても同様に真直度を求めた。この結果を図17に示す。同様にして、Y軸方向の真直度をX軸方向と同様に求め、表9にまとめた。

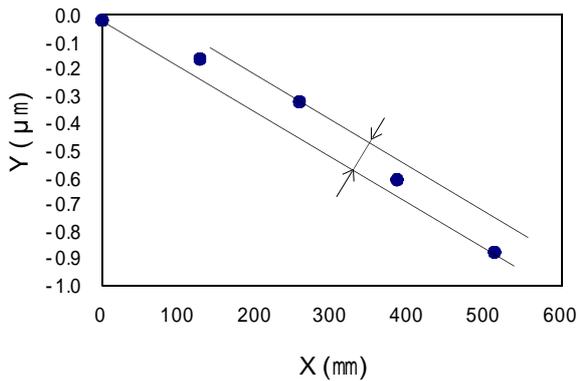


図16 X軸方向の真直度(セット方向90°,軸B)

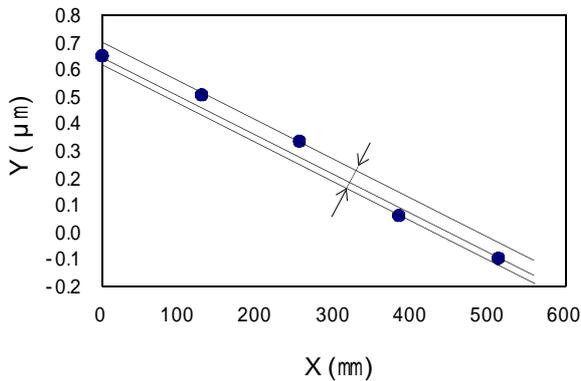


図17 X軸方向の真直度(セット方向90°,軸C)

表9 球体中心値から求めた真直度 (単位: μm)

セット方向	軸B	軸C	平均
X軸方向	0.107	0.074	0.091
Y軸方向	0.064	0.098	0.081

球体中心値から求めた測定機誤差は、角度から求めたものと同様に、Y軸方向の方が若干良い結果となった。メーカーの精度検査では、700mmの測定長(測定点数9点:30, 50, 100, 200...700)における指示誤差(E1)は、X軸が平均0.19 μm、Y軸が0.20 μmとなっており、測定点数および測定長の違いを考慮すると、有意差は無く、CMM自己診断ゲージによる誤差診断評価の有効性を確認できた。

## 6. 結 言

CMMの誤差評価のための自己診断ゲージを用いた持ち

回り試験に参加し、当センターのCMMを用いて誤差評価を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 反復法を用いて、角度および球中心座標値から測定機誤差を算出し、各軸毎の誤差の大きさと方向を把握できた。さらに、角度または球中心座標値から求めた結果は、同じ傾向を示すことが分かった。
- (2) メーカーの精度検査データと比較し、CMM自己診断ゲージによる誤差診断評価の有効性を確認できた。
- (3) 自己診断ゲージによるCMMの誤差評価手法を確立することが出来たので、今後は、県内企業のCMMの中間的な精度検査などに応用が可能である。

## 謝 辞

持ち回り測定について様々な御指導を頂いた計量研究所の松田次郎様、ゲージの取り扱いに御配慮頂いた(株)浅沼技研の柴田政典様、ならびに三次元測定機の取扱いや比較測定データの提出などに御協力頂いた(株)ミツトヨの萱場義隆様をはじめ皆様に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 松田次郎：平成12年度 第29回計測分科会資料集 CMM共同実験の状況報告，P123
- 2) 柴田政典：平成11年度 第28回計測分科会資料集 CMM校正ゲージの安定性，P30
- 3) 柴田政典：平成10年度 第2回幾何形状評価研究会資料 三次元測定機の誤差自己診断技術
- 4) ラウンドロピングテスト実施要領
- 5) 松尾哲夫ら：機械材料，朝倉書店，P187
- 6) 田口玄一：品質工学講座3 品質評価のためのS/N比 P19,133
- 7) 田口玄一：品質工学講座7 品質工学事例集 計測編 P275
- 8) 宮嶋隆司：平成11年度 第4回幾何形状評価研究会資料 CMM持ち回り測定結果
- 9) 澤近洋史：平成11年度 第28回計測分科会資料 CMMゲージの持ち回り測定結果
- 10) 大西宏明：平成12年度 第29回計測分科会資料集 CMM持ち回り検査 測定結果報告，P100