

CMM 自己診断ゲージの持ち回り測定結果

鹿児島県工業技術センター
機械技術部 岩本竜一

三次元測定機（以下 CMM）は、汎用性に優れ寸法測定や形状測定に多く用いられており、機械加工分野では欠かせない測定機となっている。しかしながら、CMM の誤差評価は複雑であるため、精度管理はメーカー側の定期点検に依存しているのが実状である。今回、機械金属連合部会計測分科会幾可形状評価研究会において、計量研究所の提案による CMM 自己診断ゲージを用いた持ち回り試験に参加し、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。

1. はじめに

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 7440-1997 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。今回、幾可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。

2. CMM および測定室環境

2.1 CMM の概要

導入した CMM の仕様は表 1 の通りである。設置状況を図 1 に示す。

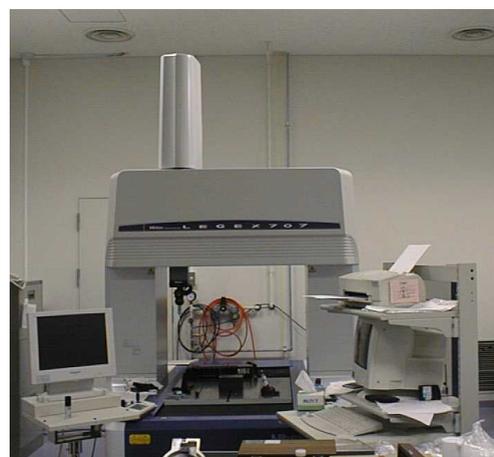


図1 CMM 設置状況

型式	㈱ミットヨ LEGEX707 門固定テーブル移動形
測定範囲	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	$20 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$
精度保証温度勾配	$0.5 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{h}, 1 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{day}$

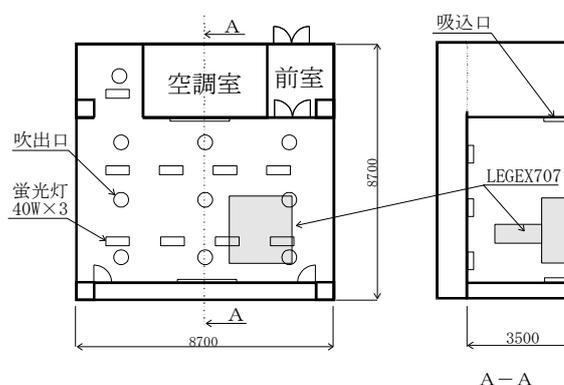


図2 測定室レイアウト

2.2 測定室環境

測定室の概要は表 2 の通りである。図 2 に測定室のレイアウトを、図 3 に測定室温度変動を示す。

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	$20 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
湿度	50 ~ 65 %

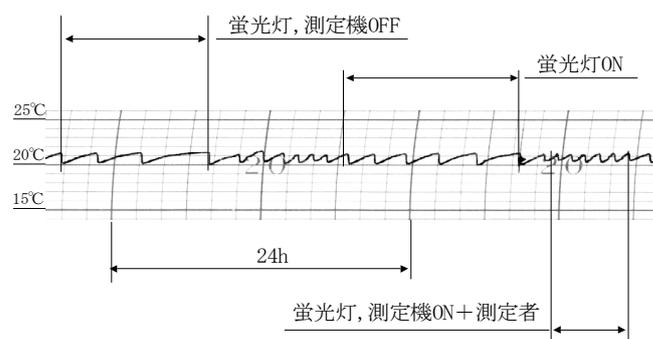


図3 測定室温度の変動

3. CMM 自己診断ゲージ

持ち回り測定に使用した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。

- 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

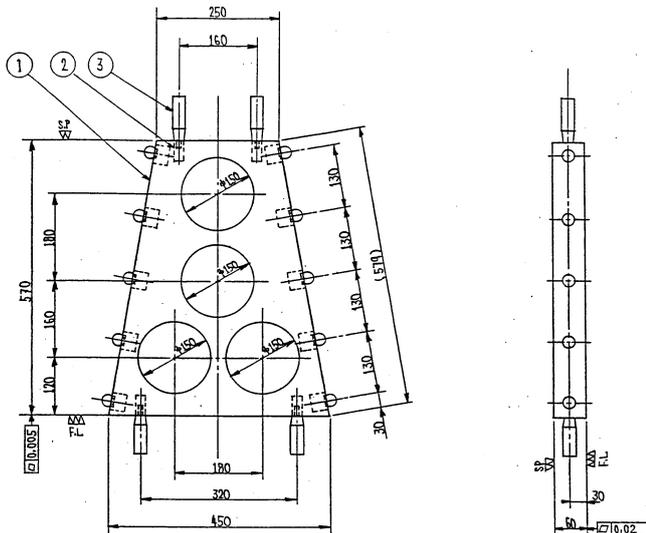


図4 CMM 自己診断ゲージ（実施要領より抜粋）

4. 測定方法

測定方法は、ラウンドロビングテスト実施要領による。ここでは、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

測定条件は以下の通りである。今回は、直径8mmの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、当センター測定室の温度環境は、天井付近と床面付近で約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。

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) + φ8mm 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℃

4.2 測定手順

4.2.1 プロー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ーブと、倣いプローブMPP-5の合計3種のプロー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、プローブヘッドの直径が大きいため、スタイラスの首下長さを大きくとる必要があり、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と首下長さを大きくした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大差は無かった。このことから、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、エクステンションバーを用いる必要がある。エクステンションバーにはアルミニ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、アルミ製では1℃の温度上昇に対し約1μm伸びることとなり、CMMの指示精度(E値)から見ても無視することができない。

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 ¹⁾	全長	伸び(計算値)
アルミニウム	23 × 10 ⁻⁶	50mm	1.15 μm
セラミック	7.7 × 10 ⁻⁶	50mm	0.38 μm

このことから線膨張係数および熱伝導率が低く、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(φ5mm)と異なるばかりでなく、前述の通り球の赤道を測定することが出来ない。そこで、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、プローブ径補正值のばらつきを調べたが大差が無かった。よって、赤道を測定できないことによる誤差よりも、温度変化に伴うスタイラスの伸縮によ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Xプラス方向に、後向きスタイラスがXマイナス方向に、右向きスタイラスがYプラス方向に、左向きスタイラスがY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、

その後は安定する。PH10M の水平方向回転角度を変えてプローブ径補正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側に回転することによるものと考えられる。この回転は、途中でタッチ信号を入れた場合でも、何もせずに放置した場合でも同様であった。また、(株)ミツトヨの MC 工場（温度変動：約 0.1 °C）でも同様の症状が発生した。したがって、この原因は、測定室環境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が未だ明らかではない。メーカーで調査中である。

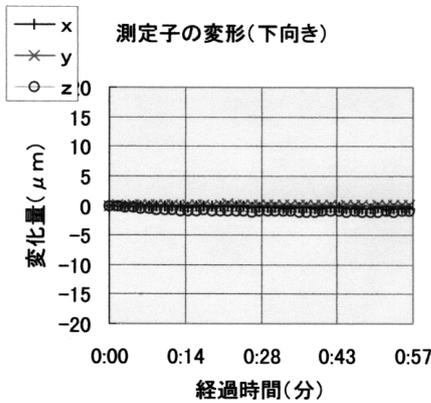


図5.1 下向きスタイラスでの測定結果

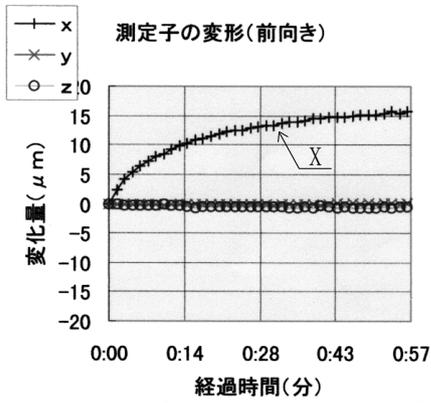


図5.2 前向きスタイラスでの測定結果

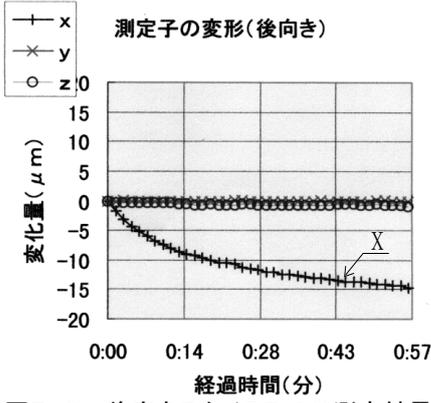


図5.3 後向きスタイラスでの測定結果

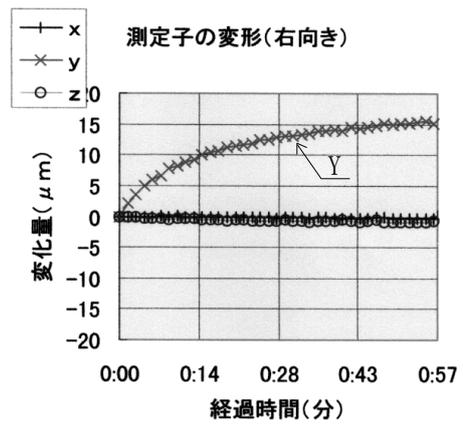


図5.4 右向きスタイラスでの測定結果

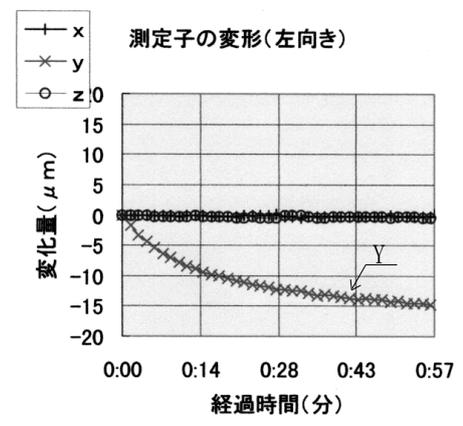


図5.5 左向きスタイラスでの測定結果

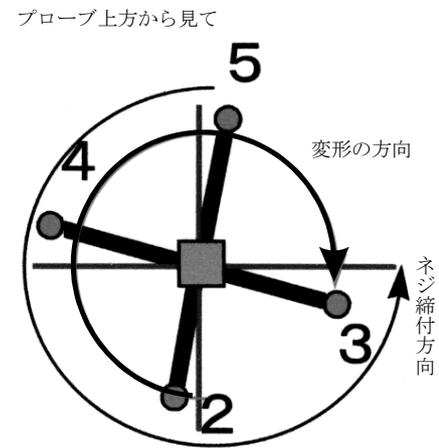


図6 スタイラス回転

当初、このことに気付かず測定を行ったため、CMM ゲージが回転しているか、あるいは CMM 本体の直角度の問題があるようなデータとなった。このため、再度、持ち回り測定を実施させて頂いた。なお、以降のデータは全て2回目の測定によるものである。

上記の理由から、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。スタイラスの回転

が止まった後、再度、マスターボールを繰り返し測定した。
図7に下向きスタイラスで測定した結果を示す。

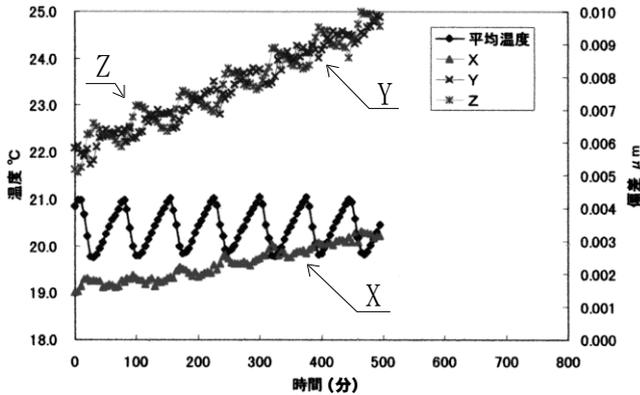


図7 下向きスタイラスによるマスターボール測定結果

図より、スタイラスが温度とともに変動し、その変動が累積していることが分かる。また、この変動は、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動せず、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。

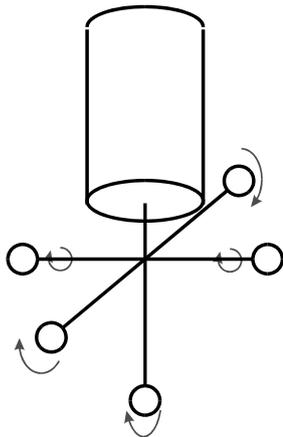


図8 温度変化に伴うスタイラスの変動

全く同様の測定を、(株)ミツトヨのMC工場内(温度変動:約0.1°C)で行った結果を図9に示す。

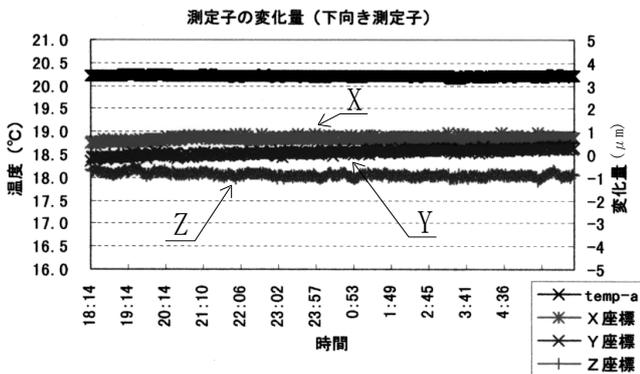


図9 下向きスタイラスによるマスターボール測定結果 (MC工場)

この結果からは12時間の連続測定で約0.5 μm程度の変動しか表れない。このことから図3, 7に示した測定室の温度環境あるいは空調の風などが原因と考え、図10に示すように、緊急措置としてCMMの周囲をシートでカバーし送風口からの風が直接当たらないようにするなどの対策を取った。この他、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。この対策後のスタイラスの補正結果を図11に示す。まだ、温度による変動はあるものの図7に比べ、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径補正を行うこととした。なお、左右スタイラスを回転中心とするような動きが、具体的にどの部位から発生しているかは突き止めることが出来なかった。



図10 温度対策

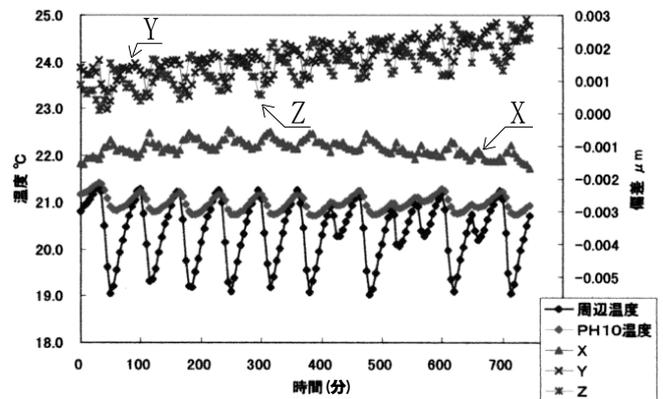


図11 下向きスタイラスによるマスターボール測定結果 (対策後)

4.2.3 座標系設定

座標系の設定は、実施要領の変更に伴い、球 a, e, f, j のみを用いて設定した。CMM ゲージ本体の台形底辺部は座標系設定に使用していない。

4.2.4 ルーチン測定

CMM のZ軸ストローク不足によりCMMゲージを立てて測定することが出来なかったため、ZX, YZ平面での測定は行っていない。したがって、ゲージセットの位置は2水準である。

5. 測定結果

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^{2),3)}。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12.1~4に示す。

表5 球径のSN比(全体)

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

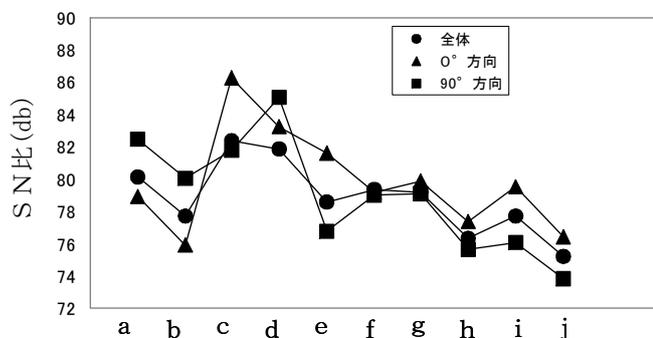


図12.1 球径のSN比(セット方向)

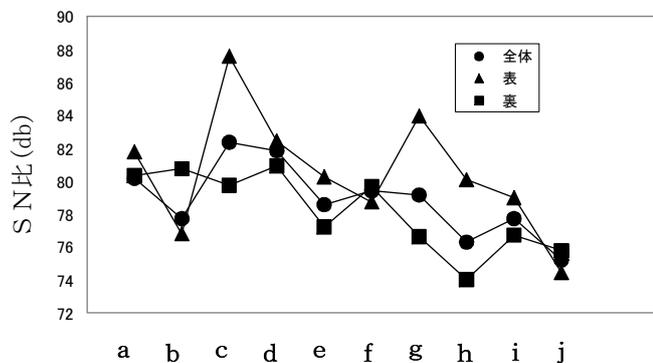


図12.2 球径のSN比(測定平面)

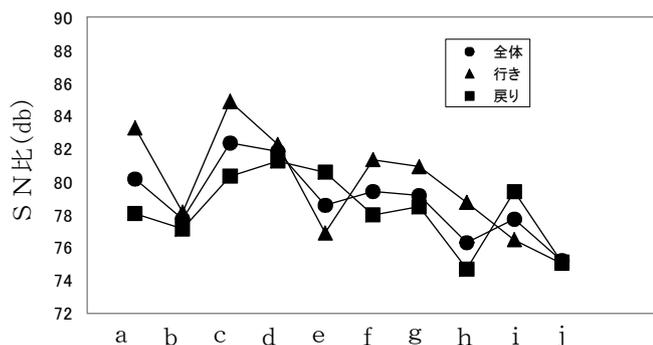


図12.3 球径のSN比(測定方向)

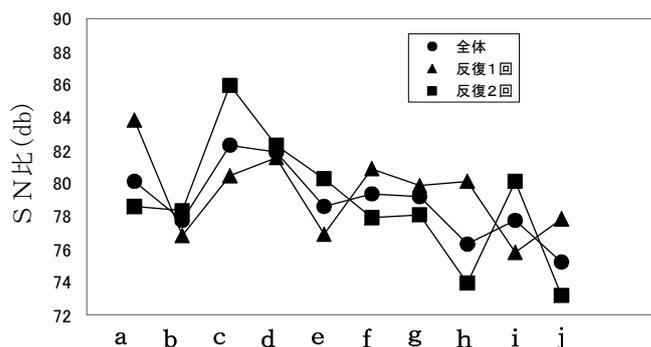


図12.4 球径のSN比(繰り返し)

球径のSN比は平均で約79dbと高いレベルであった。また、軸B側(球a~球e)に比べ軸C側(球f~球j)の方がSN比が低く、球aから球jにかけて徐々に低くなる傾向が見られる。しかし、図11に示した通り、プローブ補正値が $1\mu\text{m}$ 近く変動する(1ルーチン当たりの測定所要時間は約20分)可能性があることを考慮すると、平均のSN比79dbでの分散値($\sigma = \pm 3 / \sqrt{\eta} \approx \pm 0.3\mu\text{m}$)は、プローブ補正値のばらつきより小さいため、必ずしも上記のような傾向が事実を示しているとは言えない。

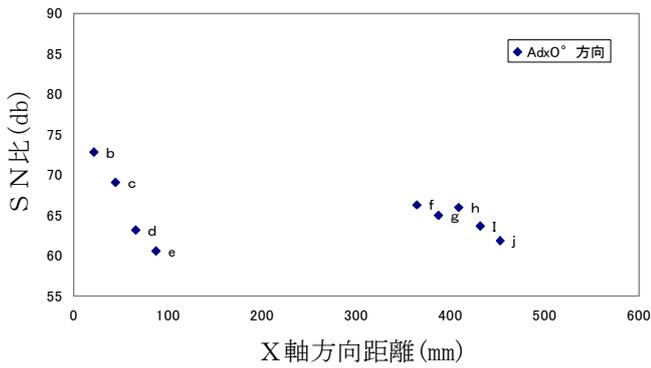
また、宮嶋氏や澤近氏らの報告^{4),5)}で述べられている「球径のSN比は球aからの距離と相関がある」という傾向が見られなかった。これは、球径の測定誤差が、測定室温度変動に伴うプローブ補正値のばらつきの中に埋もれているためと考えられる。この点については、今後、さらに検討する必要がある。

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。

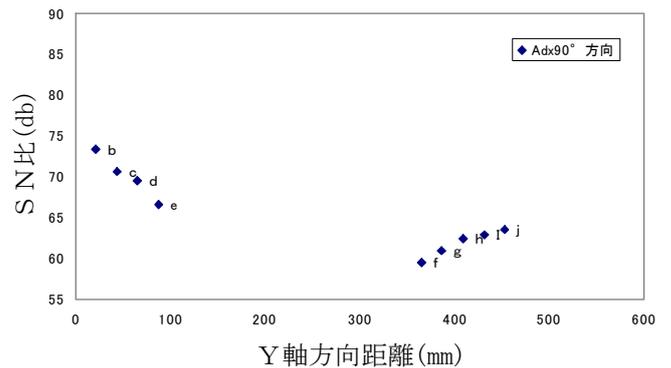
5.2 球間距離

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について解析した結果を図13に示す。

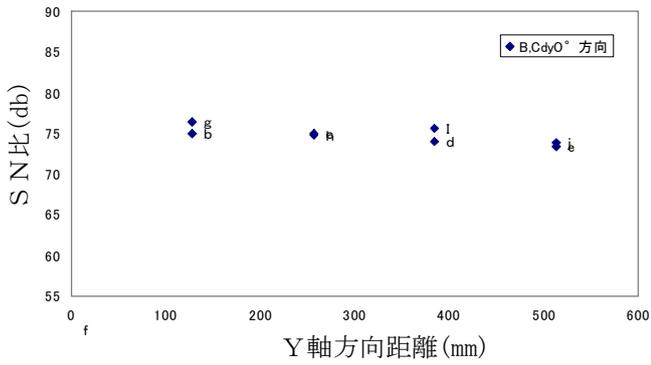
図よりCMMゲージのセット方向に関係なく、 $\text{Adx}(n)$ と $\text{B,Cdy}(n)$ の傾向が明らかに異なっていることが分かる。 $\text{B,Cdy}(n)$ のSN比がXまたはY方向距離に関係なくほぼ一定の値を示していることに対し、 $\text{Adx}(n)$ のSN比は座標差によって異なる傾向を示している。これは他の誤差因子(測定平面, 測定方向, 繰り返し)についても同様であった。



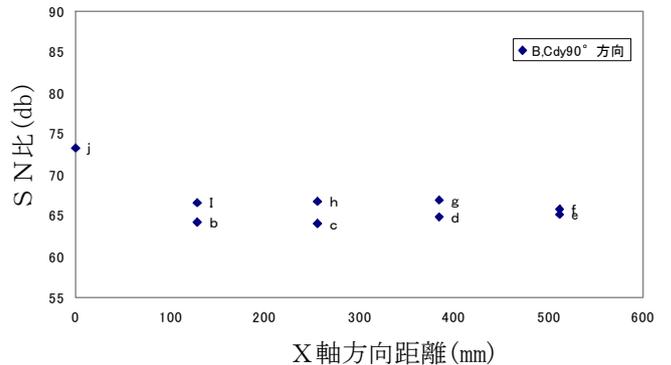
セット位置 0° 方向時の Adx (n)



セット位置 90° 方向時の Adx (n)



セット位置 0° 方向時の B,Cdy (n)



セット位置 90° 方向時の B,Cdy (n)

図13 球体の位置とSN比の関係

このことから、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、別の要因があると推定した。これを図14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、先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に示すような動きの変動が残っている。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変動が大きくなる。このことは、当然、測定値に影響を及ぼすはずである。

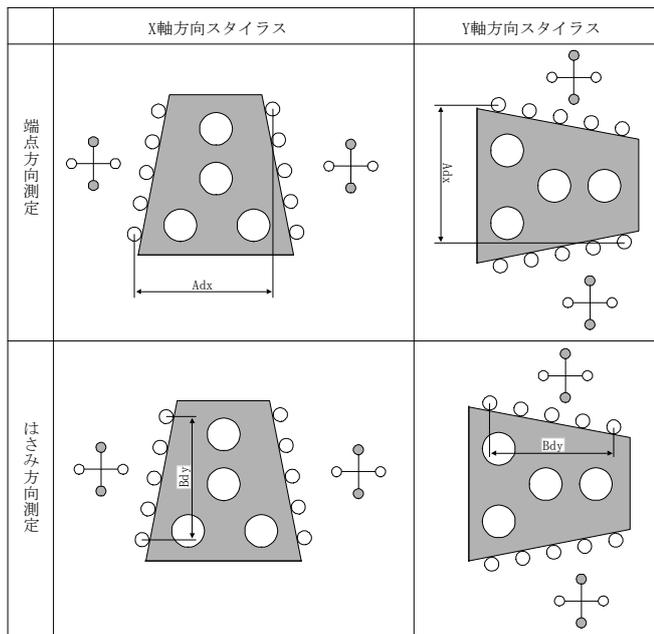


図14 測定モード

次は、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(180°の円弧の3点測定とも言える)。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平面に投影される球赤道円4点の中心座標から求めると考えられ(360°円弧の4点測定とも言える)、4点の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。

以上の仮定のもと、再度、図13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。この場合、図から明らかな通り、SN比は測定距離に関係なくほぼ 75db で一定の値を示す。同じくはさみ方向測定で、変動している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(球 a～球 e)と軸C側(球 f～球 j)では、SN比の傾向が異なる。これは、端面方向測定の際に加え、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 360° 円弧の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うことが推定できる。

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、宮嶋氏や澤近氏の報告データを、この点から検討させて頂いた結果、同様の結果であることが伺われた。詳細については詳しく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、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つ目は、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。端面およびはさみ方向測定による誤差は、プロービングの違いによる球中心座標値の重みの違いによって発生するとも言えるため、CMMの誤差診断データとして解析する際、不適当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。

$$[\text{機械誤差}] = (\beta - \gamma) / 2 \quad (1)$$

ここで β : 表面セットでの軸Aと軸Bのなす角度
 γ : 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	B軸	C軸	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を用いた澤近氏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 1 μm 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。

$$[\text{機械誤差}] = (L - L') / 2 \quad (2)$$

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		$\Delta Y = (L - L') / 2$
	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15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16に示す。X軸方向と同様にして、Y軸方向の真直度も求めた。この結果を図17、18に示す。以上の結果を表9にまとめた。

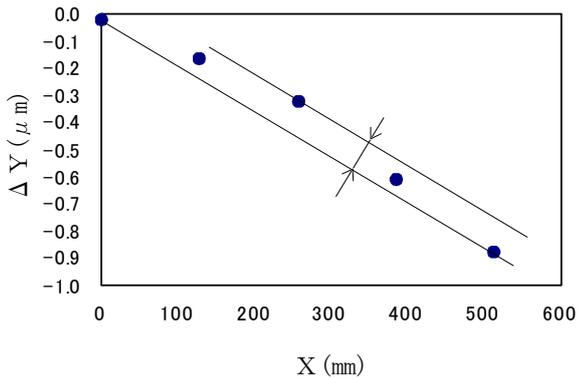


図15 X軸方向の真直度(セット方向 90°, 軸B)

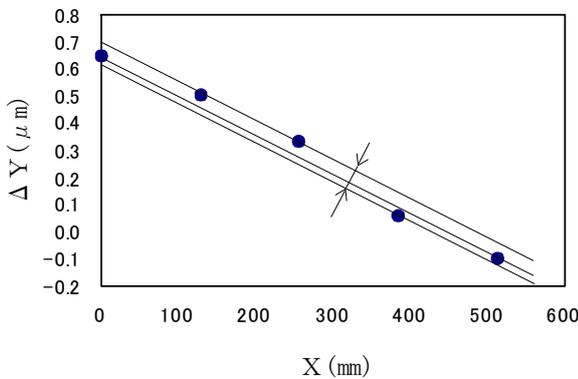


図16 X軸方向の真直度(セット方向 90°, 軸C)

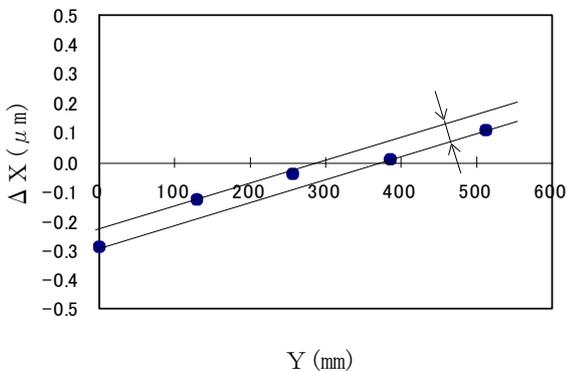


図17 Y軸方向の真直度(セット方向0°, 軸B)

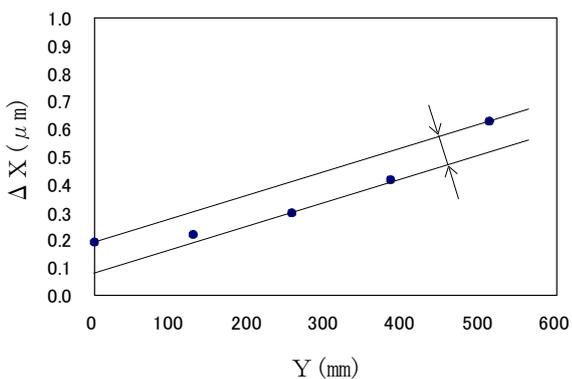


図18 Y軸方向の真直度(セット方向0°, 軸C)

表9 球体中心値から求めた真直度 (単位: μm)

セット方向	B軸	C軸	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 $0.19\mu\text{m}$ 、Y軸が $0.20\mu\text{m}$ 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、大差は無いものと考えられ、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. まとめ

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、当センターの誤差評価試験を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 反転法を用いて、角度および球中心座標値から測定機誤差を算出し、各軸毎の大きさや方向を把握できた。また、両者が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た結果、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。

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先生、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MC工場での比較測定データの提出などに御協力頂いた(株)ミットヨの萱場義隆様に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 機械材料 松尾哲夫ら、朝倉書店
- 2) 品質工学講座3 品質評価のためのSN比、田口玄一
- 3) 品質工学講座7 品質工学事例集 計測編、田口玄一
- 4) 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、宮嶋隆司、長野県工業試験場
- 5) 平成11年度 第28回計測分科会資料集 CMM ゲージの持ち回り測定結果、澤近洋史、東京都立産業研究所技術研究所
- 6) 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、柴田政典、(株)浅沼技研
- 7) 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、柴田政典、(株)浅沼技研