

都市伝説の CMM

第2部

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

## 目 次

第1章 はじめに .....	1
第2章 伸ばしすぎないの .....	2
第3章 いろいろな測り方があるのね .....	5
第4章 どこからはじめてもいいの? .....	9
第5章 小さいのは苦手 .....	14
第6章 お暑いのがお嫌い .....	18
第7章 ゆっくり倣う方が良さそう .....	22

## 第1章

### はじめに

この本は、昨年度発行した「CMMの都市伝説」の第2部です。

製造業で不可欠な三次元測定機(CMM)の使い方について、もっともらしく伝承されたり、当然と思われたりしている「都市伝説」を、疑いの目を持って検証した結果をまとめています。

独立行政法人産業技術総合研究所 計量標準総合センターと産業技術連携推進会議 知

的基盤部会 計測分科会 形状計測研究会に参加している公設研究所のメンバーが、機関ごとに一つの章を担当して執筆しました。協力頂いた方々に、この場を借りてお礼申し上げます。

第1部についてはよい評価も聞こえており、講演会などでも使用されました。第2部もぜひ積極的に活用頂きたいと思います。

## 第2章 伸ばしすぎないの

### 三次元測定機のカatalog精度と実際の精度について

埼玉県産業技術総合センター 宇野彰一

#### 1. はじめに

三次元測定機（以下、CMM）で測定すれば正確という話をよく耳にします。メーカーのカatalogでは正確さの指標として精度が表記されていますが、どんなワークもカatalogの精度で測定できるのでしょうか。

カatalog等に表記されている CMM の精度の検査方法は、JIS B 7440 シリーズに定められています。CMM の精度を一言でいう場合、この中の「長さ測定の指示誤差」( $MPE_E$ )を指すことが一般的で、通常「基準スタイラス」と呼ばれるスタイラスを用いて検査されます。ところが、実際の測定では、ワークとの干渉を避けるため、基準スタイラスより長く剛性の低いスタイラスを使用することが多々あり、JIS による検査と条件がかなり異なります。

そこで、実際の測定に使用する場合に近いスタイラスを用いて、「CMM で測定すれば正確」という都市伝説を検証しました。

#### 2. 検証内容

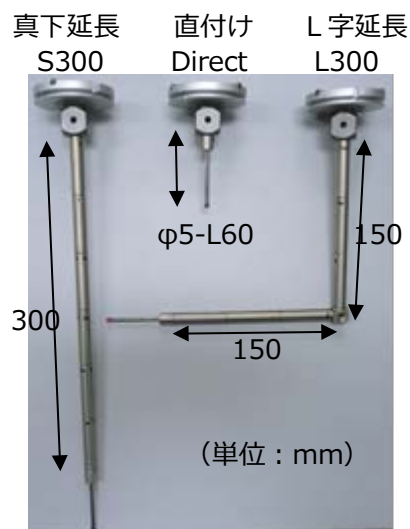
##### 2.1 CMM とスタイラス構成

使用した CMM の概要を表 1 に示します。スタイラスには基準スタイラスと同じ長さの  $\phi 5$ -L60 mm を用いました。スタイラス構成を図 1 に示します。交換皿に直付けした Direct、プローブの許容範囲内でエクステンションを用いて真下にスタイラスを延

長したスタイラス S300，及び L 字に延長した L300 の合計 3 種類の構成で検証を行いました。

表 1 CMM の概要

メーカー/型式	Carl Zeiss・ACCURA II 9/16/8
測定範囲	900 mm×1600 mm×800 mm (X 軸 × Y 軸 × Z 軸)
最大許容指示誤差	$MPE_E = 1.4 + L/350 \mu\text{m}$ (L は測定長さ mm)
プローブ	VAST-GOLD (最大スタイラス長さ 800 mm)



(エクステンション  $\phi 11$ )

図 1 スタイラス構成

##### 2.2 検証方法

測定対象物には(株)ミットヨ製のステップゲージ「チェックマスターHMC-600」を用いました。図 2 に示す 4 方向に設置し、測

定長さ 10, 110, 210, 310, 410, 510, 610 mm の指示誤差を測定しました。Space1 測定時の状況を図 3 に示します。

この測定を、メーカーによる点検と点検の間 (中間検査) と、メーカー点検調整直後 (点検後検査) の 2 回行い、結果を比較しました。

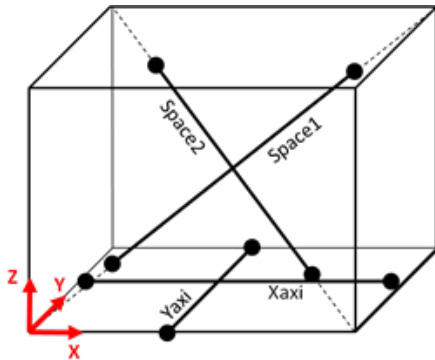


図 2 測定方向



図 3 Space1 測定状況 (スタイラス Direct)

### 3. 中間検査結果

スタイラス Direct (以下, Direct) の結果を図 4 に示します。直前のメーカーによる精度検査時とほぼ同等で、カタログ精度  $MPE_E$  の範囲内の結果となりました。

スタイラス L300 (以下, L300) の結果を図 5 に示します。Direct と比較して、全ての方向で指示誤差が大きくなり、Xaxi 方向は  $MPE_E$  を超える結果となりました。

スタイラス S300 (以下, S300) の結果を図 6 に示します。L300 よりも指示誤差が大きくなり、Yaxi 方向以外は  $MPE_E$  を超える

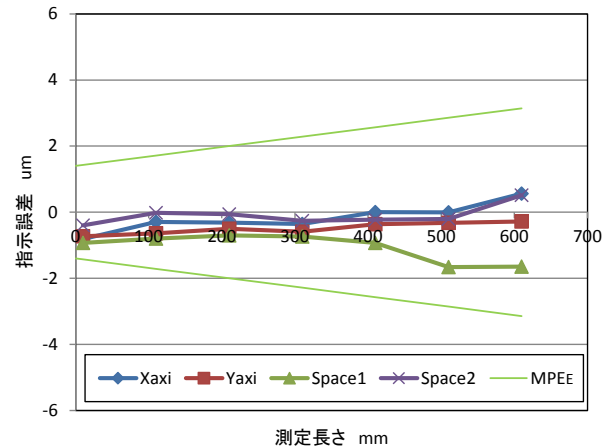


図 4 測定結果 (スタイラス Direct)

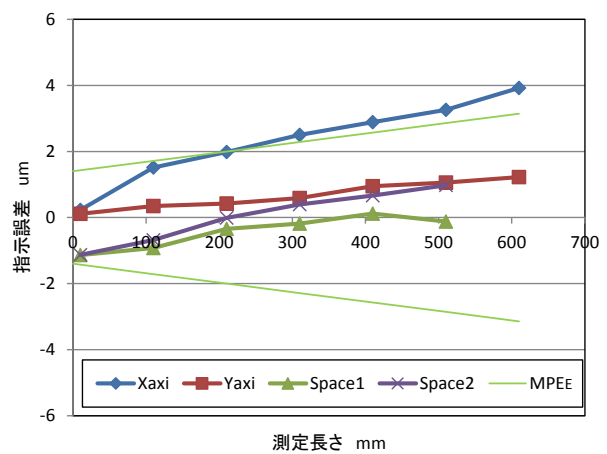


図 5 測定結果 (スタイラス L300)

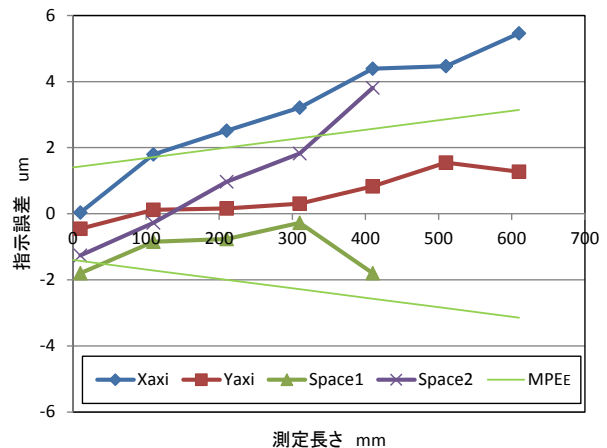


図 6 測定結果 (スタイラス S300)

結果となりました。

L300, S300 とともに CMM の X 軸が動く場合に誤差が大きくなっていることより、X 軸に幾何学誤差等の誤差要因があることが示唆されます。

これらの結果より、基準スタイラスに近いスタイラス構成の場合は、カタログ精度の範囲内で測定できること、長く剛性の低いスタイラスを用いた場合カタログ精度を超える場合があることが分かりました。

#### 4. 点検後検査結果

メーカーによる点検調整直後に、Xaxi, Yaxi 方向を、スタイラス Direct と S300 を用いて測定し、中間検査結果と比較しました。

Direct の結果を図 7 に示します。中間検査との差は 1  $\mu\text{m}$  以下で、メーカー点検調整前後でほとんど差がないことが分かりました。

S300 の結果を図 8 に示します。Direct より指示誤差は大きいですが、中間検査で誤差要因が示唆された Xaxi もカタログ精度の範囲内の結果となりました。これは、点検調整時にメーカーの実施したプローブパラメータ調整による効果と考えられます。

#### 5. 考察

これまでの結果をまとめると以下のようになります。

L300 や S300 のように実際の測定に使用するスタイラスの場合、カタログ精度を満足しない場合があることが分かりました。ただし、今回の例のように、点検調整で改善する可能性があります。

また、CMM の状態はいつも同じではないことが分かりました。メーカーによると、前回と今回の点検の間に、CMM 状態が変化していたとのこと。そのため、測定の信頼性を担保するには、メーカー点検間の中間検査で CMM の状態を把握しておくことが重要であることが分かりました。

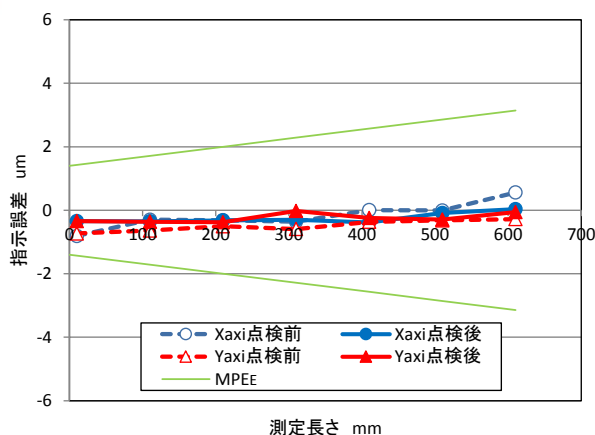


図 7 点検前後の測定結果 (スタイラス Direct)

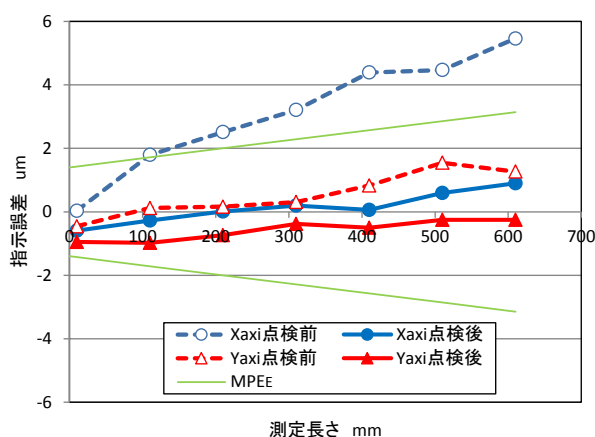


図 8 点検前後の測定結果 (スタイラス S300)

さらに、基準スタイラスを用いた検査だけではこの CMM の状態変化は分かりづらく、実際の測定に使用する条件で検査する必要があることが分かりました。

#### 教訓

- ・ 実際の測定では、カタログ精度を満足しない場合があります。
- ・ CMM の状態は変化します。中間検査で状態を把握することが重要です。
- ・ 実際の測定条件で検査しましょう。

#### 6. 謝辞

今回の検証にあたり、ご助言、ご協力をいただきました(株)東京精密の皆様にご感謝申し上げます。

## 第3章 いろいろな測り方があるのね

### 回転式プロービングシステムによる同軸度測定の場合

山梨県工業技術センター 米山 陽, 石黒輝雄, 寺澤章裕

#### 1. はじめに

CMMは長さ評価だけではなく、幾何公差の評価にも多く用いられています。例えば図1に示す様な製品で、ベアリング勘合部同士の間軸度評価など、良くある事例です。

このような測定では、被測定物に対して様々な方向からスタイラスを向けて測定するため、回転式プロービングシステムやマルチスタイラスが必要となります。そのため、スタイラス長さや方向、被測定部の設置方法など、測定者が検討を要する項目が、シングルスタイラスの場合より多くなります。

また、例えば「同軸度 $\phi 0.01$  mm以下を確認したい」という課題に対し、使用している測定機で評価が可能か判断できるでしょうか。「仕様では $MPE_E$  (最大許容指示誤差) が $0.00\mu\text{m}$ だから・・・」と考える方もいるかと思いますが、長さ計測ではない幾何公差評価においては、幾何公差の指示内容や測定手法、測定機の性能が与える影響が大きく、測定機の仕様のみでは、測定結果の信頼性についての判断が困難です。

そこで今回は、回転式プロービングシステムを搭載するCMMを使用して、同軸度測定実験を行い、被測定物の設置方法やスタイラスの選択が幾何公差評価に与える影響を検証しました。

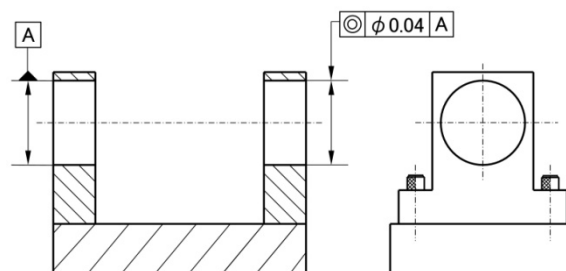
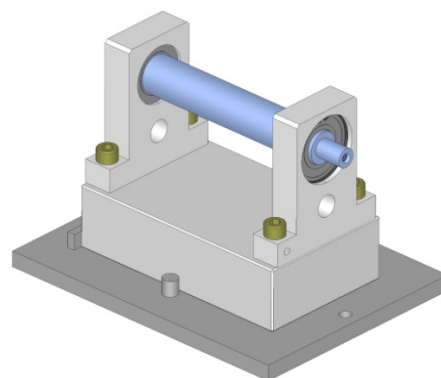


図1 同軸度評価製品例および幾何公差指示例

#### 2. 測定対象

実験には、図2に示す形状の円筒スコヤ ( $\phi 90$  mm,  $L=250$  mm) を用いました。

同軸度評価は、円1、円2測定から算出される円筒1をデーラムとし、円3および円4から算出される円筒2に対して同軸度を算出しました。

#### 3. CMM

実験には普及型の門移動形CNC座標測定機を使用しました。使用したCMMの最大許容指示誤差 $MPE_E$ は、 $1.7+3L/1000 \mu\text{m}$  ( $L$ は測定長さ [mm]) です。プローブ形式は

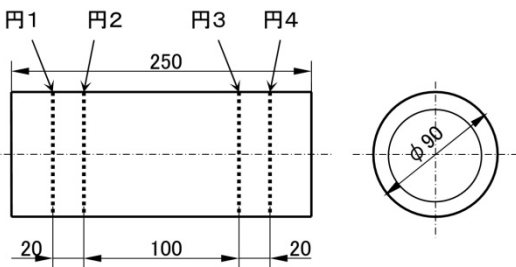
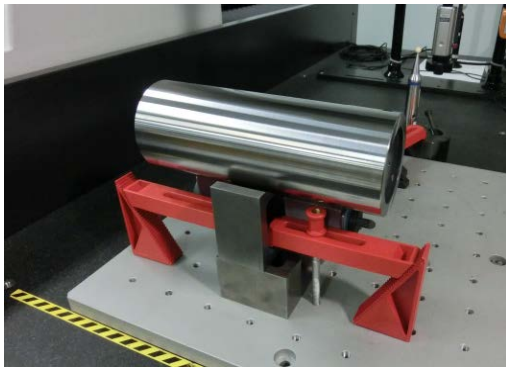


図2 円筒スコヤおよび測定箇所

スキャニングプローブで、モータ駆動型の回転式プロービングシステムです。図3にプロービングシステムの外観を示します。

CMMは $20 \pm 1$ ℃仕様の恒温室内に設置されており、各測定は十分な温度慣らし時間を設けた後、CNC測定で実施しました。

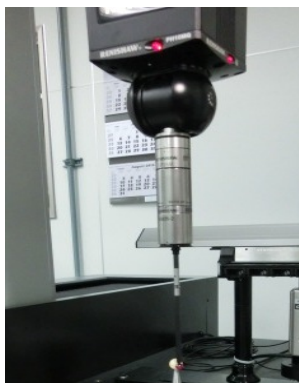


図3 プロービングシステム外観

#### 4. 実験

以下のA~Dの4パターンで測定実験を行いました。測定点、測定速度等の条件は全て同一です。測定点は円周上の8点とし、円筒下側は支持部があるため、測定部位に含めないこととしました。

#### パターンA：校正球と離れた位置

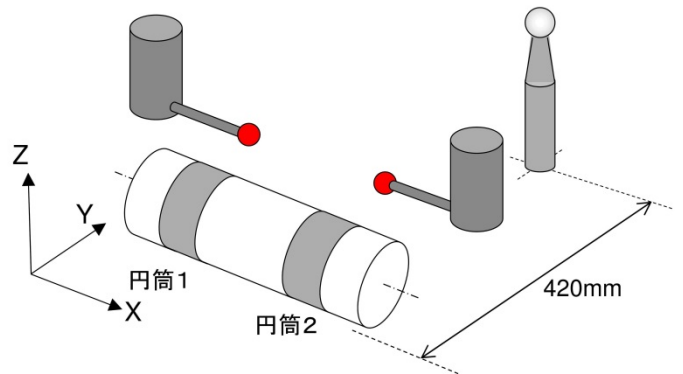


図4 パターンAの測定

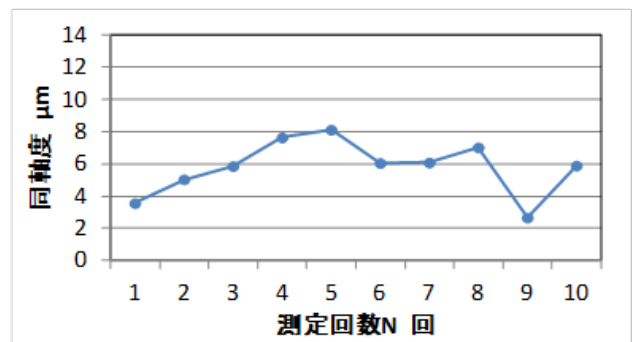


図5 パターンAによる連続10回測定結果

まず、最もスタンダードな測定手順として、図4の様に1本のスタイラスを2方向に向ける測定を行いました(φ6 mm, スイベル長 223 mm)。校正球は測定対象から+Y方向に離れて設置されており、プローブオフセット量等は、測定開始直前に全方向の校正を実施済みです。

図5に、同軸度を連続して10回測定した結果を示します。測定結果はφ2.5~8.0 μmと幅を持った値となりました。使用した円筒スコヤの円筒度(実測値 0.8 μm)を考慮すると、期待される本来の同軸度より本結果は大きいと考えられます。そこで、より同軸度が小さくなる測定方法を検討しました。



## パターン B : 校正球と位置一致

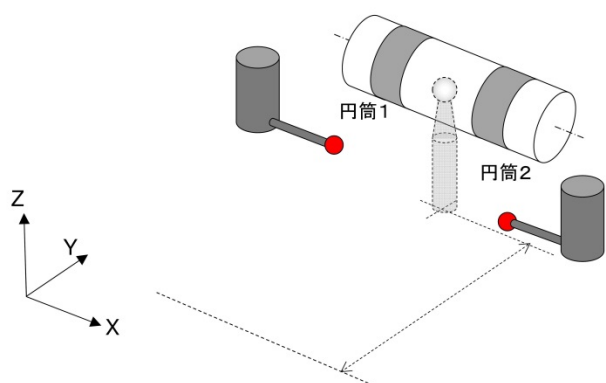


図6 パターン B の測定

## パターン C : 都度校正

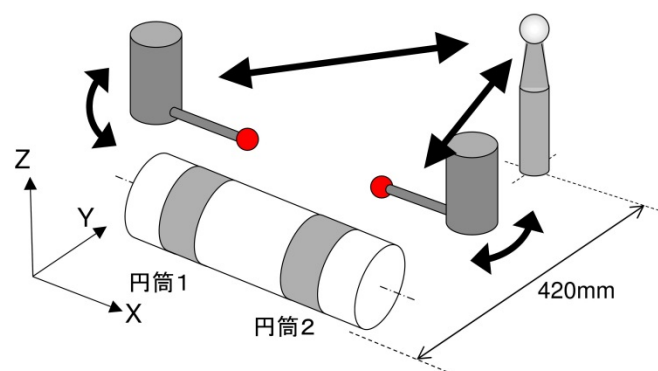


図8 パターン C の測定

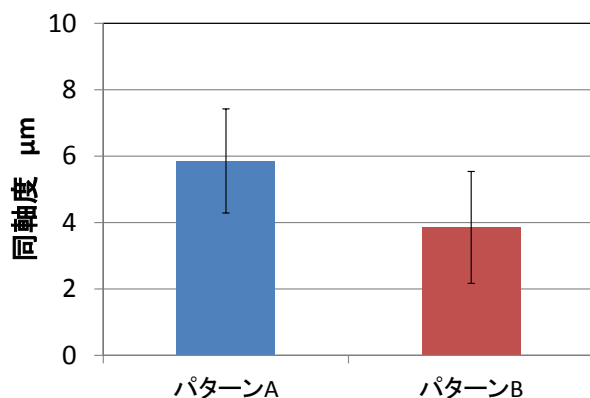


図7 パターン A, B の測定結果

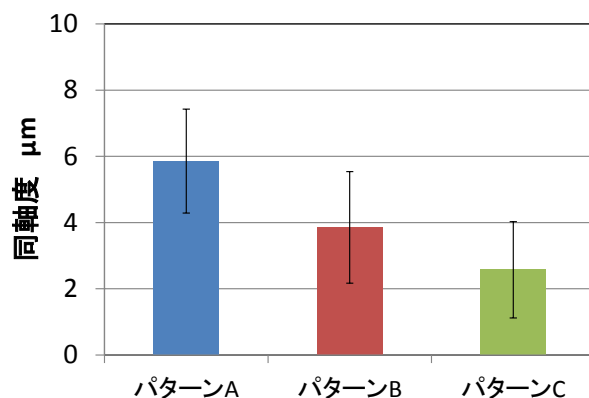


図9 パターン A, B, C の測定結果

マルチスタイラスにて測定を行う際、校正球と測定対象の位置を一致させると測定精度が良くなると言われております。パターン B として、校正を実施したのち校正球を取り外し、その位置に校正対象を設置し、パターン A と同じ測定を実施しました。パターン A との比較結果を図7に示します。

同軸度は校正球位置を一致させることにより平均値が 2 μm 程度減少し、より精度の高い測定結果を得ることが出来ました。

ただしこの方法の場合、校正球と測定対象の置きなおしが必要となる等の課題があります。

回転式プロービングシステムに限定されますが、マルチスタイラス測定精度を向上させる方法として、プロービングシステムを回転させる都度に校正を行う方法があります。図8に示す様に、パターン A と同じ設定で、回転させる都度校正を行い、同軸度を測定した結果を図9に示します。

本実験の結果では、パターン C が最も小さい値を示し、パターン A より 2.5 μm 減少し、標準偏差の値もわずかではありますが小さくなりました。しかしこの方法は、パターン A より、測定時間が増大する等の課題もあります。

## パターンD：1方向の長いスタイラス

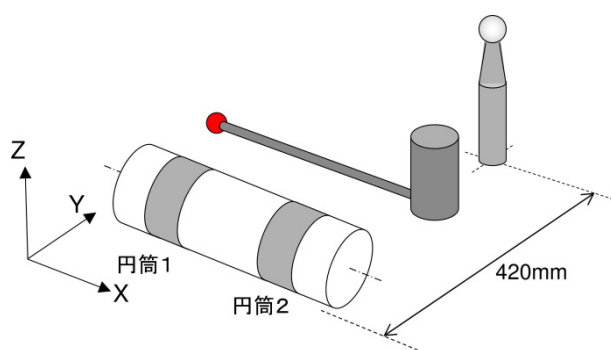


図10 パターンDの測定

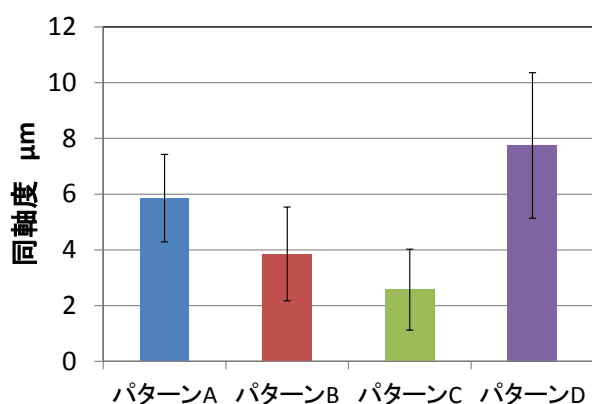


図11 パターンA, B, C, Dの測定結果

マルチスタイラス測定特有の影響を無くす測定方法として、単一方向スタイラスによる測定が考えられます。図10に示す様に、-X方向のみのスタイラス構成とし、一方向から測定が可能となる様に長いスタイラスに変更し、測定を実施しました。(スイベル長=333 mm)

その結果、図11に示す様に同軸度の値は平均値および標準偏差値も増大し、平均で7.5 μmを示しました。これは、CMMの幾何学誤差が大きく寄与していると推測されます。図10のように長いスタイラスを使用した場合、X軸のヨーイング誤差によって測定結果が大きな誤差を持つことが知られています。

## 5. 考察

マルチスタイラスによる測定誤差の検討には、JIS B 7440-5「座標測定機の受入検査及び定期検査－第5部」が参考になります。本測定機で、マルチスタイラス位置誤差： $P_{LTE}$ を評価したところ、 $P_{LTE}=1.9 \mu\text{m}$ となりました。測定方法によっては $P_{LTE}$ を大きく超えたことから、 $P_{LTE}$ 値のみで同軸度測定能力を推測することは難しいと言えます。しかしながら、本実験結果は、回転式プローブを回転の都度校正することで、 $P_{LTE}$ に近い値まで同軸度測定誤差を低減することができることを示しました。

本実験結果は、測定機や測定内容により結果が大きく異なることが予想されるため、測定機毎の検証が望ましいと考えられます。

## 6. おわりに

本実験では、以下の知見が得られました。

- (1)校正球位置と評価対象物の設置位置を近づけることにより、測定精度は向上する。
- (2)プロービングシステム回転時には、その都度校正することにより、さらに測定精度が向上する。
- (3)スタイラスの長さが長い場合、同軸度測定結果が悪化する場合がある。

### 教訓

- ・回転式プローブは回転の都度校正するとよい
- ・非回転式プローブの場合は、測定対象物と校正球位置は同一に
- ・スタイラス長さは短くする
- ・幾何公差測定能力≠測定機精度仕様だが、測定戦略によって精度仕様に近い能力が実現可能

## 第4章 どこからはじめてもいいの？

### 座標系基準の違いによる測定結果への影響

長野県工業技術総合センター 田中敏幸

#### 1. はじめに

三次元測定機(CMM)による測定ではほとんどの場合、測定対象に対してワーク座標系を設定し、その座標系を用いて測定、評価を行います。座標系の設定は、いくつかの要素(平面、軸、円等)を基準として組み立てます。基準とする要素は通常、測定対象の図面に指示されたデータムを使います。

しかし、図面上の指示だけでは、測定者に座標系の設定に必要な情報が伝わらない場合も多くあります。また、データムの指示自体が何もない図面で、「これ、ちょっと作ってみたら、ちゃちゃっと測ってみて。」そんな依頼をされたことはありませんか？そんないい加減な依頼なのに、依頼者は意図したものが精度よく測れるものと思っている、そんな場合も少なくありません。その場合、測定者が何らかの情報や推測等により基準を定めて座標系を設定するしかありませんが、測定者により違う座標系ができあがることも考えられます。座標系基準をどの様に考えるかで、測定結果への影響はないのでしょうか。

ここでは、CMMでの測定において、座標系の取り方による測定結果への影響について検証してみました。

#### 2. 測定実験

##### 2.1 実験用ワーク

実験結果をわかりやすくするため、図1に



図1 実験用ワーク外観

示す実験用ワークを用います。このワークは、板厚 20 mm、一辺 100 mm の板材にいくつかの穴を開けたものです。

実験用ワークは実際には図2のように、手前側の側面と、下面を斜めに削り、それぞれ右側面と手前面で 0.1 mm 肉が薄くなるように形状を少し歪ませています。各平面は、今回の実験結果には影響を与えない程度の十分な平面度に仕上げられています。100 mm の長さで 0.1 mm の傾斜は、角度では約 0.05°、3 分になります。この歪みは

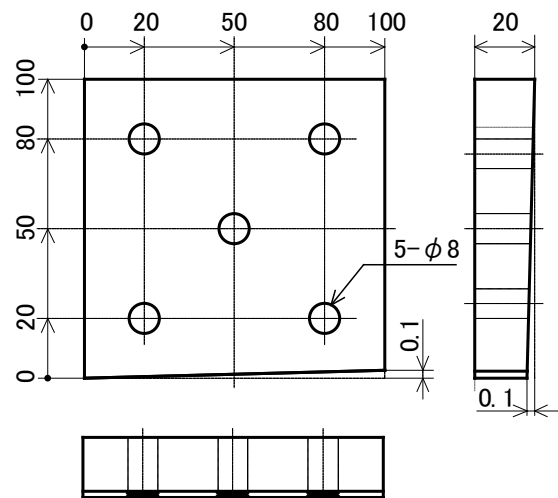


図2 実験用ワーク図面

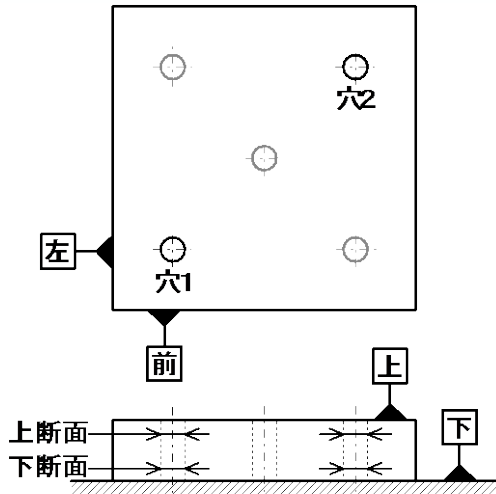


図3 データムと測定箇所

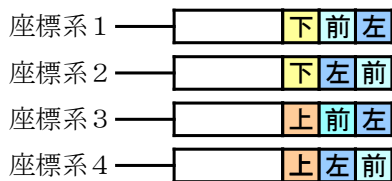


図4 座標系

目視ではほとんど判別できません。多くの場合、このような歪みの存在は測定前にはわかっていませんので、実験では歪みの存在を意識せずに測定を行います。

## 2.2 ワーク座標系

測定実験では、実験用ワークにワーク座標系を設定し、穴位置等を測定します。ワーク座標系の決め方はいろいろ考えられますが、ここでは、図3に示す4つの平面をデータムとして、図4に示すように基準の順番を入れ替えた「座標系1~4」の4つの直交座標系を設定します。JIS等ではデータム面の指示には“A, B, C, …”を用いることと規定されていますが、ここでは各面が区別しやすいように「上」「下」「前」「左」の漢字を用いることにします。実験用ワークの下面は測定機の定盤に接触し測定できませんので、定盤面を下面の代用とします。

座標系は図4のデータムの順に従い、上面

または下面を平面として測定し、その法線を空間軸(+Z軸)とします。次に、前面、左面は上下方向の中央を直線として測定し、X軸またはY軸方向とします。X, Y, Zの原点は、前面、左面それぞれの直線を空間軸の設定に使用した平面に投影し、それら2直線の交点とします。

## 2.3 測定・評価内容

設定した4つの座標系において、図3に示す穴1, 2の2つの穴について、「上断面」「下断面」の2断面を円として測定します。各断面円は、それぞれ上面、下面から2mm内側です。また、ここでは各穴の上下断面円の中心を結ぶ直線を各穴の軸とします。

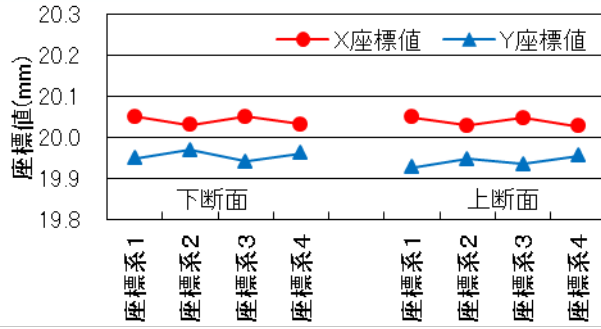
各座標系における次の項目を評価します。

- ① 各断面円の中心座標(X, Y)及び位置度
- ② 各断面円の中心間距離(X, Y, 直線方向)
- ③ 上面または下面をデータムとした、各穴の軸の直角度

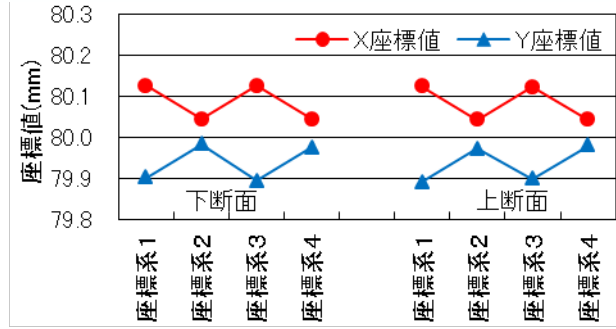
## 3. 実験結果

### 3.1 各断面円の中心座標(X, Y)及び位置度

図5に、各座標系での各断面円中心のX, Y座標値を示します。また図6に、各座標系での各断面円の中心の位置度を示します。図より、同じ断面円でも違う座標系では座標値が違って評価されることがわかります。また、穴1より穴2の方が、座標系の違いによる中心座標の違いが大きくなることもわかります。位置度はデータムとの相対位置関係に対するズレを表す数値ですので、データムとなる座標系が違えば位置度も違ってきます。これは、前面が傾斜していることにより、前面、左面のどちらを基準とするかで、図7の

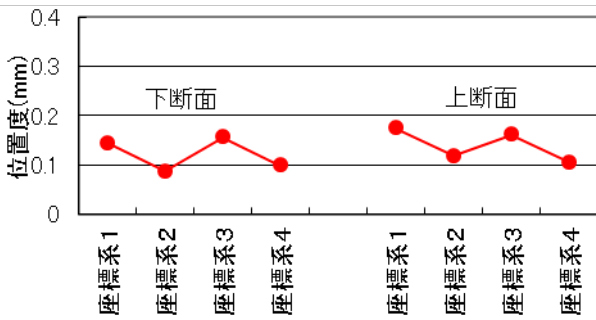


(a) 穴1

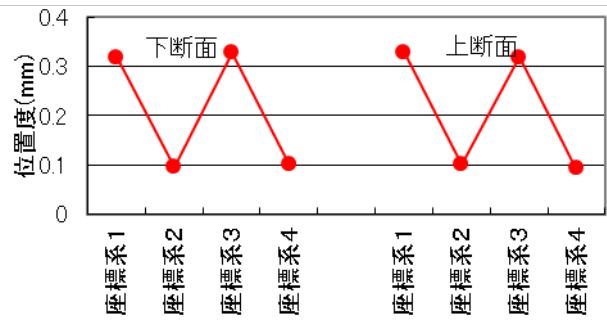


(b) 穴2

図5 穴断面円の中心座標



(a) 穴1



(b) 穴2

図6 穴断面円の中心の位置度

ように作られる座標系が回転していることによります。図7は図が煩雑になるのを避けるため、X方向の座標値のみ描画していますが、Y方向、Z方向についても同様のことがいえます。穴1より穴2の方が座標系の回転中心にあたる原点からの距離が大きいため、座標軸の方向の違いがより大きく影響します。

### 3.2 穴断面円の中心間距離

図8に2つの穴断面円の中心間距離の結果を示します。測定結果は、穴1—穴2の上断面円同士、下断面円同士を、X方向距離、Y方向距離、直線距離で算出しています。図から、X方向、Y方向については座標系によって中心間距離が違っていますが、直線距離については座標系が違っていても同じ値となっている事がわかります。これは、X方向、Y方向距離は座標系の座標軸と平行な方向の距

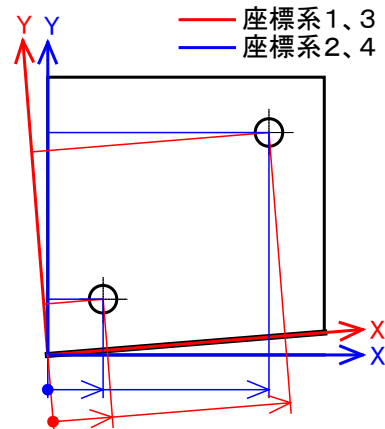


図7 作られる座標系と座標値

離であり、計算時に座標軸の方向の情報を使用するため、座標軸の向きによって違う値となるためです。一方、直線距離については2つの断面円中心同士の相対位置関係のみで決まり、座標系には関係ない値となるため、座標系が違っていても影響がなかった、ということになります。

### 3.3 各穴の軸の直角度

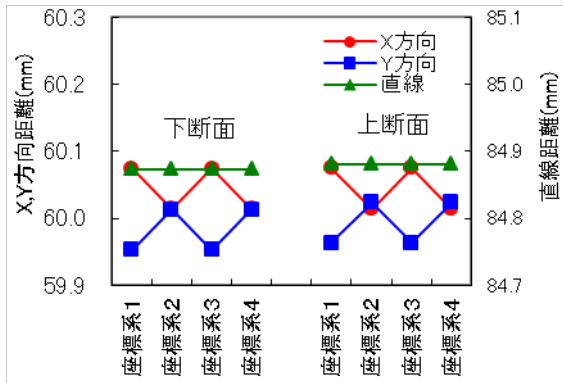


図8 穴断面円の中心間距離

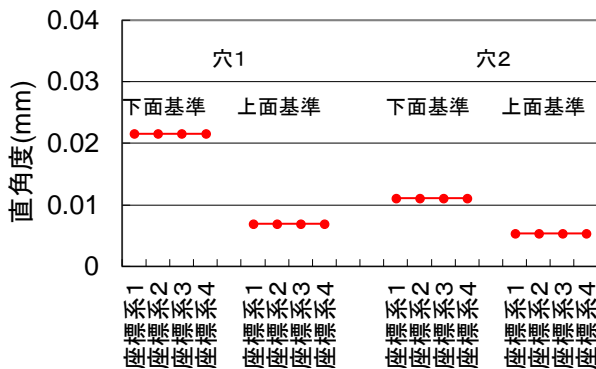


図9 直角度

図9に、上面、下面をデータムとしたときの、各穴の軸の直角度を示します。図から、座標系が違って軸とデータム面の組み合わせが同じ場合は直角度の値は変わらないことがわかります。これは前項の直線距離と同様、直角度はデータム面と穴の軸の相対姿勢関係のみで決まるため、座標系には関係ない結果となります。

#### 4. 追加実験と結果

上記実験では、X軸の基準として前面の上下方向中央の直線を使用しました。実験用ワークは下面の手前側の肉が薄くなるように削られていますので、測定時には前面は定盤面に対して上側が手前側にわずかに傾斜しています。つまり、直線の測定高さによってX軸がY方向に平行移動することになりま

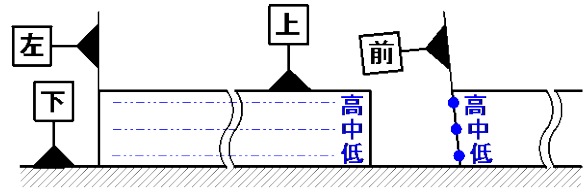


図10 前面の測定高さ

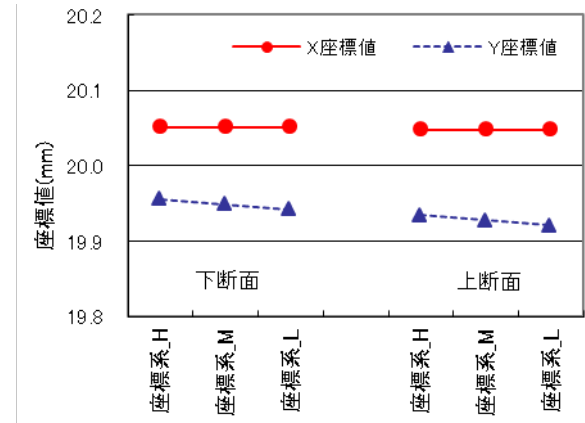


図11 前面の測定高さの違いによる

穴1の断面円の中心座標

す。この影響について追加実験を行いました。ここでは、X軸の基準となる直線を図10のように、前面の測定高さを“高” “中” “低”のそれぞれに変え、上記と同様の測定をしてみます。ここでの“中”は前節の実験時の測定高さです。

測定結果の一例として、座標系1において前面の測定高さを変えたときの、穴1の上下断面円の中心座標を図11に示します。

前面の測定高さが違うことにより、Y座標値は変化し、X座標値は変化しないことがわかります。

このように、座標系基準となる面、直線、点等の測定位置によっても座標系全体がずれ、測定結果に影響を及ぼしてしまいます。

#### 5. おわりに

形状をわずかに歪ませたワークを用い、座標系設定の違いによる測定結果への影響に

ついて検証しました。

実験により、座標値や位置度などの測定結果は座標系の設定により、異なった値となる事が確認されました。一方で、2穴間の直線距離など座標系によらず値の変化しない測定項目もありました。測定を行う前に、座標系と測定項目の設定についてしっかりと考えて測定計画を立てる必要があります。

ここでは、前面をある高さで測定した直線としましたが、製品の使用方法によっては、上面と前面の交線を使用した方がよい等、他の基準も含め、いろいろなパターンが考えられます。

どんなに高度な技術、技能を使っても、人間には完璧な形を作ることはできません。どんな様な測定対象も、程度の違いはあっても図12のような状態になっています。どこをどのように使うとどのような影響があるのか、その製品の使用方法や、求めたい特性との関係を十分考慮の上、慎重に検討することが大

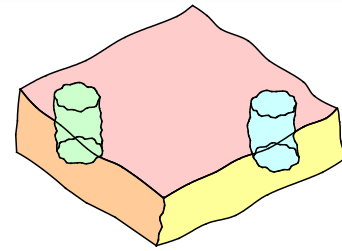


図12 測定対象の状態

切です。ここは測定者の悩みどころであり、腕の見せどころでもあります。

#### 教訓

- 座標系の設定により、測定結果が変わる測定項目があり、想定した測定結果とならない場合があります。
- 適切な測定結果を得るためには、測定対象の使い方を考えて座標系を設定する必要があります。

## 第5章 小さいのは苦手 小穴とチップ径の関係

福岡県工業技術センター機械電子研究所 竹下 朋春

### 1. はじめに

工業製品の小型化や高性能化に伴って、直径の小さな「小穴」を高精度に測定することが求められています。例えばプレス金型や樹脂金型に見られる小穴を事例として挙げるすることができます（図1）。



図1 小穴を含む金型部品の事例

対象が小さいため、画像測定器や顕微鏡なども使われますが、小穴の出口ではなく、小穴の内側を計りたいニーズも根強く、接触式の三次元測定機（以下、CMM）が使われています。

ところで穴の内径部をCMMで測るとき、穴の直径に対して十分に小さい直径のスタイラスチップ（以下、チップ）を使うことが常識になっています。しかし、小穴を測る場合、穴径に対して測定子のチップ径を十分に小さくすることが困難です。一般に、穴径に近いサイズのチップを使う場合、精度の良い穴の測定は難しいと言われています。

図2に示すように、穴径に近いサイズのチップ径の場合、チップ球の中心から接触点を推定するときの角度方向の誤差によって、

接触点の位置が大きくばらつく可能性があることがわかります。そのため、測定精度が悪くなると考えられます。そこでこの小穴にまつわる都市伝説を検証してみました。

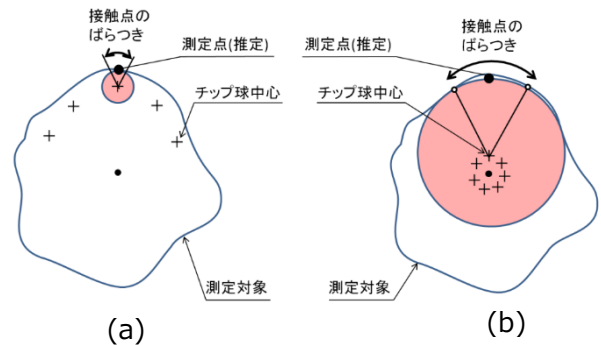


図2 異なるチップ球による小穴測定

### 2. 測定装置

図3に示すCMMで測定を行いました。カタログ仕様では、長さ測定最大の許容指示誤差  $MPE_E = 0.48 + L/1000 \mu\text{m}$ 、ポイント測定最大の許容プロービング誤差  $MPE_P = 0.45 \mu\text{m}$ 、スキャニング測定最大の



図3 CMMとプローブによる小穴測定



許容プロービング誤差  $MPE_{Tij} = 1.4 \mu\text{m}$  です。設置環境は  $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  に管理されています。チップ径は、 $0.5 \text{ mm}$  および  $0.3 \text{ mm}$  のものを使用しました。

なお、この CMM は水平方向となる X 軸および Y 軸方向にそれぞれ  $700 \text{ mm}$  の測定範囲をもっており、小穴測定に特化して設置された装置ではありません。

### 3. 測定と結果

#### 3.1 測定の概要

市販の小径リングゲージ(呼び直径  $1 \text{ mm}$ ,  $2 \text{ mm}$ )と、当研究所の地元企業様のご協力によりワイヤー放電加工で試作したサンプルワーク(以下、EDM 器物)の、形状偏差を測定しました。EDM 器物は平面基板に  $\phi 0.8 \text{ mm}$  の小穴を、直線状に  $5 \text{ mm}$  間隔で穴開け加工したものです。

測定は、小穴の上側の端面から軸方向に向かって奥側に  $1 \text{ mm}$  入った断面を第 1 の断面とし、さらにそこから  $\pm 0.5 \text{ mm}$  のところに 2 断面を追加した合計 3 断面の円測定を、各 3 回測定しました。得られた各断面の測定点について最小二乗法による円あてはめを行い、形状偏差の平均値を求めました。

実際の測定で、小穴の直径とチップ径が近く、ポイント測定に必要なアプローチ距離及びタッチバック距離を確保することが困難な場合、スキャニング測定を使用することもあるため、スキャニング測定についても実施しました。測定方法は、円周上に 36 点を配置するポイント測定と、サンプリングピッチ  $0.01 \text{ mm}$ 、測定力  $0.05 \text{ N}$ 、スキャニング速度  $1 \text{ mm/s}$  のスキャニング測定としました。

#### 3.2 $\phi 1 \text{ mm}$ リングゲージ

$\phi 1 \text{ mm}$  のリングゲージを、 $\phi 0.5 \text{ mm}$  のチップでポイント測定した測定プロファイルを図 4 に示します。このリングゲージの形状偏差は  $0.4 \mu\text{m}$  となりました。CMM の幾何誤差を分離するため、小穴の軸方向が CMM の Z 方向とほぼ一致するように設置した測定(0 度)と、小穴を軸まわりに  $90$  度回転させて設置した測定を行い、結果を比較しましたが、特徴的な形状変化は見られませんでした。このことから、CMM のポイント測定のばらつきの程度で測定ができているといえます。同じ測定をスキャニング測定で

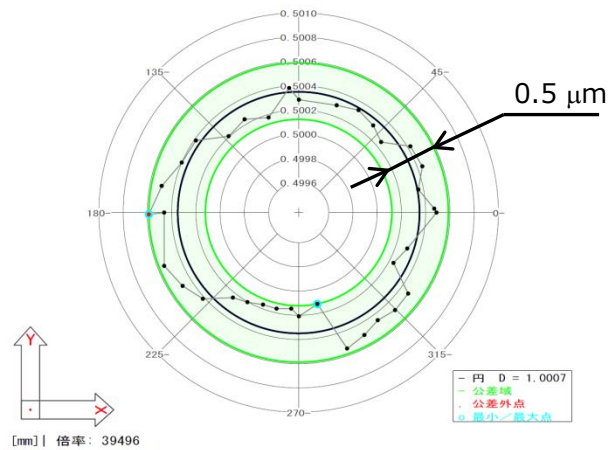


図 4  $\phi 1 \text{ mm}$  リングゲージのポイント測定結果

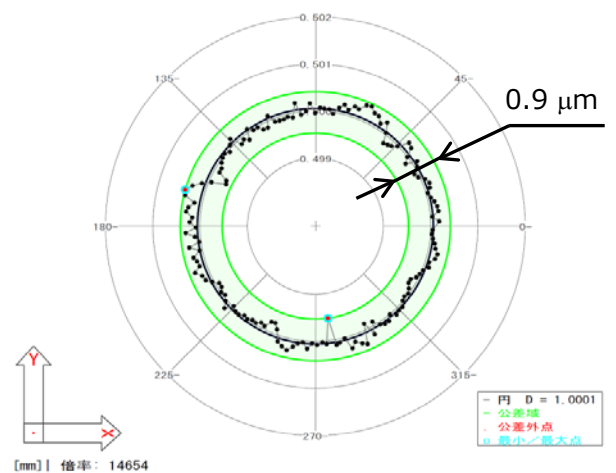


図 5  $\phi 1 \text{ mm}$  リングゲージのスキャニング測定結果

行った測定プロファイルを、図 5 に示します。形状偏差は  $0.9 \mu\text{m}$  と、プロービング測定との 2 倍程度になりましたが、最大許容プロービング誤差に近い形状誤差でした。

$\phi 1 \text{ mm}$  リングゲージを  $\phi 0.5 \text{ mm}$  チップによって測定した結果を図 6 にまとめました。このときのチップ径と小穴径の比率は 50 % で、CMM の典型的な使い方として、例えば  $\phi 4 \text{ mm}$  のチップ径で  $\phi 100 \text{ mm}$  の穴を計る場合の比率(4 %)に比べるとかなり大きな比率になっていますが、問題なく測定できていました。

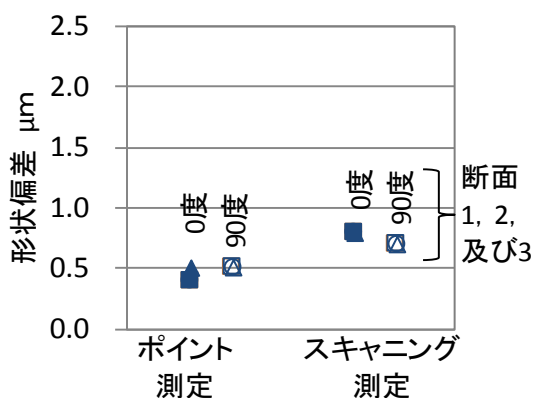


図 6  $\phi 1 \text{ mm}$  リングゲージの測定結果のまとめ

### 3. 3 $\phi 2 \text{ mm}$ リングゲージ

$\phi 2 \text{ mm}$  リングゲージを  $\phi 0.5 \text{ mm}$  チップによって測定した結果についてまとめたグラフを図 7 に示します。このとき、チップ径と小穴径の比率は 25 % です。

$\phi 2 \text{ mm}$  リングゲージの測定結果は全体として  $\phi 1 \text{ mm}$  リングゲージの測定結果の約 2 倍の形状偏差となっています。これは使用した  $\phi 2 \text{ mm}$  リングゲージの実際の凸凹が  $\phi 1 \text{ mm}$  リングゲージの実際の凸凹に比べて大きかったためと考えられます。

$\phi 2 \text{ mm}$  リングゲージの測定結果を、 $\phi 1 \text{ mm}$  リングゲージの測定結果と比較す

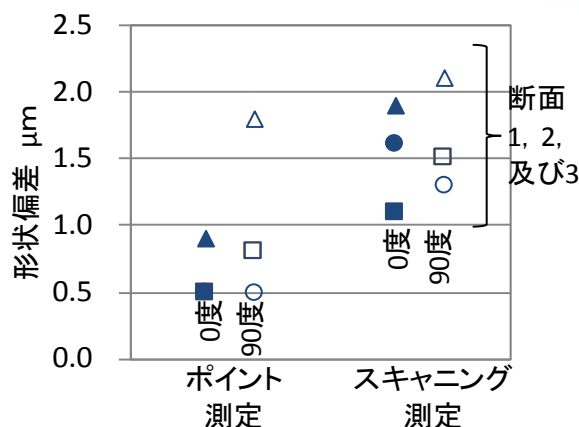


図 7  $\phi 2 \text{ mm}$  リングゲージの測定結果のまとめ

ると、ポイント測定、スキャニング測定ともに各プロービング誤差とほぼ同じ程度の測定結果となり、チップ径と小穴径の比率が 50 % と高くても正しい測定を実行できる可能性が高そうです。

### 3. 4 $\phi 0.8 \text{ mm}$ EDM ゲージ

$\phi 0.8 \text{ mm}$  EDM 器物を  $\phi 0.5 \text{ mm}$  チップ径によって測定した結果についてまとめたグラフを図 8 に示します。このとき、チップ径と小穴径の比率は 60 % にもなります。

形状偏差は  $1.7 \mu\text{m}$  程度と、リングゲージの場合より大きくなりました。また、スキャニング測定の結果とポイント測定の結果に顕著な差は認められませんでした。EDM 器物は放電加工により仕上げられているこ

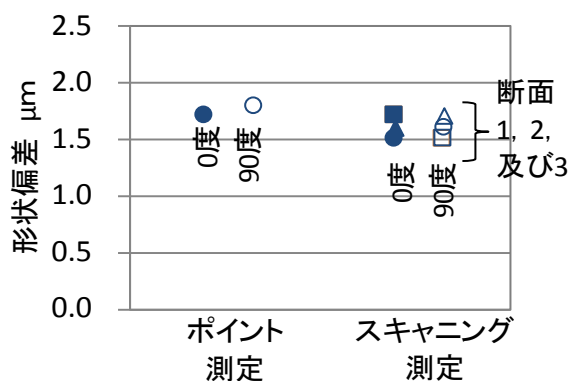


図 8  $\phi 0.8 \text{ mm}$  EDM 器物の測定結果のまとめ

とから、表面性状がリングゲージよりも悪いことが原因と考えられます。

測定対象の表面性状が一定の条件をみたせば、チップ径と小穴径の比率が 60 % となっても正しい測定を実行できる可能性があります。結論を導くにはさらに詳細な実験が必要です。

#### 4. 3 $\phi 0.3$ mm チップによる測定

$\phi 0.3$  mm チップを用いて  $\phi 2$  mm リングゲージを測定しました。これはチップ径と小穴径の比率を 15 % まで低減したことになります。

得られた測定プロファイルを図 9 に示します。このグラフでは形状偏差が  $4 \mu\text{m}$  と大幅に悪化しています。また、円周上の数か所に階段状の段差形状が認められます。これらの段差形状は CMM またはプローブの運動方向が切り替わる地点の近傍に生じる象限突起とみられます。本実験におけるその発生のメカニズムは明確ではないものの、実験に使用した CMM とプローブにとって、チップ球の直径を  $\phi 0.5$  mm から  $\phi 0.3$  mm にまで小径化した影響は大きいようです。

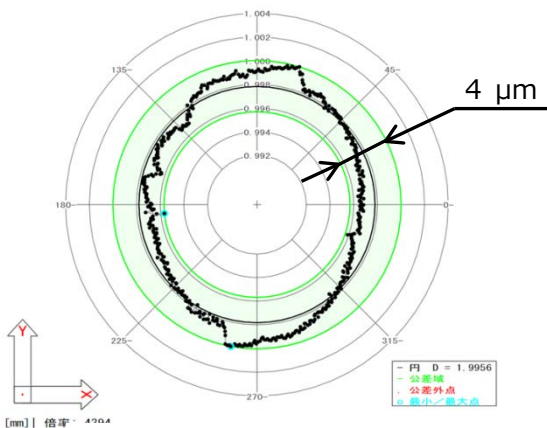


図 9  $\phi 2$  mm リングゲージの  
 $\phi 0.3$  mm チップ球による  
スキャニング測定結果

## 6. 考察

CMM で小穴を測定する場合、小穴直径に対するチップ径の比率が 60 % まで高くなっても、実用的な小穴測定の可能性が高そうなことがわかりました。穴径に近いサイズのチップ径を使う場合、精度の良い小穴測定は難しいという都市伝説は一定の範囲で否定されたと言えるでしょう。

ただし現実には CMM を用いて小穴を測定する場合、小穴の直径に対するチップ径サイズを小さく抑えることによる高精度化と、一方ではできるだけ大きなチップ径を採用することによる高精度化との間でのトレードオフが生じます。

今回の実験の事例では  $\phi 0.3$  mm までチップ径が減少すると、安定した小穴測定が困難となる現象が生じました。CMM やプローブにはそれぞれ異なる特徴や限界があります。信頼できる小穴測定を実現するためには、校正値が既知のリングゲージを参照したり、小穴の位相を変化させて測定値を確認するなどの工夫をすることが重要と考えられます。

### 教訓

- 小穴直径に対するチップ径の比率が 60 % 程度まで高くなっても実用的な小穴測定は可能。
- チップ径を小さくし過ぎると凶。

## 第6章 お暑いのが嫌い

### 温度コントロールされていない場所での問題点

東京都立産業技術研究センター 村上祐一 大西徹

#### 1. はじめに

CMMは、機械部品等を測定する際に広く利用されています。使用環境もさまざまで、恒温恒湿室に設置されるだけでなく、温度コントロールされていない厳しい環境である現場環境に併設されたりします。現場環境に設置された際に問題となる要因を列挙します。

- (1) 環境条件に起因するもの
  - ・温度ドリフト
  - ・振動、ごみ、供給空気等
- (2) 管理方法に起因するもの
  - ・校正方法
  - ・経年変化
- (3) CMMの要因に起因するもの
  - ・ごみや磨耗等によるプロービングシステムの誤差
  - ・CMM本体の幾何学誤差

特に、温度は長さ測定に大きな影響を与えることがわかっています。そのため、温度変化が大きい現場環境で、測定する際に注意すべきことを検討していきます。

#### 2. 装置概要および設置環境

今回使用したCMMは門移動型であり、測定範囲(X軸, Y軸, Z軸)が850 mm×1000 mm×600 mmです。図1にCMMに設置した温度計と概略図を示します。この

CMMは、X軸のコラムの固定点が向かって右側にあり、X軸のスケールの固定点が向かって左側にあります。Y軸, Z軸は、コラムとスケールの固定点は、ほぼ同じ位置にあります。このような構造は、多くのCMMで見られます。測定中は、温度補正機能を使用しました。

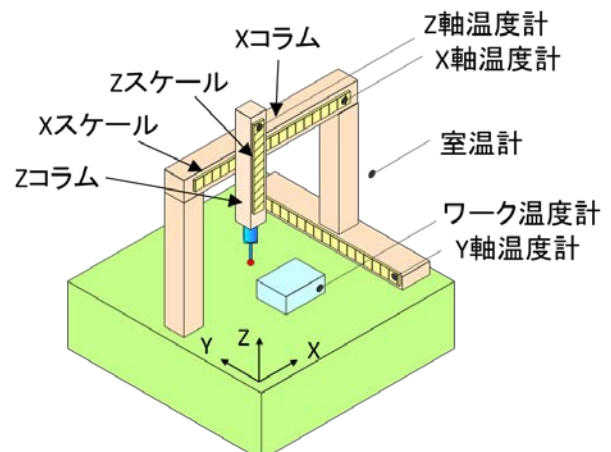


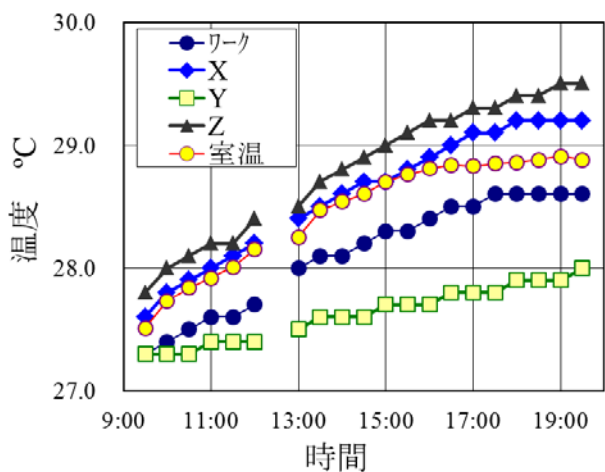
図1 温度計の設置箇所およびCMMの概略図

このCMMの設置環境は、部屋の大きさがおおよそ22 m×36 m×8 mで、空調がありません。温度計(精度: ±0.3 °C)は各軸のスケール上に1つずつ、測定定盤上の測定品上に1つ、室温測定用に1つの合計5つを配置しました。

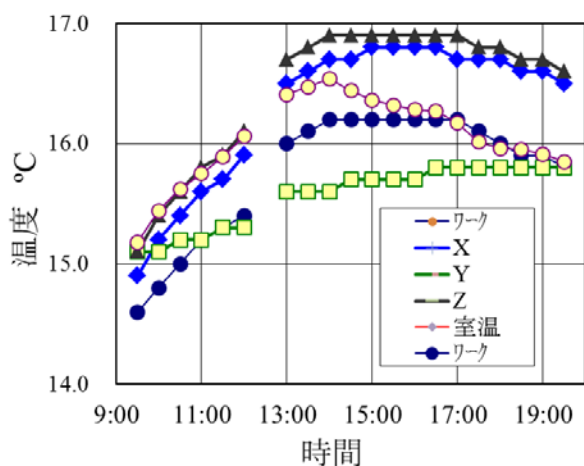
#### 3. 設置環境の温度変化

図2に、5か所の温度を、夏と冬の9:30

～19:30 で、30 分ごとに測定した結果を示します。測定定盤の近くに設置されている Y 軸の温度が低く、高い位置に設置されている Z 軸の温度が高くなっています。温度の分布は、夏は最大 1.6 °C、冬は 1.3 °C となっています。



(a) 夏の温度変化



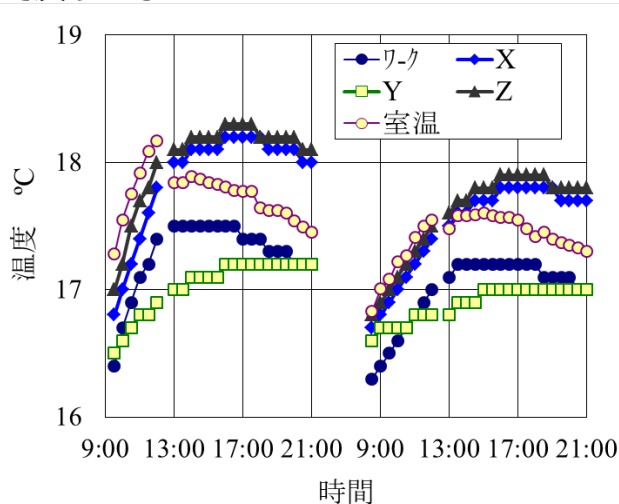
(b) 冬の温度変化

図 2 夏と冬の温度変化

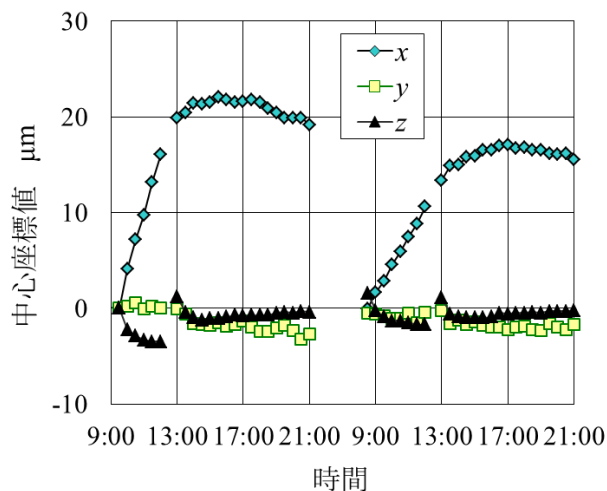
この結果から、温度コントロールされていない現場環境下では、時間がかかる測定になると、温度変化および温度分布の変化、温度変化が測定結果に与える影響が大きくなると予想されます。そこで、温度変化と測定値の変化の関係を調べました。

#### 4. 温度による座標値ドリフト

X コラムの固定点から 770 mm の測定定盤上に直径 25.4 mm の校正球を設置し、その校正球の中心座標 (x, y, z) を 30 分ごとに 2 日間測定しました。2 日間の温度変化と校正球の中心座標の変化を図 3 に示します。室温の変化に従って、校正球の x 座標が大きく変化しており、1 日で 20 μm 以上変化しました。y 座標、z 座標は、1 日で 2~3 μm ほど変化しました。また、翌日になるとすべての座標値が 0 μm 近くまで戻りました。



(a) 時間と温度変化の関係



(b) 時間と中心座標の変化

図 3 温度変化と校正球の中心座標の時間系列変化

座標値の変化の大きかったX軸について、X コラムの伸縮変化に関して電気マイクロメータを用いて測定し、そのときの温度の変化と比較しました（図4）。この図からコラムの伸縮と温度変化に高い相関があることが分かります。

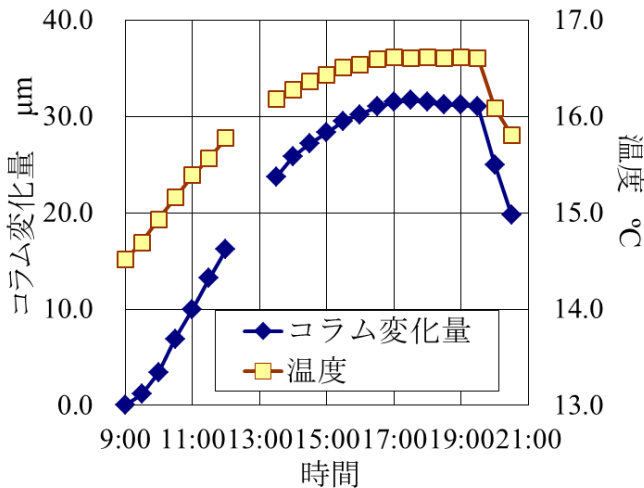


図4 コラムの伸縮変化と温度変化の関係

そこで、X 座標値のドリフトを以下のようにモデル化し、理論値を計算しました。詳細は Appendix に示します。

$$(X \text{ 座標変化量}) = (X \text{ コラムの熱膨張}) - (X \text{ 軸のスケールの熱膨張}) - (\text{定盤の熱膨張})$$

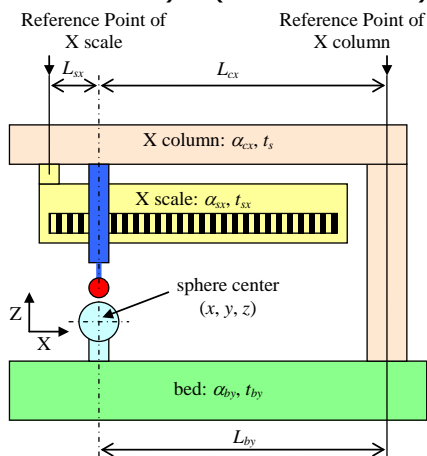


図5 X 座標値ドリフトのモデル

実際の座標値ドリフトの結果とモデルを用いた理論値を示します。

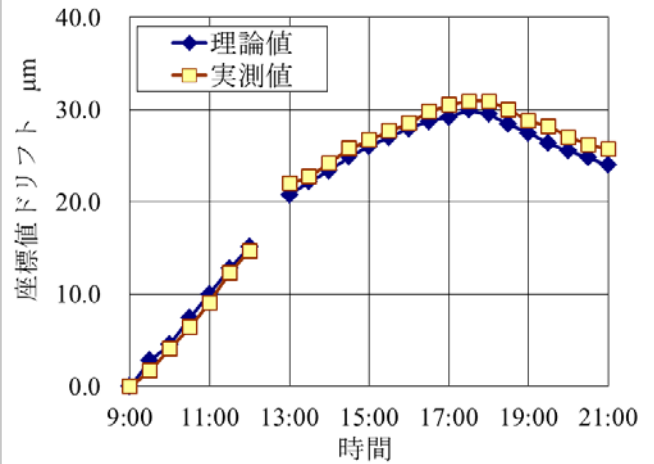


図6 温度ドリフトの実測値と理論値

実際の座標値ドリフトと理論値の差は、2 μm 以内となっており、熱膨張モデルからの理論値は妥当であると考えられます。

このことは、時間がかかる測定で、最初にワーク座標原点を決定し、そのまま原点を取り直さずに測定を続けると、座標原点が温度変化に従ってドリフトし、測定結果に大きな影響が出る、ということを示しています。測定温度から温度による座標値ドリフトの補正をすることが重要であることが分かりました。

## 5. まとめ

- ・温度変化、座標値ドリフトの測定を実施し、モデル化することができ、妥当性を確認することができました。

- ・現場環境に設置されている CMM での長時間の測定においては、温度変化および温度分布の変化による座標値のドリフトが測定結果に影響を与えることが確認できました。使用している CMM に同様の座標値ドリフトが発生するか、確認するのがよいでしょう。

教訓

・温度コントロールされていない一般の工場では、始業後急激な温度変化があります。そのため、温度変化が大きい午前中は、測定のためのセッティングやプログラムなどの測定準備を行い、温度変化の少ない午後に測定を実施したほうが望ましいです。

・温度変化による座標値ドリフトが大きい場合には以下の工夫を行うとより良い測定が出来ると考えられます。

(1) 測定サイクルを短くし、測定時間を短縮する。

(2) 温度変化を減らすためにCMMをビニールテントで囲う。

(3) 温度による座標値ドリフトの補正を測定のプログラムに組み込む。

ここで、記号を以下のように定義します。

$L_{cx}$  : X軸の基準点から校正球のXスケールの読み位置までの距離

$L_{sx}$  : Xスケールの基準点からXスケールの読み位置までの距離

$L_{by}$  : X軸の基準点から校正球までの距離

$\alpha_{cx}$  : Xコラムの熱膨張係数

$\alpha_{sx}$  : Xスケールの熱膨張係数

$\alpha_{by}$  : 定盤の熱膨張係数

$dt_{cx}$  : Xコラムの温度変化

$dt_{sx}$  : Xスケールの温度変化

$dt_{by}$  : 定盤の温度変化

校正球の位置関係から  $L_{cx} = L_{by} = 770$  mm,  $L_{sx} = 260$  mm, それぞれの熱膨張係数は  $\alpha_{cx} = 23.0 * 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{sx} = 10.4 * 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_{by} = 5.0 * 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , 温度は各軸スケールの温度計の値としました。

Appendix

式(1)にモデルの温度ドリフト  $L_{drift-x}$  の関係式を示します。

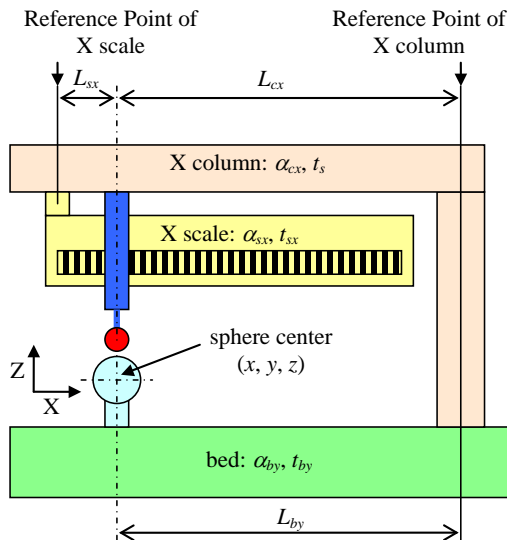


図7 X座標値ドリフトのモデル (再掲)

$$L_{drift-x} = L_{cx}\alpha_{cx}dt_{cx} - L_{sx}\alpha_{sx}dt_{sx} - L_{by}\alpha_{by}dt_{by} \dots (1)$$

## 第7章 ゆっくり做う方が良さそう

### スキャニング測定における測定値への影響の検証 測定条件の違いによる影響は意外と大きい

(地独) 鳥取県産業技術センター 木村勝典

#### 1. はじめに

三次元測定機（以下 CMM）の測定は、測定的高速化という要求を反映して、従来からのポイント（離散的な点）測定から連続的なスキャニング（倣い）測定へと変わりつつあります。特に、自由曲面の測定では、このスキャニング測定が多く利用されています。これらスキャニング測定における測定の信頼性を確保することは重要ですが、プロービングシステムの特徴、測定圧、測定速度、及び測定対象物の表面性状等の測定条件により測定結果が安定しないという現象は知られているところです。

そこで、測定条件の違いによるスキャニング測定結果への影響について検証しました。

#### 2. 検証方法

図1に示す CMM を用いてスキャニング測定を行いました。評価項目は、図2に示す、 $\Phi 30$  mm のピンゲージの外径と真円度、 $\Phi 30$  mm のリングゲージの内径と真円度とし、測定点数を 1000 点として測定を行いました。検証項目は、直径値の校正値からの差と、真円度としました。使用した各ゲージの真円度は、真円度測定機による測定では  $0.3 \mu\text{m}$ 、 $0.1 \mu\text{m}$  でした。スキャニング測定範囲、スキャニング速度、スタイラスの剛性の影響について検証しました。



図1 CMM (UPMC550CARAT)



外径用ゲージ

(呼び寸法  $\Phi 30$  mm)



内径用ゲージ

(呼び寸法  $\Phi 30$  mm)

図2 測定対象物

#### 3. 実験結果と考察

##### 3. 1 スキャニング測定範囲

###### 1) 実験と結果

円測定の場合、スキャニング測定範囲は  $360^\circ$  を超えるように設定して測定する事が一般的です。ここでは、表1の測定条件で、スキャニング範囲が  $360^\circ$  と  $450^\circ$  の場合、測定結果に差が出るかを検証しました。

結果を図3に示します。



表1 測定条件

スタイラス	Φ3 mm L: 45 mm
測定圧	100 mN
測定範囲	360°, 450°
測定速度	1, 3, 6, 10 mm/sec

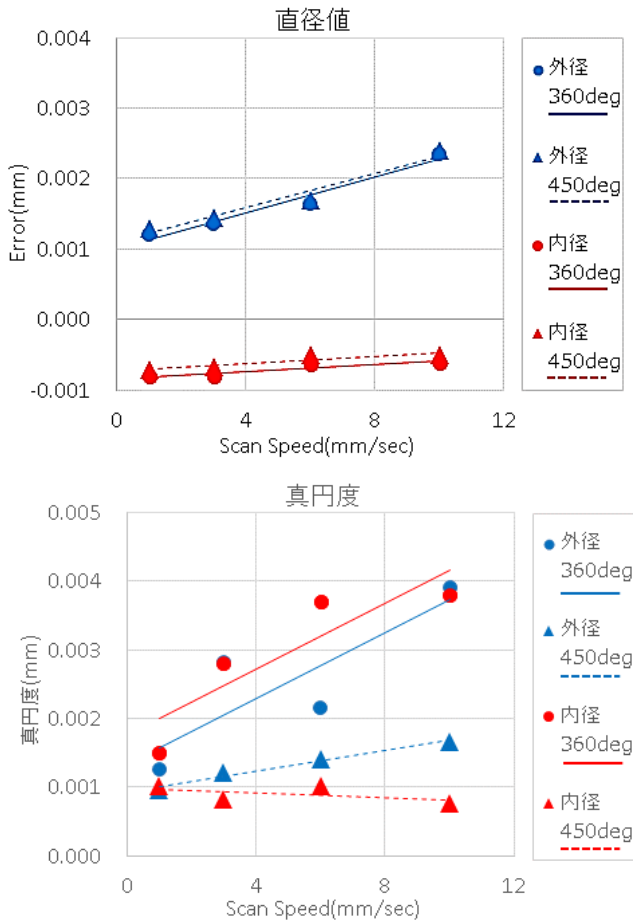


図3 測定範囲による違い

直径測定結果は、測定範囲による違いはありませんでしたが、速度と共に誤差が大きくなりました。一方、真円度測定結果は、測定範囲 360°の場合のほうが、450°より大きな値となり、測定速度の増加と共に大きくなりました。

## 2) 考察

実際に測定した波形の中で差異の大きかった 0-90°の範囲の波形を図 4, 5 に示します。

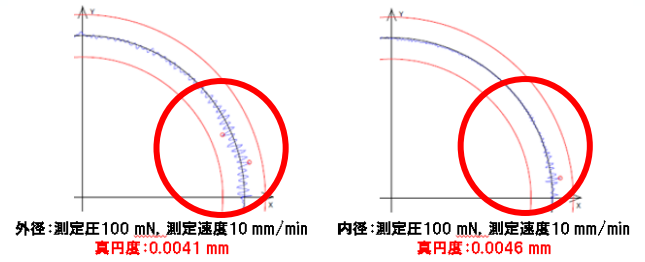


図4 360°スキャン測定波形

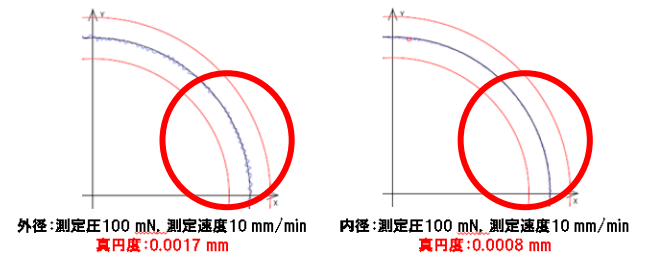


図5 450°スキャン測定波形

360°測定では測定開始点直後の赤丸範囲の波形が乱れていることがわかります。測定開始時にスタイラスが測定対象物に接触して静止した状態からスキャン測定に移る際、加速度による装置の不安定性が影響していると考えられます。450°測定では乱れを含む測定開始直後の波形データはソフトウェア上で処理されるので、本来の形状に近い測定を行う事ができるようになりました。

## 3. 2 測定速度

### 1) 実験と結果

測定速度を変えた際の測定結果を比較しました。表 2 のように測定速度を変えた場合の測定結果を、図 6, 7 に示します。ここでは、ポイント測定の結果を速度 0 mm/sec のところにプロットしています。測定圧 100, 150, 200 mN の場合の結果を示しました。

測定速度を上げていくと、ある速度から直径測定誤差、真円度ともに大きくなっていくことがわかりました。今回の測定条件では、10 mm/sec を超えた辺りからその傾向と

なることを確認しました。また、測定速度が遅い場合、ポイント測定結果との差は1  $\mu\text{m}$  以内でした。この結果は、測定圧を変えてもほとんど変わらず、最も大きな差でも1  $\mu\text{m}$  未満であり、通常の測定では無視できる大きさでした。測定圧は、測定時の測定結果に影響しないことがわかりました。

表2 測定条件

スタイラス	$\Phi 3\text{ mm}$ L: 45 mm
測定速度	1, 3, 6, 10~20 mm/s
校正時測定圧	100, 150, 200 mN
測定範囲	450°

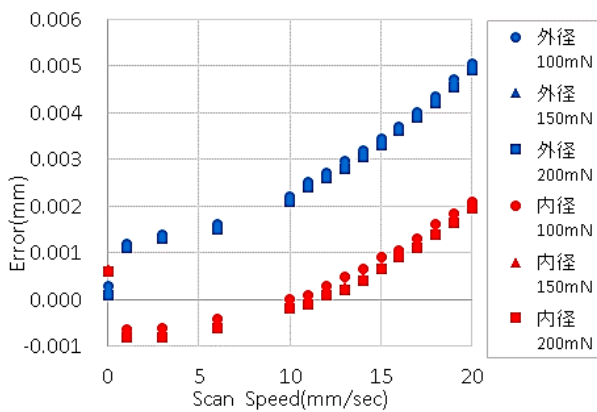


図6 測定圧と測定速度の違いによる直径校正値との差

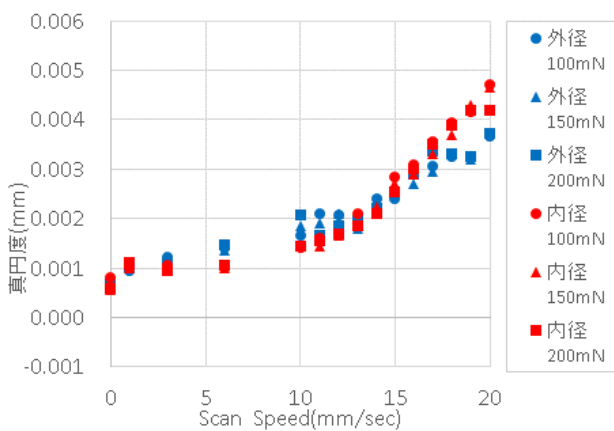


図7 測定圧と測定速度の違いによる真円度測定結果の差

## 2) 考察

測定速度がある速度を超えると、測定誤差が大きくなることがわかりました。事前に適切な測定速度を検討しておくことが必要だということがわかります。

一方、測定圧を変えてもほとんど影響がなかったのは、校正時の測定圧に関わらずそれぞれの測定圧とたわみ量との関係特性を把握し差異が生じないように、ソフトウェア側で反映しているためであると考えられます。

## 3. 3 スタイラスの剛性

### 1) 実験と結果

剛性の異なる2つ ( $\Phi 3$ ,  $\Phi 5\text{ mm}$ ) のスタイラスによる測定結果を比較しました。

たわみ量を SolidworksSimulation で計算し、2つのたわみと同じになる測定圧 (図8の赤枠部分) に設定し、内径測定を行いました。測定速度を変えて同じ実験を繰り返しました。測定結果を図9, 10 に示します。

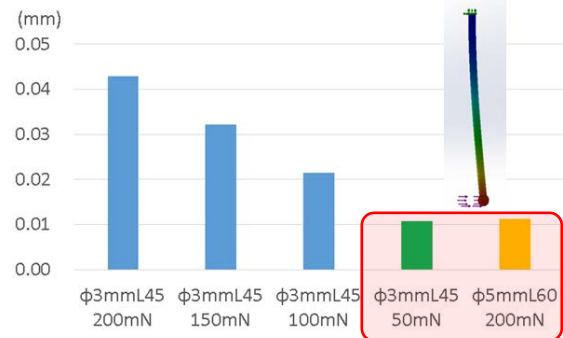


図8 測定圧の違いによるたわみ量

### 2) 考察

静荷重の状態において計算上は同じたわみ量であっても、スキヤニング測定の場合には剛性の高いスタイラスの方が測定誤差が小さくなりました。スタイラスの剛性が高い方がスキヤニング時の測定物との接触の状態が安定していることから良好な結果であ

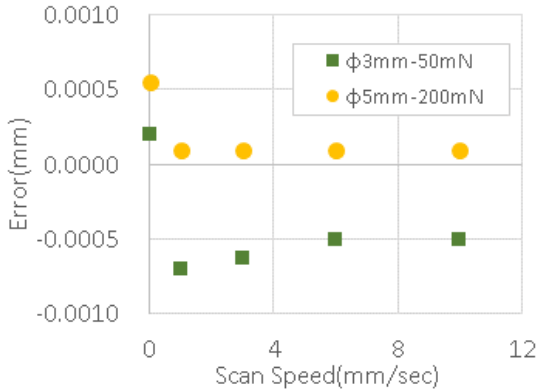


図9 内径測定の内径校正値との差

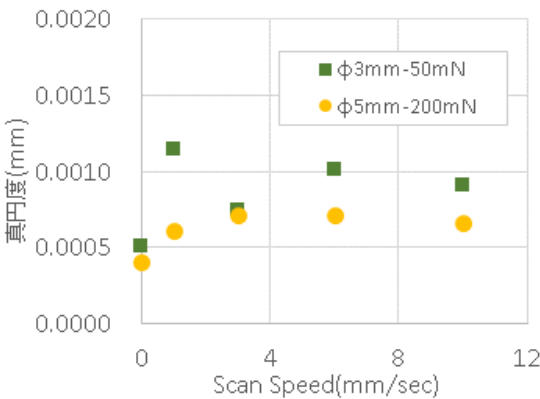


図10 内径測定の内径測定結果の差

ったと考えられます。

測定速度とスタイラスの剛性がスタイラスと測定物の接触状態に与える影響を調べるため、測定対象物を固定している治具に動力計を取り付け、測定圧の測定を行いました。測定条件は差異を把握するため、表3に示すように大きく差を付けました。図11に測定時の状態、図12に測定結果を示します。

表3 測定条件

スタイラス	φ8 mm	φ3 mm
測定圧	200 mN	100 mN
測定範囲	450°	
測定速度	3 mm/s	15 mm/s

図12から剛性と測定圧が高く測定速度が遅い測定では測定中の変動はほとんど無く安定していること、逆に剛性と測定圧が低く測定速度を速くした場合には測定中の測定



図11 測定圧測定時セッティング状態

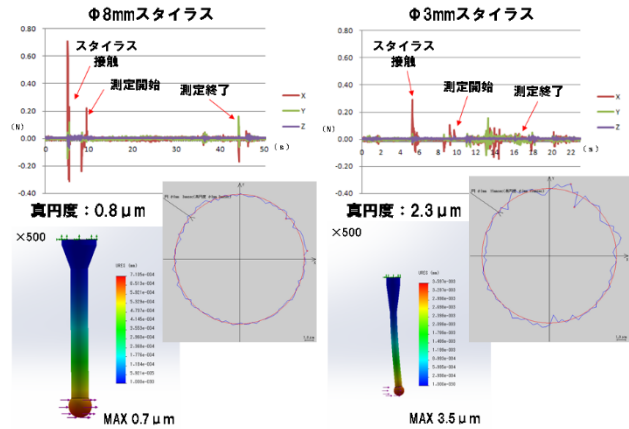


図12 スキヤニング時測定圧測定結果

圧の変動が不安定かつ大きくなる箇所が発生することが確認出来ました。

### 教訓

今回行った実験から、スキヤニング測定を行う際は測定開始時の測定波形の乱れを除去するため、測定範囲を450°程度確保することの有効性が確認出来ました。

また、測定時における測定圧の測定値への影響はほとんど無い事もわかりました。

測定値に最も影響が大きかったのは測定速度であること、スタイラスの剛性は高い方が結果は良好になることも確認できました。

- ・ スキヤニング測定速度には適切な範囲が存在します。
- ・ 出来るだけ剛性の高いスタイラスで測定する方が良いでしょう。

使用する CMM とスタイラスの組み合わせによる測定値への影響を事前に把握しておきましょう。

## **CMMの都市伝説 第2部**

発行者 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  
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第三  
国立研究開発法人産業技術総合研究所 工学計測標準研究部門  
幾何標準研究グループ内 形状計測研究会事務局

発行日 平成28年12月1日

本冊子「CMMの都市伝説 第2部」の著作権は、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(以下、「当研究会」とする)にあります。

- ・本冊子の全部または一部について、当研究会に無断で改変・複製・転載等を行うことを禁止します。
- ・引用等を行う場合は、冊子名および研究会名を明示してください。
- ・本冊子の全部または一部の、営利目的での使用を禁止します。

使用許諾、ご不明な点につきましては、形状計測研究会事務局 までお問い合わせください。

(執筆者の所属は、執筆当時のものです。)