

都市伝説の

3

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



@Marina

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 高くてもいいの	2
第3章 気をつけて触って	6
第4章 こんなヤワな私で大丈夫？	10
第5章 太ったり痩せたりするの	14
第6章 見方によって変わります	18

第1章 はじめに

「CMMの都市伝説」第3部をお届けします。

この冊子は、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たものです。

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。協力頂いた方々へこの場を借りてお礼申し上げます。

CMMは接触式から、光学式、そしてX線CTへと大きな技術進歩を遂げつつあります。第3部では初めて光学式を取り上げました。

今後も産業界で役に立つ幅広いテーマについて検証していきたいと思います。

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
計量標準総合センター（NMIJ）
工学計測標準研究部門
幾何標準研究グループ

第2章 高くてもいいの

ワークの設置高さによる影響について

京都府中小企業技術センター 前田一輝

1. はじめに

一昔前の教科書には、「CMMは精密測定を行う装置の中では、測定精度があまり良くありません。その理由の一つに軸の直角度、運動の真直度、各軸方向の角度姿勢の誤差があります。CMMは本質的にアッペの原理を満足しておらず、角度姿勢の誤差の小さい範囲で測定を行うことが重要です。」と記載されており、今でも測定を行う場所で精度が異なると言われてています。

通常、CMMを使用して計測するときには、測定者は一番見やすく、測定を行いやすい場所に測定ワークを置き測定しています。測定ワークの設置位置に関しては、CMMの都市伝説「ワークの設置位置と方位の影響」で「ワークはどこに設置してもCMMの最大指示誤差以内の精度で測定できる」ことが検証されていますが、今回は測定時の高さ方向の検証を行いました。

2. 検証内容

2.1 装置概要

使用したCMMとスタイラス（図1）及び装置の仕様（表1）を次に示します。

装置は平成24年（2012年）に設置し、年1回定期的に校正を受けています。

2.2 実験方法

実験ではCMMの定盤の中心に測定ワー



図1 使用したCMM

表1

メーカー名	Hexagon Metrology GmbH
型式	Leitz PMM-C 12.10.7
形式	固定ブリッジ形
測定範囲	X=1,200 mm, Y=1,000 mm Z=700 mm
測定精度	最大許容指示誤差 $MPE_E = 0.6 + L/800 \mu\text{m}$ 〔L: 測定長さ mm〕 最大許容プロービング誤差 $MPE_p = 0.6 \mu\text{m}$
測定圧	0.7N (Upper Force) 0.4N (Trigger Force)
プローブ	φ8 mm L=90 mm

クを設置し、高さ方向（Z方向）を変化させて測定しました。測定ワーク（図2）は、リングゲージ（φ100 mm）と校正値のわかっているブロックゲージ（100 mm から 500

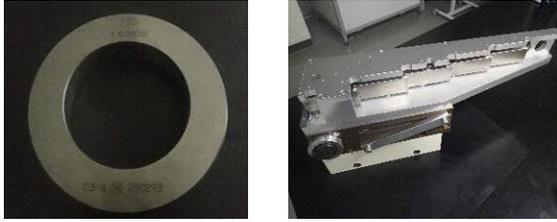


図2 測定ワーク

(左：リングゲージφ100 右：ブロックゲージホルダ)

mm) で、ブロックゲージはブロックゲージホルダに固定し、使用しました。

測定高さを変化させるために、がたつきが無く剛性が高い鋼製の架台を複数連結し、測定ワークを最上段に載せて測定を行いました。ブロックゲージは機械座標のX軸方向、Y軸方向に配置しました(図3)。測定時の写真を図4に示します。

測定は、まずスタイラスの校正を行い、測定機で使用している温度計を測定ワークに取り付けて温度補正を行い、3回ずつ測定して評価しました。

この時のワーク温度は 20.0 ~ 20.2 °C となっていました。

3 実験結果

3.1 リングゲージの測定結果

リングゲージの高さを変えて測定を行った結果を図5に示します。

内径は設置位置の高い方が小さい傾向になっていますが、その差は、最大 0.4 μm と非常に小さく、プロービング精度 0.6 μm より小さい数値となっています。真円度の差は最大 0.3 μm 程度であり、問題がある差ではありませんでした。

また、真円度の評価図で、外側の点線と内側の点線の範囲が公差域 1 μm を示しています。X軸方向、Y軸方向ともに大きな誤差が無く、架台によるたわみ等の影響は無いと

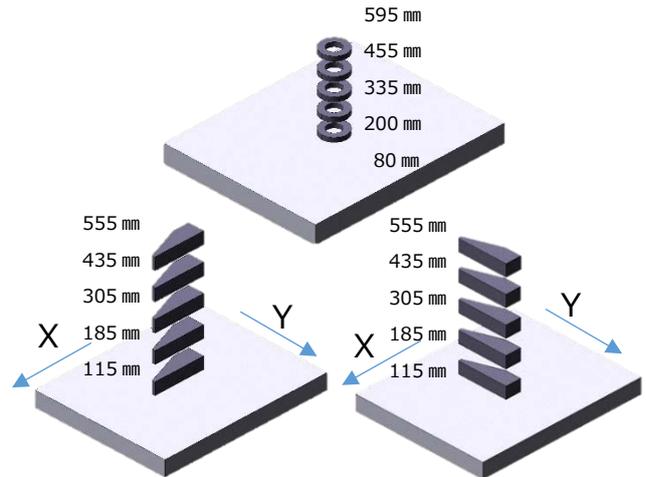
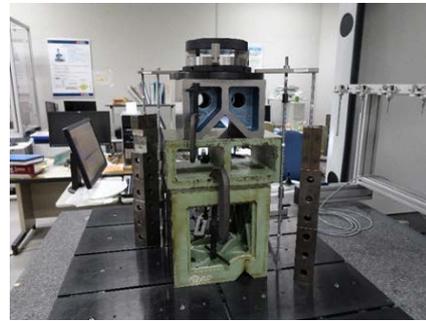
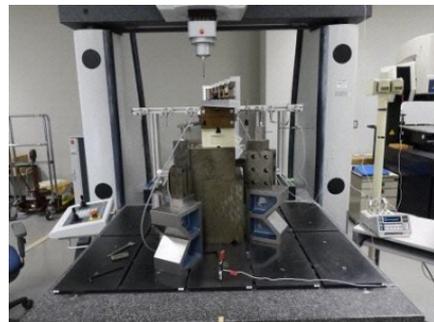


図3 測定ワーク設置位置



リングゲージ



ブロックゲージ X軸方向



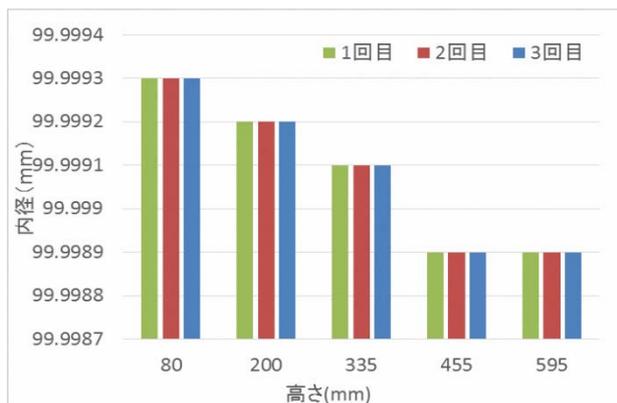
ブロックゲージ Y軸方向

図4 実験状況

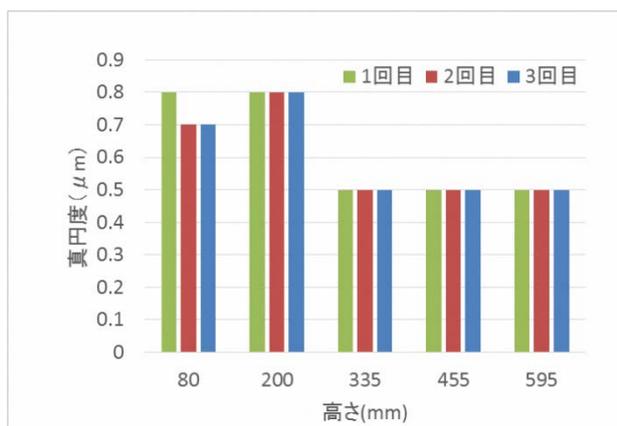
いえます。

3.2 ブロックゲージの測定結果

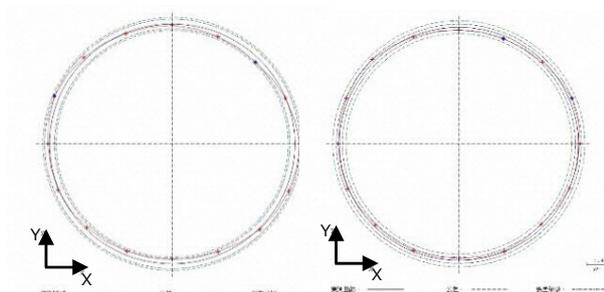
X軸方向, Y軸方向の結果を図6, 7に示します。ともに最大指示誤差域の範囲に入っていました。また, 高さを変えて測定した結果には, 大きな差は見受けられませんでした。



内径



真円度



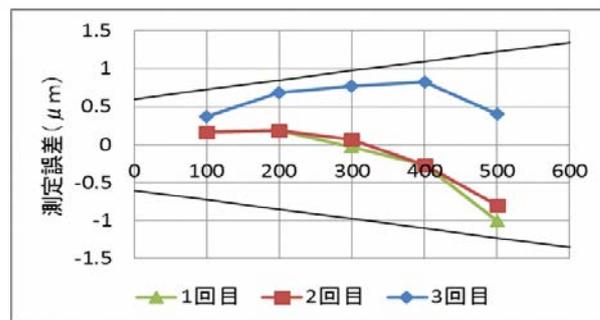
H=80 mm

公差域 1 μm
誤差倍率 5000 倍

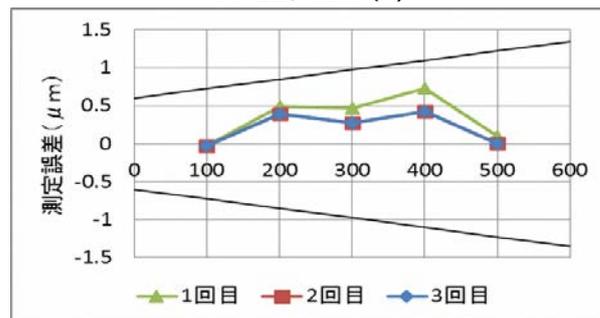
H=595 mm

真円度の評価図

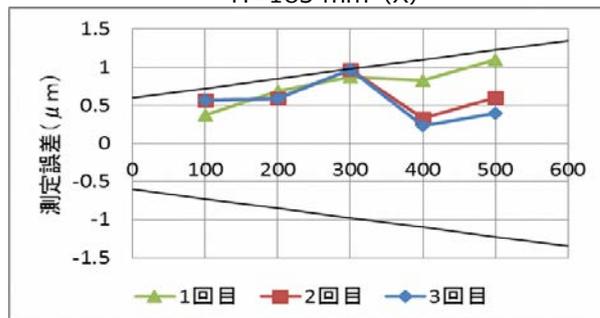
図5 リングゲージの測定結果



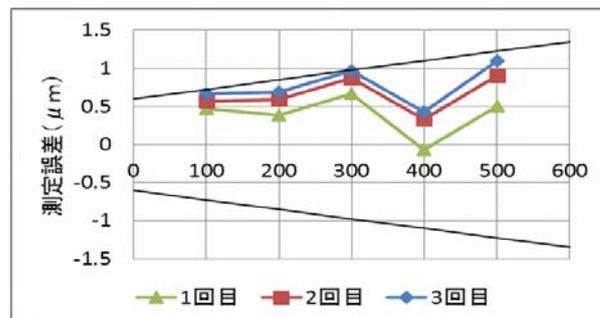
H=115 mm (X)



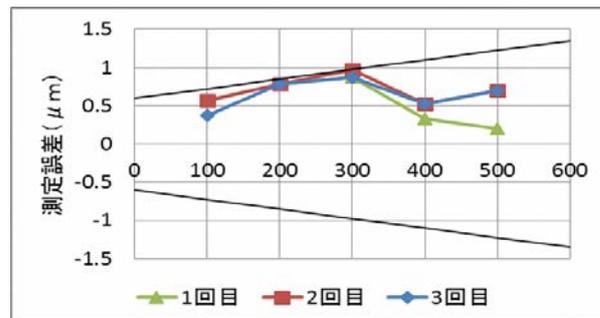
H=185 mm (X)



H=305 mm (X)



H=435 mm (X)



H=555 mm (X)

図6 ブロックゲージ (X軸方向) の測定結果

4 考察

現在の CMM では各軸の直角度や位置の誤差も含めて、合計 21 個の幾何学誤差の補正を行っているため、装置を適正に校正し管理を行っていれば、高さを変えて測定しても、特に問題はありません。

教訓

CMM で測定する際には、適切にメンテナンス、校正がされていれば、設置高さを含めてどの場所に測定ワークを設置しても、同様の測定結果となります。ただし、測定ワークは確実に定盤に固定することが必要です。

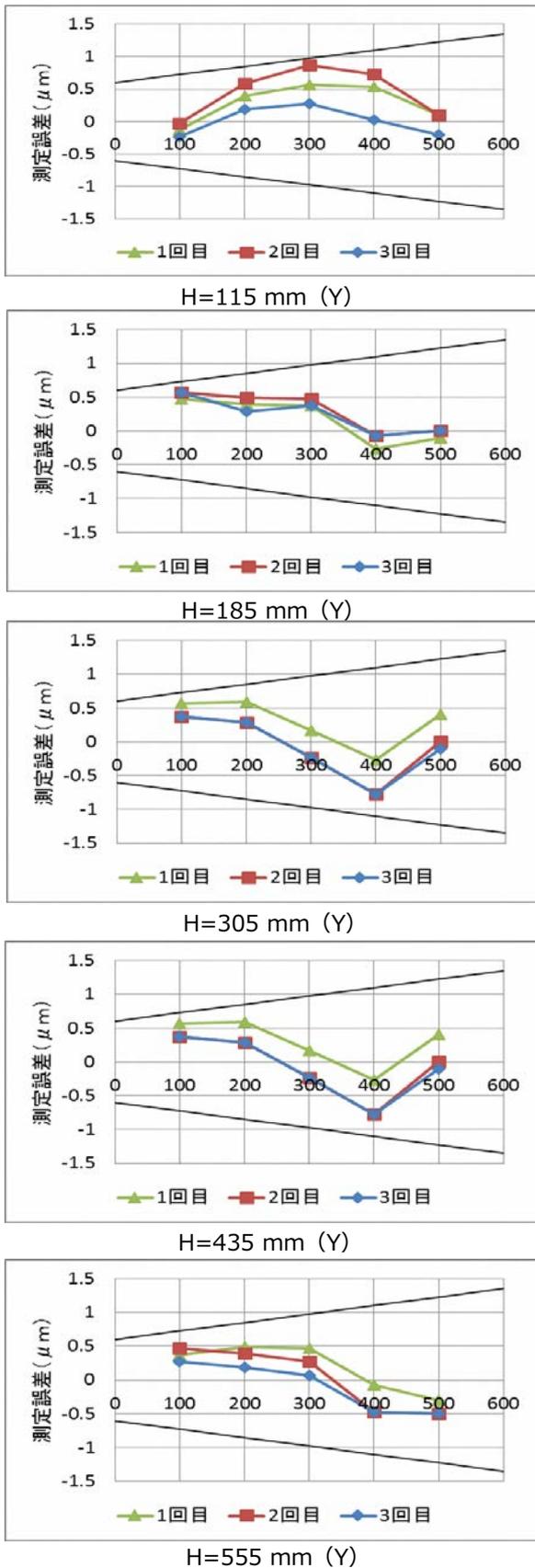


図7 ブロックゲージ (Y 軸方向) の測定結果

第3章 気をつけて触って

プロービング圧の変化による測定精度への影響

地方独立行政法人山口県産業技術センター 永田正道, 近藤拓郎

1. はじめに

接触式三次元測定機では、スタイラスと呼ばれる、先端にボールが付いた測定子を対象物に接触させ、その接触した位置から対象物の三次元形状を測定します。スタイラスを対象物に接触させる動作を、一般的にプロービングと呼びます。プロービングでは、スタイラスを対象に押し付けるので測定圧（以下、プロービング圧）が発生します。

プロービング圧は微小ではありますが、完全にゼロではないため、ゴムや銅のような柔らかい材質のものや、薄い板や細いピンなどの変形しやすい形状のものを測定する際には、その影響に注意を払う必要があります。この対策として、プロービング圧を変更可能としているCMMもあります。

「対象物の変形しやすいのなら、スタイラスを押し付ける力を小さくすれば良い」ということになるのですが、測定で押し付ける力を変えてしまって測定結果に影響はないのでしょうか？そこで、ここではプロービング圧を変化させた場合の測定精度への影響について、Leitz 製 CMM を用いて検証を行いました。

2. 検証方法

2. 1 CMM と使用スタイラス

使用した CMM の概要を表 1 に示します。

スタイラスには、プローブ直径とシャフト長さの組合せを名称とする、 $\phi 5-L60$ 、 $\phi 3-L50$ 、 $\phi 3-L35$ 、 $\phi 1.5-L28$ の 4 種類を使用し、各スタイラスでプロービング圧の変化の影響を検証しました。図 1 に使用したスタイラスを示しました。

表 1 CMM の概要

メーカー	Brown&Sharpe GmbH (旧 Leitz)
型式	PMM12106MG
測定範囲	1200×1000×600 mm (x 軸, y 軸, z 軸)
最大許容指示誤差	$MPE_E = 0.6 + L/600 \mu\text{m}$ ※L は測定長さ (mm)
プロービング精度	0.6 μm
測定力	0.01 N~0.5 N (可変)



図 1 使用スタイラス

2. 2 プロービングのプロセス

図 2 に使用した Leitz 製 CMM のプロービング動作のイメージを示します。まず、設定された“最大値”プロービング圧までスタイラスを押し込んだ後、押し込みを戻して徐々

にプロービング圧を減少させます。次にその際のプロービング圧の変化データから、設定された“上限値”及び“下限値”プロービング圧の範囲内で、時間に対するプロービング圧減少量の近似直線を求め、その近似直線と設定された“トリガー”プロービング圧との交点のデータを測定点として取得します。

以上のように、使用したCMMでは、4種類のプロービング圧の設定により、プロービング動作が制御されています。

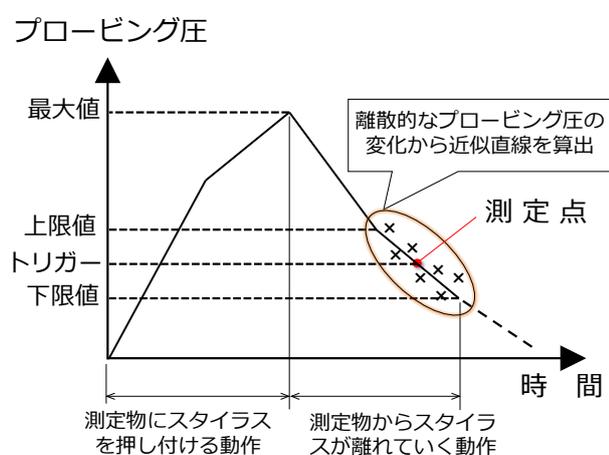


図2 プロービング動作

2.3 検証内容

図3に示すマスターボールの直径と真円度を、プロービング圧を変更して測定し、プロービング圧の影響を検証しました。測定に使用したLeitz製CMMとは別の装置の校正球を、マスターボールとして使用しました。

プロービングにおける最も単純な状態で検証するため、スタイラスを真下に1本突き出した状態で測定しました。この状態では、図4に示すようにプロービング時のスタイラスの挙動は、大きく2種類に分類することができます。1つはスタイラスの軸方向に沿って鉛直に対象物に押し付ける動きで、もう一方は軸方向と直交する方向に押し付け

て、スタイラスを水平にたわませる動きです。鉛直方向の測定では、マスターボールの頂点付近の1点測定を行い、マスターボールの半径を測定しました。また、水平方向の測定では、マスターボールの赤道付近の8点の円測定を行い、直径と真円度を測定しました(図5)。どの測定も、100回の繰返し測定を行い、平均値を求めました。

プロービング圧は、表2に示す4条件としました。条件(1)は通常使用している条件、条件(2)は、軟質素材や変形し易い形状の測定で使用されると思われる、“最大値”プロービング圧を下げた場合です。図2の関係から、プロービング圧の“上限値”-“下限値”の範囲を広げる、あるいは狭めることで近似曲線が変化し、測定データへの影響が表れることが予想されるので、使用した通常使用しているプロービング圧より、“上限値”を極端に上げた場合(条件(3))と下げた場合(条件(4))についても検証を行いました。

純粹にプロービング圧の変化による影響のみを検証するため、プロービング速度は一定としました。また、各測定はマスターボー

表2 プロービング圧の条件[N]

条件	最大値	上限値	下限値	トリガー
(1)	7.5	0.625	0.1	0.5
(2)	0.75	0.625	0.1	0.5
(3)	7.5	5.0	0.1	0.5
(4)	7.5	0.2	0.1	0.15



材質：セラミックス
直径：φ25.4300 mm
真球度：0.63 μm

図3 使用したマスターボール

ルの球中心を原点とする直交座標系を設定し、行いました。

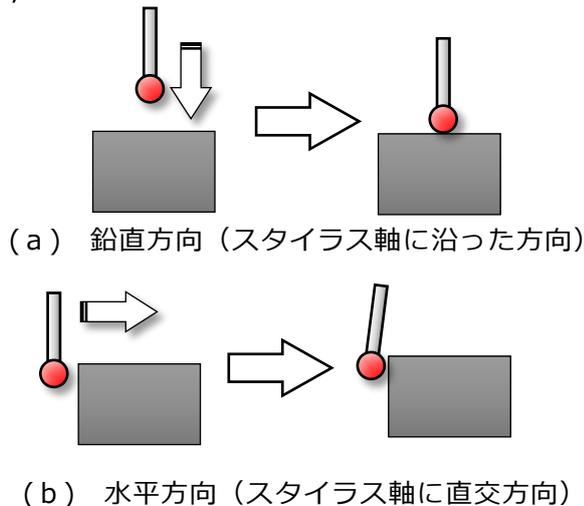


図4 プロービングでのスタイラス挙動

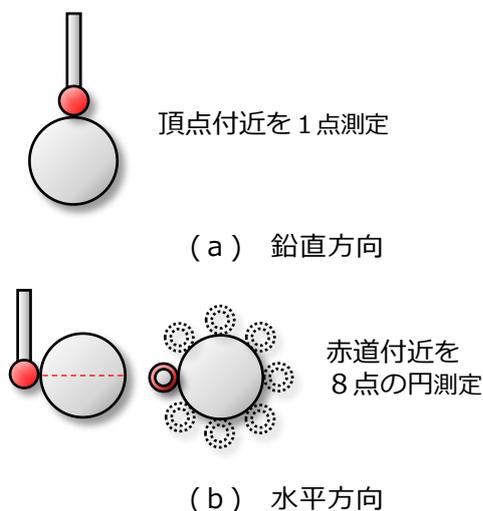


図5 検証での測定内容

3. 測定結果

表3に鉛直方向の測定結果を、表4及び表5に水平方向の測定結果を示します。表3は、測定値の、使用したマスターボールの半径(12.7150 mm)からの偏差、表4は、直径(25.4300 mm)からの偏差を示しています。

まず、各表の測定結果から、“最大値”プロービング圧を下げた条件(2)では、通常使用している条件(1)と、測定結果に大きな違いが見られないことが確認できました。

次に、表3及び表4より、表中に赤字で示した条件(3)のみ他条件との差が大きいたことが分かります。その差は鉛直方向、水平方向とも、最大3 μm程度でした。

条件(3)では、“上限値”-“下限値”の範囲を広げて“トリガー”を“下限値”の付近に設定しているため、時間に対するプロービング圧の減少がまだ直線的ではない範囲で、測定点の近似直線を求めることとなり、実際のプロービング圧の減少曲線との誤差が大きくなったと推測されます。

条件(4)では、測定結果が大きく出る傾向がありました。“トリガー”を低く設定したため、他の条件と比べてプロービング圧がより低い状態、すなわちスタイラスが測定物から離れたところが測定点となったためと考えられます。

表3 公称半径からの偏差(鉛直方向測定) [mm]

条件	φ5-L60	φ3-L50	φ3-L35	φ1.5-L28
(1)	-0.0004	-0.0006	-0.0003	-0.0005
(2)	-0.0004	-0.0006	-0.0004	-0.0002
(3)	-0.0018	-0.0029	-0.0011	-0.0008
(4)	-0.0005	+0.0002	+0.0001	+0.0004

表4 公称直径からの偏差(水平方向測定) [mm]

条件	φ5-L60	φ3-L50	φ3-L35	φ1.5-L28
(1)	+0.0001	-0.0002	-0.0003	-0.0002
(2)	0.0000	-0.0001	-0.0002	-0.0002
(3)	-0.0013	-0.0034	-0.0013	-0.0013
(4)	+0.0004	+0.0002	+0.0001	+0.0004

表5 真円度(水平方向測定) [mm]

条件	φ5-L60	φ3-L50	φ3-L35	φ1.5-L28
(1)	0.0007	0.0002	0.0003	0.0002
(2)	0.0007	0.0004	0.0003	0.0005
(3)	0.0024	0.0062	0.0027	0.0020
(4)	0.0003	0.0003	0.0002	0.0003

表3の測定結果は、マスターボール頂点付近の1点測定ですので、繰返し測定で頂点からの僅かな位置ずれによる誤差も含まれていると考えられ、チップ先端の曲率が大きくなると、よりその影響を受けるものと考えられます。

プロービング圧の条件変更による差が最も大きく出たφ3-L50について、真円度分布を比較した結果を図6に示します。円測定を行った8点の分布傾向は、条件(3)のみ極端な凹凸を示しました。このことから、“上限値”-“下限値”の範囲を広げているため、測定点を取得する近似直線と実際のプロービング圧の減少曲線との誤差が大きくなったことが原因と考えられます。

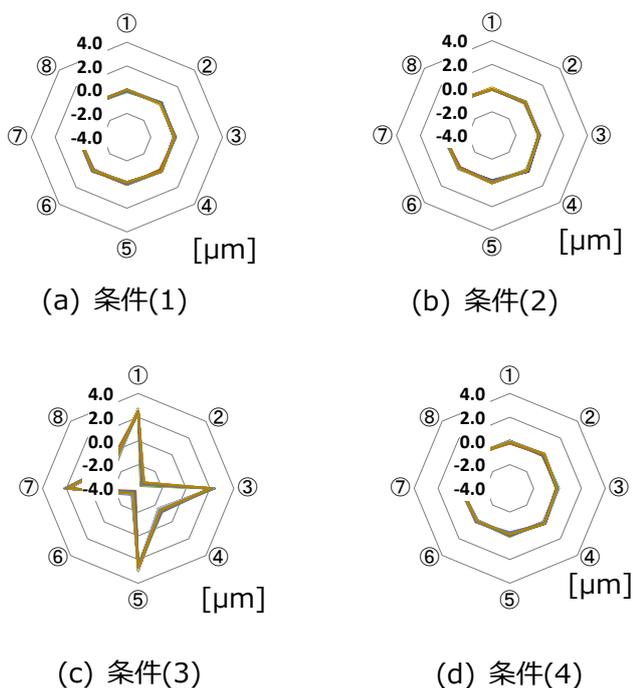


図6 真円度分布の比較 (φ3-L50)

4. 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。

最大値のみの変更であれば測定精度への影響は少なく、測定点の取得に関わる条件（上限値-下限値の範囲）を変更した場合に顕著な影響が現れます。設定によってはμm オーダーの誤差になるため、プロービング圧を変更する場合、測定物の要求精度に影響がない範囲で設定することが重要です。

CMMの機種によっては、軟質材の測定用として専用のプロービング圧の設定を持っている機種もあるため、それを活用することも重要です。

教訓

- ・ “最大値”プロービング圧を小さくしても、測定結果に影響はありません。
- ・ 測定点の算出に使用するデータ範囲(本検証では“上限値”, “下限値”)を変化させると、測定値に大きな誤差が出る場合があります。
- ・ 条件設定によってはμm オーダーの誤差になるため、μm 精度が要求される測定の場合は注意が必要です。

第4章 こんなヤワな私で大丈夫？

スタイラスシステムの剛性と測定精度との関係

あいち産業科学技術総合センター 産業技術センター 島津達哉

1. はじめに

CMM の測定精度は、JIS B 7440-2 に CMM の性能評価として規格化されていますが、その値は測定機メーカーの指定する特定の条件下で、基準スタイラスのような十分に剛性の高いスタイラス使用時に適応される値で、CMM を用いた測定全体の精度を保証するものではありません。実際の測定では、測定者が測定課題に応じて大小様々なスタイラスや、スタイラスエクステンションなど付属の治具を選択し組み付けたスタイラスシステムを用います(図 1)。

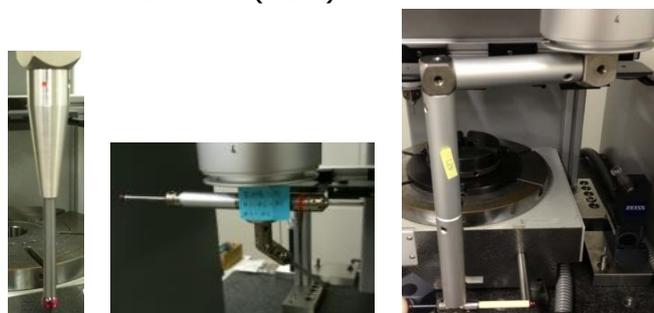


図 1 基準スタイラス(左)と
測定用スタイラスシステム(中央, 右)

剛性が低いスタイラスシステムを用いて測定を行うと、その測定精度は必ずしもカタログスペック通りに保たれているとは限りません。本章では、ソフトウェア Calypso において、プローブ校正時に得られる剛性値 G を、実際の測定に使用するスタイラスシステムの妥当性を評価する指標にできないか

検証しました。

2. 実験内容

2. 1 装置概要

実験に使用した CMM は Carl Zeiss 社製 UPMC 550 CARAT (図 2) , 門移動型, 測定精度は導入当時の規格 (VDI2617) で、 $U_3=0.8+L/600 \mu\text{m}$ (L mm:測定長さ) です。温度 $20\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 湿度 $50\pm 5 \%$ に制御された恒温恒湿のクリーンルームに設置されています。



図 2 CMM 外観

導入自体は 1992 年ですが、2009 年にレトロフィットを行い、常時 3 軸力検出のプロービングシステムに交換したことによって、プロービング方向によって測定精度が悪化する不具合が解消され、スキャニング精度も向上しました。

2.2 剛性値 G

Carl Zeiss 社製 CMM 等で使用されているソフトウェア Calypso では、プローブ校正において、スタイラスチップ径や標準偏差とともに剛性値 G が得られます(図 3)。

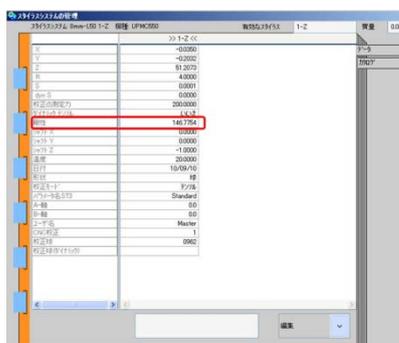


図 3 プローブ校正結果画面(Calypso)

G はスタイラス先端のルビー球をワークに接触させる際、計算上、スタイラスを 1 m たわませるのに必要な力を表します。複数のスタイラスで構成されるスタイラスシステムにおいても、1 本 1 本のスタイラスについて剛性値 G が得られます。

2.3 プロービング誤差 P

CMM の性能を評価する代表的な指標の 1 つに最大許容プロービング誤差 MPE_p があります。 MPE_p は CMM の受入検査・定期検査におけるプロービング誤差 P の限界値と定義されています($P \leq MPE_p$)。検査用標準球の少なくとも半球上にほぼ均一に分布した任意の 25 点(図 4)を測定し、得られた測定結果から最小二乗球の中心を計算します。

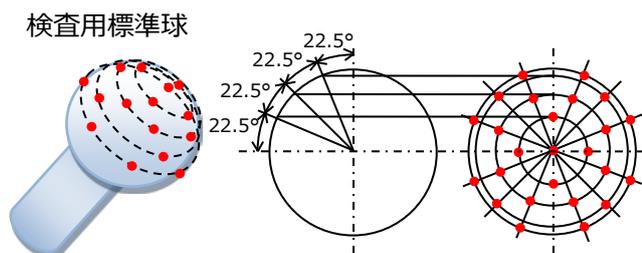


図 4 プロービング目標点 (25 点)

この球中心位置から各測定点までの距離 R を計算したときの、 R の最大値 R_{Max} と最小値 R_{Min} の差が P です。

2.4 実験方法

様々な剛性値 G をもつ スタイラスシステムを用いて検査用基準球を測定し、それぞれスタイラスでのプロービング誤差 P を求めました。基準スタイラスにおける剛性値とプロービング誤差(G_s , P_s)と比較することにより、剛性値と測定精度の関係性を検証しました。

図 5 に示す、『D8 短』、『D8 長』、『D3 短』、『D3 長』、『D0.8』5 種類のスタイラスを実験に用いました。

名称	球径 [mm]	シャフト長 [mm]	シャフト径 [mm]
D8短	8.0	50	6.0
D8長	8.0	100	6.0
D3短	3.0	25	2.0
D3長	3.0	50	2.0
D0.8	0.8	15	0.5/1.0



図 5 測定用スタイラス

また、上記スタイラスを『Z 方向』組み付ける場合(図 6 左)と、『X 方向』に組み付ける場合(図 6 右)の 2 種類の組み付け姿勢で実験しました。



図6 組み付け姿勢 (写真は『D8短』)

更にはそれぞれのスタイラスに材種の異なる『スタイラスエクステンション』を組み付ける場合(図7)等, 様々なスタイラスシステムを実験に用いました。

名称(材質)	長さ[mm]	外径[mm]
アルミ	60,100,120	11
スチール	100	
炭素繊維	100,150,200	



図7 スタイラスエクステンション
(写真は長さ 100mm)

1例として, スタイラス『D8短』+『スタイラスエクステンション』(スチール製, 150mm)+姿勢『X方向』で構成されたスタイラスシステムを図8に示します。



図8 実験に用いたスタイラスシステムの例

P を求めるために使用する検査用基準球は, プローブ校正を行うために使用する校正球とは異なります。本実験では, 半径 15.0002 ± 0.00015 mm と値付けされた

検査用基準球を使用しました。また, 前節で説明した任意の 25 点に, より細分化した点を付加した合計 57 点をプロービング目標点としました。

加えて本実験では, 最小二乗球を計算する際, 半径を 15.0002 mm と固定して求めました。これは JIS に定義されているプロービング誤差 P の求め方とは厳密には異なりますので, これ以降, 本実験で求めたプロービング誤差を P' と表現します。

3. 実験結果

実験に用いた各スタイラスシステムの剛性値 G と, それぞれのプロービング誤差 P' を図9に示します。基準スタイラスの剛性値とプロービング誤差は, $G_s=96$ N/mm, $P'_s=0.4$ μ m でした。

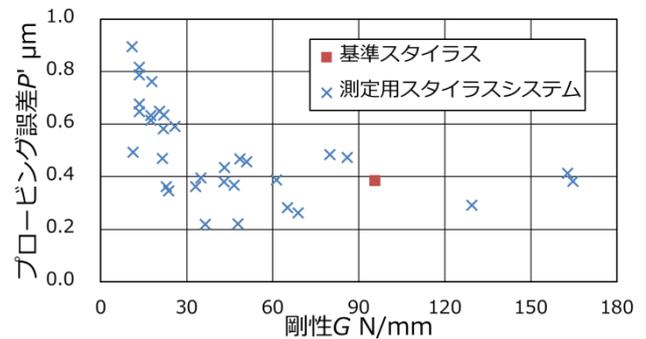


図9 G と P' の関係

スタイラス『D8短』, 『D8長』, 『D3短』を単独で用いた姿勢『Z方向』において, それぞれの剛性値 G は, 129, 65, 69 N/mm で, それぞれのプロービング誤差 P' は, 0.3 μ m でした。これらのスタイラスについては, 測定精度が維持できているといえます。

一方, スタイラス『D3長』+『スタイラスエクステンション』(炭素繊維製, 100mm)+姿勢『X方向』で構成されたスタイラスシステムの場合では, $G=11$ N/mm,

$P'=0.9\ \mu\text{m}$ となり、測定精度が悪化しました。

4. 考察

G が基準スタイラスを上回るような剛性の高いスタイラスシステムを用いた場合、 P' は $0.3\ \mu\text{m}$ となり、精度よく測定できることがわかりました。

また、 G の値が基準スタイラスより小さい、剛性の低いスタイラスシステムを用いた場合でも、 G が G_S の $1/3$ 程度までは $P=0.5\ \mu\text{m}$ 程度で、測定精度が維持できていると考えられます。

しかし、 G が G_S の $1/3$ を下回るほど剛性の低いスタイラスシステムを用いると、 P' が増大していく傾向が認められ、測定精度が維持できなくなっていることがわかりました。

これらの結果から、剛性値 G と、スタイラスシステムの測定精度には関連があり、 G をスタイラスシステムの妥当性を評価する指標とできるとわかりました。

教訓

・ソフトウェア Calypso を使用している CMMにおいて、剛性値 G に着目することで、スタイラスシステムの信頼性を評価できます。

・測定に使用するスタイラスの G が、基準スタイラスの G の $1/3$ 以上の値であれば、カタログスペックの測定精度が確保できると判断できます。

・ G を評価値として用いることで、自作のアダプタ(図 1 0)等を使用してスタイラスシステムを構成する際の妥当性が判断できます。

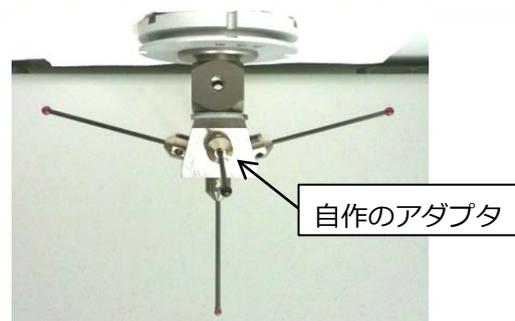


図 1 0 自作のアダプタを組み込んだ
スタイラスシステム

第5章 太ったり痩せたりするの 画像測定機の照明光量と形状測定値の関係

国立研究開発法人産業技術総合研究所 鍛島 麻理子

1. はじめに

「画像測定機」は、タッチプローブの代わりに顕微鏡を搭載し、画像解析によって形状計測を行う三次元測定機です。非接触で高精度な形状測定を行うことができるため、半導体、液晶パネル産業から、部品製造等まで、多くの分野で利用されています。

画像測定機は顕微鏡を利用するため、照明光の光量が強すぎたり弱すぎたりすることによって、物体の形状測定値(幅や直径)が変わって見え、これが測定誤差になると考えられますが、「幅を $0.1 \mu\text{m}$ の精度で測りたい」といった高度な相談を受けることが良くあります。しかし、多くのメーカーの画像測定機では、直径や幅を測定する際の測定精度は保証していないのが現状です。

そこで、照明条件によって形状測定結果がどのように変化するのか、検証することにしました。また、測定機メーカーが推奨する光量設定がありますが、その光量が「最適」なのか、その光量での形状測定値は正しい測定値なのか、検証することにしました。

2. 実験の概要

2.1 実験方法

試料として、線パターンと円パターンが成膜されたフォトマスクを使用し、その幅と直径を、照明光量と照明の向きを変えて測定し、

公称値と比較しました。ガラス基板に、 $100 \text{ nm} \sim 200 \text{ nm}$ 程度の厚さのクロム等の金属膜で微細パターンを成膜したフォトマスクは、膜の厚みが薄いので、幅や直径を測定する対象としては理想的な試料です。

2.2 測定機

測定は、Hyper QV-WLI 404 (ミットヨ) を用いて行いました(図 1)。測定精度の仕様は、 $E_{1x,y} = (0.8 + 2L/1000) \mu\text{m}$ です。この測定機には、白色干渉モードもありますが、今回は画像測定モードを使用して測定しました。

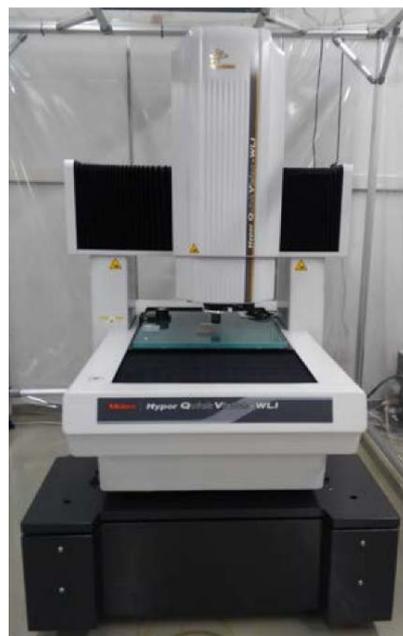


図 1 Hyper QV-WLI

3. 線パターンの幅測定

3.1 線幅パターンマスク

今回使用した線幅パターンマスクは、合成石英基板にクロム単層膜を成膜したもので、凹形状の線パターンを成膜したものと、凸形状の線パターンを成膜したものの 2 枚を用意しました(図 2)。それぞれのフォトマスクの、公称幅 50 μm の線パターンの幅を測定しました。

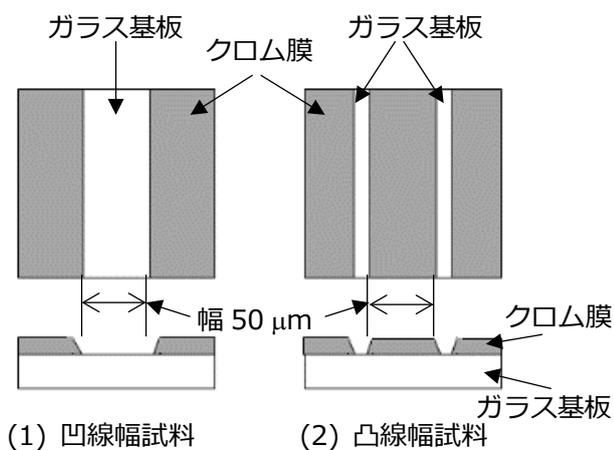


図 2 線パターンのフォトマスク

3.2 測定方法

線パターンの測定は、倍率 25 倍の対物レンズを拡大レンズで 2 倍した、総合倍率 50 倍で行いました。線のエッジ位置は、画像測定ソフトウェア QVPAK(ミットヨ)で、左エッジを線ツール、右エッジを点ツールで測定し、両者の距離を計算しました(図 3)。エッジ検出ツールは、CCD 画像を取得し、エッジ検索方向に向かって CCD の各ピクセルの光量を測定し、ある閾値を超えたところをマークのエッジと決定します。

2 種類のパターンを、落射照明、透過照明で測定しました。落射照明使用時、透過照明使用時とも、明→暗方向にエッジを検索しました。測定時の照明光の光量は、画像測定機の最大光量を 1、消灯時を 0 とする、画像測

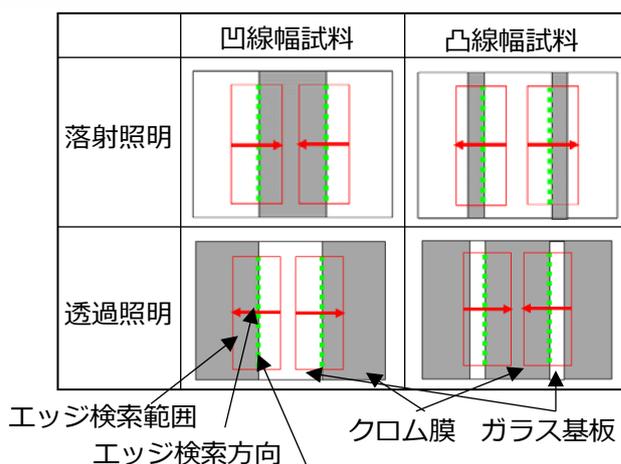


図 3 線幅パターンのエッジ検出

定機固有の光量表示で設定しました。

3.3 測定結果

各照明光量における線幅測定の結果を図 4、図 5 に示します。各光量 5 回ずつ繰り返して測定を行いました。

凹パターンでも凸パターンでも、落射照明では光量 0.28 以上、透過照明では光量 0.77 以上で、CCD の受光容量が飽和しました。CCD の受光容量が飽和した領域は、中黒丸で示しています。画像測定機の自動調光機能で推奨される測定光量をグラフ上に示しました。どの測定条件でも、CCD が飽和するより少し暗い光量が推奨されました。

凹パターンでは、光量が大きくなると、落射照明では線幅が狭くなり、透過照明では線幅が広がって見えます。一方、凸パターンでは、光量が大きくなると、落射照明では線幅が広がって見え、透過照明では狭くなって見えます。凹パターンと凸パターンでは、逆の傾向が見られました。CCD が飽和しない光量領域について見ると、光量を暗くしすぎると 0.5 μm 以上、公称値と異なる測定結果が出ますが、通常使用する、推奨光量付近での測定であれば、公称値と測定値の差は 0.2 μm 程度となり、概ね精度良く測定でき

ました。

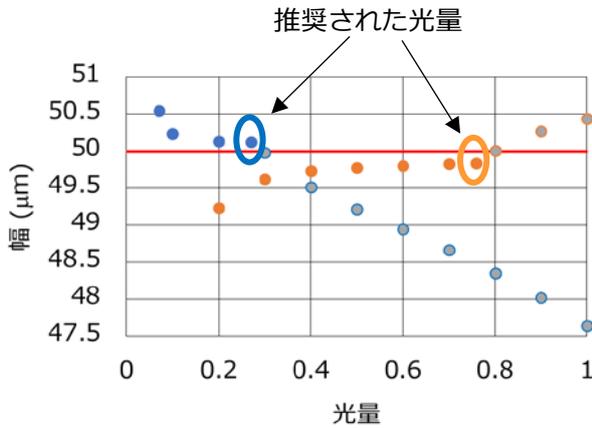


図4 各光量における幅測定結果
(凹パターン, 公称線幅 50 μm)
青: 落射照明, 橙: 透過照明

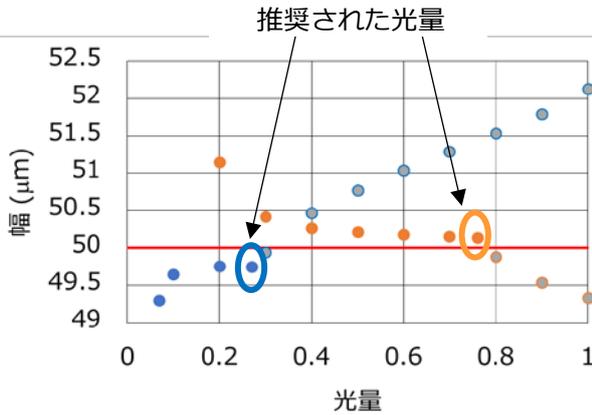


図5 各光量における幅測定結果
(凸パターン, 公称線幅 50 μm)
青: 落射照明, 橙: 透過照明

4. 円パターンの直径測定

4.1 円直径パターンマスク

今回使用した円パターンは、合成石英基板に、反射防止膜つきクロム膜を成膜したもので、図6のようなマークが成形してあります。クロム膜の厚さは200 nm (設計値)、エッジの角度は85度以上(設計値)となっています。今回測定したのは、このうち公称外径50 μmの凹形状の円パターンの直径です。線パターンのマスクは単層膜のため銀色に光っていますが、円パターンのマスクは

反射防止膜付きのため、黒っぽい表面となっており、照明光の反射、回折の条件が異なります。

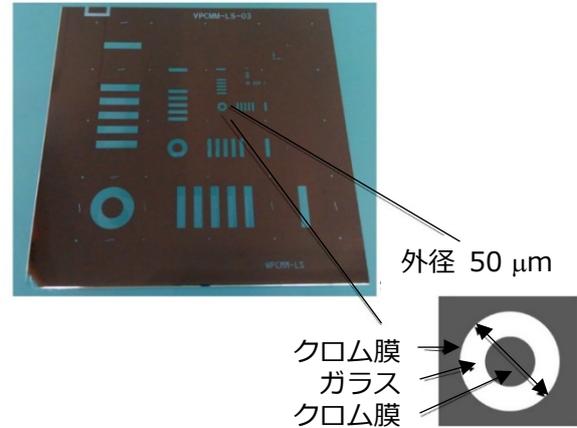


図6 円パターンのフォトマスク

4.2 測定方法

円パターンの測定は、倍率10倍の対物レンズと6倍の拡大レンズを使用し、総合倍率60倍で行いました。円周のエッジの位置は、QVPAKの円ツールをもちいて検出しました(図7)。1つの円パターンが1視野に入るようにし、検出されたエッジの全点から、最小二乗円を計算し、その直径を測定値としました。

落射照明使用時は、画像の暗部から明部に向かって(内から外)エッジ検索し、透過照明使用時は、画像の暗部から明部に向かって(外から内)エッジ検索しました。同じ条件で

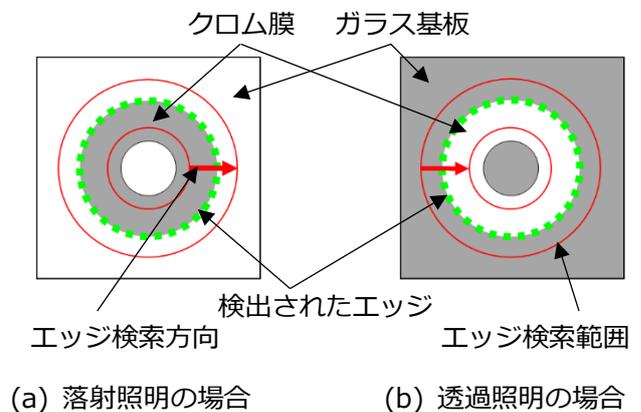


図7 円ツールによるエッジ検出

エッジ検索方向を逆にしても、測定値の差はわずかでした。

4.3 測定結果

各照明光量における直径測定の結果を図8に示します。受光容量が飽和した領域は、中黒丸で示しています。各光量で、5回ずつ繰り返し測定を行いました。

落射照明では、光量による直径測定値の変化はほとんど見られませんでした。落射照明で光量による直径値の変化が見られなかったのは、反射防止膜により、反射光が少なくCCDが飽和しないため、安定した測定域が広範囲で確保できたためと考えられます。一方、透過照明では、光量が多くなると、大きく見える傾向がみられ、これは、線幅パターンの凹パターンでの結果と一致していました。

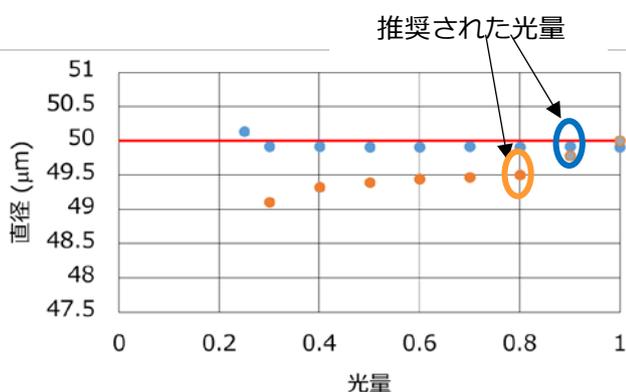


図8 各光量における直径測定結果
(公称直径 50 μm)
青：落射照明， 橙：透過照明

CCDが飽和しない光量領域では、線パターンのおきと同様に、光量を暗くしすぎると1 μm程度、公称値と異なる測定結果が出ますが、通常使用する推奨光量付近での測定であれば、安定した測定結果が得られました。公称値と測定値の差は、透過照明の場合0.5 μm程度と大きいものの、測定機の精度を考えると概ね精度良く測定できたといえます。

5. まとめ

同じパターンを同じ画像測定機で測定する場合でも、照明光の向きや光量の大小で、測定値が変化することがわかりました。

また、パターンの形状が凹か凸かによって、光量変化と形状測定値の変化の傾向は異なっていました。

通常、画像測定機では、CCDの受光容量が飽和するより少し小さい光量を使用するようになっています。その光量範囲では、公称値と測定値は概ね一致しており、精度良く測定できていることがわかりました。

今回の測定結果は、特定の測定機による、特定の器物の測定に対してのものですが、同メーカーの他の測定機や、他メーカーの測定機でも、程度の差はあれ、同様の傾向は見られるものと思われます。

また、今回は理想的な試料である、非常に良い精度のマスクパターンを測定しました。金属やプラスチック等の通常の対象物に対しては、異なる結果が出る可能性があります。サブマイクロメートルの精度を要求するような形状測定を行う場合には、注意が必要といえます。

教訓

- 同じ測定対象の形状を同じ画像測定機で測定しても、照明条件によって測定結果が異なることがあります。
- 測定機が推奨する光量での測定では、概ね精度良く形状測定が可能です。
- 高精度に測定したいときは、照明条件に注意する必要があります。

第6章 見方によって変わります ワーク座標系の決め方

石川県工業試験場 根田 崇史

1. はじめに

三次元測定機はマイクロメータやノギスといった汎用測定機器に比べて測定精度が高く、測定結果も信頼されています。しかし、三次元測定機による評価で合格した製品が他方の検査で不合格にされる事例がしばしば起きています。信頼できるはずの三次元測定機でなぜこのようなことが起こるのでしょうか。ここではワーク座標系に注目して考えます。

2. ワーク座標系の決め方

三次元測定機で寸法測定を行う場合、はじめに測定物がどのような向きで置かれているか装置に教える必要があります。そこで、測定物の中で基準になる部分を平面や円筒などの幾何要素として測定し、X軸、Y軸、Z軸の方向および位置を定義します。このようにして得られた座標系をワーク座標系と呼びます。では、測定物のどの部分を基準として測定すれば良いのでしょうか。

2. 1 データムがある場合

測定の前に図面を確認し図1のような三角記号があるか確認します。これはデータムと呼ばれるもので、JIS B 0022では「関連形体に幾何公差を指示するときに、その公差域を規制するために設定した理論的に正確な幾何学的基準」と書かれています。データ

ムとして指定されている部分は他の部分に対する基準ですので特に指示がなければデータムに従って要素を測定しワーク座標系を設定すれば問題ありません。

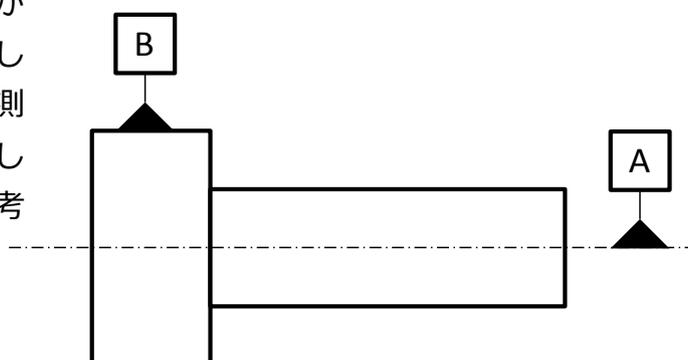


図1 データム記号の例

2. 2 データムが無い場合

全ての図面でデータムが指示されているわけではありません。データムが無い場合は測定者自身の判断で基準となる部分を決めることになります。一例として図2に示す測定物の基準について考えてみます。図面を書く際の原則として基準面から寸法線を引き出すことになっています。図2では右下の角から寸法線が出ていますので、基準となる要素は右下の角を構成する2辺だと考えられます。しかしながら、現実の測定物は正確に直角に加工されているとは限らないため、どちらの辺を基準軸としたかによって図3に示すように測定物の傾きが変化してし

まいます。基準軸の選択は測定者の判断になるため、異なる基準を選択する可能性があり、測定結果が異なる原因になります。そのため事前にしっかりと打合せを行い、お互いに共通認識を持つことが必要です。

また、測定物の中には曲面のみで構成されているものや、基準となる要素自身の形状精度が悪いものなどがあります。このような場合は要素としてではなく輪郭形状として測定を行い、得られた輪郭形状と設計値との誤差がもっとも小さくなるように位置合わせを行うベストフィットが適しています。

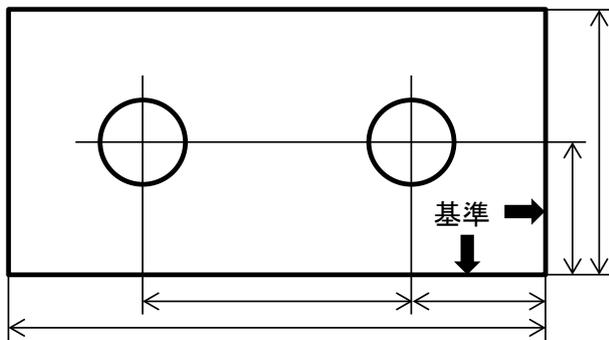
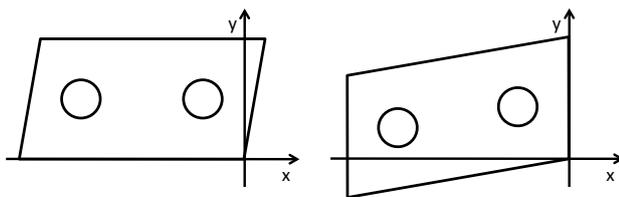


図2 データムが無い図面



(a) 長辺基準 (b) 短辺基準

図3 基準軸の選定方法の影響

3. 使用環境を想定したワーク座標系

これまでは図面の指示に従って座標系を考えてきましたが、場合によっては解釈を変えて評価する必要があります。ここでは、実際に評価を行っていく中でワーク座標系を変更した例を紹介します。

3. 1 実体公差を考慮した座標系の移動

図4に示すカムの輪郭形状を評価した際の事例について紹介します。輪郭度に示されているデータムに従い、データムB部を平面（Z軸方向とZ原点）、データムA部を円筒（XY原点）として測定しワーク座標系を設定したところ、図5(a)のように誤差が大きい結果になりました。この結果では不合格となるため、幾何公差指示にある最大実体公差を考慮することになりました。この例ではデータムAに、 \textcircled{M} で示された最大実体公差が入っていますのでAの穴寸法次第で公差値に余裕が生まれます。しかしながら当場のソフトでは最大実体公差を考慮した判定ができないため、カム形状と設計値形状をベストフィットし、その際の移動量と最大実態公差から求められる余裕を比較し問題ないことが分かりました。また、図5(b)のようにカム部の形状自体は誤差が少ないことが分かりました。

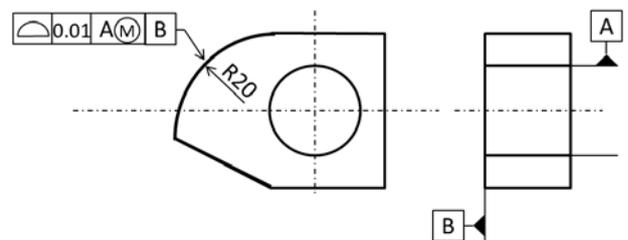
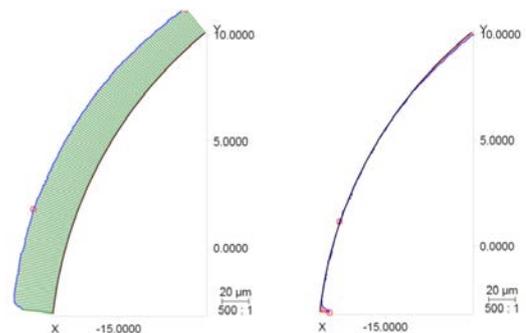


図4 カムの設計値



(a) データム座標系 (b) ベストフィット後

図5 カム評価結果

3. 2 穴の位置精度度評価

板に空いた複数の穴位置を評価した事例について紹介します。図 6 に示す図面から、ワーク座標系の X 軸方向はデータム B で指定されていることが分かります。図面指示に従いデータム B を直線で評価し X 軸に指定したときの測定結果を表 1（データム基準）に示します。この結果から、データム基準では公差外となってしまう、不合格となることが分かりました。そのため依頼者と相談したところ、使用上は中心穴と 4 つの穴位置関係が重要であると分かり、中心穴を軸として 4 つの穴位置の誤差が最小となるようにベストフィットによってワーク座標系を回転させた結果、表 1（穴基準）に示すように 4 つの穴全てにおいて公差内に入り、合格判定を受けました。

この事例はデータム B が加工時の位置決め基準として記されていたことが原因です。ワーク座標系を定義する際は使用用途を考慮し、適切な基準を選ぶようにしましょう。

（全ての値について公差は±0.01）

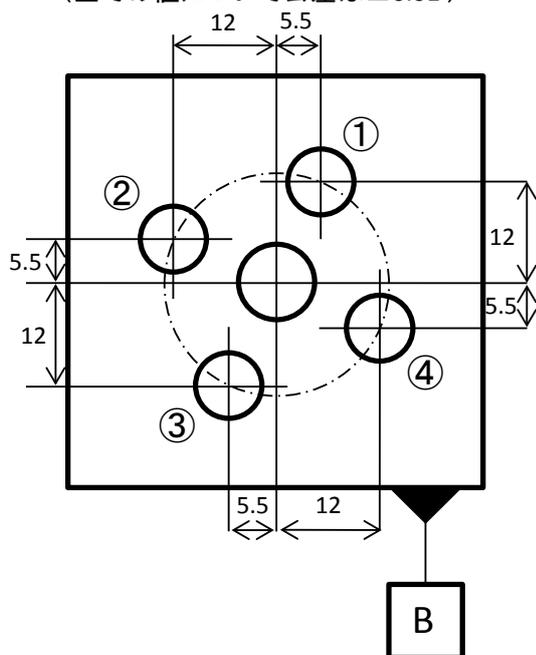


図 6 穴位置評価図面

表 1. 中心座標

番号		データム基準	穴基準
①	X	12.042	11.997
	Y	5.559	5.498
②	X	-5.460	-5.506
	Y	12.065	12.003
③	X	-11.946	-11.992
	Y	-5.434	-5.495
④	X	5.546	5.501
	Y	11.945	-12.006

4. 三次元デジタイザにおける座標系

これまで三次元測定機といえば接触式のものを指していました。しかし、近年では非接触式の測定機である三次元デジタイザ（三次元スキャナ）の測定精度が向上しており、工業製品の評価に用いられています。代表的なパターン投影式の機器は図 7 のようにプロジェクタとカメラから構成されており、プロジェクタから測定物に縞模様を投影し、その様子をカメラで読み取ることで数十μm の点間隔で測定物の全体形状を得ることができます。

三次元デジタイザによる評価では全体形状と 3DCAD データをベストフィットさせワーク座標系を設定する事例が多く見られます。図 8 は 3D プリンタで造形した器物を三次元デジタイザで測定し、3DCAD データと全体ベストフィットで求めた座標系で誤差評価したもの、および、角を球要素として評価し、その中心を結んだ軸を基準として誤差評価した結果を示したものです。図 8(a) のベストフィット座標系の結果では球部に 0.5 mm 程度の凹みが見られますが、円筒軸や角部は±0.1 mm の誤差範囲に収まっており特に傾向は見られません。しかし、図

8(b)の球基準座標系の結果からは、Z軸方向に+0.4 mm、Y軸方向では-0.3 mm程度の誤差を確認できました。全体ベストフィットによる座標系は簡単ですが、部分的な誤差が見えにくくなるという問題があることが分かりました。

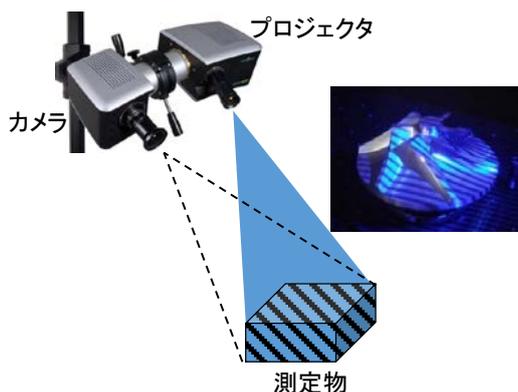
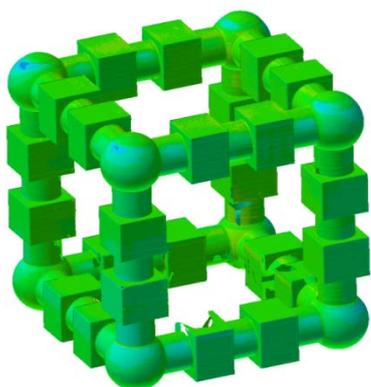
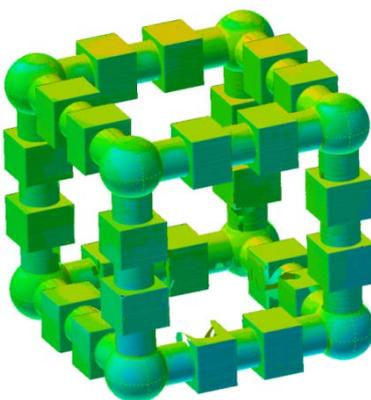


図7 三次元デジタイザ



(a) 全体ベストフィット座標系



(b) 球要素基準座標系

図8 座標系の設定方法による誤差の見え方の違い

5. まとめ

三次元測定機は測定精度が高く優れた測定機ですが、座標系の決め方によっては測定結果が変わってしまいます。測定物を正しく評価するために図面を確認するのはもちろんですが、相手先ともしっかりと打合せを行い適切な座標系を決めましょう。

教訓

- ・ 座標系の取り方で測定結果が変わります
- ・ 図面指示も間違っている場合があります
- ・ 全体ベストフィットの利用は計画的に

参考資料

- ・ JIS B 0021：製品の幾何特性仕様（GPS）
- ・ JIS B 0022：幾何公差のためのデータム
- ・ AIST, NMIJ：産総研地域連携戦略予算プロジェクト「3D スキャナと 3D プリンタの連携によるクローズドループエンジニアリングの実証」 実施報告書

CMMの都市伝説 第3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29年12月7日

本冊子「CMMの都市伝説 第3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。)