



CMMの都市伝説 Ver.2

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 CMM だっぺ	2
第3章 どこに置いてもいいの.....	4
第4章 狭いのはきらい?	9
第5章 やさしくしてね	12
第6章 何回もしなくてもいいの.....	16
第7章 アルミとルビーはラブラブ?	20
第8章 お熱いのが好き?	24
第9章 触るところで変わります	29

第1章 はじめに

三次元測定機（CMM）は、非常に多機能かつ高性能な測定機です。これ一台あれば、ほとんどの寸法や幾何形状が測定できます。しかしながら、これほど使う人に知識と経験を要求する測定機は他にありません。うまい使い方をすれば測定機のカatalogスペック以上の性能を引き出すことも可能ですが、誤った使い方をすれば全く見当外れの結果が得られることもあります。

これらの知識や経験は「ノウハウ」とも呼ばれます。ノウハウには、自分で勉強したり経験したりして獲得したものもありますし、先人から受け継いだものもあります。ところがこのようなノウハウがいつも正しいとは限りません。特定の状況にだけ成立するノウハウであったり、そもそも出所の怪しいものであったり、ノウハウが形成された当時は正しくてもその後の技術進歩により正しくなくなっているものもあります。このように何となく伝承されているけれども、実は正しいかどうか検証したことがないノウハウを「都市伝説」と名付けました。

この本は CMM にまつわる都市伝説を順に取り上げ、それを実験やシミュレーション

にもとづいて検証し真偽を確かめるとともに、CMM の効果的な使い方についてのアドバイスをまとめたものです。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、一人一つの章を担当して執筆しました。

この本は、CMM を使う部署に初めて配属された新人の教育や、各種の講習会のテキストに活用して頂くことを想定しています。また、かなりの知識と経験を持った CMM のオペレータの方々にも面白い読み物として読んで頂けると幸いです。ぜひご活用頂いて、CMM をうまく使うことにより、日本のものづくり力や産業競争力向上の一助になれば幸いです。

本書はどの章から読み始めていただいても構いませんが、第2章「CMM だっぺ」だけは全ての章に関係する内容を含んでいるので最初にお読みください。

第2章 CMM だっぺ

あなたの使っている CMM 用語は方言？

1. 三次元測定機

三次元測定機 (CMM) は、1960 年にフェランティ社によって開発されたと多くの文献に書いてあります。本当でしょうか。これも一つの「都市伝説」です。ただ、少なくとも 1960 年代には現在の CMM と同じような構造をした測定機が出現したようです。

「三次元測定機」というのがもっとも一般的に使われている用語です。英語では「Coordinate Measuring Machine」略して「CMM」です。CMM に関して規定した ISO 規格には ISO 10360 シリーズがあり、この ISO 規格は翻訳して JIS B7440 シリーズとして発行されています。JIS 規格は経済産業省のお墨付きがついた公式文書ですから、ここで用いられている名称は日本における正式名称とあってよいでしょう。そこで JIS B7440 のタイトルですが「座標測定機」です。確かに「Coordinate」をそのまま訳すと「座標」であり、「三」という数字は出てきません。とはいえ「三次元測定機」あるいは「CMM」のほうが一般的なので、本書ではこちらを使います。なお、JIS には括弧付きで「三次元測定機」も使われており、「三」は漢数字の「三」, 「機」は「器」ではなく「機」を使います。

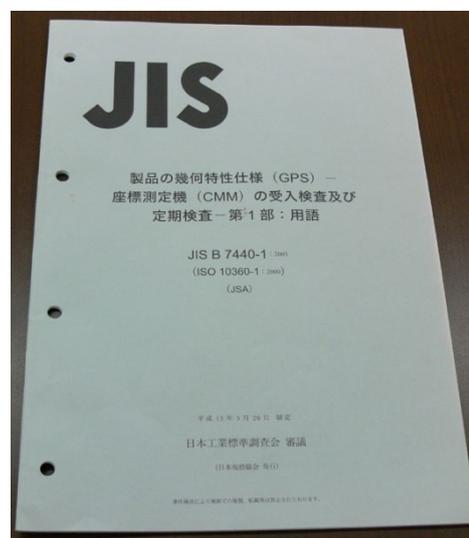


図1 JIS B 7440-1

2. プローブ

あなたの思っている「プローブ」は、プローブではないかも知れません。

メーカ毎に異なる用語を統一するために作られた規格が ISO 10360-1 及びその翻訳である JIS B7440-1 です。これらの規格では「プローブ」は、「プロービング中に信号を発生する装置」と定義されています。

この定義に従うと「小さなルビーの球がついた細い棒」は、プローブではなく「スタイラス」です。スタイラスを自動で取り替える装置は「プローブチェンジャー」ではなく「スタイラス交換システム」です。なお前述のルビーの球は「スタイラスチップ」、棒は「スタイラスシャフト」が正しい名称です。



図2 プロービングシステム
(Leitz 社カタログより)

本書では、ISO と JIS の定義に従い「プローブ」と「スタイラス」をきちんと使い分けます。

3. 校正球

CMM にはスチールやセラミックでできた直径数 cm の球が付属していて、測定の最初に必ずこの球を測ります。これは「スタイラスチップ」の直径や、「スタイラスシャフト」のプロービング力による曲がり、あるいは「プローブ」の電気特性などを調べるための作業です。



図3 スタイラス校正の様子

この球は ISO では「reference sphere」、JIS では「校正球」と呼びます。「基準球」という呼び方も耳にしますが、誤りです。さらに校正球を使って前述の特性を調べる作業を「プローブ校正」や「プローブ補正」と呼んだりしますが、これらも誤りで正しくは「probing system qualification」あるいは「プロービングシステムのパラメータ設定」です。ただこの名称は何度も繰り返して使うには長すぎるので、本書ではあえて「プローブ校正」と呼ぶことにします。

4. ワーク

CMM で測定する対象器物のことを何と呼んでいますか。被測定物、測定対象、などいろいろあります。英語では Workpiece という呼び方をよくするようで、日本語でもそれを省略して「ワーク」とも呼びます。

ワークだけでは測定対象物を指したことになりませんし、英語としても通じないでしょうが、本書では慣例に従い「CMM で測定する対象のことを「ワーク」と呼ぶことにします」。

第3章 どこに置いてもいいの ワークの設置位置と方位の影響

山形県工業技術センター庄内試験場 渡部光隆・松田文

1. はじめに

CMMにワークを設置するとき、ワークの方位がCMMの移動軸と一致するようにがんばってアライメントをしていませんか。その努力は無駄かも知れません。

現在市販されている接触式CMMのほとんどは、X、Y、Zの3軸の移動軸に沿ってプローブあるいはワークが動く直交型CMMです。

CMMは、機械座標系とは別にワーク座標系を計算により設定することができます。したがって、ワークをどのように設置しても測定は可能であり、これがCMMの大きな特徴や利点の一つとなっています。

ところで、現在ではCMMのJIS規格はISO規格の翻訳になっていますが、昔は独自のJIS規格でした。どちらの規格でもCMMの検査にはブロックゲージを使い、ゲージの校正値と測定値を比較することによりCMMの性能を検査しています。

昔のJIS規格ではX、Y、Zそれぞれの軸に平行にゲージを設置したときの精度をE1、XY、YZ、ZXそれぞれの面内の対角に設置したときの精度をE2、XYZの空間対角に設置したときの精度をE3、と区別していました。これは暗黙のうちに

$$E1 < E2 < E3 \quad (*)$$

の関係が成り立つという仮定のもとに規格が作られたことを示唆しています。

そして事実、多くのCMMでこの仮定は成

り立っていました。ところが、現在のISO規格やJIS規格ではこれらの区別は無くなり、測定領域内でゲージの設置位置や方位を変えつつ任意の7ヶ所で測定することになっています。

現在も(*)の仮定は成り立つと多くの人に信じられており、ワークはできるだけ移動軸に沿って設置すべきだと言われています。

現代のCMMでも(*)の仮定は成り立つのか、都市伝説ではないのか、それを検証してみました。

2. 検証

2.1 実験方法

今回は、①X軸に平行にゲージを設置したときの精度E1(X)、②Y軸に平行に設置したときの精度E1(Y)、③XY面内の対角に設置したときの精度E2(XY)を実験から求め、その大小関係を調べてみました。

2.2 測定機

実験に使用したCMMは(株)ミットヨ製の門移動型の汎用機Crysta-Apex707(図1)です。プローブはレニショー(株)製のPH10MにTP200を取り付け、スタイラスはφ3mm、L=30mmを使用しました。

設置は平成14年(2002年)で、最大指示誤差 $MPE_E = 2.5 \pm 4L/1000 \mu\text{m}$ (Lは測定長さで単位はmm)、最大プロービング誤差は $MPE_P = 2.7 \mu\text{m}$ です。

CMM は設定温度 20℃で空調されている精密測定室に設置してあります. 室内の平均温度は約 20.3℃, 温度の変動幅は約 1.5℃でした.



図1 CMM

2. 3 ステップゲージ

実験ではワークとして寸法(校正值)のわかっているステップゲージ(図2)を使用しました. ステップゲージは(株)ミットヨ製の610 mmのもので熱膨張係数は10.8 ppmです. ステップゲージは図2のように専用の傾斜台に固定してCMM定盤上に設置しました.



図2 ステップゲージ

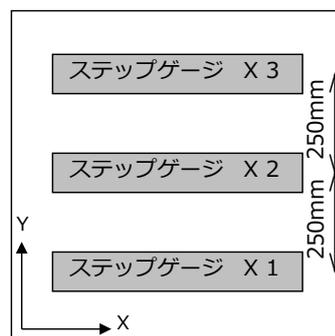
2. 4 ステップゲージの設置位置

①X軸に平行にゲージを設置したときの精度 E1(X)と②Y軸に平行に設置したときの精度 E1(Y)を調べる実験での,ステップゲ

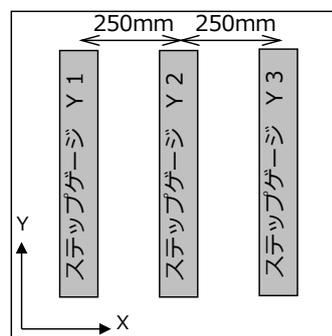
ージのCMM定盤上での位置を図3のA, Bに示します.

それぞれX1, X2, X3及びY1, Y2, Y3の3ヶ所に設置し測定しました. それぞれの間隔は250mmです.

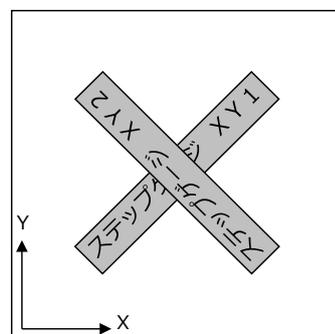
③XY面内の対角にゲージを設置したときの精度 E2(XY)を調べる実験では, ステップゲージをCMM定盤上に図3のCに示す場所XY1とXY2それぞれ設置しました.



A



B



C

図3 ステップゲージの設置位置

2. 5 測定方法

測定に必要なワーク座標の基準面はステップゲージの 0mm ゲージ面で設定しました。そして、ゲージ測定面の中央点を測定点とし測定長さ 10mm, 110mm, 210mm, 310mm, 410mm, 510mm, 610mm の位置を 3 回繰り返し測定しました。

ステップゲージには測定機付属の温度計を 2 つ貼り付け、温度補正を行いました。実験中のステップゲージの温度は 20.7 ~ 20.8℃ でした。

図 4 に Y2 の位置での実験状況を示します。



図 4 実験状況

3. 実験結果

3. 1 X 軸に平行に設置したときの精度 E1(X)

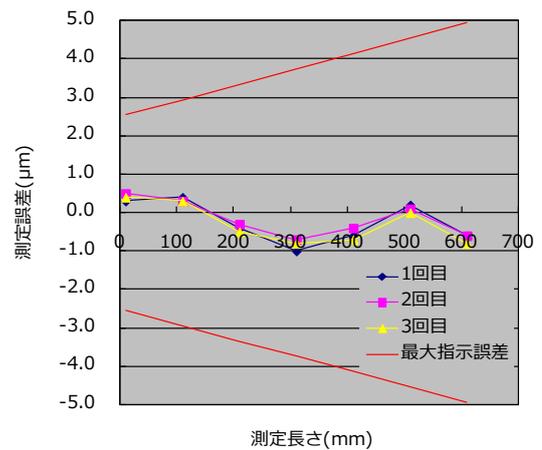
X1, X2, X3 それぞれの設置位置で 3 回繰り返し測定を行った結果を図 5 に示します。繰り返し誤差は 0.5 μm 以内でした。装置の MPE と比較して非常にいい値です。

測定誤差は 1 μm 前後であり、測定誤差の大小の傾向はどの設置位置でも同じでした。

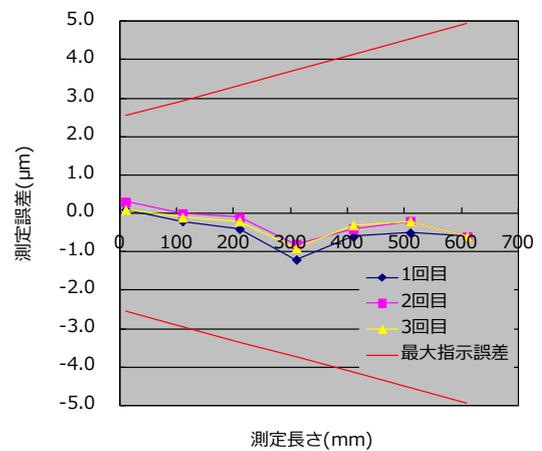
また、測定長さが 10mm, 110mm, 210mm, …, 610mm と長くなっていても測定誤差は大きくなりず測定機の最大指示誤差以内でした。

E1(X)の最大値は 1.2 μm (X2,310mm,

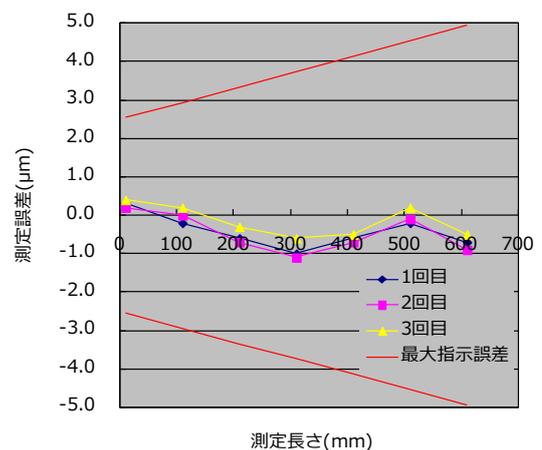
1 回目) となりました。



(1) X1



(2) X2



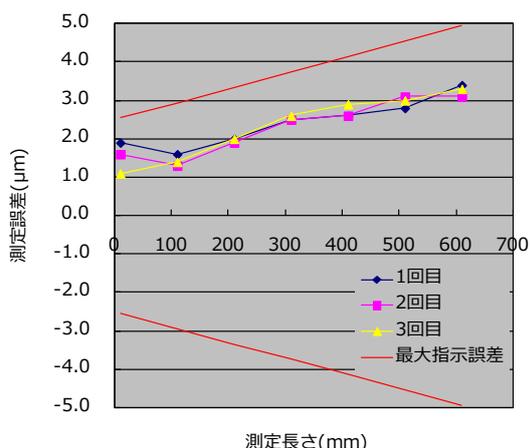
(3) X3

図 5 X 軸に平行に設置した場合の測定誤差

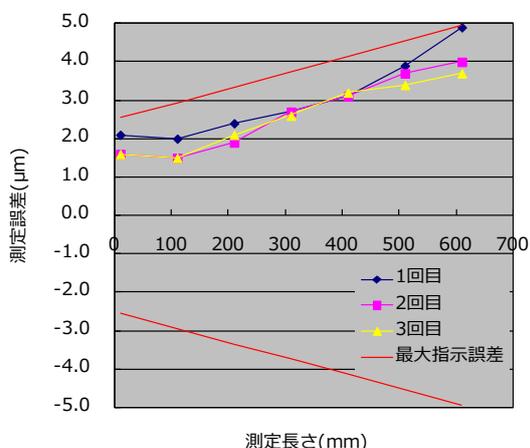
3. 2 Y 軸に平行に設置したときの精度 E1(Y)

Y1, Y2, Y3 それぞれの設置位置で 3 回繰

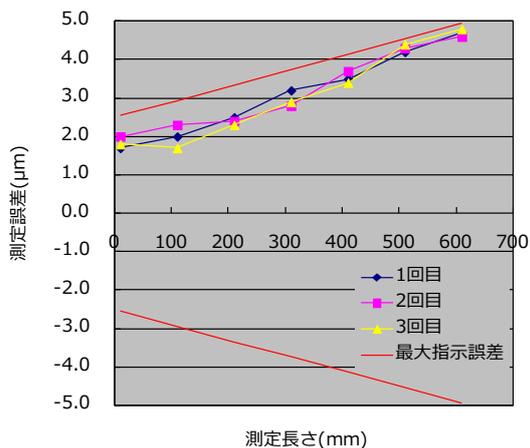
繰り返し測定を行った結果を図6に示します。



(1) Y1



(2) Y2



(3) Y3

図6 Y軸に平行に設置した場合の測定誤差

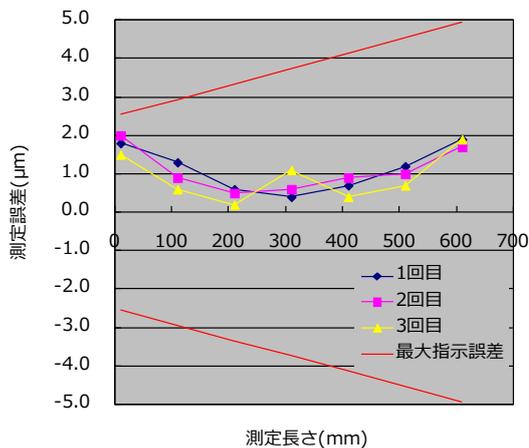
繰り返し誤差は Y2 に設置したときの 610mm 以外では 1 μm 以内でした。測定誤差は、どの設置位置でも測定長さが

210mm, 310mm, …, 610mm と長くなると大きくなりました。

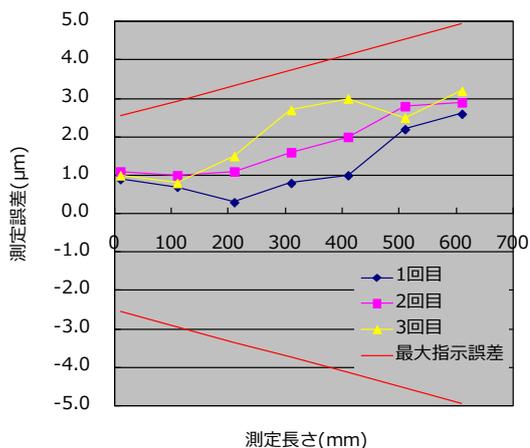
また、設置位置が Y1, Y2, Y3 と右側に行くほどグラフの傾きが大きくなり、測定誤差が大きくなりました。Y2 に設置したときの測定誤差は 610mm で 4.9 μm となりましたが、測定機の最大許容指示誤差 4.94 μm 以内でした。

3.3 XY 面内の対角に設置したときの精度 E2 (XY)

CMM の X 軸と Y 軸の対角に設置したときの測定誤差を図7に示します。



(1) XY1



(2) XY2

図7 対角に設置した場合の測定誤差

各設置位置で 3 回繰り返し測定を行いました。XY1 に設置したとき繰り返し誤差は 1 μm 以内でしたが、XY2 に設置したときは 310mm, 410mm で約 2 μm となりました。

測定誤差は XY1 の位置では約 2 μm でした。XY2 では測定長さが大きくなるほど測定誤差が大きくなる傾向があり、測定誤差は 610mm で 3.2 μm となりましたが測定機の最大許容指示誤差 4.94 μm 以内でした。

4. 結論

①X 軸に平行にゲージを設置したときの精度 E1(X), ②Y 軸に平行に設置したときの精度 E1(Y), ③XY 面内の対角に設置したときの精度 E2(XY)をそれぞれ実験から求めたところ

- ①E1(X)の最大値は 1.2 μm
- ②E1(Y)の最大値は 4.9 μm
- ③E2(XY)の最大値は 3.2 μm となりました。

大小関係をみると

$$E1(X) < E2(XY) < E1(Y)$$

となり、

$$E1 < E2 < E3 \quad (*)$$

という関係が成り立つという仮定には当てはまりませんでした。

現在の CMM はスケール誤差の補正だけでなく、直交度、ガイドや定盤の変形、スタイラスの撓みの補正などコンピュータにより様々な補正を行うことにより精度を維持しています。

実験に使用した CMM は平成 14 年に設置したもので最新型とは言えませんが、コンピュータ補正が当たり前になり組み込まれるようになった時代以降の機種だと思われます。

今回行った実験からは、定期的な校正と精度管理を行っている CMM では、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することができると言えます。がんばって CMM の移動軸に沿ってワークをセッティングするのは無駄な努力です。

ただし今回の結論が全ての CMM に当てはまるわけではありません。精度検査はメーカー任せにしないで一度は自分でやってみて、自分の CMM の振る舞いを知っておくのがよいでしょう。

♡♡♡ 今日の Lesson ♡♡♡

- ・ ワークはどのように置いても測定結果はあまり変わりません。

第4章 狭いのはきれい？

基準面の取り方によって測定値に誤差が生ずる？

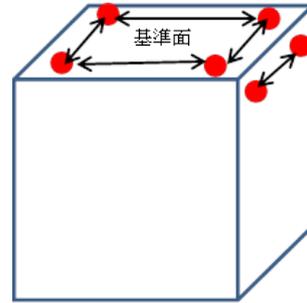
青森県産業技術センター八戸地域研究所 中居久明・上野桂

1. はじめに

三次元測定機（CMM）で測定を行う際、測定対象（ワーク）に対して、いわゆる「ワーク座標系」を設定しますが、その目的はCMMの定盤上の測定物が「どの位置に、どのような傾きで、どの方向に向かって」設置されているのかを、測定開始前に初期設定するためです。

その際、「基準面」や「基準軸」を定めますが、「基準面」と「基準軸」のワークにおける実際のプロービング点は、測定が可能な範囲でできるだけ広く取るのが、より正確な測定結果を得るためにはよいとされています。しかしながら、基準軸の長さに対して基準面が極小である場合、例えば基準面が1mm角、基準軸が1mのような場合、設定した「ワーク座標系」は不安定のように感じます。

基準面を極小範囲で設定した場合、果たして測定結果に何らかの影響が出るものでしょうか。三次元測定機の校正等の用いられているステップゲージを測定対象に、その検証を行いました。



各要素において、可能な限りプロービング点間の距離（全体の測定範囲）を大きくとる！

図1 ワークに対するプロービング点のイメージ

2. 検証内容

2. 1 装置及び測定対象の概要

使用した CMM は門移動型の汎用機です。

表1 CMMの概要

メーカー名	Carl Zeiss
型式	UPMC550 CARAT
データ処理	Calypso
測定範囲	550mm×500mm×450mm (X軸×Y軸×Z軸)
最大指示誤差	$MPE_E = 0.8\mu\text{m} + L/600\mu\text{m}$ (測定長さ L : mm)
設置年月	平成 11 年 3 月(本体) 平成 24 年 2 月(ソフトウェア)
最終校正年月	平成 25 年 12 月

測定対象のステップゲージ(ミットヨ製チエックマスター：HMC-600) は、ブロックゲージと同様に端面間の距離を測定する検

査治具で、10mmの短尺ブロックゲージが20mm間隔に31個配列されていて、最長610mmまでの精度評価が可能です(図2)。1番目のブロックの端面上に中心点を設定し、中心点から均等な距離にある4点の測定点から基準面を設定しました。また基準軸は通り出し基準面上の2点の測定点から設定しました。なお、CMM内蔵の温度センサをステップゲージに取り付けて温度補正も行いました。

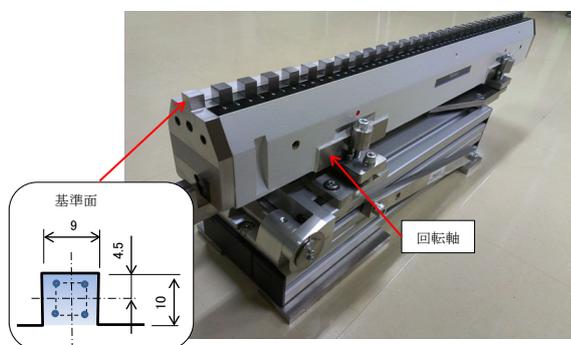


図2 ステップゲージ

2. 2 実験方法

基準面のサイズを0.5~8.0mm角の範囲で6段階に変化させ、0~450mmの範囲を(CMMの測定範囲内)、それぞれ3回の繰り返し測定を行いました(表2)。またスタイラスの球径による影響も調べるため、3種類のスタイラスを用いました(表3)。ステップゲージの設置位置は、装置特性により測定精度が良好と期待されるY軸ガイド部近傍に、機械座標系のY軸方向に対して平行に設置しました(図3)。測定はCNCによる自動測定により行いました。

表2 実験条件

基準面サイズ (mm角)	0.5,1.0,2.0,4.0,6.0,8.0
測定距離 (mm)	10,30,50,70,90,110,130,150,170,190,210,230,250,270,290,310,330,350,370,390,410,430,450
繰り返し数	n=3

表3 使用したスタイラス

チップ材質	ルビー		
チップ径 (mm)	3.0	5.0	8.0
シャフト材質	超硬		
シャフト径 (mm)	2.0	3.5	6.0
シャフト長さ (mm)	50	50	63.5

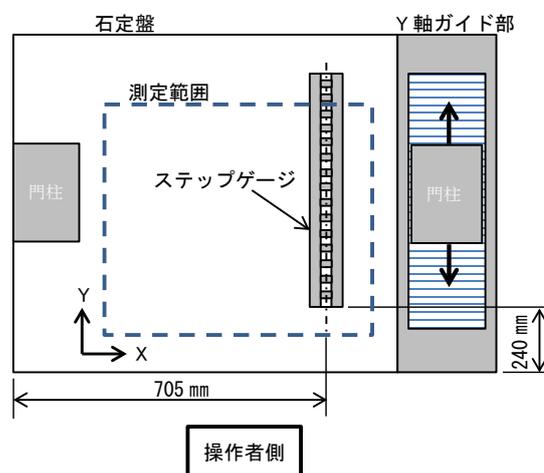


図3 ステップゲージの設置位置

3. 検証結果

スタイラスのチップ径毎の測定誤差(図4, 図5, 図6)を見ると、チップ径毎に誤差範囲に違いがあるものの、基準面サイズの違いによる誤差に特定の傾向はなく、どのサイズであっても測定長さに対する測定誤差の傾向はほぼ同様の結果となりました。また繰り返し回数による測定誤差の影響も出ませんでした(図7:基準面サイズ8mm角、スタイラス球径8mmの場合)。

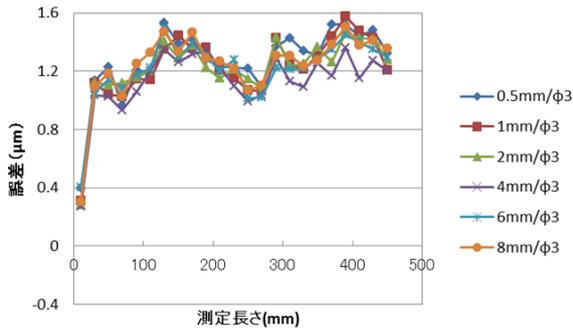


図4 測定誤差 (スタイラス球径 3mm)

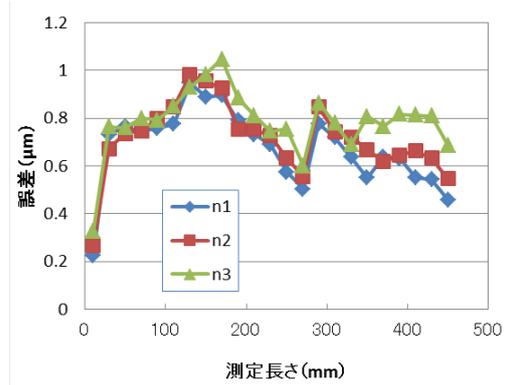


図7 測定誤差 (繰り返し回数の影響)

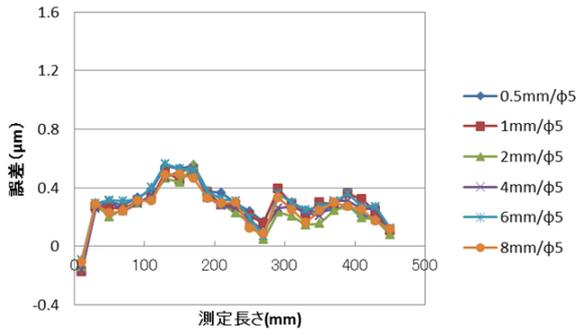


図5 測定誤差 (スタイラス球径 5mm)

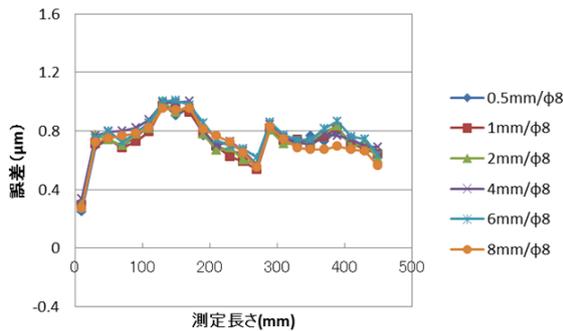


図6 測定誤差 (スタイラス球径 8mm)

4. まとめ

以上の検証結果から寸法測定における基準面の測定サイズの影響は見られなかったため、基準面の測定範囲として1.0mm角以上確保できれば十分であることが確認できました。

この実験からは、できるだけ広い範囲を測定しろという言い伝えは、都市伝説であることがわかりました。

とはいえ、できるだけ広い範囲をとるほうがよいことは理論的にも導けます。現代の高性能 CMM ではそれほど神経質になることはないということです。

また、平行度や直角度といった幾何偏差を評価する場合の基準面サイズの影響については未知であり、今後の課題です。

第5章 やさしくしてね クランプ力によるワーク変形

(地独) 岩手県工業技術センター 和合 健

1. はじめに

CMMはどんどん高精度な測定装置になっていますが、測定技能の違いにより測定結果が異なります。ここでは測定技能の1つとしてワークを固定する際の「クランプ力」を取り上げます。

ワークをプロービングする時には力が加わりますし、テーブル移動型CMMの場合にはテーブル移動時にワークと一緒に動くことが心配です。そのため初心者は必要以上に強い力でクランプをしがちです。そうするとワークは動きませんが、ワーク自体が変形して測定誤差が発生します。

どのくらいのかで、どのようにクランプすればよいのか。これは、メーカーや先輩から伝授されたり、自分の経験により獲得したノウハウです。しかしながら個人が持っているそれぞれのノウハウは都市伝説ではないのか、実験と理論によりそれを確かめてみましょう。

2. 理論解析

図1に示すように細長い板を2つの台座の上に置いて、上から押した場合を考えてみます。板の材質はステンレスSUS440、幅50mm、長さ350mm、厚さは10mmで、台座の間隔は202mmとしました。この支持位置はエアリー点と呼ばれ、ブロックゲージなどの端度器を支持する時の基本位置です。エアリー点で支持すると板が重力でたわ

んでも、その両端面が共に鉛直になります。

荷重250Nを与えた場合の鉛直方向のたわみ量は、理論的には $y_c = 47.7 \mu\text{m}$ となります。図2のオレンジ色の線で示すように、荷重が小さくなるとたわみ量は直線的に小さくなります。

また、支持点Bから梁の中心位置までの距離をPとし、支持点Bを起点として梁の中心位置に向かう各位置でのたわみ量 y_c も図2に示しました。押すところが支持台に近づくにつれてたわみ量が小さくなり、台座の真上でクランプするとたわみが防げることが分かります。

これは誰もが持っているノウハウで、理論的にも正しいことがわかりました。

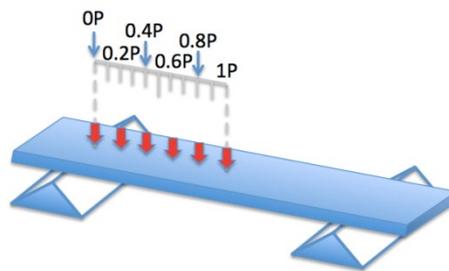


図1 2点支持した場合の板のたわみ

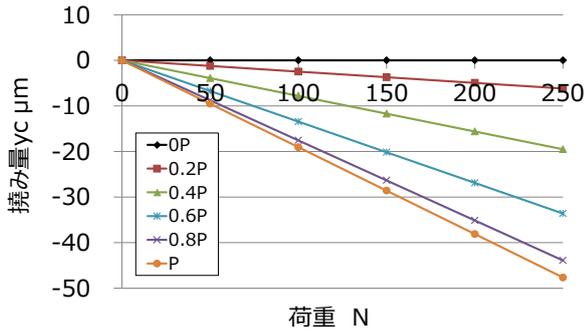


図2 2点支持した場合の板のたわみの理論値

3. クランプ力とワーク変形の測定

台座の真上でクランプすればいいことがわかりましたが、どうしてもできない場合もあります。では具体的にどれくらいの力でクランプすればよいのか。2では250 Nと仮定しましたが、実際にどれくらいの力かイメージが沸きませんので確かめてみます。

3.1 実験装置

図3及び図4に示すとおり、板状のワークをブロックの上に置いて2点で支持し、中央部をクランプで押します。クランプ力の測定には動力計を用いました。また、クランプ力により生じるワークの横方向の変形量を、てこ式変位計で測定しました。ワークの材質、サイズ、支持点などは2の理論解析と同じです。

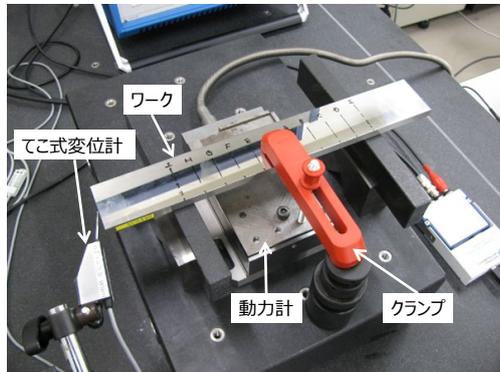


図3 装置の構成

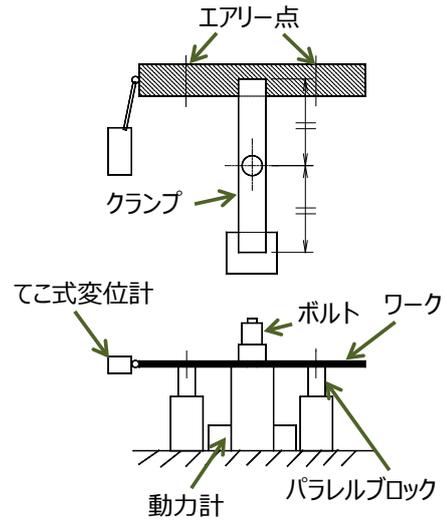


図4 ワークとクランプの配置

3.2 実験手順

荷重を加える点は、図5のとおり平行ブロックの位置(0P)とワークの中央(1P)の2箇所としました。

スパナを使って手でクランプのねじを回し、徐々に荷重をかけます。スパナで回したときにどれくらいの荷重がかかっているかを実感するために、手でねじを回す実験も行いました。その様子を図6に示します。

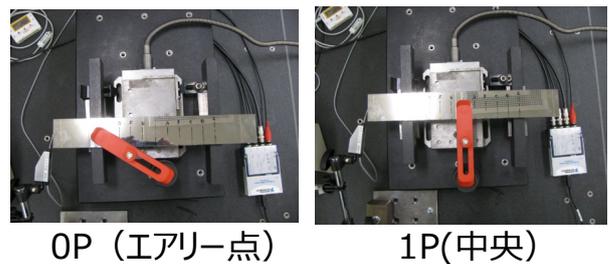


図5 クランプ位置



図6 スパナ使用(左)と手回し(右)

4. 実験結果

4. 1 樹脂製クランプの場合

樹脂製クランプを使用して個人差によるクランプ力を比較しました。個人差の比較対象は熟練者、初心者の男性、初心者の女性としました。

クランプ力により板は鉛直方向にたわみます。その量を直接測った方がよいのですが、今回は代用的に端面の水平方向の移動量を測定しています。これら 2 つは同じような振る舞いをしますが、大きさは同じにならないことに注意して下さい。

実験結果を図 7 に示します。

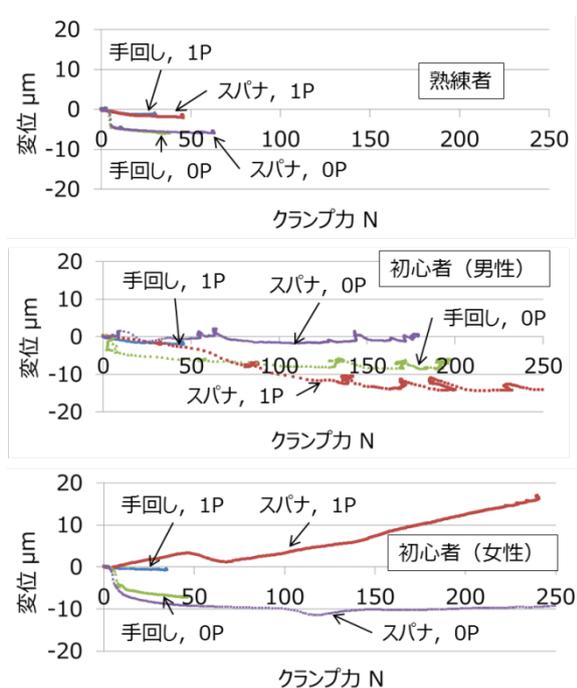


図 7 個人差による締め付け力の比較
(樹脂製クランプの場合)

熟練者は手回しとスパナを使った場合で締め付け力の差異が小さく、その大きさはせいぜい 50 N であることがわかります。

一方、初心者の男性は、手回しでもスパナを使った場合でも過度な力で締め付けています。男性の力で力まかせに締め上げると 200 N もかかっています。

初心者の女性もスパナを使った場合は締めすぎていますが、手回しの場合は女性の非力さが功を奏して締め付け力は適切でした。

以上のことから、クランプ力は女性が手回しで優しく締める程度でよいことがわかります。ただその場合でもクランプする場所が適切でないと、図 2 によると 10 μm のたわみが発生します。

4. 2 アルミニウム製クランプの場合

写真 8 にアルミニウム製クランプを用いた場合の実験結果を示します。

熟練者でも 100 N 程度の大きな締め付け力が見られました。樹脂製クランプの場合は、クランプ自身が荷重を吸収していましたが、アルミニウム製ではねじの回し角度が直接的にクランプ力として作用します。しかしながら、熟練者の場合ではエアリー点の 0P の位置ではクランプ力は 100N と大きいですが、端面変位は 5μm 以下であることから下当て治具上でクランプすることで過度なクランプ力でもワーク変形が回避されていました。一方、初心者は必要以上の締め付け力が見られ、その締め付け力は樹脂製クランプとアルミニウム製クランプで同じ程度でした。

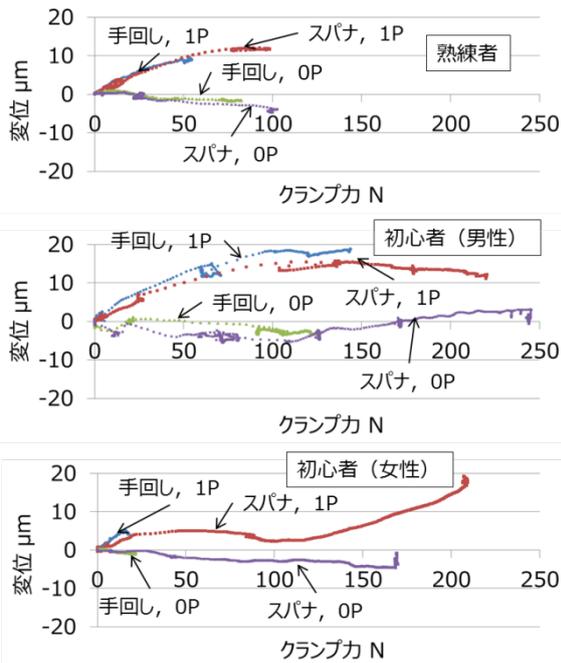


図8 個人差による締め付け力の比較
(アルミニウム製クランプの場合)

5. 結言

(1) クランプの位置によってワークの変形量は大きく異なります。できるだけワー

クを支持しているところの真上からクランプすべきです。

(2) 熟練者は手で回した場合とスパナを使った場合の締め付け力の差が小さく、適切な力で締め付けができます。初心者はいずれの場合でも必要以上の力で締め付けがちです。女性の手でスパナを使わずに優しく締めるくらいの力が適切です。

(3) アルミニウム製クランプを使うと、熟練者でも締め付け過ぎる傾向が見られました。適切なクランプ力かけるという点においては樹脂製クランプの方が優れています。

以上を総括すると、

① 適切なクランプ力かけるには熟練が必要です。

女性の手で優しく締めるくらいが適切なクランプ力です。

第6章 何回もしなくてもいいの

プローブ校正は測定の直前に行うべきか

宮城県産業技術総合センター 久田哲弥

1. はじめに

接触式 CMM を使って複雑な測定対象（ワーク）や測定箇所が多いワークを測定する場合、複数のスタイラスを交換しながら測定することがよく行われます。その際、以前に行ったプローブのパラメータ設定（以下、校正と呼びます）のデータをそのまま使って測定することが多いかと思います。

しかし、校正したスタイラスを一度取り外して再度取り付けるとき、本当に校正時の状態を再現できているのか疑問です。このことから、一般的に高精度の測定を行うためにはスタイラス交換毎（測定の直前）に校正をするべきだと言われています。

その一方で、交換のたびに校正を行うのは非効率であり、製品の品質検査などでは現実的でないケースもあります。

メーカーは CMM の設計においてこの点にも十分な注意を払っているはずですが、本当に毎回校正が必要なのか、実は単なる都市伝説ではないのでしょうか。

そこで、この章ではスタイラスを脱着し、校正せずに測定した場合に、測定値にどれだけ影響を与えるかを検証してみました。

2. 使用した CMM

実験に使用した CMM はカール・ツァイス社製 UPMC 550 CARAT（1999 年製）で、

室温を 24 時間 $20\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ に保持した恒温室に設置されています。本 CMM では図 1 にあるようにスタイラスを取り付ける皿を介して CMM のプローブヘッドに固定されます。

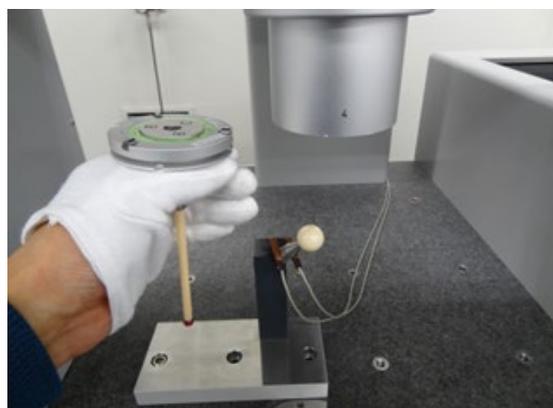
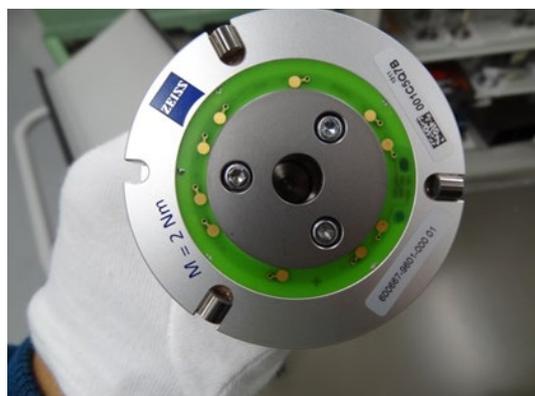


図 1 スタイラスの脱着の様子

図 2 は皿とプローブヘッドの取り付け部の写真です。皿はプローブヘッド内の電磁石で吸着することで固定され、皿側にある 3 箇所の円筒がプローブヘッド側にある 3 箇所の 2 個 1 組の球の間に入ることで位置決めされます。



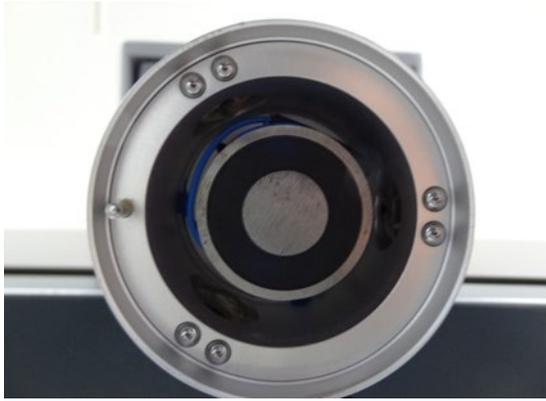


図2 皿（上）およびプローブヘッド（下）の取り付け部

また、図3はCMMのテーブルを装置の正面から見たときの写真です。座標軸の方向は、Xは左右方向で右側がプラス、Yは奥行き方向で奥側がプラス、Zは上下方向で上側がプラスです。



図3 CMMのテーブル

3. 実験方法

実験に使用したスタイラスは、直径8 mm、長さ95 mmで鉛直下向きのもので、同じく校正球は直径30 mmのアルミナ製です(図1や図3に写っているものです)。測定手順は以下の通りです。

- (1)校正球を測定して原点を設定
- (2)スタイラスをCMMから外し、再び取り付けして校正球の中心座標を測定
- (3)(2)を10回繰り返して中心座標の変化を見る

事前に行った予備実験やこれまでの経験から、スタイラスの脱着により測定値に影響を及ぼす要因として、

- ・プローブを手で触ることによる人体からの入熱
- ・取り付け部へのゴミ等の混入による位置決めはずれ

が考えられたため、これらの影響を最小限にするために、プローブの脱着は本CMMの自動スタイラス交換機能(カール・ツアイス社では自動プローブ交換機能と呼んでいます)を使って行いました。

図4の写真はそのときの様子で、テーブル上にあるラックへ自動で格納・再度取り付けを行います。これにより人間が手で触ることがなく、またラックに付属のカバーにより取り付け部にゴミが混入しにくくなります。



図4 ラックを使ったプローブ脱着の様子

4. 実験結果

はじめに、使用したCMMの測定繰り返し性を確認するため、プローブの脱着を行わずに校正球の測定を行いました。図5はその結果です。横軸は測定の繰り返し数で、初めての校正球の測定(ゼロ)で原点($x=0, y=0, z=0$)を設定後、測定を繰り返して校正球の中心座標 x, y, z の値の推移を見たものです。その結果、全ての座標で $\pm 0.2 \mu\text{m}$ の範囲に収まっており、本CMMの高い繰り返し性が確認されました。

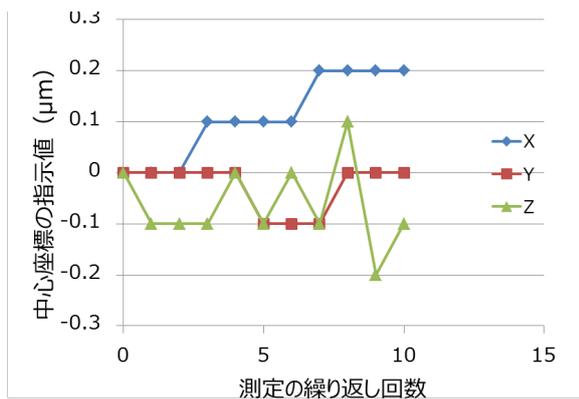


図5 プローブを脱着しないときの校正球測定結果

次に、図6はプローブの脱着・測定を10回繰り返したときの校正球中心座標の推移です。同じ測定を2回行った結果、 x, y は

$\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内であり脱着なしと同等の再現性が得られました。

その一方で、 z では+方向への変化が際だって大きくなりました。この原因として、

(1)脱着を頻繁に行うことにより電磁石がジュール熱で加熱され、(2)その熱でプローブヘッドが伸びたことでプローブのルビー球が $-z$ 方向にシフトし、(3)相対的に校正球の z 座標測定値が $+z$ 方向に推移した、と考えられます。

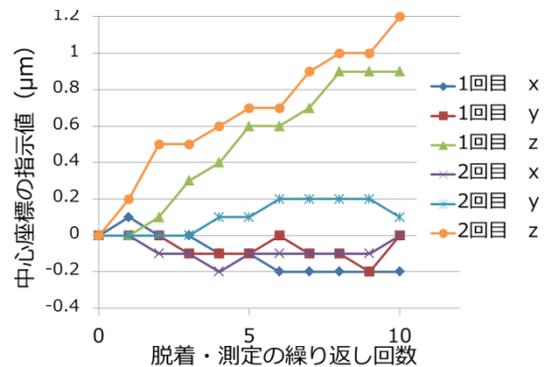


図6 プローブを脱着したときの校正球測定結果

そこで、そのまま放置すればプローブヘッドの温度が下がり、 z の値が元に戻るのではないかと考え、実験後の校正球の z 座標値の時間変化を観察しました。図7は脱着実験後の z 軸座標値の時間推移です。2回目で若干上下に振れていますが、いずれも z 座標値はゼロに近づいており、プローブ球が校正したときの位置に戻っていることがわかりました。(プローブ球は動いていないのですから、この表現は少し正しくないように思います。)

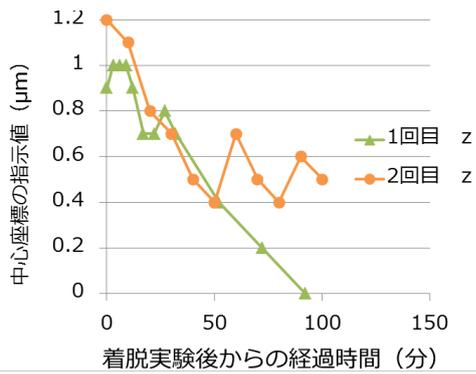


図7 実験後の校正球中心のz座標値の時間推移

5. まとめ

今回の実験で得られた知見は以下の通りです。

- 本CMMのプローブの脱着によるx, yの値の振れは $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以内に収まっており、脱着しないときと同等の再現性が得られました。

- 本CMMでは、短時間にプローブの脱着を行った場合z方向の値が大きくシフトする現象が見られました。これは熱による影響が考えられ、時間の経過で元の値に戻ることから、頻繁な脱着を行わなければx, yと同等の再現性が得られると考えられます。

スタイラスの交換ではプローブを手で長時間触らないこと、また取り付け部にゴミなどの混入を防ぐなどの対策を講じることが必要ですが、「プローブ校正は測定の直前に行う必要がある」というのは都市伝説です。現代の高性能CMMにおいては必要ありません。

第7章 アルミとルビーはラブラブ？

ルビー球スタイラスを使ったアルミ材の測定には注意が必要

秋田県産業技術センター 加藤 勝

1. はじめに

三次元測定機 (CMM) では様々な材料のワークを測定しますが、「アルミ材を測定する時はスタイラスチップに付着することがあるので注意が必要です」と聞いたことがないでしょうか。今回は、アルミニウム合金をCMMで測定した時に、本当にスタイラスチップにアルミが付着するのかという都市伝説について検証します。

2. 実験内容

2. 1 装置概要

実験で使用したCMMはCarl Zeiss社製のPRISMO5 HTG VASTで、ソフトウェアはCalypsoです。門移動型の構造で、スキヤニング測定が可能なVASTヘッド(Carl Zeiss社の商標)を有しています。ISO 10360-2に基づくCMMの指示誤差は $MPE_E = 2.7 + L/250 \mu\text{m}$ です。実験時のプロービング力(測定力)は200mNです。

2. 2 使用スタイラス

一般的なCMMのスタイラスチップには赤いルビー球が使用されています。ルビーは酸化アルミニウム(Al_2O_3 ; 通称アルミナ)の一種であることから、ワークの材質であるアルミニウムと「相性」が良いために付着すると言われています。そこでルビー製のスタイラスを使って実験を行いました。

実験に使用したスタイラス構成を図1に

示します。スタイラスチップは直径5mmのルビー球で、スタイラス皿からスタイラスチップの全プローブ長さは155mmです。このプローブに取り付けられたスタイラスを鉛直下向き(-Z方向)に取り付けて実験を行いました。



図1 使用したスタイラスの外観

2. 3 ワーク

一般的にアルミニウム合金と言うと、最もポピュラーに使用されているのが5000系のアルミニウム-マグネシウム(Al-Mg)系合金です。アルミニウムの耐食性を劣化させずに強度を上げるためマグネシウムが多く添加されており、アルミニウム合金の中では最も耐食性が良いものです。加工性にも優れているので、車両、船舶、建築用材、通信機器部品、機械部品などに幅広く用いられています。そこで、本実験のワークにはA5056棒材を用いました。ワークは直径74.7mm、

厚さ 15mmの円筒です。図2にワークと実験中の様子を示します。ワークの中心に穴を開け、CMMのベースにボルトで固定しました。



図2 ワークと実験中の様子

2. 4 実験方法

スキャン測定とポイント測定の両方を行いました。

スキャンについては、ワークの外径を50周、長さになると約 11.7 mスキャンしました。

ポイント測定については、ワークの外径を45°刻みの8ポイントの円測定を1000回実施しました。

3. 実験結果

3. 1 スキャン測定の場合

図3に顕微鏡で観察した新品の直径5mmのルビー製スタイラスチップの様子を示します。中央部に丸く見えるドーナツ状の白いものは顕微鏡のリング照明です。それがスタイラスチップに反射して映っていますが、異物付着やキズ等は見あたりません。



図3 新品のスタイラスチップ

50周のスキャンの途中で何度か止めて表面状態を目視で観察したところ、5周（約 1.1 m）スキャンを終えた時点で、既にスタイラスチップにアルミが付着している様子が確認できました。

50周の測定終了後のスタイラスチップの状態を図4に示します。スタイラスチップの赤道上にアルミが線状に付着している様子がわかります。また、赤道のみならず、赤道の上下緯度近辺にも点々とアルミが付着しているのも観察されました。

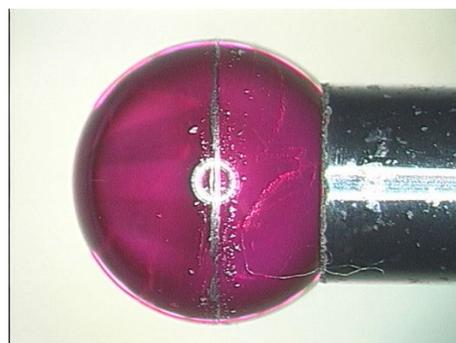


図4 50周スキャン後のスタイラスチップ

このスタイラスチップをパナソニック社製の超高精度三次元測定機 UA3P にて測定した時のプロファイル及びアルミの付着高さを図5に示します。曲率を補正して表示していますが、赤線が赤道上のアルミ付着状態のプロファイル、青線が赤道に直交方向のプ

ロファイルでアルミの付着高さを示しており、約 5 μm 程度アルミが付着していることがわかります。

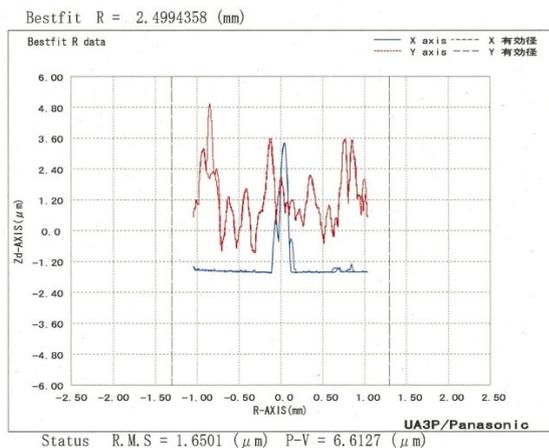


図5 アルミの付着高さ

実験終了後にこのスタイラスチップをアセトンやエタノールで洗浄してもアルミはスタイラスチップから取れませんでしたから、かなり強固に固着していると思われます。

アルミの付着は目で見てわかるほどのものですが、それに気がつかずに測定を行うと何がおこるでしょう。

スタイラスチップにアルミが付着している状態のまま、内径 44.995mm のリングゲージと CMM に付属している直径 30mm セラミックス校正球をスキャニング測定してみました。

図 6 にスキャニング測定後の真円度プロフィールを示します。左側がリングゲージ、右側が校正球です。

まずリングゲージでは、常にスタイラスチップの赤道近辺がリングゲージ内面に接触していることから、全周で凸凹のあるプロフィール形状となります。平均内径は、校正値に対して約 5 μm 小さい結果が得られ、また真円度は 8.3 μm でした。

校正球のスキャニングでは、アルミが付着しているスタイラスチップの赤道と校正球上のスキャニングする円の軌跡が傾きを持つように設定したため（図 7 参照）、両者が交差するところに凸の盛り上がりが見られます。真円度は 9.4 μm でした。前述した測定箇所のアルミの付着高さは約 5 μm でしたから、この真円度の測定結果からは、それ以上にアルミが付着していた箇所もあることがわかります。直径は校正値に対して 2.4 μm 大きくなりました。

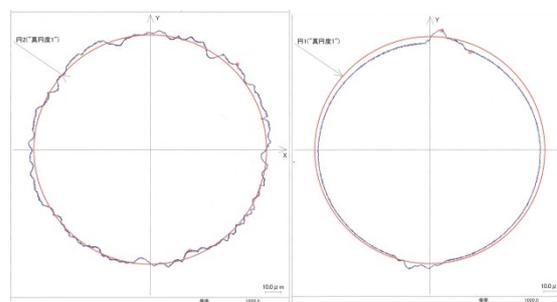


図6 スキャニング測定後の真円度プロフィール

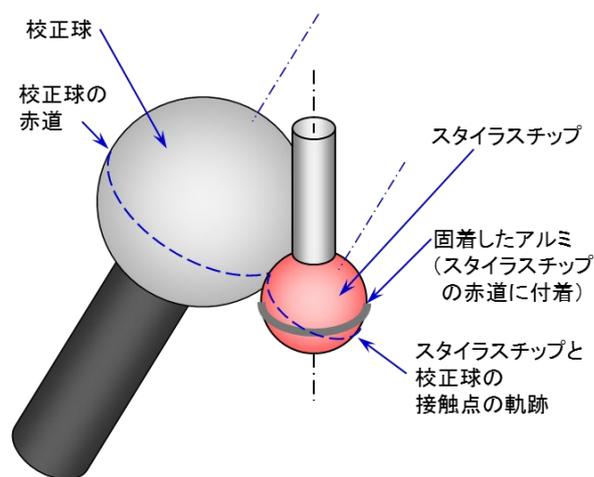


図7 校正球スキャニング測定の様子

なお、同じくアルミニウム-マグネシウム系合金である A5052 板材でもスキャニング測定の結果、スタイラスチップにアルミの付着が観察されましたが、アルミニウム-銅合

金である A2017 材（通称ジュラルミン）では、アルミの付着は見られませんでした。

3. 2 ポイント測定の場合

スキャニング測定と同様に新品のスタイラスチップを用いて A5056 材の 45°刻みによる 8 ポイントの外径測定を 1000 回行いました。

図 8 に 1000 回ポイント測定後のスタイラスチップへのアルミ付着の様子の一例を示します。反射して映っている光源の中央部にある「口」の字痕の付着が確認できました。この口の字の付着は、スタイラスチップとアルミ材の点接触において、せん断力が大きいところにアルミが付着したと考えられます。また、白色干渉顕微鏡で観察してみると（この画像を撮ったのと異なるポイントです）P-V 値で約 2.4 μ m のアルミ付着が確認できました。従って、ポイント測定でも A5056 棒材はスタイラスチップに付着することがわかりました。

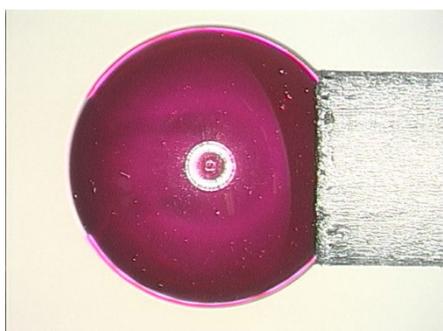


図 8 ポイント測定後のスタイラスチップの様子

図 9 に 8 点ポイント測定によるワークの外径値の測定結果（ここでは 600 回まで）を示します。測定回数が増加するにつれて、ワーク外径値が大きくなっていることがわかります。CMM の指示誤差が $2.7+L/250$ μ m のため、測定機の誤差範囲とも考えられ

ますが、スタイラスチップへのアルミの付着により、外径値が大きくなった可能性も考えられます。

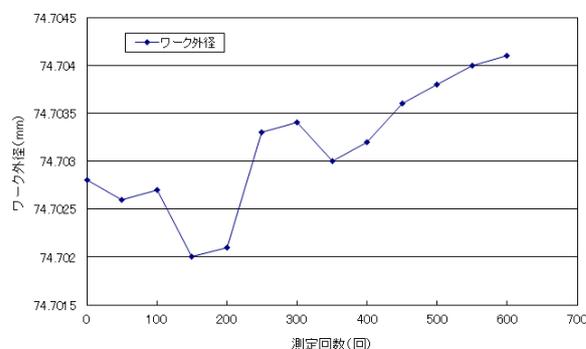


図 9 ポイント測定による外径値の変化

なお、この時のアルミ付着は、アセトンやアルコール洗浄でほぼ取ることが出来たので、スキャニング測定ほどは強固に付着していないようでした。

教訓

- ・アルミニウム-マグネシウム合金である A5056 材及び A5052 材は、スキャニング測定並びにポイント測定のいずれでも、ルビー球のスタイラスチップにアルミが付着します。
- ・スキャニング測定でのスタイラスチップへのアルミ付着は著しく、アセトンやアルコールで拭き取っても取れません。また、測定値にも大きく影響します。
- ・A2017 材（ジュラルミン）には、ルビー球スタイラスチップの使用は可能です。

以上の実験結果から、この章での課題は都市伝説ではなく真実です。

ルビー製のスタイラスでアルミ材を測定すると付着する。

第8章 お熱いのが好き？

三次元測定における温度平衡が測定精度に与える影響

福島県ハイテクプラザ 安藤久人・斎藤俊郎

1. はじめに

三次元座標測定機（CMM）を使用した寸法・形状測定で、測定誤差のもっとも大きな要因は温度によるものと考えられます。CMMのような高精度な測定機は、通常空調のきいた測定室に設置され、ほぼ一定の温度（JIS（日本工業規格）では 20℃が標準温度）に保たれています。一方、測定対象となる製品（ワーク）の加工現場の温度はまちまちで、空調されていない場合もあるのが現状です。このためワークを測定室に持ち込んだ時点では、ワークと測定機の温度差が測定誤差となって現れてきます。一般的な鋼材の熱膨張率は 11.7×10^{-6} ですから、長さ 100mm の鋼製品では温度差が 5℃あると、およそ 6 μ m の測定誤差が生じることとなります。この誤差を小さくするために、測定室に製品を持ち込んでしばらく置いてから測定する必要がありますが、どの程度の時間を置くのが望ましいのでしょうか。

もう一つ温度の影響を大きく受ける要因として、スタイラス等の温度変化によるプローブシステムの校正誤差が考えられます。CMM を使用した測定では、ワークに合わせて適切なスタイラスを選択してプローブシステムに組み付けた後、校正を行います。組み付けを行った直後は、スタイラスなどが手の温度で温められているため、こちらも時間をおいて室温になじませてから校正を行わなくてはなりません。

そこで、ここでは測定室内に持ち込んだワークや、手で温められたスタイラスの寸法や温度がどのように変化するのかを調べてみました。

2. 検証内容

2. 1. 測定機

検証に用いた測定機は、門移動型の汎用機（図 1）で、基本仕様は表 1 のとおりです。また測定機は、室温 20 \pm 1℃、湿度 55 \pm 10%の精密測定室に設置されています。



図1 CNC三次元座標測定機外観

表1 CMMの概要

メーカー名	Carl Zeiss
型式	UPMC550 CARAT
解析ソフト	UMESS(Linux)
測定精度 (μ m)	U1= (0.5+L/900) U3= (0.8+L/600) (L=測定長さ mm)
測定範囲 (mm)	X550×Y500×Z450
設置環境	20 \pm 1℃、55 \pm 10%

2. 2. ワークの温度変化の検証方法

測定室内に持ち込んだワークの寸法変化を調べるため、10mm のゲージブロックが等間隔に配置されたチェックマスタ（株）ミットヨ製、HMC-600）を使用して実験を行いました。温度 35℃、湿度 55% に設定した恒温恒湿槽内にチェックマスタを 1 日程度保管して十分に温度慣らしを行ったのち、三次元座標測定機上に移動・設置し、その直後から 15～30 分ごとに長さの測定を行いました。チェックマスタは専用の治具を使用して測定機上に設置しています（図 2）。



図 2 チェックマスタ測定状況

チェックマスタの長さは、端面を基準として 100、200、300、400、500、600mm の位置で測定し、20℃の状態の長さ(基準値)との差を求めました。また、参考としてチェックマスタの中央部と端部付近の 2 か所の温度変化を温湿度データ収録装置（神栄(株)製 TRH-DM3L）で測定しました。

2. 3. プローブコンフィグレーションの温度変化

検証に使用した装置ではワークおよび測定内

容に合わせてスタイラス、アダプタプレート、エクステンション等を選択し、プローブコンフィグレーションの組み立てを行います。その際、スタイラス等を手で取り扱うため、体温によって温度が上昇します。ここではプローブコンフィグレーションの中でもっとも温度の影響を受けやすいと考えられるエクステンションについて、温度と長さの変化を調べました。メーカーではエクステンションの材質としてアルミニウム、チタン、カーボンファイバー、鋼の 4 種類を用意しており、それぞれの材質の長さ 100mm のエクステンションを使用しました（図 3、表 3）。



図 3 エクステンション外観

(左から、アルミニウム、チタン、カーボンファイバー、鋼)

表 2 各エクステンションの寸法・重量と物性値

	アルミニウム	チタン	カーボンファイバー	鋼
直径×長さ (mm)	φ20× 100	φ18× 100	φ20× 100	φ11× 100
重量(g)	48.7	49.3	33.5	72.5
ヤング率 (Gpa)	69	106	-	192
線膨張係 数	23× 10 ⁻⁶	8.4× 10 ⁻⁶	-0.4× 10 ⁻⁶	12.5× 10 ⁻⁶
比熱 (J/kg·K)	880	520	-	460

熱伝導度 (W/m℃)	203	17	-	62
----------------	-----	----	---	----

※物性値は各材料の代表値

検証では、アダプタプレートにエクステンション、チタン製キューブを介してφ5mmのスタイラスをXYZの3方向に取り付け、Z軸方向のスタイラス球中心を原点として、エクステンション部加熱前の各スタイラス球中心座標に対する加熱後の変位を測定しました(図4)。



図4 フローブコンビネーションと加熱用電熱線

エクステンションの加熱は、電熱線を巻き付けて直流定電圧定電流電源で通電し(4.5~6W程度)、およそ35℃で5分間保持したのち、電熱線を取り外して自然冷却しました。スタイラス球中心座標の測定は、加熱前の安定状態(組立後、測定環境で半日程度放置)を基準値として、35℃保持状態と電熱線を取り外した直後から5分間隔で行いました。

3. 検証結果

3. 1. ワークの温度変化

図5に各測定点における基準値との長さの差の時間変化、図6に各測定点間の長さの差の時間変化、図7にワークの温度変化を示します。

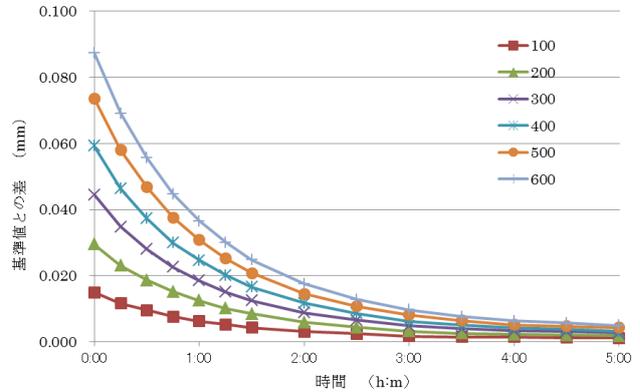


図5 基準値との長さの差の時間変化

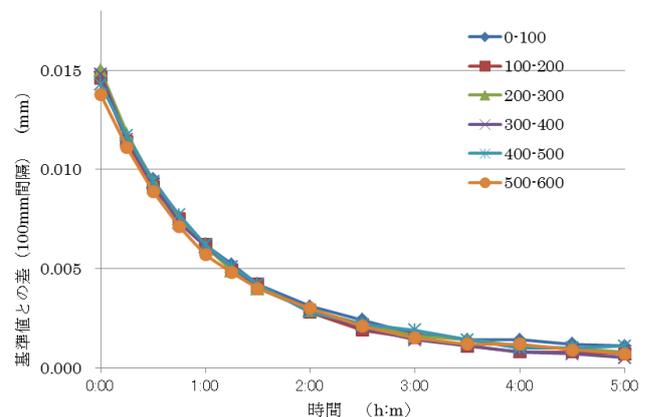


図6 測定点間の長さ差の時間変化

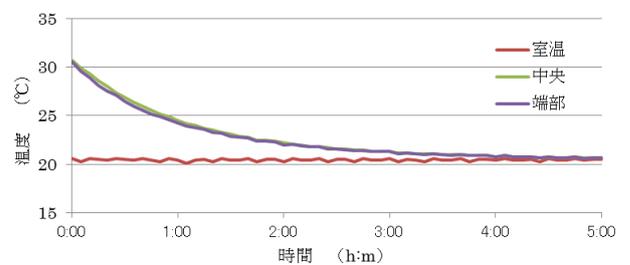


図7 ワークの温度変化

図 5 をみると、測定開始時の基準値からの差は 600mm の位置で 0.087mm で、時間の経過にもなって指数的に減少していき、5 時間後に 0.005mm 程度になっています。図 7 のワークの温度も同様に測定開始時の 30.7℃から低下していき、4～5 時間後に室温とほぼ同程度の 20.6℃になっています。また、図 6 の測定点間の長さの差については、いずれの位置でもほぼ同じ値で推移しており、図 7 のワークの温度も中央部と端部がほぼ同じ値で推移していることから、ワーク全体がほぼ均一に温度変化していることがわかります。

これらの結果から、チェックマスタと同程度のサイズのワークの場合、ワークを測定室に搬入した後、温度が平衡状態になるまでは長時間の温度らしが必要であることがわかりました。

3. 2. プローブコンフィグレーションの温度変化

図 8 はアルミニウム製エクステンションを使用したプローブコンフィグレーションの Z 軸方向スタイラス球中心の X,Y,Z 軸方向の各変位の時間変化、図 9 は各材料のエクステンションにおける Z 軸方向スタイラスの Z 軸方向変位の時間変化です。

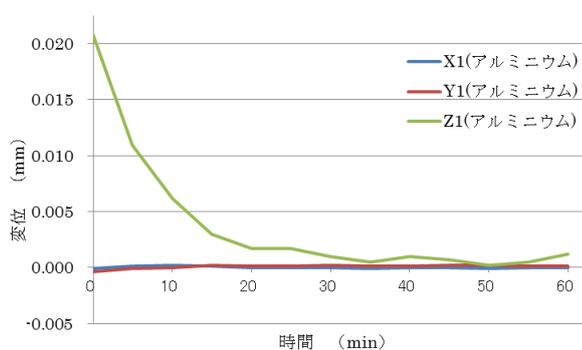


図 8 球中心変位の時間変化

(アルミニウム製エクステンション、Z 軸方向スタイラス)

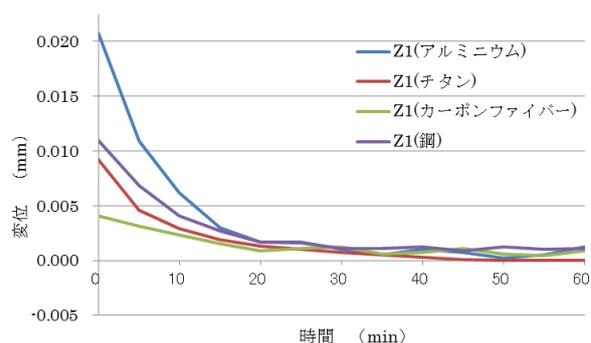


図 9 球中心変位の時間変化

(材料別、Z 軸方向スタイラスの Z 軸方向変位)

図 8 をみると、エクステンションの加熱により Z 軸方向に 0.020mm 程度の変位が生じ、電熱線を取り外した後はワークと同様、時間経過にはほぼ反比例して変位が減少していき、30～40 分後に安定しています。図 9 のエクステンションの材質別の変位については、各材質ともほぼ線膨張係数に応じた変位が生じており、いずれもアルミニウム製エクステンションと同様に変位が安定するまで 30～40 分程度かかっていることがわかります。なお、線膨張係数がほぼ 0 であるカーボンファイバー製エクステンションを使用したプローブコンフィグレーションではチタンの半分程度の変位が生じていますが、これはエクステンションからアダプタプレートやキューブに熱が伝わって生じたものと考えられます。

また図には示していませんが、スタイラス球の中心座標に数 μm 程度の Z 軸周りの回転移動や X・Y 方向の平行移動が生じ、温度が安定した後も変位が残っている場合があることが確認されました。これはスタイラスの温度変化によってねじ締結部に微小なずれが生じたことなどが原因と考えられます。

4. 結論

以上、三次元座標測定におけるワークと測定環境の温度差による測定誤差、スタイラス等の温度変化によるプローブシステムの校正誤差について実験を行った結果、以下のことがわかりました。

- ・チェックマスタを用いたワークの温度変化に関する実験の結果、ワークを測定環境へ搬入した後、温度が平衡状態になるまで、5 時間程度要す

ることがわかりました。

- ・プローブコンビネーション組み立て後、温度平衡に達するまで 30～40 分程度かかるため、プローブシステムの校正はそれ以降に実施するのが望ましいことがわかりました。また、エクステンションの材質では、カーボンファイバーが最も温度変化の影響が小さいことが確認できました。

第9章 触るところで変わります

測定点配置が結果に与える影響 測定誤差≠CMMの精度

産業技術総合研究所

1. はじめに

測定ワークに空けられた穴を CMM で測定する例を考えてみます。測定すべき幾何形体は、直径、真円度、中心位置などです。

何の指示も受けずに単に測定して下さいと言われたら、どんなパートプログラムを組みますか。普通は円の全周にわたって等間隔に測定点を配置します。測定点数は、測定にかけてよい時間や費用で決まり、例えば8点くらい測定することがよく行われています。

ところが何らかの理由で全周にわたって測定点を配置できないこともあります。別の部品がプローブに干渉する、そもそも部品が半周分しかない(図1、図2)、場合などです。このような場合に測定結果がどのような影響を受けるかが今回の課題です。

例：大同メタル工業株式会社。“エンジン用軸受-半割メタル-”
<https://www.daidometal.com/jp/product/engine-bearings-half-shell-bearings-automotive/>
(アクセス日:2022.10.10)

図1 部品が半周しかない事例(その1)

例：モーターファン。“内燃機関超基礎講座/クランクシャフトの構造をまとめてみた：構造と各部の役割”
<https://car.motor-fan.jp/tech/10018404>
(アクセス日:2022.10.10)

図2 部品が半周しかない事例(その2)

2. シミュレーション1：測定点数による効果

まずはコンピュータで測定のシミュレーションをします。それぞれの測定点には、意図的に誤差を与えて測定結果をずらしめます。誤差は乱数で発生させ、その大きさは 2σ が装置の最大許容プロービング誤差(MPE)になるようにします。

測定点数を5とし、全周にわたって等間隔に測定点を配置した場合の測定結果が図3です。5つの測定点から最小二乗円を計算し、円と中心位置をプロットします。100回のシミュレーションで得られた円と中心位置を重ねて描いたものが図3です。重なっ

た円の幅と中心のばらつきはいずれも $0.15 \sim 0.2 \mu\text{m}$ 程度です。また X 軸と Y 軸いずれの方向にも同程度の誤差が現れています。この測定機のプロービング誤差は $0.5 \mu\text{m}$ 程度です。5つの測定点を平均化する効果により、円の直径や中心位置がプロービング誤差より小さくなることが確認できます。

では測定点数を増やすとさらに誤差は小さくなるでしょうか。測定点数を 20 点にした結果が図 4 です。誤差は $0.1 \mu\text{m}$ 以下に収まっていることから、測定点数を増やすと誤差を小さくすることが可能であることがわかります。ただし実際には測定点数をどんどん大きくしていてもある程度以上には誤差は小さくなりませんし、測定時間が長くなることによる影響からかえって誤差が大きくなる恐れもあります。統計理論によると測定点数が 4 倍になると、得られる結果のばらつきはルート 4 分の 1、つまり半分になることが予想できます。図 3 と図 4 の結果はほぼ半分になっており、理論が裏付けられました。

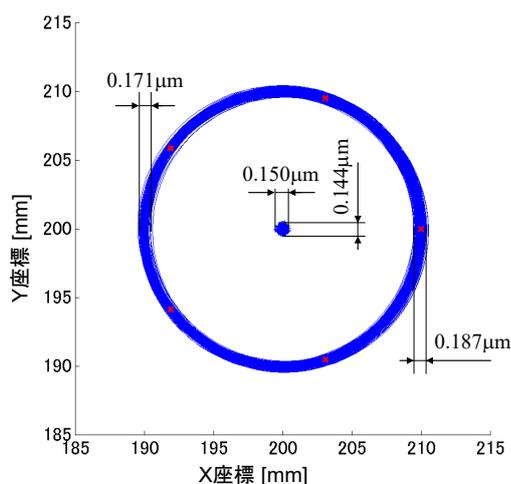


図 3 5点均等配置による円測定

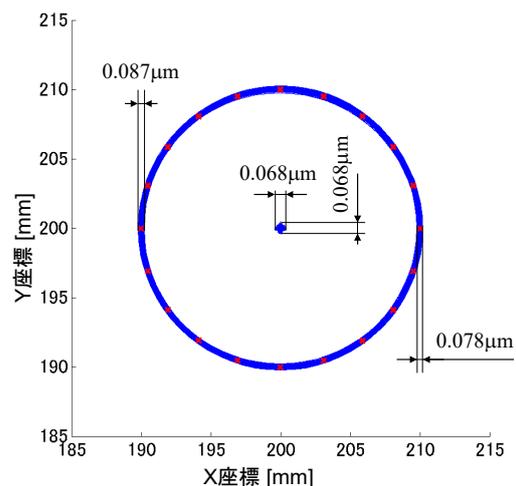


図 4 20点均等配置による円測定

3. シミュレーション 2 : 測定点配置による効果

では次に、測定点の分布を中心角 90 度の範囲に制限した場合を見てみます。図 5 に示すように、円と中心位置は X 方向にばらつきます。その大きさは $1.6 \mu\text{m}$ にも達しており、MPE とはかけ離れた数字です。

Y 方向はそれほどでもないのに、X 方向に大きくぶれるのには訳があります。中心角 90 度の場合の測定点は Y 方向には広がっているのに、X 方向にはほとんど広がっていません。広い範囲を測定すれば、それに関係する測定量（この場合は Y 座標）は高い精度で決定でき、逆もまたそうなります。

では測定点数を増やせば誤差は小さくなるでしょうか。そこで測定点数を 20 点にした結果が図 6 です。統計理論に従いいずれの値も半分程度になっていますが、それでも均等配置の場合に比べて遙かに大きいことには変わりありません。さらに測定点を増していけばシミュレーション上はさらに誤差が小さくなるでしょう。しかしながら実際の測定では時間がかかりすぎますし、長時間の測定中に装置がドリフトすることによりあ

る程度以上は誤差が以上小さくならないことが予想できます。

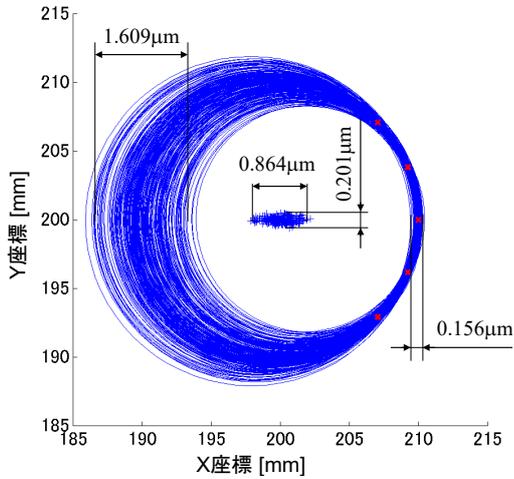


図 5 偏った 5 点配置による円測定

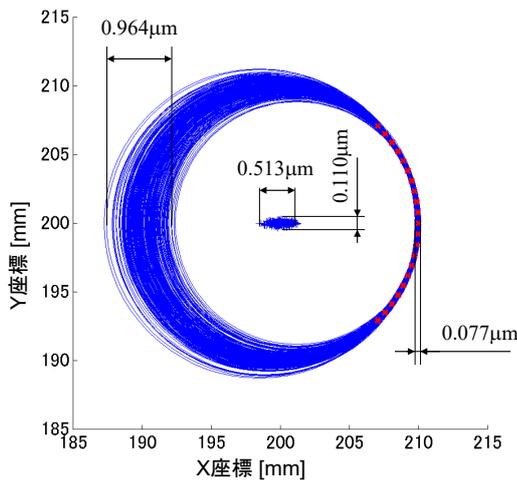


図 6 偏った 20 点配置による円測定

このように測定点数をいくつにするか、どのような配置にするかなどの条件設定のことを「測定戦略」と呼びます。このシミュレーションから、測定戦略が悪いとどうやってもいい測定結果が得られないことがわかりました。図 7(a)のように偏った測定点配置を採用してしまうと、均等に測定点を配置した図 7(b)に比べて、この図の水平方向に測定誤差が大幅に悪化してしまうのです。

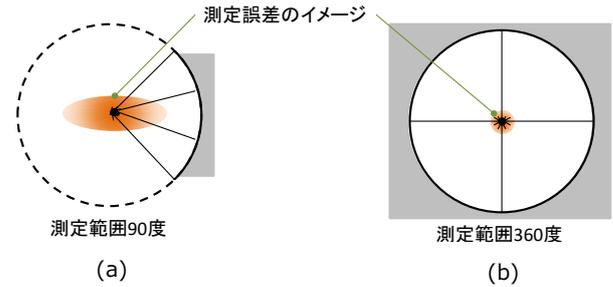


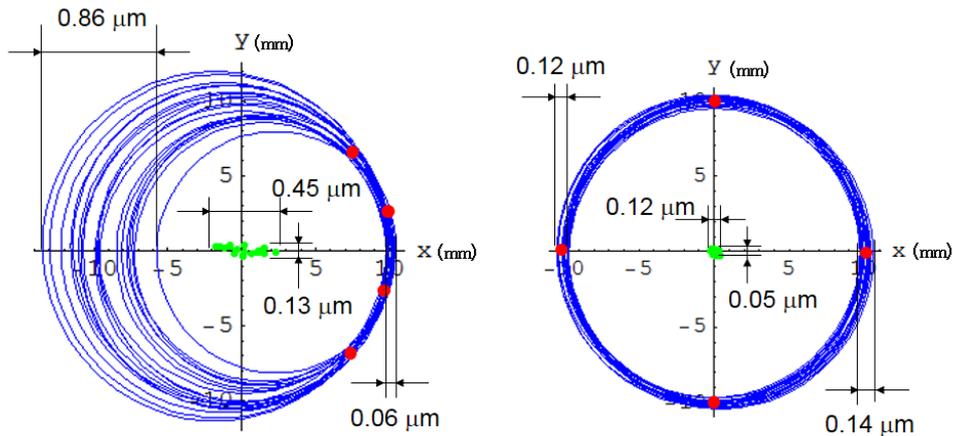
図 7 偏った測定点配置による測定誤差の拡大

4. 実験

では、実際にどの程度の誤差が現れるのか、実験で確かめてみます。CMM はライツ社製の PMM12106 型機 (MPE_P が 0.5 μm 程度) を使用しました。

図 8 に、直径 20 mm の穴を、4 点の測定点で 20 回測定した結果を示します。図 8(a)には、4 点の測定点を 90 度の角度範囲に配置した結果を、図 8(b)には、360 度の角度範囲に配置した結果を示しました。測定点範囲が 90 度の場合、円中心(緑点)の x 座標は 0.45 μm ばらつき、円は 0.86 μm もばらつきましたが、Y 軸方向には大きな誤差が発生していません。一方、測定点を 360 度の範囲に配置した場合は、x 方向にも y 方向にも均等に、0.1 μm 程度のばらつきしか見られませんでした。これらの結果はシミュレーションが正しいことを裏付けています。

また平均による効果は大きく、円の中心や直径は MPE よりも小さい誤差で測定することが可能であることもわかりました。ただしここでは触れませんでした。真円度は一点毎の不確かさがそのまま影響するので、測定点を増やしても誤差が小さくなることはありません。



(a) 4点の測定点を90度の範囲に配置 (偏差を10,000倍に拡大) (b) 4点の測定点を360度の範囲に配置 (偏差を10,000倍に拡大)

図8 偏った測定点配置による実験結果

5. 考察

ここでこれまでに得られた知見をまとめます。

一つ目は、測定戦略に測定結果は左右されるということです。パートプログラムは、必要な精度やかけるべきコストを考慮しつつ組む必要があります。CMMは高機能であるけれども、使い方が難しい装置と言われる所以です。コンピュータのプログラミングにおいて間違っただけのコードを書くと正しく動作しませんが、下手な人が書くと効率が悪いけれども正しく動作します。それに対してCMMのプログラムは、計測の知識が十分でない人が書くと、見かけ上測定はできるけれども正しくない答えが得られる可能性があります。

また測定点数を増やすことにより、測定誤差を統計理論に従って低減できることもわかりました。

そしてもう一つの大きな知見は、測定誤差はCMMのカタログに書かれている最大許容誤差と同じではなく、それよりも遙かに大きな誤差が得られることもあるということです。カタログに書かれているのは球を測っ

たときのプロービング誤差とブロックゲージを測ったときの長さ測定誤差のみです。それ以外の形体については何も言っておらず、その不確かさは測定対象や測定戦略に左右されます。個々の測定作業に固有の不確かさが得られるため task specific uncertainty と呼び、装置自身の不確かさと区別しています。

(この文章中では不確かさという用語ではなく誤差という用語を使っています。この文章の意図を説明するためにはわかりにくい不確かさを使う必要がない、CMMの業界では誤差が一般的、数学的に正しい形状との差を議論している、などの理由によります。)

教訓

- ・ 測定誤差は測定戦略に左右されます。
- ・ 測定誤差と装置のスペックは同じではありません。

CMM の都市伝説

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 27 年 11 月 19 日

本冊子「CMM の都市伝説」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。)