

An illustration of a young girl with short black hair and large, vibrant green eyes. She is wearing a dark blue or black coat over a white collared shirt with a small yellow crown-like emblem. She is holding a black hat with a red and white circular detail. The background is a dark, textured blue-purple gradient.

CMMの 都市伝説

Coordinate Measuring Machine

vol.5

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 重たくても大丈夫？	2
第3章 相手を見て戦略を立てましょう	6
第4章 綺麗な円とは限りません	10
第5章 遠くへ行かないで	14
第6章 条件次第で？	18
第7章 ホントに代わりになってるの？	22

第1章 はじめに

「CMMの都市伝説」第5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。

これまで接触式CMMから始まって、光スキャナなど新しい技術についても取り上げてきました。さらに幾何偏差の考え方や取り扱いなどテーマはどんどん広がっています。

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えます

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 重たくても大丈夫？

偏荷重が測定値に及ぼす影響

熊本県産業技術センター 川村浩二・村井満

1. はじめに

熊本県産業技術センター（以下 当センター）では、生産技術の高度化・効率化に向けた様々な取り組みを行っています。その一つに、高性能および高品質なものを製作する上で欠くことのできない、計測技術の高度化に取り組んでいます。計測技術の中で、三次元測定機（Coordinate Measuring Machine：以下 CMM）を利用した寸法・形状測定には、地域企業から数多くの依頼があります。その被測定物の中には、重量が重いものも存在します。しかし、CMMの定盤上に載せて測定した際に、測定結果がカタログスペックどおりの精度を保持できているか検証した技術資料はほとんど見られません。

本章では CMM の定盤上に重りを載せて、配置を変えながら偏荷重を与えた際に、荷重が測定値に及ぼす影響を検証することにしました。

2. 装置概要

使用した CMM の概要を表 1 に、外観を図 1 に示します。本測定に使用したプローブはレニショー社製 SP25M で、スタイラスは当センター依頼試験で頻繁に使用する直径 5 mm、長さ 31 mm を使用しました。CMM の設置環境は、 20 ± 1 °C、 50 ± 10 % の恒温室で、測定期間中の温度変化は

0.35 °C（最高 19.91 °C、最低 19.56 °C）でした。

表 1 CMM の概要

メーカー名	株式会社ミットヨ
型式	LEGEX9106
構造	門固定テーブル移動型
測定範囲 (X,Y,Z)	900×1000×600 mm
最大積載質量	800 kg
指示精度	$MPE_E = 0.30 + L/1000 \mu\text{m}$
プロービング誤差	$MPE_P = 0.6 \mu\text{m}$ $MPE_{THP} = 1.2 \mu\text{m}$

3. 検証方法

測定対象物は、φ200 mm の鋼製リングゲージを使用しました。リングゲージの精度は、寸法許容差 $\pm 20 \mu\text{m}$ 、真円度 $2.5 \mu\text{m}$ 以内です。また、固定方法は定盤上にリングゲージを設置して側面 4 カ所を磁石で固定しました。

実験は、測定速度 3, 10, 200 mm/s の 3 条件のスキニング測定を行い、0.5 mm



図 1 使用した CMM の外観

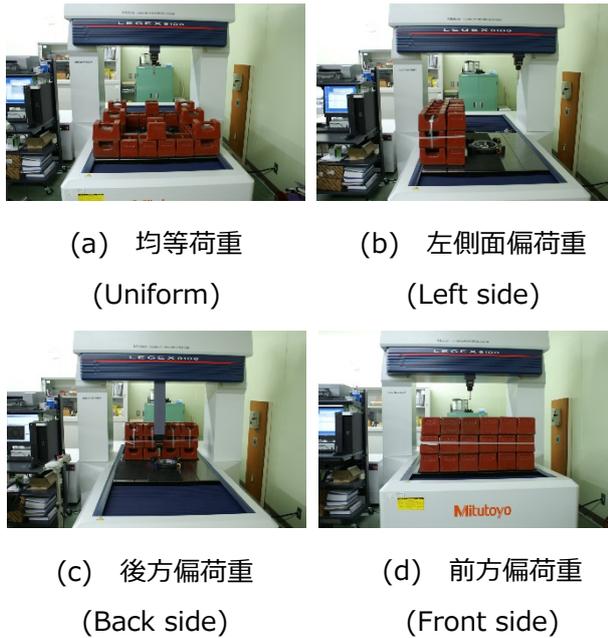


図 2 重りの設置状況

ピッチで 5 回繰り返し測定した結果を基に、直径と真円度の平均値を評価しました。また、重りを載せていない場合と図 2 に示すような 4 つのポジションに 1 個 20 kg の重りを合計 30 個載せて、600 kg の荷重をかけた場合の 5 つの条件について、重りによる偏荷重が測定値に及ぼす影響を検証しました。

実験を行う前に、当センター所有の CMM の内部構造を調べたところ、軸ガイド部は各軸ともエアベアリングで、定盤は図 3 に示すように両端 2 本の Y 軸ガイド部で支える構造になっていました。

4. 実験結果

4. 1 偏荷重が測定値に及ぼす影響(1)

まず、重りを載せていない場合、図 2 (a) に示す均等に載せた場合、図 2 (b) に示すガイド部上の左側面に載せた場合の 3 条件の実験を行いました。なお、測定時の座標系は、重りを載せる前に作成したものをすべての条件で使用しました。リングゲージ直径と重りの設置状況の関係を図 4 に示します。図



図 3 軸ガイド部の外観

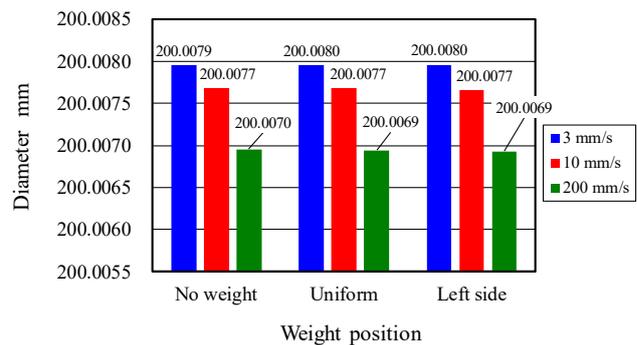


図 4 直径と重りの設置状況の関係

より、測定速度を 3 mm/s から 200 mm/s に変化させると、重りの設置状況の 3 条件すべてで直径が 1 μm 程度小さくなりました。スキャニング測定において、測定速度が測定値に大きな影響を与えることは、これまでの報告書で示されているため、ここでは確認程度に留めます。また、重りの設置状況を変化させた際の直径の最大差は 0.1 μm でした。従って、図 4 に示す 3 条件において、重りの設置状況を変化させても、直径の測定結果に及ぼす影響は小さいことがわかりました。

リングゲージ真円度と重りの設置状況の関係を図 5 に示します。図より、測定速度を 3 mm/s から 200 mm/s に変化させると、重りの設置状況の 3 条件すべてで真円度が 1 μm 程度大きくなることがわかりました。また、重りの設置状況を変化させた際の真円度の最大差は 0.1 μm 以内でした。従

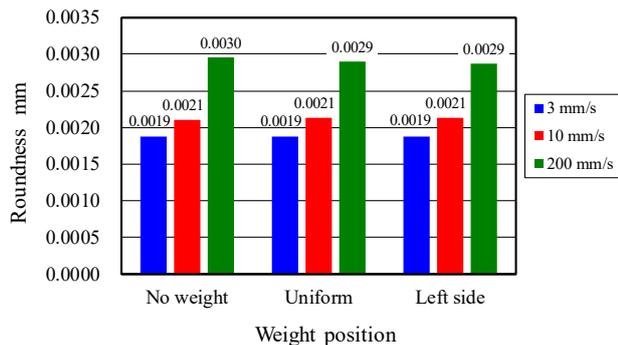


図5 真円度と重りの設置状況の関係

って、重りの設置状況を変化させても、真円度の測定結果に及ぼす影響は小さく、CMMの指示精度以下の値であることがわかりました。

4. 2 偏荷重が測定値に及ぼす影響(2)

次に、Y軸ガイド部と直角方向に重りを載せた場合の検証実験を行いました。重りを載せていない場合、図2(c)に示す後方に載せた場合、図2(d)に示す前方に載せた場合の3条件の測定を実施しました。リングゲージ直径と重りの設置状況の関係を図6に示します。図より、測定速度が3, 10 mm/sの時、重りを載せていない場合と重りを前方に載せた場合を比較すると最大で直径が0.4 μm小さくなりました。つまり、Y軸ガイド部と直角方向に重りを載せると、直径の測定結果にわずかに影響を与えることがわかりました。

リングゲージ真円度と重りの設置状況の関係を図7に示します。図より、測定速度の3条件において、重りの配置状況を変化させても、真円度の測定結果に大きな影響を及ぼすことはありませんでした。これらの配置における真円度の最大差は0.2 μmであり、CMMの指示精度以下の値であることがわかりました。

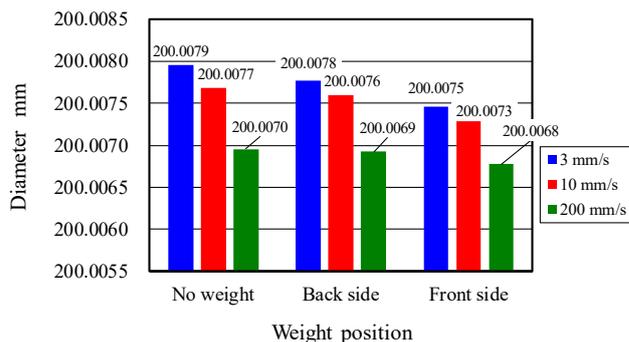


図6 直径と重りの設置状況の関係

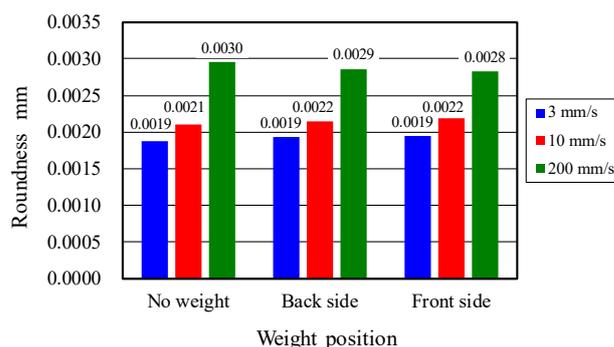


図7 真円度と重りの設置状況の関係

5. 考察

重りを載せていない場合と図2(d)に示す前方に乗せた場合を比較すると、図6に示したとおり最大で直径が0.4 μm小さくなりました。そこで、荷重によるCMMの傾きを検証しました。重りを載せたときの定盤挙動モデルを図8に示します。定盤のみが重り

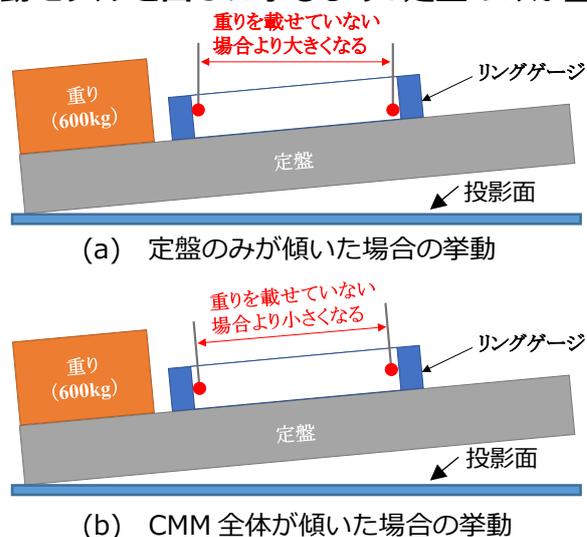
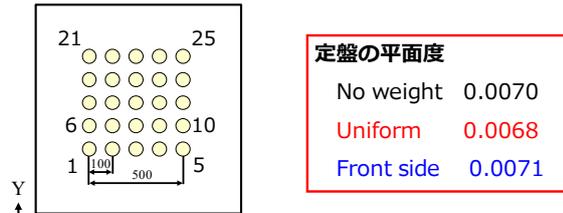


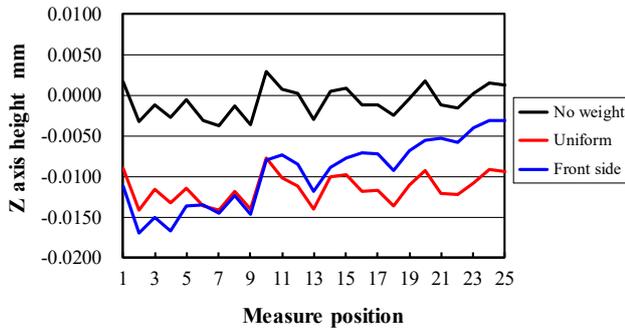
図8 重りを載せた時の定盤の挙動モデル



(a) 測定位置

定盤の平面度	
No weight	0.0070
Uniform	0.0068
Front side	0.0071

(c) 定盤の平面度



(b) 定盤のZ軸高さとの測定位置の関係

図9 重りを有無による定盤の挙動によって傾いたのであれば、図8(a)に示すとおり傾斜したリングゲージを測定することになり、直径は重りを載せていない場合より大きくなると考えられます。

一方、図8(b)に示すようにCMMが全体的に傾いた場合、直径は重りを載せていない場合より小さくなると考えられます。前方に重りを載せてリングゲージ直径が $0.4\ \mu\text{m}$ 小さくなるには、計算上約 0.1° の傾きが必要です。そこで、重りを載せていない場合、均等に載せた場合および前方に載せた場合の定盤の傾きを測定しました。測定は、図9(a)に示すように定盤上の500 mm角を100 mmピッチで25点測定しました。測定結果を図9(b)に示します。横軸は測定位置を示し、縦軸は重りを載せていない場合の25点平均平面からの差分を示します。重りを載せていない場合と均等に載せた場合の結果を比較すると、Z軸の座標値が $10\ \mu\text{m}$ 程度低くなります。また、重りを前方に載せた時の平面の傾きは、 0.0012° でした。こ



図10 CMM全体の挙動

のことから、定盤の傾きが直径の小さくなる主要因とは考えられません。なお、この時に定盤のたわみがないか確認するために平面度も測定しましたが、図9(c)に示すように3条件で定盤の平面度に大きな違いはありませんでした。

最後に、CMM全体を支えている除振台の影響を検証しました。当センターのCMMは、前方1カ所と後方2カ所に配置された除振台で支持されています。前方に重りをのせた場合の除振台の影響を調査するため、図10に示すように電気マイクロメータでCMMの前方下面の挙動を測定しました。重りを前方に載せた状態で、定盤をY軸の前後方向に移動すると、CMM前方下面のZ軸高さが $100\ \mu\text{m}$ 変化しました。除振台の全体の傾きが影響した可能性があります。

教訓

- ・ 600 kgの偏荷重でも、CMMカタログスペックの保証精度範囲内でした。
- ・ 重量物を高精度に測定するには、定盤上で均等荷重になるよう配置すると良いです。

第3章 相手を見て戦略を立てましょう

球測定における形状精度と測定点数の関係

(地独) 鳥取県産業技術センター 吉田裕亮

1. はじめに

3Dプリンタの急速な普及により試作開発の環境は大きく変わりつつあり、各都道府県に設置されている多くの公設試験研究機関に導入され、形状評価、機能評価、組み立て用治具と幅広い目的で活用されています。

また、デジタルデータを活用して、設計・製造・評価・改善を回すことにより生産性を向上する、クローズドループエンジニアリングに対する期待も高まっています。

これらの背景から、3Dプリンタと3Dスキャナ連携強化を図るとともに、これらに関する知見に基づきクローズドループエンジニアリングの高度化を目指すため、産総研を中心とした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」が平成27年度より実施され、46の公設試験研究機関や19のオブザーバ企業が参加してきました。

平成27年度には、コーナーに球を、球と球の間に円柱と直方体を配置した図1に示す形状の器物を3Dプリンタで作成し、3DスキャナおよびCMMにより形状を計測し、造形精度の検証を行いました。

本プロジェクトにおける球測定は、JIS B7440-5(2013) 6.2.4.4項に基づき行われましたが、造形精度評価器物のような表面性

状が悪く、形状精度も悪い被測定物に対し、必要十分な測定点数であるかは検証されませんでした。

そこで、今回は球測定に着目し、繰り返し精度と測定点数の関係が形状精度に与える影響について検証しました。

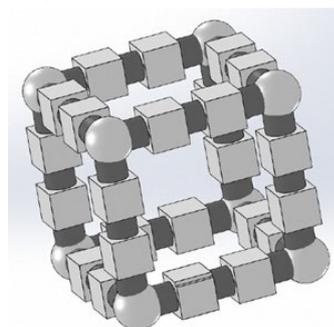


図1 造形精度評価用器物

2. 実験方法

被測定物として、図2に示す直径が約30mmの検査用標準球と、3Dプリンタで造形した球（以下、造形球）の2種類を用いました。造形球の造形概要を表1に示します。また、検証に使用したCMMの外観を図3に、仕様を表2にそれぞれ示します。



図2 被測定物

表1 造形概要

3Dプリンタ	ProJet5500X (3DSYSTEMS社製)
積層ピッチ	0.016 mm
モデル材料	CR-WT
サポート除去方法	70℃恒温槽 24h放置



図3 CMMの外観

表2 CMMの仕様

メーカー	ZEISS
型式	UPMC550 CARAT
プローブヘッド	VAST
指示精度	0.5+L/1000 μm L: 測定長 (mm)
スタイラスチップ径	φ8 mm
スタイラス軸径	φ6 mm
スタイラス軸長	86 mm
測定圧	100 mN
プロービングダイナミクス	100 %
測定室環境	室温 20℃

JIS B7440-5(2013) 6.2.4.4 項では、検査用標準球を用いてプロービングシステムを検査する方法を規定しています。測定点は、検査用標準球の表面を少なくとも半球をカバーする範囲の25点とし、図4に示す極の1点と赤道上の8点を含む、次の目標点配置が望ましいとされています。

そこで、今回の検証ではこの25点の測定点を基準とし、表3に示す通り4ポイントずつ増減させた11パターンの測定条件につ

いて測定を行いました。測定パターンを決定するにあたり、極から90°の位置にある赤道上の測定点数を最優先し、45°、67.5°、22.5°の順に優先して測定点数を決定しました。

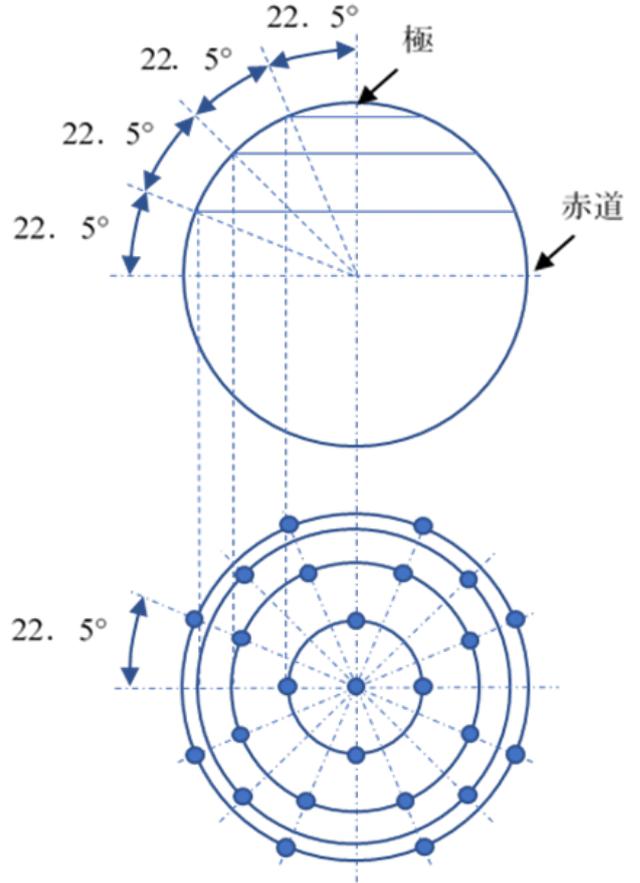


図4 25点の目標点配置

表3 測定点数

測定点数	極	極から			
		22.5°	45°	67.5°	90°
5	1	0	0	0	4
9	1	0	4	0	4
13	1	0	4	4	4
17	1	4	4	4	4
21	1	4	4	4	8
25	1	4	8	4	8
29	1	4	8	8	8
33	1	8	8	8	8
37	1	4	8	8	16
45	1	4	16	8	16
49	1	8	16	8	16

被測定物は、図5に示すように三爪チャックで軸を固定しました。作成した測定プログラムにて3回連続で自動測定を行い、形状偏差および球直径を求めました。さらに、造形球は形状精度が悪いことから、測定位置が異なることによるばらつきを考慮するため、固定軸を回転させ再アライメント後に測定することを7回繰り返し、合計10回の測定を行いました。

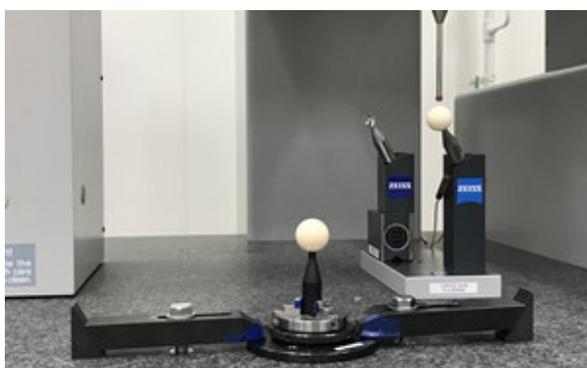


図5 被測定物の固定方法

3. 実験結果1：測定結果

検査用標準球の測定結果を図6に、造形球の測定結果を図7に示します。3回連続で自動測定を行った結果を●で示し、固定軸を回転させ再アライメント後に測定した結果を▲で示しています。

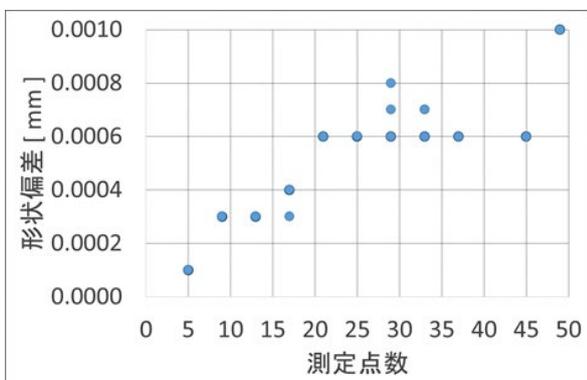


図6(a) 検査用標準球の測定結果（形状偏差）

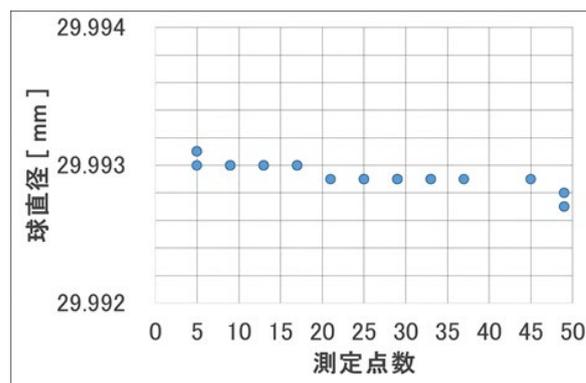


図6(b) 検査用標準球の測定結果（球直径）

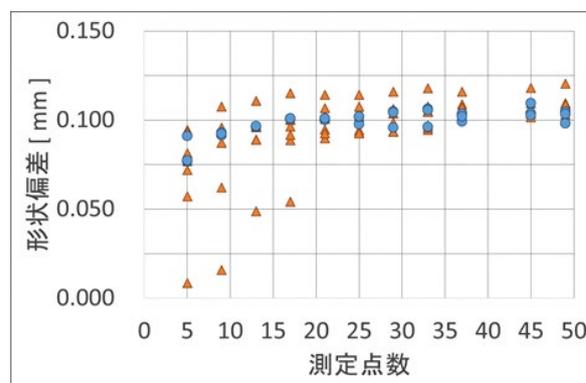


図7(a) 造形球の測定結果（形状偏差）

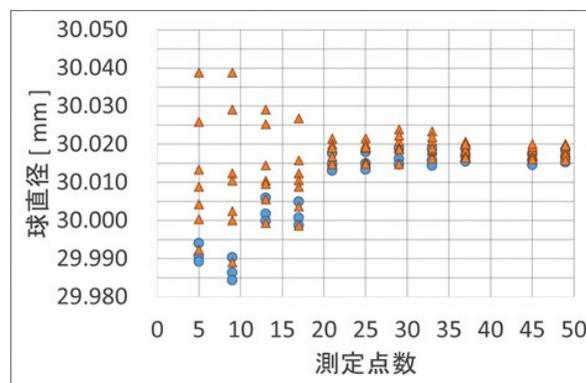


図7(b) 造形球の測定結果（球直径）

検査用標準球の測定結果において、形状偏差は測定点数が増加するにつれ大きくなりますが、その範囲は1 μm以下でした。また、球直径は測定点数が増加するにつれ小さくなりますが、その範囲は0.5 μm以下でした。造形球の測定結果において、被測定物を移動せず連続で測定した場合は、形状偏差、球直径ともに各測定点数によるばらつきは

小さく 10 μm 以下でした。しかしながら、固定軸を回転させ再アライメントを行った場合、測定点数が 5 点、10 点と少ない時には形状偏差、球直径ともに結果が大きくばらつきました。測定点数が増加すると、ばらつき幅は小さくなり、測定点数が 21 点以上になると測定結果が安定し、再アライメント行った場合でも高い繰り返し精度を得ることができました。

4. 実験結果 2 : 追加測定

造形球の測定結果から 21 点測定に分岐点があったことから、表 4 に示す通り全測定点数は 21 点に固定し、8 点測定的位置を変えて追加測定を行いました。測定結果を図 8 に示します。これより、測定結果 No.4 が最もばらつきの少ない結果となりました。

表 4 測定点数

測定 No.	極	極から			
		22.5°	45°	67.5°	90°
1	1	8	4	4	4
2	1	4	8	4	4
3	1	4	4	8	4
4	1	4	4	4	8

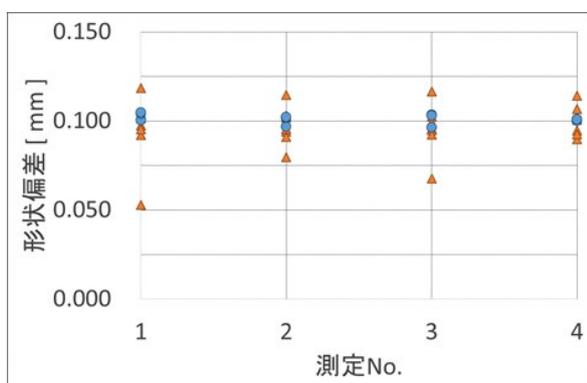


図 8(a) 追加測定結果 (形状偏差)

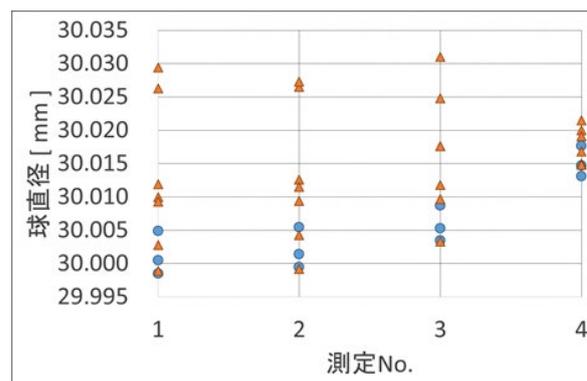


図 8(b) 追加測定結果 (球直径)

5. 考察

形状偏差が 1 μm 程度の球測定では、測定点数の影響は少なく、5 点測定でも十分測定機の指示精度程度の測定が可能なが分かりました。

これに対し、形状偏差が 100 μm 程度の球測定においては、10 μm 程度の繰り返し精度を求めるには 21 点以上の測定点数、5 μm 程度の繰り返し精度を求めるには 37 点以上の測定点数が必要であることが分かりました。

さらに、測定点数を 21 点とした場合、8 点測定を行う位置を赤道にすることで、最もばらつきが小さく、繰り返し精度が安定した測定を行えることが分かりました。

教訓

- ・形状偏差が 100 μm 程度の球測定では、測定点数を 21 点以上としたほうが良さそう。ただし、繰り返し精度を 5 μm 以下にしたい場合は、37 点以上が必要。
- ・同じ測定点数で球測定を行う場合は、赤道上の測定点を多くしたほうが良さそうです。

第4章 綺麗な円とは限りません

表面性状の違いによる真円度の評価方法について

公益財団法人広島市産業振興センター工業技術センター 田中真美

1. はじめに

接触式三次元測定機は、真円度測定機のような専用機と比較してワークの大きさや形状に制約が少なく、様々な寸法や幾何公差を一度に測定できる汎用性の高さが大きな利点です。

接触式三次元測定機の測定方法には、1点ずつスタイラスを「当てる、離す」を繰り返して測定するポイント測定と、ワークの表面にスタイラスを押し当てた状態でなぞって測定するスキニング測定があります。

真円度は、理想円からのずれを評価するため、基本的にたくさんの点を測定したほうが精度よく評価できますが、ポイント測定で多点を測定することは非常に時間がかかります。一方、スキニング測定で行う場合、高速でなぞるとスタイラスのたわみが測定精度に大きく影響しますし、低速でなぞると測定時間がかかってしまいます。

それでは、ワークの真円度を精度よく評価するのに必要な測定点数や適正なスキニング速度はどの程度なのでしょう。

そこで、接触式三次元測定機で真円度を評価する場合の適切な評価方法について、検証することにしました。また併せて、表面性状の違いによる差を見るため、加工条件を変えた複数の試料を測定することにしました。

2. 実験内容

2.1 接触式三次元測定機の概要

使用した測定機は、表1のとおりです。

表1 接触式三次元測定機の仕様

メーカー	(株) 東京精密
型式	XYZAX SVA fusion9/10/6
測定範囲	X軸：850 mm、Y軸：1000 mm、Z軸：600 mm
最大許容指示誤差	$MPE_E = 1.9 + 4L/1000 \mu\text{m}$
導入年度	平成19年度

2.2 試料

直径30 mmの丸棒を旋盤で加工し、No1～No4までの表面性状の異なる4種類の試料を作製しました。No1～3は送り速度は一定で、値を変化させて軸方向に規則的な凹凸にし、No4は、送りを手動にして不規則な凹凸になるようにしました。

軸方向と円周方向について、表面性状の測定を行いました。表2に、測定に用いた表面粗さ輪郭形状測定機の主な仕様を示します。

表2 表面粗さ輪郭形状測定機の主な仕様

メーカー	(株) 小坂研究所	
型式	DSF900K31	
使用 スタイラス	触針先端半径	2 μm
	測定範囲	$\pm 6 \text{ mm}$
	分解能	0.75 nm
導入年度	平成27年度	

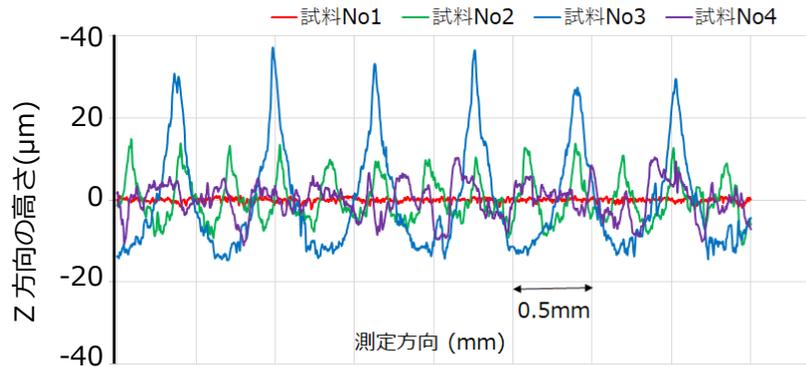


図2 軸方向の表面性状

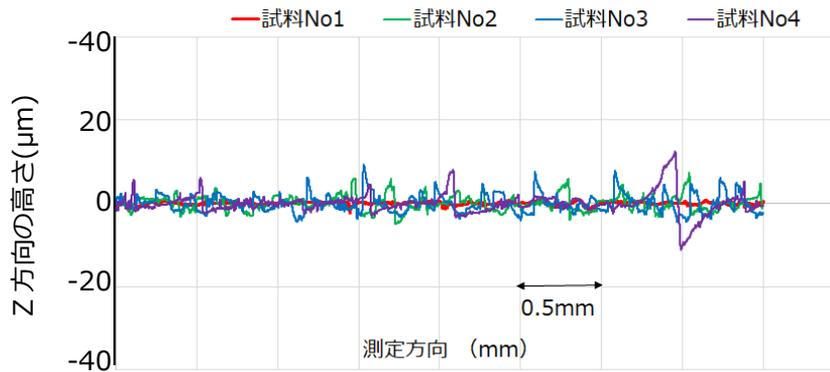


図3 円周方向の表面性状

図2と図3に表面粗さの測定結果を示します。軸方向で見ると、試料No1～3は、山谷のピッチや高さが規則的で、No4は、不規則になっています。図4は、試料の写真です。パラメータの値は、軸方向に測定したときの結果です。

2.3 測定

2.3.1 測定条件

次に、接触式三次元測定機で真円度測定を行いました。測定の様子を図5に示します。

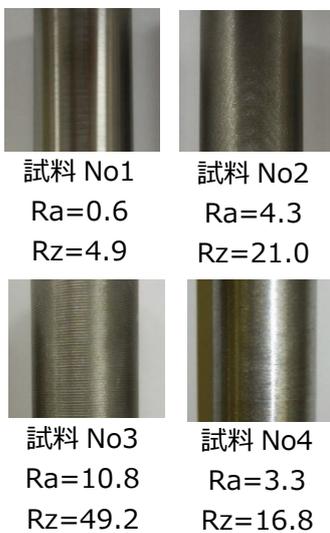


図4 試料写真



図5 測定の様子

ポイント測定もスキャニング測定も同じ条件で、スタイラス先端径は3mm、測定圧は200mNとしました。N数は2回で、平均値を測定値としました。

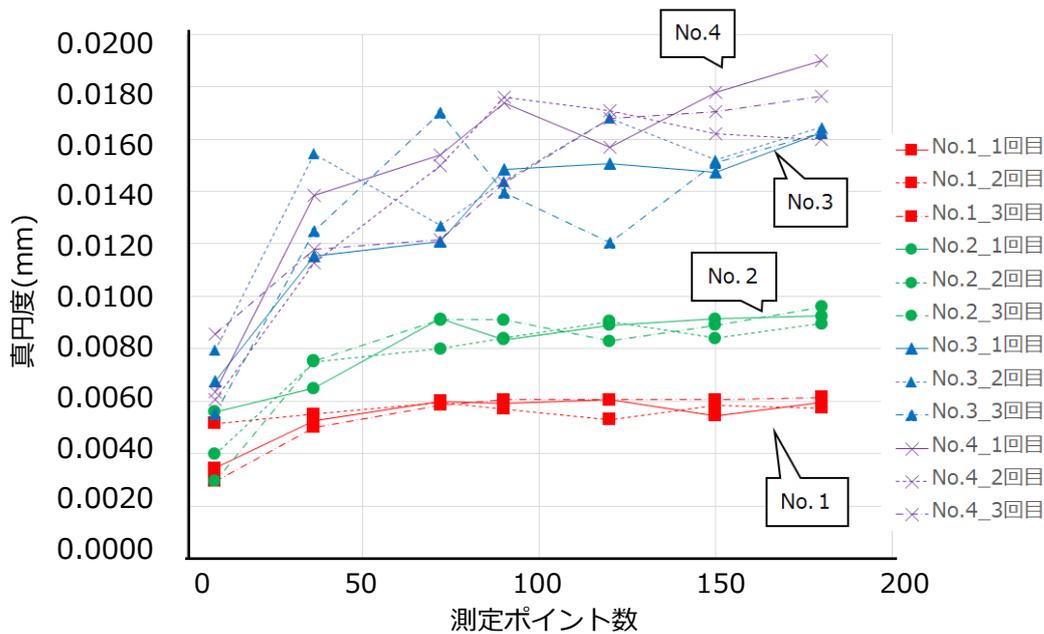


図6 ポイント測定の結果

2. 3. 2 ポイント測定による評価

サンプリングポイント数を、8、36、72、90、120、150、180点とし、円周上で等分割した位置で測定しました。また、測定位置をずらし、合計3回の測定を行いました。

2. 3. 3 スキャニング測定による評価

測定速度を1 mm/s、3 mm/s、5 mm/s、7 mm/s、10 mm/sと変化させ、スキャニング測定を実施しました。今回はスキャニングの効果を検証するため、フィルタは使用しませんでした。

3. 結果

3.1 ポイント測定

図6にポイント測定の測定結果を示します。試料No1とNo2は、72ポイント以上で測定値が安定し、試料No3とNo4は、測定位置で値が変わりますが、概ね150ポイント付近で収束しました。

3.2 スキャニング測定

図7、図8に、測定点数を180点としたスキャニング測定の結果を示します。縦軸は180点のポイント測定の結果との比較を示しています。

図7はポイント測定との差を割合で示したものの、図8は測定値そのものの差です。

試料表面の状態に関わらず、スキャニング速度3 mm/sまではポイント測定と±5%程度内の差になりました。表面粗さの小さい試料No1は、10 mm/sまでの測定でポイント測定と最大でも0.3 μmの差となり、測定機の精度による誤差を考慮すると、測定速度をかなり上げて問題なさそうなことが分かりました。

また、高速でスキャニングした場合は、表面粗さによって真円度測定の結果に大きく差が出ました。特に旋盤で高速送りをして不規則な粗さにしたNo4については、繰り返し誤差自体が3 μm以上となりました。

図9は、スキャニング測定で、サンプリ

ングポイントを真円度測定機並みの3600点にしたときの測定結果です。表面粗さの状態に関係なく、どの測定速度でもポイント測定と大きく差が出ました。この結果は、スキヤニング測定には適切なフィルタをかける必要があることを示しています。

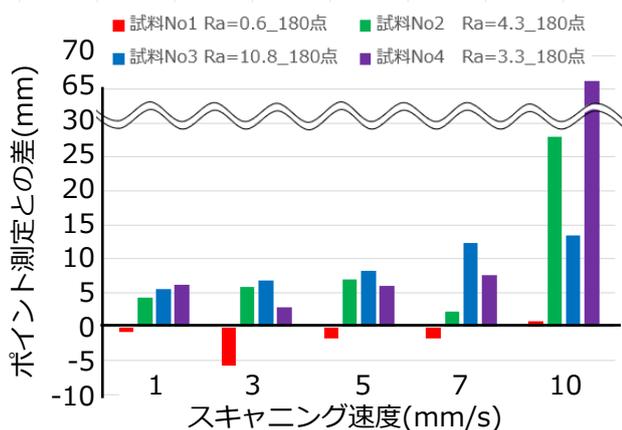


図7 ポイント測定との比較 (%)

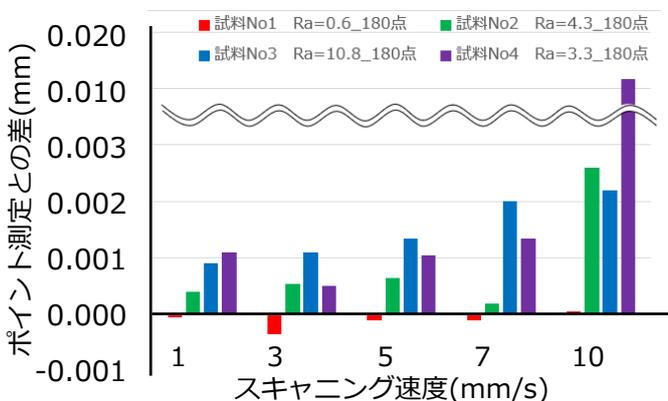


図8 ポイント測定との比較 (mm)

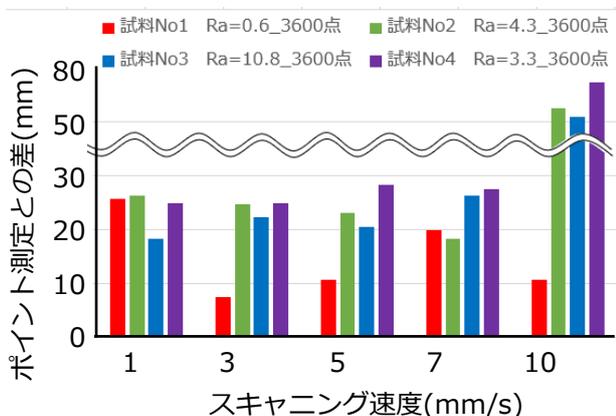


図9 ポイント測定との比較 3600点 (%)

4 考察

製品製造の際には、一般的に、形状の良いみがき棒鋼などの既製品シャフトが使われます。また、スプロケットなど他の部品と組み合わせる場合も旋盤で加工するため、粗さや真円度が極端に悪くなることはないと思われます。

今回は、表面粗さによる差を見るために極端に粗さの大きい試料も測定しましたが、通常の加工物 (Ra=0.1~2.0程度) であればポイント測定で72点程度も取れば十分と思われます。逆に、36点未満だと不十分という結果になりました。

また、表面粗さの大きい試料では、スキヤニング測定で測定速度を大きくすると、真円度が大幅に大きくなる結果となりました。

スキヤニング測定における測定点数については、サンプリングポイント数が180点の場合、測定速度が5 mm/s程度であれば、ポイント測定との差は10 %未満に収まりました。また、測定点数を真円度測定機並みに多くした場合、測定速度や表面粗さに関係なく、ポイント測定の結果と大きく差が出ました。

教訓

- 表面状態によって真円度評価に必要な測定点数は異なります。
- スキヤニング測定は、スキヤニング速度によって、測定結果が変わります。
- 通常の加工物であれば、ポイント測定でも72点程度とれば正しく真円度が測れます。

第5章 遠くへ行かないで

非接触 3D 測定機におけるワーク設置位置の影響

名古屋市工業研究所 岩間由希

1. はじめに

非接触 3D 測定機は、接触式測定機に比べ短時間で広範囲のデータを測定できるという利点があります。大きな対象物の形状データを一度に取得できますし、小さい物でしたら複数個並べて一度に測定することも可能です。しかしその場合、ワークの設置位置が異なっても得られる測定結果は同一として扱えるのか、検証を実施しました。

2. 検証内容

今回の測定では、GOM 製の非接触 3D デジタイザ ATOS III Triple Scan を使用しました。この装置はレンズ交換により、測定範囲や解像度を変更することができます。室温は約 23℃とし、同一ワークの測定は1日で完了させるようにしました。

ワークとしては図 1 の 2 種類を用いました。それぞれ事前に接触式 CMM による測定を行い、その測定値からの差分を評価することとしました。スプレー塗布は実施せず、位置合わせ用のマーカーはワーク周囲に貼付しました。様子を図 2 に示します。

非接触 3D 測定機は、図 3 のように立体的な撮影範囲を持っています。今回の検証ではこの範囲を X, Y, Z 方向に 3 分割し、計 27 箇所ワークを設置して測定を実施しました。測定機の仰角 (-45°) や首振り角



校正値

ダンベル	球B3直径	25.1276 mm	球B3真球度	1.1 μm
	球B4直径	25.1274 mm	球B4真球度	1.2 μm
	球間距離	80.2775 mm		
球	球1直径	30.0285 mm	球1真球度	10.3 μm

図 1 測定ワーク (ダンベル型・球)

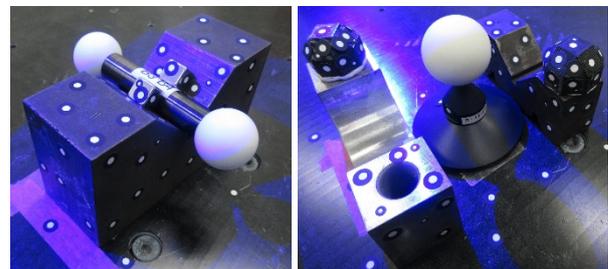


図 2 ワーク設置の様子

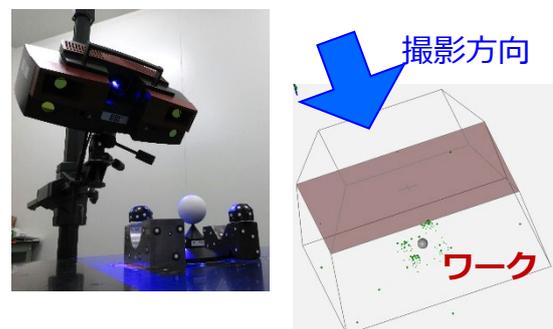


図 3 測定機の撮影範囲とワーク設置

(0°) は変えずに、ワークと測定機との位置関係を相対的に動かすことにより、27 箇所の設置位置を実現しました。

ワークが撮影範囲からはみ出さないことを確認し、設置台ごと 45°ずつ回転させて 8 方向から撮影しました。結果を合成してメッシュ化することで、STL 形式の形状データを作成し、これを評価に使用しました。

それぞれの球について、フィッティング（ガウスベストフィット）により球形状を作成し、直径を求めました。また、各球の真球度はチェビシェフ（中間）で算出しました

3. 結果と考察

3.1 ワーク設置位置（奥行き方向）の影響

3.1 節と 3.2 節では、撮影範囲の最も広いレンズ（MV560、560×420×420 mm）を用いて評価を実施しました。

球ワークの測定結果を図 4 に示します。27 箇所の位置については、図 5 のように呼称しています。

直径および真球度の両者において、C 位置、つまり測定機から遠い位置にワークが設置されている場合に、測定値が大きく変化することが分かりました。同一箇所でも 2 回測定した場合のばらつきも、C 位置では特に大きくなっています。

この理由として、2 つのことが考えられます。まず 1 つめは、測定機とワークとの距離によって、測定機（カメラ）に写るワークの範囲が異なるため、カメラに写る範囲と視差の影響を受けることです。図 6 に示す模式図のように、測定機の 2 つのカメラとワークとの位置関係は、距離によって変化します。ワークが遠くにあると、カメラに写る範囲は狭くなり、視線と並行に近い面となる箇所の測定精度は低下します。また左右のカメラの視差が小さくなることも、測定精度の低下要因として考えられます。図 7 にメッシュ化

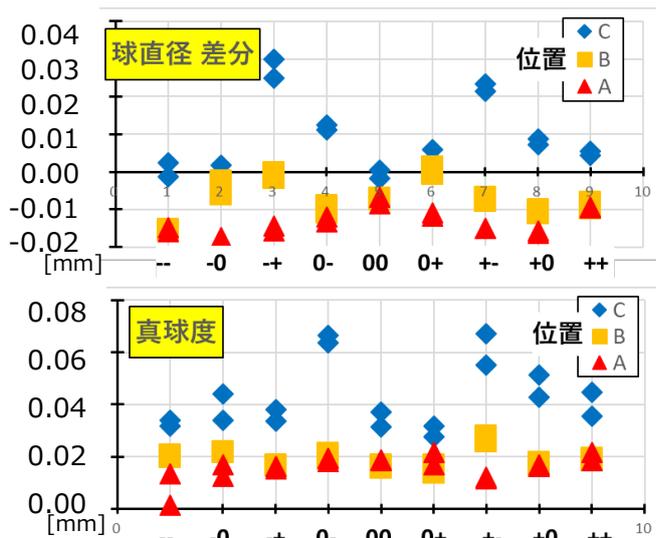


図 4 測定結果（球ワーク）

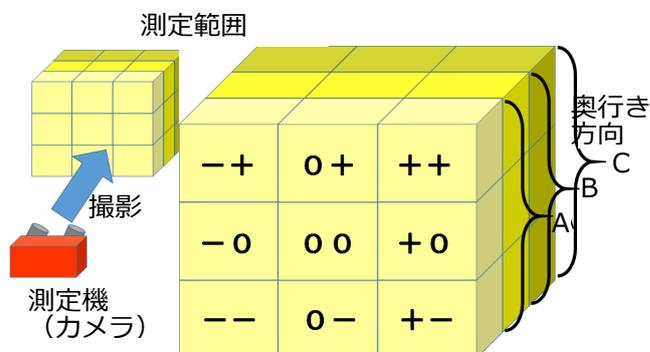


図 5 測定位置の模式図（図中での呼称）

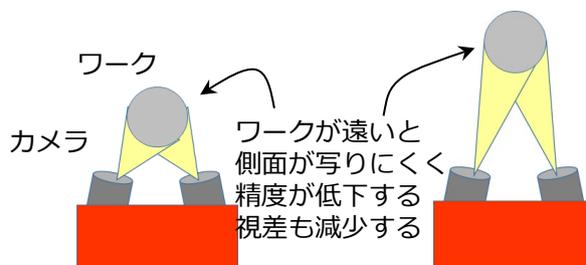
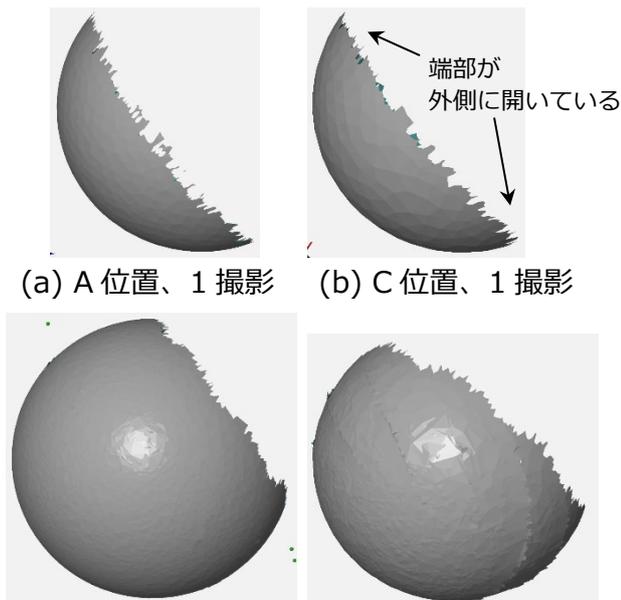
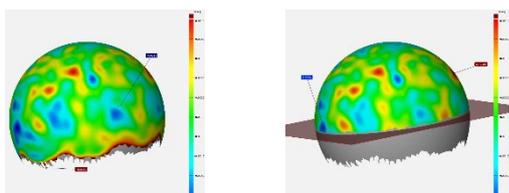


図 6 ワークと測定機（カメラ）の位置関係

前の A 位置で測定した場合と、C 位置で測定した場合の生データを示します。C 位置の 1 撮影のデータでは、端部分の精度が悪く、外側に開いたような形状が取得されてしまっているため、回転させて 8 回撮影した際の重ね合わせデータも、誤差が大きくなってしまいます。このような、精度の悪い部分を含んだデータを基に作成されたメッシュで



(a) A 位置、1 撮影 (b) C 位置、1 撮影
(c) A 位置、8 撮影 (d) C 位置、8 撮影
図 7 取得された生データ (メッシュ化前)



(a)測定データ全体を使用 (b)半球分のみ使用
図 8 フィッティング球と評価の様子

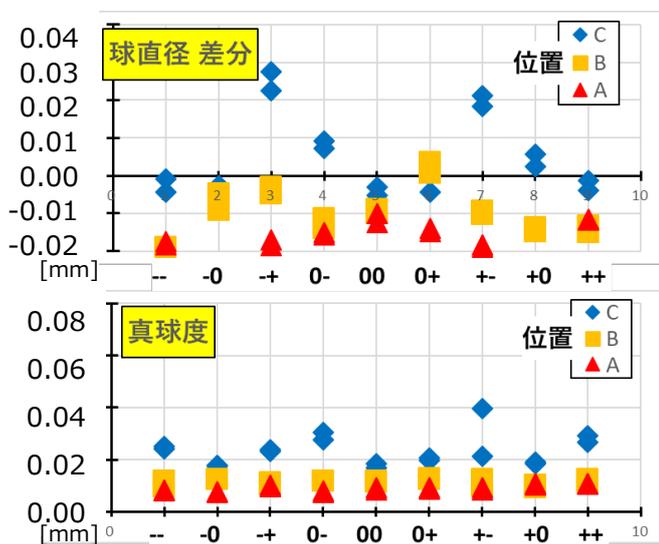
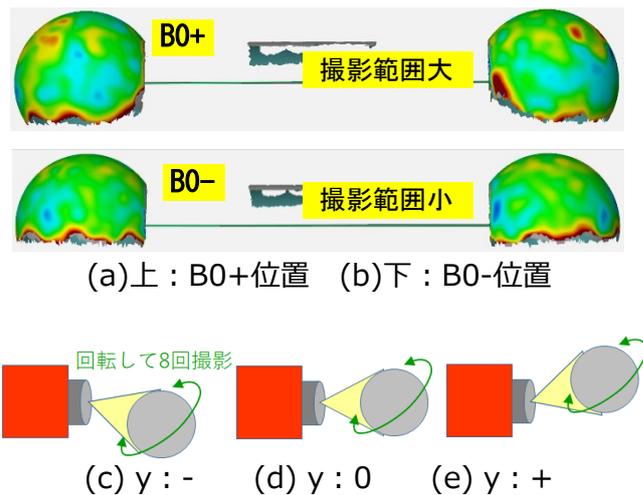


図 9 測定結果 (球ワーク、半球のみ)

あるため、誤差やばらつきが大きくなったと考えられます。
このことは、特に真球度の評価において顕著



(a)上 : B0+位置 (b)下 : B0-位置
(c) y : - (d) y : 0 (e) y : +
図 10 測定できる範囲の違い(横から見た図)

に現れています。表面偏差の最大値と最小値の差である真球度は、フィッティングにて作成された球形状からの差が大きい箇所があると大きな値を示します。カメラとワークが遠い C 位置では、端部の形状歪みの影響で真球度の値が大きくなったと考えられます。これを確かめるため、図 8 のように、球の半分のみを用いて評価したところ、図 9 のように真球度の測定値はかなり改善しました。

もう一つの理由として、測定点数の差が考えられます。測定機から遠く離れた位置にあるワークは、撮影画面内に小さくしか写らないため、測定されるデータ点数は少なくなります。前出の図 7 では、測定されたデータ点数が、A 位置である(a)では 1187 点、C 位置である(b)では 638 点と約半分になっており、形状も粗くなっているのがわかります。STL メッシュ化の際にはどちらも滑らかな面に変換されますが、元データのこのような違いが、生成されるメッシュの精度にも影響を及ぼしていることが想定されます。

3. 2 ワーク設置位置 (面内方向) の影響

測定機からの距離がほぼ同一である、面内

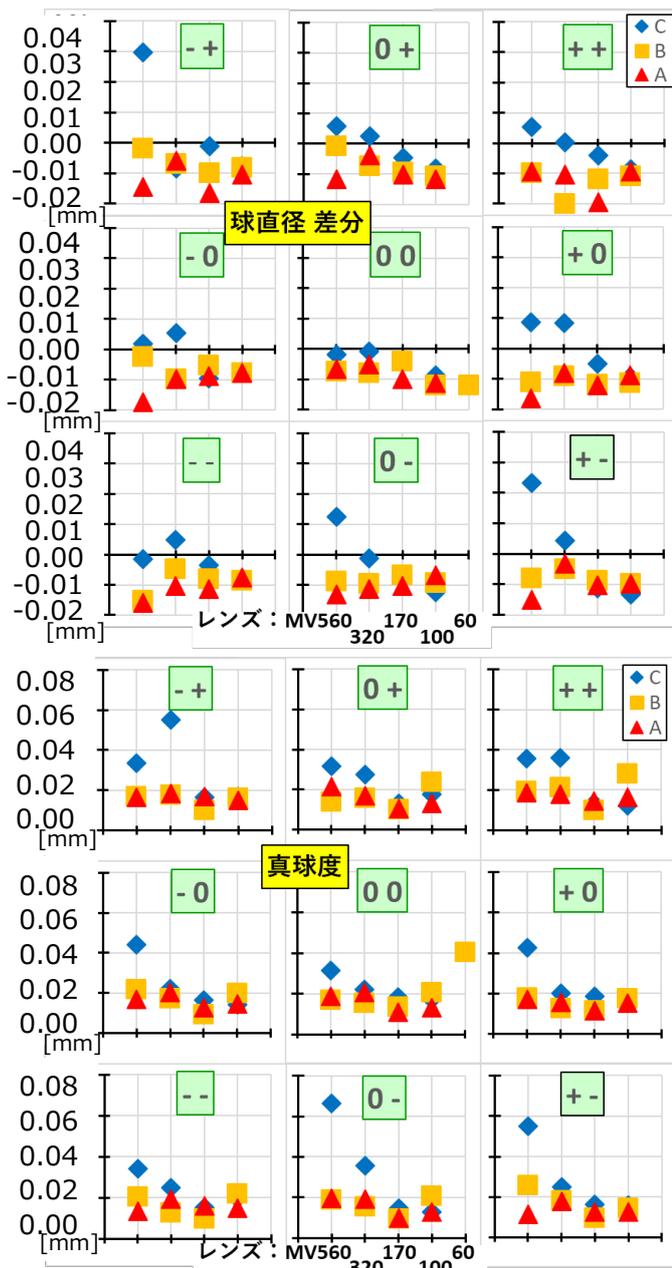


図 11 測定結果（レンズによる違い）

9 箇所の位置に関しては、ワーク各球の測定値について共通した傾向は見られませんでした。A, B 位置の場合では、測定値の変化量自体が比較的小さいと言えます。

測定機から撮影できる範囲は、図 10 のように y 方向に+であるほど広がりますが、これに起因する差は特に見られませんでした。全体としては、隅よりも中央付近にワークを設置した方が良好ではあるようでした。

3. 3 レンズによる違い

測定機のレンズを交換してそれぞれ測定した結果を、図 11 に示します。レンズの数値は撮影範囲の広さに対応しています。

全体的な傾向として、撮影範囲の狭いレンズの方が、ばらつきは小さくなりました。上述の C 位置での大きなばらつきも、撮影範囲の狭いレンズになるにつれ、収まっていく結果となりました。

撮影範囲の狭いレンズは画面内に大きくワークを捉えられるため、沢山の測定点数が得られ、解像度を上げられます。そのためばらつきが小さくなったと考えられます。ただ範囲が特に狭いレンズについてはワーク位置を大きく変えられず、結果的にあまり変化が無いように見えたと考えられます。

教訓

- ・非接触 3D 測定機での形状測定において、ワークをカメラから遠方に設置する場合は、測定結果に誤差やばらつきが生じる可能性があります。
- ・カメラから等距離の面内では、中央付近で測定するのが好ましいです。
- ・測定範囲が狭いレンズの方が、測定位置による結果のばらつきは小さくなりました。
- ・よって、同じワークを測定する場合、撮影範囲の広いレンズで余裕を持って手前で撮影するよりも、狭いレンズで奥行きいっぱいまで使って撮影した方が、誤差は小さくなる可能性があります。

第6章 条件次第で？

測定条件の違いによるオートフォーカスの測定精度への影響

(地独) 山口県産業技術センター 近藤拓郎

1. はじめに

イメージプローブ式三次元測定機（以下、CMM）は非接触式三次元測定機の一つで、CCD カメラで撮影したワークの画像を処理することでエッジを検出し、寸法や幾何形状を測定・算出することが出来ます。鉛直方向の測定にはオートフォーカス機能が用いられ、これにより高さを測定・算出します。このオートフォーカスですが、一般的にズーム倍率を高倍率にして測定した方が精度(正しさ)は良いと言われています。果たして本当に違いがあるのでしょうか？そこで、ここではオートフォーカスを用いて高さ測定をする際に、ズーム倍率を含む設定条件がどの程度測定結果に影響を及ぼすかを検証し、オートフォーカスを使用する際に気を付けるべき事について検討しました。

2. 検証方法

2.1 使用機器と測定器物

使用した CMM の仕様を表 1 に示します。また、CMM の測定結果と比較するデータの測定に使用した粗さ計の仕様を表 2 に示します。

使用した測定器物の外観と仕様を図 1 と表 3 に示します。測定器物は、金属ブロック (S45C) に、平面研削盤による研削面とワイヤー放電加工機による 1st(粗加工)面・

表 1 使用した CMM の仕様

メーカー	OGP(Optical Gaging Products)
型 式	Smart Scope ZIP300
測定範囲	(X)300×(Y)300×(Z)200 mm
測定精度	(XY 軸) : $U2=(2.0+4L/1,000)$ μm (Z 軸) : $U1=(2.5+5L/1,000)$ μm
倍率(CRT)	20~1,000 倍
スケール分解能	0.1 μm
光源	ハロゲンランプ
レンズ NA (開口数)	0.018~0.1 (倍率で変化)

表 2 粗さ計の仕様

メーカー	小坂研究所 (株)
型 式	SE-30K
倍率	縦倍率 : 5,000~1,000,000 倍 横倍率 : 20~20,000 倍

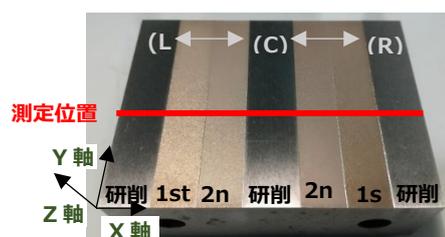


図 1 測定器物の外観

表 3 測定器物の仕様

材質	S45C
サイズ	(W)60×(D)45×(H)25 mm
上面	(L) 研 削 面 : 幅 9 mm [Ra0.387 μm] 放電加工面(1st) : 幅 8 mm [Ra5.179 μm] 放電加工面(2nd) : 幅 8 mm [Ra3.091 μm] (C) 研 削 面 : 幅 10 mm [Ra0.458 μm] 放電加工面(2nd) : 幅 8 mm [Ra3.120 μm] 放電加工面(1st) : 幅 8 mm [Ra5.147 μm] (R) 研 削 面 : 幅 9 mm [Ra0.397 μm]

2nd カット(仕上げ加工) 面の 3 種類の面加工を施しました。加工面の粗さは、場所による大きな違いはなく、器物全体で概ね表 3 に示す大きさでした。

2. 2 CMM のオートフォーカス

本 CMM のオートフォーカスは、カメラで撮影された画像において最もコントラストの高い位置を焦点とするコントラストオートフォーカス方式が採用されています。図 2 に本 CMM のオートフォーカス測定における各設定の概略図を示します。本 CMM のオートフォーカスは、測定時にズーム倍率やターゲットサイズ、フォーカス位置を設定することが出来ます。

ズーム倍率は、光学ズームであり、ズームレンズを動かすことで焦点距離を変化させ光学的に拡大させることができます。ターゲットサイズは、焦点結像時にコントラストの認識を行う範囲であり、視野範囲内の任意の大きさに設定することができます。フォーカス位置は、検出する位置の違いであり、“最上部”と“最下部”と“コントラスト最大部”の 3 種類の設定があります。“最上部”は、上から下に、“最下部”は下から上に、“コントラスト最大部”は上下に、それぞれスキャンし、ピーク表面にフォーカスを合わせます。

2. 3 検証内容

今回、ズーム倍率・ターゲットサイズ・フォーカス位置設定の違いが高さ測定結果にどの程度影響を及ぼすかを検証すると共に、粗さ計の測定結果と比較しどの程度の差異が生じるかを確認しました。

測定箇所は図 1 の測定位置(赤線)に示すように測定器物の中心を各面 1 mm 間

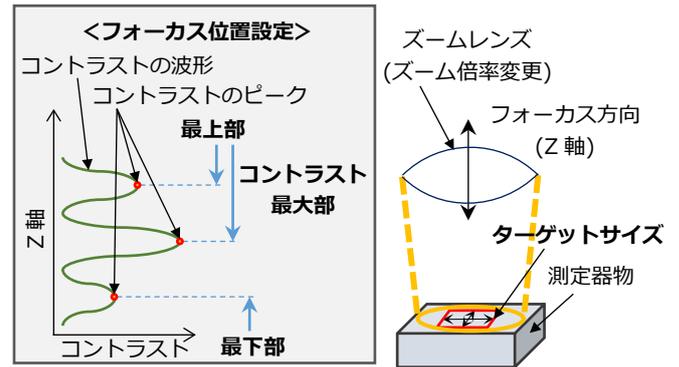


図 2 オートフォーカス測定の各設定

隔で測定する合計 37 点としました。また、基準平面の作成方法や設定は全ての実験で統一しました。

表 4 に各実験におけるオートフォーカス測定条件を示します。照明条件は、測定箇所から斜めから光を照射するリング照明を使用しました。

まず、ズーム倍率による影響を調べる実験は、29.9 倍の標準倍率と 159 倍の最大倍率を比較しました。ターゲットサイズは、標準倍率時は最大 2.65×2.65 mm、最大倍率時は最大 0.5×0.5 mm となりますが、どちらも同じターゲットサイズになるよう、標準倍率時は中心部の 0.5×0.5 mm を切り出してターゲットサイズとしました。また、フォーカス位置設定は“コントラスト最大部”としました。

次に、ターゲットサイズによる影響を調べる実験は、標準倍率で 2.65×2.65 mm と 0.5×0.5 mm を比較し、最大倍率で 0.5×0.5 mm と 0.09×0.09 mm(標準倍率での 0.5×0.5 mm に相当する切り出しサイズ)を比較しました。フォーカス位置設定は“コントラスト最大部”としました。

最後に、フォーカス位置設定による影響を調べる実験を、“最上部”と“最下部”と“コントラスト最大部”の 3 種類の比較を

標準倍率と最大倍率において行いました。このときターゲットサイズは、両倍率共に0.5×0.5 mm としました。

粗さ測定では粗さとうねりを含めた輪郭曲線を測定し、オートフォーカスの測定結果との比較を行いました。

表 4 オートフォーカス測定条件

a)ズーム倍率による影響

ズーム倍率	29.9(標準) , 159(最大)倍
ターゲットサイズ	0.5×0.5 mm
フォーカス位置設定	コントラスト最大部

b)ターゲットサイズによる影響

ズーム倍率	29.9(標準) , 159(最大)倍	
ターゲットサイズ	29.9 倍	2.65×2.65, 0.5×0.5 mm
	159 倍	0.5×0.5, 0.09×0.09 mm
フォーカス位置設定	コントラスト最大部	

c)フォーカス位置設定の条件

ズーム倍率	29.9(標準) , 159(最大)倍
ターゲットサイズ	0.5×0.5 mm
フォーカス位置設定	最上部,最下部,最下部, コントラスト最大部

3. 検証結果

3. 1 ズーム倍率による影響

図 3 に異なるズーム倍率で測定した結果を示します。図 3 より最大倍率のときは非常に安定した測定結果が得られることが分かりました。また、標準倍率は最大倍率と比較し深めにフォーカスされることが分かりました。このことから、ズーム倍率の違いがフォーカス測定に及ぼす影響が大きいことが分かりました。

3. 2 ターゲットサイズによる影響

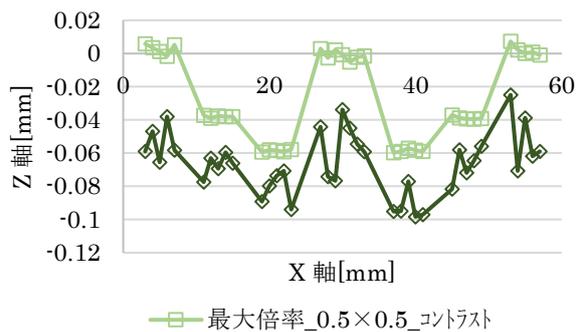


図 3 測定結果(ズーム倍率)

図 4 に異なるターゲットサイズで測定した結果を示します。ターゲットサイズは、大きさ自体による影響よりも視野範囲に対するターゲットサイズの大きさの方が影響は大きく、視野範囲に対してターゲットサイズを小さくすることで測定の精度(正しさ)が低下することがわかりました。

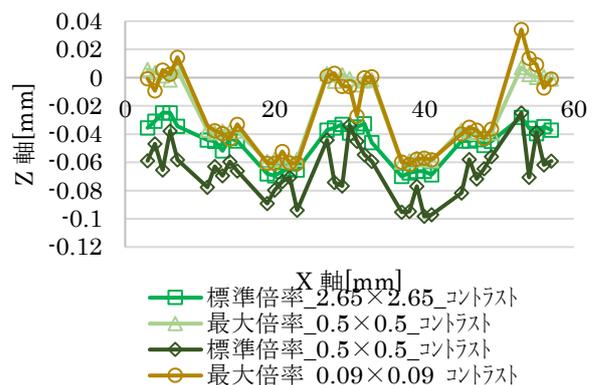


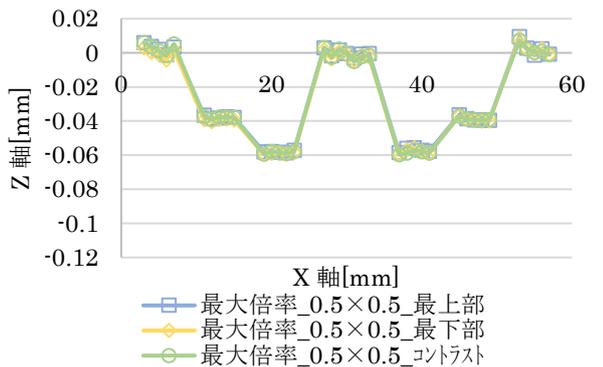
図 4 測定結果(ターゲットサイズ)

3. 3 フォーカス位置設定による影響

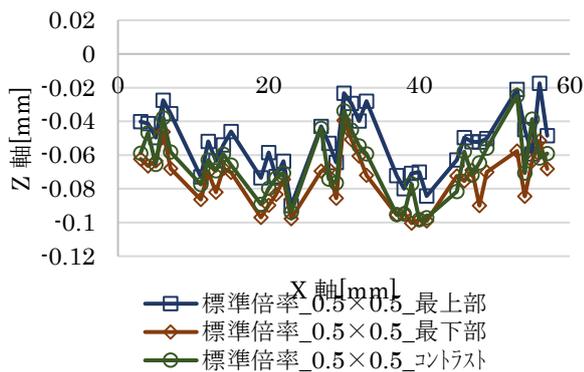
図 5 に異なるフォーカス位置設定で測定した結果を示します。図 5 より、最大倍率・標準倍率共にフォーカス位置設定により最上部・コントラスト・最下部の順でより深めにフォーカスされる傾向にあることが分かりました。また、その差は最大倍率よりも標準倍率の方が大きくなる傾向にあることが分かりました。

3. 4 粗さ計との比較

図 6 に粗さ計で取得した測定値と各フ



a) 最大倍率の測定結果



b) 標準倍率の測定結果

図5 測定結果(フォーカス位置設定)

フォーカス測定との比較を示します。図6より、粗さ計で取得した輪郭曲線は、標準倍率で取得した測定値よりも最大倍率で取得した測定値の方に近い傾向を示していることが分かりました。

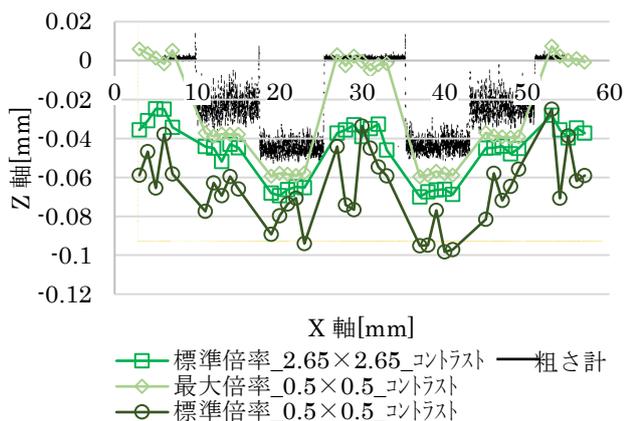


図6 粗さ計との比較

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。

各設定条件の中で最も影響が大きい条件はズーム倍率で、倍率を大きくすることで高さ測定精度(正しさ)やばらつきが改善されます。ターゲットサイズについては視野範囲に対する測定範囲を大きくすることで測定値が安定します。フォーカス位置設定についてはズームが低倍率の時には差が大きく、高倍率の時には差が小さくなります。粗さ計との比較では、最大倍率の測定値が粗さ計の測定値に近い傾向を示しており、この点においても高倍率の測定が推奨されます。

ズーム倍率の違いによる影響については、被写界深度が関係しているものと推測されます。今回の測定条件における被写界深度を算出すると、標準倍率で 27 μm 、最大倍率で 1 μm 程度となります。これは、標準倍率と最大倍率の測定値のばらつきと近い傾向を示しており、被写界深度の違いにより生じたものと推測されます。

以上の結果から、コントラストオートフォーカス方式のCMMにおいては高倍率でターゲットサイズは大きく設定し、必要に応じてフォーカス位置設定を選択する事がより良い測定になると考えられます。

教訓

- ・ 高さ測定の際は、ズーム倍率は可能な限り拡大しよう。
- ・ ターゲットサイズは可能な限り大きくしよう。
- ・ 条件の重要度は「ズーム倍率」 >> 「ターゲットサイズ」 > 「フォーカス位置設定」
- ・ 倍率による精度(正しさ)の違いには、レンズの被写界深度が影響する

第7章 ホントに代わりになっているの？

実用データムの盲点

産業技術総合研究所 佐藤 理

1. はじめに

座標測定機 (CMM) は単純な寸法だけでなく、複雑な形状の測定もできます。そのため製品が設計どおりの形に出来上がっているか、を検査するための幾何公差評価に使われています。幾何公差の中には、ある基準 (データム) に対する位置や姿勢を決めているものがあります。「この部分は基準面と直角になっていないといけない」といったようなことです。

例えば図 1 に示したワークの場合、ワークの底面と二つの側面がデータムになっています。CMM を使った測定では、データムになる部分 (平面や円筒面など) を直接測定し、データム形体を決めます。これらの基準面に対して、ワークに開けられた穴や段差の面などの位置や向きが設計どおりにできているか、を検査します。

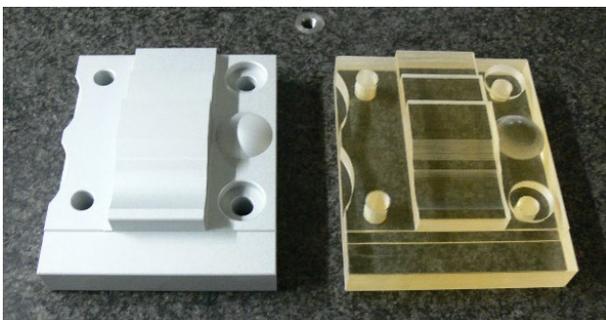


図 1 幾何公差検証用ワーク

幾何公差を評価する方法は、CMM で測る

方法だけではありません。むしろ実際の製造現場では、定盤や V ブロックのような様々な治具と、ダイヤルゲージなどのスモールツールを使用して製品の形状を検査していることが大半ではないでしょうか。

スモールツールを使用した測定ではワークを定盤の上に置き、定盤の面や定盤の上に置いた直角定規の面などをデータムの代わりに使います。このように使われるデータムを、実用データムと呼んでいます。実用データムは、実形体のデータムの代わりになっています。

2. CMM での測定と実用データム

実用データムは、CMM での測定でも使われる場合があります。CMM での測定でも実用データムをうまく利用することで、効率よく検査のための測定をすることができます。

例えば実用データムを使わずに、図 1 のワークを検査する段取りを考えてみましょう。最初に、図 2 のようにワークを置いて、ワークの底面や側面を測定します。次にプローブの向きを変えて上面や穴などを測定します。そしてワークの底面や側面に対する幾何公差を評価していきます。ちょっと想像しただけでも、「面倒くさそうだな」、と思われるのではないのでしょうか。

実際に、向きを変えたプローブをそれぞれ

キャリブレーションしたり、プローブとワークとがぶつからないように注意したり、など、測定の準備は結構大変です。それに、同じ形のワークを何個も検査しなければならないとき、ワークの底面や側面を毎回測定しなければなりません。

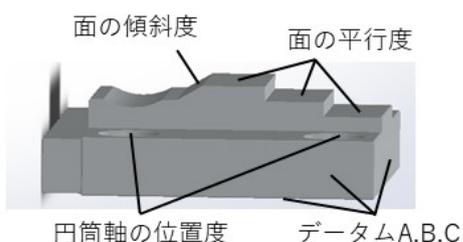
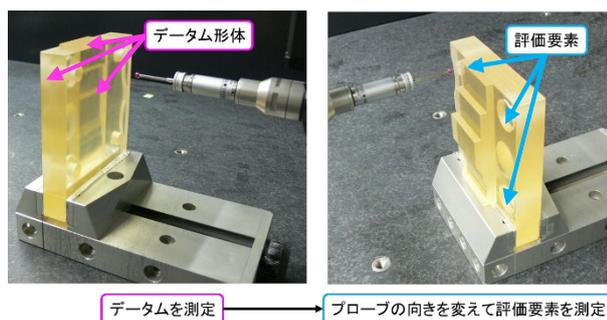


図 2 実形体をデータムとした測定

それでは、実用データムを利用して測定する場合はどうでしょうか。図 3 の例では、定盤の面や突き当て治具の面をワークの底面や側面の代わりにデータムにしています。そしてワークの底面をデータムとした上面の平行度を測る代わりに、定盤の面をデータムとしてワークの上面の平行度を測ったりします。

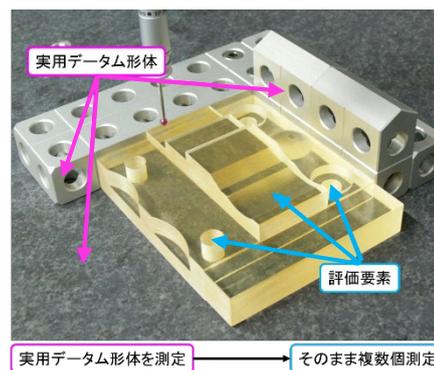


図 3 実用データムを利用した測定

この場合、プローブは下向きの 1 本だけで測定ができます。最初に下向きのプローブを使って CMM の定盤や突き当て治具の面を測っておけば、あとはワークを治具に当てて、上側から測定すればいいのです。この方法なら何個もワークを検査する場合でも、データムを決めるための測定は最初の一回で済みますので、かなり効率よく検査がこなせそうです。ところで実用データムを利用して検査した結果は、データム形体を個別に CMM で測定して検査した結果と同じになるのでしょうか。

3. 検証実験

図 1 のワークを実際に測定して、データム形体を測定結果から求めた場合と、実用データムを利用した場合とを比較してみました。評価に使用した CMM は、本体精度が繰り返し精度 $1.5 \mu\text{m}$ 、最大プロービング誤差が $1.9 \mu\text{m}$ のものです。

最初にワークのデータムになる面(実形体)を CMM で測定し、最小二乗平面を計算してデータム A, B, C を求めました。その後、ワークの穴や上側の面などを CMM で測定し、実形体から求めたデータムに対する幾何公差を評価しました。その結果を抜粋して、表 1 に示します。

次に図 3 に示した定盤面と突き当て治具の側面とを CMM で測定し、最小二乗平面を求めました。これらの面が、ワークを検査する際の実用データム（データム A, B, C）になります。その後、ワークを突き当て治具に固定し、同じようにワークの穴などを CMM で測定しました。その測定結果から、実用データムに対する幾何公差を評価しました。その結果も抜粋して、表 1 に示します。

表 1 の結果を見ると、実形体をデータムとして検査した結果と実用データムを利用して検査した結果とは、数十 μm 以上の差があります。検査に使用した CMM の本体精度が数 μm 程度ですから、この差は測定機の精度が原因ではないようです。このようなことは、なぜ起きるのでしょうか。

表 1 データムの決め方と検査結果の差
(単位 : mm)

要素	実形体	実用	差
軸の位置度	0.201	0.305	-0.104
面の傾斜度	0.123	0.039	0.084
面の平行度	0.120	0.054	0.066

4. 実用データムの盲点

そこでまず、図 1 のワークが実際にはどんな形をしているのか、を見てみましょう。ここでは光を使った測定機（デジタイザ、などと呼ばれています）で、ワークの全体像を捉えてみます。

図 4 は図 1 の右側のワークをデジタイザで測定した結果です。実際の形状がどのよ

うになっているかを見るために、設計データ（CAD データ）との差を表示しています。図で青いところは設計データよりも凹んでいるところ、赤いところは設計データよりも出っ張っているところを表しています。

ワークの底面（図 4 で一番大きく見えている面）は、真ん中あたりが出っ張っていることが分かります。これに対して四隅は凹んでいます。真ん中あたりと四隅とでは、高さが $200 \mu\text{m}$ 程度異なっています。

実用データムを利用した測定では、この面が CMM の定盤に接するようにワークを置いていました。ですから、実用データムはこの面の真ん中あたりの一番出っ張ったところに接する平面になります。

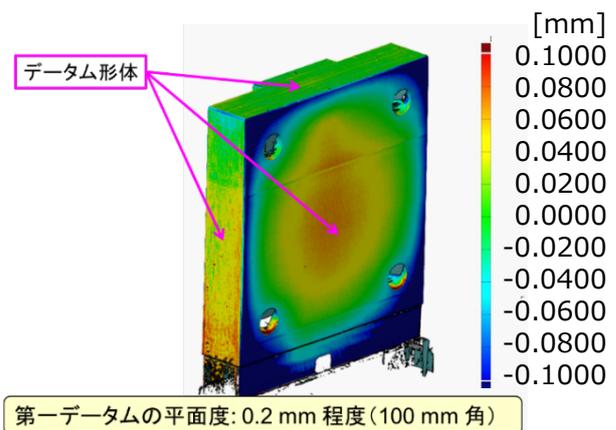


図 4 データム形体の実際の形状

この面を CMM で測定して平面を求め、データムにする場合を考えてみましょう。この場合、平面の真ん中だけでなく、四隅付近も測定して、平面を求めることが多いのではないのでしょうか。このようにして求めた平面は、実用データムである CMM の定盤面とは、位置や姿勢が異なってしまいます。

市販されている CMM の定盤の平面度は、 100 mm 角の範囲では高々数 μm 程度で

す。これに対して、図 1 の右側のワークの底面は、平面度が 200 μm 以上あります。このように平面度の大きな面がデータムに指定されている場合、実形体から求めたデータムと、その面に当てた実用データムとの違いが大きくなります（図 5）。

それでは CMM で測定した結果から、実用データムと同じデータムを作ることができのでしょうか。残念ながら、これは意外と難しいのです。なぜなら、その面が実際にはどのような形をしているのか、どこが一番出っ張っているのか、は、実際に一度、ワークのその面全体を測って見ないと分からないからです。

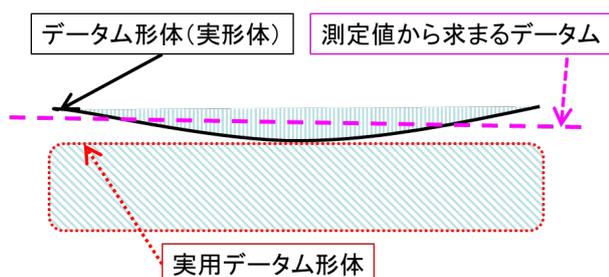


図 5 実形体と実用データム形体の差

5. 考察

製造現場でスモールツールを使って検査した結果が正しいかどうか、を確認するために、CMM で測定した結果と比べることがあります。スモールツールで測った結果と CMM で測った結果が合わないとき、どのような判断をされるのでしょうか。「CMM の方が高級な装置だから、CMM で測った結果の方が正しい」と安易に判断してしまうことはないでしょうか。

同じ CMM を使って幾何公差を評価する場合でも、基準となるデータムを実形体の測定結果から決めるか実用データムを使うかで、結果は数十 μm 以上異なりました。同

様にスモールツールで測定した結果と CMM で測定した結果でも、大きく異なることがあります。このような場合、CMM では実用データムと同じデータムを設定できていないことを疑ってみてください。実用データムがデータム形体とほぼ同じとみなせない場合があるからです。

特に樹脂製品や板金部品、鋳造品などで、比較的大きな形状公差が指示された形体がデータムに指定されている場合は、要注意です。実際の製品では、データムに指定されている要素に 0.1 mm よりも大きな幾何公差が指示されていることも珍しくありません。そのような部品を検査するとき、スモールツールで測った結果と CMM で測った結果との差が大きい場合は、CMM による測定でも実用データムを基準として評価してみてください。

そして何よりも、どのようにデータムを決めて評価した時の結果を基準とするか、を事前に約束事として決めておくことが大切です。

教訓

- 実用データムがデータム形体のよい近似になってない場合もあります
- 他の測定ツールによる結果と比較する時は要注意です
- どの様にしてデータムを決めた時の結果を正とするかを、あらかじめ取り決めておくことが大事です

CMMの都市伝説 vol.5

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 令和元年12月5日

本冊子「CMMの都市伝説 vol.5」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。)