

KSK-GH22-2-1

平成22年度 製造業の基盤的技術の拡充強化に関する  
研究等補助事業

計測技術高度化に関する研究  
—幾何形状測定の信頼性向上に関する研究—

平成23年 3 月

財団法人 機械振興協会 技術研究所



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://ringring-keirin.jp>



# 計測技術高度化に関する研究

## — 目 次 —

幾何形状測定の信頼性向上に関する研究……………大西 徹, 高瀬省徳, 高増 潔……………1	
(現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究)	
1. はじめに……………1	1
2. 指示誤差の評価実験……………2	2
3. 位置誤差と測定位置の直角誤差との関係……………4	4
4. 円筒ゲージ測定における位置誤差の評価……………6	6
4.1 円筒ゲージ測定……………6	6
4.2 位置誤差の評価……………8	8
5. MCGによるCMMの幾何学誤差の評価……………11	11
5.1 MCGの構成と使用方法……………11	11
5.2 MCGのデータ処理方法……………11	11
5.3 MCGのシミュレーション……………12	12
6. まとめ……………13	13
謝 辞……………13	13
参考文献……………13	13
(真円度測定機用切欠き標準の試作)	
1. はじめに……………15	15
2. 真円度測定の現状……………15	15
3. 当所の真円度測定……………16	16
4. 切欠き標準校正法の変遷……………16	16
5. 真円度測定機の回転速度の影響……………17	17
5.1 回転速度と切欠き部の開き角度……………18	18
6. 新しい切欠き標準片の試作……………19	19
6.1 新提案の切欠き標準の段差値評価……………20	20
7. おわりに……………21	21
謝 辞……………21	21
参考文献……………21	21
(段差評価手法による不確かさ比較)	
1. はじめに……………22	22
2. 不確かさ……………22	22
3. 当所の校正業務……………22	22
4. 評価手法……………23	23
4.1 目盛り校正に使用する段差評価方法……………23	23
4.2 被測定物評価のための段差値の求め方……………24	24

4.3 段差値の測定不確かさの推定方法 .....	24
5. 評価結果 .....	26
5.1 校正用標準の形状 .....	26
5.2 被測定物の校正証明書 .....	26
5.3 標準試料の値の相互関係 .....	26
5.4 評価-5 の標準試料の時系列変化 .....	27
5.5 評価方法による値と不確かさ .....	27
6. おわりに .....	29
謝 辞 .....	29

## 幾何形状測定の信頼性向上に関する研究

大西 徹<sup>\*1</sup>, 高瀬省徳<sup>\*1</sup>, 高増 潔<sup>\*2</sup>

### Study on Improvement Methods of geometry measurement in Workshop Environment

Tohru OHNISHI, Shotoku TAKASE & Kiyoshi TAKAMASU

#### (現場環境における三次元測定機の 高度化に関する研究)

##### 1. はじめに

三次元測定機(座標測定機, Coordinate Measuring Machine, 以下, CMM)は機械部品の三次元形状, 寸法, 位置などを測定するために, 広く機械産業分野で利用されている測定機であり, CMM の高精度化は, 品質保証のうえで必要不可欠な要求である。生産システムが, グローバル化していく中で, 部品を国際的に発注, 受注することが生産の効率化において重要となり, CMM による測定は, 測定室や恒温室で使われている状況から広く工場や生産現場(以下, 現場環境)で使われるようになってきている。一方, このようなシステムでは, 部品の設計, 加工, 組立工程を通して, 品質保証を効率的に行い, 測定の不確かさを評価することが, コスト面からも重要な技術となっている<sup>1)</sup>。

CMM を利用した測定における不確かさの評価については, 多くの研究があるが CMM の精度評価, 幾何学誤差の補正, 測定戦略の影響などが大部分で, 測定環境の影響を考慮したものは少ない。しかし, 製造現場で CMM を使う場合には, 温度, 振動, ゴミ, 供給空気などの環境の影響や校正方法, 経年変化などの管理方法が問題となる。本研

究では, 製造現場で CMM を使う場合に問題となる要因を解析し, 問題解決のための提案を行うことにより, 現場環境における三次元測定の高度化を行うことを目標にする<sup>2)~4)</sup>。

CMM に対しては, 複雑な構造のため温度の時間的, 空間的な変化によるたわみなどの変形のモデル化や有限要素法解析が行われ, 温度変化により変形が生じない構造の研究が行われている。また, 実際の CMM の温度変形を実験的に評価し, モデルとの比較や補正方法の提案も行われているが, 比較的高精度の CMM が対象で, 比較的よい温度環境で行われている研究が大部分であり, 現場環境に着目して温度を広い範囲で評価している研究はない<sup>5)~9)</sup>。

三次元的に複雑な形状の製品を測定するためには, 複数のスタイラス, またはスタイラスの姿勢を変化させることが必要不可欠である<sup>10)</sup>。CMM がこのような能力を持つ場合として, JIS 規格に示されている。

- 座標測定機のプローブに取りつけられたマルチスタイラス(例えば, スタースタイラス)
- あらかじめパラメータ設定することが可能な回転式プロービングシステムを備えた装置
- 再現性のあるプローブ交換システムを備えた装置
- 再現性のあるスタイラス交換システムを備えた装置

\*1 計量技術部 精密計測課

\*2 客員研究員(東京大学)



## － マルチプローブ装置

この JIS 規格には、固定マルチスタイラスプロービング誤差と回転式プロービングシステム誤差の指示誤差として、形状誤差、サイズ誤差、位置誤差が示されている。回転式プロービングシステムの評価原理は、プロービングシステムを異なる 5 つの姿勢を用いて、検査用標準球の形状、サイズ、位置を測定する。5 つのそれぞれの姿勢において、検査用標準球上の 25 点の測定を行う。したがって、5 つの位置に対して全部で 125 点の測定を行う。5 個すべての当てはめ球について、中心座標 (X,Y,Z) の範囲を計算する。これらの範囲の最大が回転式プロービングシステムの位置誤差  $AL$  である。さらに、125 点すべてを使って最小二乗球に当てはめ、形状およびサイズの指示誤差を調べる。この解析によって回転式プロービングシステムのサイズ誤差  $AS$  および形状誤差  $AF$  を得ることができる<sup>11)</sup>。回転式プロービングシステムの異なる姿勢を用いて行う測定もマルチスタイラス測定という。

現場環境に置かれた CMM のプロービングシステムにおける不確かさ要因として、回転式プロービングシステムによる測定の指示誤差である、形状誤差、サイズ誤差、位置誤差があり、これらを評価することは重要である。

本報では、回転式プロービングシステムによる測定の指示誤差である形状誤差、サイズ誤差、位置誤差の影響に関して実験的に評価した。また、CMM の測定位置の違いによる直角誤差をマシンチェックゲージ (Machine Checking Gauge, 以下 MCG, レニショー製)<sup>10)</sup>を用いて評価するとともに、校正球の位置と測定位置の直角誤差の値を用いて位置誤差を評価する手法を提案した。

## 2. 指示誤差の評価実験

図 1 に示す回転式プロービングシステムを用いて、表 1 に示す 5 つの姿勢 ( $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$ ) で各プローブ (回転中心からの長さ 100mm, スタイラス長さ 40mm, 先端球 4mm) の校正を行い、それぞれのスタイラスの先端球の球径および中心

座標(それぞれのスタイラスの相対的な位置座標)のパラメータの設定を行った。表 2 に回転式プロービングシステムの仕様を示す。図 2 に示す回転式プロービングシステムの  $P_1$  プローブを用いて測定球 (ミットヨ製  $\Phi 20\text{mm}$ ) の頂点と赤道上の 4 点を含む 5 点を測定し、その中心座標を原点とする。次に、5 つの姿勢で各プローブに対して、測定球の保持棒とスタイラスとの干渉を考慮した上で、JIS B7440-5 にしたがって、図 3 に示す 25 点の測定を行い、位置、形状、サイズを評価することで、指示誤差である、位置誤差  $AL$ 、形状誤差  $AF$ 、サイズ誤差  $AS$  を求めた<sup>12)~14)</sup>。

回転式プロービングシステムの各プローブを校正するための、校正球 (東京精密製  $\Phi 25.4\text{mm}$ ) の位置は図 4 に示す測定定盤上の 2 つの位置 ( $L_{LF}, L_{CC}$ ) に設置し、図 5 に示すように、それぞれ校正球の位置に対して、表 3 に示す測定位置に測定球を 4 つ配置 ( $L_1, L_2, L_3, L_4$ ) した。評価実験のようすを図 6 に示す。

ここで、校正球の位置と測定球の位置の記号を以下のように定義する。

$L_{LF}$	左前に設置した校正球の位置
$L_{CC}$	中央に設置した校正球の位置
$L_1$	右奥に設置した測定球の位置
$L_2$	右前に設置した測定球の位置
$L_3$	右前に設置した測定球の位置
$L_4$	右奥に設置した測定球の位置

ただし、校正球の位置が  $L_{LF}$  のとき、 $L_3$  は右前と中央との中間になる。

表 4 に 2 つの校正球の位置と 4 つの測定球の位置における位置誤差、形状誤差、サイズ誤差の比較を示す。また、図 7 に 2 つの校正球の位置と、4 つの測定球の位置における 5 つの姿勢の各プローブと、全プローブに対する X, Y, Z の位置、形状、サイズ (直径) との関係を示す。P1 プローブを用いて測定球の 5 点を測定し、その中心座標を原点にするとともに、測定球の直径を求めた。5 つの姿勢の各プローブを用いて測定球の 25 点を測定したときの原点からの X, Y, Z のズレ量が X,

Y, Z の位置, 各プローブを用いて, 測定球の 25 点を測定したときの, 最大値と最小値の差が形状, 各プローブを用いて, 測定球の 25 点の測定から求めた直径と P1 プローブを用いて, 測定球の 5 点の測定から求めた直径との差がサイズである. また, 5 つの姿勢の全プローブを用いて, 測定球の 125 点の測定から, X, Y, Z の位置, 形状, サイズを求めた. これらの結果から, 校正球と測定球との設置位置に関係なく, サイズ誤差は小さく, 最大で  $0.6\mu\text{m}$  となった. このことから, 校正球によって, 回転式プロービングシステムのパラメータ設定を行うときの, スタイラス先端球の球径測定誤差が小さいことが確認できた. これに対して位置誤差と形状誤差は, 校正球と測定球との位置関係によって変化していることが確認できる. また, 校正球を  $L_{CC}$  に設置したときに,  $L_{LF}$  に設置したときに比べて, 測定位置に関係なく位置誤差と形状誤差が小さくなることが分かった. これは, 校正球を  $L_{CC}$  に設置したときのほうが, 校正球と 4 つの測定球との位置関係が近くなり, 校正球によって回転式プロービングシステムを校正するとき, 校正球の位置の直角誤差と 4 つの測定球を測定するときの測定位置の直角誤差の差が小さくなるためだと考えられる<sup>15)</sup>.

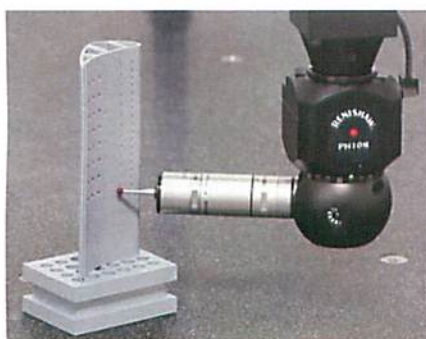


図1 回転式プロービングシステム

表1 プローブ No と方向の関係

プローブ No.	スタイラス方向
P1	-Z
P2	-X
P3	-Y
P4	+X
P5	+Y

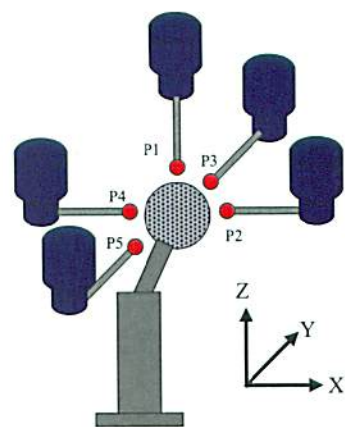


図2 回転式プロービングシステムにおける5姿勢

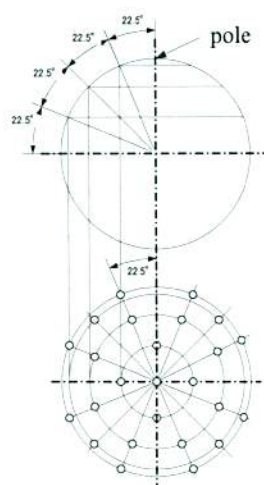


図3 プロービングの目標点

表2 回転式プロービングシステムの仕様<sup>16)</sup>

Type		PH10
回転角度 (角度ピッチ)	水平方向	$\pm 180^\circ$ ( $7.5^\circ$ )
	垂直方向	$0^\circ - 105^\circ$ ( $7.5^\circ$ )
サイクル タイム	$7.5^\circ$ ステップ	2.5 秒
	$90^\circ$ 回転	3.5 秒
繰返し位置決め精度 ( $2\sigma$ )		$0.4\mu\text{m}$
製造者		Renishaw

表3 校正球に対する測定球の位置 mm

	$L_{LF}$ : 左前	$L_{CC}$ : 中央
$L_1$	450, -450, 100	250, -150, 100
$L_2$	450, -50, 100	250, 250, 100
$L_3$	130, -130, 100	-150, 250, 100
$L_4$	50, -450, 100	-150, -150, 100





		直角誤差
$t_{zy-L}$	$L_{L1}$ に設置した測定球の位置の $t_{zy}$ の	直角誤差
$t_{zx-L}$	$L_{L1}$ に設置した測定球の位置の $t_{zx}$ の	直角誤差
$x_{P2-P4}$	P2 と P4 プローブを用いて測定球を評価したときの X 方向の位置誤差	
$y_{P2-P4}$	P2 と P4 プローブを用いて測定球を評価したときの Y 方向の位置誤差	
$z_{P2-P4}$	P2 と P4 プローブを用いて測定球を評価したときの Z 方向の位置誤差	
$x_{P3-P5}$	P3 と P5 プローブを用いて測定球を評価したときの X 方向の位置誤差	
$y_{P3-P5}$	P3 と P5 プローブを用いて測定球を評価したときの Y 方向の位置誤差	
$z_{P3-P5}$	P3 と P5 プローブを用いて測定球を評価したときの Z 方向の位置誤差	

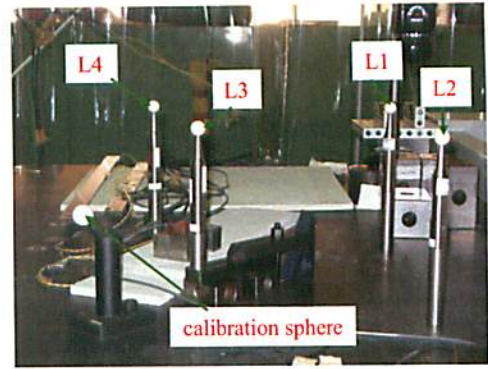
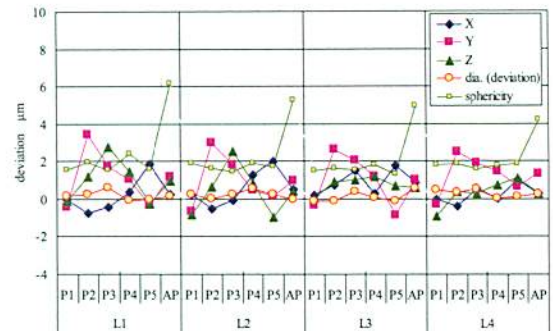
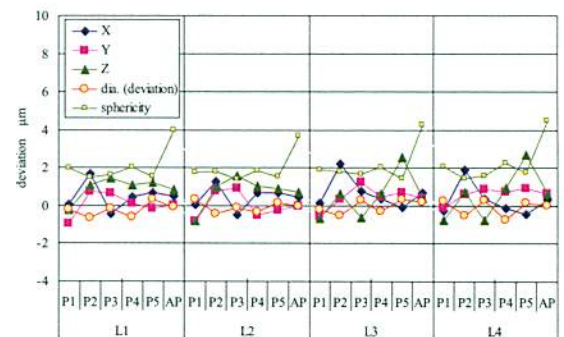


図 6 指示誤差の評価実験



(a) 校正球の位置：左前



(b) 校正球の位置：中央

図 7 校正球と測定球との位置における各プローブに対する指示誤差

図 7 から校正球の位置が  $L_{LF}$  で測定球の位置が  $L_1$  のときの位置誤差を評価した結果および 5 章において示した MCG の 101mm のアームを用いて、校正球の位置が  $L_{LF}$  と測定球の位置が  $L_1$  のときの直角誤差の評価を行い、式 (1) に基づいて、位置誤差を評価した結果を表 5 に示す。この結果から、P2 と P4 プローブおよび P3 と P5 プローブを用いて測定したときの位置誤差と校正球と測定球の位置の直角誤差の差からシミュレーションした値とは、 $1\mu\text{m}$  以内で一致した。このことから、校正球と測定球の位置の直角誤差の差から位置誤差を評価する手法の妥当性が確認できた。

表 5 シミュレーションによる位置誤差と測定による位置誤差の結果との比較  $\mu\text{m}$

直角誤差 (sec)				位置誤差のシミュレーション ( $\mu\text{m}$ )	位置誤差 ( $\mu\text{m}$ )			
校正球の位置		測定球の位置						
$t_{zy-C}$	0.4	$t_{zy-L}$	3.8	1.6	$y_{P2-P4}$	2.4	$x_{P3-P5}$	2.2
$t_{zy-C}$	-0.1	$t_{zy-L}$	-5.1	2.4	$z_{P3-P5}$	3.0	-	-
$t_{zx-C}$	2.7	$t_{zx-L}$	1.9	0.4	$z_{P2-P4}$	0.3	-	-



## 4. 円筒ゲージ測定における位置誤差の評価

### 4.1 円筒ゲージ測定

図8にスチール製の円筒ゲージ（熱膨張係数： $11.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）を示す。この円筒ゲージの図9に示す平面（平面A）と円（円1, 円2, 円3, 円4）の測定要素を図10に示すポジションXとポジションYの2つのポジションで、図11に示す回転式プロービングシステムの対向する2組のプローブ（回転中心からの長さ100mm, スタイラス長さ40mm, 先端球4mm）を用いて、プローブと円筒ゲージの相対的な位置関係が一致するように測定した。各ポジションの配置はポジションXでの円筒ゲージの中央部分を基点として回転を行った。この基点は、CMMの測定領域のほぼ中央とした。測定点の配置は、図12に示すように、平面および円測定ともに、2組のプローブを用いて9点ずつの18点の等間隔測定を行い、以下4°ずらして5回の測定を行った。測定要素は、図9における平面A, 円1, 円2, 円3, 円4に加え、円1と円2から円筒A, 円3, 円4から円筒Bを作成し、円筒Aと円筒Bから円筒ABを作成した。これらの測定要素から表6に示す平面度, 真円度, 円筒度の幾何偏差を算出した<sup>12)</sup>。円筒ゲージ測定の様子を図13に示す。

校正球（ミットヨ製  $\Phi 20\text{mm}$ ）の位置は、図14に示す4箇所（ $L_{RF}$ ,  $L_{CF}$ ,  $L_{LF}$ ,  $L_{CC}$ ）で、回転式プロービングシステムを用いて、異なる5つの姿勢で各プローブの校正を行い、パラメータを設定した。

ここで、校正球の位置の記号を以下のように定義する。

- $L_{RF}$  右前に設置した校正球の位置
- $L_{CF}$  中央前に設置した校正球の位置
- $L_{LF}$  左前に設置した校正球の位置
- $L_{CC}$  中央に設置した校正球の位置

図15に4つの校正球の位置で円筒ゲージの平面と円の測定要素をポジションXとポジションYの2つのポジションで、回転式プロービングシステムの対向する2組のプローブを用いて、プロー

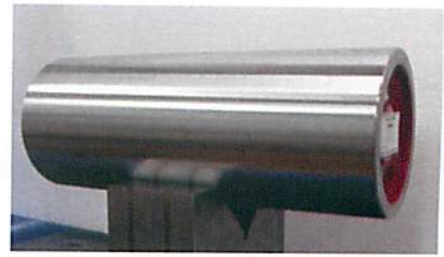


図8 円筒ゲージ

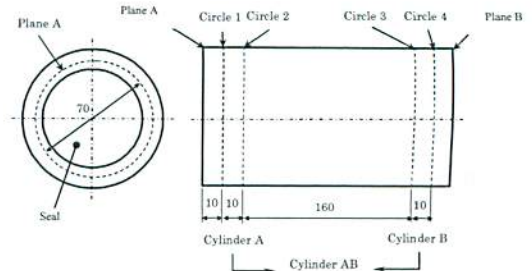


図9 円筒ゲージの測定要素<sup>12)</sup>

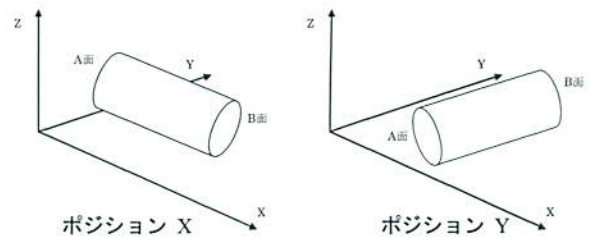


図10 円筒ゲージ測定における2つのポジション<sup>12)</sup>

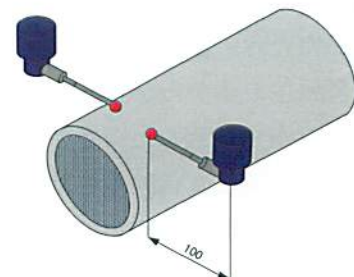


図11 円筒ゲージ測定とプローブとの関係

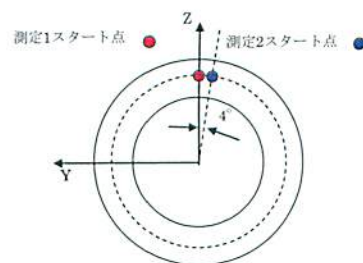


図12 平面測定の測定点配置<sup>12)</sup>

ブと円筒ゲージの相対的な位置関係が一致するように測定し、平面度、真円度、円筒度の幾何偏差を算出した結果を示す。これらの結果から、ポジションXに比べてポジションYは真円度と円筒度の値が小さくなっている。これは、ポジションXの場合、P3とP5プローブを用いた円筒ゲージの測定であり、校正球の位置と測定位置の $t_{zy}$ の直角誤差の差が大きいため、位置誤差も大きくなったと考えられる。これに対して、ポジションYの場合、P2とP4プローブを用いた円筒ゲージの測定であり、校正球の位置と測定位置の $t_{zx}$ の直角誤差の差が小さいため位置誤差も小さくなったと考えられる。これらのことから、測定位置による直角誤差の差は、 $t_{zy}$ の直角誤差に比べて $t_{zx}$ の直角誤差のほうが小さいと考えられる。また、ポジションXの場合は、校正球と測定位置に近いほうが真円度と円筒度の値が小さくなっていることが確認できる。これは、校正球と測定位置に近いほうが $t_{zy}$ の直角誤差の差が小さいためだと考えられる。

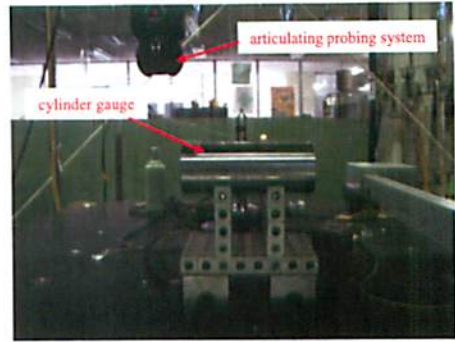


図13 円筒ゲージの測定

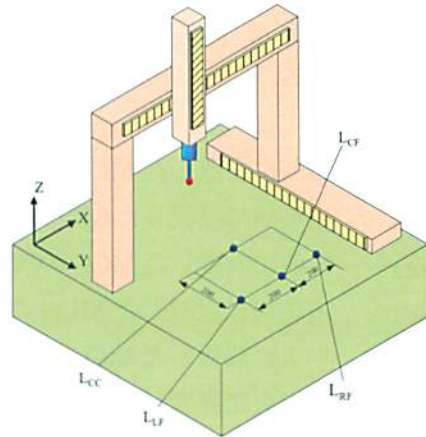
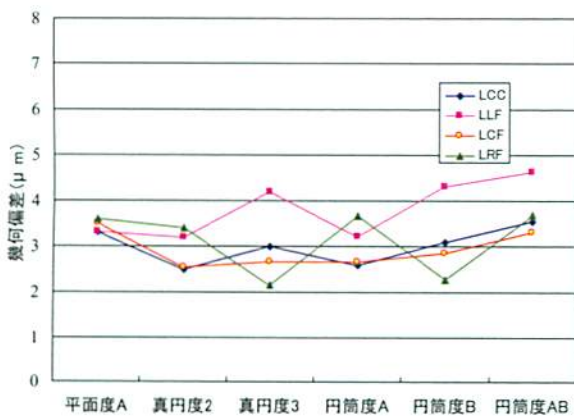


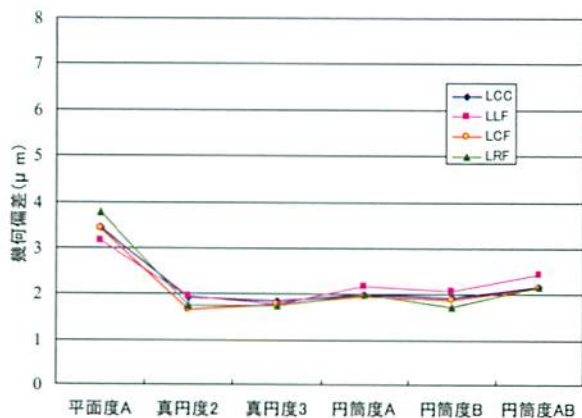
図14 円筒ゲージ測定における校正球の位置

表6 測定要素項目<sup>12)</sup>

評価項目	要素
平面度	平面A
真円度	円2, 円3
円筒度	円筒A, 円筒B, 円筒AB



(a) ポジションXにおける円筒ゲージ測定の実測値



(b) ポジションYにおける円筒ゲージ測定の実測値

図15 各ポジションにおける円筒ゲージ測定の実測値



## 4.2 位置誤差の評価

3章において示したように、校正球と測定球の位置の直角誤差の差から位置誤差を評価するため、図16に示す9箇所の位置でMCGの101mmのアーームを用いて直角誤差の評価を行った結果を表7に示す。この結果から、測定位置によって直角誤差の変化は最大 $t_{zy}$ で6 sec程度あることが確認できた。

MCGの支柱の位置の記号を以下のように定義する。また、MCGの支柱の位置における $t_{xy}$ 、 $t_{zy}$ 、 $t_{zx}$ の直角誤差を $t_{xy}$ 、 $L_{MRF}$ のように直角誤差の後に位置を記述する。

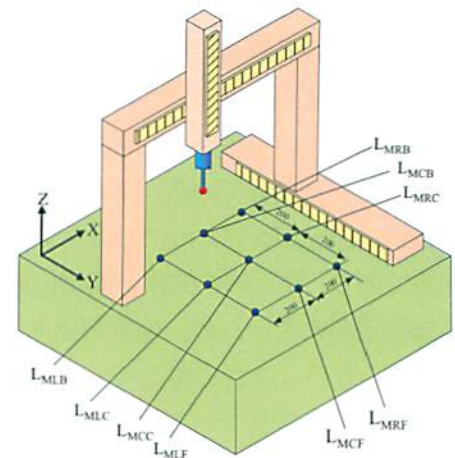


図16 MCGの支柱の位置

- $L_{MRF}$  右前に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MCF}$  中央前に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MLF}$  左前に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MRC}$  右中央に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MCC}$  中央に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MLC}$  左中央に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MRB}$  右後に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MCB}$  中央後に設置したMCGの支柱の位置
- $L_{MLB}$  左後に設置したMCGの支柱の位置

表7 CMMの測定位置の違いによる直角誤差の評価結果 sec

MCGの支柱の位置		$t_{xy}$	$t_{zy}$	$t_{zx}$
左	$L_{MLF}$	2.3	0.4	2.3
	$L_{MLC}$	2.5	-0.8	2.5
	$L_{MLB}$	2.1	0.5	2.2
中	$L_{MCF}$	3.5	-3.7	1.6
	$L_{MCC}$	1.3	-2.8	1.6
	$L_{MCB}$	3.0	-2.8	2.0
右	$L_{MRF}$	3.7	-5.6	2.2
	$L_{MRC}$	1.6	-4.8	2.2
	$L_{MRB}$	3.8	-5.1	1.9

ポジションXおよびYにおける円筒ゲージの測定要素（平面A、円1、円2、円3、円4）ごとの測定位置の直角誤差を $L_{MRC}$ 、 $L_{MCC}$ 、 $L_{MLC}$ および $L_{MCF}$ 、 $L_{MCC}$ 、 $L_{MCB}$ の距離と直角誤差の関係から求めた結果を表8に示す。この結果から、ポジションXにおける測定要素ごとの測定位置の $t_{zy}$ の直角誤差の変化は大きく、最大2sec程度あることが確認できた。

表8 円筒ゲージの測定要素ごとの直角度 sec

測定位置	ポジション X (X)			ポジション Y (Y)		
	$t_{xy}$	$t_{zy}$	$t_{zx}$	$t_{xy}$	$t_{zy}$	$t_{zx}$
平面 A (p)	1.9	-1.8	2.0	2.4	-3.3	1.6
円 1 (c1)	1.9	-1.9	2.0	2.3	-3.2	1.6
円 2 (c2)	1.8	-2.0	1.9	2.2	-3.2	1.6
円 3 (c3)	1.4	-3.6	1.8	2.0	-2.8	1.7
円 4 (c4)	1.5	-3.7	1.8	2.1	-2.8	1.8

測定位置による直角誤差の変化は、位置誤差となり、平面度の測定においては、校正球の位置と測定位置の $t_{xy}$ の直角誤差の差が位置誤差となる。また、真円度および円筒度の測定では、ポジションXにおいて、校正球の位置と測定位置の $t_{zy}$ の直角誤差の差が位置誤差となり、ポジションYにおいて、校正球の位置と測定位置の $t_{zx}$ の直角誤差の差が位置誤差となる。

表9 MCGによる位置誤差の評価  $\mu\text{m}$

	ポジション X				ポジション Y			
	$L_{CC}$	$L_{LF}$	$L_{CF}$	$L_{RF}$	$L_{CC}$	$L_{LF}$	$L_{CF}$	$L_{RF}$
平面度 A	0.29	0.21	0.77	0.86	0.53	0.03	0.53	0.62
真円度 2	0.38	1.16	0.83	1.75	0	0.33	0.01	0.29
真円度 3	0.38	1.92	0.07	0.99	0.08	0.26	0.07	0.21
円筒度 A	0.43	1.16	0.87	1.80	0.01	0.33	0.01	0.29
円筒度 B	0.43	1.96	0.07	0.99	0.09	0.26	0.08	0.21
円筒度 AB	0.43	1.96	0.87	1.80	0.09	0.33	0.08	0.29



校正球の位置の記号を以下のように定義する。また、校正球の位置における  $t_y$ ,  $t_z$ ,  $t_x$  の直角誤差を  $t_{y-LRF}$  のように直角誤差の後に位置を記述する。

- $L_{RF}$  右前に設置した校正球の位置
- $L_{CF}$  中央前に設置した校正球の位置
- $L_{LF}$  左前に設置した校正球の位置
- $L_{CC}$  中央に設置した校正球の位置

測定位置の記号を以下のように定義する。また、測定位置における  $t_y$ ,  $t_z$ ,  $t_x$  の直角誤差を  $t_{y-LPA-X}$  のように直角誤差の後に位置を記述する。

- $L_{PA-X}$  ポジション X における平面 A  
測定位置
- $L_{PA-Y}$  ポジション Y における平面 A  
測定位置
- $L_{C1-X}$  ポジション X における円 1 測定位置
- $L_{C1-Y}$  ポジション Y における円 1 測定位置
- $L_{C2-X}$  ポジション X における円 2 測定位置
- $L_{C2-Y}$  ポジション Y における円 2 測定位置
- $L_{C3-X}$  ポジション X における円 3 測定位置
- $L_{C3-Y}$  ポジション Y における円 3 測定位置
- $L_{C4-X}$  ポジション X における円 4 測定位置
- $L_{C4-Y}$  ポジション Y における円 4 測定位置

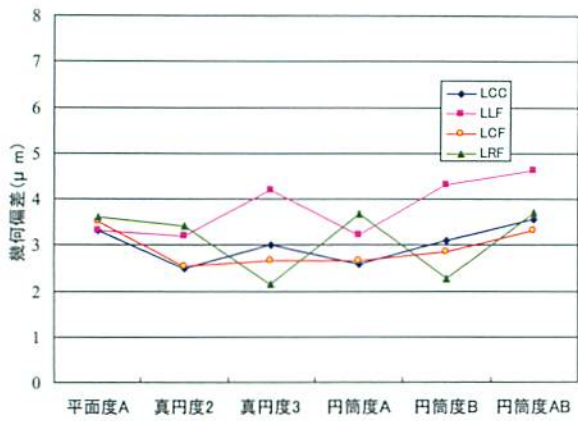
式 (1) に基づいて、校正球の位置が  $L_{RF}$  でポジ

ション X における円筒ゲージの測定要素が平面 A ( $L_{PA-X}$ ) のときの位置誤差  $AL_{P3-P5-X}$  を式 (2) に示す。

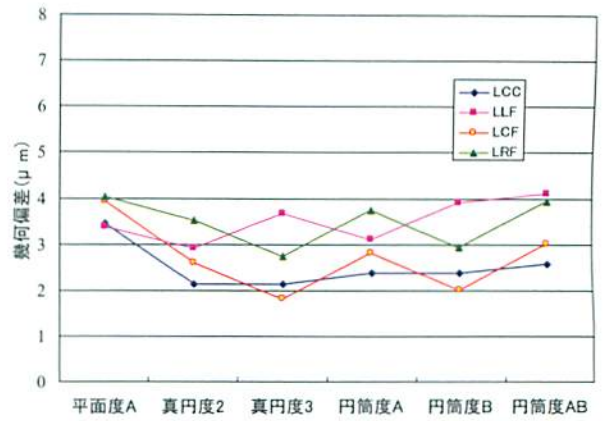
$$AL_{P3-P5-X} = l \tan(t_{xy-LRF} - t_{xy-LPA-X}) \quad (2)$$

式 (2) に基づいて、各ポジションの校正球の位置における平面度、真円度、円筒度の評価項目ごとの位置誤差を表 9 に示す。ここで、円筒度については、評価している真円度の位置誤差の最大値を円筒度の位置誤差とする。この結果から、同じ評価項目でも、円筒ゲージの設置位置および校正球の位置によって位置誤差が変化していることが分かった。

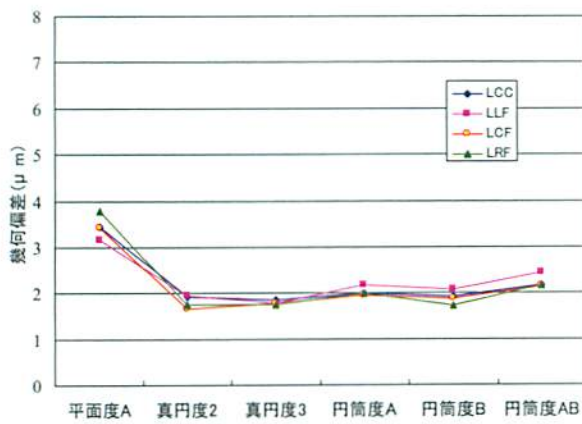
各ポジションの校正球の位置における評価項目を実測定した図 15 の結果と各評価項目の実測定の最小値と表 9 に示す位置誤差を加えてシミュレーションした各ポジションの結果を図 17 に示す。これらの結果から、実測定とシミュレーションによって得られた値とは、 $1\mu\text{m}$  以内で一致した。このことから、MCG によって評価した校正球の位置と測定位置の直角誤差の値を用いて、位置誤差を評価する手法の妥当性および校正球の位置とワークの設置位置を最適な位置に設置することにより、位置誤差を小さくできることがわかった。



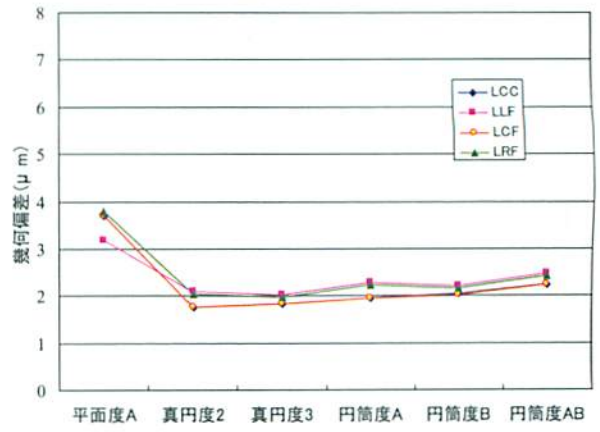
(a) ポジションXにおける円筒ゲージ測定の実測値



(b) ポジションXにおける円筒ゲージ測定の実測値



(c) ポジションYにおける円筒ゲージ測定の実測値



(d) ポジションYにおける円筒ゲージ測定の実測値

図 17 円筒ゲージの実測定とMCGによる位置誤差の評価のシミュレーション

## 5. MCGによるCMMの幾何学誤差の評価<sup>3)</sup>

3章においてCMMの測定位置の違いによる直角誤差を評価するのに使用したMCGについて以下に示す。

### 5.1 MCGの構成と使用方法

図18にMCGの構成を示す。MCGはベースの上に径4mmのピボットボールのついた支柱とアームにより構成され、ピボットボール上に3個のボールでキネマチック（運動学的）に支持されたアームの先端に、スタイラスボールを備えた形をしている。また、アームはカーボンファイバー製で熱膨張係数は $1.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ となっている<sup>17)</sup>。

まず、ピボットボールを測定し、その中心座標を原点とする。次に、アーム先端のフォーク状のバーにプローブを引っ掛けた状態で、CMMを駆動してアームを指定の位置へ移動する。その位置で、プローブをスタイラスボールへ接触することで、原点から $R$ だけ離れた球面上の測定点の座標値 $(x, y, z)$ を得ることができる。 $R$ としては、101 mm, 151 mm, 226 mm, 380 mm, 532 mm, 685 mmのアームが用意されている。

図19に示すように水平方向に45度間隔で8カ所、水平面より+45度および-45度の位置で同様に各8カ所、合計24カ所の測定位置で繰り返し3回の測定を行う。この72点の座標は、理想的にはすべて原点から $R$ の距離の座標にあるので、理想的な球からの偏差によりCMMの幾何学誤差を評価できる。また、すべての測定の終了後に、もう一度、ピボットボールの中心座標を測定することで測定中の温度ドリフトを確認できる。

以上のような測定は、一般的な数値制御のCMMでは、すべて自動的に行うことができる。1回の測定は20分程度で行うことができるため、現場環境で日常的に使用することが可能である。

### 5.2 MCGのデータ処理手法

72個の測定データの座標値 $(x_i, y_i, z_i)$ から、ピボットボールの中心座標のずれ量 $(x_0, y_0, z_0)$ および直角誤差 $(t_{xy}, t_{zx}, t_{zy})$ を求める。まず、ピボットボールの中心座標のずれ量は球の方程式を利用

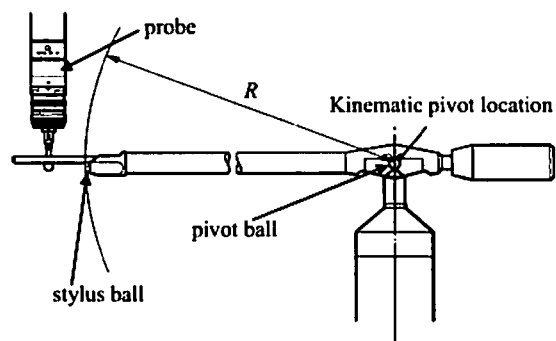


図18 マシンチェックゲージの概要<sup>17)</sup>

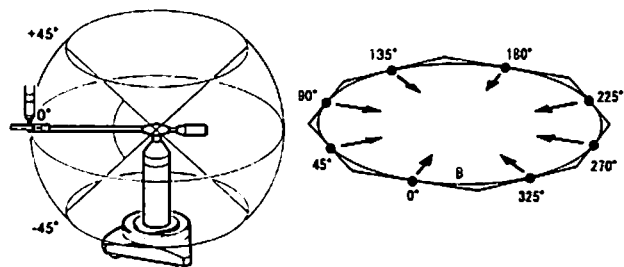


図19 マシンチェックゲージの測定位置<sup>17)</sup>

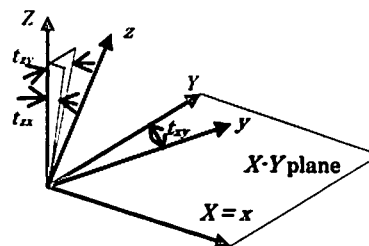


図20 CMMの座標系と理想的な座標系との関係

して、式(3)の $S_0$ を最小にする最小二乗球の中心から求めることができる。

次に、CMMの各軸の直角誤差は図20に示すように3つのパラメータで表現できる。CMMの機械座標系 $(x, y, z)$ と直角誤差のない座標系 $(X, Y, Z)$ の関係を、 $X$ 軸と $x$ 軸は等しい、 $xy$ 平面と $XY$ 平面は等しいとして表現する。直角誤差として $y$ 軸の $Y$ 軸からの角度誤差 $t_{xy}$ 、 $z$ 軸と $Z$ 軸からの $X$ 軸方向の角度誤差 $t_{zx}$ 、 $z$ 軸と $Z$ 軸からの $Y$ 軸方向の角度誤差 $t_{zy}$ の3つのパラメータで記述ができる。これらのパラメータは角度として表現される。

直角誤差のパラメータは、式(4)の近似による式(5)の $S_q$ を最小とする条件で、最小二乗法により求めた。ここで、 $r$ はピボットボールの中



心とアーム先端のスタイラスボールとの平均距離である。

$$S_c = \sum_{i=1}^n ((x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - r^2) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} X &= x + y \sin t_{xy} + z \sin t_{zx} \approx x + y t_{xy} + z t_{zx} \\ Y &= y \cos t_{xy} + z \sin t_{zy} \approx y + z t_{zy} \\ Z &= z \sqrt{1 + \tan^2 t_{zx} + \tan^2 t_{zy}} \approx z \cos t_{zx} \cos t_{zy} \approx z \end{aligned} \quad (4)$$

$$S_q = \sum_{i=1}^n ((x_i + y_i t_{xy} + z_i t_{zx})^2 + (y_i + z_i t_{zy})^2 + z_i^2 - r^2) \quad (5)$$

水平面より+45° および-45° のXY平面における測定誤差をシミュレーションにより示した(図21)。図21(a)および(b)の水平面の±45°方向の比率で、 $t_{xy}$ の推定が可能であることが分かる。同様に、図21(a)、(c)および(e)より+45°および-45°のずれのX方向と大きさが $t_{zy}$ が推定可能であり、図21(c)、(d)および(e)より+45°および-45°のずれのY方向と大きさが $t_{zx}$ の推定が可能であることがわかる。

この結果は、式(5)の $S_q$ を最小とするような最小二乗法の当てはめ結果と一致する。以上より、MCGにより直角誤差パラメータが推定可能なことを確認した。

### 5.3 MCGのシミュレーション

アームの長さを100mmとし、3つの直角誤差パラメータを種々に変化させた場合、水平面(0°),

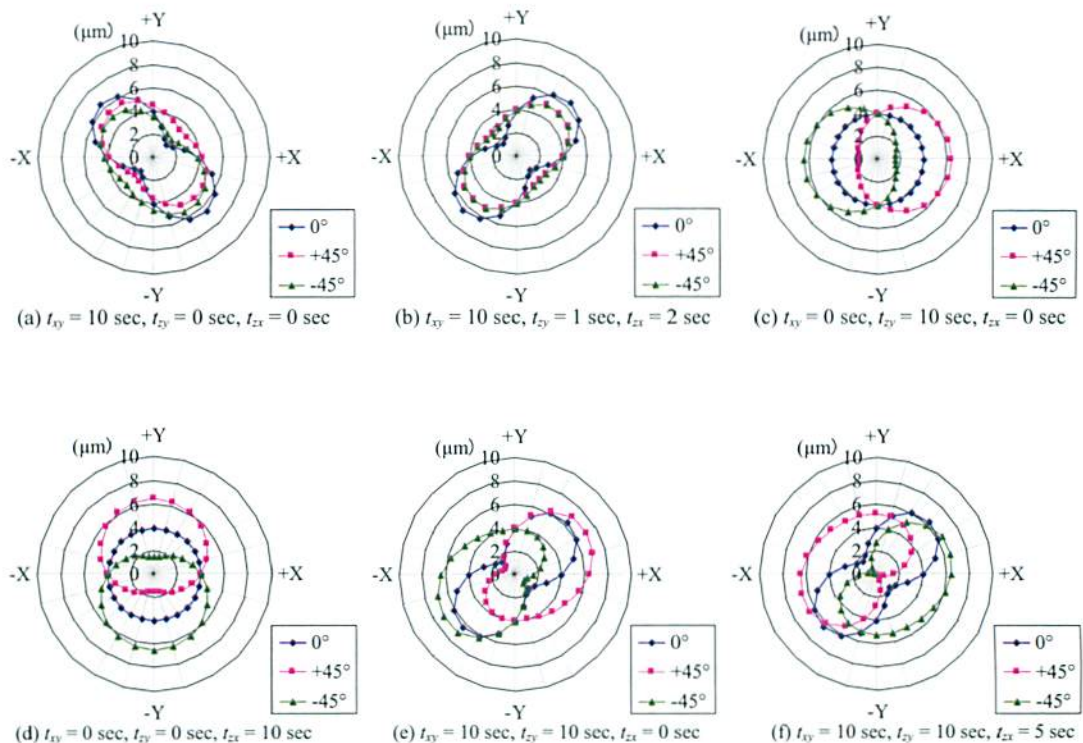


図21 直角誤差パラメータを変化させた場合のXY平面における測定誤差のシミュレーション

## 6. まとめ

回転式プロービングシステムによる測定の指示誤差である形状誤差, サイズ誤差, 位置誤差の評価を行うとともに, CMM の直角誤差を利用して, 校正球の位置と測定位置の直角誤差の値を用いて位置誤差を評価する手法を提案した.

サイズ誤差については, 校正球の位置と測定位置に関係がなく, 校正球によって回転式プロービングシステムのパラメータ設定を行うときのスタイラス先端球の球径測定が影響することを確認した.

位置誤差と形状誤差については, 位置誤差が小さくなれば形状誤差も小さくなると考えられることから, 位置誤差について, 校正球の位置と測定位置の関係を検討し, 校正球の位置と測定位置が近いほうが両方の位置の直角誤差の差が小さくなるため, 位置誤差が小さくなることを指摘した.

MCG によって評価した校正球の位置と測定位置の直角誤差の値を用いて, 位置誤差を評価する手法の妥当性を円筒ゲージの測定により確認した.

回転式プロービングシステムによる測定では, 校正球の位置と測定位置の関係が重要で, 両方の位置が近いほうが位置誤差に対して有利であるため, CMM の測定領域のほぼ中央に校正球と測定物を設置するのが望ましい.

得られた結論は以下のとおりである.

- (1) サイズ誤差は, 校正球によって回転式プロービングシステムのパラメータ設定を行うときの, スタイラス先端球の球径測定が影響することを指摘した.
- (2) CMM の測定位置によって, 直角誤差が変化していることを指摘した.
- (3) MCG によって評価した校正球の位置と測定位置の直角誤差の値を用いて, 位置誤差の評価が可能であることを確認した.
- (4) 校正球の位置と測定位置を最適な位置に設置することにより, 位置誤差を小さくできることを確認した.

今後は, 現場環境の問題点である振動, ゴミ, 空気などの環境の影響や校正方法, 温度計の設置

位置, プロービングシステムの評価などの管理方法について検討し, 現場環境の CMM の高度化を目指す.

## 謝 辞

この研究は, 競輪の補助金を受けて行われたことを付記して謝意を表します.

## 参考文献

- 1) 高増潔: バーチャル三次元測定機計測, 計測と制御, 40, 11 (2001) 801.
- 2) 大西徹, 高瀬省徳, 高増潔: 現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究 (第 1 報) - 温度ドリフトの評価および補正 -, 精密工学会誌, 73, 2 (2007) 270.
- 3) 大西徹, 高瀬省徳, 高増潔: 現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究 (第 2 報) - 直角誤差補正 -, 精密工学会誌 73, 7 (2007) 818.
- 4) 大西徹, 高瀬省徳, 高増潔: 現場環境における三次元測定機の高度化に関する研究 (第 3 報) - 低熱膨張ブロックゲージを用いた温度補正の評価 -, 精密工学会誌 76, 5 (2010) 541.
- 5) A. Balsamo, D. Marques, S. Sartori, A Method for Thermal-Deformation Corrections of CMMs, Annals of the CIRP 39/1, 1990, 557.
- 6) J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. Van den Bergh, Compensation of Static and Transient Thermal Errors on CMMs, Annals of the CIRP 50/1, 2001, 377.
- 7) J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. Van den Bergh, B. Schacht, Interaction between workpiece and CMM during geometrical quality control in non-standard thermal conditions, Precision Engineering 26, 2002, 93.
- 8) M.H. Attia, S. Fraser, A generalized modelling methodology for optimized real-time compensation of thermal deformation of machine tools and CMM structures, International Journal of Machine Tools & Manufacture 39, 1999, 1001.

- 9) 阿部誠, 高増潔, 大園成夫, 沢辺雅二: 空間座標の比較測定による CMM の構成 (第 1 報) - パラメトリックエラーモデルの構成とそのシミュレーション-, 精密工学会誌, 66, 3, (2000), 483.
  - 10) 高増潔: 光, 非光による形状計測 精密測定の課題, 2006 年度精密工学会秋季大会シンポジウム資料, 39.
  - 11) JIS B 7440-5:2003 (ISO 10360-5:2001 と同等) 「製品の幾何特性仕様 (GPS) - 座標測定機 (CMM) の受入検査及び定期検査 - 第 5 部: マルチスタイラス測定」.
  - 12) 形状計測研究会: ISO 15530-2, -6 アセスメント測定 Protocol (Final)
  - 13) 佐藤理, 大澤尊光, 高辻利之: ISO 15530-2, 6 アセスメント持ち回り測定結果報告, 第 34 回計測分科会資料, 156.
  - 14) 荻野健, 阿部誠: ISO 15530-2, 6 による校正の不確かさ評価方法についての考察, 第 34 回計測分科会資料, 142.
  - 15) J.-P. Kruth, P. Vanherck, C. Van den Bergh, B. Schacht, Interaction between workpiece and CMM during geometrical quality control in non-standard thermal conditions, Precision Engineering 26, 2002, 93.
  - 16) RENISHAW Catalog: Probing systems for co-ordinate measuring machines.
  - 17) RENISHAW Catalog: The Machine Checking Gauge.
-



## (真円度測定機用切欠き標準の試作)

### 1. はじめに

真円度測定機を正しく使用するための標準として、次の二つが真円度測定機 JIS B 7451 : 1997 に規定されている。

一つは、回転精度校正用標準器であり、半径方向の回転精度を評価するもので、球、半球又は円筒形状の標準器である(軸方向の回転精度評価もある)。

他は、拡大倍率を校正するための標準器である。この拡大倍率校正のための標準器には次の三つが規定されている。

- 1) 複数ブロックゲージによる段差(オプティカルフラットに厚さ  $10\mu\text{m}$  以上異なる2個のブロックゲージを密着したもの)を評価する。
- 2) 倍率校正器(ねじおよびてこ、ねじおよびくさびなどを利用して正確な寸法の変位を静的に与えることができる校正器)を用いる。
- 3) 校正用標準器(測定子に動的かつ一定の変位を与えるため、外周面上に一つ以上の小さな平面、または曲面をもつ円筒形の器具・一般的には切欠き標準と呼ばれている)を用いる。

当所では、動的な評価が可能であり、かつ評価も簡便に行えることから、切欠き標準を倍率校正の標準器として普及させようと考えている。

そのため、どのようにすればこの切欠き標準による倍率校正の手法が普及するか、またより正しい切欠き標準の値付けが可能かを検討している。以下、検討結果を順次示す。

### 2. 真円度測定の現状

今日、真円度測定の被測定物は風車の回転軸などのような直径1メートルを越える極大型のものから、微細な形状を評価するための三次元測定機の接触子先端球のような  $0.06\text{mm}$  にも達する極微細なものまであり、その測定範囲が大きく広がっている。

さらに、測定の高速化・高精密化の方向に向かっていく。これらの要求に対し、測定機に要求される能力は測定力を小さくし、周波数応答領域を広くし、回転速度を遅く、あるいは速く

し、かつ円周方向の角度分割を微細にするなどの広範囲にわたっている。



図1a) 軸直径1メートル以上

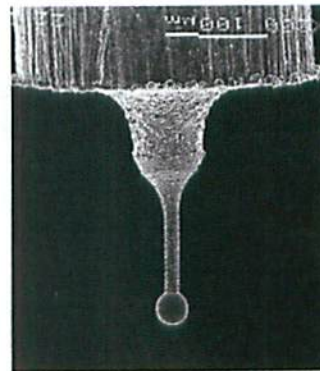


図1b) 0.06mm球

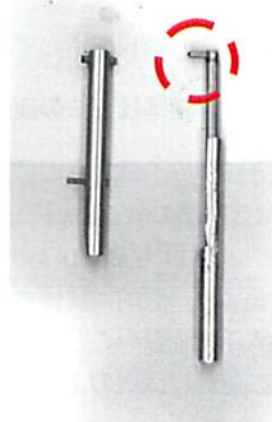


図1c) 左は標準のスタイラスで右は粗さ測定機のスタイラスで先端は  $2\mu\text{m}$ R円錐(丸印内)被測定物の径が細くなるほど、接触子の先端径も小さくしなければならない。

このような状況から、測定機の倍率校正を簡便で、しかもナノメートルオーダーまでをカバーできる標準が必要になってきている。

図1に実在する被測定物を示す。併せて、評価する接触子の回転数（6回転/分）による測定速度と表面粗さ測定における測定速度との比較を表1に示す。表1より真円度測定の場合の測定速度が非常に速い（被測定物の直径が大きくなるほど）ことがわかる。

### 3. 当所の真円度測定

現在、当所では真円度測定機用校正標準器の評価業務を行っている。

回転精度校正用標準である半球形状の標準器の評価では、位相差法を利用したマルチオリエンテーション法により対応している。測定条件は回転数6回/分、カットオフ値50(μm)である。

一方、切欠き標準器の評価では、被測定物と同等の切欠き深さを持つ、校正証明書付き切欠き標準を複数個用意し、これとの比較測定により対応している。測定条件は回転数6回/分、カットオフ値は500山としている。

比較測定を行なっているため、評価結果は非常に安定している。しかし、基準となる標準の校正値がどの程度正しいのか疑わしい部分もある。なお、依頼の校正周期は3から5年程度が一般的である。

図2に切欠き標準の形状を示しておく。

### 4. 切欠き標準校正法の変遷

表2に切欠き標準の不確かさと種類を示す。表2aより切欠き標準の段差値が1μm程度の不確かさを持つこと、および表2bより15から20μm程度の段差値（一般的に評価される真円度の範囲）しか入手できないことがわかる。これら切欠き標準の値付けは次のように行われている。

まず初期の頃に供給されていた切欠き標準片は段差値が3μmと12μm程度のものであった（表2bの\*印のもので、現在使用されていない）。

それが現在では20μmと300μm程度に変わってきている。また、切欠き標準の切欠き部を構成

表1 測定速度の比較

直径mm	真円度	粗さ
20	22.6m/h	
200	226m/h	
粗さ測定*		0.36m/h
段差測定**		0.072m/h

\*粗さパラメータの評価 \*\*段差値の評価

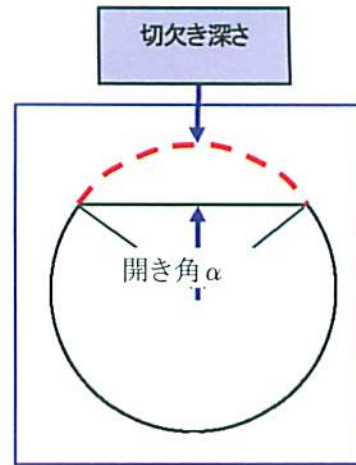


図2 切欠き標準の形状

表2a) 切欠き標準の不確かさ

品名	表示値 μm	不確かさ
A	15	±1.5%
B	20	±1 μm
B	300	±1 μm

切欠き深さ μm	直径 mm	切欠き部幅 mm	切欠き領域角度 °
300	44	7.2	18.5
20	44	1.9	4.7
15	19	1.1	6.5
12*	19	1.0	5.7
3*	19	0.5	2.9

表2b) 市販切欠き標準の種類

\* 現在は市販されていない



している円筒の直径も 19mm から 44mm へと拡大してきている。

そして、表示されている値（切欠き深さ）は図 3 の縮小機構をもつリーズンレバーアーム（試作者の名前に由来する）により、上位の真円度測定機にブロックゲージの値から移された変位量を与えられ、この目盛りにより、被測定物となる切欠き標準に段差値として与えられていた。なお、この時期の切欠き標準器は検査器機程度の扱いであった。

しかし、現在では切欠き標準の段差部を、形状と表面粗さを同時に評価できる形状測定機（フォームタリサーフ）により切欠き深さが評価されているといわれている。このときの接触子の先端形状には、真円度測定機の測定状況を考慮した、大きな直径を持つ球を採用している。

このような切欠き標準の変遷はどのような理由により行なわれたのかは不明であるが、現実には表 2b の上段に示す 3 種しか入手できない。

したがって、微細な形状の真円度評価には測定倍率の切り替え（以前よりダイナミックレンジが広がってはいるが）が必要になる。

この倍率切り替えによる誤差評価として、倍率切り替えて使用する 2 つの領域に適合する真円度形状をもつ被測定物を用意し、共通倍率（倍率の重なる部分）で評価した出力波形から、倍率切り替えによる誤差の大きさを推定している。

このような現状から、ナノメートルオーダーの真円度を評価するためには、それぞれの倍率に適した切欠き標準を準備する必要がある。

切欠き標準試料に要求されている仕様を表 3 に示す。

### 5. 真円度測定機の回転速度の影響

どのような直径と切欠き深さをもつ切欠き標準が最適かを検討するため、8~40mm の円筒の軸方向に切欠き部を 4 種類の深さにつけて試作した。これらの試作品の他に市販の切欠き標準を用い評価を行った。実際の倍率校正においては、同一の被測定物であれば、測定時の回転数に係らず、同じ測定結果を示すのが理想である。そこで、大・小二つの切欠き標準を用い、異

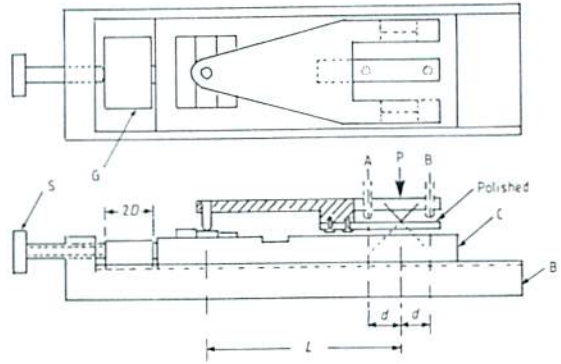


図 3 リーズンレバーアーム（ $l$  と  $d$  の比）  
段差値を 10~20 分の 1 に縮小できる。

表 3 切欠き標準品の仕様

項目	許容値
真円度	0.1 $\mu\text{m}$ 以下
表面粗さ	0.08 $\mu\text{m}$ 以下 (R z)

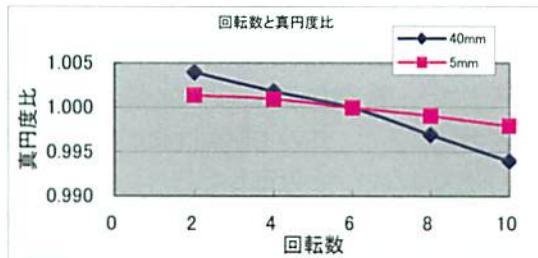


図 4 真円度の回転数による影響

### インパルス波形とその周波数成分

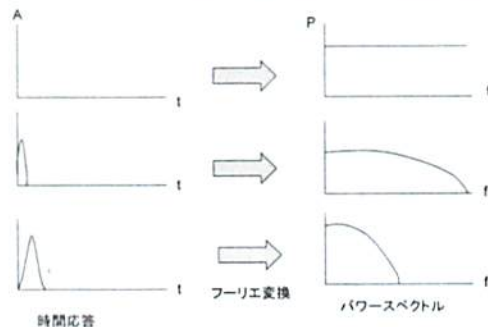


図 5 パルス波と周波数成分  
(切欠き部の開き角度が大きくなると、低い周波数が多くなる)



なる回転速度で評価してみた。それぞれのおおよその値は、大の直径が 40mm で切欠き深さが 40  $\mu\text{m}$  であり、小の直径は 8mm で切欠き深さが 20  $\mu\text{m}$  程度である。

図 4 に回転速度と真円度の関係で示す。

切欠き標準の値として、最小二乗円による評価値を用いた。表示は 6 回転/分の回転速度での値を基準とし、真円度値の比で表示した。

なお、ここでの真円度値は実際の切欠き深さ(切欠き標準の形状偏差を含んでいる)とは必ずしも一致しない。

図 4 から、回転速度により、真円度の値が異なっている(回転数が低いと真円度の値が大きい)こと、また被測定物である切欠き標準により回転速度と真円度との関係が異なる(直径小の標準の方が回転数の変化による影響が少ない)ことがわかる。また、メーカーの異なる測定機を用い、図 4 と同じ測定条件で評価した結果、測定機間による差異が認められた。

### 5.1 回転速度と切欠き部の開き角度

そこで、回転数による真円度の値の変化の原因を考えてみた。この主原因は測定機の検出器の性能ではないかと仮定した。

そこで、切欠き標準の切欠き部をパルス波の周波数として検討した。

切欠き標準の切欠き部の寸法変位は、1 回転で 1 波の円弧形状の変化であるため、有限インパルスとして扱うことができる。インパルスとその周波数成分は図 5 のような関係にある。

図 5 左図の縦軸である振幅を切欠き標準の切欠き部の深さ、横軸の時間軸を 1 回転の円周長さとして仮定すると、振幅の大きさを示している横軸の幅が切欠き部の円周方向の幅に相当することが分かる。1 回転の円周長さを同じとすると、切欠き部の幅が広くなると、振幅も大きくなる。したがって、図 5 左中段は切欠き幅が狭い標準に、図 5 左下段が切欠き部の幅の広い切欠き標準に対応する。この対応関係を図 5 右図に当てはめると、切欠き部の幅が狭い標準では周波数領域が高くなり、広い切欠き幅の標準では低い周波数側に現われることが分かる。

使用した切欠き標準の切欠き部開き角(図 2

の開き角  $\alpha$ ) を度のオーダーで表わすと、大の試料では 7 度であり、小の試料では 11 度となる。これが測定時の回転数による真円度値に影響したものと推定される。

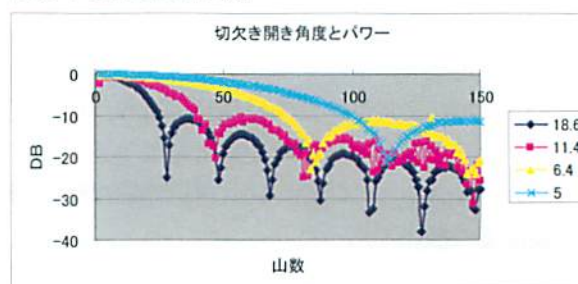


図 6 切欠き標準の周波数表示

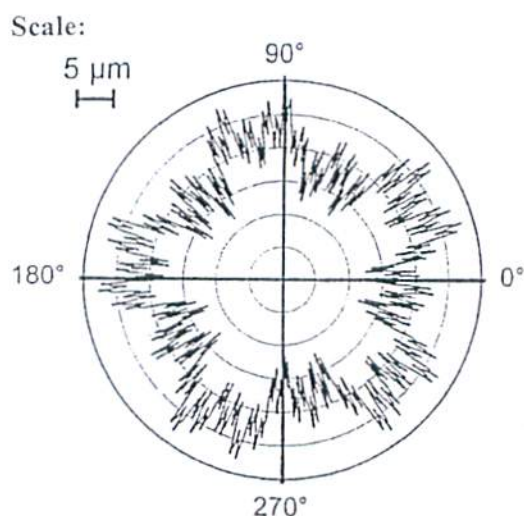


図 7 マルチウェーブ標準 (Multi-wave standard)

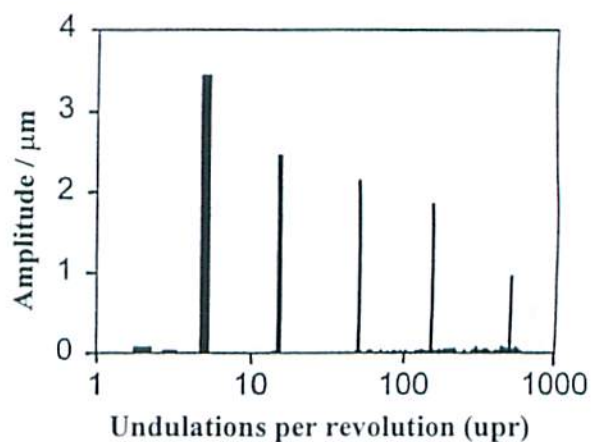


図 8a) マルチウェーブ標準のパワースペクトル

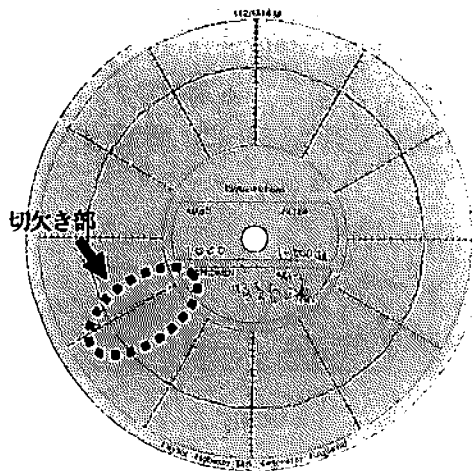


図 8b) 切欠き標準の出力波形

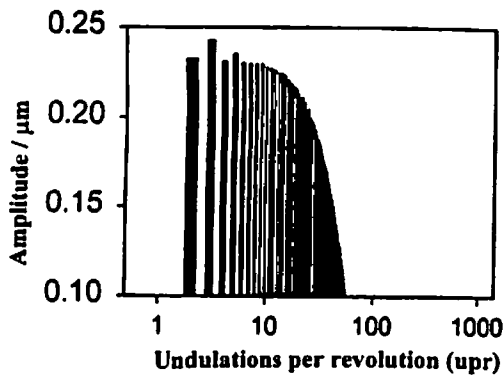


図 8c) 切欠き標準のパワースペクトル  
(直径 20mm・段差 12μm)

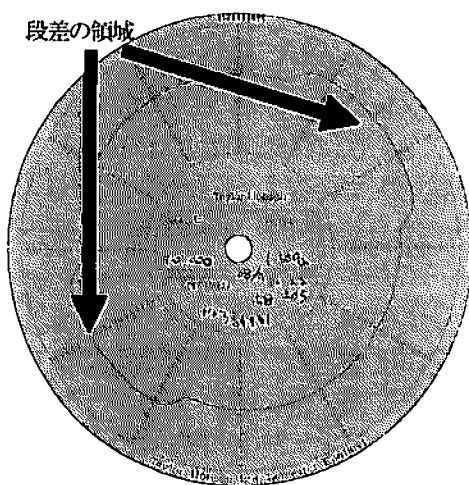


図 9a) 新しい標準の極座標表示

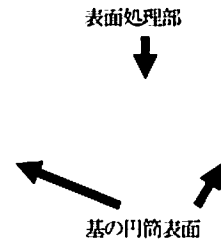


図 9b) 新しい標準の直交座標表示

そこで切欠き標準の出力波形を周波数解析してみた。そのうちの一部を切欠き部開き角度を変数として 150 山までで表示した。その結果を図 6 に示す。得られた出力波形の振幅が異なるので周波数 (山数) の最大振幅を 1 として正規化して表記した。

なお、測定時の回転速度は 6 回転/分である。

図 6 より切欠き部開き角度が小さくなるにつれて、周波数領域 (山数) が大きい側まで存在していることが分かる。したがって、検出器の応答周波数が同じであれば、切欠き部開き角度が大きい方が有利であることがわかる。

## 6. 新しい切欠き標準片の試作

ここで、これまでの切欠き標準についてまとめると、次のようになる。

- 1) 切欠き部が軸と平行であるため、真円度測定機かダイナミックレンジの広い形状測定機でしか、切欠き深さの評価はできない。
- 2) 形状測定機での切欠き深さ評価は円弧補間による最小二乗法を使用する必要がある。
- 3) 評価対象である切欠き部の円弧基準となる領域が狭いため、誤差を生じる。

このように、現在の切欠き深さ評価には欠点がある。これらの欠点を改善するため、次のような切欠き標準を提案した。

切欠き部を軸方向と直角にし、ポケット状の形状 (キー溝形状) とする。切欠き部の底の平面を基準にし、軸方向に切欠き標準を回転させ測定機の走査面を水平にする。この状態で切欠き標準を鉛直軸中心に 90° 回転させる。そして、切欠き標準の円筒最上部の母線に沿って、切欠



き部を挟んで表面粗さ測定機により測定する。その結果、切欠き部が段差溝となる直線として現われるはずである。

このような想定で加工依頼したが、切欠き標準のポケット部の形状と表面粗さが希望する値に達しないためか、いまだ納品されていない。

次善の策として次のような形状の切欠き標準を提案した。

図 7 のような振幅と波長の異なる波形を円筒上に創成した別タイプの校正標準がある。

これはマルチウェーブスタンダード (MWS multi-wave standard) と呼ばれている。図 8 にマルチウェーブ標準と切欠き標準のパワースペクトルを示す。図 8 より、これら標準の周波数領域が異なることがわかる。

このマルチウェーブ校正標準の形状を真似て、軸方向に表面粗さ測定機を走査し、段差波形として評価できる標準片を提案した。

それは円筒にスパッタし、膜を円周の一部に処理するものである。トライした新しい倍率校正用標準の極座標波形と、直交座標波形を図 9 に示す。

試作した円筒の直径は 19mm で  $1\mu\text{m}$  の膜厚を目標とし、処理した膜の領域は軸方向 5mm、円周方向 10mm とし、 $180^\circ$  の間隔とした。

図 9 より分かるように、素の円筒として市販品を使用したため、真円度が悪く、この影響により処理した膜厚が一定の厚みになっていない。

この結果から見ても表 3 に示されている形状精度が切欠き標準には必要であることがわかる。

### 6.1 新提案の切欠き標準の段差値評価

段差値が評価できる程度の標準ができたので、いろいろな評価領域を用いて段差値を計算した。評価の方法は次のとおりとした。

- 1) 真円度測定機により出力波形を得る。
- 2) この出力波形を約 2,880 点 (1 周) にデジタル化する。
- 3) 膜厚部やキズの部分を除き最小二乗円を計算し、中心座標を原点に移動させる。
- 4) 評価部分を抜き出し、基準となる部分 (スパッタ処理していない素の円筒部) より最小二乗直線を求める。

- 5) スパッタ処理部より最小二乗直線を求める。
- 6) スパッタ処理部の中央位置を求める。
- 7) 得られた二つの最小二乗直線のスパッタ処理部中央位置での値の差を段差値とする。

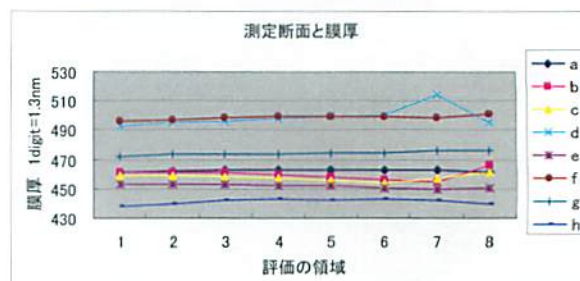


図 10 新しい標準の段差評価値

この手順でスパッタ処理部・未処理部の評価領域の長さを変え、段差値を求めた。その結果を図 10 (図 9 の円筒の片側のスパッタ部) に示す。

図 10 の a から h がスパッタ処理した円筒軸方向 5mm の範囲内での異なる断面における 8 つの段差値であり、横軸の 1 から 8 は膜厚評価に利用した評価領域の差異による影響である。段差値を出力値そのままに表示したが、1 デジットは 1.3nm に相当する。(段差値は  $0.6\mu\text{m}$  程度を示している)

段差値を求めるためのスパッタ処理部と未処理部での最小二乗直線は、理想的には、お互いに平行になるはずであるが、実際には図 9b の形状波形から想像できるように、それぞれの直線の傾きが異なり交叉している。また、図 10 より円筒の軸方向の高さ位置により段差値も変動している。さらに、評価領域が変わることで段差値が変動していることがわかる。これらの原因の大部分は素の円筒の形状精度である。

これらの評価結果から、現在の新提案の校正標準試料の状況は改善の余地はあるものの、ある程度実用に耐える校正標準になる見込みはあると考えている。

なお、図 11 に非接触測定機による新しい切欠き標準の出力波形を示す。非接触検出器のためかスパイク状の波形が多く見られ、接触式による評価結果とはあまり似ていない。



## 7. おわりに

今後の方針としては、形状精度の良い素の円筒を入手し、再度スパッタ処理する。その他の検討要因としては、スパッタ処理に関するもので、この操作が膜厚の均等さに影響を与える。

これまでのスパッタ処理は、素の円筒を窓(この部分に膜が着く)の2ヵ所開いた治具に収め、これを回転させながら膜厚処理を行っている。このときの加工条件、すなわち、スパッタのノズルと被加工物との距離、治具の回転速度、スパッタ時間、スパッタ粒子の直進性など多くの要因が処理膜の均一性に影響を与えるといわれている。

実際に測定していた気づいた点は、真円度測定機の接触子の測定力により膜が剥がれたり、摩擦力によっても剥がれたりした。このため、評価時には接触子の先端部に薄く油を塗布し、測定力を軽くすることで対応した。

また、被加工物の形状精度と膜厚との関係から、どの程度の膜厚をもつ倍率校正標準が実現可能かも検討する必要がある。さらに、図8のマルチウェーブ標準のような、検出器の周波数応答性を評価する標準をとのようにより校正するなど、いろいろな課題がある。

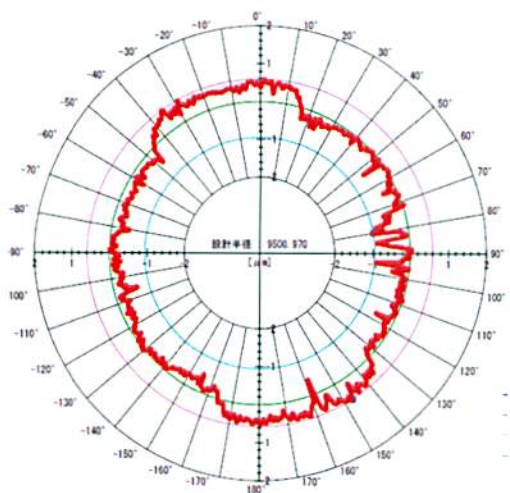


図11 新しい標準の非接触測定機による評価

これまで、切欠き標準を用い値付けされた真

円度測定機を前提に議論してきた。値付けのされた切欠き標準により、測定機の倍率校正を行い、その値は $0.1\mu\text{m}$ 程度までは移し代えられることを確認している。しかし、この基準となる切欠き標準の切欠き深さを絶対値としてどの程度正確に与えられるかの情報があまりない。

今後は10nmオーダーの値が要求される状況に対応するためには、何らかの打開策が必要になっている。

われわれは、切欠き標準の使いやすさを重視し、あくまでもこの標準により精度向上を狙っている。

## 謝辞

本研究は、財団法人JKAの競争補助金を受けて実施したものであり、ご支援いただいた関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 真円度測定機 JIS B 7451
- 2) Uncertainty analysis for roundness measurements by the example of measurements of on a glass hemisphere M Neugebauer Meas.Sci.Technol. 12(2001) 68-76
- 3) Industrial Metrology Surface and Roundness Graham T. Smith Springer
- 4) Handbook of Surface Metrology David J. Whitehouse Institute of Physics Publishing
- 5) テーラーホブソン(株) カタログ
- 6) (株)小坂研究所 カタログ
- 7) Foundations of Mechanical Accuracy Wayne R. Moore 国際工機株式会社



## (段差評価手法による不確かさ比較)

### 1. はじめに

測定結果の信頼性の表現方法として、近年、不確かさが広く用いられるようになってきている。また、いろいろな方法により、不確かさが見積もられている。しかし、それら不確かさの値はどの程度妥当なのかを検証するため、粗さ測定機による段差評価を例にとりあげた。

その手法は、測定機の目盛りを校正するための標準を同一とし、2種の測定機を用いて、ある被測定物の段差を評価した。その際、段差値の計算方法を4種とし、それぞれの不確かさを求め、比較検討した。

なお、被測定物を含め、使用した標準試料にはすべて不確かさが表記されている。これらの結果から、被測定物の表示不確かさを参考に、測定機による影響と評価値を求めるための計算方法による不確かさへの影響について検討した。

### 2. 不確かさ

計測用語 JIS Z 8103:2000 によると、不確かさ(uncertainty)とは合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴付けるパラメータ。これは測定結果に付記される。

備考1. パラメータは、例えば標準偏差、(またはその倍数)であっても、または信頼水準を明示した区分の半分値であっても良い。

備考2. 測定の不確かさは、通常、多くの成分からなる。それらの成分の一部は、一連の測定結果の統計的分布に基づいて推定可能で、試料標準偏差で示すことができる。その他の成分は、経験、または他の情報に基づいてだけ推定が可能である。

備考3. 測定の結果は、測定量の値の最良推定値であると理解されている。また、補正や参照標準に付随する成分のような系統効果によって生じる成分も含めた、すべての不確かさの成分はばらつきに寄与すると理解されている。

と記述されている。

しかし、不確かさに含まれる系統誤差は補正などにより除くとされているが、認識されてい

ない系統誤差も含まれる可能性がある。また、拡張不確かさの中にはこの系統誤差と偶然誤差の双方に包含係数(通常は2,あるいは3)が掛けられるが、偶然誤差の方にのみ係数が掛かるべきだとの意見もある。さらに、実際には持ち回り測定などの測定方法や評価対象となる被測定物が同じ時にのみ、不確かさの値が比較できるという意見も聞く。

一方、測定機などのメーカーのカタログに記載されている不確かさなどをみると、不確かさの値が小さいほうが良く、その不確かさの小さい装置の方が正しいかのように思われがちである。また、一方で不確かさの値が商取引上の安全を考慮して大きく表示されていることもある。

このような現状を考慮し、表示されている不確かさはどの程度正しいかを検討するため、以下の実験を行った。

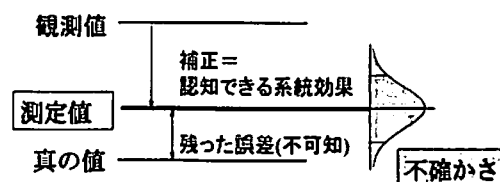


図1 不確かさと真値

### 3. 当所の校正業務

当所では1nm~100 $\mu$ mの測定領域をカバーする粗さ測定機(以下、測定機-2と表記する)により、測定機を校正するための校正用粗さ標準片の評価業務を行っている。この測定機の校正は半年に1度行っている。その手順を示すと、次のようになる。

校正証明書付き段差標準試料を5種類用意する。それらは呼び値で24・14・2.62・0.37・0.018 $\mu$ mである。これらの標準試料を用い、それぞれの測定位置を中央部に対称に9カ所測定する。これを1セットとし、反復を3回行う。反復は午前・午後と異なる日時に行う。これらの条件で行なわれた合計27個の測定結果の平均値と標準偏差を参考にし、標準の表面のキズなどによる影響をみながら再測定の必要な場合は、再測定を行う。

測定条件は測定速度0.02mm/s・測定力100 $\mu$ N

で $\lambda$ s フィルタ無しで、測定長さは1~3mmである。このようにして得られた値とそれぞれの校正値とを用い一次回帰式を求める。この回帰式の値により、依頼された被測定物の値を評価している。

なお、この回帰式は9回分の値を用い、新・旧を順次入れ替えて求められている。これは何らかの事情で、新規の1回分の値に大きな値が入ってきても、全体としての回帰式への影響があまり出ないようにとの配慮の結果である。

また、現在のところ依頼された評価結果には不確かさの表記は行っていない。

#### 4. 評価方法

上記の測定機（測定機-2）の他に、同様な門型構造をもつ粗さ測定機（以下、測定機-1と表記する）を加え、合計2台を使用して比較検討する。表1に、この評価に使用した全ての段差標準試料を示す。使用した段差標準試料は被測定物を含め合計12個になる。

なお、上記で示した通常業務で使用している段差標準は表1の標準4c(cは段差値が大きい)と標準4f(fは段差値が小さい)、標準5、標準6と標準7に対応する。

##### 4.1 目盛り校正に使用する段差評価方法

測定機の見盛り校正は上記校正業務での方法とは異なる手法を用いる。すなわち、同程度の段差値を有する8個の段差標準試料（標準1~4の大(c)と小(f)）を用い、同じ手法により目盛り校正作業を行なう。この作業を測定機-1と測定機-2に同様に適応する。この同程度の段差標準を4個用いたのは、不確かさを小さくすることを目的としている。なお、測定は位置を変えた繰返し9を3回（合計27）とし、これを反復2として行った。

ただし、測定機の都合により、段差値の評価方法が異なる。図2に、使用した段差標準の形状と、その段差値の評価方法を示す。図2のように使用した段差標準は3本溝形状であり、この中央部分の溝の段差値が表示されている。

測定機-1は基準となる最小二乗線(図2の楕円)の計算領域は連続した1カ所しか処理でき

ないため、段差となる溝部分とは離れた位置しか取れない。そのため、溝部を中心に左右別々に基準線(図2の三角印)との差を得、その平均により段差の代表値とした。したがって、最小二乗線を中央部へ延長した線と中央溝の1点からの垂線が交わる位置の縦座標の値が評価値となる。

測定機-2では溝部を中心に上面の左右1点(図2の三角印)ずつより基準直線(図2の楕円)を求め、溝部を5点取り、その中央の3点の平均値と基準直線の差を段差の代表値とした。したがって、段差値の求め方が両測定機では異なる。

表1 使用した標準試料(k=2) 単位 $\mu\text{m}$

	表示値	不確かさ	表示値	不確かさ
標準1c・f	2.61	0.05	0.40	0.01
標準2c・f	2.67	0.05	0.38	0.01
標準3c・f	2.60	0.05	0.38	0.01
標準4c・f	2.62	0.05	0.37	0.01
標準5	24	0.14	—	—
標準6	14	0.088	—	—
標準7	0.018	0.0009	—	—
被測定物	—	—	0.4501	0.0027

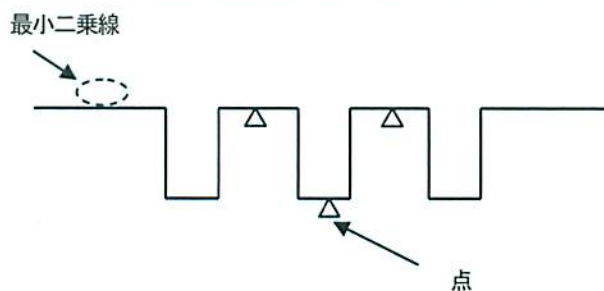


図2 段差評価方法の差異

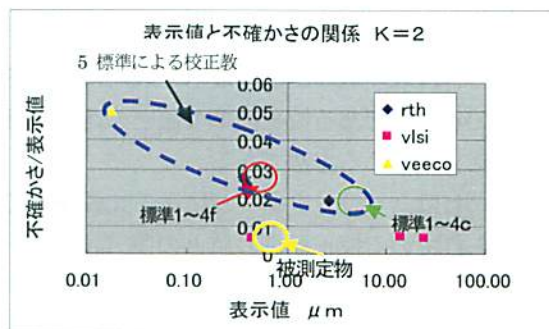


図3 使用した標準試料の表示値と不確かさ

推奨されている一般的な段差値評価方法は、溝形状の溝を挟む上面両側により最小二乗線を求め、更に溝底面も最小二乗線を求める。そして、溝中央位置より垂線を立て、これが上面と底面の直線の交点間の距離を段差値とする。これが最も一般的である。しかし、測定機の計算ソフトの都合で、理想的な評価方法とは異なる手法で段差値を求めた（メーカーより供給されている評価用計算ソフトは貧弱である）。この段差評価法による影響が被測定物の形状精度に大きく影響することが推測される。

これらの値を用い、以下評価する。

ここで測定機による表示の桁を示すと、測定機-1は10nmである。これは測定縦倍率の大きさと段差表示値とが連動しており、今回の測定倍率（1万・5万倍）では表示桁が10nmになっている。

一方、測定機-2では0.1nmまで表示される。

このように測定機によりその個性が異なっている。

図3に、使用したすべての段差標準の表示値と不確かさを示す。

図3より段差標準試料の表示値と不確かさの関係には2系統あるように見える。一般的には表示値が小さくなるにつれて、対象試料の形状精度の成分が大きく不確かさに影響するため、指数関数的に大きくなる傾向にある。

#### 4.2 被測定物評価のための段差値の求め方

また、被測定物の段差値を求めるための標準試料の使用法は、次のような大別すると三種となる。

一つ目は一次回帰直線より推定する方法（評価-1, -2, -5, -11, -22）である。

二つ目は段差値算出法で最も一般的に採用されている方法である校正標準の値との比（評価-3）により求める方法である。

三つ目は、ブロックゲージによる比較測定で用いられている校正標準の値との差（評価-4）により推定する方法である。

#### 4.3 段差値の測定不確かさの推定方法

次に、被測定物の段差測定値の不確かさを求める方法について説明する。評価方法は7種類

ある。

表2 各評価値とその不確かさ(k=2) 単位μm

	測定機-1		測定機-2	
	評価値	不確かさ	評価値	不確かさ
評価-1	0.4566	0.0049	0.4528	0.0049
評価-2	0.5680	0.036	0.5442	0.036
評価-3	0.4569	0.0060	0.4530	0.0059
評価-4	0.4591	0.0050	0.4545	0.0050
評価-5	—	—	0.4508	0.0034
評価-11	0.4566	0.0120	0.4528	0.0109
評価-22	0.5680	0.0240	0.5442	0.0090

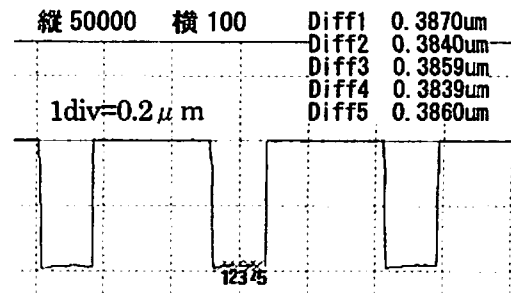


図4a) 校正用標準の段差形状 (標準4f)

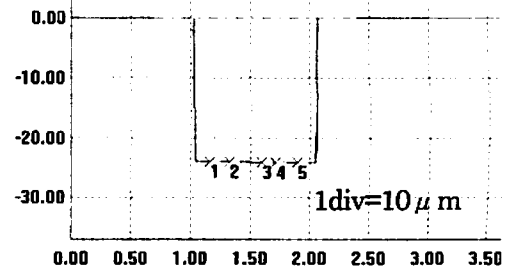


図4b) 校正用標準の段差形状 (標準5)

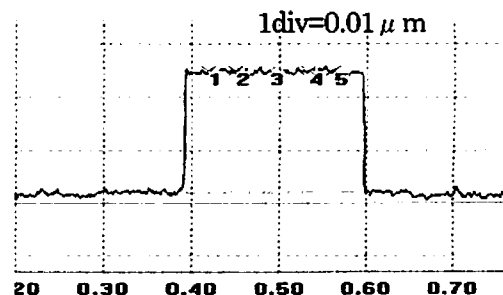


図4c) 校正用標準の段差形状 (標準7)



表2に、各評価方法による被測定物の段差値とその不確かさ(包含係数K=2とする)を示す。

1) 評価-1は標準1~4を用い、それぞれの大(c:2.6 $\mu$ m)・小(f:0.4 $\mu$ m)の合計8個の段差標準により一次回帰する。その際、不確かさの評価には使用した校正標準の表示不確かさを利用し、回帰式から推定される値の不確かさを求める方法である。この場合、使用した標準の校正不確かさ値の重み付けされた値が被測定物の不確かさ見積りに利用される。

2) 評価-2は上記標準の小の段差(標準1f~4f)のみ、つまり4個の標準(被測定物の段差値に近い)を用い回帰式を求め、これより段差値を推定する。この時の不確かさ算出も上記同様、使用した校正標準の表示不確かさを利用する。

3) 評価-3は標準1~4の小(標準1f~4f)の4個の段差標準を用い、これらの校正値との比から推定する。この時も標準の表示不確かさを使用する。

4) 評価-4は標準1~4の小(標準1f~4f)の4個の段差標準を用い、これらの校正値との差から推定する。この時も標準の表示不確かさを使用する。

5) 評価-5は標準4の大・小(cとf)と標準5, 6, 7の合計5個より一次回帰式(校正業務の方法)を求め、ここから被測定物の段差値を推定する。この時の不確かさの算出は長期間にわたる9回の評価結果より得られた回帰式のバラツキを利用する。つまり、使用した段差標準試料の校正不確かさ値は使用しない。ただし、この評価は測定機-2のみしか行っていない。

6) また、評価-11は標準1~4の大・小(標準1c~4cと標準1f~4f)を用い一次回帰するが、その際、回帰式から推定される値の不確かさを採用する。

7) 評価-22も同様とし標準1~4の小(標準1f~4f)のみを用い一次回帰し、その際、回帰式から推定される値の不確かさを用いる。

以上のような、いろいろの評価法を用い、それぞれの測定値とその不確かさを比較することにより被測定物の段差値の妥当な測定不確かさ

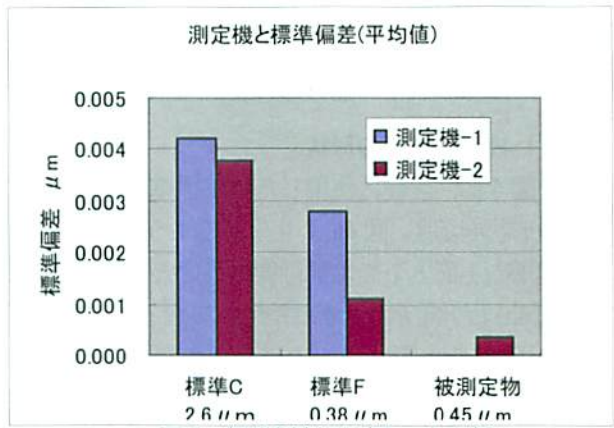


図5 標準試料のバラツキ比較



図6a) 被測定物の校正証明書

VLSI Standards, Inc. Certificate of Calibration - Annex 1 of 1 JUNE 8 2000

Step Height Standard  
Model Number: 595 4500 OC  
Serial Number: 4781-65-17

Summary of (step height) input and output quantities

Input quantity	Mean value
NIST <sub>1</sub> NIST reference (NIST region of calibration)	0.4496 μm
NIST <sub>2</sub> NIST reference (VLSI observations)	0.4495 μm
Std VLSI uncorrected observations	0.4502 μm

Output quantity	Mean value
Std VLSI corrected value	0.4511 μm
Std VLSI corrected value	0.4511 μm

Summary of (step height) standard uncertainty components, combined standard uncertainty, degrees of freedom and expanded uncertainty coverage factor

Source of uncertainty	Value (μm)	Partial derivative (μm)	Degree of freedom	Uncertainty of an
u(NIST <sub>1</sub> ) Combined	NIST reference (NIST region of calibration): 0.00114	1.00120	0.00114	8
u(NIST <sub>2</sub> ) Type A	NIST reference (VLSI observations): 0.00025	1	0.00025	8
u(NIST <sub>2</sub> ) Type B	VLSI instrument vertical resolution: 4.8E-06	1	4.8E-06	5000
u(NIST <sub>2</sub> ) Combined	NIST reference (VLSI corrected): 0.00025	1.00120	0.00025	8
u(NIST <sub>2</sub> ) Type A	Std step height uncertainty (VLSI observations): 0.00027	1	0.00027	8
u(NIST <sub>2</sub> ) Type B	VLSI instrument vertical resolution: 4.8E-06	1	4.8E-06	5000
u(NIST <sub>2</sub> ) Combined	Std VLSI corrected: 0.00027	1.00018	0.00027	8

u(NIST<sub>2</sub>) Combined standard uncertainty  
 $u(NIST_2) = \sqrt{u(NIST_2)^2 + u(NIST_2)^2 + u(NIST_2)^2 + u(NIST_2)^2 + u(NIST_2)^2}$   
 u(NIST<sub>2</sub>) = 0.00117 μm

Degrees of freedom: 8  
 Coverage factor: 2.31

図6b) 被測定物の不確かさ内訳



の値を検討した。

## 5. 評価結果

### 5.1 校正用標準の形状

図4に、評価に使用した校正標準の測定波形の形状を示す。図4aより分かるように、校正用標準の上面と下面の平行度が良いとはいえない。図4bより場所により段差値が異なる。また、図4cより段差形状に比べ表面粗さが目立ってくる事が分かる。このようなことから、段差が小さくなると、特に表面粗さや形状精度の影響が目立ってくる事がわかる。したがって、これらの影響が段差の評価方法の差異により評価結果に現われてくる。

図5に、段差標準の形状精度の差異を測定値の標準偏差で示す。

2台の測定機によるそれぞれの標準試料のバラツキを比較すると、図5のようになり、被測定物の測定の標準偏差が小さいことがわかる。したがって、測定機の見盛り校正に使用した段差標準試料より被測定物の形状精度が良いことが分かる。なお、測定機-1の不確かさが大きい理由は段差評価の方法と最小表示桁の影響と思われる（被測定物の測定機-1のバラツキはゼロ）。

### 5.2 被測定物の校正証明書

図6に、被測定物の校正証明書を示す。被測定物の表示値は $0.4501 \pm 0.0027 \mu\text{m}$ となっている。評価の方法は基準となるNIST標準の校正值(NISTc)を基にNIST標準の測定値(NISTm)と被校正物の測定値(Ym)との比として段差値が求められている。したがって、被校正物の校正值(Yc)は次式より得られる。

$$(Yc) = (NISTc) / (NISTm) * (Ym)$$

$$(NISTc) = 0.4496 \mu\text{m}$$

$$(NISTm) = 0.4495 \mu\text{m}$$

$$(Ym) = 0.4500 \mu\text{m}$$

図6bより不確かさの大きさを示すと次のようになる。U(NISTc) =  $0.00114 \mu\text{m}$

$$U(NISTmr) = 0.00005 \mu\text{m}$$

$$U(Ymr) = 0.00027 \mu\text{m}$$

U(NISTc)はNIST標準の校正の不確かさで、

この値が被校正物の不確かさの大部分を占めている。

U(NISTmr)には基準となる標準の、使用した装置による測定の不確かさと、その分解能を含み、またU(Ymr)も被校正物の測定の不確かさと測定機の分解能を含んでいる。

なお、校正証明書には使用した測定機の記載はない。

今回評価した評価結果も、この不確かさ評価手法を参考にしている。

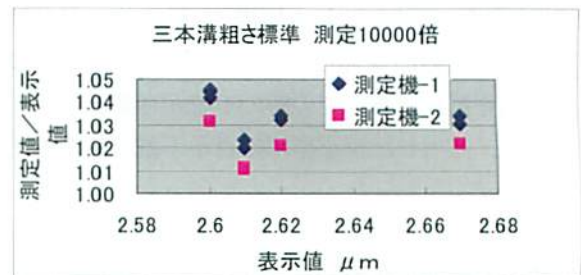


図7a) 標準試料の測定値と表示値の比 (1~4 c)

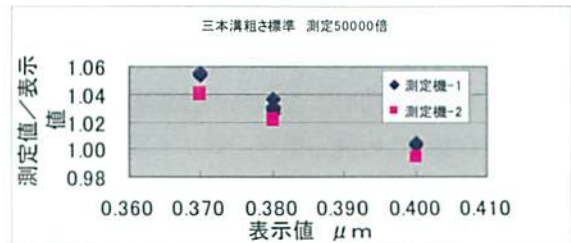


図7b) 測定値と表示値の比 (1~4 f)

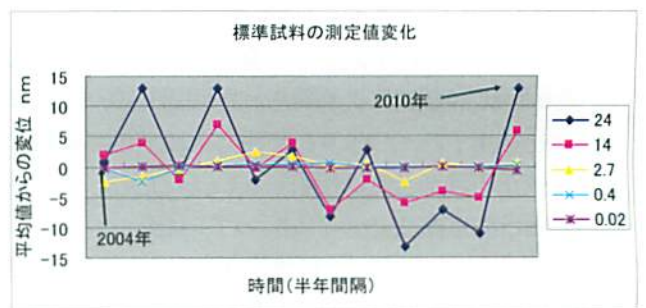


図8 長期間の測定値時系列変化

### 5.3 標準試料の値の相互関係

同じような値を持つ段差標準を4種用意できたのは、校正証明書は付いているものの、絶対値がどの程度正しいか、はなはだ疑わしいと思ったためであり、この疑わしさを解消するには複数個の標準があればよいと考えたためである。



同一標準を定期的 (3・4 年間隔) に校正機関に送り、評価してもらっていた。20 年程度で評価値には、ほとんど変化が無いことを確認している。したがって、不確かさの範囲内で段差の絶対値は正しいことが分かっている。

そこで 4 個ずつの標準試料を測定値と表示値との比で表示した結果を図 7 に示す。

表示値が正しければ、測定値と表示値との比は同一になるものと思われる。(測定機の見盛りは納入時以来のまま調整していないため、1.0 にはならない)

しかし、図 7 からみると、図 7a (標準 1c~4c) では各試料の測定機間の間隔はほぼ一定であるが、図 7b (標準 1f~4f) では異なっている。そして、両図とも試料により比の値が変化している。これらの結果から、測定機間には見盛りの線形性に差異があるのではないかとということと、段差試料の表示値に、表示不確かさの範囲内で偏りがあることが推定される。

したがって、これら標準の段差表示値を一桁よくするためには、段差形状の形状精度を上げる必要があることが分かる。

#### 5.4 評価-5 の標準試料の時系列変化

図 8 に、評価-5 (表 2 参照) で使用した段差標準試料の測定機-2 での 6 年間の測定値の変化を示す。図 8 の縦軸の単位は nm であり、それぞれの標準試料における測定値の平均からの偏差として表示されている。

図 8 のように標準 5 (表示値 24 μm) と標準 6 (表示値 14 μm) では、かなりのバラツキを示しているが、その他の標準の値は一定の値を示しているように見える。

これらの結果から測定機の見盛りは、この期間内では変化していないことが読み取れる。

#### 5.5 評価方法による値と不確かさ

再確認のために、表 3 に、評価方法ごとに評価値と測定不確かさの算出方法を示す。表 3 より評価値は評価-1 と評価-11 が同じになり、評価-2 と評価-22 も同じになる。一方、不確かさについては見盛り校正に使用した段差標準試料の校正不確かさの項が測定機-1 と-2 で同じになる。

表 3 評価値と不確かさの算出基礎

	評価値	不確かさ
評価-1	回帰式逆推定	加重不確かさ
評価-2	回帰式逆推定	加重不確かさ
評価-3	標準との比	不確かさ/4 <sup>1/2</sup>
評価-4	標準との差	不確かさ/4 <sup>1/2</sup>
評価-5	回帰式逆推定	回帰式より
評価-11	回帰式逆推定	回帰式より
評価-22	回帰式逆推定	回帰式より

表 4 主要不確かさ (K=1)

	不確かさ	測定機-1	測定機-2
評価-1	U(T)	0.00245	0.00245
	U(Tm)	0.000113	0.000102
	U(Om)	0.000100	0.000101
評価-2	U(T)	0.018	0.018
評価-3	U(T)	0.0025	0.00245
評価-4	U(T)	0.0025	0.00245
評価-5	b の分散	***	1.997 × 10 <sup>-8</sup>
	a の分散	***	3.101 × 10 <sup>-6</sup>
	e の分散	***	7.847 × 10 <sup>-5</sup>
評価-11	b の分散	1.326 × 10 <sup>-5</sup>	1.101 × 10 <sup>-5</sup>
	a の分散	4.668 × 10 <sup>-5</sup>	3.877 × 10 <sup>-5</sup>
	e の分散	2.669 × 10 <sup>-4</sup>	2.220 × 10 <sup>-4</sup>
評価-22	b の分散	3.107 × 10 <sup>-3</sup>	5.216 × 10 <sup>-4</sup>
	a の分散	4.549 × 10 <sup>-4</sup>	7.638 × 10 <sup>-5</sup>
	e の分散	2.951 × 10 <sup>-6</sup>	4.960 × 10 <sup>-7</sup>

- U(T) は基準段差標準の不確かさ U(Tm) は基準段差標準の測定不確かさ U(Om) は被測定物の測定不確かさ a は回帰式の y 切片 b は回帰式の傾き e は誤差 (一次回帰式 y=a+bx)

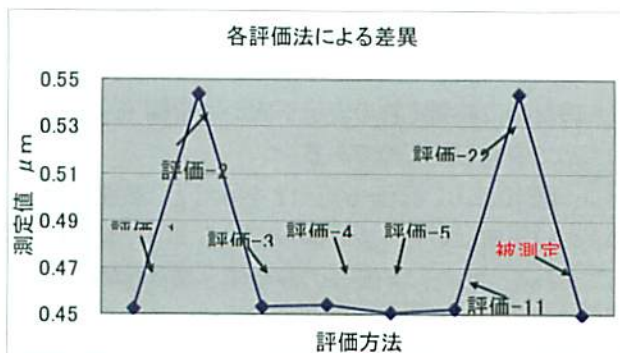


図 9 各評価方法と評価値



そして、評価-1では校正標準の重み不確かさの影響が大きく働き、試料 1f~4fの不確かさが主要不確かさを占めている。

評価-2の不確かさは4個の段差試料(試料 1f~4f)の不確かさ効果よりも、回帰からの不確かさが大きい結果、大きな校正不確かさ値となっている。

評価-3と評価-4の不確かさは試料 1f~4fの個数(4個)による効果のため不確かさが試料 1f~4fそれぞれの表示不確かさの  $(1/4)^{1/2}$  となっている。

残りの評価-5、評価-11と評価-22は一次回帰式による逆推定により不確かさが求められている。

表4にこれら評価法ごとの主要不確かさについてまとめて示した。

表4では評価-1~評価-4における基準となる校正標準と被測定物の測定不確かさは使用測定機ごとに同じ値を使用しているため、表中では評価-1にのみ表示し、代表させた。

図9に、評価方法ごとの評価値の値を示す(被測定物の校正証明書表示値を最後の項に)。

図9より評価-2と評価-22が大きな値(被測定物の表示値と異なる)になっていることがわかる。これは、使用した標準 1f~4fの値の範囲が非常に狭かったこと、および被測定物の値はこの範囲内にないため、外挿する必要があること、そして最大の理由は表示値と測定値との相関がないことによるものと思われる。そのため、これら評価-2と評価-22を除いて図示すると図10のようになる。

図10は測定機-2による、評価-1、評価-3、評価-4、評価-5と評価-11の被測定物の評価値の周りに測定不確かさの幅を示しており、参考のために被測定物の表示不確かさを幅(K=2)として表記したものである。

図10より、評価-5と-11を除くと、被測定物の校正値に対し、少し偏っているように見受けられる。また、評価-5の評価値と被測定物の値が不確かさとともにほぼ重なっていることがわかる。

評価-3と評価-4を比較すると、評価-4は評

価-3より不確かさは小さいが評価値は上側に偏っていることがわかる。この理由は不確かさの感度係数が評価-4では1であるが、評価-3では1より大きいためである。また、全体の傾向から見ると、評価-4の不確かさが小さ過ぎるのではないかと思われる。

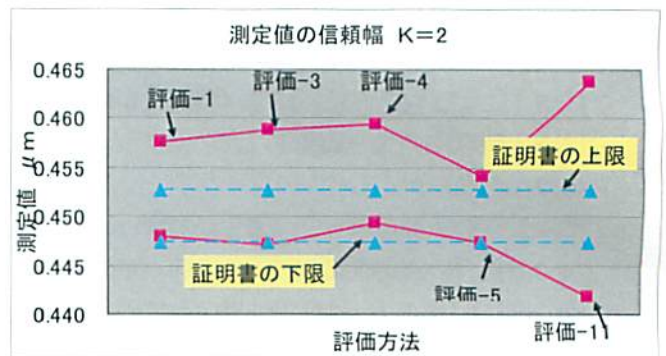


図10 測定機-2による評価値

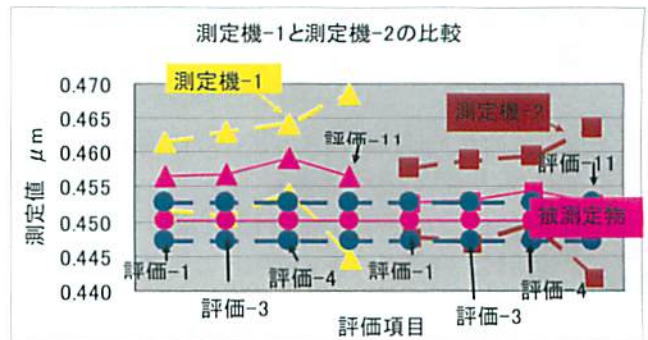


図11 測定機-1、-2による評価値と不確かさ

次に、図11に、測定機-1と測定機-2での評価-1、評価-3、評価-4、と評価-11(評価-5を除く)の評価値を不確かさの幅を付けて示す。

図11より、測定機間に差異が見られ、測定機-1の評価値が4nm程度に大きな値を示していることがわかる。この傾向は評価全体に及んでいることから、測定機の見盛り校正での評価方法の差異のためと考えられる。すなわち、測定機-1では採用した段差評価手法の影響により全体的に表示値より大きな値が目盛り校正の段階で与えられたものと思われる。

段差評価手法が影響する原因は使用した標準の形状精度にあり、一方、被測定物の形状は良い。この影響が測定機-1と測定機-2での評価



値に現われたものと推定している。もしかしたら、被測定物として、目盛り校正に使用した標準試料と同じ系統のものを使用したならば、測定機間の偏りは現われなかったかもしれない、と考えている。

この段差評価手法による影響を評価するには、測定機-1 と測定機-2 で使用した手法で同じ標準を比較すれば判断できるので、今後、検討してみる。

また、被測定物の校正証明書の表示値と測定機-2 での段差評価値を比較すると、評価-5 を除くと他は全て大きめの値を示している。したがって、校正証明書の値を信用するとそれらの評価結果には偏りがあるとも思われる。

あるいは、被測定物の校正証明書の不確かさが小さ過ぎる、あるいは偏りがあるのかもしれない。

## 6. おわりに

以上の不確かさ評価に関する結果をまとめると、次のようになる。

- 1) 一般的な段差値の評価手法である評価-3 が他の評価法と比較しても良好であることがわかる。
- 2) 不確かさの範囲内に評価結果はある。
- 3) ブロックゲージの比較測定に利用されている標準からの差としての評価-4 の値の不確かさが小さ過ぎる。
- 4) 段差評価手法の影響が現われている。
- 5) 形状精度の良い校正用標準を使用する必要がある。

被測定物の値は、校正証明書の値であるが、他の非接触測定機 (図 12 参照) により測定され

た結果は表示値より 2~3nm 大きな値になっている。この測定機による値が正しいかどうかは、別の測定機 (産業技術総合研究所に依頼中) により、不確かさと共に提供されないと分らないが、これらの結果が出次第、段差標準の依頼校正業務の値に不確かさを記載しようと考えている。

無難な不確かさとしては 6nm を考えている。

今後、標準からの差の値に付加されるべき不確かさの要因とその大きさや、段差評価の計算手法になる影響や、この手法の差異の影響を不確かさの中に系統誤差として見積もれないかなどについて検討していく予定である。

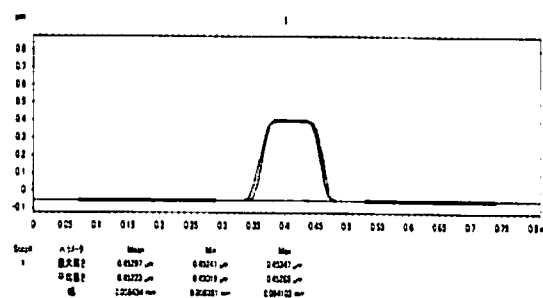


図 12 被測定物の他測定機による評価  
90 ラインの平均値

最大高さ 0.45298 μm  
(最大 0.45241・最小 0.45347)  
平均高さ 0.45223 μm  
(最大 0.45019・最小 0.45286)

非接触測定機 C C I による評価結果

## 謝 辞

本研究は、財団法人 J K A の競輪補助金を受けて実施したものであり、ご支援いただいた関係各位に深く感謝いたします。

## 研究報告書

KSK-GH22-2-1

計測技術高度化に関する研究  
—幾何形状測定信頼性向上に関する研究—

平成 23 年 3 月 31 日発行

発行所 財団法人 機械振興協会 技術研究所  
(〒203-0042) 東京都東久留米市八幡町一丁目 1 番 12 号  
電話 042-475-1155 (代表)

印刷所 株式会社 芳文社  
(〒194-0033) 東京都町田市木曾町 2320  
電話 042-792-3100