

加工機上における形状評価の研究（第2報）

Study on shape evaluation on processing machines (Part II)

電子・機械技術部 機械・加工科 渡邊孝康 小野裕道 富永隼輔

ロボット・制御科 近野裕太

日本大学工学部工学研究所 機械工学科 齋藤明徳

セミクローズドループ制御方式の3軸マシニングセンタ（MC）と2種類のタッチプローブで基準器を測定し、繰返し範囲等を調べた。プローブの違いで二次元プロービング誤差が20[μm]以上異なり、誤差に対して補正値を適用すると円筒スコヤの真円度と直径の測定値が三次元測定機（CMM）と4[μm]以下に収まった。チェックマスタの長さ測定では系統誤差と機械軸の位置決め精度の影響があった。クローズドループ制御方式の5軸MCで熱膨張係数付きブロックゲージを長さ測定した結果、既報⁴⁾の補正式と傾向が一致した。

Keywords: 機上計測、マシニングセンタ、三次元測定機、熱膨張係数

1. 緒言

マシニングセンタ（以下、MCと略記）とタッチプローブを活用し機上で加工物の真円度や平面度等の形状の評価を行うためには、多点を測定し形状を求め、形状の精確さ、繰返し範囲を明らかにする必要がある。加えてタッチプローブを使用した測定では、機械運動を含む繰返し範囲、方向特性や測定速度による影響等を考慮する必要がある。そのため、当所では、令和6年度にリングゲージ等の測定を行い、これらの影響を評価した¹⁾。

この時、実験を行った当所のMCはリニアエンコーダでX Y Z軸の座標を検出するクローズドループ制御方式だが、県内企業が使用する多くのMCは、直進軸のボールねじ軸端もしくはサーボモータのロータリエンコーダによって座標を検出するセミクローズドループ制御方式である。また、タッチプローブも当所で保有しているストレインゲージ方式と異なり、県内企業に普及している電気接点式では方向特性が大きいことが知られている²⁾。このことから、タッチプローブによる形状評価を県内企業に普及するには、セミクローズドループ制御方式のMCと電気接点式のタッチプローブで測定の繰返し範囲と精確さを明らかにする必要がある。そこで今年度は日本大学工学部工学研究所と共同研究を行い、セミクローズドループ制御方式のMCと二種類の異なるタッチプローブを用いて「JISB-6190-10:2025 工作機械試験方法通則第10部：数値制御工作機械に取り付けたプロービングシステムの測定性能評価法」を参考に計測実験を行った。また、当所のMCと熱膨張係数付きブロックゲージを使用した測定実験を行い、温度変化による長さ測定誤差を測定した。

2. 実験

事業名「基盤技術開発支援事業」

2. 1. セミクローズドループ制御方式MCによる測定実験

2. 1. 1. 面の一点測定に対するプロービングの繰返し性試験（JISB-6190-10、7.1.2.2）

日本大学工学部工学研究所保有の3軸MCと2種類のタッチプローブを使用し、X軸とY軸の単軸動作による測定を複数の速度で行い、繰返し範囲を調べた。使用したMCとタッチプローブの諸元を表1、表2に示す。直径50[mm]のリングゲージの中心を図1のとおり主軸と平行になるように設置した。リングゲージの位置は、てこ式ダイヤルゲージを使用して主軸中心と芯ずれ量2[μm]とした。また、タッチプローブの回転時の振れ量を2[μm]以内に調整した。割り出したリングゲージ中心位置をX軸、Y軸の中心座標とし、90[°]間隔で4点測定し、これを10回繰返した。スキップ位置に記録された座標値をカスタムマクロ変数に格納後、DPRNTで出力し、測定した座標から偏差と繰返し範囲を調べた。測定条件は表3のとおりである。

表1 3軸MCの諸元

メーカー	ヤマザキマザック
型式	VCN-430A
制御器	MAZATROL SmooTHC
検出方式	ロータリエンコーダ
X軸移動量[mm]	560
Y軸移動量[mm]	430
両方向位置決め系統偏差 X Y [mm]	0.001
平均両方向位置決め偏差 X Y [mm]	0.001

2. 1. 2. 円の中心位置に対するプロービングの繰返し性試験（JISB-6190-10、7.1.2.3）

2. 1. 1. で測定し求めたX、Y座標から差分を

計算し中心座標を求め、X軸中心座標の繰返し性 $R_{CIR, X}$ 、 $R_{CIR, Y}$ として評価した。

表2 タッチプローブの諸元

メーカー	レニシヨー	
型式	OMP 6 0 0	OMP 6 0
検出方式	ストレイン ゲージ	電気接点式
繰返し精度[μm]	0.35	1.00
X・Y軸2D方向特性[μm]	±0.25	—
測定圧力X Y [N]	0.06	0.75-1.4
+Z [N]	2.55	5.3
スタイラスチップ 直径[mm]	6	6
スタイラス長[mm]	100	100

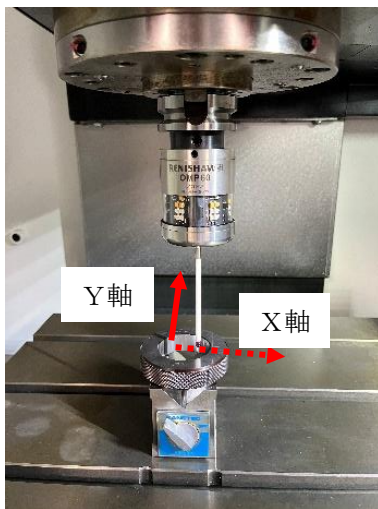


図1 リングゲージの測定

表3 面の一点測定に対するプロービングの繰返し性
試験の測定条件

リングゲージ 呼び直径[mm]	50
測定速度[mm/min]	30, 120, 240, 480
測定点数	4
測定方向	X+-、Y+-
繰返回数	10
測定時室温[℃]	18～19
測定時基準器 表面温度[℃]	18.3～18.7

2. 1. 3. X Y同時二軸運動によるプロービングの繰返し性試験

2. 1. 1. と同じ実験方法で、X Y同時二軸運動による影響を調べるため、測定アプローチ角度を

0[°]から 30[°]刻みに同時二軸運動でプロービングを行い、X、Y座標を測定した。測定した座標を極座標半径Rに変換して測定方向ごとの偏差と繰返し範囲を求めた。実験条件は表4のとおりである。

表4 X Y同時二軸運動によるプロービングの繰返し性
試験の測定条件

リングゲージ 呼び直径[mm]	50
測定速度[mm/min]	30, 240, 480
測定点数	12
測定方向[°]	周方向 30° ピッチ (0, 30, 60, 90, …, 330)
繰返回数	10
測定時室温[℃]	20～21
測定時基準器 表面温度[℃]	17.4～18.8

2. 1. 4. 二次元プロービング誤差試験 (JISB-6190-10、7.1.5)

セミクロズドループ制御方式のMCと二つの異なる検出方式のタッチプローブによる二次元プロービング誤差の評価を目的としてリングゲージの測定実験を行った。実験設置状況は2. 1. 1と同様とし、測定条件は表5のとおりである。測定した座標から、最小二乗法により求めた円の中心座標と各点の座標差を二乗和の平方根として円の半径を求め、最大最小の差を二次元プロービング誤差 $P_{FTU, 2D}$ として算出した。また算出した直径とリングゲージ直径との差から実効スタイラスチップ直径を求めた。

表5 二次元プロービング誤差試験の測定条件

リングゲージ 呼び直径[mm]	50
測定速度[mm/min]	30, 120, 240, 480
測定点数	36
測定方向[°]	周方向 10° ピッチ (10, 20, 30, 40, …, 350)
繰返回数	1
測定時室温[℃]	17～19
測定時基準器 表面温度[℃]	17.4～17.6

2. 1. 5. 円筒スコヤの測定

外径測定の基準器として、「JISB-7539 円筒スコヤ」規格品の円筒スコヤを測定した。測定は、二次元プロービング誤差 $P_{FTU, 2D}$ が小さいストレインゲージ式タッ

チプローブのみで行った。設置状況を図2、測定条件を表6に示す。測定した点群に2. 1. 4の結果から算出した実効スタイラスチップ直径を適用し補正を行い、真円度、直径、半径の標準偏差を算出した。3回測定し繰返し範囲を求めた。

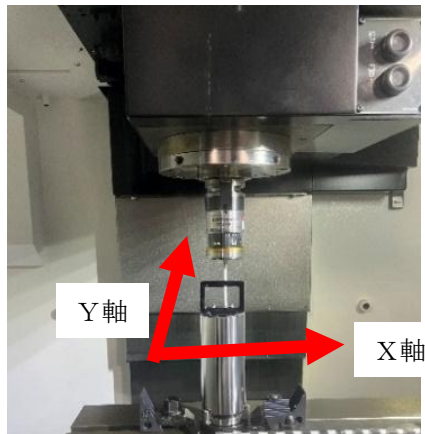


図2 円筒スコヤの測定

表6 円筒スコヤの測定条件

タッチプローブ	OMP 6 0 0
円筒スコヤ 呼び直径[mm]	70
測定速度[mm/min]	240
測定点数	360
繰返し数	3
測定時室温[℃]	19
測定時基準器温度[℃]	17.8~17.9

2. 1. 6. チェックマスタの測定

セミクローズドループ制御方式のMCと2種類のタッチプローブを使用した際の長さ測定誤差を調べる目的で、三次元測定機(以下、CMM)の検査「JISB-7440-2 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2部:長さ測定」を参考に、X軸、Y軸と平行に測定した。基準器は呼び寸法450[mm]のチェックマスタとし、各ブロックの中央寸法を真値として誤差を比較するため、測定位置は各ブロックの中心とした。基準ブロック端面から4水準を順に5回繰返し測定した。基準器は各機械のX軸、Y軸と平行に設置し、温度が測定環境の室温と平衡になるように、時間をおいて測定した。基準ブロック端面から呼び長さブロック端面の座標差を長さとして求め、また2. 1. 1から求めた実効スタイラスチップ直径で補正した長さをチェックマスタの検査値と比較し誤差を求めた。併せて繰返し範囲、測定値の標準偏差を求めた。表7に基準器の諸元、表8に測定条件、図3に設置状況を示す。

表7 チェックマスタの諸元

メーカー	(株) ミツトヨ
型式	HMC-450
測定範囲[mm]	10≤L≤450
中央寸法差の許容値	310[mm] ≤ ±2.5[μm]
	<310[mm] ±3.5[μm]
寸法差幅の許容値	310[mm] ≤ 1.2[μm]
	<310[mm] 1.5[μm]

表8 チェックマスタの測定条件

測定速度[mm/min]	30, 120, 240, 480
繰返し数	5
X軸測定呼び長さ[mm]	70, 150, 290, 430
Y軸測定呼び長さ[mm]	70, 150, 290, 410
X軸測定時室温[℃]	16~17
X軸測定時基準器温度[℃]	15~16
Y軸測定時室温[℃]	18~19
Y軸測定時基準器温度[℃]	16~17



図3 チェックマスタ設置状況

2. 2. クローズドループ制御方式の5軸MCでの熱膨張係数付きブロックゲージ測定実験

座標測定機による長さ測定で最も問題となるのが温度の影響である。長さ測定を行う測定機は、「JIS B 0621: 幾何特性仕様(GPS)―測定機器の環境条件」において、通常20[℃]で運用することになっている。一方、MCはCMMと同じような温調が制御された空間に設置されることは少ない。当所の5軸MCも空調機能のある加工室に設置されているが、部屋のスペース等の影響もあり室内全体が均一温度にはできておらず、温度変化の影響を受けていると想定される。

そこで今回は、5軸MCの設置環境の室温の変化を調べるとともに、呼び長さ2種類の熱膨張係数が校正されたK級ブロックゲージを熱電対で温度測定しながら30分間隔で長さ測定し、温度変化が測定結果に与える影響を調べた。表9に室温測定の条件、表10に使用したMCの諸元、表11に使用したタッチプローブの諸元、表12にブロックゲージの測定条件、図4に室温測定箇所及び図5に測定状況を示す。

表 9 室温測定条件

測定機メーカー	(株) 佐藤軽量計器製作所
本体型式	SK-L754
センサ型式	SK-L754-2
測定範囲[°C]	-20.0~80.0
測定精度[°C]	±0.5
設置個数	4か所
設置箇所	ch1: X軸近傍 ch2: Y軸近傍 ch3: 機械窓側 ch4: 機械正面

表 10 5軸MCの諸元

メーカー	(株) 松浦機械製作所
型式	MX-520
制御器	MATSURAG-TECH31IB
X軸移動量[mm]	630
Y軸移動量[mm]	560
Z軸移動量[mm]	510
直線軸位置決め精度X Y Z	±0.001[mm]/全長
直線軸繰返し精度X Y Z	±0.001[mm]/全長

表 11 タッチプローブの諸元

メーカー	レニショー
型式	OMP 400
検出方式	ストレインゲージ
繰返し精度[μm]	0.35
X・Y軸2D方向特性[μm]	±0.25
測定圧力X Y [N]	0.06
スタイラスチップ直径[mm]	6
スタイラス長[mm]	100

表 12 ブロックゲージの測定条件

呼び長さ	100、200
測定速度[mm/min]	30
測定方向	X+-、Y+-
OMP 400 実効スタイラスチップ 直径[mm]	5.978
ブロックゲージ規格	JISB7506 K級
ブロックゲージ材質	セラミック
ブロックゲージの 熱膨張係数[10 ⁻⁶ /K]	9.275(L100) 9.215(L200)
熱膨張係数の 拡張不確かさ[10 ⁻⁶ /K]	0.035(L100) 0.035(L200)
1測定での繰返し数	3
測定間隔[min]	30

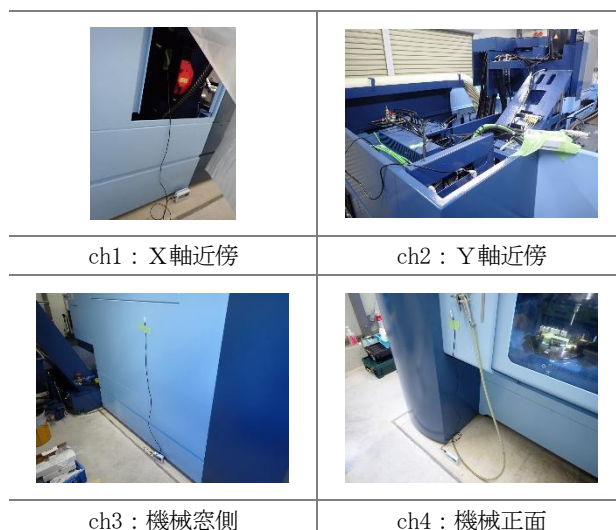


図 4 室温測定箇所

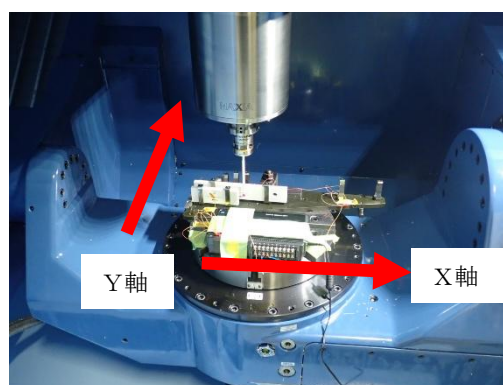


図 5 測定状況

3. 結果

3. 1. セミクローズドループ制御方式のMCによる測定実験

3. 1. 1. 面の一点測定に対するプロービングの繰返し性試験 (JISB-6190-10、7.1.2.2)

OMP 60の測定結果を図6、OMP 600の測定結果を図7に示す。OMP 60、OMP 600ともにX軸方向については、繰返し範囲が1[μm]、Y方向については2[μm]の範囲の結果となり、Y軸方向の偏差が大きくなった。OMP 600については、方向特性がない方式であることから、Y軸方向の偏差が大きい理由は機械の運動精度によるものであると考えられる。OMP 600については、測定速度30[mm/min]の時に最も繰返し範囲が大きくなった。

また、測定したX座標、Y座標の10回平均値から相対長さを算出し、リングゲージの直径50[mm]との差から、実効スタイラスチップ直径を求めた。OMP 60の結果を表13、OMP 600の結果を表14に示す。OMP 600では、X方向、Y方向での実効スタ

イラストチップ直径に差がないのに対し、OMP 6 0 ではX方向、Y方向で20[μm]の差が生じており、プローブ構造による方向特性と考えられる。

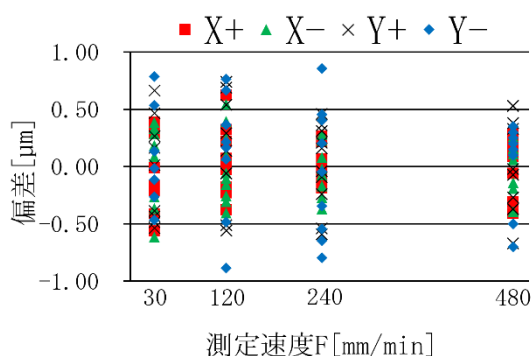


図6 OMP 6 0測定結果

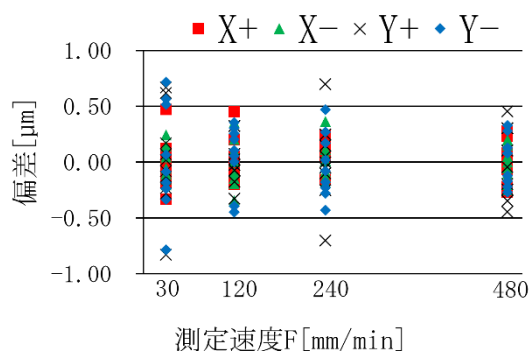


図7 OMP 6 0 0測定結果

表 1 3 OMP 6 0実効スタイラスチップ直径

測定速度F [mm/min]		30	120	240	480
実効ス タイル チップ直径 [mm]	X	5.927	5.923	5.917	5.905
	Y	5.908	5.905	5.899	5.887

表 1 4 OMP 6 0 0実効スタイラスチップ直径

測定速度F [mm/min]		30	120	240	480
実効ス タイル チップ直径 [mm]	X	5.973	5.944	5.904	5.826
	Y	5.972	5.942	5.902	5.824

3. 1. 2. 円の中心位置に対するプロービングの繰返し性試験 (JISB-6190-10、7.1.2.3)

OMP 6 0 の測定結果を図8と図9、OMP 6 0 0 の測定結果を図10と図11に示す。OMP 6 0 の $R_{CIR,X}$ は最大2[μm]、 $R_{CIR,Y}$ は最大3[μm]だった。OMP

6 0 0 の $R_{CIR,X}$ 、 $R_{CIR,Y}$ は最大2[μm]だった。3. 1. 1の結果と同様にY軸方向の偏差が大きい。これは、中心座標を求める際に、3. 1. 1のX、Yの座標差から算出している結果であるため、一点測定の変差の影響から倍の偏差として表れていると考えられる。

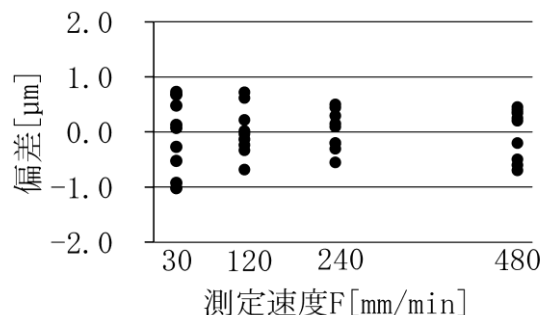


図8 OMP 6 0 $R_{CIR,X}$ 測定結果

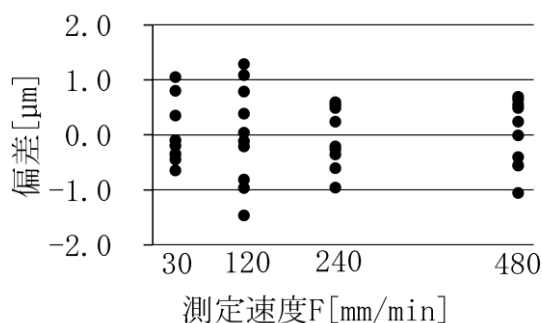


図9 OMP 6 0 $R_{CIR,Y}$ 測定結果

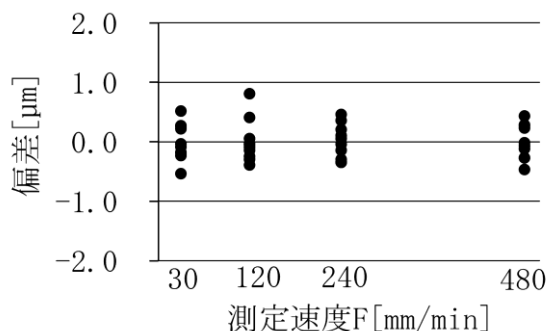


図10 OMP 6 0 0 $R_{CIR,X}$ 測定結果

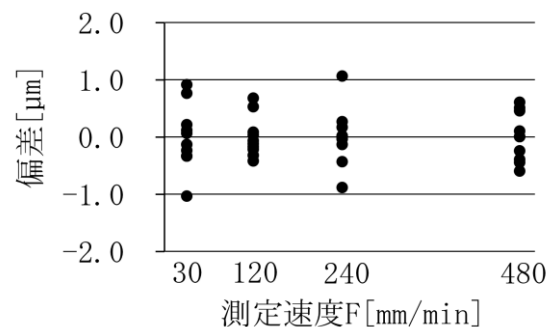


図11 OMP 6 0 0 $R_{CIR,Y}$ 測定結果

3. 1. 3. XY同時二軸運動によるプロービングの繰返し性試験

OMP 60の測定結果を表15、OMP 600の測定結果を表16に示す。共通の傾向として、OMP 60、OMP 600ともにY方向で繰返し範囲、偏差ともに大きくなっており、Y軸との同期運動による機械の位置決め誤差の影響と考えられる。また、OMP 60、OMP 600ともにF30[mm/min]で最も繰返し範囲が大きい。一方、偏差が小さいF240[mm/min]で比較した場合、OMP 60では測定方向による繰返し範囲が最大で2.6[μm]あるのに対し、OMP 600では、繰返し範囲は最大で1.7[μm]であり、機械運動精度が同じであることから、この差はプローブに起因するものと考えられる。F240[mm/min]での偏差のグラフを図12と図13に示す。

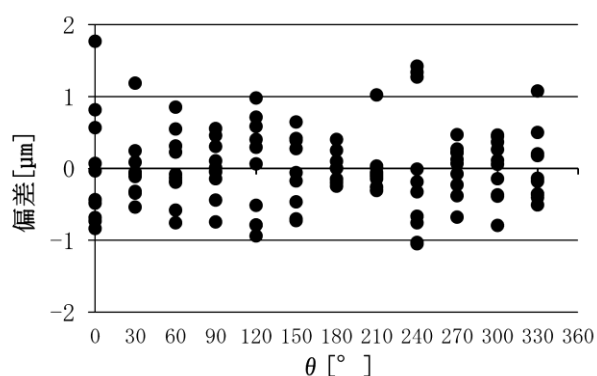


図12 OMP 60 F240[mm/min]の測定角度ごとの偏差

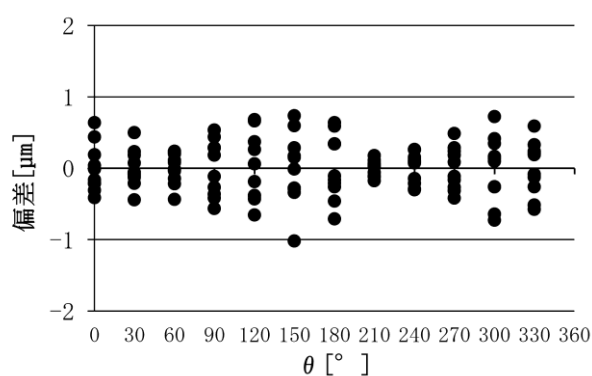


図13 OMP 600 F240[mm/min]の測定角度ごとの偏差

3. 1. 4. 二次元プロービング誤差試験 (JISB-6190-10、7.1.5)

OMP 60の測定結果を表17と図14に、OMP 600の測定結果を表18と図15に示す。結果から、OMP 60では $P_{FTU, 2D}$ が速度によらず26[μm]に対し、OMP 600では2[μm]以下と小さく、プローブ構造の違いによる方向特性が表れている。また、実効スタイラスチップ直径について、OMP 600では線形に

表15 OMP 60のXY同時二軸運動によるプロービングの繰返し性試験結果

測定速度	F 30 [mm/min]		F 240 [mm/min]		F 480 [mm/min]	
測定方向 θ [°]	繰返し範囲 [μm]	標準偏差 [μm]	繰返し範囲 [μm]	標準偏差 [μm]	繰返し範囲 [μm]	標準偏差 [μm]
0	2.2	0.7	2.6	0.8	1.2	0.4
30	1.1	0.4	1.7	0.5	1.7	0.4
60	2.9	0.9	1.6	0.5	1.7	0.6
90	4.1	1.3	1.3	0.4	1.1	0.4
120	2.9	1.1	1.9	0.7	2.3	0.7
150	3.5	1.2	1.4	0.5	2.3	0.8
180	2.6	0.8	0.7	0.2	3.3	0.9
210	3.0	1.1	1.3	0.4	0.4	0.1
240	3.7	1.0	2.5	1.0	2.1	0.7
270	4.2	1.4	1.1	0.3	1.1	0.4
300	5.7	2.1	1.3	0.4	1.9	0.6
330	4.3	1.2	1.6	0.5	1.5	0.5

表16 OMP 600のXY同時二軸運動によるプロービングの繰返し性試験結果

測定速度	F 30 [mm/min]		F 240 [mm/min]		F 480 [mm/min]	
測定方向 θ [°]	繰返し範囲 [μm]	標準偏差 [μm]	繰返し範囲 [μm]	標準偏差 [μm]	繰返し範囲 [μm]	標準偏差 [μm]
0	1.2	0.4	1.1	0.3	0.8	0.2
30	1.2	0.3	0.9	0.3	0.4	0.2
60	3.2	1.0	0.7	0.2	1.0	0.4
90	4.4	1.4	1.1	0.4	1.5	0.5
120	4.2	1.4	1.3	0.5	1.4	0.5
150	3.2	1.1	1.7	0.5	1.0	0.3
180	1.5	0.5	1.3	0.5	0.7	0.2
210	0.9	0.3	0.4	0.1	0.9	0.3
240	2.9	1.0	0.6	0.2	0.8	0.3
270	4.2	1.3	0.9	0.3	1.5	0.5
300	4.3	1.4	1.5	0.5	1.5	0.5
330	2.8	1.0	1.2	0.4	1.2	0.4

減少しており、速度による検出の時間遅れの影響が表れている。OMP 60では、今回求めた実効スタイラスチップ直径により一律で補正したとしても、測定方向によっては26[μm]の誤差が残ることから、任意方向の測定を行う際には測定方向に対しての補正量の取得が事前に必要であると考えられる。

表 17 OMP 60の測定結果

測定値	測定速度 [mm/min]			
	30	120	240	480
直径 [mm]	44.082	44.083	44.088	44.102
P _{FTU, 2D} [μm]	26.3	26.7	26.0	25.7
実効スタイラスチップ直径 [mm]	5.918	5.917	5.912	5.898

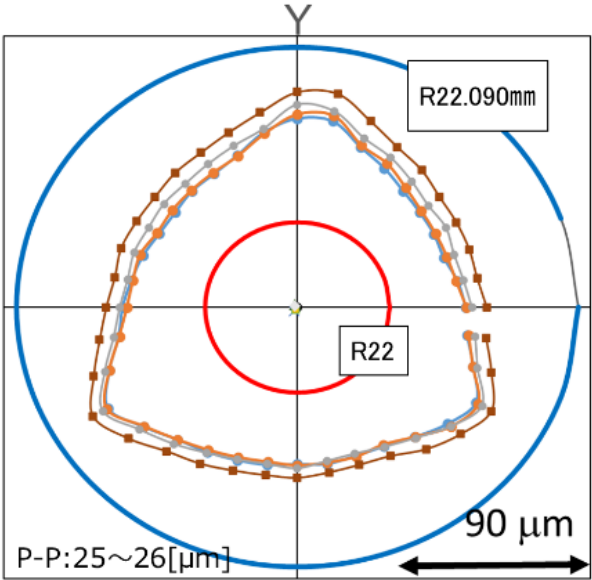


図 14 OMP 60 測定結果

表 18 OMP 600の測定結果

測定値	測定速度 [mm/min]			
	30	120	240	480
直径 [mm]	44.030	44.059	44.098	44.177
P _{FTU, 2D} [μm]	1.7	1.7	1.6	1.4
実効スタイラスチップ直径 [mm]	5.970	5.941	5.902	5.823

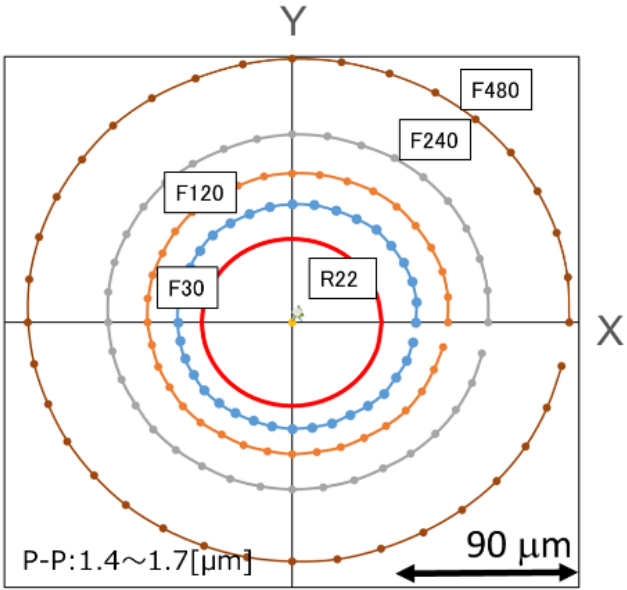


図 15 OMP 600 測定結果

3. 1. 5. 円筒スコヤの測定

測定結果を表 19 と図 16 に示す。1 回目の測定で偏差が大きい点があるが、その点を除けば真円度は 4[μm]であり、CMMの結果とよく一致している。直径についても、実効スタイラスチップ直径による補正を行った結果、CMMと比較して 4[μm]の差だった。

表 19 円筒スコヤ測定結果

測定値	CMM	MC (VCN-430A)		
		1 回目	2 回目	3 回目
直径 [mm]	70.085	70.089	70.089	70.089
真円度 [μm]	3.0	8.4	4.2	4.0
半径の標準偏差 σ [μm]	0.5	0.92	0.76	0.74

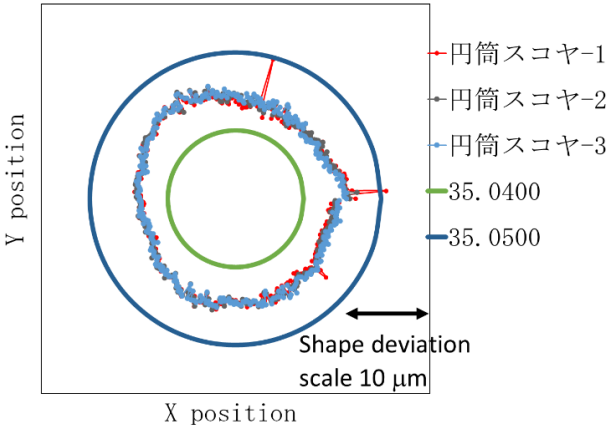


図 16 円筒スコヤ測定結果

3. 1. 6. チェックマスタの測定

OMP 6 0 の測定結果を表 2 0 に示す。測定長さに比例して誤差は大きくなり、X 軸では長さ 430[mm]で最大 11[μm]の誤差があり、Y 軸では長さ 410[mm]で最大 20[μm]の誤差であった。測定速度 F 30[mm/min]の時、偏りと繰返し範囲、標準偏差ともに大きかった。

OMP 6 0 0 の測定結果を表 2 1 に示す。OMP 6 0 0 の X 軸では長さ 430[mm]で最大 10[μm]の誤差があり、Y 軸では長さ 410[mm]で最大 18[μm]の誤差だった。

OMP 6 0、OMP 6 0 0 の X 軸、Y 軸において、測定速度によらず測定長さと比例して偏りが大きくなっている。一方、繰返し範囲、標準偏差には違いがみられないことから、偏りが大きくなった原因は機械位置決め精度が影響していると考えられる。2024 年に当

所のクルーズドループ制御方式MCで実施したチェックマスタの長さ測定実験³⁾では、測定長さと比例した偏りの拡大がみられなかった。このことから、MCの位置検出方式の違いにより偏りの傾向も異なったと考えられる。

また、図 1 7 に OMP 6 0 の F 240[mm/min]での測定結果、図 1 8 に OMP 6 0 0 の F 240[mm/min]での測定結果を示す。測定長さ 400[mm]以上の測定では、Y 軸の偏りが、X 軸の偏りより最大で 11[μm]大きくなっている。いずれの長さでも X 軸より Y 軸の偏りが大きい。繰返し範囲と標準偏差に違いがみられないことから、Y 軸の位置決め精度が X 軸の位置決め精度より劣っていると考えられる。

表 2 0 OMP 6 0 を使用したチェックマスタ測定結果

測定速度 F [mm/min]		30			240			480		
方 向	測定長さ [mm]	偏り [μm]	繰返し 範囲 [μm]	標準 偏差 σ [μm]	偏り [μm]	繰返し 範囲 [μm]	標準 偏差 σ [μm]	偏り [μm]	繰返し 範囲 [μm]	標準 偏差 σ [μm]
X 軸	70	1.3	1.4	0.6	0.4	0.5	0.2	1.2	0.5	0.2
	150	4.0	1.6	0.6	2.7	0.8	0.3	3.0	2.4	0.9
	290	6.9	1.8	0.7	4.3	1.6	0.7	3.9	1.2	0.5
	430	10.5	4.0	1.5	7.4	1.6	0.6	6.0	3.2	1.2
Y 軸	70	3.1	2.4	1.0	3.4	1.3	0.6	3.1	0.8	0.3
	150	5.9	2.6	1.1	7.2	1.2	0.5	6.4	1.2	0.5
	290	13.2	3.1	1.6	13.8	1.7	0.8	12.3	1.2	0.5
	410	19.8	2.3	1.1	19.5	3.1	1.2	17.7	1.4	0.6

表 2 1 OMP 6 0 0 を使用したチェックマスタ測定結果

測定速度 F [mm/min]		30			240			480		
方 向	測定長さ [mm]	偏り [μm]	繰返し 範囲 [μm]	標準 偏差 σ [μm]	偏り [μm]	繰返し 範囲 [μm]	標準 偏差 σ [μm]	偏り [μm]	繰返し 範囲 [μm]	標準 偏差 σ [μm]
X 軸	70	3.8	0.5	0.2	4.0	0.9	0.4	3.2	0.7	0.3
	150	4.2	0.6	0.2	4.2	0.5	0.2	2.8	0.8	0.4
	290	5.5	0.7	0.3	6.0	0.9	0.3	3.2	1.1	0.5
	430	7.8	1.0	0.5	9.5	2.0	0.8	4.8	1.7	0.7
Y 軸	70	5.4	1.0	0.4	5.4	0.7	0.3	5.5	0.5	0.2
	150	6.4	0.1	0.0	6.5	0.7	0.2	6.5	0.8	0.3
	290	12.2	0.5	0.2	12.1	0.9	0.4	11.4	1.2	0.5
	410	17.5	0.8	0.4	16.9	1.7	0.7	16.1	1.4	0.6

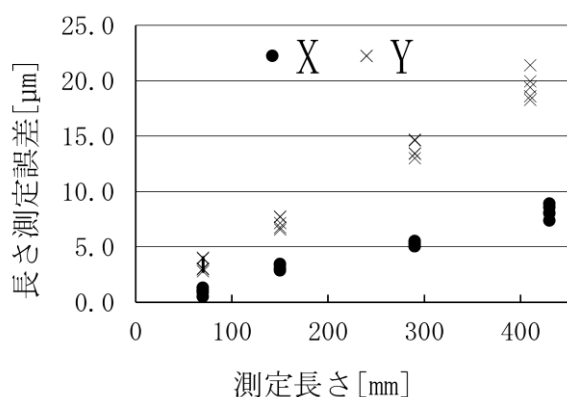


図 17 OMP 60 F240[mm/min]測定結果

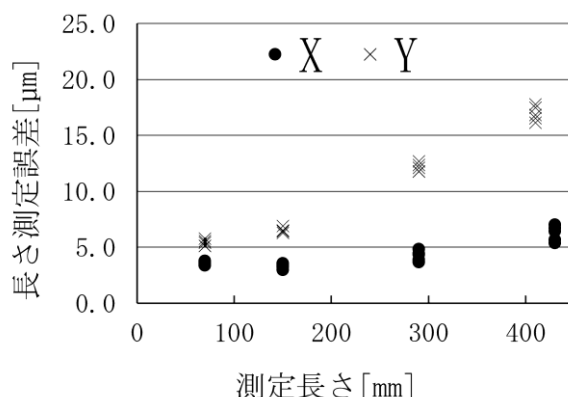


図 18 OMP 600 F240[mm/min]測定結果

3. 2. クローズドループ制御方式の5軸MCでの熱膨張係数付きブロックゲージ測定実験

室温及びブロックゲージ温度の測定結果を図 19 に示す。MCの起動から約 1 時間程度で室温は上昇し、起動後 6 時間後に空調を開始してから温度変化は± 2 度程度で平衡した。また、地面に近い X 軸近傍と上部にありエアコンに近い Y 軸近傍では、空調前では 8[°C]の温度差があり、空調後でも 6[°C]の温度差があった。加工室内に設置したブロックゲージについては、開始時が 13[°C]で、空調開始後は 16[°C]で一定となった。

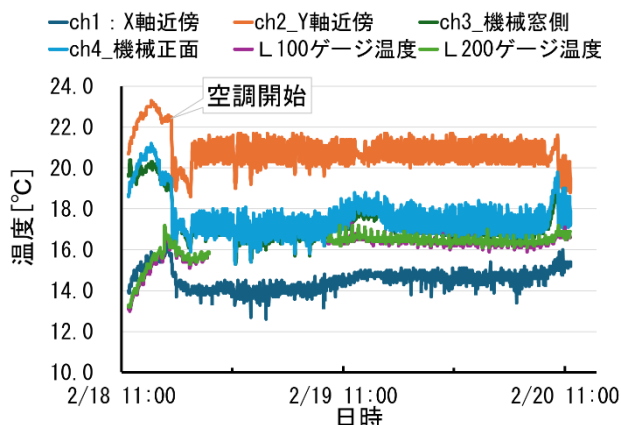


図 19 温度測定結果

次に、呼び長さ 100[mm]の測定結果を図 20、呼び長さ 200[mm]の測定結果を図 21 に示す。空調開始前の測定開始時点では、長さ 200[mm]のブロックゲージが X 軸で最大 3[μm]長く、Y 軸では最大 3[μm]短い結果となった。空調開始後、6 時間後程度で測定結果も変化は 1[μm]程度となっている。X 軸での測定結果が長く、Y 軸での測定結果が短い原因としては、ワーク及び機械スケールの温度変化が影響していると考えられる。ワークと機械スケールの温度が異なる場合のワークの長さの計測値については、大西ら⁴⁾によって補正式が提案されている。今回、ワークの線膨張係数はわ

かっているため、5 軸 MC のガラススケールの線膨張係数を $8.0 \times 10^{-6} [1/K]$ と仮定⁵⁾ した場合は X 軸でワークが測定開始時に 13[°C]、機械スケールが 10[°C]とすると、誤差量は長さ 100[mm]で 1.2[μm]、長さ 200[mm]で 2.7[μm]となり、実験結果とよく一致している。Y 軸ではワークが測定開始時に 13[°C]、機械スケールが 17[°C]とすると、誤差量は長さ 100[mm]で -4[μm]、長さ 200[mm]で -8[μm]となり、実験結果よりも誤差量が過大となるが、誤差がマイナス傾向で現れる点は実験結果とよく一致している。実際にはスケール温度、スケールの熱膨張係数が未知であり補正は困難であるが、傾向は一致していることが確認できた。

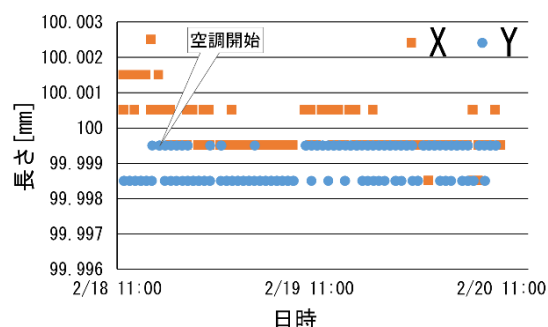


図 20 熱膨張係数付きブロックゲージ呼び長さ 100[mm]の測定結果

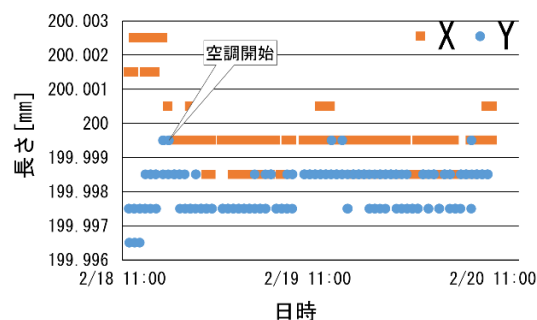


図 21 熱膨張係数付きブロックゲージ呼び長さ 200[mm]の測定結果

4. 結言

本研究ではセミクローズドループ制御方式の3軸MCと2種類のタッチプローブでリングゲージを測定し、繰返し範囲、速度による影響、方向特性を比較し、補正值である実効スタイラスチップ直径を求めた。求めた実効スタイラスチップ直径を適用し、円筒スコヤとチェックマスタを測定し、以下の結論を得た。

- (1) 面の一点測定に対するプロービングの繰返し試験の結果、OMP 60、OMP 600ともにX軸方向については、繰返し範囲が1[μm]、Y方向は2[μm]で、Y軸方向の偏差が大きかった。
- (2) 円の中心位置に対するプロービングの繰返し試験の結果、OMP 60の $R_{CIR,X}$ は最大2[μm]、 $R_{CIR,Y}$ は最大3[μm]だった。OMP 600の $R_{CIR,X}$ 、 $R_{CIR,Y}$ は最大2[μm]だった。Y軸方向の偏差が大きかった。
- (3) XY同時二軸運動によるプロービングの繰返し性試験の結果、OMP 60、OMP 600共通でY方向で繰返し範囲、偏差ともに大きく、F30[mm/min]で最も繰返し範囲が大きかった。
- (4) XY同時二軸運動によるプロービングの繰返し性試験の結果、偏差が小さいF240[mm/min]と比較した場合、OMP 60では測定方向による繰返し範囲が最大で2.6[μm]あるのに対し、OMP 600では、繰返し範囲は最大で1.7[μm]だった。
- (5) 二次元プロービング誤差試験の結果、速度によらずOMP 60では最大で26[μm]だった。一方、OMP 600では2[μm]以内で方向特定が小さかった。
- (6) OMP 600による円筒スコヤ測定の結果、CMMと比較して直径の誤差が4[μm]、真円度の誤差が4[μm]程度だった。
- (7) チェックマスタ測定の結果、長さ測定誤差は測定長さと比例して大きくなり、OMP 60のX軸では呼び長さ430[mm]で最大13[μm]の誤差が生じ、Y軸では呼び長さ410[mm]で最大21[μm]の誤差が生じた。OMP 600のX軸では呼び長さ430[mm]で最大8[μm]の誤差が生じ、Y軸では呼び長さ410[mm]で最大17[μm]の誤差が生じた。X軸とY軸の位置決め精度の違いが検出できた。

加えて、クローズドループ制御方式の5軸MCで熱膨張係数付きブロックゲージ測定実験を行った結果、誤差量は大西らの補正式と傾向が一致した。

謝辞

本研究を行うにあたり、実験にご協力いただいた日本大学工学部工学研究所機械工学科 齋藤先生をはじめ

め齋藤研究室の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 渡邊孝康,小野裕道,近野裕太,“加工機上における形状評価の研究(第一報)”, 福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2025.
- 2) 永澤毅洋,井原之敏,“マシニングセンタにおけるタッチプローブを用いた機上計測の基礎的研究”, 2012 年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2012),pp.923-924.
- 3) 渡邊孝康,“機上計測による長さ測定誤差の比較”, 福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2024.
- 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—熱膨張係数付ブロックゲージを用いた温度補正の評価—”, 2011 年精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2011),pp.852-853.
- 5) “LS 388C Electrical Connection Incremental Sealed Linear Encoder カタログ”.ハイデンハイン株式会社.
https://product.heidenhain.de/JPBC/image/HWP.EN/hlr-system/ls_388c_en.pdf, (参照 2026-2-26) .