

5軸マシニングセンタの 加工試験法の開発

電子・機械技術部 機械・加工科

小野裕道, 坂内駿平, 渡邊孝康

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科

小林翼

日本大学工学部

齋藤明德

本報告は2024年度精密工学会春季学術講演会にて報告しました。

小野裕道, 坂内駿平, 渡邊孝康, 齋藤明德, “5軸マシニングセンタの加工試験法の開発”, 2024年度精密工学会春季学術講演会論文集, (2024), pp.776-777

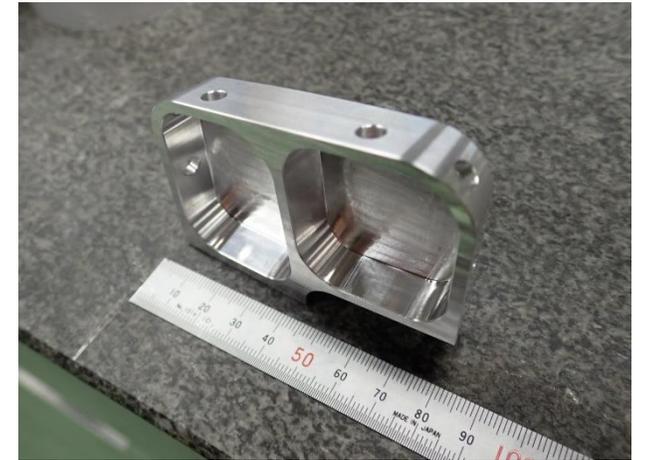
1. 研究目的

1. 1 工業的背景

5軸マシニングセンタ(MC)は工程集約を目的に普及

- 回転軸による長所
 - ・5面加工
 - ・翼形状加工
- 回転軸による短所
 - ・回転軸と直動軸の間に幾何偏差が存在, 加工精度が低い
 - 回転軸の位置偏差はタッチプローブによるMC付属のキャリブレーションシステムで補正可能

加工精度維持には, その他の角度偏差などをユーザーが定期的に精度測定する必要がある



5面加工



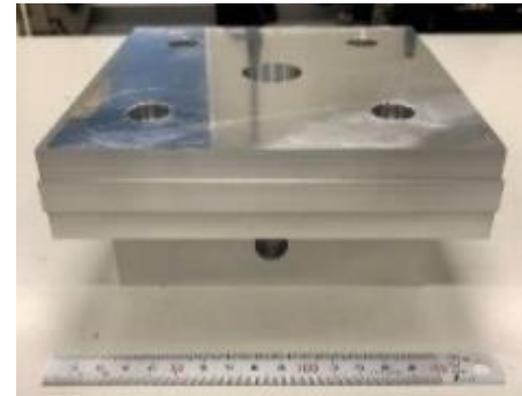
翼形状加工

○ 5軸MCの精度測定方法

規格名	測定対象	必要な機器	ユーザー導入の難点
ISO10791-2:2023 マシニングセンタの幾何精度試験 ¹⁾	幾何偏差	基準器, ダイヤルゲージ	測定手順が多く, 時間を要す
JISB6336-6:2018 マシニングセンタの補間運動試験 ²⁾	運動精度	Rテスト, ボールバー	特定の高価な測定機が必要

○ 加工試験による精度測定方法

利点 特別な測定装置が不要
 問題点 加工結果から幾何偏差への
 計算が難しい

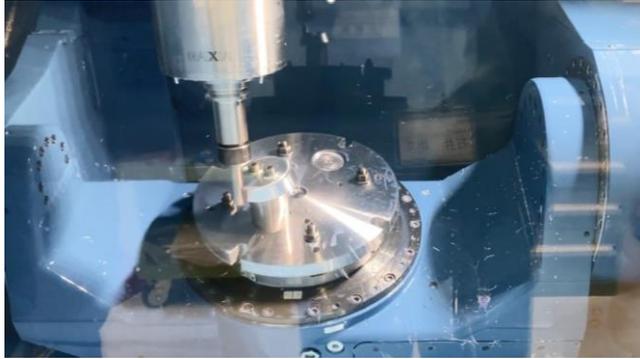


M4ワーク

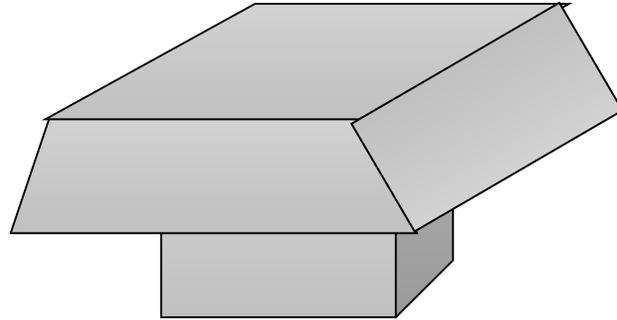
1) ISO 10791-2, (2023), マシニングセンタ-試験条件- 第2部: 垂直主軸を持つ機械の幾何精度

2) JIS B6336-6, (2018), マシニングセンタ-試験条件- 第6部: 速度及び補間運動の精度

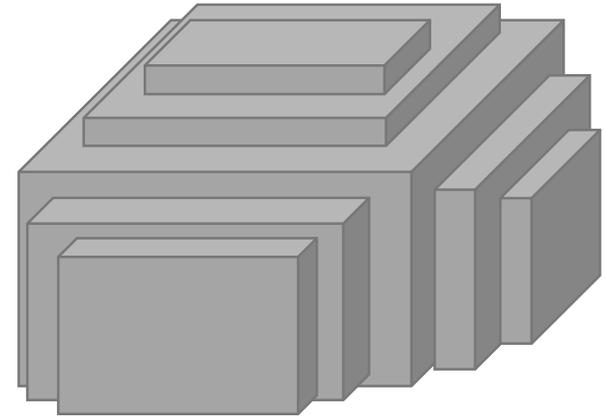
5軸MCの加工試験



円錐台 NAS979に
関する井原らの研究¹⁾



四角すい台 - 堤らによる
四角すい台の工作精度試験²⁾



四角柱を重ねた形状 -
太田, 茨木らによる運動
精度の工作試験³⁾

- 翼型 - 佐藤らによる直進軸と旋回軸の動的同期精度試験⁴⁾
- JIS B6190-12:2023 工作機械試験方法通則 工作精度試験⁵⁾
→ 5軸MCに限らず, 様々な加工形状が規定された

1) 井原之敏, 田中和也, “多軸工作機械での円錐台加工試験に対応したボールバー測定法(第1報)”, 精密工学会誌論文集, Vol.71, No. 12(2005), pp.1553-1557.
2) 堤正臣, 佐伯智之, 木落清四郎, 崔成日, 井原之敏, “四角すい台の仕上げ加工に基づく5軸マシニングセンタの工作精度試験方法の開発”, 日本機械学会論文集(C編), Vol.72, No.723 (2006), pp. 3672-3678.
3) 太田祐輔, 茨木創一, “5軸制御工作機械の運動精度評価を目的とした工作試験方法”, 2013年度精密工学会春季学術講演会講演論文集, (2013), pp. 65-66.
4) 佐藤隆太, 横堀祐也, 堤正臣, “5軸制御マシニングセンタにおける直進軸と旋回軸の動的同期精度”, 精密工学会誌, Vol. 73, No.5(2007), pp. 583-587.
5) JIS B6190-12:2023 工作機械試験方法通則 工作精度試験

1. 2 研究目的

【加工試験開発のコンセプト】

- ・幾何偏差などの5軸MCの偏差を高感度で検出
- ・ユーザにとって理解が容易
- ・加工と測定が簡便
- ・特別の測定装置が不要
→ストロークが小さい小型MCも適用可能

【本報告】

C軸ターンミリング加工に注目し、シミュレーションと実験によって、幾何偏差が加工形状に与える影響を検討

2. 実験方法

2. 1 テーブル旋回形 5 軸MCの幾何偏差

研究対象 テーブル旋回形5軸MC
(松浦機械製作所MX-520)

MX-520に存在する幾何偏差

座標系	幾何偏差	説明
機械座標系と A軸座標系 間の偏差	δ_{xAX}	A軸座標系原点 O_A と機械座標系原点 O_M との X方向の位置偏差
	δ_{yAX}	O_A と O_M とのY方向の位置偏差
	δ_{zAX}	O_A と O_M とのZ方向の位置偏差
	β_{AX}	A軸中心線とZ軸運動との直角度
	γ_{AX}	A軸中心線とY軸運動との直角度
	α_{AX}	A軸回転角度の初期値
A軸座標系と C軸座標系 間の偏差	δ_{yCA}	A軸中心線とC軸中心線との XZ平面内における一致度
	α_{CA}	A軸中心線とC軸中心線の直角度

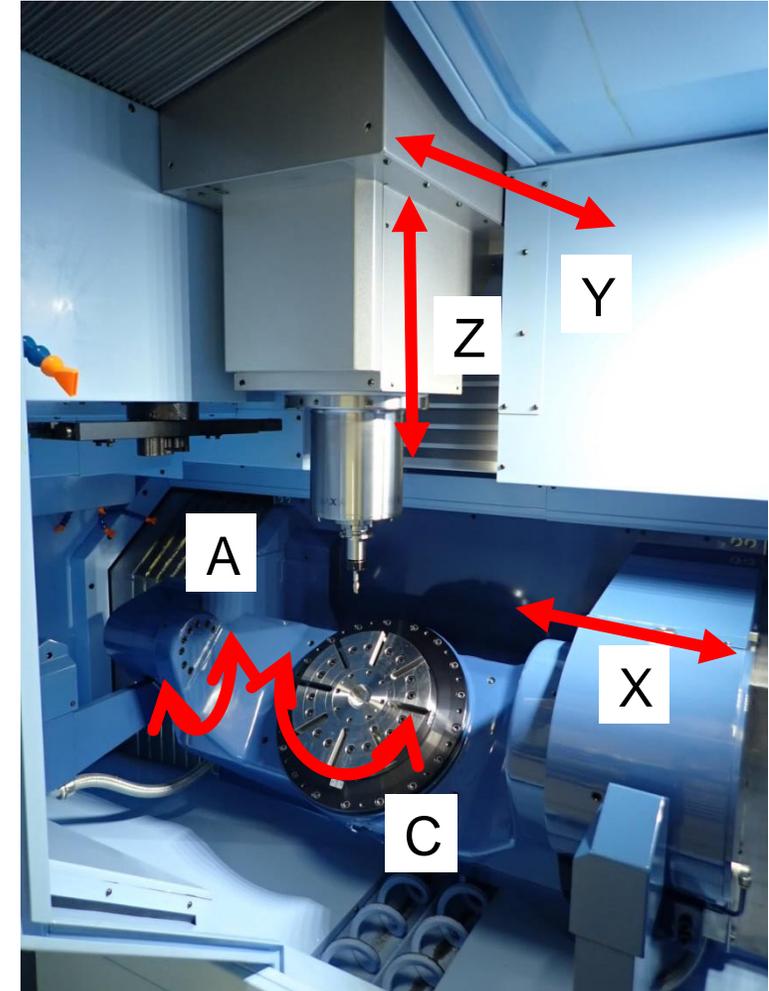


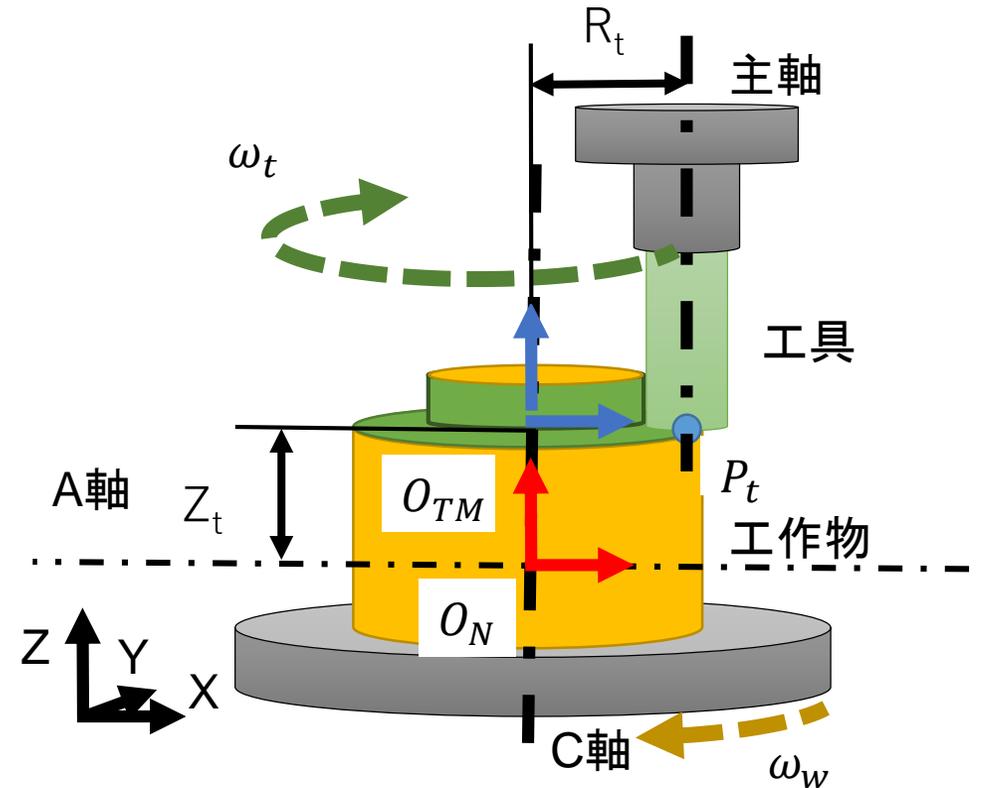
図 5 軸MCの軸構成

2. 2 ターンミリング

- 一般には
 - 工具位置を固定しC軸を回転
- 提案する加工法
 - C軸回転とXY平面の円弧補間運動

座標の定義

- ω_w : C軸回転の角速度
- ω_t : 主軸の円弧補間の角速度
- O_N : A軸とC軸交点
- Z_t : O_N と O_{TM} のZ軸の座標差
- O_{TM} : 主軸の円弧補間の中心
- R_t : 主軸の円弧補間の半径



工具位置

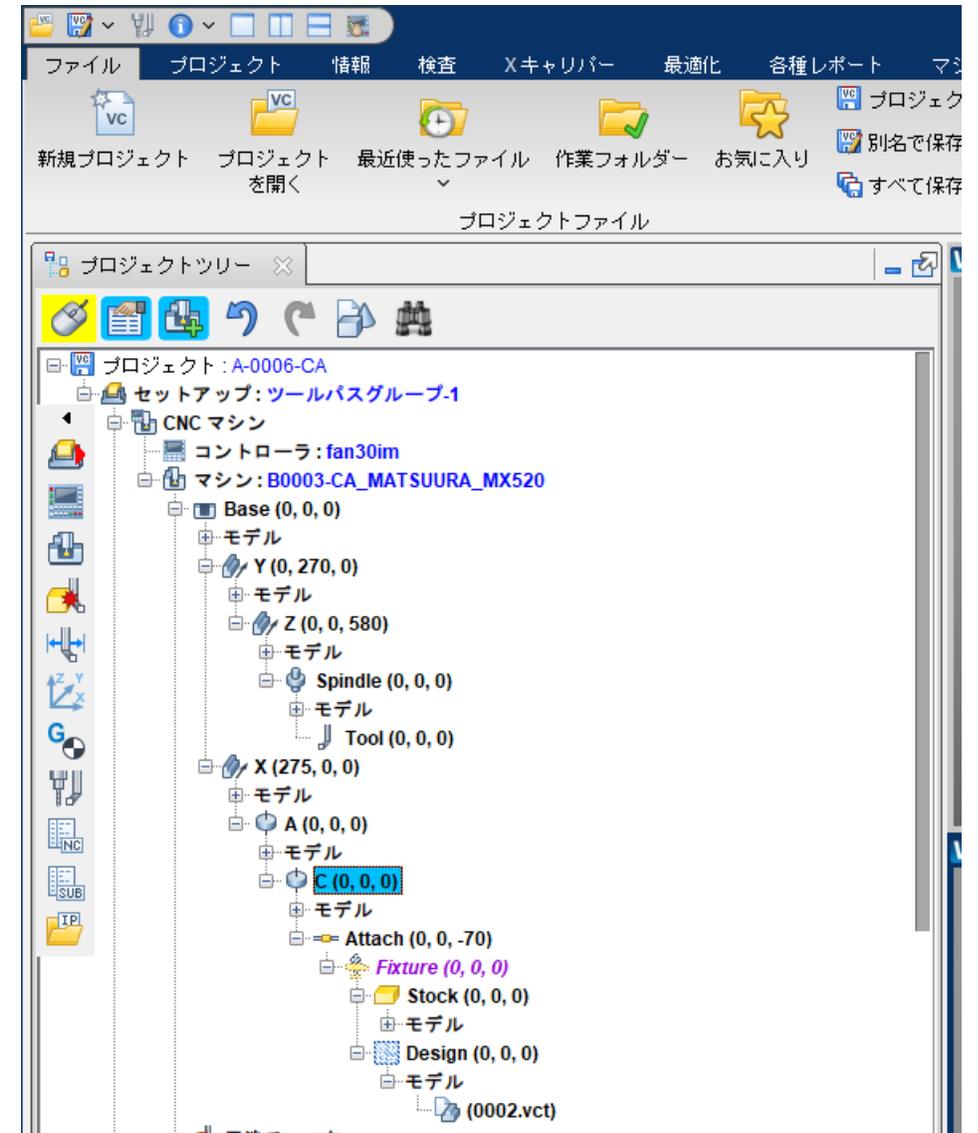
加工条件

工具	超硬スクエアエンドミル
工具径	20mm
工作物直径	100mm
加工開始位置	X軸 50mm

2. 3 実験装置 加工シミュレーション

○ CNCシミュレーションソフト (VERICUT)

- 加工結果の予測機能と設計値照合機能を使用
 - A軸回転中心のX軸に対する位置
 $\delta_{xAX}, \delta_{yAX}, \delta_{zAX}$
 - A軸回転中心のX軸に対する角度
 $\beta_{AX}, \gamma_{AX}, \alpha_{AX}$
 - C軸回転中心のA軸に対する位置 δ_{xCA}
 - C軸回転中心のA軸に対する位置 α_{CA}



2. 3 実験装置 加工試験

○ 5軸加工機



マシニングセンタの仕様

製造元	(株)松浦機械製作所
型式	MX-520
テーブル寸法	直径300mm
移動量	X 630mm Y 560mm Z 510mm A -125~10° C 360°
NC	G-tech 31iB

○ 真円度測定機



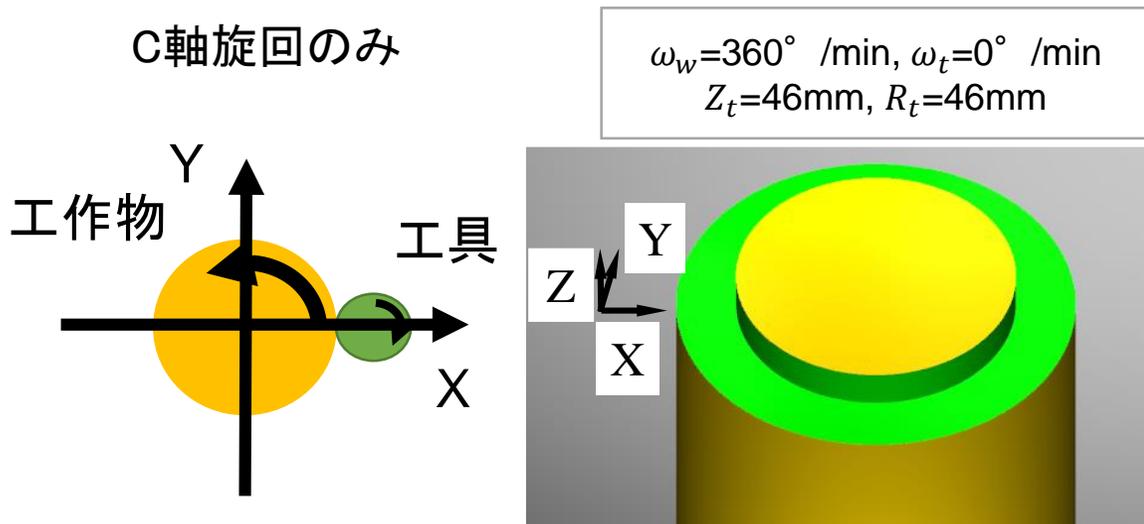
真円度測定機の仕様

製造元	(株)東京精密
型式	RONDCOM 60A
1周の測定点数	3,600
測定子直径	1.6mm
測定速度	4 /min
フィルタ	50山 / フィルタ無し
中心法	最小二乗中心法

3. 実験結果

3. 1 ターンミリングの条件による加工形状の違い

- C軸回転と主軸円弧補間が同じ回転方向を検討
- 反対向きでも加工可能
- $\omega_w = \omega_t$ の場合, JIS B 6336-6 BK2¹⁾の運動



主軸を円弧補間させた場合

工作物回転の等角速度で工具を円運動 (JIS B 6336-6 BK2¹⁾)

$\omega_w = 360^\circ / \text{min}, \omega_t = 360^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 50\text{mm}, R_t = 50\text{mm}$

工作物回転の2倍の角速度で工具を円運動

$\omega_w = 360^\circ / \text{min}, \omega_t = 720^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 50\text{mm}, R_t = 50\text{mm}$

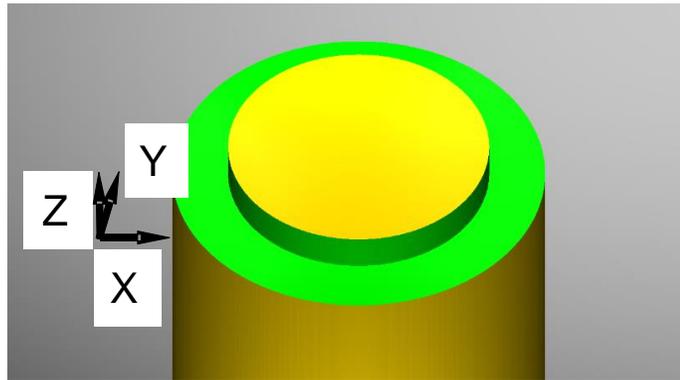
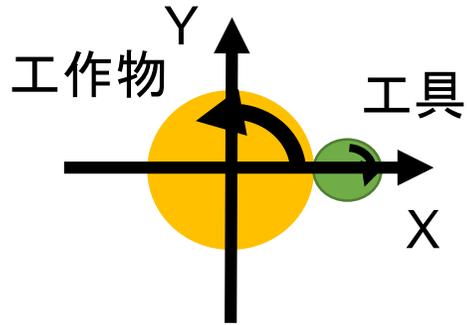
1) JIS B6336-6, (2018), マシニングセンター-試験条件- 第6部:速度及び補間運動の精度

3. 2 シミュレーション結果 位置偏差の影響

位置偏差を1000倍で付与

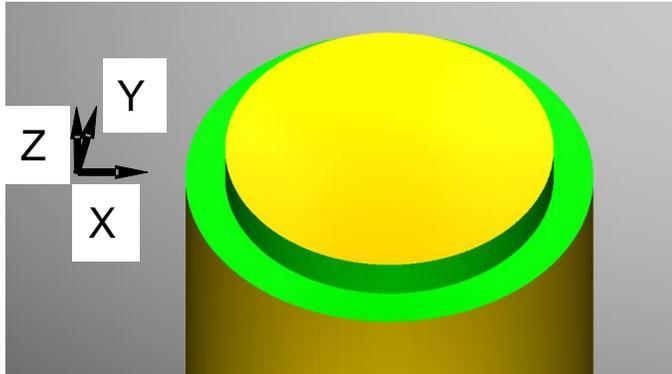
C軸旋回のみ

$\delta_{xAX}=5\text{mm}$ (0.005×1000)
 $\omega_w=360^\circ/\text{min}, \omega_t=0^\circ/\text{min}$
 $Z_t=50\text{mm}, R_t=50\text{mm}$

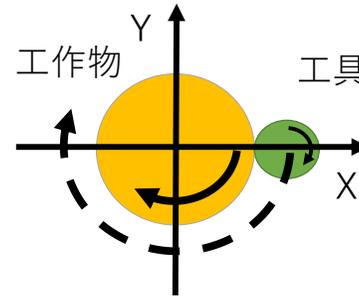


$\delta_{yAX}=5\text{mm}$
 $\omega_w=360^\circ/\text{min}, \omega_t=0^\circ/\text{min}$
 $Z_t=50\text{mm}, R_t=50\text{mm}$

X方向の偏差は
直径に影響

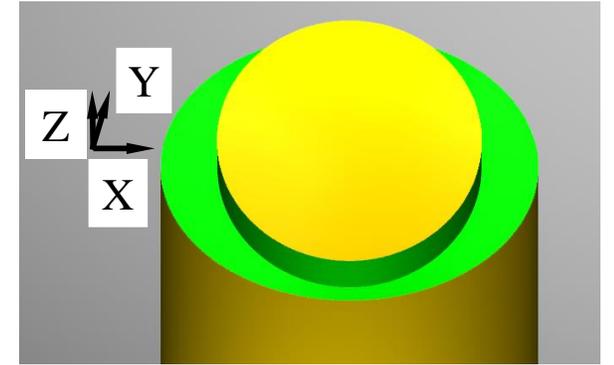


工作物回転の2倍の角速度
で工具を円運動



同様の傾向 δ_{xCA}

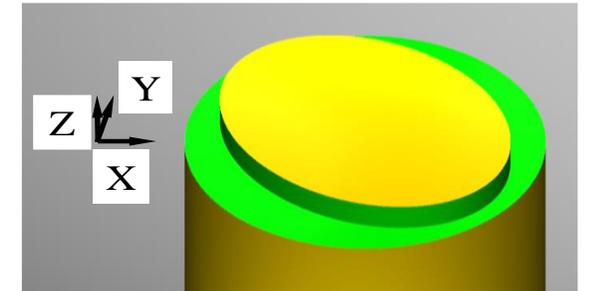
$\delta_{xAX}=5\text{mm}$
 $\omega_w=360^\circ/\text{min}, \omega_t=720^\circ/\text{min}$
 $Z_t=50\text{mm}, R_t=50\text{mm}$



$\delta_{yAX}=5\text{mm}$
 $\omega_w=360^\circ/\text{min}, \omega_t=720^\circ/\text{min}$
 $Z_t=50\text{mm}, R_t=50\text{mm}$

楕円長軸方向が
偏差方向に影響

同様の傾向 δ_{yAX}

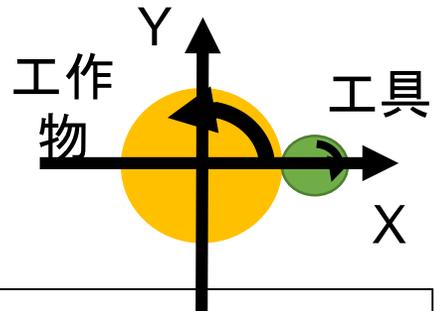


3. 3 シミュレーション結果 角度偏差の影響

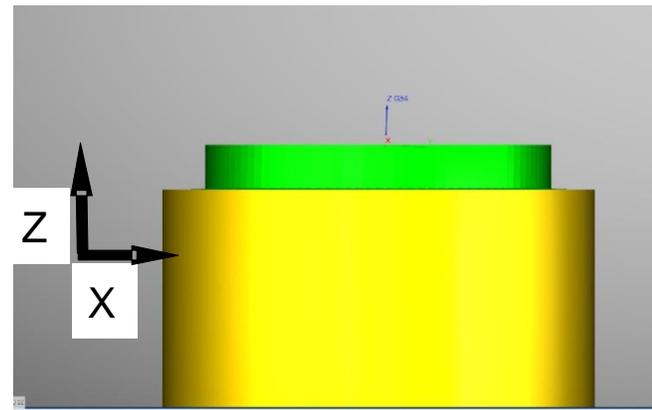
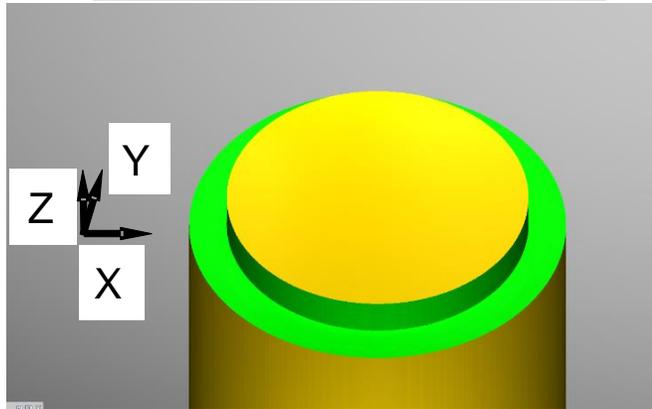
角度偏差を1000倍で付与

C軸旋回のみ

$\alpha_{AX} = 2^\circ$ (0.002 × 1000)
 $\omega_w = 360^\circ / \text{min}$, $\omega_w = 0^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 50\text{mm}$, $R_t = 50\text{mm}$

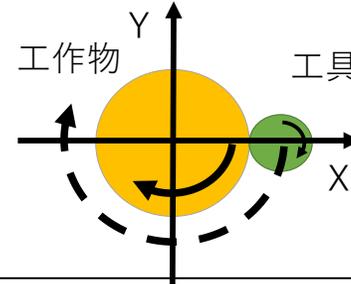


円環部に
傾きとして影響

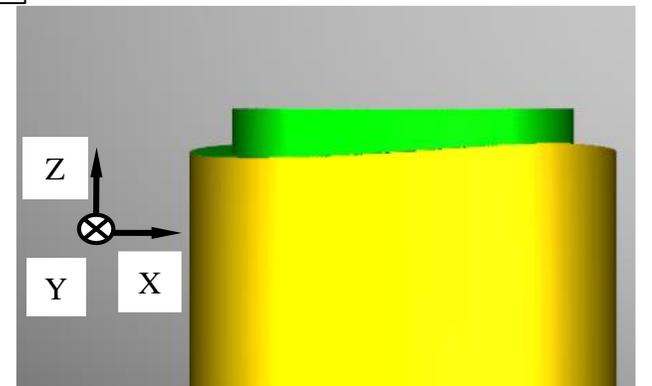
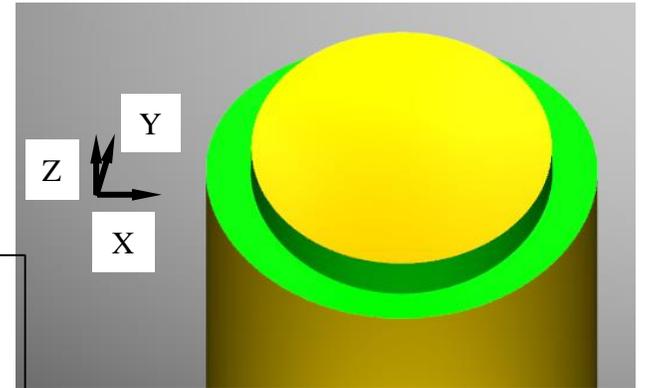


工作物回転の2倍の角速度
で工具を円運動

$\alpha_{AX} = 2^\circ$
 $\omega_w = 360^\circ / \text{min}$, $\omega_w = 720^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 50\text{mm}$, $R_t = 50\text{mm}$



円環部に
2山の凹凸に影響



同じ傾向
 β_{AX} , α_{CA}

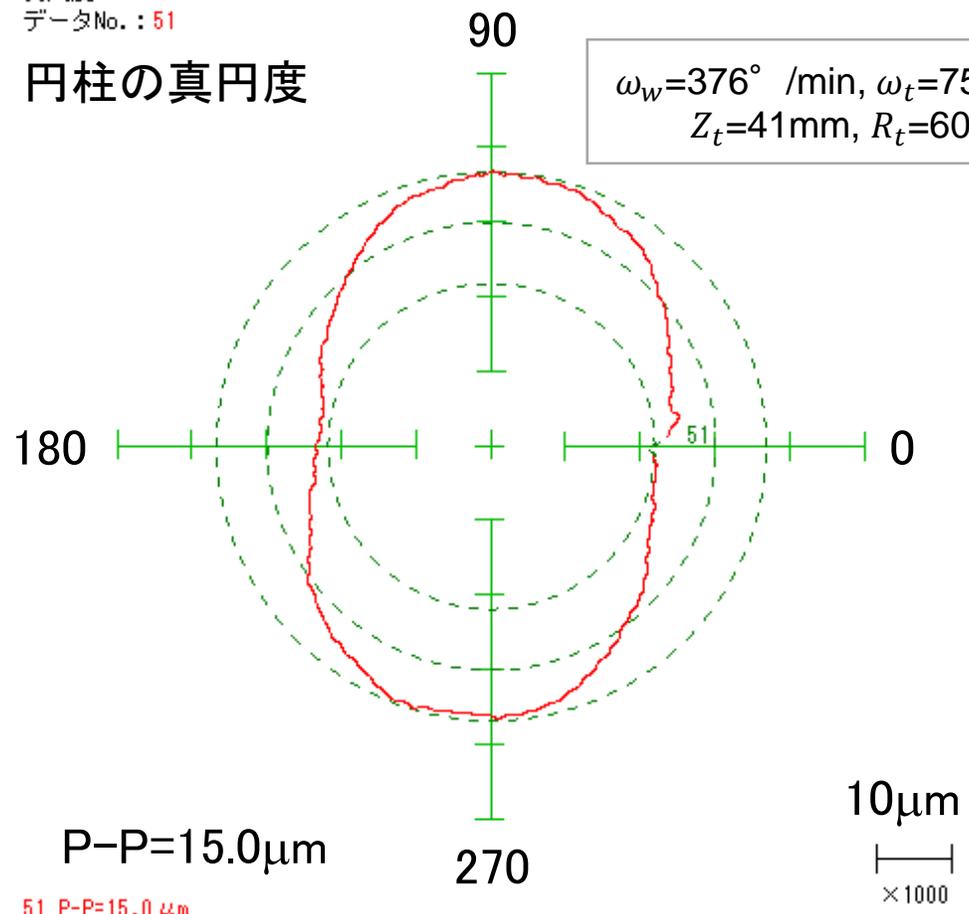
3. 4 加工試験 ターンミリングと円弧補間

提案したターンミリング結果

真円度
データNo. : 51

円柱の真円度

$\omega_w=376^\circ / \text{min}$, $\omega_t=752^\circ / \text{min}$
 $Z_t=41\text{mm}$, $R_t=60\text{mm}$

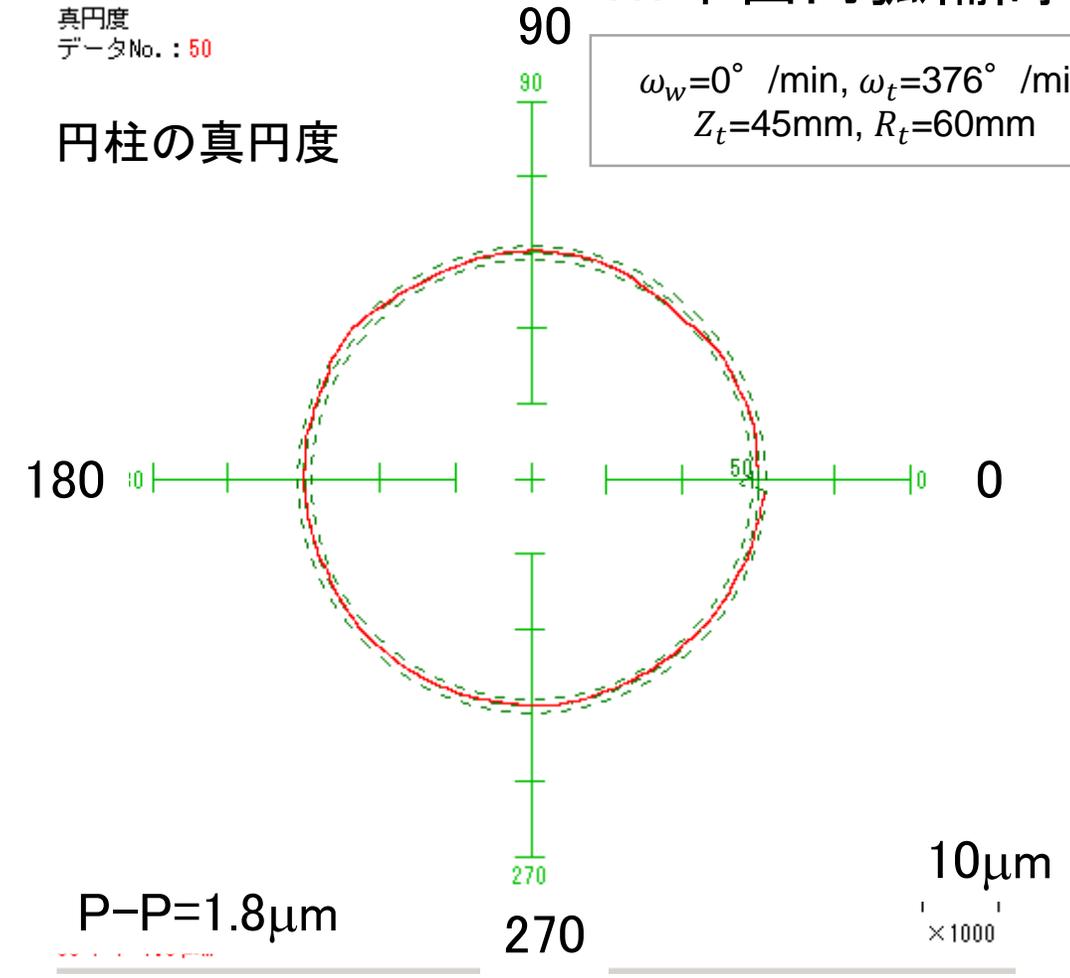


XY平面円弧補間

真円度
データNo. : 50

円柱の真円度

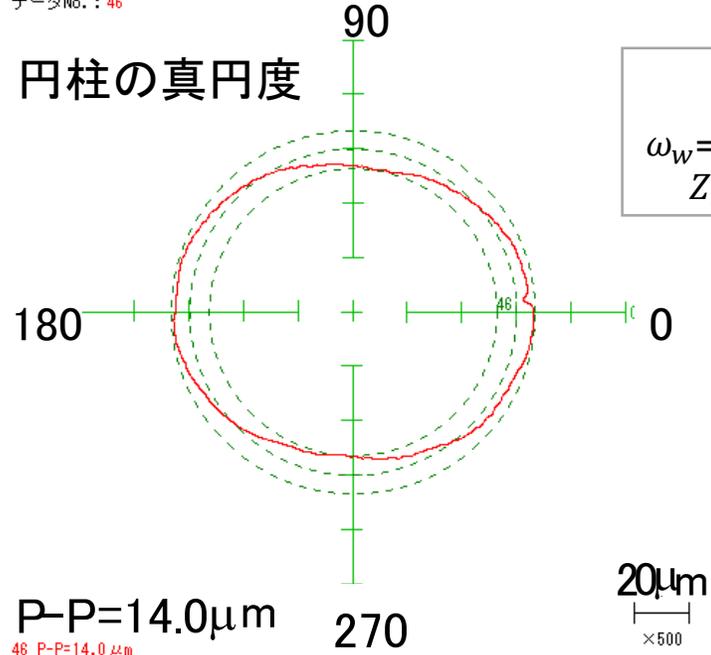
$\omega_w=0^\circ / \text{min}$, $\omega_t=376^\circ / \text{min}$
 $Z_t=45\text{mm}$, $R_t=60\text{mm}$



3. 5 幾何偏差を付与した加工試験

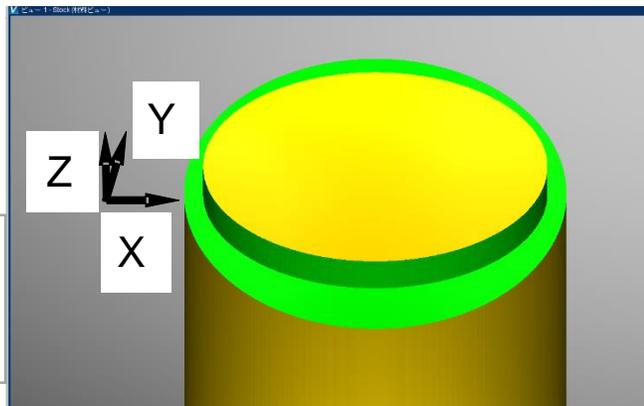
真円度
データNo.: 46

円柱の真円度



$\delta_{xAX} = -10\mu\text{m}$
 $\omega_w = 376^\circ / \text{min}, \omega_w = 752^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 243\text{mm}, R_t = 60.26\text{mm}$

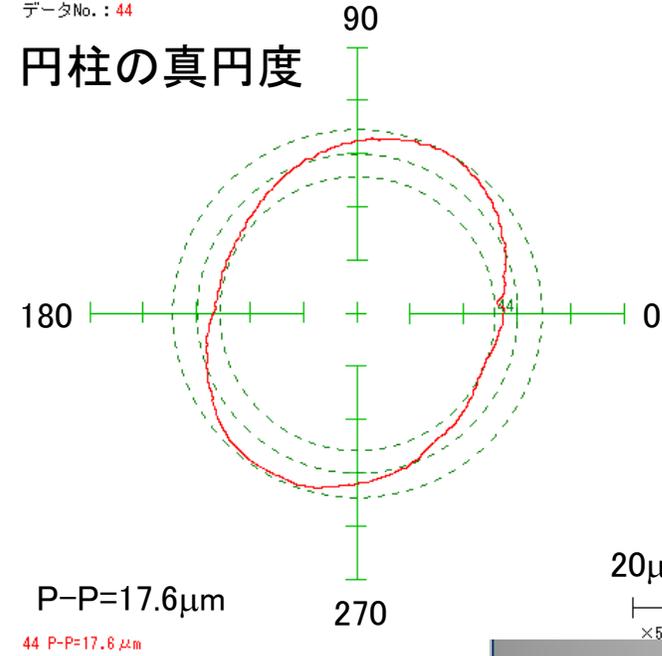
P-P=14.0 μm
46 P-P=14.0 μm



$\delta_{xAX} = -5\text{mm}$
 $\omega_w = 360^\circ / \text{min}, \omega_w = 720^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 265\text{mm}, R_t = 60\text{mm}$

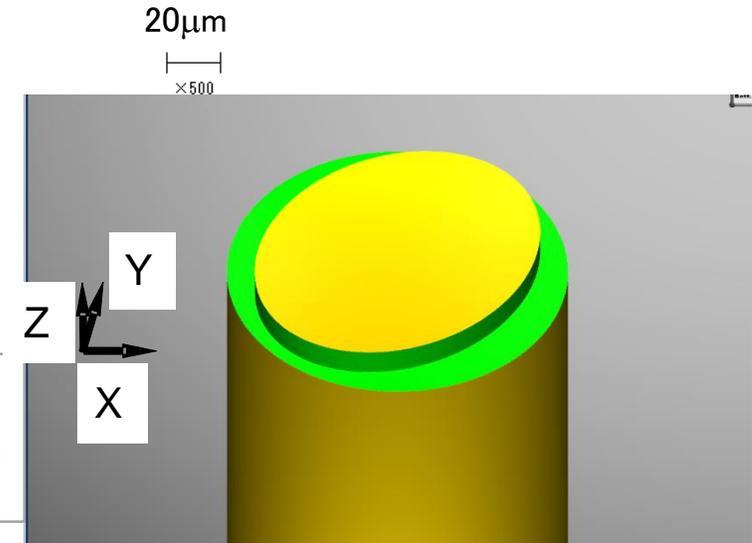
真円度
データNo.: 44

円柱の真円度



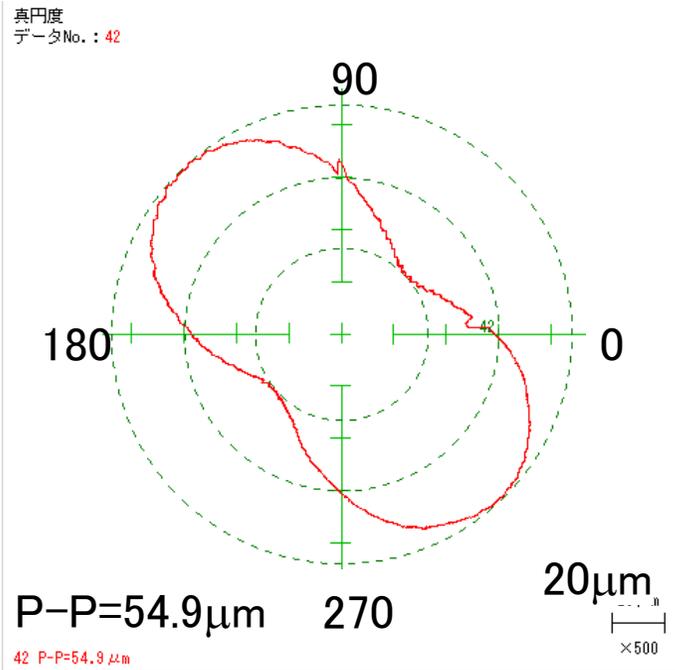
$\delta_{yAX} = -10\mu\text{m}$
 $\omega_w = 376^\circ / \text{min}, \omega_w = 752^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 252\text{mm}, R_t = 60.05\text{mm}$

P-P=17.6 μm
44 P-P=17.6 μm



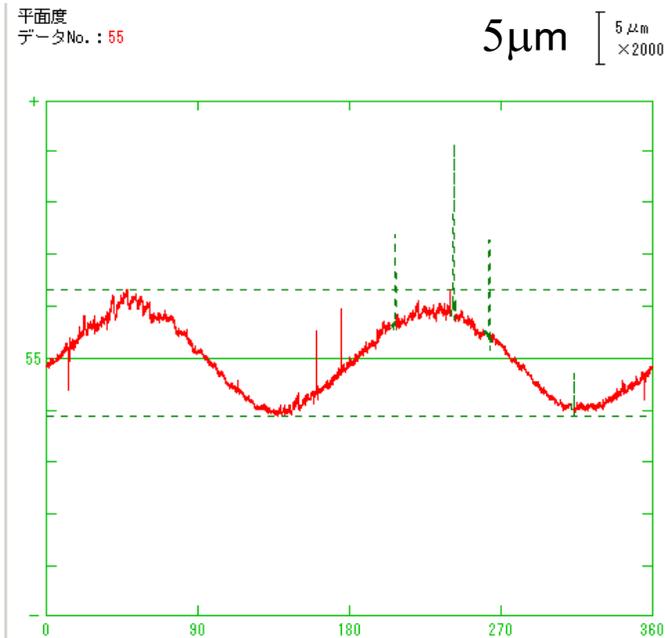
$\delta_{yAX} = -5\text{mm}$
 $\omega_w = 360^\circ / \text{min}, \omega_w = 720^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 265\text{mm}, R_t = 60\text{mm}$

3. 5 幾何偏差を付与した加工試験



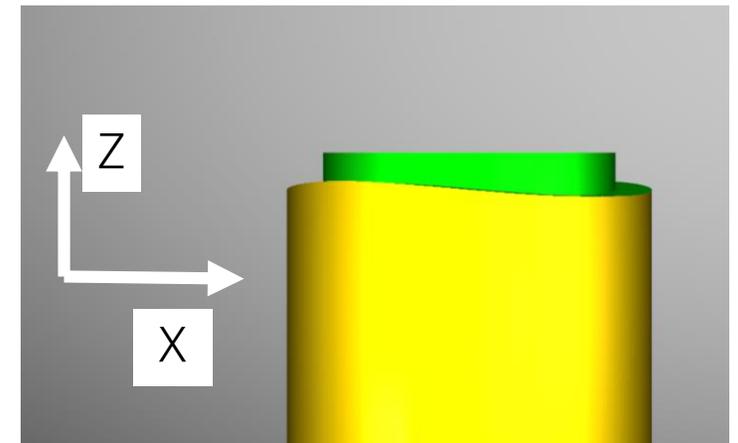
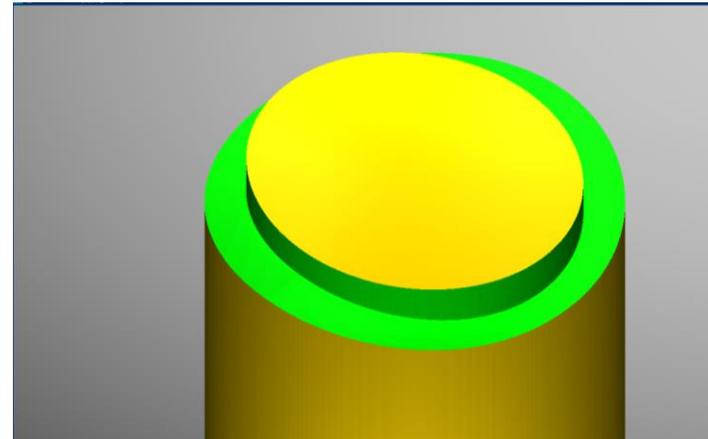
円柱の真円度

$\alpha_{AX} = -0.005^\circ$ (0.08mrad)
 $\omega_w = 376^\circ / \text{min}$, $\omega_w = 752^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 260\text{mm}$, $R_t = 59.6\text{mm}$



P-P=12.1 μ m 円環部の平面度

$\alpha_{AX} = -2.5^\circ$
 $\omega_w = 360^\circ / \text{min}$, $\omega_w = 720^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 265\text{mm}$, $R_t = 50\text{mm}$



$\alpha_{AX} = -0.005^\circ$ (0.08mrad)
 $\omega_w = 376^\circ / \text{min}$, $\omega_w = 752^\circ / \text{min}$
 $Z_t = 265\text{mm}$, $R_t = 50\text{mm}$

4. 結言

テーブル旋回形5軸MCの幾何偏差を評価するため、工作物を回転させながら円柱形状を加工するターンミリングに着目し、幾何偏差が加工形状に与える影響を検討した。VERICUTにより幾何偏差が加工形状に与える影響をシミュレーションし、加工試験を行い、次の結果を得た。

- ターンミリングの条件の違いにより、幾何偏差が工作物の形状偏差に与える影響は違いがあった。
- 工作物を回転させ、工具を直動2軸で工作物回転の2倍の角速度で円運動させ加工した場合、幾何偏差 δ_{xAX} と δ_{yAX} , β_{AX} , α_{AX} , δ_{xCA} , α_{CA} は工作物の円柱の真円度に影響を与えた。