

5軸マシニングセンタの加工試験法の開発

Development of machining test method for 5-axis machining center

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 機械工学科 齋藤明徳

段取りの省力化を目的に導入の進む5軸マシニングセンタは、旋回軸を有することから幾何偏差が多く存在し、加工精度が低いとされる。この幾何偏差はユーザが定期的に較正することが必要であるが、必要性をユーザが理解することは難しかった。理解しやすい加工試験を提案するために、旋回軸を回転させながら加工するターンミリング加工を対象に、幾何偏差が加工結果に与える影響について、シミュレーションにより予測した。また幾何偏差に応じて加工形状が変化することを確認した。

Key words: 5軸マシニングセンタ、幾何偏差、運動精度

1. 緒言

近年、段取りの省力化を目的に5軸マシニングセンタ（以下5軸MC）の導入が進んでいる。5軸MCは工作物を傾斜・回転させるため2つの旋回軸を有するが、旋回軸間あるいは旋回軸と直進軸間の軸ずれに起因する幾何偏差が多く存在し、加工精度が低いとされる。この幾何偏差は、5軸MCの設置環境や経年劣化に影響されるため、ユーザが定期的に較正することが必要である。

工作機械メーカーは、大型機と中型機ではタッチプローブと基準器を用いて較正することを推奨している。しかし、小型機では直動軸の可動範囲が小さいため、旋回軸を回転させるとタッチプローブを使用できなくなる場合が多く較正手段がない。またユーザにおいても、5軸MCの幾何偏差が正しく較正されているかを、簡便な段取りで、短時間で確認したいとの要望がある。これに対し、加工結果から幾何偏差を導出する加工試験法もあるが、旋回軸を割出して加工する例が多く、ユーザが幾何偏差を直感的に理解することは難しかった。

そこで、ユーザに理解しやすい5軸MCの加工試験を開発するため、旋回軸を回転させながら加工するターンミリング加工において、幾何偏差が加工偏差に与える影響について、シミュレーションにより解析した。旋回軸と直動軸の運動が異なる加工条件で加工偏差をシミュレーションした。この結果、特徴的な加工偏差が現れる運動について、アルミ製試験体を加工し形状を測定したので、結果を報告する。

2. 実験

2. 1. 5軸MCの幾何偏差

本報告では、国内で導入例が多いテーブル旋回形5軸MCを対象とする。実験には、当所が保有する5軸

MC（松浦機械製作所製MX-520）を使用した。装置の概略と移動軸を図1に示す。旋回軸はA軸とC軸に有し、A軸0°の状態ではA軸の中心線より下にテーブル上面が位置する構造である。

この5軸MCには、旋回2軸に関連して、A軸とX軸の位置偏差 δ_{yAX} と δ_{zAX} 及び角度偏差 β_{AX} と γ_{AX} 、C軸とX軸の位置偏差 δ_{xAX} 及び直角度偏差 α_{AX} 、A軸とC軸の公差度偏差 δ_{yCA} 及び直角度偏差 β_{CA} の合計8個の幾何偏差が存在する¹⁾。解析は、これら8個の偏差を考慮した解析モデルを用いる。この際、直動3軸の位置決め偏差は、幾何偏差に比べ充分に小さいものとする。

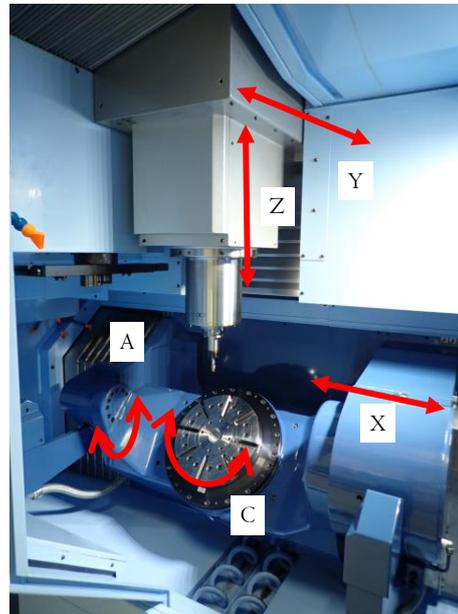


図1 実験に使用した5軸MCの軸構成

2. 2. C軸によるターンミリング

本報告では、C軸の運動に係る幾何偏差を対象とした。加工は主軸とC軸が平行となるCo-axial形の

ターンミリングとし、スクエアエンドミルで加工を行うため、エンドミルの側面によって円柱面、エンドミルの底面によって円環が同時に加工される。加工形状は、CNCシミュレーションソフトウェア（CGTech社製VERICUT）に加工機のモデルを導入し、シミュレーションした。この際、シミュレーションソフト内のモデルに任意の幾何偏差を与えることで、加工後の形状を算出した。

また、5軸MCにて座標系の設定によって、任意の幾何偏差を与え、加工試験を行った。加工条件を表1に示す。加工後、工作物の形状は真円度測定機（東京精密製 RONDCOM52B-550）により計測した。

表1 加工条件

工具	超硬スクエアエンドミル
工具径	20[mm]
工作物	A5052
工作物直径	100[mm]
加工開始工具位置	X軸 50[mm]

3. 結果

3. 1. ターンミリングの条件による加工形状の違い

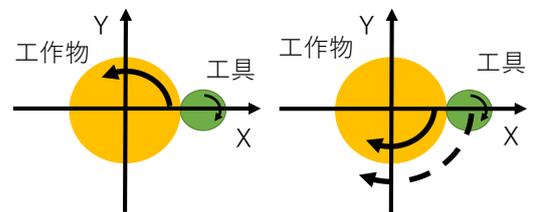
ターンミリングは、直進軸による工具の運動と回転軸による工作物の回転との組み合わせを図2の3通りに変えて検討した²⁾。それらは、図2(a)に示す工具の機械座標位置を固定し、工作物のみを回転させた場合、図2(b)に示す工作物を回転させながら、工具の機械座標位置を同じ角速度でX-Y平面内で円運動させた場合、図2(c)に示す工作物を回転させながら、工具の機械座標位置を2倍の角速度でX-Y平面内で円運動させる場合である。ここで、主軸の円弧補間の角速度 ω_t とC軸の回転角速度 ω_c とする。加工される円筒の中心はC軸の回転中心と一致し、形状は主軸とC軸間の距離の増減が転写される。工具はスクエアエンドミルとし、工作物に対しアップカットで加工することとするため、図2(a)に示す工作物のみを回転させる場合は反時計回転方向に、図2(b)及び(c)に示す直進軸も移動させる場合は時計回転方向に回転させる。

5軸マシニングセンタに幾何偏差が存在した場合の加工形状を、VERICUTによりシミュレーションした結果を図3から図5に示す。図2(a)の場合、図3の形状となる。シミュレーションソフトの5軸MCの構造に幾何偏差を与えると、軸間の距離に応じて円柱の半径が変化した。

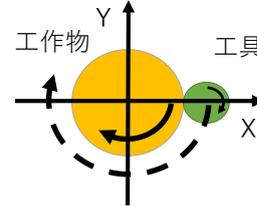
次に、図2(b)の場合、図4の形状となる。工具は円柱と共に回転するため、相対的な移動は無い。幾何偏

差を与えると、工作物に対して工具が微小に移動した。これはJISB6336-6のBK2³⁾のボールバーによる試験と同じ運動である。

さらに、図2(c)の場合、形状を図5に示す。この加工機の通常幾何偏差の変動は数 μm であるが、幾何偏差による形状変化が大きく表れるよう、位置偏差の5[μm]、角度偏差の0.002[$^\circ$]を1000倍して与えた。X方向の位置偏差 $\delta_{xAX}=5[\text{mm}]$ とした場合、Y軸を長軸とする楕円に、Y方向の位置偏差 $\delta_{yAX}=5[\text{mm}]$ とした場合、X軸より-45[$^\circ$]方向を長軸とする楕円に、角度偏差 $\alpha_{AX}=2[^\circ]$ とした場合、X軸より-45 $^\circ$ 方向を長軸とする楕円になり、底刃で加工された円環面に凹凸がみられた。このように、工作物を回転させながら工具を2倍の角速度で円運動させた場合は、幾何偏差が円柱の真円度に影響を与えた。



(a) C軸回転のみ (b) 工作物回転の等角速度で工具を円運動



(c) 工作物回転の2倍の角速度で工具を円運動

図2 ターンミリングの条件ごとの工具運動



図3 C軸回転のみの加工形状

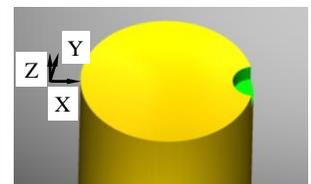


図4 円弧補間がC軸回転と等角速度の加工形状

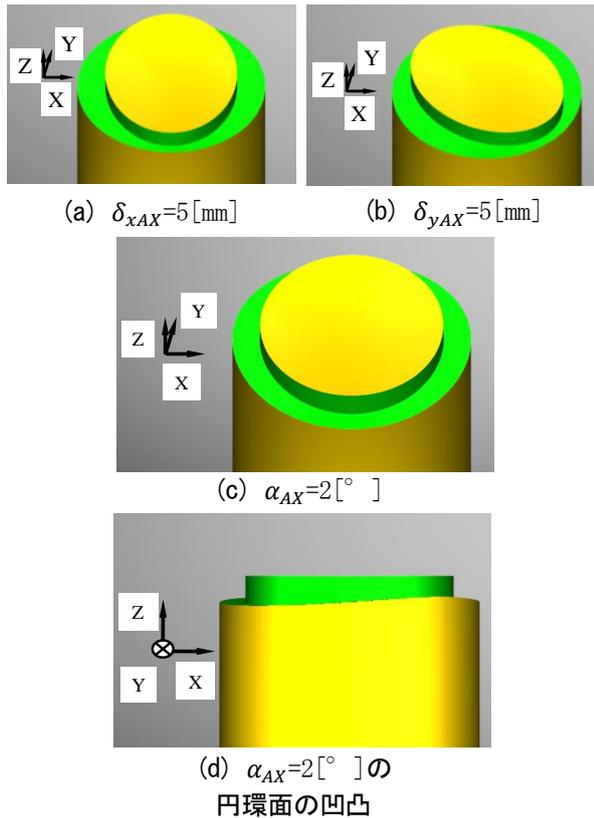


図5 工作物を回転させ工具を2倍の角速度で円運動させた加工形状

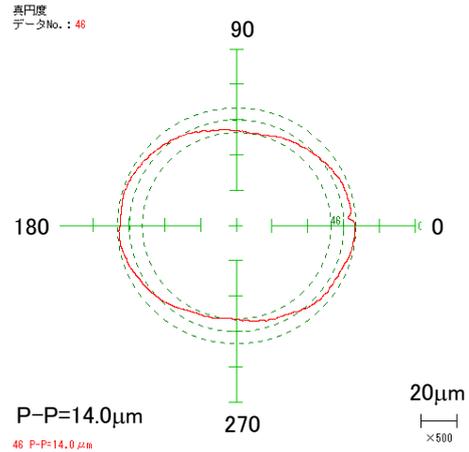
3. 2. 加工実験

シミュレーションの結果より、図2(c)の工作物回転の2倍の角速度で工具を円運動させた場合について、5軸MCにて円柱形状を加工し、真円度測定機で形状を測定した。結果を図6に示す。図6(a)に示すとおりX方向の位置偏差 $\delta_{xAX}=-10\text{ [}\mu\text{m]}$ とした場合、X軸を長軸とする楕円形状となった。図6(b)に示すとおり、Y方向の位置偏差 $\delta_{yAX}=-10\text{ [}\mu\text{m]}$ とした場合、 $45\text{ [}^\circ\text{]}$ 方向を長軸とする楕円形状になる。また、図6(c)に示すとおり、角度偏差 $\alpha_{AX}=-0.005\text{ [}^\circ\text{]}$ とした場合、工具底刃で加工された円環面は凹凸となった。

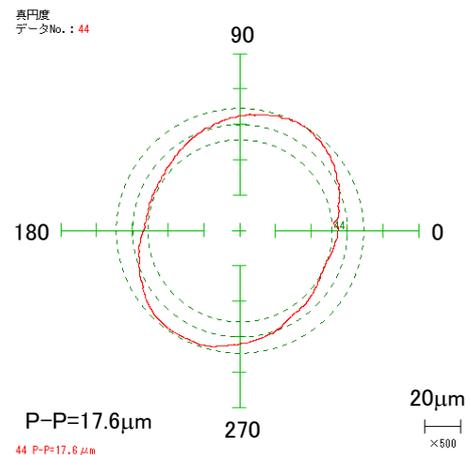
4. 考察

図5に示す幾何偏差を付与した加工シミュレーションの結果と、図6に示す幾何偏差を付与した加工結果は形状が一致していない。これは、シミュレーションで付与した幾何偏差と実験で与えた幾何偏差が、逆方向であったためと考えられる。

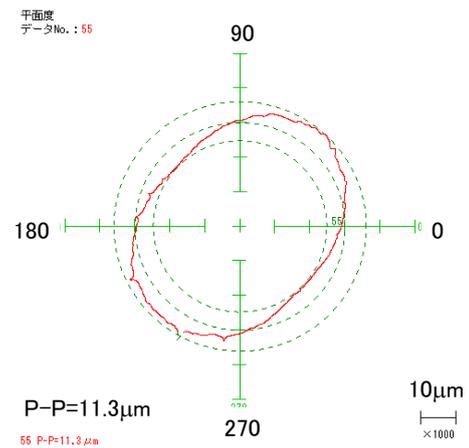
図5(a)の幾何偏差は、偏差を -5 [mm] とするとX軸を長軸とする楕円形状になる。同様に図5(b)は偏差を -5 [mm] とすると $45\text{ [}^\circ\text{]}$ 方向を長軸とする楕円形状になる。なお、図5(c)に示す角度偏差は、同じ形状であった。



(a) $\delta_{xAX}=10\text{ [}\mu\text{m}]$ を与え加工した円柱の真円度



(b) $\delta_{yAX}=10\text{ [}\mu\text{m}]$ を与え加工した円柱の真円度



(c) $\alpha_{AX}=0.005\text{ [}^\circ]$ を与えて加工した円環面の平面度

図6 工作物を回転させ工具を2倍の角速度で円運動させた加工形状

5. 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によるシミュレーションと加工試験を行い、次の結果を得た。

- (1) ターンミリングの条件の違いにより、加工機の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。
- (2) 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、幾何偏差は工作物の円柱の真円度に影響を与えた。

参考文献

- 1) 茨木創一: 工作機械の空間精度, 森北出版, (2017).
- 2) 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講演論文集, (2024), pp. 776-777.
- 3) 日本産業規格, JISB6336-6 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, (2018).