

工具傾斜エンドミル加工における切削抵抗と工具変異の高精度測定法の開発

研究報告者 吉川 浩一

プロフィール



最終学歴	1993 年 3 月 東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学専攻博士課程修了
専門分野	生産工学
学 位	博士（工学）
所属団体	九州工業大学大学院 工学研究院 機械知能工学研究系
役 職 名	准教授

今後の抱負

本研究では、継続的に取り組んでいる切削抵抗予測法の高精度化のために、高精度な切削抵抗測定的前提となる工作物の配置精度の検証と、工具変位の高精度測定を目指した。当初想定したよりも、一定の精度が確保されていることが明らかになったが、従来想定していなかった誤差も明らかになった。また、回転速度の変動や加工誤差要因に、原因が特定できない部分があることもわかった。今後はこれらの原因を追究するとともに、切削抵抗予測法を応用した加工経路設計に取り組んでいきたい。

1. はじめに

曲面を有する金型の加工には、ボールエンドミルやラジアスエンドミルが用いられる。また、5軸制御工作機械の普及により加工面に対するエンドミルの回転軸方向が制御可能であり、工具回転軸方向によって工具1回転中の切削抵抗の変動波形や加工誤差は異なることがわかっている。そのため、加工経路の最適化のためには切削抵抗や加工誤差の予測が有用である。

このような課題に対し、幾何計算と切屑流出方向に関する経験則（Stabler の経験則）を用いた切削抵抗予測法を開発している。図1に示すように、これまでに切削抵抗実測値の傾向を良く表わす予測結果を得ている。しかし、実測値と予測値とでは、切削抵抗波形における切削開始点と切削終了点に無視できない差がある。そのため、切削抵抗の変化が急な部分において、実測値と予測値の偏差が大きくなっている。

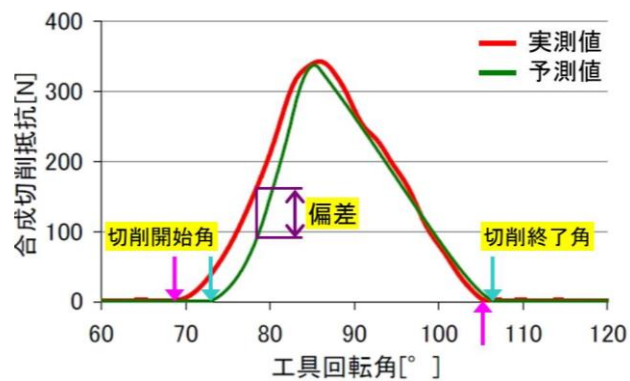


図1 ボールエンドミル加工の切削抵抗予測値と実測値の比較

本研究の目的は、工具軸傾斜エンドミル加工において、切削抵抗と工具変位を高精度に測定法する手法の開発である。この手法を用いることで、切削抵抗予測値と実測値の誤差要因を明らかにすることができると考えられる。上述したように、予測した切削抵抗波形について、現段階では定性的には実測値に近い結果を得ているが、定量的には偏差が大きい。予測法で用いる幾何的な計算値の精度に関しては、3元CADを用いて近似的に求めた値と比較した結果、大きな違いが無いことを確認している。

一方、実測値の測定精度は未検証であることから、この偏差が発生する原因を明らかにするためには、切削抵抗と工具変位のより高精度な実測値が必要である。具体的には、図2に示すように、加工面を平面とし、工具回転軸を平面の法線方向に対して一定角度傾斜した状態で、一定切込の直線経路を加工することを前提とする。

さらに、切削動力計やマシニングセンタの運動精度など、測定に用いる装置自体は信頼できるものとする。その上で、本研究では、まず工作物に対する工具

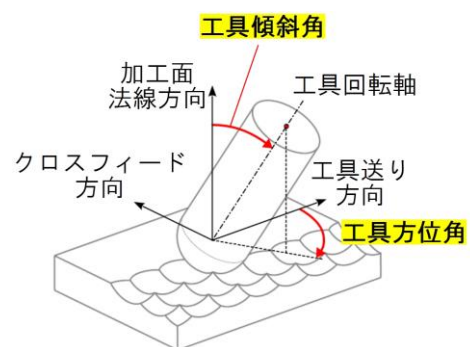


図2 工具軸傾斜エンドミル加工概念図

の位置と姿勢の設定精度を検証し、切削抵抗予測値に対する影響を検討する。次に、マシニングセンタ主軸の回転速度の変動を測定し、切削抵抗予測値の誤差要因として考慮すべきか否かを検討する。最後に、工具変位について、変位測定装置と直交する2方向から測定した変位の処理方法を改良し、加工実験における切り込み深さ誤差について検討する。

2. 工作物加工面の位置と方向の高精度測定

2-1 測定方法

高精度な切削抵抗を得るためには、実測時の工作物に対する、工具の位置と姿勢を高精度に設定しなければならない。本研究では図3に示すテーブル旋回型の工作機械を用いることから、実際には、「工具の位置と姿勢」は「工作機械主軸に対する工作物加工面の位置と姿勢」で設定する。この設定精度を検証するために、マシニングセンタ主軸に変位センサを装着し加工平面を測定する。

本実験で用いる、変位センサ取付ジグを図4に示す。本実験で用いる変位センサは接触式である。接触式変位センサの直動ガイドは、測定面に対して斜め方向から接触させることを想定していないと思われる。接触子先端を斜めに接触させた場合、直動軸方向に対して垂直方向にも力が加わり、直動部のたわみや破損の恐れがある。そのため、本実験ではスプライン軸による直動ガイドを介して、変位センサの接触子を駆動する。これにより、測定方向に垂直な力はスプライン軸で受けることができ、変位センサには、その直動方向にのみ力が加わるようにすることができる。

この取付ジグを工具ホルダで把持し、マシニングセンタ主軸に取り付ける。

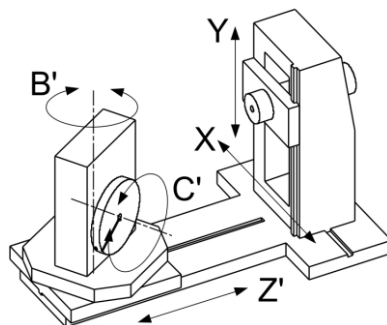


図3 本研究で用いる工作機械の軸構成

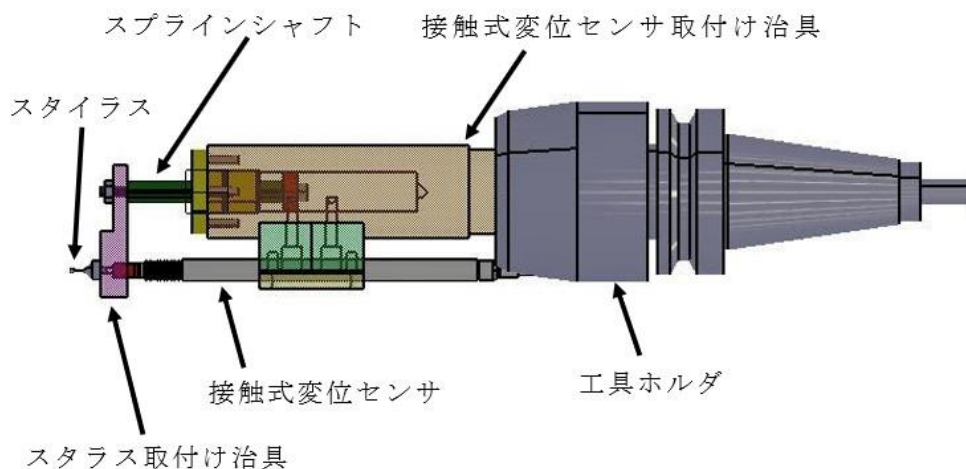


図4 接触式変位センサ取付ジグ概念図

表 1 工作物加工面測定の実験条件

測定面	SKD11 研削面
クロスフィード	0.5 [mm]
傾斜角	45 [°]
方位角	100, 110, 120 [°]
加工深さ	2 [mm]
測定距離	30 [mm]

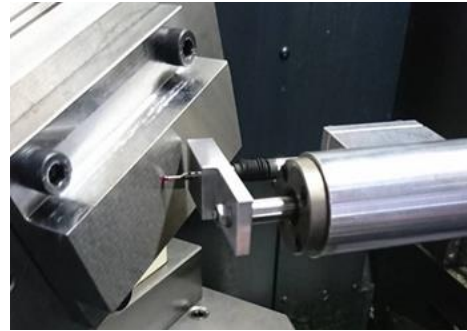


図 5 工作物加工表面位置の測定

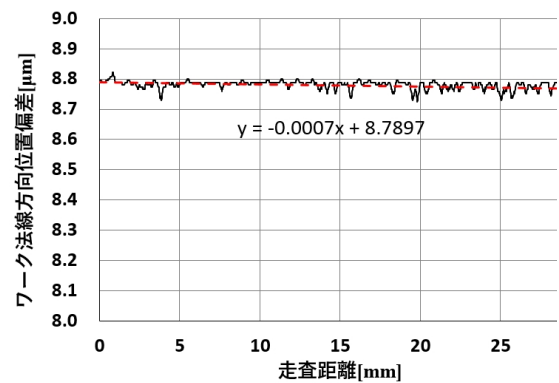
その後、加工実験と同じ手順で加工面の位置と方向を設定し、加工実験で用いる経路と同じ経路で加工図 5 に示す。

2-2 工作物加工面測定実験

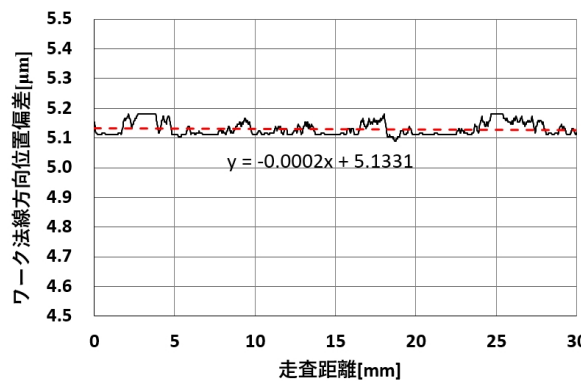
前項で示した測定方法を用いて、実際に工作物表面を測定する。測定条件を表 1 に示す。また、図 6 に方位角ごとの測定結果を示す。位置偏差の符号は、設計上の加工面よりも上にある場合、すなわち切り込みが浅い場合を「正」としている。なお、グラフ中の式は、測定値を線形近似した結果を示す。

いずれの測定結果においても、ワーク法線方向の位置偏差は正の値となり、設計上の加工面よりも上を通過している結果が得られた。近似直線の Y 切片は最大で約 $9\mu\text{m}$ であり、本実験では $5\sim 9\mu\text{m}$ の誤差が生じているが、現時点ではこの原因は不明である、ただし、本実験で得られた誤差量を考慮した加工経路を用いると、加工位置の偏差は $1\mu\text{m}$ 未満となった。

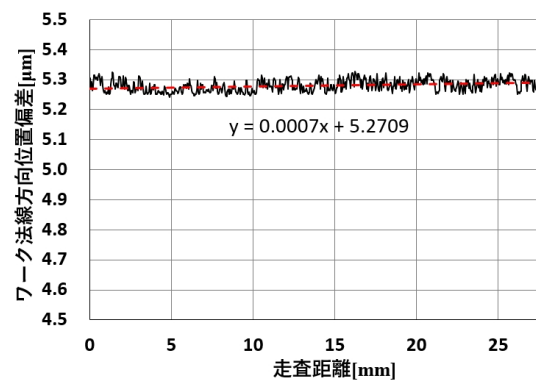
また、近似直線の傾きはどれも小さく、グラフ縦軸の単位は μm であることから、経路長 30mm の加工において最も大きい 0.0007 を用いた場合でも、加工開始点と終了点の加工深さの差は $0.02\mu\text{m}$ となる。マシニングセンタの座標値指定単位が μm であることを



(1) 方位角 100°



(2) 方位角 110°



(3) 方位角 120°

図 6 加工面表面の法線方向位置誤差

考慮すると、本実験における工作物加工面の方向誤差は、影響のない範囲であると考えられる。

3. 工具変位と回転角の高精度測定

エンドミル加工は、回転工具による断続切削であることから複雑に変動する切削抵抗を受け、切削過程における工具切れ刃位置は理想的な位置から変動する。切れ刃位置の変動は、直接予測値との偏差に影響することから、工具変位と回転角を高精度に測定する。

3-1 測定装置

具体的には、図7に示す従来の測定方法に基づいて、より安定した実測値が得られる高分解能な変位センサに置換する。工具回転角については、回転角度の直接測定が困難なため、工具にスリットプレートを取り付け、スリット間の時間を計測する。従来は1か所の凹部を検出し1回転中は等速であることを仮定していた。これに対し、本研究では1回転中9区間の時間間隔を測定することができるようになる。

図8にスリットプレートによるスリット間時間間隔の測定方法概念図を示す。スリット位置は、渦電流式非接触変位センサを用いて検出する。スリットプレートには、図9に示すように9個のスリットを設けている。以下、図中の番号をスリット番号として用いる。図9に示すように、スリット0のみ16等分の間隔で配置している。これにより、測定値とスリット位置を対応付けることが可能になる。

図10に、工具変位測定も合わせた測定システムの概念図を示す。上述したように、工具変位測定の手法自体は開発済みのものであり、本研究では変位センサを高分解能な静電容量式非接触変位センサに交換するために、取り付け部を再設計している。

図11に各センサを取り付けた写真を示す。スリット検出用の変位センサと工具変位測定用の変位センサは、ともにアルミ合金製のブロックに取り付け、エンドミルの周囲に配置している。

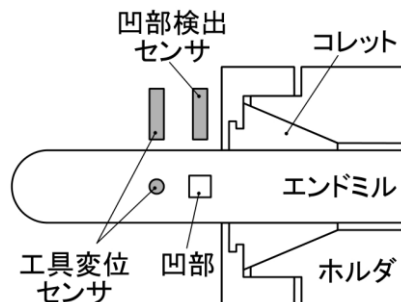


図7 工具変位と回転角の測定法

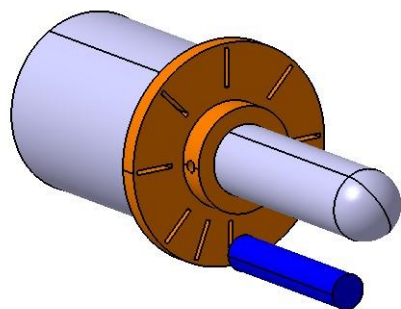


図8 スリット間時間間隔測定法概念図

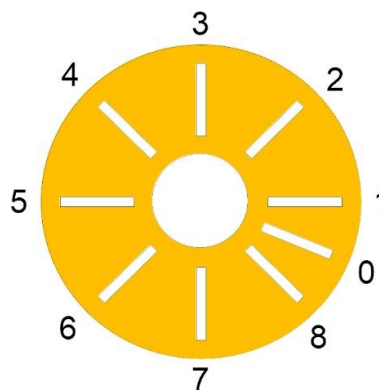


図9 スリットプレート

3-2 工具先端変位の算出方法

図11からもわかるように、2個の工具変位測定用センサで得られる測定値は、加工結果に影響する工具先端の変位ではない。さらに、これらのセンサは、測定方向が互いに垂直になるように配置しているが、測定対象が円筒形状であることから、二つの測定値は幾何的に独立ではない。従来は単純に、各測定値を工具軸の変位成分として扱っていたが、例えば工具中心軸がX軸方向にのみ変位した場合でも、Y軸方向の測定値も変化する。

本研究では、図12に示すように幾何的に正確な工具中心軸を算出する。まず、二つのセンサ測定方向を座標軸とする座標系を考える。測定値 h_x , h_y から点A, Bの座標値を求め、2点A, Bを通る円の中心を工具中心とする。ただし、工具断面は真円であり、半径は既知であるとする。また各センサの測定方向は、互いに直交しているものとして、工具中心座標を算出する。さらに、測定位置と工具突き出し長さをを用いて、変位を線形に拡大して用いる。

3-3 工具変位と回転角の測定実験

測定実験条件を表2に示す。以下では実験条件のうち方位角 110° の結果を示す。スリット間の時間間隔実測値を図13に示す。棒グラフ項目名は、スリットNとスリットN+1の間隔を「間隔N」としている。例えば、項目名の「間隔0」はスリット0からスリット1の間の時間を計測したものである。折れ線グラフは、各測定値の偏差を相対値で示している。最小値偏差は平均値よりも小さい測定値の偏差量を意味するが、ここでは見やすさのために正值として示している。

間隔1から間隔7の平均値は、約 9.4 msec である。本実験において、10 msec の 0.1% が測定間隔の $10 \mu\text{sec}$ に相当する。したがって、間隔3を除けば、どの偏差も測定点5点分の偏差に収まっている。このことから、切削中にコレットのすべりなどの原因で時間間隔が変動している可能性は判断できない。ただし、間隔3だけが偏差量が多いことについては、さらに詳細な検討が必要である。本実験では、スリット位置と刃先曲線の相対的な位置関係を測定することができなかった。

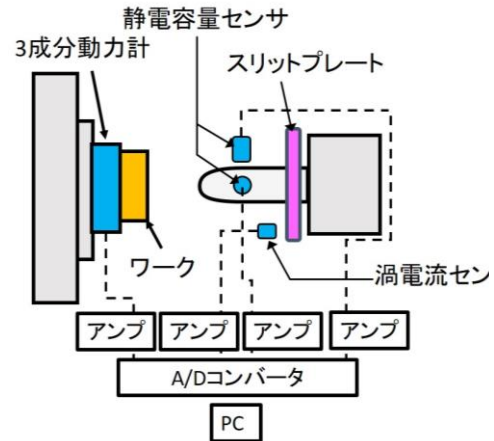


図10 工具変位測定システム概念図



図11 変位測定実験のセットアップ

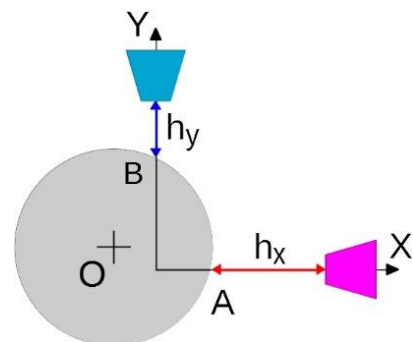


図12 工具中心座標値の算出方法

この相対的な位置関係を明らかにすれば、切削過程とスリット時間間隔の関係を分析することができるため、今後の課題である。

また、図14にスリットごとに算出した回転周期を示す。回転周期の変動は、スリット間の時間間隔の変動よりも小さく、ほぼ同一の値である。仮に、特定のスリットを基準に算出した周期が、他スリットを基準にした周期と異なるとすると、一定時間回転させた場合に、スリットによって総回転角が異なることになり、明らかに現実と矛盾する。したがって、ここでの偏差の違いは、測定上の変動と、スリット位置を算出する過程で生じる計算誤差に起因するものと思われる。

図15に工具先端における、変位測定座標系におけるX、Y方向変位の結果を示す。これを用いて、工具回転軸の実際の変位を算出した結果を図16に示す。図の赤×印で示した点が、切削抵抗が発生している区間における工具回転軸位置を示す。切削抵抗により、工具軸位置が変位していることがわかる。また灰色で示した点は、工具に設けたスクラッチを測定している部分を表す。この区間の算出結果は、工具軸の位置を表していない。

これらの結果から、工作物表面法線方向に換算した変位量のグラフを図17に示す。図中の工具回転軸方向変位は、スリット測定値からスリットプレートの変位算出を試行した結果である。算出手法の検証が

表2 測定実験条件

被削材		C2801
工具	材種	高速度鋼
	刃先形状	ボールエンドミル, 直径16[mm], 1枚刃, ねじれ角30[°]
主軸回転速度		800[1/min]
一刃当たりの送り		0.3[mm/tooth/rev]
クロスフィード量		0.5[mm]
切り込み深さ		0.5[mm]
工具姿勢	θ	10[°]
	ϕ	100, 110, 120[°]
切削油剤		なし(dry)
切削方式		下向き切削
切削距離		20[mm]×5path
測定間隔		10[μsec]

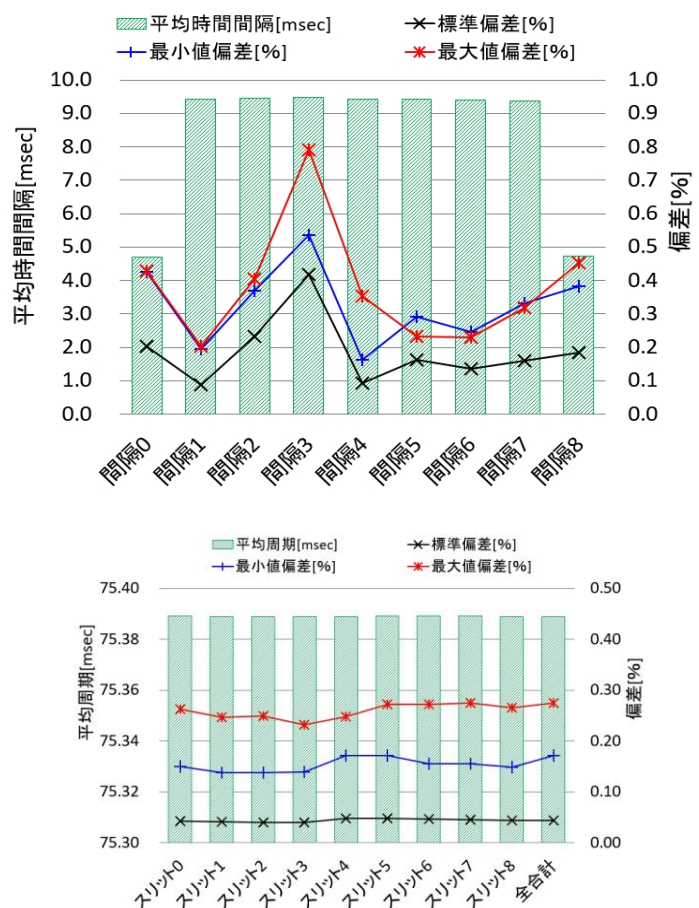


図14 スリットごとの回転周期

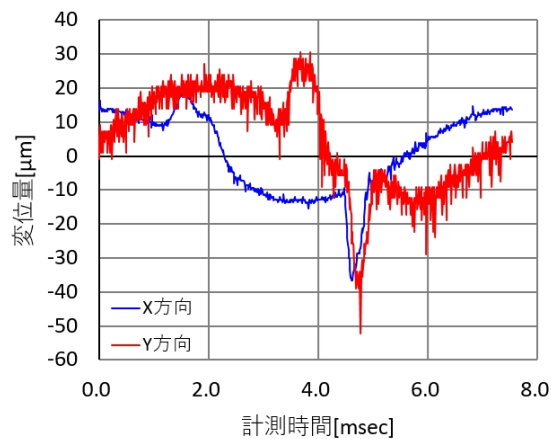


図15 工具先端変位の変化

不十分なため詳細な説明は省略するが、参考値として示す。また、加工誤差実測値と、これらの変位を比較した結果を図18に示す。方位角 120° については、加工誤差と工具変位の対応がよく、実測値との偏差は約2%であった。しかし、方位角 100° の結果については、実測値との偏差が約19%あり、本研究で検討した変位量だけでは説明できない加工誤差が生じていることが分かった。

4. まとめ

本研究の目的は、工具軸傾斜エンドミル加工において、切削抵抗と工具変位を高精度に測定法する手法の開発であった。切削抵抗実測値が想定した加工条件における実測値でなければ、予測値と比較ができないことから、工作物加工面の位置と方向を測定することにより加工条件の設定精度を検証した。その結果、加工面の傾斜方向は想定通りに設定されており、加工経路の開始点と終了点における切り込み深さの差は、最大で $0.02\mu\text{m}$ となった。

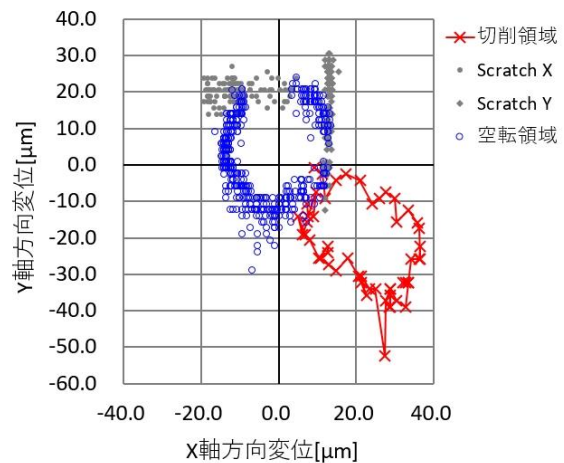


図16 工具先端における回転軸の変位

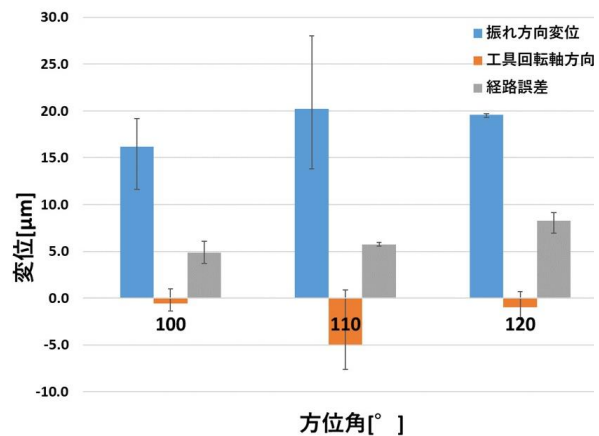


図17 工作物法線方向変位のまとめ

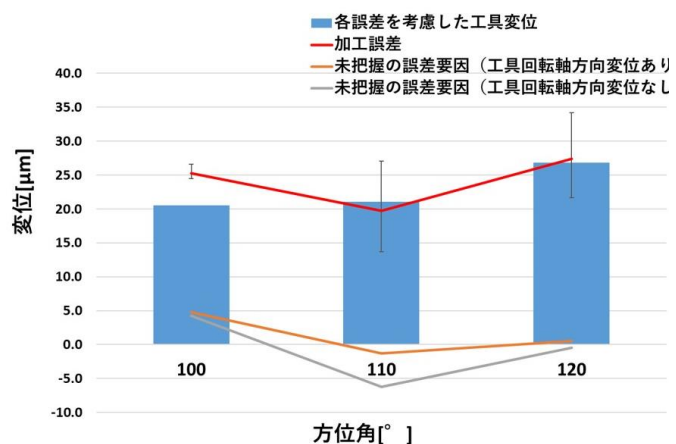


図18 加工誤差と合計変位の比較

一方、加工面の位置は $5\sim 9\mu\text{m}$ の誤差が生じており、加工経路設計上の切り込み深さよりも、浅く加工することが明らかになった。これについては、誤差量を相殺するように切り込みを深くした経路を用いれば、加工位置の偏差は $1\mu\text{m}$ 未満となった。

また、工具変位は加工誤差に直接影響し、工具回転速度はエンドミルが実際に工作物を除去している時間に影響することから、これらの測定手法を開発した。その結果、工具回転速度については、一部の測定結果を除いて測定上の変動とみなせる範囲の変動に収まっていることがわかった。ただし、一部の測定結果は他と比較して変動が大きく、切削過程との関連が否定できないことから、工具刃先位置との対応付けをしたうえで、さらに詳細な検討が必要である。

工具変位については、測定センサを更新することにより、従来よりも高周波成分の少ない測定値が得られ、より詳細な分析が可能になった。加工誤差の実測値との比較では、方位角 120° については、加工経路の誤差と工具変位で加工誤差を説明できることができたが、方位角 100° の場合は、加工誤差実測値との偏差が約 19%あり、本研究で検討した変位量だけでは説明できない加工誤差が生じていることが分かった。

謝辞

本研究は、公益財団法人三井金型振興財団研究助成の補助を受けて行ったものであり、特に工具変位測定に用いた変位センサは、本研究助成によって導入できたものである。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 寺井久宣, 郝明暉, 吉川浩一, 水垣善夫: ボールエンドミル加工の幾何的切削機構解析に基づく加工面生成に関する考察, 日本機械学会論文集 C 編 69(684), pp. 222-227, 2003.
- 2) 岩部洋育, 難波剛志, 二川真法: ラジラスエンドミルによる傾斜面加工における切削機構に関する研究-三次元 CAD を活用した切削過程の解析および切削実験に基づく切削特性の評価-, 2010 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.243~244
- 3) 神田真徳, 吉川浩一, 水垣善夫, 森直樹: 切削抵抗予測に基づく 5 軸制御ボールエンドミル加工用 CAM システムの開発-第 1 報: 傾斜面加工結果に基づく工具姿勢制御の効果-, 2017 年度精密工学会九州支部熊本地方講演会講演論文集, pp. 103-104 (2017).
- 4) 南淵智洋, 吉川浩一, 萩まや, 水垣善夫, 森直樹: ボールエンドミル加工における切削抵抗予測法の高精度化-第 2 報: 工具変位と加工誤差の関係-, 2016 年度精密工学会九州支部北九州地方講演会講演論文集, pp. 39-40 (2016) .
- 5) 塩飽達宏, 吉川浩一, 上園竜馬, 南淵智洋, 水垣善夫: ボールエンドミル加工における切削抵抗予測法の高精度化-切削過程における工具挙動の詳細把握-, 2014 年度精密工学会九州支部鹿児島地方講演会講演論文集, pp. 9-10(2014).
- 6) 沖本翔, 塩飽達宏, 鶴我拓人, 吉川浩一, 水垣善夫: ボールエンドミル加工における切削断面積を用いた切削抵抗予測-第 2 報: 前加工面と幾何計算の高精度化-, 2013 年度精密工学会九州支部宮崎地方講演会講演論文集, pp. 105-106 (2013).