

超高速回転工具における加工面除去状態観測による 切削抵抗予測手法の開発

プロジェクト代表者：金子 順一（大学院理工学研究科・助教）

1. はじめに

多軸制御切削加工機の普及に伴い、自由曲面の加工においても加工面に対する工具姿勢を選択的に設定して仕上げ加工を行うことが一般的になりつつある。一般にボールエンドミルを用いた仕上げ加工においては、加工面に対する工具の相対姿勢、ピックフィード方向・幅、工具1刃あたり送り量、工具回転角位相差等の条件が加工面の性状に大きな影響を与えることが知られている。これらの関係については以前よりさまざまな検討が行われており、高送り時のカッターマークによる表面粗さ生成の幾何的解析や、工具相対姿勢の変更による面性状変化の傾向等が報告されている。

ところで、近年の主軸の高速化に伴い、金型等の仕上げ加工においては工具1刃あたりの送り量が非常に小さな切削条件が広く用いられつつある。この種の切削条件では、加工後に残る面の大部分は被削物への工具刃の切込が工具刃先の丸み半径よりも小さい状態で創成される。このとき、工具刃先の逃げによる面全体の目標形状からのずれや、被削物除去状態の遷移による面性状の悪化を予測するためには、弾性変形による工具刃の逃げや加工面誤差の再生といった現象を考慮して工具刃先各部分における切込の状態を推定する必要がある。しかしながら、多軸制御切削加工を対象とした精密な被削物除去深さの解析は未だ行われておらず、工具姿勢の変化が切削抵抗や加工誤差もたらす影響には不明な点が多い。

そこで筆者らは、過去にスクエアエンドミル加工の誤差予測で提案した被削物除去モデルを導入し、ボールエンドミルによる仕上げ加工において加工面を工具刃が創成する瞬間の被削物除去深さおよび切削抵抗を推定する手法¹⁾を提案している。これまでの予測結果では、小径工具を用いた微小送り条件での傾斜面切削においては、被削物に与えられる加工面形状の大半が塑性変形状態に相当する除去状態で創成され、その結果加工誤差が大きく増加する傾向にあると推定されている。そこで本年度は、この種の除去状態の遷移が実際の仕上げ加工において加工面に与える影響を検証するため、工具一刃の通過によって加工面に与えられる切削痕を直接計測する実験方法を開発し、工具切れ刃の各位置と各工具回転角における被削物除去量の変化の推定を行った。

2. 被削物の急速後退による除去深さ推定

工具切れ刃の各部分が1回の通過中、それぞれの回転角において被削物を除去した深さを推定するため、本研究では工具切れ刃が1回の通過で被削物に与えた切削痕を直接観測するための実験機器を開発する。図1に示すように、軸方向およびピック方向の切込量が小さい加工条件では、工具が一回転する

間に工具刃が被削物への切削を行う工具回転角の範囲はごく一部となる。そこで被削物をピエゾステージ上に直接固定し、工具刃が被削物を除去してから次の工具刃が除去を開始するまでの時間内に被削物をピック方向と同じ向きに急速後退させることを考える。これにより、直前の工具一刃の通過によって与えられた加工面の形状を計測することが可能となると期待される。また、実験時工具上にある複数の工具刃が常に等しい切込状態で安定的な切削を行っていたと仮定すると、図2に示すように工具一刃分の送り量だけずらしてこの形状を重ね合わせることで工具刃各部の各回転角における実際の除去深さを推定することが可能となる。

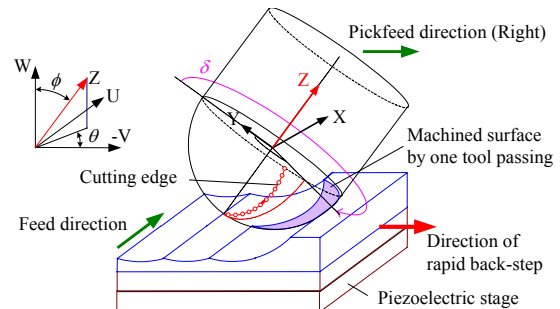


Fig.1 Coordinates definition of cutting tool on experimental apparatus

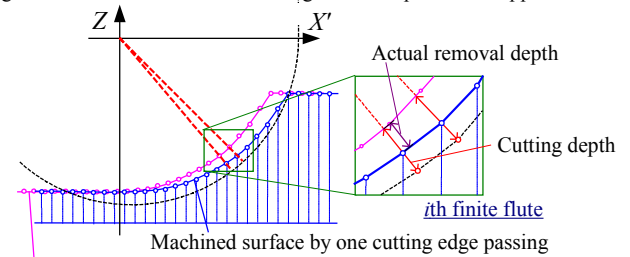


Fig.2 Cutting depth estimation based on assumption of stable machining

3. 実験機器

本研究で用いた実験機器を図3に示す。小型NCフライス(オリジナルマインド miniCOBRA2520)上にピエゾステージ(シグマ光機 SFX-60X)を設置し、その上に被削物を固定する。ピック方向をNCフライスのX方向としてZ軸上に工具傾き角 ϕ で高速主軸(ナカニシ NR-3060S)を固定し、一定のピックフィード間隔で傾斜面切削を行う。

加工途中にピエゾステージを駆動して工具を被削物表面から離脱させた後、加工面に残った工具刃先の通過痕の形状を微分干渉型計測器(Zygo)を用いて計測し、各工具回転角および工具刃先位置に対する切込深さの変化を推定する。

4. 実験結果

4.1.被削物急速後退による工具刃先通過痕の観測

表1は本研究で用いた実験条件を示す。この条件下では工具が180度回転する間、刃のいずれかの部

分が被削物に切り込む角度の範囲は 30 度強となる。ピエゾステージは約 4msec 以内に被削物を 70 μ m 後退させることができるため、一枚目の切れ刃による切削が終了してから次の切れ刃が被削物と干渉する 5ms 以内に被削物を切れ刃と干渉しない位置まで移動させることが可能となっている。

図 4 は被削物をピエゾステージによって急速後退した場合に被削物表面に現れる工具刃先の切削痕と、急速後退せずにその場で送りを停止した場合に現れる切削痕をそれぞれ示す。前者においては最後の工具一刃の通過によって転写された被削物表面の形状が明確に見える反面、後者では工具送り停止後の工具回転によって加工面がさらに除去され、円球形状を加工面に押し込んだような切削痕が転写されている。ここで最終的に被削物表面を構成する A およびそれに対応する A' の近傍の形状を比較すると、送りの有無により大きな差が生じることがわかる。これは工具一刃あたりの送りが数十 μ m 以下となる微小送り条件では、工具刃先の通過軌跡が工具の弾性変形および塑性変形状態における除去プロセスの影響を受け、加工面に大きな削り残しが生じること示している。

図 5 はそれぞれ加工条件を $\phi=30\text{deg.}$, $\theta=90\text{deg.}$ および 270deg. としたときの切削痕の高さを Zygo で計測し、切削時の工具中心位置を推定して各部分が切削された瞬間の工具回転角を加工面の色で表したものである。工具回転角は工具刃が切削を開始した瞬間を 0deg.として設定している。これらの色が等しい部分はそれぞれ同じ瞬間に創成されたことを表すため、色が変化する方向に切れ刃が通過したと考える事ができる。

4.2. 工具姿勢に対する工具刃各位置の切込深さ変化

図 6 は、図 5 で推定された加工痕各位置の工具刃回転角をもとに、工具弾性変位がないと仮定した場合の切込深さと実際の除去深さを可視化したものである。後者では図 2 で示したように直前の工具刃通過によって与えられた切削痕が計測された形状と工具一刃分の送り量だけずれた位置にあったと仮定している。図よりカusp底部を切れ刃が通過する B の周囲では切込深さに対してほとんど除去が行われていないことがわかる。これは過去に筆者らが推定してきた誤差の発生形態に近く、加工面の誤差に工具刃先による被削物のおしならしと、その際の工具変形が大きく関与した結果と考えられる。

5. 結言

本報告では、ボールエンドミルによる傾斜面切削において工具切れ刃の通過によって与えられる加工痕の直接計測手法を開発し、工具刃の被削物への切込状態を加工痕形状から推測する手法の開発を行った。傾斜面加工時の実験結果から微小送り条件では加工後に加工面として残るカッターマークの大半が塑性変形状態に相当する除去状態で創成されており、切込深さに対して大きな誤差が生じることを明らかにした。

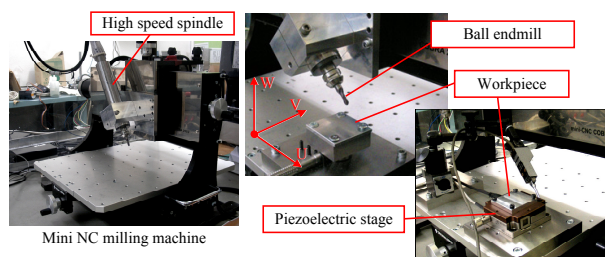


Fig.3 Experimental apparatus on NC milling machine

Table 1 Experimental condition

Workpiece material	A2017
Tool radius [mm]	2
Number of cutting edge	2
Helix angle of cutting edge[deg.]	30
Type of cut	Right pickfeed Right-Forward Tilting
Tool rotation speed [min ⁻¹]	5000
Feed rate [mm/min]	250
Axial depth of cut [mm]	0.07
Pickfeed [mm/path]	0.07

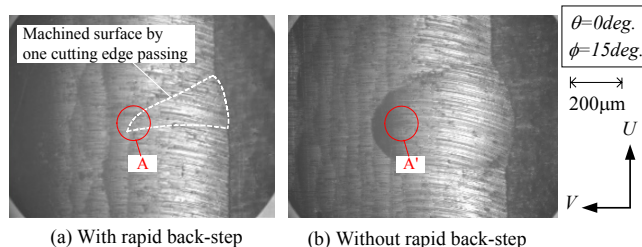


Fig.4 Shape of machined surface by ball endmill with rapid back-step

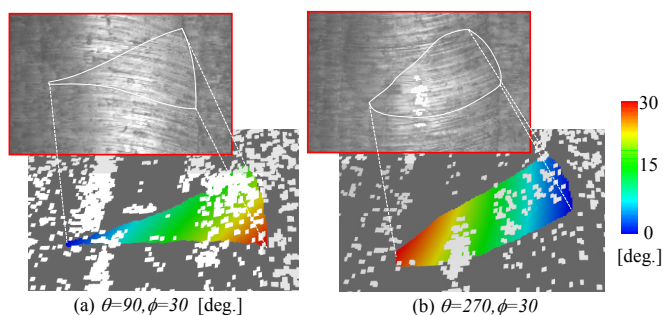


Fig.5 Rotation angle on shape of machined surface by one cutting edge

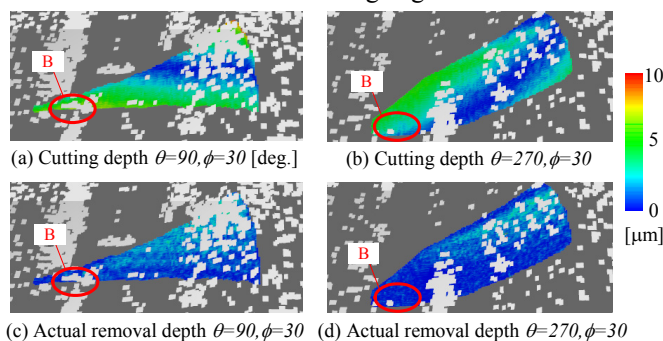


Fig.6 Cutting depth and actual removal depth on machined surface

参考文献

- [1] 金子順一 他: 刃先丸みの影響を考慮したボールエンドミル加工の誤差予測, 2007 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 915-916.