

# 金型仕上げ加工における加工面除去状態観測手法の開発

埼玉大学大学院理工学研究科  
助教 金子 順一  
(平成 18 年度一般研究開発助成 AF-2006016)

キーワード：工具刃先丸み、ボールエンドミル、切削痕

## 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学的解析や、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のほか、工具刃先によって加工面に与えられる塑性変形の影響を考慮する必要がある。しかしながら、多軸制御切削加工で通常使用される小径のボールエンドミルによる加工において加工面に与えられる切削痕を直接観測した例はなく、工具回転に伴う被削物除去深さの推移の実態や工具姿勢の変化が切削抵抗や加工誤差にもたらす影響には不明な点が多い。

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<sup>1)</sup>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。そこで本研究では、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実施した。

## 2. 被削物の急速後退による除去深さ推定

エンドミルをはじめとした回転工具によって与えられる切

削痕の観測では、従来から切削終了後に被削物表面に残るツールマークの観察が主に行われてきた。しかしながら工具送り量および軸方向切込量が小さい加工条件では、一回の工具刃先の通過によって加工面に与えられた切削痕の大半は次の工具刃先の通過時に除去される。そのため、ツールマークの形状から工具刃先の切削開始から離脱までの過程における除去状態の遷移を推定することは難しい。

一方、旋盤等を用いた実験においては切削痕の観察の際に旋削主軸を急停止させ、被削表面の形状を保存する手法が用いられてきた。しかしながら、最初の工具刃が通過してから次の工具刃が通過するまでの時間内に小径で高速回転するエンドミルを安全に急停止させることは困難である。図 1 は加工面に対して傾斜して設定されたボールエンドミルの送りを切削途中で停止させたときに停止位置上に与えられる切削痕形状の例を示している。得られた結果では加工面上を工具刃先が多数回通過し、それまでの工具送りで転写されたツールマークよりも深い位置に穴状の形状が転写されている。これは通常の切削では背分力による工具刃先の逃げによって削り残しとして加工面に残存していた被削物が、工具送り停止後、工具刃先の通過によって除去されて生じると考えられる。

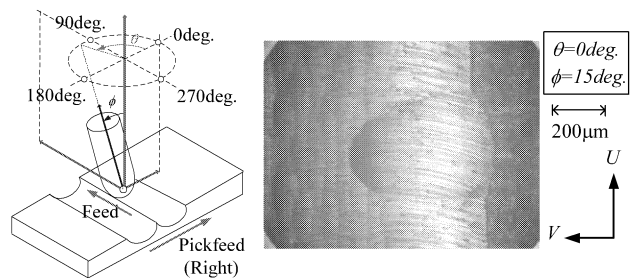


図 1 工具停止時に転写される切削痕形状

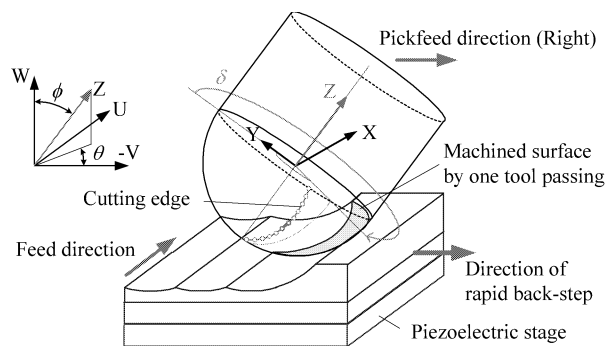


図 2 ピエゾステージの急速交代による切削痕の保存

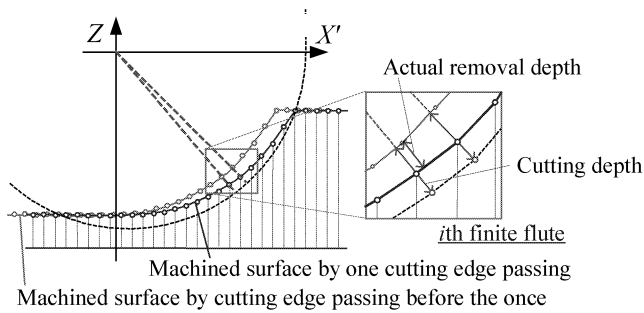


図3 工具刃先通過位置の計測結果を利用した  
工具刃先各部における実際の被削物除去深さの推定

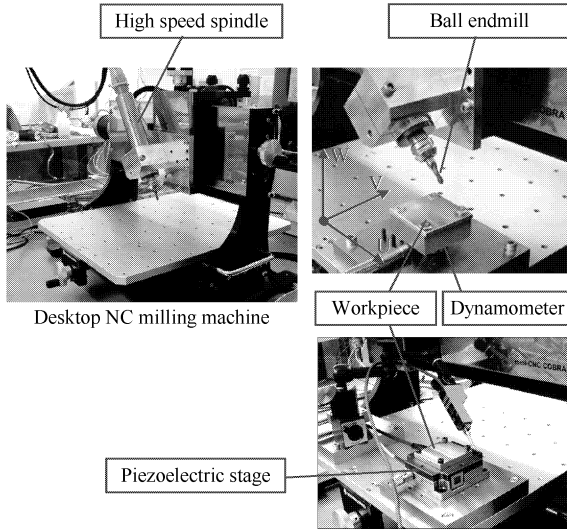
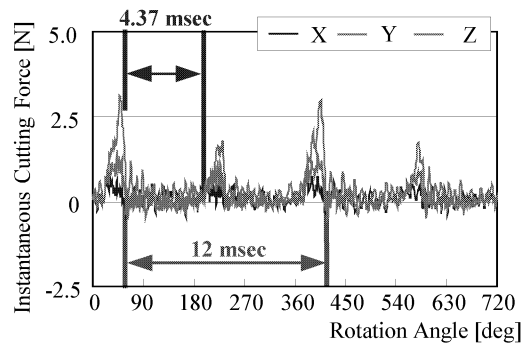


図4 実験装置の構成

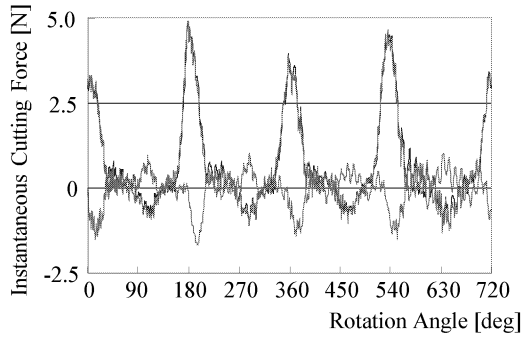
本研究では、以上の事柄より、工具切れ刃の各部分が1回の通過中それぞれの回転角において被削物を除去した深さを推定するため、工具切れ刃が1回の通過で被削物に与えた切削痕を直接観測し、加工面除去状態を推定する実験手法を開発する。手法の概要を図2に示す。軸方向およびピック方向の切込量が小さい仕上げ等の加工条件では、工具が一回転する間に工具刃が被削物への切削を行う工具回転角の範囲はごく一部となる。そこで被削物をピエゾステージ上に直接固定し、工具刃が被削物を除去してから次の工具刃が除去を開始するまでの時間内に被削物をピック方向と同じ向きに急速後退させることを考える。これにより、直前の工具一刃の通過によって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、工具上の複数の切れ刃がそれぞれ同様の切込状態で安定的に被削物の除去を行っていたと仮定すると、加工面に転写された形状を図3に示すように工具一刃分の送り量だけずらして重ね合わせ、それぞれの形状間の隔たりを推定することにより、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と考えられる。

### 3. 実験機器

本研究で用いた実験機器を図4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。

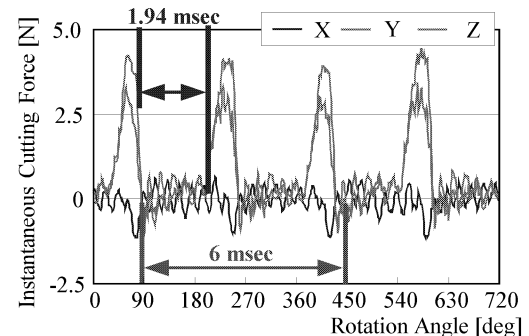


(a)  $\theta=90\text{deg.}, \phi=30\text{deg.}$

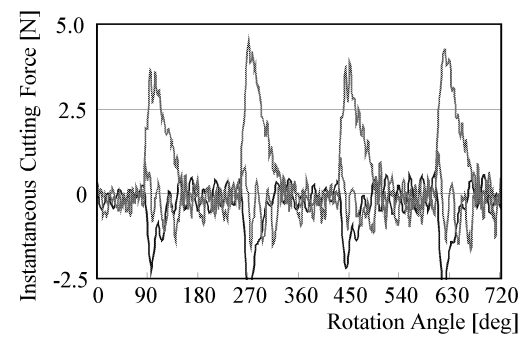


(b)  $\theta=180\text{deg.}, \phi=30\text{deg.}$

図5 瞬時切削抵抗計測結果(工具回転数 5000rpm, 軸方向切込深さ 0.07mm, ピック方向送り 0.07mm)



(a)  $\theta=90\text{deg.}, \phi=30\text{deg.}$



(b)  $\theta=270\text{deg.}, \phi=30\text{deg.}$

図6 瞬時切削抵抗計測結果 (工具回転数 10000rpm, 軸方向切込深さ 0.25mm, ピック方向送り 0.25mm)

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 $\phi$ で工具主軸(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った。

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

表1 切削条件

Workpiece material	A2017
Tool radius [mm]	2
Number of cutting edge	2
Tool material	Carbide(P)
Helix angle of cutting edge[deg.]	30
Type of cut	Right pickfeed Right-Forward Tilting
Tool rotation speed [ $\text{min}^{-1}$ ]	5000,10000
Feed rate [mm/min]	250
Axial depth of cut [mm]	0.07,0.25
Pickfeed [mm/path]	0.07,0.25

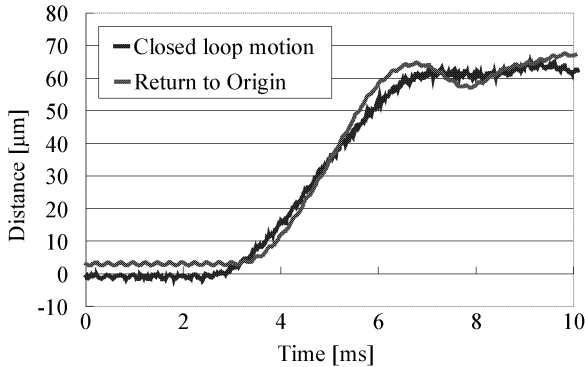


図7 ピエゾステージ駆動時間-移動量関係

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。

また、ボールエンドミル上の2枚の切れ刃が同様の切込状態で安定的に被削物の除去を行っているかを判断するため、ピエゾステージとは別に3分力切削動力計(KISTLER 9601A3)を設置し、この上に固定した被削物を切削して工具1回転あたりの切削抵抗の推移を計測した。

## 4. 実験結果

### 4.1. 切削動力計による切削抵抗の計測

図5および図6は切削動力計によって測定された工具2回転分の切削抵抗の推移を、表1はその際の切削条件を示す。工具回転速度を5000rpmと10000rpmとしたときの工具1回転ごとの切削抵抗作用周期は理論値と同様、6msecと12msecになり、各工具刃の通過時に作用する切削抵抗の大きさはほぼ等しく、安定的な切削を行うことができていると考えられる。

図7は被削物を把持した状態でステージを急速後退させたときの駆動時間と変位量の関係を表したものである。工具回転数を10000rpmとした場合、工具1刃が加工面より離脱してから次の工具刃が切削を開始するまでの時間は約1.9msecであり、最大で30 $\mu\text{m}$ だけ被削物をピック方向と反対側に離脱させることができると考えられる。同様に工具回転数を5000rpmとした場合、次の工具刃が切削を開始するまでの時間は約4.4msecとなり、ピエゾステージの最大逃げ量は40 $\mu\text{m}$

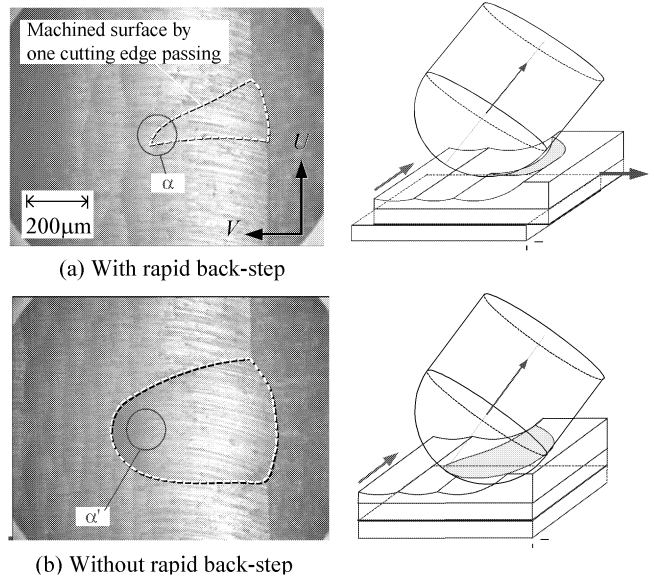


図8 工具刃先通過軌跡形状 (5000rpm,  $\theta=0$ 度,  $\phi=15$ 度)

となる。それぞれの工具送り条件では、工具1刃が通過する際に送り方向へ切り込む厚さは理論値でそれぞれ最大25 $\mu\text{m}$ および12 $\mu\text{m}$ であると考えられるため、本ピエゾステージで次の工具刃が通過する前に被削物を移動させ、転写された切削痕を保存することは十分可能と考えられる。

### 4.2. 被削物急速後退による工具刃先通過痕の観測

図8は(a)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、(b)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比較したものである。(b)では図1で示したように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。これに対して(a)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保存されており、工具刃先の通過軌跡を推定することが可能となっている。図8(a)中の $\alpha$ の領域は切削痕の中でもっとも工具先端に近い工具切れ刃で創成された部分であると考えられ、ピック方向に工具が送られた後に加工面のツールマークを構成する部分に相当する。(a)ではこの部分がそれまでの工具送りで転写されたツールマーク形状と一致する高さであり、急速後退によって切削痕が保存できたことが確認できる。一方(b)では $\alpha$ に相当する $\alpha'$ の部分は最後の工具の空転時に大きく除去されており、通常切削時の工具刃先通過軌跡が工具空転時の刃先通過軌跡よりも大きく工具中心方向に変位した位置にあることがわかる。これは工具一刃あたりの送りが数十 $\mu\text{m}$ 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を示している。

図9はそれぞれ工具姿勢を $\phi=30\text{deg.}$ ,  $\theta=90\text{deg.}$ および270deg.

としたときの切削痕の高さを Zygo で計測し、工具刃の中心が図 10 に示す位置にあると推定して切削痕上の各部分が除去された瞬間の工具回転角を加工面の色で表した例を示す。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。本研究で使用した工具切れ刃は 30 度のねじれ角を有しており、切削痕上に転写された工具刃先通過方向と工具回転角の分布は一致しないことがわかる。

### 4.3. 工具姿勢による工具刃各位置における切込み深さの変化

図 11 は、図 9 で推定された加工痕各位置の工具刃回転角をもとに、工具の弾性変位による逃げがないと仮定した場合の切込深さと実際に工具刃先によって被削物が除去された深さを可視化して比較したものである。後者の除去深さでは図 3 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ると仮定している。工具姿勢による差はあるが、いずれの工具姿勢においてもカスプの底部から切れ刃が離脱する直前の  $\beta$  の領域では切込深さに対してほとんど被削物が除去されていないことがわかる。また、いずれの場合においても、カスプの底部における被削物の除去は工具刃先が最も大きな深さで被削物に切り込むツールマークの進行方向前縁部のみで生じており、切削痕のそのほかの部分では実際に除去される被削物の深さは非常に小さいと考えられる。これらの状態は過去に筆者らが計算機モデルによって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塑性変形と弾性変形による逃げ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切削痕上の大半の部分では工具刃先は被削物を除去しておらず、工具刃先が被削物に与える塑性変形が加工面誤差に大きな影響を与えていることを明らかにした。

### 謝辞

本研究の一部は、天田金属加工機械技術振興財団 2006 年度一般研究開発助成事業を受け遂行されました。感謝の意を表します。

### 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.

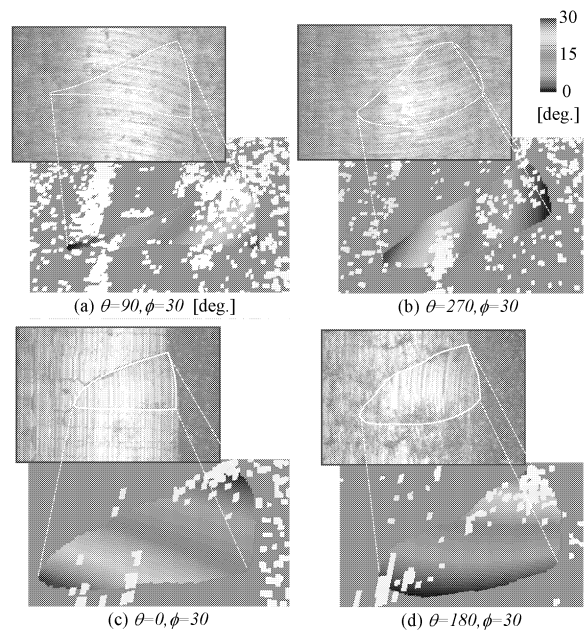


図 9 工具刃先が加工面を転写する瞬間の工具回転角度分布の推定結果

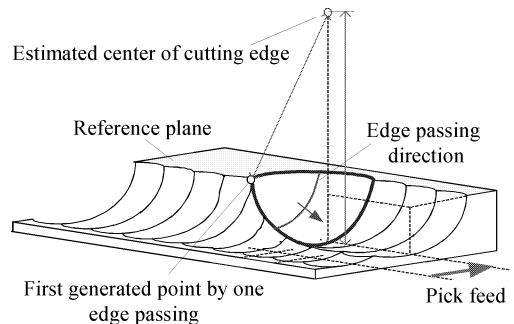


図 10 工具刃中心位置の推定

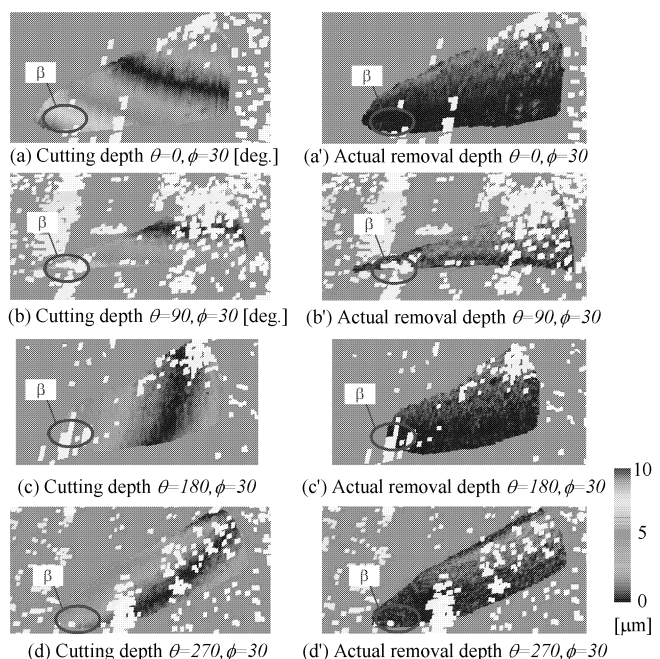


図 11 工具刃先通過に伴う被削物除去深さ推定結果