プロジェクト名：超高速回転小径工具を用いたエンドミル切削加工における被削物除去メカニズムの解明
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　研究背景

本研究は平成２０年度の総合研究機構研究プロジェクトの継続的内容として開始されており、高速回転する小径工具の刃先における被削物除去現象を切削抵抗の精密計測と切削痕の観測によって解明しようとするものである。２１年度の研究では、アルミ合金等の軽金属に比べてより大きな切削抵抗が作用する高硬度材料を対象とした切削実験を行うため、新規に高い剛性を有するマシニングセンタを利用し、小径エンドミルによる斜面切削を再現する工具経路および座標補正法の検討を行った。そして、プレス金型の直彫り加工に近年広く用いられている高硬度材料（プリハードン鋼）を対象とした切削実験を実施し、加工面に対する工具相対姿勢が工具半径方向 0.5mm 以下の微小切り込み時に工具に作用する切削抵抗に与える影響について調査を行った。得られた成果についての具体的な内容を以下に示す。

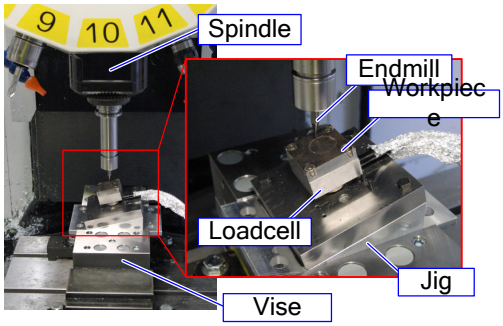
２　研究経過

本年度の研究ではまず、金型鋼に対して安定した切削実験を実施するため、マシニングセンタにおいて傾斜面の切削を模擬する実験方法の検討を行った。

実験方法として、一定の傾斜を有する治具をマシニングセンタに設置したバイスによって把持し、この傾斜面上で微小切り込み深さを保ったままエンドミル工具による切削を行うことにより、ボーエルエンドミルの工具刃の各部分における被削物の除去を再現した。

図１は本研究で使用した機器の構成を示す。縦型の軸構成を有する FANUC 社製 3 軸制御マシニングセンタ（α-T14iCL）にバイスを設置し、このバイスを用いて 15、30、45、60 度の角度を切削動力計に与える治具を設置した。治具部材には A5052 材を用い、被削物が X 方向に負、Z 方向に正の成分を含む法線ベクトルを有するよう配置を行っている。


FANUC RoboDrill a-T14iCL
(a) マシニングセンタ



(b) 装置セットアップ

図１　実験機器

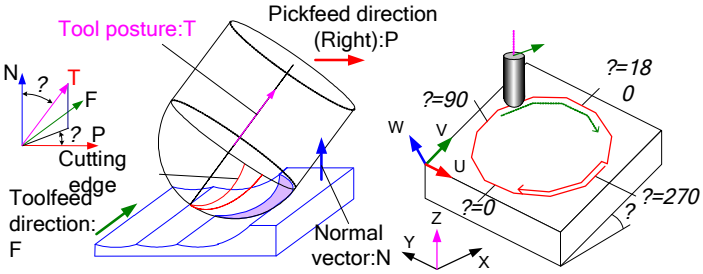
実験装置のセットアップを図 1(b)に、実験に使用した切削動力計と試料を図２に示す。切削動力計本体のセンサとチャージアンプには KISTLER 社の小型産業用動力計 9601A および ICAM 5073A を使用し、被削物と工具の間に作用した 1N 以下の微小切削力の計測を可能としている。また、切削力の変動を計測・記録するため、TEKTRONIX 社のデータレコーダ TDS2014 を使用した。また、切削した試料に対しては光学式表面形状測定器(ZYGO)を用いて工具通過後の加工面形状の高さを計測している。

切削実験では、様々な工具姿勢における切削の再現方法を開発し、切削力の測定と被削物表面形状の観察を行った。以下では実験方法の概要と、得られた結果について述べる。

まず、一定の姿勢をとる 3 軸制御マシニングセンタを用いて、様々な工具姿勢における切削の状態を再現するため、治具上に取り付けられた被削物に対して一定の切り込み深さを維持して切削を行う工具経路の生成方向を検討した。切削工具の加工面法線に対する傾斜角度 ϕ と工具移動方向に対する傾斜角

度θの定義を図2(a)に示す。加工対象物上にて基準となる原点とその上でのローカル座標系（UVW)をWが被削物平面の法線方向に一致するように与え、この上で図2(b)に示すような12角形の経路を一定のピックフィード間隔を維持して繰り返す工具経路を設定する。ここでマシニングセンタ上の工具がZ軸に一致するとき、加工対象物の法線とZ軸とのなす角がφに、斜面の上り方向と12角形の各辺とのなす角がθに、それぞれ相当する。

実験では、小径工具の半径方向切り込み深さが極めて小さいため、工具経路の各位置における切り込み深さの変動を抑えるために精密な面法線の計測が必要になる。そこでまず、タッチプローブおよびレーザー測距計を用いた加工対象物平面の機上計測手順と、ローカル座標系原点およびUVW成分の決定方法を検討した。図3は使用したタッチプローブ(大昭和製)および計測位置の相対関係を示す。図に示すように加工対象物の斜面を3点計測し、これらの座標位置から法線方向および12角形の中心位置を設定する。2回の外積を行い、ローカル座標系のV方向が工作機械のY方向と一致するよう設定することにより、UVWの各方向の機械座標系におけるベクトルを導出することができる。そしてこれらの成分を座標変換に用いることにより、ローカル座標系上で一定の切り込み厚さで12角形を移動する工具経路をポスト処理し、機械座標系における工具刃先位置の経路を導出して精密な切り込み深さの設定を実現した。



(a) 加工面に対する工具姿勢　　(b) 工具経路と工具姿勢

図2　傾斜面切削による工具相対姿勢設定

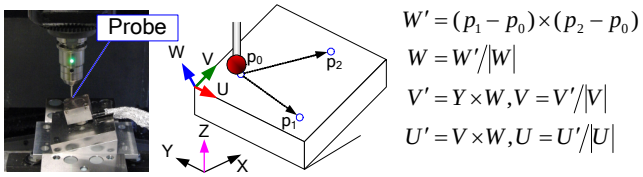


図3　タッチプローブによる機上計測

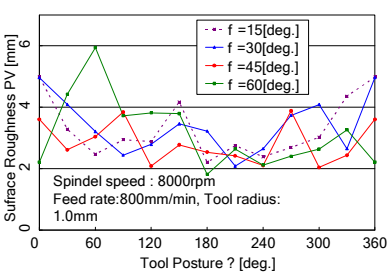


図4　加工面粗さ変化

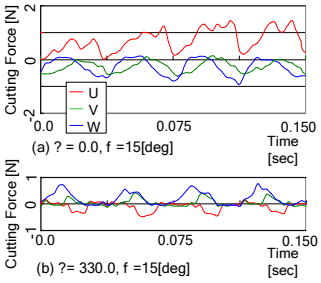


図5　切削抵抗計測例

以下では、各条件での表面粗さのばらつきおよび切削抵抗作用の状態を比較した例を示す。図5はφとθの変化に対する工具送り方向の表面最大粗さ（PV）を示している。高い硬度を有するプリハードン鋼に対する切削では、加工面と工具のなす角度θが増加するに従ってφの変化による粗さの増減が激しく、工具の弾性変形による逃げが作用しやすい工具姿勢においてφの変化を表面粗さが受けやすい傾向が明らかとなっている。また、切削抵抗の計測結果では、図6で示されるように同一の切削速度・工具送り条件下においても工具姿勢の微小な変化によって連続的な切削抵抗の作用が発生し、表面性状の大幅な悪化が発生することがわかる。特に半径方向切り込みが0.05mm以下の微小切り込み条件においては、φの微小な変化によって、工具刃の通過毎に定常的に切り込みが発生する工具姿勢から工具刃先の底面部分が切削に関与し、連続的な切削抵抗の作用によって表面性状が悪化する工具姿勢への変化が急激に生じ、面性状に支配的な影響を及ぼしていることが確認できた。

3　結言および今後の研究予定について

本年度実施した実験では、工具回転数が8000rpmまでの加工条件において、焼入後の金型鋼に対する微小切削力の測定および加工面の観察に成功した。今後の研究では、30000rpm~50000rpmの条件下において切削抵抗の計測を実施し、除去の過程において発生する小径工具特有の現象を明らかにする。