

工具磨耗を抑制した5軸仕上げ加工

中部大学 ○内方 創士 中部大学 ◎竹内 芳美

要旨

高価な工具費を軽減することができれば製造工程の低コスト化を実現できる。そこで金型の5軸制御仕上げ工程を想定し、工具傾斜方向と傾斜角を与え、その姿勢を次々刻々と変化させる割合（姿勢変化率）を付与し、切削に関与する切れ刃の位置を変えることによって工具磨耗の低減を図る。その結果、工具磨耗（最大逃げ面磨耗幅）が少なく、仕上げ面粗さも良好な姿勢方向と姿勢変化率が存在することが確認された。

1. 緒言

製品の品質での差別化とともにコスト面が重要視される加工に要するコストには様々な要因があるが、低コスト化の方法としては、高価な工具を長く使うという工具の長寿命化があげられる。工具の長寿命化には、多軸制御加工機を用いることで加工時に工具に姿勢変化を与え、切削点を動かし、切れ刃を万遍なく使うとともに、切削熱を分散させることが考えられ、同じ加工法、時間、工具でも工具費を抑制できると予想される。特にボールエンドミルによる仕上げ加工に注目すれば、加工中に連続的に工具姿勢を変化させることができるため、これを検討する。

2. 工具姿勢変化と切削関与切れ刃の概要

2.1 工具姿勢変化

本論文では、加工面に対する工具姿勢を、図1に示すように2種の角度量であらわす。

1) 工具軸傾斜方向： α

工具軸の傾斜方向は、工具送り方向を基準とし、加工面法線ベクトルまわりの回転角度 α ($0^\circ \sim 359^\circ$) で示す。

2) 工具傾斜角： β

加工面に対して工具が成す傾斜角度量は、加工面法線ベクトル N と工具中心軸 T が成す角度 β ($0^\circ \sim 90^\circ$) で示す。

2.2 切削関与切れ刃

図2は工具が $\beta=270^\circ$ に傾斜し、加工面に対して工具傾斜角 β をなしながら A_n だけ法線方向に切り込んだ際の被削材と工具の切削領域（切削関与切れ刃範囲）を示す。このとき、切削関与切れ刃の境界点 A と境界点 B の工具先端点からの位置を、工具中心軸 T となす角で表現すると次のようになる。⁽¹⁾

$$A = \beta + \cos^{-1} \left(\frac{r - A_n}{r} \right) \quad B = \beta - \sin^{-1} \left(\frac{pf}{2r} \right) \dots (1)$$

ここで、 pf はピックフィード量[mm]、 r は工具半径[mm]、 θ_1, θ_2 は工具軸から境界点までの角度である。このとき、工具傾斜角 β を変化させることで切削に関与する切れ刃の位置を変え、磨耗を分散させることができる。また、連続的に姿勢変化をしながら加工することで、切削熱の集中を抑制し、さらに境界点を動かすことで加工境界部に生じる境界磨耗による局所的な磨耗進行を防ぐこともできると考えられる。しかし、一定の変化率で姿勢を変えたとしても、切れ刃位置の実切削外径の違いなどによる切削条件のばらつきから、磨耗の分布に偏りが生じることが予想される。工具姿勢変化による、加工表面粗さへの悪影響も否めない。⁽²⁾⁽³⁾

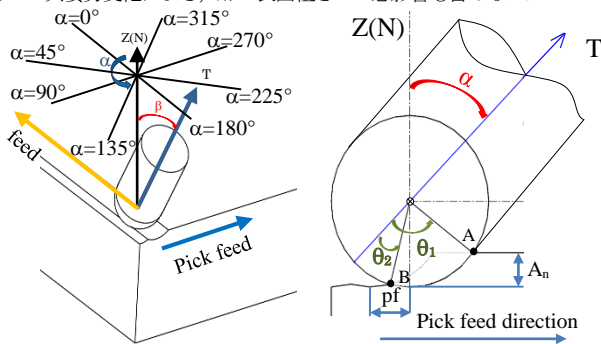


Fig.1 Definition of tilted tool

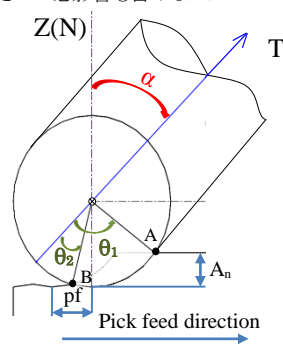


Fig.2 Cutting model

そこで、実際に工具傾斜方向、角度変化範囲(工具傾斜角)、姿勢変化率からなる姿勢変化条件を設定し、平面加工実験を行うことで、姿勢変化の有無と姿勢変化条件の差異による磨耗及び加工面性状への影響を検証する。

3. 平面加工実験

3.1 姿勢変化条件

工具傾斜角 α の範囲は大きくとるほど、広範囲に磨耗を分散できる。しかし、 $\theta_1 > 90^\circ$ になると側刃が加工面に干渉し、 $\theta_2 < 0^\circ$ では工具回転中心が境界点を超え、傾斜方向によっては接触領域内にアップカットとダウンカットが混在することになる。本実験ではこれを避け、ダウンカットにより一定の切削刃で加工を行うため、送り方向に対して8方向($\alpha=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$)の姿勢変化条件を設定するとともに β ($15^\circ \sim 45^\circ$)の範囲に設定する。また、姿勢変化なしの加工においても、その姿勢を $\beta=30^\circ$ にしている。

3.2 実験方法

姿勢変化条件を設定し、同加工条件の下で、工具姿勢を変化させ、平面を加工する。一定加工距離ごとに刃先をマイクロスコープで撮影し、姿勢変化の有無、姿勢変化条件による磨耗幅とその推移を比較する。⁽⁴⁾

3.3 平面加工実験

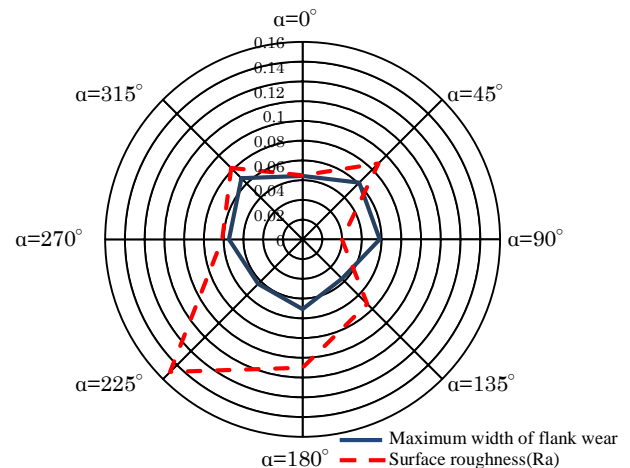
表1は、加工実験の加工条件を示す。本実験では金型加工の仕上げ加工を想定し、被削材としてSKD61材を使用した。姿勢変化の有無による磨耗推移の差異を検証する。⁽⁵⁾⁽⁶⁾

Table 1 Machining condition

Tool : cemented carbide, AlCrN coating, $\phi 10$, 2tooth	
Workpiece : SKD61	Dry cutting
Spindle revolution : 10000 min ⁻¹	Feed : 1000 mm/min
Pickfeed : 0.5 mm	Depth of cut : 0.5 mm
Angle : Angle(α)= $(15 \sim 45^\circ, 30^\circ)$, Angle(β)= $(0 \sim 315^\circ)$	
Pace of β : 0 °/mm, 0.25 °/mm, 0.5 °/mm	

図3は、15mの加工長さを終えたときの姿勢変化条件ごとの最大逃げ面磨耗幅量の推移と表面粗さの比較である。姿勢変化を行うことですべての傾斜方向で磨耗が抑制されていることがわかる。また、 $\alpha=90^\circ$ においてはどの傾斜変化率の加工でも逃げ面磨耗粗さが小さく表面精度が良いことがわかる。傾斜変化率による粗さと表面粗さ $\alpha=90^\circ$ では傾斜変化率 $\beta=0.5^\circ/\text{mm}$ が30m加工した時点では表面粗さと最大逃げ面磨耗幅は小さいが、45m加工時点では傾斜変化率 $\beta=0.25^\circ/\text{mm}$ が姿勢変化を与えた中では小さい。

以上より、 $\beta=90^\circ$ 方向へ姿勢変化を行うのが良く、傾斜変化率 $\beta=0.25^\circ/\text{mm}$ が最適であると言える。次に、実際に選定した姿勢変化で形状加工を行う。



(a) In case of $\beta = 0^\circ/\text{mm}$

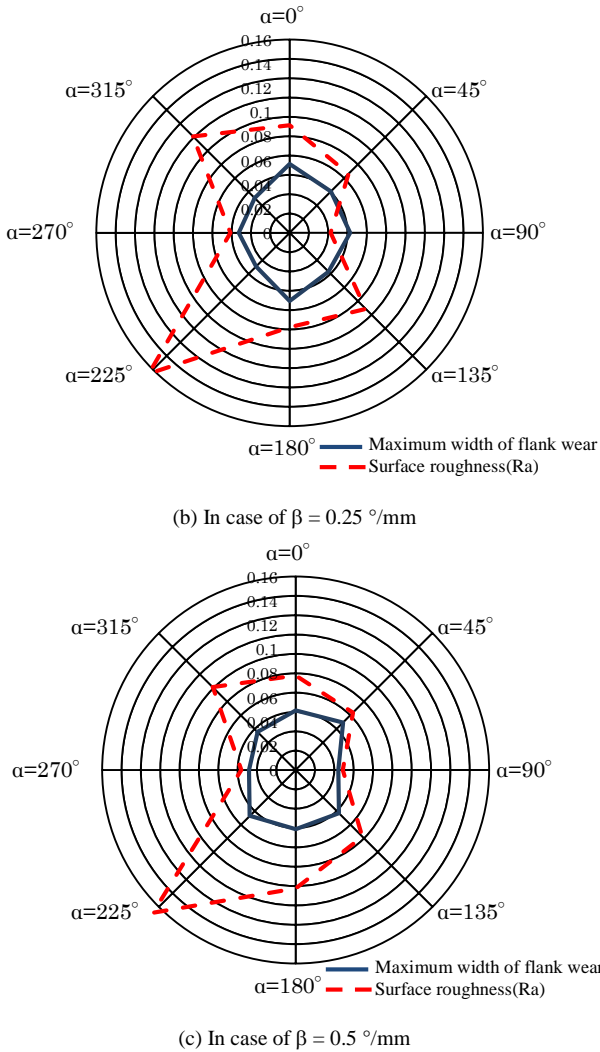


Fig.3 Maximum width of flank wear and comparison of surface roughness(Ra) (Machining the length of 15m)

4. 工具姿勢変化の形状加工への適応

4.1 工具姿勢変化

3次元CAD(solidworks)を用いて定義した形状に対して、工具姿勢変化を適用したNCデータを作成する。まず、形状データに対し、任意の面を選択し、図4のように一定間隔ごとに分割することでその線を工具経路とする。次に工具経路点において加工面に対する法線ベクトルと、加工経路となる交線と重なる方向の接線ベクトルを計算する。このとき、法線ベクトルを接線ベクトルまわりに工具傾斜角分回転させると、送り方向に対して直交方向に工具を傾斜した場合の工具姿勢ベクトルを得ることができる。また、接線ベクトルを法線ベクトルまわりに回転させ、これを軸に法線ベクトルを回転させることで工具傾斜方向を指定することができる。これを全ての分割点で傾斜角を変えながら計算することで、姿勢変化を適用した工具経路を作成できる⁹⁾

この方法で工具傾斜を付与した工具経路を作成し、実際に実証実験を行う。加工後の被削材表面粗さと工具の最大逃げ面磨耗粗さを測定する。

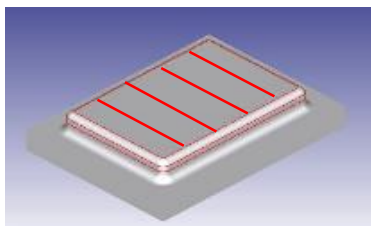


Fig.4 Target shape

4.2 金型コア形状を対象とした実証実験

表2は、実証実験の加工条件を示す。実証実験では金型コア形状の仕上げ加工を想定し、被削材としてSKD61材を使用した。姿勢変化の有無による磨耗推移の差異を検証する。

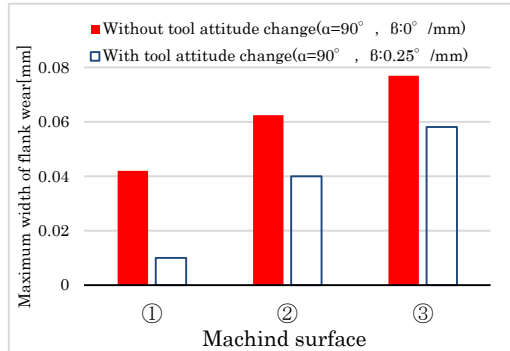
Table 2 Machining condition

Tool : cemented carbide, AlCrN coating, $\phi 10$, 2tooth	
Workpiece : SKD61	Wet cutting
Spindle revolution : 3000 min^{-1}	Feed : 700 mm/min
Pickfeed : 0.5 mm	Depth of cut : 0.5 mm
Angle : Angle(α)= (90°) , Angle (β)= $(15 \sim 45^\circ, 30^\circ)$	
Pace of β : $0^\circ/\text{mm}$, $0.25^\circ/\text{mm}$	

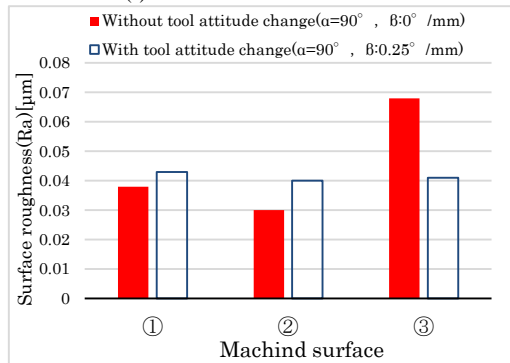
図5は、工具姿勢変化を与えて加工したものと、工具姿勢変化を与えずに加工したときの加工面(①下面, 側面, 上面)ごと逃げ面磨耗幅を測定した箇所を示す。また、加工は①～③の順に行っている。図6は、加工面ごとに測定した算術平均表面粗さを比較したものである。



Fig.5 Machining surface



(a) Maximum width of flank wear



(b) Surface roughness (Ra)

Fig.6 Experimental result

5. 結言

工具姿勢を動かすことによって磨耗が分散され、最大磨耗幅が抑制されることが確認できた。また曲面を含む簡易な形状に対して、工具姿勢変化を適用したNCデータを作成し、実際に加工することができた。

本研究を進めるにあたりご協力をいただいたDMG森精機株式会社、オーエスジー株式会社に深く感謝します。

参考文献

- (1)西田晋, 小川圭二, 中川平三郎, 垣野義昭, 須藤勝藏: ダイス鋼SKD11を加工した時のボールエンドミルの損傷と寿命に関する研究, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 163-164
- (2)岩部洋育, 遠藤尚, 中元一雄: 小径ボールエンドミルによる高硬度材の高速加工における工具寿命-加工方法と工具材種の影響-先端加工, 第Vol.25, No.1 (2007) 26-31
- (3)山田誠, 田中文基, 近藤司, 岸浪建史: 5軸NC工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究-ボールエンドミル傾斜加工における切削力解析による工具姿勢評価-精密工学会誌 Vol.70, No.1 (2004) 65-69
- (4)香山仁, 近藤司, 金子俊一, 五十嵐悟: ボールエンドミルの磨耗推定と高精度曲面加工への応用, 精密工学会誌 Vol.67, No.9 (2001) 1427-1431
- (5)是田規之, 江川庸夫, 黒田基文, 渡部健, 伊井良治: ボールエンドミル加工における表面粗さの生成過程の解析, 精密工学会誌 Vol.59, No.9 (1993) 1537-1542
- (6)藤田剛, 岩部洋育: 三次元CADを活用したボールエンドミルによる傾斜面の直線加工における切削性能評価に関する研究(送り方向が切削機構に及ぼす影響), 日本機械学会論文集 Vol.80, No.810 (2014) 1-13
- (7)竹内芳美: 多軸・複合加工用CAM, 日刊工業新聞社 (2013)