

ボールエンドミルによる加工面品位の検討

横田 知宏(情報・生産技術部 試作加工グループ)

1. はじめに

5軸加工の特長の一つに、3軸加工と比べ加工品質を向上させることができる点が挙げられる。ボールエンドミルによる平面加工を行う場合、3軸制御マシニングセンタではボールエンドミルの中心付近の切れ刃を使って加工することになる。中心付近では切れ刃の周速がゼロに近いため、材料を押しつぶすような加工となり良好な面品位を得られない。一方5軸制御マシニングセンタでは、工具を傾斜させることによってボールエンドミルの外径に近い部分の切れ刃で加工することができる。このことにより高い周速を持った切れ刃で材料を切削することができ、良好な面品位を得ることができる。

5軸制御マシニングセンタでは、テーブル傾斜軸（A軸またはB軸）とテーブル回転軸（C軸）の組み合わせにより、工具をあらゆる角度に傾斜させることが可能である。本研究では、ボールエンドミルの傾斜角を変えて平面加工を行い、工具傾斜角が加工面品位に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

被削材 A5052 に対し、直径 6 mm（R3 mm）2 枚刃のボールエンドミルにより平面加工を行った。切削条件は、主軸回転速度 $13,262 \text{ min}^{-1}$ 、送り速度 $1,326 \text{ mm/min}$ 、切込み（ap）0.3 mm 及び 0.05 mm、ピッチ（p）0.35 mm 及び 0.15 mm の一方向走査線加工とした。工具の傾斜角と送り方向の模式図を図 1 に示す。リード角（工具送り方向への傾斜角）を -60° から $+60^\circ$ まで 11 段階に、チルト角（工具送り方向に直角な方向への傾斜角）を 0° から $+60^\circ$ まで 5 段階に

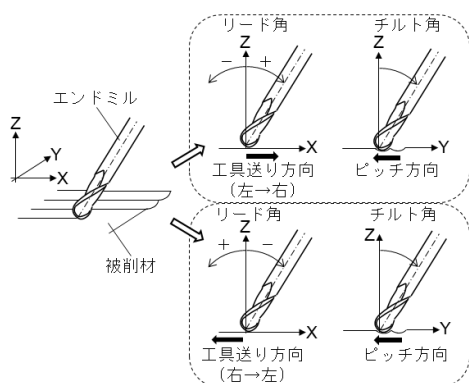


図1 工具傾斜角及び工具送り方向の模式図

表1 傾斜角の設定値

設定角度 (°)	
リード角	-60, -35, -20, -10, -5, 0, +5, +10, +20, +35, +60
チルト角	0, +15, +30, +45, +60

変化させ、工具送り方向を左→右、右→左の2通りとして、それぞれの組み合わせを実施した。具体的な傾斜角の設定値を表1に示す。

3. 実験結果

切込み 0.3 mm、ピッチ 0.35 mm、リード角 0° で加工した面の写真を図2に、ピッチとリード角は同じで切込みを 0.05 mm として加工した面の写真を図3に示す。切込み 0.3 mm の場合、チルト角 0° では工具の送り方向によらず白濁した加工面となった。またチルト角 15° 、左→右送りの場合には、不規則な傷が生じた。その他はほぼ傷が発生せず光沢のある加工面であった。一方切込み 0.05 mm では、チルト角 15° 、左→右送りの場合でも光沢のある加工面となった。他の条件の加工面は切込み 0.3 mm の場合と大きな差はなかった。

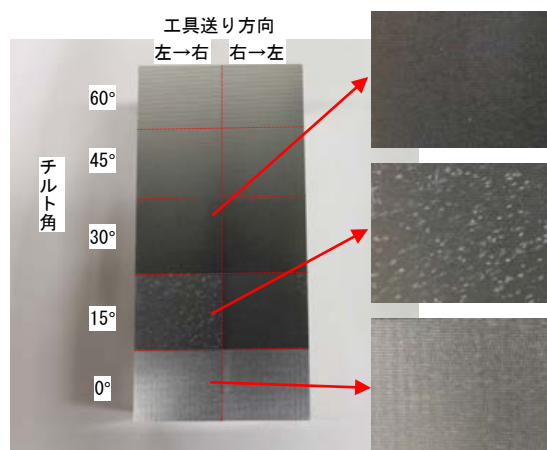


図2 加工面（ap0.3mm, p0.35mm, リード角 0° ）

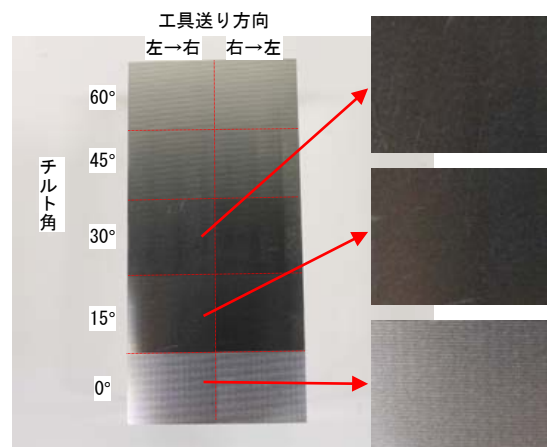


図3 加工面（ap0.05mm, p0.35mm, リード角 0° ）

図4に、切込み0.3mm、ピッチ0.35mm、チルト角15°で加工した面の写真を示す。リード角-5°と-10°の場合に工具送り方向によらず不規則な傷が発生した。特に-10°の場合は著しく荒れた加工面となった。写真の掲載は省略するが、チルト角30°以上の条件では、いずれのリード角の場合でも傷はほとんど発生せず光沢のある加工面となった。

図2に示した切込み0.3mm、ピッチ0.35mm、リード角0°の加工面のピッチ方向に測定した面粗さRzを図5に、切込みとリード角は同じでピッチを0.15mmとした加工面のRzを図6に示す。いずれのピッチ条件でもチルト角0°でRzが最も小さく、次いでチルト角30°となった。それ以外の条件では、ピッチ0.35mmの場合いずれもほぼ同等、ピッチ0.15mmの場合チルト角15°が最も大きくなった。いずれの条件も工具送り方向の差はほとんどなかった。

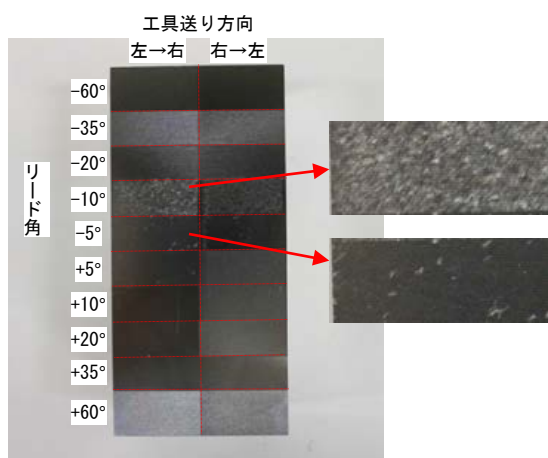


図4 加工面 (ap0.3mm, p0.35mm, チルト角15°)

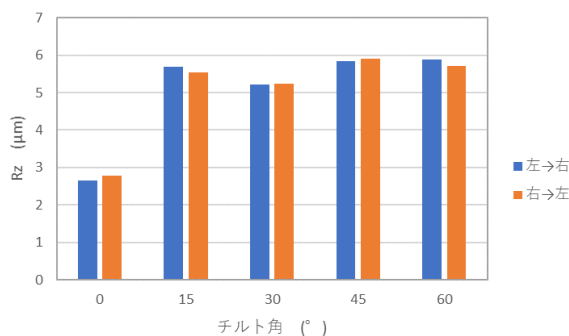


図5 加工面粗さ (ap0.3mm, p0.35mm, リード角0°)

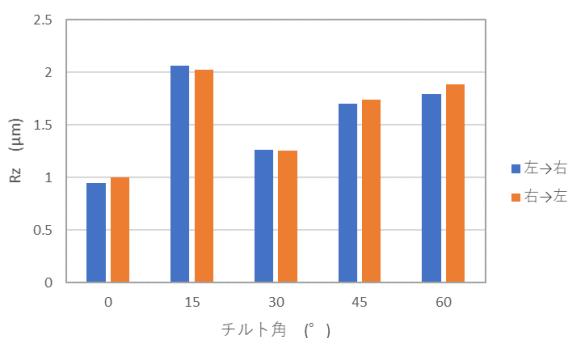


図6 加工面粗さ (ap0.3mm, p0.15mm, リード角0°)

4. 考察

4.1 加工面への傷の発生

加工面に傷が発生する条件について考察する。ボールエンドミルで被削材を切削する際の工具傾斜角と切込みの関係を図7に示す。切込み0.3mmの場合、傾斜角15°では工具中心が被削材に切り込んだ状態で切削するが、30°以上では工具中心が被削材に接触せずに切削することがわかる。一方切込み0.05mmの場合、傾斜角15°でも工具中心は被削材に接触しなくなる。今回加工面に傷が発生したのは、切込み0.3mm、チルト角15°でリード角0°、-5°、-10°の場合であった(図2、図4)。これらはいずれも工具中心が被削材に切り込んだ状態で切削する条件である。また、リード角0°、チルト角15°でも切込みを0.05mmにした条件では傷は発生しなかった(図3)。以上から、工具を傾斜させて加工する際に工具中心が被削材に切り込んだ状態のとき、加工面に傷が発生すると考えられる。このことから、良好な加工面品位を得るためには、工具傾斜角と切込みの関係を考慮し、工具中心が切削に関与しないようにする必要があることがわかった。

工具のボール半径を R 、切込みを ap 、工具傾斜角を θ とすると、工具中心がちょうど被削材に接触するときの ap と θ の関係は次式で表される。

$$\theta = \cos^{-1}(1 - ap / R) \quad ①$$

この関係式で導かれる曲線を図8に示す。図にはボール半径 R が1、3、5mmの場合を示した。それぞれの曲線が加工面への傷発生有無の境界線である。つまり、曲線より上の領域で工具傾斜角を設定すれば、傷の発生なく良好な加工面を得ることができる。この図は、ツールパス作成時に工具傾斜角を決定するための目安として活用できる。

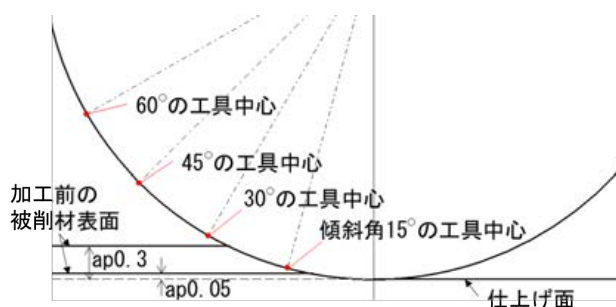


図7 工具傾斜角と切込み、工具中心位置の関係

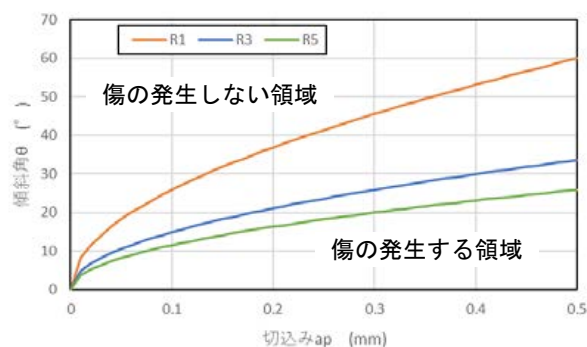
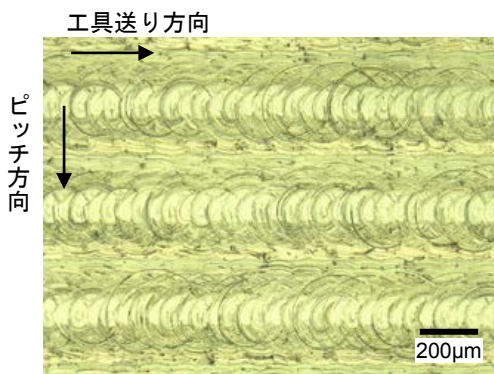


図8 加工面への傷発生有無の境界線

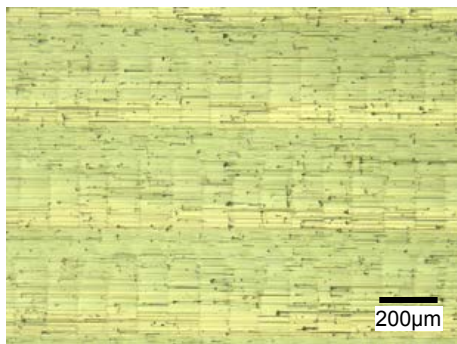
4. 2 加工面の光沢と加工面粗さの関係

加工面の光沢と加工面粗さの関係について考察する。

リード角 0° としてチルト角のみ変化させたとき、チルト角 0° では白濁した加工面となったが、チルト角 30° 以上では光沢のある加工面となった (図 2)。チルト角 15° では 4.1 の通り加工面に傷が発生したためここでの考察から除外する。チルト角 0° 及び 30° の加工面のマイクロ스코プ観察像を図 9 に示す。チルト角 0° の場合は工具中心が通過した部分の材料が押しつぶされたような跡となっており、工具中心通過部とその間で異なる加工面の状態となっている。一方チルト角 30° の場合は規則的な凹凸模様が広がっている。この違いが光の反射に影響し、白濁した加工面と



(a) チルト角 0°



(b) チルト角 30°

図 9 加工面の観察像 (ap0.3mm, p0.35mm, リード角 0°)



(a) チルト角 0°



(b) チルト角 30°

図 10 加工面の粗さ曲線 (ap0.3mm, p0.35mm, リード角 0°)

なったか光沢のある加工面となったかの差である。加工面の見た目の品位を評価する場合、一般的には光沢のある面のほうが良好と判断されると考えられる。その意味では、チルト角 30° 以上の加工面が良好と考えることができる。

一方加工面粗さはピッチ 0.35 mm、0.15 mm ともチルト角 0° の場合が最も小さい値となった (図 5、図 6)。ピッチ 0.35 mm の理論面粗さは $5 \mu\text{m}$ 、ピッチ 0.15 mm の理論面粗さは $1 \mu\text{m}$ である。すなわちチルト角 0° の面粗さは、ピッチ 0.35 mm で理論粗さを大きく下回っており、ピッチ 0.15 mm でもほぼ理論粗さに近い値となっているということである。図 10 に、ピッチ 0.35 mm でチルト角 0° 及び 30° の加工面の粗さ曲線を示す。チルト角 0° では谷の中央付近がほぼ平坦になっているが、チルト角 30° では谷の中央付近が最も凹んだ形状となっている。これは、チルト角 0° の場合に工具中心付近でボールエンドミルの R 形状通りの切削ができていなかったことを示している。すなわち、工具中心付近の削り残しがあったためにピッチ間の段差が小さくなり、面粗さが小さくなったと考えられる。

チルト角 15° 以上の面粗さについては、ピッチ 0.15 mm の条件で差が顕著になっている。チルト角 15° で面粗さが大きいのは 3.1 で考察した加工面の傷発生の影響である。一方チルト角 30° 以上では、チルト角が小さいほど面粗さが小さい傾向が認められる。この理由に関しては考察が十分にできていないため今後の課題であるが、傷が発生しない傾斜角、すなわち工具中心が切削に関与しない傾斜角の範囲では、傾斜角が小さいほど面粗さは小さくなるのではないかと考えられる。

1 章で述べた通り、3 軸制御マシニングセンタによるボールエンドミルの平面加工 (リード角、チルト角とも 0°) では良好な面品位を得られないことは既知であったが、面粗さの点では、リード角、チルト角とも 0° のほうが、工具を傾斜させるより小さくなることが明らかになった。加工面粗さを重視するか、見た目の面品位を重視するかで加工方法を変える必要があることがわかった。

5. まとめ

本研究では、5 軸加工の特長である工具傾斜と加工面品位の関係を検証した。その結果、以下の結論を得た。

- 1) 工具を傾斜させて加工する際、工具中心が被削材に切り込んだ状態のとき加工面に傷が発生した。良好な加工面品位を得るためには、工具傾斜角と切込みの関係を考慮する必要があることがわかった。
- 2) 工具を傾斜させない加工では白濁した加工面となったが、工具を傾斜させた場合光沢のある加工面となった。一方加工面粗さは工具を傾斜させないほうが小さくなることが明らかになった。加工面粗さを重視するか、見た目の面品位を重視するかで加工方法を変える必要があることがわかった。

今後は、工具寿命の観点から工具傾斜角の最適値を検証し、総合的に良好な切削特性を得られる加工条件を明確化させたい。