

機械加工における5軸加工条件の最適化

南 晃*

Optimization of Five Axis Milling Condition in Machining

Akira MINAMI

現在のNC加工では3つの直線軸（X・Y・Z軸）の動作を制御する3軸加工が主流であるが、近年の高精度で複雑な加工への要求に対応するための加工法の1つとして、5軸加工が注目されている。

本研究では、切削工具と加工面との傾斜角であるリード角・チルト角に着目し、軟質材料を対象に5軸加工における最適な加工条件について検討を行った。ボールエンドミルによる水平面の切削において、リード角を ± 10 度以上、チルト角を $+10$ 度以上与えることで、3軸加工に比べ加工面の表面粗さの大幅な改善が可能となった。

Keyword : マシニングセンタ, 5軸加工, NC, 表面粗さ

1. 緒言

マシニングセンタにおける5軸加工とは、3つの直線軸と2つの回転軸で切削工具と被削材の相対的な位置や姿勢を制御する切削加工である。3軸加工に2つの回転軸を追加することで切削工具と被削材の傾斜角を任意に変えることが可能となり、従来では段取り替えが必要であったり、加工不能であった複雑な形状でも加工可能となった。

本研究では、切削工具と加工面との傾斜角に着目し、5軸加工における最適な加工条件について検討を行った。

2. マシニングセンタにおける切削加工

2.1 マシニングセンタの概要

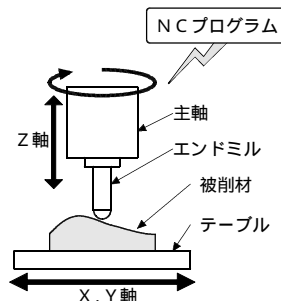
図1にマシニングセンタにおける加工の概要を示す。

主軸に取り付けられた切削工具であるエンドミルが回転し、テーブル上に固定された被削材を切削する。

数値制御情報であるNCデータでテーブルの座標位置、移動速度、主軸回転速度などを制御しながら切削工具で、所定の形状に切削加工を行う。



(a) マシニングセンタ外観



(b) 加工の概要

図1 マシニングセンタにおける加工の概要

2.2 3軸加工について

3軸加工は3つ直線軸を同時に制御する加工法で、複雑な立体形状を加工することが可能である。

しかし、3軸加工では図2に示すようなオーバーハング形状や傾斜穴など加工できる形状に制限があり、加工可能な姿勢に固定し直すための段取り替え工程が必要である。このため、工程時間の増加、被削材の再固定による精度低下などの不具合が発生している。

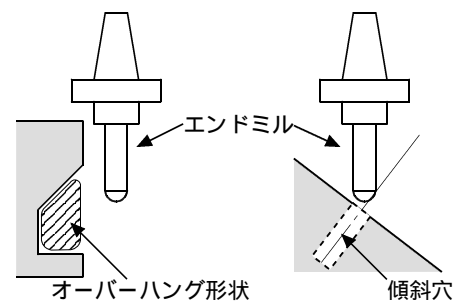


図2 オーバーハングおよび傾斜穴

2.3 5軸加工について

従来の3軸加工では制御軸数は3つの直線軸だけであったが、5軸加工では3つの直線軸と2つの回転軸を同時に制御する。図3に5軸加工における制御軸の概要を示す。

一般的に5軸加工の回転軸はX軸回りを回転するA軸とZ軸回りを回転するC軸を使用する。5軸加工を行うマシニングセンタは、エンドミルを取り付ける主軸ヘッドが回転する形式と、被削材を固定するテーブルが回転する形式の2種類がある。

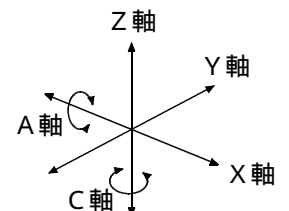
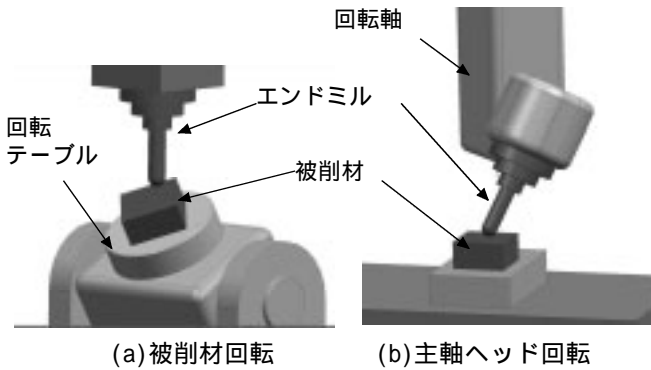


図3 5軸加工の制御軸

* 機械技術部

5軸加工機の形式を図4に示す。構造は異なるが、エンドミルと被削材の相対的な傾斜角を任意に変えることができる点では同じであり、従来の3軸加工ではできなかったオーバーハング形状等の加工が行えることが特徴である。



(a)被削材回転 (b)主軸ヘッド回転

図4 5軸加工機の形式

2.4 エンドミル加工における切削加工条件

2.4.1 エンドミル

エンドミルはその用途に応じて、図5(a)のように先端形状が平坦なフラットエンドミルや(b)のように球状となったボールエンドミルなどがある。

フラットエンドミルは、水平面や垂直面を切削するのに用いられ、切れ刃は最外径に構成されている。一方、ボールエンドミルは先端が球状で、曲面を加工するのに用いられ、切削対象により変化する。



(a)フラットエンドミル (b)ボールエンドミル

図5 エンドミルの外観

2.4.2 切削速度

エンドミルによる切削加工条件で重要なものの1つに切削速度がある。図6に示すように切削速度はエンドミルの切削点における接線速度を示し、(1)式で表される。

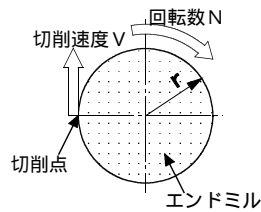


図6 切削速度

$$\text{切削速度 } V \text{ (m/min)} = \frac{\pi \times 2 \times r \times N}{10^3} \dots (1)$$

r : 切削半径 (mm)

N : 回転数 (rpm)

: 円周率

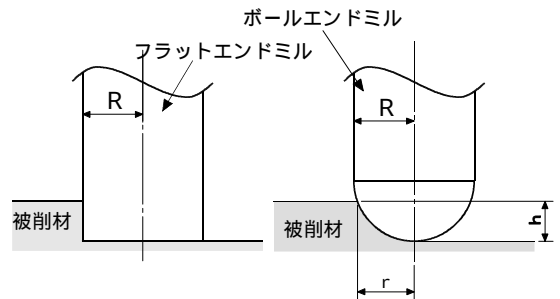
図7に示すように、フラットエンドミルの場合、工具の回転中心と切刃の距離である切削半径は、常に工具直径と等しい。一方、ボールエンドミルの場合は先端が球状であり、鉛直方向の切り込み量が変化すると切削半径も変化する。ボールエンドミルにおける切削半径は(2)式で求められる。

$$\text{切削半径 } r \text{ (mm)} = \sqrt{h \times (2 \times R - h)} \dots (2)$$

h : 鉛直方向の切込み量 (mm)

R : 工具半径 (mm)

(1)式および(2)式より、ボールエンドミル加工では、先端付近における切削半径および切削速度は極めて小さくなり、ボールエンドミルによる切込み量の小さい加工では十分な切削速度が得られず、良好な切削加工ができない。

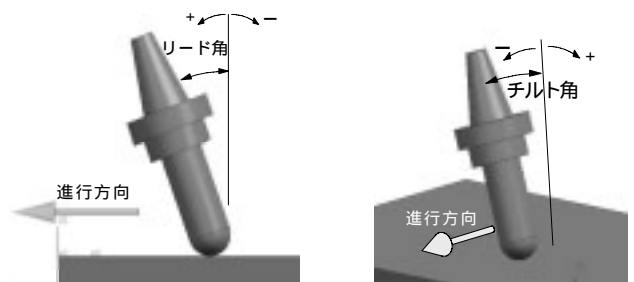


(a)フラットエンドミル (b)ボールエンドミル

図7 エンドミルにおける切削半径

2.5 リード角とチルト角

5軸加工では、エンドミルと加工面の傾斜角を任意に変化させることができる。図8に5軸加工におけるエンドミルの傾斜角を示す。エンドミル進行方向の傾斜角をリード角、これに直角な方向の傾斜角をチルト角と言う。



(a) リード角

(b) チルト角

図8 5軸加工におけるエンドミルの傾斜角

リード角とチルト角を合成した切削工具の傾斜角は(3)式で求められる。

この傾斜角が変化すると、図9に示すように切削点が変わるため、切削半径および切削速度は変化し、それぞれ(4)式および(5)式で求められる。

切削工具の傾斜角

$$(\text{度}) = \tan^{-1} \sqrt{(\tan^2 \alpha_1 + \tan^2 \alpha_2)} \dots (3)$$

- α₁: リード角 (度)
- α₂: チルト角 (度)

切削半径

$$r (\text{mm}) = R \times \sin \theta \dots (4)$$

R: 工具半径 (mm)

切削点における切削速度

$$V' (\text{m/min}) = V \times \sin \theta \dots (5)$$

V: 工具外周の切削速度 (m/s)

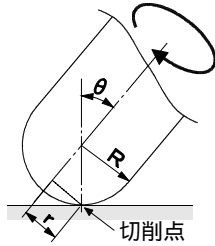


図9 切削点の変化

ボールエンドミルは工具先端付近では十分な切削速度が得られず、良好な加工が行えない。外周に近くなると切削半径・切削速度が大きくなり、良好な切削が可能となる。傾斜角は3軸加工では変

えられないが、5軸加工では任意に変えられる。本研究ではリード角とチルト角に着目し、これらを適切に設定することで加工面の表面粗さを改善する切削加工条件を最適化するため、切削加工実験を行った。

3. 実験方法

3.1 実験の概要

リード角およびチルト角を変化させたときの表面粗さの変化、加工ピッチを変化させたときの理論表面粗さとの対比、切削長を変化させたときの表面粗さの変化について実験を行った。

3.1.1 被削材

30mm角のアルミニウムA5052の表面をボールエンドミルで平面加工し、加工方向に対して直角方向に表面粗さを測定した。

3.1.2 使用した機器および工具

実験に供した機器および工具の仕様を表1に示す。

表1 機器および工具の仕様

| | | |
|------|--------|---------------------------|
| 実験機器 | 型式 | マシニングセンタ VT3A (株)三井精機) |
| | 制御軸数 | 同時5軸 |
| | 主軸回転数 | 450rpm ~ 40,000rpm |
| | 最高送り速度 | 25m/min |
| 切削工具 | 形状 | ボールエンドミル EBD (OSG (株)) |
| | 直径 | 10mm |
| | 刃数 | 2枚 |
| | 材質 | ハイス (ノンコート) |

3.1.3 表面粗さ測定条件

表面粗さ測定は1条件に対して場所を変えて3回測定し、その平均を測定値とした。表2に表面粗さの測定条件を示す。

表2 表面粗さ測定条件

| | |
|-------|---------------------|
| 測定機器 | サーフェスト701 ((株)ミットヨ) |
| 測定速度 | 1.0mm/s |
| 基準長さ | 0.8mm |
| 区間数 | 5区間 |
| 助走/後走 | 基準長さの50% |

3.2 実験条件

3.2.1 リード角およびチルト角変化

リード角およびチルト角を変化させた実験条件を表3に示す¹⁾。リード角およびチルト角を-40度~40度の範囲で10度ずつ変化させて切削加工を行った。

表3 リード角およびチルト角を変化させた実験条件

| | | |
|--------|--|-------------------------|
| 切削条件 | 切削速度 | 100m/min (3200rpm) |
| | 送り量 | 0.05mm/刃 (640mm/min) |
| | 切込み | 0.4mm (軸方向) 0.5mm (径方向) |
| | 切削油 | なし |
| | 切削方向 | ダウンカット |
| 工具突出し量 | 50mm, 70mm | |
| リード角 | -40度 ~ 40度 | |
| チルト角 | -40度 ~ 40度 | |
| 測定項目 | R _a (算術平均粗さ), R _y (最大高さ) | |

3.2.2 加工ピッチ変化

びびりや変形などが発生せず、ボールエンドミルの形状が完全に加工面に転写される理想的な加工が行われたときの加工面の表面粗さは(6)式で表される²⁾。

$$\text{表面粗さ} (\mu\text{m}) = \frac{P t^2}{8 \times R} \times 10^3 \dots (6)$$

P t: 加工ピッチ (mm)

R : 工具半径 (mm)

加工ピッチは図10に示すように、加工した溝間の距離を表す。表面粗さは加工ピッチの二乗に比例し、加工ピッチが小さいほど表面粗さは小さくなる。

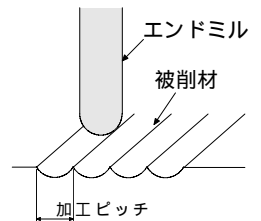


図10 加工ピッチ

実際の加工では、びびりやエンドミルの変形、形状誤差などのさまざまな要因により、(6)式で求められる値より大きくなる傾向にあるが、この値に近いほど良好な切削と言える。

加工ピッチを変化させて3軸加工と5軸加工の表面粗さRyの変化を測定した。加工ピッチ変化時の実の条件を表4に示す。

表4 加工ピッチ変化時の実験条件

| | | 3軸加工 | 5軸加工 |
|--------|-----------|-----------------------------------|------|
| 切削条件 | 切削速度 | 100m/min (3200rpm) | |
| | 送り量 | 0.05mm/刃 (640mm/min) | |
| | 切込み | 0.4mm (軸方向) 0.05mm~0.8mm (径方向) | |
| | 切削油 | なし | |
| | 切削方向 | ダウンカット | |
| 工具突出し量 | 70mm | | |
| リード角 | 0度 | 20度 | |
| チルト角 | 0度 | 20度 | |
| 測定項目 | Ry (最大高さ) | | |

3.2.3. 切削長変化

ボールエンドミルで被削材を切削するとき、切削長が長くなると切刃は摩耗する。このために、良好な加工が行えなくなり、表面粗さは粗くなる。

一定の切削長ごとに加工面の表面粗さを測定し、3軸加工と5軸加工における切削長の変化にともなう表面粗さの変化を測定した。切削長変化時の実験条件を表5に示す。

表5 切削長変化時の実験条件

| | | 3軸加工 | 5軸加工 |
|--------|-----------|----------------------|-------------|
| 切削条件 | 切削速度 | 100m/min (3200rpm) | |
| | 送り量 | 0.05mm/刃 (640mm/min) | |
| | 切込み | 0.4mm (軸方向) | 0.5mm (径方向) |
| | 切削油 | なし | |
| | 切削方向 | ダウンカット | |
| 工具突出し量 | 70mm | | |
| リード角 | 0度 | 20度 | |
| チルト角 | 0度 | 20度 | |
| 測定項目 | Ry (最大高さ) | | |

4. 結果および考察

4.1 表面変化に及ぼすリード角・チルト角の影響

リード角を変化させた実験結果を図11, 12に、チルト角を変化させた実験結果を図13, 14に示す。

リード角およびチルト角0度の状態が3軸加工である。このとき、表面粗さRyは10~23μm程度であった。

リード角を変化させた場合、10度付近で表面粗さRyは5μm程度が得られ、10度を超えるとほとんど変化はなかった。このことはリード角が+側でも-側でもほぼ同様の結果が得られた。

チルト角を+側に变化させると、10度において表面粗さRyは5μm程度が得られた。しかし、リード角同様それ以上傾けてもあまり変化はなかった。チルト角-側ではその効果は認められず、表面粗さのばらつきも大きかった。

以上のことから、ボールエンドミルにおける平面切削における表面粗さはリード角±10度、チルト角+10度程度与えることで表面粗さを改善できることがわかった。

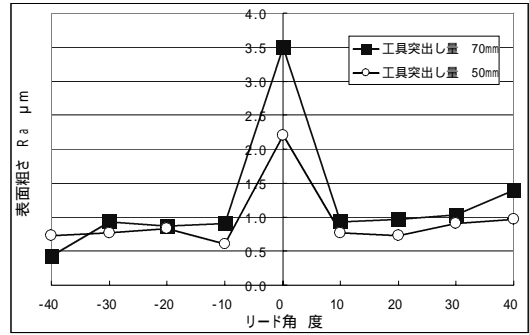


図11 リード角と表面粗さRa

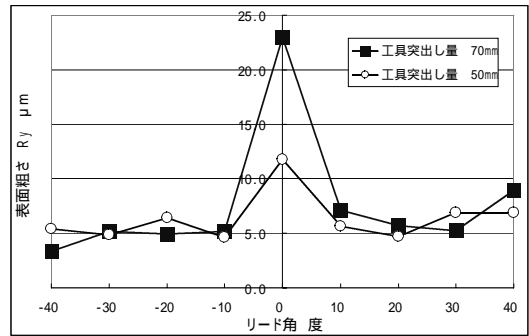


図12 リード角と表面粗さRy

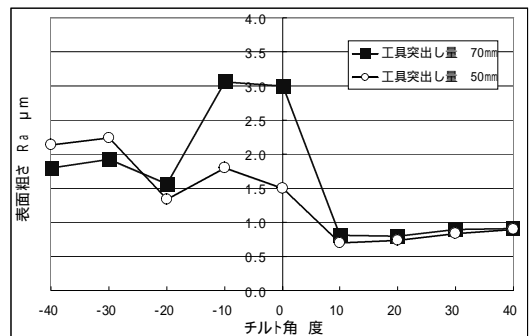


図13 チルト角と表面粗さRa

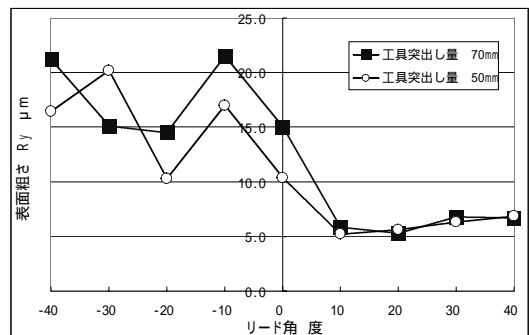


図14 チルト角と表面粗さRy

4.2 表面粗さに及ぼす加工ピッチの影響

加工ピッチを変化させた実験結果を図15に示す。3軸加工において、加工ピッチを0.8mm~0.05mmと変化させても表面粗さRyは12μm~10μm程度とあまり改善されなかった。これに対して、リード角およびチルト角を各々20度与える5軸加工では、表面粗さRyは10μm~2μm程度と大幅に改善できることがわかった。

また、(6)式で求められる理論的な値との比較においても、リード角およびチルト角を与えることで、これに近い表面粗さを得ることができた。

加工ピッチ0.8mmにおける表面粗さRyは、3軸加工で12μm、5軸加工で10μmとあまり変わらないが、加工ピッチを0.4mmで11μm、4.5μm、加工ピッチ0.1mmで10μm、2μmと加工ピッチが小さくなるほどその差は大きくなる。リード角およびチルト角を与えることによる表面粗さ改善の効果は、加工ピッチが小さくなる方がより顕著に現れることがわかった。

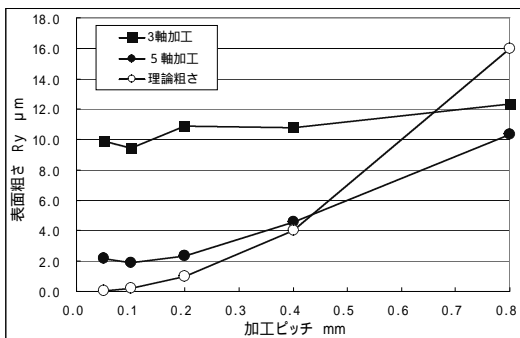


図15 加工ピッチと表面粗さRy

4.3 表面粗さに及ぼす切削長の影響

切削長を変化させた実験結果を図16に示す。3軸加工では切削開始時において表面粗さRyは10μm程度であったが、切削長100mでは20μm程度と約2倍となった。これに対してリード角、チルト角を各々20度与える5軸加工では、切削開始時に5μm程度であった表面粗さは切削長100mでもほとんど変わらなかった。

また、切削を続けていく過程において3軸加工では表面粗さのばらつきが大きく不安定なのに対して、5軸加工ではばらつきが小さく安定していた。これは、傾斜角を付けることで適正な切削速度を確保し、エンドミルの切刃に過度な負担をかけないで切削を行うことが可能となったためと考えられる。

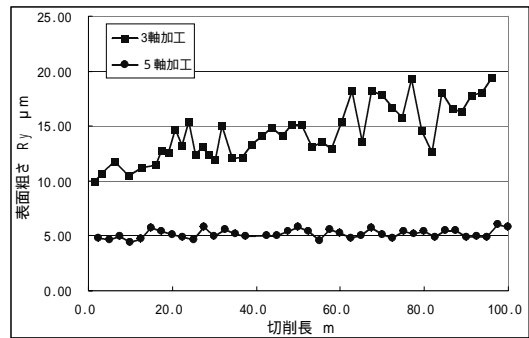


図16 切削長と表面粗さRy

5. 結言

ボールエンドミルによる平面切削において、以下のことがわかった。

- (1) ボールエンドミルと被削材にリード角およびチルト角からなる傾斜角を与えることで加工面の表面粗さを小さくすることができた。3軸加工では表面粗さRyは10~23μm程度であったが、リード角を±10度程度、チルト角+10度を程度与えることで、5μm程度の表面粗さを得ることが可能となった。
- (2) 3軸加工では加工ピッチを変化させても表面粗さはあまり変わらないが、リード角およびチルト角を与えることで加工ピッチを小さくしたときの表面粗さを小さくすることができた。加工ピッチを0.8mmから0.05mmまで変化させたとき、3軸加工では、表面粗さRyは12μmとあまり変わらなかったが、リード角およびチルト角を各々20度与えた5軸加工で加工ピッチを変化させると、表面粗さRyは10μmから2μmと大幅に小さくすることができた。
- (3) 3軸加工では、切削開始時の表面粗さRyは10μm程度だったが、切削長100mでは20μm程度と約2倍となった。これに対し、リード角およびチルト角を各々20度与えた5軸加工では、開始時と切削長100mでの表面粗さはほとんど変わらず安定した加工が可能となった。

今回の研究は比較的柔らかい材料を使用して行った。5軸加工の適応分野のひとつに金型加工があるので、今後は金型に使われるような硬質な材料の試験を行う必要がある。

参考文献

- 1) 岩本竜一ら，鹿児島県工業技術センター研究報告，10，59，(1996)
- 2) 中村健三，フライス加工ハンドブック，318，(1988)

