

# 微小径エンドミル加工における工具回転振れの形状精度への影響

豊橋技科大 ○高橋 渉, 野村 光由, 榊田 正美, 柴田 隆行, 村上 良彦, 堀内 宰

Influence of tool run-out on geometric work-errors in micro milling

Toyohashi University of Technology Wataru TAKAHASHI, Mitsuyoshi NOMURA,  
Masami MASUDA, Takayuki SHIBATA, Yoshihiko MURAKAMI, Osamu HORIUCHI

A micro end mill makes the milling process difficult, because the tools have very low stiffness and not only breakage but also machined surfaces are sensitive to the low stiffness. In the paper, the groove profile errors are discussed analytically during full-width milling or side milling. In addition, the influences of radial tool run-out upon the groove profile errors are examined experimentally using a micro end mill of 0.1mm in diameter, by monitoring high frequency cutting force. The results require significantly more severe alignment in the radial run-out, in comparison with tool feed per tooth.

## 1. 緒言

切削加工は製造業にとって最も重要な生産技術の一つであるが、製造業のグローバル化にともない、高付加価値製品を創出し得る新規な生産技術の確立や、生産コスト競争の激化による高能率切削などの要求が高まっている。そのため、 $\mu$ -TAS や自動車部品などの微小部品加工において、 $\phi 0.1\text{mm}$  の微小径工具による精密微細加工の要求が急増している。

通常径工具においても工具の回転振れは切りくず生成挙動に影響を与えるため無視できない<sup>1)</sup>。それに加え、微小径エンドミルは低剛性でありねじれ刃を有しているため、加工による切削力でのたわみが生じやすく加工側面に溝倒れが発生する。また微小径エンドミルを用いた微細加工では、工具が折損し易いため、1刃あたりの送りを小さくせざるを得ない。このため、微小な工具回転振れがあっても、形状精度に多大な影響を与えると考えられる。

本研究では、 $\phi 0.1\text{mm}$  の微小径エンドミルを用いて、種々の工具回転振れにおいて、切りくず生成挙動および加工形状精度への影響について実験検討したので、その結果について報告する。

## 2. 溝側壁倒れ形成モデル

### 2.1 アップカット時

図1を用いて、ねじれ角 $\beta$ 傾斜した切れ刃すくい面が回転し、左方向に送られるときの食いつき部における溝側壁形成を説明する。切れ刃の回転角 $\alpha$ は0のとき、溝底の点 $O_u$ から切削が開始する。回転角 $\alpha$ が増すに伴い、点 $O_u$ から上方にとった $z$ 軸と切れ刃との切片 $c$ までの高さ $a_z$ は増大していき、軸方向切り込み $a_d$ まで達する。この間、溝底( $z=0$ )における切取り厚さを $ab$ とする切れ刃すくい面との切りくず断面積 $\Delta abc$ は増大していき、切削力も増大していく。ここで、比切削抵抗 $\sigma_c$ 、分力比 $\lambda$ (=背分力 $F_n$ /主分力 $F_t$ )、1刃あたりの送り量 $s_z$ 、工具半径 $r_t$ 、工具長 $l$ として、切りくず断面積 $\Delta abc$ の微小高さ $d_z$ において生じる切削力 $\Delta F$ のうちの背分力を、 $\Delta F_n$ 、 $\Delta F_t$ による切片 $c$ での工具の弾性変形 $\Delta\delta_i$ 、ヤング率 $E$ 、断面2次モーメント $I$ とすると下記の式(1)、(2)、(3)と表せる。

$$\Delta F_n = \lambda \cdot \sigma_c \cdot (l-z/a_z) \cdot s_z \cdot \sin \alpha \cdot d_z \quad \dots (1)$$

$$\alpha = a_z / (r_t \cdot \tan \beta) \quad \dots (2)$$

$$\Delta\delta_i = (\Delta F_n / 3EI) \cdot (l-a_z) \cdot 2 \cdot (2l+a_z-3z) \quad \dots (3)$$

と求まる。この $\Delta\delta_i$ を $z$ について $0 \sim a_z$ の間で積分することで $z = a_z$ における弾性変形が求まる。

### 2.2 ダウンカット時

図2に示すダウンカット側においても、式(2)に切りくず断面積 $\Delta abc$ の高さ $z$ での微小高さ $d_z$ において生じる切削力 $\Delta F$ のうちの背分力 $\Delta F_n$ およびこの背分力による切片 $c$ での工具弾性変形 $\Delta\delta_i$ は、同様に下記の式(4)、(5)となる。

$$\Delta F_n = \lambda \cdot \sigma_c \cdot \frac{(z-a_w)}{(a_d-a_w)} \cdot s_z \cdot \sin(\theta_c - \alpha + \pi) \cdot d_z \quad \dots (4)$$

$$\Delta\delta_i = (\Delta F_n / 6EI) \cdot (l-z)^2 \cdot (2l+3a_z+z) \quad \dots (5)$$

したがって、 $\Delta\delta_i$ を $z$ について $a_w \sim a_d$ の間で積分することで $z = a_w$ における弾性変形が求まる。ここで $\theta_c$ は、 $z = a_w$ の切片 $c$ が点 $O_d$ から点 $P_d$ まで移動する間の工具回転角度 $\alpha$ で、工具半径 $r_t$ とすると $\theta_c = a_d / (r_t \cdot \tan \beta)$ で表せる。

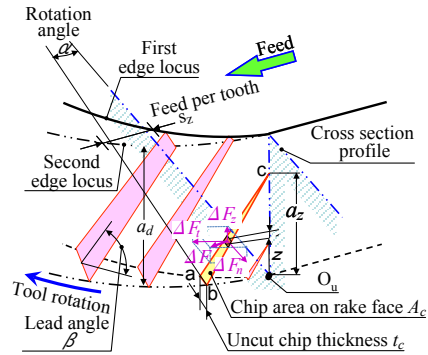


図1 アップカット時の側壁形成

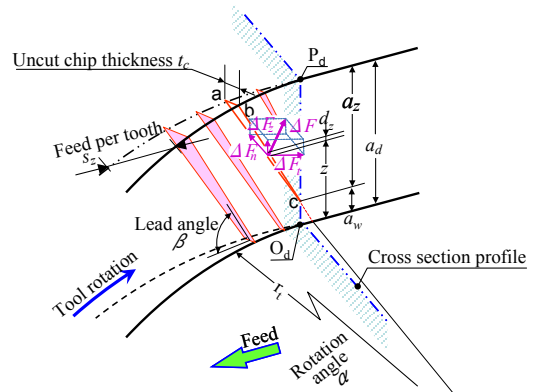


図2 ダウンカット時の側壁形成

### 2. 3 フルカット時

2 枚刃エンドミルでは、工具軸心に対して第 1 切れ刃と第 2 切れ刃は対称位置にあり、両側壁にある切片  $c$  もお互いに軸対称にある。したがって両切れ刃で同時加工されたときの両側壁上の切片  $c$  の弾性変形量は等しく、 $z=a_w$  における  $\delta_u - \delta_d$  として求まる。

### 3. 実験装置および実験方法

微小径エンドミルを用いて溝切削を行い、本研究室で製作した高帯域 3 分力動力計を用いて切削力を測定した。微小径エンドミルの工具回転振れは微細工具測定器(ユニオンツール製 OPTECH-Me/EDR-D20)を用いて測定した。実験の手順は次の通りである。焼ばめホルダをチャッキングする際、拘束面間に厚さ  $10\mu\text{m}$  前後のシムを挟むことにより工具に任意の回転振れを与える。その後、テーブル上の動力計に取り付けたワークに対し、回転数、送り速度、軸方向および半径方向切込みを設定し、切削を行った。表 1 に加工条件を示す。その後、非接触 3 次元測定装置(三鷹光機製 NH-3NT)を用いて加工したワークの形状観察を行った。

### 4. 実験結果および考察

図 3 に提案した溝側壁倒れモデルより得た結果を示す。加工条件は  $\gamma:0(1)\mu\text{mTIR}$ ,  $a_d:0.02\text{mm}$ ,  $a_r:0.05\text{mm}$ ,  $n:30000\text{min}^{-1}$ ,  $f:30\text{mm/min}$  である。図 3(a), (b) はそれぞれアップカットおよびダウンカットの結果である。結果より、両側壁は垂直ではなく倒れているのがわかる。

図 4 に送り速度による工具回転振れの溝倒れへの影響を示す。図より、送り速度の増加に伴い、側壁の溝倒れは増加する。さらに、モデルの解析結果と実験結果の値が類似していることから、提案したモデルは妥当であるといえる。一方、工具回転振れが  $0(1)\mu\text{mTIR}$  のときに比べ、溝倒れは  $10\mu\text{mTIR}$  のとき 2 倍以上大きくなる。またダウンカット時に比べ、アップカット時の溝倒れは小さい。したがって、工具回転振れおよび送り速度を小さくし、アップカットで切削を行うことにより溝倒れを抑制できる。

図 5 に溝加工における工具回転振れの溝幅への影響を示す。赤の実線および青の破線はそれぞれ工具直径および工具直径と工具回転振れの和から予想できる予想溝幅である。結果より、工具回転振れが  $6\mu\text{mTIR}$  以下のとき溝幅は工具径程度と大きな変化はないが、 $10\mu\text{mTIR}$  のとき予想溝幅を大幅に上回った。これは  $6\mu\text{mTIR}$  以下のとき工具の弾性変形により回転振れが吸収されたが、 $10\mu\text{mTIR}$  では吸収しきれなかったためである。また、送り速度の増加に伴い、溝幅は微小ではあるが減少しているのがわかる。これは送り速度の増加による切削力の増加により、工具が溝に対しより拘束されたためと考えられるが、詳細は検討中である。

表 1 加工条件

Tool diameter $\phi D$	0.1mm
Work piece	Brass (C3604)
Rotational speed $n$	$30000\text{min}^{-1}$
Axial depth of cut $a_z$	0.02 mm
Feed rate $f$	30, 60, 120 mm/min
Radial run-out $\gamma$	$0(1), 2, 4, 6, 10\mu\text{mTIR}$

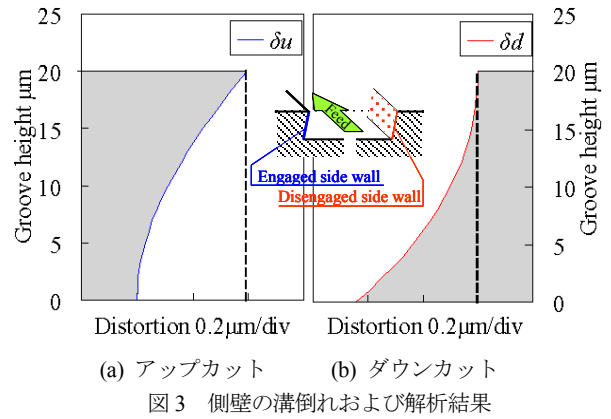


図 3 側壁の溝倒れおよび解析結果

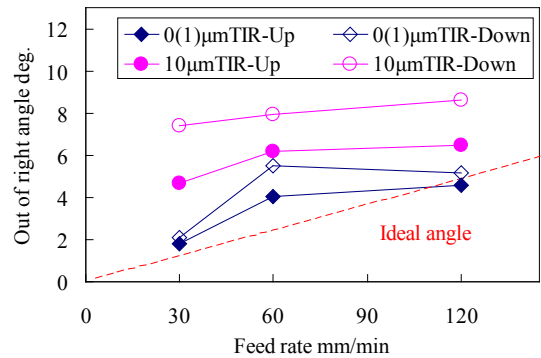


図 4 側壁溝倒れへの影響

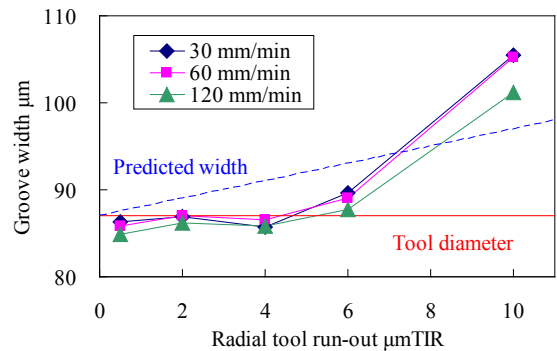


図 5 溝幅への影響

### 5. 結言

本報では  $\phi 0.1\text{mm}$  の微小径エンドミル加工において、工具の回転振れの形状精度への影響について実験検討した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 形成されか側面は垂直ではなく、溝倒れがみられた。解析計算値と実験値が同じ傾向を示していることから、提案する切削モデルの実用性を示した。
- 2) 溝倒れは工具回転振れの増加により増加した。またダウンカットに比べ、アップカットの溝倒れのほうが小さかった。
- 3) 回転振れが  $6\mu\text{mTIR}$  以下の時、溝幅に大きな変化はなかったが、 $10\mu\text{mTIR}$  の時、溝幅の大幅な増加がみられた。

以上より、微細エンドミル加工においては、工具回転振れを小さくすることが重要であるといえる。

### 参考文献

- 1) 岩部洋育：エンドミルによる加工精度に関する基本的問題と高速・高精度加工法について、2000 年度 日本機械学会論文集(C 編), p1417-1422.