

## 高アスペクト比微細深穴加工に関する研究 (第2報)

南部洋平\* 落合一裕\* 江原和樹\*\*

### Study on High-Aspect-Ratio Microdrilling (2nd Report)

NANBU Youhei\*, OCHIAI Kazuhiro\*, EHARA Kazuki\*\*

抄録

工具軸方向に低周波振動を付加する微細深穴加工において、穴加工に適した振動波形の選択、及び振動加工に適した刃先形状について検討を行った。主切れ刃逃げ角を最適化したドリルを用い、最適な振動波形の低周波振動を付加して加工を行ったところ、ステンレスSUS316Lに対して、直径0.3mm、深さ9mm(アスペクト比L/D=30)の微細深穴を工具寿命800穴以上で加工することができた。

キーワード：微細深穴ドリル、低周波振動、振動波形、逃げ角、微細加工

#### 1 はじめに

化学プラントの中の造粒装置には、多数の穴が加工された造粒プレートが用いられている。現在穴径は約0.5mmであるが、今後さらなる微細化が求められている。プレート材料のステンレスSUS316Lに対し、直径0.3mm、深さ9mm(アスペクト比L/D=30)の微細深穴を加工時間2分/穴以内で工具寿命200穴以上の加工することを目標に検討を行った。

本研究では超音波領域より低い周波数である500Hz以下の振動を工具軸方向に付加することを検討した。前年度は、正弦波振動を付加するとき、切りくず排出性向上、刃先冷却、及び切削抵抗低減を同時に実現する最適な振動条件を選択するため、切削時間比率 $R_c$ 、及び正速度時間比率 $R_p$ を評価指標として提案した<sup>1)</sup>。 $R_c$ は振動1周期中の実切削時間の比であり、 $R_p$ は実切削時間に対する振動速度が正となる時間の比である。

さらに指標のマッピングを行い、適切な周波数

比と振幅比の組み合わせを選択することで、工具の長寿命化を実現した<sup>2)</sup>。ここで周波数比とは振動周波数 $f_v$ とドリル回転周波数 $f_d$ との比 $f_v/f_d$ であり、振幅比とは軸方向の振動振幅 $A$ と1刃当りの送り $F_z$ との比 $A/F_z$ である。

本年度は、振動条件(周波数比・振幅比)だけではなく、微細深穴加工に適した振動波形や刃先形状について検討を行った。

#### 2 振動波形の検討

##### 2.1 振動波形

微細深穴加工に適した振動波形として、図1に示す波形について検討した。正弦波(a)の他に、正弦波とは異なる振動波形として(b)~(e)の波形を提案した。

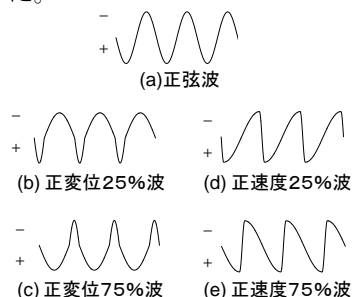


図1 振動波形

\* 技術支援室 機械技術担当

\*\* 日本ノズル精機(株)

図1(b)の正変位25%波では、変位が正となる時間が振動周期の25%となり、図1(c)の正変位75%波では、変位が正となる時間が振動周期の75%となる。図1(d)の正速度25%波では、速度が正となる時間が振動周期の25%となり、図1(e)の正速度75%波では、速度が正となる時間が振動周期の75%となる。

正弦波振動を付加したとき、ドリル刃先外周と材料の相対的な軸方向変位  $Z$  と工具回転角  $\theta$  との関係は式(1)のように表すことができる。なお、 $Z$  は工具と材料が近づく方向を正とし、 $n$  は刃数となる。

$$Z(\theta) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{f_v}{f_d} \cdot \theta\right) + \frac{F_z \cdot n}{2\pi} \theta \quad (1)$$

非正弦波振動の場合、例えば正変位25%波の振動1周期中の $Z$ は式(2)のように表すことができる。

$$\begin{cases} Z(\theta) = \frac{A}{2} \sin\left(2 \cdot \frac{f_v}{f_d} \cdot \theta\right) + \frac{F_z \cdot n}{2\pi} \theta & \left(0 \leq \frac{f_v}{f_d} \cdot \theta < \frac{\pi}{2}\right) \\ Z(\theta) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2}{3} \cdot \frac{f_v}{f_d} \cdot \theta + \frac{2}{3} \pi\right) + \frac{F_z \cdot n}{2\pi} \theta & \left(\frac{\pi}{2} \leq \frac{f_v}{f_d} \cdot \theta < 2\pi\right) \end{cases} \quad (2)$$

一例として、2枚刃のドリルを用いて工具回転数5000min<sup>-1</sup>、1刃当たりの送り1μm、周波数比1.5、振幅比8で加工を行った時の工具回転角と刃先の軸方向変位の関係を図2に示す。横軸は工具回転角、縦軸は刃先の軸方向変位を示している。塗りつぶされている部分で切削が行われる。正弦波振動ではRc=0.367、Rp=0.417となり、正変位25%波振動ではRc=0.312、Rp=0.448となる。このように、振動波形を変化させることによって切削の状態が変わることが分かる。

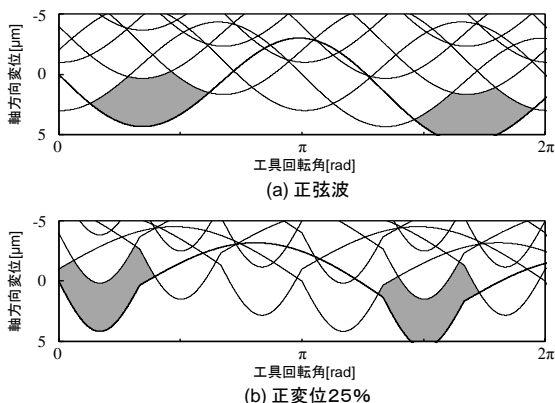


図2 ドリル刃先の軸方向変位

## 2.2 振動波形の評価

切削時間比率Rc、正速度時間比率Rpは周波数比と振幅比の組み合わせに対して1つの値に定まる。縦軸を振幅比、横軸を周波数比としたときの切削時間比率Rcを図3に、正速度時間比率Rpを図4に示す。周波数比は0~2までのパターンが繰り返されるため、0~2の範囲とした。また、振幅比は0~10の範囲とした。振幅比を0.1間隔、周波数比を0.01間隔で変化させ、それぞれの組み合わせにおいてRc及びRpを計算した。周波数比0は振動を付加しない慣用加工を示す。値は濃淡で表し、Rcの色は薄い方が小さい値となり刃先冷却効果が期待できる。Rpの色は薄い方が大きな値となり、切削抵抗低減効果が期待できる。

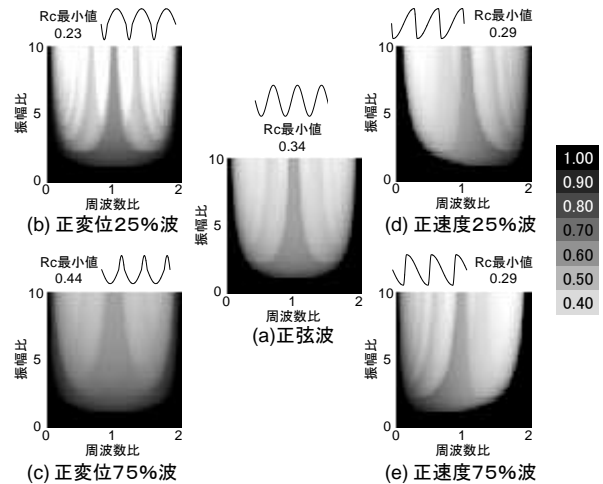


図3 切削時間比率 Rc マップ

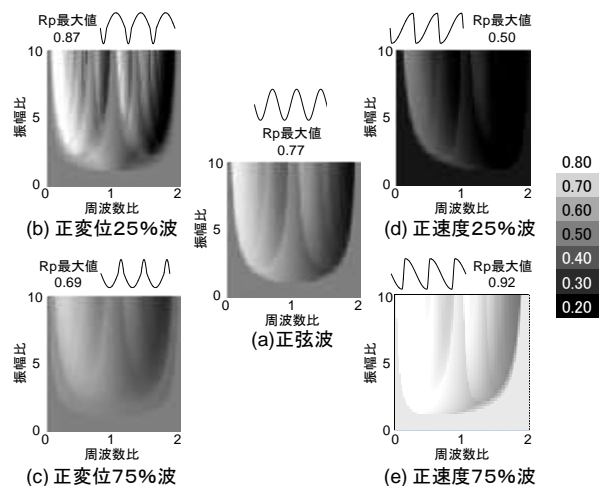


図4 正速度時間比率 Rp マップ

図3より、マップ内におけるRcの最小値が最も小さくなる正変位25%波は刃先冷却効果が最も高いと考えられる。図4より、マップ内におけるRpの最大値が最も大きくなる正速度75%波は切削抵抗低減効果が最も高いと考えられる。これらの結果から、正速度75%波、及び正変位25%波は振動付加による穴加工に適していると予想される。

### 2.3 振動波形評価の検証

振動波形を評価するため、ステンレスSUS316Lに対して直径0.3mm、深さ6mmの微細深穴加工を行った。目標加工時間は75秒/穴とした。図5に実

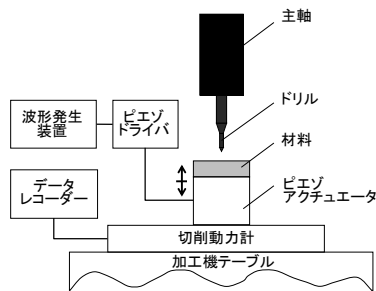


図5 実験装置

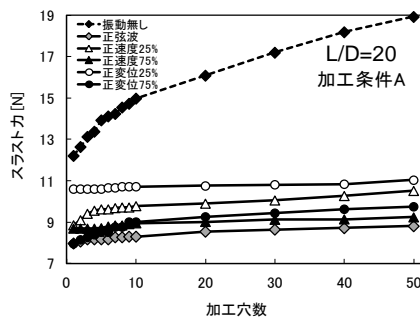


図6 スラスト力の推移

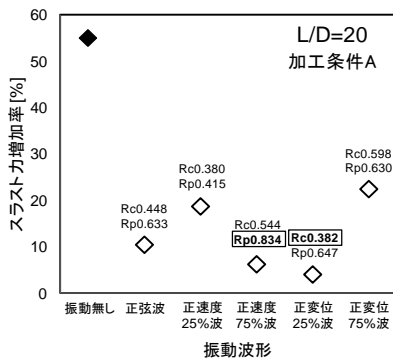


図7 スラスト増加率 (50穴加工後)

表1 加工条件A

被削材	ステンレス(SUS316L)
穴径	Φ0.3mm
回転数	2000 min <sup>-1</sup>
ステップ量	0.15mm
1刃あたり送り量	2.0μm

験装置の概略を示す。工作機械には高速加工機 (ASV400、東芝機械(株)製)、及び加工機主軸ボックスに取り付けたスピンドル (R2、(株)industria製) を使用し、加工機テーブル上に取り付けたピエゾアクチュエータ (株)メステック製) によって振動を付加した。工具には逃げ角18°の超硬ノンコートドリルを使用した。

アクチュエータの加振能力内で、全波形の加振が可能で表1の加工条件Aで加工を行った。正弦波振動付加で実績<sup>1)</sup>のある振動周波数82Hz、振動振幅10μmの振動を付加した。

切削抵抗(スラスト力)を図6に示す。振動加工では慣用加工に対し、全ての振動波形でスラスト力が大幅に低減した。また、1穴目に対する50穴目のスラスト力増加率を図7に示す。増加率は刃先摩耗と相関が強いと考えられる。Rcが小さい正変位25%波とRpが大きい正速度75%波では増加率が正弦波より小さくなった。これらのことから、RcとRpの値は振動波形の評価に対しても有効であることが分かった。しかし、加工条件Aでは加工時間が86秒/穴となってしまった。

そこで、目標加工時間75秒/穴で加工可能となる表2の加工条件Bで加工を行った。振動条件は振動周波数133Hz、振動振幅9μmとした。この振動条件では加振能力の制約から正変位25%波、正変位75%波は加振できなかった。

スラスト力増加率を図8に示す。図7と同様に増加率は正速度75%波が一番小さくなった。

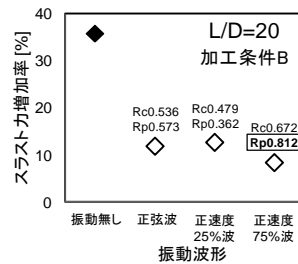


図8 スラスト増加率 (50穴加工後)

表2 加工条件B

被削材	ステンレス(SUS316L)
穴径	Φ0.3mm
回転数	3000 min <sup>-1</sup>
ステップ量	0.075mm
1刃あたり送り量	3.0μm

### 3 工具刃先形状の検討

#### 3.1 主切れ刃逃げ角

振動付加による加工では工具と材料が接触と非接触を短時間に繰り返すため、ドリルの主切れ刃にチッピングが起こる可能性がある。そこで、角度の変更が容易であり、刃先強度に影響する主切れ刃逃げ角<sup>3)</sup>について着目した。

主切れ刃の断面を図9に示す。振動を付加すると刃先の進行角度は常に変化するため、最小実逃げ角は、主切れ刃逃げ角よりも小さくなり、逃げ面が材料と接触しやすくなる。逃げ角を小さくすると刃先強度は増すが、逃げ面摩耗の進行も早くなることが予想される。そこで、振動付加に適した主切れ刃逃げ角について検討を行った。

#### 3.2 最適な主切れ刃逃げ角の検証

主切れ刃逃げ角 $6^{\circ}$  から $30^{\circ}$  まで $6^{\circ}$  間隔のドリルを準備し、それぞれのドリルを用いて正弦波振動付加による加工を行った。ステップ量は $0.15\text{mm}$ とし、他は加工条件Bと同じとした。

50穴加工後の刃先SEM写真を図10に示す。逃げ角が $30^{\circ}$  と大きくなると刃先にチッピングが起きており、刃先強度が不足していると考えられる。

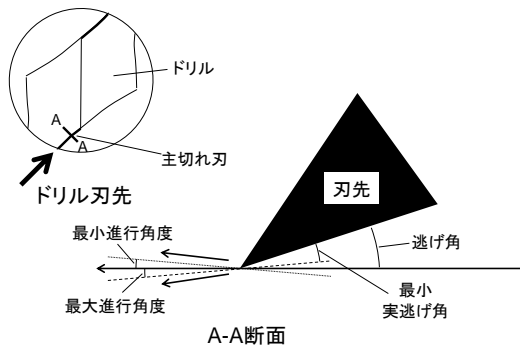


図9 主切れ刃逃げ角

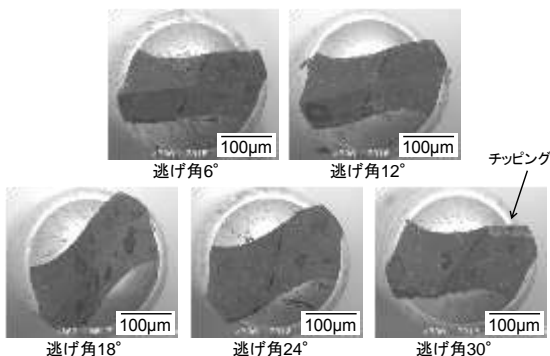


図10 刃先観察 (50穴加工後)

スラスト力を図11に示す。慣用加工ではスラスト力が大きく、加工穴数の増加に伴い急激に増加し、50穴以下で折損してしまう。振動加工ではスラスト力は小さく、50穴以上の加工を行うことができる。逃げ角を小さくするに従い、1穴目加工時のスラスト力は大きくなる傾向がみられた。逃げ角が小さくなるほど逃げ面の摩擦が大きくなっていると思われる。1穴目に対する50穴目のスラスト力増加率を図12に示す。逃げ角が $12^{\circ}$  のときに増加率が最小となった。

工具寿命を図13に示す。スラスト力増加率と強い相関を示し、逃げ角 $12^{\circ}$  のときに工具寿命が最長となった。これらのことから、逃げ角が小さいと逃げ面摩耗の進行が早く、逃げ角が大きいと刃先強度が不足して工具寿命に影響を及ぼすと考えられる。

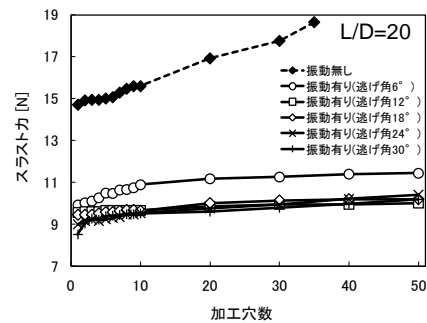


図11 スラスト力の推移

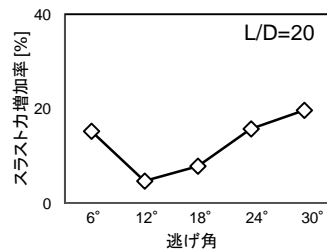


図12 スラスト力増加率 (50穴加工後)

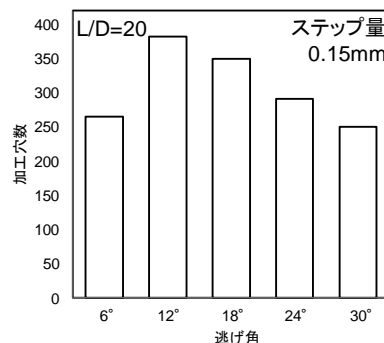


図13 工具寿命と逃げ角の関係

#### 4 アスペクト比 L/D=30 微細深穴加工

目標としている直径0.3mm、深さ9mmの微細深穴加工を行った。主切れ刃逃げ角 $12^\circ$ のドリルを用い、2分以内に加工が可能な加工条件Bで、振動周波数133Hz、振動振幅 $9\mu\text{m}$ の正速度75%波振動を付加して加工を行った。

切りくず形状を図14、10穴加工後の刃先SEM写真を図15、及びスラスト力を図16に示す。振動を付加することで切りくずが細分化され、刃先外周部の摩耗が約80%低減し、スラスト力も大幅に低減した。複数回加工した平均工具寿命を図17に示す。振動を付加することで寿命が約25倍となり、工具寿命900穴以上を実現することができた。

#### 5 まとめ

工具軸方向に低周波振動を付加する微細深穴加工において、穴加工に適した振動波形の選択、及び振動加工に適した刃先形状について検討した。

振動波形について検討したところ、正速度時間比率 $R_p$ が大きくなる正速度75%波、又は切削時間比率 $R_c$ が小さくなる正変位25%波の振動を付加すると、正弦波振動に比べて加工穴数の増加によるスラスト力増加を抑制する効果があり、穴加工に適していることが分かった。刃先形状について検討したところ、主切れ刃逃げ角 $12^\circ$ のドリルに最も長寿命化の効果がみられた。

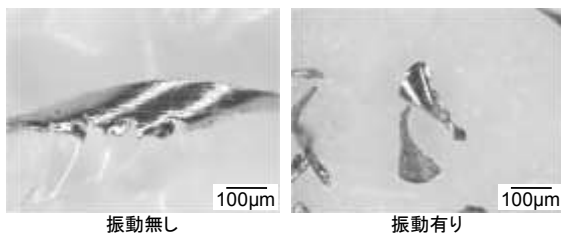


図14 切りくず形状

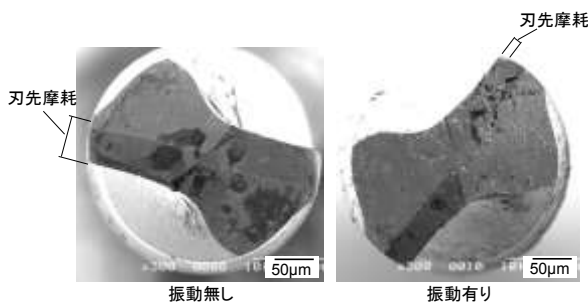


図15 刃先観察 (10穴加工後)

振動条件、振動波形、刃先形状を微細深穴加工に最適化させることで、目標である造粒プレート材のステンレスSUS316Lに対し、直径0.3mm、深さ9mm(アスペクト比L/D=30)の微細深穴を加工時間2分/穴以内、平均工具寿命900穴以上で加工することができた。また、切りくず処理が問題となるアルミや樹脂、微細深穴加工の要望の大きいマシンブルセラミックスへの適用も進めている。

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり、客員研究員として御指導いただきました松田技術経営研究所の松田信一氏、埼玉大学の堀尾健一郎教授に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 南部洋平, 落合一裕, 堀尾健一郎, 金子順一, 渡辺武, 松田信一: 微細深穴加工に対する低周波振動付加に関する研究, 精密工学会誌, **78**, 2(2012)155
- 2) 南部洋平, 落合一裕, 渡辺武: 高アスペクト比微細深穴加工に関する研究, 埼玉県産業技術総合センター研究報告, **10**, (2012)26
- 3) 小川誠: ドリル加工の勘どころ, 日刊工業新聞社, (2011)4

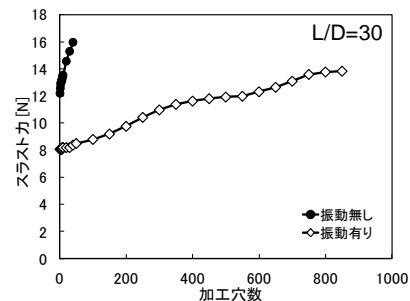


図16 スラスト力の推移

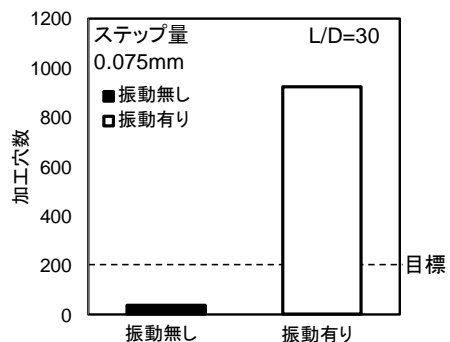


図17 工具寿命