

高アスペクト比微細深穴加工に関する研究

南部洋平* 落合一裕* 江原和樹**

Study on High-Aspect-Ratio Microdrilling

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

抄録

微細深穴加工において低周波振動を工具軸方向に付加するとき、振動条件の評価を行い最適な振動条件を選択する手法について検討した。刃先による切りくず発生モデルから切削時間比率 R_c 及び正速度時間比率 R_p を導出し、振動条件を評価する指標として提案した。加工実験による検証を行ったところ、これらの比率と工具寿命には相関があることが分かった。さらに、最適化した振動条件の低周波振動を付加することで工具寿命1000穴以上を実現することができた。

キーワード：微細深穴ドリル、低周波振動、周波数比、振幅比、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必要とされている。プレート材のステンレスに対し、直径0.3mm、深さ6mm(アスペクト比 $L/D=20$)の微細深穴を加工時間75秒以内、工具寿命500穴以上で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。このような振動は様々な駆動方法¹⁾で実現することができ、周波数と振幅の選択自由度が高く、切りくずの細分化等に効果があることが報告されている^{2)~4)}。しかし、最適な振動条件を選択する方法については議論をされていない。

そこで、微細穴加工に対して低周波振動を付加したときの切りくず排出性に加えて、刃先冷却、切削抵抗の観点も含めて振動条件を評価し、最適

な振動条件を選択する手法について検討を行った。

2 低周波振動による切りくず発生モデル

工具軸方向に低周波振動を付加したときの刃先軸方向変位と切り取り厚さについて定式化を行った。加工時のドリルの動きと付加される振動の関係は図1のように表すことができる。

1刃当りの送り F_z 、工具回転周波数 f_d 、刃数 n で行う加工に対して周波数 f_v 、振幅(p-p) A の振動を工具軸方向に加えたとき、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 θ 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する。

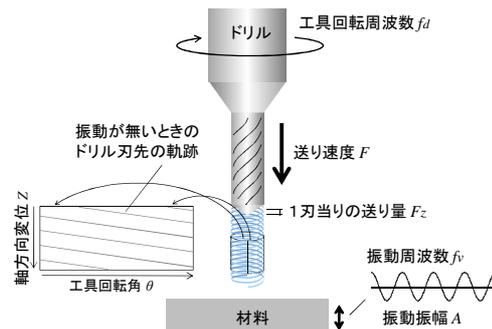


図1 低周波振動モデル

* 技術支援室 機械技術担当

** 日本ノズル精機(株)

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

切り取り厚さは k/n 回転前の軸方向変位 Z_k の最大値と軸方向変位 Z との差に相当すると考えられる。 k/n 回転前のドリル刃先の軸方向変位 Z_k は式(2)で表される。

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

$(k=1,2,3\cdots)$

刃先外周の軸方向切り取り厚さ h は式(3)のように表すことができる。切り取り厚さが負のときには切削が行われないため、 $h=0$ とする。

$$h = \begin{cases} Z(\theta) - \max[Z_1(\theta), Z_2(\theta), \dots, Z_m(\theta)] & (Z(\theta) > \max[Z_1(\theta), Z_2(\theta), \dots, Z_m(\theta)]) \\ 0 & (Z(\theta) \leq \max[Z_1(\theta), Z_2(\theta), \dots, Z_m(\theta)]) \end{cases} \quad (3)$$

$h > 0$ のときには刃先がワークに切り込み切削が行われ、 $h = 0$ のときには切削は行われず切りくずは発生しない。

例として、2枚刃のドリルを用いて工具回転数 5000min^{-1} 、1刃当たりの送り $1\mu\text{m}$ 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の高さが切り取り厚さ h に相当する。

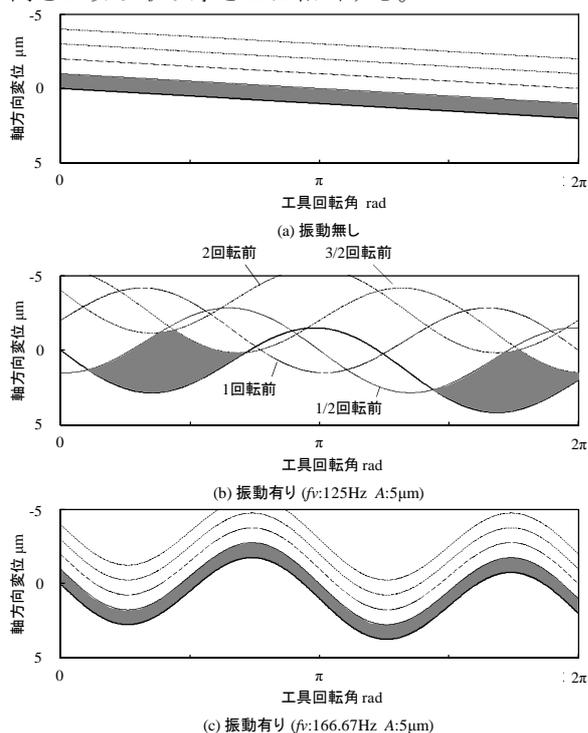


図2 ドリル刃先の軸方向変位

振動を付加しない慣用加工のときの刃先軸方向変位を図2(a)に示す。切り取り厚さは一定で連続し、1刃当たりの送りと等しくなる。

振動周波数 $f_v = 125\text{Hz}$ 、振動振幅 $A = 5\mu\text{m}$ の正弦波振動を付加したときの刃先軸方向変位を図2(b)に示す。振動を付加することにより切り取り厚さが一定ではなくなることが分かる。刃先は $1/2$ 回転前の刃先が通過したところからワークに進入し、 $3/2$ 回転前の刃先が通過したところから離脱する。このことから、切り取り厚さ $h = 0$ となる区間が周期的に発生し、短い切りくずが断続的に発生すると考えられる。

振動周波数 $f_v = 166.67\text{Hz}$ 、振動振幅 $A = 5\mu\text{m}$ の正弦波振動を付加したときの刃先軸方向変位を図2(c)に示す。振動の位相が $1/2$ 回転前の刃先と等しくなり、切り取り厚さは常に一定となる。このことから、連続的な切りくず発生が予想される。

上記のように、振動条件が変わると刃先の軌道や切りくず厚みが変化し、加工に及ぼす影響が変わると考えられる。そのため、加工条件に応じて最適な振動条件を選択することが必要となる。

3 切削時間比率

3.1 切削時間比率の導出

振動を付加すると、振動条件によっては図2(b)のように振動1周期の間に切削時間と非切削時間が存在する。非切削時間には切りくずは発生せず刃先冷却効果があるのではないかと考え、振動1周期中の実切削時間の比を切削時間比率と定義した。図2(b)と同じ振動条件の刃先軸方向変位である図3を用いて切削時間比率を説明する。振動周期 T_v に対する切り取り厚さ $h > 0$ となる切削時間 T_c の比率 T_c/T_v を切削時間比率 R_c と呼ぶ。

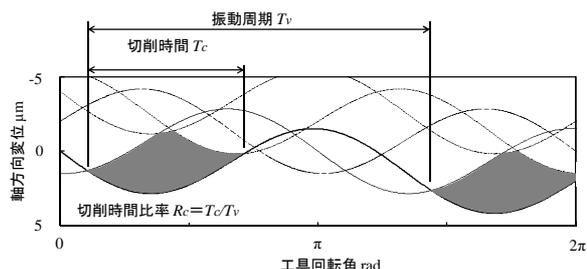


図3 切削時間比率

$R_c = 1$ のときには、常にドリルが材料に切り込むため切りくずが連続的になる。

$R_c < 1$ のときには切り取り厚さが周期的に 0 となるため、短い切りくずが断続的に発生することが予想される。また、 R_c が小さくなるにしたがって刃先がワークから離れる時間が長くなるため、刃先冷却効果が期待できる。これらのことより、切削時間比率 R_c は切りくず排出性に関わる切りくず形状や、刃先冷却性を評価する指標として有効であると考えられる。つまり、振動条件に対して切りくず排出性や刃先冷却性を 1 つの数値で評価することができる。

3.2 切削時間比率マップ

切削時間比率 R_c は振動周波数 f_v とドリル周波数 f_d との比 f_v/f_d と、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 の組み合わせに対して 1 つの値に定まる。 f_v/f_d を周波数比、 A/F_z を振幅比とする。

縦軸を振幅比、横軸を周波数比として、刃数 2 のドリルを用いて正弦波振動を付加したときの切削時間比率 R_c を図 4 に示す。 R_c の値は濃淡で表し、色が薄い方が小さい値となり刃先冷却効果が期待できる。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切削時間比率 R_c 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。

周波数比を固定して考えると振幅比が大きくなるにしたがって R_c が小さくなる。次に、周波数比 0~2 の範囲をみると周波数比 1 を中心に対称となっている。振幅比を固定して考えると周波数比 0 (振動無し) と 2 では $R_c = 1$ となり、周波数比 0~1 及び 1~2 の間で R_c が小さくなる。周波数比が 2 以上では周波数比 0~2 までのパター

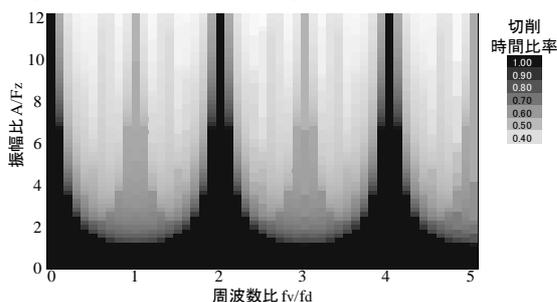


図 4 切削時間比率マップ

ンが繰り返される。

4 正速度時間比率

4.1 刃先進行の考察

軸方向に低周波振動を付加する場合、刃先が進行していく角度は一定ではない。図 5(a)に示すように軸方向速度が正のときは振動を付加しない慣用加工に比べて刃先のすくい角が大きくなる。また、図 5(b)に示すように軸方向速度が負のときにはすくい角が小さくなる。一般的にすくい角は大きくなるほどせん断角が大きくなり切削抵抗が小さくなる傾向にある。刃先が進行していく角度は刃先の軸方向速度と周方向速度の比から考えることができる。

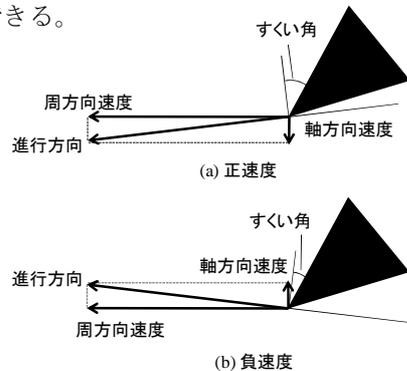


図 5 ドリル刃先の進行方向

すくい角の変化を予想するためには、ドリル刃先の軸方向速度について定式化する必要がある。工具軸回転角 θ と軸方向速度 v の関係は、式(1)を時間の関数で表しその微分をとることで式(4)のように表すことができる。

$$v(\theta) = \pi f_v A \cos\left(\frac{f_v}{f_d} \theta\right) + F_z \cdot n \cdot f_d \quad (4)$$

振動加工によるすくい角の増減を評価するため、定常的な送り速度を差し引いた振動速度 v_v は式(5)のように表すことができる。

$$v_v(\theta) = v(\theta) - F_z \cdot n \cdot f_d \quad (5)$$

図 2 と同じく工具回転数 5000min^{-1} 、1 刃当たりの送り $1\mu\text{m}$ で加工を行った時の振動速度の計算結果を図 6 に示す。切り取り厚さ $h = 0$ となる回転角では切削が行われないと考えられるため、 $h = 0$ の範囲では速度を 0 とした。

図 6(a)は図 2(b)と同じ振動周波数 $f_v = 125\text{Hz}$ 、

振動振幅 $A = 5\mu\text{m}$ の振動を付加したときの振動速度を示す。この条件では刃先が正の速度で進入し、負の速度で離脱する。

図 6(b)に振動周波数 $f_v = 150\text{Hz}$ 、振動振幅 $A = 5\mu\text{m}$ の振動を付加したときの振動速度を示す。図 6(a)に比べて振動速度が負になっている区間が長くなる。つまり、すくい角が小さい状態で切削する時間が長いといえる。

図 6(c)に振動周波数 $f_v = 183.3\text{Hz}$ 、振動振幅 $A = 5\mu\text{m}$ の振動を付加したときの振動速度を示す。図 6(b)とは逆に、振動速度が正となっている区間が長く、すくい角が大きい状態で切削する時間が長いと考えられる。

4.2 正速度時間比率の導入

切削時間 T_c に対する振動速度が正となる時間 T_p の比率 T_p/T_c を正速度時間比率 R_p とする。 R_p が大きいということは、慣用加工に比べてすくい角が大きい状態で加工をする比率が大きくなることが期待できる。

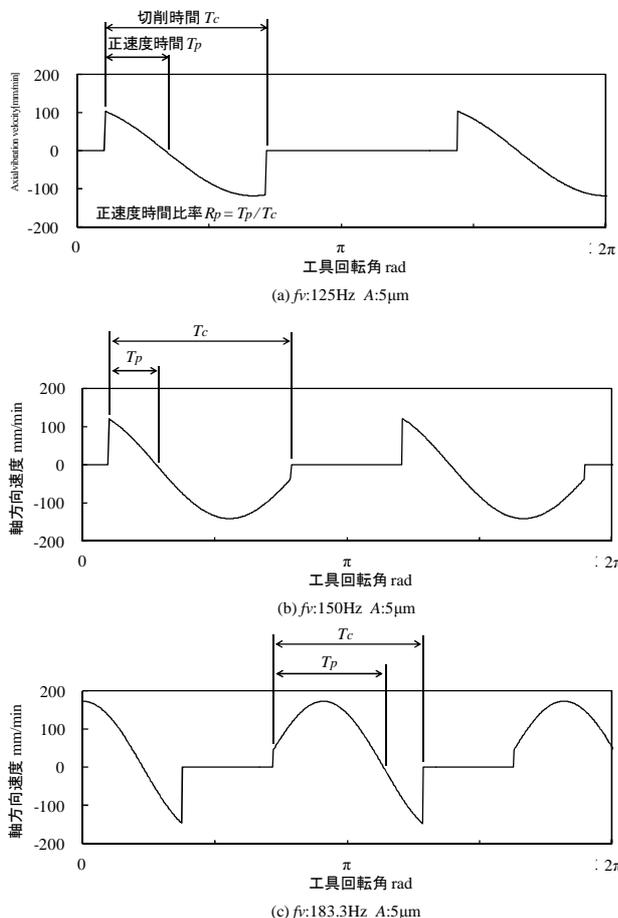


図 6 ドリル刃先の軸方向速度

4.3 正速度時間比率マップ

正速度時間比率 R_p も切削時間比率 R_c と同様に、周波数比 f_v/f_d と振幅比 A/F_z の組み合わせに対応した 1 つの値となる。

図 4 と同様に、図 7 に縦軸を振幅比、横軸を周波数比として、刃数 2 のドリルを用いて正弦波振動を付加したときの正速度時間比率 R_p を示す。 R_p の値は濃淡で表し、色が薄い方が大きい値となり平均切削抵抗の低減が期待できる。

周波数比 0~2 の範囲をみると周波数比 1 よりも小さい領域では R_p が大きくなり、1 よりも大きい領域では R_p が小さくなる。周波数比が 2 以上では周波数比 0~2 までのパターンが繰り返される。

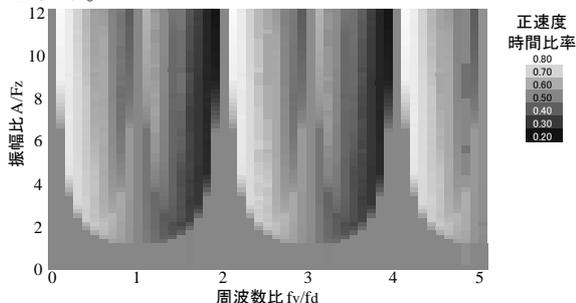


図 7 正速度時間比率マップ

5 加工実験

5.1 実験装置

図 8 に実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) を使用した。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、静電容量型変位計 (マイクロセンス 3401、日本 ADE 製) を用いて振動周波数と振動振幅を測定した。

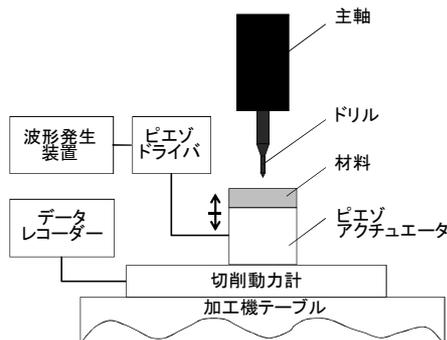


図 8 実験装置

5.2 振動条件評価指標の検証

振動条件評価指標と工具寿命の関係を検証するためにステンレス SUS304 に対して直径 0.1mm、深さ 1.5mm の微細深穴加工を行った。加工条件を表 1 に示す。振幅比は 3、5、10 とし、それぞれの振幅比で切削時間比率が極小となる周波数比、及び整数倍の周波数比の振動を付加した。

切削時間比率 Rc、正速度時間比率 Rp のマッピング上に工具が折損するまでの穴数を記したものを図 9、図 10 に示す。周波数比や振幅比が大きくなるほど工具寿命が延びる傾向にあるが、特に

表 1 加工条件

被削材	ステンレス(SUS304)
穴径	Φ0.1mm
加工深さ	1.5mm (通り穴)
回転数	5000 min ⁻¹
ステップ量	0.05mm
1 刃あたり送り量	1.0μm
振動条件	~250Hz ~10μm

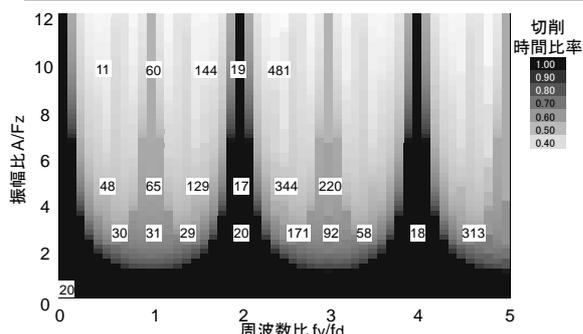


図 9 切削時間比率と工具寿命の関係

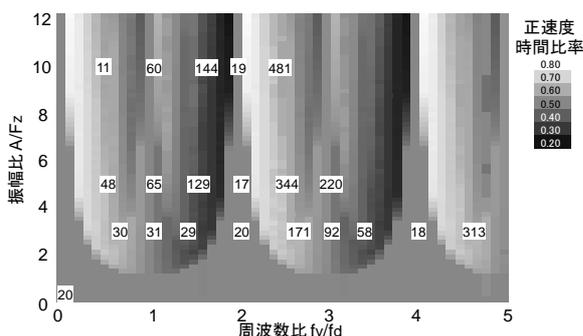


図 10 正速度時間比率と工具寿命の関係

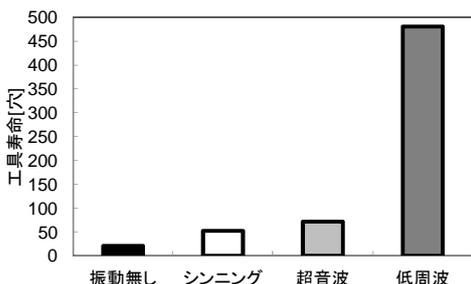


図 11 工具寿命の比較

Rc が小さく Rp が大きくなる振幅比と周波数比の組み合わせの振動を付加した時に工具寿命が延びることが分かった。

振動条件を適切に選択した低周波振動付加、ドリル刃先へのシンニング⁵⁾、工具軸方向への超音波振動付加⁶⁾を同じ加工条件下で行った時の工具寿命を図 11 に示す。低周波振動では慣用加工に対して約 24 倍の長寿命化を図ることができた。

5.3 直径 0.3mm 微細深穴加工への適用

造粒プレート材であるステンレス SUS316L に対して直径 0.3mm、深さ 6mm の微細深穴加工を行った。まず振動を付加しない慣用加工で加工条件の検討を行った。加工条件を表 2 に示す。各加工条件での工具寿命と加工時間を図 12 に示す。

表 2 加工条件

被削材	ステンレス(SUS316L)
穴径	Φ0.3mm
加工深さ	6.0mm (通り穴)
回転数	3000~10000 min ⁻¹
ステップ量	0.05~0.2mm
1 刃あたり送り量	0.6~3.0μm

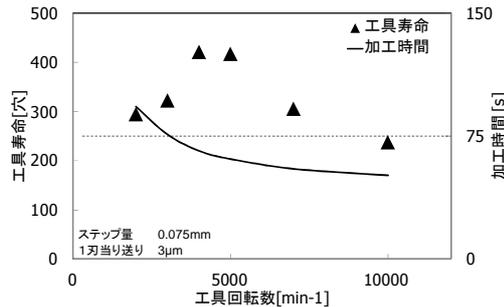
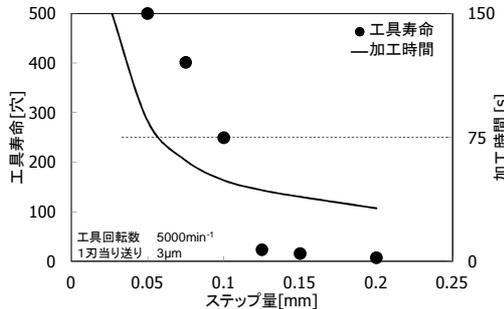
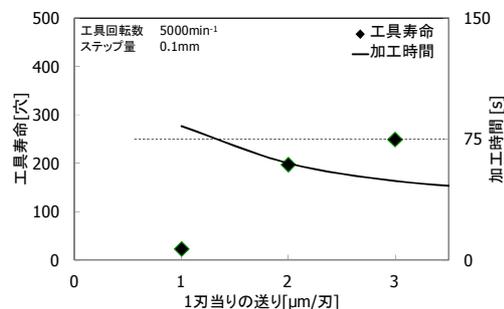


図 12 加工条件と工具寿命・加工時間の関係

1刃当たりの送り量は大きくするほど工具寿命が延びたが4 μm 以上にすると刃先欠損が発生した。また、ステップ量0.125mm以上ではすぐに折損してしまった。さらに、工具回転数には工具寿命が長くなる範囲が存在した。

慣用加工における加工条件とピエゾアクチュエータの加振範囲から、加工時間が75秒となる1刃当たりの送り量3 μm 、ステップ量0.075mm、工具回転数3000 min^{-1} の加工条件に対して周波数比2.66(周波数133Hz)、振幅比3(振幅9 μm)の振動を付加した。

このときの切りくず形状を図13に示す。振動を付加することで切りくずを細分化することができた。刃先摩耗を図14に示す。振動を付加すると刃先外周部の摩耗が約75%低減した。切削抵抗(スラスト力)を図15に示す。振動を付加することでスラスト力が大幅に低減し、工具寿命1000穴以上を実現することができた。

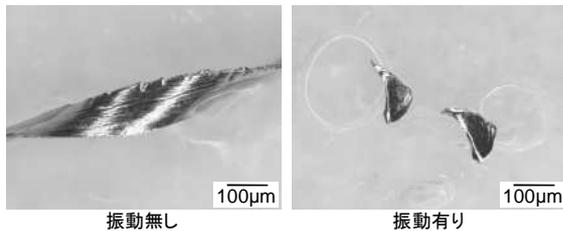


図13 切りくず形状

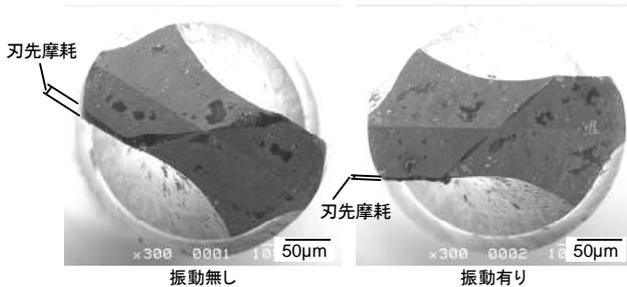


図14 刃先観察(10穴加工後)

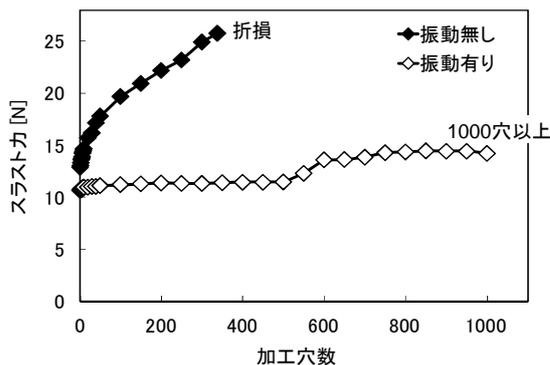


図15 スラスト力の推移と工具寿命

6 まとめ

微細深穴加工において低周波振動を工具軸方向に付加することを検討した。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、指標のマッピングを行った。これらのマップを用いて R_c が小さく R_p が大きくなる周波数比と振幅比の組み合わせを選択することで平均切削動力や刃先摩耗を低減させ、工具の長寿命化を図ることができた。

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様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 殿村隆司, 中川威雄, 大森整: 圧電素子を利用した振動テーブル, 特開平2-25077
- 2) 新井典久, 足立勝重, 西口正純, 沖田耕三, 杉原輝明: 難削材の低周波振動ドリル加工に関する研究, 日本機械学会論文集(C編), **55**, 514(1989)1550
- 3) 窪田英毅, 田部井英世, 佐藤崇: 切りくずを細分化するドリル穴加工法の検討, 精密工学会誌, **60**, 11(1994)1611
- 4) H G Toews, W D Compton and S Chandrasekar, A study of the influence of superimposed low-frequency modulation on the drilling process, Precision Engineering, **22**, (1998), 1
- 5) 南部洋平, 落合一裕, 堀尾健一郎, 金子順一, 渡辺武, 松田信一: 超音波振動を援用した高アスペクト比微細深穴加工, 精密工学会誌, **77**, 3(2011)306
- 6) 南部洋平, 落合一裕, 堀尾健一郎, 金子順一, 渡辺武, 松田信一: 微細深穴加工におけるシンニングによって形成されるチゼルすくい角の影響, 精密工学会誌, **77**, 7(2011)713
- 7) 南部洋平, 落合一裕, 渡辺武: ガスタービン用ノズルへの微細深穴加工に関する研究 (2), 埼玉県産業技術総合センター研究報告, **9**, (2011)50