

## ガスタービン用ノズルへの微細深穴加工に関する研究

南部洋平\* 落合一裕\* 星 秀和\*\*

### High-Aspect-Ratio Microdrilling of the Nozzle for Gas Turbine

NANBU Youhei\*, OCHIAI Kazuhiro\*, HOSHI Hidekazu\*\*

#### 抄録

ガスタービンにおいて、NO<sub>x</sub>排出量を増加させずに効率を上げるためには燃焼温度を均一にする必要があり、そのための手法の一つとして燃料と同時に水蒸気を噴射する技術開発が行われている。この水蒸気を精度よく噴射するためにはノズル穴径を微細化・深穴化することが求められる。

ノズル材料に対する微細深穴ドリル加工において、シンニングにおけるチゼル部すくい角、超音波振動振幅、及び低周波振動による切りくず形状について検討を行った。その結果、チゼル部すくい角を大きくすると切削動力が減少し、工具寿命に関しては最適なすくい角があることが確認された。超音波振動を付加することで切削動力が低減し、工具寿命が延びた。また、振幅量を大きくすると切削動力は減少するが、工具寿命が短くなってしまふことが分かった。さらに、低周波振動の振動周波数によって切りくず形状をコントロールできることを示した。

キーワード：微細深穴ドリル、シンニング、超音波振動切削、ステンレス加工、微細加工

## 1 はじめに

火力発電所では発電の効率を上げ、燃料消費量を抑えるため、従来の蒸気タービン単独の方式から、ガスタービン等を組み合わせたコンバインドプラントとすることが主流となってきた。

ガスタービンでは、燃焼器出口温度を上げて効率を上げることが望まれている。しかし、燃焼温度が高温になると指数関数的にNO<sub>x</sub>排出量が増加してしまう。そのため、燃料と同時に水蒸気を噴射し、燃焼温度を均一にする技術開発が行われている<sup>1)</sup>。この水蒸気を精度よく噴射するためにはノズル穴径を微細化・深穴化する必要がある。

本研究では、ノズル材料として用いられている

ステンレスに対して直径0.1mm、深さ1.5mm (L/D=15)の微細深穴を、超硬ノンコートドリルによって実用的な条件で加工することを目的としている。

## 2 研究方法

### 2.1 微細深穴ドリル加工の問題点

微細深穴ドリル加工では、切りくずの排出が困難であるうえ、切削時において発生する熱の逃げ場がないという問題がある。このことから、加工点の温度が非常に高くなるため、工具摩耗が進みやすいといった問題がある<sup>2)</sup>。また、ドリル先端の中心部分、いわゆるチゼルエッジにはスラスト方向に大きな切削動力がかかる<sup>3)</sup>。そのため、相対的に芯厚が大きくなる微細径ドリルになるほど小さいチゼルエッジが望まれる。

\* 試験研究室 生産技術担当

\*\* 日本ノズル精機 (株)

## 2.2 加工手法

微細加工においては超音波振動を付加することにより、切削動力やドリル刃先の凝着物が減少するという効果が報告されている<sup>4)~7)</sup>。また、低周波振動を付加することで切りくずの分断が可能となるという報告がされている<sup>8)</sup>。

これまでの研究において微細ドリル先端のチゼルエッジに切り欠きを入れるシンニングに着目し、微細径ドリルに対して簡便にシンニングを行う装置の開発を行ってきた<sup>9)</sup>。その装置でシンニングを施したドリルを用いることによって切りくずの排出性が向上し、切削動力が低減することを確認した<sup>10)</sup>。さらに、超音波振動付加と併用することで切削動力がさらに低減し、工具寿命が大幅に延びることを示した<sup>11)</sup>。

そこで、これらの成果を直径0.1mm、深さ1.5mm(L/D=15)の穴加工へ適用し、その効果について検討を行った。さらに、低周波振動付加において、工具回転周波数に対して振動周波数を変化させることで、微細深穴加工においても切りくず形状のコントロールを行うことができるかの検討を行った。

## 2.3 実験装置

図1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振動周波数40kHzの超音波振動スピンドル (R2、(株)industria製) を使用した。また、周波数可変な piezo アクチュエータ (メステック製) で低周波振動を付加した。

工具先端の振幅測定は応答周波数100kHzの静電容量型変位計 (NANOMETRIC SENSOR 211、ナノ技研(株)製) で行った。さらに、切削状況の評価

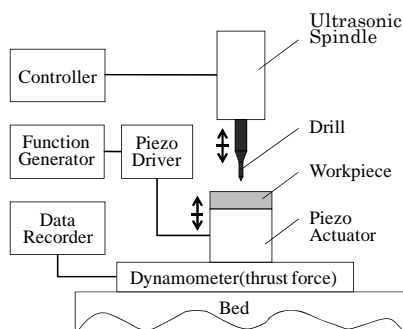


図1 実験システム

を切削動力計 (9254、日本キスラー(株)製) によるスラスト方向動力の測定によって行った。被削材にはオーステナイト系ステンレスSUS304、工具には超硬ノンコートドリルを使用した。

## 2.4 シンニング形状の検討

チゼル部すくい角の角度  $\theta_1$  を図2に示すように  $-20^\circ$  から  $+30^\circ$  まで変化させ、微細深穴加工に最適なシンニング形状を検討した。直径0.2mmの微細深穴加工において、1刃当たりの送り量を刃先への負荷が比較的小さい  $1.2 \mu\text{m}$  と、負荷の大きい  $4.8 \mu\text{m}$  として、そのときの切削動力、切りくず形状、工具寿命を評価した。加工条件を表1に示す。

表1 加工条件

被削材	SUS304
穴径	$\Phi 0.2\text{mm}$
加工深さ	4mm (通り穴)
回転数	$5000 \text{ min}^{-1}$
切削速度	3.1m/min
ステップ量	0.05mm
1刃あたり送り量	1.2, 4.8 $\mu\text{m}$
振動	無し
ドリル先端形状	チゼル部すくい角 $-20^\circ \sim +30^\circ$

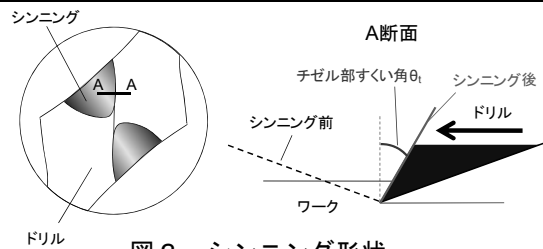


図2 シンニング形状

## 2.5 超音波振動付加の検討

超音波振動の有無、振幅の大きさを変化させ、そのときの切削動力、切りくず形状、刃先摩耗、工具寿命を評価した。加工条件を表2に示す。

表2 加工条件

被削材	SUS304
穴径	$\Phi 0.1\text{mm}$
加工深さ	1.5mm (通り穴)
回転数	$5000 \text{ min}^{-1}$
切削速度	1.6m/min
ステップ量	0.1mm
1刃あたり送り量	1.0 $\mu\text{m}$
振動周波数	40kHz
振幅	振幅約 1~3 $\mu\text{m}$

## 2.6 ドリル刃先軌道の検討

ドリル刃先のワークに対するZ方向の相対変位 $Z_d$ は式1、下向き相対速度 $V_d$ は式2で表すことができる。

$$Z_d = -\left(\frac{A}{2}\right)\sin(2\pi f_v t) - f_d \cdot F_z \cdot z \cdot t \quad (1)$$

$$V_d = 2\pi f_v \left(\frac{A}{2}\right)\cos(2\pi f_v t) + f_d \cdot F_z \cdot z \quad (2)$$

ここで、 $A$ ：振動振幅(p-p)、 $f_v$ ：振動周波数、 $F_z$ ：1刃当りの送り、 $f_d$ ：工具回転周波数、 $z$ ：刃数、 $\theta$ ：工具回転角となる。

また、 $n$ 刃前の刃先のZ方向相対変位 $Z_{d-n}$ は式3となる。

$$Z_{d-n} = -\left(\frac{A}{2}\right)\sin\left(2\pi f_v \left(t - n \left(\frac{1}{f_d \cdot z}\right)\right)\right) - f_d \cdot F_z \cdot z \left(t - n \left(\frac{1}{f_d \cdot z}\right)\right) \quad (3)$$

これらの関係式から振動周波数を変化させたときのドリル刃先の軌道と相対速度から切りくず形状の解析を行った。

## 2.7 低周波振動付加の検討

ピエゾアクチュエータの振動有無、周波数を変化させ、そのときの切りくず形状を評価した。加工条件を表3に示す。

表3 加工条件

被削材	SUS304
穴径	$\Phi 0.1\text{mm}$
加工深さ	1.5mm (通り穴)
回転数	5000 min <sup>-1</sup>
切削速度	1.6m/min
ステップ量	0.1mm
1刃あたり送り量	1.0 $\mu\text{m}$
振動周波数	0~175Hz
振幅	10 $\mu\text{m}$

## 3 結果及び考察

### 3.1 シンニング形状の検討

1穴目加工時の切削動力を図3に示す。横軸にチゼル部すくい角、縦軸に切削動力(スラスト力)を示している。このときシンニングをしていないドリルのチゼルすくい角は約-60°となっている。チゼルすくい角を大きくしていくに従ってスラスト力が減少することが分かる。このことから、微細ドリルにおいては、ドリル径に対する芯厚の比率が高くなるため、発生するスラスト力の大部分はチゼル部で発生していることが分かる。また、

1刃当りの送りを大きくすると刃先への負荷が大きくなり、スラスト力が増加することも分かる。

切りくずを光学顕微鏡で観察したものを図4に示す。シンニングを行ったドリルでは、チゼル部においても切りくずが押しつぶされることなく、切りくず排出もスムーズであるため、切りくずが短く良好な形状となっている。

工具寿命を図5に示す。シンニングを行ったドリルは切削動力が低減し、切りくず形状が良好となるための工具寿命は延びるが、チゼル部すくい角を大きくしすぎると工具寿命は短くなる。刃先への負荷が大きい1刃当たり送り4.8  $\mu\text{m}$ の時にその傾向が強いことから、刃先剛性不足が原因と考えられる。

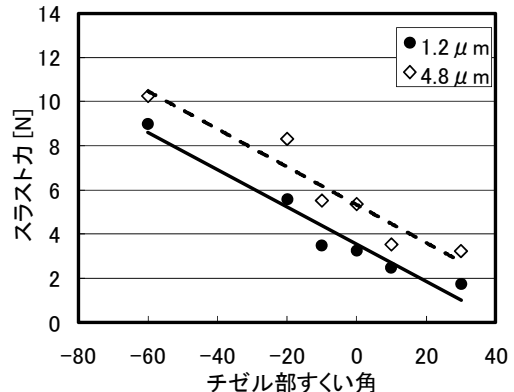


図3 切削動力

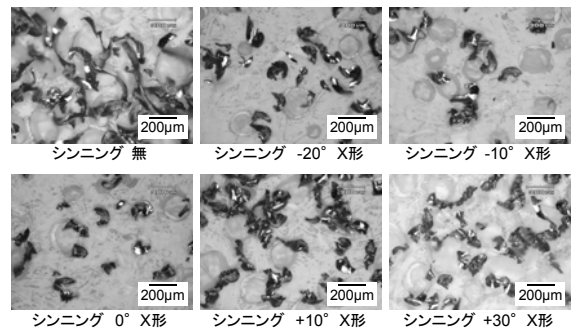


図4 切りくず

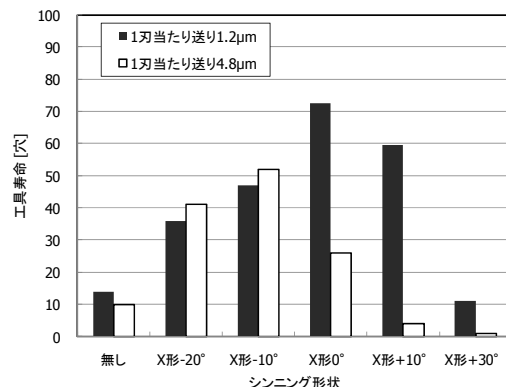


図5 工具寿命

### 3.2 超音波振動付加の検討

振動振幅による平均切削動力の比較を図6に示す。横軸に加工穴数、縦軸に切削動力(スラスト力)を示している。振動振幅を大きくするほどスラスト力が低減していることが分かる。

次に、10穴連続加工した後のドリル先端のSEM観察結果を図7に示す。慣用加工では外周部での摩耗が大きくなった。これは、外周部では切削速度が速くなるため高温になり、熱的なダメージが発生していることが原因と考えられる。超音波振動加工では振幅を大きくするほど摩耗が少なくなった。これは、切削油剤が穴の中まで浸透し、潤滑及び冷却効果が発生しているためと考えられる。しかし、振幅が大きいきには逃げ面に損傷が発生している。これは、うまく排出できなかった切りくずがドリルとワークの隙間に入ってしまうことが原因と考えられる。

続いて、工具寿命の比較を図8に示す。振動加工は慣用加工に比べて工具寿命が大きく延びるが、振幅が大きくなるほど寿命が短くなっていることが分かる。これは、逃げ面への衝撃が大ききことが影響していると考えられる。

### 3.3 ドリル刃先軌道の検討

振動周波数を変化させたときの一例として、工具回転周波数の2倍である166Hzおよびその前後の158Hz、175Hzにおけるドリル刃先の軌道と相対速度を図9に示す。横軸は工具回転角となる。切削が行われる1刃以上前の軌跡よりも下となる部分を塗りつぶした。この部分が切りくず厚みに相当すると考えられる。

この結果より、工具回転周波数 $f_t \times$ 刃数 $z$ の整数倍の周波数である166Hzでは切りくず厚みが一定の連続切削が行われ、158Hz、175Hzでは切りくず厚みが0となる部分があり、断続切削が行われる。また、振幅および周波数を変化させることで、切りくず形状をコントロールすることができると予想される。

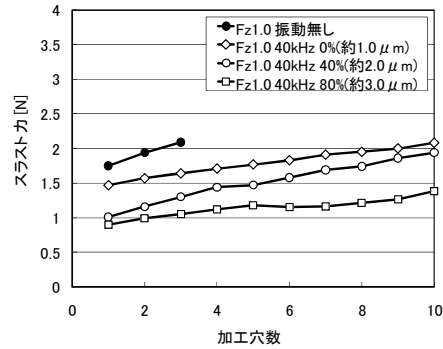


図6 切削動力

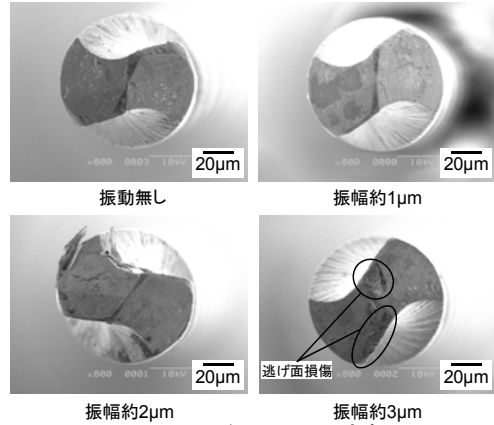


図7 ドリル刃先摩耗

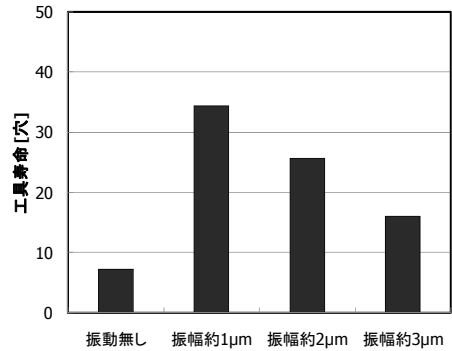


図8 工具寿命

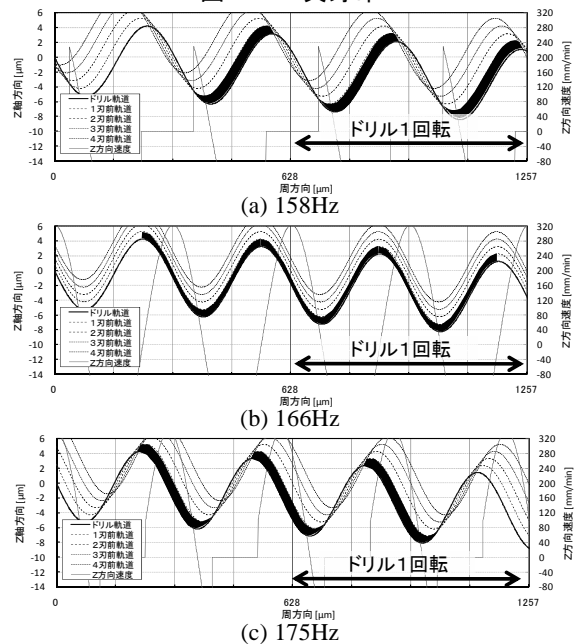


図9 ドリル刃先の軌跡

### 3.4 低周波振動付加の検討

振動周波数による切りくず観察結果を図10に示す。切りくずの軌跡より連続切削と予想された慣用加工と166Hzでは長い切りくずとなり、断続切削と予想された158Hzと175Hzでは切りくずが小さく分断されていることが分かる。このことより、本手法によって切りくず形状のコントロールが可能であると考えられる。

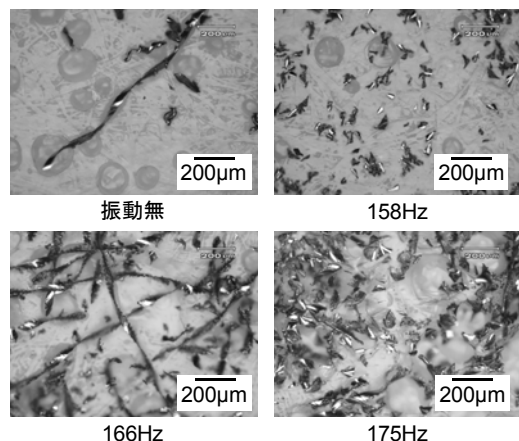


図10 切りくず

## 4 まとめ

ノズル部材であるSUS304に対するΦ0.1mm深さ1.5mmの微細深穴を実用的な条件で安定して加工することについて検討した。

### (1) シンニング形状

シンニングによって形成されるチゼル部すくい角を変化させ、その影響を検討した。チゼル部すくい角を大きくすると、切削動力が低減し、切りくず形状が良好となるために工具寿命は延びるが、大きくしすぎると刃先剛性不足から工具寿命は短くなった。

### (2) 超音波振動付加

振動振幅についての検討を行った。振幅を大きくすると切削動力は小さくなるが、逃げ面摩耗が発生し、工具寿命が短くなった。

### (3) 振動付加による切りくずコントロール

工具進行方向に振動付加した場合のドリル刃先の軌跡検討を行った。工具回転周期との比や振幅量によって切りくず形状をコントロールできる可能性を示し、実際の切りくず形状と合うことを示した。

## 謝辞

本研究を進めるに当たり、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様に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 萬代重実、稲田満、秋田栄司、谷村聡：デュアル燃料だき低 NOx 燃焼技術の開発、三菱重工技報、**36**, (1991)10
- 2) 狩野勝吉：難削材・新素材の切削加工ハンドブック、工業調査会、(2002)183
- 3) 佐久間敬三 他：ドリル・リーマ加工マニュアル、大河出版、(1992)107
- 4) 鬼鞍宏猷、大西修：超音波小径穴加工における切削機構、精密工学会誌、**64**, 11(1998)1633
- 5) 西岡孝夫、樋田靖広、加藤光吉：振動援用装置の開発とドライドリル切削工具の性能評価、東京都立産業技術研究所研究報告、**8**, (2005)83
- 6) 小川仁、升田雅博、溝渕啓：小径穴あけ加工における加工条件と工具寿命(第2報)、精密工学会誌、**73**, 5(2007)578
- 7) Moriwaki T., Shamoto E: Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration, Annals of the CIRP, **40**, (1991)559
- 8) 足立、新井、脇坂、原田、服部：低周波振動ドリル加工に関する研究、機械学会論文集(C編)、**53**, 8(1987)1877
- 9) 南部、落合、秋葉、永久保：ドリルのシンニング装置及びシンニング形成方法、特願 2006-027550, 2006-027551
- 10) 南部洋平、落合一裕、秋葉大輔、永久保輝昭：ディーゼルエンジン用ノズルの微細深穴加工、埼玉県産業技術総合センター研究報告、**5**, (2007)96
- 11) 南部洋平、落合一裕：微細深穴の高品質化に関する研究、埼玉県産業技術総合センター研究報告、**7**, (2009)65