

## 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)

南部洋平\* 落合一裕\* 渡辺武\*\*

### High-Aspect-Ratio Microdrilling of the Nozzle for Gas Turbine (2)

NANBU Youhei\*, OCHIAI Kazuhiro\*, WATANABE Takeshi\*\*

#### 抄録

火力発電所用ガスタービンのノズル材料であるステンレスに対し、直径0.1mm、深さ1.5mm (アスペクト比L/D=15)の微細深穴を加工時間1分以内、工具寿命50穴以上で加工することを目標に検討を行った。

まず、目標加工時間内で工具寿命が最長となる加工条件を検討した。続いて、シンニングによって形成されるチゼル部すくい角、超音波振動付加、及び低周波振動付加について検討を行った。その結果、チゼル部すくい角と切削動力の相関性、超音波振動付加による工具寿命増加、低周波振動付加による切りくず分断が確認された。さらに、各手法を併用すると効果が相乗され切削動力を約60%低減、工具寿命を約9倍とすることができた。

キーワード：微細深穴ドリル、シンニング、超音波振動、低周波振動、微細加工

## 1 はじめに

火力発電所用ガスタービンでは、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>。この水蒸気を均一に噴射するためにはノズル穴を微細化・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 (アスペクト比L/D=15)の微細深穴を実用的に加工することを目的としている。超硬ノンコートドリルによって加工時間1分以内、工具寿命50穴以上の実用的な加工を行うことを目標として検討を行った。

## 2 研究方法

### 2.1 微細深穴ドリル加工の問題点

微細深穴用のドリルは剛性を保つために一般径のドリルに比べて直径に対する心厚の比率が大きくなっている。そのため、ドリル先端の中心部分、いわゆるチゼルエッジの長さがドリル径に対して大きくなり、スラスト方向に大きな切削動力がかかる<sup>2)</sup>。また、切削液のような冷却効果をもたらす媒体が加工点に到達することが難しく、加工熱がこもりやすいため刃先が高温になりやすい。さらに、加工点から穴入口までの距離が長くなるため、切りくずの排出が難しい<sup>3)</sup>。これらの問題はアスペクト比が大きい深穴になるほど顕著になる。

### 2.2 加工条件の検討

微細穴のドリル加工では図に示すようなステップ送りを行うことで刃先冷却や切りくず排出を行っている。しかし、アスペクト比の大きい微細深穴ではステップ量を極端に小さくする必要があるためステップ回数が多くなり、往復の早送りによ

\* 試験研究室 生産技術担当

\*\* 日本ノズル精機(株)

る非切削時間が長くなってしまふ。そのため、加工時間が非常に長くなるという実用上の大きな問題がある。そこで、目標加工時間内で工具寿命が最長となる加工条件の検討を行った。

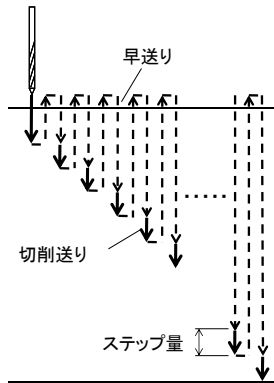


図1 ステップ送り

### 2.3 チゼル部すくい角の検討

加工中の切削動力を低減させる手法の一つとして、図2のようにチゼルエッジに切り欠きを入れるシンニングがある。著者らは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た<sup>4)</sup>。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>5)</sup>。本報ではシンニングによって形成されるチゼル部すくい角  $\theta_1$  (図3) に着目した。チゼル部すくい角は大きくするほど切削抵抗の低減が期待できるが、大きくし過ぎると刃先強度の低下により工具寿命が減少してしまう恐れがある。そこで、 $\theta_1$  を  $-20^\circ$  から  $+10^\circ$  まで変化させ、切削動力、切りくず形状、工具寿命を評価することで微細深穴加工に最適なシンニング形状を検討した。

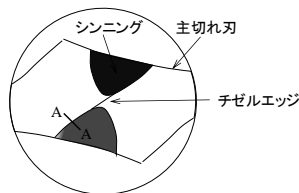


図2 シンニング

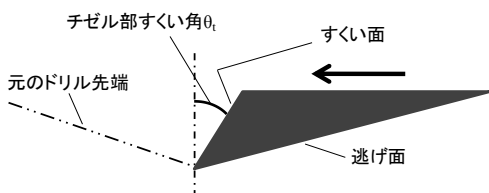


図3 チゼル部すくい角

### 2.4 超音波振動付加の検討

微細加工において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温度が低減するという効果が報告されている<sup>6)~8)</sup>。本研究では、高アスペクト比(L/D)の微細深穴加工に対する超音波振動付加の効果を検討してきた<sup>9)</sup>。前報では、最適な振動振幅の検討を行い、工具寿命が最長となる振動振幅を確認した<sup>10)</sup>。本報では、ステップ量が超音波振動付加の効果に与える影響について検討した。

### 2.5 低周波振動付加の検討

加工時間短縮のためにステップ量を大きくすると切りくずが長くなり、ドリルへの巻き付きが発生しやすくなる。これに対して低周波振動を付加することで切りくずを分断するという報告がされている<sup>11)</sup>。前報では、ドリル刃先とワークの軸方向相対変位から切りくず形状の解析を行った。本報では、切りくず分断が行われる振動条件を評価するための指標について検討した。

ドリル刃先の軸方向変位  $z$  は式1で表すことができる。

$$z(\theta) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{F_d}{F_s} \theta\right) + \frac{f_z \cdot z}{2\pi} \theta \quad (1)$$

ここで、 $\theta$  : 位相  $A$  : 振動振幅(p-p)、 $F_s$  : 振動周波数、 $F_d$  : 工具回転周波数、 $f_z$  : 1刃当りの送り、 $z$  : 刃数となる。

また、 $k$ 回前に通ったドリル刃先の軸方向変位  $z_k$  は式2となる<sup>12)</sup>。

$$z_k(\theta) = \frac{A}{2} \sin\left(\frac{F_d}{F_s} \left(\theta - \frac{2\pi k}{z}\right)\right) + \frac{f_z \cdot z}{2\pi} \left(\theta - \frac{2\pi k}{z}\right) \quad (2)$$

刃先の軸方向切込み厚さ  $h$  は式(3)で表される。

$$h = \begin{cases} z(\theta) - \max[z_1(\theta), z_2(\theta), \dots, z_m(\theta)] & (z(\theta) > \max[z_1(\theta), z_2(\theta), \dots, z_m(\theta)]) \\ 0 & (z(\theta) \leq \max[z_1(\theta), z_2(\theta), \dots, z_m(\theta)]) \end{cases} \quad (3)$$

$h > 0$  のときには刃先とワークが接触し切削が行われ、 $h = 0$  のときには切削は行われないと考えられる。また、 $h = 0$  となる位相が存在する振動条件では、切りくずの分断が行われると考えられる。

一例として工具回転数  $2000 \text{ min}^{-1}$ 、1刃当りの送り  $1 \mu\text{m}$ 、振動周波数  $49.1 \text{ Hz}$ 、振動振幅  $5 \mu\text{m}$ 、刃数2としたときの刃先軸方向変位を図4に示す。塗りつぶされている部分の高さが切込み厚さ  $h$  に相当する。刃先は1回前の刃先が通過した面から

ワークに進入し、3回前の刃先が通過した面から離脱することが分かる。ここで、全時間に対する切込み厚さ $h>0$ となる時間の比率を切削時間比率とする。切削時間比率が1のときには切りくずはつながり、1よりも小さいときには切りくずの分断が期待できる。

また、切削時間比率は工具回転周波数に対する振動周波数の周波数比 $F_v/F_d$ 、及び1刃当りの送りに対する振動振幅の振幅比 $A/f_z$ に対応して決まる。図5に横軸に周波数比、縦軸に振幅比をとり、切削時間比率の値をマッピングしたものを示す。この解析をもとに、切削時間比率と切りくず形状の関係について検討した。

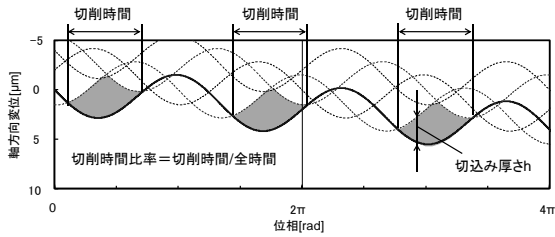


図4 刃先軸方向変位

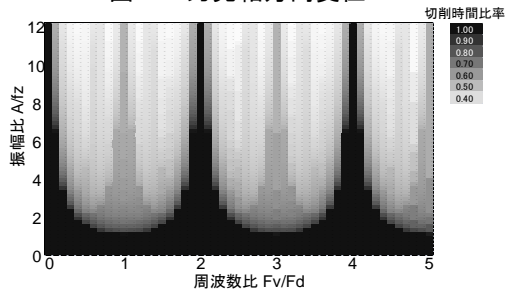


図5 切削時間比率

### 3 加工実験

図6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、周波数可変なピエゾアクチュエータ（(株)メステック製）で低周波振動を付加した。

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の微細付加穴加工を行った。加工条件を表1に示す。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。

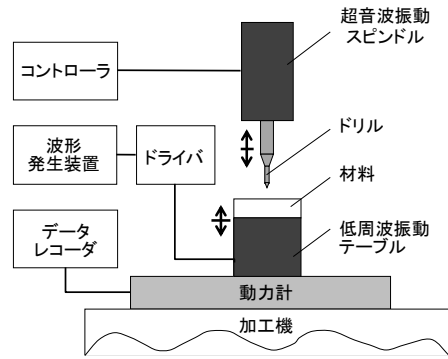


図6 実験システム

表1 加工条件

被削材	SUS304
穴径	Φ0.1mm
加工深さ	1.5mm（通り穴）
回転数	3000～10000 min <sup>-1</sup>
切削速度	1.6m/min
ステップ量	0.01～0.2mm
1刃あたり送り量	0.6～3.0 μm
超音波振動	周波数 40kHz 振幅 1 μm
低周波振動	周波数 ～252Hz 振幅 2～20 μm
ドリル先端形状	チゼル部すくい角 -20° ～+10°

## 4 結果及び考察

### 4.1 加工条件の最適化

ステップ量、1刃当りの送り量、工具回転速度を変化させたときの加工時間及び工具寿命の比較を行った。

図7に1刃当りの送り1 μm、工具回転数5000min<sup>-1</sup>としたときのステップ量と1穴加工時間及び工具寿命の関係を示す。ステップ量を大きくすると加工時間は短縮されるが、工具寿命も低減する。1穴加工時間が目標の1分以内となる0.05mmを基準のステップ量とした。

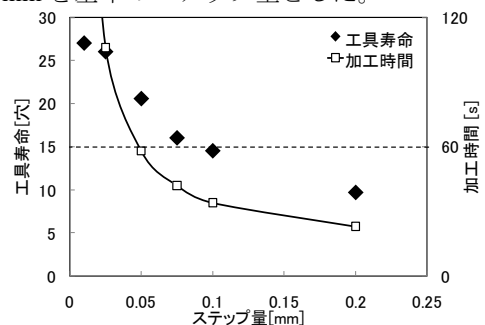


図7 ステップ量の検討

図8に1刃当りの送りと1穴加工時間及び工具寿命の関係、図9に工具回転数と1穴加工時間及び工具寿命の関係を示す。ステップ量と同様に1刃当りの送りや工具回転数を大きくすると加工時間は短縮されるが、工具寿命も低減してしまう。これらの結果より、1刃当りの送り $1\mu\text{m}$ 、工具回転数 $5000\text{min}^{-1}$ を基準条件とした。

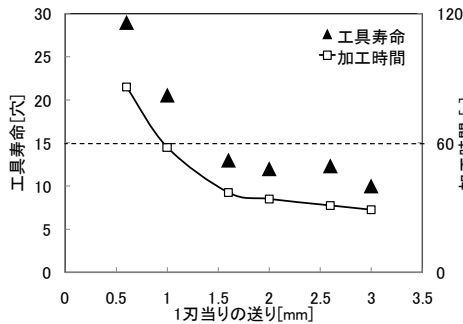


図8 1刃当りの送り量の検討

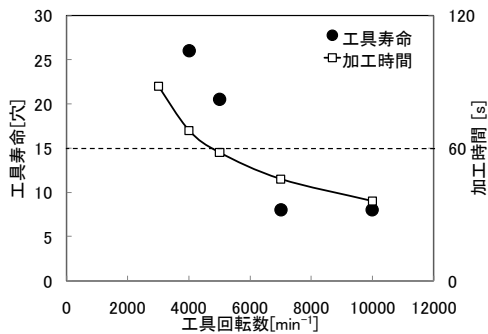


図9 工具回転数の検討

#### 4.2 チゼル部すくい角

基準加工条件としたステップ量 $0.05\text{mm}$ 、1刃当りの送り $1\mu\text{m}$ 、工具回転数 $5000\text{min}^{-1}$ で加工を行い、切削動力、切りくず形状、工具寿命を評価した。

1穴目加工時の切削動力を図10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部すくい角は約 $-60^\circ$ となっている。チゼル部すくい角を大きくするとスラスト力が低減することが分かる。

切りくずを光学顕微鏡で観察したものを図11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12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り、 $-10^\circ$ のときに工具寿命は約2.5倍となり最長となった。すくい角をさらに大きくしたときに工具寿命が減少してしまう原因としては、刃先の強度低下が考えられる。

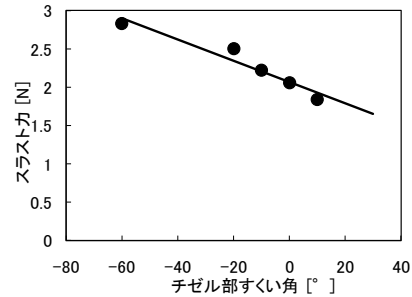


図10 切削動力

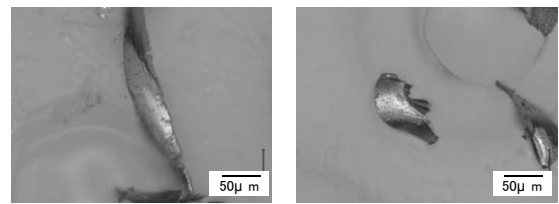


図11 チゼル部すくい角による切りくず形状

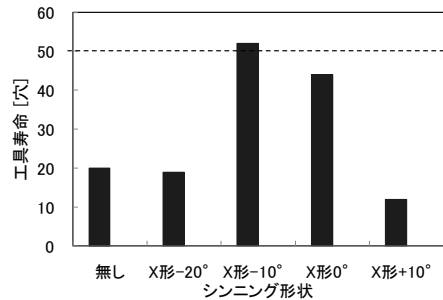


図12 工具寿命

#### 4.3 超音波振動付加

超音波振動を付加し、基準加工条件及び基準条件よりもステップ量を大きくして加工を行い、工具寿命の検討を行った。なお、振動振幅は前報で求めた $1\mu\text{m}$ とした。

図13に1刃当りの送り $1\mu\text{m}$ 、工具回転数 $5000\text{min}^{-1}$ としたときのステップ量と1穴加工時間及び工具寿命の関係を示す。基準加工条件では超音波振動を付加することで工具寿命が約3.5倍となるが、加工時間短縮を狙ってステップ量を大きくすると超音波振動付加の効果が低減した。

これは刃先温度が高温になるためと考えられ、工具回転数の低減や、シンニングドリルの使用等によって改善されると考えられる。

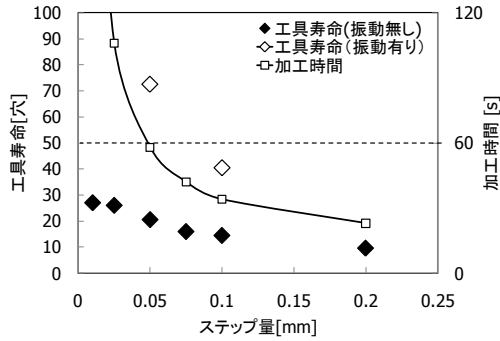


図13 超音波振動付加による工具寿命の検討

#### 4.4 低周波振動付加

周波数比及び振幅比を変化させ、基準加工条件で加工を行った。このときの切りくず形状を評価した。

切りくずを光学顕微鏡で観察したものを図14に示す。この観察によって切りくずが短くなっているものとつながっているものを分類した。その結果を切削時間比率のマッピングに記入したものを図15に示す。切削時間比率が1である振動条件では切りくずが連続し、切削時間比率が0.9以下では切りくずは短くなった。このことから、切削時間比率が切りくず分断を評価する指標として有効であることが分かった。

#### 4.5 複合振動

超音波振動と低周波振動を共に付加し、基準加工条件で加工を行い、このときの切削動力と切りくずの評価を行った。なお、低周波振動条件は、前項で切りくずを分断できた条件のうち、振動エネルギーが一番低い周波数比2、振幅比0.35とした。

図16に加工開始から10穴目までのスラスト力の推移を示す。超音波振動を付加することで切削動力が約30%低減し、低周波振動を付加することで切削動力を低減する効果は無いことが分かる。

図17に切りくずを示す。超音波振動を付加した状態でも低周波振動を重畳すると切りくずを分断できることが分かる。

#### 4.6 併用効果

シンニングを施したドリルを用いて超音波と低周波の複合振動を付加し、基準加工条件で加工を行った。このときの切削動力、切りくずと工具寿命の評価を行った。

図18に加工開始から10穴目までのスラスト力の推移を示す。シンニングしたドリルを用いることで切削動力は約30%低減し、複合振動を付加することで約30%低減する。さらに、シンニングと複合振動を併用すると切削動力は約60%低減した。

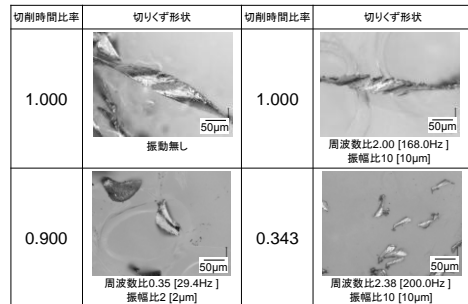


図14 低周波振動条件による切りくず形状

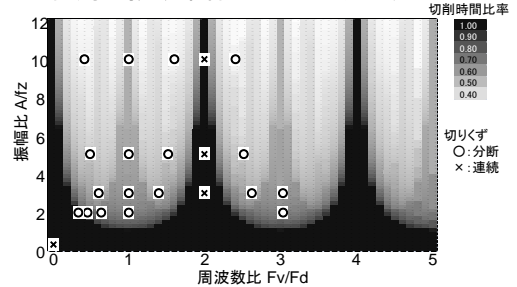


図15 切削時間比率と切りくずの関係

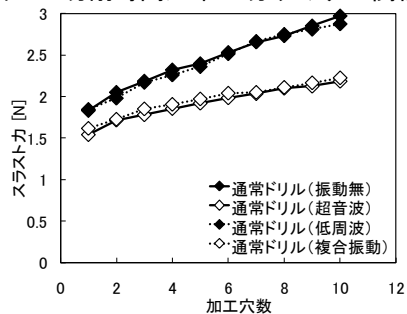


図16 複合振動によるスラスト力の推移

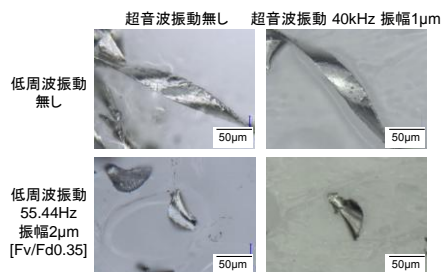


図17 複合振動による切りくず形状

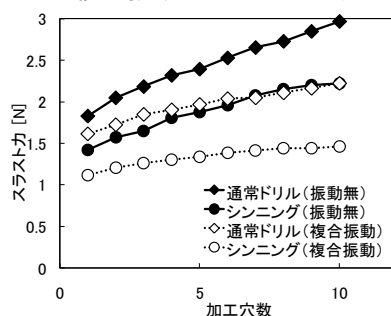


図18 シンニング・振動によるスラスト力

図19に工具寿命の比較を示す。シンニングを施したドリルを用いることで工具寿命が約2.5倍、複合振動を付加することで約6倍、シンニングと複合振動を併用することで約9倍となった。

これらのことから、シンニングと振動付加の効果は独立しており、併用することで相乗効果を得ることができるということが分かった。

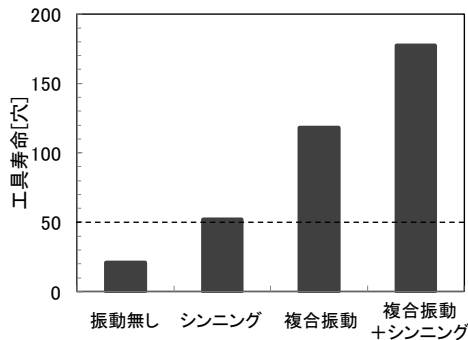


図19 工具寿命

## 5 まとめ

ノズル部材であるSUS304に対する直径0.1mm深さ1.5mmの微細深穴を実用的な条件で加工することについて検討した。

### (1)加工時間を考慮した加工条件

特に加工時間に影響の大きいステップ量を中心に加工条件を検討し、目標加工時間内で工具寿命が最長となる加工条件を確認した。

### (2)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の影響について検討した。チゼル部すくい角が $-10^\circ$ のときに工具寿命が最長となった。

### (3)振動付加

低周波振動付加時の刃先変位を検討し、切りくず分断ができる振動条件の評価指標として切削時間比率を導入した。切削時間比率が0.9以下のときに切りくずが分断されることを確認した。また、超音波と低周波の複合振動を付加することで、超音波振動の切削動力低減効果と低周波振動による切りくず分断効果を得られることが分かった。

### (4)シンニングと振動の併用

シンニングと複合振動を併用するとそれぞれの効果が相乗され、切削動力を約60%低減、工具寿命を約9倍とすることができた。

## 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) 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
- 3) 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
- 4) 南部洋平，落合一裕，秋葉大輔，永久保輝昭：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
- 5) 南部洋平，落合一裕，秋葉大輔，永久保輝昭，松田信一：Co 基超耐熱合金への微細深穴加工に関する研究，精密工学会誌，**75**，(2009)1083
- 6) 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
- 7) 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
- 8) Moriwaki T. , Shamoto E : Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration, Annals of the CIRP, **40**, (1991)559
- 9) 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
- 10) 南部洋平，落合一裕，星秀和：ガスタービン用ノズルへの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，**8**，(2010)87
- 11) 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