

## 高品位微細加工に関する研究 (2)

### — 微細深穴の高品質化に関する研究 —

南部洋平\* 落合一裕\* 江原和樹\*\*

## Study on High Performance Fine Micro Fabrication(2)

### — High Performance Fine Drilling —

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

#### 抄録

ガスタービンや船舶ディーゼルエンジンにおいて、効率の向上や排ガスの低減を実現させるためには、燃料の流量制御や噴射の均一性が重要になってくる。そのためには、ノズル穴の微細深穴化や高品質化が求められる。

ノズル材料に対する微細深穴ドリル加工において、超音波振動切削と微細ドリルへのシンニングを適用し、その効果について検討した。その結果、超音波振動切削によって工具寿命が延び、加工内壁面が滑らかになった。また、シンニングドリルを用いると工具寿命が延び、真直度が向上した。さらに、超音波振動切削とシンニングを複合させることでさらなる工具寿命延長、加工内壁面品質向上、穴真直度向上という相乗効果が得られた。

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ている。

また、船舶用ディーゼルエンジンにおいては、NOx等を削減し、燃費の大幅向上を求める燃料高圧噴射の技術革新（コモンレール方式など<sup>1)</sup>が進んでいる。燃料噴射を高圧にするためには、ノズル径を絞る必要があり、このため燃料噴射ノズルは微細化・深穴化することになる。

ガスタービンや船舶用ディーゼルエンジンにおいて効率の向上、及び排ガスの低減を実現させるためには燃料の流量制御や噴射の均一性が重要に

なり、燃料噴射ノズルの素材である難削材に対する高品質な微細深穴加工が求められている。

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φ0.2mm、深さ4mm(L/D=20)の穴を安定して高品質に加工することを目的とした。超硬ノンコートドリルによる加工を行い、加工時間3分以内となる実用的な条件で、工具寿命50穴以上、穴真直度0.02mm以下を目標とした。

## 2 研究方法

### 2.1 微細深穴ドリル加工の問題点

微細深穴ドリル加工では、切粉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)~3)</sup>。

\* 生産技術部

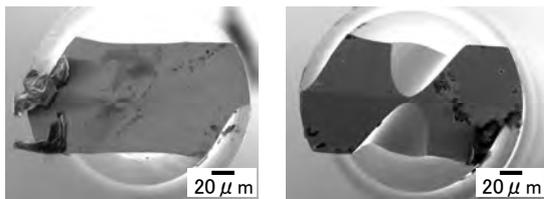
\*\* 日本ノズル精機(株)

## 2.2 加工手法

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>4),5)</sup>。その装置でシンニングを施したドリル(図1)を用いることによって切粉の排出性を向上させ、切削動力を低減させることができた。

また、直径0.2mm、深さ2mm(L/D=10)の微細穴加工において、超音波振動テーブルを用いて振動を付加することにより切削抵抗が低減し、工具寿命が大幅に延びることを確認している<sup>6)~10)</sup>。

そこで、これらの成果を微細深穴加工となる直径0.2mm、深さ4mm(L/D=20)の穴加工へ適用し、その効果について検討を行った。



シンニング無し      シンニング有り  
 図1 微細ドリル先端のシンニング有無

## 2.3 実験装置

図2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。工具取付け時には、図3に示す主軸測定装置(Jeycore、(株)ジェイネット製)を用いて工具の動的な振れ量が1μm以下となっていることを確認した。また、同装置で工具先端位置の測定及び調整も行った。

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。

また、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。

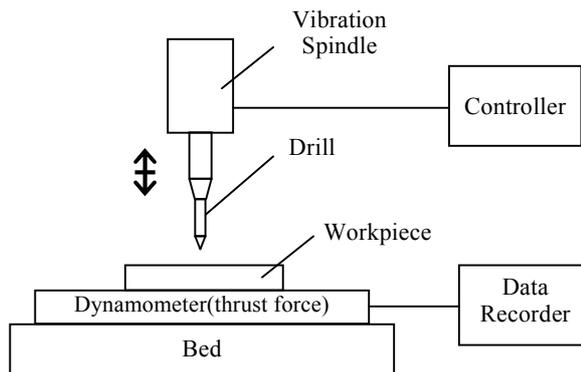


図2 実験システム

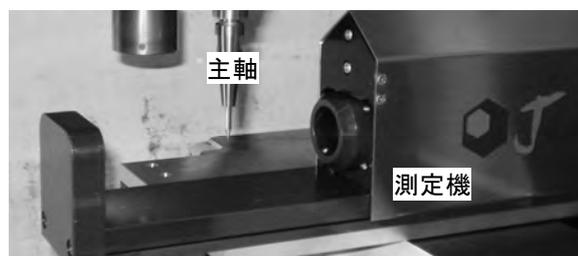


図3 主軸先端振れ測定

## 2.4 加工条件の検討

まず、SUS304に対するΦ0.2mm、深さ4mmの微細深穴に適した加工条件を検討した。高速加工機主軸を用いて、シンニング無しの超硬ノンコートドリルを使用し、超音波振動を付加しない状態で加工を行った。加工条件としてステップ量、切削速度、1刃当たりの送り量について検討した。加工条件を表1に示す。評価は1~10穴目までの切削動力(スラスト力)の推移を比較することによって行った。

表1 加工条件

被削材	SUS304
穴径	Φ0.2mm
加工深さ	4mm (通り穴)
回転数	5000 min <sup>-1</sup> ~15000 min <sup>-1</sup>
切削速度	3.1m/min~9.4m/min
ステップ量	0.025mm、0.05mm 0.1mm、0.15mm
送り速度	12mm/min~48mm/min
1刃あたり送り量	1.2μm~4.8μm
振動	無し
ドリル先端形状	シンニング無し
油剤供給	水溶性切削液 (20倍希釈)

## 2.5 加工手法の比較検討

超音波振動切削の効果、及びドリル先端へのシンニングの効果について検討を行った。加工条件を表2に示す。評価は1~10穴目までの切削動力（スラスト力）の推移、工具寿命の比較によって行った。

表2 加工条件

回転数	2000 min <sup>-1</sup>
切削速度	1.6m/min
ステップ量	0.1mm
送り速度	12mm/min
1 刃あたり送り量	1.5 μm
振動	無し, 有り(40kHz)
ドリル先端形状	シンニング無し, 有り

## 2.6 穴の品質に関する評価

穴の品質評価として穴の真直度を評価した。加工ワークの基準位置からの、X-Y平面における表面穴中心座標と裏面穴中心座標を測定し、その相対的な差を評価した。

また、加工した穴内壁面の観察を行った。加工した穴をワイヤ放電加工により半割れにし、その表面を光学顕微鏡（STM-6、オリンパス(株)製）で観察した。

## 3 結果及び考察

### 3.1 加工条件の検討

加工条件による切削動力の比較を行った。まず、ステップ量による切削動力の比較を図4に示す。このときの切削速度は3.1m/min、1刃当たりの送りは1.2 μmとし、複数回加工を行いその平均をプロットした。ステップ量は加工時間に大きく影響するため、実用的な加工を行うためにはステップ量を大きくする必要がある。しかし、結果からステップ量が大きくなるに従って切削動力は大きくなる。これは、ステップ量が大きいほど1ステップにおけるドリルと材料の接触時間が長くなるため、ドリル刃先温度が上がりやすくなり、刃先摩耗が進行するためと考えられる。

また、ステップ量を0.15mm以上にすると工具寿命が10穴以下になってしまうことが分かった。そこで、ステップ量0.1mmを基準条件とした。

続いて、1刃当たりの送り量による切削動力の比較を図5に示す。このときの切削速度は3.1m/min、ステップ量は0.1mmとし、複数回加工を行いその平均をプロットした。結果より、1刃当たりの送り量を大きくすると、加工初期の切削動力が大きくなる。これは、1刃当たりの送り量が大きいほど切り込み量が大きくなるため、切れ刃への負担が大きくなるためと考えられる。

また、1刃当たりの送り量が小さくなると、切削動力の増加率が小さくなるのが分かる。これは、1刃当たりの送り量が小さすぎると切れ刃で被削材をうまく切り取ることができず、逃げ面摩耗が進みやすいためと考えられる。しかし、4.8 μm以上では10穴以下での工具折損がみられたため、1.2~2.4 μmを基準条件とした。

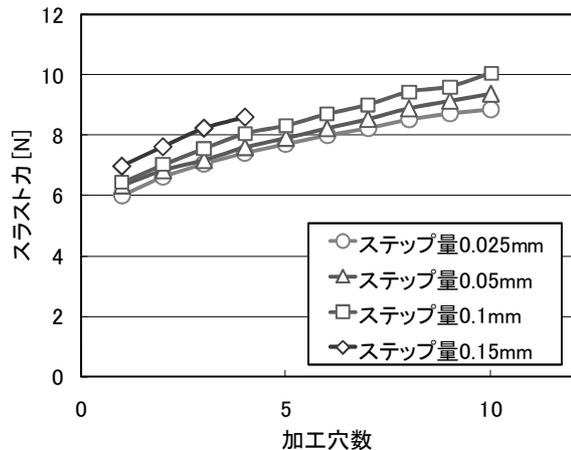


図4 切削動力（ステップ量の比較）

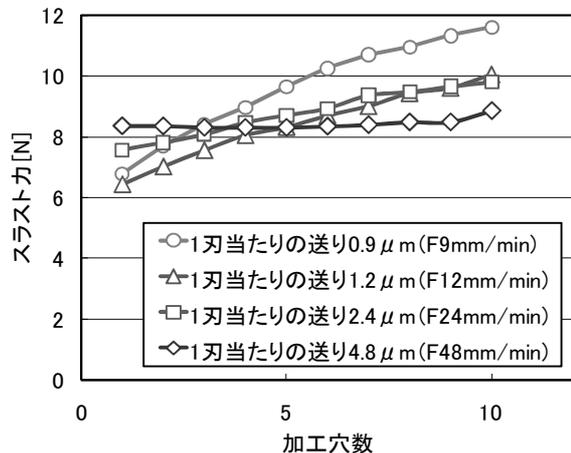


図5 切削動力（1刃当たりの送り比較）

さらに、切削速度による切削動力の比較を図6に示す。このときの1刃当たりの送りは $1.2\mu\text{m}$ 、ステップ量は $0.1\text{mm}$ とした。結果から、切削速度は切削動力には大きな影響を及ぼさないことがわかる。さらに、 $9.4\text{m}/\text{min}(15000\text{min}^{-1})$ 以上とすると1穴目で工具折損をおこすことから、切削動力は小さい方が良いと考えられる。そこで、実用的な加工となるように加工時間3分以内となる範囲で切削速度を小さくした。また、一般的な超硬ノココートドリルの推奨切削条件も考慮した結果、 $3.1\text{m}/\text{min}(2000\text{min}^{-1})$ を基準条件とした。

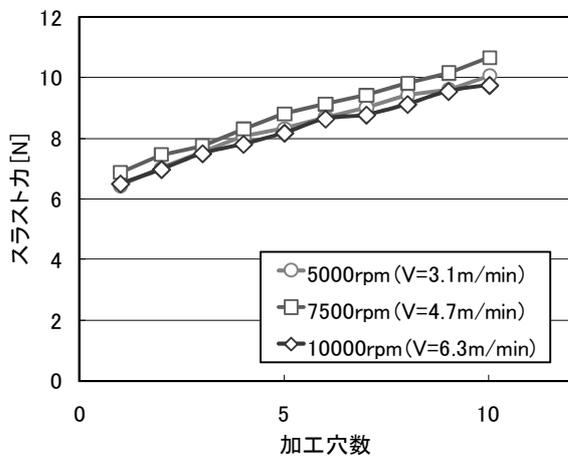


図6 切削動力 (切削速度の比較)

### 3.2 加工手法の比較検討

振動加工に最適化した切削条件を用いて、振動付加、微細ドリルへのシンニングの比較試験の結果を図7に示す。振動付加をすることで、切削動力が約30%低減し、ドリル先端へシンニングを施すことで50%低減する。さらに両方を重ね合わせ

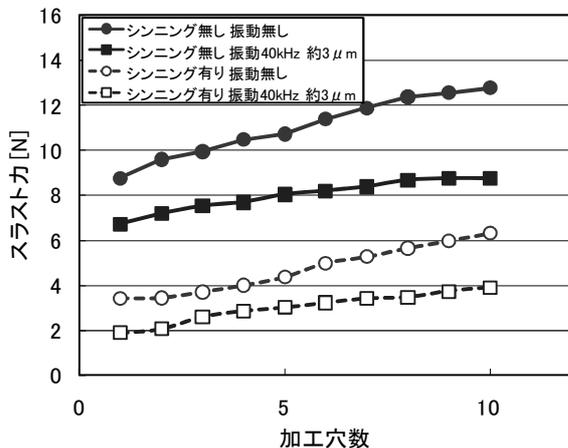


図7 切削動力の比較

ることで70%動力を低減させることができた。

続いて、各手法における工具寿命を図8に示す。工具寿命は振動付加をすることで約3倍となり、ドリル先端へシンニングを施すことで約2倍となる。さらに両方を重ね合わせることで約8倍の長寿命化を実現することができた。これは、微細ロングドリルでは、工具剛性が極端に小さくなるため、通常のドリルに比べて相対的にスラスト方向の切削動力の影響が大きくなるためと考えられる。

### 3.3 穴加工品質の評価

#### 3.3.1 穴真直度

穴真直度を図9に示す。ドリル先端へシンニングを施すことで穴の直進性が増し、真直度を約50%に低減している。これは、シンニングによってドリルの食い付き性が向上したことと、スラスト方向の力が低減したためと考えられる。

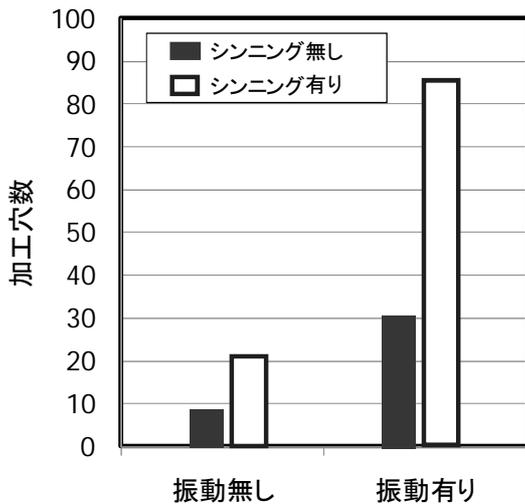


図8 工具寿命

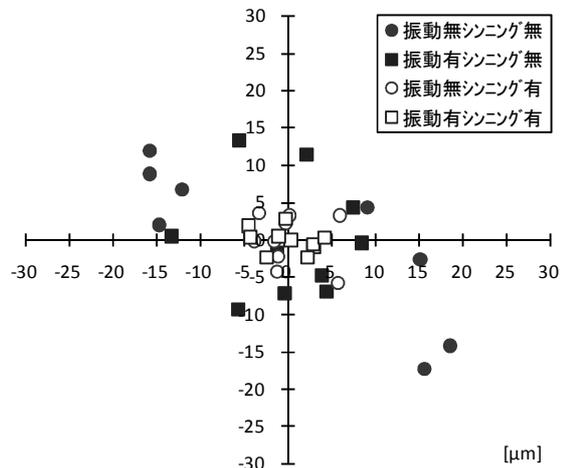


図9 穴真直度

### 3.3.2 穴内壁面

加工した穴をワイヤ放電加工により切断した断面を図10に示す。超音波振動を付加することで、穴内壁面が滑らかになることが分かった。

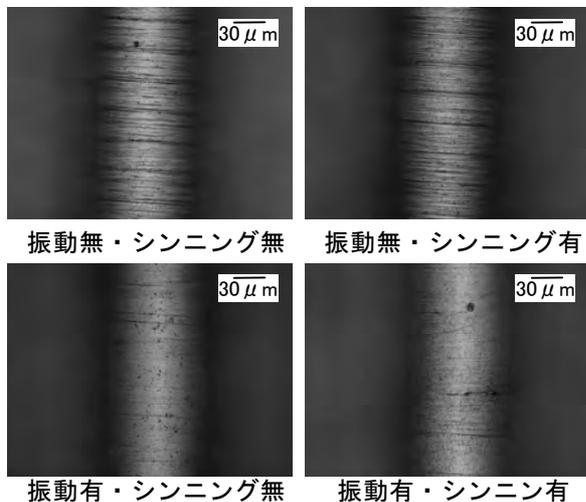


図10 穴内壁面観察

## 4 まとめ

ガスタービンノズル部材であるSUS304に対するΦ0.2mm深さ4mmの微細深穴を安定して高品質に加工することについて検討した。

### (1)加工条件の検討

ステップ量が大きくなるに従って切削動力は大きくなることが確認された。また、1刃当たりの送り量を大きくすると、加工初期の切削動力が大きくなり、1刃当たりの送り量が小さくなると、切削動力の増加率が小さくなることが確認された。

### (2)超音波振動切削及びシンニングの効果

超音波振動の付加及びシンニングドリルの使用によって切削動力の低減、工具の長寿命化を図れることが分かった。さらに両方を重ね合わせることで効果が相乗されることが分かった。

### (3)穴加工品質

シンニングドリルを使用することによって穴の真直度が向上し、超音波振動を付加することによって穴内壁面が平滑化した。

以上のことより、ガスタービンノズルへの微細深穴加工において、シンニングドリルを用いて超音波振動を付加し、切削速度を通常より小さくす

ることで、実用的な加工条件で工具寿命50穴以上、穴真直度0.02mm以下を達成した。

## 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) 三木好信：電子制御 ME 型機関と排気エミッション制御，将来燃料と原動機に関する最新情報講演論文集，日本内燃機関連合会，(2002)2
- 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) 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
- 5) 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
- 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) 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
- 9) Moriwaki T. , Shamoto E : Ultraprecision Diamond Turning of Stainless Steel by Applying Ultrasonic Vibration , Annals of the CIRP , 40(1991)559
- 10) 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，**6**，(2008)97