

高品位微細加工に関する研究

— 微細深穴の高品質化に関する研究 —

南部洋平* 落合一裕*

Study on High Performance Fine Micro Fabrication

— High Performance Fine Drilling —

NANBU Youhei*, OCHIAI Kazuhiro*

抄録

ガスタービンや船舶ディーゼルエンジンにおいて、効率の向上を図ったり排ガスを低減させるためには、燃料の流量制御や噴射の均一性が重要になってくる。燃料の流量や噴射の均一性を確保するためには、難削材に対する高精度かつ内壁面の表面粗さが小さい微細深穴加工が求められる。

微細深穴ドリル加工に対して超音波振動切削を適用し、切削動力や刃先摩耗観察等の加工状態の評価、及び穴内壁面の面粗度等の穴品質に関する評価を行った。その結果、超音波振動加工では慣用加工に比べて切削動力が低減し、工具磨耗が抑制され、工具の長寿命化が図れることが確認された。また、微細深穴をステップ加工することで穴内壁面の表面粗さが小さくなることが分かった。

キーワード：微細深穴ドリル、超音波振動切削、ステンレス加工

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¹⁾）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、難削材に対する高精度で内壁面の表面粗さが小さくなる微細深穴加工が求められている。

そのためには、加工状態の評価に加えて、穴の品質に関わる評価も行う必要がある。

本研究では、ステンレス等の難削材に対して、 $\phi 0.2\text{mm}$ 、 $L/D=10$ 以上の穴を穴内壁面の表面粗さが小さくなるように加工することを目標とした。

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特徴がある。このことから、加工点の温度が非常に高くなるため、工具磨耗が進みやすいといった問題がある^{2)~3)}。

* 生産技術部

2.2 超音波振動付加

これまでの研究において、微細ドリル先端にシンニングを行ったドリルを用いることで、切粉の排出性を向上させ、切削動力を低減できることを示した⁴⁾。

また、小径穴加工においては、超音波振動を付加することにより、穴の加工精度の向上、切削抵抗の低減、ドリルの折損やドリル刃先の凝着物の減少という効果が確認されている^{5)~9)}。

そこで、超音波振動を付加した加工の効果を確かめるため、縦方向に超音波振動するテーブルを用いて穴加工した。

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)を使用した。

この機械は回転数が5000~50000rpmの空気静圧スピンドル^{10)~11)}を搭載し、圧縮空気を供給している状態では回転部に金属接触がないことから、回転精度が高く低振動であり、微細加工には有利であると考えられる。

超音波振動テーブル(エコー技研製)には振動周波数28kHzのものを用いた。また、スラスト方向の切削動力は切削動力計(9254、日本キスラー(株)製)で測定した。

被削材にはオーステナイト系ステンレスSUS304を用いた。被削材は超音波テーブルにボルト止めし、振動がワークに確実に伝わるようにして実験を行った。

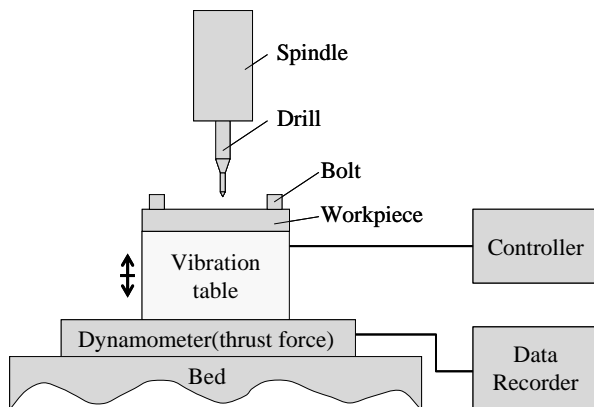


図1 実験システム

2.4 穴あけ加工

超音波振動の有無、振幅の大きさに加えて、切粉の排出性や加工温度に影響が大きいと考えられるステップ量、及び油剤供給方式についても検討を行った。

加工条件を表1に示す。油剤供給方式に関しては、ミストと水溶性切削液(20倍希釈)を比較した。

表1 加工条件

被削材	SUS304
穴径	Φ0.2mm
加工深さ	2mm (止り穴)
回転数	5000rpm
切削速度	3m/min
ステップ量	0.025mm、0.1mm 0.25mm、0.5mm
送り速度	12mm/min
1刃あたり送り量	1.2 μm
振動周波数	28kHz
振幅	無し、3.0 μm
油剤供給	ミスト(約 20ml/hr) 水溶性切削液 (20倍希釈)

2.5 加工状態の評価

慣用加工と超音波振動加工における切削動力、工具刃先摩耗、切りくず、工具寿命などについて評価を行った。

刃先摩耗はSEM(S-2150、日立(株)製)による観察を行い、さらに刃先外周部の摩耗量を図2のように数値化して評価を行った。

また、切りくずを採取し、光学顕微鏡(STM-6、オリンパス(株)製)により観察を行った。

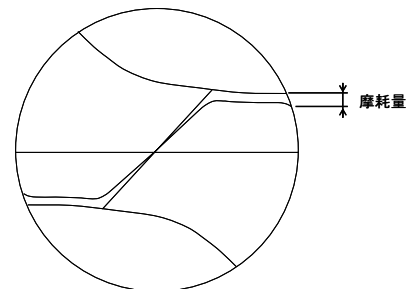


図2 ドリル磨耗量

2.6 穴内壁面の表面粗さ評価

加工した穴内壁面の表面粗さを評価した。加工した穴をワイヤ放電加工により半割れにして表面粗さを測定した。

φ0.2mm以下の穴ではJISに準拠した接触式の粗さ測定機による測定が困難であるため、非接触三次元測定機（NH-3SP、三鷹光器㈱製）で測定を行った。その妥当性を検討するため、被削材に直径0.2mm～1.5mmの穴を加工して、その表面粗さの比較を行った。加工条件を表2に示す。ステップ量と1刃あたりの送り量が同じになる条件で加工を行い、接触式の表面粗さ測定機（1400D-3DF、㈱東京精密製）と非接触三次元測定機で表面粗さを測定して比較を行った。

また、加工した穴の内壁面と、研削加工面、放電加工面の表面粗さの比較を行った。

表2 加工条件

被削材	SUS304
穴径	φ0.2mm、φ0.5mm φ0.8mm、φ1.0mm φ1.5mm
加工深さ	2mm（止り穴）
回転数	5000rpm
切削速度	3.1m/min、7.9m/min 12.6m/min、15.7m/min 23.6m/min
ステップ量	0.025mm
送り速度	12mm/min
1刃あたり送り量	1.2μm
油剤供給	水溶性切削液 (20倍希釈)

3 結果および考察

3.1 切削動力の評価

ステップ量0.025mmで加工を行ったときの、超音波振動有無と油剤供給方式による切削動力の比較を図3に示す。グラフは横軸が加工穴数、縦軸が切削動力(スラスト力)となっている。

ミストの場合は慣用加工と超音波振動加工で切削動力に大きな差はみられないが、超音波振動加工において水溶性切削液を用いたときには切削動力が大幅に低減した。

これは、振動を与えることによって切りくずの

排出性が良くなることや、摩擦が少なくなることが原因と考えられている。

ミストは水溶性切削液に比べて工具寿命が短くなったため、この後の検討は水溶性切削液で行うこととした。

続いて、超音波振動有無とステップ量による切削動力の比較を図4に示す。慣用加工では、ステップ量を大きくしていくと切削動力が増加していくが、超音波振動加工では、ステップ量を大きくしても切削動力はほとんど変わらなかった。

これは、超音波振動を付加したときにはステップ量が大きくなり、工具と被削材の接触時間が長くなっても刃先温度が上がりにくいと考えられる。

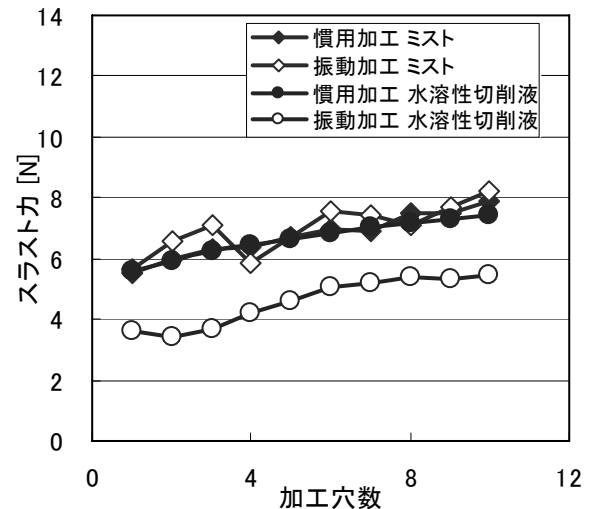


図3 スラスト力
(超音波振動及びびクーラントの比較)

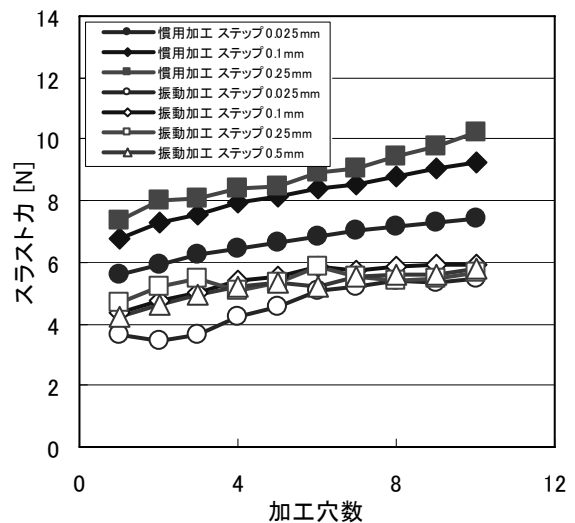
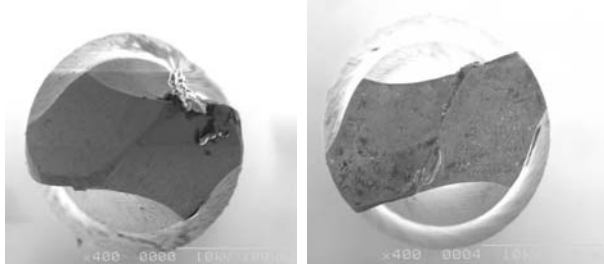


図4 スラスト力
(ステップ量の比較)

3.2 刃先磨耗の評価

ステップ量0.1mmで10穴連続加工した後のドリル先端を図5に示す。刃先磨耗量は慣用加工では約48 μm 、超音波振動加工では約16 μm となり、超音波を付加することで刃先磨耗量が約1/3になることが分かった。

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。しかし、超音波振動加工では全体的に摩耗が少なく、特に外周部で大きな摩耗が発生しなかった。これは、超音波振動加工で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。

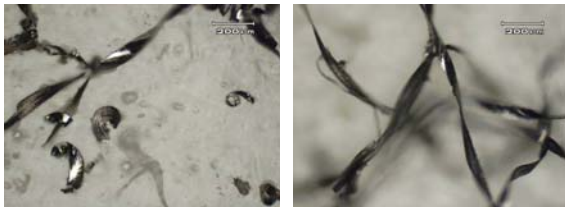


慣用加工 超音波振動加工

図5 刃先拡大写真(10穴加工後)

3.3 切りくずの評価

図6に振動による切りくず形状への影響を示す。慣用加工では切りくず形状が一定しないが、超音波振動加工ではらせん状の切りくずが発生し、切りくずが比較的スムーズに排出されていることが確認された。



慣用加工 超音波振動加工

図6 切りくずの比較

3.4 工具寿命の評価

一般的な加工条件である、ステップ量0.025mmでの慣用加工と、ステップ量をその4倍の0.1mm、つまり加工時間を約1/4としたときの慣用加工と超音波振動加工の工具寿命を図7に示す。

慣用加工では、ステップ量を4倍にすると寿命が約1/2まで低下した。これは切りくずの排出性や、刃先の温度上昇が原因と考えられる。

これに対して、超音波振動加工では、ステップ量を4倍にしたにもかかわらず、工具寿命は約4倍となった。

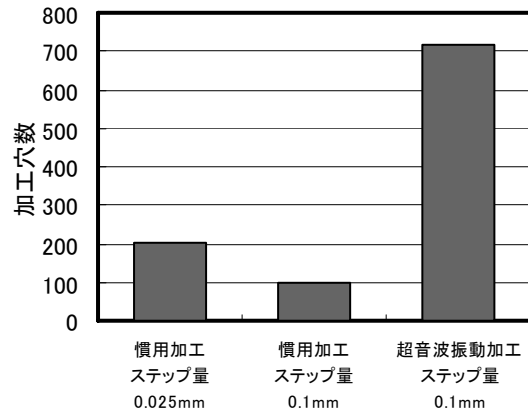


図7 工具寿命

3.5 穴内壁の面粗度評価

加工した穴をワイヤ放電加工により半割れにした断面を図8に示す。

接触式と非接触式の表面粗さ測定機による穴内壁の表面粗さの比較を図9に示す。両方式による明確な違いは認められず、非接触式での測定結果とJISに準拠した接触式ではほぼ同等の測定値と考えてよいことが分かった。

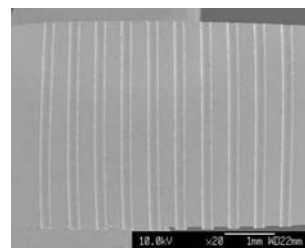


図8 微細穴の断面

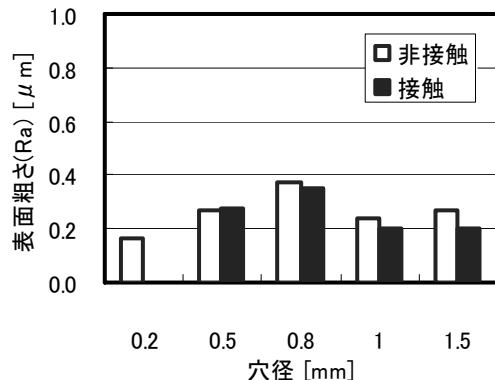


図9 非接触式と接触式の測定粗さ比較

続いて、0.2mm穴の内壁面と砥石(#60)によって加工した研削面、ワイヤカット放電加工による放電仕上げ加工面の面粗さの比較を図10に示す。

穴深さに対してステップ量の小さくなる加工では、穴内壁の面粗さが研削面や放電仕上げ加工面よりも小さくなるのが分かった。

これは、工具の往復回数が多くなるため、工具外周と穴内壁が何度もこすれるためと考えられる。

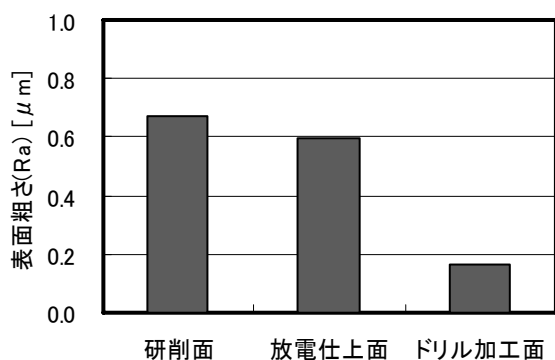


図10 表面粗さの比較

4 まとめ

(1) 超音波振動加工の効果の確認

超音波振動を付加する事によって、慣用加工に比べて切削動力が低減し、工具磨耗が抑制された。

さらに、従来加工条件に対してステップ量を4倍（加工時間1/4）としても、工具寿命が約4倍となった。

また、微細深穴加工においては、ミストよりも水溶性切削液を供給したほうが効果が得られることが分かった。

(2) 穴内壁の面粗度評価

微細深穴をステップ加工すると、研削面や放電仕上げ加工面よりも表面粗さが小さくなることを確認した。

(3) 今後の進め方

今後は、微細深穴ドリルへのシンニングと、超音波振動加工の重畳効果について検討する。

また、貫通穴加工を行い、穴の曲がり量等の評価をする予定である。

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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 原田圭，笹原弘之：超音波振動切削における切削機構に関する研究（第3報），精密工学会誌 71,8(2005)1005
- 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) 百地武：空気静圧軸受搭載高速加工機による微小径穴あけ加工例，ツールエンジニア，39，5(1998)36
- 11) 嶽岡悦雄：マシニングセンタによる金型高効率・高精度加工，機械技術，43，6(1995)24