

超微細加工に関する研究

—ディーゼルエンジン用ノズルの微細深孔加工—

南部洋平* 落合一裕* 秋葉大輔** 永久保輝昭**

Study on Micro Fabrication

—Micro Long Drilling of the Nozzle for Diesel Engine—

NANBU Youhei*, OCHIAI Kazuhiro*, AKIBA Daisuke**, NAGAKUBO Teruaki**

抄録

現在、船舶用ディーゼルエンジンの燃料噴射ノズルに対して $\phi 0.2\text{mm}$ 、深さ4mm(アスペクト比20)以上の微細深孔をあける要望がでてきている。しかし、船舶用ディーゼルエンジンに使用されるステライトは難削材であり、現状では対応できていない。

微細深孔ドリルの刃先に対してシンニング加工を施す装置を開発し、この装置でシンニングをしたドリルによって、切削動力を低減させ、刃先への切粉溶着を抑制することができていることを確認した。さらに加工条件の見直し等を行った結果、 $\phi 0.2\text{mm}$ 、深さ4mmの微細深孔を実用的に加工するために必要な条件である、工具寿命50孔以上を達成することに成功した。

キーワード：微細深孔ドリル、シンニング、燃料噴射ノズル

1 はじめに

近年、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压噴射の技術革新(コモンレール方式など^{1),2)}が進んでいる。

乗用車・トラックでは既に、コモンレール内圧力1800気圧が実現されているが、2004年秋より、船舶用ディーゼルエンジンにも排ガス規制が施行され^{3),4)}、今後も強化が予想されることから、船舶用ディーゼルエンジンにも同方式を適用する必要性が高まってきている。

燃料噴射を高压にするためには、ノズル径を絞る必要があり、このため燃料噴射孔は微細化・深孔化することになる。また、船舶の場合、エン

ジンは航海中、長時間の高負荷(最高出力の85%位)連続運転を強いられるため、燃料噴射ノズルの材料には耐熱・耐摩耗性に優れたステライト^{5),6)}が用いられている。

このステライトに対して燃料高压噴射技術を導入するためには、 $\phi 0.2\text{mm}$ で深さ4mm以上、つまりアスペクト比20以上の微細深孔をあける必要があるが、現状では対応できていない。

そこで、実用的に加工するために必要な工具寿命と加工時間を、表1のように設定して検討した。

表1 目標

孔径	$\phi 0.2\text{mm}$
孔深さ	4mm
アスペクト比	20
工具寿命	50孔/本 以上
加工時間	10分/孔 以下

* 生産技術部

** 日本ノズル精機㈱

2 研究方法

2.1 微細深孔ドリル加工の問題点

微細深孔ドリル加工では、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、切粉のドリル刃先への溶着が発生し易いという問題がある。

また、ドリル先端の中心部分、いわゆるチゼルエッジでは、加工対象物の塑性変形による除去加工になっているため、大きなスラスト方向圧力がかかる⁷⁾。太いドリルであれば、十分な強度があるためその圧力に耐えて加工を行うことができるが、微細径ドリルではドリル自身の座屈を招いてしまう。そのため、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。

2.2 ステライトの被削性評価

難削指数によるレーダーチャートによりステライトの被削性を評価した。山根らが提唱した手法⁸⁾で、材料の物性値である硬さ、引張り強さ、伸び、熱特性をプロットし、切削抵抗、切削温度等の被削性を推測するものである。

図1はS45Cを基準として、難削材といわれているSUS304とステライトを比較したものである。この図から、ステライトは切削抵抗と切削温度が特に問題となることが分かる。

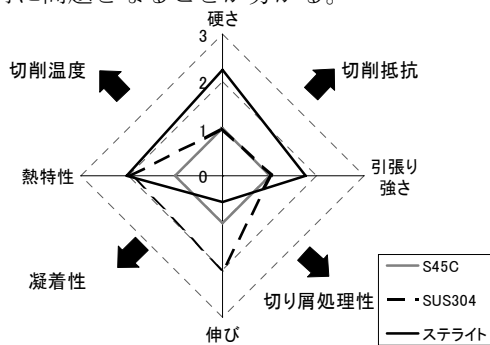


図1 ステライト材の難削指数

2.3 シンニングの検討

これらの問題を解決する手法として、本研究では、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シンニングできる装置の開発を行ってきた^{9~11)}。

そこで、このシンニング装置に対して送りを自動化させる等の改良をして、精度向上を目指し

た。

製作したシンニング装置の精度を確認するため、φ0.8mmのドリルに対してシンニング加工実験を行い、加工位置再現性を検討した。さらにφ0.2mmのドリルに対してシンニング加工を行った。

加工条件は表2のとおり。

表2 加工条件

砥石径	φ40mm
砥石回転数	3000rpm
砥石粒度	#4000

2.4 加工条件の検討

ステライト材への最適な加工条件を検討するため、切削速度、ステップ量、1刃あたりの送り量を変化させて、そのときの工具寿命と加工時間を評価した。加工条件を表3に示す。

表3 加工条件

工具径	φ0.2mm
回転数	5000~50000rpm
ステップ量	12~100μm
加工深さ	4mm
1刃当りの送り	0.3~3.6μm
送り速度	30~360mm/min

2.5 実験装置

実験には、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^{12)~13)}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。

スラスト方向の切削動力の測定には切削動力計(9254、日本キスラー(株)製)を使用し、図2のような構成で実験を行った。

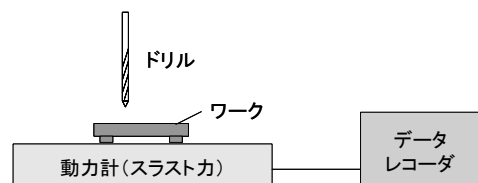


図2 加工スラスト力測定の実験装置

3 結果および考察

3.1 シンニング加工実験

加工再現性の確認を行うため、 $\phi 0.8\text{mm}$ のドリル先端に、同じ加工条件、ステージ移動量で4本連続して加工を行った。ドリル1本につき2カ所加工するため、計8回の加工でのシンニングエッジ先端座標を測定した。結果を図3に示す。

ドリル先端を正面から見たときの横方向を X 軸、縦方向を Y 軸として、シンニングエッジ先端のバラツキをプロットした。

この結果より、本装置の加工再現性が $\pm 4\mu\text{m}$ 以内に収まることが確認され、改良前のものより約 40% 改善されたことが分かる。

3.2 $\phi 0.2\text{mm}$ ドリルへのシンニング加工

開発したシンニング装置によって $\phi 0.2\text{mm}$ ドリルへ加工を行った。先端の SEM 拡大写真を図4、斜めから見た写真を図5に示す。 $\phi 0.2\text{mm}$ の微細径ドリルに対して左右対称にシンニング加工を行うことができた。

3.3 シンニングドリルによる微細孔加工

ステライトに対して、 $\phi 0.2\text{mm}$ 、深さ 4mm の加工を行った時の切削動力を図6に示す。横軸に加工孔数、縦軸に切削動力(スラスト力)を示しており、加工が進むにつれて切削動力が増加している。シンニングを施したドリルは、シンニングをしていないドリルに対して、切削動力が約 20% 低減されていることが確認できた。

10 孔加工後のドリル先端を SEM で観察したものを図7、図8に示す。シンニングを行ったドリルは、チゼル部の溶着が約 25% 低減されていることが確認できた。

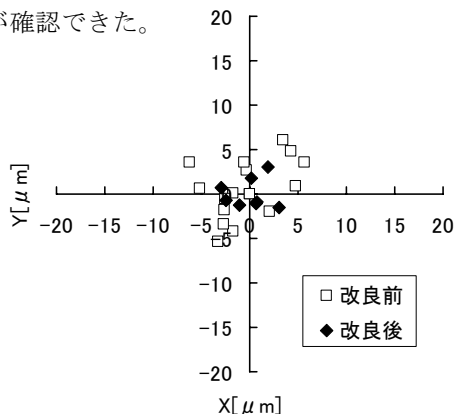


図3 シンニング装置の加工再現性

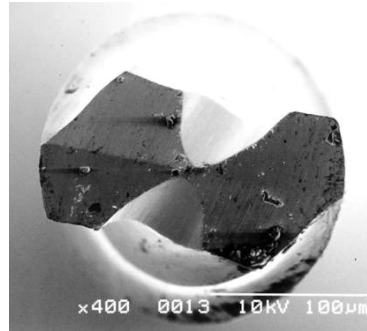


図4 シンニングしたドリル($\phi 0.2\text{mm}$)

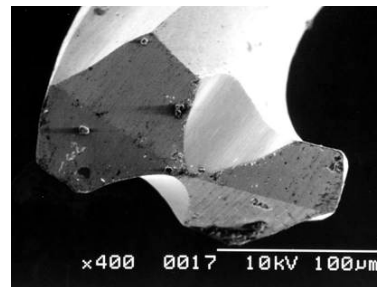


図5 シンニングしたドリル($\phi 0.2\text{mm}$)斜視

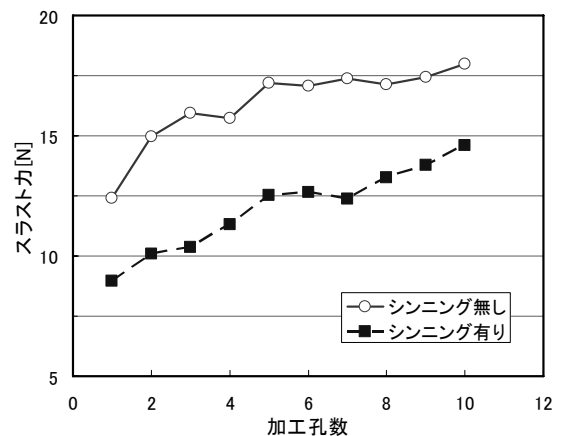


図6 切削動力の比較

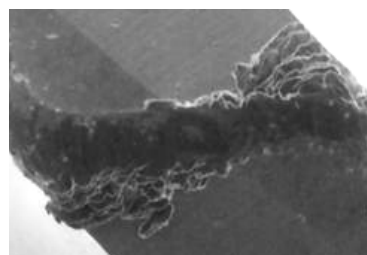


図7 シンニング無し

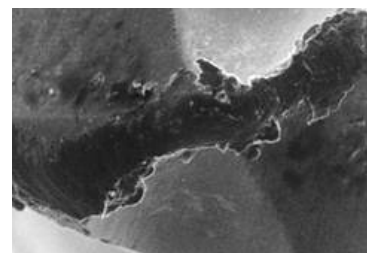


図8 シンニング有り

3.4 加工条件の検討

1 刃当りの送り量を $1.2\mu\text{m}$ 、工具回転数を 50000rpm と一定にし、ステップ量のみを変化させたときの工具寿命、および加工時間の比較を図 9 に示す。

ステップ量を大きくすると、急激に工具寿命が短くなる傾向にある。

これは、切粉を排出しないまま加工を続けるため、切粉詰まりをおこして突発的にドリルが折損してしまうためと考えられる。

しかし、ステップ量を小さくすると加工時間が急激に増加する。目標である 1 孔あたり 10 分以下とするためには、ステップ量は $25\mu\text{m}$ 程度が適当であると考えられる。

続いてステップ量を $25\mu\text{m}$ 、工具回転数を 50000rpm と一定にし、1 刃当りの送り量のみを変化させたときの工具寿命、および加工時間の比較を図 10 に示す。

1 刃当りの送り量 $1.2\mu\text{m}$ のときに、工具寿命が最長となっている。これは、1 刃当りの送り量が小さくなると、刃先がワークを擦るだけで切削が行われ難い状態になってしまうためと考えられる。逆に、送り量が大きくなると、刃先にかかる力が増加してしまうため、早くドリルが折損してしまうためと考えられる。

さらに、ステップ量を $25\mu\text{m}$ 、1 刃当りの送り量を $1.2\mu\text{m}$ と一定にし、切削速度（工具回転数）を変化させたときの工具寿命、および加工時間の比較を図 11 に示す。

一般的に難削材の加工、特にステンレスの加工では、切削速度を小さくすることが必要であると言われているが、ステライトでは、切削速度を 30000rpm 程度まで大きく、つまり工具を高速回転させた方が寿命が延びる結果となった。これは、切削速度が上がるとドリル刃先の温度が上がり、刃先への溶着のバランスが取れるためと考えられる。

また、30000rpm 以上にすると、ドリル外周の切削速度が大きくなりすぎ、磨耗が進むため、若干寿命が短くなると考えられる。

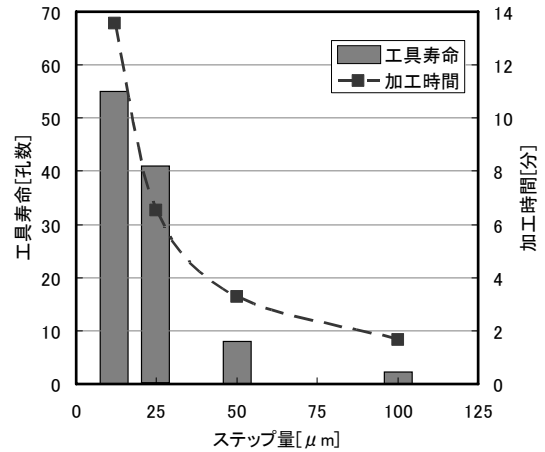


図 9 ステップ量による工具寿命比較

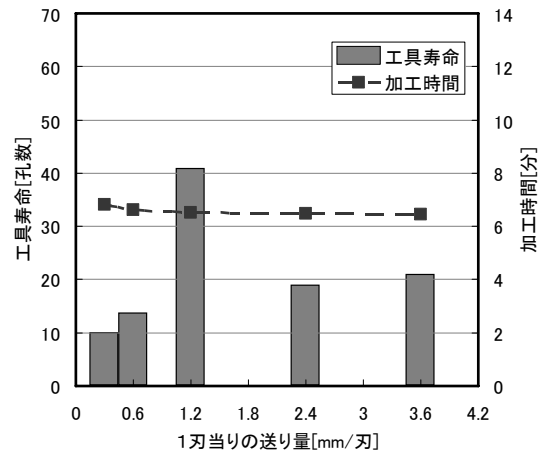


図 10 1 刃あたりの送り量による工具寿命比較

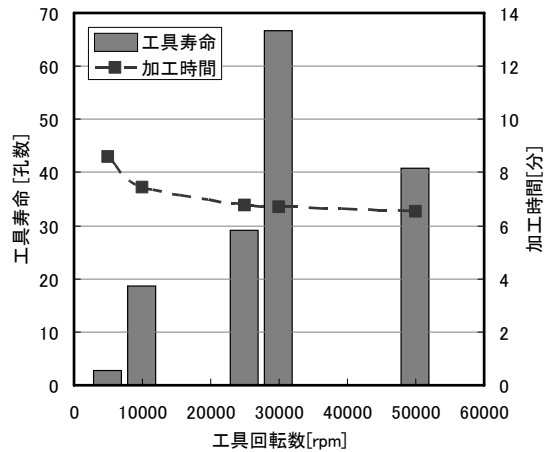


図 11 切削速度(回転数)による工具寿

加工時間に関しては、1 ステップ当りの送り量に対して加工深さが極端に大きくなる微細深孔加工において、1 ステップ毎の上下運動、つまりエアカット時間が非常に長くなる。例えば、ステップ量 $25\mu\text{m}$ 、工具回転数を 50000rpm、1 刃当りの送り量 $1.2\mu\text{m}$ の時には、切削送り時間とエアカ

ット時間の比は約 1:20 となった。しかし、エアカット時の送り速度を速くしすぎると、ドリル側面と加工した孔内壁が突発的に接触し、ドリルが折損する可能性が有る。このような折損が発生しないよう、エアカット時の送り速度を調整することにより、加工時間 3~5 分を達成することは可能であると考えられる。

4 まとめ

(1) シンニングの検討

シンニング装置の改良を行った。加工再現性を評価したところ、バラツキは $\pm 4 \mu\text{m}$ 以下となり、改良前と比べて約 40%改善された。

この装置でシンニングを行ったドリルによって、切削動力の約 20%低減、切粉溶着の抑制が可能であることを確認できた。

(2) 加工条件の検討

ステップ量は小さくするほど工具寿命が延びるが、加工時間を考慮するとステップ量は $25 \mu\text{m}$ 程度が適当であることが分かった。

1 刃当りの送り量は、約 $1.2 \mu\text{m}$ をピークに、これより大きくても小さくても工具寿命が短くなることが分かった。

切削速度（工具回転数）は、ステンレスに代表される難削材とは異なり、高速加工の領域となる 30000rpm で加工すると、工具寿命が最長となることが分かった。

これらの検討により、ステライト材に対して、 $\phi 0.2\text{mm}$ 、深さ 4mm の微細深孔加工を、実用に耐えうる工具寿命50孔以上、加工時間10分以内で行うことができた。

(3) 予想される効果

船舶ディーゼルエンジン用燃料噴射ノズルに対して、実用的に $\phi 0.2\text{mm}$ の微細深孔加工を行うことが可能となった。

これにより、排出ガス規制、燃費規制強化の流れの中で、エンジンメーカーから要求される燃料噴射ノズル噴孔の微細化、深孔化に応えられる技術を確立することができた。

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) 中野良治 他：高出力ガス機関 KU30GA の開発，三菱重工技報，**38**，4(2001)202
- 2) 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
- 3) 船舶に排ガス規制：日本経済新聞，42217(2003)
- 4) 海洋汚染及び海上災害の防止に関する法律の一部を改正する法律，平成 16 年法律第 36 号
- 5) 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)229
- 6) Kathleen Mills：Metals Handbook Ninth Edition, American Society for Metals,(1985)305
- 7) 佐久間敬三 他：ドリル・リーマ加工マニュアル，大河出版，(1992)47
- 8) 山根八州男 他：難削指数による難削性の評価と加工戦略，精密工学会誌，**70**，(2004)407
- 9) 南部，落合，秋葉，永久保：ディーゼルエンジン用ノズルの微細深孔加工，埼玉県産業技術総合センター研究報告，**4**，(2006)79
- 10) 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
- 11) 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 2006-027551
- 12) 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
- 13) 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