

切削による微細深穴加工に関する研究

米山 陽・石黒 輝雄・佐野 正明・清水 毅^{※1}

Study on High Aspect Ratio Micro Hole Drilling

Akira YONEYAMA, Teruo ISHIGURO, Masaaki SANO and Tsuyoshi SHIMIZU

要 約

微細穴の主な加工方法として、切削加工や放電加工、レーザ加工などが挙げられるが、切削加工は汎用的かつ加工速度等に優れており、微細深穴の加工に対して切削加工を適用するメリットは大きい。そこで本研究では、切削による微細深穴加工技術の確立を目的として、切削加工条件の最適化を図ると共に、超音波振動を援用した切削加工によって切削性の改善が可能であるか検討を行った。その結果、超音波振動を超硬ドリル先端に付与したところ、切削抵抗は半分以下に低下した。

1. 緒 言

半導体製造装置や医療機器等では、微細穴を有する小径ノズルや吸着部品が多く用いられており、微細穴を高精度かつ高効率に加工可能な技術が要求されている。微細穴の主な加工方法として、切削加工や放電加工、レーザ加工などが挙げられるが、切削加工は汎用的かつ加工速度等に優れている特徴があり、微細穴の加工に対して切削加工を適用するメリットは大きい。

しかし、微細穴への切削加工の適用は、切削工具も小径となるため折損等の工具損傷が発生し易く、特にアスペクト比（工具径に対する加工深さ）が大きい深穴では、切り屑の排出や刃先の潤滑が困難となり切削抵抗が増大してしまうなど課題も多い。また、これらの部品にはステンレス鋼など切削性が低い難削材料が多用されており、材料特性の面においても厳しい状況にある。

これらの課題を解決する手段の一つとして超音波を援用した切削加工方法がある。これまでの研究ではチタン合金へのタップ加工時において、工具に超音波ねじり振動を付与したところ、切削抵抗が低減する結果が得られている¹⁾。

そこで本研究では、切削による微細深穴加工技術の確立を目的として、切削加工条件の最適化を図ると共に、超音波振動を援用した切削加工によって切削性の改善が可能であるか検討を行った。

2. 実験方法

2-1 実験装置

図1に実験装置概略について示す。実験には、立形3軸マシニングセンタ((株)三井精機工業, VU50A)を使用した。マシニングセンタの主軸テーパには、超音波振動付与装置(多賀電気(株), SD-50)を取り付け、回転中の工具先端に対して工具軸方向への超音波振動付与を行った。使用した超音波振動付与装置の仕様を表1に示す。

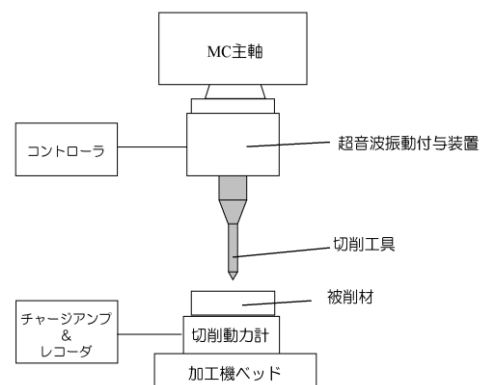


図1 実験装置概略図

表1 超音波振動付与装置仕様

振動方向	工具軸
振動周波数	54.5 kHz
振幅量	3 μm p-p
工具把持方法	コレットチャック
テーパサイズ	No.40 (7/24テーパ)

※1 国立大学法人山梨大学

被削材は、オーステナイト系ステンレス SUS304(40×40×5mm)とし、穴加工部位のみ超硬エンドミルによるポケット加工を行って板厚を 3mm に調整し実験に用いた。加工中の切削抵抗は、圧電式切削動力計(Kistler 製 9256C1)を用いて計測を行い、被削材は動力計上面に六角ボルトを用いて固定した。

2-2 切削条件

切削工具は、市販の超硬合金製ソリッドドリルを用いた。表 2 に使用した切削工具の仕様を示す。ドリル加工点は、スターティングドリル(三菱マテリアル製、先端角 90deg)による下穴加工をドリル径の約 80%となる深さまで実施した。切削油剤は 10%濃度に調整した水溶性エマルジョン形を使用し、深さ 2mm のポケット加工部に事前に切削油剤を満した状態で加工を行った。

切削実験は、表 3 に示す切削条件において行った。工具振れ量は、非接触工具位置測定機(大昭和精機(株)、ダイナビジョン)を用いて計測を行い、工具先端付近で 2μm 以下であることを確認した。

加工深さは、穴径に対する加工深さの比(L/D) 10 を目標とし、板厚 3mm に対する通り穴加工とした

表2 切削工具仕様

工具径	0.3 mm
先端角	120 deg
ねじれ角	30 deg
溝長	5.0 mm
シャンク径	3mm
工具材種	超硬合金(超微粒子)

表3 切削条件

切削速度	5 m/min
主軸回転数	5305 min ⁻¹
1回転あたり送り量	0.004 mm/rev
送り速度	21 mm/min
切削油剤	水溶性エマルジョン形

2-3 ステップフィード加工

深穴のドリル加工では、切りくず詰まりおよびドリルの折損を防止する目的で、ステップフィード加工が適用される場合がある²⁾。ステップフィード加工では、ある一定のステップ量毎にドリルが後退し、断続的に加工が行われる。微細深穴加工においては、特に切りくずの排出および潤滑が課題となるため、ステップ加工の適用効果が高いことが期待できる³⁾。

本研究では、表 4 に示すステップ量にて実験を行い、

適正ステップ量について切削抵抗の比較による検討を行った。

表4 ステップ加工量

ステップ量 Q	0.04, 0.08, 0.16, 0.32 mm
ドリルサイクル	G83

3. 結果および考察

3-1 L/D=10 加工における切削抵抗

図 2 および図 3 に、板厚 3.0mm に対して貫通穴加工を行った際の切削抵抗推移を示す。慣用切削では、切削抵抗が加工開始直後より増大し、加工深さ 1.7mm において工具が折損した。一方、超音波援用切削では、切削抵抗値は慣用切削に比べて約半分以下に低下し、加工深さ 1.5mm 付近まで安定した値を示した後、加工深さ約 2.6mm まで上昇した所で折損が生じた。

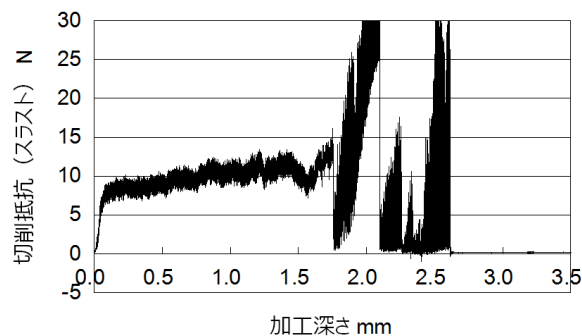


図2 慣用切削における切削抵抗の推移

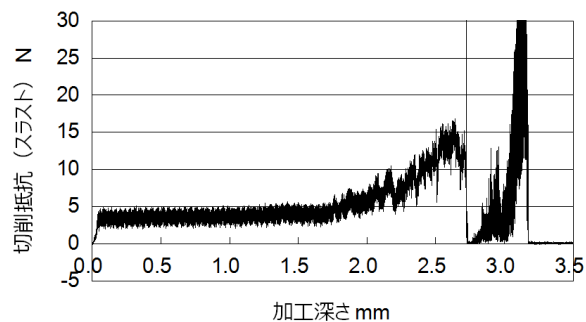


図3 超音波援用切削における切削抵抗の推移

3-2 ステップフィード加工の効果

L/D=10 を目標としてステップフィードを伴わないノンステップ加工を試みたが、超音波援用切削においても L/D=9 付近で工具折損に至ることが判明した。そこで、ステップフィード加工を適用し、同じく板厚 3.0mm に対して通り穴加工を行ったところ、ステップ量 Q=0.04mm において慣用切削および超音波援用切削両

者共、 $L/D=10$ まで加工を達成することができた。図 4 にステップフィード加工における切削抵抗の推移を示す。ノンステップ加工時と同様に、超音波援用切削は切削抵抗が慣用切削の約半分を示すことが分かった。

しかし、 $Q=0.04\text{mm}$ を用いたステップフィード加工の場合、加工時間がノンステップ加工時の約 9 倍に増大している。図 5 は、ステップ量と加工時間の関係について、本実験にて使用したマシニングセンタによる実測値を示している。特に小径工具においては、ステップ量を小さくすることにより、加工時間が増大し易いことが分かる。

そこで、適正ステップ量を見出すため、ステップ量を 0.04mm から 0.32mm まで変化させた際の切削抵抗測定結果を図 6 に示す。超音波援用切削は、切削抵抗が慣用切削より低く、ステップ量が拡大できる可能性があることが分かる。特に慣用切削ではステップ量 0.32mm 時には工具折損が生じており、 0.04mm 以上にステップ量を拡大することは難しいと考えられる。

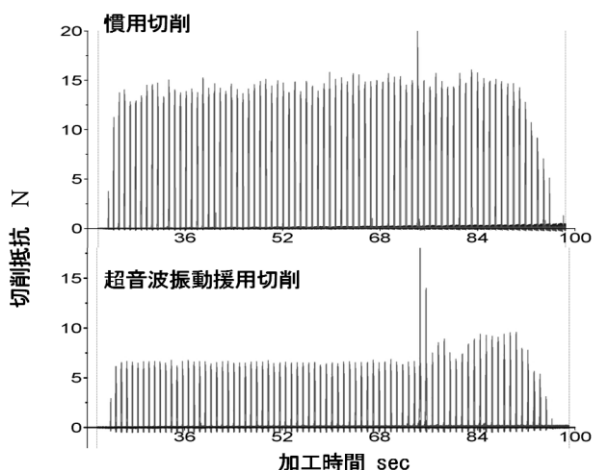


図 4 ステップ加工 ($Q=0.04\text{mm}$) における切削抵抗

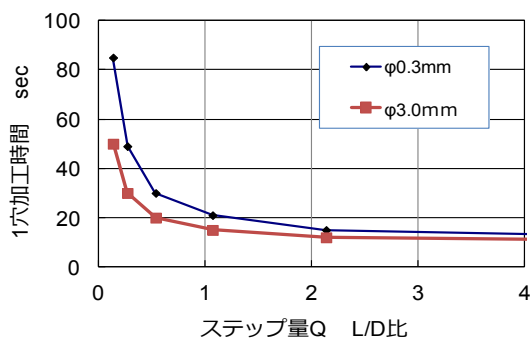


図 5 ステップ量と 1 穴加工時間の関係

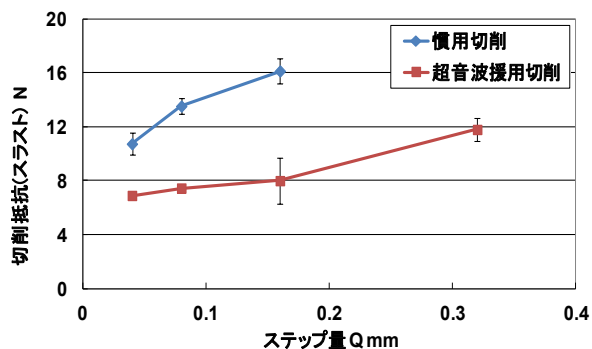


図 6 ステップ量と切削抵抗の関係

3-3 超音波振動付与による効果

本実験にて採取した切りくずを電子顕微鏡(SEM)を用いて観察した結果を図 7 に示す。超音波援用切削では、慣用切削時に比べ、切りくずが分断され細かくなっていることが分かる。また、ステップ量 Q を 0.04mm から 0.08mm に増加させた場合、慣用切削では切りくず長さが増大したが、超音波援用切削では切りくず長さはほぼ変化せず針状のままであり、超音波を援用することにより切りくずの分断効果が得られることが確認された。

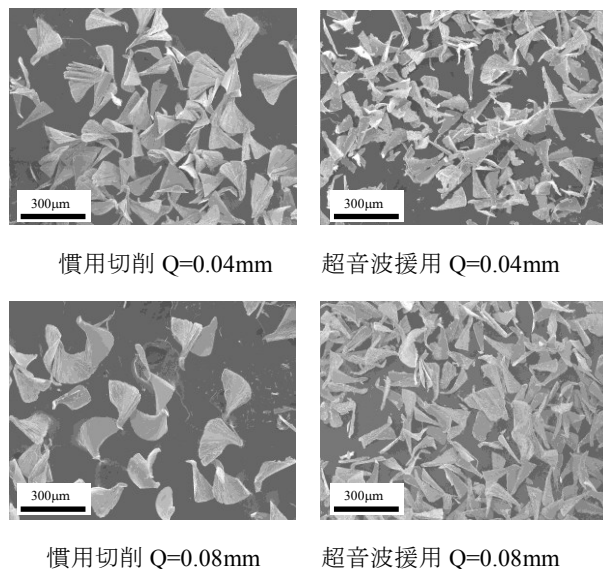
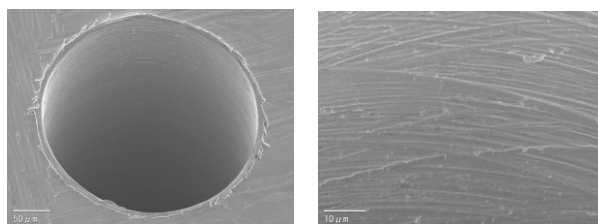
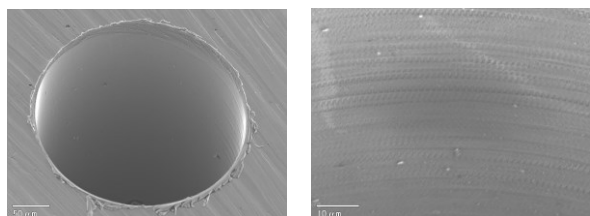


図 7 SEM による切りくず形状比較結果

図 8 に、加工後の穴入口部および壁面について電子顕微鏡を用いて観察した結果を示す。慣用切削においては壁面部にクロスハッチ状の明確なツールマークが見られるが、超音波援用切削では同様なツールマークは認められず、超音波振動に伴う数 μm ピッチの細かな凹凸のみが観察された。



(a) 慣用切削



(b) 超音波援用切削

図8 SEMによる穴入口部および壁面の観察結果

4. 結 言

切削による微細深穴加工技術確立のため、加工時の切削抵抗など各種評価を行った。また、加工中の工具先端に超音波振動を付与し、切削性の改善を試みたところ以下の結果を得た。

- (1) 微細深穴加工における切削抵抗変動状況を把握するため、ステップ動作を行わずドリル折損までの加工深さを計測した。その結果、目標加工深さ 3.0mm に対して慣用切削では 1.8mm でドリルが折損したが、超音波振動付与時は 2.7mm まで加工可能であった。
- (2) 切削抵抗の安定領域で加工を実施するため、工具 10 回転毎のステップ動作を適用したところ、アスペクト比 10 の加工が可能であることが確認できた。また、超音波振動を付与することによりスラスト方向の切削抵抗は、慣用加工に比べて約半分に低下した。
- (3) 加工によって排出された切りくず形状を確認したところ、超音波振動付与時には、細かく分断された針状切りくずとなることが確認された。

参考文献

- 1) 米山 陽, 高尾清利, 他: 山梨県工業技術センター 研究報告, No.23, P.74-75 (2009)
- 2) 日本規格協会: JIS B0171, P.18 (2005)
- 3) 清水 毅, 石川廣明, 石井孝明, 他: 砥粒加工学会誌, Vol.58, No.1, P.42 (2014)