

超音波を援用した切削加工面の高品位化に関する研究

米山陽・萩原義人・石黒輝雄・佐野正明・清水毅^{*1}

Study on an Ultrasonic Assisted for Improvement of Machined Surface Quality

Akira YONEYAMA, Yoshihito HAGIHARA, Teruo ISHIGURO, Masaaki SANO and Tsuyoshi SHIMIZU^{*1}

要 約

脆性材料や高硬度材料の切削加工では、工具の著しい損傷や加工面のチップング等が発生し易く、切削加工により高品位な加工面を得ることが難しい。しかし、汎用性の高い切削加工により高品位な加工面が得られれば、加工コストの削減など、その効果は大きい。そこで本研究では、難削材料への加工に対して有効性があるとされる超音波振動援用切削を適用し、その有効性について検討を行った。その結果、ガラス材料への切削加工において、超音波振動を切削工具に付与することにより、溝輪郭形状精度が向上すると共にチップングが減少することがわかった。また、超音波振動の付与により切削抵抗は大幅に減少し、溝形状加工において超音波振動の援用が有効であることがわかった。

1. 緒 言

近年、 μ -TAS や液晶パネル、金型等の材料として、強化ガラスや超硬合金の活用が増している。しかし、これらの材料は、脆性かつ高硬度な材料特性から難削性を有するため、切削工具の著しい損傷や加工面のチップング等が発生し易く、高品位な切削加工面を得ることは難しい¹⁾。そのため、ガラス材料や超硬合金の加工には、難削材料であるため放電加工やレーザ加工が用いられることが多い。しかし、加工時間や加工コストの課題があるため、汎用性の高いマシニングセンタ等を用いた切削加工の実用化に対する期待は大きい。

著者らが平成 25 年～26 年度に実施した研究「切削による微細深穴加工に関する研究」では、脆性材料への小径ドリルを用いた切削加工において、工具回転と共に工具軸方向に超音波振動を加えることにより、切削抵抗の低減化や加工精度が向上することを明らかにし、超音波振動援用切削が、ガラス材料への小径穴ドリル加工性の向上に寄与することを実証した²⁾。

そこで本研究では、同手法を用いた加工を小径穴加工だけではなく、いわゆるポケット形状等の 3 次元的形状加工に対して応用することにより、脆性材料へのエンドミル加工等においても表面粗さや欠け等が少ない高品位な加工面を得ることを目的とし、超音波振動援用切削の有効性について検討を行った。

2. 超音波振動援用切削

超音波振動援用切削とは、切削中の切削工具または工

作物に微小振動を与えることにより、加工面品質の向上や脆性材料の加工性改善を図る一つの手法である³⁾。切削工具を振動させる手法は種々あるが、本研究では、工作機械のスピンドルと切削工具の間に超音波振動切削装置を取り付け、切削工具に対して工具軸方向への超音波振動付与を行った。工具軸方向への超音波振動を付与することにより、工具先端は被削材と高速に接触・非接触状態を繰り返すことになる。一般的な切削加工では、工具と被削物は常に接触しているため、切削液は切削点へ十分に供給され難いが、超音波振動を付与することにより切削液が供給され、潤滑および冷却性が向上すると共に、微小な切り込みにより切り屑を細かく砕く効果が期待できる。

3. 実験方法

3-1 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ブルには、超音波振動切削装置（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の超音波振動付与を行った。使用した超音波振動切削装置の仕様を表 1 に示す。被削材は、板状（30 mm×30 mm×3 mm）のソーダライムガラス（ $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2$ ）を使用し、加工機テーブルに設置した切削動力計上に、保持治具を介して固定した。保持治具は、ステンレス合金（SUS430）製とし、深さ 5 mm のポケット形状底部に被削材を固定し、被削材上面まで切削液に浸漬可能な構造とした。

*1 山梨大学

表1 超音波振動切削装置仕様

振動モード	工具軸方向
発振周波数	54 kHz±2 kHz
振動子形式	ボルト締めランジュバン型 PZT振動子
振幅量	約2~5 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)

表2 切削工具仕様

工具母材	超硬合金 (超微粒タイプ)
コーティング	多結晶ダイヤモンド (CVD)
工具径	φ 0.3 mm
刃長	3.0 mm

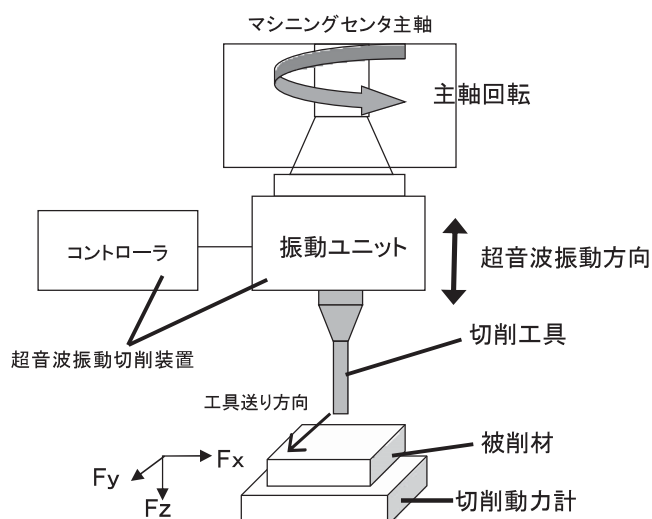


図1 実験装置概略図

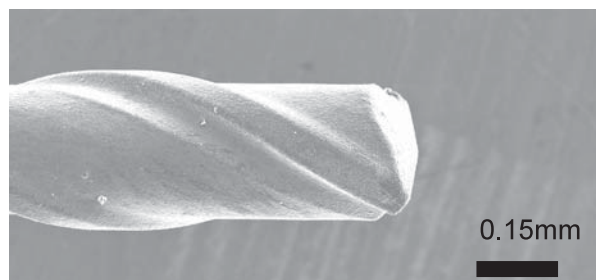


図2 切削工具外観

表3 切削条件

切削速度 V	4.7, 9.4, 18.8 m/min
主軸回転数 S	5000, 10000, 20000 min ⁻¹
送り速度 F	1, 2, 5 mm/min
切削油剤	水溶性ソルブル型切削液

3-2 切削工具

切削工具は、既報²⁾においてガラス材への小径ドリル加工実験により良好な耐摩耗性が認められた、CVDダイヤモンドコーティングタイプの超硬合金製ソリッド工具を使用した。表2に切削工具の仕様を、図2に工具外観を示す。コレットからの切削工具の突き出し量は、54 kHzの発振が得られる長さに調整し、実験に用いた。

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、主軸を10,000 min⁻¹で回転させた状態で、工具先端の振れ量が±4 μm以下であることを確認し、実験に用いた。

3-3 切削条件

切削条件を表3に示す。主軸回転数Sは、5000 min⁻¹、10000 min⁻¹および20000 min⁻¹の3条件とした。また、軸送り速度Fは、1 mm/min、2 mm/minおよび5 mm/minの3条件とした。各切削条件において、超音波振動を付与しない加工（慣用加工）と、超音波振動を付与する加工（超音波援用加工）を行い、比較評価を行った。

加工形状は幅0.3 mm、深さ0.05 mm、長さ2 mmの溝加工とし、Z軸マイナス方向へ切込みを行った後、Y軸を移動させ、G01による直線補間にて加工を行った。

切削油剤は、濃度4%に調整した水溶性ソルブル型切削液（rhenus製TY101S）を使用した。切削油剤は予め被削材を固定した治具のポケット形状部に満たしておき、被削材上面が切削油剤に浸漬する状態で加工を行った。

3-4 加工時および加工後の評価

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、被削材にかかる3方向（Fx, Fy, Fz）の切削抵抗を記録した。

加工後の輪郭形状について、測定顕微鏡（（株）ミットヨ製MF-510TH）にて観察し、加工後の外観および真直度誤差評価を行った。また、底部の表面性状については、コンフォーカル顕微鏡（（株）レーザーテックH1200）により、表面粗さの評価を行った。表面粗さの評価は、工具進行方向に直行する方向において、評価を行った。

4. 結果および考察

4-1 切削抵抗について

図3に、切削抵抗の3分力（Fx, Fy, Fz）を合成した切削抵抗（合力）値を示す。なおS=5000 min⁻¹、F=5 mm/minの加工条件については、工具折損が発生したため、各測定結果から除外している。

全般的に、切削抵抗は送り速度の増加に伴って増大す

る傾向を示すと共に、超音波援用加工時は慣用加工に比べて切削抵抗は半分以下に減少した。もっとも減少率が高かったのは、 $F=2 \text{ mm/min}$ 、 $S=5000 \text{ min}^{-1}$ で加工した場合で、切削抵抗（合力）は約 1/10 に減少した。

また、切削工具に対して曲げの応力となる、加工面に対し水平方向の切削抵抗（ F_x 、 F_y 成分）を合成した値を、図 4 に示す。超音波援用加工時は水平方向の切削抵抗が全ての加工条件において減少し、特に送り速度が大きい $F=5 \text{ mm/min}$ における減少率が最も大きくなる傾向を示した。

4-2 加工部位の輪郭精度について

図 5 に、 $S=10000 \text{ min}^{-1}$ で加工した際の溝部外観を示す。慣用加工では直線形体に曲がり認められ、送り速度 F が増加するとともに真直度誤差が増大している。

図 6 に超音波援用加工時の真直度誤差を測定した結果を示す。慣用切削では送り速度 F の増加に伴って直線的に誤差が増大し、 $F=5 \text{ mm/min}$ 時に最大 $50 \mu\text{m}$ 程度の誤差が発生した。一方、超音波援用加工では、いずれの送り速度においても誤差は $10 \mu\text{m}$ 以下であり、顕著な曲がり認められず、良好な加工精度が得られる結果となった。

溝部形状の誤差は、切削工具が小径であることから、わずかな切削抵抗でも工具が変形し易く、加工プログラム通りの工具軌跡とならなかったと考えられる。超音波振動を付与することにより、水平方向の切削抵抗低減効果が得られ、工具の変形が減少し良好な結果が得られたと考えられる。

チップングについては、送り速度 F が増加するとともに、直線形体の淵部において $50 \mu\text{m}$ 前後の欠けが増加する傾向が見られた。これらのチップングは、超音波振動を付与することにより、同切削条件間の比較においては若干減少している。

更に、送り速度を $F=1 \text{ mm/min}$ とし、主軸回転数 S を変えた場合の加工結果について、図 7 に示す。 $S=5000 \text{ min}^{-1}$ では、 $S=10000 \text{ min}^{-1}$ に比べて $100 \mu\text{m}$ 前後のチップングが増大している。一方 $S=20000 \text{ min}^{-1}$ で加工した場合は、 $S=10000 \text{ min}^{-1}$ よりチップングが減少し、最も良好な加工結果が得られた。

4-3 表面粗さについて

図 8 に、加工後の溝底部表面粗さについて、工具進行方向と直角の方向に測定し、最大高さ R_z で評価した結果を示す。切削抵抗の傾向と同様に、送り速度 F の増加と共に表面粗さ R_z が増大する傾向を示した。送り速度 $F=1 \text{ mm/min}$ または $F=2 \text{ mm/min}$ の時に表面粗さ R_z は極小値となり、本実験で最も小さい値は、超音波援用加工において、 $S=20000 \text{ min}^{-1}$ 、 $F=2 \text{ mm/min}$ の切削条件

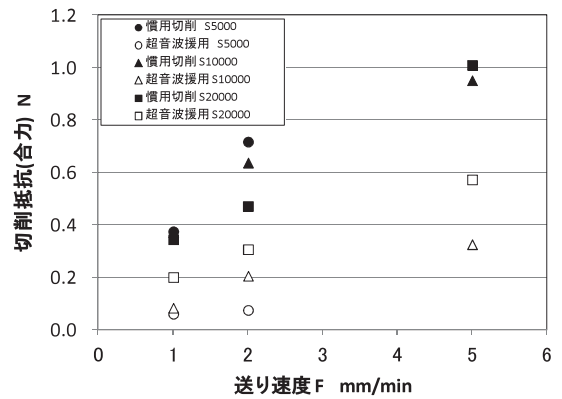


図 3 加工中の切削抵抗（合力）

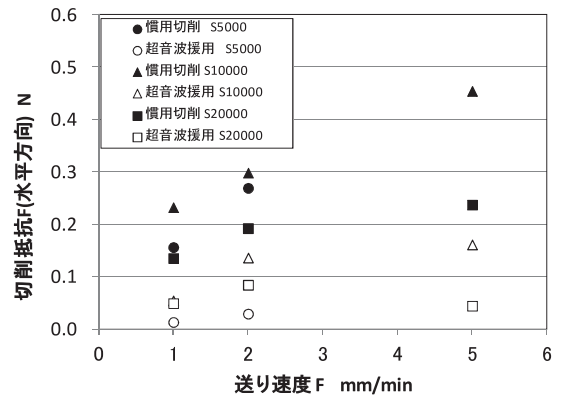


図 4 加工中の切削抵抗（水平方向）

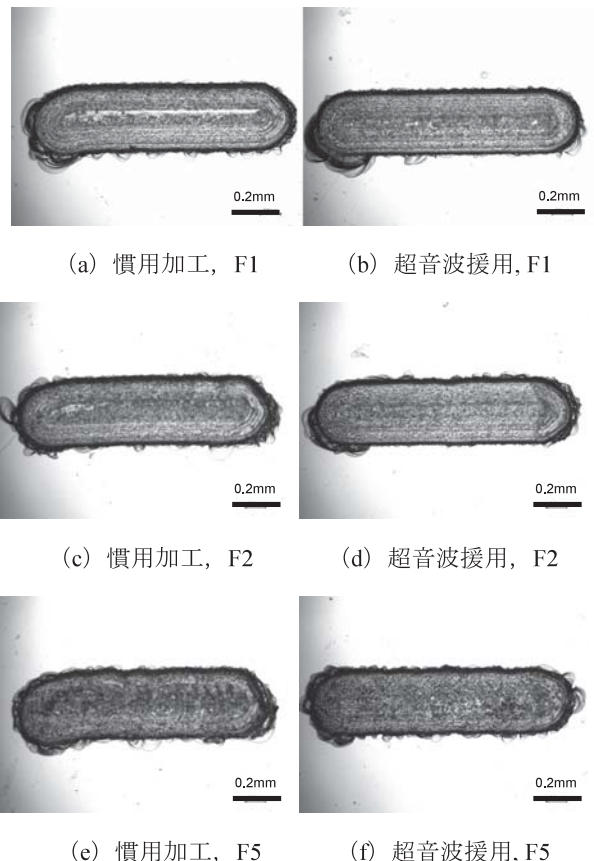


図 5 $S=10000 \text{ min}^{-1}$ による加工結果比較

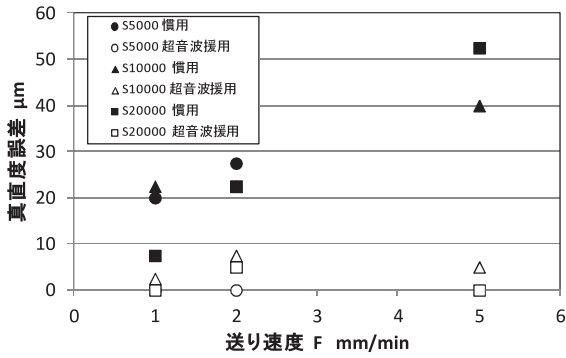
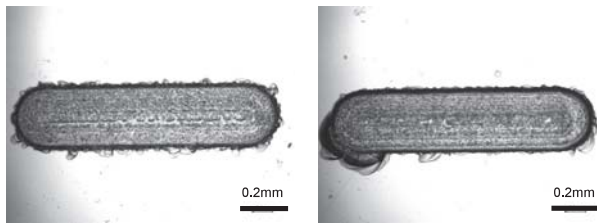
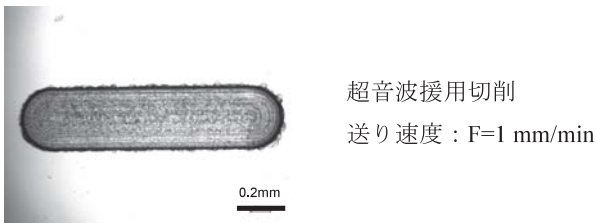


図6 溝真直度誤差の比較結果



(a) S=5000 min⁻¹

(b) S=10000 min⁻¹



(c) S=20000 min⁻¹

図7 主軸回転数の違いによる加工面の変化

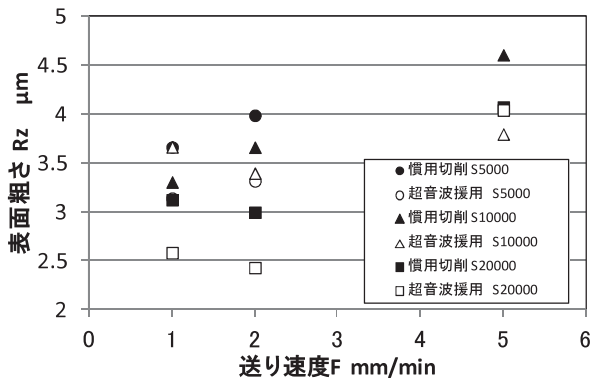


図8 加工溝底部の表面粗さ測定結果

4. 結 言

ソーダライムガラスに対して、φ0.3 mm の超硬工具を用いて溝加工形状の加工を実施し、超音波振動援用切削法の有効性について、加工時の切削抵抗や加工面の各種評価を行ったところ以下の結果を得た。

- (1) 溝加工形状を比較した結果、超音波援用加工は慣用加工より、加工形状誤差およびチッピングは減少した。
- (2) 加工中の切削抵抗は、超音波援用加工は慣用加工より減少する傾向を示し、最大で 1/10 にまで切削抵抗値が減少した。
- (3) 加工後の表面粗さは、送り速度の増加に伴って増大する傾向を示し、超音波振動の付与により表面粗さの向上に若干の効果が認められた。

以上の結果から、超音波援用切削法は、ガラス材料への溝形状加工において有効な加工方法であることがわかった。

参考文献

- 1) 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), pp.24-25 (2002)
- 2) 米山陽 他:切削による微細深穴加工に関する研究 (第2報), 山梨県工業技術センター研究報告, No.29, pp.7-10 (2015)
- 3) 隈部淳一郎:精密加工振動切削 (実教出版), p.17 (1979)

で加工した場合で、2.4 μm Rz であった。

表面粗さ評価を行った 8 種類の切削条件において、超音波援用加工により表面粗さが小さくなった加工条件が 6 条件、ほぼ変わらない条件が 1 条件、増大した条件が 1 条件であった。このことから、超音波振動を付与することにより、表面粗さの向上にも若干の効果があると認められる。