

超音波を援用した切削加工面の高品位化に関する研究（第3報）

－ボールエンドミルを用いた曲面加工への適用－

米山陽・萩原義人・石黒輝雄・佐野正明・清水毅*¹

Study on Ultrasonic Assisted for Improvement of Machined Surface Quality

(3rd Report)

- Application of Ball-End Mill Process to Curved Surface -

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

要 約

脆性材料の切削加工では、工具の著しい損傷や加工面のチッピ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可能となれば、加工コストの削減などその経済的効果は大きい。そこで本研究では超音波振動援用加工法に着目し、その有効性について検討を行った。本報では、ガラス材料を対象とし曲面加工で使用されるボールエンドミルへの適用とその加工精度について検証を行った。その結果、切削抵抗の低減効果やチッピングの減少効果が認められ、ボールエンドミルによる加工においても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、ガラスを用いた電子基板やマイクロ分析チップなどガラス材料を使用した製品が増加しており、それらの部品には目的の機能に応じて微細流路や微細穴など各種形体が加工されている。その形状加工には、エッチング加工やレーザ加工が用いられることが多く、切削加工が用いられる事例は少ない。その理由は、ガラス材料が脆性かつ高硬度な材料特性を有することから加工面のチッピングや切削工具の著しい摩耗が生じるため、一般的には切削加工が困難とされているからである¹⁾。しかし、汎用的で加工精度に優れたマシニングセンタ等を用いた切削による加工実用化に対する期待は大きい。

そこで本研究では、これら課題の解決方法として超音波振動援用加工法に着目した。本加工法は、加工中の工具や素材に対して超音波振動を付加することにより、切削抵抗の減少や切屑排出性の向上効果が期待できる加工方法である²⁾。

既報では、ソーダ石灰ガラスに対してφ0.3 mmのスクエアエンドミルを用いた切削加工時に、切削工具軸に対して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平面形状加工時の加工性向上に寄与するこ

とを実証した³⁾。本報では、平面形状以外の曲面形状に対しても本手法による加工対応を可能とするため、ボールエンドミルによる加工時の切削抵抗測定および表面粗さ等の評価を行い、曲面部加工における超音波振動援用加工法の有効性について検討を行った。

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、主軸サイズ40番の立形3軸マシニングセンタ（株）三井精機工業、VU50A）を使用した。超音波振動の付与は超

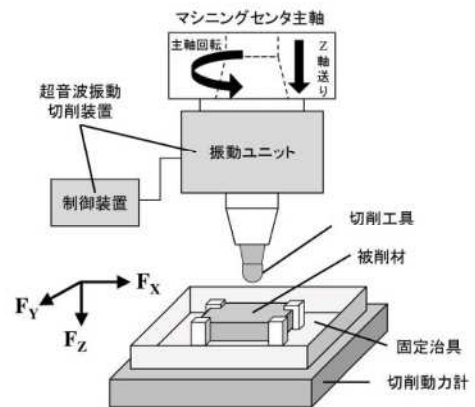


図1 実験装置概略図

*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±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	2~5 μm p-p
工具把持方法	コレットチャック
対応主軸サイズ	No.40 (7/24テーパ)

表2 切削工具仕様

工具形状	ボールエンドミル
工具材種	超硬合金 (ダイヤモンドコート)
工具半径	R0.5 mm
刃数	2枚刃

音波振動切削装置 (多賀電気 (株), SD-50) を使用し, 超音波振動発生部となる振動ユニットをマシニングセンタの主軸に設置し, ボールエンドミル工具は振動ユニット付属のコレットチャックで取り付けを行った. 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.

2-2 切削工具

切削工具は, 曲面部加工に適した超硬合金母材のソリッドスクエアボールエンドミルを使用した. 工具半径は 0.5 mm で 2 枚刃である. コーティングは既報での実験において良好な耐摩耗性を示した, ダイヤモンドコーティングを選択した³⁾. 表2に切削工具の仕様を, 図2に工具外観を示す. 切削工具の把持はコレットチャックを使用し, 切削工具の突き出し量を 54 kHz での発振が得られる長さに調整後, 切削加工実験に用いた.

2-3 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 (F_x , F_y , F_z) の切削抵抗を記録した.

加工後は, 加工面形状を測定顕微鏡 ((株) ミットヨ, MF-B2010D) を用いて観察し, 淵部のチップング状況等を評価した. また, 加工面の表面性状については, 表面粗さ輪郭形状測定機 ((株) 小坂研究所, DSF1000) により, 加工部底面の表面粗さについて工具進行方向とピックフィード方向の 2 方向で評価を行った.



図2 切削工具外観

表3 切削条件

	条件A	条件B
主軸回転数	10000 min ⁻¹	10000 min ⁻¹
送り速度	100 mm/min	2 mm/min
軸方向切込み	0.075 mm	0.020 mm
ピックフィード	0.1 mm	0.1 mm
超音波援用	有, 無	有, 無

2-4 切削条件

使用した切削条件を表3に示す. 切削条件は, 切削工具メーカーが提示している高硬度・脆性材料向けの標準条件に準じた切込み量の条件 A と, 既報のスクエアエンドミル加工において良好な結果を示した条件 B の 2 条件とし, それぞれの条件で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.

評価加工形状は, ボールエンドミル加工は緩斜面および平坦部での表面粗さが特に悪化する傾向にあることから⁴⁾, 平面加工により評価を行った.

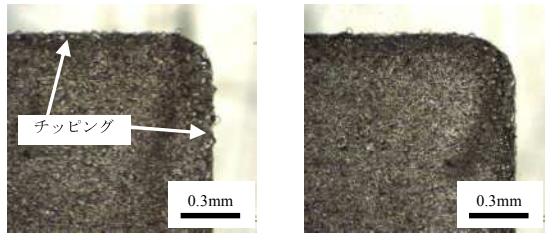
切削油剤は, 濃度 4%に調整した水溶性ソルブル型切削液 (rhenus 製 TY101S) を使用した. 切削油剤は被削材を固定した治具内を予め満たしておき, 被削材上面が切削油剤に浸漬する状態で加工を行った.

3. 結果および考察

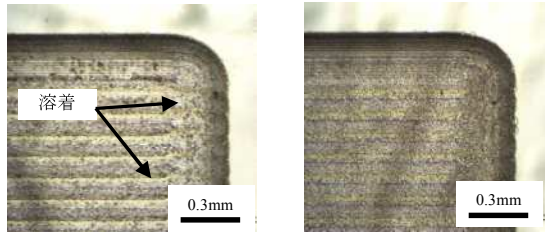
3-1 加工面性状

図3に, 加工面を測定顕微鏡により拡大観察した結果を示す. 条件 A による加工面は, 不規則な脆性破壊面が支配的であり, 加工面全体にチップングが発生し超音波援用時においても同様な加工面となった. また, 非加工部との境界に発生したチップングは, 超音波援用時に若干減少した.

次に条件 B による加工面は, 超音波援用の有無に関わらず, ボールエンドミルで生じた規則的なツールマークが目視で確認され, 脆性破壊の少ない加工状況であったと言える. このことから, 本材料の加工では条件 B は条件 A より表面性状の観点から適切と判断される.



(a) 条件 A, 慣用 (b) 条件 A, 超音波援用



(c) 条件 B, 慣用 (d) 条件 B, 超音波援用

図 3 加工面の顕微鏡写真

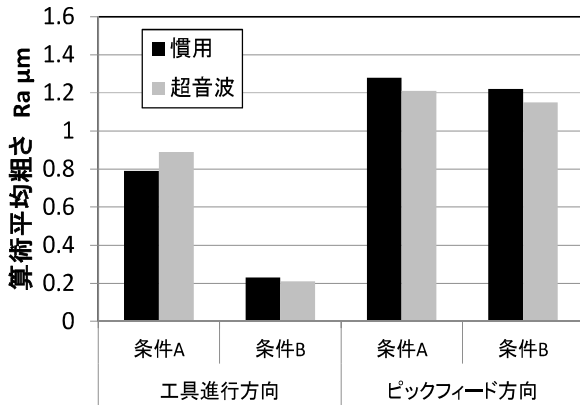
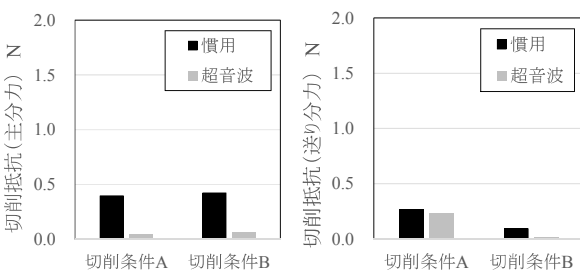
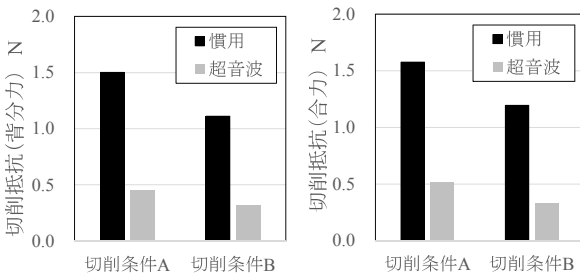


図 4 加工面の表面粗さ



(a) 主分力 (b) 送り分力



(c) 背分力 (d) 合力

図 5 加工時の切削抵抗

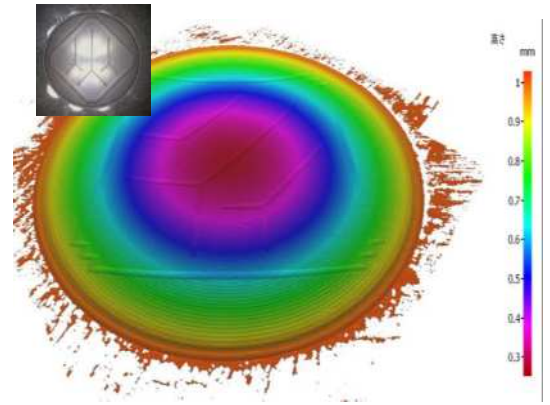


図 6 曲面形状加工サンプル

図 4 に、加工面の表面粗さを測定した結果を示す。条件 A と条件 B を比較すると、工具進行方向に測定した表面粗さは $0.8 \mu\text{m Ra}$ から $0.2 \mu\text{m Ra}$ まで減少している。これらのことは、送り速度が条件 B は条件 A より低いことから 1 刃当たりの送り量が小さくなったためと考えられる。また、ピックフィード方向の表面粗さについては、送り速度よりピックフィード量の影響が支配的であることから 2 条件間では変化が少なかったと考えられる。

次に条件 B に超音波援用を用いた加工面は、表面粗さの値が若干ではあるが減少する傾向が見られた。このことは、条件 B における慣用加工では、加工面に切り屑の溶着が発生しているが (図 3 (c))、超音波援用時には刃先の潤滑と冷却が促進され、溶着が消失したこと (図 3 (d)) により、表面粗さが小さくなったと考えられる。

3-2 切削抵抗

図 5 に、切削抵抗の 3 分力 (F_x, F_y, F_z) と三成分を合成した切削抵抗 (合力) 値を示す。超音波援用時は、加工条件 A, B 共に切削抵抗が低下する傾向を示し、主分力および背分力は特に大きく減少した。合力で比較した場合には、切削抵抗が超音波援用時はおよそ 1/3 に低下することがわかった。超音波援用による表面粗さの向上は若干であったが、切削抵抗値は大きく減少している。このことは、超音波振動を援用することにより、小径工具および薄肉材料を使用した加工時に、工具や被削材の変形を減少させ、加工精度の向上が期待できること示している。

3-3 ボールエンドミルによる曲面形状加工

最後に、ソーダライムガラスに対して凹面形状と凹面部への溝加工を組み合わせさせたサンプル加工事例を示す。凹面部の曲率は $R=30 \text{ mm}$ とし、 $R=0.5 \text{ mm}$ のボールエンドミルを用いて、超音波援用を行いつつ条件 A で荒加工を、条件 B で仕上げ加工を行った。図 6 に、全焦点三次元形状測定装置で加工形状を測定した結果を示す。

ボールエンドミルによる滑らかな曲面の生成が確認でき、CADモデルとの形状偏差を評価したところ $\pm 8.4 \mu\text{m}$ (2σ)であった。

4. 結 言

ソーダライムガラスに対して曲面形状加工を目的とし、ボールエンドミル加工における超音波振動援用加工法の有効性について、加工時の切削抵抗やチッピング量の評価等を行ったところ以下の結果を得た。

- 1) 超音波振動の援用により加工面への溶着が減少し、表面粗さは小さくなる傾向を示した。
- 2) 加工中の切削抵抗は、超音波振動の援用により合力でおよそ1/3に低下した。

以上の結果から、超音波援用加工法は、ガラス材料へのボールエンドミルを用いた曲面形状加工においても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) 隈部淳一郎 精密加工振動切削 (実教出版), p.17 (1979)
- 3) 米山 陽, 他 超音波を援用した切削加工面の高品位化に関する研究, 山梨県産業技術センター研究報告, No.31, pp.56-60 (2017)
- 4) 高尾清利, 他 金型鋼における高品質表面創成に関する研究, 山梨県工業技術センター研究報告, No.23, pp.108-112 (2009)