

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2報）

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 (2nd Report)

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、平面加工で使用されるスクエアエンドミルへの適用とその効果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、スクエアエンドミル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、ガラス材料を用いた電子基板やスマートフォンの外装部品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とする機能に応じて微細穴加工など各種加工が施されている。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し、汎用的な加工方法である切削加工を適用することが一般的には難しい¹⁾。そのため、エッチング加工やレーザ加工等が用いられることが多いが、汎用性が高く加工精度も得られやすい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。しかし、ガラス材料等に切削加工を行うと切削工具の著しい摩耗や加工面のチッピングが生じるなど課題が多く、高品位な加工面を得ることが難しいのが現状である。

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、難削材加工において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⁾。これまでの研究成果では、ソーダライムガラスに対して $\phi 0.3$ mmの小径ドリ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加工性の向上に寄与することを実証した³⁾。しかし、加工形状の要求としては穴形状以外にも楕円や溝形体な

どエンドミル工具を必要とする箇所が多く、ドリル加工のみでの対応は難しい。

そこで同手法による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。前報⁴⁾においては、先端が円錐形状の切削工具を使用し、溝加工の検討を行い、超音波振動援用加工を行うことにより、慣用加工よりチッピングが減少し、真直度が向上することを示した。本報では、ガラス材料に対して、スクエアエンドミルによる平面形状加工を行うことを目的として、加工時の切削抵抗測定および表面粗さ等の評価を行い、平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、切削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。

*1 山梨大学

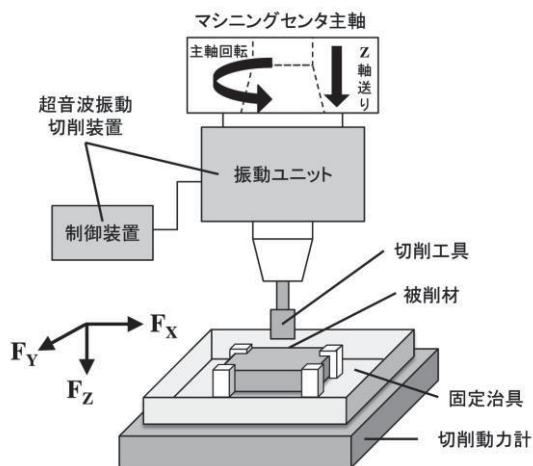


図1 実験装置概略図

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)

被削材は、板状 (30 mm × 30 mm × 3 mm) のソーダライムガラス (Na₂O-CaO-SiO₂) 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、平面部加工に適した超硬合金母材のソリッドスクエアエンドミルを使用した。エンドミル径は 0.3 mm で 6 枚刃である。ガラス材料の加工では、高硬度鋼加工等で多用される TiAlN 等のコーティングでは工具摩耗が極めて速く進行するため、実用的な加工は不可能である。そこで、小径ドリルを使用した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は、54 kHz での発振が得られる長さに調整後、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、工具シャンクの振れ量が ±4 μm 以下であることを確認し、実験に用いた。

表2 切削工具仕様

工具形状	スクエアエンドミル
工具材種	超硬合金 (ダイヤモンドコーティング)
工具径	φ0.3 mm
刃長	0.15 mm
刃数	6枚刃

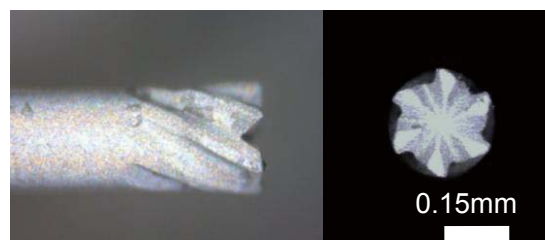


図2 切削工具外観

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

2-3 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, 目標深さ 0.05 mm, 長さ 2 mm の直線加工とし、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。切削油剤は被削材を固定した治具のポケット形状内側に予め満たしておき、被削材上面が切削油剤に浸漬する状態で加工を行った。

2-4 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。

加工後のチッピング等について、測定顕微鏡 (株) ミットヨ製 MF-B2010D) を用いて観察し、同時に縁部のクラック長さの計測を行った。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

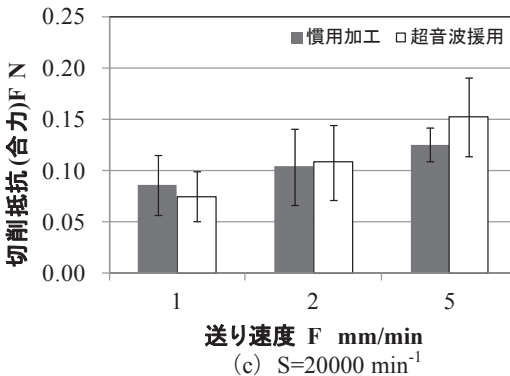
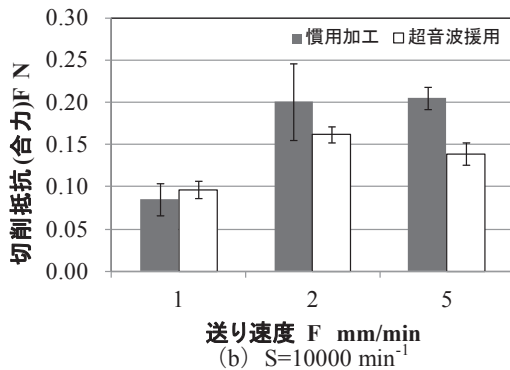
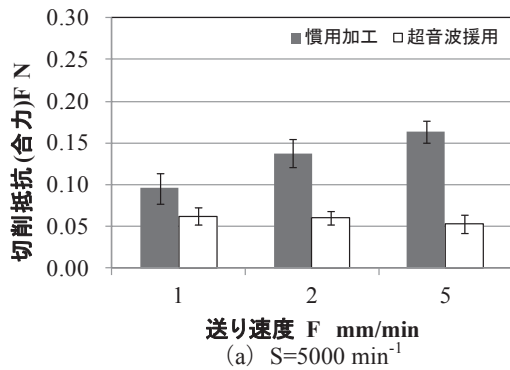


図3 加工中の切削抵抗 (合力)

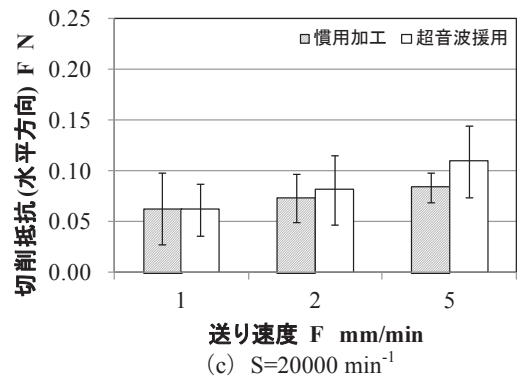
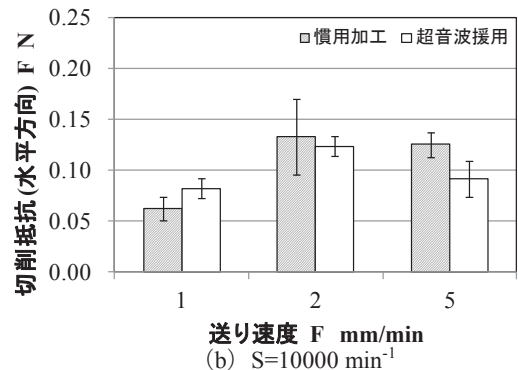
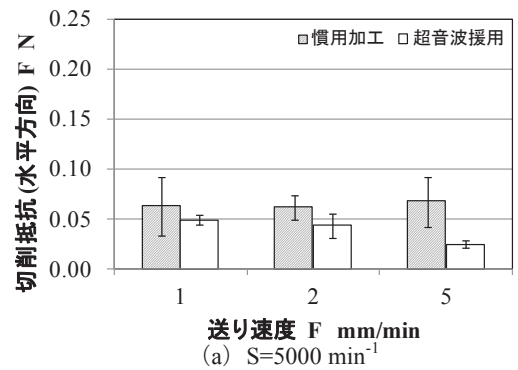


図4 加工中の切削抵抗 (水平方向)

研究所 DSF1000) により, 加工部底面の表面粗さ評価を行った. 表面粗さの評価は, 工具進行方向と同方向による, 評価を行った.

3. 結果および考察

3-1 切削抵抗

図3に, 切削抵抗の3分力 (F_x , F_y , F_z) を合成した切削抵抗 (合力) 値を示す. 慣用加工では, 切削抵抗は送り速度の増加に伴って増大する傾向を示し, $F=5$ mm/min 加工時が最も高い値を示した. 回転数の違いによる切削抵抗の差異は顕著には認められず, 慣用加工時の切削抵抗は, 送り速度の違いが支配的であることがわかった.

一方, 超音波援用加工時の切削抵抗は, $S=5000$ min⁻¹ および $S=10000$ min⁻¹ 時において慣用加工より低下する傾向を示し, $S=5000$ min⁻¹ 時にはいずれの送り速度条件

においても平均値で 40~60%減少した. $S=10000$ min⁻¹ 時は, $F=2$ mm/min および $F=5$ mm/min において減少傾向が見られ慣用加工時より 20~30%減少したが, $F=1$ mm/min では切削抵抗値の変化に有意な差は見られなかった.

また, 切削工具に対して曲げの応力となり加工精度に影響を及ぼす水平方向の切削抵抗 (F_x , F_y 成分) を合成した値について図4に示す. 合力値と同様に $S=5000$ min⁻¹ 時が超音波援用加工により切削力低下の効果が最も大きくなることがわかった.

これらの結果から, 一般的に小径エンドミルを用いた鋼材等の切削加工では一般的に高速回転での使用が推奨され, 切削速度の増加により切削抵抗が低下する傾向が見られるが, ソーダライムガラスを用いた本実験においては, $S=5000$ min⁻¹ 時に超音波援用を行った加工条件で最も切削抵抗が低くなる結果となり, 鋼材加工での特性

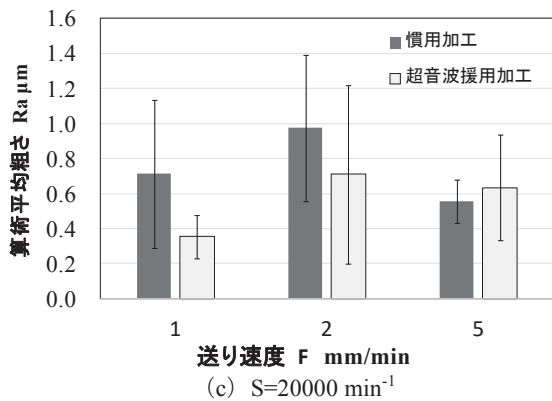
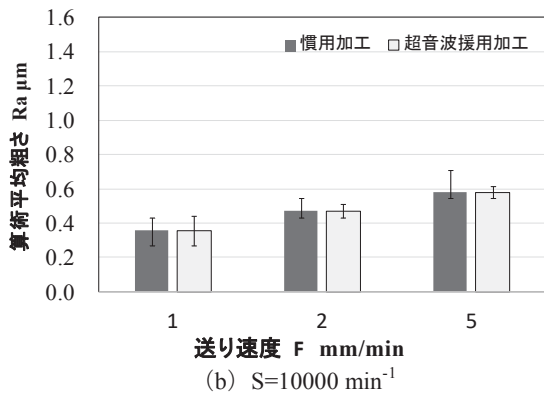
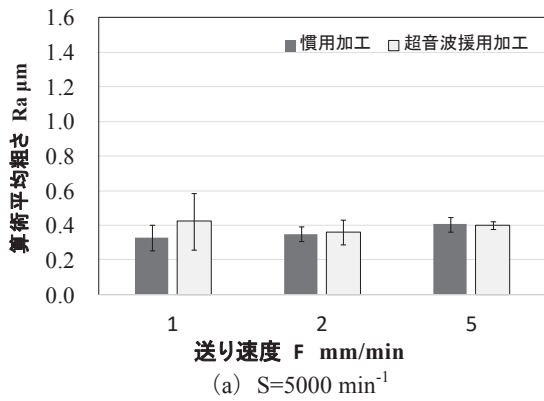
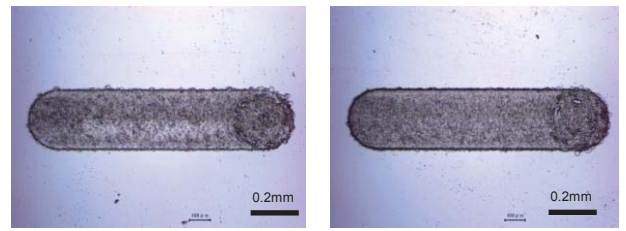


図5 加工面の表面粗さ

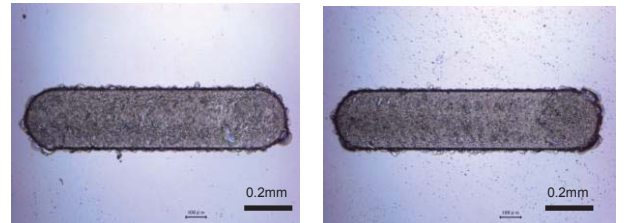
と異なることがわかった。

3-2 表面粗さ

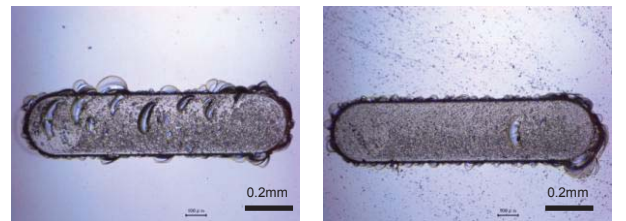
図5に、加工後の溝底部表面粗さについて、工具進行方向と同方向に測定し、算術平均粗さ Ra で評価した結果を示す。表面粗さは送り速度 F 値の増減による影響が若干見受けられ、F 値が低い条件では表面性状がやや良好となる傾向が得られたが、主軸回転数の上昇と共に表面粗さ値が増大し、主軸回転数の寄与が大きいことがわかった。切削抵抗測定結果の傾向と同様に、S=5000 min⁻¹ 時における加工面が最も表面粗さ値が小さくなり、慣用加工では 0.3 μm Ra 前後の値が得られた。しかし、S=5000 min⁻¹ 時の表面粗さは超音波援用加工時においてもほぼ同じ値を示し 0.3 μm Ra より向上する効果は認められなかった。一方、S=20000 min⁻¹ 時は超音波援用加



(a) 慣用, S=5000 min⁻¹ (b) 超音波, S=5000 min⁻¹



(c) 慣用, S=10000 min⁻¹ (d) 超音波, S=10000 min⁻¹



(e) 慣用, S=20000 min⁻¹ (f) 超音波, S=20000 min⁻¹

図6 加工面観察結果 (F=1 mm/min)

工により F=5 mm/min を除いて表面粗さ値が小さくなり、F=1 mm/min 時はほぼ半減した。

3-3 縁部のチップング

図6に、送り速度を F=1 mm/min とし主軸回転数のみ変化させた際の溝部外観を示す。外観上は表面粗さ値と同様に S=5000 min⁻¹ 時が目視上のチップングが少なく、回転数の増加に伴ってチップングが増大している。超音波援用加工時は、いずれの主軸回転数においてもチップング量が減少しており、超音波援用加工が有効に作用していることが確認できる。S=20000 min⁻¹ 時のみ、溝底部に三日月状のチップングが複数認められるが、超音波援用加工により明確に減少した。このことは、表面粗さ値が S=20000 min⁻¹ 時において表面粗さ値が増大したが、超音波援用加工により表面粗さ値が大きく減少したことも一致している。

また図7に、溝部中央の直線形状部において、材料上面と加工側面部が成す稜線部に発生した縁部のチップング長を測定した結果を示す。縁部チップングは主軸回転数の増大の共に増加する傾向を示し、チップングの抑制は低回転での加工が有利であることがわかった。縁部チップングは、慣用加工では S=20000 min⁻¹ 時において最大で 80 μm 程度発生したが、超音波援用加工により半分以下に減少し約 30 μm であった。S=20000 min⁻¹ にお

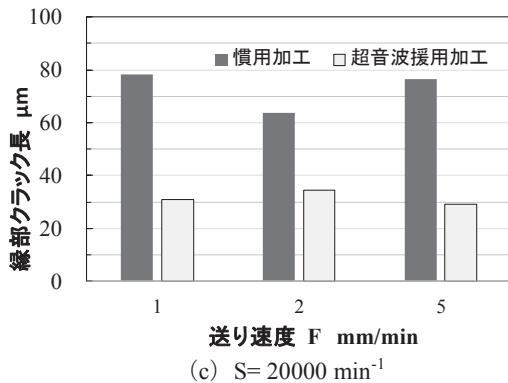
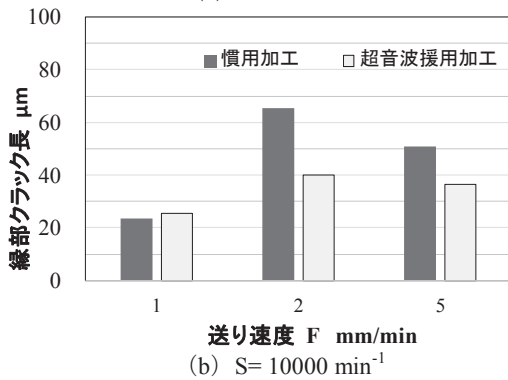
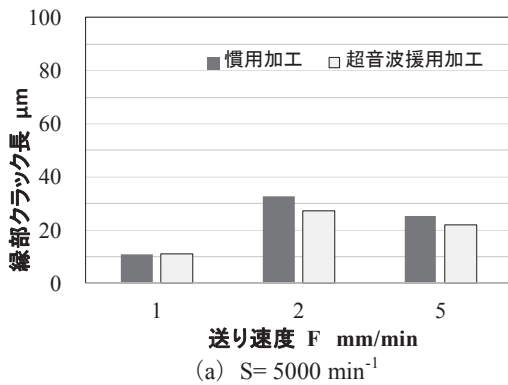


図7 溝縁部チップング長

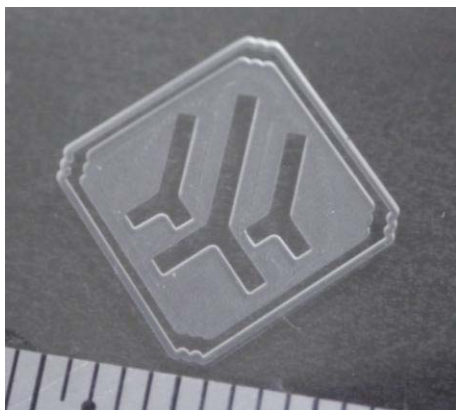


図8 平面形状加工例

いてチップングが増大する原因については不明確ではあるが、高速回転に伴う工具先端の振れ量および各部の振動等が影響している可能性が考えられる。

図8に、φ0.3 mm スクエアエンドミルを用いて超音

波援用加工により、ソーダ石灰ガラスに対して平面凹形状を加工した例を示す。明確なチップング等も確認されず良好な加工結果が得られることが確認できた。

4. 結 言

ソーダ石灰ガラスに対して平面形状加工を目的とし、φ0.3 mm のスクエアエンドミルによる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プング量の評価等を行ったところ以下の結果を得た。

- 1) 加工中の切削抵抗は、主軸回転数の上昇に伴って増大し、S=5000 min⁻¹ で超音波援用による加工時に最も低い値を示し、F=5 mm/min の合力は約 60%減少した。
- 2) 加工後の表面粗さは、主軸回転数の増加に伴って増大する傾向を示し、S=20000 min⁻¹ では超音波振動の付与によりチップングが減少し、表面粗さが向上した。

以上の結果から、超音波援用加工法は、ガラス材料へのスクエアエンドミルを用いた平面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) 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: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)
- 4) 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, 山梨県工業技術センター研究報告, No.30, pp.97-100 (2016)