

# ガラスのレーザー援用切削加工に関する研究

東京大学工学部 ○植木政瑛 伊藤佑介 木崎通 ◎杉田直彦 光石衛

## 要 旨

近年、ガラスへの切削加工が試みられているが加工能率の低さが問題となっている。そこでガラスが高温下で軟化することに着目し、レーザーを用いて局所加熱し軟化した部分を切削加工するレーザー援用切削加工法を提案した。これにより、溝加工ではレーザー非援用時と比較して表面性状が最大 74 %改善した。穴加工ではガラス下部からレーザー光を透過させて照射する手法を提案し、穴入り口における大規模クラックの低減を実現した。

## 1. 背景と目的

ガラス材料は光学部品、化学分析器具、電子機器内の基板材料など、様々な用途で利用されている。近年特に、医療診断や分子合成を極めて微量の試料で実現可能とするマイクロ流体チップや、次世代型 LSI である 3 次元 LSI 内での基板材料としてガラス材料が注目されており、微細精密な溝加工、穴あけ加工技術が求められている。ガラスへの現在の加工法にはリソグラフィ技術やレーザー加工技術が適用されているが、リソグラフィ技術は多品種少量生産において極めて高コストとなる点、レーザー加工ではクラックの発生や熱影響層の残存から精密加工が困難である点が問題となっている[1]。リソグラフィ技術やレーザー加工技術に変わる技術として切削加工が試みられているが、現状では加工速度が 0.5 mm/min と極めて低速であり高能率化が課題となっている[2]。本研究では切削加工によりガラスの微細精密加工を高能率加工条件下で実現することを目的とする。

## 2. レーザ援用によるミリング加工及びドリル加工法の提案

高温環境下においてガラスの硬度は低下し、靱性が増大するため、加熱によって被削性向上が期待できる。本研究ではレーザーを用いて被削材を局部的に加熱し、工具で軟化した部位を切削加工するレーザー援用切削加工[3]のガラスへの適用を提案する。溝加工についてはレーザー援用ミリング加工(Laser-assisted milling: LAM)を、穴開け加工については、ガラスが透明材料であることに着目したレーザー援用ドリル加工(Laser-assisted drilling: LAD)を提案する。通常の LAM では被削材内部に隠れた工具先端位置の加熱が不可能であるため穴開け加工への応用ができない。本提案手法ではレーザー光がガラスを透過するため工具先端位置に直接照射することができる。さらに液体吸収剤を加工穴内部に浸透させることで、被削材を透過したレーザー光を工具先端の吸収剤に照射し被削材内部に隠れた工具先端位置を常に加熱し軟化させることが可能となる。

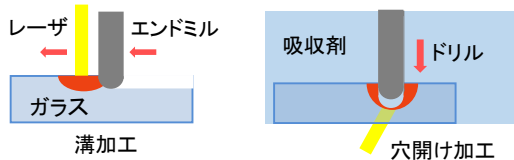


Fig.1 提案手法概念図

## 3. レーザ援用ミリング加工法

### 3.1 高温環境下切削加工実験による最適加工温度評価

昇温が被削性に及ぼす影響を適切に評価し、最適加工温度を推定するために被削材全体をヒータで加熱し溝切削加工実験を行った。生成した加工溝の表面性状と工具摩耗を評価することで、最適加工温度を推定した。実験条件を Table 1 に示す。被削材は寸法 20×20×4 mm の熔融石英ガラス、工具はφ0.5 mm の TiAlN コーティング超硬ボールエンドミルを用いた。

Table 1 実験条件

送り速度	5 mm/min
回転速度	150,000 rpm
切り込み深さ	55 μm
加工距離	2 mm
温度	25,190,300,400 °C

ドリルを使用した。結果を Fig.2, Fig.3 を示す。190 °C 以上に加熱することで表面粗さが改善した。一方で 400 °C 以上において工具摩耗が増大した。以上の結果から、最適切削加工温度を 300 °C と見積もった。

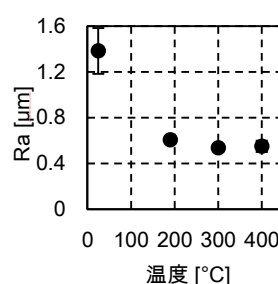


Fig.2 溝表面粗さ

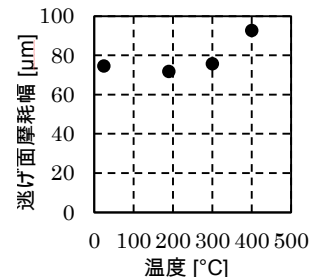


Fig.3 工具摩耗

### 3.2 温度分布シミュレーション

レーザー照射時に工具先端位置で 300 °C となるようなレーザー照射条件を決定する必要がある。そのためレーザー照射時の被削材中温度分布シミュレーションを構築した。Table 2 にシミュレーション条件を示す。レーザー光強度はガウス分布に従うと仮定し、レーザー照射位置から被削材へ流入する熱流束をモデル化した。送り速度 5 mm/min におけるシミュレーション結果を Fig.4 に示す。Table 2 に示した条件下では送り速度に依存せず、

Table 2

波長	1,070 nm
出力	20 W
送り速度	5・20 mm/min

レーザースポット中心から 0.9 mm 離れた位置において温度が約 300 °C となった。これより、レーザースポット・工具先端間距離(D)を 0.9 mm に決定した。

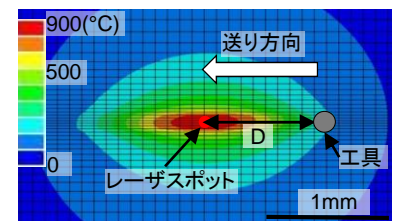


Fig.4 被削材表面の温度分布

### 3.3 レーザ援用ミリング加工法評価実験

#### 3.3.1 実験方法

以上の条件を用いて LAM による溝加工を行い、溝表面性状と工具摩耗を評価した。被削材に黒体塗料(放射率 0.94)を幅 0.15 mm で塗布し、工具送り方向に対し被削材を 45 °傾斜させた状態でレーザーを照射し、溝加工した。被削材は寸法 20×20×4 mm の熔融石英ガラス、工具はφ0.5 mm の TiAlN コーティング超硬ボールエンドミルを用いた。Table 3 に実験条件を示す。

Table 3 実験条件

送り速度	5, 10, 20 mm/min
回転速度	150,000 rpm
切り込み深さ	約 10 μm
加工距離	8 mm
レーザー出力	20 W
D	0.9 mm



Fig.5 実験装置

### 3.3.2 実験結果

Fig. 6に溝形状比較, Fig. 7に溝表面粗さ, Fig. 8に工具摩耗量のグラフを示す. LAMによって溝表面性状が改善していることがわかる. 特に送り速度 5 mm/min では表面粗さが 74 %改善していた. 一方で工具摩耗は増大していた.

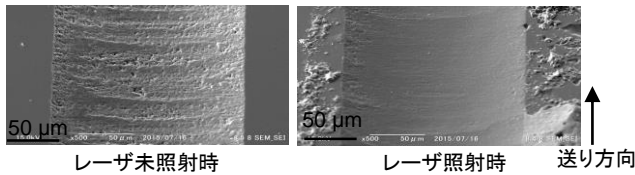


Fig. 6 加工後の溝形状の比較(送り速度 10 mm/min)

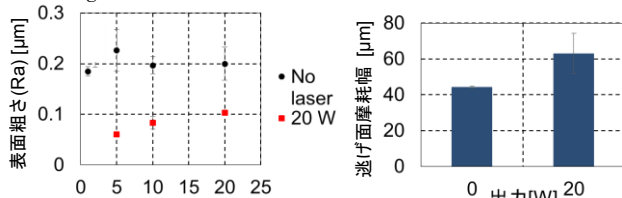


Fig. 7 加工表面粗さ

Fig. 8 送り速度 10 mm/min での工具摩耗

## 4. レーザ援用ドリル加工法

### 4.1 レーザ援用ドリル加工法による穴入り口の加工特性評価実験

#### 4.1.1 実験方法

穴開け加工における LAD の有効性を評価するため, まず基礎実験として黒体塗料を用いた LAD を行い穴入り口のクラック特性を評価した. 具体的な方法を以下に示す. 被削材表面に黒体塗料を約 2 mm 四方で塗布した. 工具とレーザー光の干渉を防ぐために, 被削材下部から被削材を透過させてレーザー光を照射して加熱し, 穴開け加工した. 被削材は寸法 20×20×4 mm の熔融石英ガラス, 工具はφ1 mm の TiAlN コーティング超硬ボールエンドミルを使用した. Table 4 に実験条件を示す.

Table 4 実験条件

送り速度	5 mm/min
送り量	0.3 mm
レーザー出力	10 W

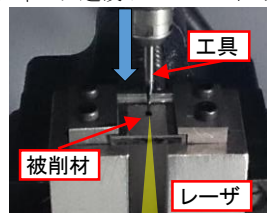


Fig. 9 実験装置

#### 4.1.2 実験結果

加工穴入り口形状比較を Fig. 10 に示す. レーザを援用することで穴入り口のクラックが低減していることがわかる. 一方で, 穴深さは 0.2 mm 程度となっており, 工具が大幅に摩耗した.

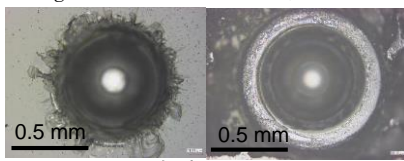


Fig. 10 穴形状の比較

### 4.2 液体吸収剤を用いたレーザー援用ドリル加工法評価実験

#### 4.2.1 実験方法

4.1 の基礎実験における課題として, 深穴加工が困難である点および被削材へのレーザー光吸収が加工開始位置に限定される点が挙げられる. 深穴加工が困難である点については切削熱による工具の強度低下が原因と考えられる. レーザ光吸収が加工開始位置に限定される点については黒体塗料が表面のみにしか存在していないことが原因である. 本提案手法では, 液体吸収剤が加工時の工具を冷却し, 同時に穴内部に液体吸収剤が浸透することで常に穴先端をレーザーで加熱することができるため, 上記の問題を解決することができる. 提案手法の有効性を評価するために, 被削材上部に吸収剤溜まりを設置し, 液体吸収剤を溜めた. 被削材下部から被削材を透過させてレーザー光を照射して加熱し, 穴開け加工した. 被削材は寸法 30×30×3 mm の熔融石英ガラス, 工具はφ1 mm の TiAlN コーティング超硬ボールエンドミル, 吸収剤は炭素

の分散したコロイド溶液を使用した. Table 5 に実験条件を示す.

Table 5 実験条件

送り速度	5 mm/min
送り量	0.1×10 mm
レーザー出力	10 W

#### 4.2.2 実験結果

加工穴入り口形状の比較を Fig. 12 に示す. 液体吸収剤を用いることで, レーザ照射時, 未照射時ともに, 1 mm の深穴加工を実現した. また, レーザ未照射時に存在していた大規模クラックがレーザーを援用することで低減した.

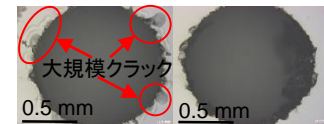


Fig. 12 穴形状の比較

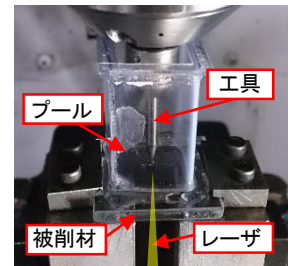


Fig. 11 実験装置

## 5. 考察及び今後の展望

### 5.1 レーザ援用ミリング加工法

レーザーを援用することで表面性状が大幅に改善し, LAM の有効性を示せた. レーザを援用することで被削材が十分に軟化され, 被削性が向上していたと考えられる. 一方, 工具摩耗は増大していた. これは, レーザ光が被削材に対して斜めから照射されているために, レーザスポット径が楕円形となり, 長軸方向が工具と干渉し工具が過剰に加熱されたことが原因だと考えられる. ダイヤモンド工具のようなレーザー光を透過する工具を使用することで工具摩耗を抑制できると考えられる.

### 5.2 レーザ援用ドリル加工法

工具が極端に摩耗せず 1 mm の深穴加工に成功したことで液体の吸収剤による工具の冷却効果があったと考えられる. 一方でクラックは低減できたものの依然として残存していた. これは吸収剤が水溶液であるために, 水の沸点以下までしか加熱できなかったことが原因であると考えられる. サーモグラフィを用いて加工位置温度を計測した結果を Fig. 13 に示す. この結果から, 温度が 50 °C 程度までしか上昇していないことを確認した. これについては沸点の高い吸収剤を用いることで十分な加熱が可能になると考えられる.

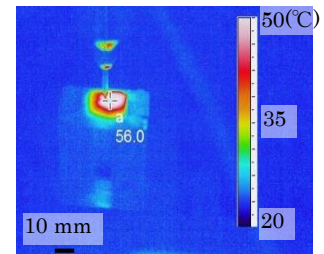


Fig. 13 加工位置の温度観測

## 6. 結論

ガラスの高効率微細精密加工法として, レーザ援用ミリング加工法(LAM)及びレーザー援用ドリル加工法(LAD)を提案した. LAM の評価実験から, 高送り速度条件下で表面粗さが大幅に改善することを示した. また液体吸収剤を用いた LAD の評価実験から, 工具を冷却しつつ被削材を加熱することで, 加工時のクラックの低減及び深穴加工の実現が可能であることを示した.

## 参考文献

- [1] R. Pease, *et al.*, "Lithography and Other Patterning Techniques for Future Electronics," *Proc. IEEE*, Vol. 96, No. 2, pp. 249-270, 2008.
- [2] T. Matsumura, *et al.*, "Cutting process of glass with inclined ball end mill," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 200, pp. 356-363, 2008.
- [3] F. Pfefferkorn, *et al.*, "Laser-assisted machining of magnesia-partially stabilized zirconia," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, Vol.126, pp.42-51, 2004.