

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：57301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05159

研究課題名（和文）レーザー誘起熱応力による水平き裂誘導を利用した新しいスライス加工技術の開発

研究課題名（英文）Development of a New Slicing Technology of brittle materials Using a Horizontal Crack Generated by Laser Induced Thermal Stress

研究代表者

森田 英俊 (Morita, Hidetoshi)

佐世保工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：40332100

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー誘起熱応力を利用して水平き裂を誘導し、脆性材料をスライス加工できる可能性について、加工実験と応力拡大係数解析から検証を行った。その結果、次のことが明らかになった。(1) 矩形熱源を用いることで、ガラス表面に破壊痕がなくガラス内部のみに水平き裂が誘導される現象を確認した。(2) 矩形熱源による端面加工実験では、カールしたガラス片をともなって長く安定した加工が成立したが、加工深さが安定せず溝加工モデルと等価なモデルではない。(3) 矩形熱源による溝加工において、水平き裂が発生した深さにおいてき裂開口領域を求めたところ、これまでの開口部と同様の特徴を示すことが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー誘起熱応力を利用することで、水平き裂を誘導することに成功した。これまでガラス表面に対して切断（割断）するための鉛直き裂を誘導する技術はあったが、水平き裂を誘導できることを示した。また、破壊力学や熱力学の知見を利用して加工成立の条件を明らかにしたことで、これらの学術に対する発展に貢献した。特に、これらの知見を利用してスライス加工に適した加工面を得るためにフラットトッププロファイルで矩形熱源形状を用いることを予見できた。

研究成果の概要（英文）：Currently, glass is used in various fields such as in FPD glass field and in smartphone display field. Also, the grind processing with grindstone is commonly used for the removal processing of brittle materials including glass. However, this way is a direct contact processing by grindstone, so it is difficult to process the glass surface without microcracks or breakage. On the other hand, in previous studies, we have discovered that when CO2 laser is scanned under specific condition on the glass surface, almost mirror surface groove is mostly generated along with the curled glass fragments. In our laboratory, we are studying the mechanism of this phenomenon and applying it to the development of new non-contact and highly efficient removal processing technology.

研究分野：レーザー加工

キーワード：レーザー加工 熱応力 き裂誘導 水平き裂

1 研究開始当初の背景

ソーダガラスにレーザをある条件で走査させると、図1のようにガラス母材側に鏡面の溝とカールしたガラス片が発生することを発見した。この現象では、図2のように加工面がほぼ鏡面に近い状態 ($Ra=0.41\mu\text{m}$) であり、仕上げ工程や洗浄工程がほとんど必要ない切削と研磨加工を融合した新しい加工技術となり得ると考え研究を行ってきた。その研究成果から、レーザの波長や加熱点形状、レーザプロファイル (エネルギー密度の分布形状) 等を工夫することで、この加工法は高脆材料全般に利用でき、高効率、省エネルギー化を実現する革新的な非接触の高速スライス加工を実現する革新的な新技術になり得ると考えた。

本現象はこれまでの研究で、図2の鏡面溝底面部は、ガラス表面に対して水平なき裂としてレーザ誘起熱応力によって誘導されるためにできる部分であり、冷却時に水平なき裂上部が熱収縮によってカールする際に、溝端部を剥離させていることが明らかになった。

そのため、き裂の開口条件を把握できる応力拡大係数解析を行い、深さ毎にき裂開口領域を求め、鏡面溝の幅や深さを予測したところ、実験結果と良い一致を得ることができた。また、図1のようにカールしたガラス片と共に溝が発生した場合 (走査速度 $500\sim 1000\text{mm/s}$ の領域) を加工成立としてきたが、これまで加工が成立しないとしてきた走査速度 100mm/s 付近においても、解析による予測通り、図3(a)のように、表面に熔融や破壊痕があるが、ガラス片がカールしなくても、図3(b)のように内部に鏡面溝が存在する条件があることを確認した。

このように、本現象を解析によって加工成立条件を予測する精度が向上したため、本現象の実用化に向け、さらに厳密な断面形状の制御を行い、新しいスライス加工技術を実現するため、以下の研究目的について明らかにする。



図1 板ガラスに発生した溝

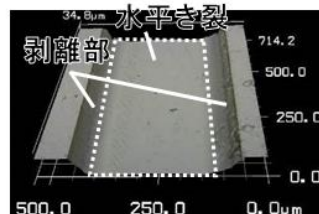
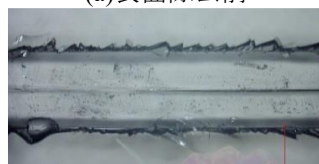


図2 溝の3次元拡大写真



(a)表面除去前



(b)表面除去後

図3 ガラス片を伴わない溝

2 研究の目的

本研究では、レーザ光の照射条件 (波長, 加熱点形状, レーザプロファイル等) と加工面形状の関連性について実験と応力拡大係数解析の両面から詳細に検証し、破壊力学的見地から、シリコンウエハなどの硬脆材料における高速非接触スライス加工技術を開発する。

特に、加工母材に対して吸収域波長のレーザを利用して、母材表面にダメージのない状態で、水平なき裂が誘導できる条件を明らかにする。特に、この加工が成立しても、内部にある水平なき裂の開口量が“0”のため、目視ではき裂を確認できない。そのため、応力拡大係数解析を利用して、表面に破壊痕が残らず水平なき裂が発生するレーザ加熱条件 (加熱点形状とサイズ, プロファイル, 出力) をこれまでの研究知見を利用して予測し、これを実現する光学系で実験を行い、解析と両面からその条件を明らかにする。

3 研究の方法

3.1 光学系の構築

本年度は表面付近の温度上昇を抑制する方法として、熱源形状を円から矩形に変更し実験を行う。熱源形状を円から矩形にすることで進行方向に対して、幅方向の位置における単位入熱量が一定となり水平なき裂の成長により適切な温度分布を得る事ができると考えたためである。

図4に熱源形状の変更に伴い光学系の再構築を行った実験装置の概略図を示す。以前の光学系はレーザ発振器から出たレーザ光は4枚のミラーを介してコリメートレンズに入射され平行光となり、ホモジナイザレンズに入射されレーザプロファイルがフラットトッププロファイルとなったのちに結像レンズで集光されガラスに照射されるというものであった。新しい光学系では、矩形マスクを導入することで熱源形状を円から矩形にし、コリメータレンズで回折した光を再度平行光に補正をした後結像レンズを通して加工母材に入射する光学系となっている。光軸調整は、レンズを1枚ずつレール上に配置し、バーンパターン法を用いてプロファイルを確認しながら所望の熱源形状になるように行った。図5に光軸調整後、正方形マスクを用いて新しく構築した光学系のレーザプロファイルを、バーンパターン法により測定した結果を示す。矩形熱源のサイズはフラットな部分が $600\mu\text{m} \times 550\mu\text{m}$ であった。熱源形状は矩形マスクを変更することで面積一定で進行方向に対してアスペクト比を 1:1, 1:2, 2:1 に変更できるような仕様とした。

3.2 矩形熱源における溝加工実験

図5の矩形熱源を用いて溝加工実験を行った。レーザ出力は最大の $P = 12.4\text{W}$ として、走査

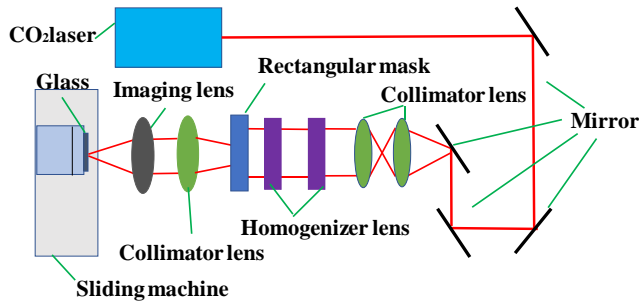


図4 実験装置概略図

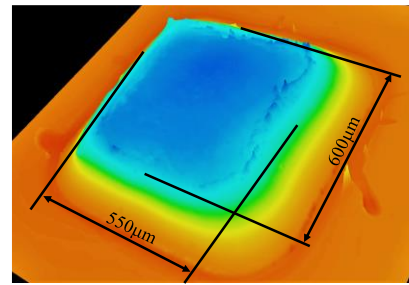


図5 レーザプロファイル

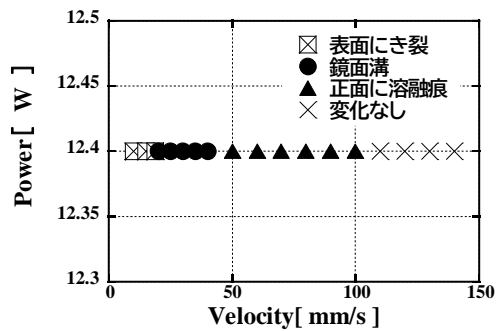
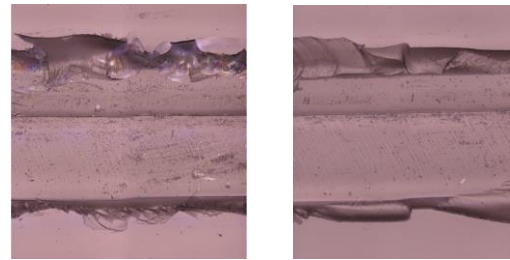


図6 レーザ走査速度と加工状態の関係



(a) $v = 25 \text{ mm/s}$ (b) $v = 40 \text{ mm/s}$

図7 溝の形状 ($P = 12.4 \text{ W}$)

速度は $v = 10 \sim 150 \text{ mm/s}$ において行った。レーザー発振器の定格出力である $P = 40 \text{ W}$ で実験を行ったが光学レンズと矩形マスクによる減衰で最大出力が 12.4 W となった。

図6に実験結果を示す。この時、図1(a)のようにカールしたガラス片をともなった鏡面溝の発生は見られなかった。そこで破壊形態を4形態に分類し結果をまとめた。表面に破壊痕が生じ、ガラス内部に水平き裂が誘導されているものをバツで、加工後表面に破壊痕が残るが、針などで破壊痕を取り除くと溝が部分的に発生しているものを丸で、表面に走査痕のみが残り水平き裂が無いものを三角で、レーザー走査後に変化がなかったものをひし形で示している。しかし例外として、出力 $P = 12.4 \text{ W}$ 、速度 $v = 16 \text{ mm/s}$ において表面に破壊痕がなくガラス内部のみに水平き裂が誘導される現象を本研究室で初めて確認した。この現象は再現性があまり高くなくことや、実験後しばらくすると残留応力によって表面が割れてしまうなどの特徴を示した。この現象の考察として、走査速度が遅くガラスの深い領域まで入熱され、水平き裂がガラスの深い部分に存在しているため普段であればカールするはずのガラス片が起き上がることができなかったことが考えられる。

次に、加工後表面に破壊痕が残るが、針などで破壊痕を取り除くと溝が部分的に発生している試料の溝部分の観察を行った。図7に観察した溝形状の例を示す。溝の形状は先行研究同様に矩形熱源の場合も、溝中央部に突起のようなものが存在しており、完全にフラットな面にはなっていない。図8に計測結果をもとに加工深さを測定し、走査速度ごとにまとめたものを示す。計測結果より走査速度が上がると加工深さは浅くなるという結果になった。

3. 3 矩形熱源における端面加工実験

上記の実験で出力 $P = 12.4 \text{ W}$ 、走査速度 $v = 16 \text{ mm/s}$ において表面に破壊痕がなく内部のみに水平き裂が誘導される現象を確認したが、表面のガラス片を剥がすことができなかった。溝加工実験ではガラス片がカールせず、表面のガラス片を取り除こうとすると残留応力によって表面が割れてしまうため溝形状や加工深さなどの詳細な観察が行えなかった。そのため我々は実験を対称問題として仮定し、実験することでガラス片がカールし、溝の形状や加工深さを計測できると考えた。溝の形状や加工深さを詳細に観察するために端面加工実験を行った。その結果、カールしたガラス片をともなって長く安定した加工が成立した。図9に顕微鏡を用いて試料の形状測定を行った結果を示す。端面加工実験の試料をレーザー顕微鏡で観察すると高さの違う水平き裂が2段になって発生しており、それらの水平き裂を繋ぐように湾曲した剥離面が生成されていた。同様の測定を7回行い加工深さの測定をしたところ、 $170 \sim 250 \mu\text{m}$ とばらつきが大きかった。これは実験の際、熱源の端部がガラス端部に来るようにガラスの両端にアクリル板を配置しレーザー光が通る場所を確認しながら実験を行ったが、それらはアクリル板の焼痕を目印にした目測であって走査位置の再現性が低かったことが原因と考えられる。また、端部の加工になるため初期き裂の起点が実験ごとにも変わることも加工深さに影響していると考えられる。この熱源とガラス端部の微妙なずれ、初期き裂の起点位置によって加工深さが異なる結果になったと推察される。そのため本方法によって水平き裂のみが発生する場合と等価なモデルとすることはできない。

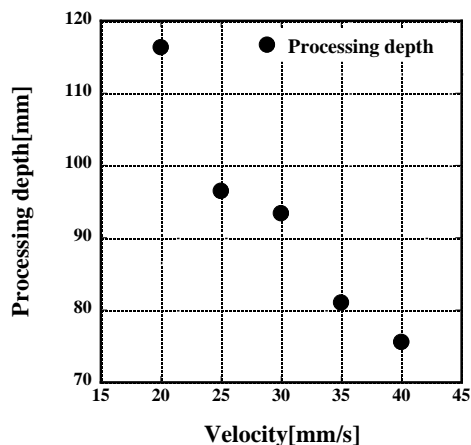


図8 走査速度と溝の深さの関係

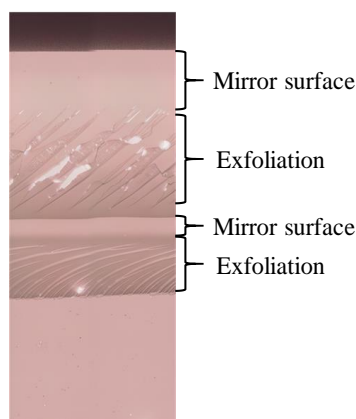
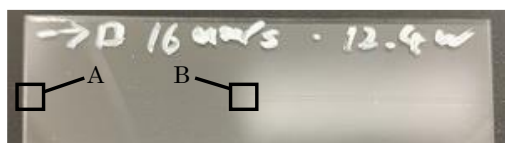


図9 ガラス端部に発生した鏡面溝



(a) ガラス試験片



(b) A 部



(c) B 部

図10 水平き裂のみが内部に発生した試験片

3. 4 水平き裂の観察

矩形熱源を用いた実験において、破壊痕がなくガラス内部のみに水平き裂が誘導されたサンプルにおいてその加工深さを測定するために水平き裂上部の除去を試みた。図10(a)にその実験試料を、図10(b), (c)にその資料の始端部、中央部を顕微鏡で撮影したものを示す。これらの試料を観察しようと表面のみを取り除こうとするとガラス内部に残留応力が存在しており溝の周辺をめぐりながら表面が破壊されてしまった。そのため表面の破壊痕を針で取り除き水平き裂を確認できた地点を加工深さとして観察を行ったところ、加工深さが $320\ \mu\text{m}$ と水平き裂が非常に深い位置にできていたことが分かった。これまでの先行研究において発生した最も深い溝は $100\ \mu\text{m}$ 程度であったことから今回発生した溝の深さが非常に深いことがわかる。実験の際に考察を行ったが、破壊痕がなくガラス内部のみに水平き裂が誘導される現象は走査速度が遅いためガラスの内部にまで深く入熱し、ガラス片がカールできないほど深い位置に水平き裂が誘導されていることが溝形状の観察結果からも確認された。

また、端面加工実験の観察結果との比較より、溝形状や加工深さなどについて端面加工実験との相関性は得られなかった。

3. 5 連続溝加工実験

端面加工実験において長く安定した加工を行えたため、発展的な実験として連続溝加工実験を行った。連続溝加工実験は、レーザを走査させ試料に送りを加えて何本も水平き裂を誘導することで平面加工を行うことを模した実験である。連続溝加工実験ではレーザ出力や走査速度に加え、送り量、レーザ半径などの多くのパラメータが必要となってくる。今回は矩形熱源を用いた端面加工でカールしたガラス片をともなって安定した加工を行えたため、同条件で送り量のみを変更し実験を行ったところ試料の一部分で平面加工が成立した。図11に試料の観察結果を示す。実験条件はレーザ出力 $P = 12.4\ \text{W}$ 、速度 $v = 16\ \text{mm/s}$ 、送り $0.9\ \text{mm}$ である。完全な平面とはなっていないことや一部分のみしか連続溝加工が成功していないことから、今後さらに固定方法の改良や冷却時間を設けるなどの実験条件を検討する必要がある。

3. 6 応力拡大係数解析

本現象はレーザ誘起熱応力により、水平き裂を誘導することで発生していると考えられる。そこで加工成立時の条件で熱応力解析を行い、応力拡大係数を求めることで実現象との比較、

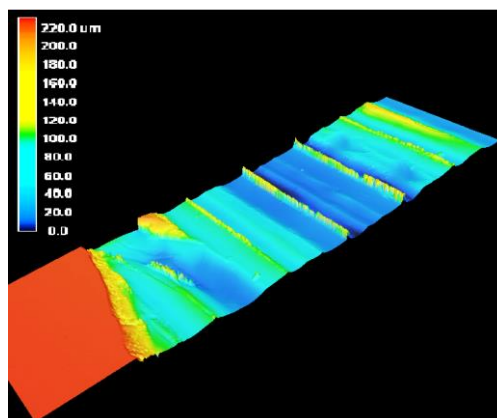


図11 鏡面溝加工に送りを加えた場合

表 1 試験片ガラスの物性値(20°C)⁽²⁾

Density	Specific heat	Thermal conductivity	Thermal expansion coefficient	Young's modulus	Poisson's ratio	Fracture toughness
[kg/m ³]	[J/kgK]	[W/mK]	[K ⁻¹]	[GPa]	[-]	[MPam ^{1/2}]
2550	730	1.03	8.2×10 ⁻⁶	71.5	0.219	0.76

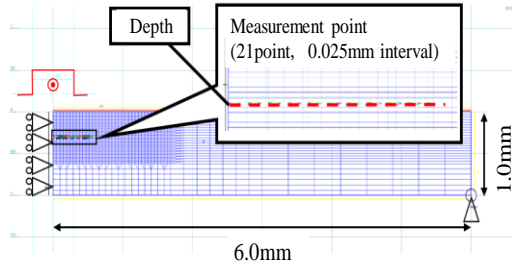


図 12 解析モデル

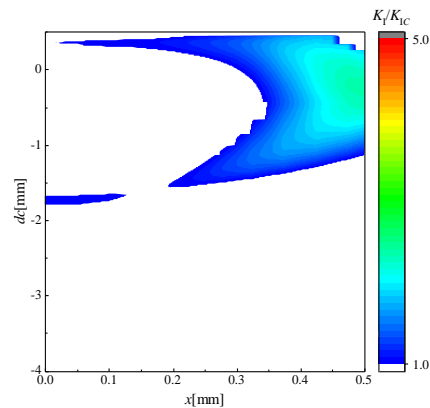


図 13 き裂開口領域図

検証を行う。き裂が安定して成長している状態について、応力拡大係数 K_I は以下の半無限クラック内面に作用する応力の場合の(1)式を用いて求めた⁽³⁾。

$$dK_I = \frac{2}{\sqrt{2\pi c}} \sigma(x) dx \quad (1)$$

ここで $\sigma(x)$ は半無限クラックの内側に作用する集中力による応力、 c はき裂先端から力が作用する場所までの距離である。(1)式を用いて台形法による近似計算をプログラムにより行い、応力拡大係数の算出を行った。

3. 7 矩形熱源における溝加工実験

観察結果をもとに二次元熱応力解析を行った。表 1 にガラスの物性値、図 12 に解析モデルを示す。測定点は実験より得られた加工深さである $y = -320 \mu\text{m}$ に 0.025 mm 間隔で 21 点配置し温度と応力の変化を FEM 解析により求め、応力拡大係数を算出した。解析モデルは対称問題として扱い、最小メッシュサイズは $16 \mu\text{m} \times 47 \mu\text{m}$ で作成した。この二次元熱応力解析の結果より求めた応力拡大係数 K_I からき裂開口領域を求め実験結果との比較を行った。解析における熱源形状は、 $0.9 \mu\text{m} \times 0.9 \mu\text{m}$ の正方形でフラットトップである。ガラスへの吸収率 81.5% を考慮し 10.1 W で解析した。また走査速度 $v = 16 \text{ mm/s}$ とし、破壊痕がなく内部のみに水平き裂が誘導された実験条件での解析を行った。

図 13 に解析結果より算出したき裂開口領域を示す。図は K_I/K_{IC} の分布を示しており、1 を超える領域で開口することを表している。先行研究において中心が開口する分布であると水平き裂を十分に誘導できる条件であることが確認されている⁽⁴⁾。実験結果より得られた加工深さ $y = -320 \mu\text{m}$ の解析において、き裂開口領域が熱源の前方と後方にあるが、中心が開口する分布であることから実験で得られた加工深さにおいて水平き裂を十分に誘導できる条件であることが確認された。

4 研究成果

- (1) 矩形熱源を用いることで、ガラス表面に破壊痕がなくガラス内部のみに水平き裂が誘導される現象を確認した。
- (2) 矩形熱源による端面加工実験では、カールしたガラス片をともなって長く安定した加工が成立したが、加工深さが安定せず溝加工モデルと等価なモデルではない。
- (3) 矩形熱源による溝加工において、水平き裂が発生した深さにおいてき裂開口領域を求めたところ、これまでの開口部と同様の特徴を示すことが明らかとなった。

参考文献

- (1) 森田英俊, レーザ誘起熱応力を利用した脆性材料の非接触除去加工技術の可能性, レーザ加工学会誌 Vol.22, No.1(2015), 30.
- (2) ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店(1999).
- (3) 岡村弘之, 線形破壊力学入門, 214.
- (4) 松田尚太郎, 永田恵二郎, 徳岡真, 橋間文哉, 森田英俊, レーザ誘起熱応力によるガラスの鏡面溝加工技術開発, 日本機械学会 第 13 回 生産加工・工作機械部門講演会(2019), B08.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中村 颯平, 森田 英俊
2. 発表標題 レーザー誘起熱応力を利用したガラスの溝加工技術開発
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第54回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹下賢、森田英俊
2. 発表標題 レーザー誘起熱応力を利用したガラスの溝加工 技術開発（線膨張係数の加熱速度依存性を考慮したき裂開口領域の検証）
3. 学会等名 日本機械学会 九州支部 九州学生会第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------