

補助事業番号 2023M-213

補助事業名 2023年度 透過型レーザーによる脆性材料の新しいスライス加工技術開発補助事業

補助事業者名 佐世保工業高等専門学校 機械工学科 教授 森田 英俊

## 1 研究の概要

ソーダガラスにレーザーをある条件で走査させると、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、溝加工面がほぼ鏡面に近い状態であり、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除去加工技術となり得ると考え研究を行ってきた。そして、その研究成果からレーザーを加工母材に対して透過性の高い波長のレーザーを用いた光学系を工夫し、材料内部に熱源をつくり走査できれば、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。

本研究では、レーザー光の照射条件（周波数、パルス幅、走査速度、加熱点形状）と加工面形状の関連性について実験と熱応力解析の両面から詳細に検証し、破壊力学的見地から、将来的にはシリコンウェハ等の硬脆材料を高速非接触スライス加工できる技術開発を目指し、内部熱源による水平き裂誘導の誘導条件を明らかにする。

## 2 研究の目的と背景

現在、半導体の需要増加に伴い、シリコンウェハなどの脆性材料を高い歩留りで高速非接触スライス加工する技術が求められている。SiC限定の技術で一部実現しているが、SiC以外では適用できない事や、わずかではあるがうねりを伴うなど問題点もある。一方、本研究室の先行研究により、レーザー誘起熱応力を利用して、ガラス内部に水平なき裂を誘導できることを明らかにした。そこで本研究室では、この現象のメカニズムを応用し、透過域波長のレーザーを用いて、水平なき裂を誘導できる内部熱源の条件を求めることで、脆性材料全般において高速非接触でスライス加工できる技術を開発することを目的に研究を行う。

## 3 研究内容

### (1) 透過型レーザーによる脆性材料の新しいスライス加工技術開発

(<https://www.sasebo.ac.jp/wp-content/uploads/2024/05/JKAoutline.pdf>)

本研究室の先行研究により、図1のように、ガラスに対して吸収率の高いCO<sub>2</sub>レーザーを利用して、照射面で発熱した熱により誘起された熱応力により、ガラス内部に水平なき裂を誘導できることを明らかにした。しかし、ガラス表面が加熱されているため、レーザー走査後、熱収縮によりガラス表面が圧壊する可能性が高いことが明らかにな



図1 ガラス内部に発生した水平き裂

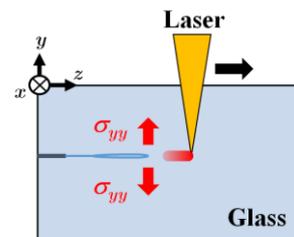
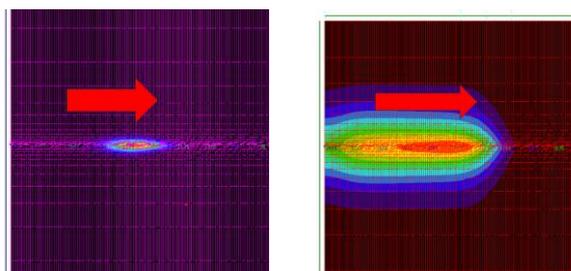


図2 内部熱源を利用した水平き裂誘導

った。そこで本研究室では、この現象のメカニズムを応用し、透過域波長のレーザを用いて、図2のように、水平き裂を誘導できる内部熱源の条件を求めることで、脆性材料全般において高速非接触スライス加工する技術を開発できる可能性が高いと考え研究を行った。

### ①透過型レーザによる内部発熱のFEM解析モデルの構築

内部熱源を利用した水平き裂が誘導できる最適な加熱形状などを検証するために、本現象を再現できる解析モデルを構築する必要がある。そのため、2つの熱源設定方法を用いてモデルを構築した。まずは、境界面に熱源を設定する「表面伝熱型」を用いた。さらに、メッシュ内部の境界面上に熱源を設定し、また、レーザ光の吸収を単位体積、単位時間あたりの発熱量として計算する「体積発熱型」を用いた解析も行った。図3に、この2つの解析モデルによる結果を示す。体積発熱型では、レーザの浸透深さを考慮して解析を行っているため、鉛直方向に長い発熱領域が形成されている。



(a)表面伝熱型 (b)体積発熱型  
図3 解析モデルによる温度解析例

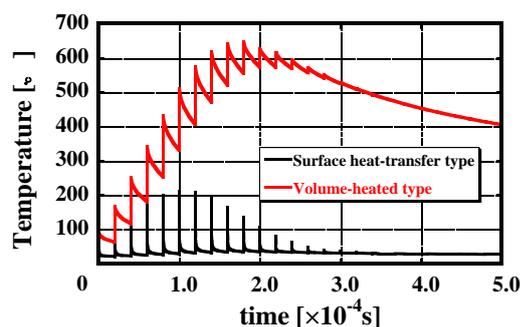


図4 発熱部における温度変化

図4に発熱部における温度変化を示す。表面伝熱型では、温度の減衰が早く体積発熱型のように温度が重畳することが無いため、体積発熱型と比較して1/3倍程度の最高到達温度であった。

### ②透過型レーザによる水平き裂誘導条件の探索

実験装置概略図を図5に示す。UVレーザ（波長355nm）発振器を用いており、その走査経路はガルバノミラーで制御する。また、ガラスの位置や焦点深さの微調整のために、別途XYZステージを取付けた。また、レーザ発振の周波数とパルス幅の値をそれぞれ変化させてレーザ出力を調整した。

まず、初期き裂を導入するための条件を探索する実験を行った。レーザ走査の繰返し数 $N$ 、レーザの周波数 $f$ 、パルス幅 $\Delta t$ 、走査速度 $v$ を変えて100通り以上の実験を行った。図6(a)にレーザ走査の繰返し数 $N = 300$ 、レーザ出力2W（レーザ周波数 $f = 30$  kHz、パルス幅 $\Delta t = 19$  ms）、走査速度 $v = 150$  mm/sの条件で行った際に発生した初期き裂を示す。この条件に際し、最

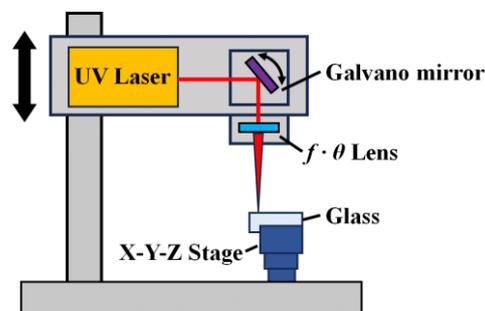


図5 実験装置概略図

も細く鋭い初期き裂を発生させることができた。

次に、水平き裂を誘導できる条件の探索を行った。まず、レーザの走査経路を矩形とし、レーザ周波数  $f = 50 \sim 500$  mm/s, 走査速度  $v = 20 \sim 50$  kHz, パルス幅  $\Delta t = 1 \sim 20$   $\mu$ s, 矩形経路1回の走査で進展する距離  $\Delta s = 0.01 \sim 0.05$  mmを変えて実験し、水平き裂の進展の様子を動画マイクロスコープで観察した。その結果、ガラス内部に鉛直方向に伸びる線状の熔融痕発生したため、わずかに水平き裂が成長してもすぐに熔融痕によって停止してしまった。一方、走査速度を上げると、熱量不足により開口応力を得ることができず、水平き裂を進展させる条件を得ることができなかった。

そこで今回は、レーザの出力不足を補うため、初期き裂の先端からの距離  $\Delta l = 0.2 \sim 0.5$  mmの範囲の位置において、熔融痕が発生せず水平き裂が進展するまで同じ地点を往復走査させる実験を行った。図6(b)に  $\Delta l = 0.2$  mm付近において初期き裂先端から熱源方向に進展したき裂を示す。この条件では、熱源位置が初期き裂に近いため、レーザによる内部熱源によって誘起された圧縮応力場により、大きく上方に逸れてき裂が進展した。次に図6(c)に  $\Delta l = 0.46$  mmにおける結果を示す。この条件において、水平き裂が熱源に向かって直線的に進展する結果を得ることができた。この図で上方と下方に分かれて進展しているき裂は、冷却時に表面付近だけに発生している。一方、水平き裂部分は図の表裏面共に観察されるため、熱源周囲の引張応力により進展したき裂であることが確認できた。

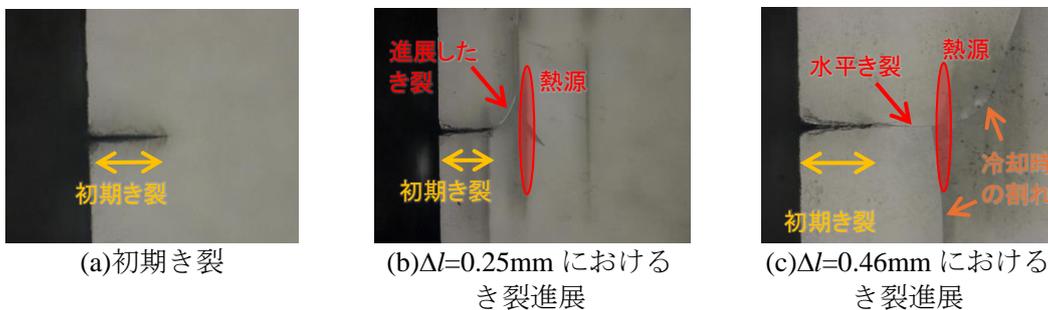


図6 実験結果

#### 4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

半導体の需要増加に伴い、シリコンウェハなどの硬脆材料を高い歩留りで高速非接触スライス加工する技術が求められている。一方、本研究室の先行研究により、表面吸収型のレーザ波長であるが、レーザの誘起熱応力を利用して、ガラス内部に水平なき裂を誘導できることを明らかにした。そのため、透過波長域のレーザで内部熱源を発生させ水平き裂を誘導できれば、工具摩耗や切削ロスがない非接触加工を実現できる可能性が高い。さらに、従来技術ではワイヤソーを用いてスライス加工を行うため、研磨や洗浄工程が必要となるが、本研究の技術が確立されれば、これらの工程を削減できる可能性が高いため、飛躍的に加工効率を上げることができることから、産業界に貢献できる技術となる可能性が高い。

## 5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

レーザー切断加工実験の途上で、連続した鏡面溝を発生させるレーザー加熱条件を発見し、破壊力学等の学術的知見を利用して、生産加工技術の発展に大きく貢献しようと考え研究してきた。そして、この研究は溝加工だけでなく、高速非接触でスライス加工できる革新的な技術となる可能性が高いと予見し、本研究を開始した。またこれまで熱応力によるき裂誘導型の加工では、母材表面に鉛直なき裂を誘導して切断する技術しかなかったが、申請者は、母材内部に水平なき裂の誘導ができる条件があること鏡面溝加工のメカニズム解明の過程において発見した。また、この原理を解明するうちに、内部熱源を適切に発生できれば、表面に熱的な損傷のない水平なき裂誘導が実現できると考えた。

さらにこの研究は、単なるレーザー加工技術の研究ではなく、破壊力学や熱力学などの学術的な知見が必要であり、発生メカニズムを解明する過程で、これらの学術的な発展に貢献できる可能性もある。

## 6 本研究にかかわる知財・発表論文等

該当なし

## 7 補助事業に係る成果物

### (1)補助事業により作成したもの

JKA研究報告書

(<https://www.sasebo.ac.jp/wp-content/uploads/2024/05/JKAreport.pdf>)

### (2)(1)以外で当事業において作成したもの

該当なし

## 8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 佐世保工業高等専門学校(サセボコウギョウコウトウセンモンガッコウ)

住 所： 〒857-1193

長崎県佐世保市沖新町1-1

担 当 者： 機械工学科 教授 森田 英俊(モリタ ヒデトシ)

担 当 部 署： 総務課総務企画係(ソウムカソウムキカクガカリ)

E - m a i l: kikaku@sasebo.ac.jp

U R L: <https://www.sasebo.ac.jp/> (佐世保工業高等専門学校)

<https://www.sasebo.ac.jp/mechanical/home/> (機械工学科)