

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14157

研究課題名（和文）レーザ溶断技術による無歪み・無欠陥・完全溶融面フレキシブルガラスの創成

研究課題名（英文）Achieving stress- and defect-free and all-fused surface flexible glass using laser fusion cutting technology

研究代表者

伊東 翔（Itoh, Sho）

千葉大学・大学院工学研究院・特任助教

研究者番号：70743441

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：フレキシブルガラスのレーザ溶断技術の確立を目的とし、CO₂レーザを用いて端面形状を制御しつつ切断可能であることを示した。複数のレーザ光を重ねて照射し、熱歪みを低減できることを示し、そのメカニズムを考察した。2点曲げ強度について表面では約600 MPa、裏面では約300 MPaを達成した（平均値）。また波長が異なるより光侵入長の長いCOレーザを用い、フレキシブルガラスを溶断できることを示した。加工中のモニタリングにより、端面欠陥となるボイドの形成メカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、ガラスのレーザ溶断における端面形状の微細制御メカニズムや、熱歪みの制御メカニズムを解明できたことや、また加工点における局所溶融現象を明らかにできたことにある。また社会的意義としては、（1）フレキシブルガラスはフリーフォームディスプレイ、フレキシブルOLED照明、半導体部品（インターポーザなど）、建築部材やソーラーパネルのカバー部材など様々な応用が期待され、本切断方法により応用を促進に寄与できる。（2）また、新切断技術を提案することにより、従来のケミカルエッチングによる端面仕上げ工程を省くことも可能となる。

研究成果の概要（英文）：The study was aimed at establishing a laser fusing technique for flexible glass. The study showed that cutting flexible glass using a CO₂ laser and controlling the edge shape was possible. The study demonstrated that overlapping irradiation of multiple laser beams could reduce thermal residual stress, and the mechanism was discussed. The two-point bending strengths of approximately 600 MPa and 300 MPa were achieved on the front and back surfaces, respectively (average values). It was also shown that flexible glass can be cut using a CO laser with a different wavelength and longer optical penetration lengths than a CO₂ laser. Monitoring during processing clarified the formation mechanism of voids behaving as edge defects.

研究分野：レーザ加工，ガラス加工

キーワード：レーザ溶断 フレキシブルガラス 残留応力 曲げ強度

1. 研究開始当初の背景

厚さ 200 μm 以下のフレキシブルガラスは、ガラスの一般的な特性に加え、従来の板ガラスと比較し軽量で可撓性がある。モバイル端末のカバー部材としても実用されているが、切断・穴あけといった加工技術、搬送技術、洗浄技術の確立が進んでいない。例えば切断技術に関して、脆性材料であるため、端面にクラックなどの欠陥があると破損しやすく、実用化を妨げる要因となっている。この可撓性を生かすためには、切断端面を無欠陥で仕上げる必要があった。従来の板ガラスにはダイヤモンドチップによるメカニカルスクライブやレーザーで初期クラックを進展させる割断などが使われてきたが、課題がある。例えば、メカニカルスクライブを適用すると不要なクラックの生成を完全に防げず、曲げ強度としては 100–200 MPa となる (文献①)。

一方、金属の切断に用いられるレーザー溶断は、熱歪みの制御の難しさから石英ガラス以外のガラスには応用されてこなかった。また、ガラスの溶断時には熔融飛散物が発生し、表面に付着することで応力集中から割れにつながる可能性が予想される。しかし、ガラスの熔融飛散物の挙動は未解明で、制御が難しい状況である。ガラスにレーザー溶断を適用する際、金属のレーザー溶断とは挙動が大きく異なることが予想され、特に熱歪みや熔融飛散物の挙動と制御性を研究する必要がある。

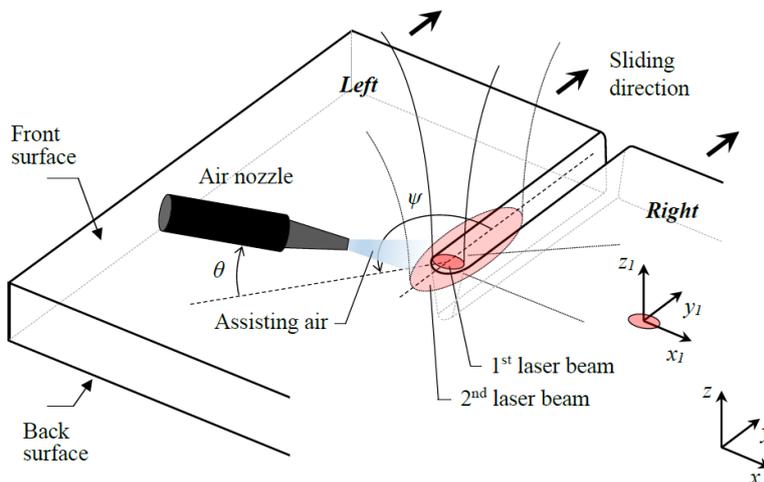


図1 レーザ溶断光学系 (2つのレーザー光を重ねて照射)

2. 研究の目的

本研究ではレーザー溶断技術に着目し、ガラスへの応用を検討する。まず、ガラスのレーザー溶断における加工過程 (1. レーザ光吸収・加熱, 2. 熔融・冷却, 3. 飛散) を明らかにしながら、無歪み・無欠陥で、丸い理想形状の端面を持つフレキシブルガラスを実現する。また、確立した知見をもとに、様々なガラスの中でも実用に近いフレキシブルガラス (強化ガラス) の切断や、ガラスの溶断現象を活かした素子封止技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

図1に示すように、複数のレーザー光を含むレーザー溶断実験系を構築した。第1レーザー光はガラスを溶断させるため、第2レーザー光は熔融部近傍の温度を制御するための熱源である。適切な加工条件 (レーザー出力・形状, 各レーザー光の相対位置, アシストガス種類・噴射圧・噴射角度など) により、レーザー溶断が可能であることを実証する。切断ガラスの評価は、端面形状、曲げ強度、熱歪み量にておこなった。

また、2つのレーザー光により平面方向の温度分布を、レーザー波長により深さ方向の温度分布を制御する。深さ方向の吸収度合いを変えるため、ガラス表面でほぼ 100% 吸収される CO₂ レーザ (波長 10.6 μm) と、より深くまで光が侵入する CO レーザ (波長 5.5 μm) を用いた。

熱歪みの形成過程を明らかにする。各レーザー光の相対位置の影響、加工後の熱歪み評価とともに、熱解析による理論的説明をおこなう。

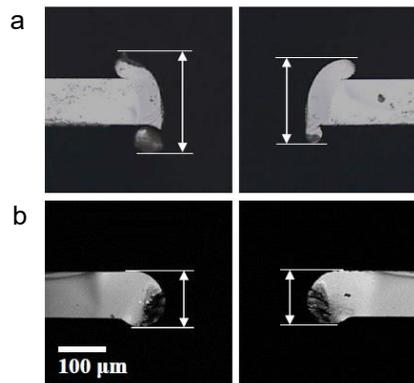


図2 左右に分離されたガラスの端面 ((a) $\psi = 0^\circ$, (b) $\psi = 180^\circ$)

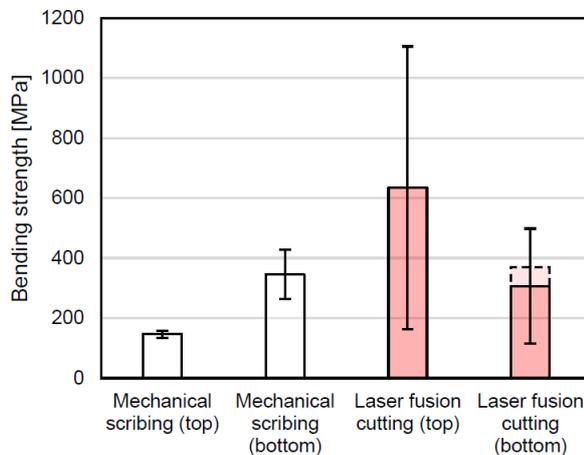


図3 2点曲げ試験による曲げ強度の評価 (メカニカルスクライブ、レーザー溶断のそれぞれにおいて表面・裏面を評価)

溶融飛散のダイナミクスを明らかにし、ガラス端面への付着除去・低減を目指す。加工時に発生した溶融飛散物が、アシストガスの影響を受けつつ、ガラス軟化部から周囲（ガラス上部・下部）へ飛散すると考えられる。高速度撮影により溶融飛散物の飛散起点・方向・速度などを可視化し、熱解析と合わせてガラスの温度分布との関係を明らかにする。

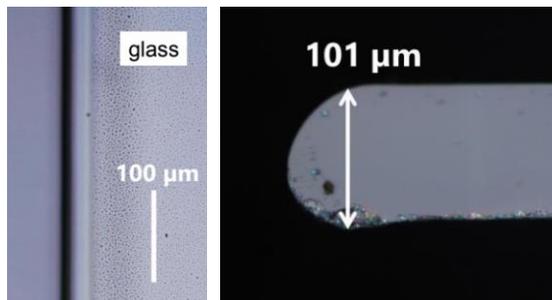


図4 切断後の写真（左：表面から，右：端面を観察した結果）

4. 研究成果

(1) 図2にアシストエア噴射角度を変えて切断した端面形状を示す。 $\psi=0^\circ$ の場合、左右両端においてガラスが上下に膨らんだ形状となった（左: $219\ \mu\text{m}$, 右: $182\ \mu\text{m}$ ）。シストエアがガラス溶断側面に当たり、アシストエアの吹き抜け方向が上下二方向に分かれ、溶融ガラスも上下に押し出されたものと考察した。 $\psi=-180^\circ$ の場合は、左右両側において、丸い形状で端面部の厚さが比較的小さな値となった（左: $122\ \mu\text{m}$, 右: $116\ \mu\text{m}$ ）。図3に最適な条件で切断したガラスの2点曲げ試験結果を示す。平均としては表面では約 $600\ \text{MPa}$ 、裏面では約 $300\ \text{MPa}$ を達成し、メカニカルスライブの場合と比較し大きな値が得られたものの、ばらつきも大きい結果となった。

(2) 波長 $5.5\ \mu\text{m}$ のCOレーザによる加工光学系を構築した。まず、ガラスの厚みを制御しつつCO₂レーザ、COレーザの透過光量を計測することにより光吸収特性の違いを明らかにした。次にCOレーザによっても溶断が可能であることを示した。図4に切断後のガラスを表面から（左図）、端面方向から（右図）観察した写真を示す。CO₂レーザの場合と同様、丸い端面を形成できた。

(3) 図5に熱歪み低減メカニズムを説明する図を示す。第1レーザ光と第2レーザ光の位置関係を変えて実験したところ、図5bに示すように、例えば左側に寄せて切断する場合、左側の分離したガラスの熱歪みが低減した（セナルモン角 11° から 8° 程度へ低減）。歪み検査機の観察結果から、ガラス端面から $1\ \text{mm}$ 程度離れた部分に引っ張り応力が発生しており（図5a）、この部分を第2レーザ光で加熱することにより、引っ張り応力が緩和され、熱歪みが低減したと考察した。端面形状の制御をしつつ溶断することで、熱歪みを約40%低減することに成功した。

(4) 図6aに加工点のモニタリング結果を示す。本実験からは溶融飛散物の挙動は確認できなかった。一方、加工点の前方にパーティクルがみられた場合、加工点でそれがガラスとともに溶融し、最終的にボイドとして端面に残留することを明らかにできた（図6b参照）。

(5) その他、温度場シミュレーションをおこない、レーザ溶断の初期モデルを構築できた。今後、さらに流体解析を含めたシミュレーションを行う予定である。

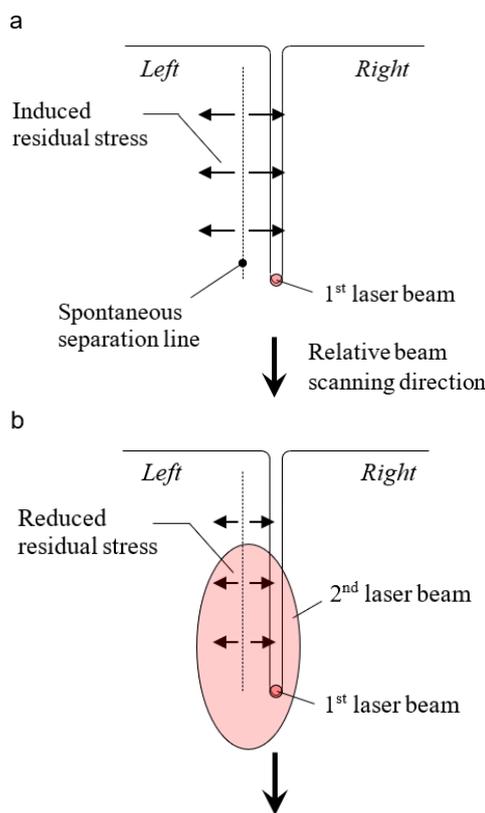


図5 熱歪み低減メカニズムを説明する図（(a) 第2レーザ光なし、(b) 第2レーザ光あり）

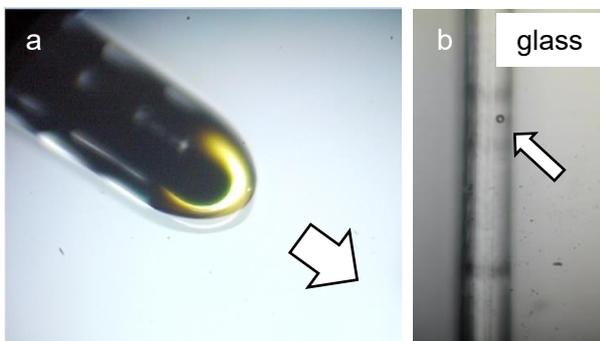


図6 (a) 加工点のモニタリング結果（矢印は切断進行方向を表す）(b) 端面に形成するボイド（表面から観察）

<引用文献>

- ① J. Dudutis et al., Optics Express, 28(21), 32133-32151 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Sho Itoh, Naoto Nagano, Souta Matsusaka, Hirofumi Hidai
2. 発表標題 Laser fusion cutting of ultra-thin glass (UTG) using a profile-controlled beam for residual stress reduction
3. 学会等名 Lasers in Manufacturing Conference 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Sho Itoh, Yusuke Kubota, Souta Matsusaka, Hirofumi Hidai
2. 発表標題 Laser fusion cutting of flexible glass via Mid-IR laser
3. 学会等名 2024 Ajou University-Chiba University Joint Symposium
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 長野尚人, 伊東翔, 比田井洋史, 松坂壮太
2. 発表標題 レーザー溶断によるフレキシブルガラスの溶融切断端面形成の試み
3. 学会等名 砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Itoh, N. Nagano, S. Obuchi, S. Matsusaka, H. Hidai
2. 発表標題 Feasibility study on laser fusion cutting of ultra-thin glass (UTG) aimed for defect-free, molten edge formation
3. 学会等名 The 9th International Conference of ASPEN (国際学会)
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		
フランス	ペルフォール・モンベリヤール 工科大学 (UTBM)		