

令和元年6月6日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06004

研究課題名(和文) 閉空間に発生させたレーザー誘起プラズマの開空間への移行のダイナミクスの理解と応用

研究課題名(英文) Dynamics of laser-induced plasma ejection which is generated in bulk glass and its application

研究代表者

比田井 洋史 (Hidai, Hirofumi)

千葉大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60313334

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：申請者らは、連続発振のレーザーをガラス内に照射することでその照射軸に沿ってガラスに変質を起こす物理現象を発見し研究を進めてきた。ガラスに高強度の光を照射し、入射面とは反対側に光吸収材を設置しておく。光吸収材にレーザーが吸収されることで温度が上昇し、温度上昇にともなってガラスが光吸収を始める。光吸収によりガラスがさらに高温になり、プラズマ化しレーザー入射側から噴出する。本申請では、このプラズマが噴出する際の挙動について、明らかにする。その結果、プラズマの噴出によりファイバ表面に微粒子が付着した形状の噴出物が得られた。さらに複数のレーザーを照射することで、異形状のプラズマを形成し、穴あけに応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザー照射によりガラス内部に形成した高温の領域が形成する。この高温の領域をガラス表面に導くと、爆発的に飛散し、急冷される。急冷されたガラスは、ファイバの上に微粒子が付着した形状をしている。また、噴出した跡は穴となる。この高温の噴出のメカニズムを解明する。さらに噴出したファイバの形状の制御や、様々な形状の穴の形成などを行った。

研究成果の概要(英文)：Glass can absorb a high power laser beam and cause the fiber fuse phenomenon, due to high temperatures. When a high power laser is transmitted into a bulk glass, absorbent on the glass absorbs the laser and is heated; the glass in the vicinity is heated by the thermal conduction, sufficient to form plasma in the fiber. The plasma propagated toward the light source and ejected when the plasma reached the glass surface. Plasma ejection formed glass fiber with nanoparticle. Blanched plasma was formed by illumination of the two laser beams and blanched hole was formed.

研究分野：精密加工

キーワード：レーザー

## 1. 研究開始当初の背景

申請者らは、連続発振のレーザをガラス内に照射することでその照射軸に沿ってガラスに変質を起こす物理現象を発見し、Continuous-Wave Laser Backside Irradiation(CW-LBI)と名付けて研究を進めてきた(図1)。これまでにプロセスの解明、変質部の評価、温度計算などを行っている。バルクガラス中に起こすCW-LBIであるが、その基本原理は光ファイバ中に起こることが知られているファイバーヒューズと同様である。光ファイバに高強度の光を照射した際に、端面や内部欠陥などを起点として温度が上昇し、温度上昇にともなってガラスが光吸収を始める。光吸収によりガラスがさらに高温になり、プラズマ化して発光する。この発光部分が熱伝導により光源側に移動する。CW-LBIでは同様の現象を光吸収材を起点にしてバルクガラス内部に能動的に起こす。

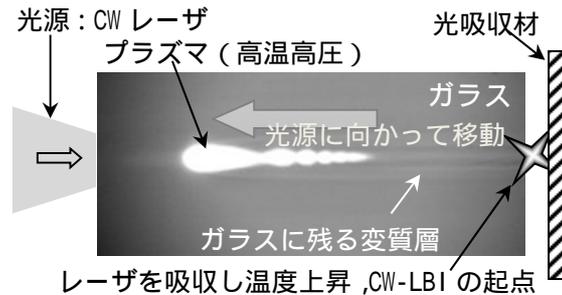


図1 申請者らが発見した CW - LBI 現象

CW-LBIではプラズマ化した発光部の温度は5000K以上になり、同時に閉空間に閉じ込められていることから高圧となっていることが予想される。また発光部は照射軸に沿って長細い形状をし、長さは数mmに達する。申請者らは、この高温・高圧のプラズマをガラス端面まで誘導した場合、発光部先端がガラス端面に達した瞬間にプラズマが解放されると考えた。閉空間へプラズマが瞬間的に解放される。石英ガラスにCW-LBIを起こし、そのプラズマをガラス端面まで導いた結果、瞬間的にガラスが噴出し、その跡に発光部の形状に似た紡錘形の穴が残された(図2)。

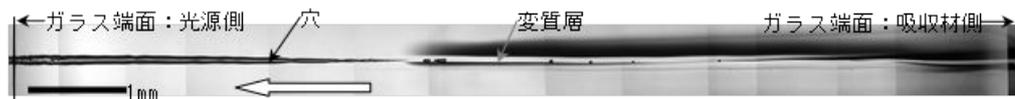


図2 CW-LBIで誘起したプラズマが通り抜けてプラズマが解放された後のガラス

## 2. 研究の目的

本申請では上述の物理現象のダイナミクス解明を目的とする。発光部の移動および噴出プロセスの観察、噴出物の調査などを目的とした。加えて、アプリケーションの例として複雑形状穴の形成を試みた。

## 3. 研究の方法

実験装置の概略図を図3に示す。石英ガラス、銅箔、スライドガラスを重ねジグで固定した。連続発振のファイバレーザを利用した。レンズで集光してレーザ照射した。飛散したガラスの採取の際には、試料表面から~3.5mm離れたところに厚さ3mmの石英ガラスを設置し、このガラスを透過させレーザ照射している。レーザ照射により、噴出する繊維状の噴出物を付着させ回収した。複雑形状穴の形成用セットアップを図4に示す。2つのレーザをガラス内部で直交するようにセッティングした。

## 4. 研究成果

レーザ照射により箔近傍に発光が観察され、その発光が光源の方に移動する、この発光がガラス表面に達すると爆発音と共にガラスが噴出し、その跡に穴があく。

トラップ用のガラスを外してレーザ照射し、吹き出している様子を観察した結果を図5に示す。噴出が始まり、試料の光源側に影が認められたフレームを0sとして定義した。0sでは照射スポット近傍1mm程度の範囲に影が認められる。15.75usでは照射スポットを中心に5mm程度の範囲に濃い影が観察される。時間が経つに従ってこの濃い影が離れていく。63us以後では繊維状の溶融飛散物が放射状に飛散している様子が観察できる。

噴出したものを観察するために、被加工材から3.5mm離れた位置に厚さ3mm、20mm角の石英ガラスを設置した。レーザ光はガラスを透過し、同様に銅箔を加熱、発光点が移動し、同様にガラスが噴出し、堆積用のガラス表面に繊維状の噴出物が付着した。その様子を図5に示す。直径数mm程度の範囲に白く繊維状の付着物が観察された。さらに、写真では認められ

ないが、20mm 角のガラス全体に薄く白い付着物が観察された。

この繊維状のものを詳細に観察するために、FE-SEM で観察した。その結果を図 5 に示す。多くのファイバは直径 500nm 以下でありファイバに直径数 10nm の粒子が多く付着している様子が観察される。

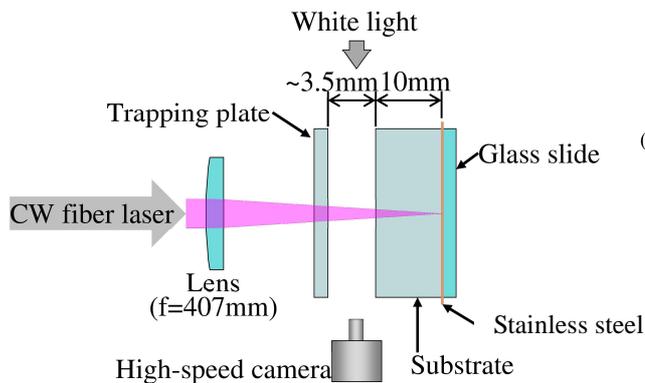


図 3 ファイバ採取用セットアップ

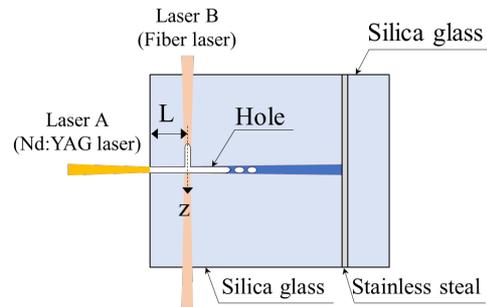
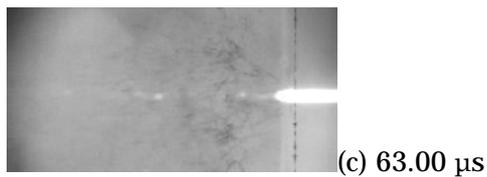
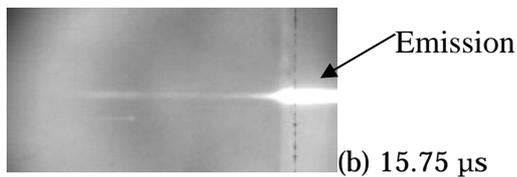
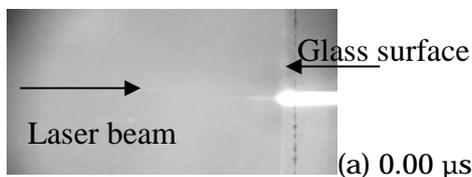
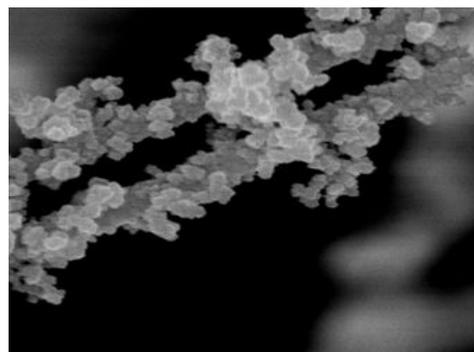
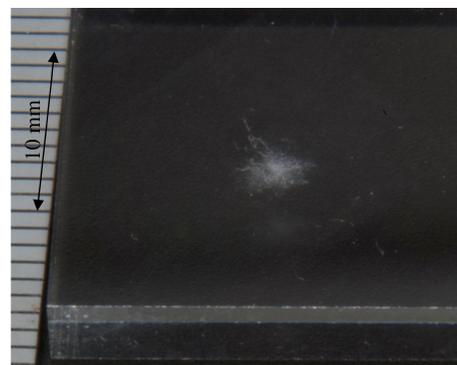


図 4 分岐穴形成用セットアップ



5 mm



100 nm

図 5 噴出するガラスの高速度カメラ像と噴出したガラスファイバ

複雑形状の穴形成では、レーザー A の照射によりステンレス箔が高温となる。接しているガラスも高温となりファイバレーザが始まる。ファイバヒューズはステンレス箔表面からレーザー A の光軸にそって進む。

レーザー B との交点にくると分岐し、ファイバレーザビームにも沿ってファイバヒューズが進む。ファイバヒューズは 2 方向に進むが、先にレーザー A 光軸側のファイバヒューズがガラス端面に到達する。その結果、内部のプラズマが噴出する。内部のプラズマ、すなわち光吸収部分がなくなるため、2 つのファイバヒューズともに発光が弱くなる。ファイバレーザ方向に進むファイバヒューズも進展が止まり、プラズマ発光していた部分が噴出して穴となる。

図 6 に加工後の試料の光学顕微鏡像を示す。レーザー照射側から、レーザー A の光軸に沿って穴があいている。レーザー B との交点からレーザー B の光軸に沿って穴があいている。



図6 分岐した穴

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

- 1) Daijiro Tokunaga, Shun Sato, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba and Noboru Morita: A novel method of triggering fiber fuse inside glass by optical breakdown and glass drilling as its application, Appl. Phys. A, accepted, 査読有.
- 2) Namiko Saito, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba, and Noboru Morita: Synthesis of silica glass fibers and nanoparticles by continuous-wave laser backside irradiation, Appl. Phys. A, **123**, 10 (2017) 643, 査読有
- 3) Nobuyasu Nishioka, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba and Noboru Morita: Continuous-wave laser-induced glass fiber generation, Appl. Phys. A, **123**, 9 (2017) 600, 査読有.

〔学会発表〕(計 3件)

- 1) Hirofumi Hidai: Laser-induced plasma drilling of silica glass, ICCPE (The 3rd International Conference on Computing and Precision Engineering) and MNHTE (4th Micro & Nanoscale Heat Transfer and Energy Workshop), (2017), 招待講演.
- 2) Nobuyasu Nishioka, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Noboru Morita, Dynamic observation of glass fiber generation with continuous laser illumination by high-speed imaging, ICI 2017 (the 3rd International Conference on Inventions ) (2017)
- 3) 西岡宣泰, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇: レーザ照射によるマイクログラスファイバー発生メカニズムの解明, 2017年度精密工学会春期大会学術講演論文集, (2017) 855-856.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 森田 昇  
 ローマ字氏名: Norobu Morita  
 所属研究機関名: 千葉大学  
 部局名: 大学院工学研究院  
 職名: 教授  
 研究者番号(8桁): 30239660

研究分担者氏名: 松坂 壮太  
 ローマ字氏名: Souta Matsusaka  
 所属研究機関名: 千葉大学  
 部局名: 大学院工学研究院  
 職名: 准教授  
 研究者番号(8桁): 30334171

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。