

CW レーザ背面照射法によるガラス内部への金属球導入のメカニズムの解明

千葉大学工学部機械工学科 ○西岡宣泰, 千葉大学大学院◎比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇

金属箔を付着させたガラスへのレーザ照射により、ガラス内部に金属球が導入される現象がある。本研究ではこの導入原理の解明を目的とした。まず高速度カメラを用いて金属球が導入する瞬間を撮影した。その結果、金属箔近傍が発光すると同時にレーザの光路にそって黒色の変質部が形成し、この変質部の先端から金属球が導入されることを明らかにした。さらに断面観察により、黒色の変質部に金属箔成分が含まれていることがわかった。

1. 緒言

ガラスは化学的、物理的な安定性に優れ、高い透過性および屈折率、低い熱膨張率をもつため、電気的、光学的に広く応用されている。電気的な応用例として、光デバイスとプリンタ回路基板の間をつなぐ高速光伝送用ガラスインターポーザが挙げられる。ガラスが高い透過率および低い熱膨張率を有する特性を生かし、従来用いられてきたメタル配線よりも高速化が可能となる¹⁾。光学的な応用例として、光ファイバーが挙げられる。光ファイバーはガラスの高い透過率および屈折率を有する特性を生かし、光を安定的に運ぶ技術である。光を長い伝送距離で移動させることができる特性を生かした情報通信技術の1つとしての応用の他に、短い伝送距離で高パワーを安定的に伝播できる特性を生かした切除、凝固等の医学的な応用もされている²⁾。

このような背景に対してCW レーザ背面照射法(CW-LBI法)は、CW レーザを照射することで金属微粒子(以下、金属球と称する)がガラス内部へ導入およびマニピュレーションされるという手法である³⁾。このようにレーザによりガラス内部に微粒子を導入する手法は従来になく、金属微粒子を連続的に配置することによるガラス内部の電気伝導路や金属球マニピュレーション時に生じるガラスの変質を生かした光導波路などへの応用が期待できる。

しかし、金属球が導入するメカニズムは正確には解明されていない。

本研究では、先行研究で用いられている CCD カメラの他に、高速度カメラ、SEM を用いて金属球が導入する瞬間の様子および金属球の観察を行った。その結果を踏まえて金属球が導入するメカニズムの検討を行った。

2. 実験方法

金属球が導入するメカニズムの解明を目的として、金属球が導入する瞬間の撮影および金属球の導入に伴う黒色変質部の断面観察を行った。そして、実験結果を踏まえて金属球が導入するメカニズムの予想を行った。また、金属球には SUS304 箔の主成分が含有されていることが分かっている。Fig. 1 に実験装置を示す。レーザ発振器には Raycus 社の CW レーザである RFE-C020/A/2/A を用いた。金属球を導入するガラスに 20×20×5mm のホウ珪酸ガラス(Corning, Pyrex[®], 7740)を、断熱材として石英ガラスを用いた。金属球として導入する金属箔として、厚さ 10 μ m の SUS304 を用いた。金属球が導入する様子を高速度カメラ(ノビテック(株), Phantom V7.3)を用いて観察を行った。黒色変質部の断面観察を光学顕微鏡、SEM および EDS を用いて行った。

3. 実験結果

Fig. 2 に金属球が導入する様子を高速度カメラを用いて撮影した結果およびガラス内部で生じたファイバーヒューズの様子を示す。ファイバーヒューズとは、ガラスを局部的に加熱することにより、SiO₂ が熱分解し、発光を伴うプラズマ状態となり、このプラズマが光を吸収することで光源方向に進んでいく現象である。ファイバーヒューズは 2000 $^{\circ}$ C 以上に加熱されると顕著に発生し、高温高压を伴うことが知られている⁴⁾。

(a)~(g)には金属球の導入過程、(h)にはガラス内部で生じたファイバーヒューズを示す。(a)には SUS304 箔が反応する直前の試料の様子を示している。レーザの照射に伴って、SUS 箔近傍が発光し(b)、この発光部分が光源方向に向かって伸びる(c)。反応部の発光が根本部より弱くなり暗くなり(d)、反応部全体が暗くなる(e)。反応部先端

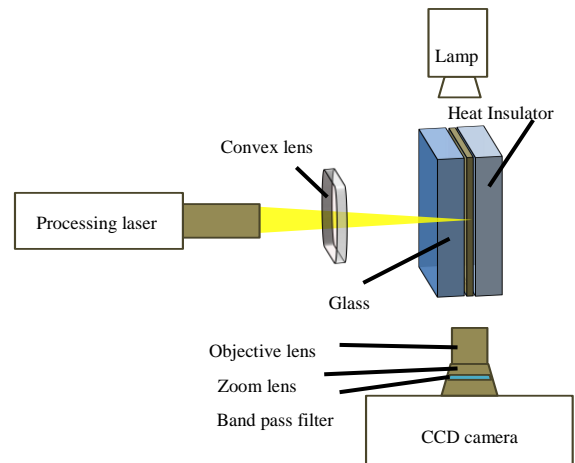


Fig.1 Schematic illustration of the experimental equipment

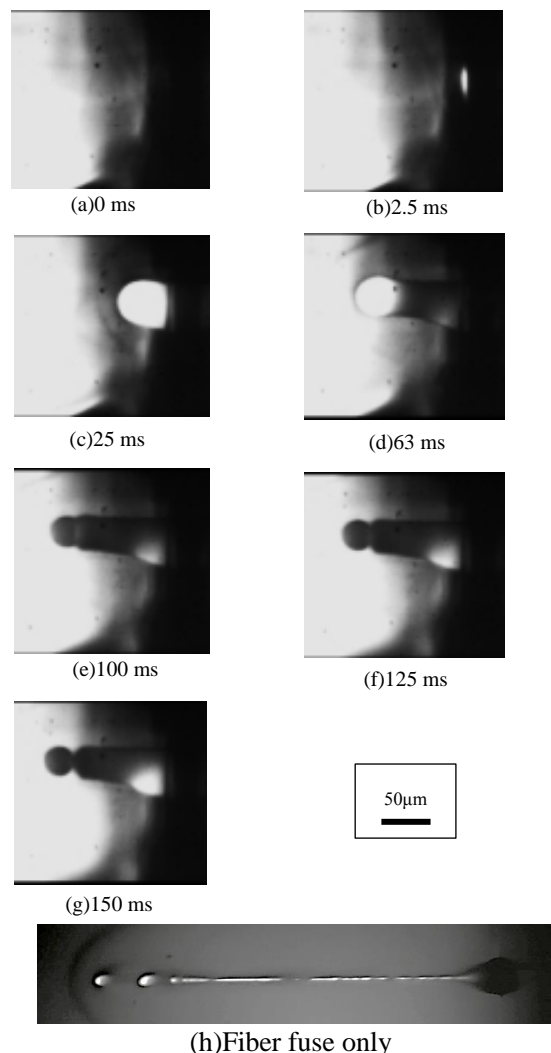


Fig. 2 Snapshots of occurring a metal particle

から球状の物体が発生し始め(f), 球状の物体が完全に反応部先端から独立する(g).この球状の物体を金属球と呼んでいる. 金属球の導入は0.47 mm/s程度で反応が進み, SUS304箔から70 μm 移動して完了している. また, ファイバーヒューズの反応(g)と金属球の導入過程での発光(c)(d)を比較する. とともに黒色の根本から発光を伴って光源方向へ伸びている. しかし, 反応部の長さはファイバーヒューズが390 μm であることに對して, 金属球の導入過程の発光は70 μm 程度とファイバーヒューズの約0.18倍である. また, ファイバーヒューズの速度が0.2~1.2m/sであること⁴⁾に對して, 金属球の導入過程の発光は0.47 mm/sとファイバーヒューズの $3.9 \times 10^4 \sim 2.4 \times 10^3$ 倍である. 発光の様子が似ているが, 反応部の長さおよび反応の速度が異なる. これは, ファイバーヒューズはガラスのみの反応であることに對して, 金属球の導入過程における発光はガラスおよびSUS304箔の成分が含まれているからだと考えられる. そのため, 金属球の導入に伴う発光はファイバーヒューズの特徴である発生時の温度や高圧を生じさせる可能性がある.

Fig. 3およびFig. 4にレーザー光方向へ伸びた黒色変質部の断面の観察結果およびEDSを用いた成分分析の結果を示す. Fig. 3(a)および(b)はそれぞれ黒色変質部の先端および根本である. Fig. 4の赤色線および黒色線はそれぞれFig. 3(a)および(b)の印部分の点分析である. AuおよびCはEDSを用いて成分分析を行う際, 導電を取るため使用した成分であるため, 成分分析結果から無視する. また, 成分分析においてFe, NiおよびCrは試料に用いたSUS304箔の主成分であり, SiおよびOは試料に用いたホウ珪酸ガラスの成分である.

Fig. 4より黒色変質部の根本および先端はどちらもSi, Fe, Ni, Crの成分が認められる. しかし, 黒色変質部の根本に比べ先端はNiが減っていることが分かる. このことより, 黒色変質部がガラス中に伸びていく反応の過程でNiが黒色変質部の周囲のホウ珪酸ガラスへ拡散している可能性がある.

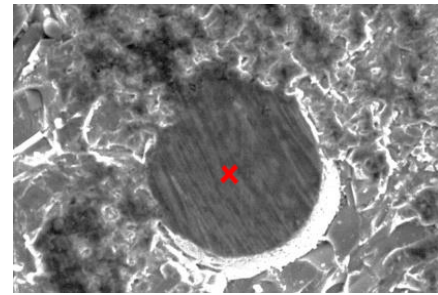
以上の結果を踏まえ検討した金属球がガラス内部へ導入するメカニズムをFig. 5に示す. (a)では, CW-LBI法によって, ホウ珪酸ガラスへレーザー照射が行われている. (b)では, レーザー光はホウ珪酸ガラスおよび断熱材で挟まれているSUS304箔のみで吸収されている. これは常温において, ホウ珪酸ガラスはレーザー光を透過するためである. (c)では, 加熱されたSUS304箔が周辺のホウ珪酸ガラスへ熱を拡散している. このとき, 融点が1400°C程度のSUS304箔は熔融し, ホウ珪酸ガラスは2000°C程度まで上昇すると考えられる⁵⁾. (d)では, レーザーで加熱されたSUS304箔を起点にレーザー光路方向へ発光が発生している. 発光がファイバーヒューズと同様に高温高圧であるとすると, 2000°C近くまで高温になったホウ珪酸ガラスのレーザー透過率が急激に低下し, レーザーを吸収することで, さらに高温になることにより生じる. (e)では, 温度上昇により発光部に陽圧が生じている. (f)では, 金属球の導入に伴う発光が終わり, 反応部の根本に負圧が生じていると考えられる. 発光は一時的であり, 反応が終わると温度が2000°Cから常温まで急降下し圧力が下がる. そのため, 相対的に反応部の根本に負圧が生じ, ガラス境界部に存在する熔融したSUS箔が反応部先端へ移動する方向へ圧力がかかる. (g)では, 金属球がホウ珪酸ガラス内部へ導入している. 発光が終わると, 反応部全体に根本から先端方向へ順番に負圧がかかる. (f)で熔融したSUS304箔とガラスの混合している黒色変質部が, 反応部先端まで移動し, ガラス内部へ導入される. この移動の駆動力の一つの要因として圧力変動の結果, 根本から発生した負圧が考えられる. また, 球状であるのは界面張力の影響であると考えられる.

4. 結言

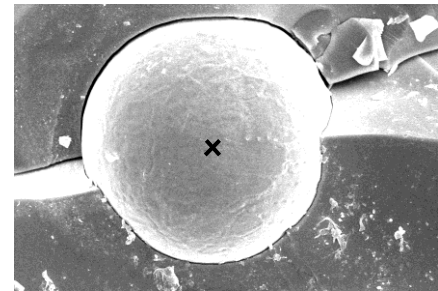
金属球は黒色変質部から連続的に発生しており, 金属球の導入にはファイバーヒューズから生じる圧力差が影響を与えていると考えられる.

5. 参考文献

- 1)松丸幸平 他, フジクラ技法 125,2(2010)12
- 2)久保宇市光, レーザ研究 22,5(1994)105
- 3)山崎貴斗 他, 精密工学会誌 76,5(2010)577
- 4)光産業技術振興協会, OITDA 規格 Technical Paper, 2010
- 5) Hirohumi Hidai et al, OPTICAL EXPRESS, 21,16(2013)18955



(a) Top



(b) Root

10 μm

Fig. 3 SEM micrographs of cross section of black affected zone

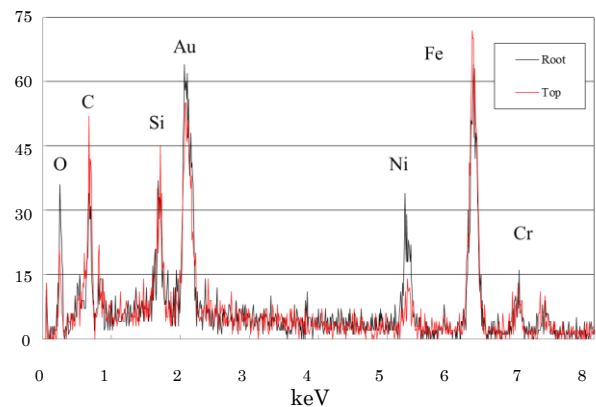


Fig. 4 EDS analysis result

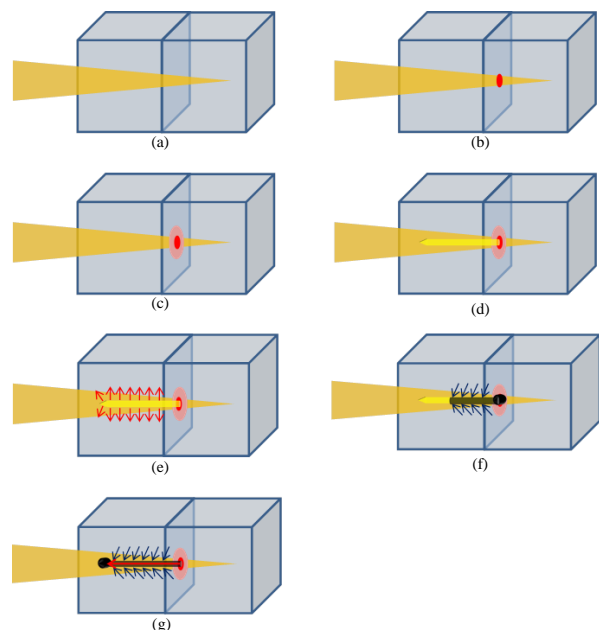


Fig. 5 Scheme illustrating the implantation of the SUS304 foil into glass as a particle