

令和 4 年 5 月 3 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02035

研究課題名(和文) ガラス中の金属球へのレーザー照射により誘起される物質移動現象と光学デバイスへの応用

研究課題名(英文) Laser-induced metal sphere manipulation in glass

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：申請者らが見出したガラス内部での金属球のレーザーマニピュレーションに関して、ガラス内部での金属球の移動メカニズム、ガラス/金属の組成変化プロセスを解明し、さらに応用展開に必要な知見を得ることを目的とし研究を行った。その結果、移動や金属箔からの導入においては、高温時に起きるガラスの吸収が重要な役割を果たしていることを明らかにした。組成変化については従来報告していた、金属成分のガラスへのドーピングに加え、ガラスの微量成分のデドーピングを見出した。応用展開には、移動量、ドーピング領域の制御に加えて、研究遂行中に見出した金属球の分離について、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

申請者らが見出したガラス内部での金属球のレーザーマニピュレーションに関して、基礎的な理解と応用に必要な検討を行った。その結果、移動メカニズムを明らかにした。ガラス内部において所望の位置、領域に金属を添加できることを示し、さらに逆にガラスの内部から、特定の元素を除き金属の内部に濃縮できることを見出した。ガラスの内部で金属球を分離できることを見出し、このメカニズムを明らかにした。これらから、ガラスの内部の所望の位置の組成を自由させ、様々な着色を施す可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The researchers have reported the laser-induced metal sphere migration in the glass. The metal sphere migrated toward the light source along the optical axis. In this project, we studied the metal sphere migration process, metal-glass composition changes, and applications. The metal spheres moved fast with plasma emission, and their trajectory contained fine metal particles when the laser power density was high. The temperatures of the metal sphere with slow (<0.1 mm/s) and fast (>1 mm/s) speeds were 1,900 and 2,900 K, respectively. The formation of a stainless-steel core-silver shell sphere in the glass has been demonstrated by passing a stainless steel sphere through silver-doped borosilicate glass. Also, we demonstrated the metal sphere separation by two laser beam illumination from the opposite direction.

研究分野：レーザー加工

キーワード：ガラス レーザ ドーピング デドーピング

1. 研究開始当初の背景

光によって物質を移動させる方法として輻射圧を利用する方法が知られている。レーザピンセットとも呼ばれ、細胞の移動などに広く応用されている。2018年にはノーベル賞の対象となった。輻射圧以外にも、温度の不均一により、界面張力に違いが生じることで誘起される移動現象はマランゴニ効果と呼ばれ、流れを生じることが知られている。

申請者らは、ガラスの片面に金属箔を密着させ、反対側からガラスを通して連続発振レーザを照射した際、金属箔が溶融し金属球となってガラス内部に入る現象を見いだした(図 1(a))。さらにレーザ照射を続けることで、金属球がガラス内部を移動する。レーザ光により金属球が加熱され、周囲のガラスに熱が伝わり軟化、流動することで移動する。すなわち固体のガラス中において、金属球の周りのみ局所的に軟化することで、金属球が移動する現象である(図 1(b))。

この金属球は光源側(高温側)に移動する。この駆動力については、界面張力の温度依存性により説明できる。温度上昇につれて金属とガラスの界面張力は小さくなるため、レーザが照射されていない側(低温)に比べてレーザ照射側(高温)の界面張力が小さくなる。この界面張力の不釣り合いが主な駆動力である(図 1(c))。このため、レーザの照射方向などを制御することで、所望の方向、位置に金属球を移動できる。本現象は輻射圧を利用する手法などとは異なる駆動力にて移動する現象である。輻射圧により加わる力は球を押す方向の力であるのに対して、本現象では、逆に、引っ張る力が加わり、かつ、輻射圧よりも大きな力であるため、光源方向に移動する。

さらに、金属球の移動に伴い、金属球および軌跡のガラス組成が変化することを確認した。具体的には金属球が徐々に溶け出し、金属球の成分がガラスの軌跡に溶解(ドーピング)したり、ナノ粒子として析出したりする。

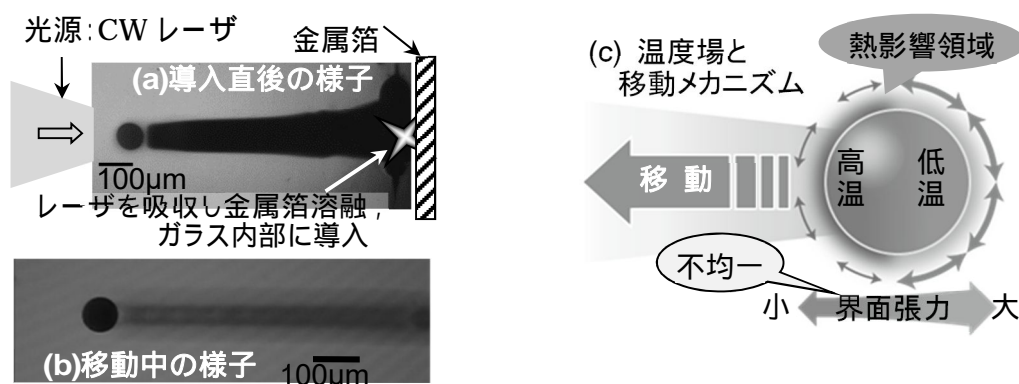


図1 金属球移動現象

2. 研究の目的

本申請は申請者が発見したガラス内部での金属球の移動現象について、(1)金属球の移動現象と(2)ガラス/金属の組成変化プロセスを解明し、応用展開に必要な知見を得ることを目的とする。さらに、(3)光学デバイス等への応用を念頭に、ガラス内部に光学特性の異なる領域を3次元的に作製する手法についての検討を目指した。

3. 研究の方法

(1) 金属球移動現象について、その移動現象で未解明な部分について、どの移動状態の観察、評価、解析などを行い、移動現象についての理解を深める。他にも、最初に金属箔ガラスに金属球が導入する際(図 1(a))の条件、プロセスが不明であるため導入プロセスを解明する。この導入プロセスの解明により安定的な導入や、導入する金属球の大きさの制御などが期待できる。

(2) 金属球の移動に伴いガラス中への金属のドーピング起きるプロセスの解明を試みる。同時に、ガラス、金属の組み合わせを変えることで、組成による違いを評価する。

(3) 金属球は高温となるレーザ光源側に向かって移動する。このため、レーザ光の方向を変えることで移動方向を制御でき、所望の位置に球を配置できる。対向する2つのレーザでの加

熱による光軸とは直交する方向への移動を試み、金属球のマニピュレートを実現する。軌跡のガラス組成変化や金属成分ドーブにより光学特性を変化できる。この軌跡の透過率、屈折率などの光学的特性を評価し、組成との関係をあきらかにすることで、応用対象と実用化の可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) 金属球移動現象について

移動現象で未解明な部分について、移動状態の観察、評価、解析などを行い、移動現象についての理解を深めた。これまで数値解析により界面張力(図 1(d))の合力を算出し、低速移動時(移動速度 1mm/s 以下)については、解析結果が実験結果と良く一致する結果を得ている。しかし、レーザパワーを高めると、高速な移動現象(移動速度 20mm/s 以上)が起き、移動時の状況も変わる。この高速移動現象の駆動メカニズムがあきらかにならなかったため、この点について解明した。

図 2 に示すようにパワー密度と移動速度の違いについて評価した。その結果、パワー密度がある値よりも大きくなると、移動速度が急激に速くなり、激しい発光が認められるようになり、同時に軌跡に金属がドーブされ不透明になることが明らかになった。さらに、この移動中の発光スペクトルを測定したところ、低速で移動している際には、金属球が移動している速度は 1900K 程度であるが、高速で移動している際には 2900K と高温になっていることが明らかになった。ガラスは 2000K 以上で不透明となりレーザ光を吸収する。このため、金属球前縁のガラスが光を吸収し、軟化する範囲が大きくなること、高温によりガラスの粘度が低下し粘性抵抗が小さくなることなどが、移動速度上昇の原因であると明らかにした。

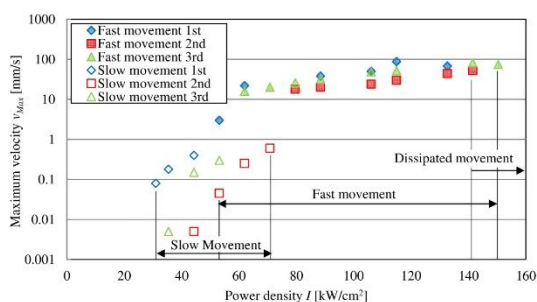


図2 パワー密度と移動速度

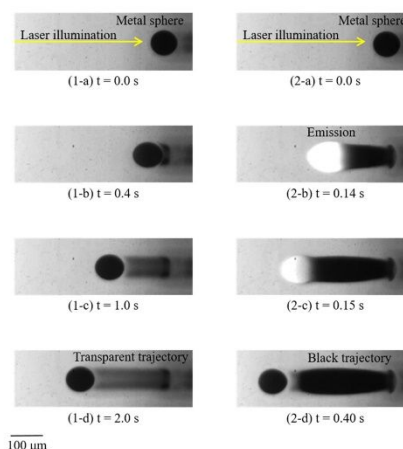


図3 移動状態の違い

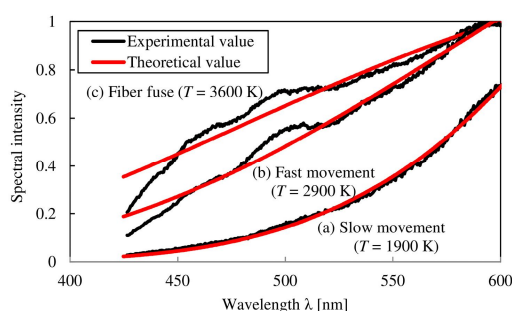


図4 移動中の発光スペクトル

N. Nishioka, H. Hidai, et.al., Clarification of fast metal sphere movement in glass," Opt. Express 27, 18988-19001 (2019) より転載

さらに、最初に金属箔から金属球として導入(図 1(a))されるメカニズムについても検討を行った。高速度カメラ観察、分光測定、温度解析により、金属箔が高温となり溶融し、さらに 2000K 以上の高温となることで、ガラスによるレーザの吸収が起きることが必要である。同時に、この高温のガラスの吸収部分の移動速度が速いと、金属球が追従できない。このため、50mm/s 以下の速度で吸収部分が移動する条件において、金属箔が金属球となってガラス内部に導入できることを明らかにした。

(2) 金属球の移動に伴うガラス中への金属のドーブ

(2) ガラスと金属の組み合わせを様々に変え、その組成変化について観察した。その結果、金

とホウ珪酸ガラスの組み合わせにおいて、金がナノ粒子となってガラスの内部に拡散すること、リンや銀を含むガラス内部でステンレス鋼球を移動させると、ステンレス鋼球からリンや銀が観察され、同時にリンや銀がガラスの内部から取り除かれること(デドープ)現象を明らかにした。特に銀を用いた場合では銀とステンレス鋼が非相溶であるため、図5で示す、ステンレス鋼を銀が囲んだコア-シェル構造を有する金属球となることを明らかにした。

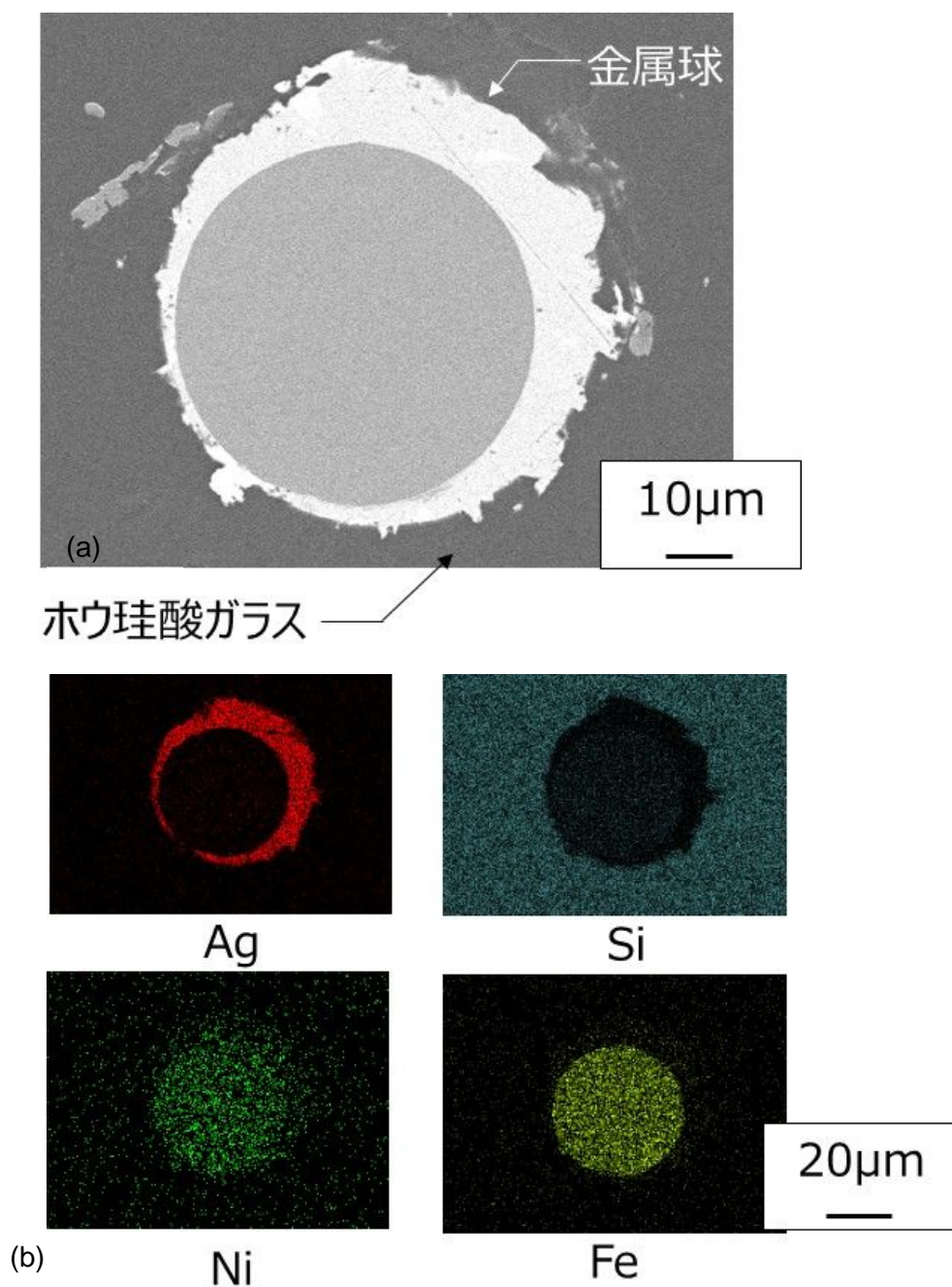


図5 銀含有ガラスを通過した後のステンレス鋼球，(a)断面 SEM 像，(b)ステンレス鋼球の X 線マップ像

(3) 応用検討

(3) 金属球は高温となるレーザ光源側に向かって移動する。まずは、高速移動現象を利用して、所望の長さの範囲に金属をドープし、着色することを試みた。パワーを変えて、着色された部分の長さをプロットした例を図6に示す。この結果より、所望の長さの範囲を着色できることを示した。

さらに、対向する2つのレーザでの加熱することで、光軸とは直交する方向への移動を試み

た．その結果，移動は実現できなかったが，球を分離することに成功した．その様子を図7に示す．

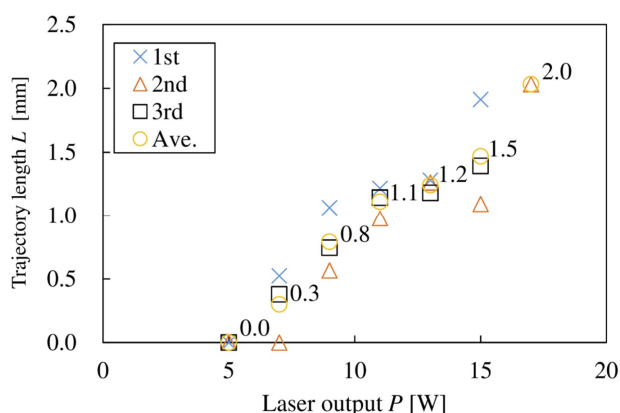


図6 ガラスの着色長さ，
N. Nishioka, H. Hidai, et.al., Length control of metal particles containing trajectories generated by metal sphere movement and elucidation of the relationship between metal sphere speed and metal addition, Opt. Mater. Express 10, 1105-1119 (2020)より転載

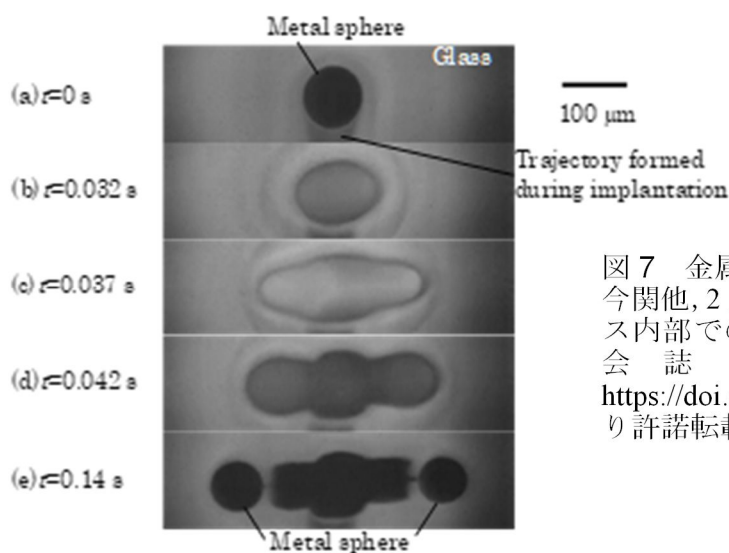


図7 金属球の分離，
今関他, 2 方向レーザー照射によるガラス内部での金属球の分裂, 精密工学会誌 87, 6 (2021) 581. <https://doi.org/10.2493/jjspe.87.581> より許諾転載

結果のまとめ

本研究では申請者が発見したガラス内部での金属球の移動現象について，(1)金属球の移動現象と(2)ガラス/金属の組成変化プロセスの解明を目的としていた．完全な解明には至っていないものの，高速移動現象や金属箔からの導入においてガラスの吸収が重要な役割を果たしていること 組成変化についても，デドープなどの新しい現象を見出したことなどの進展が見られた．(3)応用展開には，移動量，ドープ領域の制御に加えて，当初予定していなかった金属球の分離などといったことを見出した．

当初予定を完全には完遂できなかったものの，計画以外の結果も含め，6報の投稿論文を発表し 論文賞も受賞した 多くの成果をあげることができ 当初の目標は達成できたと考えている．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 IMAZEKI Taichi, NISHIOKA Nobuyasu, HIDAI Hirofumi, MATSUSAKA Souta, CHIBA Akira, MORITA Noboru	4. 巻 87
2. 論文標題 Metal Sphere Separation in Glass by the Two Laser Beam Illumination	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society for Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 581 ~ 587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.87.581	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nobuyasu Nishioka, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Noboru Morita	4. 巻 27
2. 論文標題 Clarification of fast metal sphere movement in glass	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Optics express	6. 最初と最後の頁 18988-19001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.27.018988	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nobuyasu Nishioka, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Noboru Morita	4. 巻 10
2. 論文標題 Length control of metal particles containing trajectories generated by metal sphere movement and elucidation of the relationship between metal sphere speed and metal addiction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optical material express	6. 最初と最後の頁 1105-1119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OME.386813	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fukushima Shunta, Hidai Hirofumi, Matsusaka Souta, Chiba Akira, Morita Noboru	4. 巻 146
2. 論文標題 Laser heating conditions for copper sphere implantation into borosilicate glass	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics & Laser Technology	6. 最初と最後の頁 107494 ~ 107494
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlastec.2021.107494	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshimura Shukoh, Hidai Hirofumi, Matsusaka Souta, Chiba Akira, Kishi Tetsuo, Morita Noboru	4. 巻 584
2. 論文標題 Dedoping of phosphorus and tin via laser-induced nickel sphere migration in glass ceramics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Non-Crystalline Solids	6. 最初と最後の頁 121506 ~ 121506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jnoncrysol.2022.121506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshimura Shukoh, Kawamura Hirofumi, Hidai Hirofumi, Matsusaka Souta, Chiba Akira, Kishi Tetsuo, Morita Noboru	4. 巻 128
2. 論文標題 Core-shell sphere formation by laser-induced migration of stainless steel sphere in silver-doped glass	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics A	6. 最初と最後の頁 121506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00339-022-05578-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Taichi Imazeki, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Noboru Morita
2. 発表標題 Metal sphere separation in glass by the two laser beam illumination
3. 学会等名 The 7th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (OMC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福嶋駿太, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇
2. 発表標題 レーザー照射を用いた金属ドープによるガラス吸収特性の制御
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西岡宣泰, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉 明, 森田 昇
2. 発表標題 ステージ位置制御によるガラス内部への金属球の導入安定化の提案およびレーザー照射条件が与える影響
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今関太一, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇
2. 発表標題 2方向レーザー照射によるガラス内部での金属球の分裂
3. 学会等名 2020年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Imai, Shuko Yoshimura, Hirofumi Hidai, Tetsuo Kishi, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Noboru Morita
2. 発表標題 Mass transfer and composition change during metal sphere migration in glass by continuous laser illumination
3. 学会等名 The 6th Optical Manipulation and Structured Materials Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福嶋駿太, 西岡宣泰, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇
2. 発表標題 レーザー照射によりガラス内部に導入される金属球の直径制御および導入可能な金属拡充
3. 学会等名 2020年度精密工学会卒業研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今井拓哉, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇
2. 発表標題 ガラス内部の金属球へのレーザー照射による微粒子の吸引
3. 学会等名 日本機械学会第13回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今関太一, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇
2. 発表標題 ガラス中の金属球マニピュレーションにおける金属球移動軌跡の光学分析
3. 学会等名 2019年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西岡宣泰, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇
2. 発表標題 ガラス内部の金属微粒子が生成する軌跡に対してレーザー照射条件が与える影響
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会学術講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福嶋駿太, 比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇
2. 発表標題 レーザー照射によるガラス内部への金属球の導入に必要な金属膜の加熱条件
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会学術講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福島駿太, 伊東 翔, 比田井洋史, 岸 哲生, 松坂壮太
2. 発表標題 連続波レーザーを用いた金属球マニピュレーションによるガラスの構造変化
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季大会学術講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunta Fukushima, Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka
2. 発表標題 The laser-induced metal sphere implantation into glass
3. 学会等名 Optical Manipulation and Structured Materials Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 比田井 洋史
2. 発表標題 ガラス中での金属球のレーザーマニピュレーション
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会講演予稿集 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hirofumi Hidai, Souta Matsusaka, Akira Chiba, Noboru Morita
2. 発表標題 Laser-induced metal sphere movement in glasses
3. 学会等名 1st Asia-Pacific Thermofluid Science and Engineering Conference (APTSE2019), (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirofumi Hidai
2. 発表標題 Laser-induced metal particle manipulation in glasses
3. 学会等名 The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究分担者	森田 昇 (Morita Noboru) (30239660)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	
研究分担者	松坂 壮太 (Souta Matsusaka) (30334171)	千葉大学・大学院工学研究院・准教授 (12501)	
研究分担者	岸 哲生 (Tetsuo Kishi) (90453828)	東京工業大学・物質理工学院・助教 (12608)	

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
---------	---------