

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 10 日現在

機関番号：12501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656096

研究課題名(和文) ガラス内部における微粒子のレーザマニピュレーション

研究課題名(英文) Particle manipulation in glass by laser illumination

研究代表者

比田井 洋史(Hidai, Hirofumi)

千葉大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60313334

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：申請者らは、ガラスの片面に金属膜を成膜し、反対側からガラスを通して金属膜にレーザ光を照射した際、金属膜が溶融し球状の微粒子となって、ガラス内部に入る現象を見出した。本研究では、この移動メカニズムの解明を行い、表面張力による力が支配的であることを明らかにした。さらに、画像認識を用い、微粒子の位置を把握、ステージを制御することで、同じ速度で移動させることを実現した。

研究成果の概要(英文)：We optically manipulated a metal particle in borosilicate glass. The glass in the neighborhood of the laser-heated metal particle softened; hence, the metal particle was able to migrate in the glass. In this research, the driving force of the metal particle toward the light source in the glass provided by laser illumination was investigated. The variation in the surface tension of the glass at the interface between the glass and the metal particle induced by the temperature gradient was calculated via a numerical temperature calculation. In addition, constant speed migration was achieved by detecting the particle position with CCD camera and controlling the position of the particle.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：レーザ マニピュレーション ガラス

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、ガラスの光吸収率の温度依存性を利用したガラス内部への変質部形成の研究を行ってきた。この研究を行っていた際に、ある条件を満たした時にガラスに成膜した金属が熔融し球状となってガラス内部に入る現象を見出した。図1にこの模式図を示す。ガラス片面に金属膜を成膜し、反対側からガラスを通して金属膜にレーザー光を照射する(図1(a))。金属膜が高温になると同時に熱伝導により周囲のガラスも温度上昇する(図1(b))。さらに温度上昇しガラスが軟化、金属膜が熔融し(図1(c))、表面張力によって球状の微粒子となって、ガラス内部に入る。この金属微粒子が光を吸収、周囲のガラスを軟化させつつ光源方向に移動する(図1(d)、図2)。図3に照射終了後の様子を示す。この金属微粒子の移動した軌跡のガラスは急熱急冷により、屈折率が上昇し、導波路として利用できる(図1(e))。

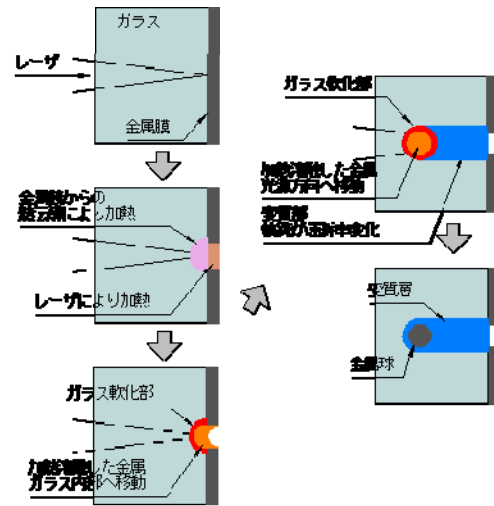


図1 金属微粒子導入の模式図の概略

2. 研究の目的

本申請では、このガラス内部の金属微粒子移動現象を解明し、応用するために以下の4点を目的とする。

- (1)この金属微粒子の移動メカニズムを明らかにする。特に微粒子の移動を引き起こすドライビングフォースを解明する。
- (2)所望の位置に微粒子を配置できるようなマニピュレーション手法を確立する。
- (3)ガラス以外にも導入可能な透明材料、内部へ導入可能な物質を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、光源として Nd:YAG レーザ (A-optowave, Awave1064-50W50K), ガラスにはホウケイ酸ガラス (CORNING, Pyrex, 7740), 導入される金属箔に SUS304 を用いた。ガラスに密着させた SUS304 に対しガラス越しにレーザー照射することで、ガラス内部に SUS304 の微粒子を導入する。このときレーザーの焦点は金属箔表面である。

スポット半径  $115\mu\text{m}$  で集光した場合、レーザー出力  $17.3\text{W}$  以上で半径  $40\mu\text{m}$  の金属微粒子を導入できた。

4. 研究成果

(1) ドライビングフォースの解明

微粒子を移動させる本手法は金属の熔融ガラスの軟化といった熱的なプロセスが主であると考えられる。しかし、レーザー照射中の微粒子の温度を実際に測定することは困難であるため、ガラス内部の微粒子について熱伝導方程式を数値的に解くことで求めた。図4に解析モデルを示す。微粒子が球体であることから、3次元球座標系モデルを用い  $(r, \theta, \phi)$ 、レーザー光と微粒子がともに軸対称であることから  $\partial\phi=0$  とした。本解析では、スポット径に対し微粒子の径が小さいことから、フルエンスが一定のレーザー光がガラス

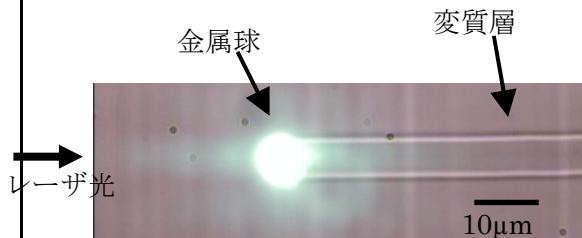


図2 金属導入中の様子

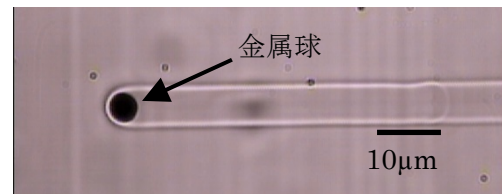


図3 内部に導入した金属球

内部の微粒子の前表面に照射されたとして計算した。球座標系  $(r, \theta)$  での時刻  $t$  における温度  $T$  は次式で与えられる。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t}(r, \theta, t) = \kappa \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r}(r, \theta, t) \right) + \frac{1}{\sin\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin\theta \frac{\partial T}{\partial \theta}(r, \theta, t) \right) \right] + Q(r, \theta, t) \quad (1)$$

$$Q(r, \theta) = \begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} (1-R) \cos\theta & (r=40 \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ) \\ 0 & (r \neq 40) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $c$ : 比熱、 $\rho$ : 密度、 $k$ : 熱伝導率、 $Q$ : レーザによる入熱である。試料の物性値を表1に示す。初期条件として、温度は  $293\text{K}$  とした。原点を微粒子の中心とし、計算領域は微粒子の領域が  $40\mu\text{m}$ 、ガラスがその周囲  $150\mu\text{m}$  離れた位置までとした。レーザー光のフルエンスは実験結果より、微粒子の導入に必要な最低値  $42\text{kW}/\text{cm}^2$  を採用した。試料の物性値に

表 1 物性値

Workpiece	Pyrex®	SUS304
Softing point[K]	1094	-
Melting point[K]	-	1673
Thermal conductivity[W/cm·K]	0.016	0.165
Reflectance[%]	6	65
Density[g/cm <sup>3</sup> ]	2.2	7.9
Specific heat[J/g·K]	0.82	0.59

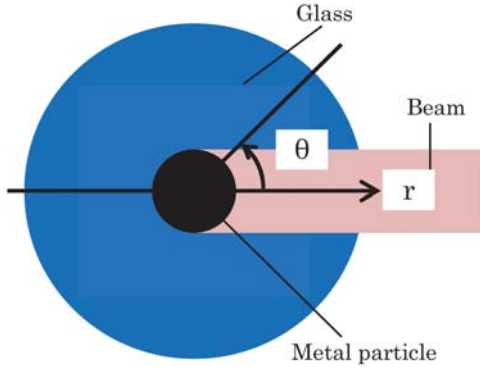


図 4 計算モデル

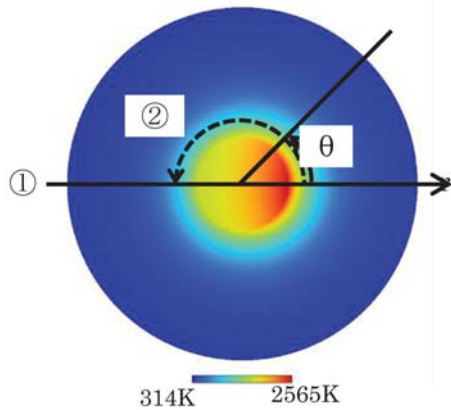


図 5 計算結果

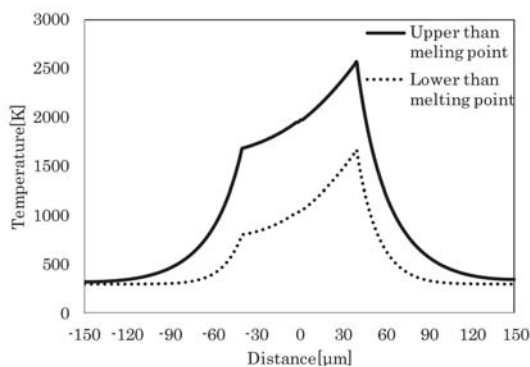


図 6 温度

については、表 1 に示したものをを用いた。簡易的に温度分布を把握するため、物性値の温度依存性、熱輻射、温度勾配により発生する対流を無視し、固体として計算している。これらの条件を用い、式(1)(2)を差分法により離散化し陽解法により計算した。

代表的な結果として、レーザ光照射開始後 0.006s の温度分布を図 4 に示す。このとき微

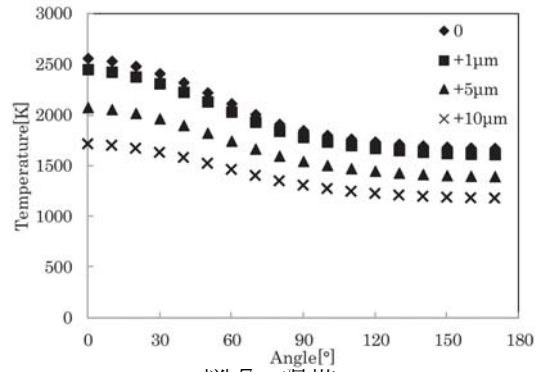


図 7 温度

粒子全体の温度は SUS304 の融点である 1673K を超えている。レーザ光の中心軸上における①方向の温度分布を図 5 の実線に示す。微粒子表面での最高温度はレーザ光照射側の中心で 2565K、最低温度は 1718K であり、およそ 850K の温度差があった。微粒子表面を 0 とし、表面からの距離 1, 5, 10 μm のガラス中における②方向の温度分布を Fig. 5 に示す。r 軸に対して対称なため  $0 < \theta < 180^\circ$  の温度分布である。微粒子表面から 1 μm の位置での温度差はおよそ 800K であり、5 μm で 700K、10 μm で 500K 程度であった。微粒子の最高温度が融点以下の結果を図 5 の点線に示す。最大温度差は同様に 850K であった。しかし、微粒子の表面から 1 μm の位置でガラスの軟化点を超えていたのは  $-40^\circ < \theta < 40^\circ$  の範囲のみであった。

今回の温度解析では熱輻射や対流による熱損失を無視している。そのため実際の温度に比べ、低い温度であると推測できる。対流など熱損失を考慮し、微粒子周囲のガラスの流動を観察した結果と比較することより、正確な温度分布を計算できると考えられる。

以上の結果より、ガラス内部の微粒子が移動するための、ドライビングフォースについて検討する。熱解析により得られた温度分布から、微粒子の表面とその近傍のガラスには 500K 以上の温度勾配があることがわかる。温度依存性のある物性値として表面張力、粘性力が挙げられる。表面張力の大きさは高温 > 低温であるため、微粒子とガラスの界面において表面張力により微粒子の進行方向に力が働く。特に温度勾配のある状況下において、表面張力 > 粘性力となった場合、流体表面に微粒子の進行方向と反対向きのマランゴニ対流が発生する。これらの状態を定量的に解くことにより、移動する微粒子のドライビングフォースを解明できる。

## (2) マニピュレーション

画像解析のために、Opencv ライブラリを利用した C# 言語のプログラムを作成した。モノクロの撮影画像の輝度をガウシアンフィルタにより平滑化し、コントラストの差のエッジから Hough 変換により画像中の円を判定する。

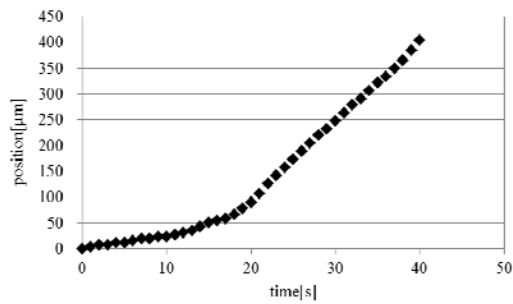


図7 微粒子の位置

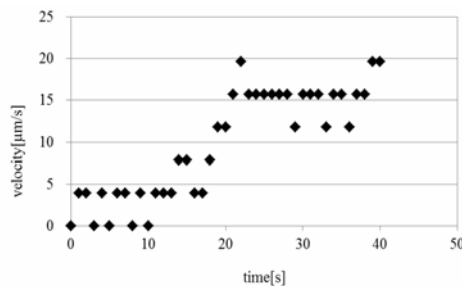


図8 微粒子の移動速度

金属微粒子の移動速度は、レーザによる微粒子の入熱量による。つまり、微粒子とレーザ焦点との距離によって移動速度が決まる。この性質を利用し、レーザ焦点遠方の金属微粒子が焦点に向かって移動する速度を、画像解析によって得た座標の変化から測定し、試料がのっている自動ステージを駆動させ微粒子の速度を制御した。

本実験では、ガラス中の金属微粒子にレーザを照射し、静止している状態から制御を開始する。微粒子を加速させる際には試料を焦点に近づくように、減速させる際には焦点から遠ざけるように移動させ、微粒子への入熱量を制御する。制御中は微粒子の移動速度が15[ $\mu\text{m/s}$ ]を維持するように制御した。

微粒子の座標および移動速度と時間の関係を図7、図8に示す。制御開始から20[s]後に、約15[ $\mu\text{m/s}$ ]の等速で移動させることができた。

### (3)他の材料の導入

従来の金属箔をホウ珪酸ガラスで挟み治具で固定した試料は、熱伝導の特性などにより、加熱できる材料が限られると考えられる。このため、試料であるホウ珪酸ガラスに金属粉末を含有させ、その粒子に対してレーザを照射することにより、金属微粒子導入現象を発生させる実験を行った。

ホウ珪酸ガラスの上に、200メッシュのNi粉末をまぶし、さらに厚さ0.5[mm]の薄いホウ珪酸ガラスを乗せて加熱した。

その結果、金属微粒子の移動を確認した。しかし、他の材料では移動が確認できていない。この原因については、今後の課題である。

さらに、パイレックスガラスにさらに別のガラスを重ねることで、金属微粒子を導入できた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Hirofumi Hidai, Makoto Matsushita, Souta Matsusaka, Akira Chiba and Noboru Morita, Moving Force of Metal Particle Migration by Laser Irradiation in Borosilicate Glass, Opt. Exp., 査読有, 21, 16 (2013) 18955 - 18962, .

[学会発表] (計 2 件)

- ① 松下真, 比田井洋史, 松坂壮太, 森田昇, CWレーザ背面照射法(CW-LBI)によるガラス内部の金属微粒子の移動メカニズムの検討, 2013年度精密工学会春期大会学術講演論文集, (2013) 575 - 576, 東京都目黒区, 2013年3月13日.
- ② 松下真, 比田井洋史, 松坂壮太, 森田昇: CWレーザ背面照射法(CW-LBI)によるガラス内部を移動する金属微粒子の観察, 2012年度精密工学会秋季大会学術講演論文集, (2012) 813 - 814, 福岡県北九州市 2012年9月14日

[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)研究代表者

比田井 洋史 (HIDAI, Hirofumi)  
千葉大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60313334

### (2)研究分担者

森田 昇 (MORITA, Noboru)  
千葉大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30239660

松坂 壮太 (SOUTA, Matsusaka)  
千葉大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 31334171

### (3)連携研究者

なし