

# CO<sub>2</sub> レーザを用いたガラス内部の温度勾配による金属球の移動

千葉大学 ○沢藤新, 千葉大学大学院◎比田井洋史, 松坂壮太, 千葉明, 森田昇

## 要旨

ガラス内の金属球にレーザを照射することで光源に向かって移動する現象がある。本研究ではガラス自体の加熱により温度勾配を形成し、温度勾配による金属球の移動の可能性を検討した。ガラス中に温度勾配を作り出すために、金属球を導入したガラスに対して CO<sub>2</sub> レーザを照射した。その結果、金属球が加熱部に向かって移動の様子が観察された。また、吸収率の計算により金属球の移動がガラス内部の温度勾配によるものと確認した。

## 1. 緒言

ガラス材料は、透明性、加工性、耐熱性、耐水性、耐摩耗性等において優れた特性を有しており、情報通信デバイスや光メモリヘッド等において重要な素材である。

ガラスの内部加工方法の一つとして CW レーザ背面照射法 (CW-LBI 法) がある。CW-LBI 法とは CW レーザを用いてガラス内部へ金属球を導入する手法である。CW-LBI 法によるガラス内への金属球の導入方法を図 1 に示す。図 1 に示すようにガラス越しにレーザを照射することによって、金属箔が微小球としてガラス内部へ導入される。また、導入された金属球に対してレーザを照射することによって、金属球を光源方向に移動させることも可能である。

ガラス内の金属球に対してファイバレーザを照射した時の、金属球に働く力を図 2 に示す。図 2 に示すように、レーザを照射することによって、金属球前後に温度差が生じる。金属球およびガラス間の界面張力は、温度上昇にともなって小さくなるため、金属球の光源側で小さくなり、非光源側で大きくなる。よって金属球前後で界面張力の大きさに差が生じ、金属球が光源側に移動すると考えられている<sup>2)</sup>。

本研究ではガラス自体の加熱によりガラス内部に温度勾配を形成し、温度勾配による金属球の移動の可能性について検討した。また、石英ガラスの光吸収率を計算し、ガラスを透過して金属球に到達するレーザ光が、金属球の移動に与える影響についての評価を行った。

## 2. ガラス内部の温度勾配による金属球の移動

### 2.1 実験方法

実験試料を図 3 に示す。図 3 に示すように、CW-LBI 法によって直径 25  $\mu\text{m}$  の金属球 (SUS304) を石英ガラス内に導入した。また、導入した金属球に対してファイバレーザを照射することによって、金属球をガラス端面から 180  $\mu\text{m}$  の位置に移動させた。

試料の外観図を図 4 に示す。図 4 に示すように、金属球を導入した 20×20×3 mm の石英ガラスに対して CO<sub>2</sub> レーザを照射した。CO<sub>2</sub> レーザはガラスに吸収されるため、ガラス端面を加熱することができる。試料の 20×20 mm の面に CO<sub>2</sub> レーザを照射することによって、ガラス内部に温度勾配を形成し、温度勾配による金属球の移動を試みた。本実験ではガラスの熱膨張による割れを防ぐため、レーザを 6 回に分けて照射した。1 回目は 2 分間レーザを照射し、以後 5 回は 1 分間レーザを照射した。なおガラスが十分に冷却する時間、間隔をあけてレーザ照射を行った。

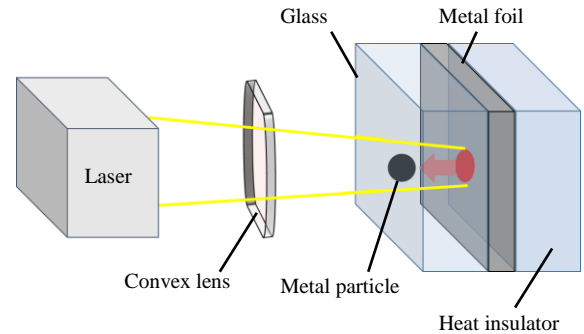


Fig. 1 Experimental equipment including CW-LBI

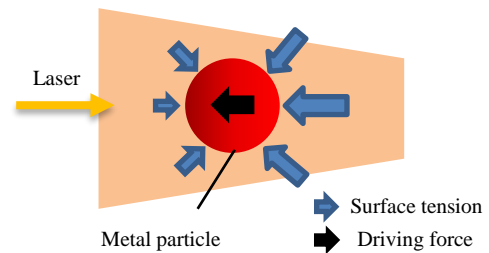


Fig. 2 Force of the metal particle

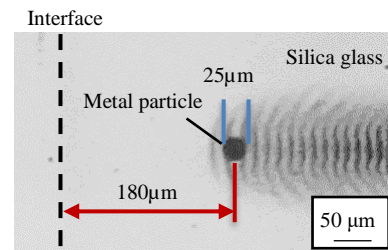


Fig. 3 Metal particle in the silica glass

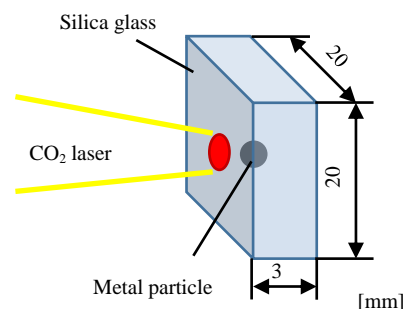


Fig. 4 Configuration of the sample

## 2.2 実験結果

実験結果を図 5(a)~(d)に示す。(a)はレーザー照射前、(b)および(c)は、それぞれ 1 回目のレーザー照射 60 s 後、120 s 後、(d)は 6 回目のレーザー照射 50 s 後の金属球の様子である。図 5(a)および(b)より、レーザー照射後 60 s の間に金属球が光源方向に移動している様子がわかる。図 5(d)より、レーザーの照射を重ねると金属球が光源方向に移動を続け、金属球がガラス内部から大気中に放出されているのがわかる。

## 2.3 考察

実験結果から金属球がガラス内部に形成した温度勾配によってレーザー光源に向かって移動したと考えられる。しかし、CO<sub>2</sub> レーザがガラスを透過し、金属球に到達している可能性がある。そこで、次節で石英ガラスの CO<sub>2</sub> レーザに対する光吸収率を計算する。

## 3. CO<sub>2</sub> レーザの吸収率の評価

### 3.1 計算方法および結果

光の物質に対する吸収率を表すものとしてランベルト・ベールの法則があり、次式で与えられる。

$$I = I_0 e^{-\alpha z} \quad (1)$$

ここで、 $I$  はガラス表面から  $z$  の深さでのレーザーのパワー密度、 $I_0$  は入射光のパワー密度である。また、 $\alpha$  は吸収係数である。

(1)式によって計算されたパワー密度  $I$  と光進入深さ  $z$  の関係を図 6(a)に、その拡大図を図 6(b)に示す。図 6(b)より、ガラス界面から距離 180  $\mu\text{m}$  の位置ではレーザー光のパワー密度が  $5.90 \text{ W/m}^2$  であることがわかる。

ガラス界面からの距離 180  $\mu\text{m}$  におけるレーザー光のパワー密度を  $I_0$ 、金属球の断面積を  $A$  とする。全てのレーザー光が吸収されるとすると、金属球に入るパワー  $Q$  は次式で与えられる。

$$Q = I_0 \times A \quad (2)$$

ガラスを透過して金属球に到達したレーザー光による 1 分間当たりの金属球の温度変化  $\Delta T$  は次式で与えられる。

$$\Delta T = \frac{Q \times 60}{\rho \times V \times c} \quad (3)$$

ここで、金属球の比熱を  $c$ 、密度を  $\rho$ 、体積を  $V$  とする。本計算で用いたガラス、金属球、およびレーザーの物性値を表 1 に示す。(2) および(3)式より金属球に対して 1 分間レーザーを照射した場合の金属球全体の温度変化は 4.5 K であることが計算により求められた。なお本計算では、レーザー照射時間が金属球内の熱の移動に要する時間よりも十分に長い。そのため、金属球内の熱伝導を無視して、金属球が一様に加熱されるものとして計算を行った。

### 3.2 考察

本計算によりガラス界面から 180  $\mu\text{m}$  の位置にある金属球に対してレーザーを 1 分間照射した場合、金属球全体の温度が 4.5 K 上昇することがわかった。さらにガラス界面から 180  $\mu\text{m}$  の位置におけるレーザーのパワー密度が  $5.90 \text{ W/m}^2$  であることがわかった。一方、先行研究によって金属球の移動に必要な金属球の前後の温度差は約 600 K であり、金属球の移動に必要なパワー密度は  $5.5 \times 10^8 \text{ W/m}^2$  であることがわかっている<sup>2)</sup>。この結果を比較すると、金属球の温度の計算結果は先行研究の結果の約 0.8 % であり、パワー密度の計算結果が先行研究の値の約  $10^{-6}$  % である。このこ

とより、CO<sub>2</sub> レーザがガラスを透過して金属球に与えるエネルギーは十分微小であり、金属球の移動に与える影響はない。したがって、ガラス内部の金属球が温度勾配で移動したと考えられる。

## 4. 結言

ガラス内部に形成した温度勾配によって、金属球が移動する様子が観察された。また、吸収率の計算により金属球の移動がガラス内部の温度勾配によるものだと確認した。

## 5. 参考文献

- 1) 平尾一之 他, 機能性名のガラス技術と応用, シーエムシー出版, (2009)
- 2) H. Hidai, J. Wada, T. Iwamoto, S. Matsusaka, A. Chiba, T. Kishi and N. Morita: Experimental and theoretical study on the driving force and glass flow by laser-induced metal sphere migration in glass, Sci. Rep.,6,(2016)38545

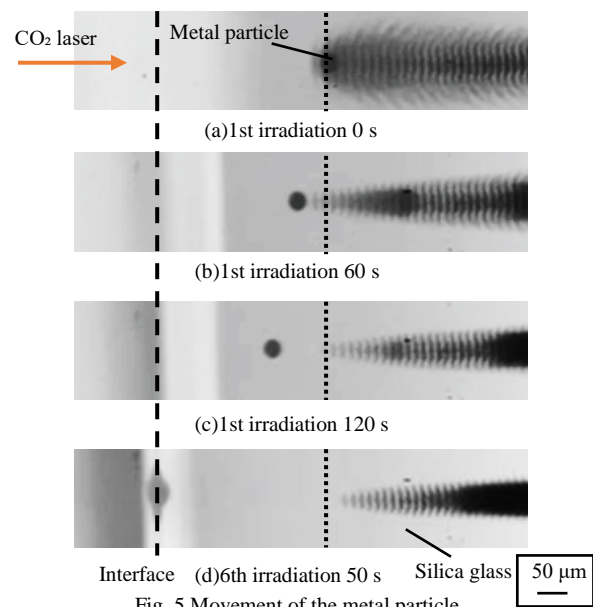


Fig. 5 Movement of the metal particle

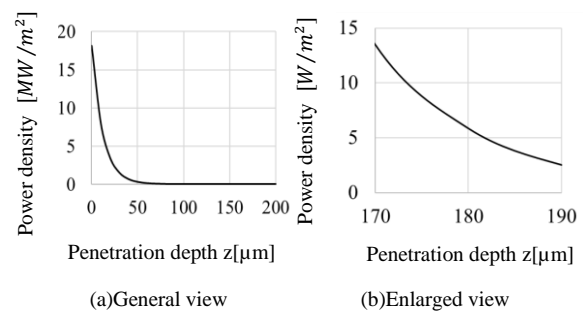


Fig. 6 Calculation results

Table 1 Properties of the materials

SUS304		CO <sub>2</sub> laser	
$\rho$ [ $\text{g/cm}^3$ ]	7.93	$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	10.6
$c$ [ $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ]	0.59	Silica glass	
$d$ [ $\mu\text{m}$ ]	25	$\alpha$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	830