

微小重力環境下での液滴振動計測

相渡邊 匡人 (学習院大), 羽染 博道 (学習院大・院)

Drop Oscillation Measurement under Microgravity Conditions

Masahito Watanabe*, Hiromichi Hasome

*Gakushuin Univ., Mejiro Toshima, Tokyo 171-8588

E-mail : masahito.watanabe@gakushuin.ac.jp

Abstract: We start to measure interfacial tension between iron melt and molten oxide using the electrostatic levitation furnace (ELF) installed in ISS-KIBO. Interfacial tension is obtained from the surface oscillation frequencies of levitated drop oscillation if core-shell droplet by iron melt and molten oxides. Under microgravity, levitated droplet forms completely spherical shape, therefore we can precisely obtain the surface oscillation frequency. Our first task for ISS experiments is to confirm the droplet shape of electro-statistically levitated droplet under the microgravity conditions. In this report, we show that the shape of electro-statistically levitated molten oxide ($\text{SiO}_2\text{-CaO-TiO}_2\text{-Mn}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ system) was completely spherical between the electrodes space even in the case of droplet moving.

Key words; Microgravity experiment, International space station, Electrostatic levitation, Drop oscillation

1. はじめに

国際宇宙ステーション (ISS: International space station) の「きぼう棟 (KIBO)」に搭載された静電浮遊炉 (ELF: Electrostatic levitation furnace) を用いた溶融 Fe と酸化物融体の界面張力測定プロジェクトを進めている。溶融 Fe と酸化物融体界面は鉄鋼プロセスにおいて様々に現れ、それぞれの状況での制御に界面張力値を知ることが重要となっている。本研究プロジェクトでは、微小重力環境で溶融 Fe 酸化物融体による浮遊した二重液滴の表面振動数から界面張力を計測する計画である。微小重力下では、密度差のある液体同士の二重液滴でも完全な球形になるため、理想的な表面振動数が得られるため、界面張力を正確に計測できるはずである。しかし、ELF を用いての計測では、液滴位置を保持するために僅かな大きさの静電気力を電極から印加する必要がある。ELF では 3 組の対向した電極を使用して液滴位置を保持しているため、完全に均一な静電気力が液滴に印加されているわけではない。このため、実際に ELF で浮遊した液滴形状がどのようになっているかを確かめる必要がある。ISS-KIBO に搭載した ELF では、放電の影響を回避できるので、ガス雰囲気中での計測実験が可能であり^{2,3)}、高温で蒸発の激しい酸化物融体試料の浮遊が可能である。そこで、溶融 Fe と酸化物融体による二重液滴形成に用いる $\text{SiO}_2\text{-CaO-TiO}_2\text{-Mn}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系酸化物のみを ELF で溶融浮遊し、その形状観察をおこなった。さらに、この溶融浮遊した酸化物融体試料に表面振動を励起し、液滴振動の観察もおこなった。本稿では、ELF において溶融浮遊した $\text{SiO}_2\text{-CaO-TiO}_2\text{-Mn}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系酸化物融体の形状観察の結果を示す。

2. ISS-KIBO に搭載した ELF における酸化物溶融浮遊実験

ELF は JAXA による基本構想から設計、製作がおこなわれ、2015 年 12 月に ISS に設置された制御・観測システムを含む静電浮遊装置である^{2,3)}。Fig.1 に ELF の模式図を示す。ELF では x-y-z 軸に沿って互いに対向するように 6 つの電極プレートを配置し、これらの電極プレート間に電場を形成し、帯電した試料を高速フィードバック制御で一定位置に保持する。一定位置に浮遊・保持した試料を 4 つの半導体レーザーで加熱、溶融し、単色放射温度計で試料温度を計測する。溶融浮遊試料の形状を、バックライトと CCD カメラによる拡大試料観察光学系で観察することができ、得られた試料形状から試料融体の密度を得ることができる。また、2 次元光学検出器を用いて、限定した領域での光強度の時間変化から液滴振動周波数が計測できる。この液滴振動の計測結果を用いて、表面振動数から試料融体の表面張力、表面振動の減衰時間定数より粘性が得られる。この 2 次元光学検出器システムでの液滴表面振動計測は、微小重力下での浮遊液滴の基本振動が中心対称であることが前提となっている。浮遊液滴が回転したり、位置が変化しても、液滴振動が中心対称であれば、断面積の時間変化はこれらの影響を受けないからである。このため、ELF で溶融浮遊した液滴試料は真球となっている必要がある。我々は界面張力測定のために、二重液滴を溶融 Fe と酸化物融体で形成するが、酸化物に溶接用フラックスを用いる計画である。このため、最初の ISS-KIBO における ELF での実験で、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-TiO}_2\text{-Mn}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系酸化物を用いて、溶融、液滴形状観察および表面振動の計測をおこなった。

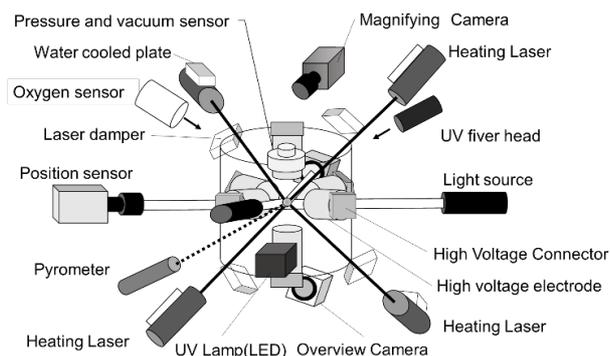


Fig.1 Schematic diagram of ELF system.

3. ELF で静電浮遊した酸化物融体液滴形状

ELFにおいて、 $\text{SiO}_2\text{-CaO-TiO}_2\text{-Mn}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系酸化物を4つの半導体レーザーを均一に照射し、半導体レーザーの最大出力の70%で溶融することができた。完全に溶融した後の酸化物液滴の観察画像をFig.2に示す。この観察の際の溶融酸化物試料は、一定位置に保持できず、電極プレート間で移動を繰り返した。Fig.2の液滴観察画像は、電極プレート間を移動している際の任意の位置でのものである。この画像から外径を抽出し、重心からの半径を算出し鉛直軸からの角度ごとにプロットした結果をFig.3に示す。計測した形状の結果の内側に、一定半径（真球）の場合を示している。計測で得られた形状と真球形状の差をとったところFig.3の(a)-(d)においてほぼ0となった。つまり電極プレート内で融体液滴が移動しても、真球形状を保つことが確認できた。これは、微小重力下での静電気力が小さいため、電場の異方性が液滴形状には影響しないためと言える。また、Fig.2以外の計測時には液滴が移動せず、電極プレート間で一定位置を保つことも観察できた。液滴が移動してしまう原因はまだ明らかではないが、温度分布の不均一性により帯電の異方性が生じ、一度移動が始まるとさらに温度分布が不均一になり、静止できなくなってしまうと考えられる。

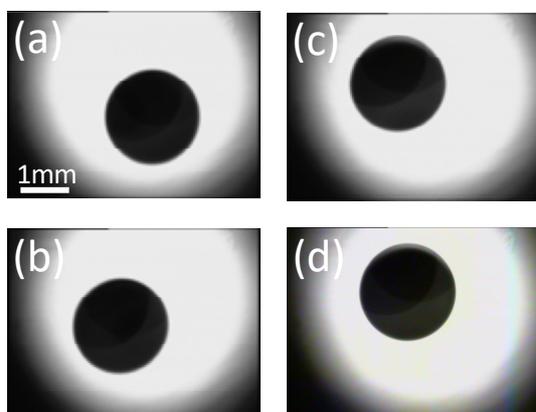


Fig.2 Photograph of levitated molten oxide by ELF system in ISS.

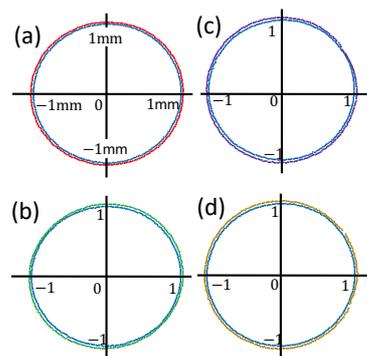


Fig.3 Drop shape of molten oxide shown in Fig.2.

ここで、Fig.3の(a)-(d)で、計測した形状が真球からややずれる位置が見られた。これは、CCDカメラで液滴を観測しているため外径抽出の際にどうしても画素の影響が出てしまうためである。今後、高密度画素のカメラを使うことで形状計測はより詳細にできると考えられる。しかし、計測した外径を最小二乗法でフィティングすることで真球形状となり、体積算出は半径のみの計測で良いことを確認したため、現状のCCDカメラでの計測でも体積（密度）計測には十分と考える。Fig.2に示した試料温度は1670Kであったが、放射率を1と設定して計測したものであり、正確な試料温度ではない。これは、酸化物融体の放射率は測定例が少なく、測定に使用した酸化物の放射率が不明なためである。物質の放射率は1以下であり、実際の試料温度は提示温度よりも高いはずである。現在、酸化物融体の放射率測定を実施しており、得られた放射率を用いて温度校正を今後おこなう。

4.まとめと今後の計画

ISS-KIBOに搭載したELFにおいて $\text{SiO}_2\text{-CaO-TiO}_2\text{-Mn}_3\text{O}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系酸化物の溶融浮遊に成功した。溶融浮遊酸化物の形状観察をおこない、微小重力下で静電浮遊した液滴が真球となり、電極プレート間を移動しても真球形状を保つことを確認した。今後、酸化物融体の放射率を求め、正確な温度計測も実施し、熱物性値の温度変化を計測していく。

参考文献

- 1) M. Watanabe *et al.*; Interfacial Phenomena and Thermophysical Properties of Molten Steel and Oxides - Fundamental Research of Steel Processing using Electrostatic Levitation Furnace (ELF)-, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 32 (2015) 320102.
- 2) H. Tamaru *et al.*; Overview of the Electrostatic Levitation Furnace (ELF) for the International Space Station (ISS), *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 32 (2015) 320104.
- 3) H. Tamaru *et al.*; Status of the Electrostatic Levitation Furnace (ELF) in the ISS-KIBO, *Microgravity Sci. Technol.* 30(2018) 643.