

# ISS 搭載 ELF による酸化物融体の熱物性計測

清水颯希(学習院大・院), 羽染博道(学習院大), 田口正二郎(学習院大), 渡邊匡人(学習院大), 石川毅彦(JAXA), 小山千尋(JAXA), 田丸晴香(JAXA), 織田裕久(JAXA), 猿渡英樹(JAXA), 中村裕広(JAXA)

Thermophysical property measurement of molten oxides under microgravity by ELF in ISS

Satsuki Shimizu<sup>1\*</sup>, Hiromichi Hasome<sup>1</sup>, Taguchi Seiji<sup>1</sup>, Masahito Watanabe<sup>1</sup>, Takehiko Ishikawa<sup>2</sup>, Cihiro Koyama<sup>2</sup>, Haruka Tamaru<sup>2</sup>, Hirohisa Oda<sup>2</sup>, Hideki Saruwatari<sup>2</sup>, Yasuhiro Nakamura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Gakushuin Univ., Mejiro, Tokyo 171-8588, <sup>2</sup>JAXA, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

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. Under microgravity, levitated droplet forms completely spherical shape, therefore we can precisely obtain the surface oscillation frequency. In our first experiment in ISS, we obtained the surface oscillation of molten oxides (SiO<sub>2</sub>-CaO-TiO<sub>2</sub>-Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system). However, we could not obtain correct temperature of molten oxide samples. IN this report, we discuss our idea of estimation of normal spectral emissivity of molten oxide for correction of molten oxide temperature of ISS experiments.

Key words: International space station, Electrostatic levitation, Molten oxide, Emissivity

## 1. はじめに

これまでに ISS に設置した静電浮遊炉 ELF を用いて SiO<sub>2</sub>:CaO:Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:TiO<sub>2</sub>=22:12:16:50 wt% (flux13 と呼ぶ)、および SiO<sub>2</sub>:CaO:Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:TiO<sub>2</sub>:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=25:7:23:18:27 wt% (flux7)の酸化物融体の熔融浮遊に成功し密度計測を達成した[1]。さらに、flux13 では液滴振動計測にも成功し表面張力と粘性を得た[1]。しかし、測定時には酸化物融体の放射率が未知であったため、放射率を 1 と設定していたので実際の試料温度は不明であった。そこで、放射率既知の Fe 融体に酸化物融体を接触させて同時に熔融浮遊し、放射温度計を用いて見かけの温度から分光放射輝度を算出し、Fe 融点と Fe の垂直分光放射率を基準にして酸化物融体の垂直分光放射率を推定した。

## 2. 実験方法

Fig.1 に示す電磁浮遊装置[2]を用いて地上において酸化物と Fe を同時に熔融浮遊し、電磁浮遊コイルのギャップ位置での試料から分光放射輝度を求め酸化物融体の垂直分光放射率を推定した。熔融浮遊した Fe と酸化物は電磁力と重力のため、Fig.2 に示すような酸化物融体が熔融 Fe の下部を帯状に囲うような形態となる[2]。この浮遊した試料を側方から放射温度計(波長 925nm)を用いて放射率を 1 として試料の見かけの温度を測定した。試料は電磁力により鉛直軸を中心に回転しており鉛直軸に並行に放射温度計を移動し、Fe のみを観察される領域の温度から酸化物が囲った部分の境界付近の温度を計測した。チャンパー内部は真空排気後 Ar ガスで置換し 1atm

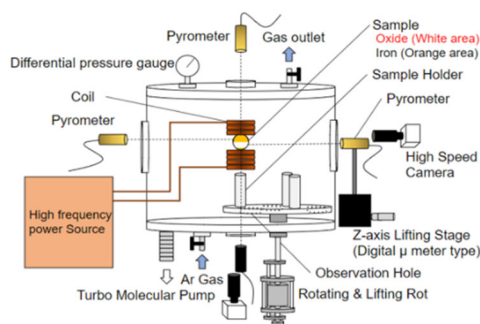


Fig.1 Fe と酸化物を同時熔融浮遊する電磁浮遊装置の模式図

を維持するように圧力を調整して測定をおこなった。使用した Fe は純度 99.998%で、酸化物組成は flux13 と flux7 について測定をおこなった。

## 3. 実験結果と解析方法

Fe と flux13 の見かけの試料温度と測定時間の関係を Fig.3 に示す。図内に示したように、1600°C付近で時間に対し一定となっている部分が熔融 Fe の見かけの温度、15 秒~23 秒付近の高い温度を示している部分が酸化物の見かけの温度である。さらに 45 秒付近で一度過冷却まで下がってから 1350°C付近に急激に上昇している部分が潜熱の放出によるリカレンスで Fe の融点と判断できる。ここで、試料は Fe のみが高周波磁場により誘導加熱され、酸化物は Fe からの伝導のみで加熱されているので、Fe と酸化物は同じ温度と仮定する。このため、放射率 1 に設定して測定した試料の見かけの温度が Fig.3 のように Fe のみの部分と酸化物と Fe の境界付近で異なっている

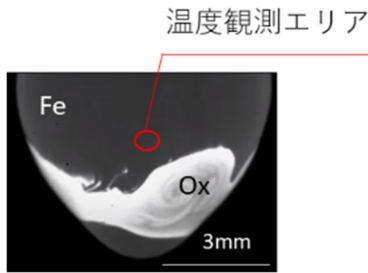


Fig.2 電磁浮遊した熔融 Fe と酸化物融体

のは熔融 Fe と酸化物融体の放射率の違いと考えられる。Fe の垂直分光放射率は既に測定され既知であるため[2]、酸化物の温度が Fe と同じと仮定すれば酸化物の垂直分光放射率が得られる。ここで、15 秒～23 秒付近で高い温度を示している部分を詳細に見ると、試料の回転のため温度が周期的に変化している。Fe と酸化物の帯状の部分の境界は波状に変形しており、放射温度計の視野に Fe のみが入ったとき一番低い温度を示し、酸化物のみが視野に入ったとき一番高い温度を示している。その中間は、Fe と酸化物の両方が視野に入っている時間である。以上の考えを基に、酸化物の垂直分光放射率を以下のように推定する。

まず放射率 1 で測定した見かけの温度から、試料からの輻射の特定波長の輝度である分光放射輝度を求める。プランクの輻射則から、放射率  $\epsilon$  の物質の放射輝度  $L_\lambda$  は以下の(1)式で表せる。

$$L_\lambda = \frac{\epsilon C_1}{\pi \lambda^5 e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T} - 1\right)}} \quad (1)$$

( $\lambda$ :波長,  $\epsilon$ :放射率,  $T$ :温度,  $C_1 = 2\pi h c^2$ :放射第一定数,  $C_2 = \frac{hc}{k}$ :放射第二定数)

リカレンセンスで Fe 融点(1535°C) [2]の見かけの温度はわかっているので、Fe 融点での完全黒体の波長 925nm(放射温度計の測定波長)での放射輝度を得て放射輝度の校正をおこなう。Fe 融体の直分光放射率 0.3[ref]を用いて 925nm でのリカレンセンス時の  $L_\lambda$  をみかけの温度データから算出する。これが完全黒体

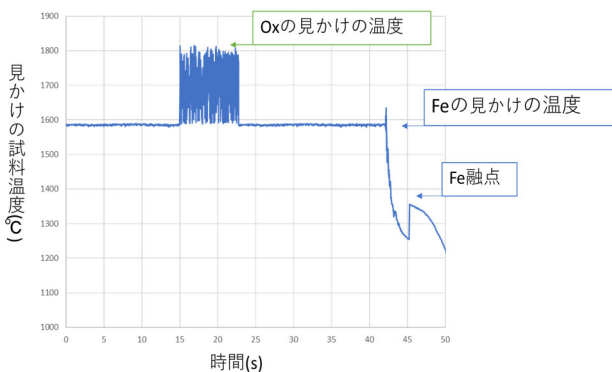


Fig.3 放射率 1 で測定した熔融 Fe と flux13 の見かけの温度

の 1535°Cでの放射輝度と一致していなくてはならないが、測定配置に起因する吸収と散乱により一致しないためこれを装置定数  $C$  としてとして  $L_\lambda$  にか、完全黒体の放射輝度に一致させた。この結果、flux13 の場合  $C=0.78$  となった。一方 flux7 の場合  $C=1.28$  であった。

#### 4. 酸化物融体の垂直分光放射率の推定

以上の方法で放射輝度を校正し、Fe の素直分光放射率 0.3、flux13 の温度を Fe の温度との差が最小になるように  $\epsilon$  の値を変えていった結果を Fig.4 に示す。図内に示すように、Fe の融点 1535°C に一致しており、熔融時の Fe 部分の温度 1824°C、flux13 部分の温度 1831°C となり、それぞれの温度を一致させることができた。この時  $\epsilon=0.74$  でありこれが flux13 の組成の酸化物の 925nm での垂直分光放射率と推定できる。flux7 についても同様の解析をおこない、 $\epsilon=0.72$  が得られこれが flux7 の組成の酸化物の 925nm での垂直分光放射率と推定できる。酸化物融体の放射率は報告例がほとんどない。静電浮遊装置を用いて  $Al_2O_3$  融体の垂直分光放射率が 0.8 であることが報告されている[4]。この値を基に考えると今回の酸化物の組成では、金属元素が多く含まれているため 0.8 より小さな値となったことは測定と解析の手法の妥当性を支持していると考えられる。しかし、今回の実験では、flux13 と flux7 の測定時に放射温度計の配置を変えてしまっており、装置定数として用いた値が異なってしまった。また、全ての基準をリカレンセンスによる Fe 融点としており、リカレンセンスの計測と固液共存時の温度とも比較し Fe 融点での校正をさらに詰めていく必要がある。今後、これらの詳細を検討し、酸化物融体の垂直分光放射率推の値をさらに検討していく必要がある。

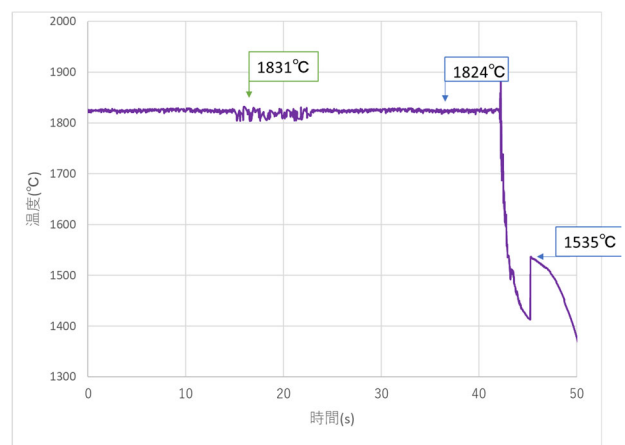


Fig.4 放射輝度の校正後 Fe の垂直分光放射率 0.3[2]をもとに算出し直した電磁浮遊した Fe と flux13 の温度。flux13 の垂直分光放射率は 0.74

## 5. まとめ

酸化物と鉄を同時溶融浮遊し、放射率 1 に設定した放射温度計からの見かけの温度データから放射輝度  $L_\lambda$  を算出し酸化物試料の垂直分光放射率を推定する方法を検討した。SiO<sub>2</sub>:CaO:Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:TiO<sub>2</sub>= 22:12:16:50 wt% (flux13), および SiO<sub>2</sub>:CaO:Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>:TiO<sub>2</sub>:Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=25:7:23:18:27 wt% (flux7)について測定した結果, 925nmでの垂直分光放射率の値は、flux13 は 0.74、flux7 では 0.72 と推定することができた。今後この手法の現状の問題点を修正しながら酸化物融体の垂直分光放射率の値を検討していく。

## 参考文献

- [1] 渡邊匡人,羽染博道, 第 33 回宇宙利用シンポジウムウム, (2019 年 1 月)
- [2] M. Watanabe, M. Adachi and H. Fukuyama, J. Mater. Sci., **52** (2017) 9850.
- [3]羽染博道、学習院大学修士論文 (2020 年 3 月)
- [4]P. -F. Paradis, T. Ishikawa, Y. Saita and S. Yoda, Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2004) 1496.