

# ISS 搭載静電浮遊炉の状況報告

石川 毅彦, 猿渡 英樹, 中村 裕広, 織田 裕久, 大塩 正人, 小山 千尋 (JAXA)

## Status of the electrostatic levitation furnace (ISS-ELF) on the ISS

Takehiko Ishikawa\*, Hideki Saruwatari, Yasuhiro Nakamura, Hirohisa Oda, Masato Oshio, Chihiro Koyama

\*JAXA., Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505  
E-Mail: ishikawa.takehiko@jaxa.jp

Abstract: Status of the electrostatic levitation furnace on the International Space Station (ISS-ELF) is described. Since 2016, functional checkout and technical demonstration experiments have been conducted. Thorough modification of software and hardware, initial sample insertion process has become stable. Oxide materials at high temperature has been successfully levitated and molten in the facility and their densities were precisely measured.

Key words; Electrostatic levitation, International Space Station, High temperature melts

### 1. はじめに

静電浮遊炉は、クーロン力を利用して試料を位置制御し、高出力レーザーを試料に照射して溶融する装置である<sup>1)</sup>。国際宇宙ステーション (ISS) 搭載用の静電浮遊炉は、2011 年から開発を開始し<sup>2-4)</sup>、2015 年に ISS に輸送された後、2016 年から運用が開始された。本稿では、2019 年までの実績について報告する。

### 2. 実験実施状況 — 初期浮遊の成功確率上昇

静電浮遊法では、帯電させた試料と周囲の電極間に働くクーロン力 (引力もしくは斥力) を用いて試料位置をコントロールする。従って、試料を所望の極性に帯電させることが必要である。地上の場合、上下方向に配置した電極の下の方 (下電極) に試料を置き、この電極間に電場を印加することで試料を帯電させる。試料が十分に帯電して重力に拮抗する力が働くまで試料は静止している。ところが、微小重力環境では試料を電極上に静止させることはできないため、地上のテクニックは用いることができない。そこで、試料を押し棒で押して一方の電極に衝突させ、瞬間的に試料を帯電させる方式を採用した。航空機による低重力試験でこの方法の妥当性を確認して、ISS 実験に望んだが、成功確率は低かった。

ソフトウェア、ハードウェアの改修および試料放出手順の改訂を繰り返して、初期浮遊の成功確率を上げてきた。2019 年 8 月に行ったソフトウェア更新以降は成功確率がほぼ 100% となり、加熱溶融実験に供する試料の数が大幅に増加した。

### 3. 高温酸化物融体の熱物性計測

静電浮遊炉では、無容器プロセッシングの特長を活かして、容器を用いる方法では溶融が困難な高い融点を持つ材料の溶融を行い、融体の物性計測や急冷凝固による新材料の創製実験を行っている。特に

ISS では、地上の静電浮遊炉では浮遊溶融が困難な酸化物融体をターゲットとして実験を進めている。

これまでに浮遊溶融に成功した試料を Table-1 に示す。2019 年は融点が 2400°C を越える希土類酸化物の実験を進めてきた。

#### (1) 密度計測

密度は溶融した試料が真球状になることを利用して、画像解析によって試料の体積を求め、回収した試料の質量を求めた体積で除することによって得られる。Fig.1 に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 試料の密度測定結果および文献値との比較を示す<sup>5)</sup>。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は比較的融点が低いため、文献値が存在する。ISS-ELF では Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて密度測定機能の検証を行った。ISS-ELF で測定された密度は、他の文献値と良い一致を示している。特に最近ガス浮遊法を用いて測定されたデータとは広い測定温度範囲全般に亘って良く一致している。ISS-ELF における試料 2 つの密度差は 2% 程度であり、測定法の理論上の不確かさの範囲である。

Fig.2 に Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の密度測定結果を示す<sup>6)</sup>。この試料

Table-1 List of oxide samples and their melting temperature (T<sub>m</sub>) levitated and molten in the ISS-ELF

| No. | Material                       | T <sub>m</sub> (°C) |
|-----|--------------------------------|---------------------|
| 1   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2054                |
| 2   | Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2420                |
| 3   | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 1598                |
| 4   | Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2413                |
| 5   | Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2415                |
| 6   | Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2410                |
| 7   | Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 2439                |

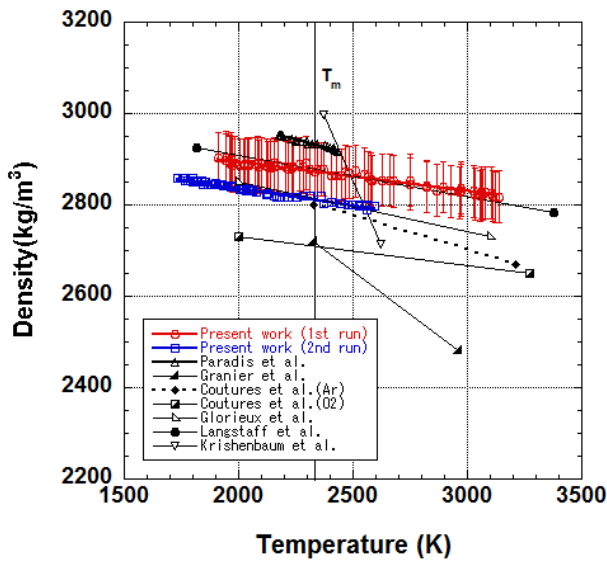


Fig.1 Density of molten Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs temperature measured in the ISS-ELF

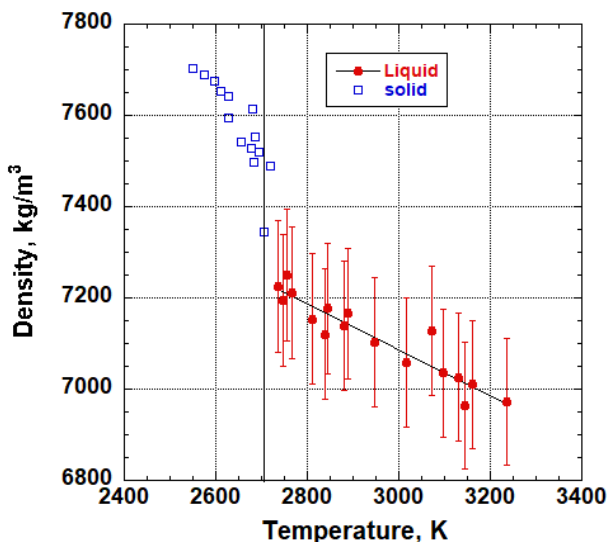


Fig.2 Density of molten Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs temperature

は Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> に比較して 400℃程度高いため、測定例が極めて少なく、文献値を見つけることができていない。

Table-1 のその他の試料についても密度計測に成功している。幾つかの試料は論文投稿中であり、残りは試料の地球への帰還を待っているところである。  
(2)表面張力・粘性係数測定

2018年に表面張力・粘性測定機能の検証ができたため、2019年は Table-1 の試料について液滴振動による表面張力・粘性測定に挑戦した。

2500℃を越える高温で振動波形にノイズがのることが判明したが、幾つかの試料について鮮明な液滴振動と減衰波形が得られている (Fig.3)。密度同様に試料の地上回収、質量測定、密度決定後に最終的な値を算出する予定である。

#### 4. 今後の予定

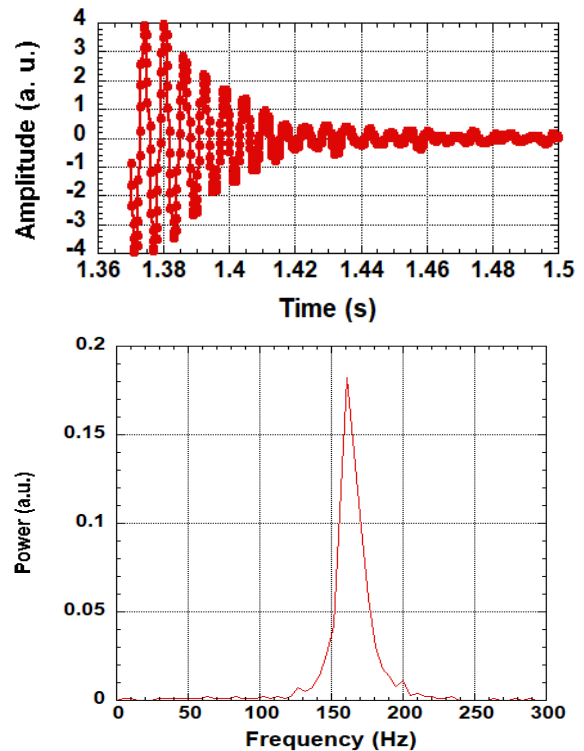


Fig. 3 Obtained oscillation data (top) and result of FFT analysis (bottom)

今年は公募で採択された Interfacial Energy および Fragility テーマ等が実施予定で、また米国のテーマも実施される予定である。2019年9月に公募が発出され、5 テーマが新たに採択されている。これらのテーマについても実施に向けて準備作業を進めていく。

#### 参考文献

- 1) Rhim, W.-K., Chung, S. K., Barber, D., Man, K. F., Gutt, G., Rulison, A., Spujt, R. E., *Rev. Sci. Instrum.* **64**, 2961-2970 (1993)
- 2) Tamaru, H., Ishikawa, T., Okada, J.T., Nakamura, Y., Ohkuma, H., Yukizono, S., Sakai, Y., Takada, T., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **32**, 32104 (2015)
- 3) Fuse, T., Nakamura, Y., Murakami, K., Shibasaki, K., Tamaru, H., Ohkuma, H., Yukizono, S., Ishikawa, T., Okada, J., Takada, T., Sakai, Y., Arai, T., Fujino, N., 64<sup>th</sup> International Astronautical Congress, Beijing, China IAC-13-A2.7.8 (2013)
- 4) Ishikawa, T., Okada, J. T., Paradis, P.-F., Marahalli, V. K., *Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan* **12 ists29**, Th\_15-18 (2014)
- 5) Tamaru, H., Koyama, C., Saruwatari, H., Nakamura, H., Ishikawa, T., Takada, T., *Microgravity Science and Technology* **30** (2018), 643-651.
- 6) Ishikawa, T., Koyama, C., Saruwatari, H., Tamaru, H., Oda, H., Ohshio, M., Nakamura, Y., Watanabe, Y., Nakata, Y., *High Temp. - High Press.* (in press).