

ISS 搭載静電浮遊炉の状況報告

石川 毅彦, 猿渡 英樹, 織田 裕久, 大塩 正人, 小山 千尋, 上野 紗英子 (JAXA)

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

Takehiko Ishikawa*, Hideki Saruwatari, Hirohisa Oda, Masato Oshio, Chihiro Koyama, Saeko Ueno

* 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. In year 2020, 3 experiments from user community including the first experiment from the US has been conducted in the facility. It was very challenging to conduct levitation experiments in Ar gaseous environment where electric discharge easily occurs. Even though handling a variety of samples, success rate of the initial levitation and melt has been drastically improved, which indicates that our hardware/software modifications were proper.

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¹⁾。国際宇宙ステーション搭載用の静電浮遊炉 (ISS-ELF) は、地上では達成が困難な「ガス環境下での酸化物の浮遊溶融」を主目的として設計、製作されている。ISS-ELF は 2011 年から開発を開始²⁻⁴⁾、2015 年に ISS に輸送された後、2016 年から運用が開始された⁵⁾。本稿では、2020 年に実施された実験の概要について説明する。

2. 実験実施状況

昨年度、ソフトウェア及びハードウェアの改修によって初期浮遊の成功率を飛躍的に向上させたことを踏まえて、2020 年は、技術検証以外のテーマを実施した。ISS 搭載静電浮遊炉の利用形態は、国内の科学利用公募 (年 1 回)、企業等の有償利用 (随時) の他、海外の宇宙機関 (現在は NASA) との協定による利用がある。今年度はそれぞれ 1 テーマずつ実験を実施した。2020 年は、11 月に野口宇宙飛行士らが Crew Dragon に乗って ISS に到着するまで、日本の実験に関与出来る宇宙飛行士が 1 名しかいなかったため、搭乗員の作業時間 (クルータイム) が非常に限られていた。クルータイムは協定によって参加国に配分されているが、日本への配分は 1/8 程度であり、これを日本が実施する実験で分け合う。一方、米国の割り当ては約 1/2 と日本より多く、米国の実験を ISS-ELF で実施する場合は米国のクルータイムが使用できる。こうした状況を踏まえて、公募の科学テーマ 1 実験、有償利用 1 実験を終了した後に米国の実験を実施した。

なお、2-3 月に「きぼう」ではマウスを使用した実験が行われ、クルータイムや映像ダウンリンクなど

多くのリソースがこの実験に優先的に半分されるため、ISS-ELF の実験運用を休止している。

(1) 国内公募実験

「新奇機能性非平衡酸化物創製に向けた高温酸化物融体の脆弱性の起源の解明」(Fragility: 代表研究者: NIMS 小原真司 NIMS 主幹研究員)⁶⁾ の試料 (LaNb 系酸化物) の融体熱物性計測を実施した。高温において試料の帯電量が低下して位置制御が不安定になることから、溶融するのが困難であったが、密度の計測に成功した。試料が溶融中に若干蒸発しているため、試料が地上に帰還した後に質量を確定させ、正確な密度を算出する予定である。表面張力、粘性係数測定は、帯電量低下による位置制御不安定化に対する対策を講じた後、今年度再度挑戦する予定である。

(2) 有償利用実験

新日本繊維株式会社の BashFiber の熱物性計測実験⁷⁾ を実施した。この試料も LaNb 系酸化物同様に高温で帯電量が低下することと、蒸発が激しいことから、融点近傍での測定に留まったが、密度の計測に成功した。粘性計測の取得も試みたが、融体の粘度が非常に高く、測定限界を超えていたため計測には至らなかった。

(3) 米国実験

「Round Robin」実験 (代表研究者 Tufts 大学 Matson 教授) を実施している。この実験は、地上も含めた様々な浮遊法による溶融金属、合金の熱物性計測法について統一した試料で測定を行って、比較検討することが目的である。試料は酸化を嫌うため、主に Ar ガス雰囲気を実験を実施している (空気中でも酸化しない Au は空気中で実施)。

Ar ガス環境下では電極間の放電が発生しやすく、これに伴う機器の損傷が課題となる。Static には最大

3kV まで印加しても放電は抑制される設計であったが、試料位置制御に伴う急激な電圧変化において度々放電が発生した。これに伴い、ISS-ELF の運転中断が発生し、スケジュールの遅れが生じている。

この実験を通じて以下の項目が技術的に明らかとなっている。

1) Zr, Au 等において非常にきれいな液滴振動データが得られた。これらの物質は、酸化物に比べて熱物性データ（文献値）が多いため、より定量的に ISS-ELF の測定機能の検証が出来る。

2) 供給される Ar ガスには 3 ppm の酸素が含まれている。この残留酸素は、Zr 等を高温保持する事によって試料に吸収させることができる。幾つか吸着用試料（ゲッター）を搭載しておけば、より低い酸素濃度が得られる。但し、Fe 系合金など非常に酸化しやすい試料はこの方法では対処が難しく、今後、金属・合金を対象とするのであれば、抜本的な対策が必要である。

3. 2020 年の総括

Table-1 に年別の浮遊成功数（その確率）、加熱溶解数（その確率）を示す。2019 年から、試料の初期浮遊に関しては 9 割以上の成功維持している。一方、加熱溶解に関しては、2020 年に格段に成功率が向上したものの、試料によっては加熱中に制御が不安定になり溶解に至らないものもあり、更なる技術開発が必要である。また、2020 年はこれまでに測定されたデータをまとめて 5 報の論文⁸⁻¹²⁾が発出されている。

4. 今後の予定

今年は Round Robin 実験終了させ、有償テーマを実施した後に、公募で採択された Interfacial Energy（学習院大）、Fragility 及び原子炉材料を対象としたテーマ（JAEA）を実施予定である。また、2018 年以降に発出された公募で採用されたテーマについても実験計画が固まり次第、実施に向けて準備作業を進めていく。また、今年も 9 月頃に科学テーマの国内公募が実施される予定であるので、本シンポジウム参加者からの応募に期待している。

参考文献等

- 1) Rhim, W.-K., Chung, S. K., Barber, D., Man, K. F., Gutt, G., Rulison, A., Spuht, 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., 64th 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) <https://iss.jaxa.jp/kibouser/subject/science/70489.html>
- 7) <https://nipponfc.com/news/342>
- 8) Ishikawa, T., Koyama, C., Saruwatari, H., Tamaru, H., Oda, H., Ohshio, M., Nakamura, Y., Watanabe, Y., Nakata, Y., *High Temp. – High Press.* **49** (2020), 5.
- 9) Koyama, C., Tahara, S., Kohara, S., Onodera, Y., Småbråten, Y. S., Selbach, M., Akola, J., Ishikawa, T., Masuno, A., Mizuno, A., Okada, J. T., Watanabe, Y., Nakata, Y., Ohara, K., Tamaru, H., Oda, H., Obayashi, I., Hiraoka, Y., Sakata, O., *NPG Asia Materials* **12** (2020), 43.
- 10) Ohara, K., Onodera, Y., Kohara, S., Koyama, C., Masuno, A., Mizuno, A., Okada, J. T., Tahara, S., Watanabe, Y., Oda, H., Nakata, Y., Tamaru, H., Ishikawa, T., Sakata, O., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **37** (2020), 370202.
- 11) Oda, H., Koyama, C., Oshio, M., Saruwatari, H., Ishikawa, T., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **37** (2020), 370302.
- 12) Koyama, C., Ishikawa, T., Oda, H., Saruwatari, H., Ueno, S., Oshio, M., Watanabe, Y., Nakata, Y., in press, *J. American Ceramics Soc.*

Table-1 Number and rate of successfully levitated samples in the ISS-ELF by year

	Initial levitation		Heat and melt	
	Number	Success rate (%)	Number	Success rate (%)
2016	14	46.7	2	28.6
2017	44	64.7	10	25.0
2018	23	46.9	9	42.9
2019	58	96.7	21	39.6
2020	113	94.2	44	61.1