

ISS 搭載静電浮遊炉の状況報告 2023

石川 毅彦, 伊藤 剛, 小山 千尋, 下里 里奈, 栗田 英明, 織田 裕久 (JAXA)

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

Takehiko Ishikawa*, Tsuyoshi Ito, Chihiro Koyama, Rina Shimonishi, Hideaki Kuwada, Hirohisa Oda,

* 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 2023, 8 experiments from user community including 2 experiments from the US have been conducted in the facility. Around 210 samples were levitated, and 124 samples were successfully melted. Thermophysical properties of these samples will be determined after retrieving the samples on the ground.

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、2023 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

2023 年は、温度勾配炉との排気ラインの干渉による中断を除くと継続的に運用機会が確保されて、200 回以上の浮遊が達成できた。浮遊溶融の成功確率は前年同様に 70%以上を維持したため、溶融した試料数は最高の 124 試料となった。

今年度は、Ar ガス雰囲気での金属・合金試料の実験が大半を占めた。残留酸素の影響で実験的に大きな制約を受けた。これについては、今後の装置改善に繋げるべく、地上での検討を開始している。また、2 月にカメラ 1 台を高速度カメラに交換した。以下に、実施した実験テーマについて概要を記す。

(1) 国内公募実験

「SS-B4C eutectic」(代表研究者: JAEA 山野秀将次長): B₄C 濃度の異なるステンレス-B₄C 合金の融体熱物性の取得を試みた。酸化防止のため、密度測定に限定して実験を行い、15 mass%の試料について測定に成功した。

「Multi shell sphere」(代表研究者: 芝浦工大 正木匡彦教授): 過冷却状態で二相分離する Fe-Cu 合金につ

いて、浮遊溶融から急冷凝固する実験を実施した。既に試料は地上に帰還しており、現在試料を解析中である。

「Thermal Storage」(代表研究者: 同志社大 小島秀和教授): 蓄熱材料として有望な Fe-Cu 及び Al-Si 系合金の熱物性(密度、表面張力、粘性係数)取得を実施した。Al-Si 系は、酸化の影響で、密度の測定に留まった。試料の地球への帰還を待って、最終的な物性値を決定する予定である。

「Hetero-3D」(代表研究者: 早稲田大 鈴木進補教授): 3D プリンティングで使用される TiC 添加 Ti6Al4V 合金について、浮遊溶融/凝固を実施した。試料は既に地上に帰還しており、凝固組織の観察が PI チームにおいて実施されている。

「Laser Debris Removal」(代表研究者: 大阪公大 森浩一教授): 加熱レーザーが試料に与える推力を計測する実験を、Zr、Ti 及び Al 試料を用いて実施した。一定の範囲に試料が存在する間、制御力を 0 にするフリードリフト制御を新たに組み込んで、加熱レーザーの推力によって動く試料の軌跡の測定を実施した。現在データ解析が PI チームで行われている。

「Interfacial Energy」(代表研究者: 学習院大学 渡辺教授): 昨年度成功した 2 相試料の液滴振動実験について再現性確認実験を中心に実施している。

「Fragility」(代表研究者: NIMS 小原主席研究員): 実験は昨年までに終了している。MgO-SiO₂ 系酸化物融体の原子構造と物性についてまとめた論文が発行された。⁶⁾

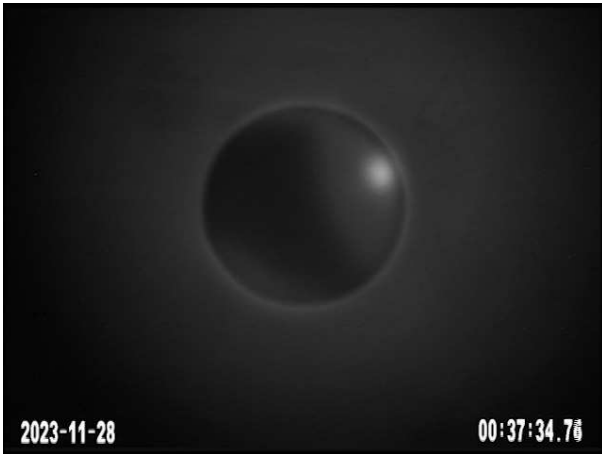


Fig.1 A molten ZrO₂ sample levitated in the ISS-ELF.

(2) 米国実験

「Round Robin」実験（代表研究者 Tufts 大学 Matson 教授）：残っていた 3 試料について実験を実施した。取得した熱物性データを用いて 4 報の論文⁷⁻¹⁰が出されている。

「RIIST (Resonance Induced Instability for Surface Tension determination)」実験（代表研究者 Florida 大 Narayanan 教授）：Au, Ir, Zr 融体に於いて液滴振動を励起し、モード 2,3 及び 4 の振動を高速カメラを用いて観察することを試みた。Sn 及び In 試料については酸化の影響で溶融が困難であったため、代替試料を用いた実験を来年度実施する予定である。

(3) 技術開発

酸化物試料中最高の融点を持つ HfO₂ 及び ZrO₂ の浮遊溶融に挑戦し、ZrO₂ の溶融に成功した (Fig.1)。

3. 2023 年の総括

Table-1 に年別の浮遊成功数（その確率）、加熱溶融数（その確率）を示す。70%以上の溶融成功確率が維持出来たため、過去最高の試料数を溶融できた。昨年度までに 10 報の論文^{5,11-19}が発出されていたが、今年度は、6 報の論文が発出された^{6-10,20}。今後は日米の ELF 利用研究者による論文発表が予定されている。

2023 年も運用チームの惜しみない協力（実験時間の確保、試料ホルダー交換に必要なクルータイムの確保、数多くのコマンドの送信、実験データのタイムリーなダウンロードなど）に支えられ、安定した実験運用が出来た。ここに感謝の意を表します。

4. 今後の予定等

2024 年は、「Interfacial Energy」や米国 2 実験について残っている試料を用いた実験を実施すると

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
2021	246	96.9	115	56.9
2022	150	96.7	95	72.5
2023	212	96.8	124	70.9

もに、昨年度採択された 3 実験について、準備が整ったものから順次実験を実施する予定である。また、昨年 9 月に科学テーマの国内公募が発出され、3 月に新しいテーマが採択される予定である。これらのテーマについても、宇宙実験の準備を進めていく。

参考文献等

- 1) Rhim, W.-K., Chung, S. K., Barber, D., Man, K. F., Gutt, G., Rulison, A., Spuigt, 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) H. Tamaru, Koyama, C., Saruwatari, H., Nakamura, H., Ishikawa, T., Takada, T., *Microgravity Science and Technology* **30** (2018), 643-651.
- 6) Shuseki, Y., Kohara, S., Kaneko, T., Sodeyama, K., Onodera, Y., Koyama, C., Masuno, A., Sasaki, S., Hatano, S., Shiga, M., Obayashi, I., Hiraoka, Y., Okada, J., Mizuno, A., Watanabe, Y., Nakata, Y., Ohara, K., Murakami, M., Tucker, M., McDonnell, M., Oda, H., Ishikawa, T., “Atomic and electronic structure in MgO-SiO₂”, in press, *The Journal of Physical Chemistry*.
- 7) Nawer, J., Matson, D. M., *High Temp. – High Press.* **52** (2023),123-138.
- 8) Nawer, J., Ishikawa, T., Oda, H., Saruwatari, H., Koyama, C., Xiao, X., Schneider, S., Kolbe, M., Matson, D. M., *npj microgravity* **9** (2023), 38.
- 9) Nawer, J., Ishikawa, T., Oda, H., Koyama, C.,

- Saruwatari, H., Sansoucie, M. P., Phillips, B., Gosse, S., Nohr, M., Kolbe, M., Matson, D. M., *High Temp. – High Press.* **52** (2023), 323-339.
- 10) Nower, J., Ishikawa, T., Oda, H., Koyama, C., Matson, D. M., *J. Astron. Space Sci.* **40** (2023), 93-100.
 - 11) 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) Oda, H., Koyama, C., Ohshio, M., Saruwatari, H., Ishikawa, T., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **37** (2020), 370302.
 - 15) Koyama, C., Ishikawa, T., Oda, H., Saruwatari, H., Ueno, S., Ohshio, M., Watanabe, Y., Nakata, Y., *J. American Ceramics Soc.* **104** (2021), 2913.
 - 16) Ishikawa, T., Koyama, C., Oda, H., Saruwatari, H., Paradis, P.-F., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **39** (2022), 390101.
 - 17) Ishikawa, T., Koyama, C., Oda, H., Shimonishi, R., Ito, T., Paradis, P.-F., *Metals* **12** (2022), 1126.
 - 18) Ishikawa, T., Paradis, P.-F., Koyama, C., *Frontiers in Materials* **9** (2022), 954126.
 - 19) Yoshida, K., Kumagai, H., Yamane, T., Hayashi, A., Koyama, C., Oda, H., Ito, T., Ishikawa, T., *Applied Physics Express* **15** (2022), 085503.
 - 20) Taguchi, S., Hasome, H., Shimizu, S., Ishiwata, R., Inoue, R., Yamada, M., Watanabe, M., Matsushita, T., Ishikawa, T., Oda, H., Koyama, C., Ito, T., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, **40** (2023), 400101.