

ISS 搭載静電浮遊炉の状況報告 2021

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

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

Takehiko Ishikawa*, Tsuyoshi Ito, Hirohisa Oda, Chihiro Koyama, Rina Shimosato

* 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 2021, 6 experiments from user community including 2 experiments from the US have been conducted in the facility. Around 250 samples were levitated, and 115 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、2021 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

2021 年は、装置の不具合もなく、安定した運用が行われた。月 1 回のペースで試料ホルダー交換が宇宙飛行士によって行われ、年間 250 回程度の試料浮遊が実施出来た。

(1) 国内公募実験

「Fragility」(代表研究者: NIMS 小原真司 NIMS 主席研究員) の試料 (SiO-MgO 系酸化物、LaNb 系酸化物、TiO₂ 系酸化物) の融体熱物性計測を実施した。昨年度まで課題であった高温における位置制御の課題 (試料の帯電量が低下して位置制御が不安定になる) を克服して、多くの組成について密度の計測に成功した。また、一部の組成について、表面張力、粘性係数の測定に成功した。

「Interfacial Energy」(代表研究者: 学習院大学 渡辺匡人教授) については、高酸化チタン系スラグの熱物性計測に成功した。

(2) 有償利用実験

2 社から依頼された試料について実験を実施した。両者とも、密度・表面張力・粘性係数の取得に成功した。1 社については、来る応用物理学会で公表され

る予定である。

(3) 米国実験

昨年開始した「Round Robin」実験 (代表研究者 Tufts 大学 Matson 教授) を 1 月に完了した。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 ガス雰囲気で行われている (空気中でも酸化しない Au は空気中で実施)。

この実験を通じて以下の項目が技術的に明らかとなった。

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た。これらのデータを纏めて、Tufts 大学学生が博士号を取得した。

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。

更に今年度「Superglass」実験 (代表研究者 MDI 社 Weber 博士) を開始した。このテーマは Fragility 同様、酸化物のガラス形成能と融体バルク熱物性を放射光等で取得した原子構造を用いて結びつける研究テーマである。12 月に一部の実験が実施され、所要の熱物性データ (密度・表面張力・粘性係数) の取得が実施出来た。

(4) 技術開発

上述の実験テーマの合間に希土類酸化物融体の熱

物性計測を継続的に進めている。2021 年は Yb_2O_3 及び Lu_2O_3 の密度測定に成功した。また、今後のテーマに対応するため、位置制御ソフトウェアの改修を行って、試料のフリードリフト制御機能を追加した。

3. 2021 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。マシンタイムが安定して確保されたため、浮遊溶解に成功した試料数は 2020 年に比べて倍増している。溶解の確率に関しては、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。これまでに測定されたデータをまとめて 5 報の論文⁶⁻¹⁰⁾が発出されている。

2021 年の安定した実験運用は、装置の完成度向上だけでなく、運用チームの多大な努力（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）に支えられたもので、ここに感謝の意を表します。

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

4. 今後の予定等

今年は Superglass テーマを完了後、引き続き国内公募 Fragility、Interfacial Energy 実験を実施する。更に、原子炉材料を対象としたテーマ（JAEA）、蓄熱材料の熱物性計測（同志社大）及び偏析過程の観察（芝浦工大）、マグマの熱物性計測（愛媛大）、3D プリンティング素材の凝固挙動観察（早稲田大）、加熱レーザーによる推力測定（大阪府大）等を順次実施していく予定である。例年 9 月頃に発出されていた科学テーマの国内公募が遅延しているが、今年の夏には発出される予定なので、本シンポジウム参加者からの応募に期待しています。

参考文献等

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., 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** *ists* **29**, 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.* **49** (2020), 5.

7) 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.

8) 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.

9) Oda, H., Koyama, C., Oshio, M., Saruwatari, H., Ishikawa, T., *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **37** (2020), 370302.

10) Koyama, C., Ishikawa, T., Oda, H., Saruwatari, H., Ueno, S., Oshio, M., Watanabe, Y., Nakata, Y., *J. American Ceramics Soc.* **104** (2021), 2913.