

ISS 搭載静電浮遊炉の状況

石川 毅彦, 中村 裕広, 猿渡 英樹, 織田 裕久, 道小島 友和, 小山 千尋, 大塩 正人 (JAXA), 高田 哲也 (IHI エアロスペース)

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

Takehiko Ishikawa*, Yasuhiro Nakamura, Hideki Saruwatari, Haruka Hirohisa Oda, Tomokazu Dokojima, Chihiro Koyama, Masato Oshio Tetsuya Takada

*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. Development of the furnace was started in 2011. The facility was launched in 2015 and assembled in the ISS in 2016. Since then, functional checkout and technical demonstration experiments have been conducted. Oxide materials at high temperature were successfully levitated and molten in the ISS-ELF and their temperatures and 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¹⁾。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。本稿では、2018 年に実施された液滴振動機能の確認について概要を報告する。

2. 表面張力及び粘性係数測定原理

表面張力及び粘性係数は融体液滴にモード 2 の振動 (Fig.1(a)) を励起して、その振動周波数及び励起終了後の振動振幅の減衰から測定する⁶⁾。

液滴振動の励起は、Y 軸方向の電極電圧に正弦波状の電圧を重畳させて励起する。液滴振動のデータは、位置検出用の He-Ne レーザー光を分岐させて試料の影をパワーメータに投影し、液滴振動時の影の変形量をパワーメータへの入光量に変換して測定している (Fig.1(b))。Fig.1(c) に測定波形の一例を示す。

3. 実験状況

2017 年に密度計測機能を確認した⁵⁾後、液滴振動による表面張力及び粘性係数測定機能の確認を開始した。

試料は地上実験によって表面張力データが確定していることと、粘性係数が小さく振動の励起が容易なことから、金属 Zr を採用した。酸化を抑えるため、2 気圧の Ar ガス雰囲気中で実験を実施した。しかしながら、液滴振動を示す波形を得ることができなかった。

液滴振動が Zr において確認出来なかった理由は以下の通りと考えられる。

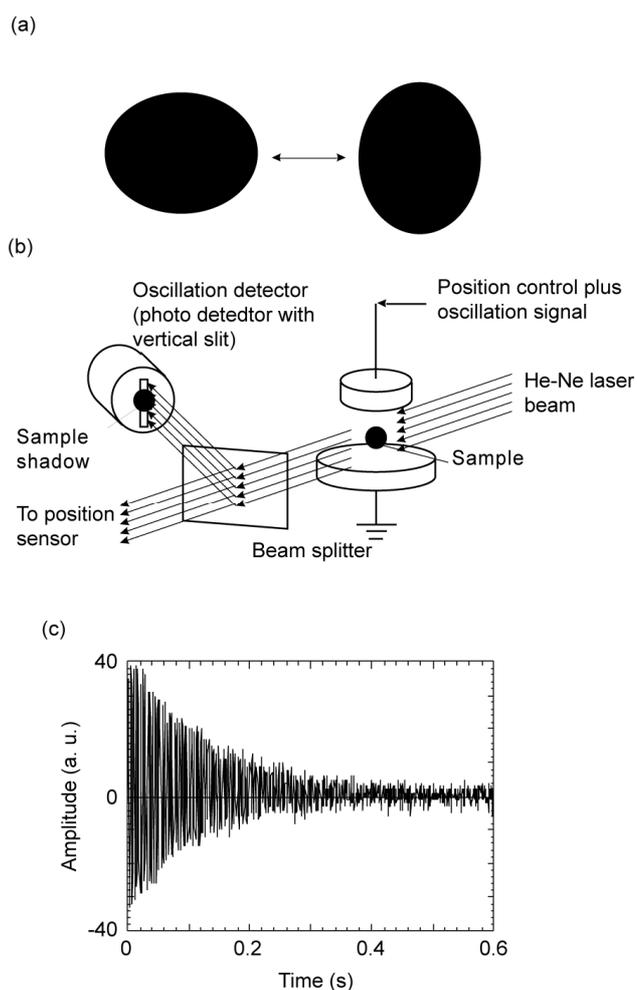


Fig. 1 Sample oscillation detection for surface tension and viscosity measurements: (a) mode-2 oscillation, (b) diameter sensing system, and (c) decay of the signal of the oscillation following electrical excitation for a molten sample measured by the sensing system.

(1) 少ない試料帯電量

地上では重力に拮抗したクーロン力を発生させるために最低 10^{-10}C の試料帯電が必要である。一方、微小重力では 10^{-13}C 程度でも浮遊位置制御が可能である。逆に、地上実験では、浮遊前試料は下電極に接触しているためこの電極を通じて帯電量を増加させることが可能であるが、微小重力において、試料は電極に留まらないため、接触を利用した帯電量増が行えない。このため、Zr 試料の帯電量は高々 10^{-11}C 程度で地上に比べて 1/10 程度である。試料表面の電荷が電場の振動を感じて液滴振動が励起されていると考えると、振動を提起する力は、表面電荷量に比例する。従って、ISS-ELF 内の Zr には地上に比べて 1/10 以下の力しか働かない。加えて、Ar ガス雰囲気では放電を防ぐ目的から最大 $\pm 0.6\text{kV}$ まで電圧を印加できるが、地上実験では通常 $\pm 3\text{kV}$ 程度の正弦波電波をかけているため、電場も 1/5 程度となっている。総合すると地上に比べて液滴振動励起のための力が 1/50 程度であるため、顕著な振動が現れていないと考えられる。

(2) 酸化に伴う Zr 物性の変化

チャンパー内は数回の Ar ガス置換によって酸素濃度を低下させているが、Ar ガス内に 3ppm の酸素が存在するため、酸素濃度は 3ppm 以下には下らない。Table-1 は ISS-ELF で熔融した Zr 試料の密度測定結果である。地上の高真空静電浮遊炉で測定した密度と比較して密度が顕著に低下している。帰還した試料を分析した結果かなりの酸素が認められ、チャンパー内に残留する酸素が Zr 融体と反応しているのは明らかである。表面張力も酸化に伴って大きく変化するため、振動を励起するための適切な共振周波数を探し当てることが困難である。

Table-3 Comparison of density of molten zirconium at 1900 °C

	Oxygen at %	Density (kg/m ³)	Remarks
Zr-1	23	5611	ISS-Ar
Zr-2	33	5585	ISS-Ar
Zr-3	48	5313	ISS-Ar
Zr(ground)	<10	6196	High vacuum

以上のことから、金属 Zr 融体を用いて液滴振動機能の確認を行うことをあきらめ、酸化物試料を用いて確認を行うこととした。また、広く共振周波数をサーチするための機能を軌道上の ISS-ELF 用 PC に追加した。

その結果、2018 年 10 月に実施した Interfacial

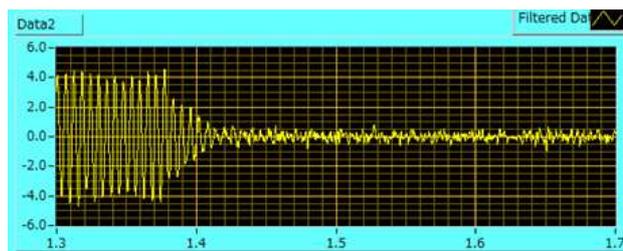


Fig.2 Typical oscillation signal obtained in the ISS-ELF

Energy 実験において、液滴振動の励起及び信号取得に成功した。Fig.2 に、測定した波形の一例を示す。

4. 今後の予定

現在、Interfacial Energy テーマ及び高融点酸化物融体の物性測定 (JAXA 技術開発テーマ) を並行して実施している。来年度には公募で採択された Fragility テーマ等が実施予定で、現在準備を進めている。また米国のテーマも再来年には実施される予定である。国内のテーマ公募は、今年度も実施される見込みである。

参考文献

- 1) Rhim, W.-K., Chung, S. K., Barber, D., Man, K. F., Gutt, G., Rulison, A., Spjut, 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) Rhim, W.-K., Ohsaka, K., Paradis, P.-F., Spjut, R. E., *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 2796-2801 (1999).