

ISS 搭載静電浮遊炉の状況 —位置制御機能の検証—

石川 毅彦^{1,2}・小山 千尋¹・田丸 晴香¹
猿渡 英樹¹・大塩 正人¹・中村 裕広¹

Status of the Electrostatic Levitation Furnace in the ISS — Evaluation of Sample Position Control—

Takehiko ISHIKAWA^{1,2}, Chihiro KOYAMA¹, Haruka TAMARU¹,
Hideki SARUWATARI¹, Masato OHSHIO and Yasuhiro NAKAMURA¹

Abstract

An electrostatic levitation furnace for microgravity experiments has been developed and transferred to the International Space Station (ISS). This electrostatic levitation method utilizes Coulomb force between a charged sample and surrounding electrodes for sample position control. On the ground experiment, amount of charge accumulated on the sample surface has to be 10^{-9} to 10^{-10} C to levitate it against gravity. In microgravity, it was found that a sample can be stably handled even though the amount of surface charge is 10^{-13} C. When the control parameters are properly chosen, the position stability of the sample during heating can be maintained better than $\pm 100 \mu\text{m}$. This stability is good enough to precisely measure the sample temperature by a pyrometer as well as to measure the sample volume by an image analysis.

Keyword(s): Containerless processing, Thermophysical property, High temperature melts, Electrostatic levitation.

Received 22 February 2018, Accepted 4 April 2018, Published 30 April 2018.

1. はじめに

高温融体の熱物性値を測定する方法として浮遊法が用いられている。高温融体は化学的活性が高く、容器と容易に反応するため、熱物性測定等は不純物の影響を強く受けてしまう。浮遊法による無容器溶融は、この容器に伴う問題を回避するのに非常に有効な手段である。また、無容器状態では容器からの核発生が起りにくいため深い過冷却状態を簡単に達成でき、容器を用いた方法では得られない過冷却温度域のデータ取得が可能となる。

宇宙の微小重力環境では比較的小さな力で試料の位置制御が可能であるため、欧米を含めた宇宙機関は浮遊装置の開発に力を注いできた。一方、地上では、重力に拮抗する浮遊力を発生する必要があるが、様々な力を利用した浮遊装置が開発されている。特に 1990 年代後半からの技術発展はめざましく、浮遊装置を利用した高温融体の研究が進められてきている。

電磁場（ローレンツ力）を利用する電磁浮遊炉は、スペースシャトルに 2 回搭載されて微小重力実験が行われている¹⁾とともに、地上装置も普及して合金の凝固実験や熱物性測定²⁻⁵⁾（密度・表面張力・比熱・熱伝導率・電気伝導率）が行われている。国際宇宙ステーション（ISS）でも電磁浮遊炉が稼働中である。^{6,7)} 空気圧を利用するガス浮遊法は、浮遊試料の一部がノズルに隠れてしまう欠点はあるものの非常に簡便な方法で、球状試料の作製、放射光と組み合わせた液体構造解析実験⁸⁾や、熱物性測定⁹⁻¹¹⁾（密度・表面張力・粘性係数）に用いられている。音波浮遊法は高温、高温勾配下で定在波を維持することが困難なことから、高温融体の実験にはあまり用いられていない。しかし、液滴の流体ダイナミクスなど熱物性測定の基本となる現象の実験^{12,13)}や、液滴の非接触移送¹⁴⁾や複数液滴の合体¹⁵⁾など独自の研究分野を開拓している。クーロン力を利用する静電浮遊法¹⁶⁾は、高温融体の熱物性計測（密度・表面張力・粘性係数・比熱・輻射率）¹⁷⁻²¹⁾に用いられるほか、

1 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 つくば市千現 2-1-1

Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan.

2 総合研究大学院大学物理科学研究科 〒252-5210 相模原市中央区由野台 3-1-1

SOKEN-DAI (Graduate University for Advanced Studies), 3-1-1Yoshinodai, Chuo-Ku Sagamihara 252-5210, Japan.

(E-mail: ishikawa.takehiko@jaxa.jp)

放射光と組み合わせた融体構造測定²²⁻²⁵⁾にも用いられている。静電浮遊法ではクーロン力を作用させるために、試料を帯電させる必要がある。酸化物など帯電が困難な試料は地上で浮遊させることが困難である。一方、微小重力環境では重力に拮抗する力は必要ないため、少ない帯電量で浮遊位置制御が可能である。ISSに向けて開発された静電浮遊炉²⁶⁾は、帯電しにくい試料を主なターゲットとしており、本装置を利用して高温酸化物融体の熱物性測定や、界面張力測定実験が計画されている。

様々な浮遊装置においても、試料の安定浮遊（試料位置制御）は、必須の要求項目である。試料をレーザー等によって効率よく加熱するためには、試料位置が安定している必要がある。また、放射温度計による非接触温度測定においても、試料位置の安定は測定精度を左右する。

更に、密度計測においては、試料の画像から体積を求めている。このとき、コンピューター画像処理を用いて試料の輪郭を抽出しているが、試料が静止せずに動いている場合、試料の画像がぶれて明確な画像処理が行えない。

静電浮遊法では、温度上昇に伴って試料の帯電量が変化すること及び加熱レーザーからの外乱のため、高温試料の安定した位置制御は非常に難しい。1998年に小型ロケットで行った静電浮遊炉実験^{27,28)}では、常温での安定浮遊は達成したものの、高温の熔融状態では安定した位置制御が達成できなかった。高温試料の安定浮遊は、宇宙用静電浮遊炉において長年の技術課題である。本論文では、これまでに実施したISS搭載静電浮遊炉の初期検証結果のうち、試料位置制御性能について報告する。

2. ISS 搭載静電浮遊炉 (ISS-ELF)

2.1 概要

ISS 搭載用静電浮遊炉 (ISS-ELF) の詳細については、別報^{26,29)}にまとめられているので、本論文では概要を述べる。ISS-ELFは「きぼう」内に設置された多目的実験ラック (MSPR) 内に収納され、ラックから電力・冷却水・通信等のサポートを受ける。ISS-ELFは3分割でISSに運ばれ (Fig. 1)、宇宙飛行士によって組み立て・収納が行われた。3分割の右及び左には制御装置が搭載されている。中央に置かれたチャンバーは26面を持つ多面体で、それぞれの面に光学観察装置が配置されている。チャンバーは2気圧まで加圧可能で、使用できるガス種はAr、空気及び窒素である。容積の制約から真空ポンプが非搭載のため、チャンバー内の排気は宇宙空間につながれた排気ラインに頼っている。到達真空度は500 Pa程度であるため、Arガス雰囲気で行うためには数回チャンバー内をフ

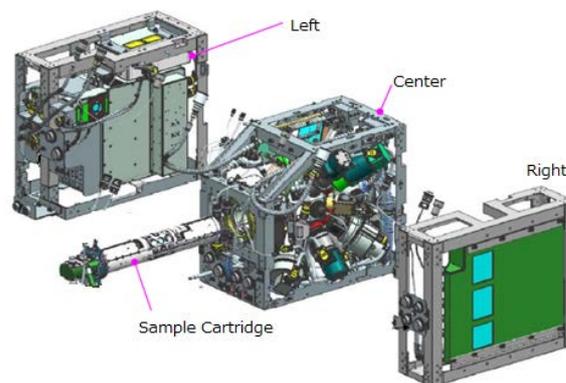


Fig. 1 Detail of ISS-ELF.

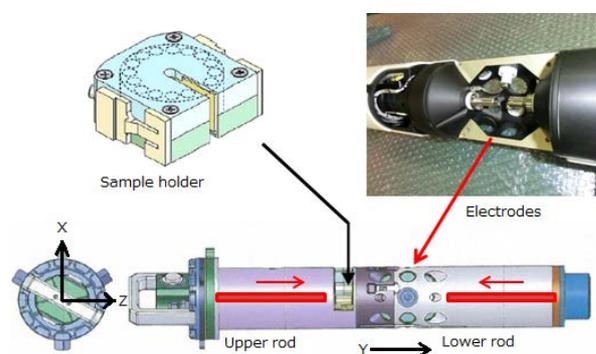


Fig. 2 ISS-ELF Sample cartridge.

ラッシング (真空排気/ガス封入の繰り返し) する。試料の蒸発抑制及び電極間放電の防止 (パッシェンの法則から、電極間の放電は高真空もしくは加圧により抑制される) のため、酸化物の実験は主に2気圧の空気環境で実施する。

Figure 2に試料カートリッジの詳細を示す。試料は本カートリッジ内の電極の間で浮遊する。試料はカートリッジに組み込まれる試料ホルダーから供給ロッド及び回収ロッドを用いて供給/回収される。試料ホルダーには15個の試料を格納でき、この小型・軽量の試料ホルダーを用いて地上とISS間の試料の輸送が行われる。

2.2 位置制御系

Figure 3にISS-ELF試料位置制御系の概要を示す。2方向からHe-Neレーザー平行光を照射して試料の影を位置センサーに投影し、試料の3次元位置を検出する。検出した試料位置と目標位置の差に応じて位置制御コンピューター内でPD (Proportional-Differential) 制御計算を行い、直交する3軸に配置された電極の電圧を調整する。位置制御は3軸独立に以下の式 (Y軸を代表して記述する) で電極間電圧の調整を1000 Hzで行っている。

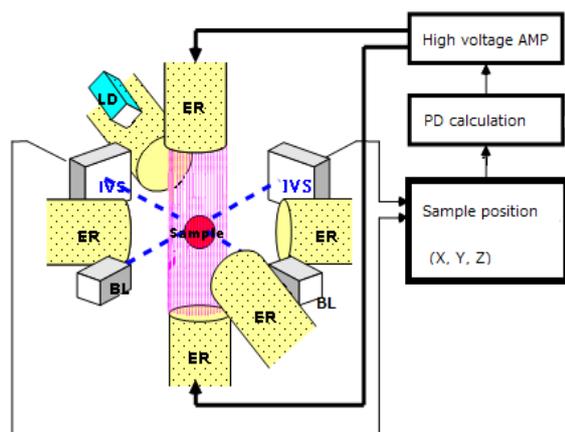


Fig. 3 ISS-ELF position control diagram. Abbreviations in the figure stand for; ER (Electrode), BL (Back light), IVS (Intelligent vision system), LD (Laser diode), respectively.

$$V_y = P_y (y - y_0) + D_y (y - y_0)' \quad (1)$$

ここで、 y は試料位置、 y_0 は目標位置、 P_y は比例ゲイン、 D_y は微分ゲイン、 V_y は印加する電圧である。各電極に印加できる電圧の最大値は± 3 kV となっている。(Ar ガス雰囲気では放電防止のため± 0.6kV に制限される。)

試料の座標系は **Fig. 4** に示す通り、試料供給方向を Y 軸、それに直交する 2 軸を X 及び Z 軸としている。拡大観察カメラによる浮遊試料の拡大画像及びこの画像における各軸の対応を **Fig. 5** に示す。図に示す a 及び b は、画像処理における座標系である。拡大観察カメラは XZ 平面から 45 度傾いた光学観察窓から撮影しているため、a 方向は X、Z の変位、b 方向は X、Y、Z 変位の合成となる。試料の拡大観察系は紫外線の背景光及びズームレンズと紫外線透過フィルタのついた白黒カメラで構成されている。紫外領域の光のみを観察することで試料からの発光の影響を排除し、背景と試料との明確なコントラストを得ることができる。

試料体積を求める画像処理は、試料は鉛直軸対称形状であるとの前提で **Fig.5** の画像から試料の輪郭を抽出し、これを球面調和関数にフィッティングするものである。体積と同時に試料中心の座標が算出される。

3. 位置制御機能検証

3.1 試料投入、捕捉

試料は-Y 電極から投入後に+Y 電極に接触してプラス電荷を得て、目標位置に浮遊する。 **Figure 6** に、+Y 電極に

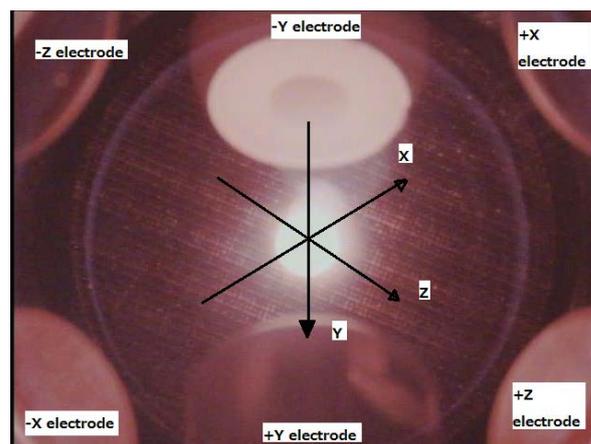


Fig. 4 A molten alumina sample levitated in the ISS-ELF. Electrodes and coordination (X,Y,Z) for sample position control are indicated in the figure.

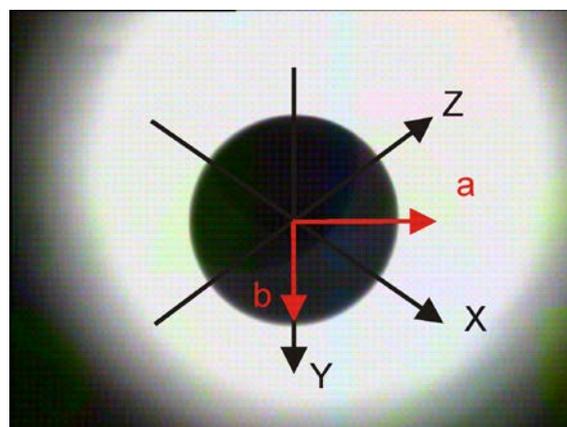


Fig. 5 A magnified sample (stain-less sphere). This black and white image is used for image analysis. Coordination of ISS-ELF (X, Y, Z) and that of image analysis (a,b) are indicated in the figure.

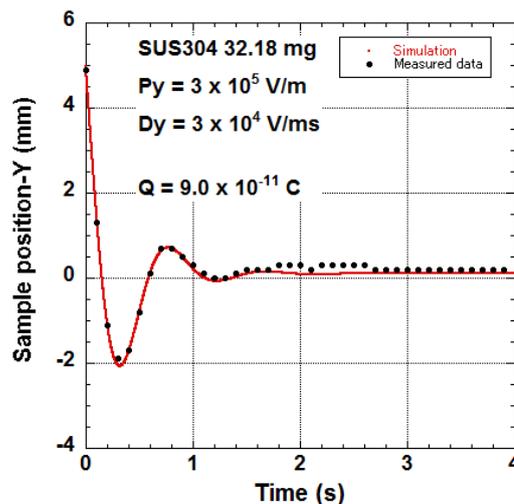


Fig. 6 Time-position (Y direction) data during sample insertion.

接触後の試料挙動を示す。このデータは、ISS-ELF に保存され、実験終了後に ISS から地上にダウンリンクされたもので、時間間隔は 10 Hz、位置分解能は 0.1 mm に切り上げられている。

試料の運動は以下の式で記述されるため、上述の制御パラメータと試料の質量(m)、帯電量(Q)から簡単にシミュレートすることができる。

$$my'' = \frac{QV_y}{L_y} \quad (2)$$

Figure 6 の赤線は(1), (2)式に基づく数値シミュレーションの結果である。試料の挙動は数値シミュレーションとよく一致しており、試料の帯電量は、 9×10^{-11} C 程度と推定される。

試料の帯電量は、投入後の試料の位置振動からも推定することができる。(1),(2)式から

$$my'' = \frac{Q}{L_y} \left\{ P_y (y - y_0) + D (y - y_0)' \right\} \quad (3)$$

と単純なおもりーバネーダンパーと同じ式となるので、試料の振動数 f は、以下の式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{QP_y}{mL_y}} \quad (4)$$

Figure 7 に示す酸化ガドリニウム (Gd_2O_3) の例で f は

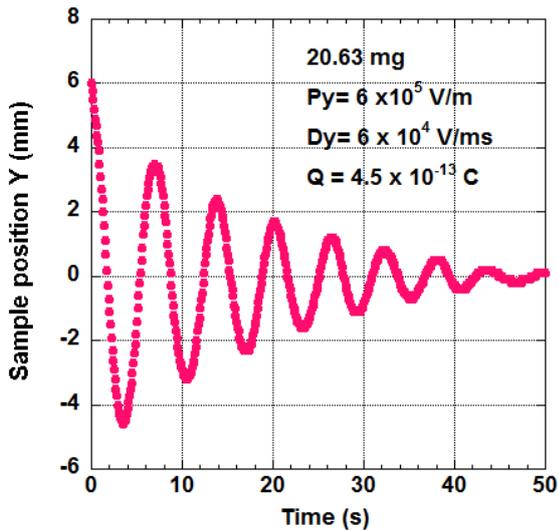


Fig. 7 Time-position (Y) history during insertion of a Gd_2O_3 sample. Sample charge is estimated by equation (4).

0.15 Hz 程度であり、(4)式から Q は 4.5×10^{-13} C と推定される。この帯電量は地上で重力に打ち勝って浮遊させるために必要な帯電量 ($10^{-9} \sim 10^{-10}$ C) に比較して 1/1000 となっている。このような少量の帯電量でも位置制御が可能であることが実証された。

これまでに微小重力下で浮遊させた試料の推定帯電量を Table 1 に示す。一部例外を除いて試料の帯電量は $10^{-11} \sim 10^{-12}$ C で、地上浮遊に必要な帯電量の 1/10~1/100 となっている。

3.2 試料位置安定性

投入後の試料は、目標位置で安定して浮遊する。Figure 6 のデータから、+Y 電極に接触してから 3 秒程度で位置変動は 0.1 mm 以下となる。ISS-ELF からダウンリンクされる位置データは 0.1 mm 刻みであるため、より詳細な位置情報を得ることはできない。そこで、試料の拡大観察画像 (Fig. 5) を画像処理して試料重心座標を算出し¹⁷⁾、安定浮遊時における試料の位置変動の大きさを確認した。

Table 1 Estimated surface charge of the samples levitated in the ISS-ELF.

Sample	Mass (mg)	Charge ($\times 10^{-12}$ C)
SUS	32.2	10 - 50
Zr	20 - 28	6 - 10
Al_2O_3	15 - 17	2 - 20
40wt% Er_2O_3 - $CaAl_2O_4$	10 - 11	10
Gd_2O_3	15-20	0.45-3

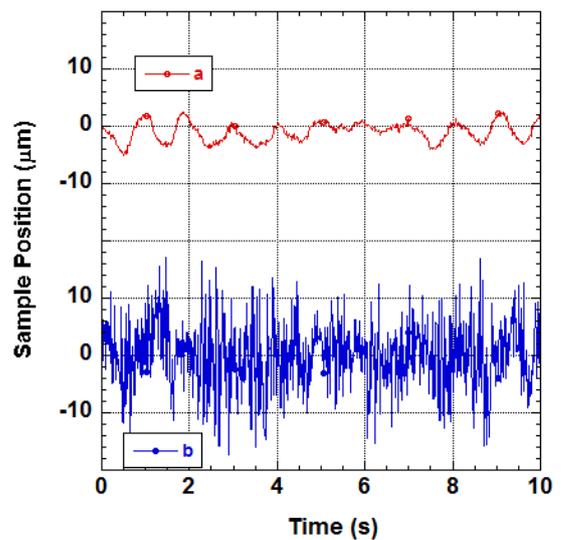


Fig. 8 Position stability of levitated sample in the ISS-ELF at room temperature. Position displacements are obtained from image analysis.

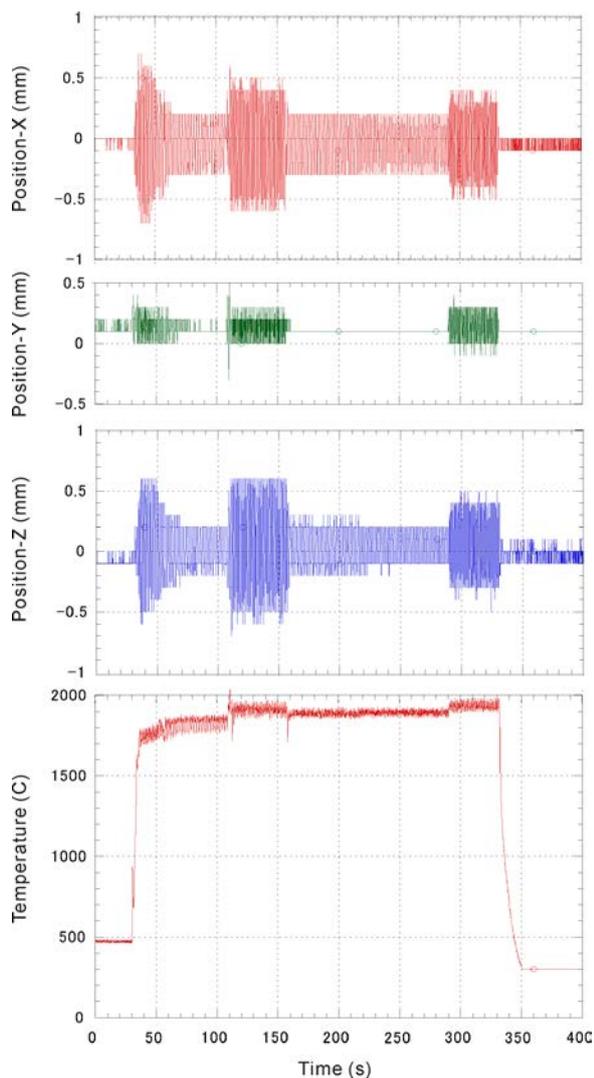


Fig. 9 Position and temperature of 40 wt% Er_2O_3 - CaAl_2O_4 sample levitated and heated in ISS-ELF.

Figure 5 は、直径 2 mm のステンレス球（真球）であり、画像処理から約 120 画素が試料半径（1 mm）に対応していることを求めた。また、10 秒間の動画から連続した静止画 300 枚を切り出し、画像処理によって試料の重心座標を算出した。

Figure 8 にその結果を示す。試料位置変動は a 方向 $\pm 5 \mu\text{m}$ 、b 方向 $\pm 10 \mu\text{m}$ 程度と非常に小さいことが確認できた。

3.3 加熱時の安定性

試料を加熱して溶融する場合、試料は加熱レーザーからの光子圧を外乱として受けるため、試料の位置安定性は悪化する³⁰⁾。4 方向から加熱レーザーを等出力で照射して光子圧を相互に相殺させるなど、この外乱を低減する工夫を施しているが、加熱レーザーの出力には個体差があるため、

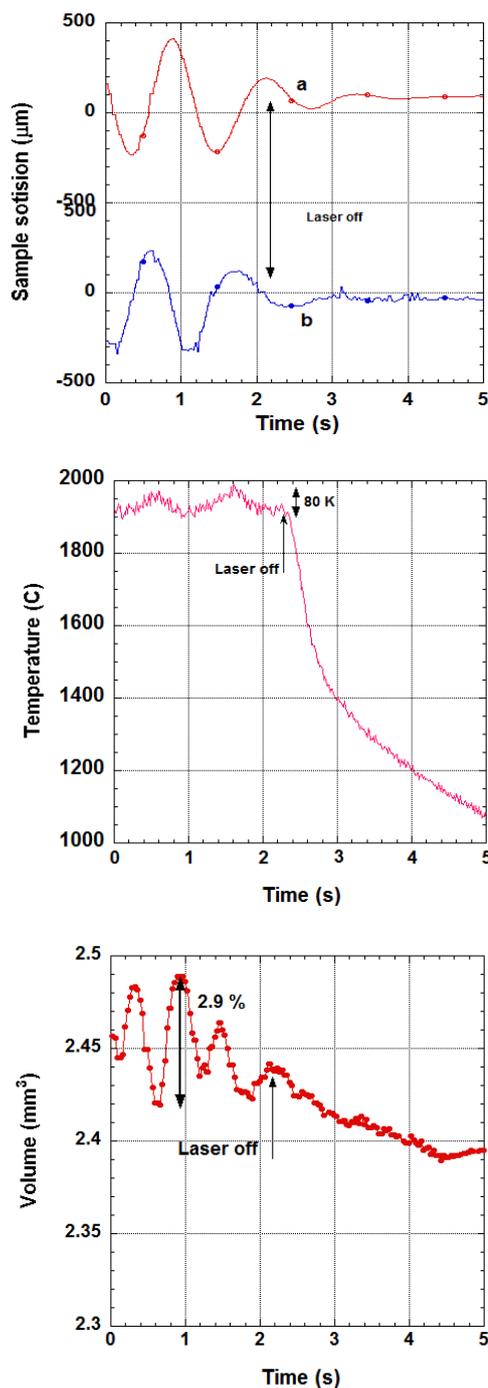


Fig. 10 Position, temperature, and volume fluctuation of 40 wt% Er_2O_3 - CaAl_2O_4 sample around cooling time period.

外乱を完全になくすことは困難である。**Figure 9** に 40 wt% Er_2O_3 - CaAl_2O_4 試料を浮遊溶融した時の温度及び試料位置変動の履歴を示す。なお、これは ISS-ELF 初めての酸化物浮遊溶融実験である。加熱レーザー照射を開始して試料温度が上昇すると、位置変動が大きくなっている。

X, Z 方向は±0.5 mm 程度の振幅で振動している。一方, 加熱レーザー照射を停止すると変動は直ぐに小さくなり, 3.2項で評価した常温での位置変動に落ち着いている。

Figure 10 は, 加熱レーザー照射停止前後の温度, 拡大試料画像 (の画像処理) から得られる試料位置変動及び試料体積測定への影響を示す。加熱レーザー照射時, 外乱により試料は ±500 μm ほど変動し, この位置変動によって放射温度計 (測定スポット径 1 mm) の値は 80 °C, 試料体積は約 3 % の影響を受けることが明らかとなった。特に XZ 面での位置変動が大きい。この結果を受け, 位置制御パラメータの調整 (X 及び Z 方向の微分制御の強化) を行い, 浮遊溶融時の位置安定性向上を試みた。

Figures 11, 12 に, Al₂O₃ 試料の浮遊溶融時のデータを示す。適切な制御パラメータを用いることによって, 位置変動は±100 μm に改善した。この程度の位置変動では, 放射温度計における温度測定には影響がほとんど見られない。また試料体積計測への影響も 1 % 以下である。拡大

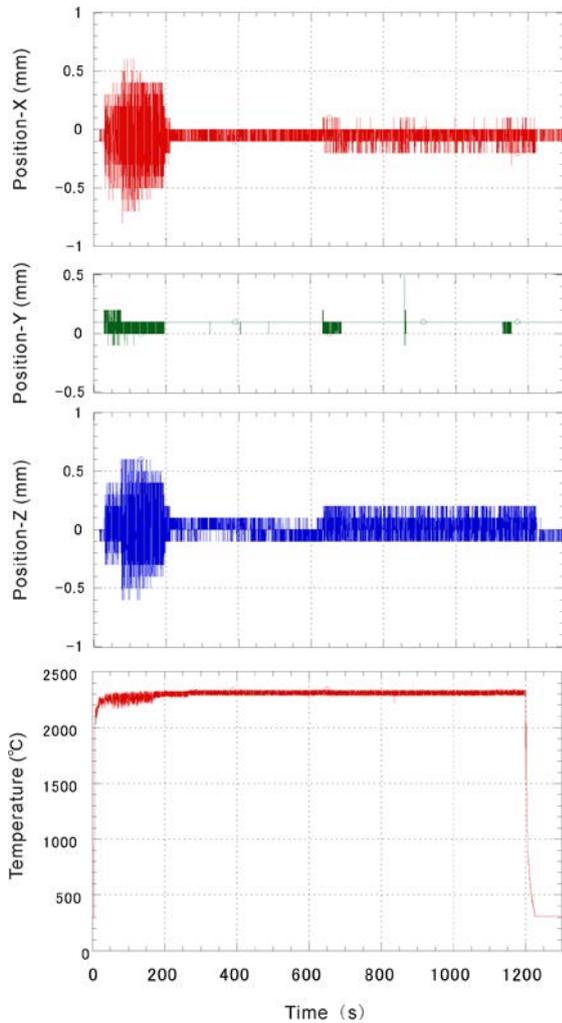


Fig. 11 Position and temperature of Al₂O₃ sample levitated and heated in ISS-ELF.

画像の画像処理による体積計測は元々2 %程度の不確かさを有する¹⁷⁾ので, 試料の位置変動の影響は不確かさ以下に抑えられていると評価できる。**Figure 12** の温度履歴に示すとおり, 試料温度は 2,300 °C 程度であり, このような高温状態でも試料を安定して浮遊できることが確認された。

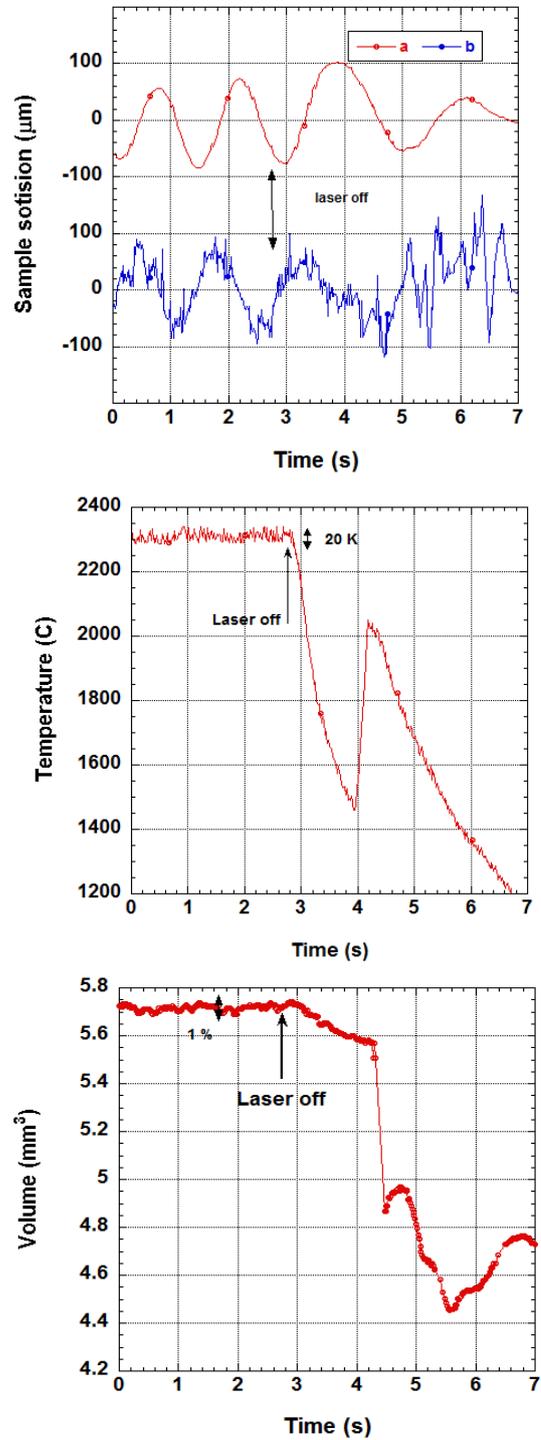


Fig.12 Position, temperature and volume fluctuation of Al₂O₃ sample around cooling time period.

4. 結論

1998 年の小型ロケット実験以来、日本は静電浮遊法による高温融体の安定浮遊技術の研究を進めてきた。その結果、ISS-ELF において融点が 2,000 °C を超える酸化物の浮遊溶解に成功した。試料の位置安定性は、密度等の熱物性測定 of the requirements sufficiently satisfied, and the density of the molten material is already being measured. In addition, the measurement of surface tension and viscosity coefficient is being conducted. These results are reported in the progress report. The use of ISS-ELF is also being promoted, and various materials are expected to be dissolved in the future.

謝辞

ISS 搭載用静電浮遊炉の開発に尽力された高田哲也氏をはじめとする IHI エアロスペース社担当者の方々に感謝いたします。また、ISS での運用においては、油井、大西宇宙飛行士や地上運用チームに多大なる支援をいただいています。ここに感謝の意を表します。ISS 実験手順の作成や実施、データ処理等で、JAMSS 曾根氏、日本宇宙フォーラム島岡氏、AES 渡邊氏、仲田氏に支援いただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) I. Egly : J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **15** (1998) 215.
- 2) J.J. Wessing and J. Brillo: Metallurgical and Materials Transactions A, **48** (2017) 868.
- 3) G. Lohöfer: Meas. Sci. Technol., **16** (2005) 417.
- 4) H. Kobatake, H. Fukuyama, T. Tsukada and S. Awaji: Meas. Sci. Technol., **21** (2010) 025901.
- 5) S. Ozawa, M. Nishimura and K. Kuribayashi: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **33** (2016) 330310.
- 6) Y. Luo, B. Damaschke, S. Schneider, G. Lohöfer, N. Abrosimov, M. Czupalla and K. Samwer: npj Microgravity, **2** (2016) 1.
- 7) D.M. Matson, X. Xiao, J. Rodriguez and R.K. Wunderlich: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **33** (2016) 330206.
- 8) S. Kohara, J. Akola, L. Patrikeev, M. Ropo, K. Ohara, M. Itou, A. Fujiwara, J. Yahiro, J.T. Okada, T. Ishikawa, A. Mizuno, A. Masuno, Y. Watanabe and T. Usuki: Nature Commun., **5** (2014) 5892.
- 9) D. Langstaff, M. Gunn, G. N. Greaves, A. Marsing and F. Kargl: Rev. Sci. Instrum., **84** (2013) 124901.
- 10) A. Nakamura, S. Hakamada, A. Mizuno and M. Watanabe: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **34** (2017) 340404.
- 11) S. Hakamada, A. Nakamura, M. Watanabe and F. Kargl: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **34** (2017) 340403.
- 12) T.G. Wang, A.V. Anilkumar, C.P. Lee, J. Fluid mech., **308** (1996) 1.
- 13) R. Tanaka, S. Matsumoto, A. Kaneko and Y. Abe: J. of Phys., Conference Series, **327** (2011) 012021.
- 14) D. Foresti, G. Sambatakakis, S. Bottan and D. Poulikakos: Scientific Reports, **3** (2013) 3176.
- 15) D. Foresti and D. Poulikakos: Physics of Fluids, **26** (2014) 091111.
- 16) W.-K. Rhim, S.K. Chung, D. Barber, K.F. Man, G. Gutt, A. Rulison and R.E. Spjut: Rev. Sci. Instrum., **64** (1993) 2961.
- 17) S.K. Chung, D.B. Thiessen and W.-k. Rhim: Rev. Sci. Instrum., **67** (1996) 3175.
- 18) W.-K. Rhim, K. Ohsaka, P.-F. Paradis and R.E. Spjut: Rev. Sci. Instrum., **70** (1999) 2796.
- 19) A. Rulison and W.-K. Rhim: Rev. Sci. Instrum., **65** (1994) 695.
- 20) T. Ishikawa, J.T. Okada, P.-F. Paradis and Y. Watanabe: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **34** (2017) 340305.
- 21) P.-F. Paradis, T. Ishikawa, G.-W. Lee, D. Holland-Moritz, J. Brillo, W.-K. Rhim and J.T. Okada: Materials Science and Engineering R, **76** (2014) 1.
- 22) A.K. Gangopadhyay, G.W. Lee, K.F. Kelton, J.R. Rogers, A.I. Goldman, D.S. Robinson, T.J. Rathz and R.W. Hyers: Rev. Sci. Instrum., **76** (2005) 073901.
- 23) T. Masaki, T. Ishikawa, P.-F. Paradis, S. Yoda, J.T. Okada, Y. Watanabe, S. Nanao, A. Ishikura, K. Higuchi, A. Mizuno, M. Watanabe and S. Kohara: Rev. Sci. Instrum., **78** (2007) 026102.
- 24) J.T. Okada, P.H.-L. Sit, Y. Watanabe, Y. J. Wang, B. Barbiellini, T. Ishikawa, M. Itou, Y. Sakurai, A. Bansil, R. Ishikawa, M. Hamaishi, T. Masaki, P.-F. Paradis, K. Kimura, T. Ishikawa and S. Nanao: Phys. Rev. Lett., **108** (2012) 067402.
- 25) J.T. Okada, P.H.-L. Sit, Y. Watanabe, B. Barbiellini, T. Ishikawa, Y.J. Wang, M. Itou, Y. Sakurai, A. Bansil, R. Ishikawa, M. Hamaishi, P.-F. Paradis, K. Kimura, T. Ishikawa and S. Nanao: Phys. Rev. Lett., **114** (2015) 177401.
- 26) H. Tamaru, T. Ishikawa, J. T. Okada, Y. Nakamura, H. Ohkuma, S. Yukizono, Y. Sakai and T. Takada: Int. J. Microgravity Sci. Appl., **32** (2015) 320104.
- 27) S. Yoda, N. Koshikawa, T. Nakamura, J. Yu, T. Nakamura, Y. Nakamura, S. Yoshitomi, H. Karasawa, T. Ikade, Y. Arai, M. Kobayashi, Y. Awa, H. Shimoji, T.S. Morita and S. Shimada: J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., **17** (2000) 76.
- 28) J. Yu, N. Koshikawa, Y. Arai, S. Yoda and H. Saitou: J. of crystal growth, **231** (2001) 568.
- 29) T. Fuse, Y. Nakamura, K. Murakami, K. Shibasaki, H. Tamaru, H. Ohkuma, S. Yukizono, T. Ishikawa, J. Okada, T. Takada, Y. Sakai, T. Arai and N. Fujino: 64th International Astronautical Congress, 2013 Beijing, China, IAC-13-A2.7.8.
- 30) P.-F. Paradis, T. Ishikawa and S. Yoda: Space Technol., **22** (2002) 81.