

# ガスジェット浮遊法による熔融金属酸化物の熱物性値測定法の確立

表面振動特性からの表面張力と粘性係数の算出

白鳥 英 (都市大), 吉野 裕斗 (都市大・院), 小池 聡一郎 (都市大・学),

小澤 俊平 (千葉工大), 清宮 優作 (千葉工大・院), 高橋 勇太 (千葉工大・学), 加藤 蒼 (千葉工大・学),

小島秀和 (同志社大), 河本 幹太 (同志社大・学), 杉岡健一 (富山県立大), 石川毅彦 (JAXA)

Measurement framework for thermophysical properties of molten metal oxides by aerodynamic levitation

Identification of surface tension and viscosity from droplet oscillation behaviour

Suguru Shiratori\*, Yuto Yoshino, Soichiro Koike,

Shumpei Ozawa, Yusaku Seimiya, Yuta Takahashi, So Kato,

Hidekazu Kobatake, Kanta Kawamoto, Ken-ichi Sugioka, Takehiko Ishikawa

\*TokyoCity Univ. Tamazutsumi Setagaya, Tokyo 158-8557

E-Mail: sshrator@tcu.ac.jp

Abstract:

Keywords; Aerodynamic levitation, droplet oscillation, eigenvalue problem

## 1 はじめに

### 1.1 月レゴリスの熔融凝固プロセスによるものづくり

日本の無人月探査機 SLIM の着陸成功がメディアを賑わせており、月面での長期有人探査の計画も進められている<sup>1,2)</sup>。月面での持続的な有人活動の実現にはその場資源を用いたものづくりが不可欠であり、月レゴリスを用いた建材の製法や積層造形などの技術が重要になると考えられる。月面での建材、特に外壁には、過酷な環境に耐えるために気密性・耐熱性・耐放射性などが要求される。その場資源を用いた建材の製法として、焼結によるレゴリスブロックの研究例<sup>3)</sup>があるが、外壁に関しては焼結製法では強度に関して懸念があり、熔融・再凝固プロセスを用いた製法が不可欠と考えられる。エネルギーの限られた月面で金属の熔融を伴う製法を実現するには、数値シミュレーションによるプロセス最適化が欠かせないが、このシミュレーションには月レゴリス熱物性値が必要である。月レゴリスには酸化物が多く含まれることが分かっているが<sup>4)</sup>、熔融状態の酸化物にする熱物性値はデータ整備が殆ど進んでおらず、この点が月面でのその場資源からのものづくりにおける障壁の一つである。

### 1.2 ガスジェット浮遊法による熱物性値測定の課題

酸化物を含めた金属融液の熱物性値測定法として、電磁浮遊法 (EML)・静電浮遊法 (ESL)・ガスジェット浮遊法 (ADL) の3種類の浮遊法が知られている。いずれも、

浮遊した液滴を観察して静的・動的な表面形状の解析から密度・表面張力・粘性係数等を同定する方法である。酸化物は導電性が殆どないため、EML では浮遊自体が不可能である。また、酸化物は帯電しにくいいため、ESL では浮遊に必要なクーロン力を得るには高電圧を印加する必要がある、非現実的である。国際宇宙ステーション (ISS) に搭載されている静電浮遊炉 (ELF) を用いれば低電圧でも浮遊可能であるが、ISS での実験コストは高い。ADL は浮遊対象の材料に制約がないため、熔融酸化物の熱物性値測定法として有力候補である。しかし、ADL 実験から算出した物性値は他の浮遊法や ISS-ELF での測定と大きく乖離する状況にある<sup>5)</sup>。

Fig. 1 に示すように、液滴を側面から観察する際、液滴のかなりの部分がノズルに隠れるため、液滴の形状について推定が必要になる。浮遊法での密度測定は観察画像から算出した体積に基づくため、ノズルの隠蔽は密度の算出精度に直結する。また、浮遊法で表面張力と粘性係数を算出する際は、液滴の振動挙動を高速度カメラで撮影し、表面の振動周波数と減衰時定数から数理モデルに基づいて表面張力と粘性係数を算出する。周波数と表面張力の関係は Rayleigh<sup>6)</sup>、減衰時定数と粘性係数の関係は Lamb<sup>7)</sup> がそれぞれ解析式を導出しているが、これらの数理モデルでは液滴が真球であることと、時間平均場として静止状態 (無流動) が仮定されている。ADL では液滴を加熱することによるマランゴニ効果と気流からのせん断力によって内部対流が発生する。この対流によって周波数・減衰時定数が変化すると考えられ、これが前述の乖離の原因であると考えられるが、この影響を考慮した数理モデルは構築されていない。

### 1.3 本研究の目的

本研究を含む一連のプロジェクトでは、ガスジェット浮遊法に関する前述の課題を解決し、酸化物を含めた熔融金属の熱物性値 (密度・粘性係数・表面張力) を高精度に測定する技術を確立することを最終的な目標としている。既報<sup>8)</sup> では分割型ノズルを用いた密度測定法と、液滴の静的形状から表面張力を算出する方法を提案した。

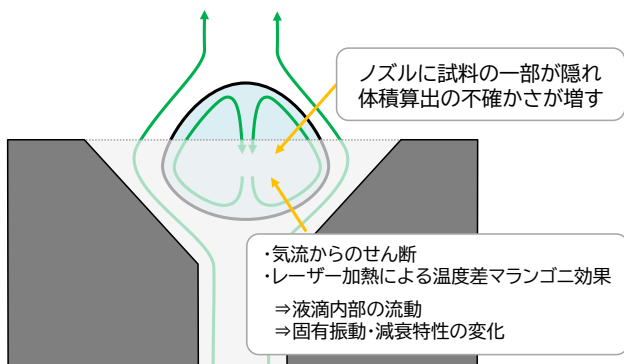


Fig.1 ガスジェット浮遊法とその課題

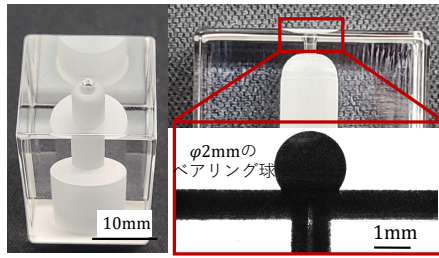


Fig.2 石英ガラス製のノズル (左) と固体球の観察結果 (右).

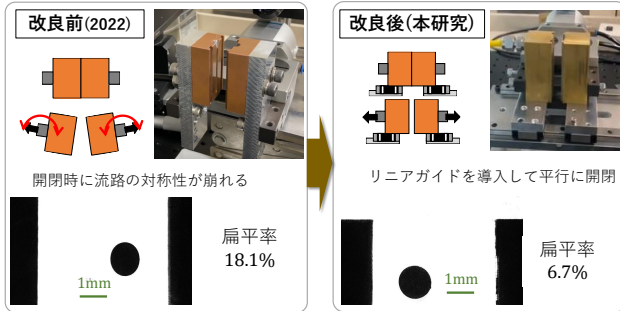


Fig.3 既報<sup>8)</sup> の分割型ノズル (左) と本研究で改良した分割型ノズル (右).

本報はその続報にあたり、密度の算出方法を改良した結果、および液滴の振動挙動から表面張力と粘性係数を算出する方法についての検討結果を報告する。

## 2 密度の算出方法の改良

既報<sup>8)</sup> では、ガスジェット浮遊に用いるノズルを高速に分割することで液滴の全景を観察する方法を提案した。ISS-ELF での測定値が得られている白金 (Pt) 液滴を対象に密度測定の精度を検証したところ、液滴の扁平が大きい場合は ESL での測定値<sup>9)</sup> との乖離が見られた。本研究では液滴の体積を正確に測定する方法として、①透明ノズル、②分割型ノズルの改良、③3方向ノズルの3通りの方法を検討した。

### 2.1 透明ノズル

Fig. 2 は石英ガラスで製作したノズルと、これを用いて直径 2mm の固体球を観察した様子である。平面部分の透明度は高いが、角部では面取りの影響により透明度が低くなっている。固体球の観察画像 (Fig. 2 右図) を見ても、面取り部で透過性がなく、液滴の全景を観察することはできないことが分かる。面取りを最小限に抑えた加工法も考えられるが、角部の影響を完全に除去することは難しいと考えられる。

### 2.2 分割型ノズルの改良

分割ノズルを用いた観察については既報<sup>8)</sup> でも述べたが、製作したノズルの開閉機構は Fig. 3 左図に示すような構造になっており、開閉時に流路の対称性が崩れる状況であった。Pt 液滴を浮遊させた際の液滴の扁平率は 18.1% と高く、その要因の一つとして、流路の対称性の低下によるガスジェット流の偏心が考えられた。本研究ではこの仮説に基づいて、Fig. 3 右図のようにノズルの開閉にリニアガイドを用いる改良案を施した。改良後のノズルを用いて浮遊させた落下中の液滴の扁平率は

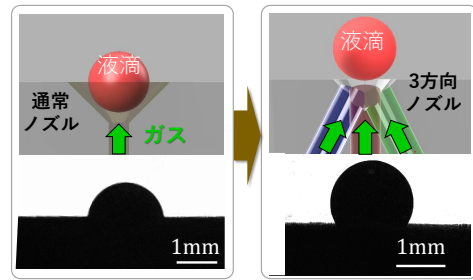


Fig.4 3方向ノズルの構成.

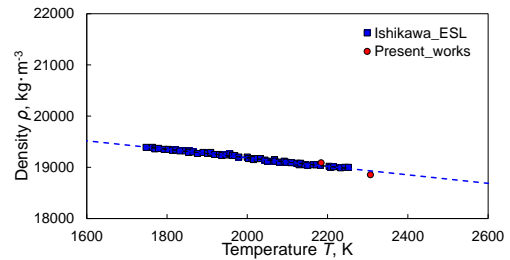


Fig.5 3方向ノズルを用いて算出した溶融 Pt の密度. Ishikawa\_ESL は文献<sup>9)</sup> のデータ.

6.7% と有意に小さくなった。Pt の密度を算出したところ、ノズルの改良前と比べてばらつきが低減し、平均値についても ESL による測定値<sup>9)</sup> との相対誤差が 2.5% 程度まで一致するようになった。

### 2.3 3方向ノズル

液滴の可視範囲を大きくする方法として、Fig. 4 に示すような 3 方向ノズルを考案した。通常のノズルでは液滴の真下からガスを吹きつけるため、安定浮遊する位置はガス流量で決まるのに対し、3 方向ノズルではノズルの吹き出し角度によっても浮遊位置を変えることができる。本研究では 3 ノズルから伸ばした直線がノズルの外側で公差するように設計したところ、Fig. 4 右図に示すように通常ノズルよりも高い位置で安定浮遊させることができた。これにより液滴の可視範囲が広くなり、液滴の輪郭抽出に用いるデータを増やすことができた。液滴の扁平率が小さい瞬間を選択して密度を算出したところ、Fig. 5 に示すように ESL での測定値と定量的に整合する結果となった。

## 3 浮遊実験からの液滴振動特性の算出

次に、液滴の振動特性から表面張力と粘性係数を算出するための検討について述べる。Fig. 6 は本研究で構築した密閉型のガスジェット浮遊装置である。ガスジェットの流路の途中に、ファンクションジェネレータで生成した音波をスピーカーから放出することで、浮遊液滴に特定周波数の振動を励起することができる。Fig. 7(a) はこの装置によって Ni 液滴を浮遊させた様子であり、この画像から算出した液滴半径の時間変化を Fig. 7(b) に示した。一定周波数の振動が指数関数的に減衰していることが分かる。溶融 Ni と溶融 Fe について温度を変えたガスジェット浮遊実験を行い、Rayleigh 振動と Lamb の減衰モデルを用いて周波数と減衰時定数から表面張力と粘性係数を算出したものを Fig. 8 に示した。図中の破線は、

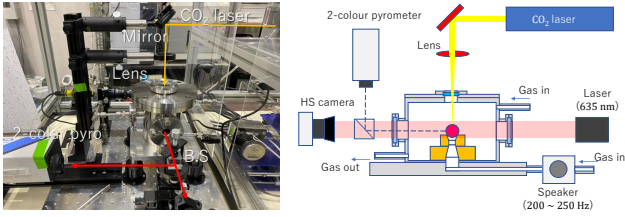


Fig.6 密閉型的气体ジェット浮遊装置.

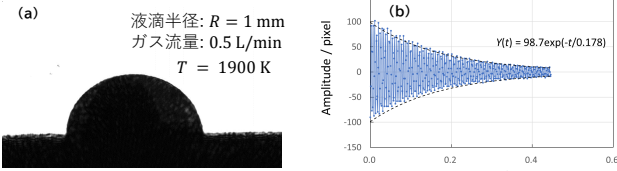


Fig.7 (a) 溶融 Ni の浮遊実験の様子, (b) 溶融 Ni の表面振動.

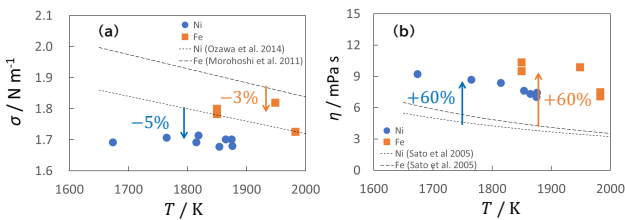


Fig.8 Fig. 6 の装置で浮遊させた溶融 Ni と溶融 Fe の振動周波数と減衰時定数から Rayleigh 振動と Lamb 減衰を用いて算出した表面張力 (a) と粘性係数 (b). 図 (a) 中の破線は EML による測定値<sup>10,11</sup>, 図 (b) 中の破線は文献<sup>12</sup>による測定値.

表面張力 (a) は EML による測定値<sup>10,11</sup> であり, 本研究でガスジェット浮遊によって算出した値は EML での報告値より 3 ~ 5% 小さい結果となった. また, Fig. 8(b) の破線は文献<sup>12</sup> による粘性係数の測定値であり, 本研究で算出した値は文献<sup>12</sup> の報告値の約 1.6 倍と大きくなった. ガスジェット浮遊中の液滴の振動周波数と減衰時定数は, Rayleigh 振動と Lamb 減衰とは異なる可能性が強く示唆され, 適切な数理モデルの構築が求められる.

#### 4 VOF 法による液滴振動のシミュレーション

数値解析的なアプローチとしては, 非定常数値シミュレーションによる方法と, 後述する振動論的に固有値解析する方法を検討した. Fig. 9 は, Volume-of-Fluid (VOF) 法によって, 液面の動的変形, 内部流動, 気流場を全て連成して時間発展計算した結果を抜粋したものである. 液滴の半径の時間変化を分析したところ, 振動周波数についてはガスジェット流がない場合と大きな変化は認められなかったのに対し, 振動の減衰についてはガスジェット流がない場合より早く, 見かけの粘性係数が約 2 倍となった. 本研究での VOF シミュレーションは簡単のため 2 次元デカルト座標系で実施しており, この結果から振動挙動について定量的な議論はできないが, ガスジェット流の影響により減衰が速くなる傾向は確認できた.

#### 5 液滴振動の固有値解析

VOF 法による時間発展計算は, 計算空間を 2 次元とした場合でも 1 ケースの計算に長時間を要するため, 振動挙動と物性値を対応付けるモデルとしては実用的ではな

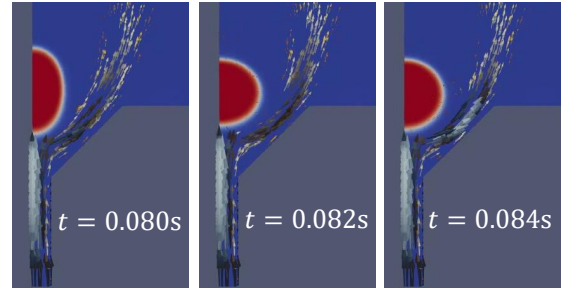


Fig.9 VOF 法によるガスジェット浮遊液滴の内外の流動と液面変形のシミュレーション結果.

い. そこで, 液滴の振動を固有値問題に帰着させて, 時間発展計算よりも圧倒的に少ない計算量で物性値と振動挙動との対応関係を予測する方法を検討した.

#### 5.1 問題設定

Fig. 10 に示すように, まず流れ場を軸対称定常状態を仮定した基本流と, 基本流からの変動成分に分解する. 基本流については非線形問題として計算する. 変動成分は微小であるとして線形化し, 変動場に関する固有値問題を計算することで振動周波数  $\omega$  と減衰時定数  $\tau$  を得る.

#### 5.2 支配方程式と境界条件

本研究では下記の支配方程式と境界条件で流れ場と液面変形を記述する.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\mathbf{u} \quad (2)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \alpha\nabla^2 T \quad (3)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla F = 0 \quad (4)$$

式 (1)~(4) はそれぞれ質量保存則, Navier-Stokes 方程式, エネルギー方程式, 界面の輸送方程式である.  $\mathbf{u}$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$  はそれぞれ速度, 圧力, 温度, 密度, 粘性係数, 熱拡散率である.  $F$  は界面位置を陰関数表現したものであり, 下記のように定義した.

$$F(r, \theta, \varphi, t) = r - R_0(1 + r'(\theta, \varphi, t)) \quad (5)$$

ここで,  $R_0$  は真球相当半径,  $r'$  は真球からの相対変形量である. 境界条件は下記のように与えた.

$$p = \sigma\nabla \cdot \mathbf{n} + p_{\text{jet}} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} = \boldsymbol{\tau}_{\text{jet}} \cdot \mathbf{n} + \sigma_T(\mathbf{I} - \mathbf{nn})\nabla T \quad (7)$$

$$\lambda\nabla T \cdot \mathbf{n} = h(T - T_a) + \varepsilon\sigma_{\text{SB}}(T^4 - T_a^4) + \dot{q}_L \quad (8)$$

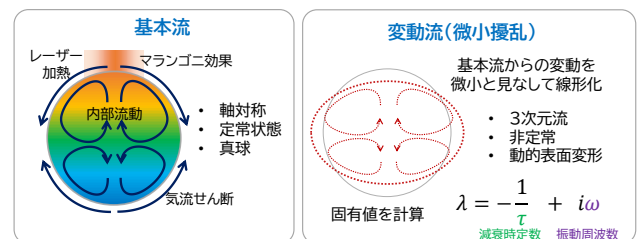


Fig.10 液滴振動の固有値解析の問題設定.

式 (6), 式 (7), 式 (8) はそれぞれ法線圧力, せん断応力, 熱流束である.  $\mathbf{n}$ ,  $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma_T$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma_{SB}$  はそれぞれ, 界面法線ベクトル, 粘性応力テンソル, 表面張力, 表面張力の温度係数, 熱伝導率, 対流熱伝達係数, 放射率, ステファンボルツマン定数である.  $\dot{q}_L$  はレーザーによる熱流束であり, 下記のように与えた.

$$\dot{q}_L = \frac{P_L}{2\pi R_L^2} \exp\left[-\frac{s(\theta, \varphi)^2}{2R_L^2}\right] \quad (9)$$

$s$  はレーザーのスポットからの距離,  $R_L$  はレーザーのスポット半径,  $P_L$  はレーザーの出力である.

### 5.3 熱流動と界面変形の表現方法

前述したように, 流れ場を基本流と振動成分に分けて, 球座標系として式 (10) のように表現した.

$$\begin{cases} \mathbf{u}(r, \theta, \varphi, t) = \mathbf{u}_0(r, \theta) + \mathbf{u}'(r, \theta, \varphi, t) \\ p(r, \theta, \varphi, t) = p_0(r, \theta) + p'(r, \theta, \varphi, t) \\ \Theta(r, \theta, \varphi, t) = \Theta_0(r, \theta) + \Theta'(r, \theta, \varphi, t) \end{cases} \quad (10)$$

空間離散化についてはスペクトル法を用いて, 式 (11) のように展開した.

$$u(r, \theta, \varphi) = \sum_i^{N_r} \sum_{l=0}^{N_\ell} \sum_{m=-l}^l u_{ilm}(t) T_i(r) Y_\ell^m(\theta, \varphi) \quad (11)$$

$r$  方向は Chebyshev 級数,  $\theta, \varphi$  方向は球面調和関数を基底関数とした. 離散化後の方程式について, 基本流は Newton-Raphson 法で反復計算する. 線形化擾乱方程式については下記のノーマルモードを仮定すると

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u}'(r, \theta, \varphi, t) \\ p'(r, \theta, \varphi, t) \\ \Theta'(r, \theta, \varphi, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{u}}(r, \theta) \\ \hat{p}(r, \theta) \\ \hat{\Theta}(r, \theta) \end{pmatrix} \exp(\lambda t + im\varphi) + \text{c.c.} \quad (12)$$

下記の一般化複素固有値問題に帰着され, これを解くことで固有値  $\lambda$  から減衰時定数  $\tau$  と周波数  $\omega$  が得られる.

$$\mathbf{A}x = \lambda \mathbf{B}x, \quad \lambda = -\frac{1}{\tau} + i\omega \quad (13)$$

## 6 計算結果

前節で定式化した方程式群をプログラム実装し, 熔融 Ni のガスジェット浮遊実験を想定した数値計算を行った. Fig. 11 は, 固有ベクトルとして得られた液滴の動的変形 (液滴形状) と擾乱場の圧力 (色), 速度 (ベクトル) をスナップショットで示したものである. Fig. 12 はマランゴニ効果の規模と気流せん断の強さを変えた場合の振動周波数 (a,b) と減衰時定数 (c,d) について, Rayleigh 振動と Lamb の減衰時定数からの相対誤差として示したものである. マランゴニ効果・気流せん断のいずれに対しても, 振動周波数については殆ど変化が見られず, 減衰時定数については  $\varphi$  方向の波数  $m$  によって傾向が異なり,  $m = 0, 1$  モードについては減少傾向,  $m = 2$  モードでは増加傾向が見られた. 各モードを重ね合わせた場合, 全体として減衰は早くなる傾向にあり, 実験<sup>2)</sup> で得られている傾向と少なくとも定性的には整合する.

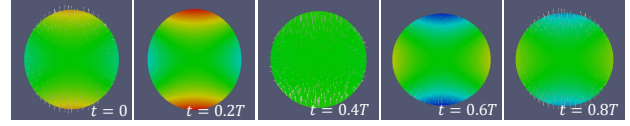


Fig.11 擾乱成分の計算結果.

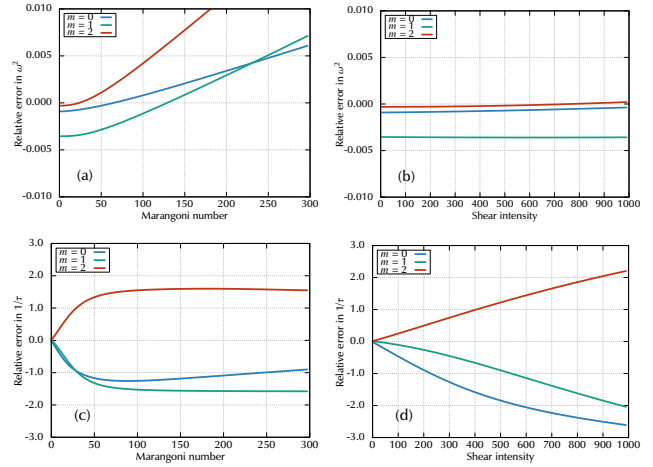


Fig.12 (a,b) 算出した振動周波数についての Rayleigh 振動との相対誤差. (c,d) 減衰時定数の逆数についての Lamb の解析解との相対誤差.

## 7 まとめと今後の課題

ガスジェット浮遊法による溶融酸化物の密度・表面張力・粘性係数の測定法を確立することを目的に実験と数値計算の両面の検討を行った. 密度の算出に関しては, 分割型ノズルの改良と 3 方向ノズルの導入によって測定精度を向上することができた. 表面張力と粘性係数の算出に関しては, 密閉型のガスジェット浮遊装置によって液滴の振動挙動を捉えらえるようになった. 数値解析的には, VOF 法によって液面変形と液滴内外の流動を連成して計算する方法を確立し, 数ケースについては計算時間を掛けて物性値と振動挙動との関係を算出できる見通しを得た. 物性値と振動挙動の関係を網羅的に解析する方法として固有値問題の計算法を構築し, 定性的には実験を説明し得る結果を得た. 今後は, それぞれの方法の課題を解決し, 定量的に物性値の測定精度を議論する.

## 謝辞

本研究の一部は 2023 年度宇宙環境利用専門委員会 フロントローディング研究の助成を受けて行われた.

## 参考文献

- 1) Artemis program; WEB site.
- 2) JAXA; 日本の国際宇宙探査シナリオ (案)2021.
- 3) 金森・篠田, 第 34 回宇宙エネルギーシンポジウム (2015).
- 4) S. Schreiner et al., *Adv. in Space Res.* **57**(5), p.1209 (2016).
- 5) T. Ishikawa et al. *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* **39**(1) 390101 (2022).
- 6) L. Rayleigh: *Phil. Mag.* **32**, pp. 529–546 (1916).
- 7) H. Lamb: *Hydrodynamics, 6th ed.* Cambridge University Press (1932).
- 8) 白鳥 他: 第 37 回宇宙環境利用シンポジウム (2023).
- 9) T. Ishikawa et al.; *Jpn. J. Appl. Phys.* **45** 1719 (2006).
- 10) S. Ozawa et al.; *Int. J. Thermophys.* **35** p.1705 (2014).
- 11) K. Morohoshi et al.; *ISIJ Int.* **51** p.1580 (2011).
- 12) Y. Sato et al.; *Meas. Sci. Technol.* **16** 363 (2005).