

IIII ISS 静電浮遊炉 IIIII

(解説)

ISS 静電浮遊炉を用いた高温融体界面現象の研究
—酸化物・鉄鋼融体の界面張力測定—渡邊 匡人¹・田中 敏宏²・塚田 隆夫³・石川 毅彦⁴・田丸 晴香⁴・水野 章敏¹Study on Interfacial Phenomena High Temperature Liquids by Electrostatic
Levitation Furnace in ISS
—Interfacial Tension between Molten Oxides and Molten Steel—Masahito WATANABE¹, Toshihiro TANAKA², Takao TSUKADA³, Takehiko ISHIKAWA⁴,
Haruka TAMARU⁴ and Akitoshi MIZUNO¹

Abstract

The purpose of this research project is to clarify the interfacial phenomena between the molten steel and the oxide melts from the viewpoints of thermophysical properties of these liquids. In our project, using an electrostatic levitation furnace (ELF) in the International Space Station (ISS) we obtain density, surface tension and viscosity of oxide melts and also try to obtain interfacial tension between the molten steel and the oxide melts by the modified oscillating drop technique. The research work contributes the precise process control for the high advantage steels products. Because in iron and steel making processes interfacial tension plays important role for the control of molten steel flow at the interface between molten steel and oxide melts. We, therefore, propose the novel technique to obtain temperature dependence of interfacial tension between molten iron and molten oxides by core-shell form droplet including interface between two liquids using electrostatic levitation, which achieve the containerless conditions. The proposal of the novel technique of interfacial tension measurements using ELF in KIBO was accepted in 2012-JAXA-AO for International Research Participation on ISS-KIBO. In the manuscript, we introduce our research project outline and current status for the future ISS experiments.

Keyword(s): Electrostatic Levitation, Thermophysical Properties, Interfacial Tension, Surface Oscillation, Steel processing

Received 17 Jan. 2015, accepted 21 Jan. 2015, published 31 Jan. 2015

1. はじめに —ISS の微小重力環境を用いた 2 液相間の界面張力測定—

本稿では、国際宇宙ステーション (ISS) において無容器浮遊法の 1 つである静電浮遊装置 (Electrostatic Levitation Furnace, ELF)¹⁾を用いて、スラグ・溶鋼などの酸化物・金属融体界面現象を融体熱物性と界面エネルギーの観点から解明することを目指した研究の紹介と ISS 実験に向けた準備状況について述べる。

2012 年に ISS 搭載の ELF の活用と利用促進を目指した研究テーマ募集がおこなわれた。ISS での ELF を用いた実験では、酸化物等の融点が高く電磁浮遊法では浮

遊できない物質の融体熱物性の研究が重要と考えられた。これは地上の静電浮遊法では、試料の浮遊のために高電圧を印加しなくてはならず、ガス中では放電してしまうため真空中での測定しかおこなえない。酸化物等を真空中で溶融浮遊すると、蒸発が激しく組成が大きく変化し熱物性を正確に測定できない。しかし、ISS の長時間微小重力環境では、高電圧の印加が必要ないためガス雰囲気中でも実験が可能となり、電磁浮遊できない酸化物の実験がおこなえる。そこで、我々は単に酸化物の熱物性測定だけではなく、貴重な長時間微小重力環境を有効に活かさないかと考え、長時間微小重力環境でしかできない研究をおこなうことを目指した。これまで高温融体の無

1 学習院大学 理学部 〒171-8588 東京都豊島区目白 1-5-1

Faculty of Science, Gakushuin University, 1-5-1 Mejiro, Tokyo, 171-8588, Japan

2 大阪大学大学院工学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871, Japan

3 東北大学大学院工学研究科 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-07

Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-07 Aoba, Sendai, 980-8579, Japan

4 宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

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

(E-mail: masahito.watanabe@gakushuin.ac.jp)

容器浮遊をおこなってきた中で、微小重力の最重要性は浮遊液滴内での成分の均一性であった。均一に混合するはずの合金融体でも、地上では密度差により分離してしまう場合があり、物性値を測定する際に密度差による偏析を微小重力環境でなくすることが最も重要である。一方、水と油のような混合しない 2 種類の液体を混ぜて微小重力下で無容器浮遊させた場合には、2 つの液体が卵のようなコア・シェル形状の液滴になる。この際、混合しない液体 1 と液体 2 の表面張力をそれぞれ σ_1 と σ_2 ($\sigma_1 > \sigma_2$) として系全体の表面自由エネルギー W を考えると

$$W = \sigma_1 S_1 + \sigma_2 S_2 \quad (1)$$

(S_1 と S_2 は液体 1 と 2 のそれぞれの表面積) となり、系が安定になるために表面自由エネルギーを小さくするには、表面張力の小さい液体が外側 (シェル)、表面張力が大きい液体が内部 (コア) とならなければならない。実際に 2 種類の混合しない液体がコア・シェル形状となった場合にコア液体 1 とシェル液体 2 の間に界面が発生するので、液体 2 の表面張力 σ_2 は液体 1 と液体 2 の間の界面張力 σ_{12} (元の表面張力よりも小さくなる) となり、**Figure 1** のようにコア・シェル形状の場合(1)式は

$$W = \sigma_o (4\pi R_o^2) + \sigma_{12} (4\pi R_i^2) \quad (2)$$

となる。**Figure 1** のように中心が一致したコア・シェル形状の液滴を形成するには、密度差を無視できる微小重力環境でなければならない。実際、ドイツ航空宇宙センター (DLR) のグループでは、過冷却温度域で相分離する Cu-Co 合金液体を TEXUS ロケットによる微小重力下で電磁浮遊法を用いて溶融浮遊させて、**Fig. 2** のような Co-rich 相のコアと Cu-rich 相のシェルの液滴が形成できることを示した²⁾。このような界面を持った液滴が形成できると、液滴振動法を応用して 2 液相間の界面張力を求めることができる。このコア・シェル形状液滴の表面振動から界面張力を求めることは微小重力環境下のみで実施でき、ISS での長時間微小重力環境を有効に活用できる実験・測定である。Cu-Co 合金の界面張力は過冷却温度域でのみ測定できるため、実際の合金製造プロセスにおける重要性はあまり大きくない。

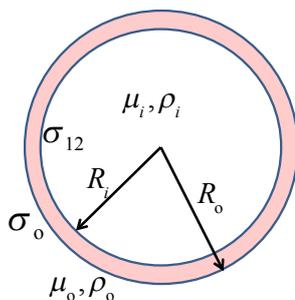


Fig.1 Core-shell droplet configuration of two-phase liquids.

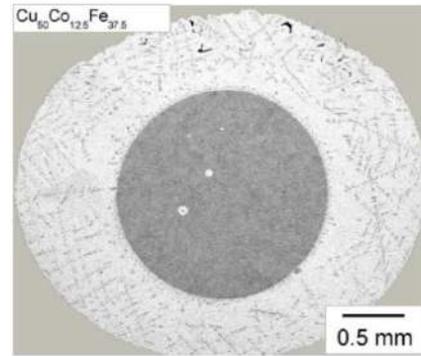


Fig.2 Core-shell droplet of immiscible liquid alloy Cu-Co system under microgravity conditions²⁾.

そこで、次に述べるような鉄鋼プロセスで実際に重要とされている酸化物・鉄融体による 2 液相について、その界面張力を計測する研究プロジェクトを申請したところ採択され、現在 ISS での実験に向けて準備を進めている。

2. 鉄鋼プロセスにおける酸化物・鉄鋼融体界面張力

酸化物・鉄鋼融体の界面は、鉄鋼プロセスの様々なところで現れ、重要とされている。精錬過程では、脱酸、脱硫で発生するスラグと呼ばれる酸化物融体が溶融鉄の上部に偏析し、酸化物 (スラグ)・溶融鉄界面が生じる。また、この精錬された鉄を薄板鋼板に加工する連続 casting プロセスでは、スラグと同様な成分の酸化物融体をモールドフラックスとして溶融鉄の周りを囲み、溶融鉄を薄く伸ばしながら冷却していく。この際にも酸化物 (モールドフラックス)・溶融鉄界面が生じている。このプロセスでは、モールドフラックスと溶融鉄界面での界面張力勾配により界面に気泡や微粒子が集まり、鉄鋼材中に混入し特性劣化の原因になることがしばしばある。このため、モールドフラックス・溶融鉄界面張力の値を知ることが重要とされている。さらに、鉄鋼材同士の溶接プロセスにおいても、酸化物・溶融鉄界面の界面張力が重要な役割を担っている。鉄鋼材の溶接プロセスでは、アーク溶解した溶融鉄プールを酸化物融体 (溶接フラックス) で覆い流動させ、溶接フラックス・溶融鉄の界面張力で溶接部分の形状の制御をおこなっている。最近の精密加工の要請から、溶接部分を設計通りになるように溶接形状を制御する必要がある。また、溶接形状は溶接部分の強度を左右するため、溶接フラックス・溶融鉄界面張力の制御がより重要となってきている。このように、酸化物・溶融鉄界面現象の解明についての要求は多く、酸化物・溶融鉄界面張力を知ることは鉄鋼プロセスの現場では非常に重要である、このため、これまでに X 線透視法を用いてスラグや酸化物融体内に溶鋼を設置し、静滴法と同様にして界面張力の測定がおこなわれてきた³⁾。しか

し、スラグ・溶鋼界面張力は添加物に敏感であるにもかかわらず、従来の方法では容器からの不純物を制御できていない。また容器の制約から、鉄鋼の融点近傍のみ（1800K）での温度しか測定がおこなえず界面張力の温度変化を知ることはできなかった。

このように、酸化物・溶融鉄界面の界面張力の測定は困難が大きいため、界面での様々な現象の理解は進んでいない。そこで前述したように、ISS において静電浮遊炉 ELF を用いて酸化物融体に内包された溶融鉄試料を用いて、液滴表面振動解析から精密な界面張力とその温度変化を取得するのが本プロジェクトの目的である。

3. 液滴振動法による界面張力測定

次に、界面を有した液滴振動の解析から、界面張力を導出する方法を述べる。このアイデアは、宇宙実験の初期の1981年に Saffren ら⁴⁾による微小重力下での2液相の振動現象の解析に基づいたものである。Figure 1 のように中心が一致した2相分離した液滴について、以下のような解析で界面張力を求めることを検討した。液滴の表面振動は、液滴形状の時間変化を真球半径 R からの変化で表すと、

$$r(t) = R + \sum_{l,m} \Delta R_l(t) Y_l^m(\theta, \phi) \quad (3)$$

($Y_l^m(\theta, \phi)$ は球面調和関数) となり、表面振動数 ω_0 は、液滴密度 ρ と表面張力 σ_s を使って、

$$\omega_0 = \frac{l(l-1)(l+2)\sigma_s}{\rho R^3} \quad (4)$$

と表せる。これを Figure 1 のようなコア・シェル形状液滴に拡張すると、コアとシェルの形状の時間変化は

$$R_i(t) = R_i + \sum_{l,m} \Delta R_i(t) Y_l^m(\theta, \phi) \quad (5)$$

$$R_o(t) = R_o + \sum_{l,m} \Delta R_o(t) Y_l^m(\theta, \phi)$$

と表せ、この2式に従って液滴形状が変化すると、シェルの表面振動数はコア・シェル液体の半径比 $\tau = \sqrt{R_o/R_i}$ 、密度差比 $\Delta\rho = 3(\rho_i - \rho_o)/5\rho_o$ 、および表面張力と界面張力の比 $\sigma = \sqrt{\sigma_o/\sigma_{12}}$ を使って、

$$\omega_{\pm}^2 = \omega_0^2 K_{\pm} \left(\frac{\tau^8}{\sigma(1+\Delta\rho)\tau^{10} + 2/3\Delta\rho} \right) \quad (6)$$

$$K_{\pm} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma m_i}{\tau^3} + \frac{m_o \tau^3}{\sigma} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\sigma m_i}{\tau^3} - \frac{m_o \tau^3}{\sigma} \right)^2 + 1}$$

と表せる。 K_{\pm} 中のパラメータ m_p, m_o は、

$$m_i = (1+\Delta\rho)\tau^5 - \Delta\rho/\sigma, m_o = 3\tau^5/5 + 2/5\tau^5 \quad (7)$$

である⁴⁾。(6)式からコア・シェル形状液滴の表面振動数

は1相のときの表面振動 ω_0 よりも大きくなる振動数 ω_+ と小さくなる振動数 ω_- の二つに分裂することがわかる⁴⁾。この解析解のように、コア・シェル液滴の表面振動数が2つに分裂することを確かめるため、流体解析ソフト FLUENT を用いて VOF (Volume of Fluid) 法により液滴振動のシミュレーションをおこなった。シミュレーションは、純鉄と酸化物を仮定しコア・シェル液滴として Table 1 のような物性値を用いておこなった。界面張力は、純鉄との界面張力が大きい酸化物を想定し、CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO の値 1.306N/m³⁾ を用いておこなった。他の物性値もこの酸化物に合わせて設定した^{5,6)}。この結果得られた表面振動の振幅の時間変化のパワースペクトラムを Figure 3 に示す。(a)はコア液体(鉄)の振幅、(b)がシェル液体(酸化物)の振幅の時間変化のパワースペクトラムである。ピーク強度が小さいが、(b)のシェルのパワースペクトルには2つのピークが現れていることが確認できる。Table 1 に示した物性値を用いて(6)式から得られる周波数は $f_+ = \omega_+/2\pi = 56\text{Hz}$ と $f_- = \omega_-/2\pi = 25\text{Hz}$ であるが、シミュレーションの結果は、 $f_+ = 46\text{Hz}$ と $f_- = 20\text{Hz}$ となり周波数が低く現れている。周波数が低くなった原因は、粘性を大きく設定しているため表面振動の少ないデータを用いて高速フーリエ変換しているためと考えられる。現在、より詳細なシミュレーションをおこなっているが、今回のシミュレーションでコア・シェル液滴は、(6)式で表せるように純粋な液体の表面張力よりも大きい振動数と小さい振動数の2つの異なる振動数で表面振動することが確認された。従って(6)式において、液滴の半径比 τ と密度差比 $\Delta\rho$ を既知とすれば未知数は界面張力 σ_{12} とシェルの酸化物融体の表面張力 σ_o の2つとなるので、測定で2つのピーク ω_+ と ω_- が取得できれば、 σ_{12} と σ_o を同時に求めることができる。相分離系の場合には、2相が平衡に達するまでに体積が時々刻々変化するので、 τ が時間変化しある程度の時間を保持しなければ σ_{12} を正確に求めることができない。(平衡なコア・シェル形状になる時間を予め知っておく必要がある。)しかし、本研究で対象とする酸化物・鉄融体系の場合には予め界面が形成されており、2相の体積変化はないとして良い。このため、 σ_{12} を正確に求めることができる。仮に ω_{\pm} が時間変化する場合は、界面での反応により酸化物と金属の体積が変化していると判断できる。

Table 1 Materials parameter for numerical simulations of core-shell droplet oscillations.

	Iron (Core)	Oxide (Shell)
Density (kg/m ³)	7030	2848
Surface tension (N/m)	-	0.45
Viscosity (10 ⁻³ Pa·s)	5.5	214
Radius (mm)	3.475	2.149

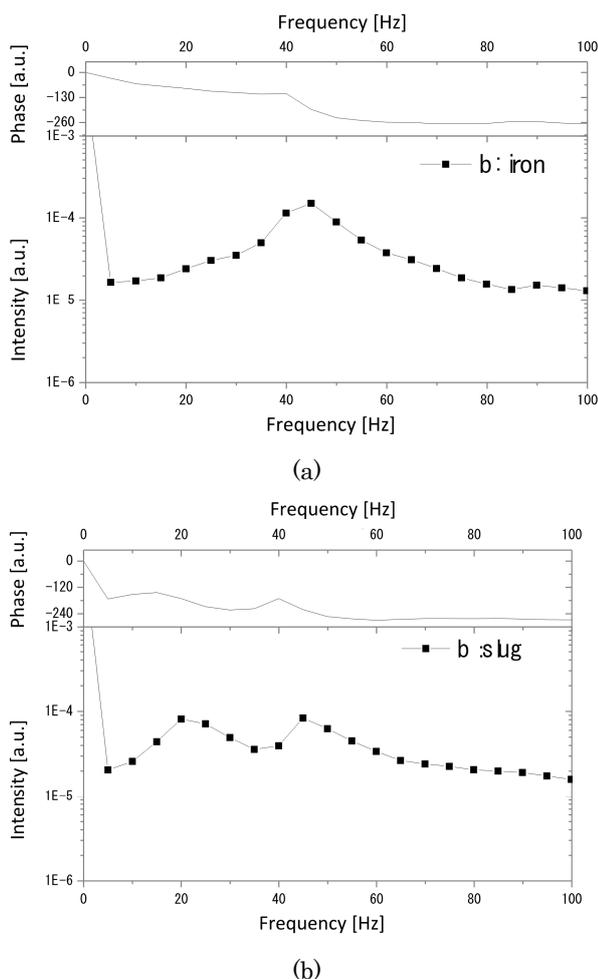


Fig.3 Power spectrum of interface and surface oscillation amplitude with time varying; (a) interface oscillation (iron core oscillation) and (b) surface oscillation (oxide shell oscillation).

4. ISS 実験に向けての準備状況

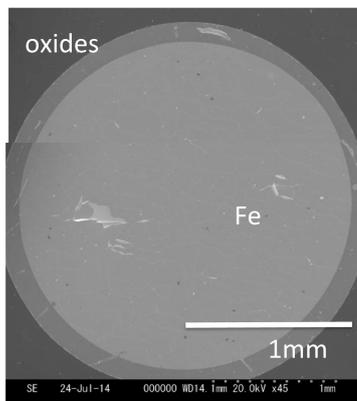
以上のような酸化物・溶融鉄の界面張力を ISS において静電浮遊炉 ELF を用いておこなっていくための、現在の準備状況を述べる。ELF は、田丸らの報告¹⁾のように開発が完了し ISS への搭載準備が完了している。2015 年中に ELF の打ち上げが予定されており、同時に試料カートリッジも打ち上げる予定である。最初の実験では、酸化物だけを用いて液滴振動計測をおこない、Table 2 に示すような酸化物融体の密度、粘性、表面張力を計測する計画である。この実験の終了後に、コア・シェル形状液滴を使って界面張力測定をおこなっていく計画である。ISS での ELF での実験手順は、田丸らの解説¹⁾で述べている手順でおこなう。試料の融解はレーザーを用いておこなうが、ELF では波長 980nm の半導体レーザーを使用しているため、この波長を試料が吸収する必要がある。スラグの主成分である $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ は、この波長を吸収しないため、FeO を少量添加することでレーザーを吸

収できることを確認している。(FeO の添加で界面張力と物性値が変化しない量の添加で確認をおこなった。) また、溶接フラックス用の酸化物は FeO と TiO_2 が主成分に含まれているため、レーザー吸収の問題はない。Table 2 に挙げた酸化物試料は半導体レーザーで溶解できることは確認できている。従って、酸化物のみの実験試料準備は問題はない。現在、我々がおこなわなければならないことは、スラグ・溶融鉄試料の準備である。まず実際に酸化物融体・溶融鉄が Fig.1 のようなコア・シェル形状の液滴になるかを確かめる必要がある。このため航空機を用いた短時間微小重力実験をおこない、酸化物と金属融体がコア・シェル液滴を形成するか電磁浮遊法を用いて実験した⁷⁾。ISS 実験を想定して静電浮遊法を用いるべきであるが、静電浮遊は航空機のパラボラ飛行での加重力から微小重力へ変化する際に電場の制御が難しく、簡単に航空機実験がおこなえないため、航空機の短時間微小重力環境でも容易に浮遊できる電磁浮遊法を用いた。また、最初の実験では確実に溶融浮遊させることを目的として、金属として電気伝導度の高い Ag を用い、酸化物として融点の低い B_2O_3 を用いて実験をおこなった。この金属と酸化物の組み合わせの場合、部分的に酸化物が金属を覆った試料から溶融浮遊させると、完全に酸化物が金属融体を覆うことが難しいことがわかった。(部分的に酸化物が離れて隙間ができてしまう。) 二回目の実験では ISS 実験を想定し、鉄と酸化物のコア・シェル液滴の形成を目指し、イルミナイト系溶接フラックス (Table 2 中の⑤) に相当) が塗布されている溶接棒を用いて実験をおこなった。この場合、最初に部分的に溶接フラックスが Fe を覆っている試料でも溶融後に酸化物が溶融鉄を覆い尽くし、コア・シェル液滴が形成できることがわかった。詳細については次号で報告するが、これらの航空機実験の結果より、部分的に酸化物が鉄を覆った試料を用いた場合、溶融後に完全なコア・シェル液滴を形成できない可能性がある。このため初めから鉄を酸化物に内包した形状の試料を作成しておく必要がある。ELF での実験を想定し、直径 2mm になるように溶接棒から切り出した酸化物と鉄試料を BN 基板上で半導体レーザーにより溶解凝固させ、その断面形状を SEM で観察した (Fig. 4)。Figure 4(a)は酸化物としてライムチタニア系溶接フラックス (Table 2 の⑦)、Fig. 4(b)は酸化物として低水素系溶接フラックス (Table 2 の⑧) をそれぞれ用いた結果である。これから、ライムチタニア系フラックスの場合、ほぼ均質に酸化物が鉄の周りを覆ったコア・シェル構造になっているが、低水素系フラックスでは酸化物が鉄の周りを覆うものの、厚さが均質ではないことがわかる。しかし、鉄が酸化物に覆われた試料を形成できることが確認できたので、さらに作成プロセスを検討し、ELF での実験用試料準備を進める。また中本らの報告⁸⁾にもあるように、鉄試料の酸素濃度により酸化物の被覆の仕方が変化することが予想されており、鉄内部の酸素濃度も考慮して試料作成を進めていく。

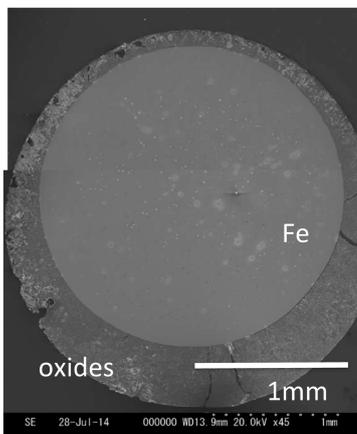
Table 2 Compositions of oxide materials for shell liquids of interfacial tension measurement samples.

	(mass%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	TiO ₂	FeO
① Slag 1	10	40	50	-	-	-
② Slag 2	10	35	55	-	-	-
③ Slag 3	10	30	60	-	-	-
④ Slag 4	14	36	50	-	-	-
⑤ IL flux	25.6	-	6.9	22.8	17.9	26.8
⑥ RU flux	26.6	-	7.4	13.3	52.8	-
⑦ LT flux	21.9	-	12.2	21.0	44.8	-
⑧ LH flux	16.7	7.6	57.8	3.2	14.7	-

IL flux: ilmenite type flux, RU flux: rutile type flux,
LT flux: lime titania type flux, LH flux: low hydrogen type flux



(a)



(b)

Fig.4 SEM image of oxide-Fe samples after laser melting on BN substrate, (a) IL flux for oxide and (b) LT flux for oxide.

また、3章で述べた界面張力算出の解析方法では、界面張力を求めるためには酸化物融体と熔融鉄の密度が必要である。熔融鉄の密度は静磁場印加電磁浮遊法を用いて既に取得しており⁹⁾、酸化物の密度は最初のELFの実験で測定する予定であるが、地上での準備においてもガスジェット浮遊法¹⁰⁾を用いて測定を進めている。3章に示した

(6)式は、2液相の粘性を考慮せずに導いている。1液相の液滴振動の解析でも粘性が表面振動に及ぼす影響が調べられているが¹¹⁾、粘性が小さい場合には大きな影響がないことがわかっている。また、液滴振動を引き起こし表面振動数を得るためには、液体の粘度が200mPa·s以下程度の必要があり、この程度の粘性では表面振動数に影響を与えない。しかし、酸化物の粘性は成分と組成により大きく変化するため、粘性を変化させた場合およびコア・シェルの半径比 r_c を変化させた場合について、コア・シェル液滴の表面振動のより詳細な数値シミュレーションをおこなった¹²⁾。数値シミュレーションの詳細は、上野らにより次号で報告予定であるが、シェルの酸化物の粘性とコア・シェル半径比の選択で2つの表面振動ピークの強度が変わることがわかった。これから、酸化物の粘性に対してシェルの厚さを変えることで、表面振動数を精度良く求めることが示唆された。このように、数値シミュレーションを援用することで表面振動ピークを精度良く求めるための測定条件を絞りこむことができるようになった。今後も数値シミュレーションを援用し、ISS実験に向けた準備をおこない、貴重な長時間微小重力環境を有効に使い、意義のある実験をおこなえるようにしていく。このため、本プロジェクトは、本稿の筆者の他に、小澤俊平准教授(千葉工業大学)、福山博之教授(東北大学多元物質科学研究所)、Prof. Joonho Lee (Korea Univ.), Prof. Andreas Meyer, Prof. Florian Kargle (DLR), Prof. Robert Hyres, Dr. Jonghyun Lee (Massachusetts Univ.), Prof. Anders Jarfors, Dr. Taishi Matsushita (Jönköping Univ.)などの国内外のメンバーの協力のもとに進めていく。

5. 最後に

これまで述べてきたように、ISSでの静電浮遊技術を利用し、これまで前例のない金属融体を内包した酸化物融体を浮遊し界面現象を研究するアイデアは新規なものである。この界面張力導出のアイデアは、これまでに国際研究協力チーム(International Topical Team)での議論や、研究班ワーキングチームでおこなってきた浮遊液滴の解析の検討に基づいている。宇宙実験は非常に時間のかかる研究であるが、希少な機会を使って研究するために十分な議論を重ねていくことで、新たなアイデアが生まれることを今回のプロジェクトでは感じている。このため、この界面を有した液滴を試料とすることで、界面張力を知るだけでなく、これまで観測することのできなかった液滴の振る舞いを調べる事が可能となり、浮遊技術の新たな展開にもつながると期待する。例えば、放射性物質の廃棄方法の検討や、反応性の高い物質を酸化物ガラスなどで保護する方法等を検討する際に、異相界面での移動現象などのシミュレーションにも役立つ情報を提供できるはずである。これは、高温融体熱物性測定ツールとして静電浮遊法は確立されてきたが、さらに静

電浮遊法が界面での現象を研究する強力なツールにもなることを本研究プロジェクトを通して実証していき、ELF を使った画期的な研究が今後おこなわれる参考となるような成果を上げられるように研究を進めていく。

参考文献

- 1) H. Tamaru, T. Ishikawa, J. T. Okada, Y. Nakamura, H. Ohkuma, S. Yukizono, Y. Sakai and T. Takada: *Int. J. Microgravity Appl.*, **32** (2015) 320104 (in Japanese).
- 2) I. Egry, L. Ratke, M. Kolbe, D. Chatain, S. Curiotto, L. Battezzati, E. Johnson and N. Pryds: *J. Mater. Sci.*, **45** (2010) 1979.
- 3) K. Ogino: *Tetsu-to-Hagane*, **61** (1975) 2118 (in Japanese).
- 4) M. Saffren, D. Ellmann and W. K. Rhim: *Proc. 2nd international colloquium on drops and bubbles*, p. 7, 1981.
- 5) K. Ogino, K. Suetaki, R. Tsukada and A. Adachi: *Tetsu-to-Hagane*, **52** (1966) 135 (in Japanese).
- 6) T. Koshida, T. Ogasawara and H. Kishidaka: *Tetsu-to-Hagane*, **67** (1981) 85 (in Japanese).
- 7) K. Onodera and M. Watanabe, 10th Asian Microgravity Symposium 2014, p. 129, 2014
- 8) M. Nakamoto, H. Gotoh, M. Suzuki and T. Tanaka: *Int. J. Microgravity Appl.*, **32** (2015) 320103 (in Japanese).
- 9) A. Mizuno, M. Tanno, R. Takahashi, H. Kawauchi and M. Watanabe: *Netsu-Bussei*, **27** (2013) 10 (in Japanese).
- 10) D. Langstaff, M. Gunn, G. N. Greaves, A. Marsing and F. Kargl: *Rev. Sci. Instrum.*, **87** (2013) 12491.
- 11) P. V. R. Suryanarayana and Y. Bayazitoglu: *Int. J. Thermophys.*, **12** (1991) 137.
- 12) S. Ueno, M. Kubo, T. Tsukada, Sugioka and M. Watanabe: *CAMP-ISIJ*, **27** (2014) 652. (in Japanese).