

## 炉心熔融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発 (委託研究)

—令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

Development of Technology to Simultaneously Measure Viscosity and Surface Tension  
of Molten Materials in Reactor Core  
(Contract Research)

-FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource  
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉環境国際共同研究センター  
大阪大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science  
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development  
Osaka University

December 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<https://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Institutional Repository Section,  
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,  
Japan Atomic Energy Agency.  
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発  
(委託研究)

—令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
廃炉環境国際共同研究センター

大阪大学

(2020年10月15日受理)

日本原子力研究開発機構(JAEA)廃炉環境国際共同研究センター(CLADS)では、令和元年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業(以下、「本事業」という)を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、平成30年度に採択された「炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発」の令和元年度の研究成果について取りまとめたものである。

炉心溶融物である(U, Zr)O<sub>2</sub>やボライドは非常に高温であるために、通常の測定方法では容器との反応が避けられず、熱物性の測定は困難である。本研究では、ガス浮遊法を用いて浮遊させた試料を加熱溶融させることで液滴とし、その液滴を基板に衝突させる。その衝突の一瞬の挙動から、粘性と表面張力を同時に導出する新しい技術を開発する。

---

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、大阪大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

Development of Technology to Simultaneously Measure Viscosity and Surface Tension  
of Molten Materials in Reactor Core  
(Contract Research)

— FY2019 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science  
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development  
Japan Atomic Energy Agency  
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Osaka University

(Received October 15, 2020)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2019.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields. The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2018, this report summarizes the research results of the “Development of Technology to Simultaneously Measure Viscosity and Surface Tension of Molten Materials in Reactor Core” conducted in FY2019.

Since (U,Zr)O<sub>2</sub> and boride, molten materials in reactor core, exist at extremely high temperature, chemical reactions between the vessel and these molten materials are unavoidable. Therefore, it is difficult to measure the thermophysical property of these materials. In the present study, droplets are produced by heating and melting the samples levitated by a gas levitation method, then the droplets are collided with a substrate. From the instant behavior of the collision, a novel technique to simultaneously derive the viscosity and surface tension will be developed.

Keywords: Impingement, Deformation, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, Borides

---

This work was performed by Osaka University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要 .....	1
2. 平成 30 年度 採択課題（継続分） .....	2
3. 令和元年度 採択課題 .....	5
付録 成果報告書 .....	9

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project .....	1
2. Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~ .....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
Appendix Result Report.....	9

This is a blank page.

## 1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン(平成26年6月文部科学省)」等を踏まえ、平成27年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」(以下、「本事業」という。)を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」という。)では、平成27年に廃炉国際共同研究センター(以下、「CLADS」という。現:廃炉環境国際共同研究センター)を組織し、「東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所廃炉(以下、「1F廃炉」という。)に係る研究開発を進めている。

また、平成29年4月にCLADSの中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後はCLADSを中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成30年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省からJAEAに移行することで、JAEAとアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来プログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム(令和元年度より新設)に再編した。

## 2. 平成 30 年度 採択課題（継続分）

平成 30 年度採択課題（継続分）については以下のとおりである。

課題数：19 課題

- 共通基盤型原子力研究プログラム 11 課題  
(若手研究 6 課題、一般研究 5 課題)
- 課題解決型廃炉研究プログラム 6 課題
- 国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題  
(日英共同研究)

### 平成 30 年度 採択課題一覧

#### 共通基盤型原子力研究プログラム

##### 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

## 国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

### 3. 令和元年度 採択課題

令和元年度は、4つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。  
公募の概要は以下のとおりである。

- ・ 公募期間：平成 31 年 4 月 24 日～令和元年 6 月 7 日  
令和元年 5 月 30 日～令和元年 7 月 18 日 ※日露共同研究のみ
- ・ 課題数：19 課題
  - 共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題  
(若手研究 2 課題、一般研究 5 課題)
  - 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題
  - 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題  
(日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題)
  - 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

#### 令和元年度 採択課題一覧

##### 共通基盤型原子力研究プログラム

###### 【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一郎	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

## 共通基盤型原子力研究プログラム

## 【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁	産業技術総合 研究所

## 課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島2・3号機ペダスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立 GE ニュークリア・ エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾大学

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

本報告書は、採択課題のうち、共通基盤型原子力研究プログラム(若手研究)「炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発」の令和元年度の研究成果について記したものである。

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録  
成果報告書

This is a blank page.

令和元年度

日本原子力研究開発機構

英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

炉心溶融物の粘性及び表面張力同時

測定技術の開発

(契約番号 31I039)

成果報告書

令和2年3月

国立大学法人大阪大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人大阪大学が実施した「炉心熔融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発」の令和元年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略 .....	iv
1. はじめに .....	1
2. 業務計画 .....	2
2.1 全体計画 .....	2
2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法 .....	3
3. 令和元年度の実施内容及び成果 .....	4
3.1 酸化物試料の粘性及び表面張力評価手法開発 .....	4
3.1.1 表面張力・粘性評価手法開発 .....	4
3.1.2 $ZrO_2$ の測定 .....	13
3.2 金属系試料の粘性及び表面張力評価開発手法 .....	19
3.2.1 表面酸化膜除去技術開発 .....	19
3.3 研究推進 .....	22
4. 結言 .....	23
参考文献 .....	24

Contents

Abstract ..... iv

1. Introduction ..... 1

2. Project plan ..... 2

    2.1 Overall plan ..... 2

    2.2 Objectives of the project in FY2019 and how to achieve the objectives..... 3

3. Contents and results of the project in FY2019 ..... 4

    3.1 Development of a new technology to measure viscosity and surface tension of oxides ..... 4

        3.1.1 Development of a technique for surface tension and viscosity measurement ..... 4

        3.1.2 Measurement of ZrO<sub>2</sub> ..... 13

    3.2 Development of a new technology to measure viscosity and surface tension of metals ..... 19

        3.2.1 Development of a technique for removing oxidation layer ..... 19

    3.3 Management of the project..... 22

4. Conclusion ..... 23

References ..... 24

表一覧

表 2. 1-1 年度別全体計画..... 3  
 表 3. 1. 1-1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Au, Pt 及び B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の Weber 数 (直径 2.0 mm, 衝突速度 1.0 m/s) ..... 10  
 表 3. 2. 1-1 打ち合わせ日程と内容..... 22

図一覧

図 3. 1. 1-1 作製した液滴落下装置とその概略図..... 4  
 図 3. 1. 1-2 放射温度計による冷却曲線測定例..... 5  
 図 3. 1. 1-3 液滴衝突法解析概略図..... 5  
 図 3. 1. 1-4 液滴衝突法取得画像例 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ..... 6  
 図 3. 1. 1-5 反跳後の試料の振動 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ..... 7  
 図 3. 1. 1-6 液滴衝突法によって評価した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の表面張力と文献値..... 8  
 図 3. 1. 1-7 Weber 数と変形 ..... 9  
 図 3. 1. 1-8 熔融 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の液滴落下試験における Weber 数と表面張力解析の関係..... 10  
 図 3. 1. 1-9 熔融 Au の液滴落下試験結果..... 11  
 図 3. 1. 1-10 反跳後の減衰振動 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ..... 12  
 図 3. 1. 1-11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の粘性評価結果 ..... 13  
 図 3. 1. 2-1 熔融 ZrO<sub>2</sub> の BN 板への衝突反跳 ..... 13  
 図 3. 1. 2-2 熔融 ZrO<sub>2</sub> の BN 板への衝突反跳解析 ..... 14  
 図 3. 1. 2-3 熔融 ZrO<sub>2</sub> の表面張力評価 ..... 14  
 図 3. 1. 2-4 熔融 ZrO<sub>2</sub> と熔融 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の液滴落下試験における Weber 数と表面張力の関係.... 15  
 図 3. 1. 2-5 試験に用いた静電浮遊装置の外観図と装置構成..... 16  
 図 3. 1. 2-6 熔融 Zr-O の表面張力温度依存性..... 17  
 図 3. 1. 2-7 熔融 Zr-O の表面張力組成依存性..... 18  
 図 3. 2. 1-1 Fe, B, ならびにその酸化物の蒸気圧曲線..... 19  
 図 3. 2. 1-2 重量変化試験結果..... 20

略語一覧

DLR : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
 (ドイツ航空宇宙センター)  
 BN : Boron nitride (窒化ホウ素)

## 概略

### 研究の背景

福島第一原子力発電所では炉心損傷が発生し、核燃料や被覆管、炉内構造物を含む炉心物質が熔融したと考えられる。炉心熔融物の流動は、圧力容器下部の損傷やシェルアタックに大きな影響を及ぼす。また、燃料デブリの分布状況を推定するためにも、炉心熔融物の流動挙動の解明は極めて重要な課題である。物質の流動挙動は、物性を元に計算科学的手法を用いて推定することができる。物性の中でも、粘性と表面張力が流動挙動を支配する特に重要な物性である。

炉心熔融物の中でも注目しなければならない物質は、ウラン(U)とボロン(B)である。Uが重要なのは明白であるが、Bについては化合物が非常に硬い物質であること、またその分布が再臨界に大きな影響を与えることから特に注意する必要がある。Uは核燃料  $UO_2$  として炉内に存在し、3000℃近い高温で  $ZrO_2$  と共に流動した可能性がある。一方Bは制御材  $B_4C$  として炉内に存在し、事故初期にステンレスやジルカロイと反応して液相を形成したと考えられている。しかし、これらの熔融物は極めて高温もしくは反応性が高いために、容器を用いる通常の物性測定方法では試料と容器との反応を避けるのが困難であり、物性測定が難しい。試料を浮遊させる浮遊法を用いた物性測定方法では容器との問題を解決できる可能性があるが、炉心熔融物が高い蒸気圧を有していることが制約となり、浮遊法を用いた既存の物性測定手法でも炉心熔融物の物性測定は困難である。これが、炉心熔融物の挙動を把握するうえで大きな課題となっている。

### 本研究の目的

本研究では、試料と容器との反応の問題を克服できる浮遊法をベースとし、酸化物熔融物及び金属熔融物の粘性及び表面張力測定を可能とする新しい技術を開発することを目的とする。酸化物熔融物として  $ZrO_2$ 、金属熔融物として Fe-B を模擬物質とし、これらの粘性と表面張力を測定し、この技術の有用性を示す。

### 本研究の実施内容・成果

#### (1) 酸化物試料の粘性及び表面張力評価手法開発

##### ①表面張力・粘性評価手法開発

平成30年度に作製した液滴落下装置を用い、液滴を基板に衝突させる試験を行った。衝突の瞬間及び反跳後の振動の様子をハイスピードカメラで記録し、得られた画像を解析することで、物性（粘性及び表面張力）の評価を試みた。 $Al_2O_3$  や物性既知の金属等を試料として用い、測定した物性値と文献値を比較することで、開発した物性評価手法の妥当性を検証した。

物性既知の物質として  $Al_2O_3$  を用いて液滴落下試験を行った。 $Al_2O_3$  液滴の衝突変形挙動から表面張力を、反跳後の振動の減衰から粘性を導出して文献値と比較したところ、文献値と良く一致する結果が得られた。これにより、本研究によって開発した表面張力及び粘性の評価手法の妥当性が示された。

##### ② $ZrO_2$ の測定

①で確立した手法を用い、 $ZrO_2$  の物性（粘性及び表面張力）の評価を試みた。試料として  $ZrO_2$  を用いて液滴落下試験を行った。 $ZrO_2$  液滴の衝突変形挙動から表面張力を導出することに成功し

た。温度を変化させて表面張力を測定することで、 $ZrO_2$  の表面張力の温度依存性を得た。粘性については、 $ZrO_2$  液滴の反跳後の振動の減衰から粘性を導出しようと試みたが、振動の減衰を観察する前に  $ZrO_2$  液滴が凝固してしまったために粘性の評価は不可能であった。

## (2) 金属系試料の粘性及び表面張力評価手法開発

### ① 表面酸化膜除去技術開発

Fe-B を試料として用い、ガス浮遊法を用いた浮遊熔融試験を行った。浮遊ガスとして水素を混合したガスを用いることで、試料表面の酸化膜の形成を防ぐことができるかについて検討した。

共晶組成 ( $Fe_{0.84}B_{0.16}$ ) の Fe-B 合金を試料として用い、浮遊ガスとして純 Ar と Ar に 4% の  $H_2$  を混合したガスの 2 種類のガスを用いて浮遊熔融試験を行った。その結果、純 Ar を用いた場合には B の酸化と蒸発に起因する質量減少が顕著に観察されたのに対し、 $H_2$  を混合したガスを用いた場合は質量減少が抑制される結果となった。これにより、浮遊ガスに  $H_2$  を混合させることで試料表面の酸化膜の形成を防ぐことができるという見通しが得られた。

## 次年度の見通し

### (1) 金属系試料の粘性及び表面張力評価手法開発

#### ① Fe-B 溶融合金の熱物性測定

Fe-B を試料として用い、ガス浮遊法を用いた浮遊熔融試験を行う。試料はアーク溶解法によって作製し、浮遊試験に適したサイズに切断、加工する。この試料に対し、これまでに開発した液滴落下による物性評価手法や酸化を防ぐ技術等を適用することで、Fe-B 溶融合金の密度、粘性、表面張力の評価を試みる。本事業で開発した手法により金属系試料の熱物性の評価が可能であるかを検証する。

## 1. はじめに

福島第一原子力発電所では炉心損傷が発生し、核燃料や被覆管、炉内構造物を含む炉心物質が溶融したと考えられる。炉心溶融物の流動は、圧力容器下部の損傷やシェルアタックに大きな影響を及ぼす。また、燃料デブリの分布状況を推定するためにも、炉心溶融物の流動挙動の解明は極めて重要な課題である。物質の流動挙動は、物性を元に計算科学的手法を用いて推定することができる。物性の中でも、粘性と表面張力が流動挙動を支配する特に重要な物性である。

炉心溶融物の中でも注目しなければならない物質は、ウラン(U)とボロン(B)である。Uが重要なのは明白であるが、Bについては、化合物であるボライドが硬い物質であるためにデブリ取り出し時に留意する必要があること、またその分布が再臨界に大きな影響を与えることから、特に注意する必要がある。Uは核燃料 $UO_2$ として炉内に存在し、3000℃近い高温で $ZrO_2$ と共に流動した可能性がある。一方Bは制御材 $B_4C$ として炉内に存在し、事故初期にステンレスやジルカロイと反応して液相を形成したと考えられている。この液相が凝固することで、FeやZrのボライドが生成した可能性がある。ボライドは比較的融点が高い物質であり、特にZrのボライドである $ZrB_2$ の融点は3000℃近い高温である。

以上をまとめると、炉心溶融物（酸化物溶融物である $(U, Zr)O_2$ と金属溶融物であるFe-B, Zr-B)の粘性と表面張力を評価することが重要であると言える。しかし、これらの物質は融点が極めて高いため、これらの溶融物は超高温となる。このような融体は容器と反応してしまう可能性が高いため、物性の測定が極めて困難であり、これらの物質の物性測定を可能とする新しい技術を開発する必要がある。

高温融体と容器との反応という問題は、試料を浮遊させれば解決することができる。浮遊法は主に航空宇宙分野で研究が進められており、代表的な浮遊法として静電力を利用する静電浮遊法、電磁力を利用する電磁浮遊法、ガス圧を利用するガス浮遊法が存在する。いずれの浮遊法でも、溶融した液滴試料に何らかの方法で振動を与え、その振動の共振周波数から表面張力を、振動の減衰から粘性を導出する（液滴振動法）。浮遊の原理的に、静電浮遊法と電磁浮遊法は現状では金属系試料のみしか安定して浮遊させることができない。金属系試料も酸化物試料も浮遊させることができるのは現在のところガス浮遊法のみであるため、本研究ではガス浮遊法に着目する。

ガス浮遊法はコニカルノズルから噴出させたガスによって試料を浮遊させるという簡単な浮遊法である。浮遊させた試料はレーザー加熱によって溶融させることができる。近年になって、音波によって試料に振動を与え、その振動の共振周波数から表面張力を、減衰挙動から粘性を導出する手法がDLRのグループによって開発された。

本測定の問題点は、測定に時間がかかるために試料の蒸発による組成の変化の影響が免れないという点にある。また、 $UO_2$ や $ZrO_2$ のような超高温試料ではそもそも安定して試料を浮遊させるのも難しい。さらに、表面張力の測定は粘性の測定よりもさらに時間がかかるうえに技術的に極めて困難で、現実的ではない。金属系試料は浮遊用のガスに僅かに含まれる不純物（水分等）によって試料表面に酸化膜が生成し、振動を阻害するために物性測定が困難であると考えられる。

以上、ガス浮遊法を用いて炉心溶融物( $(U, Zr)O_2$ やボライド)の物性を測定するに当たり、解決すべき課題をまとめると以下の通りとなる。

1. 安定した浮遊が困難である上に測定にある程度の時間が必要であり、試料の蒸発の影響が免れない。
2. 金属系の試料では表面に酸化膜が生じてしまい、表面張力へ影響を与えてしまう。

上記の問題点を解決するためには、1. 測定を瞬時に終わらせ、2. 表面の酸化膜を除去する技術を開発する必要がある。

研究代表者はこれまでに、英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業「Multi-physics モデリングによる Ex-Vessel 熔融物挙動理解の深化」（平成 28-30 年、代表 早稲田大学 山路哲史）において、ガス浮遊法で浮遊させた液滴を基板上に落下させ、液滴の衝突挙動を観察することで表面張力の評価が可能であることを見出している。具体的には、ガス浮遊に分割式ノズルを用い、ノズルを分割することで熔融試料を基板上に落下衝突させる。衝突挙動を高速度カメラで撮影し、衝突速度と表面積を導出する。衝突速度から運動エネルギーを計算し、

$$(\text{運動エネルギー}) = (\text{表面積の増分}) \times (\text{表面張力})$$

の関係から表面張力を導出する。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> で試したところ、文献値と良く一致する良好な結果が得られた。

本研究では、上記の手法（液滴衝突法と命名）をベースとし、表面張力のみならず粘性も同時に測定する技術と、金属系試料の表面に生成する酸化膜を除去する技術を新たに開発することを目的とする。粘性については、基板上に落下し反跳した試料の振動の減衰挙動からの導出を試みる。表面酸化膜の除去には浮遊ガスへの水素ガスの混合やパルスレーザーによる酸化膜の除去等を検討する。

## 2. 業務計画

### 2.1 全体計画

本研究の目的は、浮遊法をベースに酸化物や金属炉心熔融物の粘性や表面張力等の物性を測定できる技術を開発することである。この目的を達成するために、本研究計画は以下から構成される。

#### (1) 酸化物試料の粘性及び表面張力評価手法開発

液滴落下装置を作製し、液滴衝突挙動から粘性及び表面張力を評価する方法を開発する。物性既知の物質の物性を測定し、その妥当性を検証する。その後、ZrO<sub>2</sub> 熔融物の物性測定を行う。また、浮遊法を用いた既存の物性評価手法の炉心熔融物への適用可能性についても評価し、新たに開発した手法の位置付けを明らかにする。

#### (2) 金属系試料の粘性及び表面張力評価手法開発

表面酸化膜を除去することで、ガス浮遊法を用いて金属系の炉心熔融物の物性評価ができる技術を開発する。その技術を用いて Fe-B 系熔融物の物性測定を行う。

全ての試験及び評価は大阪大学において実施する。これらの全体計画を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 年度別全体計画

実施項目	平成30年度	令和元年度	令和2年度
(1) 酸化物試料の粘性及び表面張力評価手法開発 (大阪大学)	装置作製 液滴衝突による粘性及び表面張力評価手法の検討	表面張力・粘性評価手法開発	
(2) 金属系試料の粘性及び表面張力評価手法開発 (大阪大学)	既存の物性評価手法の炉心溶融物への適用可能性評価	ZrO <sub>2</sub> の測定 表面酸化膜除去技術開発	FeBの測定
(3) とりまとめと報告書作成 (大阪大学)			とりまとめと報告書作成
(4) 研究推進	打ち合わせ	打ち合わせ	打ち合わせ

## 2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法

本研究の目的は、浮遊法をベースに酸化物や金属炉心溶融物の粘性や表面張力等の物性を測定できる技術を開発することである。この目的を達成するために、本研究計画は以下から構成される。

### (1) 酸化物試料の粘性及び表面張力評価手法開発

#### ①表面張力・粘性評価手法開発

平成30年度に作製した液滴落下装置を用い、液滴を基板に衝突させる試験を行う。衝突の瞬間及び反跳後の振動の様子をハイスピードカメラで記録し、得られた画像を解析することで、物性（粘性及び表面張力）の評価を試みる。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> や物性既知の金属等を試料として用い、測定した物性値と文献値を比較することで、開発した物性評価手法の妥当性を検証する。

#### ②ZrO<sub>2</sub>の測定

①で確立した手法を用い、ZrO<sub>2</sub>の物性（粘性及び表面張力）の評価を試みる。

### (2) 金属系試料の粘性及び表面張力評価手法開発

#### ①表面酸化膜除去技術開発

Fe-Bを試料として用い、ガス浮遊法を用いた浮遊溶融試験を行う。浮遊ガスとして水素を混合したガスを用いることで、試料表面の酸化膜の形成を防ぐことができるかについて検討する。

### 3. 令和元年度の実施内容及び成果

#### 3.1 酸化物試料の粘性及び表面張力評価手法開発

##### 3.1.1 表面張力・粘性評価手法開発

###### (1) 装置概要

図 3. 1. 1-1 に本事業において平成 30 年度に作製した液滴落下装置とその概略図を示す。ノズルは分割可能となっており、ガス圧によって開閉を行う。閉の状態では分割ノズルは通常のコニカルノズルとして働き、試料を装荷してガス (Ar と O<sub>2</sub> の混合ガス) を流すことによって試料を浮遊させることができる。この状態で、CO<sub>2</sub> レーザー (波長 10.6 μm, 出力 100 W) を照射することにより、浮遊試料の加熱溶融を行うことができる。試料の温度は放射温度計 (IR-CAS8CNL, CHINO, 測定波長 0.9 μm) で計測を行い、Wien の法則を用いて以下のように補正を行った。

$$\frac{1}{T_{sample}} - \frac{1}{T_P} = \frac{1}{T_L} - \frac{1}{T_{L,P}} \quad (3.1.1-1)$$

ここで、 $T_{sample}$  は校正後の試料温度、 $T_P$  は校正前の試料温度、 $T_L$  は状態図における凝固点、 $T_{L,P}$  は校正前の冷却曲線から読み取れる試料の凝固点をそれぞれ示す。これは、相変態時の温度が状態図上の液相線と一致するように試料の放射率を設定したことに相当する。測定時の冷却曲線の一例を図 3. 1. 1-2 に示す。

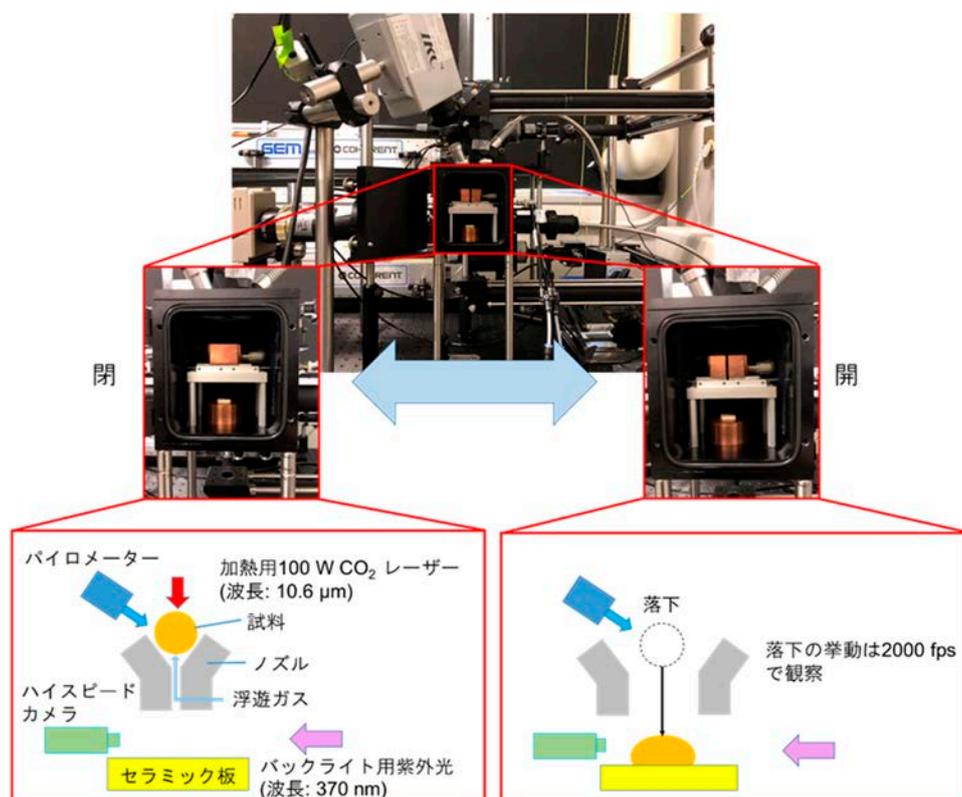


図 3. 1. 1-1 作製した液滴落下装置とその概略図

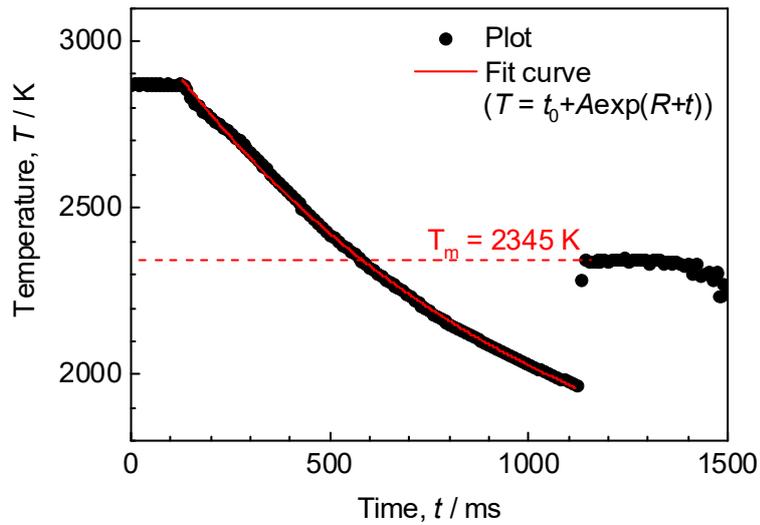


図 3. 1. 1-2 放射温度計による冷却曲線測定例

冷却曲線を確認後、再加熱して試料を溶融した後にノズルを開く。浮力を失った試料は自由落下し、下部に配置された BN 製の基板へと衝突する。この際の挙動をハイスピードカメラ (HAS-D72, 2000fps、1280×1024 pixel) で撮影し、二値化処理を施した後に表面張力の解析に必要な幾何学的値を求める。図 3. 1. 1-3 には解析の模式図を、図 3. 1. 1-4 には実際に撮影し、二値化処理を行った試料の画像を示す。試料の衝突前後での変形の様子が確認され、必要な幾何学的値も解析できていることが分かる。

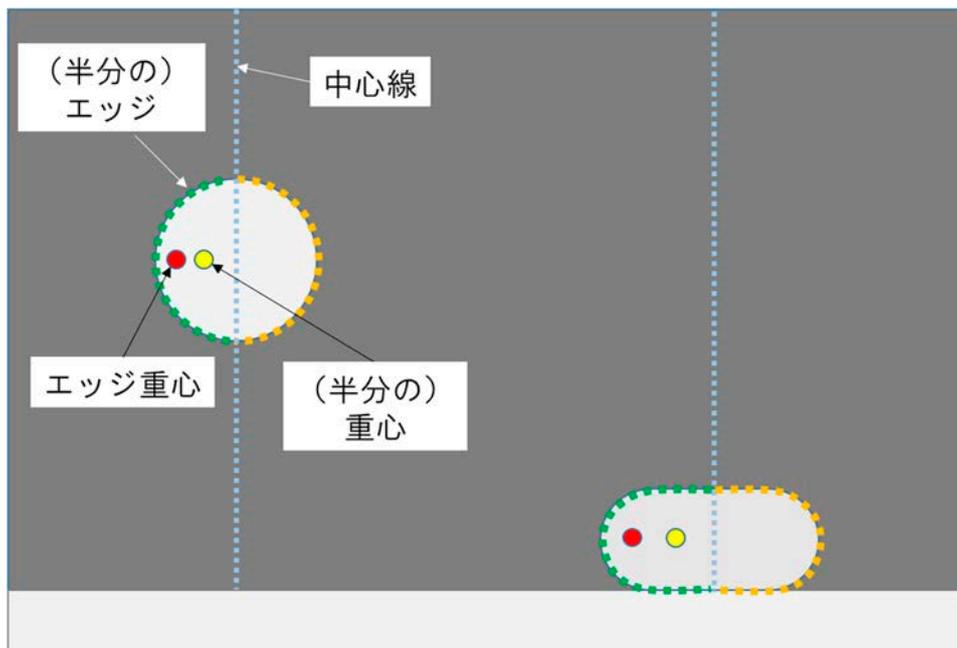


図 3. 1. 1-3 液滴衝突法解析概略図

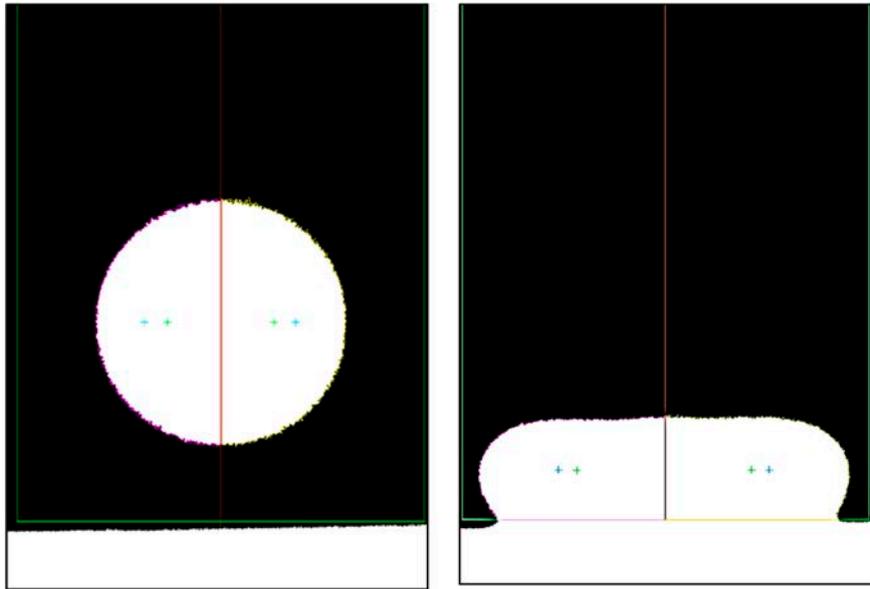


図 3.1.1-4 液滴衝突法取得画像例 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

## (2) 表面張力評価方法

得られた画像を用いて表面張力を導出する方法を述べる。液滴は基板に衝突する直前には運動エネルギー $E_m$ を有しているが、液滴が基板に衝突して変形し、静止した時点では運動エネルギーは0となる。一方、液滴は基板に衝突する直前はほぼ球形であるのに対し、衝突によって変形して表面積が増加する。液滴が衝突時に分裂しない、液滴と基板が濡れない、かつ液滴内部の対流の影響が無視できる場合、液滴が初期に有している運動エネルギー $E_m$ は、表面積増加による表面エネルギーの増分と粘性によるエネルギーの散逸の和に等しいと考えられる。変形によって増加した面積分のエネルギー増分を $E_s$ とし、散逸したエネルギーを $E_v$ とすると、上記の関係は以下の式で表される。

$$E_m = E_s + E_v \quad (3.1.1-2)$$

$E_m$ は、液滴の衝突直前の試料の速度と試料の重量から計算できる。 $E_v$ は、液滴が衝突して変形する様子が液滴の振動の一部（周期の1/4）とみなせるとして導出した。減衰振動では、1周期当たりのエネルギー減少率は減衰比 $\zeta$ を用いて $4\pi\zeta$ と表せる。すなわち、 $E_v$ を、減衰比を用いて以下の式で計算した。

$$E_v = E_m \pi \zeta \quad (3.1.1-3)$$

減衰比 $\zeta$ は減衰振動係数 $\Gamma$ と以下のような関係であることが知られている。

$$\Gamma T = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.1.1-4)$$

ここで、 $T$ は減衰振動の一周期間の時間である。減衰振動係数 $\Gamma$ と粘性 $\eta$ は次の式で表せる関係があるので、粘性から減衰振動係数を導出することができる。

$$\eta = \frac{1}{5} \rho R^2 \Gamma \quad (3.1.1-5)$$

ここで、 $R$ は試料が真球であるとみなした時の試料径である。

$E_s$  は、液滴の衝突前後の表面積の変化と表面張力  $\gamma$  から以下の式で計算できる。

$$E_s = \gamma(S_d - S_s) \quad (3.1.1-6)$$

ここで、 $S_s$ 、 $S_d$  はそれぞれ変形前、変形後の液滴の表面積である。変形前の液滴の表面積は、衝突前の液滴が楕円球で近似できるとして衝突前の液滴の画像から計算した。変形後の液滴の表面積はパップス＝ギュルダンの定理を用いることで、以下の式によって求めた。

$$S_d = 2\pi lG \quad (3.1.1-7)$$

ここで、 $l$  は側面の輪郭線長さ、 $G$  は試料の中心線から輪郭線の重心までの距離である。重心位置は画像解析により求めた。 $l$  は画像を元に試料の輪郭を多角形で近似することで求めた。

### (3) 粘性評価手法

粘性の評価方法を説明する。衝突後、反跳する試料は減衰振動をする。 $Al_2O_3$  の反跳の様子を例として図 3.1.1-5 に示す。この振動の減衰の要因は試料の粘性による内部摩擦であることから、試料反跳時の振動の減衰挙動から液滴振動法によって粘性を評価することが可能であると考えられる。

液滴振動法では、減衰振動の様子を以下の周期的な振動項（正弦波振動項）と粘性による散逸項（対数項）の積の以下のような関数でフィッティングする。

$$r_h = A \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau}\right) \sin\{2\pi\nu_R(t-t_0)\} + R_{av} \quad (3.1.1-8)$$

ここで、 $r_h$  は試料の水平または鉛直方向の径、 $t$  は時間、 $\tau$  は減衰振動係数、 $\nu_R$  は共振周波数、 $A$ 、 $t_1$ 、 $t_0$ 、 $R_{av}$  はフィッティングパラメータである。このうち、フィッティングによって得られた  $\tau$  を用いて、粘性は以下のように導出することができる。

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau} \quad (3.1.1-9)$$

上式において、 $\rho$  は試料密度、 $r_0$  は試料を真球状としたときの半径である（密度ならびに試料の質量から決定できる）。

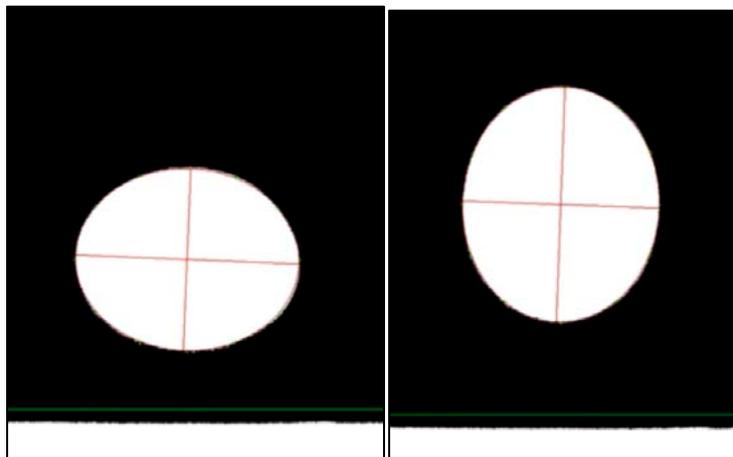


図 3.1.1-5 反跳後の試料の振動 ( $Al_2O_3$ )

(4) 溶融  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の表面張力評価結果

液滴落下装置を用いて  $\text{Al}_2\text{O}_3$  液滴を基板に衝突させる試験を行った。その結果から求めた  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の表面張力の温度依存性を文献値と併せて図 3.1.1-6 に示す。本手法で評価した  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の表面張力は 0.7 N/m 程度で、温度に対する大きな依存性は確認されなかった。多くの液体の表面張力は温度に対して線形に変化することが知られている。図中に赤色の実線で線形フィットの結果を示しているが、比較的良くフィッティングできていることが分かる。

図中に示す通り、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  の表面張力はこれまでにガス浮遊法 [1] [2] や液滴法 [3]、最大泡圧法 [4] 等の様々な手法で評価されている。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  は高融点物質であるため表面張力の測定が技術的に困難であり、文献値はばらつきが大きい。文献値の中でも最も確からしいのは、容器の影響を排除できる浮遊法による測定結果に対して Sum rule を用いた補正解析を行ったもの [1] であると考えられる。本研究による表面張力測定結果はこの文献値と近い値を示していることから、本研究で開発した液滴衝突による表面張力手法の妥当性が示されたと言える。

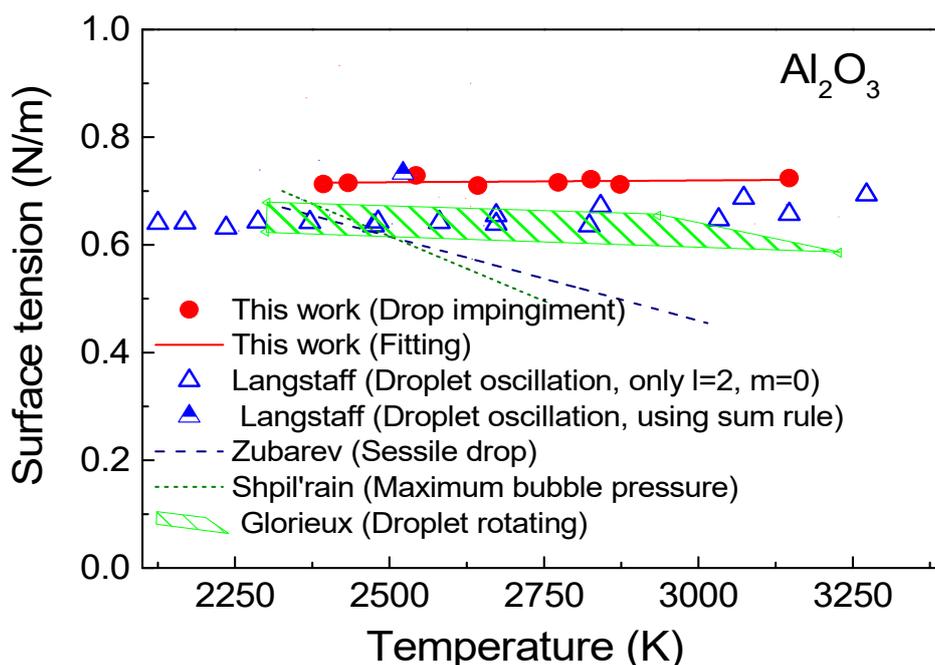


図 3.1.1-6 液滴衝突法によって評価した  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の表面張力と文献値 [1] [2] [3] [4]  
 (T. Kondo, H. Muta and Y. Ohishi, “Development of a new method to measure surface tension of molten oxides”, High Temperatures-High Pressures より許可を得て転載)

液滴衝突時の液滴の変形挙動から表面張力を導出する際に、液滴の変形が大きすぎると液滴の分裂により表面張力の導出が困難になる、もしくは図 3.1.1-7 に示すような水平方

向からは観察不可能な変形が生じ、表面張力の導出結果が影響を受けてしまうと考えられる。そこで、変形が過剰であるか否かについて Weber 数により検討した。Weber 数は以下のように表される [5]。

$$We = \frac{\rho L v^2}{\gamma} \quad (3.1.1-10)$$

ここで、 $We$  は Weber 数、 $\rho$  は密度 [kg/m<sup>3</sup>]、 $L$  は代表長さ (液滴直径) [m]、 $v$  は衝突速度 [m/s]、 $\gamma$  は表面張力 [N/m] である。Weber 数が大きいほど変形は大きくなる。

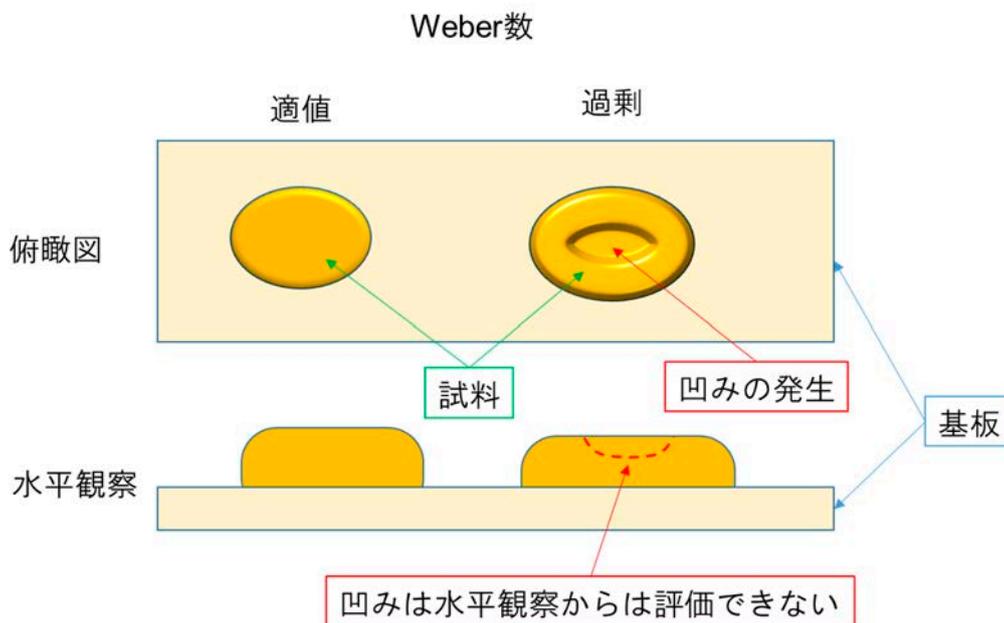


図 3.1.1-7 Weber 数と変形

表面張力を測定した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 液滴の衝突試験について、それぞれの試料の大きさ、落下距離、得られた表面張力から Weber 数と表面張力測定結果の関係をまとめると図 3.1.1-8 のようになる。今回の測定において、表面張力の値は Weber 数の値によらずほぼ一定値となっていることから、試験条件内では試料の過剰な変形は起きていないと考えられる。

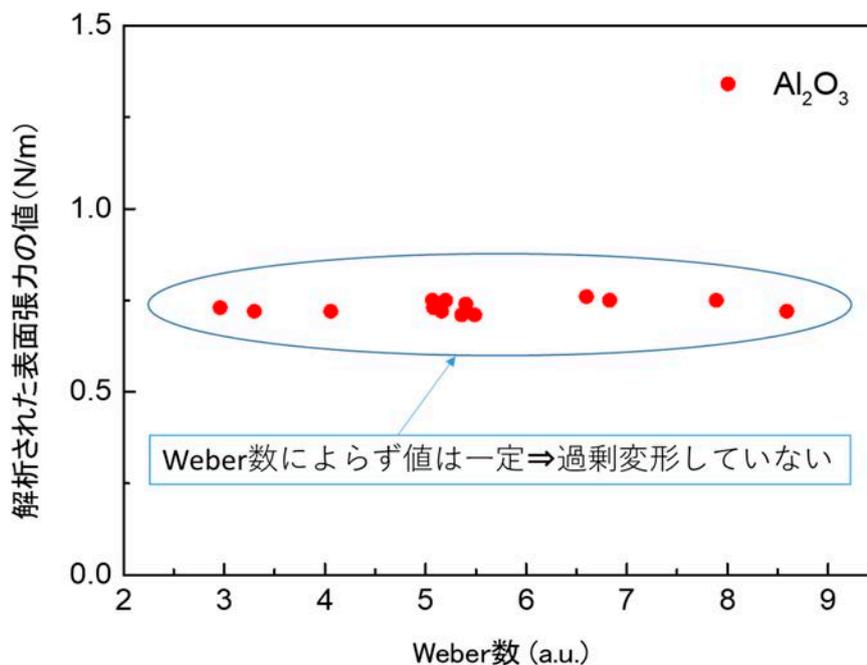


図 3. 1. 1-8 熔融 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の液滴落下試験における Weber 数と表面張力解析の関係

液滴衝突法を他の物質に適用するに当たり過剰変形が問題となり得るかについての知見を得るために、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と他の物質の Weber 数を比較した。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> については、試料直径 2.0 mm、衝突速度 1.0 m/s の条件で Weber 数を算出した。これは、本研究で実施した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の液滴衝突試験において最大の Weber 数となったときの条件に相当する。また、比較のために融体の密度ならびに表面張力が既知である熔融 Au、熔融 Pt、熔融 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> についてもそれぞれ Weber 数を計算し、以下の表 3. 1. 1-1 にまとめて示す。なお、密度と表面張力の値は表中に示すように Langstaff[1]、Gale[6]、Yu[7]の値を用いた。

表 3. 1. 1-1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Au, Pt 及び B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の Weber 数 (直径 2.0 mm, 衝突速度 1.0 m/s)

	Au (Gale)	Pt (Gale)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Langstaffのデータ使用)	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Yu)
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	17360	18910	2900	1500
長さ (直径) (m)	0.002	0.002	0.002	0.002
落下速度 (m/s)	1.0	1.0	1.0	1.0
表面張力 (N/m)	1.17	1.8	0.64	1
<b>Weber 数</b>	<b>29.68</b>	<b>21.01</b>	<b>9.06</b>	<b>3</b>

表 3.1.1-1 より、熔融酸化物 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{B}_2\text{O}_3$ ) は比較的小さい Weber 数となり、熔融金属 (Au、Pt) はこれより数倍大きな値となった。Weber 数の大きい Au で液滴衝突試験を行った (試験条件：直径約 1.5mm、衝突速度約 0.8 mm、Weber 数=約 14.2) ところ、図 3.1.1-9 に示すように大きな変形と、衝突時の試料の分裂が観察された。このことから、確かに Weber 数が大き過ぎると液滴衝突法の適用が難しくなることが分かる。酸化物の Weber 数が比較的小さい傾向にあるのは、原子量の小さな酸素が加わっていることにより酸化物の密度が金属に比べて小さくなっていることに起因すると考えられるので、熔融  $\text{ZrO}_2$  についても本手法で測定できる可能性は十分にある。

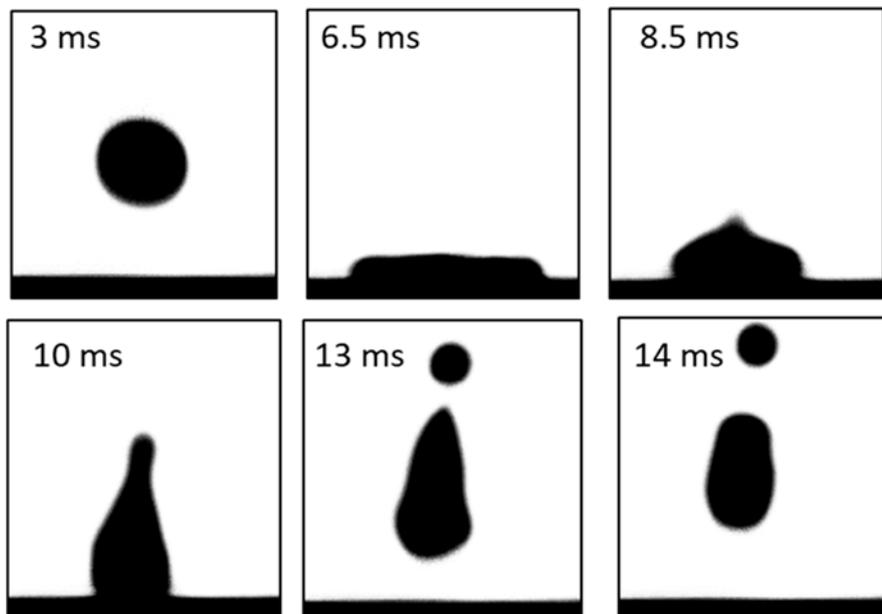


図 3.1.1-9 熔融 Au の液滴落下試験結果

#### (5) 熔融 $\text{Al}_2\text{O}_3$ の粘性評価結果

熔融  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の液滴落下試験を行い、反跳して振動している  $\text{Al}_2\text{O}_3$  液滴の水平方向長さの時間変化を図 3.1.1-10 に示すようにプロットしたところ、減衰振動のデータが得られた。この実験データを式 (3.1.1-8) で表される減衰振動曲線でフィッティングした結果、実験データと良く一致するフィッティング曲線が得られた。なお、1 衝突目は反跳後速度が速すぎて減衰振動を観測するには点数が足らなかったため、2 衝突目のデータを用いている。この時の温度は放射温度計で観測した落下直前の試料温度ならびに冷却曲線と、落下開始から 2 衝突目が起こるまでの時間から計算した。計測時間内に生じる温度変化は図中に示す通り数十 K 程度である。

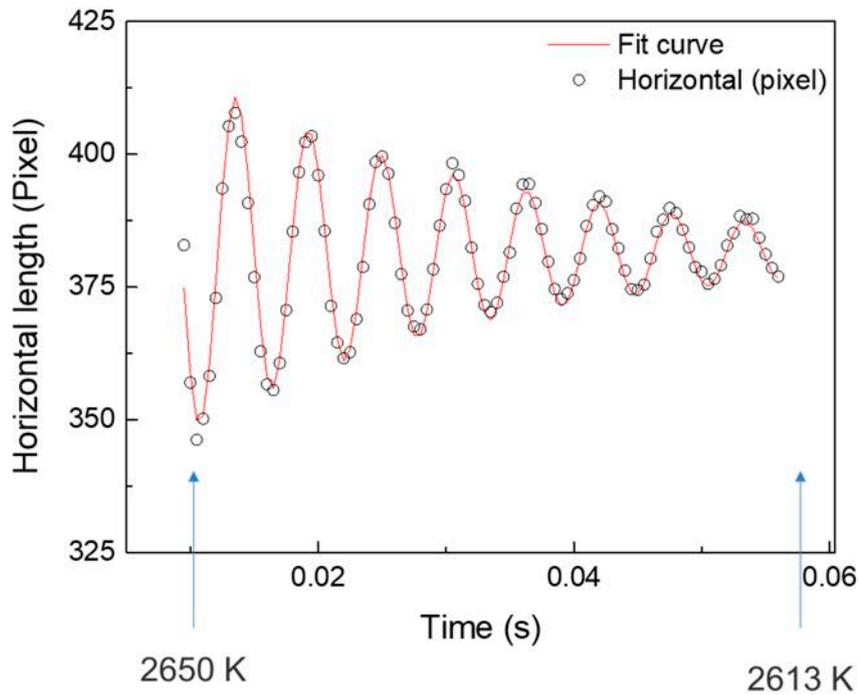


図 3.1.1-10 反跳後の減衰振動 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

フィッティングによって求めた減衰振動係数より液滴振動法によって粘性を計算したところ、図 3.1.1-11 に示すような結果が得られた。温度については計測開始時の計算値を用いたが、先に述べた通り測定中に数十 K の温度変化があったと思われる。液滴衝突法による粘性評価結果は、ガス浮遊法を用いて測定された  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の粘性の文献値と良く一致していることが分かる。この結果より、本研究によって開発した液滴衝突による粘性評価手法の妥当性が示された。

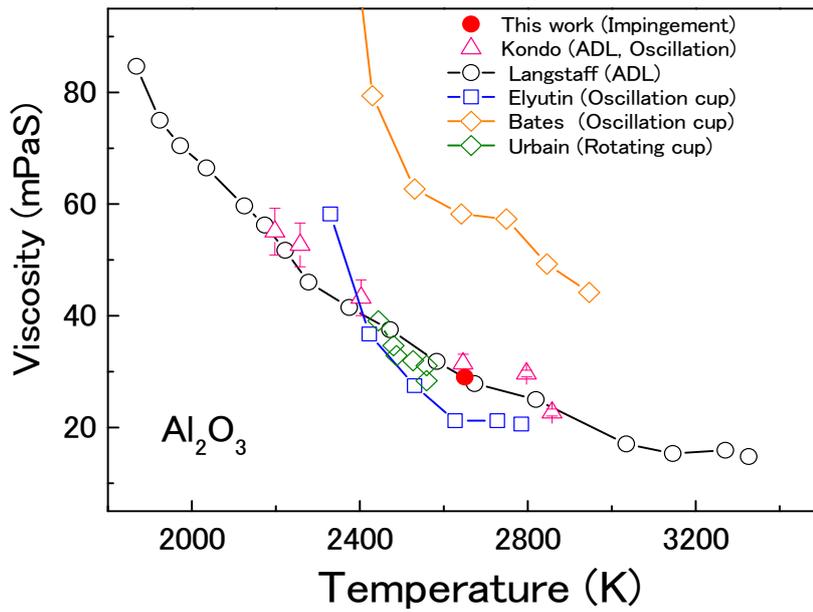


図 3. 1. 1-11 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の粘性評価結果 [1][8][9][10]

### 3. 1. 2 ZrO<sub>2</sub> の測定

#### (1) 落下衝突試験結果

溶融 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を用いて確立した液滴衝突法により、溶融 ZrO<sub>2</sub> の粘性及び表面張力の評価を試みた。図 3. 1. 2-1 に溶融 ZrO<sub>2</sub> 液滴を BN 基板に衝突させた際の反跳挙動を示す。ZrO<sub>2</sub> 液滴が変形・反跳する様子が観察されている。

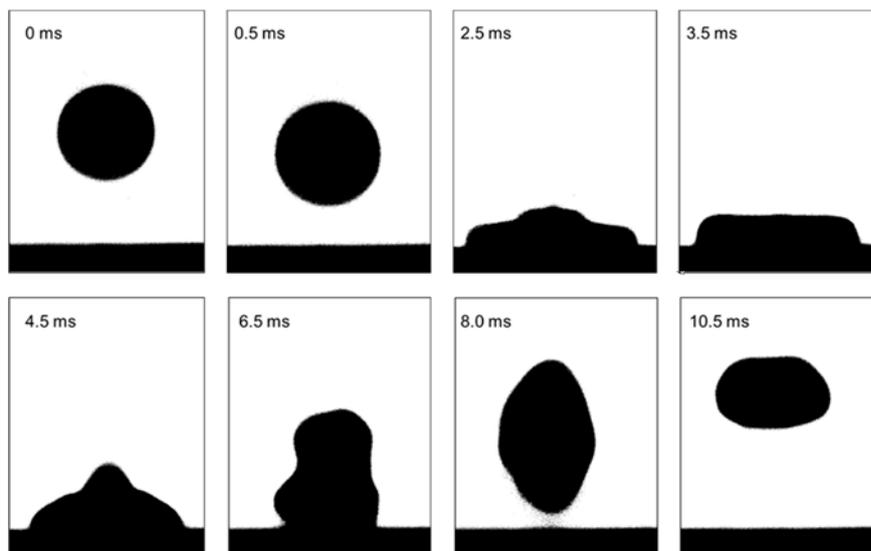


図 3. 1. 2-1 溶融 ZrO<sub>2</sub> の BN 板への衝突反跳

(T. kondo, H. Muta and Y. Ohishi, “Droplet impingement method to measure the surface tension of molten zirconium oxide”, Journal of Nuclear Science and Technology, 04 Mar 2020 より Taylor & Francis 社の許可を得て転載)

(2)  $ZrO_2$  の表面張力評価

衝突変形の様子を解析すると図 3.1.2-2 のようになり、表面張力評価に必要な各値を得ることができる結果が得られた。そこで  $Al_2O_3$  と同様にして液滴の変形挙動から表面張力を導出した結果を図 3.1.2-3 に示す。この図より、熔融  $ZrO_2$  の表面張力はおよそ 0.9 N/m であることが分かる。

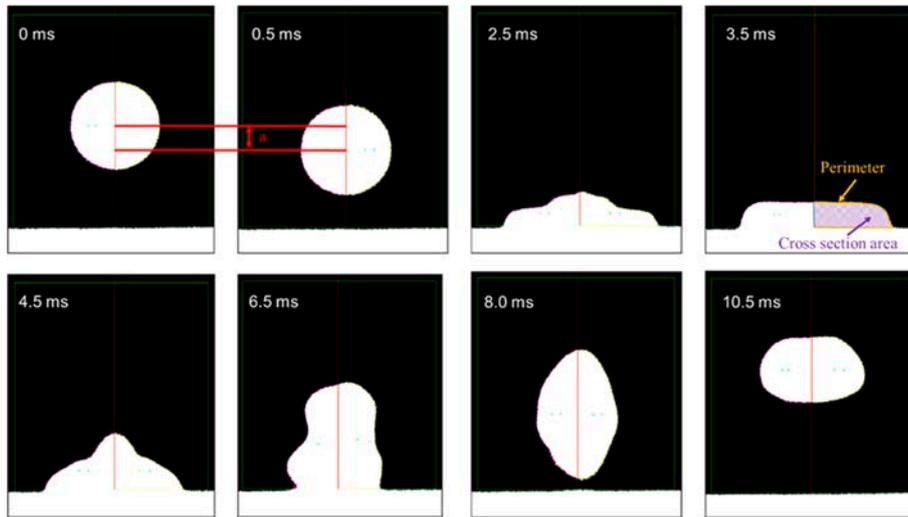


図 3.1.2-2 熔融  $ZrO_2$  の BN 板への衝突反跳解析

(T. kondo, H. Muta and Y. Ohishi, “Droplet impingement method to measure the surface tension of molten zirconium oxide”, Journal of Nuclear Science and Technology, 04 Mar 2020 より Taylor & Francis 社の許可を得て転載)

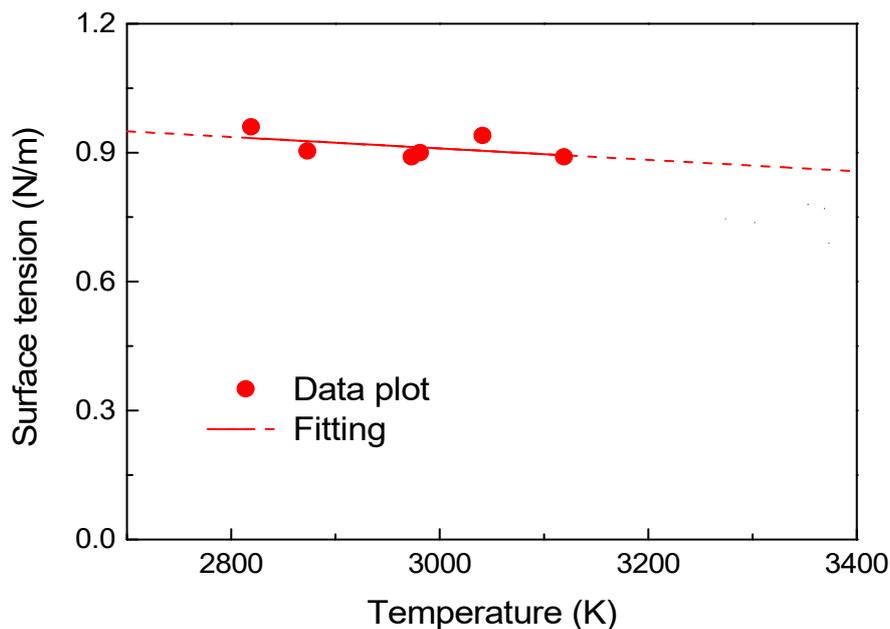


図 3.1.2-3 熔融  $ZrO_2$  の表面張力評価

また、ZrO<sub>2</sub>液滴が過剰に変形していないかを確認するため、熔融 ZrO<sub>2</sub>の液滴衝突試験について Weber 数の導出を行った。Weber 数と表面張力の関係を図 3.1.2-4 に示す。ZrO<sub>2</sub>の Weber 数は6~9であり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とほぼ同程度の値であることから過剰変形は生じておらず、妥当な評価が行えていたと考えられる。

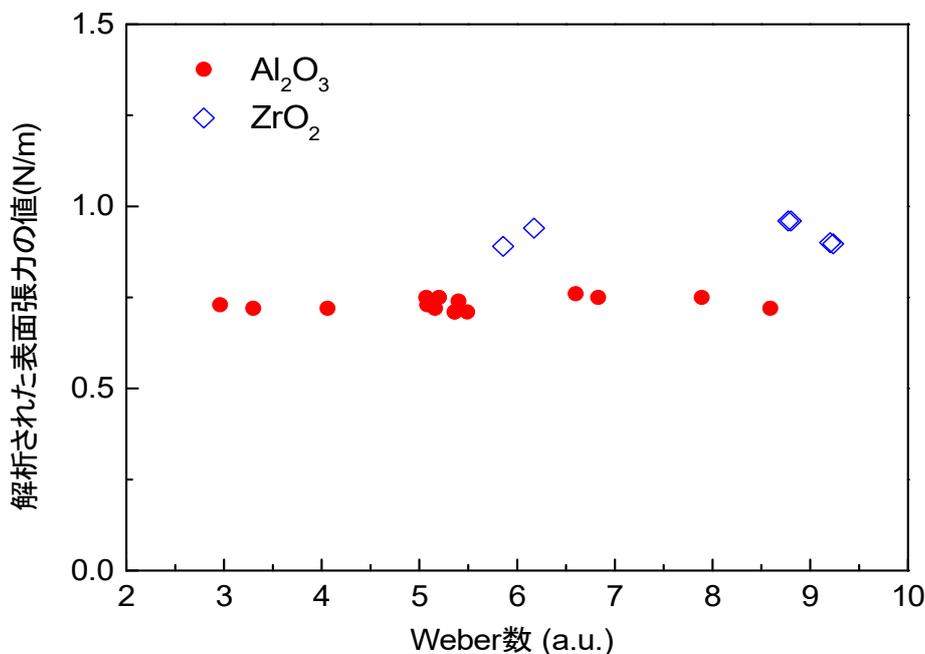


図 3.1.2-4 熔融 ZrO<sub>2</sub>と熔融 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の液滴落下試験における Weber 数と表面張力の関係

### (3) Zr-0 合金の表面張力評価

液滴衝突法によって評価した ZrO<sub>2</sub>の表面張力の妥当性を検証するために、実績の豊富な手法である静電浮遊法を用いた表面張力の評価を行った。静電浮遊法は通常真空雰囲気中で試料を浮遊及び加熱するため、金属は問題ないものの酸化物は還元してしまい浮遊が困難となる。そこで、静電浮遊実験は ZrO<sub>2</sub>ではなく Zr-0 合金を用いて行った。

試験に用いた静電浮遊炉の外観図と装置構成の概略図を図 3.1.2-5 に示す。静電浮遊法では上下の電極に電圧を印加し、強い静電場を発生させる。これにより、僅かに帯電した試料がクーロン力により浮遊する[11]。試料はレーザーにより加熱熔融される。その後、電極に与えるパルス電圧を与えることで振動を励起し、共振周波数から次式を用いて表面張力を算出する。

$$\gamma = \frac{3}{l(l-1)(l+2)} \nu_R^2 M \quad (3.1.2-1)$$

ここで  $M$ は試料の質量であり、 $\nu_R$ は共振周波数である。また、 $l$ は振動モードの次数であり、 $l = 2$ の振動を励起させる。ガス浮遊法では、共振周波数は重力の影響で分裂するために補正計算を行う必要があるが、静電浮遊法は浮遊試料が真球に近い形となるため、

共振周波数が分裂しない。そのため、試料の振動から比較的簡単に表面張力を求めることができる。

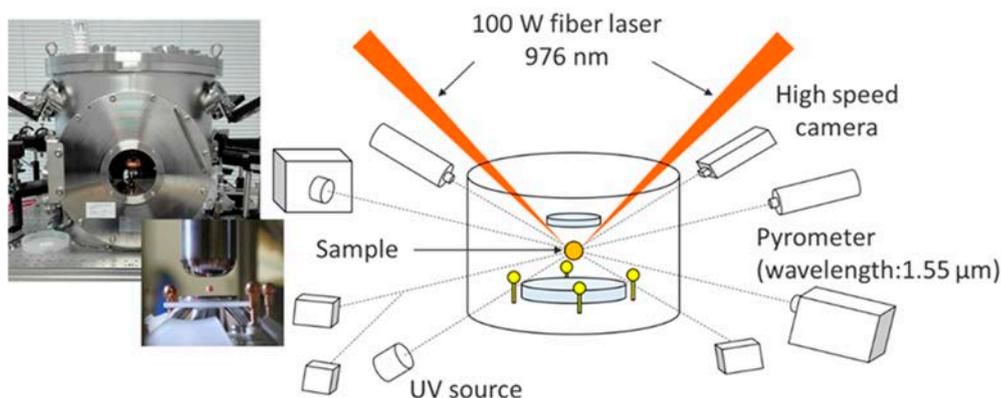


図 3.1.2-5 試験に用いた静電浮遊装置の外観図と装置構成

試料の組成は  $Zr_{1-x}O_x$  ( $x = 0, 0.1, 0.2$ ) とした。Zr と  $ZrO_2$  を所定の組成となるように秤量し、アーク溶解法によってインゴット状の合金とした。その後  $x = 0.1$  の試料は 1473 K で、 $x = 0.2$  の試料は 1673 K で、それぞれ 24 時間真空雰囲気中で熱処理し、均質化した。均質化処理後のインゴットを 15-25mg 程度の大きさになるように切断し、静電浮遊試験を行った。静電浮遊試験後の試料の酸素組成は酸化重量法によって評価した結果、 $x = 0.1$  の試料の酸素組成  $x$  は 0.09 に、 $x = 0.2$  の試料の酸素組成  $x$  は 0.19 となっており、試料は僅かに還元していた。

静電浮遊法によって測定した Zr-0 合金の表面張力測定結果を、Zr と  $ZrO_2$  の文献値と共に図 3.1.2-6 に示す。各組成で複数回の測定を行ったが、還元を防ぐために測定温度は液相線温度直上のみとした。そのため、 $x = 0.1, 0.2$  の組成については温度依存性の評価はできなかった。一般的に熔融物の表面張力は温度に対して線形に変化することが知られている。Zr,  $ZrO_2$  の表面張力も温度に対して線形に変化しており、その傾きはほぼ同じである。そこで、Zr-0 合金も温度に対して同様に変化すると仮定し、傾きが Zr,  $ZrO_2$  と同じで Zr-0 合金の測定点を通る直線を図中に示している。

このように Zr-0 の測定点に対して引いた直線と、Zr,  $ZrO_2$  の表面張力の線形外挿線を用い、2988 K における表面張力を組成に対してプロットした結果を図 3.1.2-7 に示す。Zr に酸素が加わるほどに、表面張力が低下していく挙動が確認できる。また、Fe-0 や Ag-0 のような金属-酸素合金の表面張力の酸素量依存性については、以下のような式で与えられるとされている [12] [13]。

$$\gamma^{Metal-Oxy} = \gamma^{Pure} - RT \times \Gamma^0 \ln(1 + K \times a_o) \cdot 10^{-3} \quad (3.1.2-2)$$

ここで、 $\gamma^{Metal-Oxy}$  は金属-酸化物混合融体の表面張力、 $\gamma^{Pure}$  は純金属の表面張力、 $R$  は気体定数、 $\Gamma^0$  は過剰表面吸着量、 $K$  は融体に対する酸素吸着の反応定数、 $a_o$  は酸素の活量である。今回の結果を (3.1.2-2) 式でフィッティングした結果を図 3.1.2-7 中に点線で

示す。なお、活量は酸素組成比とし、現在の知見で求めることが困難な  $\Gamma^0$  ならびに  $K$  はフィッティングパラメータとしている。結果として、表面張力の酸素量依存性は (3.1.2-2) の式で良くフィッティングでき、以下のようなになる。

$$\gamma^{Zr-Oxy} = 1.38 - 116.1 \times \ln(1 + 93.8x) \quad (3.1.2-3)$$

すなわち、Zr-O 合金の表面張力は Fe-O や Ag-O といった典型的な金属-酸素合金の酸素量依存式と同型で表されると判明した。

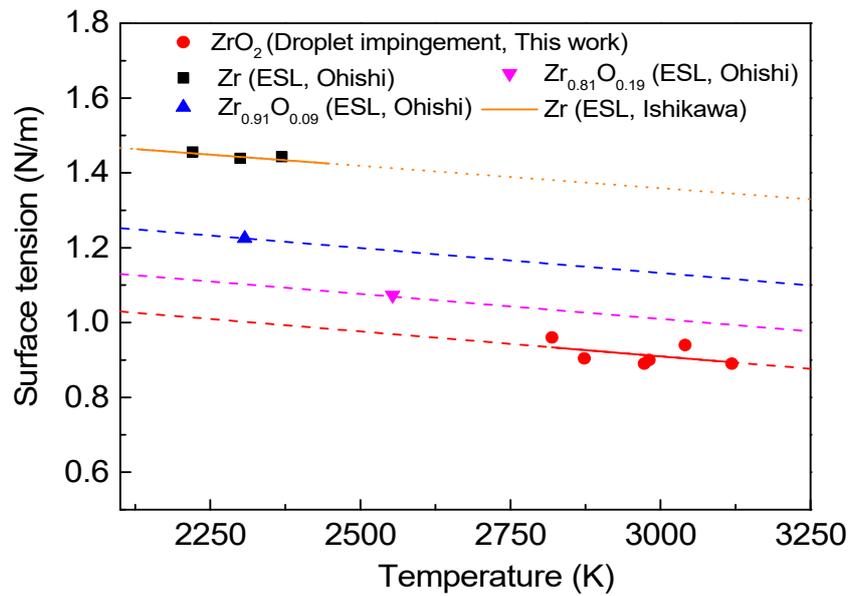


図 3.1.2-6 熔融 Zr-O の表面張力温度依存性 [14][15]

(T. kondo, H. Muta and Y. Ohishi, “Droplet impingement method to measure the surface tension of molten zirconium oxide”, Journal of Nuclear Science and Technology, 04 Mar 2020 より Taylor & Francis 社の許可を得て転載)

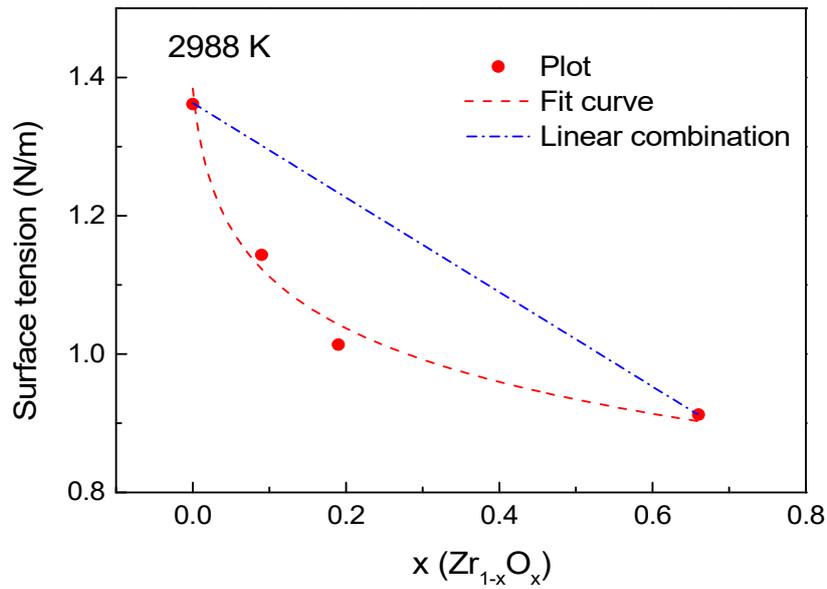


図 3.1.2-7 熔融 Zr-O の表面張力組成依存性

(T. kondo, H. Muta and Y. Ohishi, “Droplet impingement method to measure the surface tension of molten zirconium oxide”, Journal of Nuclear Science and Technology, 04 Mar 2020 より Taylor & Francis 社の許可を得て転載)

#### (4) ZrO<sub>2</sub> の粘性評価

熔融 ZrO<sub>2</sub> の液滴衝突試験結果から Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と同様に粘性の評価を試みたが、反跳後のスピードが速く、粘性測定に必要な減衰振動を十分に観測することができなかった。また、2 衝突目時には ZrO<sub>2</sub> は凝固してしまっていたため、2 衝突目の結果を用いた解析も不可能であった。

## 3.2 金属系試料の粘性及び表面張力評価開発手法

### 3.2.1 表面酸化膜除去技術開発

#### (1) 試験概要

本研究で開発している液滴衝突法では、ガス浮遊法で試料を浮遊させてレーザー加熱により液滴とする。液滴衝突法を金属系の試料に適用するに当たり、ガス浮遊中に試料が酸化すると測定が困難になる。そこで、酸化を防ぐために浮遊ガスに水素を混合し、Fe-B 試料を用いて試料の酸化を防ぐことができるかを検討した。

図 3.2.1-1 に、Fe ならびに B とその酸化物の蒸気圧曲線を、熱力学平衡計算ソフトウェア FactSage に付属のデータベース Fact53 を用いて計算した結果を示す。図より、Fe-B 系では、 $B_2O_3$  の蒸気圧が一番高く蒸発しやすいことが分かる。このことから、Fe-B 系の熔融物の測定中に試料が酸化すると、 $B_2O_3$  の蒸発によって試料の重量が減少すると予想される。そこで、Fe-B 熔融試料を Ar、Ar+ $H_2$  ガス流下で浮遊保持を行い、蒸発による質量変化量を比較した。

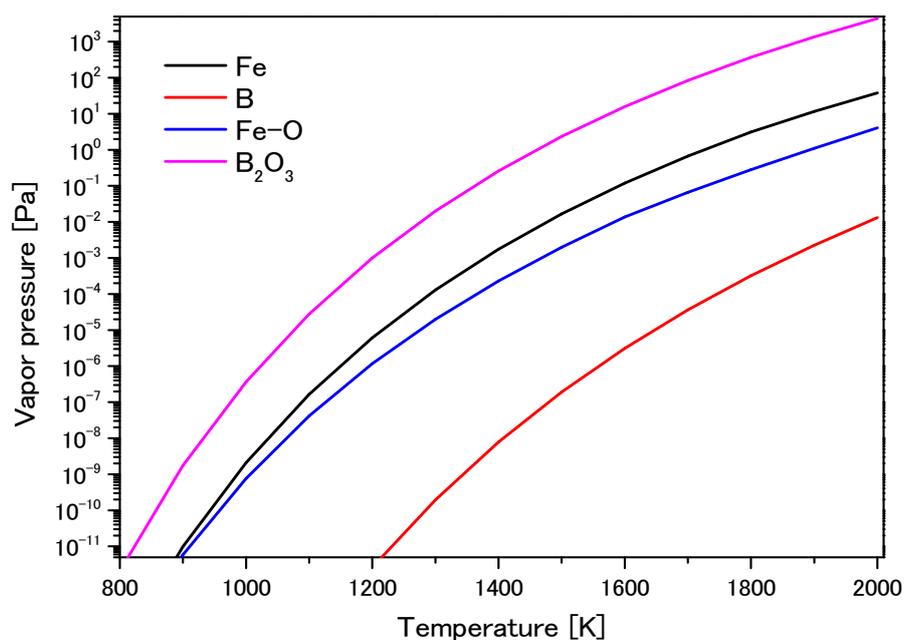


図 3.2.1-1 Fe, B, ならびにその酸化物の蒸気圧曲線 [16]

## (2) 試験方法

Fe-B 合金 (Fe:B = 84:16 (at. %)) のインゴットをアーク溶解法で作製し、球形時の直径が 2mm 以下となるようなサイズに切り出した試料をコニカルノズル内に装荷し、Ar と 4% $H_2$ -Ar を用いて浮遊させた。この試料に  $CO_2$  レーザーを照射して熔融させた。熔融したか否かはパイロメータならびに CCD カメラ観察により判定した。熔融状態で試料を 1 分程度保持し、冷却後試料の質量を測定することで、試験前後の試料の重量変化を調べた。

## (3) 試験結果

図 3. 2. 1-2 に、Ar と 4% $H_2$ -Ar を用いた場合の試料の重量変化試験の結果を示す。Ar ガスよりも還元性の強い 4% $H_2$ -Ar では試料重量の減少が少ないことが分かる。これは、4% $H_2$ -Ar では試料が殆ど酸化しなかったのに対し、Ar では  $B_2O_3$  が酸化して蒸発したためであると考えられる。これにより、浮遊ガスに水素を混合させることで金属系試料の表面の酸化膜の形成を防ぐことができるという見通しが得られた。

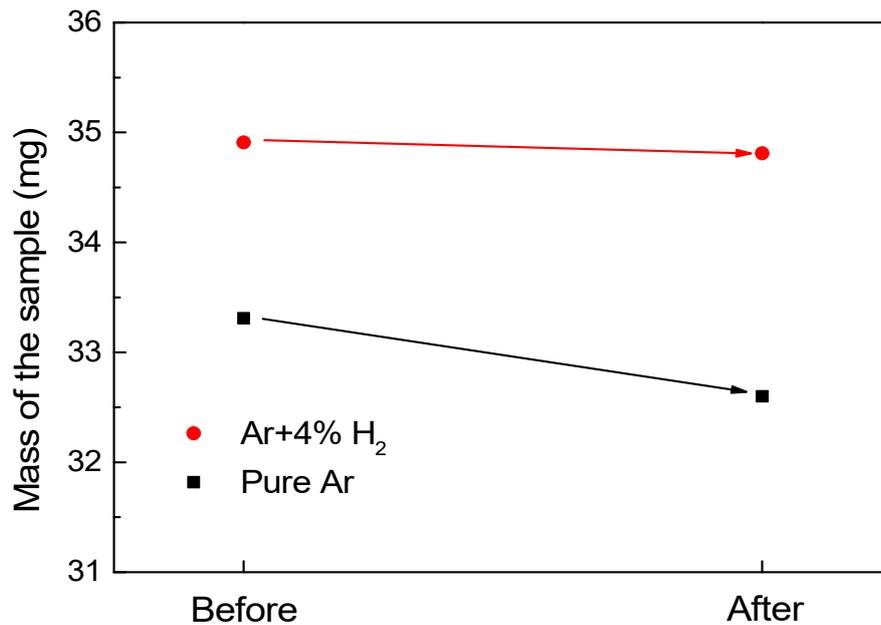


図 3. 2. 1-2 重量変化試験結果

#### (4) 液滴落下装置の改良指針

液滴落下法を金属系試料にも適用するにあたり、試料の酸化については浮遊ガスに水素を混合させることで解決できる見通しが得られた。今後は浮遊ガス中の水素の濃度や装置の密閉性等を調整し、測定対象試料の酸化を防ぐことができる条件を探る必要があると考えられる。

また、金属は酸化物よりも密度が高い傾向にあるため、Weber 数も大きくなる傾向がある。Weber 数が大きくなると過剰変形してしまう可能性が高くなるため、Weber 数をできるだけ小さくする必要がありと考えられる。これは試料の衝突速度を小さくすること、すなわち試料の落下距離を小さくすることで達成される。現状の装置構成では分割ノズル下端から衝突用の基板までの距離は最低でも数 cm 程度なので、ノズル下端から基板までの距離をより短くできるように装置構成を変更する必要があると考えられる。

ノズル下端から基板までの距離を短くできれば、液滴衝突法による粘性評価がより容易になるという別の利点もある。今年度の研究では液滴衝突法によって  $\text{Al}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZrO}_2$  の表面張力の測定に成功したが、粘性については  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の測定には成功したものの  $\text{ZrO}_2$  の測定には失敗した。原因は、熔融  $\text{ZrO}_2$  が反跳の途中で凝固してしまい減衰振動を観察できなかったためである。もし試料の落下距離を短くできれば、反跳中の熔融  $\text{ZrO}_2$  が凝固する前に減衰振動を観察することが可能になると思われる。

衝突用の基板については、今年度の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  と  $\text{ZrO}_2$  の試験では BN 製のものを用いた。BN 製の基板は  $\text{Al}_2\text{O}_3$  や  $\text{ZrO}_2$  とは濡れなかったため、衝突後の反跳を確認することができた。しかし、液滴衝突法を金属系試料に適用する場合は、測定対象試料と濡れない物質を基板として用いる必要がある。BN は化学的に安定で濡れにくいことが知られているが、他には化学的に安定で金属イオンのイオン半径が比較的小さい  $\text{MgO}$  のような酸化物[17]も選択肢になり得ると考えられる。BN や酸化物を基板として使い、液滴落下試験を実施して濡れるか否かを画像から判断することで、測定対象試料に対して基板として適切な物質を選択する必要がある。

### 3.3 研究推進

本研究を推進するにあたり、CLADS との連携を密にして研究を進めた。2020 年 2 月 12 日に大阪大学吹田キャンパスにおいて CLADS の担当者とミーティングを行い、研究の進捗状況を報告すると共に今後の研究方針や研究ニーズについての助言をいただいた。また、本研究を推進するに当たり、表 3.2.1-1 に示す通り研究実施計画を推進するための打合せを月に 1、2 回程度の頻度で定期的実施した。

表 3.2.1-1 打ち合わせ日程と内容

日付	内容
2019/7/16, 7/25	研究計画及び装置作製についての確認
2019/9/4	装置の調整についての議論
2019/10/2, 10/9	実験経過報告
2019/10/30, 11/13	粘性解析について議論
2019/11/29, 12/18	試験成果とりまとめ
2020/1/8	Fe-B 試験検討
2020/1/27	Fe-B 試験成果報告
2020/2/14, 2/29	全体の試験結果とりまとめ
2020/3/5, 3/12	報告書作成内容検討
2020/3/27	報告書最終確認

#### 4. 結言

本研究では、炉心溶融物の流動挙動の解明に資するために、浮遊法をベースに酸化物や金属炉心溶融物の粘性や表面張力等の物性を測定できる技術を開発することを目的としている。以下に、3カ年計画の2年目である本年の業務の実績を述べる。

##### (1) 酸化物試料の粘性及び表面張力評価手法開発

###### ①表面張力・粘性評価手法開発

平成30年度に作製した液滴落下装置を用い、液滴を基板に衝突させる試験を行った。衝突の瞬間及び反跳後の振動の様子をハイスピードカメラで記録し、得られた画像を解析することで、物性（粘性及び表面張力）の評価を試みた。 $Al_2O_3$  や物性既知の金属等を試料として用い、測定した物性値と文献値を比較することで、開発した物性評価手法の妥当性を検証した。

物性既知の物質として  $Al_2O_3$  を用いて液滴落下試験を行った。 $Al_2O_3$  液滴の衝突変形挙動から表面張力を、反跳後の振動の減衰から粘性を導出して文献値と比較したところ、文献値と良く一致する結果が得られた。これにより、本研究によって開発した表面張力及び粘性の評価手法の妥当性が示された。

###### ② $ZrO_2$ の測定

①で確立した手法を用い、 $ZrO_2$  の物性（粘性及び表面張力）の評価を試みた。試料として  $ZrO_2$  を用いて液滴落下試験を行った。その結果、 $ZrO_2$  液滴の衝突変形挙動から表面張力を導出することに成功した。温度を変化させて表面張力を測定することで、 $ZrO_2$  の表面張力の温度依存性を得た。粘性については、 $ZrO_2$  液滴の反跳後の振動の減衰から粘性を導出しようと試みたが、振動の減衰を観察する前に  $ZrO_2$  液滴が凝固してしまったために粘性の評価は不可能であった。

##### (2) 金属系試料の粘性及び表面張力評価手法開発

###### ①表面酸化膜除去技術開発

Fe-B を試料として用い、ガス浮遊法を用いた浮遊溶融試験を行った。浮遊ガスとして水素を混合したガスを用いることで、試料表面の酸化膜の形成を防ぐことができるかについて検討した。試験は共晶組成 ( $Fe_{0.84}B_{0.16}$ ) の Fe-B 合金を用いて行った。浮遊ガスとして純 Ar と、Ar に 4% の  $H_2$  を混合した還元性の強いガスの2種類のガスを用いて浮遊溶融試験を行った。その結果、純 Ar を用いた場合では試料中の B の酸化と蒸発に起因する質量減少が顕著に観察されたのに対し、 $H_2$  を混合した還元性の強いガスを用いた場合は質量減少が抑制される結果となった。これにより、浮遊ガスに  $H_2$  を混合させることで試料表面の酸化膜の形成を防ぐことができるという見通しが得られた。

##### (3) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして、研究を進めた。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催した。

## 参考文献

- [1] D. Langstaff, M. Gunn, G. N. Greaves, A. Marsing and F. Kargl, “Aerodynamic levitator furnace for measuring thermophysical properties of refractory liquids”, *Review of Scientific Instruments*, 84, 124901, 2013.
- [2] B. Glorieux, M. L. Saboungi, F. Millot, J. Enderby and J. C. Rifflet, “Aerodynamic levitation: An approach to microgravity”, *AIP Conf. Proc.*, 552, 316, 2001.
- [3] Y. V. Zubarev, V. I. Kostikov, B. S. Mitin, Y. A. Nagibin and V. V. Nischeta, “Certain Properties of Molten (Liquid) Aluminums Oxide”, *Izv. Akad. Nauk SSSR Neorg. Mat.*, 5, 1563, 1968.
- [4] E. E. Shpil’rain, K. A. Yakimovich and A. F. Tsitsarkin, “Experimental Study of the Density of Liquid Alumina Up to 2750 C”, *High Temp. High Press.*, 5, 191, 1973.
- [5] 田中義人, 鷺尾裕一, 吉野正人, 平田哲夫, “ウェーバー数の違いによる固体表面における液滴の動的挙動解析”, *JASCOME*, 8, 65, 2008.
- [6] W. F. Gale and T. C. Totemeier, *Smithells Metals Reference Book*, 8th ed. Netherland: Elsevier Inc., 2004.
- [7] Z. Yu and K. Mukai, “Measurement of Surface Tension and Density of Liquid Oxides from Meniscus Shape”, *J. Japan Inst. Met.*, 59, 8, 806, 1995.
- [8] V. P. Elyutin, B. C. Mitin, and Y. A. Nagibin, “Properties of liquid aluminum oxide”, *Fiz. Aerodispersnik. Sisk.*, 7, 104, 1972.
- [9] J. L. Bates, C. E. McNeilly, and J. J. Rasmussen, “Properties of Molten Ceramics,” in *Ceramics in Severe Environments*, Boston, MA: Springer US, 5, 11, 1971.
- [10] G. Urbain, “Viscosity of Liquid Alumina”, *Rev. Int. Hautes Temper. Refract. Fr.*, 19, 55, 1982.
- [11] W. Rhim et al., “An electrostatic levitator for high - temperature containerless materials processing in 1 - g”, *Rev. Sci. Instrum.*, 64, 2961 1993.
- [12] T. Iida and R. T. L. Guthrie, *The Physical Properties of Liquid Metals*, Oxford Science Publication, 1988.
- [13] 田中敏宏, 鈴木賢紀, “溶融合金・イオン性融体の表面張力の熱力学計算”, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 30, 36, 2013.
- [14] T. Ishikawa and P.-F. Paradis, “Thermophysical properties of molten refractory metals measured by an electrostatic levitator”, *J. Electron. Mater.*, 34, 1526, 2005.
- [15] Y. Ohishi, K. Kurokawa, Y. Sun, and H. Muta, “Thermophysical properties of molten  $Zr_{1-x}O_x$  ( $x=0.1, 0.2$ ) measured by electrostatic levitation”, *J. Nucl. Mater.*, 528, 151873, 2019.
- [16] “FactSage”, [Online]. Available: [www.factsage.com](http://www.factsage.com) (accessed 2020/03/04).
- [17] 野城 清, 萩野 和己, “溶融金属と固体酸化物の濡れ性および界面現象”, *Netsu Bussei*, 5, 31, 1991.

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質량	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>
比体積	立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 <sup>(a)</sup> , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。  
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(e)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(e)</sup>	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。  
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。  
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。  
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。  
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の間には1:1の関係がある。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。  
 (g) 単位シーベルト (PV, 2002, 70, 205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> = s <sup>-1</sup>
角加減速	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> = s <sup>-2</sup>
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射線強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> = kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクタ	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =(10 <sup>12</sup> cm <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デシベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe <sub>e</sub> =(10 <sup>3</sup> /4π)A m <sup>-1</sup>

(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 <sup>-6</sup> m

