

原子力安全に向けた高温融体物性研究 — ガス浮遊レーザー加熱法を基盤として —



研究室紹介

大石 佑治*

High-Temperature Melt Research toward Nuclear Safety
— Based on Aerodynamic Levitation and Laser Heating —

Key Words: Aerodynamic levitation, Molten core materials, Thermophysical properties

はじめに

2011年の東京電力福島第一原子力発電所事故は、私の研究の方向を決める契機となった。それまで私は、固体核燃料の作製や物性評価を中心とした研究に取り組んでいた。事故後、廃炉に関する研究を調べていく中で、炉心溶融物が炉内でどのように流れ落ちたのかを予測することが重要であり、そのためには炉心溶融物の流動シミュレーションが不可欠であることを知った。さらに調べてみると、そのシミュレーションに必要な高温融体の物性値に関する情報が極めて限られていることが分かった。こうして、高温融体物性の研究に取り組むことになった。

炉心溶融物は極めて高温かつ反応性が高いため、容器との反応や汚染を避けることが難しく、従来の容器を用いる測定法では高精度な物性評価は容易ではない。そこで、金属から高融点酸化物まで幅広い物質に適用できるガス浮遊法を研究の基盤技術として採用した。

しかし、研究を進める中で、ガス流の影響により既存の物性評価法をそのまま適用することが難しいことも分かってきた。そこで現在は、ガス浮遊装置の改良と並行して、ガス浮遊法に適した新しい物性評価手法の構築にも取り組んでいる。

本稿では、本研究室で進めているガス浮遊レーザー加熱法による高温融体物性評価技術と、近年開発した周波数掃引共振法(Sweep Resonance Method :

SRM)による粘性評価について紹介する。

ガス浮遊レーザー加熱法を用いた高温融体物性評価

高温融体物性の研究を始めるにあたり、最初に考えたのは「どのようにして試料を溶かし、測定するか」であった。2000～3000℃にも達する上に化学的に活性なZrを含む炉心溶融物は、容器を用いた通常の方法では容器との反応や汚染を避けることが難しい。一方で試料を浮遊させる浮遊法では容器との接触に起因する問題を回避できるため、炉心溶融物のような物質の測定に適している。そのため、非接触で試料を保持できる浮遊法を候補とした。

浮遊法には静電浮遊法や電磁浮遊法など様々な手法がある。それぞれ特徴を持つが、検討や試行を進める中で、金属から高融点酸化物まで幅広い材料へ適用できるガス浮遊法を選択した。比較的簡素な装置構成であることから、自ら装置を改良し、試行錯誤を繰り返しながら研究を進められることも、ガス浮遊法を選択した理由の一つである。

ガス浮遊法では、ノズルから噴出するガス流によって試料を浮遊させ、レーザーによって非接触で加熱する(図1)。容器と接触しないため、容器との反

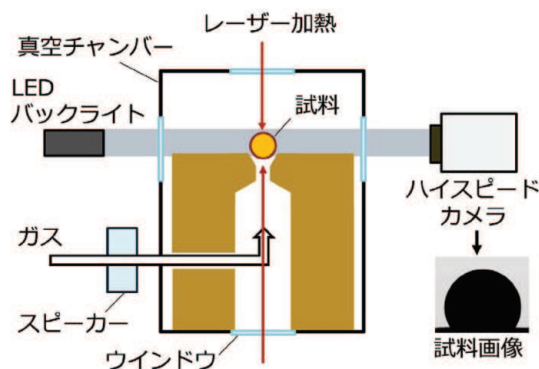


図1 ガス浮遊法概念図



* Yuji OHISHI

1982年6月生まれ
東京大学大学院 新領域創成科学研究科物質系専攻博士課程中退(2009年)
現在、大阪大学大学院 工学研究科 環境エネルギー工学専攻 教授 博士(科学)
TEL : 06-6879-7880
FAX : 06-6879-7889
E-mail: ohishi@see.eng.osaka-u.ac.jp

応や汚染を抑えた物性測定が可能となることが大きな利点である。また、浮遊した液滴は側方から観察できるため、液滴形状や液滴振動を利用して密度、表面張力、粘性など様々な物性評価へ展開できる。さらに、装置構成が比較的簡素であるため、用途に応じて装置を改良しやすく、大型放射光施設 SPring-8 へ持ち込めるコンパクトな装置も開発している (図2)。

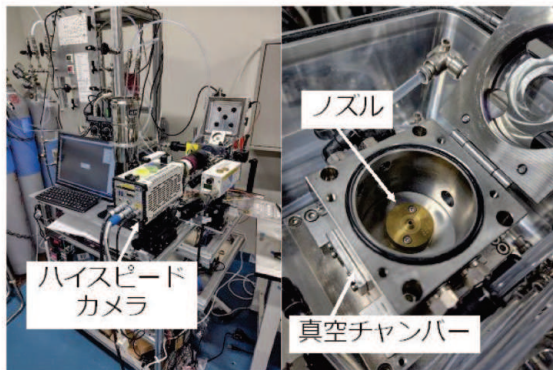


図2 ガス浮遊装置の写真

ガス浮遊法の大きな特徴は、浮遊対象となる材料をほとんど選ばないことである。静電浮遊法や電磁浮遊法では、対象となる材料に一定の制約がある。一方、ガス浮遊法は材料の電気的・磁気的性質に依存しないため、鉄やアルミニウムなどの一般的な金属から、融点が約2900℃に達する酸化ウラン (UO_2) のような超高融点酸化物まで、幅広い材料を非接触で浮遊・加熱できる (図3)。

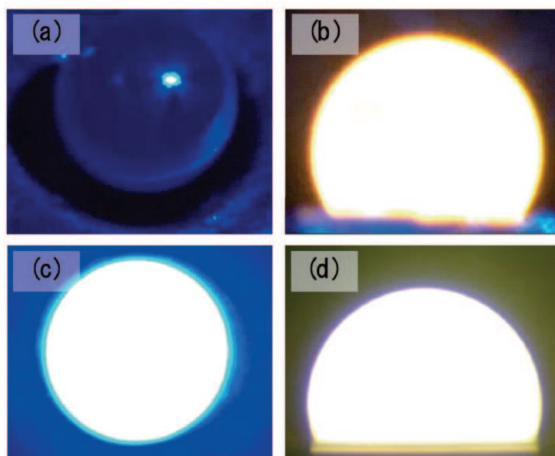


図3 (a) 斜め上から、(b) 横から見た浮遊溶融する Fe と、(c) 斜め上から、(d) 横から見た浮遊溶融する UO_2 の写真

スイープ共振法(Sweep Resonance Method)の開発

液滴振動を利用した粘性評価法としては、液滴を一度振動させた後の自由減衰振動から粘性を求める自由減衰法が広く用いられている。液滴を共振させた後に励振を停止すると、液滴振動は振動エネルギーが散逸することにより時間とともに減衰していく。この減衰速度は液滴内部でのエネルギー散逸、すなわち粘性に強く依存するため、その減衰波形を解析することで粘性を評価できる。特に静電浮遊法では標準的な評価法として確立されている。

ガス浮遊法についても、スピーカーを用いて液滴を励振し、励振停止後の自由減衰振動から粘性を評価する手法が提案されている¹⁾。この手法は主として酸化物融体を対象として適用されてきた。本研究グループでも、これまで Al_2O_3 ²⁾ や ZrO_2 ³⁾ などの高融点酸化物に加え、 UO_2 - Fe_2O_3 系融体⁴⁾ の粘性評価を進めてきた。一方、金属融体への適用例は極めて限られていた。そこで、ガス浮遊法による物性評価の対象を金属融体へ広げるため、同じ自由減衰法を鉄融体へ適用した。しかし、鉄融体を対象に測定を繰り返すと、得られる粘性は文献値よりも系統的に高くなるだけでなく、測定値のばらつきも非常に大きかった。試料や解析条件を見直しても改善せず、「なぜだろう」と考えながら実験を続けていた。

酸化物融体と比較して、金属融体の粘性は一般に低い。そのため、粘性による液滴内部でのエネルギー散逸が小さくなり、これまで十分に意識されてこなかった周囲の気体等による影響が、相対的に無視できなくなるのではないかと考えた。ガス浮遊法では液滴はガス流によって浮遊しており、同時にガス流によって回転する場合がある。そのため、液滴のエネルギー減衰には、粘性による内部散逸だけでなく、ガス流や回転に起因する外部散逸も含まれている可能性がある。外部散逸を考慮しなければ、粘性は見かけ上過大評価される上に、液滴の回転状態が測定ごとに異なれば、測定値のばらつきにもつながると考えられる。しかし、従来の自由減衰法では液滴の回転状態を知ることができないため、その影響を評価・補正することはできない。

そこで、「ガス浮遊法ではどのような評価法が適しているのか」という視点から、改めて測定法そのものを考え直した。その結果、励振周波数を連続的に掃引しながら液滴を振動させるスイープ共振法

(Sweep Resonance Method : SRM) を考案した(図4)。

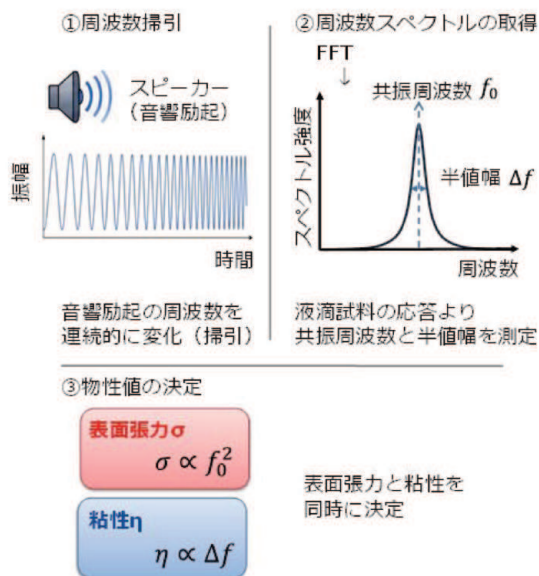


図4 SRM法の概要

本手法では、液滴を励振しながら周波数を掃引し、その応答をフーリエ解析することで共振スペクトルを取得する。共振スペクトルからは共振周波数やピーク幅だけでなく、液滴の回転数も同時に評価できるため、液滴状態を考慮した物性評価が可能となる。また、液滴の回転数を同定することで、ガス流や回転に起因する外部散逸を定量的に取り扱うことが可能となり、その補正式を構築した。

Ni、CoおよびFe融体を用いて構築した補正式を、

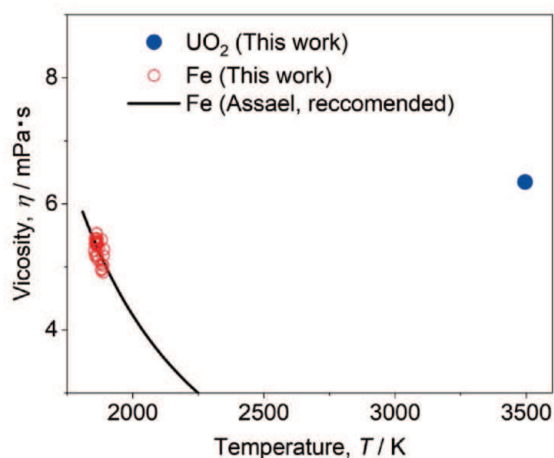


図5 SRM法により測定したFeおよび UO_2 の粘性とFeの文献値⁵⁾

構築には用いていないCu融体へ適用した結果、文献値と良好に一致する粘性が得られ、本手法の有効性を確認した。さらに現在は、酸化ウラン(UO_2)融体へ本手法を適用し、粘性評価を進めている(図5)。

原子力安全への応用と今後の展望

これまでの研究は粘性評価を中心に進めてきたが、粘性以外にも密度、表面張力、比熱など、シミュレーションに必要な多くの物性が存在する。現在は、ガス浮遊法を利用したこれらの物性評価技術の開発も進めている。

また、高温では、融体だけでなく融点直下の固体についても、容器との反応や測定治具の制約が大きく、信頼性の高い物性データを得ることは容易ではない。そこで、測定対象を金属融体や低粘性酸化物だけでなく、融点近傍の固体などへも広げたいと考えている。例えば、液相だけでなく、融点近傍の固相の熱膨張率や熱拡散率まで測定できるような、浮遊法をベースとした研究基盤の構築を目指している。

これらの技術は、東京電力福島第一原子力発電所事故で生じた燃料デブリの形成・流動挙動の理解に貢献するだけでなく、鉄鋼やガラスなどの高温材料プロセスへの応用も期待される。高温物性は様々な材料分野に共通する基盤データであり、非接触で高精度に測定できる技術へのニーズは今後さらに高まると考えられる。

このような研究を通して私が指導する学生に伝えたいのは、高度な技術を身に付けることだけではなく、課題を解決できる研究者になってほしいということである。研究では、既存の方法では解決できない問題に直面することが少なくない。そのようなときに、「どうすれば解決できるだろうか」と考え、新しい解決法を自ら生み出す姿勢を大切にしてほしい。必要であれば、装置や測定法そのものを開発することも研究の一部である。今後も、既存の方法では解決できない高温物性の課題に対し、新しい計測技術を開発しながら、様々な高温物性を非接触で評価できる研究基盤を構築し、高温材料研究と原子力安全の発展に貢献していきたい。

参考文献

- 1) D Langstaff et al., Aerodynamic levitator furnace for measuring thermophysical properties of

- refractory liquids, Review of Scientific Instruments, 84 (12), 2013.
- 2) Y. Sun et al., Thermophysical Properties of Dense Molten Al_2O_3 Determined by Aerodynamic Levitation, International Journal of Thermophysics, 45 (1):11, 2024.
 - 3) T. Kondo et al., Density and viscosity of liquid ZrO_2 measured by aerodynamic levitation technique, Heliyon, 5 (7), 2019.
 - 4) T. Kondo et al., Thermophysical properties of molten $\text{FeO}_{1.5}$, $(\text{FeO}_{1.5})_{0.86}(\text{ZrO}_2)_{0.14}$ and $(\text{FeO}_{1.5})_{0.86}(\text{UO}_2)_{0.14}$, Journal of Nuclear Science and Technology, 59 (9):1139–1148, 2022.
 - 5) M. J. Assael et al., Reference Data for the Density and Viscosity of Liquid Aluminum and Liquid Iron, J. Phys. Chem. Ref. Data 35, 285–300, 2006.

