

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18898

研究課題名（和文）計算計測融合アプローチに基づく高温高反応性溶融体の熱物性測定の新展開

研究課題名（英文）Paradigm shift in measurement techniques for thermophysical properties of molten metal using simulation/experiment assimilation approach

研究代表者

阿部 圭晃（Abe, Yoshiaki）

東北大学・流体科学研究所・助教

研究者番号：40785010

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：浮遊する溶融金属周りのガス流れと浮遊安定性に関する圧縮性流体の数値解析を行い、粒子法に基づき変形解析を行うことで、両者を組み合わせたマルチフィジックス数値解析モデルを構築した。上述の数値解析と比較・融合させる実験として、溶融した硫化銅を対象として溶融体の球形からのずれが物性推算精度に及ぼす影響を評価した。これにより、従来用いられていた球形を仮定した熱物性予測手法に対し、ガス流れの効果および溶融体の変形効果を考慮した補正手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では溶融体の浮遊計測に関するデジタルツインを構築出来たことが大きな成果であり、世界的に初めての事例と考えられる。実際の実験値を用いたリアルタイムのデータ同化解析やより高度な数値モデルの実現には今後も継続的に研究を展開させていく必要があるものの、本研究で構築できた表面張力係数の予測修正法を含めた数値モデルは溶融体の浮遊実験に限定されるものではなく、金属や酸化物の高温溶融体とガス流れの干渉に関する様々な系への展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：We conducted a numerical investigation of the behavior of compressible flow around a floating molten metal and its dynamic stability. To do this, we employed deformation analysis using the particle method to develop a multiphysics numerical model that integrates both aspects. As an experiment to compare and integrate the numerical analysis mentioned above, we investigated the effect of the deviation from a spherical shape on the accuracy of property estimation with molten copper sulfide. A new correction method was proposed to account for the influence of gas flow and melt deformation, in contrast to the conventional thermophysical property prediction method that assumes a spherical shape.

研究分野：数値流体力学

キーワード：ガスジェット浮遊法 熱物性計測 数値流体力学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

溶融体 (1000°C以上の溶融した金属やセラミック等) の熱物性 (粘性, 表面張力等) は, 鑄造・結晶成長・3D プリント等の高温プロセスの支配因子であり, 高精度な測定技術が求められる。しかし, 溶融体は高温かつ高反応性のため容器に格納した測定が難しく, 銅等の基礎材料ですら熱物性は正確に把握されていない。そこで希ガスの噴流 (以下ガスジェットと呼ぶ) により溶融体を浮遊させ, 振動特性から熱物性を算出するガスジェット浮遊法が提案されており, 測定対象に磁性や導電性が不要な無容器測定法の一つとして着目されている。しかし, 溶融体をガスジェットで安定に浮遊させるためにはガス流量を試行錯誤的に調整する必要があり, また溶融体の変形が測定精度に及ぼす影響が検証されていないことから, 計測技術の確実性・精度は未だ十分でない。

2. 研究の目的

本研究では, 計測データと数値解析の融合アプローチに基づき, ガスジェット浮遊法による熱物性計測技術の高度化 (浮遊安定化による計測確実性の向上・溶融体変形評価による測定誤差の低減) を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

ガスジェット浮遊法は, 溶融体の浮遊安定性, 溶融体周りの圧縮性流れ現象, 溶融体内部の流動変形現象といった複数の物理が相互作用するマルチフィジックス現象を含み, これらを連成させた数値解析事例は申請者の知る限り存在しない。本項目では, 溶融体周りのガス流れと浮遊安定性に関する数値解析を圧縮性流体解析により行い, また粒子法に基づき溶融体の変形解析を行うことで, 両者を組み合わせたマルチフィジックス数値解析モデルを作成する。上述の数値解析と比較・融合させる実験として, 溶融した硫化銅を対象として溶融体の球形からのずれが物性推算精度に及ぼす影響を評価する。これにより, 従来用いられていた球形を仮定した物性予測手法に対し, ガス流れの効果および溶融体の変形効果を考慮した補正手法を提案する。

4. 研究成果

まず, 溶融金属をコニカルノズル内でガスジェットにより浮遊させる際の安定性を調べるため, 溶融金属を剛体球と仮定した数値解析を行った。図1に, 浮遊する溶融体周りのガス流れの代表例を示す。等高線は速度の大きさを示し, 溶融体とノズル間で加速流れが生じることがわかる。また, 高温時には溶融体を中心に左右に大きく広がるガス流れが生じることがわかる。これまで硫化銅の溶融温度である1300K程度に限定して浮遊安定性を解析していたが, 新たに複数の温度域(700K-1600K)で浮遊解析を実施した。

その結果, 鉛直方向の釣り合い位置 (平衡点) は温度上昇と共に上方へと移ること, 水平方向には全ての温度域で安定性を持つものの, 上方で保持される場合には試料直径の10%程度の振幅で横揺れを生じることを見出した。これにより, 硫化銅だけでなく異なる溶融温度を持つ金属や酸化物を対象とした浮遊安定性・平衡点を予測することが出来るようになった。図2に高温時の溶融体浮遊安定性に関する結果を示す。図2の左下部は溶融体中心座標の浮遊時の時間変化を表し, いずれも上下 (y方向) に振動しつつ, 左右 (x方向) の安定性は確保されていることがわかる。ここには示さないが, 低温時にはこのような安定性が見られないこともわかった。また右下図には, 溶融体の下面で上向の力がどのような範囲に発生するかを示している。温度によらず, おおよそ135度から225度の間に上向の力が発生していることがわかる。このことは次に説明する補正法の構築において非常に重要な結果となる。

次に, ガスジェットからの流体力を考慮し溶融体の浮遊変形解析を行うことで, ガス浮遊法で用いられる表面張力モデルの精度を評価可能とした。具体的には, 表面振動を計測し球面調和関数により表面張力係数を近似的に求めるモデルである。従来モデルは溶融体にはたらく外力 (重力や流体力) が無いと仮定したものであり, 外力が存在すると予測精度が低下することが分かった。これに対し, 溶融体にはたらく流体力を考慮した修正モデルを提案し, 表面張力係数の予測精度が大幅に向上することが示された。また, 提案した修正モデルの適用範囲はボンド数によって整理出来ることも明らかとなり, 密度の異なる物質に対しても適用性があることが示された。

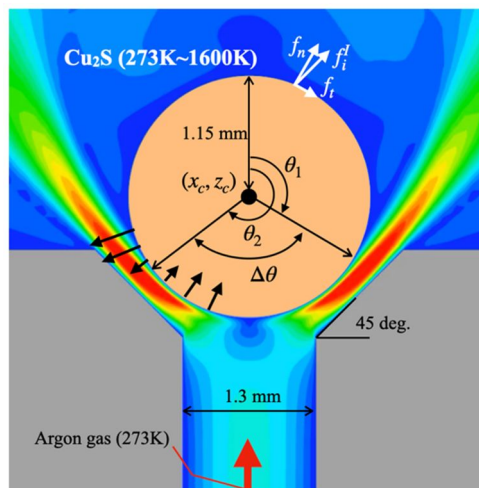


図1 浮遊する溶融体周りのガス流れ

図3には、(ガス流れの流体解析結果を用いて行なった) 粒子法に基づく変形解析の結果を示す。

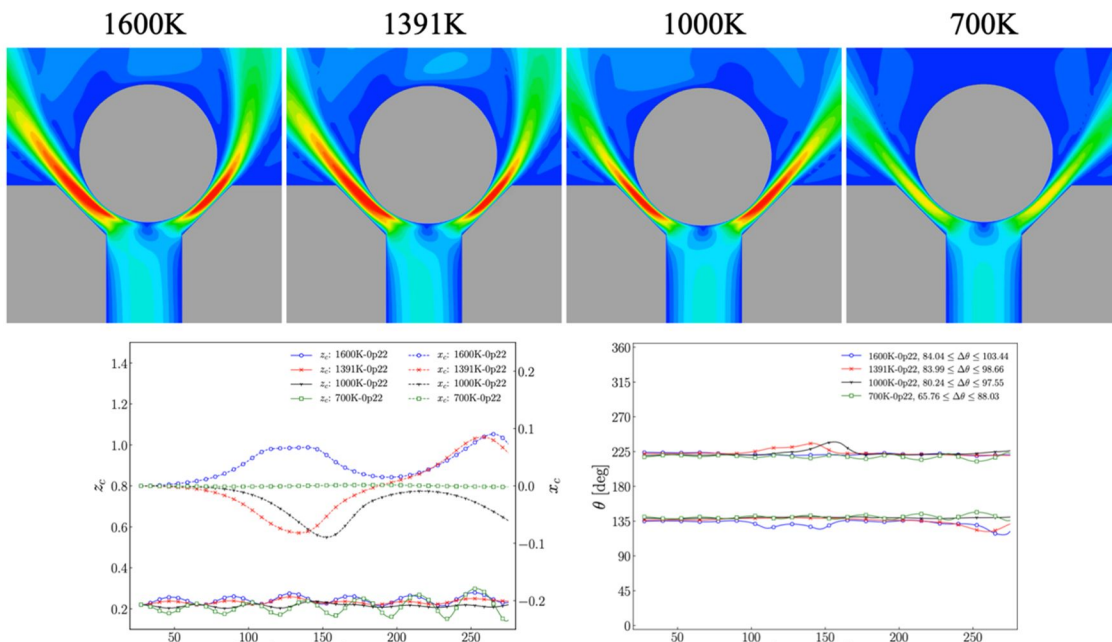


図2 温度の異なる溶融体の浮遊安定性(左)と溶融体下面に発生する上向力の領域(右)

最後に、これまで進めてきた溶融体の浮遊実験装置が完成し、本研究において数値計算との比較対象とする表面変形データや、振動特性から表面張力係数を推定する一連の解析ツールを整備することが出来た。実際に浮遊実験を行いデータ取得が可能であることを確認し、定性的にはあるが表面変形データを計算結果と比較することまで達成した。またこれまでに提案した表面張力係数の予測補正法についてさらに検証を進め、より多くの条件下で適用性を検証し、また実験に対応する結果にも適用出来ることを確認した。この表面張力係数の予測修正法を含め、溶融体の浮遊安定性に関する圧縮性流体解析と溶融体の変形に関する流動解析を接続することが可能となり、溶融体の浮遊計測に関するデジタルツインとなる数値モデルを完成させた。

研究期間全体を通じて、溶融体の浮遊計測に関するデジタルツインを構築出来たことが大きな成果と考えているが、実際の実験値を用いたリアルタイムのデータ同化解析やより高度な数値モデル(浮遊と変形を同時に考慮した連成解析)の実現には今後も継続的に研究を展開させていく必要がある。また本研究で構築した表面張力係数の予測修正法を含めた数値モデルは溶融体の浮遊実験に限定されるものでなく、金属や酸化物の高温溶融体とガス流れの干渉に関する様々な系への展開が期待される。

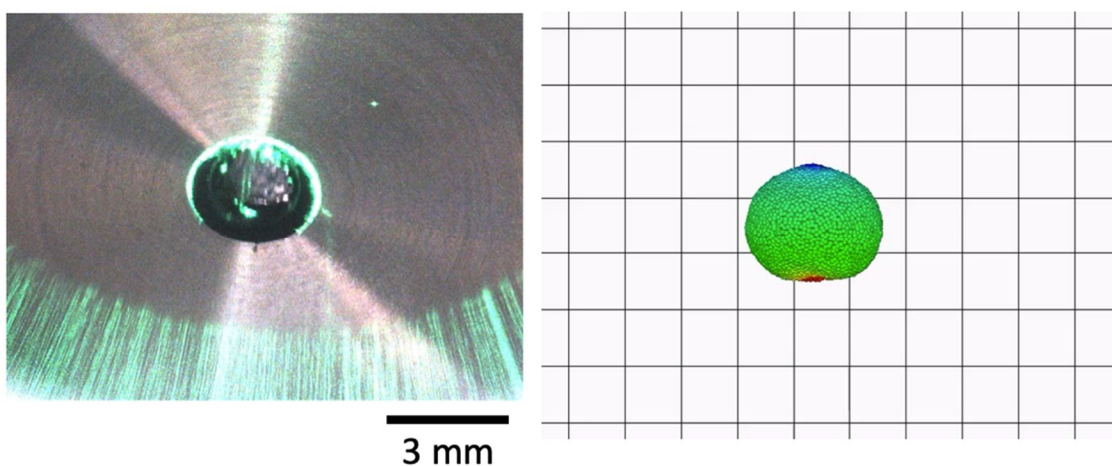


図3 実験時のノズル付近拡大図(左)とガス流れによる流体力を基にした粒子法の変形解析結果(右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Masayoshi Adachi, Ryoya Masaoka, Masahito Watanabe, Makoto Ohtsuka, Jun-ichi Takahashi, Hiroyuki Fukuyama
2. 発表標題 Surface tension measurement of Cu ₂ S-FeS melts by aerodynamic and electromagnetic levitation techniques
3. 学会等名 ECPT2023: 22nd European Conference on Thermophysical Properties (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masayoshi Adachi, Masahito Watanabe, Hiroyuki Fukuyama
2. 発表標題 Surface tension and viscosity measurement of molten materials using aerodynamic levitation technique
3. 学会等名 International Conference on Materials Science and Engineering (Materials Oceania 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shingo Ishihara, Yoshiaki Abe, Masayoshi Adachi
2. 発表標題 Analysis of oscillation behavior of droplet in aerodynamic levitation
3. 学会等名 ECPT2023: 22nd European Conference on Thermophysical Properties (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoki Yamazaki, Yoshiaki Abe, Freddie D. Witherden, Tomonaga Okabe
2. 発表標題 Development of a low-cost computing method for static aeroelasticity and deep dynamical modeling for unsteady FSI
3. 学会等名 76th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshiaki Abe, Masayoshi Adachi, Shingo Ishihara
2. 発表標題 Effects of surface temperature on stability of aerodynamic levitation technique
3. 学会等名 the 13th Asian Thermophysical Properties Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shingo Ishihara, Yoshiaki Abe, Masayoshi Adachi, Junya Kano
2. 発表標題 Development of a correction method for surface tension measured by aerodynamic levitation
3. 学会等名 the 13th Asian Thermophysical Properties Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masayoshi Adachi, Masahito Watanabe, Makoto Ohtsuka, Jun-ichi Takahashi, Hiroyuki Fukuyama
2. 発表標題 Surface tension measurement of copper matte melts using an aerodynamic levitation technique
3. 学会等名 the 13th Asian Thermophysical Properties Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿部 圭晃, 石原 真吾, 安達 正芳
2. 発表標題 高温高反応性溶融金属の熱物性測定に向けたガス浮遊法の数値解析
3. 学会等名 日本機械学会年会講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	石原 真吾 (Ishihara Shingo) (40760301)	東北大学・多元物質科学研究所・助教 (11301)	
研究 分担者	安達 正芳 (Adachi Masayoshi) (90598913)	東北大学・多元物質科学研究所・講師 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------