

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01762

研究課題名（和文）転移学習を利用した高温二相流体のレオロジー特性予測システム構築

研究課題名（英文）Estimation of rheological characteristics of dual phase fluid at high temperature utilizing transfer learning

研究代表者

齊藤 敬高 (Saito, Noritaka)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：80432855

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、室温でのシリコンオイルまたはグリセロール水溶液中のポリエチレンビーズからなる分散粒子のサスペンション粘度を測定し、粘度を推定するための経験的モデルを提案した。さらに、CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO スラッグのマトリックス中に分散した CaO および MgO 粒子のサスペンション粘度を 1773 K で測定し、提案された粘度式の適用性を調査した。同等の測定条件下では、グリセロールサスペンションの粘度はシリコンオイルよりも高かった。熔融スラッグサスペンションの粘度上昇の傾向は、室温サスペンションのそれと同様であり、ビンガムの非ニュートン挙動を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題では、研究代表者がこれまで開発してきた高温二相共存融体（サスペンションおよびフォーム）の粘性に関する一連の手法を余すことなく駆使し、高精度な実験データを積み上げた。ここでは、比較的に実験が容易でデータ数の大きな室温系の見かけ粘度挙動から、機械学習に関する優れた実績が豊富な研究分担者とともに、挙動が似て非なる高温系の流動挙動を推定するモデルを転移学習および特徴選択によって構築し、同分野における機械学習の適用を世界に先駆けて行った。また、得られたモデルはエクセル形式のスプレッドシートとして、国内の金属素材産業に携わる研究者に試用をしてもらっている。

研究成果の概要（英文）：In the present study, the viscosity of suspensions of dispersed particles consisting of polyethylene beads in a matrix of silicone oil or aqueous glycerol at room temperature was measured. Then, empirical models for estimating the viscosity were proposed. Furthermore, the viscosity of suspensions of CaO and MgO particles dispersed in a matrix of CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO slag at 1773 K was measured, and the feasibility of the proposed viscosity equations was investigated. Under comparable measurement conditions, the viscosities of the glycerol suspensions were higher than those of the silicone oil suspensions. The trend of increasing viscosity of the molten slag suspensions was similar to that of the room-temperature suspensions, exhibiting Bingham non-Newtonian behavior. The viscosity model composed with the results from the glycerol aqueous suspensions underestimated the slag viscosity, which can be attributed to the repulsive forces in the high-polarity liquid matrix.

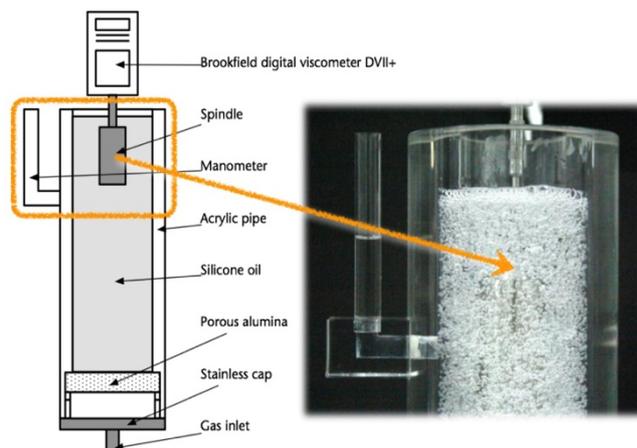
研究分野：高温融体物理化学

キーワード：見かけ粘度 サスペンション フォーム 非ニュートン流体 粘弾性流体 機械学習 ガウス過程

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

各種基盤金属材料の高温冶金プロセスや固体廃棄物(一般・産業廃棄物および放射性廃棄物を含む)の熔融高減容プロセスにおいて、生成・排出する酸化物融体(スラグ)は均一ではなく、固体結晶や、場合によっては気体を含む第二相が入り乱れる複雑な流体を形成している。また、これら多相共存融体の流動特性である粘度は、もちろん温度や組成によって大幅に変化するが、それ以上に混入する気相の割合やずり速度等に大きく影響を受け桁違いに増大することを近年申請者らは室温系の実験において明らかにした(右図)。



また、高温系の実験として酸化物融体にガスを吹き込むことによって、もしくは実際に熔融金属との不純物除去反応を生じさせることによって、酸化物融体中における気相の分散挙動(フォーミング挙動)を調査する研究は80~90年代を中心に精力的に行われてきた(e.g. K.Ito et al.: Metall.Trans. 20B(1989), 509. 北村信也ら: 第71回日本鉄鋼協会九州支部合同学術講演会講演概要,(1990), 63. 原茂太, 生田昌久, 北村光章, 荻野和巳: 鉄と鋼, 69 (1983), 1152.). しかしながら、これらの研究において酸化物融体の組成、粘性や表面張力等の物性、さらには固相が共存した場合など、様々なパラメータにおいて統一的な見解が得られているとは言い難い。また前述のように、融体の流動を司る粘性と固相もしくは気相の分散挙動の関係を系統的に調査した研究は非常に少なく、関連の高温プロセスの最適化や諸現象の解明が停滞している状態である。

### 2. 研究の目的

「室温系と高温系 (~1600°C) では、流体(融体)中に分散した第2相と、マトリックス液体の間に存在する相互作用が大きく異なる。この違いはどこからやってくるのか?」これが、本課題の根底に存在する明らかにしたい疑問である。これまでに、研究代表者は独自に、または鉄鋼企業との共同研究において、室温系・高温系にかかわらず様々な液相・固相・気相の組み合わせによる2相共存流体の見かけ粘度を実測してきた。その中で、室温系の $N=300$ を超えるデータから、数学的に多重回帰したモデルが、温度のみが異なる同条件(分散第2相の割合、体積割合、ずり速度等)の高温系データを全くと言っていいほど、再現しない事実に向き合ってきた。具体的には、高温系のデータの方が数倍から数10倍高い見かけ粘度を示す。ここから、シリコンオイル等をマトリックスとする場合と、重合したイオンの海である酸化物融体をマトリックスにする場合では、分散第2相との界面状態が大きく異なるのではないかと考えた。

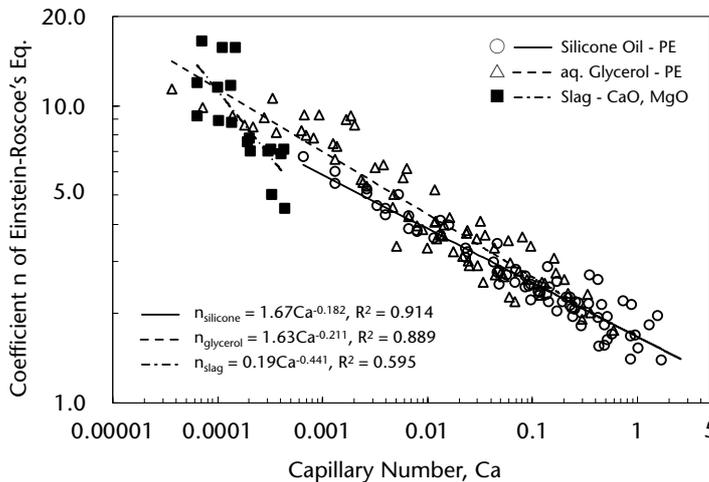
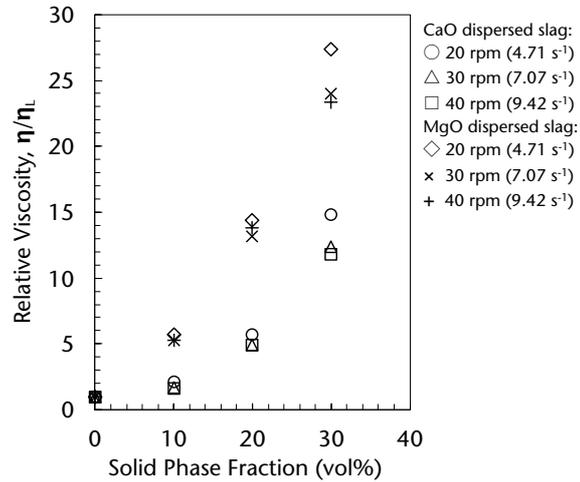
本課題の目的は、上記の「問い」に対する「答え」を導き、高温2相共存融体の見かけ粘度予測モデルを構築することである。具体的には以下の2系統の研究によって目的を達成したい。1. 室温系および高温系において、様々な液相・固相・気相の組み合わせによる2相共存流体の見かけ粘度を、固相率もしくは気相率の関数として高精度に測定し、データを蓄積する。2. 得られたデータを多重回帰するとともに、機械学習の一種である転移学習および特徴選択を適用することによって、高温2相共存融体の見かけ粘度予測モデルを構築する。ここで、上記1では研究代表者がこれまでに培ってきた実験技術によって、所望のデータを蓄積するとともに、特に見かけ粘度を大きく変化させる分散第2相の固相率もしくは気相率については、近年開発した交流電場パラメータを用いる手法によって定量化する。また、上記2では研究分担者が生物学や化学における諸問題を解決するための人工知能・データマイニング手法の研究開発を行ってきた優れた知見を生かし、転移学習を用いたモデルの構築を行う。

### 3. 研究の方法

室温系においてシリコンオイルもしくはグリセロール水溶液をマトリックス流体に、ポリエチレンビーズもしくは不活性ガスを分散させた2相共存流体を作製し、高精度広範囲レオメータを用いて、見かけ粘度を系統的に、かつ高精度に測定した。なお、測定パラメータとして、マトリックスの粘度、分散第2相の大きさ、体積割合および与えるずり速度を採用し、 $N=300$ 程度のデータの蓄積を行った。また、メニーコアサーバを用いて上記の得られたデータを複数のパラメータを用いる、多重回帰によって2相共存流体の見かけ粘度を再現する実験式の作成を試みた。次に、高温系において $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ 系酸化物融体をマトリックス流体に、固体 $\text{CaO}$ もしくは不活性ガスを分散させた2相共存流体を作製し、高精度広範囲レオメータを用いて、見かけ粘度を系統的に、かつ高精度に測定した。なお、測定パラメータとして、マトリックスの粘度、分散第2相の大きさ、体積割合および与えるずり速度を採用し、 $N=30$ 程度のデータの蓄積を行った。また、メニーコアサーバを用いて高温2相共存流体の見かけ粘度モデル構築を行った。

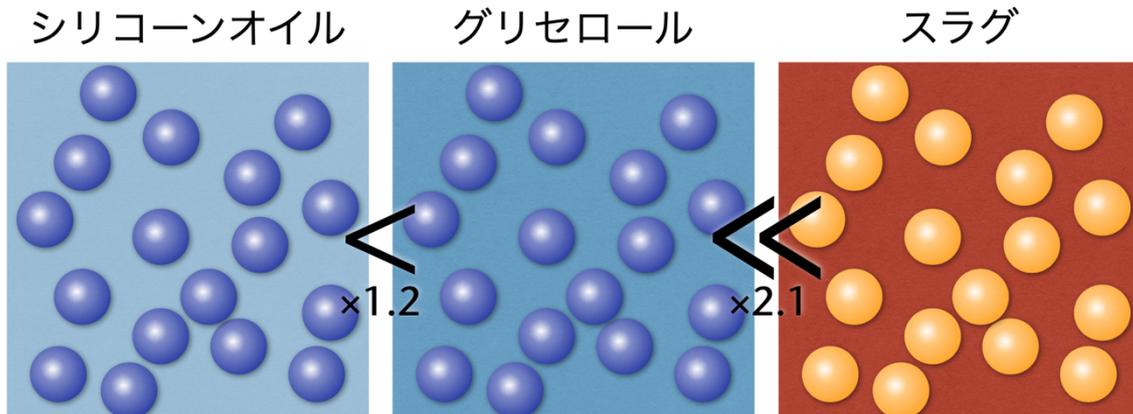
#### 4. 研究成果

右図に 1773K で CaO および MgO 粒子が分散した CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO スラグサスペンションの粘度測定結果を示す。これより、熔融スラグをマトリックスとするサスペンションの相対粘度も室温系の結果と同様に CaO および MgO の固相率の増加とともに上昇することがわかった。特筆すべき点として、相対粘度は 10vol% の低固相率領域においても速度に依存することが明らかとなった。これは室温系のマトリックス、つまりシリコンオイルやグリセロール水溶液よりも熔融スラグは遥かに高い極性を有し、固相間の斥力を増大させていることを示唆している。CaO が分散したスラグサスペンションの場合、相対粘度は CaO の体積分率とともに徐々に増加し、10vol% の固相率で約 1.6~2.1 に達することがわかった。また、CaO 含有量がさらに増加すると相対粘度が急速に上昇し、30vol% CaO および 20rpm のときで最大値 14.8 を示した。同様に MgO が分散したスラグサスペンションの場合、相対粘度は MgO の体積分率とともに徐々に増加し、10vol% の固相率で約 5.3~5.7 に達することがわかった。また、MgO 含有量がさらに増加すると相対粘度が急速に上昇し、30vol% CaO および 20rpm のときで最大値 27.4 を示すほど劇的に増大することが明らかとなった。これらより、MgO 系サスペンションの相対粘度の増加は CaO 系のそれよりも顕著であった。



左図に本研究で用いた 3 種類の液体マトリックス、つまりシリコンオイル、グリセロール水溶液、および CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-MgO スラグをそれぞれマトリックスとするサスペンションの相対粘度から計算された Einstein-Roscoe 式の係数 n とそれぞれの実験条件から算出したキャピラリー数 Ca の両対数プロットを示す。左図に示すようにいずれの系においても Einstein-Roscoe 式の係数 n の対数値はキャピラリー数の対数値の増加とともに単調かつ直線的に減少することがわかる。こ

こで、直線の傾きに注目すると、シリコンオイルおよびグリセロール水溶液のサスペンションではそれぞれ -0.182 および -0.211 であることがわかる。つまり負に大きい勾配は、より大きな係数 n を示すことになるため、キャピラリー数が同条件であればより高い相対粘度を示すことになる。シリケート融体をマトリックスとするスラグサスペンション系の指数は最も負に大きい値、すなわち -0.411 を有していることがわかる。これは、スラグサスペンション系の粘度に対する誘電分極率の影響が、ここで調査したサスペンション系の中で最も強かったことを意味する。これらの値を比較すると、シリコンオイル系に比較してグリセロール水溶液系は約 1.2 倍、グリセロール水溶液系に比較して熔融シリケートスラグ系は約 2.1 倍の誘電分極による斥力がサスペンションに与える影響を有していることを示唆していると思われる (下図)。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Noritaka SAITO	4. 巻 2020
2. 論文標題 Estimation of Rheological Characteristics of Dual Phase Fluid at High Temperature utilizing Transfer Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Impact	6. 最初と最後の頁 82-84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2020.1.82	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 齊藤敬高，助永壮平，中島邦彦
2. 発表標題 固体もしくは気体が共存したスラグの流動特性
3. 学会等名 日本学術振興会 素材プロセッシング第69委員会第1分科会（非鉄製錬関連技術）第60回研究会「非鉄製錬スラグの現状と課題および将来展望」（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noritaka SAITO, and Kunihiko NAKASHIMA
2. 発表標題 Simultaneous Evaluation of Viscosity and Crystallization Behavior of Silicate Melt by Electrical Capacitance Measurement
3. 学会等名 ICG 2019, 25th International Congress on Glass (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noritaka SAITO
2. 発表標題 Evaluation of Wettability, Viscosity, and Crystallization Behavior of High Temperature Melts
3. 学会等名 Third TITECH-CRIEPI-JAEA Joint Workshop - R&D updates on fuel debris and FP behavior during severe accidents - (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齊藤敬高
2. 発表標題 多相融体の流動理解のためのスラグみえる化
3. 学会等名 日本実験力学会 2019年度年次講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江頭誉志幸, 齊藤敬高, 中島邦彦
2. 発表標題 三相共存スラグの粘性挙動に及ぼす分散気泡の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第178回秋季講演大会 日本金属学会 2019年秋期(第165回)講演大会 共同セッション「高温熔融体の物理化学的性質」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noritaka SAITO, and Kunihiko NAKASHIMA
2. 発表標題 Simultaneous Evaluation of Viscosity and Crystallization Behavior of Molten Slags and Fluxes
3. 学会等名 The 15th China-Japan Symposium on Science and Technology of Iron and Steel (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 原大悟, 齊藤敬高, 中島邦彦
2. 発表標題 スラグサスペンションの流動特性に及ぼす界面電荷の影響
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 第178回春季講演大会 日本金属学会 2020年春期(第166回)講演大会 共同セッション「高温熔融体の物理化学的性質」
4. 発表年 2020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	西郷 浩人  (Saigo Hiroto)  (90586124)	九州大学・システム情報科学研究院・准教授   (17102)	

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
---------	---------