

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630428

研究課題名(和文) コンピュータシミュレーションを用いた微粒子を含む高粘性流体のレオロジー特性評価

研究課題名(英文) Rheological evaluation of highly viscous slurry by using a numerical computation

研究代表者

酒井 幹夫 (Sakai, Mikio)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00391342

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：高粘性流体中の固体粒子の挙動を模擬するために、以下の研究を行った。DEM-DNS法において、非球形の固体粒子の回転運動を精度よく模擬するために、クォータニオンの導入および検討を行った。その際、固体粒子に作用する抗力は埋込境界法により評価した。さらに、流体解析において陰解法を導入するとともに、高速なマトリックスソルバーを導入した。また、高粘性流体のスラリー流れのマクロ挙動を効率よく計算するために、DEM-MPS法の高速度化を図った。圧力項を陽的に計算して、粘性項を陰的に計算するアルゴリズムを採用した。本手法により、定性的に高粘性の固液混相流の挙動を模擬することが示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we develop new models to simulate the behavior of solid particles in a highly viscous fluid. Introduction of the quaternion was investigated to simulate the rotational angle of the non-spherical solids in the DEM-DNS method. Besides, implicit algorithm and fast matrix solver were employed in the CFD. In addition, DEM-MPS method was accelerated to simulate a highly viscous slurry flow efficiently. Specifically, efficient algorithm was introduced in pressure and viscous terms. Adequacy of the DEM-MPS method was proved qualitatively through this study.

研究分野：粉体シミュレーション

キーワード：離散要素法 流体力学的相互作用力 高粘性流体 固体粒子 MPS法

1. 研究開始当初の背景

ガラス溶融炉は、長時間運転した際に炉底に微粒子が堆積してしまうと、安定的な運転に支障をきたす可能性があることが知られている。ガラス溶融炉において、高粘性スラリー（微粒子を含む高粘性流体）の制御は、その安定運転のために極めて重要である。その際、溶融ガラスのレオロジー特性を効率的に評価することが求められる。

実際のガラス溶融炉の使用環境は、高温かつ高放射線の極めて過酷な環境である。従って、溶融ガラスのレオロジー特性の評価について、実験によるアプローチは実質的に不可能である。そのため、レオロジー特性に係る評価において、数値解析の応用が期待されている。既存の手法では、高粘性スラリーを安定的かつ効率的に計算することができなかった。そこで、高粘性スラリーのレオロジー特性に係る数値解析手法を開発する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高粘性スラリーのレオロジー特性に係る数値解析手法を開発することである。高粘性スラリーの流れを効率的に計算する手法を開発するとともに、ミクロスケールおよびマクロスケールの高粘性スラリーのレオロジー特性に係る評価を行う。

3. 研究の方法

(1) ミクロスケールの数値解析

ミクロスケールの数値解析では、DEM-DNS法を使用する。本研究で行う内容は、非球形の固体粒子の回転運動を精度よく模擬するためのクォータニオンの導入・検討、流体解析における陰解法の導入および高速なマトリックスソルバーの導入である。なお、固体粒子間の接触に関しては、離散要素法 (Discrete Element Method: DEM) を使用する。固体-流体間相互作用は、埋め込み境界法を導入して、直接計算により模擬される。計算手法についても、最新の手法を調査する。

(2) マクロスケールの数値解析

マクロスケールの数値解析では、DEM-MPS法を使用する。流体解析における陰解法の導入および陽的な圧力計算の導入を行った。なお、固体粒子間の接触に関しては、DEMを使用する。流体の支配方程式には、局所体積平均法を導入する。流体の数値シミュレーションは、陽的MPS法により模擬する。固体-流体間相互作用は、固相および液相の運動量交換により模擬される。

4. 研究成果

高粘性流体中の固体粒子の挙動を模擬するために、以下の研究を行った。

(1) ミクロスケールの数値解析

ミクロスケールの数値シミュレーションにはDEM-DNS法を使用した。本研究で取り組

んだ研究事例を以下に示す。まず、液相および固相の基礎式を示す。液相の基礎式は、連続の式および揺動ナビエ-ストークス式である。流体と固体粒子との相互作用力は、DNSに埋込境界法を導入して計算するため、メッシュの大きさは固体粒子の直径よりも十分に小さくする必要がある。固体粒子は、並進運動および回転運動に基づいて模擬する。固体粒子に作用する抗力は直接計算により模擬され、van der Waals力による付着力が考慮される。回転運動は、固体粒子間相互作用ばかりでなく、流体からの影響も模擬される。

本研究では、沈降時の高粘性スラリーの見かけ粘度を評価するための3次元数値解析を実行した。図1に相対粘度と粉体層の高さの関係を示す。計算結果は、DEM-DNS法により得られた。沈降時の高粘性スラリーの理論解について、沈降した粉体層の高さを h 、計算領域の高さ h_m としたとき、相対粘度は、

$$h_r = \frac{h_m}{h_m - h}$$

のようにして得た。数値解析結果は、理論界とよく一致した。相対粘度で評価しているため、実際の溶融ガラスが溶媒になっても同様の結果が得られることが予想される。また、沈降した固体粒子は、シア負荷時にほとんど流動しなかった。従って、ガラス溶融炉の炉底に白金族粒子が一旦沈降してしまうと、流動せずにそのまま保有される可能性があることが示された。

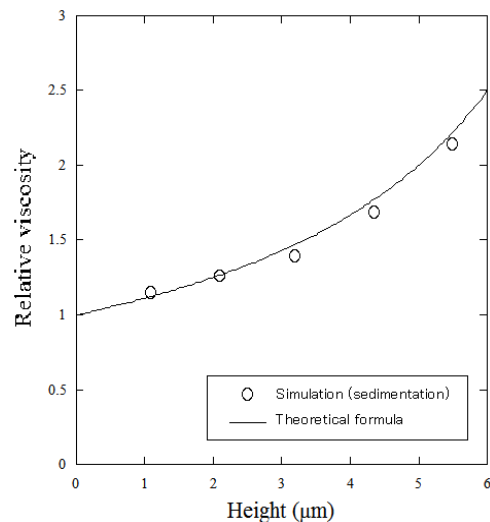


図1 粉体層と比粘度の関係

(2) マクロスケールの数値解析

高粘性流体のスラリー流れのマクロ挙動を効率よく計算するために、DEM-MPS法の高速度を図った。圧力項を陽的に計算して、粘性項を陰的に計算するアルゴリズムを採用した。まず、液相および固相の基礎式を示す。液相の基礎式は、連続の式およびナビエ-ストークス式であり、ラグランジュ的記述では、

それぞれ、

$$\frac{D(\mathbf{e}_f)}{Dt} + \mathbf{e}_f \nabla \cdot \mathbf{u}_f = 0$$

および

$$\frac{D\mathbf{u}_f}{Dt} = -\frac{1}{\mathbf{r}_f} \nabla p + \mathbf{n} \nabla^2 \mathbf{u}_f + \mathbf{g} - \frac{1}{\mathbf{e}_f} \mathbf{f}^s$$

のように表される。ここで、ここで、 ε 、 ν 、および f^s は、それぞれ、空隙率、流体の動粘度、および固体粒子-流体間相互作用力である。固相については、並進運動および回転運動は、それぞれ、

$$m_s \frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = \mathbf{F}^C + \mathbf{F}^d - V \nabla p + m_s \mathbf{g}$$

および

$$\dot{\omega} = \frac{\sum T}{I}$$

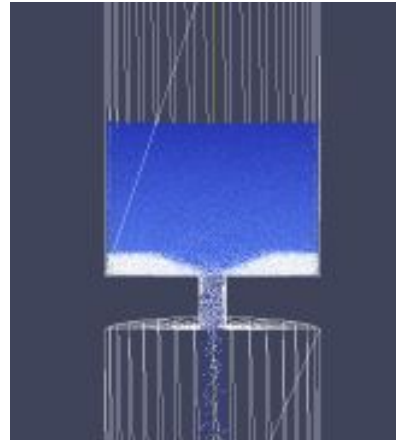
のように与えられる。ここで、 V 、 F^C 、 F^d 、 ω 、 T および I は、それぞれ、固体粒子の体積、接触力、流体抗力、角速度、トルクおよび慣性モーメントである。

本手法により、高粘性スラリー（固液混相流）の挙動を模擬できる。本研究で取り組んだ、研究事例を以下に示す。

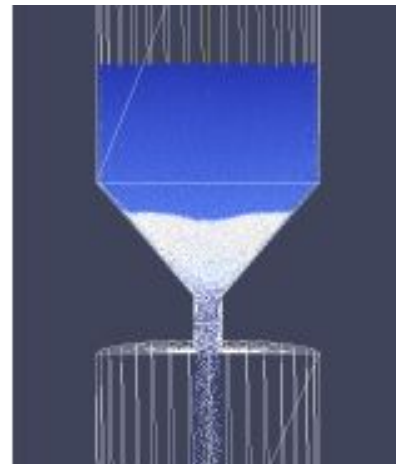
本研究では、ガラス溶融炉底部の流れを模擬するための3次元数値解析を実行した。本研究では、炉底斜度をパラメータとした3種類の数値解析を実行することとし、Case 1、Case 2 および Case 3 において、それぞれ、斜度を 0° 、 45° および 60° とした。炉の形状について、炉底の直径を20 cm とし、流下ノズルの口径を5 cm とした。固体粒子および流体粒子の個数は、それぞれ、20000 個および50000 個とした。固体粒子について、バネ定数を10000 N/m、固体粒子径を1.35 mm、密度を 8500 kg/m^3 とした。流体の初期粒子間距離（解像度に相当）を2.7 mm とし、流体の粘性を 0.04 Pa s 、流体の密度を 2500 kg/m^3 とした。ガラス溶融炉中に白金族粒子がランダムに沈降している状態を初期配置として設定した。高粘性スラリーを重力により排出させた。

図2に高粘性スラリーの流下時における典型的なスナップショットを示す。固体粒子と流体粒子が重力により下側に流動した。何れのケースにおいても、粉体層についてはfunnel flowのように上部中心箇所にくぼみが生じた。図2(a)のように、斜度が低い方が、粉体層の上部が大きくくぼんだ。図3に、固体粒子の排出量の時間変化を示す。斜度が 0° の場合、開始からしばらくすると、固体粒子があまり排出されなくなった。他方、斜度が 45° および 60° では、時間とともに、固体粒子の排出量が線形的に増加していった。また、斜度が大きい方が、固体粒子の排出量が多くなった。

今後、実際の溶融ガラスの抜き出しに応用していきたい。



(a) 斜度 0° (Case 1)



(b) 斜度 45° (Case 2)



(c) 斜度 60° (Case 3)

図2 流下の数値シミュレーション

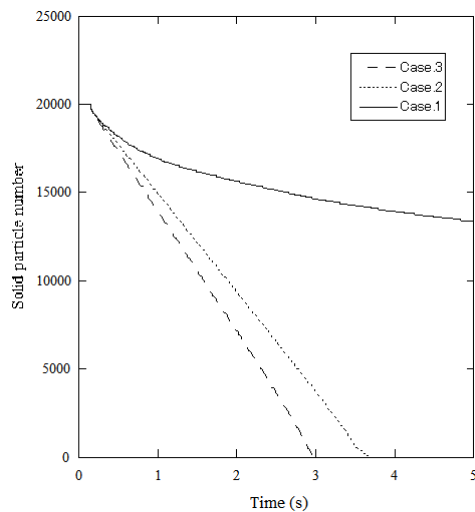


図3 流下による固体粒子の排出量

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 3 件)

- [1] M-T. Sakai, M. Sakai, Numerical simulation of an apparent viscosity of slurry by the DEM-DNS method, Singapore (InterContinental Hotel), 2013 Dec 11-13
- [2] 境正俊, 酒井幹夫, 白金族粒子の分散・沈降状態における溶融ガラスの見かけ粘度に関する数値シミュレーション, 日本原子力学会 2014 年春の年会, 2014 年 3 月 26 日～28 日, 東京都市大学, 東京 (2015)
- [3] 境正俊, 酒井幹夫, 白金族粒子を含む溶融ガラスの流下プロセスの数値シミュレーション, 日本原子力学会 2015 年春の年会, 2015 年 3 月 20 日～22 日, 茨城大学, 茨城 (2015)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 幹夫 (Mikio SAKAI)
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号: 00391342