

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02825

研究課題名(和文)高精度金型設計のための革新的粉体成形シミュレータの開発

研究課題名(英文) Development of an innovative powder molding simulator for high-precision die design

研究代表者

酒井 幹夫 (Sakai, Mikio)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：00391342

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)：申請者のグループで独自開発した、DEM粗視化モデルおよび符号付距離関数と埋込境界法を結合した壁境界モデル(薄板モデルを含む)が、粉末金型充填をはじめとする固気混相流体系に応用できることを理論的および実験的に示す。また、離散要素法で模擬した粉体の空間分布を反映した粉末圧縮シミュレーションを行うための計算手法を新たに開発する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

金型を用いた粉体成形プロセスを経て製造される製品は、数え上げたら枚挙に暇がない。今日の粉体成形技術(金型設計から運転条件検討まで)は、職人の経験に支えられている。技術伝承を円滑に進めるため、コンピュータシミュレーションの粉体成形技術への応用が期待されている。本研究では、試作品を製作しなくても高精度な金型設計が可能となる革新的なシミュレータを開発する。本研究成果は、粉末金型充填の運転条件の最適化や粉末成形の歩留まりの向上に役立てられる。

研究成果の概要(英文)：The coarse graining DEM and the wall boundary model (including the thin-wall model) combining the signed distance function with the signed distance function have been developed in the applicant's group. Through this project, applicability of the above models are proved in a gas-solid flow systems such as powder die filling. In addition, we have developed a numerical method for powder compaction, where the spatial distribution of solid particles can be taken into consideration.

研究分野：粉体シミュレーション

キーワード：離散要素法 粉体工学 粉体 粉末金型充填 シミュレーション 数値流体力学 DEM-CFD

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

粉体シミュレーションの産業応用は、化学工学や混相流に係わる工学の数値シミュレーション部門において国際的に極めて重要な研究テーマと認められている。近年の数値解析モデルの高度化と計算機の性能向上により、本研究テーマは今後もますます重要になることが予想される。本研究では、粉体シミュレーションの産業応用において波及効果の最も大きな粉体成形に注目する。今日の粉体成形技術（金型設計から運転条件検討まで）は、職人の経験に支えられており、技術継承が困難となることが指摘されている。粉末整形技術の技術伝承に係る問題を解決するために、粉体シミュレーションの粉体成形技術への応用が期待されている。粉体成形は、量産のための極めて重要な加工技術であり、ハイブリッド自動車用モーターおよび新幹線用ディスクブレーキパッドといった輸送機器の重要部品、半導体、原子燃料のような工業製品ばかりでなく、薬品、食品、などの幅広い分野にも応用されている。今日の粉体成形技術は職人の経験に支えられているが、試作品製作によるコスト増や職人の高齢化による技術継承の困難といった問題に直面している。これらの問題を解決するため、コンピュータシミュレーションの粉体成形技術への応用が期待されている。粉体成形において、重要になるプロセスは、粉末金型充填および粉末圧縮である。既存の計算技術では、粉末金型充填および粉末圧縮のシミュレーションにおいて課題があったため、実際の粉末成形に応用することが難しかった。そこで、本研究では、正確に粉末成形体を製造するための計算技術を開発する。

粉末金型充填は **Shoe-Die** システムより構成される。**Shoe** は粉末の供給ボックスであり、**Die** は金型である。従来の粉末金型充填のシミュレーションには、**Discrete Element Method**（以下、**DEM** と記す）が使用され、単純形状の **Die** 内の粉末充填率の検討がなされた。既存の粉末金型充填のシミュレーション技術は、**Shoe** が動かない状態しか空気の流動を考慮できない、莫大な数の固体粒子を計算できない、といった問題があったため、産業の粉末金型充填に応用することができなかった。粉末圧縮シミュレーションについては、既存の計算技術において金型充填後の固体粒子の空間配置が考慮できないという問題もあった。このように、粉体成形は産業で多用されているにもかかわらず、その計算技術は産業に応用できるレベルに到達していなかった。

### 2. 研究の目的

以上の研究背景より、本事業では、試作品を製作しなくても高精度な金型設計が可能となる革新的なシミュレータを開発する。研究代表者らの独自技術を組み合わせた新しい数値解析モデル、具体的には、(1)粉末金型充填を正確に模擬するためのシミュレーション手法、および(2)**DEM** で得られた固体粒子の空間配置を反映した粉末圧縮シミュレーション手法の応用を試みる。本章にて、研究方法の概要を示す。

### 3. 研究の方法

#### (1) 粉末金型充填シミュレーション手法

本事業では、粒子径が  $100\ \mu\text{m}$  程度で密度が比較的小さな固体粒子を対象とした粉末金型充填の数値シミュレーションを実行する。本事業で対象とする固体粒子の挙動を正確に模擬するにあたり、固体粒子と流体との相互作用をモデル化する必要がある。さらに、水平方向に移動する粉箱から固体粒子が金型に流入させるため、移動壁境界モデルを導入する必要がある。空気の影響を考慮した粉末金型充填の数値シミュレーションを実行するために、**DEM** と **Computational Fluid Dynamics**（以下、**CFD** と記す）を連成した固気混相流の数値シミュレーション手法（以下、**DEM-CFD** 法と記す）に、研究代表者のグループで独自開発した壁境界モデル（**Signed Distance Function**（以下、**SDF** と記す）と **Immersed Boundary Method**（以下、**IBM** と記す）を組み合わせた壁境界モデル）を開発した。本手法を **Advanced DEM-CFD** 法と名付けた。

さらに、産業用の大規模粉末金型充填の数値シミュレーションを実行するために、**Advanced DEM-CFD** 法に **DEM** 粗視化モデルを導入した（**Integrated DEM-CFD** 法）。**DEM** 粗視化モデルは、研究代表者が開発した **DEM** のスケーリング則モデルであり、オリジナル粒子群を大きなモデル粒子で代表して計算する手法である。**DEM** 粗視化モデルにより、実際よりも少ない粒子数で計算を実行することができる。

#### (2) 粉末圧縮シミュレーション手法

本事業では、**DEM** の計算結果に基づく固体粒子の空間分布を **Finite Element Method**（以下、**FEM** と記す）の初期条件として反映する粉末圧縮シミュレーション手法を開発した。粉末圧縮シミュレーションを実行するにあたり、商用ソフトウェア **ABAQUS** を用いた。

### 4. 研究成果

#### (1) 粉末金型充填シミュレーション手法

**DEM-CFD** 法に **SDF** と **IBM** を組み合わせた壁境界モデルを導入して、**Advanced DEM-CFD** 法を開発した。**Advanced DEM-CFD** 法が妥当であることを示すために、粉末金型充填体系において、数値シミュレーションおよび実験を公平な条件のもとで実行した。数値シミュレーションおよび実験の結果を比較したところ、粉体のマクロ挙動（空間配置など）が数値シミュレーションと実験でよく一致したことから、**Advanced DEM-CFD** 法が妥当であることが示された（Yao et al., J. Taiwan Inst. Chem. Eng. (2018)）。

産業用の大規模な粉末金型充填シミュレーションを実行するために、Advanced DEM-CFD 法に DEM 粗視化モデルを導入した (Integrated DEM-CFD 法)。Integrated DEM-CFD 法が粉末金型充填に応用できることを示すための数値実験を行った。数値実験では、Case 1-1 はオリジナル体系であり、Case 1-2 は粗視化率 2 倍の体系であり、Case 1-3 は粗視化率 3 倍の体系であり、Case 1-4 は DEM 粗視化モデルを使用せずにただ単に Case 1-1 の 3 倍大きな固体粒子の体系である。図 1 に数値実験の結果を示す。DEM 粗視化モデル (Case 1-2 および Case 1-3) を用いると、実際よりも大きな計算粒子を用いても、オリジナル体系 (Case 1-1) の固体粒子のマクロ挙動を模擬できることが示された。また、Case 1-3 と Case 1-4 の計算結果を比較すると、両ケースにおいて計算粒子径が同じであるにもかかわらず、DEM 粗視化モデルを使用しないと、Case 1-1 の個体粒子のマクロ挙動を再現できないことが示された。このようにして、数値実験を通して、粉末金型充填体系において DEM 粗視化モデルがオリジナル体系を精度良く模擬することができたため、Integrated DEM-CFD 法が妥当であることが示された (Widartiningsih et al., Powder Technol. (2020))。

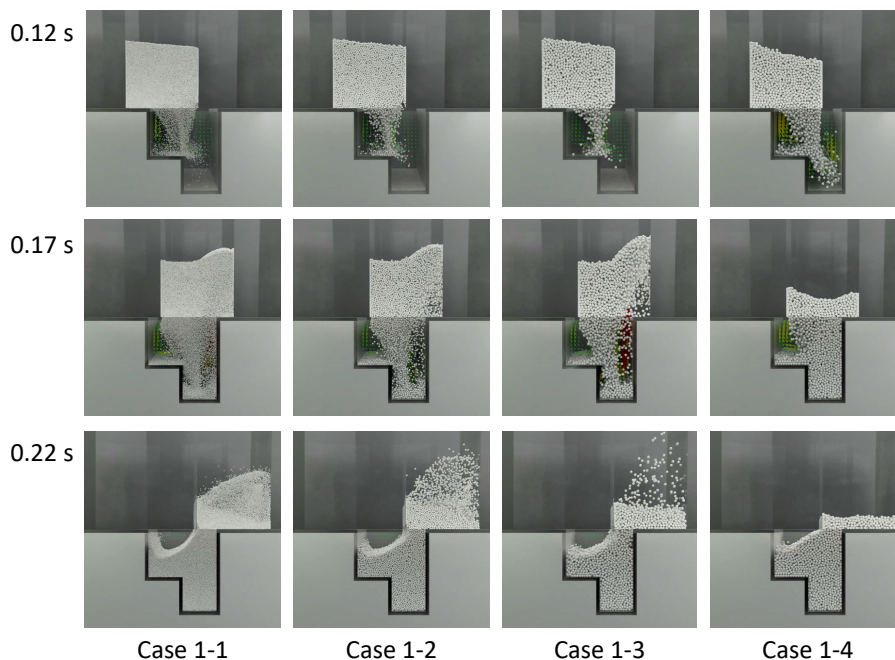
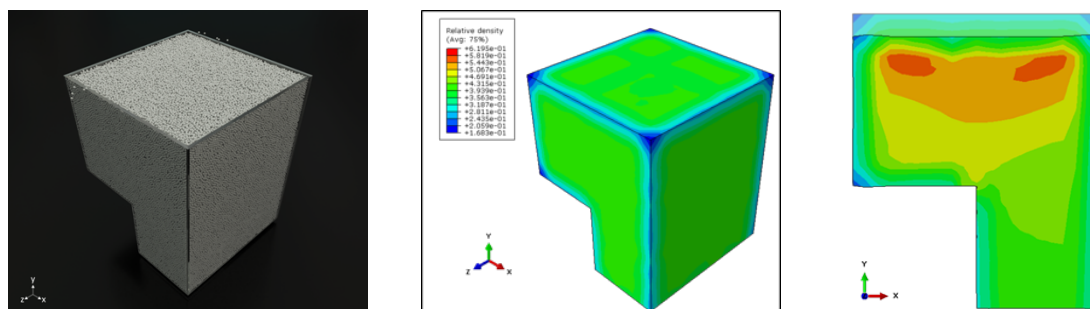


図 1 粉末金型充填体系における DEM 粗視化モデルの妥当性検証

## (2) 粉末圧縮シミュレーション手法

Integrated DEM-CFD method の数値シミュレーションは、固体粒子の流動を模擬する計算手法であるため、原理上、粉末圧縮のような構造解析に応用することはできない。そこで、Integrated DEM-CFD method 法の計算結果を FEM の初期条件 (密度) に反映する計算手法を開発した (図 2 (a) および (b))。本事業では、構成方程式として、Drucker-Prager Cap モデルを使用した。本モデルを用いて、粉末圧縮シミュレーションを行ったところ、粉末の密度を定性的に正しく模擬することができた (図 2 (c))。



(a) DEM の計算結果 (空間分布) (b) DEM を反映した FEM の初期条件 (c) 粉末圧縮シミュレーション

図 2 DEM と FEM を接続した粉末圧縮シミュレーション

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 酒井幹夫	4. 巻 32
2. 論文標題 事例から学ぶ粉体シミュレーションの活用術	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 混相流	6. 最初と最後の頁 314-320
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.3811/jjmf.2018.T005">https://doi.org/10.3811/jjmf.2018.T005</a>	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 酒井幹夫	4. 巻 33
2. 論文標題 固体 - 流体連成シミュレーション：. マクロスケール・ミクロスケール体系の計算手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 エアロゾル研究	6. 最初と最後の頁 162-167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11203/jar.33.162	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yao Huaqin, Mori Yuki, Takabatake Kazuya, Sun Xiaosong, Sakai Mikio	4. 巻 90
2. 論文標題 Numerical investigation on the influence of air flow in a die filling process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers	6. 最初と最後の頁 9~17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jtice.2017.11.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mori Yuki, Takabatake Kazuya, Tsugeno Yoshiharu, Sakai Mikio	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 On artificial density treatment for the pressure Poisson equation in the DEM-CFD simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.116">https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.116</a>	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Widartiningsih Putri Mustika, Mori Yuki, Takabatake Kazuya, Wu Chuan-Yu, Yokoi Kensuke, Yamaguchi Akira, Sakai Mikio	4. 巻 371
2. 論文標題 Coarse graining DEM simulations of a powder die-filling system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 83 ~ 95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.063">https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.063</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Takabatake Kazuya, Sakai Mikio	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Flexible discretization technique for DEM-CFD simulations including thin walls	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.017">https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.017</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakai Mikio, Mori Yuki, Sun Xiaosong, Takabatake Kazuya	4. 巻 37
2. 論文標題 Recent Progress on Mesh-free Particle Methods for Simulations of Multi-phase Flows: A Review	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 KONA Powder and Particle Journal	6. 最初と最後の頁 132 ~ 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) <a href="https://doi.org/10.14356/kona.2020017">https://doi.org/10.14356/kona.2020017</a>	査読の有無 有
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22件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 Key technologies for industrial granular flow simulations
3. 学会等名 2nd International Symposium on Computational Particle Technology & 13th International Conference on CFD 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森勇稀, 酒井幹夫
2. 発表標題 大規模固気混相流シミュレーションのため計算安定化手法開発
3. 学会等名 粉体工学会 第53回技術討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井幹夫
2. 発表標題 粉体・混相流シミュレーションの進展
3. 学会等名 化学工学会 第50回秋季大会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Yao, 酒井幹夫
2. 発表標題 Verification of coarse-grained DEM-CFD simulations in die filling process
3. 学会等名 粉体工学会 第53回技術討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高畑和弥, 酒井幹夫
2. 発表標題 狭間隙流路における固体 流体連成シミュレーション
3. 学会等名 化学工学会 第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuaqin Yao, Mikio Sakai
2. 発表標題 Computational modeling for industrial die filling processes
3. 学会等名 化学工学会 第49回秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuaqin Yao, Mikio Sakai
2. 発表標題 Application of the DEM-CFD method to a die filling process
3. 学会等名 化学工学会 第83年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuaqin Yao, Mikio Sakai
2. 発表標題 Application of the DEM-CFD method on die filling for fine particles
3. 学会等名 The 6th International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuya Takabatake, Mikio Sakai
2. 発表標題 Numerical Study on a Gas-Solid Flow in an Arbitrary Shape Boundary Including Thin Plates
3. 学会等名 2018 AIChE Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井幹夫
2. 発表標題 粉体シミュレーション技術とその未来展望
3. 学会等名 粉体工業展大阪2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井幹夫
2. 発表標題 粉体・混相流の数値シミュレーションにおける革新的要素技術の開発
3. 学会等名 粉体工学会秋期研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井幹夫
2. 発表標題 最先端粉体シミュレーション技術の医薬品製造工程への応用
3. 学会等名 製剤機械技術学会第29回大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Putri, 高畑和弥, 森勇稀, 酒井幹夫
2. 発表標題 Numerical study on the DEM-CFD method for die-filling
3. 学会等名 化学工学会横浜大会2019
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 R. Yokoyama, M. Sakai
2. 発表標題 DEM-CFD SIMULATION FOR POWDER FILLING IN A MULTI CAVITY DIE
3. 学会等名 PGBSIA 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 On signed distance function based wall boundary model in the DEM simulation
3. 学会等名 PGBSIA 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 State-of-the-art modeling for DEM simulations toward virtual manufacturing
3. 学会等名 APCOM2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 Innovative granular flow modeling for industrial systems
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 Development and application of innovative discrete element modelling for industrial systems
3. 学会等名 UK-China International Particle Technology Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 DEM simulations for pharmaceutical engineering
3. 学会等名 DEM 8 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 Development and Application of Flexible Eulelian-Lagrangian Method for Industrial Gas-Solid Flow Systems
3. 学会等名 Fluidization XVI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 Recent progress on industrial DEM simulations: challenges and opportunities
3. 学会等名 International Powder and Nanotechnology Forum 2019, INCHEM TOKYO 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sakai
2. 発表標題 Development and applications of the discrete element method for food and pharmaceutical industries
3. 学会等名 The 2nd International Conference and Exhibition on Powder Technology Indonesia (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----