

平成 31 年 5 月 3 日現在

機関番号：33907

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06816

研究課題名(和文) 湿潤粉粒体モデリングを用いた粒度分布適正化による生砂型の高強度化

研究課題名(英文) High-Performance Green Sand Mold made by Particle Sand Distribution Controlled using Green Sand Particle Modeling

研究代表者

前田 安郭 (Maeda, Yasuhiro)

大同大学・工学部・教授

研究者番号：10240813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：生砂型成型シミュレーションは、砂型設計と制御において有用なツールであり、開発ニーズが高まっている。本研究では、生型砂特性を考慮してスクィーズ成型シミュレーションを実施した。特に、生型砂の特性である粒径分布と粘着力をモデル化した。開発したモデルを用いて数種類の生型砂のシミュレーションを実施することで、実際の粒度分布から離散要素への同定法が、DEMを用いた成形シミュレーションに有用であることを示した。またスクィーズ成型時の空隙率とスクィーズ圧力の関係を明らかにした。生型砂層の圧密挙動に及ぼす粒度分布の影響もまた明らかにされた。また、砂型充填挙動の3次元可視化が有効であることも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鑄鉄鑄物で使用される生砂型の成型に対して有用な成型シミュレーションを開発している。特に、粒度分布の重要性を示唆するとともに、粘着力を考慮するモデルを開発している。本研究で開発された解析モデルは、生型砂のみならず、自硬性鑄型、シェル鑄型の主型へ、また中子成型へも展開が容易に推測される。現在の日本は、高品質な鑄造製品を大量かつ安価に製造する技術で世界の優位に立っているが、今後はコンピュータを活用したモノづくりが求められており、本研究成果は非常に有意義であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Sand molds making simulation is useful tool for designing and controlling for the sand molding, so the demand for molding simulation is increasing. In the present study, the squeeze molding simulation are carried out considering the green sand properties. Especially, the characteristics of green sand with particle size distribution and cohesion are modeled. From the simulation with several kinds of sands using proposed model, the identification method from a real particle size distribution to the discrete element is useful for molding simulation using DEM. As a result, it was clear that the relationship between the void fraction and the compacting pressure during squeeze molding was clarified. The influence of the particle size distribution on the compacting behavior of the molding sand layers was also clarified. Further, the three-dimensional visualization of the green sand molding was shown in the present study.

研究分野：鑄造工学

キーワード：離散要素法 スクィーズ成型 粒度分布 空隙率 シミュレーション 粘着力

1. 研究開始当初の背景

- (1) 従来は造型プロセスの新規開発や造型方法の検討により鋳型の高強度化が計られてきた。一方で、生型砂の造型プロセスは粉粒体の圧密充てん挙動であり、粒度分布の重要性も一部で示唆されていたが、実務上で粒度分布を制御することは困難であり、十分な研究成果は見当たらない。
- (2) 粒度分布の違いによる圧密化メカニズムを解析する方法として、改良型 Cooper-Eaton 式による実験解析が報告¹⁾⁻³⁾されている。この手法を用いれば異なる粒度分布や粘結剤が圧縮充てんに及ぼす影響を定量的に評価できる。
- (3) 鋳鋼鋳物を中心に人工セラミック砂を骨材とする生砂型の活用が進んでいる。高温強度が高いことを利点として登場した人工セラミックス砂であるが、従来の珪砂に比べシステムサンドとしてリサイクル性が高いこと、工場の粉塵が少なく環境や作業者に優しいことなどの利点から、現在では鋳鉄鋳物に対してもその普及が進んでいる。人工的につくる砂であるがゆえに、粒度分布などの調整が可能であると考えられる。
- (4) 申請者らは、生砂型の骨材と被覆している粘結層を Hard-Core/Soft-Shell で表現する湿潤粉粒体モデリングを提案し、個別要素法 (DEM : Discrete Element Method) を用いてシミュレーションを報告^{1),3)-7)}している。開発当時は PC 性能が乏しく十分な性能を示すことが出来なかったが、現在では CPU 性能アップ、大容量メモリ化、マルチコア化、GPGPU により、実用的な粒度分布や粘結力を考慮できると考えられ、大手ベンダーをはじめ DEM による造型シミュレーションの開発が進みつつある。本分野の DEM の先駆者としてさらに研究を発展させて業界に貢献したいと考える。

2. 研究の目的

本研究では、従来はコスト面から制御しようと考えなかった粒度分布に着目し、高強度な生砂型を得るための粒度分布の形態、その適正化について検討を行う。申請者らが報告している湿潤粉粒体モデリング HCSS (Hard-Core/Soft-Shell) は、生型砂特性である粘着力と粒度分布を考慮できるオリジナル方法であり、砂粒子の追跡には、離散要素法 (DEM : Discrete Element Method) を用いる。これにより、粒度分布形態を変化させる新砂によるラボ実験で基礎調査と開発を行う。これにより次世代の高強度生砂型を造型できる環境が構築できると考える。

3. 研究の方法

実際の多段階の粒度分布を考慮して砂層圧縮シミュレーションが出来るように湿潤粉粒体モデリングを改良し、数値解析を駆使して高強度砂型を構成できる粒度分布を模索する。具体的な進め方として、

- (1) 従来の湿潤粉粒体モデリング (Hard-Core/Soft-Shell) を高機能化する。生型砂に対応する必要機能の厳選し、実際の粒子サイズ及び粒度分布形態を離散要素に同定する方法を確立する。
- (2) 骨材、平均粒子サイズ、粒度分布、生型砂特性としてのコンパクタビリティ (CB) 値が変化したときの圧縮充填挙動の経時変化を測定出来る実験装置を準備し、充填挙動の実験解析を行う。
- (3) 実験で得られた圧縮挙動を、粒子再配列による充填挙動と粘着層の変形による充填挙動に分離し、それらの挙動をシミュレートできるパラメータについて調査し、同定を行う。
- (4) 従来の離散要素法シミュレーションを高機能化する。多数個対応処理の導入、並列化処理の導入による高速化、またポスト処理として、3D 表示機能の導入を行う。
- (5) 高強度鋳型を得るための適正な粒度分布を検討し、また実造型ラインのシステムサンドに展開を模索する。

4. 研究成果

- (1) 湿潤粉粒体モデリングと DEM シミュレーションの高度化

従来のモデリング手法とシミュレーション方法を検討し、現在の計算機使用に合わせた仕様にバージョンアップさせた。Fig.1 に本研究で採用した HCSS (Hard-Core/Soft-Shell) モデルを示す。接触力は、ばねとダッシュポットの並列配置とし、生型砂のオーリチック層を模擬した二重構造となっている。

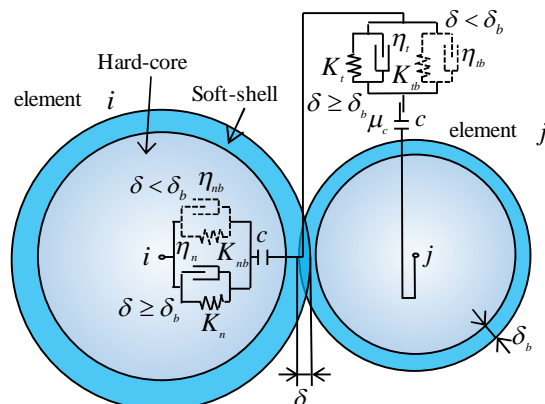


Fig.1 Hard-Core/Soft-Shell model for green sand.⁷⁾

- (2) 粒度分布の同定
実際の粒度分布を、DEM シミュレーションを行うための離散要素に同定した結果の 1 例を Fig.2 ~ Fig.5 に示す。骨材には、珪砂、人工セラミック砂 #650、#950、人

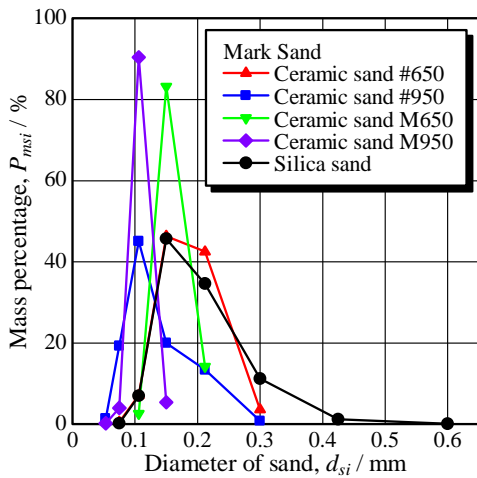


Fig.2 Particle size distribution by mass percentage of sand used in experiments. ⁷⁾

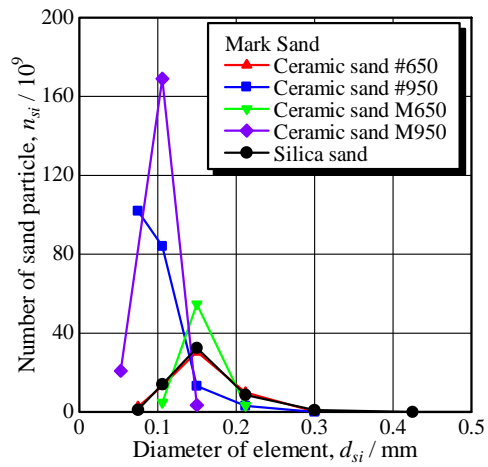


Fig.3 Particle size distribution by number percentage of sand used in experiments. ⁷⁾

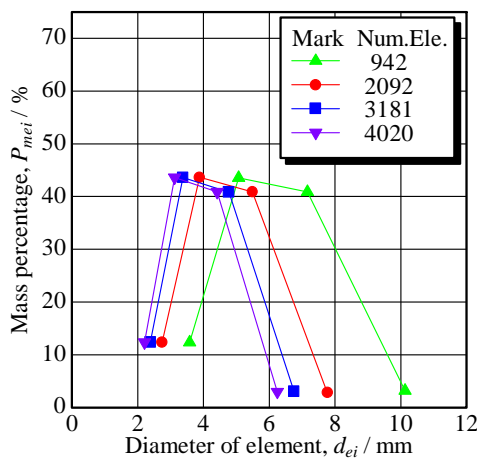


Fig.4 Element size distribution changing with total number of elements for ceramic sand #650. ⁷⁾

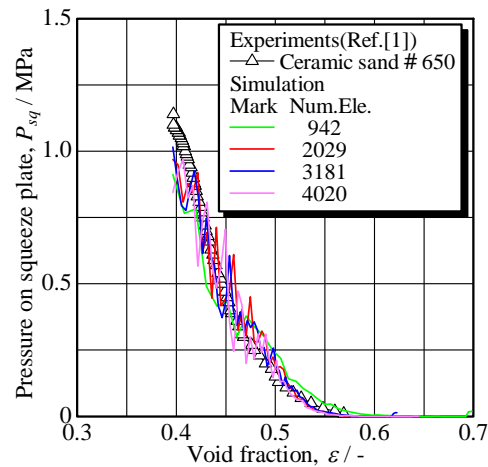


Fig.5 Compacting pressure on squeeze plate P_{sq} changing with total number of elements. ⁷⁾

工セラミックス砂で粒度分布の広がりを抑えた mono-size650(M650)、M950 の 5 種類を示してある。砂粒子の通常の質量粒度分布を Fig.2 に示す。これを開発した粒度分布同定方法で同定を行うと Fig.3 の離散要素の粒度分布に同定できる。なおこの例は約直径 0.1mm の実粒子を約直径 3mm の離散要素に同定した例である。同定倍率を固定することで、砂粒子の大小関係、分布の広がりを適確に再現できていることがわかる。

またセラミックス砂#650 を、4 種類の大きさの離散要素(942、2092、3181、4020 個)に同定したときの結果を Fig.4 に示す。粒度分布の広がり形状を近似した状態で、粒径が変化していることがわかる。この離散要素を用いたときのスクイズ成型時の圧縮挙動が Fig.5 であり、同定した離散要素のサイズが変わっても同じ挙動を示していることがわかる。これにより本同定方法の汎用性が示せた。

(3) スクイズ圧縮挙動

スクイズ圧縮挙動のシミュレーション結果の 1 例を Fig.6 に示す。図は本研究で得られた人口セラミックス砂#650 と#950 を骨材とする生型砂の挙動である。なお、実験

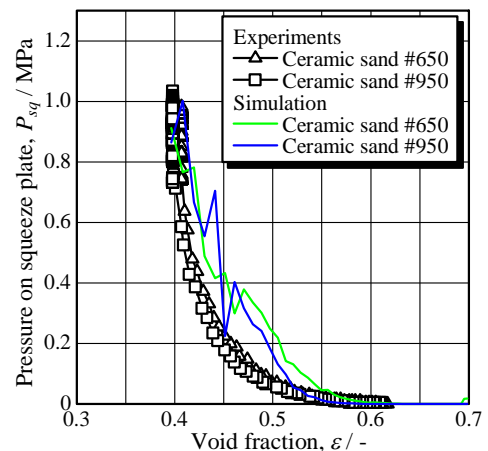


Fig.6 Comparison of compacting behavior between experiment and simulation in the case of ceramic sand #650 and #950. ⁷⁾

では再現性を考慮して3回以上の平均的な挙動を、シミュレーションでも粒度分布のロット内変化を考慮して乱数により初期配置をランダムに変更して計算しており、その5回平均値で示してある。図より充填初期の粒子再配列による充填での傾きと、後半の粘着層の変形による充填挙動の違いが明確に表れており、シミュレーションの有効性が示せた。

一方で、粒度分布の広がりがある場合と無い(狭い)場合についても検討したが、文献⁶⁾と異なり、粒度分布の広がりが充填挙動に影響を及ぼさない結果となった。シミュレーションのみならず実験でも同じ結果であった。原因を追及したところ、スクイーズ圧縮スピードの影響と考えられた。現在の短時間の造型工程を鑑みると、スクイーズ速度は高速側に移行しつつあり、これに対応した造型シミュレーションを開発する必要性が示唆された。この問題については引き続き検討するとともに、適応した開発を進めていく。

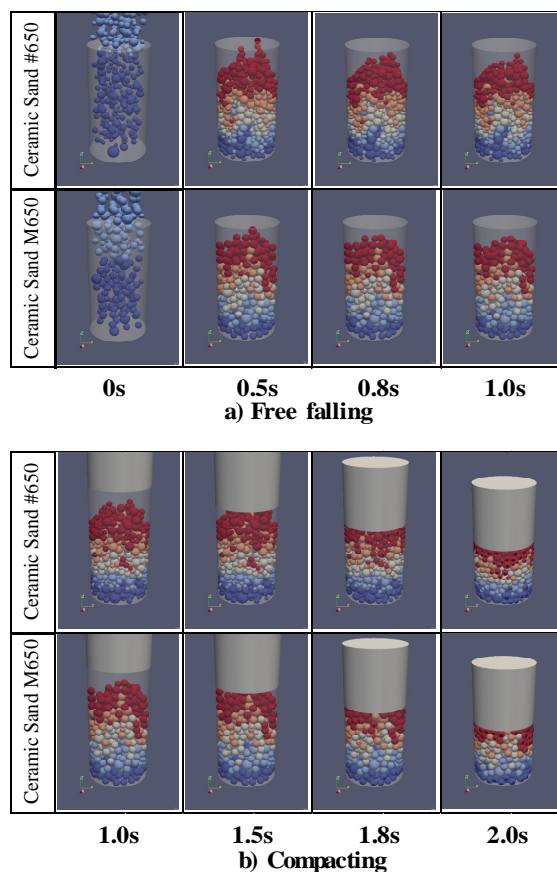


Fig.7 Three-dimensional visualization for ceramic sand #650 and mono-size M650 by ParaView.⁷⁾

- (4) ポスト処理における3次元可視化砂粒子の充填挙動を視覚的に捉えるためにポスト処理において3次元可視化技術を導入した。Fig.7にParaViewを用いた自由落下とスクイーズ圧縮の充填挙動結果を示す。3次元表示が可能となることで、砂粒子が混合することなく充填していく様子が観察できるようになった。

参考文献

- 1) 前田安郭：砂・鋳型におけるシミュレーションの現状とこれから、素形材技術セミナー「鋳物砂の現状とこれから —鋳物砂の現状とこれからの鋳型の方向性を考える—」(2014), 67-72
- 2) 陳秀萍, 野村宏之, 前田安郭：Cooper-Eaton 式による各種生型砂の圧縮機構の解析, 鋳造工学, 75(2003), 35-41
- 3) X. Chen, Y. Maeda and H. Nomura : “A Novel Method to Evaluate Green Sand Compaction Process”, Proc. of The 65th World Foundry Congress, Gyeongju(2002), 783-792
- 4) Y. Maeda, Y. Maruoka, H. Makino and H. Nomura : “ Squeeze Molding Simulation Using The Distinct Element Method Considering Green Sand Properties ”, Journal of Materials Processing Technology, 135(2003), 172-178
- 5) 前田安郭, 丸岡洋介, 牧野泰育, 野村宏之：粒度分布を考慮した離散要素法によるスクイーズ圧縮シミュレーション, 鋳造工学, 75(2003), 108-114
- 6) 前田安郭, 牧野泰育, 野村宏之：3次元離散要素法による生型砂のスクイーズ造型シミュレーション, 鋳造工学, 75(2003), 102-107
- 7) Yasuhiro Maeda, Yuuka Ito, Shingo Yoshida and Hiroyasu Makino : “Effects of Green Sand Particle Distribution on Squeeze Compacting Behavior Analyzed by Discrete Element Method”, International Journal of Metalcasting, Online, DOI 10.1007/s40962-018-0284-6

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

- 1) Yasuhiro Maeda, Yuuka Ito, Shingo Yoshida and Hiroyasu Makino : “Effects of Green Sand Particle Distribution on Squeeze Compacting Behavior Analyzed by Discrete Element Method”, International Journal of Metalcasting, 査読有, Online, 1-7
DOI: 10.1007/s40962-018-0284-6
- 2) Y. Ito and Y. Maeda : ” Three-Dimensional Modeling of Green Sand and Squeeze Molding Simulation”, Material Science Forum, 査読有, (2018), Vol.925, 473-480
DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.925.473

〔学会発表〕(計5件)

- 1) Y. Ito, S. Yoshida, Y. Maeda and H. Makino : “Effects of Green Sand Particle Size Distribution on Squeeze Compacting Behavior Analyzed by Discrete Element Method”, Proc. of The 73rd World Foundry Congress, Krakow (2018), 335-336
- 2) Y. Ito and Y. Maeda : “Three-Dimensional Modeling of Green Sand and Squeeze Molding Simulation”, International Symposium on The Science and Processing of Cast Iron SPXI-XI, Jonkoping(2017), September
- 3) 前田安郭 : “生型砂造型のつき固め機構の解明と湯流れ・凝固に関する鋳造 CAE”, 日本鋳造工学会, 第 172 回全国講演大会概要集, (2018), 88
DOI: 10.11279/jfeskouen.172_88
- 4) 吉田信吾, 伊藤由華, 前田安郭 : “粒度分布を考慮した離散要素法(DEM)を用いたスクィーズ圧縮シミュレーション”, 日本鋳造工学会, 第 171 回全国講演大会概要集, (2018), 40
DOI: 10.11279/jfeskouen.171_40
- 5) 吉田信吾, 伊藤由華, 前田安郭 : “生型砂のスクィーズ造型における充填シミュレーション”, 日本鋳造工学会東海支部, 東海 YFE フォーラム, (2017)

6. 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：牧野 泰育

ローマ字氏名：(Makino Hiroyasu)

研究協力者氏名：伊藤 由華

ローマ字氏名：(Ito Yuuka)

研究協力者

研究協力者氏名：吉田 信吾

ローマ字氏名：(Yoshida Shingo)

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。