

令和元年6月6日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06081

研究課題名(和文) 高濃度固気二相流における粗大粒子の運動(離散粒子モデルと高速MRIによる検討)

研究課題名(英文) Large solid motion in dense gas-solid two-phase flows (discrete particle simulation and real-time MRI measurement)

研究代表者

辻 拓也(Takuya, Tsuji)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：90379123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：流動層に代表される高濃度固気二相流中に投下された粗大な固体粒子の運動は、周囲の媒体小粒子や流動化ガスの影響を受け大変複雑である。本研究では、独自に開発した離散粗大粒子モデルによる数値シミュレーションと、リアルタイム計測が可能な核磁気共鳴画像法(MRI)による実験により、粗大粒子運動の詳細な観察と現象の解明を試みた。特に、最小流動化速度未満の通気粉体層中における粗大球の特異沈降現象に着目した。球密度が層のみかけ密度に近いと、球近傍において気泡の発生を伴う局所流動化が起こり、球表面から気泡が離脱する際の流体力のわずかな減少が、球の緩慢でより深い特異的な沈降を引き起こしていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気流中に高濃度で固体粒子が分散した高濃度固気二相流は、自然現象や種々の産業装置中に見られる。高濃度固気二相流中に投下された粗大粒子の運動は、大変複雑であるが、高い粒子濃度のため観察自体が困難であり、従来その詳細についてはよくわかっていなかった。本研究では、独自に開発した離散粗大粒子モデルによる数値シミュレーションと、高速MRI計測による実験を併せて実施することにより、高濃度固気二相流中の粗大粒子の運動や周囲の流れについて“見える化”を行い、詳細な観察とこれに基づく現象の理解促進を試みた。本研究の成果は、将来的には高濃度固気二相流が関係する産業装置の最適な設計や運用につながるものである。

研究成果の概要(英文)：The motion of large solid objects in dense gas-solid flows such as fluidized bed is highly complex due to the influence of surrounding medium particles and gas. In this study, by using numerical simulation based on an original discrete coarse particle model together with nuclear magnetic resonance imaging (MRI) that enables the real-time measurement of granular motions, detailed observation and elucidation of the underlying physics behind the object motions were conducted. Specifically, we focused on the anomalous sphere sinking phenomenon in a particle bed aerated under but close to the minimum fluidization velocity. When the sphere density is close to the apparent density of the bed, local fluidization with bubble formations was observed around the sinking sphere. We revealed that small attenuation of upward fluid force occurring at the moment of bubble detachments from the sphere surface is responsible for the slower and deeper sinking of the sphere.

研究分野：流体工学，粉体工学

キーワード：離散粒子シミュレーション MRI 固気二相流 流動層 浮沈 DEM-CFD 粉体

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

気流中に固体粒子が分散した固気二相流は、相間に流体力学的な相互作用を伴う。固体粒子濃度が高くなるにつれ、流体力学的相互作用に加えて粒子-粒子間の衝突や接触の影響が顕著となり、その振る舞いは大変複雑となる。このような高濃度固気二相流は火砕流、雪崩、砂嵐などの自然現象として、またエネルギー分野における流動層式燃焼炉やガス化炉、化学工学分野における触媒反応炉や乾燥炉、環境分野における固体分離装置やゴミ焼却炉、製薬・食品分野における造粒装置などの産業装置中において広く見られる。これらの各種応用において、固体粒子のサイズが均一であることはほとんどなく、比較的大きい固体粒子（今後、粗大粒子と記す）と、流動化や伝熱を促進するための媒体粒子（今後、小粒子と記す）が混在することが多々ある。粗大粒子-媒体小粒子間のサイズ比が十分に大きいと、粒子サイズに応じて粒子が空間的に偏る現象である“偏析”などの特徴的な現象が起こることが知られているが、高濃度固気二相流中の粗大粒子の運動は大変複雑であり、浮くのか沈むのかという単純な疑問にも答えることは容易ではない。これは実際の装置設計を考える際に重要なだけでなく、物理的にも興味深い問題である。

高濃度固気二相流において、吹き込む気流流速を徐々に増加させると、あたかも氷（固体）から水（液体）に相変化するかのようになり、固体粒子相は周囲の粒子との接触により拘束された“固体的振る舞い”から、接触から解放され流動化する“流体的振る舞い”へと大きくその力学的な状態が変化する。実際の流れは、不均一かつ不安定であり、局所的かつ非定常的に“固体的”⇔“流体的”変化が盛んに起こっているものと考えられる。高濃度固気二相流に添加した粗大粒子に働く流体力・接触力や、その結果起こる運動を考える際にも、周囲の媒体小粒子相の力学特性状態が大きく影響していると推測されるが、これまで層内の状態を局所的に直接観察する手段が存在しなかったため、その詳細については不明なままである。

2. 研究の目的

本研究では、独自に開発した粗大粒子モデルによる数値シミュレーション[1]と、リアルタイムでの観察が可能な高速MRI[2]による実験を併せて実施することにより、これまで観察自体が困難であった高濃度固気二相流中の粗大粒子の運動と周囲の局所的な流れとの関係について詳細な調査を行い、現象をより深く理解することを目的とした。本研究では、特に最小流動化速度未満で通気した粉体層における粗大粒子の特異沈降現象に着目した。

3. 研究の方法

これまでの研究において、本研究で対象とする高濃度固気二相流中の粗大粒子運動を表現できる計算モデルを提案した[1]。本モデルの最大の特徴は、図1に示すように流体計算に使う計算格子サイズ Δx が媒体小粒子 $d_{particle}$ より大きく、同時に粗大粒子 d_{object} より小さい点にある。これにより、媒体小粒子スケールのミクロな流れを直接考慮しないことにより計算コストを抑えつつ、一方で粗大粒子スケールの流れについては直接解像するため、粗大物体の運動と周囲の流れの関係を直接検討可能である。本モデルはいわゆる離散粒子モデルに分類され、粗大粒子・媒体小粒子共に離散的に取り扱っているため、時々刻々と変化する流れ場や粗大粒子に働く力や運動の詳細を取得することが可能である。

高濃度固気二相流では、粒子濃度が極めて高いため、実験において従来から流体計測に用いられてきた光学的手法を用いることは困難である。一方で、流れ中へ計測用のプローブ等を挿入すると流れ場を乱す可能性があり、あまり得策ではない。本研究では、非侵襲計測法の一種であり、任意断面における情報を、観察対象を乱すことなく取得可能な核磁気共鳴画像法(MRI)

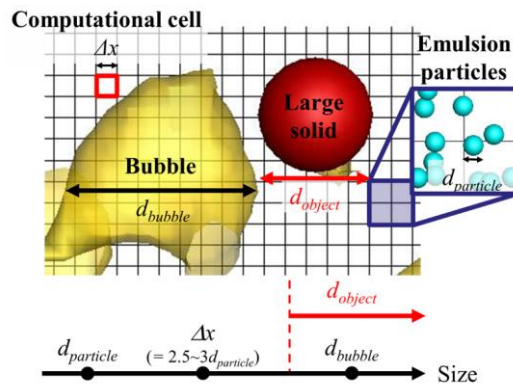


図1 粗大粒子モデルにおけるサイズ関係

に着目した。これまでも、この種の問題に MRI は適用されてきており、大きな成果をあげてきているものの(たとえば[3]),従来の MRI 計測には時間分解能が低いという大きな問題があった。後に述べるが、高濃度固気二相流中の粗大粒子の運動を考えるには、粗大粒子近傍の非定常な流れを考えることが重要であり、これは大きな問題である。本研究では、この問題を解決するために、これまでスイス連邦工科大学チューリッヒ校との共同研究により検討を進めてきたリアルタイム計測が可能な高速 MRI 手法[2]を採用することにより、この問題を解決した。

4. 研究成果

(1) 最小流動化速度未満の通気粉体層中における粗大粒子の特異沈降現象の解明

粒子層に通気するガスの流速を徐々に増加させていくと、あるところで粒子群に働く重力と流体力が釣り合う。一般的に、この時点のガス流速は最小流動化速度と呼ばれる。Oshitani ら [4]は、最小流動化速度未満で通気した粉体層において、密度の異なる粗大粒子の沈降挙動に関する実験を行い、粗大球の密度が粒子層の見かけ密度に近いと、より密度が大きい粗大球より緩慢に深く沈降する特異沈降現象を発見した。本現象は、乾式の固体粒子分離技術として活用することが期待されるが、粒子層内部の状態を観察することが困難であり、その詳細についてはよくわかっていなかった。本研究では、数値シミュレーションと高速 MRI 計測を併用することにより、特異沈降メカニズムの解明を試みた。数値シミュレーション、高速 MRI 実験共に、内径 190mm の 3 次元円筒容器に平均粒径 1.02mm の粒子を充填させ、下方から通気した。層中央において密度を変化させた直径 40mm の単一の粗大球を投下した。以下に、観察結果と得られた知見の概要を示す。

- (a) 高速 MRI によって得られた沈降停止後の層中央断面像を図 2 に示す。離散粒子数値シミュレーション・高速 MRI 実験のいずれにおいても、Oshitani らの実験[4]と同様に、粗大球の密度が層の見かけ密度に近いと、緩慢に深く沈降することを確認した。
- (b) 最小流動化速度未満であっても、粗大球周りで気泡の発生・離脱を伴う局所流動化が起こることを確認した。図 3 に、高速 MRI 実験・数値シミュレーション双方において、気泡が離脱する瞬間を捉えた画像を示す。高速 MRI 計測による結果は、空間分解能 $2.5 \times 2.5 \times 10$ mm, 時間分解能 45 msec にて行ったものであり、本手法を用いることにより高濃度固気二相流中における個々の気泡の発生・離脱過程を詳細に観察することが可能である。

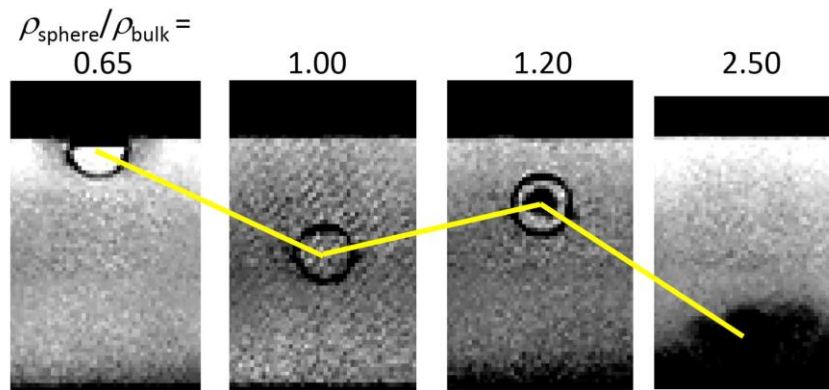
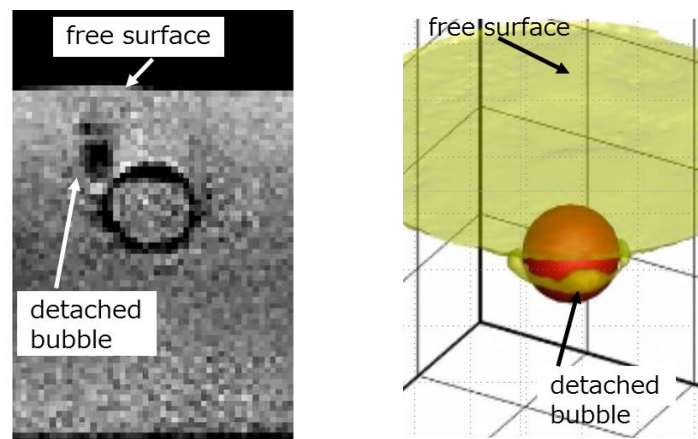


図 2 高速 MRI によって得られた粗大球停止位置での画像



(a) MRI experiment

(b) Calculation

図 3 粗大球表面から離脱する気泡（球密度が層の見かけ密度に近い場合）

- (c) 粒子層上部より投下された粗大球は、粒子層に貫入した後一旦静止し、その後緩慢な沈降を開始する。粗大球は、緩慢な沈降開始後、最終的には密度に応じてある深さに至った時点で停止する（図 2）。
- (d) 離散粒子シミュレーションにおいては、粗大球に働く力を、重力、流体力、媒体小粒子との接触力に分離して検討することが可能である。緩慢な沈降が開始した後は、粗大球に働くこれらの力がほぼ釣り合っている。
- (e) 緩慢な沈降中は、粗大球表面近傍からの気泡の発生・離脱が繰り返され（図 3）、停止後明確な気泡の離脱は見られなくなる（図 2）。
- (f) 気泡挙動と粗大球に働く鉛直方向力の関係を調べたところ、気泡が離脱する際に、鉛直上向きの流体力がごくわずかであるが緩和され、鉛直方向力の作用力のバランスが崩れる。緩慢な沈降中は、気泡の発生・離脱が繰り返されることにより、粗大球の緩慢な沈降が起こる。
- (g) 粗大球密度が十分に大きい場合は、粗大球近傍において気泡の発生や離脱は起こらない。沈降メカニズムが、球密度によって異なると推測される。

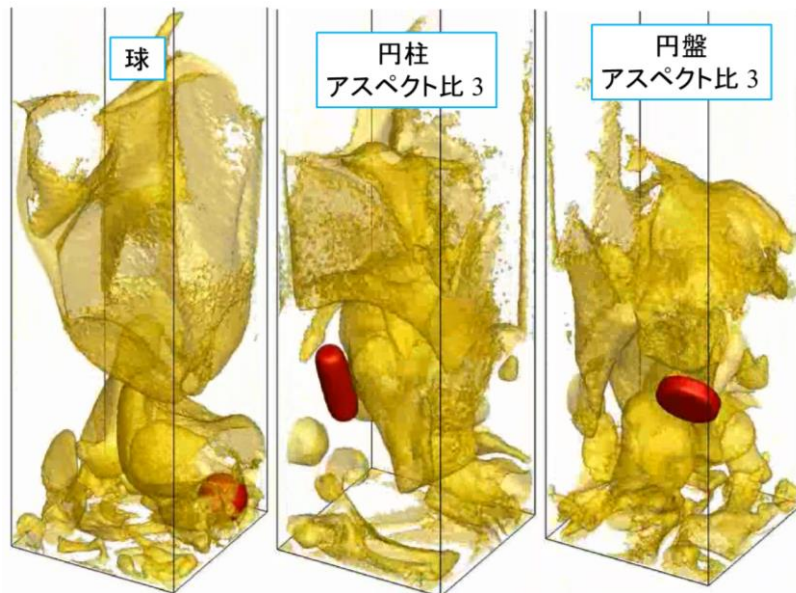


図4 層内部の空隙構造と粗大非球径物体の運動(空隙率 0.8 の等値面を表示している)

(2) 非球径粗大粒子の数値モデリング

特にガス化炉や燃焼炉などで用いられる燃料粒子は粗大であることに加えて非球径性を有す。様々な形状が考えられ、さらに流動状態ではその姿勢も刻一刻と変化すると考えられるが、高濃度固気二相流中の粗大非球径物体の形状や姿勢がその運動に与える影響についてはほとんど知られていない。本研究では、これらの詳細を検討可能な非球径粗大粒子モデルの開発を行った。前述した粗大粒子モデル[1]をベースとし、粗大粒子の形状を super-ellipsoid 関数を用いて表現することとした。図4は、例として十分に流動化した気泡流動層へ等体積・等質量を持つ円柱・円盤を投入した際の粗大物体と層内部の空隙構造を可視化したものである。内部の流動構造の変化に応じて、その姿勢は頻繁に変化し、等体積・等質量の球と比較すると浮上しやすい傾向にあることを確認した。本提案モデルでは、粗大粒子の形状を解析的に表しているため、パラメータを変更することにより、円柱・円盤の様々な形状を表現することが可能である。

現在、これらの結果をまとめた学術論文を投稿準備中である。

<引用文献>

- [1] T. Tsuji, K. Higashida, Y. Okuyama & T. Tanaka, Fictitious particle method: a numerical model for flows including dense solids with large size difference, *AIChE Journal*, 60, 1606-1620 (2014)
- [2] A. Penn, T. Tsuji, D.O. Brunner, C.M. Boyce, K.P. Pruessmann, C.R. Muller, Real-time probing of granular dynamics with magnetic resonance, *Science Advances*, 3 (9), e1701879 (2017)
- [3] E. Fukushima, Nuclear magnetic resonance as a tool to study flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 95-123(1999)
- [4] J. Oshitani, T. Sasaki, T. Tsuji, K. Higashida, D.Y.C. Chan, Anomalous sinking of spheres due to local fluidization of apparently fixed powder beds, *Physical Review Letters*, 116, 068001 (2016)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Y. Nagahashi, H. Takeuchi, J.R. Grace, D. Yoshioka, T. Tsuji & T. Tanaka, Dynamic forces on an immersed cylindrical tube and analysis of particle interaction in 2D-gas fluidized beds, *Advanced Powder Technology*, 査読有, 29, 3552-3560 (2018)
DOI: 10.1016/j.appt.2018.09.038
- ② 辻, 東田, 田中, 粗大な粒子を含む高濃度固気二相流の数値シミュレーション, *粉体工学* 会誌, 査読無, 54 (2), 122-129 (2017)

[学会発表] (計 15 件)

- ① T. Tsuji, A. Penn, T. Hattori, K.P. Pruessmann, C.R. Müller, J. Oshitani & T. Tanaka, Mechanism elucidation of anomalous sphere sinking in particle beds aerated under minimum fluidization velocity, International conference on multiphase flows 2019, 23 May 2019, Rio de Janeiro, Brazil
- ② T. Tsuji, A. Penn, T. Hattori, K.P. Pruessmann, C. R. Müller & J. Oshitani, On the mechanism of anomalous sphere sinking in apparently fixed particle beds (discrete particle simulation and ultra-fast MRI measurement), 8th World congress on particle technology, 23 April 2018, Orland, USA
- ③ Y. Sakamoto, T. Tsuji, K. Washino, T. Tanaka, K. Uemoto, S. Harada, S. Kato, J. Oshitani, H. Kajiwara & K. Matsuoka, Discrete particle model for non-spherical large objects in dense gas-solid flows, AIChE annual meeting, 29 October 2018, Pittsburgh, USA
- ④ T. Tsuji, K. Higashida, Y. Nagahashi & T. Tanaka, Numerical simulation of dense gas-solid flows with large particle size difference by fictitious particle method, V International Conference on Particle-Based Methods, 27 September 2017, Hannover, Germany
- ⑤ K. Higashida, T. Tsuji & T. Tanaka, DEM-CFD simulation for mixing process of binary particles with large size difference in a bubbling fluidized bed, Fluidization XV, 22 May 2016, Quebec, Canada
- ⑥ K. Higashida, T. Tsuji, K. Washino & T. Tanaka, Large-scale DEM-CFD simulation for a pseudo 2-D bubbling fluidized bed containing binary mixture of particles with large size difference, 2016 AIChE Annual Meeting, 14 November 2016, San Francisco, USA
- ⑦ T. Tsuji, K. Higashida & T. Tanaka, Motion of dense solid mixtures with large size difference by fictitious particle method, 7th International Conference on Discrete Element Method, 3 August 2016, Dalian, P.R. China

[その他]

ホームページ等

高速 MRI により粉体層内部の運動をリアルタイムに見える化
https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2017/20170922_2

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名 : Christoph R. Müller

※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。