

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 12 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：2013～2015

課題番号：25420122

研究課題名(和文) サイズが大きく異なる固体粒子群を高濃度に含む流れのシームレス解法

研究課題名(英文) Seamless numerical method for flows including dense solid particles with large size difference

研究代表者

辻 拓也(Tsuji, Takuya)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90379123

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、流動層に代表される高濃度固気二相流を研究对象とし、従来手法では取り扱いが困難な、少なくとも十倍以上の大きなサイズ比を持つ固体粒子群が混在する流れを高精度に予測・再現できる数値シミュレーション手法の開発を行った。また、提案手法の有効性の検証を目的として、ベンチスケール流動層を用いて実験を実施した。気泡流動化状態における単一粗大粒子の運動を比較したところ、複数の物理因子が影響する大変複雑な現象であるにも関わらず、本提案モデルにより定量的な予測が可能であることを確認した。また、層内に自発的に形成される気泡群の振る舞いが、粗大粒子の運動に対して大きく影響を与えることを示した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we focus on dense gas-solid flows typically occur in fluidized bed applications. A new Euler - Lagrange numerical model, which can reproduce and predict the motion of flows including dense solid particles with large size difference, was newly proposed. Along with the model development, experiments using a bench-scale fluidized bed were also performed for the validation study of the proposed numerical model. The motion of single large solid particles in bubbling fluidized conditions was compared in detail between the proposed model and the experiment. From the results, it was confirmed that the proposed model has a quantitative and qualitative predictive performance despite of the complexity of phenomenon. Moreover, it was also found the behavior of bubbles spontaneously occur in the bed gives major effects on the motion of the large particles in beds.

研究分野：流体工学

キーワード：仮想粒子法 DEM-CFD 固気二相流 混相流 数値シミュレーション 流動層 偏析

1. 研究開始当初の背景

固気流動層は、触媒反応、燃焼、ガス化、乾燥、造粒、熱処理、コーティングなどを目的として、様々な産業分野で広く用いられている。層内の固体粒子の濃度は大変高く、流れの振る舞いは、固体粒子-固体粒子間、固体粒子-壁面間の接触や衝突による相互作用の影響や、固体粒子-周囲気流間の流体力学的な相互作用の影響を受け、大変複雑となる。さらに、これらの粒子レベルでの相互作用が、気泡などのメソスケールでの特徴構造の形成を誘起し、流れ場は極めて不均一性が高く不安定となり、粒子の対流や混合挙動、さらには装置全体の性能や効率に大きな影響を及ぼす。近年、高速 X 線 CT や MRI などを用いた内部流動構造の観察が可能となってきたはあるものの、詳細な実験観察は依然困難であり、数値計算による現象の把握と、これに基づく工学設計の最適化が切望されている。これまでの固気流動層を対象とした数値計算では、層内の固体粒子のサイズや形状が均一であると仮定して行われたものが多かったが、実際には固体粒子サイズに大きな分布があり、また形状も均一では無いことがよく知られている。

一般にサイズや密度が大きく異なる固体群を流動化させると、炉内において粒子の偏りである“偏析現象”が生じることが知られている。これは装置効率に影響するため、その振る舞いを前もって予測することが重要であるが、現時点ではどのような条件において偏析が起こるのかという単純な疑問にさえ答えることは容易ではない。

流動層などの高濃度に固体粒子を含む流れを対象とした数値計算法は、流体運動を取り扱うスケールと粒子の大きさの関係から、大きく2つに分けられる。メソスケールでの特徴構造を捉えることに主眼を置いたメソスコピック法[1]では、流体運動を取り扱うスケールは粒子より大きく(図1(a))、セルサイズ以下の流体運動は平均化して取り扱われる。一方、直接計算法[2, 3]では、個々の粒子まわりの微視的な流れまでを直接取り扱う(図1(b))。粒子サイズに大きな分布があったとしても、原理上は直接計算法で取り扱い可能であるが、実際の装置を対象として、個々の粒子まわりの微視的な流れまで直接取り扱うには、膨大な計算コストが必要となり、近い将来においてもこれを実現することは難しい。一方のメソスコピック法は、計算コストの面では大きな利点があるが、個々の粒子まわりの流れを直接解像しないという特徴から、粒子-流体間の運動量交換量を、各計算セルにおいて経験式を用いて与える必要がある。これまでに、粒径分布がある系に対しても、メソスコピック法による計算が行われていたが、(例えば[4])、研究代表者の知る限りこれらの研究における粒径比は最大でも1:5程度であり、またその精度についても十分に検証されているとは言えない

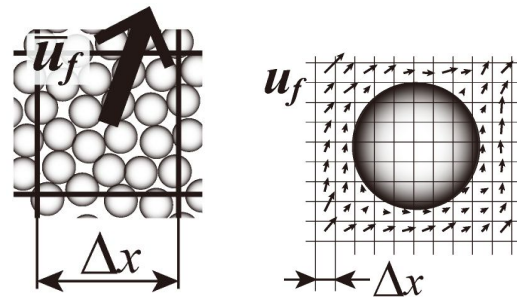
い。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの手法では取り扱いが困難な、少なくとも十倍以上の粒径比を伴う固体粒子群が混在する高濃度固気二相流を対象として、新たな数値計算手法の提案・開発を行った。また、流動層中の粗大物体挙動に関する各種のベンチスケール実験を行い、現象の理解促進と提案計算モデルの精度検証を行った。

3. 研究の方法

本研究では、対象とする粒子のサイズに応じてメソスコピック法と、直接計算法を併用することを提案した。基本的には、計算セルより相対的に大きい粗大粒子を直接計算法で、小さい粒子をメソスコピック法で取り扱えば、単一の計算セルを用いて現実的な計算コストで粒径比が大きな系を取り扱うことが可能なはずである。しかし、実際の流れ場では、大きさの異なる粒子群が混在した状態であり、単純にこの二つの異なる手法を併用するだけでは、流れ場の適切な表現は困難であり、これらをシームレスにつなげる必要がある(図2)。本研究では、Euler-Lagrange



(a)メソスコピック法 (b) 直接計算法

図1 粒子と流体計算格子サイズの関係

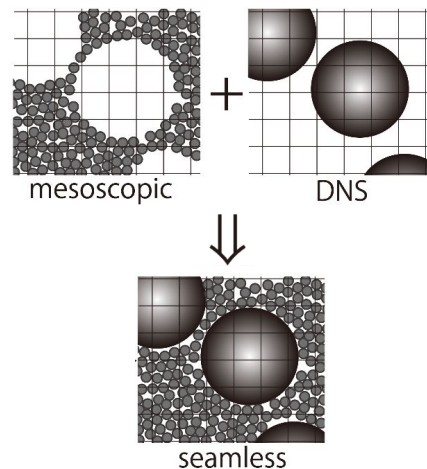


図2 提案手法の概要

型のメソスコピック法の一つである DEM-CFD 法[1]と、直接計算手法の一つである Volume penalization 法(以下 VP 法)[5]に着目した。VP 法は、流体-固体の連成系を扱うために開発された直接計算法の一つであり、計算アルゴリズム上、固体は多孔体と見なされ、その透過率を下げることにより固体としての振る舞いが表わされる。VP 法と DEM-CFD 法は元々現象を捉えるスケールが異なるが、双方の流体の支配方程式上において、固体の存在により生じる抵抗を体積力の形で与えているなど共通点が多い。

4. 研究成果

(1) 仮想粒子法の提案

大きなサイズ比を伴う固体粒子群を含む高濃度固気二相流を対象として、仮想粒子法(FPM: Fictitious particle method)と名付けた手法を提案した(発表論文の)。本提案手法において、粗大粒子は流体計算を行う計算セルサイズより大きく、小粒子はこれより小さい。粗大粒子は VP 法の考えを参考に、微小な粒子が密に充填していると想定してモデル化を行った。実質的にその内部を流体が透過することが出来ないため、粗大固体粒子周りの流れを、簡便に表現することが可能である。

(2) ベンチスケール実験との比較による精度検証

仮想粒子法の計算精度検証を目的として、ベンチスケールの三次元気泡流動層中における単一粗大粒子の運動や、準二次元流動層における固定円柱まわりの流れなどに関して実験を実施し、仮想粒子法による計算と一対一で比較した。

三次元気泡流動層内における粗大粒子の運動は大変複雑であるが(図3)、十分に流動化した後にガス流入を停止し、安定となった後に層内で粒子の高さを比較したところ、実験・計算で定量的な一致を確認した。また、粗大粒子は層内に自発的に形成される気泡群に比べて、同等かより大きいため、これら気泡との直接的な相互作用が、粗大粒子の運動に大きな影響を与えることを示した(発表論文の)。上記の知見は、従来の DEM-CFD 法では原理上捉えることができないものであり、提案手法ならではのものであると言える。

さらに加速度センサを内蔵した Lagrange 型のセンサ粒子を導入し、流動状態で自由運動する粗大粒子に働く非定常力について、実験-計算間で直接比較を行った(発表論文の)。これより、粗大球に働く非定常力の大きさや変動周期など、提案手法により粗大粒子の流動状態での運動の特徴をよく再現できることを示した。また、計算-実験の比較を通して、粗大粒子の鉛直方向の加速度が、気泡通過に伴い重力加速度の 0~2 倍の範囲で変動することを示した。

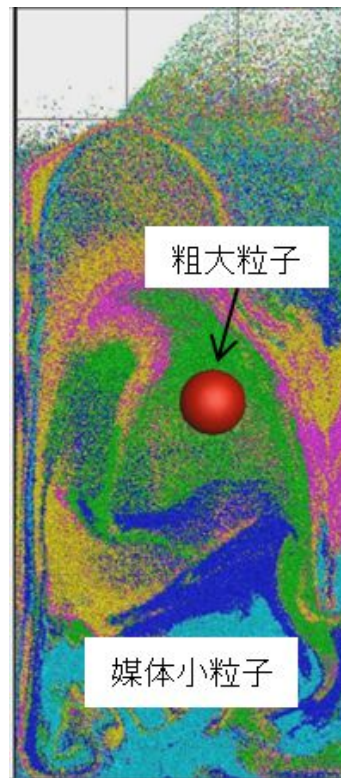


図3 仮想粒子法による計算の例

(3) 非球形粗大粒子への拡張

例えば、流動層型ガス化炉や燃焼炉の燃料である木質バイオマスや石炭粒子など、その多くの形状は非球形である。粗大粒子の形状は、その運動に大きな影響を与えると考えられ、数値計算においてもこれを表現する必要がある。本研究では、DEMにおいて非球形形状の取り扱いを可能とする Multi-sphere モデルを仮想粒子法と組み合わせることにより、非球形粗大粒子の運動を表すことが可能な計算手法の開発についても実施した(学会発表の)。真球の要素粒子を二つその表面で結合させたダンベル粒子を用いて実験を行った。気泡流動層におけるダンベル粒

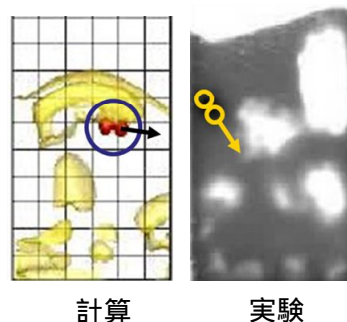


図4 非球形粗大粒子モデル

子の姿勢変化を含むその運動に関して、提案手法 - 実験間で定性的な一致を確認した(図4)。

(4)多数の粗大粒子を含む流れの大規模数値計算

ここまでの検証は、単一の粗大粒子の運動に着目したものであったが、提案手法は複数の粗大物体を含む流れの問題へも適用可能である。多数の粗大粒子を含む二成分粒子系において、流動化により促進される粒子の混合・拡散挙動の観察と、この結果引き起こされる偏析挙動に関して数値計算を実施した(学会発表の)。提案手法は、Euler-Lagrange法の一つであり、対象とする粒子数の増加に伴い、計算負荷が大幅に増加する。より現実的な問題を考えるには、計算の大規模化が必須となる。本研究で開発を行った数値計算プログラムにおいては、流体、粗大粒子、小粒子それぞれの運動について、MPIを用いたプロセス並列化に加えて、OpenMPを用いたスレッド並列化を行い、多数の計算コアを持つ大型計算機を用いた大規模計算を可能とした(図5)。

研究代表者の知る限り、提案手法は大きな固体サイズ比を伴う高濃度固気二相流の計算手法として、世界初のものである。この業績に対して、2014年度化学工学会粒子・流体プロセス部会フロンティア賞(受賞)や2013年度日本混相流学会奨励賞(受賞)を受賞しており、当分野におけるインパクトは十分に大きいと言える。

<引用文献>

- [1] Tsuji et al., Powder Technol., Vol. 77, 1993, pp.79-87
- [2] van der Hoef et al., Ann. Rev. Fluid Mech., Vol.40, 2008, pp. 47-70
- [3] Tsuji et al., Proc. Int. Conf. Multiphase Flow, No. 13.1.2, 2010
- [4] Hoomans et al., Powder Technol., Vol.109, 2000, pp. 41-48
- [5] Kolomenskiy & Schneider, J. Comput. Phys., Vol.228, 2009, pp. 5687-5709

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

K. Higashida, K. Rai, W. Yoshimori, T. Ikegai, T. Tsuji, S. Harada, J. Oshitani & T. Tanaka, Dynamic vertical forces working on a large object floating in gas-fluidized bed: discrete particle simulation and Lagrangian measurement, Chemical Engineering Science, 査読有, Vol. 151, 2016, pp. 105-115
DOI: 10.1016/j.ces.2016.05.023

T. Tsuji, K. Higashida, Y. Okuyama & T.

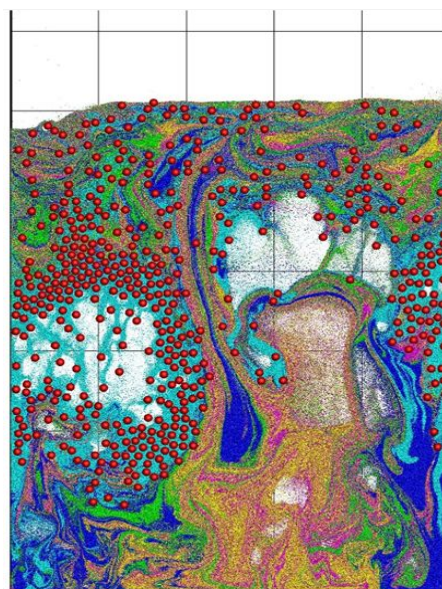


図5 多数の粗大粒子を含む気泡流動層の大規模並列計算

Tanaka, Fictitious particle method: a numerical model for flows including dense solids with large size difference, AIChE Journal, 査読有, Vol. 60, 2014, pp. 1606-1620
DOI: 10.1002/aic.14355

[学会発表](計8件)

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, 26 May 2016, Quebec, Canada

K. Higashida, K. Rai, W. Yoshimori, T. Ikegai, T. Tsuji, S. Harada, J. Oshitani & T. Tanaka, Vertical force acting on large object floating in gas-fluidized bed (Direct comparison between numerical simulation and Lagrangian measurement), 2015 AIChE annual meeting, 11 November, 2015, Salt Lake City, USA

T. Tsuji, A numerical model for flows including dense heterogeneous particles, 6th Asian Particle Technology Symposium, 16 September 2015, Seoul, Korea

K. Higashida, T. Yamada, T. Tsuji & T. Tanaka, A numerical model for the motion of large non-spherical object in fluidized bed", ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, 30 July 2015, Seoul, Korea

T. Yamada, T. Tsuji & T. Tanaka, A numerical model for the motion of large non-spherical object in Geldart-A fluidized bed, 7th World Congress on Particle Technology, 5 May 2014, Beijing, P.R. China

T. Tsuji, Y. Okuyama, T. Tanaka, Y. Nagahashi & J.R. Grace, Direct interactions between a large object and a bubble in fluidized beds, International workshop on fluid-particle systems, 27 June 2014, Vancouver, Canada

T. Tsuji, K. Higashida, Y. Okuyama & T. Tanaka, Validation study of a numerical model for the flows including dense solids with large size difference, International conference on Multiphase flows, 29 May, 2013, Jeju, Korea

T. Tsuji, Y. Okuyama, K. Higashida & T. Tanaka, Motion of a large solid in bubbling fluidized bed, 2013 AIChE annual meeting, 5 November 2013, San Francisco, USA

〔その他〕
受賞

東田 恭平, 辻 拓也, 田中 敏嗣, 第 29 回

数値流体力学シンポジウム CFD グラフィックス・アワード静止画部門第 2 位入賞, "DEM-CFD カップリング法による大規模流動層解析", 2015 年 12 月 17 日

辻 拓也, 東田 恭平, 奥山 佳那, 田中 敏嗣, 2014 年度化学工学会粒子・流体プロセス部会フロンティア賞, Fictitious particle method: a numerical model for flows including dense solids with large size difference, (社)化学工学会, 2014 年 3 月 18 日

辻 拓也, 日本混相流学会奨励賞, サイズが大きく異なる粒子群を含む高濃度固気二相流の数値モデリング, 日本混相流学会, 2014 年 7 月 29 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

辻 拓也 (TSUJI, Takuya)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90379123

(2) 研究分担者

永橋 優純 (NAGAHASHI, Yusumi)
高知工業高等専門学校・教授
研究者番号：80208040

田中 敏嗣 (TANAKA, Toshitsugu)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90171777