

令和 5 年 4 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K20284

研究課題名（和文）高温固気流動層内の非球形粒子群輸送に対する数値解析手法の開発とその応用

研究課題名（英文）Development and application of computational method for transport of non-spherical particles in gas-solid fluidized bed with large temperature difference

研究代表者

鳥生 大祐 (Daisuke, Toriu)

京都大学・学術情報メディアセンター・助教

研究者番号：60772572

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高温固気流動層内の非球形粒子群輸送に対して粒子スケールでの数値計算を行うことを目的とし、低マッハ数圧縮性流れと多数の任意形状粒子の連成計算手法について検討した。流体計算には音速抑制法を導入したFractional Step法を、流体と固体の連成計算にはDF/FD法などによる直交格子ベースの手法を用いた。提案手法の基礎的な特性を確認するために数値実験をいくつか行い、音速を抑制するパラメータを適切に設定すれば計算結果に与える影響を十分に小さく抑えつつ計算を高速化できること、また、100程度の大きな温度差の流れによる粒子輸送現象を安定に計算できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑な流動層の流動化メカニズムを解明するために、近年では固体粒子よりも十分に小さい流体計算格子を設定し、粒子周りの微視的な流れと粒子個々の運動を直接計算する手法が検討されている。しかし、大きな温度変化による気体の密度変化（圧縮性）や固体粒子形状の影響を考慮したものは少ない。本研究で開発した手法を発展させることで、これらの影響を考慮しつつ高温固気流動層内の微視的な温度分布や流速分布、各粒子に働く流体力や接触力など、実験では得ることの難しい精緻なデータの取得が可能となることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, a computational method for interactions between low Mach number flows and arbitrary shaped particles is developed to conduct particle scale computations for the transport of non-spherical particles in gas-solid fluidized beds with large temperature differences. The fractional step method with the reduced speed of sound technique is used for fluid computations, and a Cartesian grid method with the DF/FD method is used for computations of fluid-solid interactions. Several numerical experiments were conducted to confirm basic characteristics of the proposed method. The computational results show that the proposed method can accelerate computations while keeping the impact on the computational results sufficiently small by setting appropriate parameters to reduce the speed of sound, and that can stably calculate particle transport phenomena due to flows with large temperature differences about 100 .

研究分野：計算力学

キーワード：流体・固体熱連成 低マッハ数圧縮性流れ 流動層 音速抑制法 直交格子法

1. 研究開始当初の背景

固気流動層は乾燥や燃焼などに関連した各種プロセスで広く利用されている。流動層内では固体粒子濃度が高く粒子間の接触や衝突の影響が無視できず、気体・固体粒子間では力学的、熱的相互作用が生じる。加えて、工学上の実用問題では、数十℃以上の温度差が生じることで低マッハ数の流れであっても気体の密度変化(圧縮性)が無視できない場合がある。このように複雑な流動層内で生じる現象のメカニズムを解明するために、近年では固体粒子よりも十分に小さい流体計算格子を設定し、粒子周りの微視的な流れと粒子個々の運動を直接計算する手法が検討されている。しかし、既往研究では気体の非圧縮性(密度一定)を仮定し、粒子を完全な球体とすることで現象を簡略化して計算を行う場合が多い。したがって、高温の固気流動層現象をより詳細に把握するためには、流体の圧縮性を考慮しつつ、高温度差の低マッハ数流れと多数の任意形状粒子の連成計算を高速に行える手法の開発が必要となる。

2. 研究の目的

流体の圧縮性を考慮しつつ、高温度差の低マッハ数流れと多数の任意形状粒子の連成計算を高速に行える手法の開発、およびその基本的特性を確認することが本研究の目的である。具体的にはまず、圧縮性流体の基礎方程式を用いて大きな温度変化を伴う低マッハ数流れを高速に計算可能な手法が必要となる。圧縮性流体の基礎方程式を用いて低マッハ数流れの計算を行う場合、計算の時間刻み幅は音速に基づく CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件に基づいて制限されるため、この CFL 条件を適切に緩和する手法が高速な計算を行う上で重要となる。次に、検討した流体計算手法を流動層の問題に適用するために、圧縮性流体と固体粒子間の相互作用を計算する手法が必要となる。様々な粒子形状への対応と多数の粒子を扱う大規模並列計算への展開を見据え、本研究では直交構造格子ベースの手法について検討することとした。以上のような計算手法を開発することに加え、その基本的な特性を明らかにすることも重要であり、特に音速に基づく CFL 条件の緩和が計算結果に与える影響については慎重に議論する必要がある。

3. 研究の方法

流体計算手法として、音速抑制法 (Reduced Speed of Sound Technique) [1, 2, 3] を用いることとした。音速抑制法では、計算中に音速を人工的に低減することで音速に基づく CFL 条件を緩和し、低マッハ数流れを完全陽解法で高速に計算可能である。本研究では、後述する流体・固体連成計算手法と組み合わせる際の簡便性を考慮し、Fractional Step 法に音速抑制法を導入した。この手法では、状態方程式を用いて密度と温度から圧力を計算する際、圧力の変化を人工的に抑制するパラメータを導入し、このパラメータを変化させて音速を調整する。また、本研究では各固体粒子の運動は Lagrange 的に、流体は空間に固定された単純な直交構造格子上で Euler 的に計算する。流体と固体の連成計算手法としては、Yu ら [4] による DF/FD (Direct Forcing/Fictitious Domain) 法や Kajishima ら [5] の手法を用いることとした。

提案手法を用いていくつかの数値実験を行い、その基本的な特性について考察した。特に、提案手法では音速抑制法を利用するため、これが計算結果に与える影響を確認することが重要である。また、与える温度差についても数℃程度から数百℃に至る条件を設定し、広範な温度差の問題に対する適用性を検討した。

4. 研究成果

提案手法を用いて行った数値実験のうち、代表的なものの概要を以下に記載する。

(1) 静止円柱群を含む正方形キャビティ内自然対流

提案した手法を用いて、静止円柱群を含むキャビティ内自然対流 [6, 7] を計算した。なお、本数値実験では、流体と固体の連成計算に Kajishima ら [5] の手法を用いた。この手法では、各流体計算格子に含まれる固体の体積割合に基づいて計算ステップ毎に固体速度が流体計算格子に強制される。計算領域を図-1 に示す。計算領域内には 4×4 の水平円柱が配置され、左壁面は温度 T_h の高温壁、右側の壁面は温度 T_c の低温壁、上下の壁面は断熱壁とした。流体のプラントル数は 0.71、レイリー数は 10^5 とした。また、固体の熱伝導率、密度は初期状態における流体の熱伝導率、密度の 10 倍とし、固体の比熱は流体の定圧比熱と同じとした。

以上の条件のもと、まずは流体の非圧縮性を仮定して計算された既往の結果と比較するために、 $T_h - T_c = 3 \text{ K}$ とし、音速を約 1/200 程度に抑制して定常状態となるまで計算を行った。定常状態における加熱壁面での平均ヌセルト数の比較を表-1 に示す。表-1 から分かるように、提案手法で得られた平均ヌセルト数は既往の計算結果とよく一致した。

続いて、 $T_h - T_c = 720 \text{ K}$ とし、音速を約 1/30 程度に抑制して定常状態となるまで計算を行った。本数値実験では、音速を抑制した場合 (以下、RSST) と抑制しない場合 (以下、Non-RSST) について計算結果を比較し、音速の抑制が計算結果に与える影響を確認した。図-2 に定常状態における温度分布を示す。図-2 より、今回設定した計算条件においては RSST と Non-RSST で

温度分布に大きな差がないことを確認した。また、図-3 はそれぞれ水平方向および鉛直方向の中央断面における流速成分の比較であり、流速分布についても温度分布と同様、RSST と Non-RSST で大きな差がないことを確認した。ただし、音速をより低減させていくと、徐々に計算結果の差異が大きくなっていくことも確認しており、妥当な計算を行う上で音速の値に下限があることに注意が必要である。

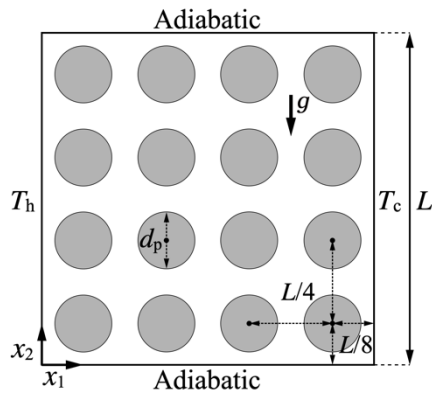


図-1 静止円柱群を含むキャビティ内自然対流の計算領域

表-1 加熱壁面における平均ヌセルト数の比較

Present	Ref. [6] (FVM)	Ref. [6] (LBM)	Ref. [7] (LBM)
2.0220	2.0429	2.0375	2.0153

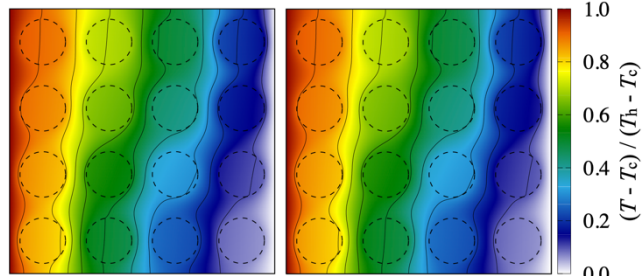


図-2 定常状態における温度分布の比較

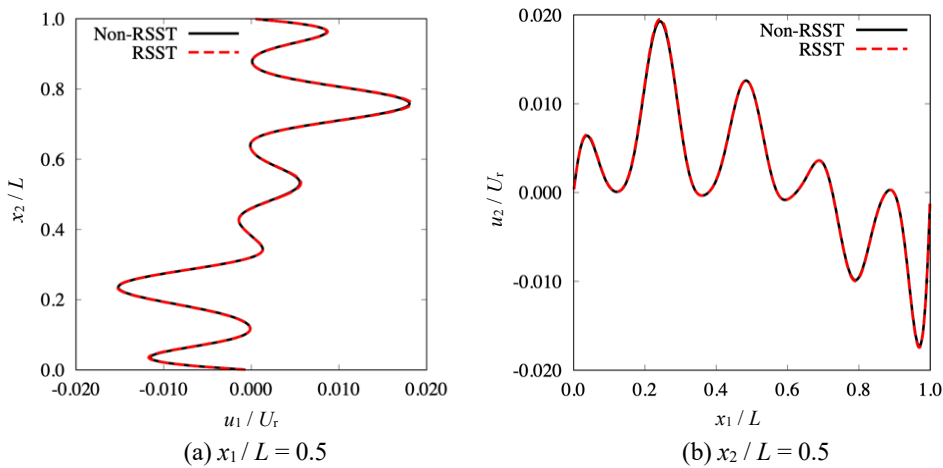


図-3 定常状態の各断面における流速分布の比較

(2) 非等温流体中の単一粒子沈降

提案した手法を用いて、まずは等温流体中の単一粒子沈降を計算し、沈降速度の時間変化を既往の計算結果と比較した。この数値実験では、流体と固体の連成計算にDF/FD法[4]を用いた。この手法では、図-4に示すように固体の表面および内部にLagrange点を配置し、分散デルタ関数を用いて流体計算格子との間で流速や相互作用力をやりとりする。計算領域と粒子の初期配置を図-5に示す。計算領域の各方向の長さ L_1 、 L_2 と粒径 d_p の関係はそれぞれ $L_1 = 8d_p$ 、 $L_2 = 24d_p$ であり、本数値実験において壁面はすべて断熱条件とした。また、流体のプラントル数は0.71とし、流体密度に対する固体密度の比は1.4とした。図-6に粒子沈降速度の時間変化について、音速を抑制しない場合(Non-RSST)および音速を抑制した場合(RSST)の結果とWan & Turek[8]による計算結果を示す。なお、RSSTでは音速を約1/100に抑制した。図-6より、RSSTの結果がNon-RSSTおよび既往の計算結果とよく一致しており、本数値実験で設定した条件においては、音速の抑制が沈降速度に与える影響は十分小さいといえる。

上部、底部壁面の温度をそれぞれ $T_h = 400$ K、 $T_c = 300$ Kで一定とし、固体粒子を固定して流体計算のみを行って得られた定常状態を初期状態として非等温流体中の単一粒子沈降を計算した。図-7に粒子沈降にともなう温度分布の時間変化を示す。図-7より、粒子の沈降によって温度分布が変化する様子が確認された。また、図-8に等温および非等温の各ケースにおける粒子沈降速度の時間変化を比較した結果を示す。図-8より、等温のケースでは0.2秒付近から沈降速度がおおよそ一定となっているのに対し、非等温のケースでは沈降速度が減少しており、温度分布が沈降速度に大きく影響していることが確認された。

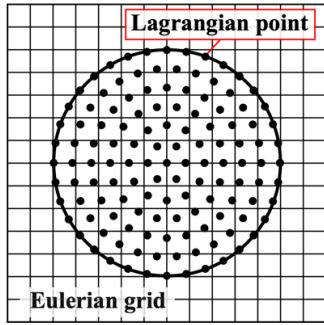


図-4 DF/FD 法における流体計算(Euler)格子と固体表面および内部に配置された Lagrange 点

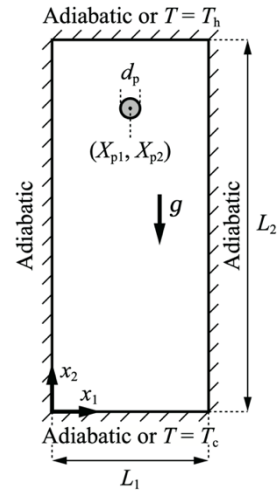


図-5 単一粒子沈降の計算領域

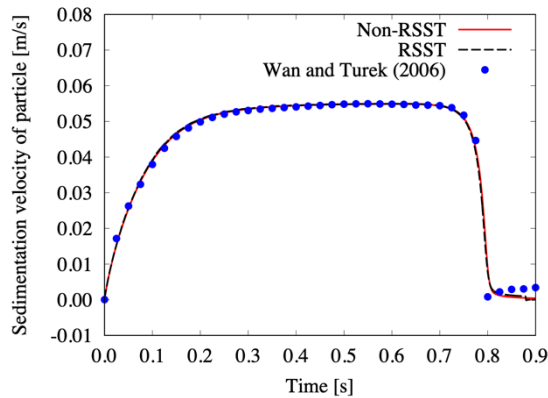


図-6 等温流体中における粒子沈降速度の時間変化

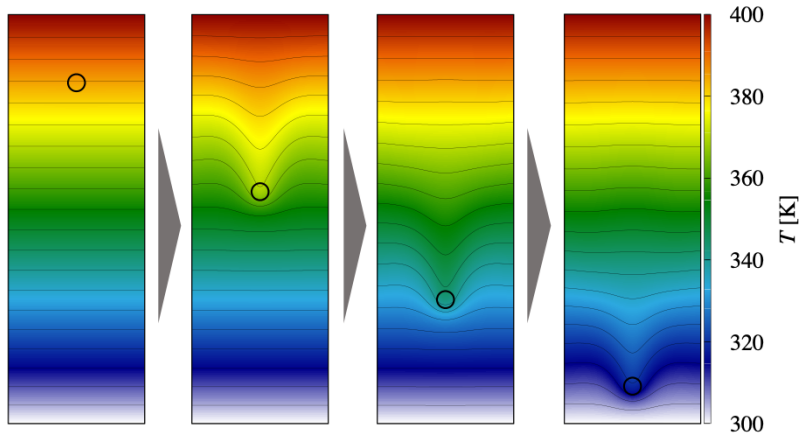


図-7 粒子沈降に伴う温度分布の時間変化

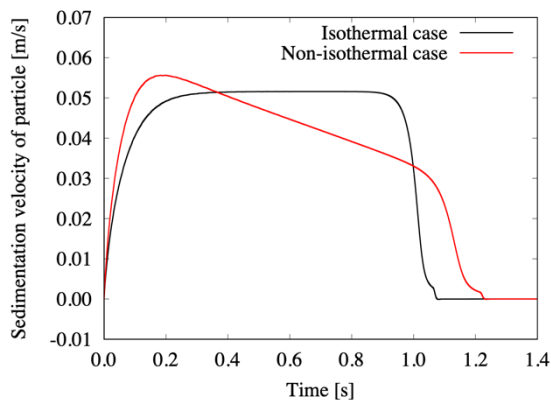


図-8 等温および非等温流体中における粒子沈降速度の時間変化

(3) 移動粒子群を含むキャビティ内自然対流

多数の粒子を含む問題への適用性を確認するために 36 個の粒子が正方形キャビティ内で自然対流によって輸送される計算を行った。計算領域と粒子の初期配置を図-9 に示す。計算領域の各方向の長さ L と粒径 d_p の関係は $L = 16d_p$ であり、流体のプラントル数は 0.71, 流体密度に対する固体密度の比は 1.2 とした。上部、底部壁面の温度をそれぞれ $T_c = 300$ K, $T_h = 400$ K で一定、側壁は断熱壁とし、固体粒子の無い状態で流体計算のみを行って得られた定常状態を初期状態とした。なお、音速は約 1/100 に抑制した。

図-10 に計算で得られた温度および粒子分布の時間変化を示す。本数値実験では下部壁面を加熱、上部壁面を冷却することで計算領域内に時計回りの循環流が生じた。固体の密度を基準とした流体密度の変化率は最大で約 30%程度であり、比較的大きな温度および密度変化の生じる流体内で輸送される粒子群の挙動を提案手法によって安定に計算できることを確認した。

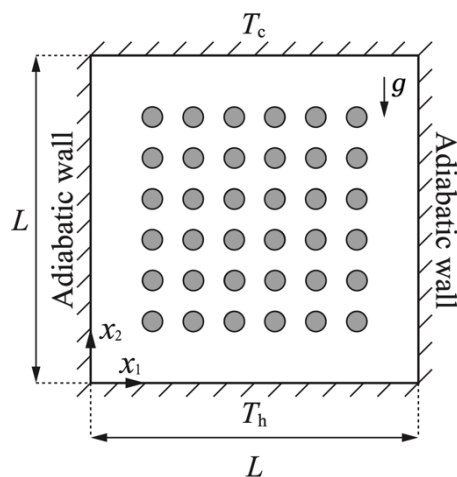


図-9 移動粒子群を含むキャビティ内自然対流の計算領域

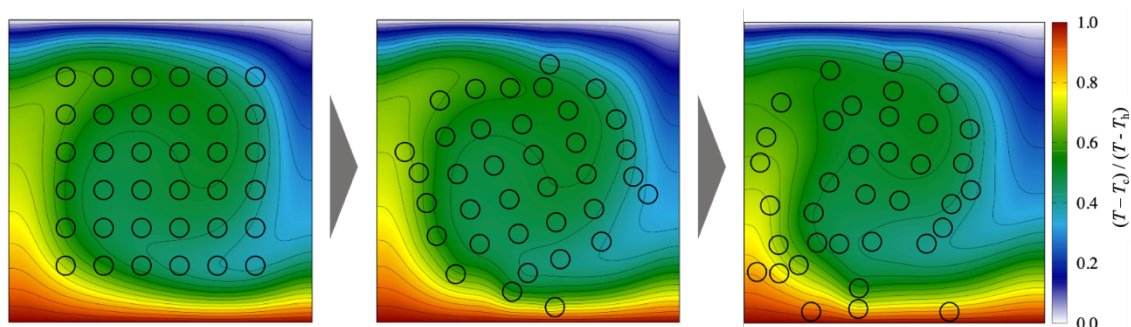


図-10 温度分布および粒子分布の時間変化

参考文献

- [1] Rempel, M.: Solar differential rotation and meridional flow: the role of a subadiabatic tachocline for the Taylor-Proudman balance, *The Astrophysical Journal*, Vol. 622, pp. 1320–1332, 2005.
- [2] Hotta, H., Rempel, M., Yokoyama, T., Iida, Y. and Fan, Y.: Numerical calculation of convection with reduced speed of sound technique, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 539, A30, 2012.
- [3] Iijima, H., Hotta, H. and Imada, S.: Semiconservative reduced speed of sound technique for low Mach number flows with large density variations, *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 622, A157, 2019.
- [4] Yu, Z., Shao, X.: A direct-forcing fictitious domain method for particulate flows, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227, pp. 292–314, 2007.
- [5] Kajishima, T., Takiguchi, S., Hamasaki, H. and Miyake, Y.: Turbulence structure of particle-laden flow in a vertical plane channel due to vortex shedding, *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, Vol. 44, pp. 526–535, 2001.
- [6] Hu, Y., Li, D., Shu, S. and Niu, X.: Full Eulerian lattice Boltzmann model for conjugate heat transfer, *Physical Review E*, Vol. 92, 063305, 2015.
- [7] Lu, J. H., Lei, H. Y. and Dai, C. S.: A lattice Boltzmann algorithm for simulating conjugate heat transfer through virtual heat capacity correction, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 116, pp. 22–31, 2017.
- [8] Wan, D. and Turek, S.: Direct numerical simulation of particulate flow via multigrid FEM techniques and the fictitious boundary method, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 51, pp. 531–566, 2006.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 D. Toriu, S. Ushijima	4. 巻 9
2. 論文標題 Computational method for low-Mach-number compressible flows with moving particles and large temperature variations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 170-184
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.15748/jasse.9.170	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 D. Toriu, S. Ushijima
2. 発表標題 Fully explicit computational method for gas-solid two-phase flow with large temperature variation
3. 学会等名 JSST2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 音速抑制法を用いた高温自然対流と固体の熱連成計算
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 W. Liu, D. Toriu, S. Ushijima
2. 発表標題 Pressure-based algorithm for compressible fluid without low-Mach-number approximation
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 劉 威, 鳥生 大祐, 牛島 省
2. 発表標題 高温度差のキャピティ内自然対流に対する圧縮・非圧縮性流体計算法の比較
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 W. Liu, D. Toriu, S. Ushijima
2. 発表標題 Computational methods to improve CFL conditions in low-Mach-number compressible flows
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Toriu, S. Ushijima
2. 発表標題 Fully explicit computational method for thermal interactions between solids and compressible low Mach number gas flows
3. 学会等名 JSST2019 (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
研究協力者	牛島 省 (Ushijima Satoru) (70324655)	京都大学・学術情報メディアセンター・教授 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------