

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420111

研究課題名(和文) 粒子分散混相流れ中の自己相似性・多重スケール性に基づく粒子集団挙動の解析

研究課題名(英文) Analysis of collective motion of particles based on self-similarity and multi-scale property in particle-dispersed multiphase flow

研究代表者

竹内 伸太郎 (Takeuchi, Shintaro)

大阪大学・工学研究科 ・准教授

研究者番号：50372628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：高解像度の数値計算によって分散粒子混相流れ中の熱輸送解析を実施した。閉容器の鉛直方向に一定温度差を与えた系に粒子を添加し、粒子の熱伝導率や粒子体積率を変化させて熱輸送特性を調べたところ、粒子を含む流れ場の運動量と熱輸送スケールの違いに起因する特徴的な粒子集団運動を見出した。また、流れの中に分散して存在する粒子が受ける力のモデリングにも焦点を当てて研究を進めた。流体運動の基礎方程式に粒子径と同程度の空間スケールにおける体積平均を施した方程式を導出し、新たに提案した(粒子表面の局所応力を反映させた)流体相への作用力とともに解くことで、モデリングの有効性を様々な流れ場について確認した。

研究成果の概要(英文)：Heat transport analysis in particle-dispersed multiphase flow was studied by highly-resolved numerical simulation. We investigated the heat transport properties by adding particles to a system under a constant temperature difference in the vertical direction of a closed container. By changing the thermal conductivity and the volume fraction of the particles, we found characteristic collective motion of the particles due to the difference in heat transport time scales.

We also focused on the force modelling in particle-dispersed flow for the case of the particle diameter comparable to the smallest eddies in the flow. Through volume-averaging of the basic equation of the flow at the spatial scale of the same order of magnitude as the particle diameter, we formulated the force on the fluid phase reflecting the local stress on the particle surface in a moderate Reynolds number range. The effectiveness of the model was established for a variety of particle-induced flows.

研究分野：数値流体力学

キーワード：粒子流れ

1. 研究開始当初の背景

固気液媒質が分散的に存在して流れる分散性混相流は、自然環境や工業分野、生命科学などの広い領域にわたって見られる。そのような流れでは、分散相を質点とみなせない非質点効果が顕著となる場合がある。混相流内の界面を通じた熱輸送は非質点効果の表れやすい例である。たとえば界面と分散相内部での熱伝導を考慮すると複数のスケールが影響を及ぼしあい、分散相の集団的な運動が発生することが知られている。このように界面の局所的な運動量・エネルギー授受は系全体にわたる運動や熱・物質輸送に影響を与えることがある。

この研究では特に分散性粒子の混相流における非質点効果について着目する。粒子径が流れの最小空間スケールよりも大きい場合には、高解像度の数値計算が有効で、界面輸送現象や集団現象の解析はようやく解決の糸口が見えてきた。しかし、単相流れの最小構造と同程度のサイズの粒子を入れるとき、粒子が受ける流体力のモデリングには独特の難しさが存在する。というのも、粒子周囲流れの加減速や粘性散逸などは異なるスケールで発生する。その結果、粒子と流体の相互作用に関わる全ての要素を質点モデルのような既存の手法で適切に捉えることが難しい一方で、異なるスケールにわたる現象を高解像度数値計算で捉えるには極限的な計算条件になると考えられている。この制約が粒子による乱流変調などの現象解明を難しくしている。

2. 研究の目的

粒子の非質点効果を考慮した熱輸送の数値シミュレーションを行い、流体と粒子の熱輸送特性時間の違いから発生する集団的挙動の解析を行った。特に粒子数密度が高い系における輸送特性の解析を行った。

また、粒子混相流中に分散して存在する粒子と流体運動の相互作用の理解を深めるために、非質点効果を考慮した流体力モデルを構築することを目指した。

3. 研究の方法

問題に応じて、二つの異なる方針を採っ

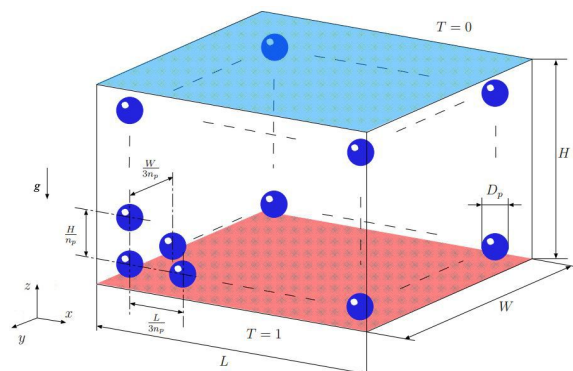


図1. 計算領域と初期粒子配置の模式図

た：粒子径が流れの最小空間スケールより大きい系に対しては高解像度数値解析、一方、粒子径と流れの最小空間スケールが同程度の場合は平均化方程式に基づき低解像度計算を指向する。

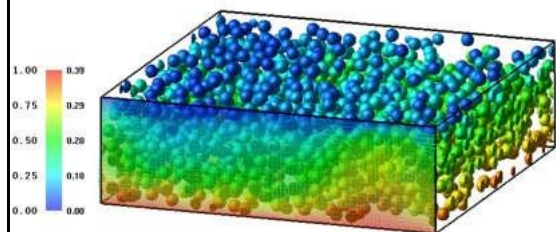
前者では、埋め込み境界法によって流体と粒子の相互作用を解き、流体と粒子の熱伝導率の違いを反映した界面熱流束を与えることにより、直接数値解析を実施する。粒子間接触による熱流束も考慮した。

また後者では、流れの基礎方程式に粒子サイズと同程度の空間スケールにおける体積平均を施した方程式を導出し、粒子の非質点効果を反映した流体力のモデリングを行うため、有限レイノルズ数域で粒子表面の応力分布を反映させた粒子から流体への作用力を定式化し体積平均方程式を数値的に解く。

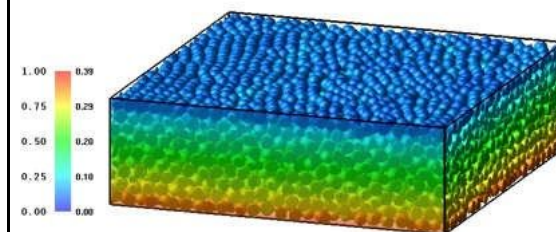
4. 研究成果

粒子を含む流れにおいて熱輸送を考慮した解析を実施した結果を紹介する。粒子接触の熱抵抗モデル式を提案し、多粒子径の混相流において粒子内部温度分布まで考慮した混相伝熱の問題を幅広く取り扱えるようになった。粒子接触による熱抵抗を一般化して特殊関数を用いた形に表し、接触部における熱流束を(流体・固体の)界面熱流束と同じ形式でまとめることができた(下記5. 主な発表論文等〔雑誌論文〕に詳述)。これにより粒子混相流中における熱輸送を統一的に記述することができるようになった。

その計算手法を適用し、閉じた容器の鉛直方向に一定温度差を与えた系に粒子を加え(図1) 分散粒子混相流中の熱輸送解析を実施した。



(a) 粒子体積率 約 20%



(b) 粒子体積率 約 54%

図2. 三次元における大規模な粒子混相流の内部の温度分布

アスペクト比の大きい流路において粒子充填率を徐々に上げていくと、ある充填率で流れの構造に変化が起こり、粒子運動に伴う位相速度をもつ特徴的な波動現象によって熱輸送が起こる様子を見出した。これは充填率などのパラメータと同時に、有限サイズ粒子を含む流れ場の運動量と熱の輸送時空間スケールの違いに起因すると考えられる。粒子の内部温度分布および粒子間接触伝熱の効果が表れた、高濃度系における特徴的な粒子集団運動であるといえる。

また、容器内の全熱輸送量のうち対流・拡散・接触による効果を個別に評価した。図1の系において、有限サイズ粒子の運動による混合が強い影響力をもつ充填率の場合には、系に印加した温度勾配とは逆の時間平均温度勾配が形成されることがある。さらに充填率を上げていくと、粒子の運動が阻害されて伝導による熱輸送が支配的になる。このとき、定常に至る過程において、系全体にわたる特徴的な熱輸送の時間発展が表れる。

さらに高精度化を行うため、流体・固体の界面における熱流束連続条件の離散化の方法を再検討し、対流と伝導の複合的な熱輸送問題を高精度に解く方法を提案した(下記5. 主な発表論文等〔雑誌論文〕に詳述)。この発展型解法は今後の研究で、混相流中の熱輸送問題へ実装していく予定である。

一方で、上述のように乱れの最小空間スケールと同程度の径をもつ粒子を含む粒子混相流は高解像度計算による実施が難しい。粒子添加は乱流変調の最も基本的な要因のひとつであるため、そのようなサイズの粒子が流体に与える力のモデリングを行った。まず流れの基礎方程式に粒子径と同程度の空間スケールにおける体積平均を施した方程式を導出した。続いてその体積平均方程式を数値的に解くために、いくつかの基本的な流れ場を対象に、粒子表面の応力を反映させた流体相への作用力を定式化した。

結果の一例を紹介すると、一様流中に粒子を置いた場で、Proudman & Pearson (*J. Fluid Mech.*, 1957) に基づいて粒子表面における流体力の非線形効果のうち本質的に重要な項を検討し、有限レイノルズ数における非線形性を考慮した流体力を求めた。このモデルでは粒子表面局所の流体力を表すため、粒子レイノルズ数、主流方向から測った迎角と方位角、および粒子中心と検査体積の位置関係を表すパラメータを用いている。詳細は下記5. 主な発表論文等〔雑誌論文〕を参照。さらに、単純剪断流れに置かれた粒子に作用する流体力のモデルとともに、より広い範囲に適用できる形式へと拡張し、作用力のエネルギー保存性とともなそれらの有効性を示した。この解析によって既存の質点モデルから特に改善された点は、一様流および剪断流れ場の中に置かれた粒子の表面応力分布の非等方性の影響である。また、複数の複合剪断流れ場に適用する際にこれらの重ね合わ

せが有効であることを直接計算の結果から示した。

この内容は、有限サイズの球形粒子の表面に作用する流体力を、有限レイノルズ数の範囲でモデル化する基礎的なものであるが、提案手法により粒径スケールの計算格子を用いて乱れをシミュレートする基礎が確立され、解析できるスケール幅を格段に広げた。粒子添加による乱れの増減のメカニズムを解明するために有用な数値シミュレーション手法となり、分散性混相乱流の研究に対して画期的な方法を提示するものである。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

Norikazu Sato, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Masahide Inagaki, Nariaki Horinouchi, A consistent direct discretization scheme on Cartesian grids for convective and conjugate heat transfer, *Journal of Computational Physics*, Vol. **321**, pp. 76-104 (2016), 査読有
DOI: 10.1016/j.jcp.2016.05.034

Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Interaction force and residual stress models for volume-averaged momentum equation for flow laden with particles of comparable diameter to Kolmogorov length scale, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. **85**, pp. 298-313 (2016), 査読有
DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.06.018

Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Wake structures of a particle in straight and curved flows, *Springer Proceedings in Physics*, Ser Vol. **185**, pp. 189-194 (2016), 査読有
DOI: 10.1007/978-3-319-30602-5_24

佐藤範和, 竹内伸太郎, 梶島岳夫, 稲垣昌英, 堀之内成明, 直交格子を用いた熱流体シミュレーションの高精度化, *機械学会流体工学部門ニューズレター* 2016年2月号, 査読無
http://www.jsme-fed.org/papertech/2016_01/002.html

Shintaro Takeuchi, Takaaki Tsutsumi, Katsuya Kondo, Takeshi Harada, Takeo Kajishima, Heat transfer in natural convection with finite-sized particles considering thermal conductance due to inter-particle contacts, *Computational Thermal*

Sciences Vol. 7, Issue 5-6, pp. 385-404 (2015, Available online on 28 June 2016), 査読有
DOI:10.1615/ComputThermalScien.2016 014791

Daisuke Takagi, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Role of Vortical Structures on the Forced Convective Heat Transfer in Oscillation-Controlled Coaxial-Pipe Heat Exchanger, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 22(5), pp. 365-389 (2015, Available online on 12 May 2016), 査読有
DOI:10.1615/JEnhHeatTransf.2016015399

深田利昭, 竹内伸太郎, 梶島岳夫, 粒子周りの曲がった背景流れにおける流体力の自己相似性, *ながれ*, Vol. 34-5, pp. 345-348 (2015), 査読無
<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=34-5tokushu6.pdf&dir=53>

Suguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, A numerical method for mass transfer by a thin moving membrane with selective permeabilities, *Journal of Computational Physics*, Vol. 284, pp. 490-504 (2015), 査読有
DOI: 10.1016/j.jcp.2010.09.032

花輪理徳, 山田暁, 宮内優, 竹内伸太郎, 梶島岳夫, 平板上に設置された弾性柱群と乱流の相互作用の数値シミュレーション, *ながれ*, Vol. 33-6, pp. 513-517 (2014), 査読無
<http://www.nagare.or.jp/download/noauth.html?d=33-6tokushu9.pdf&dir=15>

Suguru Miyauchi, Azusa Ito, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Fixed-mesh approach for different dimensional solids in fluid flows: application to biological mechanics, *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Vol. 6, pp. 818-844 (2014), 査読有
DOI: 10.15282/jmes.6.2014.9.0079

[学会発表](計15件)

Shintaro Takeuchi, Numerical simulation of heat transfer in solid-dispersed two-phase media, 2nd International Workshop on Numerical Simulations of Particle/Droplet/Bubble-laden Flow, JAMSTEC Yokohama Institute (Yokohama), 13 October, 2016

Jingchen Gu, Shintaro Takeuchi, Takeo

Kajishima, Effects of Solid Particles on Heat Transfer in Dense Particle-Liquid Two-Phase Media Based on Rayleigh Number, Two-phase Modelling for Sediment Dynamics in Geophysical Flows, Chuo University (Tokyo), 12-14 September, 2016

Jingchen Gu, Katsuya Kondo, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Direct Numerical Simulation of Heat Transfer in Dense Particle-Liquid Two-Phase Media, International Conference on Multiphase Flow, Firenze (Italy), 22-27 May, 2016

Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Volume-averaged equations for direct numerical simulation of particle-dispersed flow under a grid resolution comparable to particle diameter and Kolmogorov length scale, International Conference on Multiphase Flow, Firenze (Italy), 22-27 May, 2016

Shintaro Takeuchi, Suguru Miyauchi, Takeo Kajishima, Mass transfer of solute and solvent across a deforming permeable membrane, International Conference on Multiphase Flow, Firenze (Italy), 22-27 May, 2016

Takeshi Harada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Computational study of heat transfer in particle-laden flow considering temperature gradient within particles and inter-particle lubrication, Asian Symposium on Computational Heat Transfer and Fluid Flow, Busan (Korea), 22-24 November, 2015

Takeo Kajishima, Shintaro Takeuchi, Direct numerical simulation of heat transfer in liquid-solid two-phase media, 7th European-Japanese Two-Phase Flow Group Meeting, Zermatt (Switzerland), 11-15 October 2015

Takeo Kajishima, Katsuya Kondo, Shintaro Takeuchi, Numerical simulation of heat transfer in shear flow of liquid-solid two-phase media by immersed solid approach, ASME-JSME-KSME Joint Conference on Fluids Engineering, Seoul (Korea), 26-31 July, 2015

Takanori Hanawa, Suguru Miyauchi,

Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, DNS analysis of the interaction between turbulent flow and elastic fibers implanted on a flat plate, Ninth International symposium on turbulence and shear flow phenomena, Melbourne (Australia), June 30 - July 3, 2015

Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Deflection of the wake of a particle in sheared ambient flows, International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, Stockholm (Sweden), June 16-18, 2015

Shintaro Takeuchi, Takaaki Tsutsumi, Takeo Kajishima, Heat transfer in particle-dispersed two phase flows considering temperature gradient within the particles, 6th International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer, New Jersey (USA), 25-29 May, 2015

Hiroki Fukuoka, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Interaction between Fluid and Flexible Membrane Structures by a New Fixed-Grid Direct Forcing Method, International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, Athens (Greece), 20-23 March, 2015

Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Numerical study of heat transfer problems in two-phase flows involving temperature distribution within dispersed solid particles, International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, Athens (Greece), 20-23 March, 2015

Takeo Kajishima, Shintaro Takeuchi, Direct Numerical Simulation of Heat Transfer in Dispersed Solid-Liquid Two-Phase Flow, The Tenth Asian Computational Fluid Dynamics Conference, Jeju (Korea), 19-23 October, 2014

Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, Numerical simulation of the interaction between a spherical particle and curved background flows, 2nd International Conference on Numerical Methods in Multiphase Flows, Darmstadt (Germany), June 30 - July 2, 2014

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕アウトリーチ活動

第2回 Cyber HPC Symposium (201603)

http://www.hpc.cmc.osaka-u.ac.jp/lec_ws/cyberhpcsympo-2nd/

Multiphase flow seminar, Zhejiang University (201603)

第32回計算数理工学フォーラム (201703)

http://gpsun1.gee.kyoto-u.ac.jp/JASCO_ME/event/study/study.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹内 伸太郎 (TAKEUCHI, Shintaro)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50372628

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

梶島 岳夫 (KAJISHIMA, Takeo)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：30185772

(4) 研究協力者

深田利昭 (FUKADA, Toshiaki)

谷京農 (GU, Jingchen)