

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686030

研究課題名(和文) 柔軟構造体と気液界面を含む固気液三相の熱流体数値解析

研究課題名(英文) Numerical analysis of heat and mass transfer in multiphase flows

研究代表者

竹内 伸太郎 (Takeuchi, Shintaro)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50372628

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：固気液媒質が分散的に存在して流れる分散性混相流において、界面の変形およびそこでの熱の授受は系全体の熱・物質輸送に本質的な役割を果たすが、それらの解析方法は未確立である。本課題では、固体内部の温度分布を考慮した混相流中の熱輸送解析法を開発・検証し、個々の分散相近傍の流れから分散相の群挙動までの流れのマルチスケール性について研究を行った。特に固体粒子と流体の熱伝導率の比および粒子添加量によっては、粒子群に新奇な振動モードが発生する場合があることを見出しモデル化を通して機序を解明した。

研究成果の概要(英文)：Heat transfer problem in solid-dispersed two-phase flow is numerically studied. The temperature distribution within the particles and heat exchange between the fluid and particles are solved by a newly developed interfacial heat flux model. The model is thoroughly validated through comparisons with the analytical solutions of heat conduction problems. The method is applied to natural convection problems including multiple particles. Heat transfer and particle behaviours are studied for different solid volume fractions and heat conductivity ratios (solid to fluid). A transition of the particulate flow structure to oscillatory modes is newly found to take place. The study shows that the difference in the time scales of heat transfer through the fluid and solid is responsible for the oscillation, and the results highlight the effects of temperature gradient within the finite-sized particles on the flow structure and heat transfer in the solid-dispersed multiphase flows.

研究分野：数値流体力学

キーワード：混相流れ 熱輸送

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化学工業分野の流れや雲の形成また生体内流れなど自然・工業から生命科学にまでわたって見られる。相界面の変形およびそこでの熱の授受は系全体の熱・物質輸送に本質的な役割を果たすが、それらの解析方法は未確立である。これまで実施された粒子混相流の熱輸送解析の多くは質点粒子を用いたもので、代表温度が与えられた粒子を用いている。一方、粒子内部の温度分布も考慮した熱流体解析は触媒の研究者によって行われているが、もっぱら単一粒子もしくは固定粒子群であり、混相媒体の新機能の予測・解析には、相対運動する粒子群に対して界面および粒子内部における熱・物質拡散効果を考慮した解析が不可欠であると判断した。

2. 研究の目的

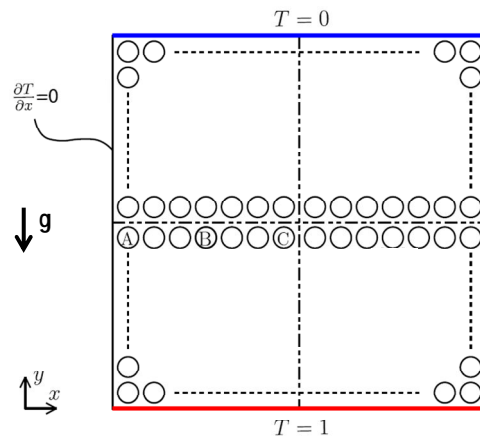
個々の分散相近傍の流れから分散相の群挙動までの流れのマルチスケール性について研究を行うことを目的とした。

以下では特に分散粒子混相流れにおける熱物質輸送問題に関する主要な研究成果を中心に報告を行う。特に有限サイズ粒子を含む混相流中の熱輸送問題において、粒子サイズが質点ではなく有限サイズであることによる流体と粒子の(並進・角)運動量の交換、および粒子内部温度分布が本質的な効果をもたらす特徴的な輸送現象について解析した結果を紹介する。

3. 研究の方法

混相流れ場の中の熱輸送問題は非線形性の強い問題である。微小領域における保存則を立式し、流体と固体の界面における熱流束が連続性を保つような異種界面熱流束モデルを提案し数値シミュレーションによって流れ場の解析を行うという方法で研究を進めた。

本研究で提案した界面熱流束分解は、物性の異なる粒子と周囲流体の界面における熱流束をEuler系で表す方法であり、粒子混相流



中において粒子内部の温度分布を考慮した熱輸送解析を可能にする方法である。

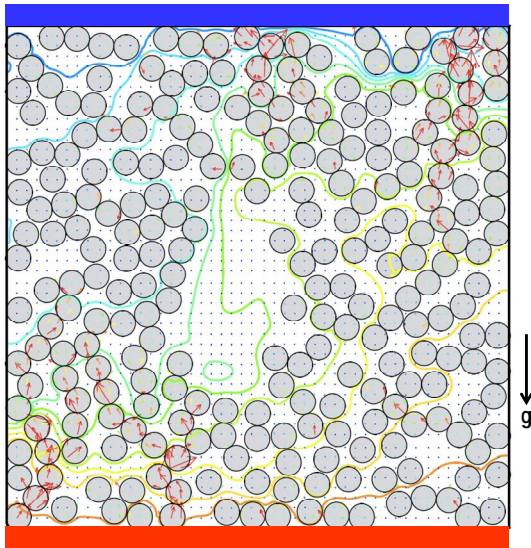
また粒子接触時の接触熱伝達モデルを構築した。本研究では温度差のある二つの粒子の接触熱抵抗を特殊関数によって表す方式を採用した。このモデルは上記の界面熱流束分解と整合するように一般化され、混相界面熱流束モデルとして整備した。こうして得た熱輸送モデルは、流体および粒子内温度分布の時間発展解法とも相性がよく、また径の異なる粒子どうしおよび粒子と壁面などの衝突熱輸送にも用いることができる。

4. 研究成果

固体内部の温度分布を考慮した混相流中の熱輸送シミュレーション手法を開発し、独自の検証問題を設定して解析解と数値シミュレーション解を比較することで手法の妥当性を確立した。

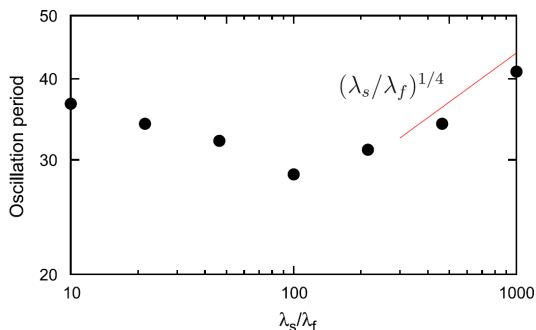
つづいて開発した手法を自然対流問題に適用した。ここでは、閉じた矩形領域の上端と下端に一定温度差を与えた系を設定し、重力の影響の下に粒子混相流れを発達させる(上に模式図を示した: 図中の○印が粒子の初期配置)。その際、浮力と粘性力の比に相当する量をパラメータとしてその値が比較的低い値に設定し、固体粒子と流体の熱伝導率の比および粒子添加量をさまざまに変化させた。

混相流れは浮力が支配的であるときは、領域中心を一方向へ回転する流れまたは左右



一对の回転流れを示す。そのときの瞬時の流れ場の一例を上図に示す。この図では粒子と粒子の間は流体で満たされており、流体と粒子の間に分布する等温度線とともに、接触した粒子間の接触熱流束を矢印で示している。

しかし粘性力の方が相対的に大きくなってくると運動量拡散と温度拡散のスケールの違いに起因する特徴的な輸送現象が見られた。すなわち熱を通しやすい粒子を入れた場合には粒子群に新奇な振動モードが発生する場面があることを見出した。解析の結果、これは粒子と粒子を伝わる熱輸送の代表時間スケールの差があることによって説明できることがわかり、モデル化を通して粒子と流体の熱伝導率の比 (λ_s/λ_f) が非常に大きい場合は振動の周期は λ_s/λ_f の1/4乗に比例する予測を得た。数値シミュレーション結果を理論予想と比較したものを下図に示す。これまで粒子を含む混相流れの解析は質点粒子を仮定したシミュレーションであったが、本研究の結果は内部温度分布まで考慮した



有限サイズの粒子の混相流に特有の現象であり、個々の分散相内部および近傍の流れから分散相の群挙動までの流れのマルチスケール性が顕在化した好例と言える。

また大規模問題への実装として開発手法を強い乱れが生じる粒子混相場における熱輸送解析を実施した。先の例と同様に一定温度差を与えた系において粒子混相流の熱輸送の影響を解析したところ、粒子と流体の熱伝導率比を適切に選んだ場合において、平均温度勾配とは逆の温度勾配をもつ流れ構造が顕著に見られた。その分布はやはり有限サイズ粒子の内部温度分布および粒子運動時間スケールによって理解することができる。拡散現象のスケールの違いが複数の空間スケールにわたって影響を及ぼすことは知られているが、混相流れのような強い非線形性を持つ系でもそのような考え方でまとめられる現象があることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

Sguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "A numerical method for mass transfer by a thin moving membrane with selective permeabilities", *Journal of Computational Physics*, 査読有, vol.284, pp.490-504 (2015)
DOI: 10.1016/j.jcp.2014.12.048/
Suguru Miyauchi, Azusa Ito, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Fixed-mesh approach for different dimensional solids in fluid flows: application to biological mechanics", *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 査読有, vol.6, pp.818-844 (2014)
<http://jmes.ump.edu.my/index.php/archive/volume-6-june-2014.html>
Takaaki Tsutsumi, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Heat transfer and particle behaviours in dispersed two-phase flow with different heat conductivities for liquid and solid", *Flow, Turbulence and Combustion*,

査読有, vol.92, Issue 1-2, pp.103-119 (2014)
DOI: 10.1007/s10494-013-9498-0
Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Effects of curvature and vorticity in rotating flows on hydrodynamic forces acting on a sphere", *International Journal of Multiphase Flow*, 査読有, vol.58, pp.292-300 (2014)
DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2013.10.006
Shintaro Takeuchi, Takaaki Tsutsumi and Takeo Kajishima, "Effect of temperature gradient within a solid particle on the rotation and oscillation modes in solid-dispersed two-phase flows", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 査読有, vol.43, pp.15-25 (2013)
DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.05.013
佐藤範和, 竹内伸太郎, 梶島岳夫, 稲垣昌英, 堀之内成明, "直交格子を用いた対流熱伝達計算における物体境界近傍の直接離散化法", *日本機械学会論文集 B 編*, 査読有, vol.79 No.803, pp.1219-1231 (2013)
DOI: 10.1299/kikaib.79.1219
佐藤範和, 梶島岳夫, 竹内伸太郎, 稲垣昌英, 堀之内成明, "直交格子法における物体境界近傍の直接離散化法(速度場と圧力場の整合性を考慮した高精度化)", *日本機械学会論文集 B 編*, 査読有, vol.79, No.800, pp.605-621 (2013)
DOI: 10.1299/kikaib.79.605
Takaaki Tsutsumi, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Effect of solid and liquid heat conductivities on two-phase heat and fluid flows", *Discrete Element Modelling of Particulate Media*, 査読有, Royal Society of Chemistry, pp.21-29 (2012)
DOI:10.1039/9781849735032-00021
大山峻幸, 伊井仁志, 杉山和靖, 竹内伸太郎, 高木周, 松本洋一郎, "フロント・トラッキング法を用いた自由界面と剛体壁における単一気泡の反発現象の解析", *混相流*, 査読有, vol.26 No.1, pp. 60-67 (2012)
DOI: 10.3811/jjmf.26.60
Satoshi Ii, Kazuyasu Sugiyama, Shintaro Takeuchi, Shu Takagi, Yoichiro Matsumoto and Feng Xiao, "An interface capturing method

with a continuous function: the THINC method with multi-dimensional reconstruction", *Journal of Computational Physics*, 査読有, Vol.231, Issue 5, pp.2328-2358 (2012)
DOI: 10.1016/j.jcp.2011.11.038
Takeo Kajishima and Shintaro Takeuchi, "Direct numerical simulation of multiphase flows involving dispersed components with deformable interfaces", *Heat Transfer - Asian Research*, 査読有, vol.40, Issue 5, pp.387-403 (2011)
DOI: 10.1002/htj.20345

(学会発表)(計28件)

Shintaro Takeuchi and 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 (ICCMSE2015)*, Athens, Greece, 20-23 March, 2015
Takeo Kajishima and Shintaro Takeuchi, "Direct Numerical Simulation of Heat Transfer in Dispersed Solid-Liquid Two-Phase Flow", *The Tenth Asian Computational Fluid Dynamics Conference (ACFD10)*, Jeju, Korea, October 19th - 23rd, 2014
Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Numerical simulation of the interaction between a spherical particle and curved background flows", *2nd International Conference on Numerical Methods in Multiphase Flows (ICNMMF2014)*, Darmstadt, Germany, June 30 - July 2, 2014
Takaaki Tsutsumi, Shintaro Takeuchi, and Takeo Kajishima, "Effect of Temperature Gradient within Solid Particles for Dispersed Two-Phase Flow and Heat Transfer", *5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013)*, Singapore, 11-14 December, 2013
Suguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Numerical Simulation of Diffusion

through Permeable Membrane using an Unconformable Mesh", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), Singapore, 11-14 December, 2013

Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "The modeling of the effect of the streamline curvature for the fluid force on a sphere", 5th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics & 4th International Symposium on Computational Mechanics (APCOM & ISCM 2013), Singapore, 11-14 December, 2013

Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima, "Decoupling the effects of the streamline curvature and the vorticity on the hydrodynamic forces acting on a spherical particle in rotating flows", 66th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Pittsburgh, USA, 24-26, November, 2013

Takeo Kajishima, Toshiaki Fukada and Shintaro Takeuchi, "The Effect of Streamline Curvature on The Fluid Force Acting on a Solid Particle", 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF2013), Nagoya, Japan, 17-21 September, 2013

Suguru Miyauchi, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Numerical modeling of biological fluid-structure interaction involving contact of elastic objects and concentration diffusion through permeable membrane", Joint EUROMECH / ERCOFTAC Colloquium 549, Immersed Boundary Methods: Current Status and Future Research Directions, Leiden, The Netherlands, 17-19 June 2013

Takeo Kajishima, Takaaki Tsutsumi and Shintaro Takeuchi, "Direct Numerical Simulation of Heat Transfer in Fluid-Particle Two-Phase Media", 8th International Conference on Multiphase Flow (ICMF) 2013, Jeju, Korea, 26-31 May, 2013

Shintaro Takeuchi, Takaaki Tsutsumi and Takeo Kajishima,

"Behaviours of dispersed particles and heat transfer in buoyant-driven two-phase flows with different solid-liquid heat conductivities", 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012), Gold Coast, Australia, 25-27 November, 2012

Takeo Kajishima, Shintaro Takeuchi and Takaaki Tsutsumi, "Direct numerical simulation of particle-laden flows", 9th Japan China Turbulence Workshop, Xi'an, China, 14-17 October 2012

Azusa Ito, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima, "Numerical analysis of the effect of flexible wall elements on flow behavior", 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 10-14 September, 2012

Shintaro Takeuchi, Takaaki Tsutsumi and Takeo Kajishima, "Effect of Solid-Liquid Heat Conductivity Ratio on Two-Phase Flow Behaviours", International Symposium on Discrete Element Modelling of Particulate Media, University of Birmingham, 29-30 March, 2012

〔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〕
なし

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
なし