

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H02066

研究課題名（和文）統合平均方程式に基づく混相乱流における非相似輸送機構の研究

研究課題名（英文）Study of non-similarity in multiphase turbulent transport on the basis of unified averaging equations

研究代表者

梶島 岳夫 (Kajishima, Takeo)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・招へい教授

研究者番号：30185772

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：多相系乱流の数値解析手法として、直接数値計算からラージエディシミュレーションへの展開を意図し、固体粒子群を含む乱流場に対して局所体積平均に基づく統合平均方程式を導出した。検査体積内での固体・流体間の相互作用力項とサブグリッドスケール応力項を抽出し、既存のモデルの形式を適用できる範囲内では、統合平均方程式の枠組みが多相系乱流の高効率解析に有効であることを検証した。有用性を示す応用例として、固液二相乱流における運動量と熱の非相似輸送条件の探索を試みたが、高濃度で混入した粒子の集団挙動を扱う必要性が見通され、現実的な格子数で求めるため、粒子間の狭隘流路に適用する拡張潤滑モデルの構築と実装を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

混相流と乱流の数値シミュレーションでは従来、それぞれの分野で慣用的な（しばしば明確に定義されていない）平均化方程式と物理モデルが用いられてきた。多相系の乱流に対しては、それぞれの既存のモデルの欠陥だけでなく、単純な組み合わせによる不整合が解消されていないため、普遍的な解析方法が確立されていない。本研究で導出した統合平均方程式は、放置されてきたこれらの問題を解決する指針を与える。省エネルギーに寄与する流動抵抗の低減と伝熱の促進の両立は、単相流では困難であるが、混相状態にすれば実現できるかもしれない。本研究は、運動量と熱の非相似輸送条件を探索するための数値シミュレーション法の構築の基盤となる。

研究成果の概要（英文）：As a proper basis of numerical method for multiphase turbulent flows, we derived an integrated average equation based on local volume averaging for direct and large-eddy simulations of particle-laden turbulent flows. The solid-fluid interaction force terms and subgrid-scale stress terms within the control volume were extracted. It was verified that the framework of our integrated average equation is effective for our purpose, within the condition in which existing models can be applied. As an application example, we attempted to explore the conditions for non-similar transport of momentum and heat in solid-liquid two-phase turbulent flows. But, we faced the necessity to simulate the collective behavior of particles laden in at high concentrations. Then, in order to deal with the conditions with a realistic computational capacity, we constructed and implemented an extended lubrication model that can be applied to narrow passages between particles.

研究分野：流体工学

キーワード：流体工学 混相流 乱流 粒子 数値シミュレーション

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

混相乱流の解明・予測・制御に関連して、実験あるいは数値計算による研究が精力的に行われている。本研究では固体粒子群を含む乱流を対象とする。固体粒子の輸送や機能性媒体の開発においては、特に粒子体積率が高い場合に関心がもたれるが、内部流動の光学的な観察や非侵襲的計測が困難であるため、数値シミュレーションへの期待が高い。

背景の流れのスケールと粒子のサイズが十分に分離された条件（乱流渦に比べて非常に小さい粒子を質点近似できる場合、逆に乱流渦よりも十分に大きい粒子の周りの流れを直接計算できる場合）では、工業的応用、基礎研究ともに多くの計算例がある。高レイノルズ数の混相乱流に対しては、格子スケール以下(subgrid scale、以下SGS)の乱れにモデルを与える Large-Eddy Simulation (LES) の試みも増えつつある。しかし、前者では普遍的な混相乱流SGSモデルが確立されておらず、後者は高コストのために工業的な応用は困難である。また、大小さまざまな粒子が含まれる場合は、既存の方法で扱うことが困難である。

乱流と混相流はそれぞれ予測困難な非線形現象であり、いずれに対しても広範に適用可能で普遍的な物理モデルが完成しているわけではない。また、粒子の混入が乱流に与える影響（乱流変調）についての知見も整理されていない。混相乱流の数値シミュレーションの確立に向けた研究課題として、乱流と混相流に対する高度なモデルを導入する前に、それらを搭載する共通基盤となる統合平均方程式を整備することが必要である。その根拠は以下のように指摘できる：

- ・乱流計算はレイノルズ平均または空間フィルターで粗視化された支配方程式を用いる。前者は平均則を定義しているが平均操作そのものは曖昧であり、後者は乱れの物理的な尺度ではなく計算格子に付随するフィルター幅に基づくモデル化にならざるを得ない。
- ・混相流計算で用いられる体積率や質量分率についても、平均をとるための時空間スケールは明確に定められていない。また、混相の物理モデルにおいては、乱流における上述の平均化との関係に注意が払われていない。
- ・平均操作そのものが空間的に変化する場合、平均流れの支配方程式にはそのことが反映されるべきであるが、平均操作と微分操作の互換性を考慮した基礎式に基づく数値計算は実現されていない。

これらの不明瞭性を残したまま既存のモデルや計算法を流用して結合した混相乱流計算では、乱流渦のスケールと粒子のサイズが十分に分離された条件においてのみ、問題の顕在化を免れているにすぎない。しかし、混相乱流計算法の適用範囲を拡げ、解析や設計のための信頼できるツールとするためには、混相と乱れに対して、直接計算と物理モデルの対象をそれぞれ明確に定義した上で、整合性をもってモデルと計算法を構成しなければならない。

### 2. 研究の目的

固体粒子群を含む乱流のLESを確立するため、空間平均操作を明確化した統合平均方程式に立脚した乱流モデル、粒子運動モデル、ならびに固体・流体相互作用モデルを開発する。その検証のため、乱れの最小スケールや粒子周りの流れまで直接計算する Direct Numerical Simulation (DNS) によるデータベースの整備を進める。

まず、粒子径と格子幅の比および粒子体積率に対して広範囲にカバーできる混相乱流シミュレーションのため、統合平均方程式を確立し、これに基づく混相乱流モデルと数値計算法を開発する。

続いて、上記手法の有用性を示す題材として、運動量と熱の非相似輸送すなわち流動抵抗の低減（運動量輸送の減少）と伝熱の促進（熱輸送の増加）の両立の発現を探索する。そのために、高濃度粒子群に対して、粒子間の狭隘な潤滑領域での運動量や熱の輸送に対する新たな計算モデルを構築する。

### 3. 研究の方法

われわれは本研究の開始前から従来の乱流ならびに多相流に対する数値計算法を見直し、多相系の乱流に適した解法に統合する研究を行ってきた。具体的には、格子幅と同程度の径の固体粒子を含む流れを解析できる体積平均方程式と相互作用項の導出(Fukada, T. et al., Int. J. Multiphase Flow, Vol.85, 2016, pp.298-313)、体積平均方程式を用いて粒子と渦の相互作用を数値解析する方法の提案(Fukada, T. et al., Int. J. Multiphase Flow, Vol.104, 2018, pp.188-205.)、体積平均方程式により流体と粒子の相互作用を解析するための流体力の評価(Fukada, T. et al., Int. J. Multiphase Flow, Vol.113, 2019, pp.165-178)を実施した。本研究では、上述の事前の成果を踏まえ、統合平均方程式を導き、乱流に対しては渦粘性モデル・渦拡散モデルを搭載する枠組みを構想した。まず、混相と乱流に対して共通の空間フィルターを施して粗視化する。その際、格子幅と同等の径をもつ粒子に対する局所体積平均法、格子幅の数倍以上の径をもつ粒子に対する埋め込み境界法をいずれも乱流のLESに通常用いられる空間フィルター形式で統一する。格子幅の変化だけでなく固体体積率の変化も表現するため、フィルタースケール内の流体の速度変動にともなう渦粘性係数の輸送方程式に対するモデリングを行う。

加えて、混相のフィルター量に対する流路壁面の境界条件を検討する。

固液二相媒体に特有な熱流動現象に対しては、大規模 DNS によるデータベースの構築を行う。そのため、われわれが開発した固液二相乱流の解析プログラム (Takeuchi S., et al., *Int. J. Heat Fluid Flow*, Vol.43, 2013, pp.15-25; Gu J. et al., *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.120, 2018, pp.250-258) を新たに切断乱流に適用する。さらに、運動量と熱に対する非相似輸送の発現の探索を題材に、混相乱流の DNS や LES を実施する。その際、粒子群の間歇的な集団現象と非相似輸送の発現の関係を解析するため、近接した固体間の潤滑領域に対する新規な取り扱いとして、拡張潤滑理論解の導出と数値計算への埋め込み法を開発する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 多相系乱流に対する統合平均方程式

多岐にわたる多相流体に対して、対象を固体・流体の二相乱流に限定しても、粒子径や粒子濃度に加え、固体と流体の密度や物性の比など、混入や物性に関する多数のパラメーターがある。われわれの関心は、乱流の運動量および熱の輸送における多相化の効果にあり、乱流渦と同等のスケールで密度が中立の粒子を高濃度で混入させる場合を想定して研究を進めた。

このような固液二相乱流を数値シミュレーションによって解析するには、乱流現象および粒子と流体の相互作用に対するモデルの影響を低減し、可能な限り大規模な流れ場を非定常的にとらえる必要がある。混入する固体粒子が乱流の DNS や LES で用いる計算格子幅と同程度である場合も想定しているため、従来のような小さい粒子に対する質点近似も、大きい粒子に対する境界埋め込み法はいずれも適していない。また、質点近似はモデルへの依存度が大きく、境界埋め込み法は計算負荷が高い。そこで、我々が独自に開発した手法を発展させ、格子幅より小さい粒子にはたらく流体力の非等方性の体積平均方程式への反映 (Fukada, T. et al., *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol.105, 2020, pp.1017-1034)、固体粒子を含む乱流における SGS モデルの評価 (Fukada, T. et al., *J. Fluid Mechanics*, Vol.946, 2022, A13) を行った。その結果、既存の SGS 乱流モデルや粒子運動モデルを使える範囲内では、基本的な考え方の妥当性は実証された。したがって、乱流や粒子運動のモデルを条件に応じて選定する必要はあるが、乱流の計算格子の幅と同程度の径で、周りの流れを格子で解像できない粒子を加えても、固液の相互作用は十分に精度よく表現することを初めて示すことができた。以上により、多相系乱流に適した統合平均方程式を導出することができたと考える。

なお、本研究から導かれた知見については、「流れの数値シミュレーション」と題して日本流体力学会誌 (ながれ) に連載している (第 1 回 保存則の計算, 42-5, 2023, pp.330-337; 第 2 回 平均操作と乱流モデル, 43-1, 2024.3, pp.33-40; 第 3 回 埋め込みの考え, 43-3, 2024.9 予定; 第 4 回 複雑流体の扱い, 44-1, 2025.1 予定)。

##### (2) 高濃度固液二相乱流伝熱の数値シミュレーション

乱流状態での運動量と熱の非相似輸送は、単相流体では容易ではないが、流体とは異なる熱伝導率をもつ粒子を加えるなど、多相化によって達成できる可能性が高まる。その条件を数値シミュレーションにより探索するには、有限サイズの粒子を扱い、表面応力を介した流体との相互作用および粒子内部の熱流束を精度よく表現する必要がある。また、大規模な流れ場を扱うための体積平均モデルの構築、粒子を高濃度で混入させる場合の粒子間の狭隘部の扱いを新たに開発する必要がある。研究期間の初期に、概説論文 (Kajishima, T., *Fluid Dynamics Research*, Vol.51, 2019, 051401) において、本研究の二本柱である体積平均の考え方と狭隘流路の扱い方について基本的な構想を公表した。

われわれが開発した伝熱を伴う固液二相乱流の直接数値計算プログラムを温度成層のある平行平板間乱流に応用し、駆動の条件 (レイノルズ数、レイリー数) と粒子の条件 (流体との熱伝導率比、粒子径、体積率) を調整しながら、流動抵抗と熱伝達を評価して非相似輸送の発現を探索する計画であった。しかし、その過程で、粒子の大規模な集団挙動を捕捉する必要性が示唆された (例えば、固液二相自然対流の解析で、多数の粒子が数珠つながりになると対流の反転が生じるなど、局所的に特定の分布を形成した粒子群を通る熱流束が流れを劇的に変える現象を見いだしている; Takeuchi, S. et al., *Phys. Rev. Fluids*, Vol.4, 2019, 84034)。粒子の高濃度領域では、粒子間の狭隘部での潤滑流れが粒子の集団挙動に支配的な影響を及ぼすことになるが、一般には数値計算の格子で潤滑流れを捕捉することができない。そこで、潤滑理論の解析解を埋め込む方法に着想し、凸面どうしの粒子間に適用できるよう、古典的なレイノルズの潤滑理論を拡張し、その解析解を導出した。粒子間の狭隘部に拡張潤滑理論解を埋め込んだ結果は、解析解または高解像度の数値解が得られるテストケースに対して良好に一致した。また、当初の計画には含まれていないが、近接した粒子間の熱伝達が重要との認識から、輻射を考慮した計算法も開発した。これは、従来のような質点近似された粒子間ではなく、表面の温度分布も考慮した斬新な手法であり、粒子内部の伝導と粒子間の輻射のバランスが粒子群の挙動に大きく影響を及ぼすという興味深い結果が得られている。

以上、非相似輸送条件の探索や定量化は将来の課題として残ったが、これを実現する鍵となる近接粒子間の運動量輸送と熱移動に対する新規な方法を開発することができた。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeuchi Shintaro, Miyamori Yuri, Gu Jingchen, Kajishima Takeo	4. 巻 4
2. 論文標題 Flow reversals in particle-dispersed natural convection in a two-dimensional enclosed square domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 84304(22pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.084304	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 -
1. 著者名 Kajishima Takeo	4. 巻 51
2. 論文標題 Immersed boundary/solid method for the numerical simulation of particle-laden flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 051401(13pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/ab27e7	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 -
1. 著者名 Fukada Toshiaki, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 105
2. 論文標題 Anisotropic Reaction Force Model in Two-way Coupling Simulation for a Smaller Particle Than Grid Spacing Based on Volume Averaging	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Flow, Turbulence and Combustion	6. 最初と最後の頁 1017-1034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10494-020-00142-0	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 -
1. 著者名 Takeuchi Shintaro, Fukada Toshiaki, Yamada Shuji, Miyauchi Suguru, Kajishima Takeo	4. 巻 6
2. 論文標題 Lubrication pressure model in a non-negligible gap for fluid permeation through a membrane with finite permeability	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 114191(17pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.114101	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 -

1. 著者名 Takeuchi Shintaro, Miyauchi Suguru, Yamada Shuji, Tazaki Asahi, Zhang Lucy T, Onishi Ryo, Kajishima Takeo	4. 巻 53
2. 論文標題 Effect of lubrication in the non-Reynolds regime due to the non-negligible gap on the fluid permeation through a membrane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 035501(11pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/abf3b4	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 該当する

1. 著者名 Fukada Toshiaki, Takeuchi Shintaro, Kajishima Takeo	4. 巻 946
2. 論文標題 Particle subgrid stress models for large Stokes numbers in particle-laden turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A13:1-39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.593	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 -

1. 著者名 Takeuchi Shintaro, Omori Takeshi, Fujii Takehiro, Kajishima Takeo	4. 巻 27
2. 論文標題 Higher order lubrication model between slip walls	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Microfluidics and Nanofluidics	6. 最初と最後の頁 46(10pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10404-023-02644-5	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 -

1. 著者名 梶島岳夫	4. 巻 42
2. 論文標題 流れの数値シミュレーション 1. 保存則の計算	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 330-337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 梶島岳夫	4. 巻 43
2. 論文標題 流れの数値シミュレーション 2. 平均操作と乱流モデル	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 33-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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11件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima
2. 発表標題 A new immersed stress method based on volume average
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeo Kajishima, Hui Tang, Firdaus Mohamad, Kie Okabayashi
2. 発表標題 Discussion of subgrid scale models for the large eddy simulation with highly non-uniform grid
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 梶島岳夫
2. 発表標題 乱流のLarge Eddy Simulationの課題
3. 学会等名 日本機械学会年会2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田修司
2. 発表標題 埋め込み境界法を用いた潤滑が支配的な流れ場における膜透過流束の解析
3. 学会等名 第34回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶島岳夫
2. 発表標題 二相乱流のLarge-Eddy Simulationに向けて
3. 学会等名 日本機械学会 第100期流体工学部門講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋本健人
2. 発表標題 二次元正方形キャピティ内の熱伝導性固体粒子を含む自然対流における輻射伝熱の影響
3. 学会等名 第36回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 祝峻太郎
2. 発表標題 界面垂直方向圧力分布を考慮した潤滑モデルを埋め込む粒子流れ解法
3. 学会等名 第36回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shuntaro Hour i
2. 発表標題 Numerical method for inter-particle flow with immersed pressure solution of lubrication
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kento Hashimoto
2. 発表標題 Heat transfer in particle-laden flow considering temperature gradient within the particles and radiative heat transfer
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shuntaro Hour i
2. 発表標題 Numerical method for capturing interaction forces between fluids and solid objects with immersed pressure solution of lubrication
3. 学会等名 10th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kento Hashimoto
2. 発表標題 Heat transfer in natural convection with conductive particles considering radiative heat transfer
3. 学会等名 10th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer ( 国際学会 )
4. 発表年 2023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 分担者	竹内 伸太郎  (Takeuchi Shintaro)  (50372628)	大阪大学・大学院工学研究科・教授   (14401)	

	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	深田 利昭  (Fukada Toshiaki)		

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
---------	---------