

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：82641

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13692

研究課題名（和文）乱流による非等方な粒子拡散挙動の解明

研究課題名（英文）Study on anisotropic dispersion of particles in turbulence

研究代表者

深田 利昭（Fukada, Toshiaki）

一般財団法人電力中央研究所・エネルギー技術研究所・主任研究員

研究者番号：30812127

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：乱流中の粒子拡散挙動を明らかにするため、詳細な数値解析を実施し、複数の粒子拡散モデルの再現性を評価した。乱流の数値解析実施に先駆けて、粒子挙動を高精度に再現するための解析手法を確立し、その手法の妥当性を確認した。非等方な粒子拡散の向きに着目して、粒子のサイズによる各モデルの再現性の違いを示した。さらに等方乱流と非等方乱流では適切な粒子拡散モデルが異なる可能性があることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の前半で提案した粒子サイズの影響を反映した流体-粒子の相互作用解析手法は、粒子を質点とみなす従来の解析手法よりも現実的であり、大規模かつ高精度な粒子群挙動が再現可能となった。乱流中の粒子拡散挙動に関する結果では、これまで不明であった乱流構造によるモデルの再現性の違いを示した。得られた結果に基づいて条件に応じたモデルの切り替えを提案することで、粒子挙動が重要な工学的応用や自然界の現象に対して高精度な予測を可能にする。

研究成果の概要（英文）：To clarify the behavior of particle diffusion in turbulent flows, detailed numerical analyses were carried out to evaluate the reproducibility of several diffusion models. Prior to the implementation of the numerical analysis of turbulent flows, an numerical method for reproducing the particle behavior with high accuracy was established and its validity was confirmed. Focusing on the directionality of particle diffusion, the reproducibility of each model was shown to change with particle size. Furthermore, it was clarified that the appropriate particle diffusion model differs between isotropic and anisotropic turbulence.

研究分野：流体工学

キーワード：粒子拡散 乱流 固気混相流 体積平均

1. 研究開始当初の背景

固体や液滴、気泡などの形態をとる粒子群の集団挙動の予測は、雲の形成過程といった自然現象の解明や微粉炭燃焼発電プラントなどの性能予測に関わる非常に重要な技術である。粒子群の集団挙動を数値解析で予測する際には、例えば数 μm から数 m にわたるマルチスケールな現象を全て捉えることは計算負荷の観点から非現実的である。そのため解析格子で直接捉える解像スケールと、より小さな非解像スケールを分離し、非解像な乱流構造に起因する粒子群の非等方な拡散挙動を適切にモデル化する必要がある。

粒子拡散モデルに関する研究のアプローチは、仮定したモデルを大規模な流れ場解析に適用してその統計的な結果から妥当性を調べるマクロアプローチと、粒子群と乱流の相互作用をできるだけ詳細に解析してモデルの再現性を直接確かめるミクロアプローチに大別される。これまで多くのマクロアプローチが試みられているものの、実用的な粒子拡散モデルは確立されていない。一方、モデルの有効性に関してはミクロアプローチによる評価も重要であるが、限られた条件の等方的な乱流に対して粒子拡散挙動が評価されているのみで、非等方な乱流による影響など詳しく調べる必要がある。

粒子群と乱流の相互作用を詳しく調べるミクロアプローチでは、空間領域を限定し、乱流構造を直接解像しつつ、個々の粒子を追跡する数値解析が行われる。さらに粒子のサイズは乱流の最小渦に匹敵することも多いため、粒子を大きさの無い質点とみなす従来の方法ではなく、粒子サイズの影響も加味した高精度な粒子-流体相互作用モデルが必要である。

2. 研究の目的

まず粒子サイズの影響を反映した粒子-流体の相互作用モデルを構築する。ミクロアプローチの立場から、この粒子-流体の相互作用モデルを用いて、等方および非等方な乱流における粒子群の挙動についての詳細な数値解析を実施し、これまでに提案されている粒子拡散モデルの適用性を明らかにする。

3. 研究の方法

粒子拡散モデルのミクロアプローチにおいては、最小渦を解像する乱流解析を実施する。格子幅程度(すなわち最小渦スケール)またはより小さな粒子の存在する位置では、粒子周囲に形成される流れ構造を直接捉えることはできず、代わりに格子幅スケールで局所平均した流れの情報が得られる。粒子-流体の相互作用はこの局所平均速度と粒子サイズに基づいて決定される。粒子を質点とみなす従来モデルでは、粒子の存在による流れの擾乱効果が考慮されていない。そこで粒子-流体の相互作用モデルの構築にあたっては、まず単一粒子スケールの数値解析(図1(a))を実施し、粒子周囲に形成される流れ構造を詳細に取得する。その結果を用いて、擾乱の情報を含む局所体積平均速度から粒子-流体の相互作用を求める方法を構築する。

粒子群と乱流の相互作用解析(図1(b))では、まず粒子加速度の確率密度分布について既往の結果と比較することで、構築した粒子-流体相互作用モデルを乱流場に適用することの妥当性を確かめる。次に粒子拡散挙動について検討するために、すべての方向にランダムな乱れが生じて平均速度が0となる等方乱流と、特定方向に正弦波分布の平均速度をもつ非等方乱流をそれぞれ検討する。非等方な粒子拡散の向きを特徴づける主方向に着目し、これまでに提案されている基本的なモデルの再現性について、解析結果に基づき評価を実施する。

4. 研究成果

(1) 単一粒子周りの解析結果に基づいて新たな粒子-流体の相互作用モデルを提案した。粒子自身による流れの擾乱効果を反映したモデルはここ数年でいくつか提案されているが、多くの

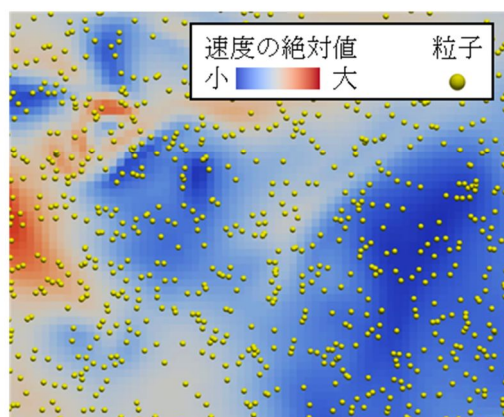
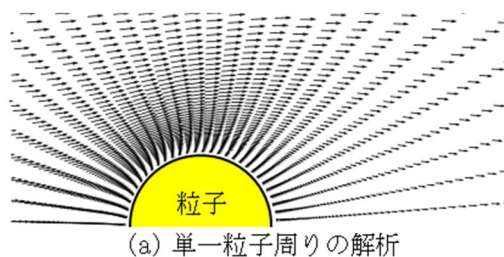


図1 本研究の解析対象

モデルでは粒子近傍における解析格子上的の速度の定義が不明確である。これに対して本研究の提案モデルでは、解析格子上的の速度が体積平均速度として定義の明確な量となっている。提案モデルの有効性を確認するために、渦が規則的に並ぶ流れ場の中に置かれた単一粒子の軌跡について、粒子を質点とみなす従来モデルと比較した(図2)。ここでは粒子サイズより充分小さい解析格子を用いた完全解像計算の結果を参照データとした。提案モデルでは粒子サイズ程度の解析格子を用いているにも関わらず、完全解像計算と同様の結果が得られている。一方で粒子を質点とみなす従来モデルでは、粒子自身による流れの擾乱の影響を考慮しないことから、相互作用を小さく評価することになり、結果として背後の渦にほとんど追従せず、完全解像計算とは大きく異なる結果を得た。

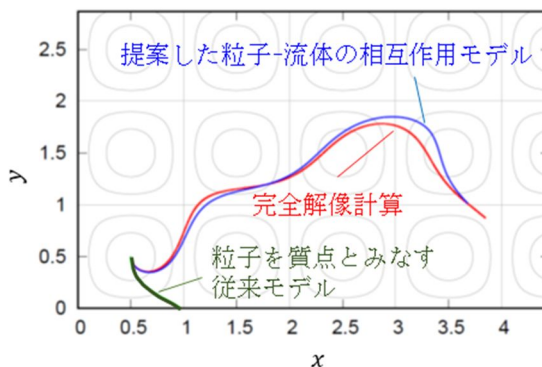


図2 モデルによる粒子軌跡の比較

(2) 提案した粒子-流体の相互作用モデルの乱流場における適用性を確認するために、既発表の完全解像計算と同じ条件の小規模な粒子群と乱流の相互作用解析を実施した。すべての粒子の加速度に関して確率密度を評価した結果(図3) 提案モデルは完全解像計算の結果と良好に一致した。さらに体積平均領域サイズ(解析格子幅の程度)を明示的に考慮することで、格子幅 Δ と粒子径 D の比 D/Δ によらない結果が得られた。この結果は、粒子を質点とみなす従来モデルが D/Δ によって有意な影響を受けることと対照的である。より大規模な流れ場解析では、計算負荷が膨大になりすぎて完全解像計算が難しくなることから、提案モデルが有効な選択肢となることが示された。

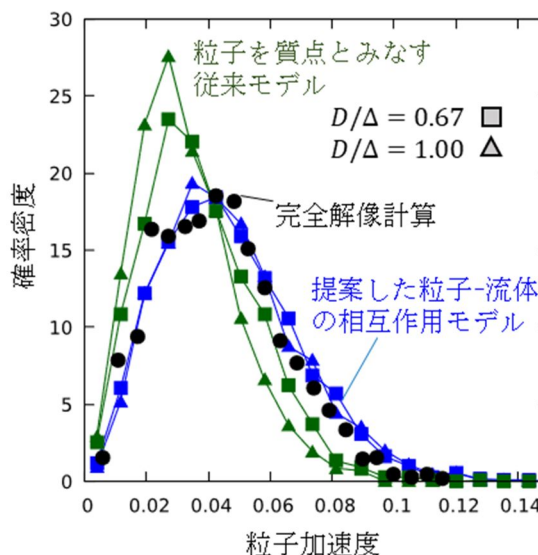


図3 乱流中の粒子加速度の確率密度分布

(3) 粒子拡散の方向性について、提案した粒子-流体の相互作用モデルを用いた乱流解析の結果を詳細な粒子群挙動の参照データとして、これまでに提案されている基本的なモデルの再現性を調べた。現在用いられている粒子拡散モデルとして、拡散フラックスが解像スケールでの粒子運動量の空間勾配に比例すると仮定する「勾配拡散モデル」と、粒子拡散を記述する式に現れる非解像速度の情報を解像速度でおきかえて近似的に計算する「スケール相似モデル」の二通りを考えた。非等方な粒子拡散の向きを特徴づける主方向に関して、粒子拡散モデルでの予測と実際の結果は角度 θ だけ異なっており、 $\cos\theta$ が1に近いほど一致度が高い。そこで $\cos\theta > 0.9$ となる確率を粒子拡散モデルの再現性として評価した(図4)。粒子慣性の指標である緩和時間と乱流最小渦の時間スケールとの比で定義されるストークス数 St が小さな条件 ($St < 30$) においては、等方、非等方乱流のいずれにおいてもスケール相似モデルの方が勾配拡散モデルよりも再現性が高く良好な結果を得た。等方乱流では、 $St > 50$ において、両モデルの再現性が同等の値を示すことから、粒子が乱流渦に追従しにくくなる高 St 条件では、スケール相似の仮定が成立しにくくなるのがわかる。一方で平均速度分布を有する非等方乱流では、 St の増加に伴いスケール相似モデルの再現性も増加しており、常に勾配拡散モデルよりも良好な再現性を示した。このことから特に平均速度分布の影響が大きい場合には、スケール相似モデルの適用が有効と示唆される。以上より、等方および非等方乱流では粒子拡散モデルの再現性が異なり、特に St 条件によって有効なモデルが異なる可能性が示された。本研究の結果や新たなモデルに対する同様の評価に基づいて、条件に応じたモデルの切り替えを提案することで、自然現象や工業プラントにおける粒子拡散の予測精度向上が期待される。

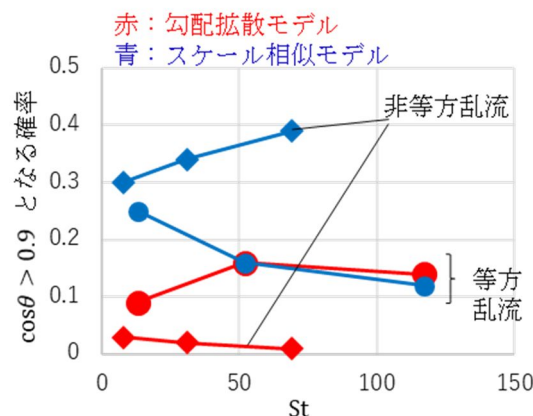


図4 粒子拡散モデルの再現性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 Fukada Toshiaki、Takeuchi Shintaro、Kajishima Takeo	4. 巻 113
2. 論文標題 Estimation of fluid forces on a spherical particle for two-way coupling simulation based on the volume averaging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Multiphase Flow	6. 最初と最後の頁 165 ~ 178
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.01.009	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 深田利昭	4. 巻 55
2. 論文標題 非一様流れの中で粒子が受ける履歴力の数値解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 粉体工学会誌	6. 最初と最後の頁 433 ~ 438
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 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 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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima
2. 発表標題 A REACTION FORCE MODEL IN TWO-WAY COUPLING SIMULATION FOR A SMALLER PARTICLE THAN GRID SPACING BASED ON VOLUME AVERAGING
3. 学会等名 10th International Conference on Multiphase Flow (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi, Takeo Kajishima
2. 発表標題 A NEW IMMERSSED STRESS METHOD BASED ON VOLUME AVERAGE
3. 学会等名 ASME - JSME - KSME Joint Fluids Engineering Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 深田利昭, 竹内伸太郎, 梶島岳夫
2. 発表標題 粒子周り流れの擾乱効果を考慮した流体力の評価手法
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiaki Fukada
2. 発表標題 Numerical approach for flow laden with particles of non-negligible size
3. 学会等名 A Symposium on Patterns and Dynamics in Multiphase and Interface Flows (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Toshiaki Fukada, Shintaro Takeuchi and Takeo Kajishima
2. 発表標題 Effect of flow disturbance around a particle for fluid force estimation in two-way coupling simulation
3. 学会等名 71st Annual Meeting of the American Physical Society Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2018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
--	---------------------------	-----------------------	----

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