

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03925

研究課題名（和文）乱流と微小粒子群の相互作用に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental study on interactions between small solid particles and turbulence

研究代表者

渡邊 威（Watanabe, Takeshi）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30345946

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：乱流による粒子輸送現象は、自然界から工学的流れに至るまで幅広く観測される普遍的な物理現象である。本研究では、固体粒子群により生じる乱流変調に関する解析をおこなった。固体粒子を質点粒子によって近似した場合、生じる乱流変調の物理的な妥当性や計算精度を数値計算により検証した。有限サイズの粒子群と乱流の相互作用に関する大規模計算を実行し、その結果を質点近似した粒子により得られたものと比較することで近似の妥当性を検証した。さらに質点近似に関する問題点や計算手法の改善点などを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流粒子輸送における乱流変調への粒子群の影響に関する解析は、混相乱流研究の基本的な問題の一つである。本研究を通して粒子群と乱流の相互作用の素過程の理解を深め、簡易的なモデルで計算することの妥当性を検証することで、乱流粒子輸送に関する様々な応用解析におけるモデル化の指針を得ることが可能である。また、流れと粒子群の相互作用の計算には、粒子（点）と流体（場）の情報の授受が伴うため、効率的な計算には工夫が必要である。計算上の工夫や改善点を明らかにすることは、将来の計算コストの削減と計算の信頼性の向上に大きく寄与する。

研究成果の概要（英文）：Particle transport by turbulence is a universal physical phenomenon that has been observed in a wide range of natural and engineering flows. In this study, turbulence modulation caused by the ensemble of solid particles is analyzed by conducting direct numerical simulation (DNS). The physical validity and computational accuracy of the turbulence modulation induced by solid particles approximated by point-particles are numerically verified. The validity of the approximation is verified by comparing the results obtained by performing a large-scale calculation of the interaction between finite-sized particles and turbulence with results obtained by DNS using point-particles. Furthermore, problems and improvements of calculation method related to the point-particle approximation are clarified.

研究分野：統計流体力学，数値シミュレーション

キーワード：固体粒子 乱流変調 シミュレーション解析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の計算機の飛躍的な発展は、乱流と微小物質の複雑な相互作用を第一原理になるべく忠実に、かつ精度よく計算することを可能にしつつある。微小液滴や気泡、固体粒子群を内包する混相流や、高分子が混入した非ニュートン流体の流れはその典型例である。粒子群を内包する流れの数値計算は、離散的な粒子群の動力学計算と、場の方程式を連結して解くいわゆるオイラー・ラグランジュ計算のプロトタイプとして、極めて重要な研究課題である。

粒径が乱流中の微細渦よりも小さいとき、粒子は質点に近似して扱われることが多い。このとき粒子群と流れ場との相互作用は、粒子重心点において粒子が流体から受ける力、及び粒子から流体への反作用力を、重心点を取り囲む流体計算格子を介して計算される。この手法は 2way カップリング計算と呼ばれ、多数の固体微小粒子を内包した乱流の近似計算手法の一つとして古くから用いられてきた(例えば Computational Methods for Multiphase flow (Cambridge Univ. Press) の 9 節参照)。一方で粒子と乱流の相互作用を厳密に評価するためには、粒子は質点近似を用いずに有限の大きさを持つ粒子として扱い、粒子表面において流れ場との粘着条件を課し、個々の粒子周りの流れを解像して計算する必要がある。粒子解像計算の方法は様々あるが、一般に膨大な計算格子点を用意する必要があり、扱う粒子数が巨大になればその計算コストは莫大なものになる。

計算機の演算能力の飛躍的向上に伴い、有限サイズ粒子群の挙動を扱う研究は今後益々重要になっていくと考えられる。一方で粒径が十分小さく、且つ粒子数密度が高い場合には、質点近似による取り扱いが有効な近似計算法の一つとして進化し続けると予想される。

### 2. 研究の目的

(1) 乱流中の微細渦スケールと同程度の粒径でかつ粒子周りの流れを解像した固体粒子群と乱流の相互作用を大規模数値計算により解析する。比重や体積分率を変化させたときの粒子群の動径分布関数や衝突頻度、乱流変調への影響を調査する。

(2) レイノルズ数や粒子数密度などの物理パラメータを同一にした質点近似粒子群による乱流変調の 2way カップリング計算を行い、(1) と同様の解析を行う。両者の結果を詳細に比較することで、質点近似計算の妥当性や限界を明らかにし、高精度近似計算手法の構築に向けた知見の獲得を目指す。

(3) 有限サイズ粒子群を伴う乱流輸送計算の高速化に向けて、時間刻み幅の制限に伴う計算速度の限界を緩和するための陰的な時間発展法の改良を検討する。

(4) 質点近似粒子を用いる場合の流体力の評価においては、粒子自身による流れ場の擾乱の影響を取り除いた計算を実施しなければ、流体力を過小評価することになる。非擾乱速度を擾乱速度場から求める方法は一意でなく、過去にいくつかの近似手法が提案されている。本研究ではこれらの手法の再検討を行い、その有効性と本研究で採用している計算方法との相性を探る。

### 3. 研究の方法

(1) 乱流中の有限サイズ粒子の挙動解析の計算には、Volume Penalization 法(P. Angot et al. Numer. Math. 81, 497(1999))を用いた。これは埋め込み境界法の一つであり、固体領域を浸透率が極めて小さな多孔性媒質と見なして、この媒質内に Darcy 則を仮定した体積力を流体方程式に付加することで、固体-流体の連成問題を解く手法である。この計算手法自体は確立されたものであり、国内およびヨーロッパの研究グループによって様々な研究展開がなされている(例えば B. Kadoch et al. J Comp. Phys. 231, 4685(2012))。系の支配方程式は Navier-Stokes 方程式と連続の式、及び粒子群の並進および回転を記述する運動方程式となる。流れ場の計算にはフーリエ・スペクトル法、あるいは有限差分法を用いた。

(2) 大規模計算の実施のためのコードを開発する。並列化は流れ場を 2 次元領域分割し、直方体の集合として扱う。各直方体領域の流れとそこに属する粒子の運動を各プロセスに割り当て、並列計算を行う。プロセス並列化は MPI を用いてコードの実装を行い、各プロセス内では Open MP を用いたスレッド並列化を行う。本研究では名古屋大学情報基盤センターのスパコンを利用して計算を行った。粒径は乱流の散逸長程度に設定し、粒径を代表長さとして定義したレイノルズ数は常に 1 を超えないようにする。粒径は流体計算格子の 20 格子点程度となるようにし、粒子形状を直交格子上で表現する。20 格子点程度あれば、粒子に働く力やトルクをある程度精度よく計算できる。粒子群の体積分率および比重をパラメータとして粒子群が乱流に及ぼす影響を詳細に調べた。

(3) Volume Penalization 法を用いた粒子解像計算には浸透率を表す微小パラメータが存在し、これは陽的な時間積分において時間刻み幅の取り方に大きな制約を与える。このため、長時間積

分の実施には膨大な計算コストを要する。計算の高速化を目指すために、有限サイズ粒子群の計算に陰的解法を導入し、数値積分の時間刻み幅の制約を緩和することで、計算コスト削減に取り組んだ。

(4) 質点近似粒子を用いた 2way カップリング計算において、粒径が流れ場の計算格子間隔に比べて十分小さい場合、抗力は粒子自身による擾乱を含むストークス抵抗を用いて評価できる。しかし両者が同程度のオーダーになると粒子自身が与える速度場への擾乱の影響は無視できない。この時は非擾乱速度を用いてストークス抵抗を評価する必要がある。そこで非擾乱速度を求める手法として提案されている Horwitz & Mani, J. Compt. Phys. 318 (2016) 85 および Yoshida et al., Chem. Phys. Lett. 737 (2019) 136809 の方法をスペクトル DNS 法へ適用する方法について検討を行い、その妥当性について検証した。

#### 4. 研究成果

(1) 質点近似粒子を用いない、有限サイズの粒子群と乱流の相互作用に関する計算を質点近似粒子と同じ物理条件下で実行し、両者の結果を比較検討することで、質点近似の取り扱いに関する妥当性や問題点を明らかにすることを目指した。計算領域は一辺が 2 の周期的境界条件に従う立方体とし、乱流計算の格子点数は  $1024^3$ 、一つの粒子について約  $20^3$  格子点を用いてその周りの流れを解像し、個々の粒子群の挙動と乱流変調の様子を、長時間に渡る数値積分を実行することにより解析した。計算領域全体に最大 6144 個の固体球形粒子を分散させた計算を行い、乱流レイノルズ数を抑えて粒子周りの流れを十分に解像できるように配慮した。粒径はコルモゴロフ長程度であり、これは特徴的な乱流渦に比べて比較的小さい。両手法で得られた乱流スペクトルの振る舞い等の結果(図1)から、質点近似粒子群による乱流変調と有限サイズ粒子群による乱流変調には、特に大スケールでの振る舞いは定量的にも良く一致することが明らかになった。これは条件によっては質点近似計算の有効性や妥当性を根拠づけるものである。

(2) 有限サイズの粒子群を空間的に周期的に配置し、乱流場がこれらの粒子群によって変調する様子を解析した(図2)。また、これらの有限サイズ固体粒子を質点近似した粒子に置き換え、質点近似粒子による反作用力を考慮した計算を行い、両者を比較することで質点近似の影響を検証した。解析では固体粒子の粒径を固定したまま、粒子数密度を変化させたときに乱流の運動エネルギーがどのような変化をするか調査した。その結果、運動エネルギーの減衰の様子は、ダムケラ数(粒子数密度に比例する流れの緩和時間を乱流の大渦回転時間で無次元化して定義される)を用いて整理されること、同じ物理的条件下であっても質点近似粒子よりも有限サイズ粒子群の方がより大きく乱流の運動エネルギーが減衰することがわかった(図3)。これは粒子近傍におけるエネルギー散逸の増大が大きく寄与していることが要因と考えられる。

(3) Volume Penalization 法は固体領域を浸透率が非常に小さい多孔性物体とみなし、流体方程式に強制項  $F_{vp} = -\chi(x)(u(x,t) - v_p(t))/\eta$  ( $\eta \rightarrow 0$ ) を印加することで、物体表面における粘着条件を近似的に満足させて流体と剛体の連成問題を解析する方法である。時間発展に陽的な計算スキームを用いた場合、その時間刻み幅の値は浸透率  $\eta(\rightarrow 0)$  の値に

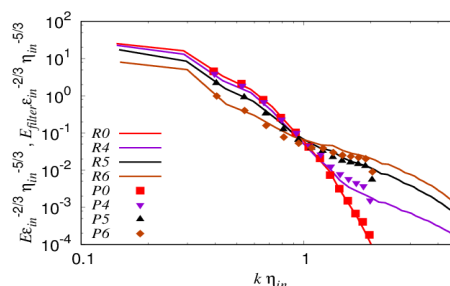


図1 粒子群による乱流のエネルギースペクトルの変化の様子。比重( )の増加とともに、全波数領域でのスペクトルの振る舞いが大きく異なる。また質点近似した粒子群による乱流変調との結果(P0-P6)とよく一致していることがわかる。

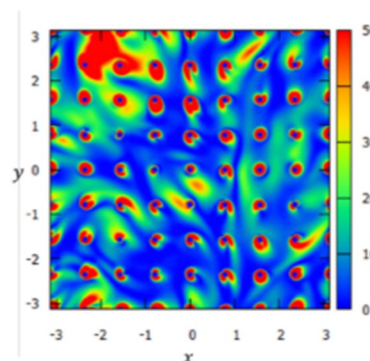


図2 流れ場に周期的に配置された固体粒子群と乱流渦の様子を示す。立方体の計算領域のある断面における流れ場の様子を可視化している。

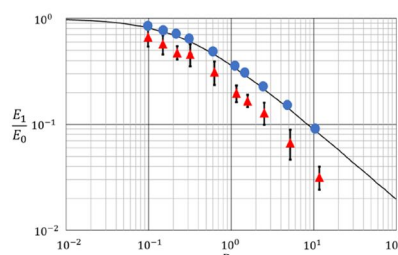


図3 流体の運動エネルギー(粒子の存在を考慮しない場合の値で規格化)をダムケラ数  $Da = \tau/\tau_f$  の関数としてプロットしたもの。ここで赤三角が有限サイズ粒子による結果を示し、青丸は質点近似粒子による結果をそれぞれ示している。

より制約を受け、十分な時間ステップを確保した計算を実施するには膨大な計算コストがかかる．そこで有限サイズ粒子群の計算に陰的解法を導入することに取り組み、数値積分の時間刻み幅の制約を緩和することで、計算コスト削減に取り組んだ．静止流体中を単振動する球に働く抗力を計算により求め、得られた結果を理論解と比較することで陰的解法による計算の実装の妥当性とそのパフォーマンスの検証を行った．図4に振動球に働く抗力の時間変化の様子を示す．この計算では浸透率 $\eta$ に対して時間刻み幅を100倍大きくとっている．この結果より、陰的解法で得られた抗力の値は、時間刻み幅を大きくとっても理論解と遜色ない振る舞いを示していることがわかった．

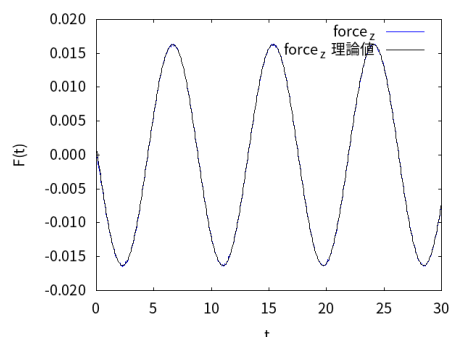


図4 静止流体中を単振動する球に働く抗力の時間変化の様子を示す．理論解とほぼ一致した振る舞いを示すことがわかる．計算領域 $(2\pi)^3$ 、格子点数 $512^3$ 、球の半径0.125、粒子レイノルズ数0.5、VP項の浸透率は $\eta = 10^{-5}$ 、時間刻み幅は $10^{-3}$ である．

(4) 質点近似計算においては、抗力の評価式としてストークス抵抗を仮定した解析が行われている．粒径が流れ場の計算格子間隔に比べて十分小さい場合、ストークス抵抗に含まれる流体速度の評価の際に粒子点での値を用いても大きな問題にならないが、両者が同程度のオーダーになると粒子自身を与える速度場への擾乱の影響が顕著になるため、非擾乱速度を用いてストークス抵抗を評価する必要がある．しかしこの非擾乱速度は一意には決められないため、過去に様々な手法が提案されてきた．本研究では非擾乱速度を求める手法の一つとして提案されている Horwitz & Mani, J. Compt. Phys. 318 (2016) 85の方法をDNSコードに適用する方法について検討を行った．擾乱速度場から非擾乱速度を推定する際に用いる係数値が、スペクトル法の計算方法ではどのような値を示すか具体的な計算を行い、その妥当性や問題点について検証を行った．その結果、得られた係数値から求めた非擾乱速度は単一粒子周りの流れから得られる理論的な予測値と矛盾しない結果が得られることが確認された．

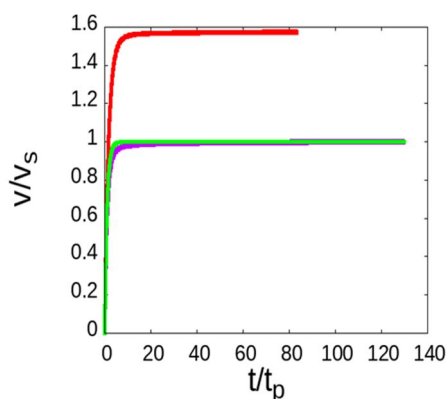


図5 静止流体中を落下する質点粒子の速度の時間変化の様子．緑の線は解析解を示し、紫線が非擾乱速度を用いて得られる数値解である．赤線は擾乱速度を含む場合であり、理論解から大きくずれる．

(5) Horwitz and Mani (2016)の非擾乱速度の評価方法は複数個の係数値を事前に求めておく必要があり、多粒子系に拡張した計算への適用は容易ではない．そこで、ストークスレットの解を用いた非擾乱速度の評価方法 (Yoshida et al., Chem. Phys. Lett. 737 (2019) 136809) に着目し、単一粒子の沈降問題についてこの方法の妥当性を検証した．この論文では、 $x$ 方向の一様流中の原点に $6\pi\mu a U^\infty$ の力が集中して加わっている場合に生じる流れの解(ストークスレット)

$$\mathbf{u}^A = U^\infty \left[ \left(1 - \frac{3a}{4r}\right) \mathbf{e}_x - \frac{3ax}{4r^3} \mathbf{x} \right]$$

を用い、 $\sum_{p=1}^8 |\mathbf{u}^N - \mathbf{V} - \mathbf{u}^A(\mathbf{x}_p)|^2$ が最小をとる $U^\infty$ の値を非擾乱速度と評価し、抗力 $F_{pi} = 6\pi\mu a (U_\infty - V_i(t)) \delta(\mathbf{x} - \mathbf{r}_i)$ を求めている．我々は有限差分法の流体計算コードにこの方法を実装し、計算の妥当性について検討した． $x$ 軸方向に一様な重力場 $\mathbf{g} = (g, 0, 0)$ の中で、静止した流体中を質量 $m$ の質点が流体抵抗を受けながら自由落下する問題を解析した．計算領域は一辺の長さが4の立方体とし、計算格子点数は $128^3$ とした．粒子レイノルズ数は0.1、粒径と計算格子幅の比を1とし、終端速度が非擾乱速度を用いた場合とそうでない場合にどのように違うかについて解析した(図5)．この結果より、非擾乱速度が提案された方法で精度よく求まることがわかった．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Saito Izumi, Watanabe Takeshi, Gotoh Toshiyuki	4. 巻 931
2. 論文標題 Modulation of fluid temperature fluctuations by particles in turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.939	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 Gotoh Toshiyuki, Saito Izumi, Watanabe Takeshi	4. 巻 6
2. 論文標題 Spectra of supersaturation and liquid water content in cloud turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 110512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.110512	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 Saito Izumi, Watanabe Takeshi, Gotoh Toshiyuki	4. 巻 21
2. 論文標題 Statistical properties of a stochastic model of eddy hopping	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Atmospheric Chemistry and Physics	6. 最初と最後の頁 13119 ~ 13130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5194/acp-21-13119-2021	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 Watanabe Takeshi, Saito Izumi, Gotoh Toshiyuki	4. 巻 2215
2. 論文標題 Turbulence modulation by small particles in isotropic turbulence	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 RIMS Kokyuroku	6. 最初と最後の頁 20-31
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 Vincenzi Dario, Watanabe Takeshi, Ray Samridhi Sankar, Picardo Jason R.	4. 巻 912
2. 論文標題 Polymer scission in turbulent flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.1092	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 Yasuda Tatsuya, Gotoh Toshiyuki, Watanabe Takeshi, Saito Izumi	4. 巻 898
2. 論文標題 Peclet-number dependence of small-scale anisotropy of passive scalar fluctuations under a uniform mean gradient in isotropic turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.419	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 Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh	4. 巻 880
2. 論文標題 A new time scale for turbulence modulation by particles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2019.775	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 Jingyuan Yang, Toshiyuki Gotoh, Hideaki Miura, Takeshi Watanabe	4. 巻 4
2. 論文標題 Intermittency of an incompressible passive vector convected by isotropic turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 114602
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.114602	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 Jingyuan Yang, Toshiyuki Gotoh, Hideaki Miura, Takeshi Watanabe	4. 巻 4
2. 論文標題 Statistical properties of an incompressible passive vector convected by isotropic turbulence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 64601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.4.064601	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 Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe	4. 巻 26
2. 論文標題 Cloud Turbulence and Droplets	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Gorokhovski M., Godeferd F. (eds) Turbulent Cascades II. ERCOFTAC Series	6. 最初と最後の頁 179-187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-12547-9_19	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 渡邊友貴, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸	4. 巻 37
2. 論文標題 乱流と固体粒子群の相互作用に関する大規模シミュレーション (第31回数値流体力学シンポジウム特集)-- (特集 注目研究 in CFD31)	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ながれ: 日本流体力学会誌	6. 最初と最後の頁 123-128
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh	4. 巻 1035
2. 論文標題 On the smoothing of point force in the two-way coupling simulation of polymer-laden turbulent flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1035/1/012010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe	4. 巻 97
2. 論文標題 Size distribution spectrum of noninertial particles in turbulence	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 53108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.97.053108	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 Kozawa Tomoki, Sugitani Kenichiro, Oehler Dorothy Z., House Christopher H., Saito Izumi, Watanabe Takeshi, Gotoh Toshiyuki	4. 巻 17
2. 論文標題 Early Archean planktonic mode of life: Implications from fluid dynamics of lenticular microfossils	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geobiology	6. 最初と最後の頁 113 ~ 126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/gbi.12319	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 渡邊 威, 後藤 俊幸	4. 巻 2097
2. 論文標題 ランダム速度場下での弾性乱流の発生とその統計性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 40-49
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 Gotoh Toshiyuki, Watanabe Takeshi, Saito Izumi	4. 巻 130
2. 論文標題 Kinematic Effects on Probability Density Functions of Energy Dissipation Rate and Enstrophy in Turbulence	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 254001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.254001	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 Saito Izumi, Watanabe Takeshi, Gotoh Toshiyuki	4. 巻 9
2. 論文標題 Spectrum of passive scalar carried by particles in isotropic turbulence	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 54601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.9.054601	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 Takeshi Watanabe, Hikaru Suzuki, Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Numerical simulations of microbubble dispersion in isotropic turbulence	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Springer Proceedings in Physics, 34th IUPAP Conference on Computational Physics	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計26件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸
2. 発表標題 スカラーおよびベクトル場の乱流輸送に関する大規模シミュレーション
3. 学会等名 プラズマシミュレータシンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤泉, 渡邊威, 後藤俊幸
2. 発表標題 粒子法を用いた高シュミット数スカラー乱流の直接数値シミュレーション
3. 学会等名 京大数理研RIMS 共同研究 (公開型) 「乱流の予測可能性と可制御性」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Watanabe, I. Saito, T. Gotoh
2. 発表標題 Turbulence modulation by small particles in isotropic turbulence
3. 学会等名 RIMS Workshop on "Mathematical Analysis in Fluid and Gas Dynamics" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Hamazaki, T. Watanabe, I. Saito and T. Gotoh
2. 発表標題 On the Behavior of microbubbles in isotropic turbulence
3. 学会等名 4th International Workshop on Cloud Turbulence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 齋藤泉, 渡邊威, 後藤俊幸
2. 発表標題 乱流中における熱慣性粒子群による流体温度ゆらぎ場の変調
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 濱崎博也, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸
2. 発表標題 乱流中のマイクロバブルの挙動の可視化
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Toshiyuki Gotoh, Tatsuya Yasuda
2. 発表標題 Modulation of fluid temperature fluctuations by particles in turbulence
3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiyuki Gotoh, Izumi Saito, Takeshi Watanabe, Tatsuya Yasuda
2. 発表標題 Numerical simulation of cloud droplets and turbulence
3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Yasuda, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe, Izumi Saito
2. 発表標題 Schmidt-number dependence of scalar fluxes and spectra in isotropic turbulence with a mean scalar gradient
3. 学会等名 73rd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤泉, 渡邊威, 後藤俊幸
2. 発表標題 慣性粒子群の乱流変調に関する新しい時間スケール
3. 学会等名 第34回数値流体シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊威
2. 発表標題 NS乱流とMHD乱流におけるスカラーおよびベクター輸送現象の大規模シミュレーション
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 I. Saito, T. Watanabe, T. Gotoh
2. 発表標題 A new timescale for turbulence modulation by particles
3. 学会等名 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡邊威
2. 発表標題 固体粒子群による乱流変調の大規模数値解析
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威, 安田達哉
2. 発表標題 乱流と粒子群の相互作用を特徴付ける新しい時間スケール
3. 学会等名 京大数理研RIMS 共同研究(公開型)「乱流基礎相似則の再検討」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takeshi Watanabe, Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh
2. 発表標題 New insights into turbulence modulation by small particles obtained using point-particle and particle-resolved DNSs
3. 学会等名 3rd International Workshop on Cloud Turbulence (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊威, 小澤朋樹, 齋藤泉, 後藤俊幸
2. 発表標題 等方乱流中の固体粒子群の振る舞いと乱流変調
3. 学会等名 日本物理学会 2018 年秋季大会 同志社大学京田辺キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤朋樹, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸
2. 発表標題 小さな固体粒子群による乱流変調の大規模シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018 大阪大学豊中キャンパス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威
2. 発表標題 乱流中で衝突・合体成長する粒子スペクトルの統計理論
3. 学会等名 京都大学数理解析研究所共同研究集会「乱流と遷移：構造, 多重スケール, モデル」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe
2. 発表標題 On the modification of scalarvariance spectra due to cloud droplets in cloud microphysics simulator
3. 学会等名 12th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Izumi Saito, Toshiyuki Gotoh, Takeshi Watanabe
2. 発表標題 Turbulence-cloud droplet interaction in cloud micro-physics simulator
3. 学会等名 15th Conference on Cloud Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤泉、渡邊威、後藤俊幸
2. 発表標題 ラグランジュ画像に基づく高シュミット数スカラー乱流の大規模シミュレーション
3. 学会等名 日本流体力学会年会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤泉、渡邊威、後藤俊幸
2. 発表標題 粒子法を用いた高シュミット数スカラー乱流の大規模直接数値シミュレーション
3. 学会等名 RIMS共同研究(公開型)「乱流の予測可能性と可制御性」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 壽松木輝, 渡邊威, 齋藤泉, 後藤俊幸
2. 発表標題 等方乱流中のマイクロバブルの局在化
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤泉, 後藤俊幸, 渡邊威
2. 発表標題 高シュミット数パッシブスカラー乱流の粒子法シミュレーション
3. 学会等名 第37回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Watanabe, H. Suzuki, I. Saito, T. Gotoh
2. 発表標題 Numerical simulations of microbubbles dispersion in isotropic turbulence
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 I.Saito, T.Watanabe, T. Gotoh
2. 発表標題 Turbulent mixing of scalar field of particle properties
3. 学会等名 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023) (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
--	---------------------------	-----------------------	----

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