

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02068

研究課題名（和文）添加物による乱流の制御：秩序構造の階層に立脚した理解と指針

研究課題名（英文）Control of turbulence by additives: principles in terms of the hierarchy of coherent structures

研究代表者

後藤 晋 (Goto, Susumu)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

研究者番号：40321616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：流れの状態は微量の添加物（粒子や高分子など）により大きな影響を受けることがある。この興味深い現象を抜本的に理解することを目的とした。まず、粒子添加による乱流低減に関して、多数の大規模数値シミュレーションを実行し、徹底的なデータ解析および理論解析により、その物理機構を明らかにし、低減が起きる条件や低減量を与える公式を導いた。また、高分子や界面活性剤の添加による乱流変調に関しては、数値シミュレーションおよび実験を並行して実行し、低減が起きる条件を明らかにした。さらに、分子の添加による乱流変調を抜本的に解明するためマイクロシミュレーションを実行し、分子の統計性質に対する流れの影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

少量の添加物が流れの状態を劇的に変化させることは実験的には古くから知られていたが、その物理機構は未知のままであった。本研究により、とくに固体粒子の添加による乱流低減の物理機構が系統的に理解されたことの学術的意義は非常に大きい。また、高分子や界面活性剤の添加による乱流変調現象に関しては、完全な解明には至らなかったが、本研究で得られた知見は今後の学術研究の基盤を与える。なお、少量の添加物により流れの状態を変化させる技術は、広い応用が期待できる。したがって、本研究を通じて得られた知見は、例えば、流体輸送におけるエネルギー低減技術などへの展開が期待され、その社会的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：A small amount of additives (particles, polymers, and so on) can affect flow states. The objective of the present study is to obtain the fundamental understanding of this interesting phenomenon. First, we performed many direct numerical simulations of turbulence attenuation by solid particles to clarify the physical mechanism through thorough data and theoretical analyses. Then, we derived the conditions under which the attenuation occurs and the formulas that give the degree of the attenuation. We also conducted direct numerical simulations and experiments on turbulence modulation by the addition of polymers and surfactants, and clarified the conditions for the attenuation of turbulence intensity. Furthermore, we conducted microscopic simulations to clarify the effect of the flow on the statistical properties of molecules in order to understand the turbulence modulation caused by the addition of molecules.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 乱流変調 秩序構造 数値シミュレーション 室内実験 高分子 界面活性剤 混相流

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

乱流は強い輸送能力をもつため、たとえば乱流を用いた攪拌工程ではこれを促進することが望まれる一方で、乱流の強い運動量輸送能力は大きな流動抵抗を生むのでこれを抑制することが望まれる系も多い。つまり、乱流の状態を自由に制御(すなわち、促進や抑制)できれば、さまざまな系でその意義は極めて大きい。実際、これまでに乱流制御に関する膨大な数の研究が行われ、種々の制御法が提案されてきた。その中で、本研究では、少量の添加物(剛体粒子、弾性体粒子、気泡、高分子、界面活性剤等)によって、乱流の状態が劇的に変化する現象に着目した。このような添加物による乱流変調現象自体は、実験的には古くから知られるが、その物理機構は完全には理解されておらず、また、乱流低減が起こる条件や、低減量の見積もりなども未知のままであった。

### 2. 研究の目的

本研究では、添加物による乱流変調の仕組みを統一的に理解することを目的とした。

ところで、これまでの我々の研究により、発達した乱流中には秩序だった渦構造の階層が存在することが明らかになってきた(詳細は、最近の我々のレビュー論文 [1] を参照)。とくに重要なことは、渦の階層構造の存在により、乱流の特徴時間が多重スケールとなることである。したがって、添加物による乱流の変調現象の解明においても、乱流の特徴時間が重要になるであろうと考えた。そこで、本研究では、『添加物もつ緩和時間』と『乱流の特徴時間』の競合に着目することで、乱流変調が起こる条件を明らかにすることを具体的な目標とした。

### 3. 研究の方法

上述の目的を達成するために、添加物による乱流変調に関する数値シミュレーション研究と室内実験研究を並行して行った。

(1) 有限の大きさをもつ剛体粒子と乱流の相互作用を正確に解く数値手法(埋め込み境界法)を採用した数値シミュレーションを実行した。流体の数値シミュレーションは標準的な有限差分法を用いた。乱流としては、壁から離れた領域における乱流を模擬した『周期境界条件下の乱流』および壁面近傍の乱流の代表として『平行平板間乱流』を扱った。その際、いずれの乱流に対しても、まず、球形の剛体粒子による乱流変調現象を調べたが、前者に対しては、非球形(楕円体粒子)による乱流変調現象も扱った。いずれの場合も、剛体粒子の添加による乱流変調現象の物理機構を明らかにするために、粒子径、および粒子の質量密度を系統的に変化させた。

(2) 変形可能な粒子(弾性体粒子)と乱流の相互作用を理解するための数値シミュレーション研究を行った。数値手法としては、フル・オイラー法を採用した。粒子は超弾性体とし、粒子と流体の密度比は1の場合のみを扱った。流れ場は、テラー・グリーン型の定常渦とし、中立浮遊粒子が渦まわりでどのような挙動を示すかを明らかにするために、粒子の堅さを系統的に変化させた。

(3) 高分子の添加による乱流変調現象を明らかにするために、高分子を微小なダンベルで模擬したブラウン力学シミュレーションを実行した。この際、まず、ダンベルが流体の運動には影響を与えない場合をよく調べ、次に、ダンベルによる流れの変調も考慮した場合を調べた。この

とき、乱流としては、周期境界条件下で適当な外力により駆動される乱流を扱った。乱流の数値シミュレーションには前者にはフーリエ・スペクトル法、後者には有限差分法を用いた。さらに、構成則を用いた乱流シミュレーションも行った。具体的には、FENE-P モデルを用いて、有限差分法と埋め込み境界法により、下の(4)に示す実験装置における乱流場を再現する乱流のシミュレーションを実行した。いずれの数値シミュレーションにおいても、高分子(およびそれを模したダンベル)の緩和時間を系統的に変えた。

(4)(3)に示した数値シミュレーションの妥当性の検証のために、テラー・グリーン型の外力に駆動される乱流を実験的に模擬する実験装置を製作した。直方体の水槽中に鉛直方向に平行に4本の円柱あるいは平板上のブレードを配置し、それらを互い違いの向きに一定の角速度で回転させ、乱流を駆動する。前者は、円柱表面の粘性摩擦による乱流駆動、後者は圧力による乱流駆動状態を実現する。とくに、後者では大きなせん断速度をもつ乱流が維持される。このように駆動された乱流に界面活性剤や高分子を添加して、その変調の様子を粒子画像流速測定およびレーザードップラー流速計を用いて定量化した。

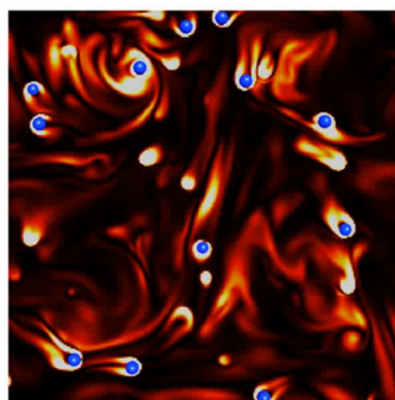
(5)液滴の添加による乱流変調現象を調べるために、二相流に対する格子ボルツマン法を用いた数値シミュレーションを行った。とくに、乱流中で液滴がどのように分裂をして、結果として乱流にどのような影響を与えるかを系統的に明らかにするために、液滴の大きさと表面張力を系統的に変えた数値シミュレーションを行った。

(6)分子の添加による乱流変調現象を抜本的に理解するために、散逸動力学法とよばれる粗視化分子動力学シミュレーションを用いて、せん断流中における界面活性剤ミセルや高分子の挙動を調べた。とくに、流れが界面活性剤の棒状ミセルの配向や切断の統計に与える影響を明らかにするために、せん断速度を系統的に変えた数値シミュレーションを行った。

#### 4. 研究成果

前節で示したそれぞれの研究に関して、以下の成果を得た。

(1)この課題に関しては極めて重要な知見を得た。周期境界条件下の乱流に球形の剛体粒子を添加した場合には、その速度緩和時間が乱流の大規模構造の特徴時間と比べて十分に長い場合に、粒子は乱流に追従できず粒子まわりの剥離渦ができる(右図:青色が粒子、背景は明るさが渦度の大きさを表す)。したがって、この剥離渦により付加的なエネルギー散逸が起こるために、乱流中を大スケールから小スケールへとカスケードするエネルギーが減少する。カスケードのエネルギー流束は、乱流エネルギーの2分の3



乗に比例するので、結果として乱流エネルギーが低減することが分かった。また、この物理描像に基づけば、粒子添加による乱流低減量を粒子まわりの付加的なエネルギー散逸率を用いて評価することができる。また、乱流低減が起こるための必要条件が、粒子の速度緩和時間と乱流中の最大渦の巡回時間の比(ストークス数)を用いて記述できることを示した(参考文献[2])。周期境界条件下の乱流に対しては、非球形の剛体粒子を添加した場合も、上述の物理描像が基本的には変わらないことを示した。つまり、同じ体積と質量をもつ剛体粒子であれば、アスペクト比の大きな粒子ほど乱流低減効果が大きいのが、これは粒子の回転の効果ではなく、並進運動による

効果である。このことは、アスペクト比が大きい粒子の方がエネルギー散逸に効果的な小さな渦が剥離するためであると理解できる（参考文献[3]）。

さらに、得られた知見を、平行平板間乱流の乱流低減現象へと展開した。その結果、この乱流中でも、乱流低減の基本的な物理機構は、速度緩和時間が長い粒子の周囲に発生する剥離渦による付加的なエネルギー散逸であることを明らかにした。ただし、平行平板間乱流は、壁からの距離に応じて乱流構造の性質が変わるので、その変調も壁からの距離に応じて記述する必要がある（参考文献[4]）。

（2）中立浮遊する弾性体粒子と渦との相互作用に関しても興味深い現象を見出した。すなわち、弾性体粒子は渦の周辺部で変形され、しかも、渦の周囲の流跡線との間に角度ができると、たとえ流体と粒子の間に密度差がなくても、旋回しながら渦中心に移動する。このとき、渦中心に移動するにしたがって次第にその変形が緩和されるために、渦の中心に留まる傾向がある。我々は、この興味深い現象を数値的に見出すとともに、簡単なモデルを用いた理論解析を用いてこの現象を説明した（参考文献[5]）。

（3）高分子による乱流変調現象においては、高分子の緩和時間と乱流の特徴時間の比（ワイゼンベルグ数）が重要なパラメタとなる。ただし、乱流の特徴時間が多重スケールであることに注意しなければならない。そのうち最短の特徴時間は最小渦の旋回時間であるコルモゴロフ時間であるので、これを特徴時間としたワイゼンベルグ数が高分子の乱流による変形（いわゆるコイル・ストレッチ転移など）をよく説明することが知られる。しかし、本研究では、乱流中の時間の多重スケール性により、コルモゴロフ時間より長い緩和時間をもつ高分子の変形には、より長い時間で旋回する渦の影響が表れる可能性があることを示した。ただし、実際には、高分子の配向は小さい渦による回転により緩和されるので、この影響は無視できないが限定的である（参考文献[6]）。さらに、高分子による乱流変調をダンベルのブラウン動力学シミュレーションにより調べた結果、ワイゼンベルグ数の増加に伴い、小さなスケールの渦から次第に変調することを明らかにした。これは、上述の描像とも整合する結果である。なお、FENE-P モデルを用いた数値シミュレーションでも、同様の結果を得た。しかも、得られた結果は、（4）の実験結果もよく説明する。

（4）テラー・グリーン型の外力に駆動される乱流を模擬した装置を用いた室内実験に関しても順調に進展した。まず、円柱を用いた粘性駆動と、平板状のブレードを用いた圧力（慣性）駆動とでその乱流の統計性質が異なることを確かめた。その上で、とくに後者の場合にテラー・グリーン型の体積力によって駆動される乱流（参考文献[7]）と同様に、外力によって駆動される大規模渦対間に、より小さなスケールの渦管が生成される様子を捉えることができた。この乱流に高分子や界面活性剤を添加した場合に、これらの渦の階層がどのように影響を受けるかを粒子画像流速測定およびレーザードップラー流速計を用いて定量化した。その結果、界面活性剤の棒状ミセルの緩和時間が乱流の最小渦の特徴時間と競合する場合に、乱流が最小渦から変調する様子を捉えることができた。なお、この乱流変調の様子は、（3）で行った構成則を用いた数値シミュレーション結果と整合的である。

（5）（1）の剛体粒子による乱流変調がよく理解できたので、より複雑な問題として、変形する粒子（つまり、液滴や気泡）による乱流変調の解明にも挑戦した。その第一段階として、本研究では、密度比が1の液滴の分裂現象を扱った。粒子径および表面張力を系統的に変えた数値シ

ミュレーションを行った結果、液滴が分裂するには、表面張力によって粒子形状が緩和する時間と比べて、粒子径程度の渦による変形時間が短いことが必要であることを示した。これは古典描像ではあるが、分裂と合一を繰り返した液滴が示す統計的な定常な粒度分布とも矛盾しないことを示した。

(6)(3)や(4)で述べた高分子や界面活性剤による乱流変調現象を根本的に理解するためには、分子(ミクロ描像)と流れ(マクロ描像)を結びつける必要がある。しかし、これらの間にはスケールの大きな乖離があるため、ここでは粗視化分子動力学シミュレーションを行い、界面活性剤の棒状ミセルの統計や動力学にせん断流が与える影響を明らかにした(参考文献[8,9])。とくに、界面活性剤ミセルは、高分子とは異なり、せん断流れにより切断されるために、その最長緩和時間がせん断速度に依存することを明らかにした。上で述べた通り、添加物による乱流変調では、時間スケールの競合が肝心なので、この結果は界面活性剤の添加による乱流変調現象の解明に向けた重要な知見を与える。

#### <参考文献>

- [1] Susumu Goto and Yutaro Motoori, "Hierarchy of coherent vortices in developed turbulence," *Review of Modern Plasma Physics* 8 (2024) 23 (40 pages).  
<https://doi.org/10.1007/s41614-024-00161-8>
- [2] Sunao Oka and Susumu Goto, "Attenuation of turbulence in a periodic cube by finite-size spherical solid particles," *J. Fluid Mech.* 949 (2022) A45 (17 pages).  
<https://doi.org/10.1017/jfm.2022.787>
- [3] Hideto Awai, Yutaro Motoori and Susumu Goto, "Attenuation of turbulence in a periodic cube by anisotropic solid particles," submitted.
- [4] Yutaro Motoori and Susumu Goto, "Attenuation mechanism of wall-bounded turbulence by heavy finite-size particles," submitted.
- [5] Yutaro Fujiki, Hideto Awai, Yutaro Motoori and Susumu Goto, "Attraction of neutrally buoyant deformable particles towards a vortex," *Phys. Rev. Fluids* 9 (2024) 014301 (18 pages).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.9.014301>
- [6] Yusuke Koide, Susumu Goto, "Polymer stretching and alignment under the hierarchy of multiscale vortices in turbulence," submitted.
- [7] Susumu Goto, Yuta Saito, Genta Kawahara, "Hierarchy of antiparallel vortex tubes in spatially periodic turbulence at high Reynolds numbers" *Phys. Rev. Fluids* 2 (2017) 064603 (25 pages).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.2.064603>
- [8] Yusuke Koide, Susumu Goto, "Flow-induced scission of wormlike surfactant micelles under shear flow" *J. Chem. Phys.* 157 (2022) 084903 (12 pages).  
<https://doi.org/10.1063/5.0096830>
- [9] Yusuke Koide, Susumu Goto, "Effect of scission on alignment of wormlike micelles under shear flow," *Soft Matter* 19 (2023) 4323-4332.  
<https://doi.org/10.1039/d3sm00167a>

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Susumu Goto, Yusuke Koide	4. 巻 19
2. 論文標題 Effect of scission on alignment of nonionic surfactant micelles under shear flow	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 4323-4332
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/d3sm00167a	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 Yutaro Motoori, Susumu Goto	4. 巻 102
2. 論文標題 Multiscale clustering of heavy and light small particles in turbulent channel flow at high Reynolds numbers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 109166
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109166	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 Ryo Araki, J. T. Water Bos, Susumu Goto	4. 巻 55
2. 論文標題 Minimal model of quasi-cyclic behaviour in turbulence driven by Taylor-Green forcing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 35507
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1873-7005/acdff7	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 Jun Fujino, Yutaro Motoori, Susumu Goto	4. 巻 975
2. 論文標題 Hierarchy of coherent vortices in turbulence behind a cylinder	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2023.824	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 Yutaro Fujiki, Hideto Awai, Yutaro Motoori, Susumu Goto	4. 巻 9
2. 論文標題 Attraction of neutrally buoyant deformable particles towards a vortex	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 14301
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.9.014301	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 Ryo Araki, J. T. Water Bos, Susumu Goto	4. 巻 9
2. 論文標題 Space-local Navier-Stokes turbulence	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 14603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.9.014603	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 Masanobu Inubushi, Yoshitaka Saiki, Miki U. Kobayashi, Susumu Goto	4. 巻 131
2. 論文標題 Characterizing small-scale dynamics of Navier-Stokes turbulence with transverse Lyapunov exponents: A data assimilation approach	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.131.254001	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 Yutaro Motoori, ChiKuen Wong, Susumu Goto	4. 巻 942
2. 論文標題 Role of the hierarchy of coherent structures in the transport of heavy small particles in turbulent channel flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.327	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 Yusuke Koide, Susumu Goto	4. 巻 157
2. 論文標題 Flow-induced scission of wormlike micelles in nonionic surfactant solutions under shear flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 84903
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0096830	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 Daiki Watanabe, Susumu Goto	4. 巻 2
2. 論文標題 Simple bladeless mixer with liquid-gas interface	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Flow	6. 最初と最後の頁 E28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/flo.2022.22	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 Sunao Oka, Susumu Goto	4. 巻 949
2. 論文標題 Attenuation of turbulence in a periodic cube by finite-size spherical solid particles	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.787	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 藤野潤, 本告遊太郎, 後藤晋	4. 巻 41
2. 論文標題 円柱背後の乱流の生成機構	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 53-56
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 鶴橋知典, 後藤晋, 岡温, 米田剛	4. 巻 41
2. 論文標題 乱流渦の階層の自己相似性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ながれ	6. 最初と最後の頁 386-390
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 Araki Ryo, Goto Susumu	4. 巻 6
2. 論文標題 Quasiperiodic fluctuations of von Karman turbulence driven by viscous stirring	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 84603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.084603	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 Yoneda Tsuyoshi, Goto Susumu, Tsuruhashi Tomonori	4. 巻 35
2. 論文標題 Mathematical reformulation of the Kolmogorov-Richardson energy cascade in terms of vortex stretching	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinearity	6. 最初と最後の頁 1380-1401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6544/ac4b3b	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 Tomonori Tsuruhashi, Susumu Goto, Sunao Oka, Tsuyoshi Yoneda	4. 巻 380
2. 論文標題 Self-similar hierarchy of coherent tubular vortices in turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions Royal Society A	6. 最初と最後の頁 20210053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsta.2021.0053	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 Yasufumi Horimoto, Atsushi Katayama, Susumu Goto	4. 巻 5
2. 論文標題 Conical shear-driven parametric instability of steady flow in precessing spheroids	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Fluids	6. 最初と最後の頁 63901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.5.063901	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 Yutaro Motoori, Susumu Goto	4. 巻 86
2. 論文標題 Hairpin vortices in the largest scale of turbulent boundary layers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Int. J. Heat Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 108658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatfluidflow.2020.108658	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 Yutaro Motoori, Susumu Goto	4. 巻 911
2. 論文標題 Hierarchy of coherent structures and real-space energy transfer in turbulent channel flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 J. Fluid Mech.	6. 最初と最後の頁 A27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2020.1025	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 Sunao Oka, Daiki Watanabe, Susumu Goto	4. 巻 33
2. 論文標題 Large-scale clustering of light small particles in developed turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Fluids	6. 最初と最後の頁 31707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0041873	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 Sunao Oka, Susumu Goto	4. 巻 6
2. 論文標題 Generalized sweep-stick mechanism of inertial-particle clustering in turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Fluids	6. 最初と最後の頁 44605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.044605	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 -

[学会発表] 計97件 (うち招待講演 15件 / うち国際学会 23件)

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 発達した乱流中の秩序渦の階層
3. 学会等名 日本学術振興会二国間ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Application of Reservoir Computing to Turbulence
3. 学会等名 2nd US-Japan Workshop on Data-Driven Fluid Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 固体粒子による乱流低減
3. 学会等名 第66回「乱流遷移の解明と制御」研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 発達した乱流中の輸送現象
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Hierarchy of coherent vortices in developed turbulence and its role in transport phenomena
3. 学会等名 6th Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 気液界面を有する回転円筒内流における対流の発生
3. 学会等名 日本機械学会 第100期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 固体球形粒子の添加による乱流低減現象
3. 学会等名 第36回 数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Interactions between turbulence and particles
3. 学会等名 日仏二国間交流事業セミナー
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yusuke Koide
2. 発表標題 Flow-Induced Scission of Surfactant Micelles under Shear Flow
3. 学会等名 USNC/TAM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊大記
2. 発表標題 気液界面を有する回転容器内流れとその混合性能
3. 学会等名 化学工学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 一様せん断流における界面活性剤ミセルの分裂と再結合
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊大記
2. 発表標題 気液界面を有する回転円筒内部流の直接数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鶴橋知典
2. 発表標題 乱流渦の階層の自己相似性
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江口健斗
2. 発表標題 気液界面を有する回転容器内部流れの室内実験
3. 学会等名 日本機械学会 第100期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 乱流中における高分子鎖のふるまい
3. 学会等名 日本機械学会 第100期 流体工学部門 講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安房井英人
2. 発表標題 渦と非球形粒子の相互作用
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 江口健斗
2. 発表標題 気液界面を有する回転容器内部流れの室内実験
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第98期定時総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田颯人
2. 発表標題 高分子溶液の乱流のマイクロ-マクロハイブリッド数值シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第98期定時総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤嶋歩里
2. 発表標題 自由表面を有する一様流中の物体に作用する流体力の測定
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第98期定時総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊大記
2. 発表標題 気液界面を有する回転円筒内流れの数値シミュレーション
3. 学会等名 化学工学会 第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 乱流中における高分子鎖の伸長と配向
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 一様せん断流における界面活性剤ミセルの分裂と配向
3. 学会等名 日本レオロジー学会第49年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 一様せん断流におけるひも状ミセルの配向：高分子鎖との比較
3. 学会等名 第36回 分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 Yutaro Motoori
2. 発表標題 Role of the hierarchy of coherent structures in the transport of solid particles in turbulent channel flow at high Reynolds numbers
3. 学会等名 TSFP12 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 壁乱流中における固体粒子分布の秩序構造による記述
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 乱流中の渦の階層とスケール間エネルギー輸送
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 粒子の添加による壁乱流の変調現象
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 発達した乱流におけるパッシブスカラーの階層構造
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Fluid turbulence theory and numerical simulations
3. 学会等名 10th East-Asia School and Workshop on Laboratory, Space, and Astrophysical Plasmas (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 固体粒子の添加による乱流低減の条件
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 一様乱流と固体粒子の相互作用
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 後藤晋
2. 発表標題 複雑な流動現象の数値シミュレーション、データ解析、モデル化
3. 学会等名 オンラインセミナー「流れの複雑現象」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 固体粒子の乱流輸送現象
3. 学会等名 第8回複雑熱流体工学研究センターシンポジア(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 秩序構造による乱流輸送現象の理解
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 シンポジウム「プラズマサイエンスの新展開」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Hierarchy of coherent vortices in developed turbulence and its role in particle clustering
3. 学会等名 France-Japan (CNRS/JSPS) Bilateral Workshop 2021 (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Hierarchy of counter-rotating pairs of vortex tubes in turbulence
3. 学会等名 2022 Australasian Fluid Mechanics Seminar Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yutaro Motoori
2. 発表標題 Hierarchy of coherent structures and energy cascade in wall-bounded turbulence
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM25) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 渦の階層で紐解く乱流中の固体粒子の輸送現象
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 十分に発達した乱流中における固体粒子の輸送現象と乱流変調
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 渦の階層に基づく高レイノルズ数乱流中の物質輸送と混合
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野潤
2. 発表標題 円柱背後の乱流中における渦の階層とその生成機構
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 (2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 壁乱流中の秩序構造の階層による粒子の輸送
3. 学会等名 第37回生研TSFDシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤木優太郎
2. 発表標題 柔軟な粒子と渦の相互作用
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野潤
2. 発表標題 物体の背後に維持される乱流中の渦の階層の可視化
3. 学会等名 第49回可視化情報シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浜田幸多
2. 発表標題 球体容器に封入された粉体の加振による対流現象
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 小井手祐介
2. 発表標題 散逸粒子動力学法を用いた高分子鎖の緩和に伴うエネルギー散逸の評価
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 小井手祐介
2. 発表標題 散逸粒子動力学法を用いた一様せん断流におけるミセルの分裂機構の解明
3. 学会等名 第69回レオロジー討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤木優太郎
2. 発表標題 渦による柔軟な粒子の集積現象
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野潤
2. 発表標題 渦伸長に基づいた円柱背後の乱流の維持機構
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡邊大記
2. 発表標題 自由表面近傍に配置された円柱後流の直接数値シミュレーション
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浜田幸多
2. 発表標題 加振された球体容器内に封入された粉体の対流現象
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第97期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 一様せん断流における界面活性剤ミセルの分裂のせん断速度依存性
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 壁面近傍の乱流輸送現象に関する大規模数値シミュレーション
3. 学会等名 プラズマシミュレータシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤晋
2. 発表標題 球形容器の振動が誘起する粉体の対流
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Fluid turbulence and hierarchy of vortices
3. 学会等名 Joint Seminar between Shanghai Jiao Tong University and Osaka University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Clustering of light small particles in developed turbulence
3. 学会等名 DAAD/JSPS Project: Development of novel particle-laden-turbulence research using invariant solutions (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 平行平板間乱流中の渦の階層から探る慣性粒子の輸送現象
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡温
2. 発表標題 高レイノルズ数の乱流中における微小固体粒子群の空間分布に付加質量が及ぼす影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 乱流境界層中の最大スケールのヘアピン渦
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡温
2. 発表標題 エネルギーカスケードに着目した固体粒子添加による乱流変調の機構
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 散逸粒子動力学法を用いた一様せん断流における界面活性剤の棒状ミセル形成過程の解明
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 荒木亮
2. 発表標題 von Karman乱流中の渦構造とエネルギーカスケード機構
3. 学会等名 日本機械学会 2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿部篤司
2. 発表標題 周期箱乱流中のスケール間エネルギー伝達の評価
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 散逸粒子動力学法を用いた高分子と流体間のエネルギー伝達の評価
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 渦の階層の客観的な同定による壁乱流のエネルギーカスケードの解明
3. 学会等名 日本流体力学会 年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡邊大記
2. 発表標題 気液界面を有する回転球体内乱流の直接数値計算
3. 学会等名 34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 一様せん断流における界面活性剤の棒状ミセルの動力学とレオロジーへの影響
3. 学会等名 第34回 分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤野潤
2. 発表標題 物体の背後に維持される乱流中の渦の階層とスケール間エネルギー伝達
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川碧
2. 発表標題 格子ボルツマン法による二相流の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 壁乱流中の秩序構造の階層が慣性粒子の輸送に果たす役割
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木亮
2. 発表標題 粘性駆動されるvon Karman乱流の準周期変動
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 一様せん断流におけるミセルの動力学から探る界面活性剤水溶液のレオロジー
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会 (2021年)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 The condition and rate of attenuation of turbulent kinetic energy due to solid spherical particles
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Turbulent Structure and Particles-Turbulence Interaction (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Coherent structures and transport phenomena in turbulence
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division Conference (AJK-FED 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Turbulence attenuation by finite-size spherical particles
3. 学会等名 The 18th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Susumu Goto
2. 発表標題 Turbulence modulation by heavy solid particles
3. 学会等名 IUTAM Symposium on Rapid granular flows and turbulent particle suspensions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Daiki Watanabe
2. 発表標題 Flow and mixing in a rotating container with a gas-liquid interface
3. 学会等名 11th International Conference on Multiphase Flow, ICMF 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Koide
2. 発表標題 Alignment of wormlike micelles under shear flow: Comparison with polymers
3. 学会等名 The 8th Pacific Rim Conference on Rheology (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daiki Watanabe
2. 発表標題 The onset of convection cells in a partially filled cylinder rotating about a horizontal axis
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division Conference (AJK-FED 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yusuke Koide
2. 発表標題 Shear-rate dependence of scission of wormlike micelles under shear flow
3. 学会等名 The 9th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊大記
2. 発表標題 気液界面を有する回転円管内部流の直接数値計算
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daiki Watanabe
2. 発表標題 Sustaining mechanism of turbulence in a rotating container partially filled with liquid
3. 学会等名 The 18th European Turbulence Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田颯人
2. 発表標題 高分子添加による乱流中の渦の階層構造の変調
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 江田駿介
2. 発表標題 自由表面を伴う物体後流の室内実験と強化学習による制御
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 渡邊大記
2. 発表標題 気液界面を有する回転円管内流れの直接数値計算
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 安房井英人
2. 発表標題 長球状粒子による乱流変調とその物理機構
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 渡邊大記
2. 発表標題 気液界面を有する回転円筒内流れとその混合性能
3. 学会等名 化学工学会 第89年会
4. 発表年 2024年



1. 発表者名 小井手祐介
2. 発表標題 一様せん断流における流動誘起分裂による界面活性剤ミセルの配向の抑制
3. 学会等名 日本物理学会 2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yusuke Koide
2. 発表標題 Role of scission in dynamics of surfactant micelles
3. 学会等名 The 7th International Soft Matter Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田颯人
2. 発表標題 秩序構造と高分子の配向に着目した希薄高分子溶液の乱流の数値シミュレーションと実験
3. 学会等名 第71回レオロジー討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野元大
2. 発表標題 乱流中における乳化現象の物理機構の解明へ向けた液滴分裂の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会関西支部 第99期定時総会講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Yutaro Motoori
2. 発表標題 Interaction between solid particles and coherent structures in turbulent channel flow
3. 学会等名 International Conference on Multiphase Flow (ICMF2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaro Motoori
2. 発表標題 Modulation of wall turbulence by addition of solid particles
3. 学会等名 ASME-JSME-KSME Fluids Engineering Division Conference (AJK-FED 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 粒子の添加による壁乱流の低減および乱流構造の変化
3. 学会等名 混相流シンポジウム2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yutaro Motoori
2. 発表標題 Hierarchy of coherent vortices and energy cascade in turbulence behind a cylinder
3. 学会等名 European Turbulence Conference 18 (ETC18) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本告遊太郎
2. 発表標題 粒子による壁乱流中の秩序構造の低減
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 本告遊太郎
2. 発表標題 混相乱流中の種々の輸送現象の直接数値シミュレーション研究
3. 学会等名 プラズマシミュレータシンポジウム2023
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	犬伏 正信  (Inubushi Masanobu)  (20821698)	東京理科大学・理学部第一部応用数学科・准教授   (32660)	
研究分担者	本告 遊太郎  (Motoori Yutaro)  (20906911)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教   (14401)	
研究分担者	大槻 道夫  (Otsuki Michio)  (30456751)	大阪大学・大学院基礎工学研究科・准教授   (14401)	

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			
ドイツ	カールスルーエ工科大学			
フランス	リール大学	エコール・セントラル・リオン		
ドイツ	カールスルーエ工科大学			