

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20403

研究課題名（和文）秩序渦の階層から紐解く乱流輸送現象とその予測

研究課題名（英文）Unravelling turbulent transport on the basis of a hierarchy of coherent vortices and its prediction

研究代表者

本告 遊太郎 (Motoori, Yutaro)

大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教

研究者番号：20906911

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：乱流中には大小さまざまな渦が秩序だって存在する。本研究では、秩序渦の階層に基づいて、乱流による物質輸送現象の物理機構を明らかにした。壁乱流中において、非常に小さい粒子は非一様に分布し、粒子クラスタを形成する。より正確には、重い粒子は、粒子の緩和時間と同程度の旋回時間をもつ渦の中心から掃き出されることで、その渦の周りにクラスタを形成する。一方、軽い粒子は、緩和時間と同程度の旋回時間をもつ渦の中心に集積する。つまり、粒子クラスタの形成には、粒子の緩和時間と渦の旋回時間との時間スケールの一致が重要であり、このことを大規模数値シミュレーションにより示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流は身の回りにあふれた現象であるため、幅広い分野で、乱流による物質輸送の制御や予測が求められる。しかし、乱流のもつ強い非線形により、単純な場合においても、乱流輸送に関して理解されていない部分は多い。本研究では、乱流による固体粒子の輸送を、乱流の維持機構に対して重要な役割を果たす「秩序渦の階層」に基づいて、明らかにした。乱流の本質に根ざした解析であるからこそ得られた本研究の結果は明快であり、将来の乱流制御・予測に向けて、より高度な展開が期待される。

研究成果の概要（英文）：Turbulence is composed of coherent vortices of different sizes. In the present study, we have unraveled the physical mechanism of mass transport in turbulence based on the hierarchy of coherent vortices. In near-wall turbulence, sufficiently small particles are inhomogeneously distributed. They form clusters. More precisely, heavy particles are swept out from vortices with the eddy turnover time comparable to the particle relaxation time to form clusters around the vortices. On the other hand, light particles accumulate in the center of the vortices. Thus, the time scale match between the particle relaxation time and the eddy turnover time is an important factor for particle clustering. We have demonstrated this fact by conducting large-scale direct numerical simulations.

研究分野：流体力学

キーワード：乱流 壁乱流 乱流輸送 渦 固体粒子 数値シミュレーション

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

乱れた流れ（乱流）は身の回りにあふれた現象であるため、乱流の維持機構や乱流による輸送現象の理解は、さまざまな分野で重要である。ここ数十年の計算機性能の向上のおかげで、さまざまな種類の発達した乱流の数値シミュレーションが可能になり、乱流の維持機構の大部分が明らかになりつつある[1-3]。乱流の教科書を見ると、乱流の維持機構は大小さまざまな渦でよく説明されるが、数値シミュレーションにより得られた3次元の乱流場の時間発展を緻密に解析すると、たしかに、乱流中には「大小さまざまな渦」が秩序だって存在するし、この「秩序だった渦の階層」で乱流の維持機構を詳細に説明できることもここ数年で明らかとなってきた。

ただし、これまで我々が主に研究の対象としてきた乱流は、流体中に粒子を含んでおらず、また、自由界面も伴っていない単相の流れであった。つまり、次に解決すべき課題は、乱流中に粒子や気泡が混入した場合のより複雑な乱流の動力学の解明であり、単相乱流が手に取るようにわかってきた今こそ解決できる課題である。本研究では、乱流中における固体粒子や気泡などの輸送現象を理解するために、数値シミュレーションを軸とした研究を行う。

2. 研究の目的

本研究の大きな目的は、乱流による物質輸送の仕組みを理解し、それを簡潔に表現することで、乱流による物質輸送の予測モデルの指針を確立することである。本研究では、背景でも述べたように、乱流中の「大小さまざまな秩序だった渦」、つまり、「秩序渦の階層」に着眼し、乱流輸送を紐解く。

3. 研究の方法

以下では、乱流中でのさまざまな種類の粒子および（物質の濃度場などを模擬する）パッシブスカラーの数値シミュレーションを実施した。粒子に関しては、たとえば、（1）空気中の小さな砂、（2）気泡、（3）有限の大きさをもつ粒子を想定した数値シミュレーションを行った。流体はいずれも非圧縮で、ナビエ・ストークス方程式を数値的に解くことで、時間発展させた。空間微分は標準的な有限差分法を用いて評価した。粒子の運動に関しては、粒子径が十分に小さい場合には、流体からのストークス抵抗と付加質量の効果のみを受ける質点粒子と仮定した。一方、有限の大きさをもつ粒子の運動を解く場合には、埋め込み境界法を用いて流体と粒子の相互作用を表現した。（4）パッシブスカラーに関しては、フーリエ・スペクトル法を用いて、周期境界条件下の乱流中でシミュレートした。

4. 研究成果

（1）非常に小さな重い粒子

背景でも述べたように、乱流の本質は秩序渦の階層である。本研究においても、固体粒子の輸送現象を渦の階層に基づいて理解する。ただし、渦を同定するために必要な速度勾配の大きさは、小さなスケールほど大きいいため、数値シミュレーションにより得られた速度勾配を用いて渦を同定すると、小さな渦のみが強調される。そこで、得られた流速場を一旦スケールごとに分解し、それぞれのスケールの流速場から速度勾配テンソルを評価することで、さまざまな大きさの渦を抜き出す。図1の大きさの異なる3つの物体は、流速場を3つのスケールに分解し、それぞれの速度勾配テンソルの第二不変量の正の等値面を描くことで同定した渦の階層である。

図2は、乱流中の粒子の空間分布と、ある大きさの渦を重ねたものである。(a, b)はそれぞれ壁摩擦時間で規格化した粒子の緩和時間（ストークス数）が25および250の粒子と、壁摩擦長の30倍および240倍の大きさの渦である。粒子は乱流中で非一様に分布し、粒子クラスタを形成することが知られるが、ストークス数が大きくなるに伴い、粒子クラスタも大きくなることがわかる。さらに、小さなストークスの粒子は小さな青色の渦の中心から掃き出され、その渦の周りにクラスタを形成することがわかる。一方、大きなストークス数の粒子は、大きな赤色の渦から掃き出されることでクラスタを形成する。我々は、各階層の渦の巡回時間を定義することで、粒子の緩和時間と同程度の巡回時間をもつ渦が、粒子クラスタの形成に重要であることを示した[4]。

(2) 非常に小さな軽い粒子

気泡を模擬した軽い粒子の数値シミュレーションも実施した。(1)と似たような条件で乱流中の質点粒子を考え、ストークス抵抗に加えて付加質量による効果も考慮して、乱流中での軽い粒子の運動をシミュレートした。軽い粒子は、緩和時間に応じて、異なる大きさの渦の中心軸に集積する傾向があり、とくに、粒子の速度緩和時間と同程度の巡回時間をもつ渦によく集積することを示した[5]。

(3) 有限の大きさをもつ固体粒子

乱流と固体粒子が互いに影響を及ぼし合う場合の数値シミュレーションプログラムも新たに開発し、乱流によって輸送された粒子が翻って乱流をどのように変調させるかを明らかにする課題にも挑戦した。具体的には、(1)や(2)と同じ境界条件下の壁乱流中に微量の固体粒子を添加し、粒子径、質量密度および乱流レイノルズ数を系統的に変えることで、壁乱流の変調現象の物理機構を調べた。大きな渦の巡回時間よりも長い緩和時間をもつ粒子を添加すると、平均流が縦渦に伝達するはずだったエネルギーの一部が粒子に伝達される。これにより、粒子周りでエネルギーの散逸が活発になるため、その分だけ乱流低減が起こる。

(4) パッシブスカラーの輸送

乱流中におけるパッシブスカラーの数値シミュレーションを実施し、乱流によるスカラー混合過程の物理機構を調べた。この課題は、古くから取り組まれてきた研究ではあるが、本研究では、乱流中の秩序渦の階層とスカラー変動の階層に基づいた我々独自の視点で、乱流によるスカラー混合過程を調べた。本課題に関しては今のところ明確な結論は得られていないが、さらに詳細な解析を進め、より詳細な動力学を明らかにする計画である。

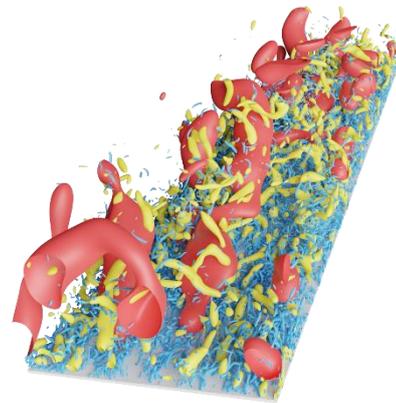


図1. 秩序渦の階層の可視化。

(a) ストークス数 25



(b) ストークス数 250

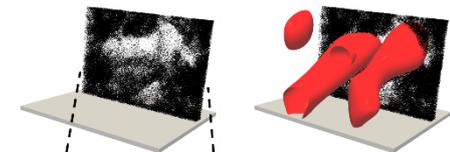


図2. 粒子と渦の階層の可視化。

参考文献

- [1] S. Goto, Y. Saito & G. Kawahara, Hierarchy of antiparallel vortex tubes in spatially periodic turbulence at high Reynolds numbers, *Phys. Rev. Fluids* 2 (2017) 064603.
- [2] Y. Motoori & S. Goto, Generation mechanism of a hierarchy of vortices in a turbulent boundary layer, *J. Fluid Mech.* 865 (2019) 1085-1109.
- [3] Y. Motoori & S. Goto, Hierarchy of coherent structures and real-space energy transfer in turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.* 911 (2021) A27.
- [4] Y. Motoori, C. Wong & S. Goto, Role of the hierarchy of coherent structures in the transport of heavy small particles in turbulent channel flow, *J. Fluid Mech.* 942 (2022) A3.
- [5] Y. Motoori & S. Goto, Multiscale clustering of heavy and light small particles in turbulent channel flow at high Reynolds numbers, submitted.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Motoori Yutaro, Wong ChiKuen, Goto Susumu	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 -

〔学会発表〕 計27件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yutaro Motoori, Susumu Goto
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 Twelfth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP12)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本告遊太郎, 後藤晋
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2022年度年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本告遊太郎, 後藤晋
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, 後藤晋
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, 沖田和也, 後藤晋
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 安房井英人, 藤木優太郎, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 渦と非球形粒子の相互作用
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 畦崎凜, 藤嶋歩里, 江田駿介, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 開水路流れに置かれた物体により変形する自由表面の測定
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木雅大, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 高分子の添加による乱流低減の解明に向けた連続体数値シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中野元大, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 格子ボルツマン法を用い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 関西学生会2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林真史, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 バイパス遷移境界層における乱流エネルギー輸送の解析
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2022年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 増田颯人, 本告遊太郎, 後藤晋
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98期定時総会講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤嶋歩里, 江田駿介, 畦崎凜, 本告遊太郎, 後藤晋
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 Yutaro Motoori, Susumu Goto
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, 岡温, 後藤晋
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, 後藤晋
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 中谷謙介, 犬伏正信, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 機械学習を用いた時系列データからの乱流場推定
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 犬伏正信, 中谷謙介, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 機械学習を用いた2次元角柱後流の乱流場推定
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤野潤, 本告遊太郎, 後藤晋
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, 藤野潤, 本告遊太郎, 後藤晋
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 本吉遊太郎, 沖田和也, 後藤晋
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回数值流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本吉遊太郎, 後藤晋
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 森脇渉太, 本吉遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 リザバーコンピューティングを用いた壁乱流の秩序構造の推定
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村端秀基, 本吉遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 イルカの背びれ周りの流れの解明に向けた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 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 増田颯人, 小井手祐介, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 高分子溶液のレオロジー特性の解明に向けた2つの異なるスケールの連成シミュレーション
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 江田駿介, 藤嶋歩里, 中谷謙介, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 強化学習による流れの能動制御の実験と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 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安房井英人, 本告遊太郎, 後藤晋
2. 発表標題 非球形粒子の乱流輸送現象の解明へ向けた直接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 2021年度関西学生会卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤野潤, 本告遊太郎, 後藤晋
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

〔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
---------	---------