

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14883

研究課題名（和文）乱流に内在する疎な渦構造による流れ場の推定と制御

研究課題名（英文）Feedback control for turbulence based on coherent vortex structure

研究代表者

佐々木 英一（SASAKI, Eiichi）

秋田大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60710811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：秩序渦の存在は、乱流の本質的な自由度が格子点数など系の自由度に比べ圧倒的に少ないことを示唆する。これをスパースと呼ぶ。スパース性を用いた流れの推定法を調べた。3次元周期箱乱流について、格子点数の約30%程度の測定で秩序渦を再構成できることを示した。平行平板間 Couette流れについて、スパン方向渦の生成過程を数値的に求めた周期解によって示した。球面上の2次元流れについて、高Reynolds数において外力によらず領域を覆う渦をもつ解が存在することを示した。風洞実験について、レーザーシート光源とスモークによる可視化方法を確認し、ピトー管・熱線風速計による測定法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流運動には秩序渦が存在する。この事実は乱流の本質的な自由度が格子点数など系の自由度に比べ圧倒的に少ないことを示唆する。秩序渦の動力学に関する研究が多くなされてきたが、スパース性を用いた乱流運動の解析や推定は行われていなかった。本研究で、素朴なスパース推定法によって限られた測定点の情報から流れ場を再構成できることが分かった。Couette乱流について新たな秩序渦の動力学を見出した。渦運動に立脚した推定法が必要であることが示された。

研究成果の概要（英文）：In turbulence, we could find coherent vortex structures, suggesting that the intrinsic degrees of freedom of turbulence are smaller than the degrees of freedom of the system, such as the number of grid points. We call this property sparse. We have considered sparse representation for turbulence.

We examined the reconstruction method for box turbulence and found that the velocity field could be reconstructed using 30% of the total grid points. For plane-Couette turbulence, we obtained unstable periodic orbits describing the generation of spanwise vortex structures. We conducted the wind tunnel experiment and established velocimetry using pitot tubes and heat wires. Moreover, we performed flow visualization using smoke and laser sheet light sources.

研究分野：流体力学

キーワード：秩序渦 スパース性 数値解

1. 研究開始当初の背景

近年、発達乱流に存在する秩序的な渦運動が報告された。このことは一見複雑で不規則に見える乱流が単純な運動を自発的に内包していることを意味する。つまり系の自由度に比べ乱流の本質的運動の自由度が少ないことを示唆する。この性質をスパースと呼ぶ。しかし、渦運動の力学的性質を用いた乱流状態の推定・予測や制御指針は明らかとなっていない。本研究の問いは限られた実験データから乱流に潜む重要な渦を暴き制御することである。

2. 研究の目的

一見複雑に見える乱流場は秩序的な渦運動の集まりである。本研究の目的は、スパース性に立脚して乱流が自発的に持つ本質的運動を見つける方法を確立する。理論研究では数値的にスパース推定法を調べる。風洞実験において、物体周りの流れを系統的に測定する環境を整え、スパース性を用いた渦運動の同定法を開発する。

3. 研究の方法

研究代表者が本研究を着想したのは数値解による乱流解析である。乱流アトラクタは相空間で大きな多様体を持つ。乱流アトラクタに埋め込まれた数値解(定常解・周期解)は相空間で局所に存在するにもかかわらず、乱流の統計量や重要な渦運動を記述する。このことは系の自由度に比べ本質的な自由度が少ない、つまりスパースであることを意味する。本研究の目標は、限られた情報から重要な渦を推定する方法を開発することである。

数値計算法の開発と風洞実験を行った。L1 ノルムを用いた再構成問題を解き、流れ場の空間構造を分離する。渦運動を少数個の空間的に疎な表現ベクトルで記述する。一次独立な表現ベクトルの重ね合わせで、独立した少数の測定点の情報から流れ場を再構成する。測定点の位置や測定する物理量を変えることで、再構成に必要な情報を明らかにする。乱流抵抗の主たる原因となる渦運動を限られた測定データから検出する数値計算法を開発する。推定法により渦構造が検出できない場合のために、数値解に関する秩序渦の同定も行う。風洞実験では、ピトー管・熱線風速計による測定環境を整える。レーザーシート光源とスモークによる系統的な可視化する方法を確立する。風速の観測データと可視化した渦構造を対応付けて、限られた風速の測定から渦構造を再構成する方法を開発する。

4. 研究成果

単純な系から数値計算法の開発を行った。周期箱乱流において、特異値分解による再構成問題を解いた。格子点数の30%程度の測定で10%程度の相対誤差で速度ベクトル場を再構成できることがわかった。平行平板間 Couette 流について PCA による渦構造の同定を行った。さらにこの系で数値解の探索を行い、抵抗低減や混合促進に重要な役割を果たす横渦がストリーク不安定性によって発現することをみつけた。素朴な PCA は流れ方向渦を特徴づけてしまうため、スパン方向の秩序構造を抽出する計算法が必要であることが分かった。風洞実験について、研究代表者が秋田大学に着任時に、前職から譲り受けた小型風洞を用いた室内実験を行った。移動や経年劣化を調べるために、ピトー管・熱線風速計による校正を行った。スパン方向の流れの精度を調べるためにトラバース装置を作成し、1~4m/s 程度の一様流が有効数字3桁で実現できることを確認した。スモークとレーザーシート光源による可視化を行うため、実験環境を整備した。実験研究についてはコロナ禍の影響を大きく受け、十分な進捗を得ることができなかった。

以下、それぞれの研究成果の詳細を述べる。

(1) 周期箱乱流の再構成

3次元周期箱乱流について、L1 ノルムによるノイズ除去法に類似して、特異値分解による再構成問題を解いた。格子点上の速度ベクトルを p の割合でガウスノイズに置き換える。残りの格子点上の速度ベクトルから元の速度ベクトルを復元する。ここでガウスノイズに置き換えていない格子点上の速度ベクトルを観測データと呼ぶ。速度ベクトルを適当な行列にし、特異値分解を行う。特異値に軟判定閾値をかけ、特異ベクトルを用いて行列に戻す。このとき観測データも変化してしまうため、観測データを代入する。軟判定閾値の値を徐々に減少させながらこの操作を繰り返す。Taylor-micro Reynolds 数が194までの乱流状態について、本数値計算法を試験したところ、Reynolds 数によらず、70%のデータが欠損しても、残りの30%のデータを用いて10%程度の誤差で流れ場を再構成できることが分かった(図1)。一方、渦度場で推定すると、精度が大きく低下する。このことは限られた観測データから積分長スケールの渦構造が再構成できることを意味する(Sasaki & Ohzeki 2020)。スパースな特徴量抽出法である SPCA について、乱流など大規模データに適用可能な数値計算法を開発中である。

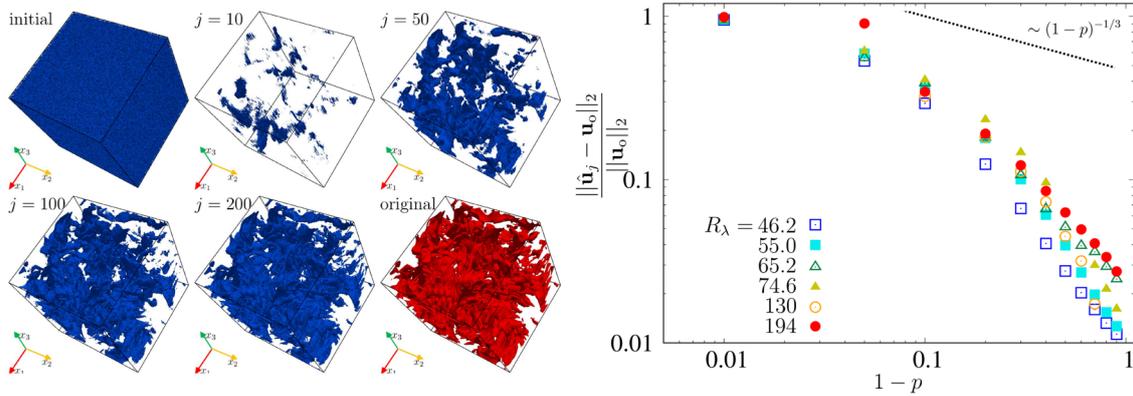


図1 周期箱乱流の再構成. 左: Taylor-micro Reynolds 数 130 における速度ベクトル場の再構成. エネルギーの等値面を可視化した. 青は再構成された流れ場, 赤は元の流れ場. 右: 全格子点数のうち割合 $1-p$ で速度を観測し, 流れ場の再構成問題を解いた. 縦軸は相対誤差.

(2) 数値解による秩序渦の同定

静的 Smagorinsky モデルを導入した LES 平行平板間 Couette 乱流について, Reynolds 数 2000 における不安定周期解を数値的に求めた. この解は乱流アトラクタに埋め込まれており, 乱流の統計的性質をよく近似する. この解はストリーク不安定性によって横渦が発現する. 横渦は抵抗低減や混合促進に寄与する重要な渦構造であることが知られているが, その動力学はわかっていなかった (Sasaki et al. 2021). PCA など従来の辞書学習では流れ方向の構造を特徴づけてしまうため, 横渦を記述する特徴量抽出法は非自明である.

2次元球面上の流れについて, 高 Reynolds では外力によらず大規模構造をもつ数値解が必ず存在することを示した (Sasaki et al. 2020).

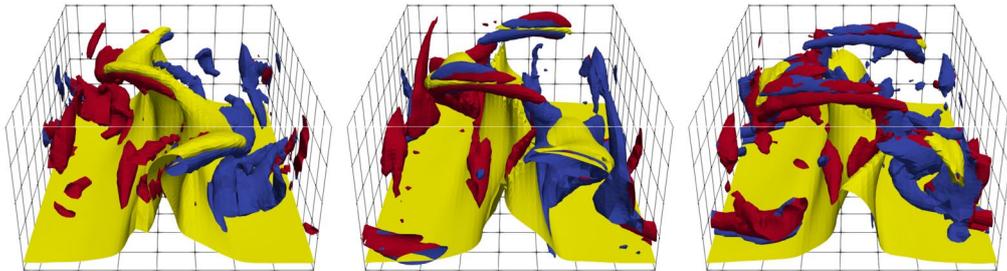


図2 LES 平行平板間 Couette 乱流を記述する不安定周期解. 黄色は流れ方向速度の等値面, 赤と青は Q 値によって可視化した渦構造.

(3) 風洞実験

研究代表者が現職に着任時に, 前職から譲り受けた小型風洞を用いた室内実験を行う. 風洞下流にラックを作り, 微差圧計・データロガー・PCなどを設置できる環境を整えた. まず, 移動や経年劣化を調べた. 1次元トラバース装置をマウントし, ピトー管・I型熱線風速計による測定を行った. 1~4 m/s 程度の風速の一樣流を有効数字 3 桁で得ることができたことが分かった (図3-左).

(図3-左). 現在, 精度よく水平かつ垂直に移動可能な2次元トラバース装置を作成している. 必要部品などは購入済みである. 可視化実験を行うために, カーテン・プラスチック段ボールを用いて実験室を暗室にした. スモークとレーザーシート光源による可視化を行う. 一眼レフカメラによる撮影が可能になるようにマウント機構をつけた. NACA0048 翼を取り付け, 流れの可視化を行った (図3-右). 今後, 実験データからスパース性を用いた低次元モデルの構成を行う.

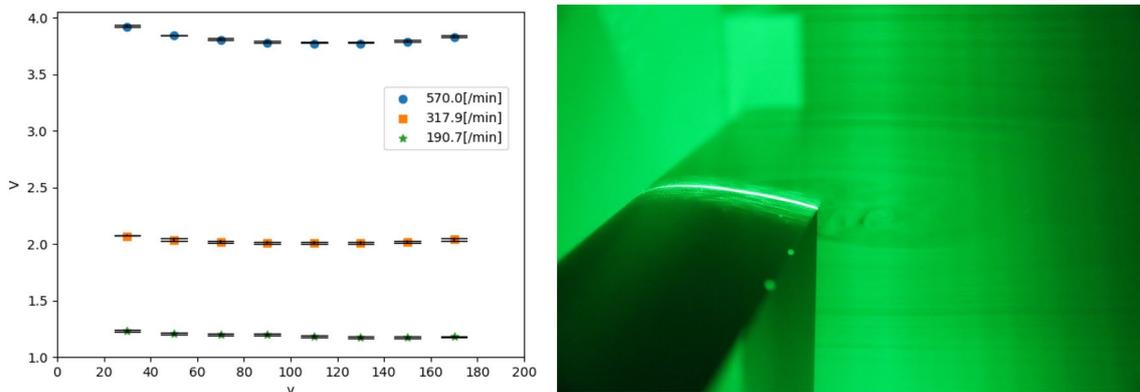


図3 左: 風洞実験による風速の測定. エラーバーは標準偏差. 右: Reynolds 数約 1300 における NACA0048 翼後流の可視化.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Eiichi Sasaki and Masayuki Ohzeki	4. 巻 1522
2. 論文標題 A note on the reconstruction of a 3D-3C velocity field for box turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Phys.: Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 12023
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1522/1/012023	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 Sasaki Eiichi, Takehiro Shin-ichi, Yamada Michio, Kawahara Genta	4. 巻 406
2. 論文標題 Bimodal vortex solutions on a sphere	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica D: Nonlinear Phenomena	6. 最初と最後の頁 132438 ~ 132438
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physd.2020.132438	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 Sasaki Eiichi, Kawahara Genta, Jimenez Javier	4. 巻 6
2. 論文標題 Bifurcation structure of unstable periodic orbits in plane Couette flow with the Smagorinsky model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 84608
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevFluids.6.084608	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

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐々木英一, 高岡正憲
2. 発表標題 回転球殻Couette乱流の大規模構造と動力学
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木英一, 高岡正憲
2. 発表標題 回転球殻Couette流の遷移
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 Eiichi Sasaki and Masayuki Ohzeki
2. 発表標題 Reconstruction for chaotic 3D box flow by using singular value decomposition
3. 学会等名 Fourth Madrid Turbulence Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eiichi Sasaki
2. 発表標題 Bimodal vortex solutions on a sphere
3. 学会等名 Mathematics of Fluid Motion, KIAS, Seoul, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木英一
2. 発表標題 流れ場の再構成と動的モード分解
3. 学会等名 現象と数理モデル2019
4. 発表年 2019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
---------	---------