

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14588

研究課題名(和文) 機械学習を用いた高精度乱流モデルの構築

研究課題名(英文) High-precision turbulent modeling by machine learning

研究代表者

清水 雅樹 (Shimizu, Masaki)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：20550304

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：機械学習における様々なデータ駆動型の手法を用いて、流体力学の数値計算コストの削減を行った。乱流の数値計算は大規模な計算コストが必要であるが、深層学習によって構築した必要最小限の変数のモデルを解くことで即座に行うことが可能になった。動的モード分解という機械学習の手法において、流れのデータから分解されたモードを用いることで、流体中の物体運動に効率的な制御が可能となる手法を考案した。強化学習のアルゴリズムを流れの制御に適したアルゴリズムに修正し、低コストな強化学習を可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流の数値計算は様々な工学的製品の設計開発において用いられ、効率的で高精度な性能評価が求められる。物理的な面から乱流計算の効率化が進められてきたが、近年は機械学習による効率化が急速に進みつつある。本研究では乱流が少数自由度で記述できるという性質を用いて、機械学習の様々なアルゴリズムを流体工学の問題に応用した。これにより、物理から演繹的には導出不可能な方法によって、【研究成果の概要】で述べた最適化手法が可能になり、更なる工学製品の省エネの実現に結び付けることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：We have reduced the computational cost of fluid dynamics by using various data-driven methods in machine learning. Numerical calculation of turbulence requires an enormous calculation cost, but it became significantly small by solving the model of the minimum necessary variables constructed by deep learning. Using dynamic mode decomposition, which is one of data-driven algorithm, we devised a method that enables efficient control of object motion in a fluid by using modes decomposed from flow data. The reinforcement learning algorithm was modified to be suitable for flow control, enabling low-cost reinforcement learning.

研究分野：流体力学

キーワード：Turbulent model Machine learning

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

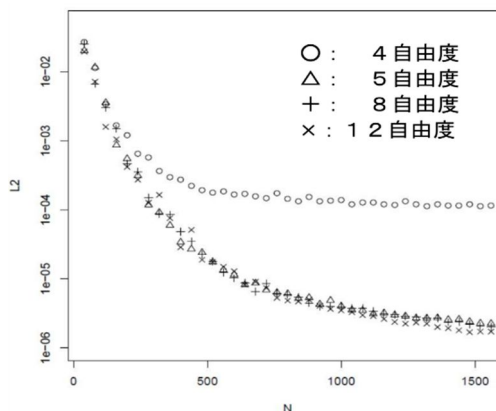
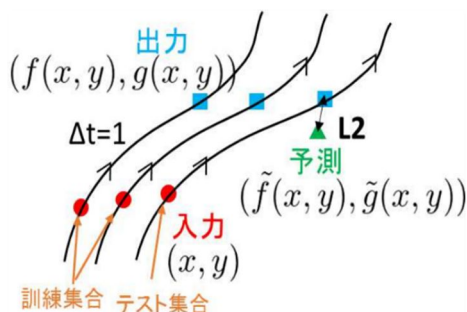
1. 研究開始当初の背景

流れを扱う厳密な方程式として、個々の分子を直接扱う分子動力学方程式、分子の分布関数を扱う運動論的方程式、連続体方程式の3階層が存在する。後ろの方程式ほど粗視化されたものであり、前の方程式の理想的極限の方程式である。数値流体力学(CFD)では、連続体方程式であるナビエ・ストークス方程式を数値的に扱うが、近年の計算機の発達をもって、発達した乱流を直接的に扱うことは困難である。そのため CFD を用いた工学的な設計・開発では LES や RANS といった乱流モデルが多く用いられている。しかし、これらのモデルは厳密なモデルではなく、モデルパラメータの調整も困難であり、理論的にも性能的にも十分とは言い切れない。一方、ナビエ・ストークス方程式のような無限次元散逸系では、状態空間での最終状態であるアトラクタのフラクタル次元(容量次元)以上の自由度を用いることで、系の状態を完全に特徴付けられることが証明されている。このため原理的には、ナビエ・ストークス方程式からもう1階層粗視化された、有限個の自由度による時間発展方程式(常微分方程式系)が存在する。

2. 研究の目的

近年、深層学習の急速な発展に伴い、データからモデル構築に必要な特徴量を自ら抽出する自己学習の重要性が増している。概念的には、乱流の DNS や実験のデータを機械学習のアルゴリズムに入力すれば、要求する精度に応じた、必要最小限の物理量の構成方法とそれらの時間発展のモデル構築が完了する。機械学習が道びいたこれらのルールを基に、物理的知識を得るということも可能になる。数理的にも工学的にも古くから取り組まれている乱流の問題に対し、新しい分野である機械学習のこうした特徴を取り入れ、乱流の研究者が試行錯誤的に行ってきた乱流のモデル化を、より効率的に行おうとする点が本研究の独創的な特色である。これにより、自由度の小さい高精度な乱流モデルを構築し、乱流の完結問題や CFD の低コスト化といった流体力学の重要な課題の解決に貢献できると考える。

3. 研究の方法



乱流軌道上の低次元力学系の構築

左図にアトラクタが2次元の場合の、時間発展方程式の構築法を例示する。方向付きの曲線は状態空間でのアトラクタ上のフローを表す。入力と出力の対が数値計算の結果から得られるので、これを教師付き学習に用いることで軌道の予測関数が構築できる。アトラクタの次元はこの教師付き学習の際の誤差の大きさからわかる。右図は用いる変数の数を変えたときの、誤差の減少の訓練サンプル数依存性を表す。この例では5変数以上あれば、どれも同様な誤差を示し、5変数で十分アトラクタ上の位置を区別できることが分かる。或いは、フラクタル次元を直接求めることによって、必要な変数の数を求める。

動的モード分解 (DMD) による流れの制御と DMD モードを用いたナビエ・ストークス方程式の厳密解の求め方

DMD は、多次元時系列データから特徴的な空間構造(DMD モード)とその時間依存性(DMD 固有値)を抽出する。このとき DMD 固有値は対応する DMD モードの周波数および増幅/減衰率を表し、分解結果の解釈と利用がしやすいことが特徴である。DMD は流体分野で初めて提案されて以来、大規模データへの対応やスパース化など様々なアルゴリズムの拡張がなされながら流体以外の分野にも応用されている。ここでは、二次元の円柱後流において、不安定性によって生じる構造の時間的特徴と空間的特徴を DMD により抽出し、その結果得られた DMD モードを用いることで不安定性による構造を制御できることを示す。

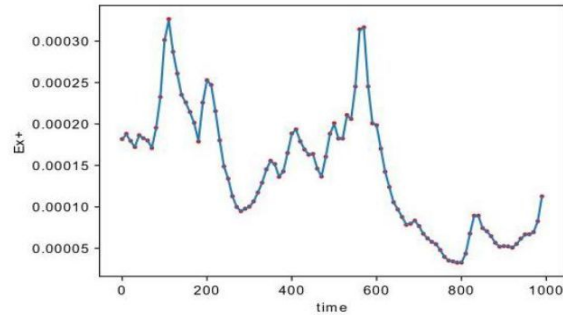
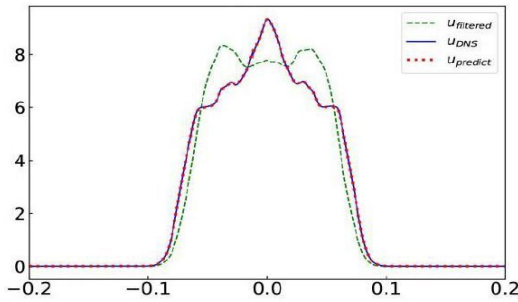
流れの最適制御のための強化学習

流れ制御の問題に強化学習の既存のアルゴリズムを適用する場合、流れ場が連続体であることから、全速度場や時間遅れ座標によって過去の状態を用いる等、状態を指定するのに非常に多くの観測量が必要である。このため、これまでの先行研究では既存の強化学習のアルゴリズムを用いるために、大規模な深層ネットワークにより状態評価や方策表現を行ってきた。あるいは、部分的観測を用いる手法も存在するが、その複雑なアルゴリズムのため我々の知る限り実用的

ではない。散逸系の1つである流れの系では、乱流であっても状態は実質的に位相空間の限られた部分集合に留まり、有限の観測量で状態を指定できるという性質がある。本稿では、この性質を用いて強化学習のアルゴリズムを流体の制御に応用し、低コストなアルゴリズムの導出を行う。流れの状態の集合は制御の方策に依存して変化するが、方策をパラメトリックに扱う場合、そのパラメータを観測量に加えることで状態を指定する。

4. 研究成果

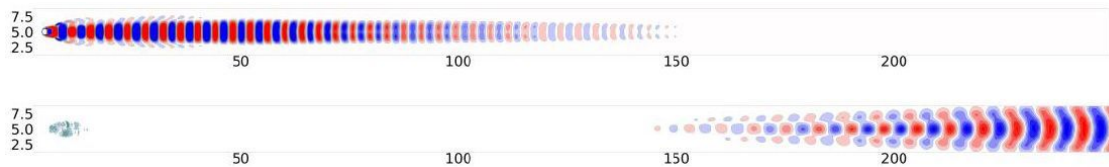
乱流軌道上の低次元力学系の構築



左図は蔵本 シバシンスキー方程式における解の確率密度関数を示している。青の実線は高精度な直接数値計算による結果であり、緑の破線がある波数で切断した低解像度の数値計算による結果である。低解像度の自由度のみを用いて、高精度な直接数値計算を再現するモデル項をニューラルネットワークによって構築し、構築したモデル項を含む低解像度の計算結果を赤の点線で示す。高解像度の数値計算とほとんど区別がつかない計算が可能であることが分かる。

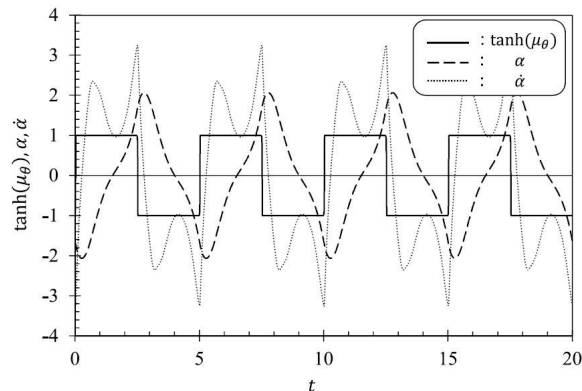
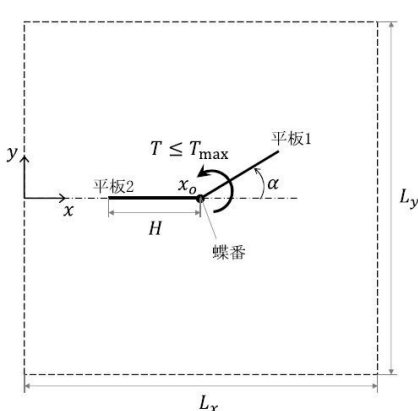
右図はレイノルズ数 3000 のチャンネル乱流での攪乱エネルギーの時間変化を示す。この例では、空間で分割された領域の積分量を使って、合計で 16 の特徴量を用いて 16 変数の力学系をニューラルネットワークで構築した。青の実線が直接数値計算の結果であり、赤点は 16 変数系での予測を表している。

動的モード分解 (DMD) による流れの制御と DMD モードを用いたナビエ・ストークス方程式の厳密解の求め方



この図は DMD によって分解されたカルマン渦列の第一渦列 (上) と第二渦列 (下) を示す。このような DMD モードを用いることで、例えば第一渦列 u_1 だけに限定するような制御外力を ($u-u_1$) に比例するように構築した。それぞれのモードはナビエ・ストークス方程式の厳密解ではないものの、このように局所的な不安定性によって流れが複雑化している場合、それぞれのモードは方程式の解に近い。このため、この制御によって効率的な円柱の抵抗低減が可能である。また、DMD モードを用いて接続することで、第一渦列だけの不安定な非線形解を求める方法を考案した。

流れの最適制御のための強化学習



左図は流体中を泳ぐ蝶番運動の系を示している。平板 1 にトルクを与えることで、蝶番を左方向に進行させる。強化学習を用いて、流れの状態に応じてトルクを最適に与えることで蝶番の速度を最大化させた。観測量を平板 1 の角度と角速度とし、状態の評価関数に制御パラメータを導入することで少ない観測量での強化学習を可能とした。右図に最適制御下での 2 つの観測量の時系列とトルクの与え方の時系列を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Shingo Motoki, Genta Kawahara and Masaki Shimizu	4. 巻 851
2. 論文標題 Maximal heat transfer between two parallel plates	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R4-1-R4-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2018.557	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 Masaki Shimizu, Takahiro Kanazawa and Genta Kawahara	4. 巻 51
2. 論文標題 Exponential growth of lifetime of localized turbulence with its extent in channel flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fluid Dynamics Research	6. 最初と最後の頁 1-9
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 Shingo Motoki, Genta Kawahara and Masaki Shimizu	4. 巻 835
2. 論文標題 Optimal heat transfer enhancement in plane Couette flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 1157-1198
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 Lustro Julius Rhoan T., Kawahara Genta, van Veen Lennaert, Shimizu Masaki, Kokubu Hiroshi	4. 巻 862
2. 論文標題 The onset of transient turbulence in minimal plane Couette flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R2-1-R2-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2018.971	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 Shimizu Masaki、Manneville Paul	4. 巻 4
2. 論文標題 Bifurcations to turbulence in transitional channel flow	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 113903(1-21)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.4.113903	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24件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 S. Motoki, G. Kawahara, M. Shimizu
2. 発表標題 THREE-DIMENSIONAL STEADY SOLUTIONS IN RAYLEIGH-BENARD CONVECTION
3. 学会等名 Euromech Colloquium 598 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Rhoan T. Lustro, G. Kawahara, L. van Veen, M. Shimizu, H. Kokubu
2. 発表標題 THE ONSET OF TRANSIENT TURBULENCE IN MINIMAL PLANE COUETTE FLOW
3. 学会等名 Euromech Colloquium 598 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 P. Manneville, M. Shimizu
2. 発表標題 Subcritical transition to turbulence in wall-bounded flows: the case of plane Poiseuille flow
3. 学会等名 LA 22e RENCONTRE DU NON LINEAIRE (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本木 慎吾, 河原 源太, 清水 雅樹
2. 発表標題 浮力駆動型対流における3次元定常解
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 廣田 幸起, 河原 源太, 清水 雅樹, 渡邊 大記
2. 発表標題 平面クエット系における特異な乱流状態
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 清水 雅樹, Manneville Paul
2. 発表標題 チャンネル流における一方向乱流から二方向乱流への遷移
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 本勝 隆喜, 加藤 賢人, 清水 雅樹, 河原 源太
2. 発表標題 矩形ダクト流の乱流遷移時に現れる蛇行乱流パターン
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 久保 晃, 河原 源太, 清水 雅樹
2. 発表標題 平面クエット流への渦導入による非相似的伝熱促進とその機構解明
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 川野 晃季, 本木 慎吾, 清水 雅樹, 河原 源太
2. 発表標題 高レイリー数におけるレイリー・ベナル対流の乱流構造と統計的性質
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 Lustro Julius Rhoan, Kawahara Genta, van VeenLennaert, Shimizu Masaki, Kokubu Hiroshi
2. 発表標題 The onset of transient turbulence in minimal plane Couette flow
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 清水雅樹, マンネビル ポール
2. 発表標題 チャンネル流の乱流パターンの分岐：個別性から普遍性へ
3. 学会等名 第63回「乱流遷移の解明と制御」研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本木慎吾, 河原源太, 清水雅樹
2. 発表標題 レイリー・ベナル対流におけるマルチスケール性を有する定常解の階層的渦構造と統計性質
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水雅樹, Paul Manneville
2. 発表標題 チェネル流の乱流パターンの分岐
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 (2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水雅樹
2. 発表標題 平行平板間流れにおける持続乱流の発生
3. 学会等名 非一様乱流の数理解析 京大 数理解析研究所 RIMS共同研究 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本木慎吾, 河原源太, 清水雅樹
2. 発表標題 平行平板間における熱輸送最大化
3. 学会等名 非一様乱流の数理解析 京大 数理解析研究所 RIMS共同研究
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 本木慎吾、河原源太、清水雅樹
2. 発表標題 熱輸送最大状態における階層的渦構造
3. 学会等名 日本流体力学会 年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 宮脇基裕，河原源太，清水雅樹，本木慎吾
2. 発表標題 高レイノルズ数チャネル乱流における熱と運動量輸送の非相似性
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久保晃，河原源太，清水雅樹
2. 発表標題 平面クエット流における渦導入による非相似的伝熱促進
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水雅樹
2. 発表標題 壁面流における持続乱流の発生過程
3. 学会等名 プラズマシミュレーションポジウム2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水雅樹, 河原源太, Paul Manneville
2. 発表標題 平面クエット流における持続乱流の発生過程
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Paul Manneville
2. 発表標題 Onset of Sustained Turbulence in Plane Couette Flow
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Motohiro Miyawaki, Shingo Motoki, Masaki Shimizu, Genta Kawahara
2. 発表標題 Dissimilarity Between Momentum and Heat Transfers in Turbulent Channel Flow at High Reynolds Numbers
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Akira Kubo, Genta Kawahara, Masaki Shimizu
2. 発表標題 Dissimilar Heat Transfer Enhancement by Vortex Introduction in Plane Couette Flow
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takahiro Kanazawa, Masaki Shimizu, Genta Kawahara
2. 発表標題 Two-dimensionally Localized Turbulence in Plane Channel Flow
3. 学会等名 The Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2017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