

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820046

研究課題名(和文) 壁面流における乱流発生から発達乱流に至る不変集合の分岐構造と境界クライシス

研究課題名(英文) Bifurcation structure and boundary crisis in wall-bounded flows

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：平面クエット流において、レイノルズ数と初期条件が異なる10万例以上の数値計算を行い、カオス発生の初期段階を詳細に捉えた。層流解以外のアトラクタが同時に2つ存在することで、フラクタル吸引領域境界の形成やその崩壊過程を複数の大域分岐と関連して見つけた。求めたリアプノフ次元は2を少し上回る大きさであり、カオスアトラクタは1次元写像と同相であると考えられる。このため、原理的には数次元の力学系を構築できることが分かった。永田の定常解からのカオスの発生においては、機械学習を用いてこの低次元化系を構築し、少なくとも5変数を用いることで、ナビエ・ストークス方程式を再現する高精度な系が構築できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：In plane Couette flow, we performed numerical simulations of more than 100,000 cases with different Reynolds number and initial condition, and investigated the onset of initial chaos in detail. Because two different untrivial solutions exist in the same range of Reynolds number, we found the creation of the fractal basin boundaries and its crisis at several global bifurcation points. We calculated Lyapunov dimension of the chaotic attractor and found that the dimension is slightly higher than 2. So the chaotic attractor is considered to be homeomorphic to a one-dimensional map. In the case of the onset of chaos from Nagata steady solution, we constructed low-dimensional system, which reproduces Navier-Stokes equations very precisely, by using machine learning at least with five variables.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 乱流遷移 力学系 機械学習

1. 研究開始当初の背景

円管流や平行平板間流等の壁面流における乱流遷移は有限振幅の攪乱により生じ、遷移レイノルズ数(Rec)を決めるのは数学的に困難であるとされてきたのは周知の事実である。しかし本研究開始前の数年の間で、現実的な値が導出可能である Rec の定義がいくつか考え出された。1つ目は、Avila ら(2011)によるものであり、彼らは円管流における局在乱流の平均消滅時間と平均分裂時間を実験と数値計算を用いて測定し、両時間が一致するレイノルズ数を乱流が永続できる下限レイノルズ数と定義した。2つ目に Kreilos&Eckhardt(2013)によるクエット流におけるカオスの発生の Rec である。彼らは、永田の定常解から分岐した周期解からの周期倍分岐によるカオス発生を発見した。これらの研究結果は、力学系における大域分岐理論の重要性を着想させた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、数値計算を用いて様々な壁面流における最初のカオス発生から発達乱流までの遷移の過程を知ることである。具体的には、次の点である。(1)円管流や平行平板間流におけるカオスの発生と境界クライシスによる消滅の Re を高精度に特定する。(2)局在乱流の分裂が境界クライシスによるカオスサドル間の移り変わりであることを示し、分裂が発生する Re を特定する。(3)この過渡的乱流(カオスサドル)が有限の Re の範囲で生じているのかを調べる。(4)こうした遷移過程での乱流や高レイノルズ数での乱流のフラクタル次元を求める。乱流遷移の具体的な分岐構造や臨界値を示すことは該当分野においてインパクトがあり、不変集合に着目する方針は乱流の解法の低次元化に繋がる可能性がある点にも意義がある。カオス軌道の不安定方向は低次元であり、フラクタル次元も低次元であると想像でき、次元を求める際の計算コストとしては比較的容易に求められると考える。同様に発達乱流にいたるまで、フラクタル次元を求める。乱流が本質的に位相空間上の低次元部分空間で生じているとすると、将来的に乱流の解法が劇的に変えられる可能性がある。

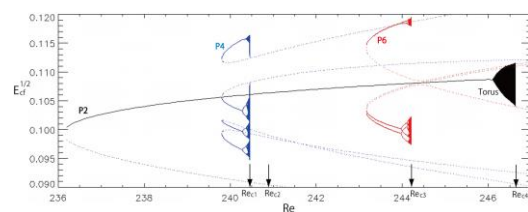
3. 研究の方法

広い領域を対象にし、各レイノルズ数に応じた最終的な状態に着目する場合、自由度や積分時間や計算の実行回数が非常に大きくなる。本研究では収束性と有効桁数が優れたスペクトル法を用い、また最適化や大規模化も充分であり、効率的に数値計算を行うことができる。直接数値計算とニュートン法によって解の分岐構造を求め、不変集合による境界クライシスが発生するレイノルズ数のい

くつかを数値的に求め、乱流の最初の発生から発達乱流までの遷移過程を解明する。乱流の分裂はカオスサドル(過渡的乱流)による境界クライシスで発生すると考えられ、カオスアトラクタによるものより、発生のレイノルズ数を求めるのは困難である。長時間カオスサドルに留まる軌道(維持される乱流)を探すことにより、分裂に繋がる軌道の存在を調べる。また、カオスアトラクタについて、Shimada&Nagashima(1979)の方法により、位相空間でのとり得る値域の次元(フラクタル次元)を直接求め、乱流を表す低次元方程式への指針を得る。

4. 研究成果

平面クエット流において、10万例以上(Re と初期条件が異なる)の数値計算を行い、層流解から有限振幅攪乱によるカオス発生の初期段階を詳細に捉えた。周期境界条件以外の対称性を課さなくても、層流解以外のアトラクタが同時に2つ存在することで、フラクタル吸引領域境界の形成やその崩壊過程を複数の大域分岐と関連して見つけることが出来た。下図において、矢印で示す Re がこれらの大域分岐点である。縦軸は攪乱エネルギーを示す。また、フラクタル次元は2を少し上回る大きさであり、カオスアトラクタはほぼ1次元写像と同相であることが分かった。このため、原理的には数次元の計算コストの小さい力学系を構築できることが分かった。永田の定常解からのカオスの発生において、機械学習を用いて、この低次元化系を構築し、少なくとも5変数を用いることで、ナビエ・ストークス方程式を再現する高精度な系が構築できることが分かった。



円管流においては、Avila et al. (2011)の空間局在周期解からのカオスとカオスサドル発生の分岐構造を再現した。Avila らは下分枝解への境界クライシスによってカオスサドルが発生していることを示唆しているが、この点に関しては、我々の結果と反していると考えられ、今後この大域分岐構造を詳細に調べる予定である。

矩形管流れにおいては、ルジャンドル多項式を用いた数値計算法を開発し高精度安定に数値計算を実行できるようになった。Okino(2015)の流れ方向局在解を求め、比較的容易にニュートン法による解の追跡が可能となり、スパン方向に計算領域を広くして解を接続することで、スパン方向にも局在し

た解を得た。また、高精度数値計算が安定に可能となったため、正方形ダクトにおける二次流れのレイノルズ数依存性及び維持機構をこれまででは困難であった高レイノルズ数で調べることができた。

正方形容器内の対流の分岐構造を調べ、プラントル数 $Pr=7$ の場合、1つ渦の定常解から分岐した周期解の対称解のペアが、4つ渦の不安定解に接触することで一対のホモクリニック軌道を生じ、その直後にカオス的な循環方向の反転運動が発生した。ここでも、高次元力学系での大域分岐構造が流れの重要な性質の変化をもたらす例として発見できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- (1) 渡邊大記, 河原源太, 清水雅樹, 水平平板間ポアズイユ乱流における熱対流の発生, ながれ, 査読無, Vol. 36, 2017, 79-82
- (2) 長賢太朗, 清水雅樹, 河原源太, 熱対流におけるカオスの反転の発生条件, ながれ, 査読無, Vol. 34, 2015, 409-411
- (3) Susumu Goto, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Turbulent mixing in a precessing sphere, Physics of Fluids, 査読有, Vol. 26, 2014, 115106-1-24
DOI: 10.1063/1.4901449
- (4) Masaki Shimizu, Paul Manneville, Johann Duguet, Genta Kawahara, Splitting of a turbulent puff in pipe flow, Fluid Dynamics Research, 査読有, Vol. 46, 2014, 061403-1-13
DOI: 10.1088/0169-5983/46/6/061403

[学会発表] (計42件)

- (1) 森下誠, 清水雅樹, 河原源太, 高レイノルズ数乱流における正方形ダクト二次流れ, 日本機械学会第94期流体力学部門講演会, 2016年11月12日~2016年11月13日, 山口大学 (山口県・宇部市)
- (2) 清水雅樹, 河原源太, 機械学習を用いた平面クエット乱流における低次元力学系の構築, 日本機械学会第94期流体力学部門講演会, 2016年11月12日~2016年11月13日, 山口大学 (山口県・宇部市)
- (3) 金澤昂弘, 清水雅樹, 河原源太, チャネル流における局在斜め乱構造の維持機構, 日本機械学会第94期流体力学部門講演会, 2016年11月12日~2016年11月13日, 山口大学 (山口県・宇部市)
- (4) 金澤昂弘, 清水雅樹, 河原源太, チャネル流における局在乱れの平衡状態, 日本流体力学会年会2016, 2016年9月26日, 2016年9月28日, 名古屋工業大学 (愛

知県・名古屋市)

- (5) 金澤昂弘, 清水雅樹, 河原源太, チャネル流における局在斜め乱流構造, 日本物理学会2016年秋季大会, 2016年9月13日~2016年9月16日, 金沢大学 (石川県・金沢市)
- (6) 清水雅樹, 河原源太, 円管流における過渡的乱流パフの発生過程, 日本物理学会2016年秋季大会, 2016年9月13日~2016年9月16日, 金沢大学 (石川県・金沢市)
- (7) 本木慎吾, 河原源太, 清水雅樹, 変分原理を用いた強制対流熱伝達の最適化, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016年9月12日~2016年9月14日, 九州大学 (福岡県・福岡市)
- (8) 渡邊大記, 河原源太, 清水雅樹, レイリー・ベナル・ポアズイユ乱流における熱・運動量輸送, 日本機械学会2016年度年次大会, 2016年9月12日~2016年9月14日, 九州大学 (福岡県・福岡市)
- (9) Shingo Motoki, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Optimization of forced convection heat transfer by using a variational method, 11th European Fluid Mechanics Conference, 2016年9月12日~2016年9月16日, セビリア (スペイン)
- (10) Shingo Motoki, Genta Kawahara, Masaki Shimizu, Optimization of heat transfer enhancement in wall-bounded shear flow, RIMS Camp-Style Seminar: Dynamics of wall-bounded shear flows, 2016年8月31日~2016年9月2日, 関西セミナーハウス (京都府・京都市)
- (11) Takahiro Kanazawa, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Domain size dependence of the lifetime and the transition in plane channel flow, RIMS Camp-Style Seminar: Dynamics of wall-bounded shear flows, 2016年8月31日~2016年9月2日, 関西セミナーハウス (京都府・京都市)
- (12) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Naoto Onishi, Bifurcation to a transient turbulent puff in pipe flow, RIMS Camp-Style Seminar: Dynamics of wall-bounded shear flows, 2016年8月31日~2016年9月2日, 関西セミナーハウス (京都府・京都市)
- (13) Takahiro Kanazawa, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Exponential increase of the lifetime with the number of coherent structures, 24th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 2016年8月21日~2016年8月26日, モントリオール (カナダ)
- (14) Shingo Motoki, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Optimization of heat transfer in plane Couette flow, 5th

- International Conference of Continuous Optimization (招待講演), 2016年8月6日~2016年8月11日, 政策研究大学院大学(東京都・港区)
- (15) Shingo Motoki, Genta Kawahara, Masaki Shimizu, Optimal heat transfer enhancement in wall-bounded shear flow, International Workshop on Theoretical Aspects of Near-Wall Turbulence Studies (招待講演), 2016年6月28日~2016年6月30日, 関西セミナーハウス(京都府・京都市)
- (16) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Dimension reduction method by machine learning for turbulent plane Couette flow, International Workshop on Theoretical Aspects of Near-Wall Turbulence Studies (招待講演), 2016年6月28日~2016年6月30日, 関西セミナーハウス(京都府・京都市)
- (17) Daiki Watanabe, Genta Kawahara, Masaki Shimizu, An unprecedented turbulent state in plane Couette flow International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence, 2016年6月20日~2016年6月22日, 京都大学(京都府・京都市)
- (18) Shingo Motoki, Genta Kawahara, Masaki Shimizu, Upper bound for heat transfer in plane Couette flow, International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence, 2016年6月20日~2016年6月22日, 京都大学(京都府・京都市)
- (19) Takahiro Kanazawa, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Strong dependence of the lifetime with the domain size in plane channel flow, International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence, 2016年6月20日~2016年6月22日, 京都大学(京都府・京都市)
- (20) Kentaro Cho, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Onset of chaotic reversals in thermal convection, International Symposium on Near-Wall Flows: Transition and Turbulence, 2016年6月20日~2016年6月22日, 京都大学(京都府・京都市)
- (21) 本木慎吾, 清水雅樹, 河原源太, 平行平板間クエット流れにおける最適熱輸送 第53回日本伝熱シンポジウム, 2016年5月24日~2016年5月26日, グランキューブ大阪(大阪府・大阪市)
- (22) 清水雅樹, 壁面流における乱流遷移過程, 先駆的科学計算に関するフォーラム2016, 2016年4月27日, 福岡市(福岡)
- (23) Genta Kawahara, Daiki Watanabe, Masaki Shimizu, Onset of thermal convection in wall-bounded turbulent shear flows, 第58回乱流遷移の解明と制御研究会, 2016年3月21日~2016年3月22日, 首都大学東京(東京)
- (24) 清水雅樹, 河原源太, 機械学習を用いた乱流計算の低次元化方法, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日~2016年3月22日, 東北学院大学(宮城)
- (25) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Dimension reduction method for simulation of turbulent flow by machine learning, France-Japan workshop on subcritical transition to turbulence, 2016年3月2日~2016年3月3日, Paris(France)
- (26) Takahiro Kanazawa, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Strong dependence of the lifetime and the transition with the domain size in plane channel flow, France-Japan workshop on subcritical transition to turbulence, 2016年3月2日~2016年3月3日, Paris(France)
- (27) 清水雅樹, 河原源太, 乱流における低次元力学系の構築, 第29回数値流体力学シンポジウム, 2015年12月15日~2015年12月17日, 九州大学(福岡)
- (28) 森下誠, 河原源太, 清水雅樹, 正方形ダクト流れの数値計算法と乱流二次流れ, 第29回数値流体力学シンポジウム, 2015年12月15日~2015年12月17日, 九州大学(福岡)
- (29) 金澤昂弘, 清水雅樹, 河原源太, チャネル流における局在乱れの寿命の構造依存性, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 2015年11月7日~2015年11月8日, 東京理科大学(東京)
- (30) Masaki Shimizu, Construction of low-dimensional dynamical system in Couette turbulent flow, France-Japan workshop on subcritical transition to turbulence, 2015年10月14日~2015年10月15日, 東京理科大学(東京)
- (31) Shingo Motoki, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Optimal heat transfer in plane Couette flow, 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2015年9月15日~2015年9月18日, Officer's Hall, Sarajevo(ボスニア・ヘルツェゴビナ)
- (32) Masaki Shimizu, Kentaro Cho, Genta Kawahara, Onset of reversal and chaos in thermally driven cavity flow, 15th European Turbulence Conference, 2015年8月25日~2015年8月28日, Delft University of Technology(オランダ)
- (33) Masaki Shimizu, Kentaro Cho, Genta Kawahara, Homoclinic explosion and chaotic reversals in thermally driven cavity flow, Workshop on New Trends in Patterns and Waves (招待講演), 2015年8月17日~2015年8月18日, 北海

- 道大学 (北海道)
- (34) Takahiro Kanazawa, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Subcritical transition to turbulence in plane channel flow, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, 2015年7月26日~2015年7月31日, COEX (韓国)
- (35) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Julius Rhoan Lustro, Lennaert van Veen, Structure of invariant set in Couette flow at low Reynolds number, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015, 2015年7月26日~2015年7月31日, COEX (韓国)
- (36) 清水雅樹, 壁面流における乱流遷移過程, 先駆的科学計算に関するフォーラム 2015, 2015年4月24日, 福岡市 (福岡)
- (37) 金澤昂弘, 清水雅樹, 河原源太, チャンネル流における乱流遷移過程, 日本機械学会第92期流体工学部門講演会, 2014年10月25日~2014年10月26日, 富山大学 (富山県)
- (38) 清水雅樹, 河原源太, ミニマム平面クエット流における乱流発生過程, 日本流体力学会年会 2014, 2014年9月15日~2014年9月17日, 東北大学 (宮城県)
- (39) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Route to chaos in minimal plane Couette flow, 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics, 2014年7月20日~2014年7月25日, Palace of Congresses of Catalonia (スペイン)
- (40) Genta Kawahara, Julius R. Lustro, Lennaert van Veen, Masaki Shimizu, Homoclinic orbits and their relevance to the onset of transient turbulence in wall flow, 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (招待講演), 2014年7月20日~2014年7月25日, Palace of Congresses of Catalonia (スペイン)
- (41) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Route to chaos in minimal plane Couette flow, Euromech Colloquium on Subcritical Transition to Turbulence (招待講演), 2014年5月6日~2014年5月9日, IESC Cargse (フランス)
- (42) 清水雅樹, 壁面流における大域分岐構造と境界クライシス, 先駆的科学計算に関するフォーラム 2014, 2014年4月25日, 福岡市 (福岡)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:

発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]
ホームページ等
<https://sites.google.com/site/wwwkawaharalab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
清水 雅樹 (SHIMIZU Masaki)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 20550304

(2) 研究分担者 ()

研究者番号:

(3) 連携研究者 ()

研究者番号:

(4) 研究協力者
河原 源太 (KAWAHARA Genta)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授

Paul Manneville
Ecole Polytechnique, France

Yohann Duguet
CNRS, France