

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14889

研究課題名(和文) マルチスケール定常解で解き明かす乱流の階層構造とエネルギー伝達機構

研究課題名(英文) Elucidation of hierarchical structure and energy transfer mechanism in turbulence on the basis of multi-scale steady solution

研究代表者

本木 慎吾 (Motoki, Shingo)

大阪大学・基礎工学研究科・講師

研究者番号：70824134

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)：本研究では、熱対流乱流の秩序構造と統計的性質を再現する定常な解を見出した。具体的には、レイリー・ベナール対流、透過性を有する壁面間における熱対流、および3方向に周期的な領域における熱対流について、3次元構造を有する定常解を数値的に求め、これらの解が階層的なマルチスケールの渦構造を示し、熱対流乱流において観測されるスケーリング則およびエネルギースペクトルを再現することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流現象の解明と制御のためには、乱流における統計法則やエネルギー伝達において本質的な役割を担う構造・事象を同定することが重要であるが、広範囲にわたるスケール(大きさ)の渦の階層構造によって構成されるマルチスケール性を有し、時間・空間的に不規則に変動する乱流場からその核となる要素を抽出することは極めて困難である。本研究課題では、乱流のマルチスケール構造と統計的性質を再現する定常な解を見出すことに成功した。この発見を契機とし、様々な流れにおけるマルチスケール定常解が調査されることで、乱流の理論的な理解と適切なモデル化、および新たな制御手法の開発に繋がると期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have found steady solutions reproducing coherent structures and statistical properties in convective turbulence. More precisely, in Rayleigh-Benard convection, thermal convection between permeable walls, and triply-periodic thermal convection, we have numerically obtained steady solutions with three-dimensional structures and revealed that these solutions represent hierarchical multi-scale vortex structures and reproduce the scaling laws and the energy spectrum observed in convective turbulence.

研究分野：熱流体工学

キーワード：マルチスケール 乱流 熱対流 秩序構造 エネルギー伝達 ニュートン法 ホモトピー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

運動量・熱・物質の輸送現象において重要な役割を担う乱流の解明と制御は、熱流体工学において高い学術的意義を有するとともに、ポンプやタービン等の流体機械はもちろん、乱流輸送現象を伴う多種多様な工学機器の研究開発・問題解決のための実践的意義をも持ち合わせた極めて重要な研究課題である。乱流に関する研究は国内外の多くの研究者により精力的に行われてきており、特に、計算機の性能の飛躍的な発達に伴い大規模な数値シミュレーションが可能になったことで、乱流中に存在する大小様々なスケールの秩序構造（組織性を有する構造）に対する理解が深まってきた。近年では、乱流中の管状渦構造や壁乱流における縦渦とストリーク構造といった代表的な秩序構造に対する理解が進み、これらに基づき乱流を解明し、制御する試みが数多く行われている。しかし、このような乱流秩序構造と普遍的統計法則、および乱流中のエネルギー伝達機構との直接的な関係性は未だ明らかとなっていない。

レイリー・ベナル対流（浮力により駆動される自然対流）は基本的な熱流体现象の一つとして古くから精力的に研究され続けており、対流セル（ベナルセル）構造や熱プリューム構造の形成といった特有の現象だけでなく、乱流状態において普遍的な統計法則（ $-5/3$ 乗エネルギースペクトル等）が現れる例としても知られている。このレイリー・ベナル対流の問題に関連し、研究代表者は最近の研究において、一定温度差を有する壁面間の熱輸送を最大化する速度場を、変分原理に基づく汎関数の数値最適化により求めることに成功した。最適状態を実現する速度場は、意外にも乱流状態のそれと類似した階層的な管状渦構造によって特徴付けられ、速度場の3次元性とそのマルチスケール性発現の鍵となることを見出した。最適状態として得られた定常解を実現するためには浮力以外の体積外力を必要とするが、その外力に対する比例係数として新たなパラメータを導入し、目的汎関数に対するオイラー・ラグランジュ方程式系からレイリー・ベナル対流を支配するブシネスク方程式系へとニュートン法を用いて解をホモトピー接続することで、ブシネスク方程式を満足し、マルチスケール性を有する3次元の定常解を得ることに成功した。

最近、レイリー・ベナル対流の2次元定常解について、その性質が改めて注目され、ニュートン法を用いた数値解析によって詳細に調べられており、レイリー数（無次元壁面間温度差）が増加するにつれて、より小さな水平方向周期を有する（より小スケールの対流ロールの列で構成される）2次元定常解の集合が、レイリー・ベナル乱流の実験および数値シミュレーションにおいて観測されるスケールリング則を示すことが報告されている。しかし、水平方向周期を固定した単一の2次元定常解においては、乱流において観測されるマルチスケール構造およびスケールリング則が現れないこともまた報告されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、浮力駆動型対流の近似モデル式であるブシネスク方程式（浮力項を有する非圧縮ナビエ・ストークス方程式および温度についての移流拡散方程式）に対する数値解析により、熱対流乱流の階層的秩序構造および普遍的統計法則を再現するマルチスケール定常解（3次元定常解）を求め、その時間的変化の伴わない（乱流に比して）単純な解の空間構造および統計的性質を徹底的に調査することによって、乱流輸送現象の理論的な理解とモデル化、および制御の指針を得ることである。

3. 研究の方法

上記の目的を達成するため、複数の熱対流問題に対する数値解析および数値シミュレーションを実施した。具体的には、通常のレイリー・ベナル対流、透過性を有する壁面間における熱対流、壁面を伴わない3方向に周期的な領域における熱対流について、ブシネスク方程式を満足する3次元定常解をニュートン法により求めた。ホモトピー接続あるいは系に空間対称性を課すことによって、低レイリー数における解を求め、固有値解析を用いて解の安定性および分岐構造を詳細に調査するとともに、少しずつレイリー数を増加させることで高レイリー数における解を得た。また、プラントル数（流体の動粘性係数と温度拡散係数の比）に対する依存性および水平方向の周期（領域サイズ）に対する依存性についても調査した。定常解との比較のため、定常解と同一のパラメータおよび計算領域における乱流場を直接数値シミュレーションによって求めた。支配方程式の空間離散化にはスペクトル法を用いた。また、熱対流乱流についての実験データとも空間構造や統計量の比較を行った。得られた定常解の速度場および温度場を、可視化や平均統計量の解析により詳細に調べるとともに、水平方向のフーリエスペクトルを解析することで、波数空間におけるエネルギー伝達を調べた。また、ガウシアンフィルタを利用した流れの粗視化を行うことで、マルチスケール定常解に階層的に存在する異なるスケールの渦構造を同定した。

以上のマルチスケール定常解の数値解析、可視化・粗視化処理、および乱流の直接数値シミュレーションに係る大規模数値計算を京都大学学術情報メディアセンター大型計算機システム Cray XC40 (Xeon Phi KNL, 1ノード: 68コア, ピーク性能: 3.05TFlops, メモリ: 96+16GB) を用いて実施した。

4. 研究成果

本研究課題の特徴は、乱流の秩序構造および統計的性質を再現する時間定常な解を数値的に求め、その単純な解に基づき、乱流輸送現象を解明することである。本研究では、乱流と同様にマルチスケール性を示す定常解を複数の熱対流系において求めた。その主な成果を以下に示す。

(1) レイリー・ベナール対流

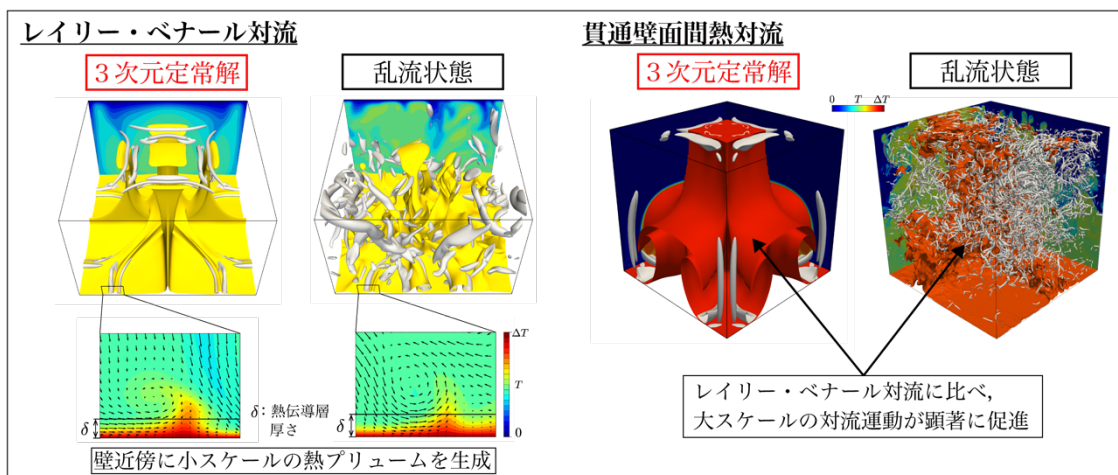
水平方向に周期的な、一定温度差を有する非透過性水平壁面間の熱対流系（通常のレイリー・ベナール対流）において、乱流状態を良く再現する3次元定常解を求めた（下図左）。レイリー・ベナール対流は、特定の臨界レイリー数において、熱伝導解から2次元および3次元の定常解が超臨界分岐により生じることがよく知られている。しかし、このような解は高レイリー数において一般に不安定であり、高レイリー数域における詳しい性質は明らかとなっていなかった。特に、3次元定常解について詳細に調べた研究は本研究が初めてである。3次元定常解は乱流と同様に、レイリー数の増加に伴い、熱伝導層厚さに対応する小スケールの熱プルームおよび管状渦構造を壁面近傍に生じ、ヌセルト数（無次元壁面熱流束）がレイリー数の1/3乗に比例するスケールリング則（古典スケールリングと呼ばれる）を示し、乱流平均統計量を良く再現する。また、高レイリー数の3次元定常解において、最大スケールの対流構造から最小スケールの壁近傍の渦構造の間に管状渦構造が階層をなして存在し、乱流と類似したエネルギースペクトルを示すことを見出した。また、3次元定常解のプラントル数依存性、および水平方向の周期（領域サイズ）に対する依存性についても調査し、異なるプラントル数および水平方向周期においても、同様の3次元定常解が普遍的に存在することを明らかにした。高い空間対称性（鉛直軸に対する回転対称性等）を有する3次元定常解が、時間・空間的に不規則に振舞う乱流状態の特徴を再現することは、乱流中の秩序構造およびエネルギー伝達機構のさらなる理論的な理解とモデル化における指針と成り得ると期待できる。また、本研究で得られた3次元定常解は乱流状態および2次元定常解よりも顕著に高いヌセルト数を示しており、今後、3次元定常解を含めた大域的な解の分岐構造の調査が進むことで、乱流熱伝達の促進を目的とした制御に対する新たな知見が得られると期待できる。

(2) 貫通壁面間熱対流

水平方向に周期的な、一定温度差を有する透過性水平壁面間の熱対流系（貫通壁面間熱対流）において、乱流状態を良く再現する3次元定常解を求めた（下図右）。貫通壁面は壁面垂直方向に開いた多数の細孔で構成される多孔質壁面を模した単純なモデルであり、壁面上において、局所の圧力変動に比例する壁垂直方向速度を、滑りなし境界条件と等温条件とともに課すことで実現される。このような熱対流の乱流状態においては、壁面透過性により対流運動が顕著に促進され、ヌセルト数がレイリー数の1/2乗に比例する究極スケールリング（壁面熱流束が流体の熱伝導率に依存しない極めて高い熱伝達）が達成されることが最近明らかとなっており、本研究では、マルチスケール性を示す3次元定常解も同様に究極スケールリングを示すことを見出した。究極スケールリングは古くからその存在が予測されながらも、通常のレイリー・ベナール対流においては未だ観測されておらず、このような特異なスケールリング則を示す対流状態がブシネスク方程式を満足する定常解として得られたことにより、熱対流乱流における統計法則の理論的な理解が深まると期待できる。

(3) 周期箱熱対流

3方向に周期的な、一定の温度勾配を有する熱対流系（周期箱熱対流）において、乱流状態を良く再現する3次元定常解を求めた。この系においては、鉛直方向の周期性のために、時間発展に伴ってその振幅が指数関数的に増大する鉛直方向に一樣な解がレイリー数の増加とともに出現することが知られており、解の分岐構造や統計的性質が十分に調べられていなかった。本研究では、この周期箱熱対流においても、3次元定常解が熱伝導解から亜臨界分岐により生じることを見出した。さらに、この解を高レイリー数まで求めた結果、階層的なマルチスケール構造の発現が確認され、乱流の統計的性質を再現することが明らかとなった。3方向に周期境界条件を有する最も単純な系におけるマルチスケール定常解が得られたことで、熱対流乱流のスケールリング則のみならず、より普遍的な乱流統計法則の解明に繋がると期待できる。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Motoki Shingo, Kawahara Genta, Shimizu Masaki	4. 巻 380
2. 論文標題 Steady thermal convection representing the ultimate scaling	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20210037
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsta.2021.0037	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 Motoki Shingo, Tsugawa Kentaro, Shimizu Masaki, Kawahara Genta	4. 巻 931
2. 論文標題 The ultimate state of turbulent permeable-channel flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R3
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2021.937	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 Motoki Shingo, Kawahara Genta, Shimizu Masaki	4. 巻 914
2. 論文標題 Multi-scale steady solution for Rayleigh-Benard convection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2020.978	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 Kawano Koki, Motoki Shingo, Shimizu Masaki, Kawahara Genta	4. 巻 914
2. 論文標題 Ultimate heat transfer in 'wall-bounded' convective turbulence	5. 発行年 2021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.2020.867	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 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 本木 慎吾, 河原 源太, 清水 雅樹
2. 発表標題 Ultimate heat transfer in coherent thermal convection
3. 学会等名 Caust workshop on causality in turbulence and transition (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本木 慎吾
2. 発表標題 乱流熱伝達における究極状態
3. 学会等名 日本伝熱学会関西支部 第29期第1回講演討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 酒井 智弘, 八尾 洋希, 本木 慎吾, 河原 源太
2. 発表標題 多孔質壁を有する円管内乱流の乱流特性
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 白井 敦, 本木 慎吾, 河原 源太
2. 発表標題 多孔質壁面間熱対流乱流における究極熱伝達
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 車 世那, 本木 慎吾, 河原 源太
2. 発表標題 チャンネル乱流における多孔質フィン導入による非相似的伝熱促進
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 白井 敦, 本木 慎吾, 河原 源太
2. 発表標題 多孔質壁面間熱対流乱流におけるスケーリング則と対流構造に関する実験的研究
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 稲田 健汰, 津川 健太郎, 本木 慎吾, 清水雅樹, 河原源太
2. 発表標題 Ultimate heat transfer in turbulent Poiseuille flow between permeable walls
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本木 慎吾, 川野 晃季, 清水雅樹, 河原源太
2. 発表標題 Ultimate heat transfer in 'wall-bounded' convective turbulence
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小池嶺, 本木慎吾, 清水雅樹, 河原源太
2. 発表標題 チャンネル乱流におけるスパン方向渦構造と運動量・熱輸送間の非相似性
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 2021年

1. 発表者名 藤嶋亮太, 本木慎吾, 河原源太
2. 発表標題 溝を有する壁面チャンネルにおける乱流熱伝達
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 2021年

1. 発表者名 八尾洋希, 酒井智弘, 本木慎吾, 河原源太
2. 発表標題 多孔質壁面を有する円管内流における乱流熱伝達
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 2021年

1. 発表者名 本木 慎吾
2. 発表標題 Multi-scale steady solutions representing classical and ultimate scaling in thermal convection
3. 学会等名 George Batchelor Centenary Fluid Mechanics Webinars Series (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本木 慎吾、河原 源太
2. 発表標題 Ultimate heat transfer in thermal convection between porous walls
3. 学会等名 Transport and Mixing in Complex and Turbulent Flows (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本木 慎吾、河原 源太
2. 発表標題 2次元多孔質壁面間熱対流における究極熱伝達
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 稲田 健太、本木 慎吾、河原 源太
2. 発表標題 多孔質チャネル乱流における非相似的伝熱促進
3. 学会等名 日本機械学会 第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本木 慎吾
2. 発表標題 透過性壁面による乱流制御と伝熱促進
3. 学会等名 大阪大学MMDモデリング部門主催ワークショップ「工学と数学の接点を求めて」
4. 発表年 2020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 水平貫通壁面間熱対流乱流における究極スケーリング
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋 知大, 河原 源太, 清水 雅樹, 本木 慎吾
2. 発表標題 チャネル乱流遷移に現れる局在乱流における熱・運動量輸送の非相似性
3. 学会等名 第56回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本木 慎吾, 川野晃季, 松森圭祐, 河原 源太, 清水 雅樹
2. 発表標題 熱対流乱流における究極スケーリング
3. 学会等名 京大数理解析研究所 R I M S 共同研究 (公開型) 「乱流の基礎的相似則の再検討」
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 Multiscale three-dimensional steady solutions in Rayleigh-Benard convection
3. 学会等名 11th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP11) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋 知大, 河原 源太, 清水 雅樹, 本木 慎吾
2. 発表標題 チャンネル乱流遷移に現れる熱・運動量輸送の非相似性
3. 学会等名 2019年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019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 水平貫通壁面間熱対流乱流における究極熱輸送
3. 学会等名 2019年度日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津川 健太郎, 本木 慎吾, 清水 雅樹, 河原 源太
2. 発表標題 貫通壁チャンネル乱流における究極熱伝達
3. 学会等名 2019年度日本機械学会年次大会
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 水平貫通壁面間熱対流における定常解の構造及び統計的性質
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 稲田 健汰, 本木 慎吾, 清水 雅樹, 河原 源太
2. 発表標題 貫通壁チャンネル乱流における非相似的伝熱促進
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松森 圭祐, 本木 慎吾, 河原 源太
2. 発表標題 周期箱熱対流乱流における究極スケーリング
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019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 水平貫通壁面間熱対流乱流の究極状態
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 パリティ編集委員会、大槻 義彦	4. 発行年 2022年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 204
3. 書名 物理科学, この1年 2022	

〔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
---------	---------