

平成 30 年 6 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25249014

研究課題名(和文) 不変解を用いた高レイノルズ数乱流の解明と制御

研究課題名(英文) Elucidation and control of high-Reynolds-number turbulence using invariant solutions

研究代表者

河原 源太 (Kawahara, Genta)

大阪大学・基礎工学研究科・理事

研究者番号：50214672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,680,000円

研究成果の概要(和文)：平行平板間流についてLES方程式の周期解を計算し、レイノルズ数を約2000まで増加させることに成功した。周期解は同一レイノルズ数における乱流状態の平均速度分布やrms速度分布をよく再現することが明らかとなった。また、周期解には、レイノルズ数の増加とともに、対数型平均速度分布の出現を示唆する振舞いが見られた。周期箱流については、Kidaの高対称性を課した系に対してナビエ・ストークス方程式の周期解を計算し、テイラー長レイノルズ数を約88まで上げることに成功した。レイノルズ数の増加とともに周期解のエネルギー散逸率が一定値に近づき、周期解がコルモゴロフの相似則を満足することが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Periodic solutions to the LES equation have been computed in flow between two parallel plates to succeed in increasing the Reynolds number up to about 2000. The periodic solutions reproduce mean and rms velocities profiles for a turbulent state, suggesting a possibility that the periodic solutions could represent the logarithmic mean velocity profile at higher Reynolds number. Periodic solutions to the Navier-Stokes equation have been computed in triply periodic flow with the Kida high-symmetry to achieve the Taylor-length Reynolds number up to 88. The energy dissipation rate of the periodic solutions approaches a constant value with increasing the Reynolds number, implying the Kolmogorov similarity law.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流

### 1. 研究開始当初の背景

乱流現象の解明と制御は、物理学上の難問解決として高い学術的意義を持つと同時に、エネルギー有効利用、環境アセスメントといった工学的応用とも直結した極めて重要な研究課題である。これまで、乱流に関する研究が国内外を問わず数多くの研究者により精力的に進められてきた。それらの研究の結果、壁乱流や等方乱流の粘性層や散逸領域における縦渦やワーム（渦管）といった秩序構造の存在が明らかにされ、最近では対数層や慣性領域における大規模構造の理解も進んでいる。今後、普遍統計法則（プラントルの壁法則、コルモゴロフの相似則）が発現するこれらの領域での乱流構造の動力学特性を解明できれば、構造に立脚した乱流の統計的性質の理解や制御法の開発が格段に進展するものと期待される。だが、元来不規則性を有する乱流場では、乱流構造の時々刻々の挙動が厳密に繰り返されることはなく、それらの再現性のないカオス的な時間発展中のどの事象が普遍統計法則を発生させるのかを特定することは困難とされてきた。

このような状況の中、研究代表者らは、平面クエット乱流中の秩序構造（縦渦、ストリーク）の自己再生過程を再現する、非圧縮ナビエ・ストークス方程式の不安定周期解を発見した。周期解は平衡解と並んで最も単純な不変解（不変集合）であり、相空間において不変解上に存在する状態点はその上にあり続け、物理空間では同じ事象が厳密に繰り返されることになる。その後、平衡解や周期解といった単純不変解が種々の壁乱流に存在し、それらの不変解が壁乱流の秩序構造に酷似した普遍的空間構造を示すことを明らかになった。これらの不変解は不安定であるが、乱流状態にある状態点は相空間において不変解に頻りに接近することができる。また、矩形ダクト乱流の平均二次流れは秩序構造（縦渦）によって生成され、この種の縦渦を再現する不安定平衡解が存在することを見出した。他方、(定常)等方乱流においても、壁乱流の場合と同様に秩序構造（ワーム）の動力学を再現する不安定周期解を求めることに成功した。

以上の研究成果を総括することにより、低レイノルズ数の壁乱流や等方乱流の単純不変解は、乱流における秩序構造ばかりでなく、粘性層や散逸領域の普遍統計法則をも再現することが判明した。この事実は、『普遍統計法則をごく短時間（1周期、平衡解の場合は1時刻のみ）で再現する単純不変解の時空間構造に着目すれば、それとの比較により、乱流構造の動力学を解明し、乱流において普遍統計法則を発生させる事象を特定できる』ことを意味する。そこで、対数層や慣性領域が現れるに十分な『高レイノルズ数の不変解を用いて、対数層や慣性領域での乱流構造の動力学を解明し、高レイノルズ数乱流の普遍統計法則である対数速度分布や-5/3乗エネルギー

ギースペクトルを発生させる動力学的事象を特定し制御する』という着想を得た。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、『不変解を用いて、対数層や慣性領域での乱流構造の動力学を解明し、高レイノルズ数乱流の普遍統計法則を発生させる事象を特定し制御する』ことである。具体的には、代表的な乱流である平行平板間乱流、(定常)等方乱流に対して、

- (1) 高レイノルズ数の不変解(不安定平衡解, 不安定周期解)の数値計算手法の確立
- (2) 不変解を用いた、対数層あるいは慣性領域における乱流構造の動力学特性の解明
- (3) 対数速度分布あるいは-5/3乗エネルギー・スペクトルを発生させる事象の特定
- (4) 統計法則発現を担う事象の制御による乱流の性質改善(流動抵抗低減, 伝熱・物質混合促進)

の4点を研究の主眼とする。

### 3. 研究の方法

高レイノルズ数の壁乱流や等方乱流に現れる対数層あるいは慣性領域における乱流構造の動力学及び普遍統計法則(対数速度分布、-5/3乗エネルギー・スペクトル)を再現する不変解(不安定平衡解, 不安定周期解)を求めるための数値計算法を確立する。不安定な不変解は単なるナビエ・ストークス方程式の時間積分によって得ることが不可能であり、ナビエ・ストークス方程式から派生した非線形方程式の反復計算により解を求める必要がある。本研究では、高レイノルズ数乱流の空間離散化で生じる大自由度系にも適用可能な反復数値計算法を開発する。本研究グループが開発した平面クエット乱流、矩形ダクト乱流及び等方乱流中の不変解を数値的に求める計算手法を拡張して、高レイノルズ数の平行平板間乱流、円管乱流、矩形ダクト乱流、等方乱流中の不変解を得る数値計算プログラムを作成する。高レイノルズ数での大自由度系に対する非線形解を求めるためには、ニュートン法で通常用いられる大規模線形化方程式に対する直接数値解法に代わり、行列フリーな反復数値解法を適用する必要がある。そこで、本研究では、Viswanathにより提案された行列フリーなニュートン・クリロフ法を適用して本研究グループが開発した計算プログラムを用い、高レイノルズ数における非圧縮ナビエ・ストークス方程式の不変解を求める。以上の数値計算手法では対数層あるいは慣性領域が出現するに十分な高レイノルズ数の不変解が得られない場合に備えて、(静的)スマゴリンスキー・モデルに基づき計算格子以下のスケールをモデル化したナビエ・ストークス方程式(以下LES方程式とよぶ)の不変解も求める。

高レイノルズ数の壁乱流や等方乱流に現れる対数層あるいは慣性領域における乱流構造の動力学及び普遍統計法則をDNS及びラ

ージ・エディ・シミュレーション (LES) により解析する。上述の開発済みプログラムを用いて、平行平板間乱流、円管乱流、矩形ダクト乱流、等方乱流の DNS 及び LES を実施し、乱流構造の時間発展を詳細に調べると同時に、対数速度分布及び  $-5/3$  乗エネルギースペクトルの発現を確認する。

#### 4. 研究成果

平行平板間流についてはレイノルズ数を増加させることが困難であったため、静的スマゴリンスキーモデルを適用した LES 方程式の周期解を計算した。レイノルズ数を増加させることが容易でないため、スマゴリンスキー定数を大きめに設定し、分子粘性を減少させたところ、レイノルズ数を約 2000 まで増加させることに成功した。このレイノルズ数においても、低レイノルズ数の場合と同様に、周期解は同一レイノルズ数における乱流状態の平均速度分布や rms 速度分布をよく再現することが明らかとなった。また、周期解のレイノルズ数依存性を調べることにより、レイノルズ数の増加とともに乱流状態で現れる対数型平均速度分布の出現を示唆する振舞いが見られた。さらに、周期解には乱流に匹敵する極めて複雑な時空間構造が現れ、低速ストリークの壁からの上昇、それに伴う縦渦構造の生成等、乱流の時空間構造をよく表すことが明らかとなった。

一方、周期箱流については、Kida の高対称性を課した系に対してナビエ・ストークス方程式の周期解を計算した。この系での周期解については、これまでの研究によって、5 周期解が同一レイノルズ数の乱流のエネルギースペクトル及びコルモゴロフの相似則を満足することが知られていた。まず、5 周期解のおよそ  $1/5$  の周期を有する 1 周期解に着目しその性質を調べ、テイラー長レイノルズ数を約 88 まで上げることに成功した。1 周期解も 5 周期解と同様に、同一レイノルズ数での乱流のエネルギースペクトルを再現するとともに、レイノルズ数の増加とともにエネルギー散逸率が一定値に近づき、コルモゴロフの相似則を満足することが明らかとなった。この 1 周期解は 1 周期あたり 1 回のエネルギーカスケード事象 (エネルギーの系への注入、高波数域への伝達、エネルギー散逸から成る) が観測されるため、乱流の動力学と乱流統計とを結びつける最も基本的な周期解であるといえる。次に 5 周期解に着目し、その性質を調べた。この系には大規模な渦構造とその周りの小規模な渦構造とが存在し、大規模渦構造が小規模渦構造を巻き付けかつ引き伸ばして増強し、他方巻き付けられた小規模渦が大規模渦をその軸方向に引き伸ばすことにより、互いに強め合い持続することを明らかにした。さらに、定常外力により駆動する周期箱流については、静的スマゴリンスキーモデルを適用した LES 方程式の周期解を計算した。上述の平行平板間流と同様の

アプローチにより、乱流に匹敵する極めて複雑な時空間構造を有する周期解を求めることに成功した。

上記の不変解を用いた平行平板間乱流へのアプローチから得られた運動量・熱輸送機構に関する知見に基づき、多孔質壁面の導入による壁乱流の非相似的伝熱促進 (乱流制御) を試みた。平行平板間のうちの一平板が多孔質壁である場合のチャンネル乱流における熱・運動量輸送を直接数値シミュレーションにより調べ、規格化された平均温度勾配は平均速度勾配より大きくなり、壁面摩擦を抑えながら壁面での伝熱を促進可能であることが明らかとなった。非相似性の程度は、壁面での平均速度勾配と平均温度勾配との差で数パーセントから 10 パーセントである。したがって、摩擦係数とスタントン数との差にも同程度の非相似性が見られることとなる。

#### 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 11 件)

- (1) Lennaert van Veen, Alberto Vela Martin, Genta Kawahara, Tatsuya Yasuda, Periodic orbits in Large Eddy Simulation of Box Turbulence, Fluid Dynamics Research, 2018, 印刷中
- (2) Masaki Shimizu, Takahiro Kanazawa, Genta Kawahara, Exponential growth of lifetime of localized turbulence with its extent in channel flow, Fluid Dynamics Research, 2018, 印刷中
- (3) Shingo Motoki, Genta Kawahara, Masaki Shimizu, Optimal heat transfer enhancement in plane Couette flow, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 835, 2018, 1157-1198  
DOI: 10.1017/jfm.2017.779
- (4) Lennaert van Veen, Alberto Vela-Martin, Genta Kawahara, Towards the computation of time-periodic inertial range dynamics, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1001, 2018, 012018-1-11  
DOI: 10.1088/1742-6596/1001/1/012018
- (5) Susumu Goto, Yuta Saito, Genta Kawahara, Hierarchy of antiparallel vortex tubes in spatially periodic turbulence at high Reynolds numbers, Physical Review Fluids, Vol. 2, 2017, 064603-1-25  
DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.064603
- (6) Eiichi Sasaki, Genta Kawahara, Atsushi Sekimoto, Javier Jimenez, Unstable periodic orbits in plane Couette flow with the Smagorinsky model, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 708,

- 2016, 012003-1-8  
DOI: 10.1088/1742-6596/708/1/012003
- (7) Keisuke Takeishi, Genta Kawahara, Hiroki Wakabayashia, Markus Uhlmann, Alfredo Pinelli, Localized turbulence structures in transitional rectangular-duct flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 782, 2015, 368-379  
DOI: 10.1017/jfm.2015.546
- (8) Susumu Goto, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Turbulent mixing in a precessing sphere, *Physics of Fluids*, Vol. 26, 2014, 115106-1-24  
DOI: 10.1063/1.4901449
- (9) Tatsuya Yasuda, Susumu Goto, Genta Kawahara, Quasi-cyclic evolution of turbulence driven by a steady force in a periodic cube, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 46, 2014, 061413-1-12  
DOI: 10.1088/0169-5983/46/6/061413
- (10) Masaki Shimizu, Paul Manneville, Johann Duguet, Genta Kawahara, Splitting of a turbulent puff in pipe flow, *Fluid Dynamics Research*, Vol. 46, 2014, 061403-1-13  
DOI: 10.1088/0169-5983/46/6/061403
- (11) 加藤健司, 酒井陽, 藤井亮介, 脇本辰郎, 河原源太, 乱流場における運動量と熱輸送の非相似性に及ぼすパン方向渦度の影響, *日本機械学会論文集 B 編*, 79 巻, 2013, 2019-2029  
DOI: doi.org/10.1299/kikaib.79.2019

〔学会発表〕(計 42 件)

- (1) Genta Kawahara, Hierarchical structures and scaling in maximal heat transfer between two parallel plates, *Fundamental Aspects of Geophysical Turbulence III* (招待講演), 2018 年 3 月 19 ~ 2018 年 3 月 21 日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)
- (2) Lennaert van Veen, Genta Kawahara, Alberto Vela-Martin, Tatsuya Yasuda, Towards the computation of time-periodic inertial range dynamics, *The 6th Bremen Winter School and Symposium on Dynamical Systems and Turbulence* (招待講演), 2018 年 3 月 12 日 ~ 2018 年 3 月 16 日, プレーメン(ドイツ)
- (3) 河原源太, 矩形ダクト乱流の二次流れ, *基礎水理シンポジウム 2017 「乱流研究クロスオ - バー: 流体物理学から水理学まで* (招待講演), 2017 年 12 月 6 日, 土木学会講堂(東京都・新宿区)
- (4) Motohiro Miyawaki, Shingo Motoki, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Dissimilarity between momentum and heat transfers in turbulent channel flow at high Reynolds numbers, *The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, 2017 年 10 月 27 日から 2017 年 10 月 30 日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県・宜野湾市)
- (5) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Paul Manneville, Onset of sustained turbulence in plane Couette flow, *The 9th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, 2017 年 10 月 27 日 ~ 2017 年 10 月 30 日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県・宜野湾市)
- (6) Takahiro Kanazawa, Masaki Shimizu, Genta Kawahara, The sustaining mechanism of turbulent bands in plane channel flow, *The 7th International Symposium on Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics*, 2017 年 7 月 11 ~ 2017 年 7 月 14 日, ウッドランズ(アメリカ)
- (7) Shingo Motoki, Genta Kawahara, Masaki Shimizu, Maximal heat transfer between two parallel plates, *The 7th International Symposium on Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics*, 2017 年 7 月 11 日 ~ 2017 年 7 月 14 日, ウッドランズ(アメリカ)
- (8) Genta Kawahara, Periodic solutions representing the origin of turbulent bands in channel flow, *KITP Conference: Recurrence, Self-Organization, and the Dynamics of Turbulence* (招待講演), 2017 年 1 月 9 日 ~ 2017 年 1 月 13 日, サンタバーバラ(アメリカ)
- (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) Eiichi Sasaki, Genta Kawahara, Javier Jimenez, Unstable periodic orbits in LES plane Couette 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)
- (14) 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)
- (15) 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)
- (16) 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)
- (17) Eiichi Sasaki, Genta Kawahara, Javier Jimenez, Bifurcation of unstable periodic orbits in plane Couette flow with the Smagorinsky model, 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)
- (18) 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)
- (19) 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)
- (20) 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)
- (21) 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)
- (22) 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)
- (23) Genta Kawahara, An attempt at theoretical identification of the onset of transient turbulence in wall-bounded shear flows, IST Seminar(招待講演), 2016年5月30日, ウィーン(オーストリア)
- (24) Genta Kawahara, Optimal heat transfer enhancement in plane Couette flow, Extreme events and criticality in fluid mechanics: computations and analysis(招待講演), 2016年1月25日~2015年1月29日, University of Toronto(カナダ)
- (25) Eiichi Sasaki, Genta Kawahara, Bifurcation structure of plane Couette flow with the Smagorinsky model, Extreme events and criticality in fluid mechanics: computations and analysis(招待講演), 2016年1月25日~2015年1月29日, University of Toronto(カナダ)
- (26) 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)
- (27) Genta Kawahara, Dynamical systems approach to subcritical transition to turbulence in plane Couette flow, J. Jimenez's 70th Birthday Conference on Turbulence and Supercomputing(招待講演), 2015年9月3日~2015年9月4日, Parador de Turismo de Salamanca(スペイン)
- (28) 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)
- (29) 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・札幌市)
- (30) 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)
- (31) Masaki Shimizu, Genta Kawahara, Julius Rhoan Lestro, 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)
- (32) Genta Kawahara, The onset of transient turbulence in wall-bounded shear flow, International Symposium on Engineering Science (招待講演), 2015年5月19日~2015年5月20日, シンガポール国立大学(シンガポール)
- (33) Genta Kawahara, The onset of thermal convection in plane Couette turbulence, France-Japan Workshop on Subcritical Transition to Turbulence, 2015年3月2日~2015年3月3日, ESPCI (フランス)
- (34) 河原源太, 乱流現象への力学系アプローチ, 研究集会「非線形現象の数理」-流体力学・地球流体力学・気象学・ウェーブレット解析・力学系-(招待講演), 2014年12月26日~2014年12月27日, 休暇村紀州加太(和歌山県・和歌山市)
- (35) Genta Kawahara, Localized turbulence structure in transitional rectangular-duct flow, France-Japan Workshop on Transition to Turbulence, 2014年11月11日~2014年11月12日, 大阪大学(大阪府・豊中市)
- (36) 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)
- (37) Genta Kawahara, Julius R. Lestro, 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)
- (38) 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)
- (39) 河原源太, L. van Veen, J. R. Lestro, 平板間クエット流のホモクリニック軌道と過渡的乱れの発生, 西日本乱流研究会創立30周年シンポジウム(招待講演), 2013年10月13日, 山口大学(山口県・山口市)
- (40) 河原源太, 平面クエット流における間欠性乱れとホモクリニック軌道, 数学協働プログラム地球流体现象の疎構造(招待講演), 2014年3月13日, 京都大学(京都府・京都市)
- (41) Genta Kawahara, The onset of transient turbulence in minimal plane Couette flow, 10th ERCOFTAC SIG33 Workshop on Progress in Transition Modeling and Control, 2013年5月30日, Sandhamn (スウェーデン)
- (42) Genta Kawahara, Exploration into global phase-space structures in minimal plane Couette flow, NORDITA Program on Stability and Transition(招待講演), 2013年5月27日, Nordic Institute for Theoretical Physics (スウェーデン)

〔図書〕(計2件)

- (1) 河原源太, サイエンス社 数理科学 2015, 84頁(担当頁14-19)
- (2) 河原源太, 朝倉書店, 事例で学ぶ数学活用法, 2015, 291頁(担当頁55-64)

〔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

河原 源太 (KAWAHARA Genta)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 50214672

### (2) 研究分担者

後藤 晋 (GOTO Susumu)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・教授  
研究者番号: 40321616

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

佐々木 英一 (SASAKI Eiichi)  
秋田大学・大学院理工学研究科・特任助教  
研究者番号: 60710811