

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 3 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360079

研究課題名（和文） 非線形進行波解に基づく矩形ダクト乱流二次流れの解明と制御

研究課題名（英文） Elucidation and control of turbulence-driven secondary flow in a rectangular duct using nonlinear traveling-wave solutions

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、ニュートン法によるプログラムを用いて、正方形ダクトにおける非線形定常進行波解の解析を行った。乱流二次流れと同様の 8 つの渦を有するパターンをもつ定常進行波解を求めることに成功した。この解の流れ方向平均された速度場は、乱流二次流れの時間及び流れ方向平均された平均二次流れの速度と同程度の強さを持ち、低レイノルズ数域（ $Re=1400-2500$ ）での乱流二次流れの性質を定性的にも、定量的にも再現できていることがわかった。さらに、矩形ダクト流における非線形定常進行波解の解析も行った。正方形ダクトにおける乱流二次流れと同様の 8 つの渦を有するパターンをもつ定常進行波解を、ダクト断面のアスペクト比を変化させながら追跡した。レイノルズ数が 1200 の場合には、8 つの渦を有する定常進行波は、2.4 より小さいアスペクト比に対してのみ存在することが明らかとなった。アスペクト比が大きくなると、定常進行波に見られる渦構造はスパン中央に局在化することが判明した。また、高レイノルズ数域（ $Re=3500, 5480$ ）で正方形ダクト乱流の直接数値シミュレーションを行い、平均二次流れと関連性が示唆されるダクト横断面での大規模循環流を、クレプシュポテンシャルを導入することにより同定し、大小様々なスケールを有する大規模循環流が平均二次流れを生成することを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this study, numerical computation of nonlinear traveling-wave solutions has been performed using a Newton method in a square duct. We have succeeded in obtaining the steady traveling-wave solution exhibiting an eight-vortex pattern similar to the turbulence-driven mean secondary flow. The streamwise-averaged velocity field of this traveling wave has a comparable intensity of the time- and streamwise-averaged turbulent velocity field, and in low-Reynolds-number range,  $Re=1400-2500$ , the traveling wave reproduces not only qualitative but also quantitative properties of turbulence-driven mean secondary flow. We have also worked on numerical computation of nonlinear-traveling waves in a rectangular duct. The eight-vortex traveling wave found in a square duct has been tracked with changing an aspect ratio of a duct cross-section. It has been found that at  $Re=1200$ , the eight-vortex traveling wave exists only for the aspect ratio smaller than 2.4. It has also been observed that when the aspect ratio is increased from unity, vertical structures in the traveling wave are localized around the bisector of the duct wall of wider span. Direct numerical simulations of turbulent square-duct flow have been performed at higher Reynolds numbers,  $Re=3500, 5480$ , to identify large-scale streamwise rolls by using the Clebsch potential for cross-stream turbulence motion. It has been suggested that the large-scale rolls of a variety of cross-stream length scales play a significant role in the generation of the mean secondary flow in high-Reynolds-number turbulence.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	12,500,000	3,750,000	16,250,000

2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：流体工学，乱流

キーワード：乱流，壁乱流，矩形ダクト，定常進行波解，二次流れ，乱流遷移，乱流パフ，乱流斑点

### 1. 研究開始当初の背景

乱流に関わる代表的難問のひとつにプラントルの第二種二次流れの問題がある。矩形ダクトなどの非円形断面流路の乱流では、たとえ直線流路であっても主流垂直方向平均流（プラントルの第二種二次流れ）が発生する。この特異な乱流二次流れは、主流速度の数%程度の速度しか持たないが、流路内の運動量・熱・物質輸送に重大な影響を及ぼす。そのため、乱流二次流れの生成メカニズムの解明と制御は、熱流体工学上きわめて重要な研究課題となっている。この問題は、80年以上の長い歴史を持ち、これまで国内外を問わず数多くの研究がなされてきた。しかし、それらのほとんどは主流方向平均渦度方程式など、乱流の平均場方程式に基づく議論に終始している。すなわち、従来の研究では、二次流れを伴う乱流状態での平均場方程式において、どの項が最も二次流れの維持に寄与するかが明らかにされているが、二次流れの存在しない（層流）状態から、いかにして二次流れが生成されるかという根本的な問いに対する解答が得られていない。

そこで、研究代表者らは、正方形ダクト乱流を取り上げ、その乱流構造及び二次流れに関する研究を進めてきた。まず、正方形ダクト乱流の擬スペクトル法による直接数値シミュレーションを実現し、低レイノルズ数では、側壁による拘束を受けた壁近傍秩序構造（縦渦）がダクト断面の特定の位置に現れることによって二次流れが発生することを明らかにした。また、シミュレーションの妥当性を実験データにより検証するとともに、高レイノルズ数においては、側壁による拘束を受けて定在する乱流中の大規模構造（循環流）が二次流れを生成することを明らかにした。さらに、正方形ダクト系における非圧縮ナビエ・ストークス方程式の非線形定常進行波解を求めることに成功し、この解が大規模乱流構造を再現すると同時に、その流れ方向平均速度場が乱流二次流れときわめてよく一致することを示した。以上の結果から、研究代表者らは、『乱流二次流れを大規模構造として捉え、大規模構造を記述する非線形進

行波解に基づいて乱流二次流れの生成メカニズムを解明し制御する』という着想を得た。

### 2. 研究の目的

本研究では、『矩形ダクトの乱流二次流れを大規模構造として捉え、大規模構造を非圧縮ナビエ・ストークス方程式の非線形（定常、周期）進行波解によって記述することで、乱流二次流れの生成メカニズムを解明し制御する』ことを目的とした。具体的には、主に

- (1) 乱流二次流れの特性（循環流の寸法や速度に関するスケーリング則）を把握する
- (2) 乱流二次流れの特性を記述する進行波解を用いて、二次流れの生成メカニズムを解明する

の2点を研究の主眼とした。

### 3. 研究の方法

本研究では、当該分野での研究業績及び豊富な共同研究実績を持つ研究協力者5名（海外共同研究者4名，日本学術振興会特別研究員1名），大学院生4名，研究代表者の計10名の体制で研究を実施した。矩形ダクト乱流に対する二次元LDV（レーザドップラ流速計）を用いた実験計測及び擬スペクトル法による直接数値シミュレーションにより二次流れのスケーリング則を明らかにし、またニュートンGMRES法により求めた矩形ダクト系の非線形進行波解を用いて二次流れの生成メカニズムを解明し、さらにダクト乱流及び定常進行波解のアスペクト比依存性を直接数値シミュレーション及びニュートン法により調べる。

### 4. 研究成果

正方形ダクト流については、既に開発済みのニュートン法によるプログラムを用いて、非線形定常進行波解の解析を進めた。その結果、乱流二次流れと同様の8つの渦を有するパターンをもつ定常進行波解を求めることに成功した。この解の流れ方向平均された速度場は、乱流二次流れの時間及び流れ方向平均された平均二次流れの速度と同程度の強

さを持ち、低レイノルズ数域 ( $Re=1400-2500$ ) での乱流二次流れの性質を定性的にも、定量的にも再現できていることがわかった。また、高レイノルズ数域 ( $Re=3500$ ) で乱流の直接数値シミュレーションを行うことにより、乱流二次流れと関連性が示唆される大規模ストリークのダクト断面内での存在分布を調べ、ストリークがダクトの特定の位置に存在しやすいことを示した。

矩形ダクト乱流については、様々なアスペクト比に対して乱流遷移域での乱流の直接数値シミュレーションを行い、臨界レイノルズ数や乱流パフ、乱流斑点といった局在構造がアスペクト比の影響を大きく受けることを明らかにした。レイノルズ数については、正方形ダクトでは比較的高い遷移レイノルズ数となるが、アスペクト比の増加とともにレイノルズ数は減少し、アスペクト比が4程度において二次元チャンネル（アスペクト比無限大）の遷移レイノルズ数と同程度となる。一方、乱流構造については、正方形ダクトでは乱流パフが現れるが、アスペクト比が4を超えると乱流斑点が現れ、乱れは流路スパン方向にも局在し始める。

その後、既に開発済みのニュートン法によるプログラムを用いて、矩形ダクト流における非線形定常進行波解の解析を進めた。平成22年度に求めた正方形ダクトにおける乱流二次流れと同様の8つの渦を有するパターンをもつ定常進行波解を、ダクト断面のアスペクト比を変化させながら追跡した。その結果、レイノルズ数が1200の場合には、8つの渦を有する定常進行波は、2.4より小さいアスペクト比に対してのみ存在することが明らかとなった。アスペクト比が大きくなると、定常進行波に見られる渦構造はスパン中央に局在化することが判明した。また、高レイノルズ数域 ( $Re=5480$ ) で正方形ダクト乱流の直接数値シミュレーションを行い、平均二次流れと関連性が示唆されるダクト横断面での大規模循環流を、クレプシュポテンシャルを導入することにより同定し、大小様々なスケールを有する大規模循環流が平均二次流れを生成することを明らかにした。さらに、様々なアスペクト比に対して乱流遷移域での乱流の直接数値シミュレーションを行い、アスペクト比が4を超えると乱れは、乱流パフといわれる流れ方向のみに局在した状態から、流れ方向だけでなくスパン方向にも局在する、いわゆる乱流斑点の状態に移行することが明らかとなったが、このスパン方向の乱れの局在化は、上述の定常進行波の渦構造の局在化と関連性を有す得るものと考えられる。

以上の理論、シミュレーションに加え、アスペクト比3の矩形ダクトの実験装置を設計製作し、LDVによる流速計測及び可視化の

実験を行った。その結果、アスペクト比3の矩形ダクトの乱流遷移がシミュレーションとほぼ同一のレイノルズ数で生じることが確認され、上記シミュレーションの妥当性が検証された。

#### 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6件)

- (1) G. Kawahara, Numerical computation of unstable periodic solutions to a system of equations of fluid motion, American Mathematical Society Sugaku Expositions, 査読有, Vol. 25, 2012, 177-188.
- (2) G. Kawahara, M. Uhlmann, L. van Veen, The significance of simple invariant solutions in turbulent flows, Annual Review of Fluid Mechanics, 査読有, Vol. 44, 2012, 203-225.
- (3) L. van Veen, G. Kawahara, Homoclinic tangle on the edge of shear turbulence, Physical Review Letters, 査読有, Vol. 17, 2011, 114501.
- (4) A. Sekimoto, G. Kawahara, K. Sekiyama, M. Uhlmann, A. Pinelli, Turbulence- and buoyancy-driven secondary flow in a horizontal square duct heated from below, Physics of Fluids, 査読有, Vol. 23, 2011, 075103.
- (5) L. van Veen, G. Kawahara, A. Matsumura, On matrix-free computation of 2D unstable manifolds, SIAM Journal on Scientific Computing, 査読有, Vol. 33, 2011, 25-44.
- (6) M. Uhlmann, G. Kawahara, A. Pinelli, Traveling-waves consistent with turbulence-driven secondary flow in a square duct, Physics of Fluids, 査読有, Vol. 22, 2010, 084102.

[学会発表] (計52件)

- (1) M. Shimizu, P. Manneville, Y. Duguet, G. Kawahara, The splitting of a turbulent puff in pipe flow, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, 2013年3月13日, 九州大学(福岡県).
- (2) T. Yasuda, G. Kawahara, S. Goto, Large-eddy simulation of hyperbolic stagnation-point flow, IUTAM Symposium on Vortex Dynamics: Formation, Structure and Function, 2013年3月13日, 九州大学(福岡県).
- (3) G. Kawahara, The onset Reynolds

- number of transient turbulence in minimal plane Couette flow, Turbulence Seminar Imperial College (招待講演), 2013年3月4日, Imperial College London (イギリス) .
- (4) G. Kawahara, Characterization of transient plane Couette turbulence in terms of homoclinic tangle, LIMSI-CNRS Seminar (招待講演), 2013年2月27日, LIMSI-CNRS (フランス) .
- (5) 河原源太, 中辻竜也, 清水雅樹, M. Uhlmann, A. Pinelli, 正方形ダクト乱流の大規模循環流と平均二次流れ, 2013年1月11日, 京都大学(京都府) .
- (6) 後藤晋, 河原源太, 安田達哉, 乱流中の多重スケール秩序構造の生成過程, 京都大学数理解析研究所研究集会「多重物理・多重スケール乱流現象の数理」, 2013年1月10日, 京都大学(京都府) .
- (7) 大槻起之, 河原源太, M. Uhlmann, A. Pinelli, 安定温度成層下における水平正方形ダクトの乱流パフ, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月18日, 同志社大学(京都府) .
- (8) 後藤晋, 安田達哉, 河原源太, 定常外力に駆動される一様乱流中の秩序構造, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月18日, 同志社大学(京都府) .
- (9) 山登将宏, 後藤晋, 堀本康文, 河原源太, 歳差運動する球体容器内に維持される界面活性剤水溶液の乱流, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月17日, 同志社大学(京都府) .
- (10) 清水雅樹, P. Manneville, Y. Duguet, 河原源太, 円管内乱流パフの分裂, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月17日, 同志社大学(京都府) .
- (11) 武石恵介, 大西健之, 河原源太, M. Uhlmann, 矩形ダクト流における局在乱れ構造, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月17日, 同志社大学(京都府) .
- (12) 安田達哉, 河原源太, 後藤晋, 双曲型淀み点流に生じる発達した乱流のLES, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月17日, 同志社大学(京都府) .
- (13) G. Kawahara, Exploration into an unstable periodic orbit in large-eddy simulation of plane Couette flow, Departamento de Motopropulsion y Termofluidodinamica Seminario (招待講演), 2012年10月2日, Universidad Politecnica de Madrid (スペイン) .
- (14) M. Shimizu, P. Manneville, Y. Duguet, G. Kawahara, The splitting of a turbulent puff in pipe flow, JSST 2012 International Conference on Simulation Technology, 2012年9月28日, 神戸大学(兵庫県) .
- (15) K. Takeishi, G. Kawahara, M. Uhlmann, A. Pinelli, S. Goto, Puff-spot transition in rectangular-duct flow, JSST 2012 International Conference on Simulation Technology, 2012年9月28日, 神戸大学(兵庫県) .
- (16) Y. Koike, M. Shimizu, S. Kida, G. Kawahara, S. Goto, Continuous spin-up and dynamo in a precessing sphere, JSST 2012 International Conference on Simulation Technology, 2012年9月28日, 神戸大学(兵庫県) .
- (17) T. Otsuki, G. Kawahara, M. Uhlmann, A. Pinelli, Turbulent puffs in a horizontal square duct under stable temperature stratification, 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2012年9月24日, University of Palermo (イタリア) .
- (18) S. Goto, G. Kawahara, T. Yasuda, Coherent structures in homogeneous turbulence sustained by steady force, 9th International Conference on Flow Dynamics, 2012年9月21日, ホテルメトロポリタン仙台(宮城県) .
- (19) L. van Veen, G. Kawahara, Global bifurcations and the onset of turbulence in shear flows, 9th International Conference on Flow Dynamics, 2012年9月21日, ホテルメトロポリタン仙台(宮城県) .
- (20) 清水雅樹, P. Manneville, Y. Duguet, 河原源太, 円管内乱流パフの分裂, 日本流体力学会年会2012, 2012年9月18日, 高知大学(高知県) .
- (21) 河原源太, 中辻竜也, 清水雅樹, M. Uhlmann, A. Pinelli, 正方形ダクト乱流の大規模構造と二次流れ, 日本流体力学会年会2012, 2012年9月17日, 高知大学(高知県) .
- (22) 河原源太, 矩形ダクト乱流への実験および数値シミュレーションによるアプローチ, 日本機械学会2012年度年次大会(招待講演), 2012年9月12日, 金沢大学(石川県) .
- (23) 加藤健司, 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スパン方向渦度の影響, 日本機械学会2012年度年次大会, 2012年9月10日, 金沢大学(石川県) .
- (24) 河原源太, 中辻竜也, 清水雅樹, M. Uhlmann, A. Pinelli, 正方形ダクトにおける乱流構造と二次流れ, 日本機械学会

- 2012 年度年次大会, 2012 年 9 月 10 日, 金沢大学 (石川県) .
- (25) G. Kawahara, L. van Veen, The appearance of homoclinic tangle in plane Couette flow, ICTAM 2012, 2012 年 8 月 23 日, 北京国家会議センター (中国) .
- (26) 安田達哉, 河原源太, 木田重雄, L. van Veen, 清水雅樹, 等方乱流の統計的性質を再現する周期運動の動力学とエネルギー伝達, 日本機械学会関西支部第 87 期定時総会講演会, 2012 年 3 月 17 日, 関西大学 (大阪府) .
- (27) G. Kawahara, Turbulence structures in rectangular-duct flow, Lathyx Seminar (招待講演), 2012 年 3 月 1 日, Ecole Polytechnique (フランス) .
- (28) 河原源太, 若林弘輝, 武石恵介, M. Uhlmann, 矩形ダクトにおける空間局在乱流構造, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「乱流の普遍性と個別性: 流体乱流を通して宇宙を見る」, 2012 年 1 月 13 日, 京都大学 (京都府) .
- (29) 中辻竜也, 河原源太, 清水雅樹, M. Uhlmann, A. Pinelli, 正方形ダクト流における大規模乱流構造の同定と解析, 第 25 回数値流体力学シンポジウム, 2011 年 12 月 20 日, 大阪大学 (大阪府) .
- (30) 河原源太, 乱流および乱流遷移現象に対する力学系のアプローチ, RIMS 共同研究「偏微分方程式の背後にある確率過程と解の族が示す統計力学的な現象の解析」(招待講演), 2011 年 12 月 20 日, 京都大学 (京都府) .
- (31) G. Kawahara, Turbulence structures in rectangular-duct flow at low Reynolds numbers, Departamento de Motopropulsion y Termofluidodinamica Seminario (招待講演), 2011 年 10 月 5 日, Universidad Politecnica de Madrid (スペイン) .
- (32) G. Kawahara, Coherent structures and secondary flow in square-duct turbulence, Turbulence Colloquium Marseille 2011 (招待講演), 2011 年 9 月 27 日, Centre International de Rencontres Mathematiques (フランス) .
- (33) 河原源太, L. van Veen, ミニマル平面クエット流におけるホモクリニック軌道, 日本機械学会 2011 年度年次大会, 2011 年 9 月 13 日, 東京工業大学 (東京都) .
- (34) 安田達哉, 河原源太, 木田重雄, L. van Veen, 等方乱流の統計的性質を再現する周期運動の動力学, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 8 日, 首都大学東京 (東京都) .
- (35) 河原源太, L. van Veen, 平面クエット流におけるホモクリニック軌道とバースト, 日本流体力学会年会 2011, 2011 年 9 月 7 日, 首都大学東京 (東京都) .
- (36) G. Kawahara, Structures of low-Reynolds-number turbulence in a rectangular duct, Geophysical Fluid Dynamics Program (招待講演), 2011 年 6 月 27 日, Woods Hole Oceanographic Institution (アメリカ) .
- (37) L. van Veen, G. Kawahara, A homoclinic tangle on the edge of Couette turbulence, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (招待講演), 2011 年 5 月 25 日, Snowbird Ski and Summer Resort (アメリカ) .
- (38) G. Kawahara, H. Wakabayashi, M. Uhlmann, A. Pinelli, Spatially localized turbulence structures in transitional rectangular-duct flow, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (招待講演), 2011 年 5 月 25 日, Snowbird Ski and Summer Resort (アメリカ) .
- (39) 中辻竜也, 大槻尅之, 河原源太, 不安定温度成層下における矩形ダクト乱流の長周期変動, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 20 日, 京都工芸繊維大学 (京都府) .
- (40) 大槻尅之, 関山和英, 清水雅樹, 河原源太, 安定温度成層下における正方形ダクトの乱流パフ, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 20 日, 京都工芸繊維大学 (京都府) .
- (41) 清水雅樹, 若林弘輝, 河原源太, M. Uhlmann, 乱流パフの普遍性について, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 19 日, 京都工芸繊維大学 (京都府) .
- (42) 若林弘輝, 関本敦, 清水雅樹, M. Uhlmann, 河原源太, 矩形ダクトにおける空間局在乱流構造, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 19 日, 京都工芸繊維大学 (京都府) .
- (43) 鶴田真裕, 河原源太, 森学, 周期運動の安定化による平面クエット乱流の抵抗低減, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 2011 年 3 月 19 日, 京都工芸繊維大学 (京都府) .
- (44) 河原源太, 関本敦, Uhlmann, A. Pinelli, 正方形ダクト乱流の二次流れ, 京都大学数理解析研究所共同研究集会, 2011 年 1 月 14 日, 京都大学 (京都府) .
- (45) G. Kawahara, An introduction to the problem of fluid turbulence, UOIT Modelling and Computational Science Seminar (招待講演), 2010 年 9 月 28

- 日, University of Ontario Institute of Technology (カナダ) .
- (46) G. Kawahara, Secondary flow in isothermal and thermal square-duct turbulence, Applied and Interdisciplinary Mathematics Seminar (招待講演), 2010年9月24日, University of Michigan (アメリカ) .
- (47) 鶴田真裕, 河原源太, 森学, 周期運動の安定化による低レイノルズ数平面クエット乱流の抵抗低減, 日本流体力学学会講演会 2010, 2010年9月10日, 北海道大学 (北海道) .
- (48) 河原源太, 関本敦, 関山和英, M. Uhlmann, A. Pinelli, 加熱水平正方形ダクトの乱流・浮力駆動二次流れ, 日本流体力学学会講演会 2010, 2010年9月9日, 北海道大学 (北海道) .
- (49) 河原源太, 関本敦, M. Uhlmann, A. Pinelli, 水平正方形ダクトにおける乱流・浮力駆動二次流れ, 日本機械学会 2010年度年次大会講演会, 2010年9月6日, 名古屋工業大学 (愛知県) .
- (50) 池戸隆人, 河原源太, 藤定義, 水平平板間乱流における乱れ構造への浮力の影響 - レイノルズ数依存性, 日本機械学会 2010年度年次大会講演会, 2010年9月6日, 名古屋工業大学 (愛知県) .
- (51) 若林弘輝, 関本敦, 河原源太, M. Uhlmann, A. Pinelli, 矩形ダクト流における乱流パフと乱流斑点 - ダクト断面縦横比の影響, 第59回理論応用力学講演会, 2010年6月9日, 日本学術会議 (東京都) .
- (52) 河原源太, 松村篤, L. van Veen, 平面クエット流における静穏周期軌道の不安定多様体と乱流遷移, 第59回理論応用力学講演会, 2010年6月8日, 日本学術会議 (東京都) .

[図書] (計2件)

- (1) J. Jimenez, G. Kawahara, Cambridge University Press, Ten Chapters in Turbulence (Chapter 6 Dynamics of Wall-Bounded Turbulence), 2012, 437 (担当ページ 221-268) .
- (2) 柳瀬眞一郎, 百武徹, 河原源太, 渡辺毅, 森北出版, 乱流のシミュレーション, 2010, 232 (担当ページ 77-103) .

[その他]

ホームページ等

<http://www-thermomech.me.es.osaka-u.ac.jp/index.html>

## 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