

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656138

研究課題名(和文)多孔質壁面を用いた非相似的な乱流伝熱促進

研究課題名(英文)Dissimilar heat transfer enhancement in porous channel turbulence

研究代表者

河原 源太(Kawahara, Genta)

大阪大学・基礎工学研究科・教授

研究者番号：50214672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：壁面の多孔率が小さい場合には、運動量と熱の乱流輸送の程度を示す摩擦係数とスタントン数に通常壁面との顕著な違いが見られず、非相似性も認められない。しかし、多孔率が大きくなると、非貫通壁に比べ、著しい輸送現象の促進がなされることが明らかになった。さらに、スタントン数の増加の方が摩擦係数のそれより優勢であることが確認され、摩擦を抑制しつつ熱流束を大きくする、いわゆる非相似的な伝熱促進が多孔質壁面の導入により実現されることが明らかとなった。また、このような運動量と熱の輸送の非相似性が、多孔質壁面の導入により出現する、スパン方向に回転軸をもつ大規模渦構造によってもたらされることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In case of small porosity on the wall, no significant difference has been observed in a skin friction coefficient or the Stanton number in comparison to an impermeable wall. For large wall porosity, however, turbulent heat and momentum transfer is found to be remarkably enhanced by the introduction of the porous wall. Weak but non-negligible dissimilarity, i.e., the higher Stanton number and the lower skin friction coefficient, is observed between heat and momentum transfer. The physical mechanism of this dissimilarity is interpreted in terms of the relevance of the large-scale spanwise rolls with their induced turbulent heat flux and Reynolds stress.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流 多孔質伝熱面 伝熱促進 非相似性

### 1. 研究開始当初の背景

周知のように、熱と運動量の乱流輸送には強い相似性が存在し、熱輸送の促進は運動量輸送促進をもたらす、伝熱性能向上の代償としてエネルギー損失が増大することになる。もし運動量と熱の輸送の間に非相似性を発現させることができれば、流動抵抗(エネルギー損失)を低減すると同時に伝熱を促進するといった、従来の常識を覆す画期的な乱流制御が実現できる。したがって、これまでにこの種の非相似性に関する研究が国内外を問わず精力的に行われてきたが、非相似性の発現メカニズム及びそれに基づく乱流制御の指針は未だに明らかにされていない。

このような状況の中、研究連携者である加藤教授は、壁面乱流に対する運動量と熱の輸送方程式のラグランジュ表現を比較することで、双方の輸送現象の相違、すなわち非相似性を発生させる主因が、壁垂直方向速度と圧力変動の流れ方向勾配との相関であることを明らかにした。さらに、この非相似性をもたらす乱流構造として、スパン方向の回転軸を持つ横渦が重要であることを示し、横渦を生成する仮想的な体積力を乱流に印加することにより、流動抵抗を乱流状態の約 0.9 倍に低減しつつ、壁面熱伝達率をその 2 倍に増加させることに成功した。一方、研究代表者らは、壁乱流に多孔質壁を導入することで、スパン方向の高い一様性を有する横渦構造を発生させ、乱流輸送を促進できることを明らかにした。以上の研究成果から、横渦構造を生成する多孔質壁面を導入することで、壁乱流に強い非相似性を発現させ、エネルギー損失を低く抑えた伝熱促進を実現できるという従来にない新しい着想を得た。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、多孔質壁面の導入により横渦を生成することで、壁乱流に強い非相似性を発現させ、エネルギー損失を低く抑えた高効率伝熱促進を実現することである。具体的には、

- (1) 多孔質壁面乱流における運動量・熱輸送の非相似性の発現メカニズムを解明する
- (2) 最も効率的な非相似性を発現する多孔質壁を決定し、それを用いて伝熱促進を実現する

の 2 点を研究の主眼とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 直接数値シミュレーション

本研究では、平行平板間チャンネルにおいて、一方あるいは両方の平板が多孔質壁である場合の乱流を対象とする。多孔質壁面のチャンネル外側は一定圧力のチャンバーで覆われている。この場合、通常壁面での粘性流体に対する境界条件(滑りなし・非貫通)は成立せず、壁面に沿う方向には通常壁面と同様に流体は壁面との相対速度を持たない(滑りな

し)が、壁面垂直方向には壁面を貫通する速度が現れる。ここでは、多孔質内流れがダルシー則を満足するものと仮定し、多孔質壁面上で壁面垂直方向速度成分  $v$  と圧力変動  $p'$  の間に  $v = -\rho'$  なる関係 ( $\rho'$  は正定数) が成り立つものとする。多孔質壁面及び通常壁面はそれぞれ一定温度に保たれている。

本研究では、流量及び内部発熱量をいずれも一定に保ったチャンネル乱流における運動量と熱の輸送を考える。運動量と熱の輸送が可能な限り相似となるよう、プラントル数を 1 とし、平均流速  $u_b$  とチャンネル半幅に基づくレイノルズ数を約 3000 に設定する。

以上の多孔質壁面乱流における運動量と熱の輸送現象を直接数値シミュレーションにより解析する。空間の離散化では、流れ方向とスパン方向にフーリエ級数展開を用い、壁垂直方向には選点を自由にとれる 4 次の B スプラインを用いる。非圧縮ナビエ・ストークス方程式及びエネルギー方程式(温度の移流・拡散方程式)の時間積分では、移流項に三段陽的ルンゲ・クッタ法を適用し、粘性項(拡散項)には陰的オイラー法を用いる。本研究で用いる数値シミュレーションプログラムは、これまで実行実績のある多孔質壁面チャンネル乱流に対するプログラムに、パンプスカラーの移流・拡散を新たに組み込んだもので、シリアル版、並列版のいずれも使用可能である。数値シミュレーションは、九州大学情報基盤研究開発センターにおいて実施された。

#### (2) 非相似性の解析

上述の直接数値シミュレーションの結果に基づいて、運動量と熱の乱流輸送における非相似性を解析する。まず、乱流中に現れる渦構造の特性について調べる。多孔質壁面を導入することによって壁付近の渦構造が大きく変化することを確認する。具体的には、通常壁面の場合に支配的な縦渦構造が消滅し、スパン方向の高い一様性を持つ横渦構造が発生することを示す。次に、この横渦構造の、運動量・熱輸送の非相似性発現への寄与を定量的に明らかにする。各瞬間の乱流場において、非相似性の発現に決定的な寄与をなす壁垂直方向速度と圧力変動の流れ方向勾配との積の空間分布と横渦構造との対応関係を調べ、両者が強い相関を持つことを定量的に示す。

### 4. 研究成果

#### (1) 多孔質壁モデルの検証

上記の極めて簡単な多孔質壁上の境界条件が妥当であるかを検証した。多孔質内部の流動も含めてチャンネル乱流の直接数値シミュレーションを行った Breigem, Boresma, Uittenbogaard の結果と本研究の結果を比較したところ、多孔率が 0.8、空隙間隔とチャンネル半幅との比が 0.00027 の多孔質壁面上の乱流の平均速度及び乱れ速度が、 $u_b=0.69$  とした境界条件によって良好に再現できる

ことが明らかとなった。また、多孔率が 0.6、空隙間隔とチャンネル半幅との比が 0.00087 の上とは異なる多孔質壁面も、 $u_b=0.56$  とすることで再現できることが分かった。

#### (2)非相似性の発現

$u_b=0$  (非貫通), 0.56, 0.70, 0.93 とした, 一方あるいは両方の壁面が多孔質の場合に, 運動量と熱の乱流輸送の程度を示す摩擦係数  $C_f$  とスタントン数  $St$  を調べたところ,  $u_b=0.56$  では非貫通の場合に比べ  $C_f, St$  ともに顕著な違いが見られず, 非相似性も認められなかった。しかし,  $u_b=0.70$  において非貫通壁との違いが現われ,  $u_b=0.93$  では, 一方の壁面が多孔質の場合には  $C_f, St$  ともに非貫通壁の場合の約 2 倍となり, 両方の壁面が多孔質の場合には約 4 倍になり, 著しい輸送現象の促進がなされることが明らかになった。さらに,  $u_b=0.93$  では,  $(St - C_f) / St$  が 0.06 から 0.07 の値をとることが確認され, 摩擦を抑制しつつ熱流束を大きくする, いわゆる非相似的な伝熱促進が多孔質壁面の導入により実現されていることが実証された。

#### (3)非相似性発現のメカニズム

Hasegawa, Kasagi の研究により,  $C_f, St$  への乱流に由来する寄与は, 壁垂直方向座標  $y$  と, それぞれレイノルズ応力, 乱流熱流束との積の  $y$  による積分で表されることが示されている。そこで, 瞬時の流れ方向速度揺らぎと壁垂直方向速度揺らぎとの積 (レイノルズ応力に相当), 及び瞬時の温度揺らぎと壁垂直方向速度揺らぎとの積 (乱流熱流束に相当) のスパン方向平均の空間分布と乱流構造との関係を多数の時刻において調べた。その結果, 非相似性が見られ始める  $u_b=0.70$  において, スパン方向の高い一様性を有する横渦構造が出現することが確認された。 $u_b=0.93$  では, より顕著なスパン方向渦が認められた。これらの渦の上流側の壁付近では, 温度揺らぎと壁垂直方向速度揺らぎとの積のスパン方向平均が, 流れ方向速度揺らぎと壁垂直方向速度揺らぎとの積のスパン方向平均より卓越することが明らかとなり, 横渦の出現によって非相似的な伝熱促進が実現されることが立証された。

#### 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 8 件)

M. Shimizu, P. Manneville, Y. Duguet, G. Kawahara, Splitting of a turbulent puff in pipe flow, Fluid Dynamics Research, 査読有, 46, 2014, 掲載予定  
T. Yasuda, S. Goto, G. Kawahara, Quasi-cyclic evolution of turbulence driven by a steady force in a periodic cube, Fluid Dynamics Research, 査読有, 46, 2014, 掲載予定  
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スパン方向渦度の影響, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 79, 2013, 2019-2029

DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/kikaib.79.2019>

G. Kawahara, Numerical computation of unstable periodic solutions to a system of equations of fluid motion, American Mathematical Society Sugaku Expositions, 査読有, 25, 2012, 177-188

G. Kawahara, M. Uhlmann, L. van Veen, The significance of simple invariant solutions in turbulent flows, Annual Review of Fluid Mechanics, 査読有, 44, 2012, 203-225

DOI: [10.1146/annurev-fluid-120710-101228](https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120710-101228)

L. van Veen, G. Kawahara, Homoclinic tangle on the edge of shear turbulence, Physical Review Letters, 査読有, 107, 2011, 114501-1-4

DOI: [10.1103/PhysRevLett.107.114501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.107.114501)

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, 23, 2011, 075103-1-19

DOI: [10.1063/1.3593462](https://doi.org/10.1063/1.3593462)

L. van Veen, G. Kawahara, A. Matsumura, On matrix-free computation of 2D unstable manifolds, SIAM Journal on Scientific Computing, 査読有, 33, 2011, 25-44

DOI: [10.1137/100789804](https://doi.org/10.1137/100789804)

##### [学会発表](計 16 件)

石川航佑, 貫通壁面チャンネルにおける熱・運動量輸送の非相似性, 第 50 回日本航空宇宙学会関西支部・中部支部合同秋期大会, 2013 年 10 月 25 日, 大阪大学(大阪府)

小笠原拓, 2 次元平行平板間流れの熱・運動量輸送の非相似性に関する研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 9 日, 岡山大学(岡山県)

河原源太, 多孔質壁面上の乱流における熱・運動量輸送, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 2013 年 9 月 9 日, 岡山大学(岡山県)

G. Kawahara, The onset of transient turbulence in minimal plane Couette flow, 10th ERCOFTAC SIG 33 Workshop on Progress in Transition Modeling and Control, 2013 年 5 月 30 日, Sandhamn(スウェーデン)

G. Kawahara, Exploration into global phase-space structures in minimal

plane Couette flow, NORDITA Program on Stability and Transition, 2013年5月27日, Nordic Institute for Theoretical Physics (スウェーデン)

G. Kawahara, The onset Reynolds number of transient turbulence in minimal plane Couette flow, Turbulence Seminar Imperial College, 2013年3月4日, Imperial College London (イギリス)

G. Kawahara, Characterization of transient plane Couette turbulence in terms of homoclinic tangle, LIMSI-CNRS Seminar, 2013年2月27日, LIMSI-CNRS (フランス)

G. Kawahara, Exploration into an unstable periodic orbit in large-eddy simulation of plane Couette flow, Departamento de Motopropulsion y Termofluidodinamica Seminario, 2012年10月2日, Universidad Politecnica de Madrid (スペイン)

T. Otsuki, 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)

加藤健司, 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)

G. Kawahara, 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)

G. Kawahara, Turbulence structures in rectangular-duct flow, Ladhux Seminar, 2012年3月1日, Ecole Polytechnique (フランス)

G. Kawahara, Turbulence structures in rectangular-duct flow at low Reynolds numbers, Departamento de Motopropulsion y Termofluidodinamica Seminario, 2011年10月5日, Universidad Politecnica de Madrid (スペイン)

G. Kawahara, Coherent structures and secondary flow in square-duct turbulence, Turbulence Colloquium Marseille 2011, 2011年9月27日, Centre International de Rencontres Mathematiques (フランス)

G. Kawahara, Structures of low-Reynolds-number turbulence in a rectangular duct, Geophysical Fluid Dynamics Program, 2011年6月27日, Woods Hole Oceanographic Institution (アメリカ)

G. Kawahara, H. Wakabayashi, M.

Uhlmann, A. Pinelli, Spatially localized turbulence structures in transitional rectangular-duct flow, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, 2011年5月25日, Snowbird Ski and Summer Resort (アメリカ)

〔図書〕(計 1 件)

J. Jimenez, G. Kawahara, Cambridge University Press, Ten Chapters in Turbulence (Chapter 6 Dynamics of Wall-Bounded Turbulence), 2012, 437 (221-268)

〔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 0 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

## 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) 連携研究者

加藤 健司 (KATO, Kenji)  
大阪市立大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号 : 10177438