

令和元年6月3日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18019

研究課題名(和文) 壁面上を伝播する進行波による乱流境界層の摩擦低減・伝熱促進，同時達成制御の試み

研究課題名(英文) Traveling wave like control in turbulent boundary layer flow for relaminarization phenomenon and simultaneous achievement of skin-friction drag reduction and heat transfer enhancement

研究代表者

守 裕也 (Mamori, Hiroya)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：80706383

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)：乱流境界層における摩擦抵抗低減制御の確立は輸送機の燃費削減などに大きな貢献ができる。本研究では、国内外で提案されている乱流制御手法と比較し有利な点を持つ進行波状制御の効果の詳細な調査を行った。進行波状制御は、乱流摩擦抵抗を著しく低減させる再層流化効果と、摩擦低減と熱伝達促進が同時に起きる非相似な制御効果の2つの利点を持つ。本研究では乱流境界層における進行波制御の再層流化効果/非相似効果が生じるパラメータ群とその発現メカニズムを、直接数値計算を用いて明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では乱流境界層における進行波制御を用いた制御効果について数値計算を用いた調査を行なった。乱流境界層における制御による再層流化/非相似効果は、輸送機や熱交換器などにおける幅広い流体が関連する機器において、エネルギーの効率的な利用という観点から工学上意義がある。本研究で明らかにした有効な制御効果が得られるパラメータ群とそのメカニズムは、将来の乱流抵抗低減・伝熱促進制御デバイスの設計及び実用化に寄与できると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Flow control techniques to decrease skin-friction drag in turbulent flows are expected to contribute to reduction of transport cost. In this study, we investigate drag reduction effect of traveling wave-like control in turbulent boundary layer flows. The traveling wave-like control not only induces a relaminarization phenomenon with large skin-friction drag reduction, but also leads simultaneous achievement of the skin-friction drag reduction and the heat transfer enhancement (i.e., dissimilar control effect). The present study clarifies parameter sets of the traveling wave control for the relaminarization phenomenon and the dissimilar control effect by means of direct numerical simulations.

研究分野：熱流体制御工学

キーワード：乱流制御 進行波制御 抵抗低減 熱伝達促進

# 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

現在人類が直面するエネルギー問題の解決のために、航空機や車など輸送機器の燃費向上が解決に寄与できるといわれている。一般的に輸送機器周囲の流れは乱流状態であり、乱流の自在な制御手法のさらなる進歩により輸送機器の燃費向上へ寄与が期待できる。国内外の動向として、例えば流れに高分子添加する方法やプラズマアクチュエータ制御があるが、それぞれ環境負荷が大きい、制御効率が悪い、摩擦が減ったとしても熱伝達性能が低下する等、課題を多く残す。

過去に我々の研究グループでは、乱流渦が多く存在する内部流において、壁面進行波状プレデターミンド制御による制御効果の調査を行った。この壁面進行波が主流と同方向である下流方向に進む場合には、乱流渦が消失、流れは再層流化し80%程度の抵抗低減を達成することを発見した[1-2]。一方、上流方向の進行波においては、摩擦抵抗低減効果[3]のみならず、摩擦抵抗低減と同時に壁面からの伝熱促進が示唆されていた[4]。摩擦抵抗と熱伝達の強い相似性の為に従来両者の同時達成は困難であったが、進行波という簡易な構造であるにもかかわらず達成できる為その工学的利用価値が高い。

本研究の学術的な特色は、従来の研究では内部流に限定された制御効果を外部流の代表例である乱流境界層で実施することにある。新幹線などの輸送機器の周囲は外部流の一つである境界層流れであり工学上適用範囲が広い。従来の研究対象であった内部流とは異なり、乱流境界層では主流が壁から離れる空間的な発達が起こり、それが制御下の摩擦抵抗や熱伝達に影響を与える事が予想される。独創的な点として、下流進行で再層流化、上流進行で抵抗低減と熱伝達の非相似性が生じる点への着目が挙げられる。両者は進行方向が異なるのみで得られる制御効果を切り替える事が可能であり、どちらも工学的価値のある制御効果になる点に意義がある。既に実用化もされた壁面に設置した微細な溝であるリブレット制御による制御効果と比べても、大きな摩擦抵抗低減および熱伝達増加を得ることができる。以上を踏まえ本研究の調査によって示される制御の結果は、今後の乱流制御の指針となり工学的な意義となりえる。

## 2. 研究の目的

前節の背景を踏まえ本研究では、空間発達の効果が顕著になる乱流境界層において壁面進行波の制御効果の調査を行った。従来の研究はほとんどが円管内や平行平板間等の内部流を対象としており、乱流境界層など外部流を対象とした調査は依然として少ない。本研究では、目的を境界層乱流における自在な乱流制御手法の確立と位置づけ、特に大きな乱流摩擦抵抗低減且つ熱伝達促進を達成する壁面進行波制御の効果の調査した。図1に示す通りに、流れに壁面から進行波を与える事で摩擦抵抗低減及び熱伝達促進を狙う。壁面からの吹出し・吸込みによる進行波を実施しその効果を調査した。

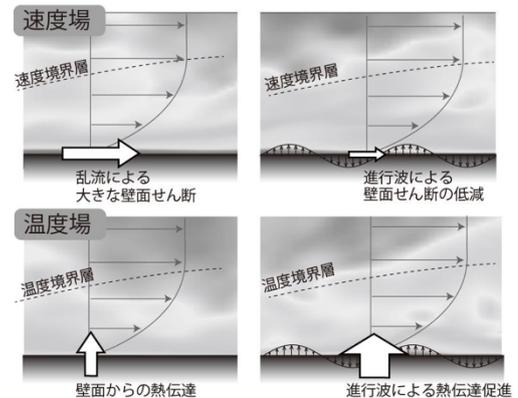


図1 進行波による制御効果

## 3. 研究の方法

乱流境界層に関して進行波状制御の直接数値シミュレーションを行う。直接数値シミュレーションとは、乱流モデル等を用いずに流れを計算機内に再現する手法であり、高精度な数値計算により信頼性の高いデータが得られる。申請者はこれまでの内部流における計算実績を活かし発展させた解析を実施した。

図2に示す通り、進行波制御の効果を検証するメイン部と、メイン部への流入条件を用意するドライバー部の2つの

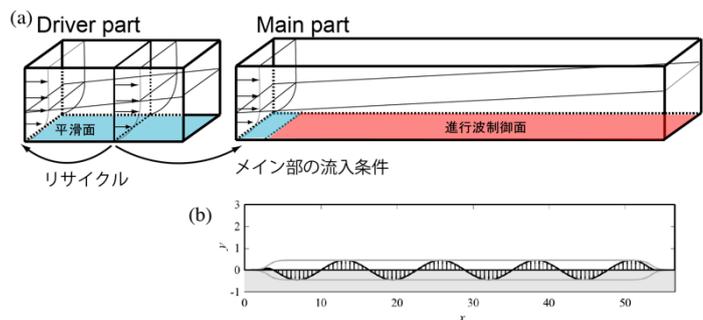


図2 (a) 境界層乱流の計算領域 (b) 進行波制御

計算領域を用意した。どちらの計算領域においても途中の境界条件を流入条件として利用するリサイクル法を利用した。なお、研究期間開始当初は未実装であった温度輸送方程式を実装し、また OpenMP 用いた計算コードの並列化を行い、より効率的な計算を行った。本計算コードは乱流境界層であり、壁面に囲まれている内部流よりも数値的な不安定性が生じる事が予想される。さらに壁面からの制御がこの不安定性を助長させる可能性があるが、本研究ではそれらを避けるため、Navier-Stoke 方程式に基づいた流入流出境界条件を採用し安定した計算を試みた。

#### 4. 研究成果

図 3 に、特に非相似制御が期待できる壁面からの上流方向進行波の場合の流れ場の様子を例として示す。壁面からの進行波状制御を与え、壁面上には薄い層として進行波が確認できる。非制御時と同様に白色の等値面で示される乱流渦も多数確認された。従ってこのケースにおいて摩擦抵抗は低減されるものの、乱流が維持された。

次に主流と同じ方向に波を進行させた下流方向進行波制御について制御が流れに与える効果のパラメータ依存性を網羅的に調査した。図 4 に代表的なケースにおける摩擦抵抗値  $c_f$  の分布を示す。ここに摩擦抵抗は概ね増加し、平行平板間乱流において得られた再層流化は生じなかった。その他、制御パラメータから計算される影響厚さから考えて再層流化が期待されるパラメータ群においても、再層流化は生じなかった。理由として、乱流境界層は発達流であるために下流方向に流れのスケールが変化し、再層流化に有効なパラメータが変化し再層流化に至らなかったと考えられる。また現状の進行波は下壁側からのみの制御であったため、進行波が作成するポンピングの効果が小さかったと考えられる。

加えて、内部流の代表例である平行平板間チャンネル流およびテイラーケット流れについても同様の進行波状吹出し・吸込み制御による制御効果を改めて検証した。これら内部流の研究についてメインターゲットとする境界層流れとは異なるが非常に似た制御効果が期待できる上、計算コストの点では有利である。そのため、これら内部流の解析が境界層流れの研究に大きな貢献ができると考えた詳細に検討した。平行平板間流れにおける進行波制御結果の例を図 5 に示す。平均温度分布は進行波の影響を受け壁面近傍で波状の分布となった。より詳細にはスパン方向に軸を持つロール構造が生成されており、それらが摩擦抵抗低減・熱伝達促進に寄与したと考えられる。

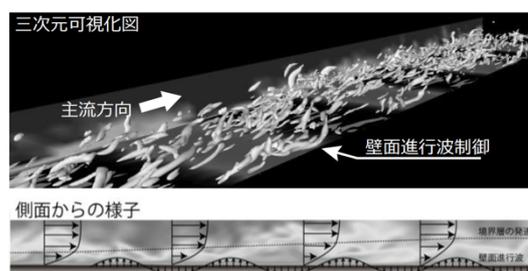


図 3 上流方向進行波制御の効果

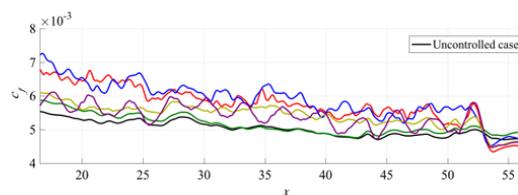


図 4 下流方向進行波制御の効果

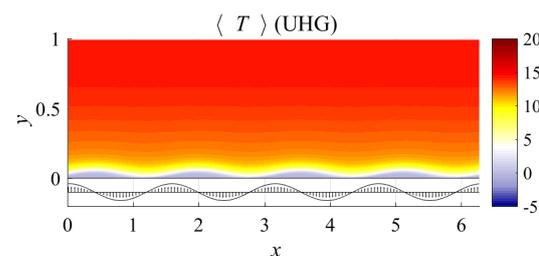


図 5 平行平板間制御流における温度場

#### 参考文献

- [1] H. Mamori, K. Iwamoto, and A. Murata, *Effect of the parameters of traveling waves created by blowing and suction on the relaminarization phenomena in fully developed turbulent channel flow*, Phys. Fluids, 26, 015101, 15 pp., 2014.
- [2] R. Nakanishi, H. Mamori, and K. Fukagata, *Relaminarization of turbulent channel flow using traveling wave-like wall deformation*, Int. J. Heat Fluid Flow 35, pp. 152-159, 2012.
- [3] H. Mamori, K. Fukagata, and J. Hoepffner, *The phase relationship in laminar channel flow controlled by traveling wave-like blowing/suction*, Phys. Rev. E, 81, 046304, 11 pp., 2010.
- [4] K. Higashi, H. Mamori, and K. Fukagata, *Simultaneous control for friction drag reduction and heat transfer augmentation by traveling wave-like blowing/suction*, Comput. Therm. Sci. 3, pp. 521-530, 2011.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

- [1] H. Mamori, K. Ogino, N. Fukushima, K. Fukudome, and M. Yamamoto, *Influence of control parameters of traveling-wave blowing and suction in turbulent Taylor-Couette flow*, Proc of TURBULENCE, HEAT AND MASS TRANSFER 2018, pp. 553-556.
- [2] H. Mamori, N. Fukushima, and M. Yamamoto, *Effect of parameters of traveling wave-like blowing and suction on skin-friction drag reduction and heat transfer enhancement in turbulent channel flow*, Proc. 10th Int. Symp. Turbulence Shear Flow Phenomena (2017), Paper No. 210, 4 pp.
- [3] 荻野昂平, 守裕也, 福島直哉, 山本誠, テイラーケット乱流における進行波状吹出し・吸込み制御パラメータの影響, 第31回数値流体力学シンポジウム, 京都, 2017年12月12日-12月14日 Paper No. A06-3, 2 pp.
- [4] K. Ogino, H. Mamori, N. Fukushima, and M. Yamamoto, *Direct numerical simulation of turbulent Taylor-Couette flow controlled by a traveling wave-like blowing and suction for drag reduction*, The 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Denver, Colorado, US, 19-21 Nov., 2017, Abstract: F16.00002.
- [5] H. Mamori, H. Aono, Y. Kametani, N. Fukushima, H. Ishikawa, M. Yamamoto, and K. Fukagata, *Effect of traveling wave-like blowing and suction control on turbulent boundary layer flow*, 16th European Turbulence Conference, Aug. 21 2017, Stockholm, Sweden, Paper No. 29835, 1 p.
- [6] H. Mamori, K. Fukagata, N. Fukushima, and M. Yamamoto, *Direct numerical simulation of turbulent channel flow controlled by wave-like wall-normal body force for drag reduction*, Proc. 11th European Fluid Mechanics Conference, Seville, Spain, 2016, 1 p.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mamorilab.mi.uec.ac.jp>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：山本 誠、福島 直哉、福留 功二、荻野 昂平

ローマ字氏名：Makoto Yamamoto, Naoya Fukushima, Koji Fukudome, Kohei Ogino

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。