

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14884

研究課題名(和文)低レイノルズ数流れにおける乱流・層流の間欠性を利用した乱流熱伝達促進制御

研究課題名(英文)Heat transfer by using traveling wave control and laminar-turbulent intermittency in low Reynolds number flow

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) 4,700,000円

研究成果の概要(和文)：小型熱交換器等において交換効率の増加には、冷媒流の熱伝達増加が求められるが、一方で流れの中の乱れが弱く熱伝達率が小さい低レイノルズ数流れである。低レイノルズ数流れでは流路に層流・乱流が間欠的に分布していることが知られており、本研究ではこの間欠性に着目しフィードバック制御及び進行波制御が持つ局所的な乱れの増加効果効果を使い、低レイノルズ数流れの乱流領域を種として流路全体の乱れを増加させる直接数値計算を実施した。その結果、乱流および熱伝達の大きな促進効果が得られ、その効果のパラメータ依存性も確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では低いレイノルズ数流れにおける進行波制御を用いた熱伝達促進効果について直接数値計算を用いた調査を行なった。乱流パフを種として、制御による乱れの促進を狙った。熱交換器などにおける熱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制御効果のパラメータ範囲及び制御メカニズムは、伝熱促進制御デバイスの設計及び実用化に大きく寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：In a small heat exchanger, an increase in heat transfer of the refrigerant flow is required to increase the exchange efficiency. However, the flow is operated in a low Reynolds number and the turbulent heat transfer is very small. In order to enhance the heat transfer, we focus on the intermittency of the laminar and turbulence at low Reynolds number flow. The blowing and suction from the wall is employed and the intermittency is used as a seed of the promotion of the turbulent heat transfer. A series of the direct numerical simulation shows significant turbulent heat transfer and the dependency of it by the control parameters.

研究分野：計算熱流体制御工学

キーワード：乱流制御 熱伝達促進 進行波制御 フィードバック制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

多くの工業製品に利用されている熱交換器内では管内冷媒流と外部流との間で熱交換する。近年工業製品の効率化・小型化が加速しているが、小型の熱交換器においては流路が小さいため冷媒流は熱伝達率の小さい低レイノルズ数流れである。乱流促進体設置により熱伝達を高める方法もあるが、小さい流路断面積や圧力抵抗の増加を考えると難しい。

低レイノルズ数乱流場において乱流は一樣に減衰するのではなく、図1に示す通り乱流領域と層流領域が間欠的に分布し、特に乱流領域が主流方向に対して傾斜していることが知られている[1]。

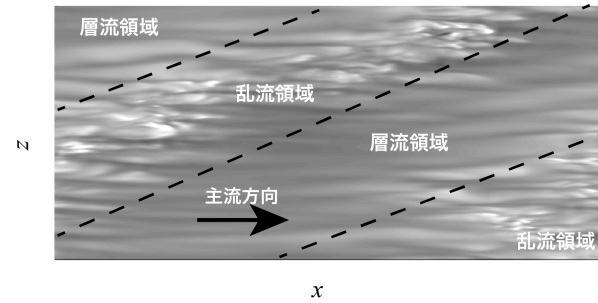


図1 低レイノルズ数の平行平板間流れにおける乱流縞の分布。濃淡はチャンネル中心断面速度の大きさ、座標  $x, z$  はそれぞれ主流方向、スパン方向を示す。

乱流生成は、渦運動に対応したレイノルズせん断応力と壁垂直方向の速度勾配との積で表される。従って、低レイノルズ数流れにおける間欠的な構造のうち乱流領域を何らかの制御により刺激すれば乱流が増幅され、その強い運動量および熱の輸送作用により、結果として高い熱伝達率が得られるはずである。

本研究では、「乱流と層流が混在する低レイノルズ数流において、制御により乱流領域を局所的に刺激することで流路全体の乱れが促進され、結果として熱伝達の増加が得られるのではないか？」という問いのもと、研究を実施した。制御手法として壁面からの吹出し・吸込みを採用し、それらが持つ乱流熱伝達促進の可能性を調査した。具体的には古典的なフィードバック則[2]に基づく制御を与えた平行平板間流れ、また進行波状制御[3]を与えた円管内流れを調査した。

2. 研究の目的

本研究は熱交換器などにおける熱伝達性能向上を念頭にした乱流の促進を目指し、乱流一層流の間欠的な分布に対する制御を与え、その乱流維持・促進効果を評価することを目的とする。制御手法はフィードバック制御と進行波制御とし、対象とする流れは平行平板流れ及び円管内流れとする。

3. 研究の方法

本研究では流れの直接数値計算を実施する。直接数値計算とは乱流モデルを用いずに乱流を計算機内に再現する数値計算手法であり、高精度な結果により信頼性の高いデータを得ることができる。支配方程式は、非圧縮性流れの連続の式、Navier-Stokes 方程式、そしてエネルギー方程式とする。本研究で用いた計算コードは過去に十分妥当性の検証がされている。空間離散化には有限体積法、時間方向の積分にはルンゲクッタ法を用い、計算格子はスタッガード格子を採用している。

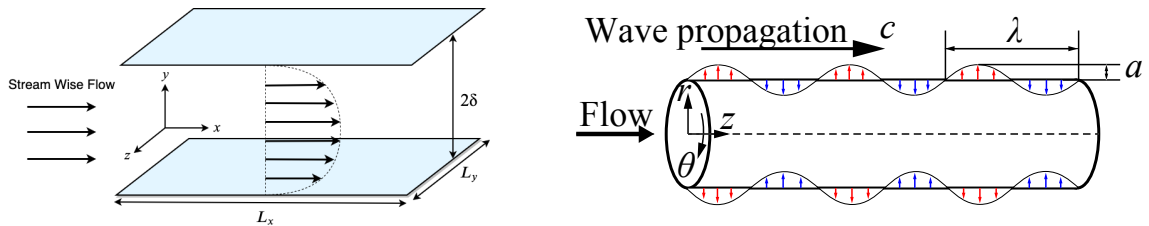


図2 平行平板間流れ(左)及び円管内流れ (右)

図2に平行平板間流れ及び円管内流れの模式図を示す。壁には滑りなし条件を施す(制御入力を除く)、また主流方向とスパン方向(周方向)には周期境界条件を課している。どちら流れにおいても、圧力一定条件、温度については一様発熱条件を課した。これは運動量輸送及び熱輸送の相似性が最も高くなる条件である。

4. 研究成果

まず、平行平板間流れにおける熱伝達促進について調査した。制御入力はポジティブフィードバックとして、壁面近傍に仮想的に儲けた検知面において速度を検知し、次式に基づき壁からの壁面法線速度を与えた。

$$v(x, 0, z) = Av(x, y_d^+, z)$$

ここで  $A$  は強度、 $y_d^+$  は検知面高さを表す。上壁についても同じ制御則を適用した。本研究での

制御パラメータは、検知面高さとして、 $y_d^+ = 5 - 30, A = 0.3 - 0.9$ の範囲で検討した。プラスの上付き文字は  $Re_\tau=70$  での壁指標を表す。全てのケースにおいて摩擦レイノルズ数  $Re_\tau=180$  の完全発達した乱流から、計算開始と同時に  $Re_\tau=70$  まで急激に減少させる。これは代表速度と代表長さの急激な減少に対応する[4]。計算領域は  $x, y, z$  方向にそれぞれ  $5\pi, 2\pi$ 、格子点数は  $N_x \times N_y \times N_z = 256 \times 96 \times 128$  とした。強度  $A$  と検知面高さ  $y_d^+$  に対して全 56 ケースにおいて検討した。その結果、小さな動力で乱流熱伝達が促進するケースと、大きな動力で大きく乱流熱伝達が促進されるケースが存在することがわかった。

制御による乱流維持について議論するため、図 3 に小さな動力で乱流熱伝達が促進するケースの流れの構造を可視化する。オレンジと青で色付けされた高・低速ストリーク構造と、白で示された乱流渦構造が確認できる。低速ストリーク構造は壁からの吹出し部上空に存在し、流れ方向に細長く伸びている。一方、高速ストリーク構造は低速ストリーク構造に隣接しており、渦構造は低速ストリーク構造を取り囲むようにして存在する。吹出し・吸込みにより、低速ストリーク構造が流路の中心に向かって移動し乱流が維持される。

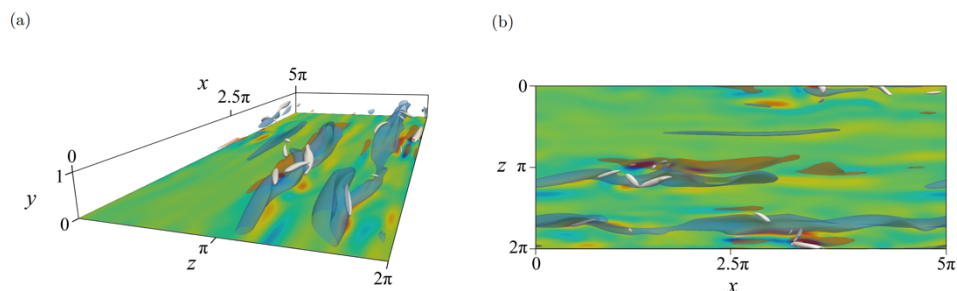


図 3 制御下における瞬時のコヒーレント構造を可視化: (a) 鳥瞰図 (b) 上面図

次に円管内流れにおける熱伝達促進について調査した。円管長さは  $L_z = 30$ 、格子点数は  $N_r \times N_\theta \times N_z = 64 \times 128 \times 512$  とした。非制御時には乱流と層流の間欠構造である乱流パフが生じる摩擦レイノルズ数である  $Re_\tau=87$  として計算を実施した。制御入力は進行波状制御として壁面垂直方向速度  $v_{r,w}$  を次式で与えた。

$$v_{r,w} = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (z - ct)$$

入力パラメータは振幅  $a$ 、波長  $\lambda$ 、位相速度  $c$  として、パラメトリックスタディの結果、最も高い制御効果を示したのは波長  $\lambda = 15$ 、位相速度  $c = 5$  であり 12% の抵抗低減及び 12% の熱伝達増加が得られた。

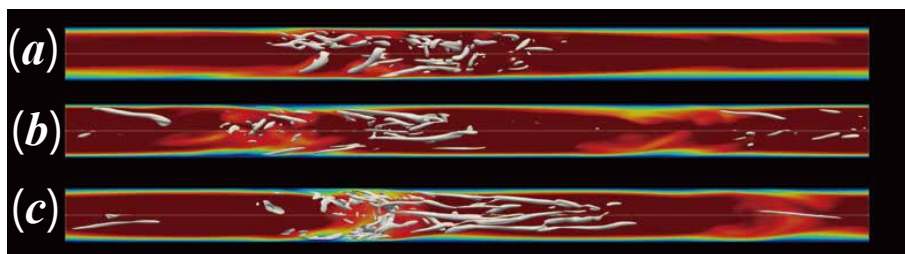


図 4 乱流渦構造: (a) 非制御時 (b) 上流方向進行波 (c) 下流方向進行波

図 4 に渦構造の可視化を示す。渦構造は変形速度テンソルの第二不変量の等値面により白色で可視化し、背景の色は瞬時の流れ方向速度  $u_z$  を示す。図 4(a) は乱流部と層流部で間欠構造が確認できる。進行波を与えたケースでは図 4(b-c) の渦は流路全体に引き伸ばされた。このことから進行波が乱流構造に影響を与え、結果的に制御効果に寄与したと考えている。

<引用文献>

- [1] K. Fukudome, T. Tsukahara, and Y. Ogami, "Heat and momentum transfer of turbulent stripe in transitional-regime plane Couette flow", Int. J. Adv. Eng. Sci. Appl. Math. Vol. 10, pp. 291–298, 2018.
- [2] 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, Vol. 26, 015101, 2014.
- [3] H. Choi, P. Moin, and J. Kim, "Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows", J. Fluid Mech., Vol. 262, pp. 75-110, 1994
- [4] A. Mitsuishi, M. Sakoh, T. Shimura, K. Iwamoto, A. Murata, and H., Mamori, "Direct numerical simulation of convective heat transfer in a pipe with transverse vibration", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 148, 119048, 2020.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 MAMORI Hiroya, FUKUDOME Koji, OGINO Kohei, FUKUSHIMA Naoya, YAMAMOTO Makoto	4. 巻 16
2. 論文標題 Heat transfer enhancement and torque reduction by traveling wave-like blowing and suction in turbulent Taylor-Couette flow	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JTST0003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jtst.2021jtst0003	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 三藤春輝, 守裕也, 宮寄 武
2. 発表標題 進行波状吹出し・吸込みによる円管内低レイノルズ数流れにおける熱伝達促進
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木 良太, 守裕也, 宮寄 武
2. 発表標題 低レイノルズ数の平行平板間流における吹出し・吸込み制御を用いた乱流熱伝達促進のパラメトリックスタディ
3. 学会等名 日本流体力学学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Mamori
2. 発表標題 Drag reduction, relaminarization phenomena, and heat transfer by a traveling wave control in wall turbulence
3. 学会等名 The Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木良太, 守 裕也, 宮寄 武, 原 将太
2. 発表標題 低レイノルズ数領域の平行平板間流れにおける吹出し・吸込み制御による乱流熱伝達促進
3. 学会等名 日本機械学会第97期流体工学部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三藤 春輝、守裕也、宮寄武
2. 発表標題 円管内低レイノルズ数流れにおける進行波状吹出し・吸込みによる乱流熱伝達促進
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木 良太、守裕也、宮寄武
2. 発表標題 低レイノルズ数領域における渦構造に着目したフィードバック制御による熱伝達促進
3. 学会等名 日本機械学会関東学生会第59回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三藤春輝、守裕也、宮寄武、榎木光治
2. 発表標題 低レイノルズ数円管内乱流における進行波状吹出し・吸込み制御モードの熱伝達促進効果の比較
3. 学会等名 第35回数値流体シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 良太、守 裕也、宮崎 武
2. 発表標題 吹出し・吸込みフィードバック制御による低レイノルズ数平行平板間流の熱伝達促進
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 K. Tanaka, H. Mamori , and T. Miyazaki
2. 発表標題 Skin-friction drag reduction effect of streamwise large-scale vortex generated by wall heating and cooling in turbulent pipe flow
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Mamori, K. Ogino, N. Fukushima, K. Fukudome, and M. Yamamoto
2. 発表標題 Effect of control parameters of traveling-wave blowing and suction on relaminarization phenomenon in fully developed turbulent Taylor-Couette flow
3. 学会等名 The 72nd Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔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
---------	---------