

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03952

研究課題名（和文）壁面分布加熱による新機軸の流体制御手法の実証開発

研究課題名（英文）Development of a new flow control methodology using periodic wall heating

研究代表者

稲澤 歩（INASAWA, Ayumu）

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：70404936

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）：周期加熱壁を有するチャンネル流れについて風洞実験により詳細に調べた。滑面に周期温度分布を与えると加熱と冷却に対応した定在対流ロールが加熱レイリー数3500まで実現され、レイノルズ数20以下で流路抵抗が約8%低減することが示された。さらに、壁面の波打ちと組み合わせると、水平流が駆動され、体積流量はレイリー数とともに増加した。これらの結果は理論予測と極めて良く一致し、壁面周期加熱によって流れが確かに制御されることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、流れの制御は壁面形状の微細加工やアクチュエータなどのデバイスを用いて行われてきた。これに対し、本研究では、壁面外側からの加熱・冷却により生じる自然対流を利用した新たな流れの制御法について、周期温度分布の実現方法とともに、実験的に調べ、抵抗低減と水平流の駆動制御が可能であることを実証した。この制御法は特に、デバイスの設置が困難な、微小流路内の抵抗低減や流れの駆動（すなわち圧力損失の低減）に適用でき、流れの制御の新たな可能性を切り拓く。

研究成果の概要（英文）：Flows in a channel with distributed surface heating were examined experimentally. When the heating was applied to a smooth surface, a pair of steady rolls was formed for $Rap < 3500$, leading to skin-friction drag-reduction of at most 8% for $Re < 20$. In addition, when the heating was applied to corrugated wall with proper phase difference, the net horizontal flow was created whose volumetric flow rate increased monotonically with the heating intensity. The agreement between the experimental and theoretical results verified the flow was surely controlled by using distributed surface heating.

研究分野：流体力学

キーワード：対流 流れの制御 熱流体 抵抗低減 流れの駆動

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

層流摩擦抵抗の代表的な低減手法に超疎水性の利用が知られてきた。これは、壁面上の微細構造(凹凸)中に閉じ込められた気体が主流(液体)の壁面への直接接触を妨げることで壁面せん断応力を減じることによる。ただし、これによる抵抗低減効果を得るには、主流と凹凸中で異なる流体(あるいは異なる相)でなければならないという強い制約がある。一方、最近の理論研究によると、壁面の温度分布によって超疎水性と類似パターンの流れ場が実現されると予測している。この手法は、壁面の微細加工や流路内のデバイスを一切必要とせず、単一流体(単相流れ)に対しても適用できる優れた特徴を持つ。しかしながら、理論解析はブジネスク近似を仮定した純粋二次元流(流れ方向には周期流を仮定)に対して行われており、不安定性を示しやすい熱流体において、そのような流れが実現されるかについては明らかではない。

2. 研究の目的

本研究では、壁面温度分布による摩擦抵抗低減(Super-hydrophobic効果)および、水平流の駆動(Thermal drift現象)について、その実現方法(実験デザイン)を入念に検討したうえで、流れ場を実験的に詳細に調べるとともに、対応する理論研究と実験データとの定量的な比較・検討から、「壁面加熱による流れの制御」という新たな流れの制御法の実証を目指している。

3. 研究の方法

本研究は風洞実験を中心に行われた。また、海外研究協力者(流体理論が専門)のJ.M. Floryan教授(カナダ)と連携しながら研究を遂行した。流れ場の観察は、スモークによる可視化およびPIVにより行われた。壁面温度分布の計測は、赤外線放射温度計および薄膜熱電対を用いた。以下に実験の概要を示す。

(1) 壁面周期加熱による抵抗低減(Super-hydrophobic効果)

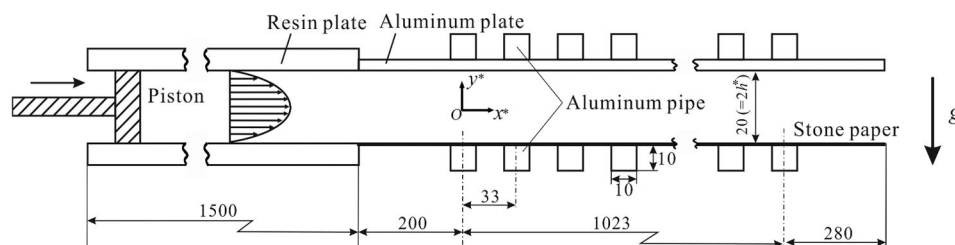


図1 チャンネル風洞

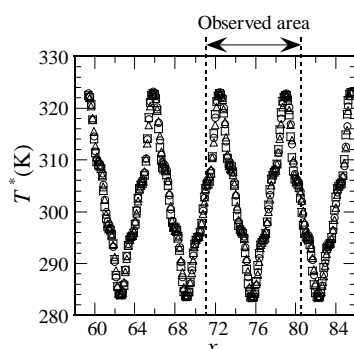


図2 下壁面の温度分布

一つ目は、壁面加熱による抵抗低減に関する実験である。抵抗低減の対象は、低レイノルズ数($Re \sim 10$)平面ポアズイコ流れであり、これを実現するためピストンで駆動されるチャンネル風洞(断面アスペクト比20)を製作した。チャンネル下壁面はアルミニウム製の角パイプを33mm間隔で流れ(x)方向に配置し、それに恒温槽から温水・冷水を供給して周期温度分布を生成する。パイプの表面は厚さ0.2mmの耐水紙で覆われ、滑面が実現される。これにより、下壁には x 方向に周期的な(二次元)温度分布が実現された(図2)。上壁面はアルミニウム製の背面のパイプに供給される恒温水により一様な温度(下壁の平均温度に一致)に保たれる。周期加熱は16周期あり、流れ場の観察は加熱開始から11周期目で行った。

(2) 壁面の温度分布と波打の組合せによる水平流の駆動 (Thermal drift 現象)

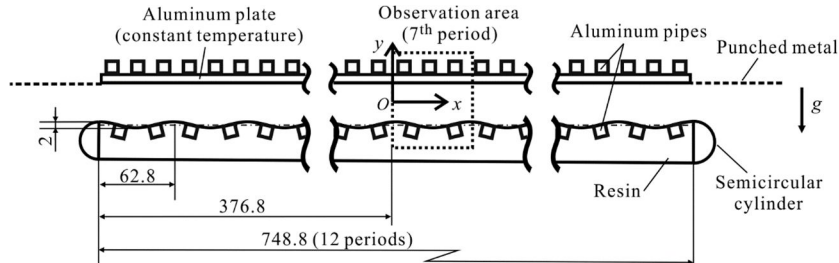


図3 波状壁(下壁)を有する周期加熱チャンネル(両端は開放)

二つ目は、壁面の波打ちとの組合せによる水平流の駆動実験である。この実験では両端が実験室(大気)に開放されたチャンネルを用いた(図3)。チャンネル下壁には微小振幅(チャンネル半幅の10%)で正弦波状に波打ち(波長は温度分布のそれと同一)を持たせ、加熱・冷却は波打ちの変曲点位置に設けた。実験モデルの波状壁はNC工作機により精密に加工され、装置の設置にあたってはレーザー水準器により水平度を慎重に確認した。チャンネル出口では、流れのはく離を低減する目的で半円柱を取り付けるとともに、プルームによる上昇流の影響(外部浮力による駆動力の発生)を減じる目的でパンチングメタルを設置した。また、外乱の影響を最小限に抑えるために装置全体を囲って実験を行った。

4. 研究成果

(1) 壁面周期加熱による抵抗低減 (Super-hydrophobic 効果)¹⁾

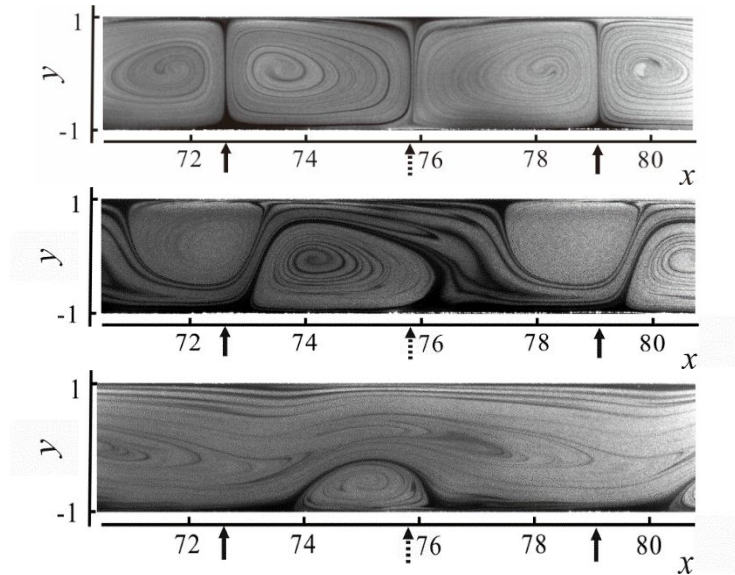


図4 周期加熱(下壁)による流れ場の可視化 ($Ra_p = 3500$).

上: $Re = 0$, 中: $Re = 5$, 下: $Re = 15$.

実線および破線矢印はそれぞれ加熱部(最大温度)と冷却部(最小温度)を示す。

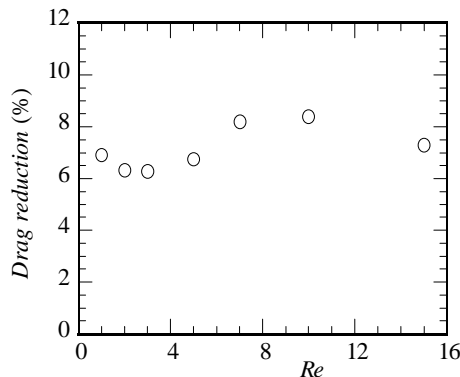


図5 レイノルズ数(水平流量)に対する抵抗低減率

図4は $Ra_p = 3500$ (加熱と冷却の温度差は30K)において下壁を周期加熱した場合の流れ場で

ある．水平流がない $Re=0$ (図 4 上) では，加熱部 (実線矢印) で上昇，冷却部 (破線矢印) で下降する対流ロール対が定在して存在していることがわかる．観察から，上昇流は下降流よりも強く，ロール中心は加熱部に引き寄せられている．これに水平流 (平面ポアズイコ流れ) を与えると ($Re=5$, 図 4 中) 流れはロールの間を縫うように大きく蛇行して右側へと移動する．このときロールは，水平流を後押しする方向に回転する：下面 (上面) に接しているロールは時計回り (反時計回り) に回転している．レイノルズ数が $Re=15$ になると，上壁 (等温壁) のロールは消滅し，下壁のロールも小さくなる (図 4 下)．さらにレイノルズ数が増すと，強制対流が勝り，自然対流によるロール対は消滅した．このような流れの特徴 (ロールの大きさ，はく離位置，再付着位置など) は，いずれのレイノルズ数においても理論と極めて良く一致することが示された．水平方向速度分布の詳細な定量計測からロールによる抵抗低減効果 (摩擦抵抗) を評価した結果，最大約 8% の抵抗低減が実現されることが示された (図 5)．

なお，本実験は，一般にブジネスク近似の影響が 1% を超える条件 (空気において 30 度の温度差) で行われたが，得られた結果は，理論解析 (ブジネスク近似を仮定) と極めて良く一致した．さらに，周期加熱強さ ($Ra_p=3500$) においても，一様加熱平板に対する対流不安定 (レイリー・ベナール対流．臨界値は本実験スケールで $Re_c=213$) は見られず，対流ロール対は安定して存在することも示された．これは，本制御手法がより広いレイリー数において適用可能であることを示しており，工学的に有用な知見と言える．

(2) 壁面の温度分布と波打の組合せによる水平流の駆動 (Thermal drift 現象)²⁾

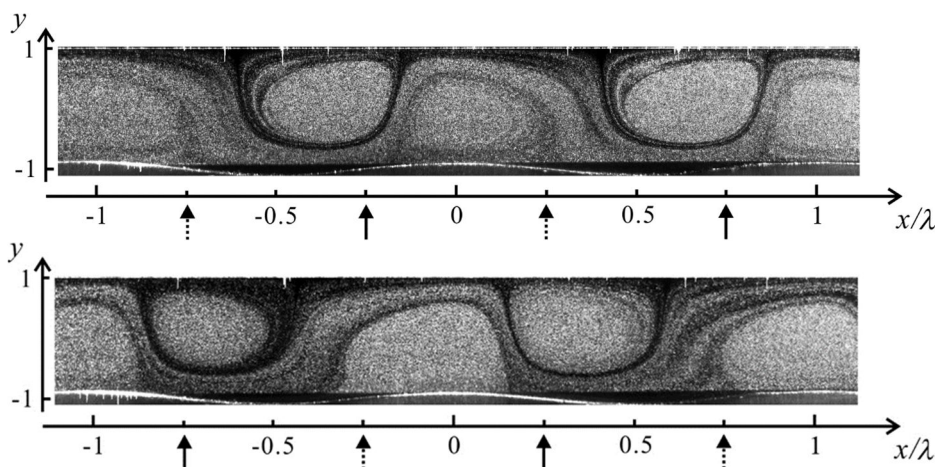


図 6 周期加熱波状壁による水平流の駆動 ($Ra_p=1500$)．

上： $\Omega=\pi/2$ ，下： $\Omega=-\pi/2$ ．

実線および破線矢印はそれぞれ加熱部 (最大温度) と冷却部 (最小温度) を示す．

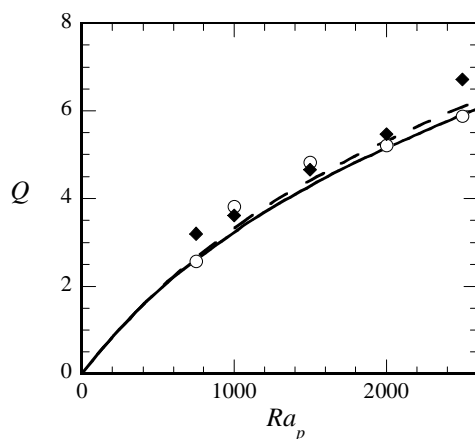


図 7 加熱強さ (レイリー数) に対する駆動水平流の体積流量

○： $\Omega=\pi/2$ ，◆： $\Omega=-\pi/2$ ．実線，破線は理論解析．

図 6 は，両端を開放した水平チャンネルの片面に，チャンネル半幅のわずか 10% の振幅の波打ち (波長はチャンネル幅の約 3 倍と緩やか) と周期加熱を適用した場合の可視化結果である．図の上下で加熱と冷却は反転させている (波打に対する加熱位相が 180° 異なる)．図のように，壁面

の微小な凹凸(波打ち)によってわずかに傾いた定在对流ロールが生成され,水平非対称な圧力勾配によって,水平流れが駆動された.駆動流は,(1)同様,対流ロール対の間を縫うように大きく蛇行する(図6上).加熱の位相を 180° シフトすると,流れのパターンと駆動流は反転する(図6下).PIVによる速度分布計測から駆動水平流の体積流量を評価したところ,図7のように,本実験範囲では加熱強さ(レイリー数)とともに流量は単調に増加し,増加率はレイリー数とともに減少することがわかった.この結果は理論解析とも良く一致し,Thermal drift現象の実証に成功した.

また,3次元流路に対する本制御手法の適用可能性について,チャンネル幅を変化させて調べた結果,流路のアスペクト比が1程度の矩形流路においても水平流が駆動されるという,円管(パイプ)のような工学的により重要な流れの制御に対する有益な知見も得た.

以上のように,本実験研究では,壁面周期加熱による抵抗低減と水平流の駆動という新たな流れの制御について,その実現手法とともに実証することができた.

<引用文献>

- 1) A. Inasawa, K. Taneda, J. M. Floryan, Experiments on flows in channels with spatially distributed heating, *Journal of Fluid Mechanics*, 872 (2019), 177-197.
- 2) 原奏人, 稲澤歩, Floryan, J.M., 周期加熱波状壁を有するチャンネル流れの実験的研究, 日本機械学会第97期流体工学部門講演会, OS1-04, 豊橋, 2019年11月.

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ayumu Inasawa, Keinosuke Taneda, Jerzy M. Floryan	4. 巻 872
2. 論文標題 Experiments on Flows in Channels with Spatially Distributed Heating	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 177-197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2019.332	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 該当する

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 原奏人, 稲澤歩, Floryan J. M
2. 発表標題 周期加熱波状壁を有するチャネル流れの実験的研究
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 稲澤歩, 佐藤啓太, 原奏人, Floryan J.M.
2. 発表標題 周期加熱された波状壁を有するチャネル流れの実験的研究
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Inasawa, K. Sato, K. Hara, J. M. Floryan
2. 発表標題 Experimental study of flow in a corrugated channel with periodic heating
3. 学会等名 12th European Fluid Mechanics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

稲澤研究室ホームページ
https://fluid.sd.tmu.ac.jp

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
研究協力者	FLORYAN J.M. (Floryan J.M.)		

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		
カナダ	University of Western Ontario		