

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：22604  
研究種目：基盤研究(C)（一般）  
研究期間：2021～2023  
課題番号：21K03861  
研究課題名（和文）表面操作の組合せによる流体制御法の新展開

研究課題名（英文）Flow control by surface manipulation

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） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：微小振幅の壁面波打ちを有する水平スロット間の自然対流について、実験および理論解析により詳細に調べた。一方の壁面に波打ちを与えると亜臨界レイリー数では壁面波長と一致する定在対流が生じ、その速度は壁面波長で大きく異なる。超臨界では壁面波長に依らず、レイリーベナール対流が流れを支配する。両方の壁に波打ちがある場合、亜臨界での対流はさらに促進され、対流パターンは壁面位相差とともに変化する。実験は解析とよく一致し、理論モデルの妥当性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面条件のわずかな操作による流れ場の応答を実験および理論から示したことは、熱と運動量の輸送現象の基礎資料になるだけでなく、流路中に機械的・電気的なアクチュエータを必要としない、効果的かつ効率的な受動的流体制御手法の開発につながる意義のある成果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, natural convection in horizontal slots with small-amplitude surface corrugation was examined experimentally and theoretically. When surface corrugation was applied to either wall, convection rolls whose wavelength was the same as that of the corrugation was generated at subcritical Rayleigh numbers. On the other hand, at supercritical condition, the Rayleigh-Benard convection dominates the flow, regardless of the wall wavelength. Convection is further enhanced when surface corrugation was applied to both walls, and the convection pattern changes with wall phase difference. Experimental results were in good agreement with the analysis, verifying the validity of the theoretical model.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 流れの制御 表面操作 熱対流 流れの不安定性

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

壁面上の粗度(波打ち)や不均一な(周期的な)表面温度分布は、流れに対する刺激となり、直接的あるいは、流れの不安定性(力学的分岐)を介して間接的に、流れを別状態に遷移させる。この種の刺激が強い場合、流れが大きく変化することは容易に想像できる。これに対し、本研究では、極めて弱い(微小な)刺激による流れの応答(表面パターンフォーミング)、すなわち、わずかな刺激に対して敏感に応答する、流れ場の性質(不安定性)を明らかにしたうえで、それを梃子として積極的に利用することを狙っていて、制御におけるエネルギーコストの観点からも理想的である。

表面温度が不均一な場合の滑面上の自然対流については、これまで、亜臨界条件下(不安定性が生じる臨界レイリー数以下)でのパターンフォーミングが実験的に調べられ<sup>(1)-(3)</sup>、亜臨界条件下での二次元表面フォーミングに対する流れ場については、実験<sup>(4)</sup>から、定性的に解明されつつある。しかしながら、流れの分岐(不安定性、遷移)が生じる、臨界条件(臨界レイリー数以上)におけるそれらの効果(特に流れ場の応答)については、線形安定性に基づく理論研究が開始されたばかりであり、実験的な研究は皆無である。

### 2. 研究の目的

本研究では、壁面形状の工夫による効率的な受動的流体制御法の確立に向けて、微小な壁面波打ちが自然対流現象に及ぼす影響を実験および解析から明らかにする。

### 3. 研究の方法

本実験で用いた装置の概略を図1に示す。水平に置かれた上下の壁面はアルミニウム製で、スロットの高さは $2h = 10\text{mm}$ 、スパン長 $s = 300\text{mm}$ 、アスペクト比は30である。測定部の外周には外乱の侵入を避けるために厚さ5mmの亚克力板が取り付けられている。座標系はスロット中央に原点をとり、水平方向右向きを $x$ 、垂直方向上向きを $y$ 、スパン方向に $z$ にとる。下壁の波打は、一定振幅0.25mm(スロット高さ $2h$ の2.5%)の正弦波を与えた。壁面波数 $\alpha_w$ は0.5, 1, 1.5, 2とした。上壁は滑面または振幅0.25mm、波数が $\alpha_w = 1.5$ の波状壁とし、下壁波打との位相差を変化させた。対流パターンの $x$ - $z$ 断面の可視化は、上面をガラス(滑面)とした。

レイリー数 $Ra$ は上下壁の温度差とスロット半幅( $h = 5\text{mm}$ )に基づく。壁面温度は上壁面外側の水冷アルミプレートと下壁面外側の精密ホットプレートを用いて定めた。各壁面温度の均一性は $\pm 0.2\text{K}$ 以下である。可視化観察は主に、側面からの影響の小さいスロット中央付近の $-3.14 \leq x/h \leq 9.42$ ,  $z = 0$ の部分で行った。スモーク導入から観察開始までの時間は $t^* = tk/h^2 = 1000 - 2100$ (20 - 40分)とした。

実験中の壁面温度は、薄膜熱電対により監視した。流れの観察は、測定部に導入したスモークをレーザーシートにより可視化して行われた。スロットの水平度は $\pm 0.04^\circ$ 以下となるよう慎重に調整した。また、予備実験により、上下壁が滑面の場合にはレイリー数 $Ra = 215$ からレイリー・ベナル対流の生成を確認した。これは線形安定性理論に基づく値(213.5)とほぼ一致していることを確認した。

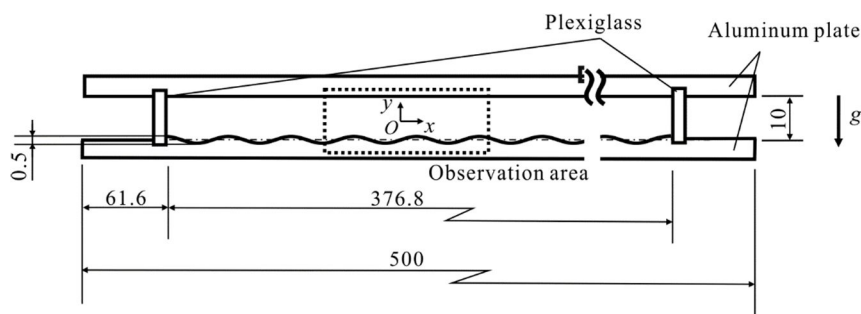


図1 波状壁を有する水平スロット(単位: mm)

### 4. 研究成果

#### (1) 下壁が波状壁、上壁が滑面の場合

図3は下壁が波状壁、上壁が滑面の場合における $Ra = 50$ の可視化結果である。この値は臨界レイリー数(213)の1/4以下である。図より、壁面に振幅がスロット幅の2.5%の波打があるだけで、いずれの壁面波数でも定対流ロール対が生成され、その波数はそれぞれの壁面波数と一致する。図4は超臨界の $Ra = 230$ における可視化結果である。このときのロールの波数は約1.4-1.5であり、壁面波数とは一致せず、滑面スロットで生じるレイリー・ベナル対流ロールの波数1.4に近く、壁面形状の影響は相対的に弱くなる。

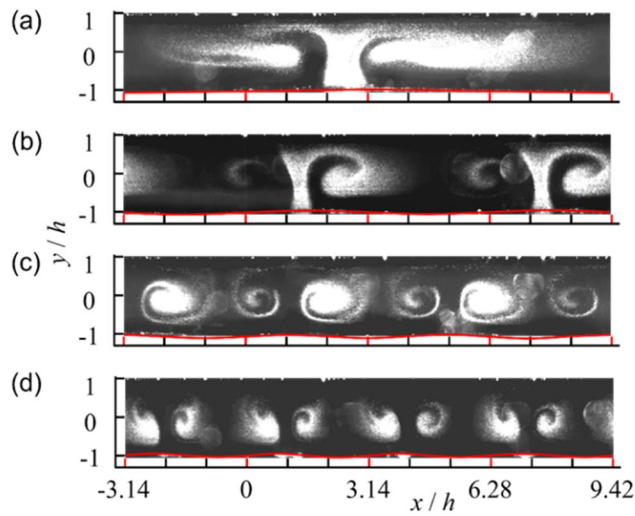


図3 微小振幅波状壁による対流パターン ( $Ra=50$ )  
 (a)  $\alpha_w = 0.5$ , (b)  $\alpha_w = 1$ , (c)  $\alpha_w = 1.5$ , (d)  $\alpha_w = 2$

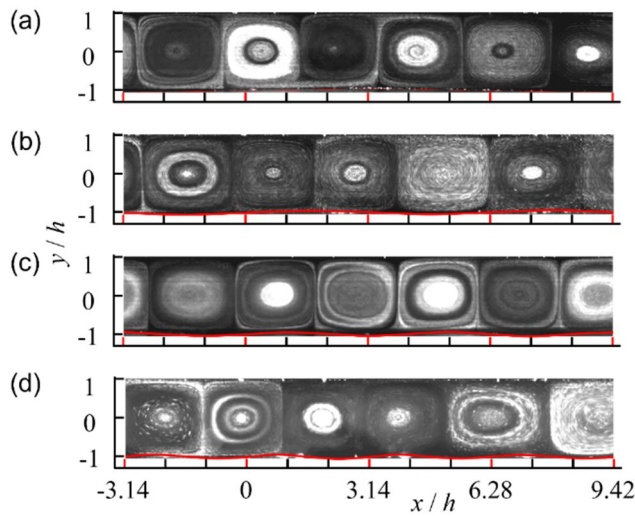


図4 微小振幅波状壁による対流パターン ( $Ra=230$ )  
 (a)  $\alpha_w = 0.5$ , (b)  $\alpha_w = 1$ , (c)  $\alpha_w = 1.5$ , (d)  $\alpha_w = 2$

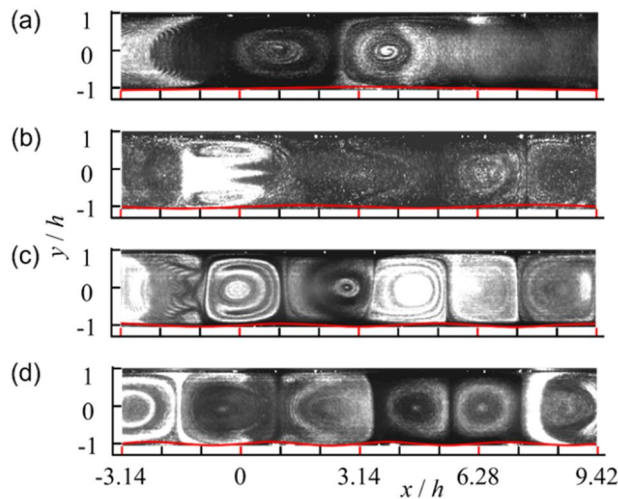


図5 微小振幅波状壁による対流パターン ( $Ra=215$ )  
 (a)  $\alpha_w = 0.5$ , (b)  $\alpha_w = 1$ , (c)  $\alpha_w = 1.5$ , (d)  $\alpha_w = 2$

臨界レイリー数付近の  $Ra = 215$  では、図5のように、対流の波数は水平方向に変化する。ただし、スパン方向には、図6のように揃っており、対流ロールの二次元維持される。理論解析を

実行したところ，こうした対流パターンの変化は空間的なパラメトリックレゾナンスで説明される．

図6は，壁面波数による対流の最大上昇速度  $V_{\max}$  の変化(波打の峰上方のスロット中心  $y=0$  で計測)を示している．亜臨界レイリー数においては，レイリー数の上昇に伴い速度が大きくなる．同一レイリー数では，レイリー・ベナール対流の臨界波数に近い  $\alpha_w = 1.5$  が常に最大となり，それ以下では  $\alpha_w^{-1}$ ，以上では  $\alpha_w^{-3}$  で変化し，理論解析結果と一致した．

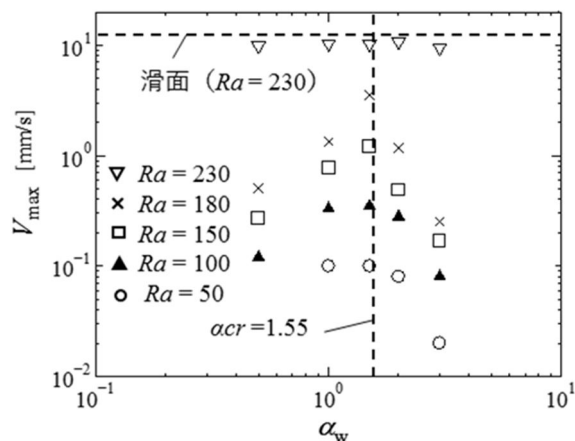


図6 壁面波数によると最大上昇速度変化

(2) 上下壁とも波状壁の場合 ( $\alpha_w=1.5$ )

次に，上下壁とも壁面波数  $\alpha_w=1.5$  の波状壁で，上下壁間の位相を変化させた．図7から図9は， $Ra=50$  における位相差  $\Omega=0, \pi/2, \pi$  における結果である．各図の上段は実験，下段は解析結果(実線は流線，色は温度)である．位相差  $\Omega=0$  の場合，図3(c)と同様，壁面波数と一致する対流が生じる．ただし，ロールの回転速度は約2倍になる．位相差を  $\Omega=\pi/2$  にすると，ロールは傾く(図8)．この場合，壁面には水平方向に合計の力が生じる．位相差が  $\Omega=\pi$  になると，対流ロールは鉛直方向にも対を作るようになる．

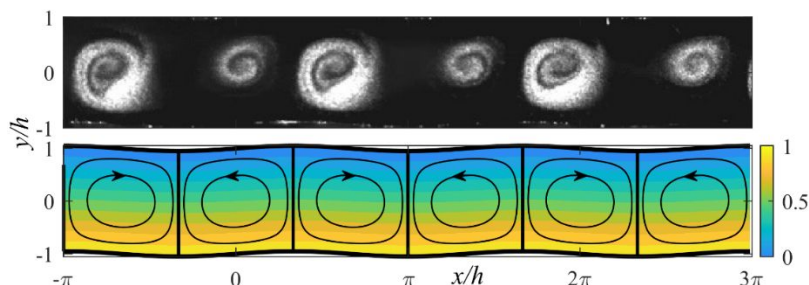


図7 上下壁に波打がある場合 ( $\Omega=0, Ra=50$ )

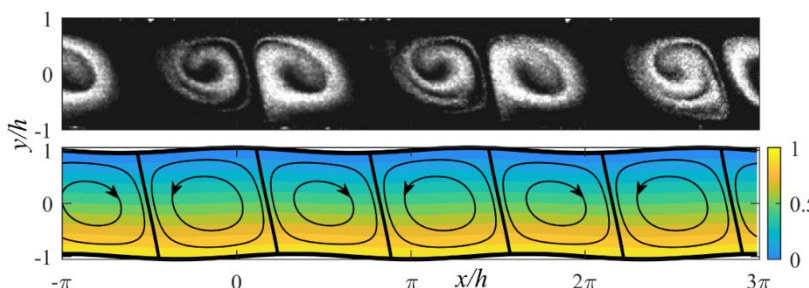


図8 上下壁に波打がある場合 ( $\Omega=\pi/2, Ra=50$ )

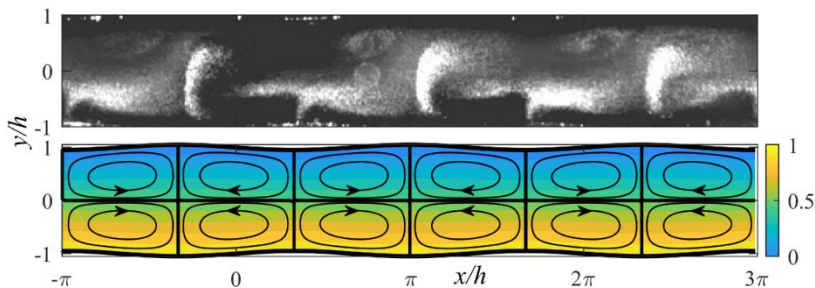


図9 上下壁に波打がある場合 ( $\Omega=\pi, Ra=50$ )



図10は上下壁の位相差による最大上昇速度変化を示しており、実験は解析と非常に良く一致しており、理論モデルの妥当性が確認される。これは、理論を用いて熱と運動量の最適な輸送条件が評価可能であることを意味する。

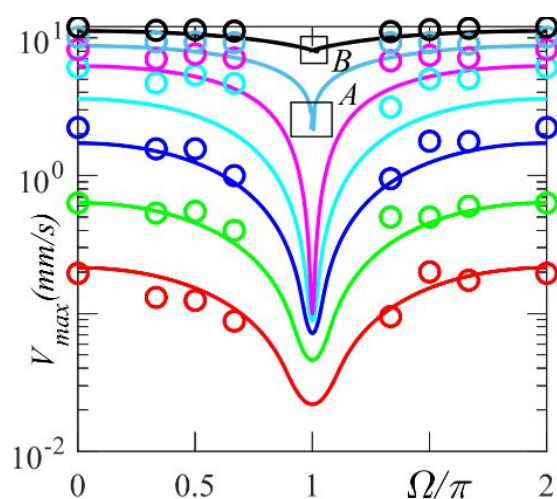


図10 上下壁の位相差による最大上昇速度変化

#### 参考文献

- (1) Inasawa, A., Taneda, K., Floryan, J.M., Experiments on Flows in Channels with Spatially Distributed Heating, *J. Fluid Mech.* 872 (2019), 177-197.
- (2) Inasawa, A., Hara, K., Floryan, J.M., Experiments on Thermal Drift, *Phys. Fluids* 33 (2021), 087116.
- (3) Abtahi, A., Floryan, J.M., Natural Convection in Corrugated Slots, *J. Fluid Mech.* 815 (2017), 537-569.
- (4) Floryan, J.M., Inasawa, A., Pattern Interaction Effect, *Sci. Rep.* 11 (2021), 14573.

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 1件）

1. 著者名 Ryohei Unno, Ayumu Inasawa	4. 巻 18-2
2. 論文標題 Direct numerical simulation of the stability of zero-pressure-gradient boundary layer over corrugated wall using the immersed interface method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JFST0024
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jfst.2023jfst0024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 片山滉, 稲澤歩
2. 発表標題 感温塗料による流れの温度分布計測
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第30期総会・講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Mikio Sakai, Ayumu Inasawa
2. 発表標題 Experiments on aerodynamic sound radiated from a row of protuberance in boundary layers
3. 学会等名 The 20th International Conference on Flow Dynamics (ICFD2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂井幹央, 稲澤歩
2. 発表標題 乱流境界層中の突起から生じる空力音に関する実験
3. 学会等名 日本機械学会 2023年度年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryohei Unno
2. 発表標題 Numerical experiments on the boundary-layer instability over corrugated wall
3. 学会等名 The 66th Workshop on " Investigation and Control of Transition to Turbulence ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉野健太郎
2. 発表標題 波打ちを有する水平スロットの自然対流に関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会第100期 流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本光祐
2. 発表標題 縦溝を有するチャンネル流に関する実験的研究
3. 学会等名 本機械学会関東支部 第62回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 玉野健太郎
2. 発表標題 水平スロット内の自然対流に対する表面形状の影響
3. 学会等名 日本機械学会関東支部 第29期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Inasawa A., Hara K., Floryan J.M.
2. 発表標題 Experiments on flows in a channel with surface corrInasawa A., Hara K., Floryan J.M.ugation and periodic heating
3. 学会等名 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM) (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究協力者	Floryan Jerzy  (Floryan Jerzy)		

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	ウエスタンオンタリオ大学		