

進行波状加熱冷却を用いた摩擦抵抗低減効果の数値解析

Friction Drag Reduction by Traveling Wave-Like Surface Heating and Cooling

○ 守 裕也 (慶大院) オプナー ジェローム (パリ第6大) 正 深淵 康二 (慶大)

Hiroya MAMORI, Keio University, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

Jérôme HÉPFFNER, UPMC, 75252 Paris Cedex 05, France

Koji FUKAGATA, Keio University

The skin-friction drag reduction effect of the traveling wave-like surface heating/cooling in the channel flow is investigated by using a linear analysis and a direct numerical simulation. The buoyancy force induced by the surface heating/cooling is expected to reduce the Reynolds shear stress in the region near the wall. The linear analysis shows that the downstream traveling wave can reduce the skin-friction drag in laminar flows. Amount of drag reduction is larger at lower Prandtl numbers. For a fully development turbulent channel flow the direct numerical simulation shows that the skin-friction drag is slightly reduced below the uncontrolled level by the high wavenumber of the downstream traveling wave.

Key Words: Turbulent flow, Flow control, Skin-friction drag reduction, Heating/Cooling, Linear analysis

1 背景・目的

近年、環境に関する様々な問題の深刻化の解決策の一つとして、エネルギーの有効利用を目的とした流体摩擦抵抗の低減制御が注目されている。乱流下では摩擦抵抗が著しく増加することが知られており、さまざまな低減制御が提案されているが、実用化には至った例は少ない。

完全発達した平行平板間流れにおいて、無次元の摩擦抵抗値 (D) は ⁽¹⁾⁽²⁾

$$D = \underbrace{2}_{D_{lam}} + \frac{3}{2} \text{Re} \int_{-1}^1 \underbrace{(-\overline{u'v'})(-y)}_{\Delta D} dy \quad (1)$$

と表わされる。右辺第一項が層流摩擦抵抗値 (D_{lam})、第二項が層流値からのずれ分 (ΔD) である。ここに Re はチャネル中心速度とチャネル半幅で定義されたレイノルズ数、 $-\overline{u'v'}$ はレイノルズせん断応力、 y は両壁面の中心を原点とした壁面方向の座標である。式 (1) は摩擦抵抗値の層流から見た増分がレイノルズせん断応力の重み付き積分で表わされることを示している。

この知見をもとに、Min ら ⁽³⁾ は上流方向進行波状吹出し・吸込みが、摩擦抵抗値を層流値以下 ($\Delta D < 0$) にすることを示した。線形解析と式 (1) から ΔD を予測し、直接数値シミュレーションによって確かめた。この制御は予め制御を加えるプレデターミンド制御であり、センサを必要としない利点を持つが、一方で吹出し・吸込みを進行波状に行う機構は簡単ではなく、そのままの実用化は難しいという欠点がある。

そこで壁面近傍における進行波状浮力制御に注目する。壁面からの進行波状加熱・冷却により浮力を発生させるこの制御は、進行波状吹出し・吸込み制御に比べ、実用化した場合の機構が単純かつ制御が容易になると考えられる。制御により生じた浮力により壁面付近における進行波状吹出し・吸込みと同様の流体運動が生じることに期待する。本研究では、壁面における進行波状加熱・冷却による浮力の摩擦抵抗低減効果を調査を目的とする。層流下での制御効果は線形解析と式 (1) を用い、乱流下では直接数値シミュレーション (DNS) を用いる。

2 線形解析

Figure 1 に解析対象とした 2 次元平行平板間流れを示す。代表長さ、速度、温度は有次元のチャネル半幅、層流中心速度、下に示す進行波状加熱・冷却の振幅をそれぞれ用いた。速度の境界条件は壁面において滑りなし条件、上壁面 (T_{w+}) と下壁面 (T_{w-}) における温度境界条件は制御入力である進行波状加熱・冷却であり、

$$T_{w\pm} = \mp \cos(k(x - ct)) \quad (2)$$

と表わされる。ここに、進行波の波数 k 、位相速度 c である。

本節では Min ら ⁽³⁾ と同様に線形解析及び式 (1) から、進行波状加熱・冷却による摩擦抵抗低減効果 (ΔD) を予測する ⁽⁴⁾。浮力項はブシネスク近似を用い、浮力の強さはリチャードソン数 (Ri) で示される。基礎流れには層流ポアズイユ分布を用いた。

Figure 2 に波数 k を変えた場合の ΔD をしめす。ここに Pr はプラントル数である。摩擦抵抗値は、下流方向進行波 ($c > 0$) で最小値を持ち、それより位相速度が大きい場合は摩擦抵抗値は正となる。一方で $c < 0$ 、 $c > 1$ では $\Delta D \approx 0$ となる。

Figure 3 にプラントル数 Pr を変化させた場合の ΔD を示す。プラントル数の減少とともに ΔD がより負になることが分かる。これは、壁面から流体へ熱がより伝導したことでより強い浮力が生じ、摩擦抵抗の原因である壁面近傍のレイノルズせん断応力がより低減されたためと考えられる。

3 直接数値シミュレーション

乱流下での制御効果を調べるために、3 次元完全発達平行平板間流れの直接数値シミュレーションを行った。流量一定として、層流中心速度に基づくレイノルズ数を $\text{Re} = 4200$ ($\text{Re}_\tau \approx 180$) とした。オリジナルの DNS コード ⁽⁵⁾ にブシネスク近似を施した浮力項を加えてある。壁面には線形解析と同様の境界条件を課した。

Figure 4 に摩擦抵抗値 \bar{D} と位相速度 c^+ の関係を示す。ここで $+$ は非制御時の摩擦速度を代表速度とした壁指標、 $(\bar{\cdot})$ は、 $t^+ \approx 1100 - 2200$ における時間平均量である。ここに $t^+ = 0$ を制御開始時刻とした。時間平均を計算する時刻 ($t^+ \approx 1100 - 2200$)

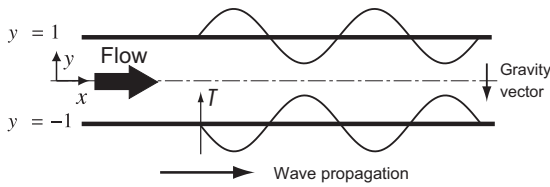


Fig. 1: Flow geometry, coordinate system and the traveling wave-like surface heating/cooling as the control input.

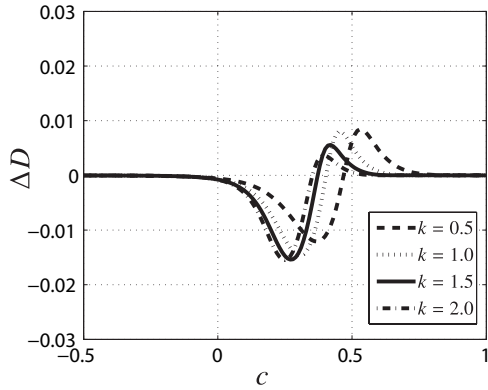


Fig. 2: The drag increment, ΔD , as a function of wavenumber, c , for different wavenumbers at $Re = 2000$, $Ri = 0.0945$, and $Pr = 0.71$.

では流れ方向及びスパン方向に空間平均した壁面摩擦抵抗値 D が十分定常に達している．ほとんどの位相速度に対し摩擦抵抗値は，非制御時の摩擦抵抗値を大きく下回ることにはなかったが， $c^+ \approx 32$, $k = 1.5$ においてわずかに摩擦抵抗値が非制御時を下回る摩擦抵抗低減 (-3.1%) が得られた．

Figure 5 にレイノルズせん断応力分布を示す．波数が増加とともにレイノルズせん断応力が低減されており， $k = 1.5$ ではわずかに非制御時を下回った．式 (1) より摩擦抵抗値 \bar{D} はレイノルズせん断応力の重み付き積分であるため，このパラメータでは摩擦抵抗が非制御時より低減されることが分かる．

4 結論

平行平板間流れにおける壁面進行波状加熱・冷却制御による摩擦抵抗低減効果を調査した．基礎流れが層流の場合には下流方向進行波によりパラメータによっては摩擦抵抗低減が得られた．またプラントル数を小さくすることでより大きな摩擦抵抗低減が得られた．一方で乱流下では，多くのパラメータで摩擦抵抗は増加したが，摩擦抵抗低減となるパラメータも存在することが分かった．

参考文献

- (1) Fukagata *et al.*, Phys. Fluids, **14** (2002), L73.
- (2) Bewley and Aamo, J. Fluid Mech., **499** (2004), 183.
- (3) Min *et al.*, J. Fluid Mech., **558** (2006), 309.
- (4) 守裕也ら, 日本流体力学会年会 2008 講演論文集 (CD-ROM), 神戸, 2008 年 9 月 4 日-7 日, Paper No. 33032, 4 pp.
- (5) Fukagata *et al.*, Phys. Fluids, **18** (2006), 051703.

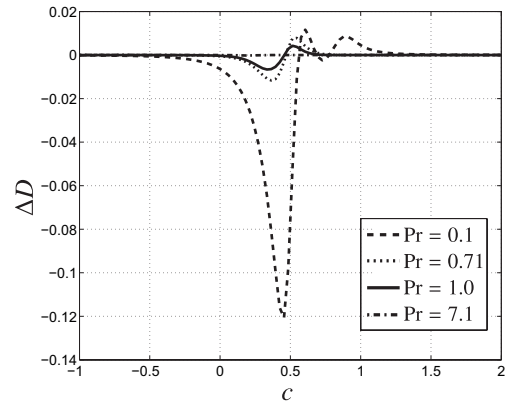


Fig. 3: The drag increment, ΔD , as a function of wavenumber, c , for different Prandtl numbers at $k = 0.5$, $Re = 2000$, and $Ri = 0.0945$.

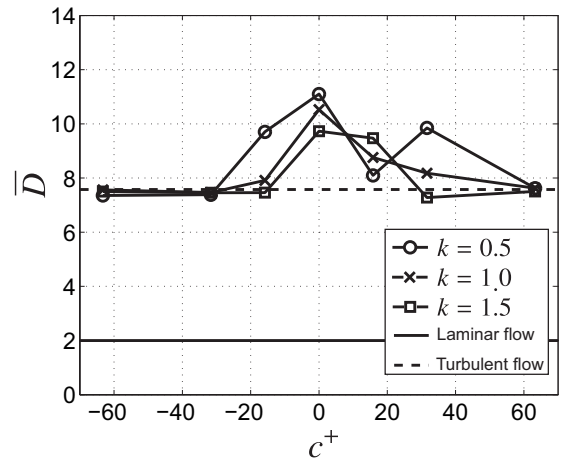


Fig. 4: Time-averaged skin-friction drag, \bar{D} , as a function of wavenumber, c^+ , in turbulent channel flow at $Re = 4200$, $Ri = 0.2$, and $Pr = 0.71$.

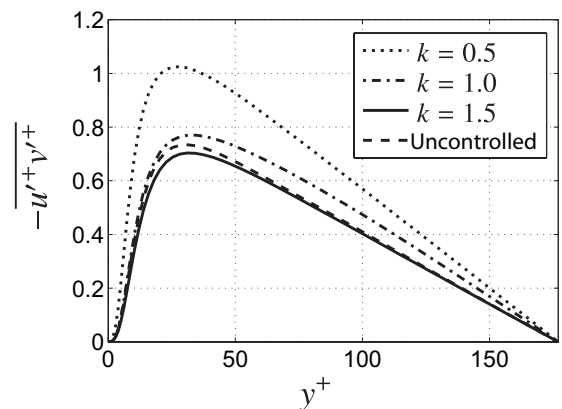


Fig. 5: Profile of the Reynolds shear stress at $c^+ \approx 32$, $Re = 4200$, $Ri = 0.2$, and $Pr = 0.71$.