

平行平板間流れにおける進行波状体積力による摩擦抵抗低減効果の線形解析

Linear Analysis of Drag Reduction by Traveling Wave-Like Body Force in Channel Flow

○守 裕也, 慶大院, 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail: hiroyamamori@z5.keio.jp

深潟康二, 慶大, 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail: fukagata@mech.keio.ac.jp

オプフナー・ジェローム, 慶大, 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1,

E-mail: jerome@fukagata.mech.keio.ac.jp

小尾晋之介, 慶大, 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1, E-mail: obsn@mech.keio.ac.jp

Hiroya Mamori, Dept. Mech. Eng., Keio Univ., 3-14-1, Hiyoshi, Yokohama 223-8522

Koji Fukagata, Dept. Mech. Eng., Keio Univ., 3-14-1, Hiyoshi, Yokohama 223-8522

Jerome Hœpffner, Dept. Mech. Eng., Keio Univ., 3-14-1, Hiyoshi, Yokohama 223-8522

Shinnosuke Obi, Dept. Mech. Eng., Keio Univ., 3-14-1, Hiyoshi, Yokohama 223-8522

A linear analysis is made for the skin-friction drag reduction in channel flow by traveling wave-like surface heating/cooling. The analysis reveals that downstream traveling waves can reduce the skin-friction drag. The buoyancy force induced by the surface traveling wave creates the disturbance fields of velocities, pressure and temperature. Due to a subtle effect of fluid viscosity, a phase lead of streamwise velocity disturbance (u') is induced. Therefore, the phases of u' and v' (wall-normal velocity disturbance) depart from quadrature, inducing a non-zero Reynolds shear stress near the walls, resulting drag reduction effect.

平行平板間流れにおける層流摩擦抵抗値 ($D_{lam} = 2$) からの増分 ΔD は, レイノルズせん断応力 ($-\overline{u'v'}$) を両壁面の中心を原点とした壁面方向 (y) の重み付き積分によってあらわされる⁽¹⁾.

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

この知見のもとに Min et al.⁽²⁾ は上流への進行波状吹出し・吸込みで $\Delta D < 0$ を達成した. 本研究では進行波状加熱・冷却により発生された浮力で摩擦抵抗を低減させることを目的とする. その際, 制御効果は線形解析と式 (1) により評価される.

壁面で進行波状加熱・冷却を $T_{w\pm}^* = \mp \cos(k(x^* - ct^*))$ と与える. ここで x^* は流れ方向座標, t^* は時間, k は波数, c は位相速度である. 基礎流れは層流ポアズイユ流を仮定した.

連続の式, Navier-Stokes 方程式, エネルギー式を攪乱が基礎流れに影響しない仮定のもとに線形化し, x 方向に周期的であるとしてフーリエ変換した. 本研究では $\text{Re} = 2000$, $\text{Gr} = 3.87 \times 10^5$, $\text{Pr} = 0.71$ とした. まず温度攪乱はパッシブスカラであるため独立に解く. 次に線形攪乱方程式を $\mathbf{A}\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{b}$ と表わす. \mathbf{A} はチェビ

シェフ微分行列を用いたシステム行列, $\hat{\mathbf{q}}$ はチェビシェフ選点で離散化した各成分のフーリエ係数のベクトル, \mathbf{b} は浮力項と境界条件を含むベクトルである. 定常解は $\hat{\mathbf{q}} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$ で求まり, 逆フーリエ変換から計算された各変動値により ΔD を予測する.

Figure 1 に c に対する ΔD を示す. 下流方向への進行波による摩擦抵抗低減が確認された. Figure 2 に, ΔD が最小値をとる $k = 1.5$, $c = 0.27$ の場合の $-\overline{u'v'}$ の分布を示す. 下壁面および上壁面付近で, 負および正の値をそれぞれとっている. これは進行波により u' の位相進みが発生することに起因することが位相関係を詳しく調べることにより明らかになった.

参考文献

- (1) K. Fukagata et al., "Contribution of Reynolds Stress Distribution to the Skin Friction in Wall-Bounded Flows," *Phy. Fluids* **14** (2002), L73-L76.
- (2) T. Min et al., "Sustained Sub-Laminar Drag in a Fully developed channel flow," *J. Fluid Mech.* **558** (2006), pp. 309-318.

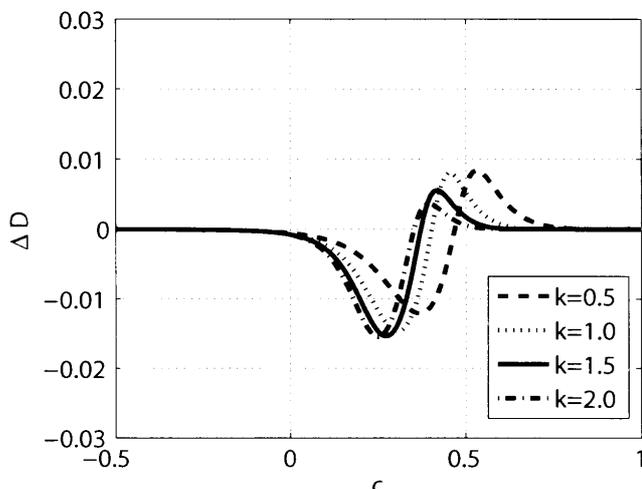


Fig. 1 Drag increment, ΔD , by the traveling wave-like surface heating/cooling as a function of wavespeed, c ; (a) varicose mode, (b) sinuous mode

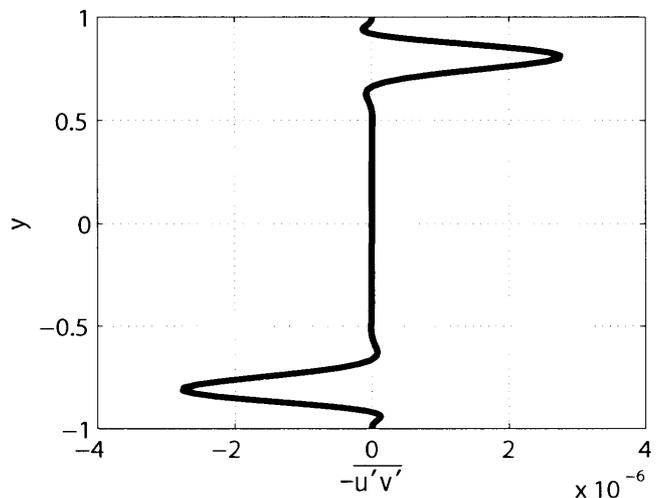


Fig. 2 The Reynolds shear stress distribution by the traveling wave-like surface heating/cooling for $k = 1.5$ and $c = 0.27$.