

平行平板間乱流におけるスパン方向壁面振動制御の壁間位相差が 抵抗低減効果に与える影響

Influence of phase difference of spanwise wall oscillation for turbulent channel flow

- 原田 友成, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, 4518547@ed.tus.ac.jp
 福留 功二, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, kfukudome@rs.tus.ac.jp
 守 裕也, 電通大, 東京都調布市調布ケ丘 1-5-1, mamori@uec.ac.jp
 山本 誠, 東理大, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, yamamoto@rs.kagu.tus.ac.jp
 Harada Tomonari, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo
 Koji Fukudome, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo
 Hiroya Mamori, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo
 Makoto Yamamoto, Tokyo University of Science, 6-3-1 Niijuku, Katsushika-ku, Tokyo

Effect of phase difference of oscillating walls on drag reduction effect in a fully developed turbulent channel flow is investigated by using direct numerical simulations. Three different controls are examined: Case 1, only lower wall oscillates; Case 2, upper and lower walls oscillate in “in-phase”; Case 3, the walls oscillate in “out-of-phase”. The oscillation amplitude and period are fixed at the optimal parameters suggested by Quadrio et al. (*J. Fluid Mech.*, 2004). In a friction Reynolds number of 110, drag reduction rates are 11.2%, 10.3%, and 10.2% for Cases 1, 2, and 3, respectively, whereas input energy for the control in Case 1 is a half of that in Cases 2 and 3. This drag reduction in Case 1 is considered owing to be an antisymmetric distribution of mean velocity and Reynolds shear stress between upper and lower wall sides.

1. 緒言

流体の摩擦抵抗が全推進抵抗に対して占める割合は航空機で 50%, 潜水艦で 90%, パイプラインで 100%と言われており, 省エネルギーや環境汚染の軽減の観点から摩擦抵抗低減に向けた様々な流体制御技術が提言されている¹⁾。

流体制御手法は能動制御と受動制御に分類でき, さらに能動制御はフィードバック制御²⁾とプレディターミンド制御³⁾に分類できる。フィードバック制御は各時刻の流れの状態に応じた制御入力を付与するため理論的には流れ場をより柔軟に制御できる。しかし, 摩擦抵抗低減に向けた制御を考慮すると非定常な流れ場の情報を時々刻々取得し, 縦渦構造などの制御を実現するために高精度なセンサとアクチュエータ等が必要となる。一方, プレディターミンド制御は予め決められた制御入力を流れに付与するため制御系が簡素になる。アクチュエータにおける出力の大きさや周波数応答にも限界があるため, 応答の正確さが限られている中でより高い摩擦抵抗低減効果を得られる制御手法が求められている。

本研究では優れた摩擦抵抗低減制御の開発に向け, プレディターミンド制御の一つである「スパン方向壁振動制御」に対して制御入力が摩擦抵抗低減に与える影響の調査を行う。先行研究として, Quadrio ら⁴⁾はスパン方向両壁同位相振動の周期と振幅を系統的に変化させ, 摩擦レイノルズ数 $Re_\tau = 200$ の流れにおいて振幅 $W_0^+ = 4.5$, 周期 $T_0^+ = 125$ で最大利得率と最大省エネルギー率を得ることを示した。ここで, Re_τ はチャネル半幅 δ と摩擦速度 u_τ により定義される。また, 上付き文字 (+) は粘性スケールでの無次元化を示す。焼野ら⁵⁾は, 時空間の周期性を有するスパン方向振動制御において, 条件抽出法による縦渦構造の解析を行った。その結果, 縦渦構造の回転と逆方向にスパン方向速度を付与する位相ではイジェクションの減少及びスウィープの増加が生じ, 順方向で付与する位相ではスウィープが著しく減少することを示した。Agostini ら⁶⁾は, スパン方向のエンストロフィー成分の増加が, ひずみ度の高い領域での渦の tilting と stretching をもたらすことを示した。しかし, 両壁の振動に位相差を与えた研究は, 著者らの知るところ行われていない。特に低レイノルズ域においては壁同士の影響が大きいと見られるため, 位相差が摩擦抵抗低減に影響を与える。そ

ここで, 本研究では異なる振動位相を有するスパン方向壁振動制御において, 摩擦抵抗低減効果を調査する。制御入力として与える振動の振幅と周期は, Quadrio ら⁴⁾の推奨値を用いる。

Table 1 Control parameters.

Case	Parameters			
	Lower side		Upper side	
	φ	k	φ	k
Case 1	1	0	0	0
Case 2			1	0
Case 3			1	1

2. 数値計算手法

2.1. 計算手法 計算対象は平行平板間内の流体を一定の圧力勾配によって駆動するポアズイユ乱流である。空間離散化は, スペクトル法を適用し, 流れ方向及びスパン方向には周期境界条件によるフーリエ級数, 壁面垂直方向にはチェビシエフ級数を用いて有限級数展開を行った。支配方程式は非圧縮性流体のナビエ・ストークス方程式と連続の式である。時間離散化は, 非線形項に 2 次精度 Adams-Bashforth 法を, 粘性項に Crank-Nicolson 法を用いる。座標系は流れ方向, 壁垂直方向, スパン方向にそれぞれ x, y, z とする。流れは $Re_\tau = 110$ において定常な乱流状態に次節で述べる制御を加えた。また, 計算領域 $L_x \times L_y \times L_z = 5\pi\delta \times 2\delta \times 2\pi\delta$, 格子点数 $N_x \times N_y \times N_z = 256 \times 97 \times 256$ とした。

2.2. 制御入力 本研究では壁面平行間乱流にスパン方向壁振動制御を行う。これは壁面を一樣にスパン方向に振動することで抵抗低減効果を得る制御手法である。各壁に与える制御入力 w_{wall} は

$$w_{wall} = W_0^+ \sin\left(\frac{2\pi\varphi}{T_0^+}t + k\pi\right) \quad (1)$$

である。ここで W_0^+ は振動振幅, T_0^+ は周期であり, Quadrio ら⁴⁾に倣いそれぞれ $W_0^+ = 4.5$, $T_0^+ = 125$ とした。表 1 に本研究で対象とする三種類の制御入力の条件を示す。また, 図 1 に制御入力の模式図を示す。本研究では, 片壁振動 (Case 1), 両壁同位相振動 (Case 2) および両壁逆位相振動 (Case 3) の 3 種を取り扱う。

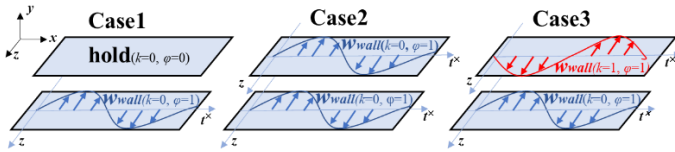


Fig. 1 Schematics of spanwise oscillation control.

Table 2 Drag reduction rates.

$Re_\tau=110$	w/o control	Case 1	Case 2	Case 3
Re_m	3254	3507	3477	3472
$C_f \times 10^3$	9.14	7.93	8.02	8.10
R_D [%]		11.2	10.3	10.2

3. 結果と考察

発達したチャンネル乱流にスパン方向振動制御を付与した抵抗低減効果について述べる。スパン方向振動制御効果の評価は以下で定義される抵抗低減率 R_D を用いる⁽⁶⁾。

$$R_D = \frac{W_p \text{Dean} - W_p \text{Control}}{W_p \text{Dean}} \times 100 \quad (2)$$

ここで W_p はポンプ動力、 $W_p \text{Dean}$ は非制御時のポンプ動力であり次の Dean⁽⁷⁾らの実験式を用いる。

$$C_f \text{Dean} = 0.073 Re_m^{-0.25} \quad (3)$$

ここで、 Re_m はバルクレイノルズ数 (流量) であり、平均速度 u_m とチャンネル幅 $2d$ によって定義される。また、摩擦係数 $C_f (= 2\tau_w / \rho u_m^2)$ は、壁面剪断応力 τ_w と密度 ρ 、及び平均速度 u_m より算出する。

表 2 に、 $Re_\tau=110$ における Re_m 、 C_f および R_D を示す。これらは各種制御を行い十分時間が経過した流れにおいて算出した。制御により 3 ケース全てにおいて摩擦係数が減少し流量が増加している。摩擦係数の減少量と流量の増加量は、片壁振動 (Case 1) で最大となり、両壁同位相振動 (Case 2)、両壁逆位相振動 (Case 3) ではほぼ同等の値となる。両壁同位相振動 (Case 2) における C_f の低下率は 12.3% であり Quadrio ら⁽⁴⁾の 18.3% に比べ小さい。これはレイノルズ数が異なるためである。Case 2 と 3 における抵抗低減率は同程度であることから、両壁を振動させる場合、振動の位相差が抵抗低減に与える影響は小さいことが分かる。

図 2(a) に流れ方向速度分布を、同摩擦レイノルズ数における非制御時の塚原ら⁽⁸⁾の結果とともに示す。非制御時において、本研究の値と塚原らの値はほぼ一致する。両壁振動 (Case 2 と 3) において非制御時に比べ壁面から離れた領域の流速増加が共に観察され、両者の値はほぼ同等の分布を示す。一方、片壁振動 (Case 1) は上壁側と下壁側の分類を平均速度勾配がゼロとなる位置で行い算出している。下壁側では著しい流速増加が観察される。しかし、上壁側は流速が低下し、非制御時の速度に比べ対数速度分布の値と近い分布を示す。

図 2(b) にレイノルズ応力の分布を示す。レイノルズ応力は非制御時及び二種の両壁振動 (Case 2 と 3) で、両壁振動を加えることで壁面近傍のピーク値が若干低下する。これにより、摩擦係数が低下する。一方、片壁振動 (Case 1) では下壁側での大きな減少と上壁側での増加より上下壁で非対称な分布を示す。この非対称な分布は、スパン方向の回転を付与したポアズイユ流に類似している⁽⁹⁾。

以上の結果より、片壁振動において振動壁側で乱れの減少と静止壁側で乱れの増加を示し、上下非対称な流れが得られ、全体として両壁振動の場合と同等の摩擦抵抗低減効果が得られることが分かった。

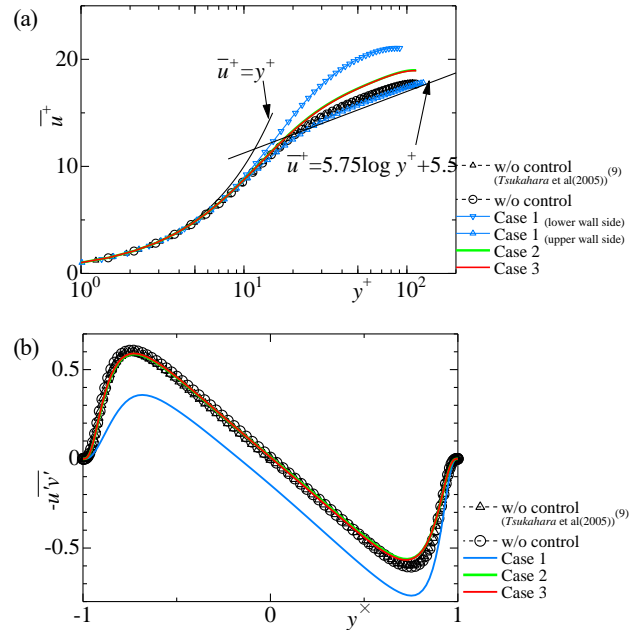


Fig. 2 Turbulent statistics: (a) mean velocity, (b) Reynolds shear stress.

4. 結言

本研究では直接数値シミュレーションを用いて、異なる振動位相を有するスパン方向壁振動制御の摩擦抵抗低減効果に与える影響を調査し、次の結言を得た。抵抗低減率は、両壁を同位相及び逆位相の振動制御で同等の値を示す。一方、下壁のみの壁面振動制御での抵抗低減率は、両壁振動と同等の値となる。また、片壁振動の場合、下壁側の乱れとレイノルズ応力の著しい減少と、上壁側の乱れの増加が見られた。

参考文献

- (1) M. Gad-el-Hak, "Interactive control of turbulent boundary layers – A futuristic overview", *AIJAA J.*, Vol.32, No. 9, pp. 1753-1765, 1994.
- (2) 笠木, "壁乱流のフィードバック制御", *ながれ*, 25, pp. 13-22 2006.
- (3) 焼野ら, "時空間的周期性を有する壁乱流プレディターミンド制御の摩擦抵抗低減機構", *機論 B* 76, 764, pp. 555-562, 2011.
- (4) M. Quadrio and P. Ricco, "Critical assessment of turbulent drag reduction through spanwise wall oscillations", *J. Fluid Mech.*, Vol. 521, pp. 251-271, 2004.
- (5) L. Agostutini et al., "The turbulence vorticity as a window to the physics of friction-dragreduction by oscillatory wall motion", *Int. J. Heal Fluid Flow*, 51, pp. 3-15, 2015.
- (6) H. Mamori et al., "Effect of the parameters of traveling waves created by blowing and suction on the relaminarization phenomena in fully developed turbulent channel flow", *Phys. Fluid*, Vol. 26, 015101, 2014.
- (7) R. B. Dean et al., "Reynolds number dependence of skin friction and other bulk flow variables in two-dimensional rectangular duct flow", *J. Fluid Mech.*, Vol. 100, pp. 215-222, 1978.
- (8) T. Tsukahara et al., "DNS of turbulent channel flow at very low Reynolds numbers", *In Proc. of the Forth Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena*, Williamsburg, USA, pp. 935-940, 2005.
- (9) O. Iida et al. "Low Reynolds number effects on rotating turbulent Poiseuille flow" *Phys. Fluids* Vol. 22, 085106, 2010.