

# スパン方向進行波状壁面変形を用いた 抵抗低減の直接数値シミュレーション

Direct Numerical Simulation of Drag Reduction by means of Spanwise Traveling Wave-Like Wall Deformation

- 富山 暢仁, 慶大院, 神奈川県港北区日吉 3-14-2, E-mail : tomiyama@fukagata.mech.keio.ac.jp  
深淵 康二, 慶大, 神奈川県港北区日吉 3-14-2, E-mail : fukagata@mech.keio.ac.jp  
Nobuhito TOMIYAMA, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522  
Koji FUKAGATA, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama 223-8522

Drag reduction effect in turbulent flow in a channel with spanwise traveling wave-like wall deformation, i.e. "moving riblets," is investigated by means of direct numerical simulation (DNS). This control method is expected to have larger drag reduction effect than that of the ordinary riblets. Regardless of the parameters of the wave, drag reduction of several percents was obtained: maximum drag reduction of 11% and maximum net energy saving of 10%. In order to analyze the contribution of the spanwise-periodic component, phase averaging was taken and discussed. The decreases of the turbulent kinetic energy and streamwise vorticity fluctuation are observed and the peak of them was shifted away from the wall at every phase of the wave. These observations indicate that the quasi-streamwise vortex in the region near the wall is weakened and moved away from the wall due to the wave.

## 1. 緒言

将来のエネルギー利用の効率化へ向けて、乱流における抵抗を低減する手法が数多く提案されてきた。流れに沿って壁面に溝を入れるリブレット<sup>(1)</sup>や界面活性剤の添加<sup>(2)</sup>のような受動的な手法だけでなく、近年では能動的な制御手法が注目されている。例えば、Nakanishi *et al.*<sup>(3)</sup>は平行平板間乱流において流れ方向に両側壁面を進行波状に変形させることで再層流化が起こることを確認し、最大で抵抗低減率として約 70%、エネルギー削減率として約 65% を達成した。また、壁面の摩擦応力に基づいたフィードバック制御則による壁面変形<sup>(4)</sup>や、スパン方向への定在波状壁面変形<sup>(5)</sup>などでも数%の抵抗低減が報告されている。これらは壁面変形による抵抗低減効果の可能性を大きく支持するものである。

壁乱流の準秩序構造が明らかになるにつれて、特に能動的な制御では壁面近傍の渦の生成運動を抑制あるいは安定化することによって抵抗低減が達成されている。この考え方に基づけば、例えばこれまで受動制御とされていたリブレットでも、その溝をスパン方向へ動かすことによってより積極的に渦運動にアプローチできればさらに高い抵抗低減の可能性を有していると考えられる。リブレットでは渦が入り込めない溝によって壁面へ向かう高速流体の渦運動(スweep運動)が生じる面積を制限することで抵抗低減を実現しているが、さらに壁面運動を付与することで渦生成サイクルの抑制などといったリブレットとは違う乱流構造の変化を期待できる。

以上の背景を踏まえて、本研究ではスパン方向への進行波状壁面変形チャンネルにおける完全発達乱流を直接数値シミュレーション(DNS)で再現し、抵抗低減の可能性を調査する。また同時に壁面変形による流れ場の影響を検討することを目的とする。

## 2. 計算手法

### 2.1 座標変換

壁面変形するチャンネルを扱えるように、デカルト座標系  $x_i$  に対して以下の座標変換<sup>(6)</sup>を行った座標系  $\xi_i$ ,

$$x_1 = \xi_1, \quad x_2 = \xi_2(1 + \eta_u) + \eta_d, \quad x_3 = \xi_3, \quad (1)$$

を考える。ここで下付文字 1~3 はそれぞれ流れ方向、壁垂直方向およびスパン方向を表す。また、 $\eta_u, \eta_d$  はそれ

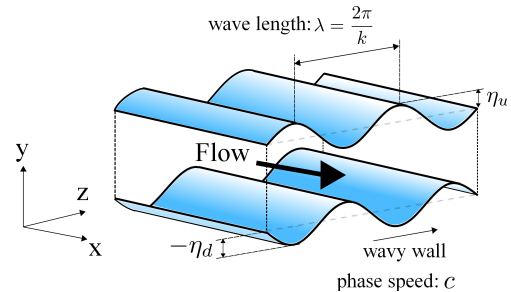


Fig. 1: The schematic of wall deformation

ぞれ上側, 下側の壁面変形量である。チャンネル内の領域は  $0 + \eta_d \leq x_2 \leq 2 + \eta_u$  で変化するが、 $\xi_i$  座標系では  $0 \leq x_2 \leq 2$  で固定される。すなわち  $\xi_i$  座標系で固定値の計算格子を切ることで、 $x_i$  座標系では壁面変形に従って計算格子が伸縮するようにした。支配方程式は非圧縮の Navier-Stokes 方程式および連続の式である。座標変換による  $\xi_i$  座標系でのこれらの支配方程式は、

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{\partial (u_i u_j)}{\partial \xi_j} - \frac{\partial p}{\partial \xi_i} + \frac{1}{\text{Re}_b} \frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi_j \partial \xi_j} - \frac{dP}{d\xi_1} \delta_{i1} + S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial \xi_i} = -S, \quad (3)$$

となる。ここで局所圧力勾配  $\partial p / \partial \xi_i$  に対し、 $dP / d\xi_1$  は駆動力となる平均圧力勾配である。支配方程式の変数  $t, x_i, u_i, p$  などは全て壁面変形がないときのチャンネル半幅  $h$ , バルク平均速度  $2U_b$ , および動粘性係数  $\nu$  で無次元化されている。また、壁面変形による付加項  $S_i, S$  は、

$$S_i = -\varphi_t \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial \xi_2} - \phi_j \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial \xi_2} - \phi_j \frac{\partial p}{\partial \xi_2} \delta_{ij} + \frac{1}{\text{Re}_b} \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial (\phi_j \phi_j)}{\partial \xi_2} \frac{\partial u_i}{\partial \xi_2} + \phi_j \phi_j \frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi_2^2} + 2\phi_j \frac{\partial^2 u_i}{\partial \xi_j \partial \xi_2} \right\}, \quad (4)$$

$$S = \phi_j \frac{\partial u_j}{\partial \xi_2}, \quad (5)$$

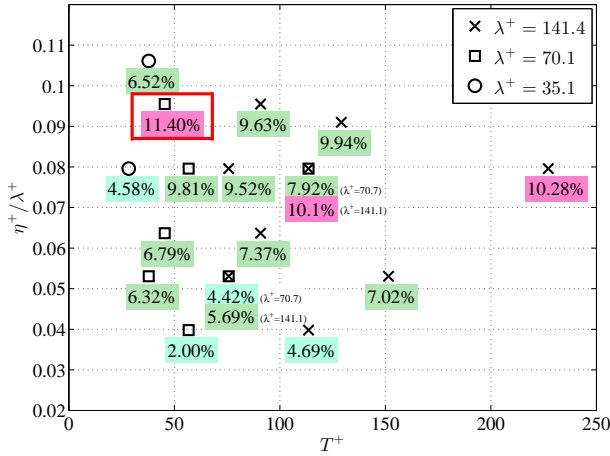


Fig. 2: Drag reduction rate due to parameters for wall deformation

となる．ここで  $\phi_j, \varphi_j, \varphi_t$  は，

$$\phi_j = \varphi_j - \delta_{j2}, \quad (6)$$

$$\varphi_j = \frac{\partial \xi_2}{\partial x_i} = \begin{cases} -\frac{1}{1 + \eta_u} \left( \xi_2 \frac{\partial \eta_u}{\partial \xi_j} + \frac{\partial \eta_d}{\partial \xi_j} \right), & \text{for } j = 1, 3 \\ \frac{1}{1 + \eta_u}, & \text{for } j = 2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\varphi_t = \frac{\partial \xi_2}{\partial t} = -\frac{1}{1 + \eta_u} \left( \xi_2 \frac{\partial \eta_u}{\partial t} + \frac{\partial \eta_d}{\partial t} \right), \quad (8)$$

である．本計算では，流れ方向の壁面変形の計算を行った Nakanishi *et al.*<sup>(3)</sup> の計算コードにスパン方向への壁面変形寄与項を付加して開発した．空間離散化には二次中心差分，時間積分には三次ルンゲクッタ法およびクランク・ニコルソン法を用いた．壁面変形量  $\eta_u, \eta_d$  に関する項は次節で示す境界条件から式 (10) を代入した．

## 2.2 境界条件

壁面における速度境界条件は下側壁面において，

$$u_1 = u_3 = 0, \quad u_2 = \frac{\partial \eta_d}{\partial t} = a \cos(k(\xi_3 - ct)), \quad (9)$$

とし，図 1 に示すように進行波はチャンネル中心で上下対称 ( $\eta_d = -\eta_u$ ) とした．ここで  $a$  は変形速度振幅， $k$  は  $z$  方向長さ  $\pi$  中の波数， $c$  は進行波の位相速度であり，これら 3 変数をパラメータとした．なお，式 (9) を時間積分することで壁面変形量，

$$\eta_d = -\frac{a}{kc} \sin(k(\xi_3 - ct)), \quad (10)$$

が得られる．計算領域は壁面変形がないときで  $L_x \times L_y \times L_z = 2\pi \times 2 \times \pi$  である．格子数は  $N_x \times N_y \times N_z = 128 \times 96 \times 256$ ，レイノルズ数は  $Re_b = 5600$  と設定した．計算は流量一定の条件で行い，平均圧力勾配の増減で抵抗値を評価した．

## 3. 結果

### 3.1 抵抗低減効果

図 2 に各パラメータにおける抵抗低減率  $R_D$ ，

$$R_D = \frac{\mathcal{P}_u - \mathcal{P}}{\mathcal{P}_u} \times 100 \quad [\%], \quad (11)$$

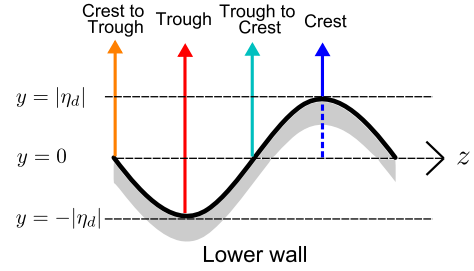


Fig. 3: Each phase where statistic is taken on cross section,  $y - z$  plane

を示す．ここで  $\mathcal{P}$  は平均圧力勾配の時間平均  $\mathcal{P} = -dP/d\xi_1$  で， $\mathcal{P}_u$  は壁面変形がないときの平均圧力勾配である．横軸は進行波周期  $T^+ = 2\pi/k^+c^+$ ，縦軸は進行波波長と壁面変形量の比  $\eta^+/\lambda^+ = a^+/2\pi c^+$  とした．なお， $(+)$  は壁面変形がないときの摩擦速度  $u_\tau$  で定義される粘性スケールを表す．

図 2 に示すようにスパン方向への進行波状壁面変形では，抵抗低減率は数% から 10% 程度であるが，各パラメータに依存することなく抵抗が低減した．これはパラメータに依らず壁面変形が流れ場に同じような影響を及ぼすためだと考えられる．そこで以降では最大抵抗低減を達成したケース ( $T^+, \lambda^+, \eta^+$ ) = (45, 70, 6.75) (図 2 中赤枠) について詳細に解析を行った．まず，

$$R_S = \frac{W_0 - (W_p + W_a)}{W_0} \times 100 \quad [\%], \quad (12)$$

で定義されるエネルギー削減率  $R_S$  を計算した．ここで  $W_0, W_p$  はそれぞれ壁面変形がないときとあるときの駆動エネルギー， $W_a$  はアクチュエーションのエネルギーである．取り上げたケースでは約 9.7% のエネルギー削減率を得た．これは壁面変形量が比較的小さく，また位相速度も主流に対して十分小さいために壁面変形に必要なエネルギーを抑えることができたためだと考えられる．

### 3.2 乱流統計量

進行波状壁面変形が流れ場に及ぼす影響を調査するため，同じケースについて乱流統計量を考察した．壁面変形によるスパン方向への周期的な要素とそれ以外のラン

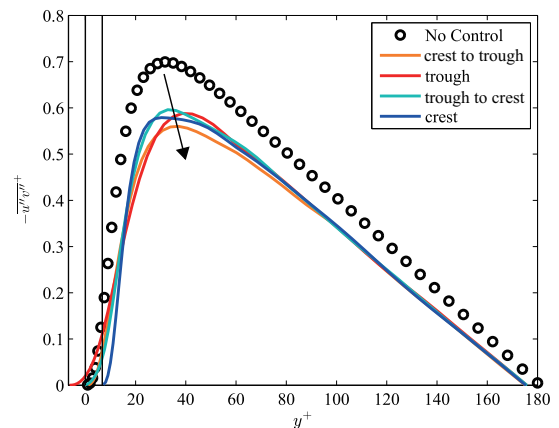


Fig. 4: Distribution of random-Reynolds shear stress  $-u''v''^+$  at each phase.

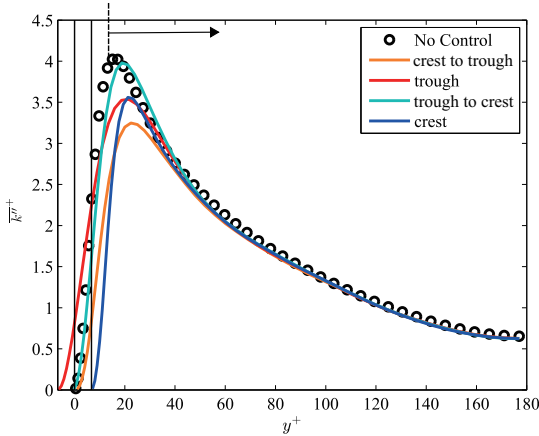


Fig. 5: Random turbulent kinetic energy  $\overline{k''+}$  at each phase.

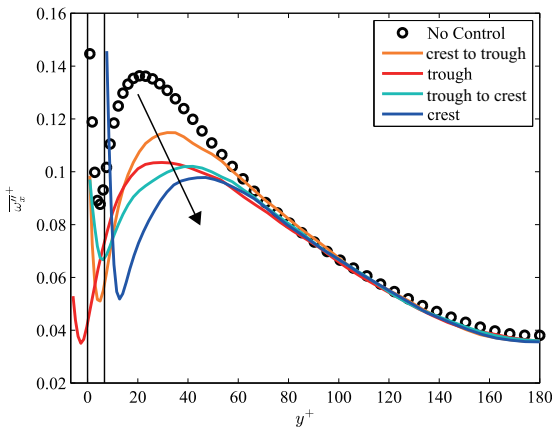


Fig. 6: Random streamwise vorticity fluctuation  $\overline{\omega_x''+}$  at each phase.

ダムな要素を区別して考えるために位相平均,

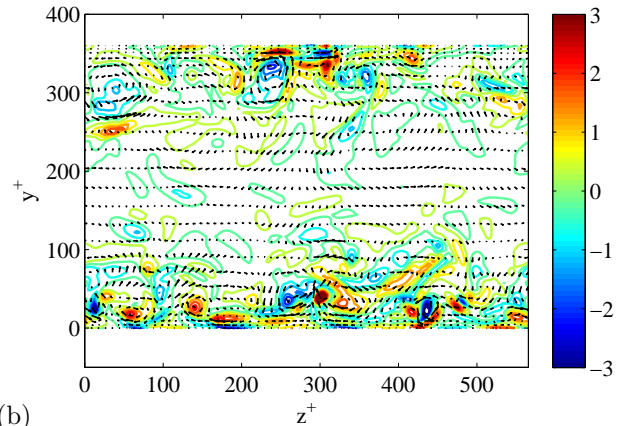
$$u_i(x, y, z, t) = \langle u_i(\phi, y) \rangle + u_i''(x, y, z, t), \quad (13)$$

を用いた．ここで， $\langle \cdot \rangle$  は位相平均成分を， $(\cdot)''$  はランダム成分を示す．位相  $\phi$  は  $\phi + 2n\pi = k(z - ct)$  で定義した．また局所的な流れ場の影響を調べるために，図 3 に示すように下側壁面の山 (crest), 谷 (trough),  $y = 0$  かつ山へ進行するところ (trough to crest) および  $y = 0$  かつ谷へ進行するところ (crest to trough) の 4 箇所について統計量を取った．なお計算座標である  $\xi_i$  系から  $x_i$  系に戻した座標系で評価を行った．図 4 にレイノルズせん断応力のランダム成分の位相平均値  $-\overline{u''v''+}$  を示す．それぞれの箇所においてレイノルズせん断応力が小さくなっており，抵抗低減に寄与していると考えられる．図 5 に乱流運動エネルギーのランダム成分の位相平均値  $\overline{k''+}$ ,

$$\overline{k''+} = \frac{1}{2} (\overline{u''u''+} + \overline{v''v''+} + \overline{w''w''+}) \quad (14)$$

を示す．いずれの箇所でもわずかにそのピークが壁面から離れていることが分かる．また， $y = 0$  かつ山へ進行する箇所を除いて乱流運動エネルギーの生成が抑制されているおり，抵抗低減の要因であると考えられる．図 6

(a)



(b)

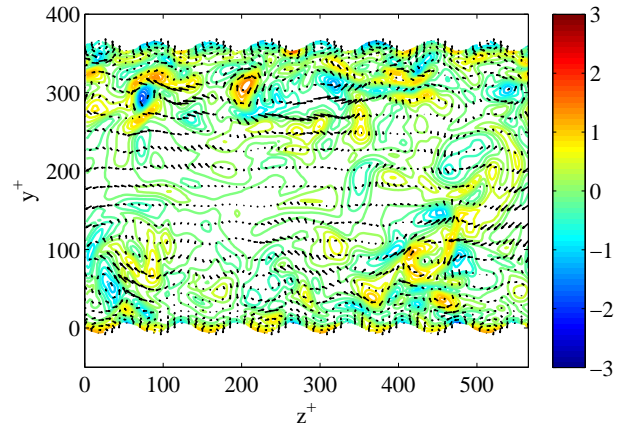


Fig. 7: Distribution of instantaneous streamwise vorticity  $\omega_x$  and velocity vector  $(v, w)$  on the cross section: (a) no control (b) wall deformation.

に流れ方向の渦度変動のランダム成分の位相平均値  $\overline{\omega_x''+}$  を示す．レイノルズせん断応力と同様に，それぞれのところで渦度変動が抑えられ，かつそのピークが壁面から離れていることが分かる．壁面変形ないチャンネルの場合，流れ方向の渦度変動のピーク  $y^+ \approx 20$  と平均的な渦中心位置はほぼ一致することが知られている<sup>(7)</sup> が，壁面変形によって渦中心が壁面から遠ざかったことが抵抗低減につながったと考えられる．

### 3.3 瞬時場の可視化

図 7 に同様のケースにおける  $y - z$  断面での瞬時の流れ方向の渦度  $\omega_x$  と速度ベクトル  $(v, w)$  を可視化した．図 7(a) と (b) を比較すると，壁面変形するときの方が特に壁面近傍での渦の強度が弱まっており，渦中心が壁面から離れていることが分かる．これは図 5 と図 6 での考察を支持するものであり，さらに抵抗低減のメカニズムにおいてリブレットとは違うということが言える．リブレットでは渦が溝に入り込めないことによって摩擦抵抗低減を実現するが，スパン方向への壁面変形では進行波によって渦を壁面から遠ざけることによってそれを実現していると考えられる．

#### 4. 結言

チャンネル乱流におけるスパン方向進行波状壁面変形の抵抗低減効果を調べるため直接数値シミュレーションを行い、以下の結論を得た。

- ・ 壁面変形速度や壁面変形量を決めるパラメータに依らず抵抗低減を達成し、最大で抵抗低減率 11.4%、エネルギー削減率 9.4% を得た。
- ・ リブレットでの抵抗低減のメカニズムとは違い、壁面変形によって乱流運動エネルギーや渦の生成する位置を壁面から遠ざけることで抵抗低減を実現したと考えられる。

#### 参考文献

- (1) Choi, H., Moin, P., and Kim, J., “Direct numerical simulation of turbulent channel flow over the riblets”, *J. Fluid Mech.*, **255** (1993), 503-539.
- (2) White, C. M. and Mungal, M. G., “Mechanism and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **40** (2008), 235-256.
- (3) Nakanishi, R., Mamori, H., and Fukagata, K. “Relaminarization of turbulent channel flow using traveling wave-like wall deformation”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **35** (2012), 152-159.
- (4) Endo, T., Kasagi, N., and Suzuki, Y., “Feedback control of wall turbulence with wall deformation”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **21** (2000), 568-575.
- (5) Mito, Y. and Kasagi, N., “DNS study of turbulence modification with streamwise-uniform sinusoidal wall-oscillation”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **19** (1998), 470-481.
- (6) Kang, S. and Choi, H., “Active wall motions for skin-friction drag reduction”, *Phys. Fluids*, **12** (2000), 3301-3304.
- (7) Kim, J., Moin, P., and Moser, R., “Turbulence statistic in fully developed channel flow at low Reynolds number”, *J. Fluid Mech.*, **177** (1987), 133-166.