

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*

焼野 藍子^{*1}, 長谷川 洋介^{*1}, 笠木 伸英^{*2}

Mechanism of Drag Reduction by Pre-determined Spatio-Temporally Periodic Control of Wall Turbulence

Aiko YAKENO ^{*3}, Yosuke HASEGAWA ^{*3} and Nobuhide KASAGI ^{*3}

^{*3} Department of Mechanical Engineering, The University of Tokyo.
Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan.

We evaluate pre-determined controls with temporally- and spatially-periodic spanwise velocity inputs at the wall in a fully developed turbulent channel flow. The spatially-periodic control generally achieves better than the temporally-periodic one, which is conventionally called the spanwise wall-oscillation control. Particular attention is paid to the Reynolds stress generation, which dominates the skin friction. We apply a conditional sampling technique in order to clarify the response of the Reynolds stress around a near-wall longitudinal vortex to the spanwise control input. Quadrant analysis of the Reynolds stress shows that each of the phase-dependency of Q2 and Q4 events around a longitudinal vortex is totally different. Based on the present knowledge, different drag reduction mechanisms in the two controls are discussed.

Key Words : Wall turbulence, Flow control, Friction drag reduction, Coherent structure

1. 序 論

近年, 計算機性能の向上や流体計測技術の発達とともに, 壁近傍の乱流準秩序構造の物理的機構が徐々に明らかになりつつある. それに伴い, 乱流を自在に制御することによって壁面摩擦を低減する試みも多くなされてきた. 中でもアクティブ制御は, 壁面に設置したアクチュエータなどを駆動し, 流体運動へ直接作用する制御手法であり, 主に数値計算においてその効果が実証されている.

アクティブ制御は, 更にフィードバック制御とプレディターミンド制御に分けられる. 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, 極めて少ない投入エネルギーにより流れ場を柔軟に制御できると考えられる. Yoshino *et al.* (2008)⁽¹⁾ は, 壁近傍の縦渦構造を対象として, せん断応力センサと変形アクチュエータを壁面で駆動させ, 世界で初めて室内実験においてその効果を実証した. しかし, フィードバック制御は, 縦渦構造を捉え, 操作するために多数の微

小センサ・アクチュエータ群を要し, 現時点では製造技術やコストなど, 実用上の課題が存在する.

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ものであり, 制御系が簡素になるという利点を持つ. その抵抗低減機構に関しては未解明な点が多く残されているが, 高い摩擦抵抗低減率を得られるため, 近年注目が集まっている⁽²⁻⁴⁾. しかし, 従来提案されているプレディターミンド制御は大きな投入エネルギーを要し, 正味のエネルギーの利得は小さいことが課題である⁽⁵⁾.

以上の背景から, 本研究では, より優れた制御効果が得られる新たなプレディターミンド制御則の開発に取り組んでいる. そのために, 時空間周期性を有する制御入力が壁乱流準秩序構造に与える影響を解明し, 最終的には摩擦抵抗低減制御に関する一般的な設計指針の確立を目指している. 本報では, 特にスパン方向制御入力に注目し, その制御効果と制御機構について, 平行平板間乱流の直接数値計算を通じて検討した結果を報告する.

2. 時空間周期制御

プレディターミンド制御の先駆けとして, スパン方向壁振動制御⁽²⁾がある. 壁面上での制御入力 w_{wall} は, 次式で与えられる.

*原稿受付 2009年02月10日.

*¹ 正員, 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1).

*² 正員, フェロー, 東京大学大学院工学系研究科.

E-mail: yakeno@thtlab.u-tokyo.ac.jp

$$w_{wall} = W_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (1)$$

式(1)に従い、壁全体をスパン方向に振動させることで、最大で45%の摩擦抵抗低減が得られる⁶⁾。以下、上記の制御則を時間周期制御と呼ぶ。

近年、新たな制御法として、次式で与えられる、空間的に周期性を有する制御入力提案された^{6,7)}。以下、この制御則を空間周期制御と呼ぶ。

$$w_{wall} = W_0 \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_x} x\right) \quad (2)$$

空間周期制御の模式図を図1に示す。空間周期制御は、時間周期制御と類似の制御機構を有すると予想されるが、時間周期制御に比べて高い摩擦抵抗低減率が得られることが明らかにされている^{6,7)}。

時間周期制御の摩擦抵抗低減機構に関しては、従来多くの研究例がある。Baron & Quadrio⁸⁾は、縦渦構造とその周りの低速ストリークの位置関係の変化に言及している。また、Choi *et al.*⁹⁾は、縦渦構造周りのストリーク構造がスパン方向の壁速度により大きく変形することを示した。しかし、これら乱流構造の変化が、どの程度摩擦抵抗低減に影響を与えるかについて、定量的な議論はされていない。

Fukagata *et al.*¹⁰⁾は、十分発達した乱流場において、摩擦抵抗係数 C_f ($= 2\tau_w / \rho U_b^2$) は、以下の式に示す積分式 (FIK 恒等式) で表されることを示した。

$$C_f = \frac{12}{\text{Re}_b} + 12 \int_{2\delta} (1-y)(-\overline{u'v'}) dy \quad (3)$$

ここで、変数はチャンネル半幅 δ と二倍のバルク流速 $2U_b$ によって無次元化されている。ここで、右辺第一項は層流時の C_f で、第二項が乱流の寄与を示している。これより、式(3)の右辺第二項に現れるレイノルズ応力の重み付き積分に注目することで、乱流構造の変化による摩擦抵抗低減への寄与を定量的に示すことができる。

そこで本報では、時間周期制御と空間周期制御に焦点を当て、振幅 W_0 、周期 T 、波長 λ_x を系統的に変化させることで、その制御効果の違いを明らかにする。次に、条件付き抽出法により、各位相において、スパン方向制御入力が縦渦構造、及びその周囲のレイノルズ応力分布に与える影響を観察し、スパン方向制御入力による摩擦抵抗低減機構を議論する。また、上記の解析を通して、二つの制御則の共通点と相違点を明らかにする。

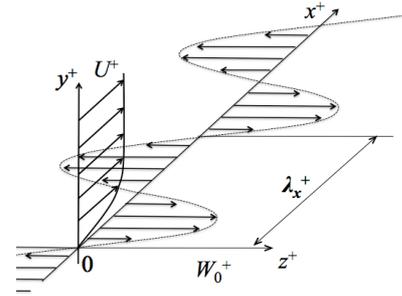


Fig. 1 Schematic of spatially-periodic control.

3. 制御評価指標

これまで、制御則の評価には摩擦抵抗低減率が主に用いられてきた。一方、現実の系においては、消費エネルギーやコストの上で利得を得るためには、制御に要する投入エネルギー、制御系の要素機器効率、ハードウェアの製造コスト等を考慮する必要がある。そこで本研究では、摩擦抵抗低減率 R に加えて、省エネルギー率 S 、利得率 G を導入し、制御則の評価を行う。

質量流量一定の条件下において、圧力勾配により駆動されるチャンネル流を考える。ポンプ動力 P を、次のように定義する。

$$P = \int_{2\delta} \left(-\bar{u}(y) \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) dy \quad (4)$$

今、流れ場に制御を加えることで、ポンプ動力が非制御時の値 P_0 から制御時の値 P へと変化したとする。下付きの 0 は非制御時の値を示す。また、制御に伴う投入エネルギーを P_m とする。

以上から、摩擦抵抗低減率 R 、省エネルギー率 S 、利得率 G をそれぞれ以下のように定義する。

$$R = (P_0 - P) / P_0 \quad (5)$$

$$S = (P_0 - P - P_m) / P_0 \quad (6)$$

$$G = (P_0 - P) / P_m \quad (7)$$

時間周期制御では、 $W_0^+ = 4.5$ 、 $T^+ = 125$ において S と G は最大となり、それぞれ $S = 0.07$ 、 $G = 1.7$ となることが知られている⁶⁾。ここで上付きの + は粘性スケールでの無次元化を表す。その他のプレディターミンド制御則では、フィードバック制御と同等の $S \sim 0.2$ が得られる例もあるが、いずれの制御においても、 G は最大でも 5 程度であり、フィードバック制御の値 $G \sim 100$ ¹¹⁾ に対し著しく劣る。

以上の比較より、プレディターミンド制御において投入エネルギーの低減が大きな課題であることが分かる。

4. 計算手法

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。流れ方向とスパン方向に周期境界条件を課した。上下壁において、式(1), (2)で定義されるスパン方向制御速度 w_{wall} を境界条件として用いた。制御入力パラメータは、時間周期制御では振幅 W_0^+ と振動周期 T^+ 、空間周期制御では振幅 W_0^+ と流れ方向波長 λ_x^+ である。上記のパラメータを $W_0^+ = 1.0 - 10$, $T^+ = 25.0 - 300$, $\lambda_x^+ = 294.5 - 2355$ と系統的に変化させて、2種の制御則の各々について256通りの計算を行った。

空間離散化は二次精度中心差分を用いた。時間離散化には、対流項に二次精度 Adams -Bashforth 法を、粘性項には Crank-Nicolson 法を用いた。

質量流量を一定とし、バルク平均流速 U_b とチャネル半幅 δ に基づくレイノルズ数を $Re_b = 2228$ とした。これは、非制御時における粘性速度 u_c ($= \sqrt{\tau_w/\rho}$) に基づく摩擦レイノルズ数 $Re_c = 150$ に対応する。時間周期制御では、計算領域の大きさは、 x, y, z 方向に $2.5\pi\delta \times 2\delta \times \pi\delta$ とし、格子点数は $64 \times 129 \times 64$ とした。格子幅は、 $\Delta x^+ = 18.4$, $\Delta y^+ = 0.0938 \sim 5.70$, $\Delta z^+ = 7.36$ である。空間周期制御では、制御入力の流れ方向波長に応じて、流れ方向の計算領域長さ及び格子間隔を、 $L_x = 2.5\pi\delta \sim 4\pi\delta$, $\Delta x^+ = 9.20 \sim 18.4$ と変化させた。振動波長が、少なくとも一周期は含まれるように L_x を選んだ。スパン方向、及び壁垂直方向については、時間周期制御と同様の格子を用いた。

また、格子幅を一定として計算領域を x, z 方向に2倍にした計算、及び領域を一定として格子幅を半分にした計算を各制御則について行い、本報で報告する各種統計量に及ぼす影響が十分小さいことを確認した。

5. 制御結果

時間周期制御と空間周期制御の二つの制御について、まず摩擦抵抗低減率 R の比較を図2に示す。(a)は時間周期制御、(b)は空間周期制御である。いずれの場合も、縦軸は振幅 W_0^+ であり、横軸は、時間周期制御では振動周期 T^+ 、空間周期制御では波長 λ_x^+ である。振幅の増加に伴い R が増加する傾向は一致するが、同じ振幅 W_0^+ で比較すると、時間周期制御に比べて空間周期制御でより高い R が得られる。

二つの制御則の最適周期 $T^+ = 125$ 、及び最適波長 $\lambda_x^+ = 1178$ の場合において、 $t^+ = 0$ から制御を開始した時のポンプ動力 P と投入仕事率 P_{in} の時系列データを図3に示す。ここで、いずれの制御においても、 $W_0^+ = 7.0$ とした。なお、投入仕事率 P_{in} は、以下の式で与えられる。

$$P_{in} = \frac{1}{L_x} \frac{1}{L_z} \int_{L_x} \int_{L_z} \left(w_{wall} \frac{\partial w}{\partial y} \Big|_{y=0} \right) dx dz \quad (8)$$

ここで、 L_x と L_z は、制御入力を与える領域の広さを表す。図3より、空間周期制御では、投入仕事率の時間平均は時間周期制御に対して若干低減するにも拘らず、より大きなポンプ動力の低減が得られる。この結果、図4, 5に示すように、省エネルギー率 S 、利得率 G についても、空間周期制御においてより高い値が得られる。図4より、空間周期制御では、最大で $S = 0.3$ に達しており、より広い領域で $S > 0$ となることが分かる。一方、利得率 G は振幅が小さく、波長または周期が大きい程その値が向上する。これは、投入仕事率 P_{in} がより小さくなるためである。以上より、空間周期制御は、時間周期制御に比べて、より高い制御効果を有することが分かる。

時間周期制御における最適な振動周期は、振幅に依存せず、およそ $T^+ = 100$ であるが、空間周期制御においても同様に最適な波長が存在し、その値は $\lambda_x^+ = 1000$ である。これら二つの制御における、最適周期と最適波長の物理的意味を考察するため、 $y^+ = 15$ 付近の流れ方向移流速度 u_c^+ (~ 10) で移動する座標系を導入し、以下のように、空間周期性と時間周期性を関連付ける。

$$T_c^+ = \lambda_x^+ / u_c^+ \quad (9)$$

ここで、 T_c^+ は移動座標系から見た時間スケールである。空間周期制御における最適波長 $\lambda_x^+ \sim 1000$ は、 $T_c^+ \sim 100$ に対応し、時間周期制御における最適周期と同程度である。 $y^+ = 15$ 付近は、レイノルズ応力生成の主要因である縦渦構造が存在し、乱れの生成率が最大となる位置である。壁近傍では、準秩序構造の周期的な生成-散逸のサイクルが存在し、その周期は $T^+ \sim 200$ 程度であることが知られている^(12,13)が、この領域の構造が $T^+ \sim 100$ の時間スケールでスパン方向に強制的な歪み速度振動を受けることが、摩擦に寄与するレイノルズ応力の生成を顕著に抑制していると推察できる。以下では、位相分解、及び条件付き抽出法を用いて、その機構を明らかにする。

6. 摩擦抵抗低減機構

6・1 位相分解 時間, 及び空間周期制御における摩擦抵抗低減機構を調べるため, 以下では, 振幅を $W_0^+ = 7.0$ と固定し, 各制御において最大の摩擦抵抗低減が得られる条件, すなわち周期 $T^+ = 125$, 及び波長 $\lambda_x^+ = 1178$ の場合に注目し, より詳細な解析を行う. なお, 以後の計算は, 圧力勾配一定の条件下で行った. これは, 壁面摩擦速度に基づく Re_τ を一定に保つことで, 制御に伴う低レイノルズ数効果を取り除くことを意図したためである.

一般に, 周期的な制御入力が付与された速度場は, 平

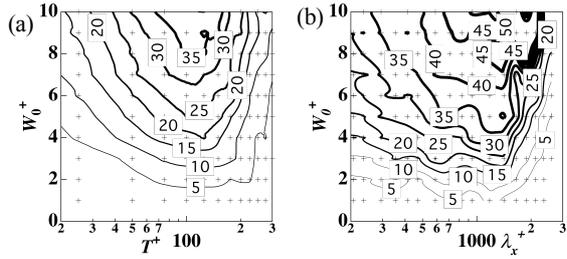


Fig. 2 $DR \times 100$ (%) as a function of time period, wavelength and amplitude: (a) temporally-periodic control, (b) spatially-periodic control.

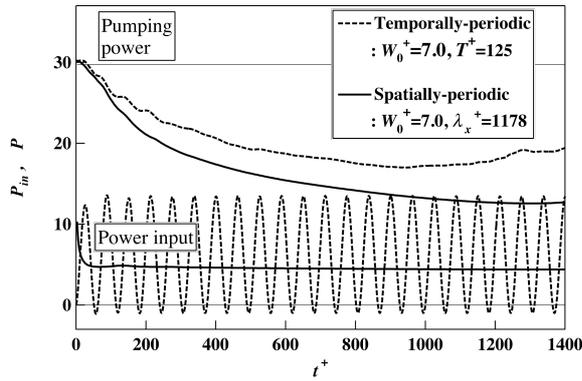


Fig. 3 Time traces of pumping power and control power input.

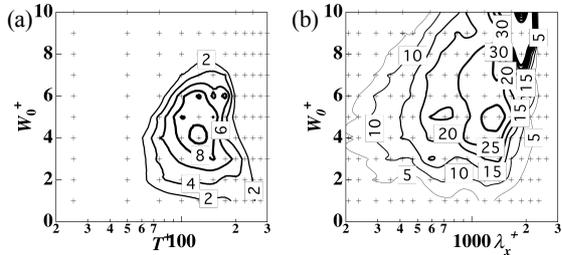


Fig. 4 $S \times 100$ (%) as a function of time-period T^+ or wavelength λ_x^+ , and amplitude W_0^+ : (a) temporally- and (b) spatially-periodic controls.

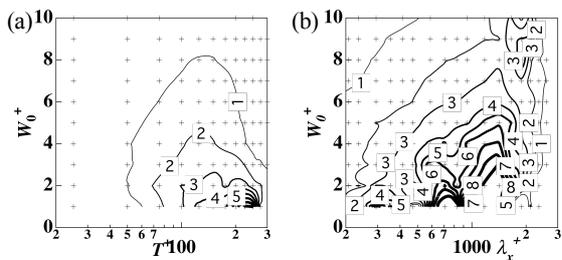


Fig. 5 G as a function of time period T^+ or wavelength λ_x^+ and amplitude W_0^+ : (a) temporally- and (b) spatially-periodic controls.

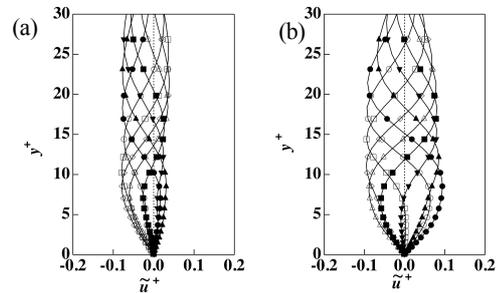


Fig. 6 Phase fluctuation parts of \tilde{u} : (a) temporally-periodic control, (b) spatially-periodic control.

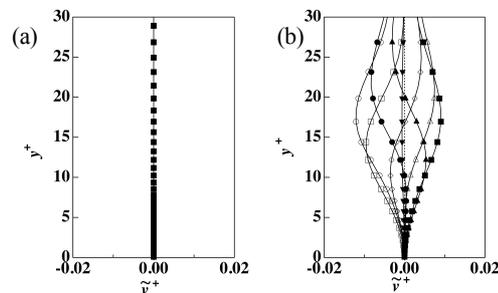


Fig. 7 Phase fluctuation parts of \tilde{v} : (a) temporally-periodic control, (b) spatially-periodic control.

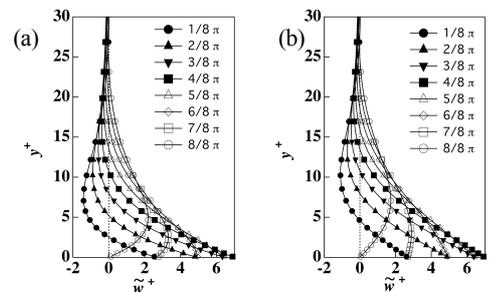


Fig. 8 Phase fluctuation parts of \tilde{w} : (a) temporally-periodic control, (b) spatially-periodic control.

均, 周期平均, 変動の和とできる. そこで, 瞬時の速度 u_i を, 次のように時間あるいは空間平均 \bar{u}_i , 位相変動 \tilde{u}_i , ランダム成分 u_i'' の三成分に分解する.

$$u_i = \bar{u}_i + \tilde{u}_i + u_i'' \quad (10)$$

一方, 位相平均は, 次のように表される.

$$\bar{u}_i + \tilde{u}_i = \langle u_i \rangle_\phi = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N u_i(\phi) \quad (11)$$

但し, ϕ は位相であり, 時間周期制御では $\phi = 2\pi t^+ / T^+$, 空間周期制御では $\phi = 2\pi x^+ / \lambda_x^+$ である. 以下では, 1 周期を 16 分割し, 位相解析の結果を示す.

図 6 ~ 8 において, 各方向速度の位相変動 \tilde{u} , \tilde{v} , \tilde{w} を示す. \tilde{u} , \tilde{v} は, \tilde{w} に比べて非常に小さいことが分かる. なお, 時間周期制御では, \tilde{v} は連続の式より厳密にゼロである. また \tilde{u} , \tilde{v} の周期は, \tilde{w} の半分となる. これは, 流れ場がスパン方向に対して対称であるためである.

式(3)の右辺に, 式(10)の位相分解を施すと, 以下のようになり, 位相変動成分による寄与 ($-\overline{\tilde{u}\tilde{v}}$) とランダム成分による寄与 ($-\overline{u''v''}$) に分けられる.

$$C_f = \frac{12}{Re_b} + 12 \int_{26}^1 (1-y)(-\overline{\tilde{u}\tilde{v}} - \overline{u''v''}) dy \quad (12)$$

各レイノルズ応力の寄与を図 9 に示す. いずれの制御においても, 位相変動成分による寄与 $-\overline{\tilde{u}\tilde{v}}$ は無視しうるほど小さく, 点線で示すランダム成分による寄与 $-\overline{u''v''}$ が主に摩擦抵抗に寄与することが分かる. 各位相におけるランダム成分のレイノルズ応力 $-\overline{u''v''}$ も図 9 に示す. 流れ場のスパン方向の対称性から, 位相 $\pi \sim 2\pi$ での分布は $0 \sim \pi$ の分布と同じである. いずれの制御においても, $-\overline{u''v''}$ は, 制御入力の絶対値が最大になる位相 ($4/8\pi$ 付近) において最も減少する. また, $-\overline{u''v''}$ の位相依存性は, 時間周期制御に比べて, 空間周期制御においてより顕著であることが分かる. これらの理由については, 6.4 節において考察する.

6.2 レイノルズ応力四象限の寄与

ランダム成分のレイノルズ応力 $-\overline{u''v''}$ は, u'' と v'' の正負で以下のように四つに場合分けできる.

- (1) Q1 イベント : $u'' > 0, v'' > 0$.
- (2) Q2 イベント : $u'' < 0, v'' > 0$.
- (3) Q3 イベント : $u'' < 0, v'' < 0$.
- (4) Q4 イベント : $u'' > 0, v'' < 0$.

式(12)より, Q2 と Q4 イベントは摩擦抵抗の増加, 逆に Q1 と Q3 イベントは低減に寄与する.

図 10 にレイノルズ応力の各象限の寄与を示す. 式(12)の被積分関数を考慮し, 縦軸は壁からの距離で重み付けされたレイノルズ応力を表す. 各イベントの貢献度はいずれも低減しており, 特に Q2 と Q4 イベントの低減が著しい. また, Q2 イベントは, 時間周期制御よりも空間周期制御でより減少している. この事実が, 空間周期制御では, 時間周期制御よりも大きな摩擦抵抗低減率が得られる原因となっている.

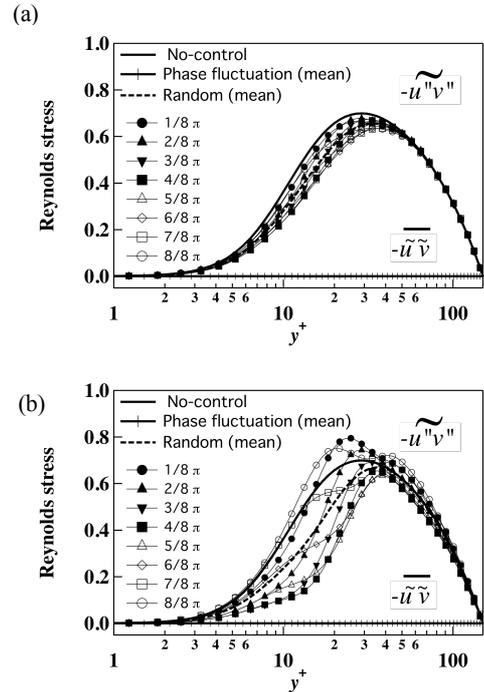


Fig. 9 Contributions of phase and random fluctuations to the Reynolds stresses, $-\overline{\tilde{u}\tilde{v}}$ and $-\overline{u''v''}$: (a) temporally-periodic control, (b) spatially-periodic control.

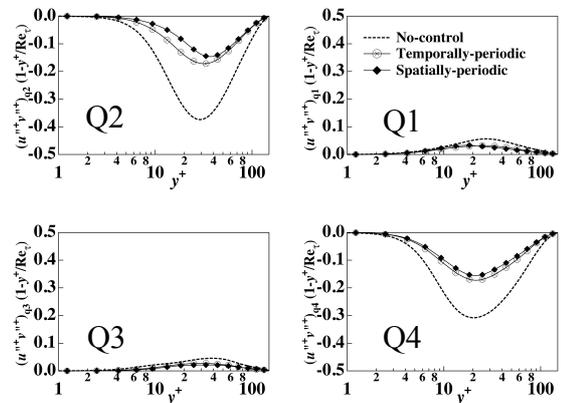


Fig. 10 Quadrant contribution of the weighted Reynolds stress $-\overline{u''v''}$.

6・3 条件付き抽出法 6.1, 6.2 節で見られたレイノルズ応力の変化を乱流構造の観点からより詳細に調査するため、壁近傍の縦渦構造周りの流れの様子を条件付き抽出法により求めた。まず、 $y-z$ 面内で、縦渦構造が主に存在している領域 $y^+ = 10 \sim 20$ において、渦核を表す変形速度テンソルの第二不変量 Q^+ が、縦渦構造を可視化する典型値⁽¹⁴⁾である -0.02 以下である各領域を抽出する。更に、それらの領域で圧力が負の極値を取る点を渦中心 (c_x, c_y) と定義する。ここで、制御入力（スパン方向壁面速度）が縦渦構造に与える影響を、渦度の正負で区別するため、渦度が正の場合のみを抽出する。次に、渦中心の周りでスパン方向に $\Delta z^+ = z^+ - c_z = -40 \sim 40$ 、高さ方向に $y^+ = 0 \sim 40$ の検査領域をもうけ、各速度成分の平均値を算出する。図 11 に条件付き抽出の概念図を示す。

上記の手法により抽出された、非制御時における $y-z$ 平面内の速度ベクトル、及び Q2, Q4 イベントを図 12 に示す。従来の結果と同様に、Q2 イベントは縦渦の左側に位置し、壁付近の低速流体の上昇運動を表す。一方、Q4 イベントは縦渦の右側に位置し、高速流体の壁への吹き下ろし運動に対応する。

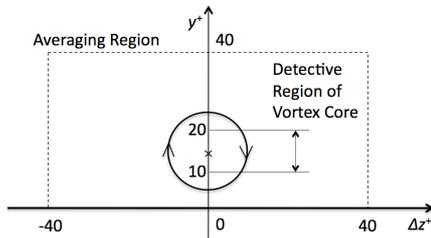


Fig. 11 Schematic figure of a detection plane used in the conditional sampling.

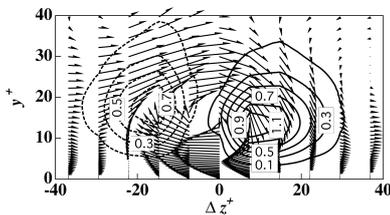


Fig. 12 Conditionally-averaged flow vectors and $-\overline{u''v''}$ around a longitudinal vortex of $\omega_x > 0$ in the uncontrolled case (dotted lines: Q2, solid lines: Q4).

6・4 壁近傍準秩序構造の変化 時間、及び空間周期制御時における、各位相での縦渦構造周りの条件付き平均成分の速度ベクトル、及び Q2, Q4 イベントの $y-z$ 面内分布を図 13(a), (b) に示す。各々の図の右側に、スパン

方向制御速度 \tilde{w} を示している。位相が $2/8\pi \sim 9/8\pi$ では、縦渦の誘起速度は $y^+ = 5$ 付近のスパン方向制御速度と逆方向となり、 $10/8\pi \sim 17/8\pi (1/8\pi)$ では順方向となる。いずれの制御においても、縦渦構造やその周囲で発生する Q2 及び Q4 イベントの位置とその強度は位相ごとに大きく変化することが分かる。

位相が $2/8\pi \sim 9/8\pi$ では、Q2 イベントは著しく減衰し、特に制御入力の絶対値が最大となる位相 $4/8\pi$ で甚だしい。これは、壁速度が渦の誘起速度と対向し、壁近傍の低速流体の巻き上がりが抑制されるためと推測される。また、この傾向は、時間周期制御に比べて空間周期制御でより顕著である。図 8 に示したように、最適周期におけるストークス層は、空間周期制御の方が時間周期制御に比べて厚く、振動周期だけでなくストークス厚さも抵抗低減効果に影響を与えていると考えられる。一方、上記の位相において、渦の強度自体は、非制御時と同等、もしくはそれ以上となっており、その結果、Q4 は大きな値を持つ。この事実は、単に渦に対向する壁速度を入力することが、渦の減衰、及びレイノルズ応力の低減に繋がらないことを示している。

位相が $10/8\pi \sim 17/8\pi$ では、渦の誘起速度と制御入力の方が一致するにも拘らず、上述の位相 $2/8\pi \sim 9/8\pi$ に比べて、渦運動の強度が著しく低減する。特に、制御入力の絶対値が最大となる位相 $12/8\pi$ では、渦運動に伴う下降流が減衰し、Q4 イベントが減衰する。

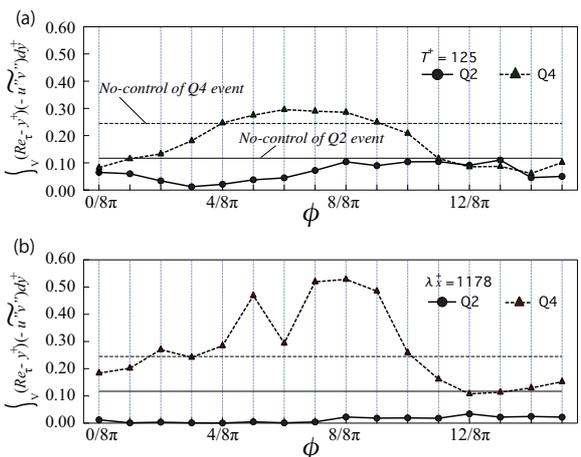


Fig. 14 Integral of Q2 and Q4 events of weighted $-\overline{u''v''}$ around a conditionally-sampled longitudinal vortex: (a) temporally-periodic control, (b) spatially-periodic control (dotted and dashed-dotted lines are Q2 and Q4 in the uncontrolled case, respectively).

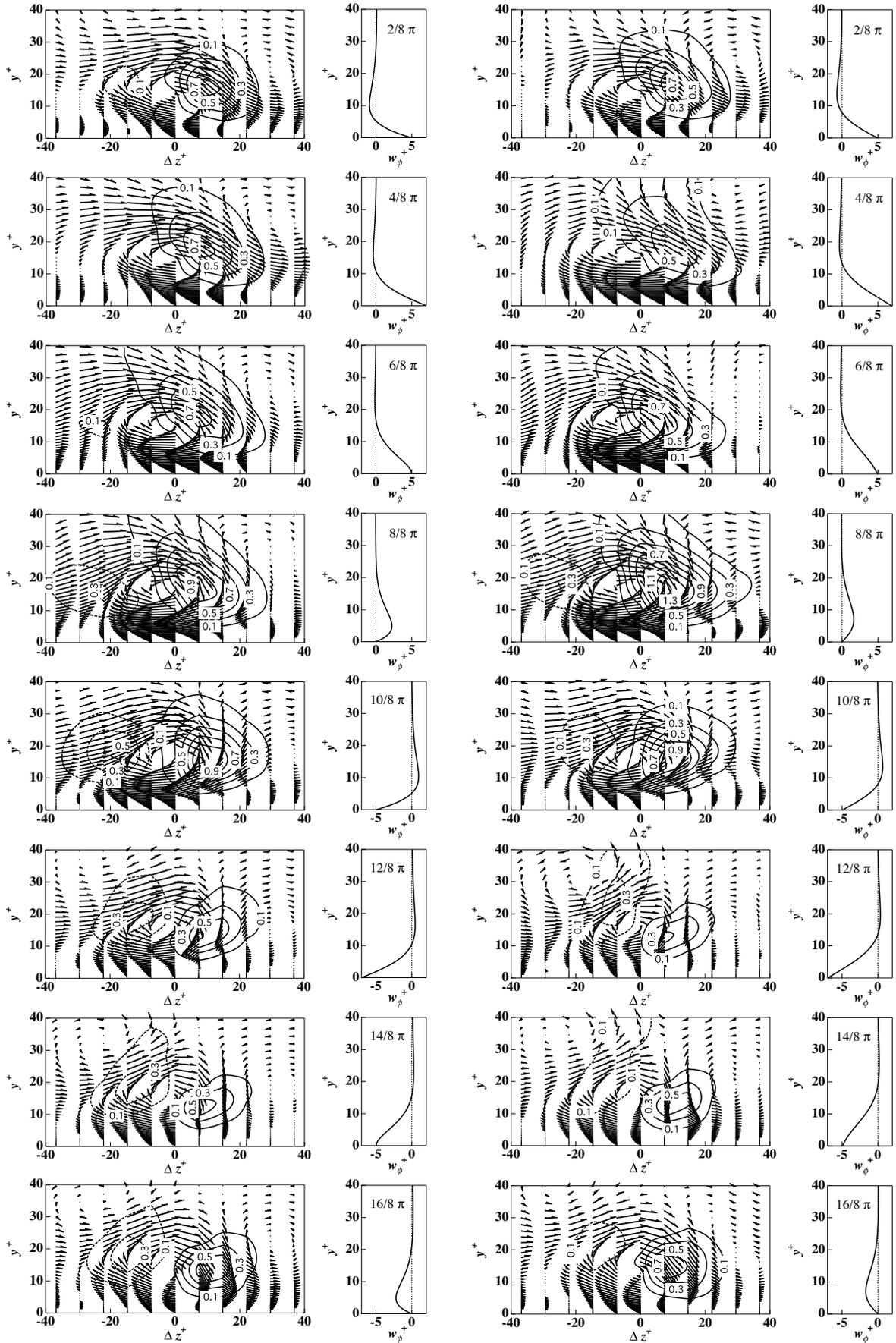


Fig. 13 Conditionally-averaged flow vectors and $-\widetilde{u''v''}$ around a longitudinal vortex of $\omega_\chi > 0$ with phase-averaged spanwise velocity in the (a) temporally-periodic and (b) spatially-periodic controls (dotted lines: Q2, solid lines: Q4).

上述の各位相におけるレイノルズ応力の変化が、摩擦抵抗に与える影響を定量的に議論するため、各制御下での縦渦検知面内における重み付きレイノルズ応力の積分値(式(3)の右辺第2項)を図14(a),(b)に示す。比較のため、非制御時のQ2、及びQ4の積分値を点線、及び一点鎖線でプロットした。いずれの制御においても、位相 $2/8\pi \sim 9/8\pi$ では、Q2が減少する一方、Q4は増加する。一方、位相 $10/8\pi \sim 17/8\pi$ では、Q2は回復する傾向にあるものの、Q4が減少する。また、空間周期制御では、上記位相におけるQ2の回復が小さく、一周全体に渡りQ2がより小さな値に保たれることが分かる。このため、空間周期制御は、時間周期制御に比べて制御効果が高いと考えられ、図10の結果とも一致する。

7. 結 論

時空間周期性を有するスパン方向速度によるブレディターミンド制御に着目し、直接数値シミュレーションを用い、制御効果、及び摩擦抵抗低減機構を調べた。その結果、以下の結論を得た。

1. 空間周期制御では、同じ制御振幅において、時間周期制御に対して、より高い摩擦抵抗低減率、省エネルギー率、利得率が得られる。
2. 時間周期制御と空間周期制御には、摩擦抵抗低減に対し、各々最適な周期 $T^+ \sim 100$ と波長 $\lambda_x^+ \sim 1000$ が存在する。壁近傍の縦渦構造が存在するバッファ領域の移流速度を勘案すると、最適波長は最適周期にほぼ一致する。このことから、この領域の構造が $T^+ \sim 100$ の時間スケールでスパン方向に強制的な歪み速度振動を受けることが、摩擦に寄与するレイノルズ応力の生成を顕著に抑制していると考えられる。
3. レイノルズ応力を位相変動成分とランダム成分に分解すると、いずれの制御においてもランダム成分が支配的であることが分かった。後者は、壁面でのスパン方向速度振幅が最大になる位相で最も低下し、その位相変動は空間周期制御でより顕著である。
4. 条件付き抽出法による解析を行った結果、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、Q2イベントが減少し、Q4イベントは増加する。一方、順方向のスパン方向制御速度を付与する位相では、縦渦構造と周辺のストリークの強度が急速に減衰し、その結果、特にQ4イベントの減衰が著しい。また、空間周期制御では、時間周期制御に比べて、

Q2 イベントの減衰が大きいと、より高い摩擦抵抗低減率が得られる。

謝 辞

本研究は、文部科学省日本学術振興会の科学研究費補助金(A)(No.20246036)の助成を受けた。記して感謝を表す。

文 献

- (1) Yoshino, T., Suzuki, Y. and Kasagi, N., Drag reduction in turbulence air channel flow with distributed micro sensors and actuators, *J. Fluid Science and Technology*, Vol. 3 (2008), pp. 137-148.
- (2) Jung, W. J., Mangiavacchi, N., and Akhavan, R., Suppression of turbulence in wall-bounded flows by high-frequency spanwise oscillations, *Phys. Fluids*, Vol. 4 (1992), pp. 1605-1607.
- (3) Du, Y. and Karniadakis, G. E., Suppressing wall-turbulence via a transverse travelling wave, *Science*, Vol. 288 (2000), pp. 1230-1234.
- (4) Min, T., Kang, S. M., Speyer, J. L. and Kim, J., Sustained sub-laminar drag in a fully developed channel flow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 558 (2006), pp. 309-318.
- (5) Quadrio, M. and Ricco, P., Critical assessment of turbulent drag reduction through spanwise wall oscillations, *J. Fluid Mech.*, Vol. 521 (2004), pp. 251-271.
- (6) Hasegawa, Y. and Kasagi, N., Effects of spanwise wall disturbance on heat and momentum transfer in turbulent channel flow, *proc. 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference (TFEC-7)*, Paper No. M142, 2. (2008).
- (7) Quadrio, M., Ricco, P. and Viotti, C., Streamwise-travelling waves of spanwise wall velocity for turbulent drag reduction, *J. Fluid Mech.*, Vol. 627 (2009), pp. 161-178.
- (8) Choi, J. I., Xu, C. X. and Sung, H. J., Drag reduction by spanwise wall oscillation in wall-bounded turbulent flows, *AIAA Journal*, Vol. 40 (2002), pp. 842-850.
- (9) Baron, A. and Quadrio, M., Turbulent drag reduction by spanwise wall oscillations, *Applied Scientific Research*, Vol. 55 (1996), pp. 311-326.
- (10) Fukagata, K., Iwamoto, K. and Kasagi, N., Contribution of Reynolds stress distribution to the skin friction in wall-bounded flows, *Phys. Fluids*, Vol. 14 (2002), L73-L76.
- (11) Iwamoto, K., Suzuki, Y. and Kasagi, N., Reynolds number effect on wall turbulence: toward effective feedback control, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 23 (2002), pp. 678-689.
- (12) Hamilton, J., Kim, J. and Waleffe, F., Regeneration mechanisms of near-wall turbulence structures, *J. Fluid Mech.*, Vol. 287 (1995), pp. 317-348.
- (13) Jimenez, J. and Moin, P., The minimal flow unit in near-wall turbulence, *J. Fluid Mech.*, Vol. 225 (1991), pp. 335-359.
- (14) Iwamoto, K., Suzuki, Y. and Kasagi, N., Reynolds Number Effect on Wall Turbulence: Toward Effective Feedback Control, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 23 (2002), pp. 678-689

