

〔特集〕 注目研究 in 年会 2011

抵抗低減を目的とした進行波状壁面を有する チャンネル乱流の実験的研究

東京農工大学大学院

*東京農工大学大学院

東京農工大学大学院

浦野 俊也

岩本 薫†

村田 章

Experimental Study of Turbulent Channel Flow on Traveling Wavy Wall for Drag Reduction

Shunya URANO, Tokyo University of Agriculture and Technology

Kaoru IWAMOTO, Tokyo University of Agriculture and Technology

Akira MURATA, Tokyo University of Agriculture and Technology

1 緒言

摩擦抵抗を低減する手法として、物体表面上に微小な振動を発生させる進行波状壁面に関する研究が行われている。Kramer¹⁾や種子田・友成²⁾によって、フレキシブルな物体表面上に進行波を発生させる手法が提案されている。また微小な振動を模した直接数値計算 (Direct Numerical Simulation : DNS)³⁾では、平行平板間において両側壁面に進行波を発生させた場合、最大で約 70% の抵抗低減効果が確認された。しかし、実験において進行波の発生機構の確立や抵抗低減効果の解明はされていない。本研究では、進行波による抵抗低減効果を実験的に確認することを目的とする。DNS において最大抵抗低減効果が確認された条件を参考に進行波のパラメータ値を設定し、抵抗低減効果を確認する。

2 実験装置及び実験条件

実験は片側壁面が主流方向に進行波運動する平行平板間乱流において行う。実験装置の概略図を図 1 に示す。平行平板間流路を試験部とする吸い込み式の風洞装置である。作動流体は空気である。チャンネル半幅 $\delta = 10 \text{ mm}$ とし、テストセクションの長さは

200δ である。以後、流れ方向を x 、テストセクションの開始位置を $x = 0$ 、壁垂直方向を y 、スパン方向を z とする。

進行波運動におけるパラメータとして図 2(a) に示すように、変位振幅 Δy_{\max} [m]、 y 方向への速度 v_w における速度振幅 a [m/s]、波長 λ [m]、位相速度 c [m/s] が挙げられる。DNS の結果³⁾では、チャンネル半幅 δ [m]、摩擦速度 u_τ [m/s] によって定義される摩擦レイノルズ数 $\text{Re}_\tau = 110 \sim 300$ において、

$$\begin{aligned} \Delta y_{\max}^+ &= 3 \sim 10, & a^+ &= \frac{5 \text{Re}_\tau}{110} \\ \lambda^+ &= 235 \sim 471, & c^+ &= \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2} \right) \cdot \text{Re}_\tau \end{aligned} \quad (1)$$

で抵抗の低減が確認された。()⁺は動粘度 ν [m^2/s] と摩擦速度 u_τ により無次元化された量を表す。本研究では上式を実験条件に設定する。実験条件を満たす進行波を発生させるために、振動源に増幅機構を伴ったピエゾアクチュエータ、振動平板の材質に天然ゴムを用いた。図 2(b) に示すように、平行平板間流路内に設置した振動平板に $x = 0$ の位置に設置したピエゾアクチュエータからの周期的な振動を伝達させ、正弦波状の進行波を発生させる。

*〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16

† E-mail: iwamotok@cc.tuat.ac.jp

摩擦抵抗の評価には式(2)に示す壁面摩擦係数 C_f [-]を用いた。

$$C_f = \frac{8w^2\delta^3}{\rho Q^2} \frac{\Delta p}{l} \quad (2)$$

ここで、空気の密度 ρ [kg/m³], 流量 Q [m³/s], 差圧 ΔP [Pa], 差圧測定区間の長さ $l = 0.5$ m, チャンネルスパン方向長さ $w = 0.2$ m とした。

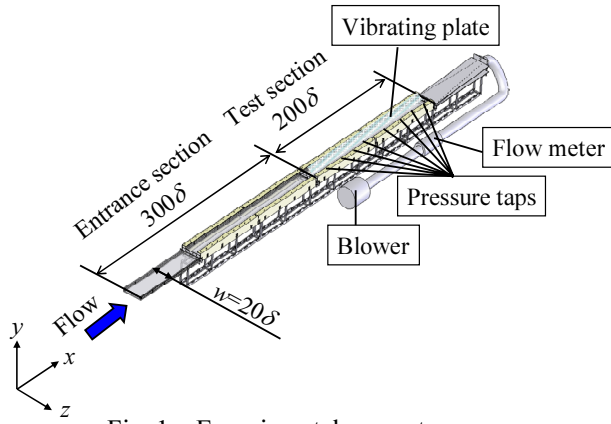


Fig. 1 Experimental apparatus.

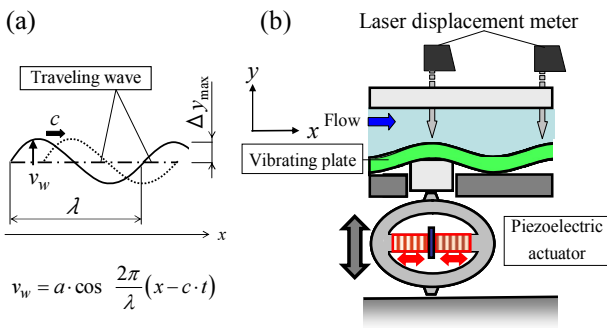


Fig. 2 (a) Parameters of traveling wave, (b) Configuration of oscillator.

3 振動平板の挙動実験

平行平板間流路内に設置した際の振動平板の挙動を計測し、式(1)で示される抵抗低減に有効なパラメータ範囲との差異を評価した。ピエゾアクチュエータの駆動周波数 f を 50 Hz から 160 Hz まで変化させ、振動源での変位振幅、速度振幅、位相速度、波長を比較した。計測にはレーザー変位計を用い、振動源における平板上の変位振幅の時間的変化を計測した。また、振動源から 250 mm の地点における振幅の時間的変化を同時計測することで、位相速度を算出した。さらに、波長及び速度振幅の算出には以下の式を用いた。

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad a = \frac{\Delta y_{\max} \cdot 2\pi c}{\lambda} \quad (3)$$

今回は $Re_\tau = 100$ として各計測値の無次元化を行った。各駆動周波数における振幅及び速度振幅を図 3 に、位相速度及び波長を図 4 にそれぞれ示す。なお、 $f = 100$ Hz では周期的な正弦波が計測できなかったため、計測結果を載せていない。図 3 より、 $f = 90$ Hz で Δy_{\max}^+ が大きな値を得たことから、振動部の共振点が 90 Hz 付近であることがわかる。また、実験条件には達していないものの、 a^+ も他の周波数よりも大きな値をとっていることから、90 Hz は実験条件として有意な値であると考えられる。また図 4 より、 $f = 90 \sim 120$ Hz において c^+ が実験条件を満たしていることがわかる。

この中で振幅が最も大きい 90 Hz 及び λ^+ が最も小さい値をとった 120 Hz、さらに全体で λ^+ が最も小さい 160 Hz において、平板の挙動を評価した。振動源から流路下流方向への Δy_{\max}^+ の計測結果を図 5 に示す。図 5 より、90, 120 Hz において Δy_{\max}^+ が増減していることがわかる。これは端点 ($x/\delta = 200$) においても有意な変位振幅を有することから、端点からの反射波が存在し、平板上に進行波が発生していないと考えられる。一方、160 Hz では下流方向に Δy_{\max}^+ が徐々に減衰し、かつ端点 ($x/\delta = 200$) においてはほぼゼロであることから、平板上に進行波が発生していると考えられる。よって、駆動周波数を 160 Hz として抵抗低減効果の評価を行うこととした。

4 摩擦抵抗低減評価実験結果

$x/\delta = 25$ の位置での差圧を計測し、壁面摩擦係数を求めた。図 6 に振動平板上に進行波を発生させた壁面摩擦係数 C_f と平滑面での壁面摩擦係数 $C_{f, flat}$ を示す。 $Re_b \approx 360 \sim 1200$ において、 C_f が負の値をとったため、図中に計測結果を載せていない。本来、主流方向に進行波を発生させた場合、上流から下流へと押し出される力が流体に加わる。しかし、本実験では進行波の発生によって上流方向への力が発生し、 C_f が負の値をとった。また、 $Re_b \approx 1500 \sim 3000$ においても上流方向への力が影響し、 C_f は $C_{f, flat}$ よりも小さい値をとっていることがわかる。一方、 $Re_b \approx 3300$ 以降において、 C_f は $C_{f, flat}$ とほぼ同様な値をとっている。これは進行波による上流方向への力が一定であるため、流量の増加に伴い進行波による影響が小さくなったためと考えられる。

5 結言

平行平板間流路内に設置した振動平板上に進行波を発生させ、挙動の計測した。また、進行波を発生させた際の壁面摩擦抵抗 C_f を評価した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ ピエゾアクチュエータの駆動周波数 $f = 160\text{Hz}$ において、変位振幅が徐々に減衰していく進行波を確認した。
- ・ 進行波の発生によって上流方向への速度が発生し、 $Re_b \approx 360 \sim 3000$ において C_f は $C_{f, flat}$ より小さい値をとった。
- ・ $Re_b \approx 3300$ 以降では進行波の影響がなくなり、 C_f は $C_{f, flat}$ とほぼ同様な値をとった。

引用文献

- 1) Kramer, M. O.: Boundary layer stabilization by distributed damping, J. American Society of Naval Engineers, 72 (1960) 25-34.
- 2) 種子田, 友成: 進行波運動における剥離の遅れに関する研究, 九州大学応用力学研究所所報, 38 (1972) 37-45.
- 3) 岩本: 私信 (2009)

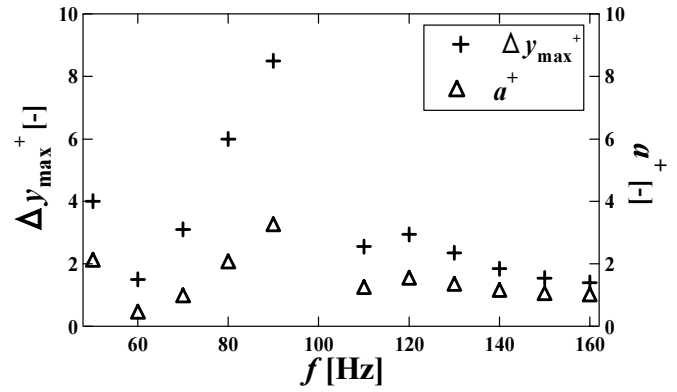


Fig. 3 Amplitude and velocity amplitude at $x = 0$.

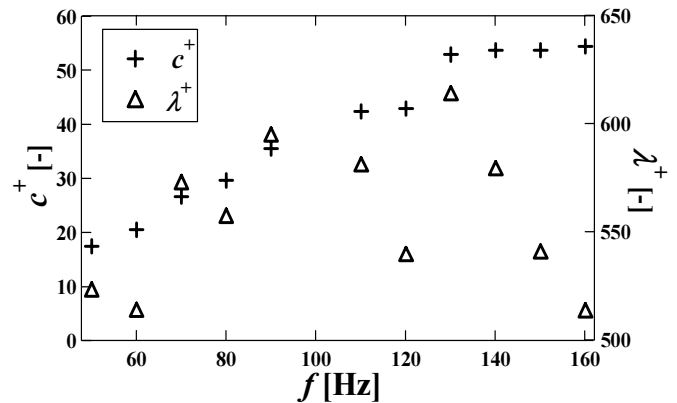


Fig. 4 Phase velocity and wavelength at $x = 0$.

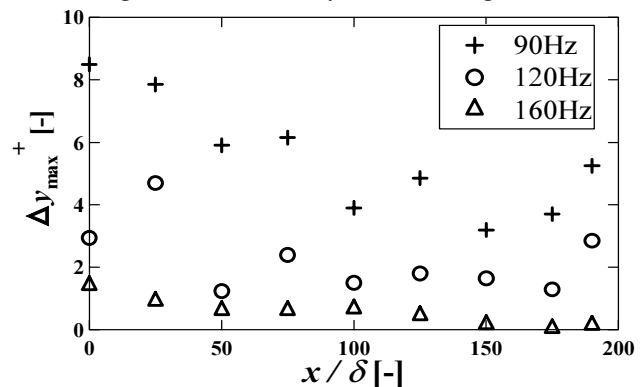


Fig. 5 Streamwise dependence of amplitude.

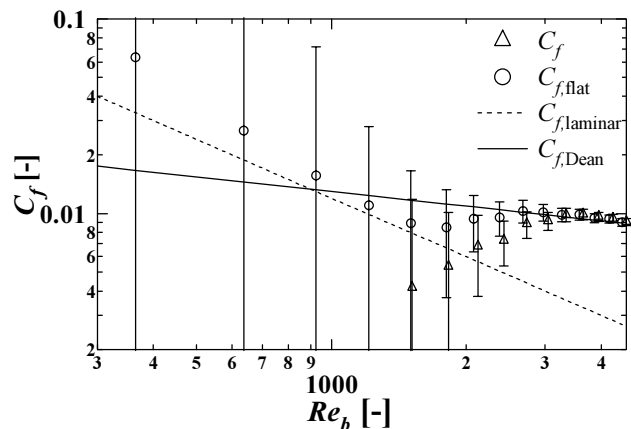


Fig. 6 Friction coefficient of flat surface and vibrating plate at $x/\delta = 25$.