チャネル壁面からのポリマー溶液滲出による 抵抗低減流れの空間構造に関する PIV による実験的研究

Experimental Study on the Spatial Structure of Drag Reducing Channel Flow with Blowing Polymer Solution from the Wall.

○学 石塚 翔太(東理大院) 徐鶴寧(東理大院) 正 本澤政明(東理大) 正 岩本 薫(農工大)
正 安藤 裕友(海技研) 正 千田 哲也(海技研) 正 川口 靖夫(東理大)

Shota Ishitsuka, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba
Hening Xu, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba
Masaaki Motozawa, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba
Kaoru Iwamoto, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakamachi, Koganei, Tokyo
Hiroto Ando, National Maritime Research Institute, 6-38-1, Shinkawa, Mitaka, Tokyo
Tetuya Senda, National Maritime Research Institute, 6-38-1, Shinkawa, Mitaka, Tokyo
Yasuo Kawaguchi, Tokyo University of Science, 2641 Yamazaki, Noda, Chiba

Spatial structure of turbulent drag reducing flow with blowing polymer solution from the channel wall has been investigated by using PIV. The instantaneous velocity fields in x - z plane were measured in the near-wall region. In this experiment, 10.6 % of drag reduction was obtained under $Re=20000$. As a result of PIV measurement, RMS of streamwise velocity fluctuation increases and spanwise velocity fluctuation decreases. In the drag reducing flow with blowing polymer solution, low-speed streaks spaces expanded to the spanwise direction with increasing streak thickness. This phenomenon was also analyzed quantitatively by a two-point cross-correlation coefficient. In addition, small scale component in the velocity fluctuation decays and large scale component is dominant with drag reduction effect.

Key Words: Drag reduction, Blowing method, PIV, Polymer solution

1. 緒 言

水に微量の直鎖状ポリマーを添加することにより、乱流摩擦抵抗が著しく減少する現象は Toms 効果⁽¹⁾と呼ばれ、これまでに多くの知見が得られている。Tiederman ら⁽²⁾は、ポリマーが壁面近傍の準秩序構造に作用することで抵抗低減効果が引き起こされると報告している。このことから、壁面近傍のみにポリマーを供給することで抵抗低減効果を得ることが出来、船舶などの外部流れにも Toms 効果は適用可能であると考えられる。著者ら⁽³⁾は、実際にチャネル流れにおいて、壁面に取り付けた多孔質壁面から水流にポリマー溶液を供給することで、壁近傍の乱流構造にポリマーが作用し、抵抗低減に結びつくことを確認している。本研究では、PIV を用いて多孔質壁面からのポリマー溶液滲出を伴う平行平板間流れの x - z 面内の速度分布計測を行い、ポリマー溶液滲出による抵抗低減効果の乱流構造へ及ぼす影響を考察した。

2. 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。水路は遠心ポンプにより駆動される循環型水路であり、長さ 6000 mm、高さ(H)=40 mm、幅 500 mm のアクリル製のチャネルを有している。水路の貯水タンクには攪拌機とヒーターが設置されており、流水の温度を $25\pm0.1^\circ\text{C}$ に保っている。チャネル片面にはポリマー溶液滲出用の多孔質滲出壁面が設置されている。滲出壁面には公称ろ過精度 $2\ \mu\text{m}$ 、 $450\ \text{mm}\times450\ \text{mm}$ の焼結金属板を用いており、これを3面取り付け、定量チューブポンプにより滲出開始点から下流まで一様にポリマー溶液を滲出させることができる。また滲出開始点と 1650 mm 下流に差圧測定孔を設けており、差圧測定区間 ($L=1650\ \text{mm}$) の差圧から壁面せん断応力、壁面摩擦速度、抵抗低減率を算出した。本研究においては、チャネル片面のみからのポリマー溶液滲出のため、滲出壁の無い面の壁面せん断応力は水流における壁面せん断応力と仮定し、(1)式によりポリマー溶液滲出時の壁面せん断応力を算出した。

$$\tau_{\text{blowing}} = 2 \cdot \frac{H}{2L} \Delta p - \tau_{\text{water}} \quad (1)$$

この壁面せん断応力を用いて抵抗低減率は(2)式で定義した。

$$DR = \frac{\tau_{\text{water}} - \tau_{\text{blowing}}}{\tau_{\text{water}}} \times 100(\%) \quad (2)$$

滲出ポリマー溶液にはポリエチレンオキシドを主成分とする PEO-18Z (住友精化(株)製)を用い、質量濃度(C)を 100 ppm に調整して、滲出量 2.0 L/min で一定滲出させた。実験は水路高さと平均流速を代表にとったレイノルズ数 $Re=20000$ で行った。

チャネル入口から 3650 mm 下流に PIV 測定部を設けており、滲出壁に対向する面にガラス窓を設置している。測定は x - z 平面において 100 枚の画像を記録し、一枚の画像につき 125×125 の速度ベクトルを取得した。その画像から乱れ統計量、瞬時の速度分布を算出した。PIV システムに用いた CCD カメラは 2048×2048 pixel の解像度を有している。また、トレーサ粒子には平均粒径 $4\ \mu\text{m}$ のナイロン粒子を用いた。

Fig. 1 Experimental apparatus.

Table 1 Drag reduction rate and turbulent intensity.

Solution	DR(%)	u_{rms}/u_τ	w_{rms}/u_τ
Water	0	1.62	1.04
100ppm	10.6	2.51	0.76

Fig. 2 Instantaneous distribution of velocity fluctuation u' at $y/(H/2)=0.05$: (a) Water and (b) 100ppm (DR=10.6%)

3. 実験結果

3-1 抵抗低減率と乱れ強度 表 1 に $y/(H/2)=0.05$ ($y^+ \approx 20$) のポリマー溶液を滲出させたときの抵抗低減率と乱れ強度との関係を示す。乱れ強度は壁面摩擦速度で無次元化したものである。この表より、抵抗低減効果が生じると壁面近傍では、主流方向の乱れ強度は増加し、スパン方向の乱れ強度は減少することがわかる。

3-2 瞬時速度分布 図 2 に(a)水流と(b)ポリマー溶液滲出時の主流方向の瞬時速度変動分布を示す。流れ方向は左から右であり、水の場合には低速と高速のストリークがスパン方向に枝葉のように蛇行して散在し、ストリークが一本に合流する複雑な形状が見られるが、ポリマー溶液を滲出させた抵抗低減流れでは、ストリークの蛇行運動が見られなくなり、ストリークの厚みがスパン方向に増加している。このストリークの厚みが増したことで、低速、高速ストリークの間隔が広がっていることが定性的に確認できる。

この乱流構造変化の要因として、スパン方向乱れ強度の減少が考えられる。Ptasinski ら⁽⁴⁾は FENE-P モデルを用いた数値計算により、エネルギー再分配項である圧力歪相関項が減少することで主流方向乱れからの他方向へのエネルギー供給が減少することを報告している。本研究でも上記のような変化が起こり、スパン方向への乱れエネルギー供給が減少したために流体塊の乱れエネルギーが主流方向に維持され、スパン方向乱れ強度が相対的に減少し、スパン方向成分の乱れ生成が抑えられている形態になったと考えられる。

Fig. 3 Cross-correlation coefficient of streamwise velocity fluctuations versus z^+ at $y/(H/2)=0.05$.

Fig. 4 Pre-multiplied Spectra of streamwise velocity fluctuation to the spanwise direction at $y/(H/2)=0.05$.

3-3 相関係数 図 3 にスパン方向の 2 点相関係数を示す。横軸はスパン方向距離を粘性スケールで無次元化したものである。この 2 点相関の極小値が平均ストリーク間隔に対応する量であり、ポリマー溶液を滲出させた場合には平均ストリーク間隔が広がっていることが定量的にも確認できる。以上から、ポリマー溶液を壁面近傍に供給することで滲出壁面近傍におけるストリーク構造には大きな変化が見られ、この変化が抵抗低減の重要な因子の一つであると考えられる。

3-4 スペクトル 図 4 に主流変動速度成分のスパン方向 Pre-multiplied Spectra を示す。Pre-multiplied Spectra は各波数が持つエネルギー含有量を示している。水流と比較してポリマー溶液を滲出させた場合にはピーク位置が高波数側に移動する。さらに、より高波数域では水流より値が減少している。これは速度変動の小スケール成分の減少とより大きなスケールの成分のエネルギーの増加を示している。つまり、抵抗低減流れでは、壁面近傍の小スケールの渦がポリマー溶液により減少し、より大きなスケールの渦のエネルギーが支配的になっているものと考えられる。

4. 結 言

PIV システムを用いてチャネル壁面からのポリマー溶液滲出による抵抗低減流れの x - z 面内の速度計測を行った。その結果、主流方向乱れ強度は増加し、スパン方向乱れ強度は減少した。また、低速、高速ストリークの厚みが増し、平均間隔が広がったことを定性的、定量的に示した。さらに、小スケール渦の減少が見られ、大きなスケール渦のエネルギーが支配的になることがわかった。

引用文献

- (1) B. A. Toms, *Proc. 1st Intl Congr. Rheol.*, (1948), 135.
- (2) W. G. Tiederman et al., *J. Fluid Mech.*, 156 (1985), 419.
- (3) S. Ishitsuka et al., *Proc. ETMM-8*, (2010), 374.
- (4) P.K. Ptasinski et al., *J. Fluid Mech.*, 490 (2003), 251.