237 マイクロチャネルにおける希薄高分子溶液の PIV 計測

伊藤 信彦[○] (横浜国大院生) 五十公野 純一 (横浜国立大学学部生)

正 西野 耕一 (横浜国大院) 正 鳥居 薫 (横浜国大)

PIV Measurement of Micro Channel Flow of Dilute High Polymer Solution

Nobuhiko ITHO, Junichi IZUMINO, Koichi NISHINO and Kahoru TORII

ABSTRACT

Dilute solution of high polymer in water is known to bring about a drastic drag reduction of turbulent shear flows. Some previous studies have shown that the rate of drag reduction in a pipe for a constant Reynolds number is enhanced with decreasing pipe diameter, indicating that the size of the flow geometry can be an important parameter. In the preset study, a series of flow visualization and PIV measurement of velocity distributions in a micro channel flow of dilute high polymer solution have been performed to understand the relationship between the drag reduction and the characteristics of micro channel flow.

Keywords: Visualization, Flow Measurements, PIV, Turbulent Flow, Drag Reduction, Micro Flow

1. 緒言

鎖状高分子を水に添加すると乱流での壁面摩擦抵抗が激減する Toms 効果が現れる^(1, 2). この現象は乱流のマイクロ長さスケールと高分子の長さスケールとの比の影響を受けると考えられ、これまでに幾つかの研究が行われている. その結果、小径円管では同一レイノルズ数であっても管径が減少するにつれ壁面摩擦抵抗減少率が增大することが報告されている⁽³⁾.

本研究では、トレーサ粒子を混入した希薄高分子水溶液を作動流体として、マイクロチャネル乱流の速度場を可視化計測し、壁面摩擦抵抗と乱流特性との関係を実験的に明らかにすることを目的とする.

2. 実験装置及び測定方法

実験装置の概略図を Fig.1 に示す. アクリル製マイクロチャネルは幅 1.69mm, 高さ 20.1mm, 長さ 305mm である. 測定部はチャネル入り口より 250mm 下流に位置し、そこでは十分に発達した二次元チャネル流が実現するものと考えられる. チャネル入口での流入を一様化するため、その上流に金網 (メッシュ間隔 0.6mm) とガラスビーズ (粒径 1.4 ± 0.1 mm) を用いた整流部を設けた. 作動流体はイオン除去処理を施した純水に鎖状高分子 (ポリエチレンオキシド: PEO, $\text{HO}-(\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{H}$, 分子量 360 万~400 万) を質量濃度 50ppm 溶解させたものである. PIV 用トレーサとし

て外径 $1.5 \mu\text{m}$ 、密度 $1.19 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ のアクリル真球を懸濁させた. 鎖状高分子構造の切断による Toms 効果の劣化を抑えるため、高圧窒素加圧 (0.2MPa 程度) による流体駆動方式とした⁽⁴⁾. 撮影は CCD カメラ (有効画素数 640×480) で行い、f105mm/F2.8 のマイクロレンズと 2 個のテレコンバータを装着することで $3.75 \mu\text{m/pixel}$ の空間分解能を得た.

速度場計測はダブルフレーム相互相関 PIV で行った. 計測領域にダブルパルス Nd:YAG レーザ (発光半値幅: 7ns, 厚さ 0.06mm) を照射し、2 時刻の粒子像移動距離から流速を算出する. 一方、摩擦抵抗の測定のため、チャネル側壁に設けた静圧孔を通して静圧勾配を測定した. 流量調節は流路下流のバルブで行い、浮子式流量計で実験中の流量をモニタし、全体積流量測定は下流タンクの水位センサで行った.

Fig. 1 Experimental apparatus.

3. 実験結果及び考察

Toms 効果による摩擦抵抗低減とその管径効果に関する従来の測定結果^(1,2)と比較するため、上述のマイクロチャネルに加えて小径円管(内径 2, 3, 5mm)の摩擦抵抗を測定した⁽⁴⁾。管摩擦係数 λ と静圧降下 Δp の関係は式(1)で定義される。

$$\Delta p = -\lambda \cdot \frac{l}{D} \cdot \frac{1}{2} \rho U_m^2 \quad (1)$$

ここで、 D は円管直径またはチャネルの等価直径、 l は測定区間の距離である。 λ と $Re (=U_m D/\nu)$ の関係を Fig.2 に示す。これより同濃度の高分子溶液では管径が小さくなるほど摩擦抵抗が減少すること、またマイクロチャネル流の摩擦抵抗減少が直径 1.05~5mm の小径円管のそれと同程度であることを確認した。Fig.3 は小径円管とマイクロチャネルの摩擦抵抗減少率を示したものである。円管の場合、摩擦抵抗低減は乱流遷移域($Re=2000 \sim 4000$)で徐々に増加するが、マイクロチャネルでは $Re=2000$ 付近から急激に減少率が増加し、 $Re=6000$ でほぼ一定となる。本実験条件では摩擦抵抗減少率の最大値はおよそ 60%に留まる。マイクロチャネルでの摩擦抵抗低減状態における速度分布を把握するため、前述した PIV 測定を行った。Fig.4 は $Re=6290$ 、断面平均流速 $U_m=5.41\text{m/s}$ での粒子画像を示したものである。同図右側は 1000 フレームの PIV 画像より求めた平均速度ベクトルマップである。各レイノルズ数での壁からの距離に対する平均速度分布を Fig.5 に示す。乱流域($Re=9660$)での希薄高分子溶液はチャネル中心付近では水の平均速度分布と類似他分布を示すが、壁面近傍ではなだらかな速度勾配を有する層流に似た分布を示す。一方、壁面垂直方向の速度分布は水および高分子溶液ともにほぼ零となった。

4. 結言

幅 1.69mm のマイクロチャネルを製作し希薄高分子溶液(ポリエチレンオキシド, 50ppm)の摩擦抵抗低減を調べた。その結果、小径円管と同程度の管径効果が現れ、摩擦抵抗減少率が最大約 60%に達すること、PIV で測定された平均速度分布から乱流域($Re=9660$)でも速度分布は層流的であることが確認された。

参考文献

- 1) 富田侑嗣, 1969a, 日本機械学会論文集(第2部), 35-279, pp.2243-2250.
- 2) 富田侑嗣, 1969b, 日本機械学会論文集(第2部), 35-279, pp.2251-2258.
- 3) 田古里哲夫, 1971, ポリマーの希薄溶液における摩擦抵抗, 機械の研究, 23-1, pp.193-201.
- 4) 河原一貴, 1999, 横浜国立大学工学部卒業論文.

Fig. 2 Friction coefficients of pipe flows and micro channel flows of dilute high polymer solution.(50ppm)

Fig. 3 Drag reduction rate.

Fig. 4 Particle image and PIV result.

Fig. 5 Mean velocity distributions.