

Developing Characteristics of Surfactant Drag-Reducing Flow

鈴木 洋 (神戸大自), 中山友絵 (神戸大自), 薄井洋基 (神戸大工)

Hiroshi SUZUKI*, Tomoe NAKAYAMA* and Hiromoto USUI**

*Grad. of Sci. Tech., Kobe Univ., Kobe 657-8501, Japan

**Dept. of Chemical Sci. Eng., Kobe Univ., Kobe 657-8501, Japan

An experimental study has been performed to investigate the developing characteristics of drag-reducing surfactant solution flow in a duct. Streamwise velocity distributions at six cross-sections were measured by LDV system. From the results, the flow development of the surfactant solution was found to be very slow. Even at the end of the test section with the distance of 112 times of hydraulic diameter from the inlet, the flow is not fully developed but still has the developing boundary layer characteristics on the duct walls. This slow development is caused by very long formation time of shear-induced state of the surfactant micelles. The present results lead a conclusion that the entry length of 1,000 times of hydraulic diameter is required for fully developed surfactant flow at least.

1. 緒言

界面活性剤添加による抵抗低減効果は、他の方法に比して絶大であるため、地域冷暖房等の流体の長距離輸送が必要な場合に利用されている¹⁾。しかしながら、その流れ構造、流動抵抗低減効果の発現機構の詳細についてはいまだ明らかとなっていない。Kawaguchiら²⁾は、矩形ダクト内の流れと垂直方向のせん断場について検討し、壁近傍に応力が集中し、壁より離れた領域で応力がゼロとなる欠損領域が存在することを指摘した。しかしながら、著者らは、界面活性剤溶液の形成時間が非常に長いことを報告し³⁾、このことから従来の実験においては、流れの発達が不十分であった可能性を指摘した。

本研究では矩形ダクト内の平均速度の測定結果から、流れの平均場の発達特性について検討したので、報告する。

2. 実験方法

試料には、塩化オレイルビスヒドロキシエチルメチルアンモニウム (商品名: Ethoquad O/12) を 1,000ppm, 対イオンとしてサリチル酸ナトリウムを 600ppm 加えたものを用いた。

図1に本実験で用いた実験装置の概略を示す。流体は温度制御された下部タンクから、整流部 (60mmx150mm 断面)・縮流部を通り、試験部に流入する。流量は下流に置かれた電磁流量計によって測定され、ポンプのインバータによって調節された。試験管路は 20mmx50mm の断面を有し (水力直径 $D_{H1}=28.6\text{mm}$)、全長 3.6m の矩形ダクトである。試験管路には LDV による流速測定に供するように石英ガラスによる窓が設けられており、これを移動させることによって、流れ方向の発達様式の測定が可能となる。

座標原点は、試験管路入り口の図で手前側の側壁中央高さ位置とし、流れ方向に $x[\text{m}]$ 、図で手前側の壁面から 50mm 幅 (=H) の方向へ $y[\text{m}]$ とする。

平均流速の測定には LDV を用い、シーディングにはナイロン粒子 (4 μm) を用いた。またバースト検知法を採用し、サンプル数は約 8,000 とした。測定断面は、 $x/D_{H1}=14, 28, 56, 70, 98$ および 112 の 6 断面とした。

摩擦係数は、 $y=0$ の位置の断面に 1mm の圧力孔を設けて 2 断面間の圧力差を測定することによって算出した。測定位置は、 x/DH で 7-35 間、49-77 間および 91-119 間の 3 カ所とし、その中間位置を代表測定点とした。

いずれの実験においても断面平均流速 $U_m[\text{m/s}]$ は

0.78m/s と一定とした。また、温度は水の場合に 25 $^{\circ}\text{C}$ 、界面活性剤溶液の場合に 15 $^{\circ}\text{C}$ とした。

3. 解析方法

本研究では、界面活性剤溶液が Maxwell モデルで記述できると仮定し、重畳法によって応力解析を行った。

溶質と溶媒の応力を $\sigma_p[\text{Pa}]$ と $\sigma_s[\text{Pa}]$ に分離し、 σ_p についての Maxwell モデルは以下のように表される。

$$\sigma_p + \lambda \frac{d\sigma_p}{dt} = \eta_p \dot{\gamma}$$

ここで $t[\text{s}]$ は時間、 $\dot{\gamma}[\text{s}^{-1}]$ はせん断速度、 $\eta_p[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ は溶質粘度であり、 $\lambda[\text{s}]$ は特性時間である。これより、インパルス応答関数 $g(t)[\text{Pa}]$ が以下のように求められるので、

$$g(t) = \frac{\eta_p}{\lambda} \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right)$$

各瞬間の応力は、 $t < 0$ で $\dot{\gamma} = 0$ として、以下の時間積分によって求められる。

$$\sigma_p(t) = \int_0^t \dot{\gamma}(t-\tau) g(\tau) d\tau$$

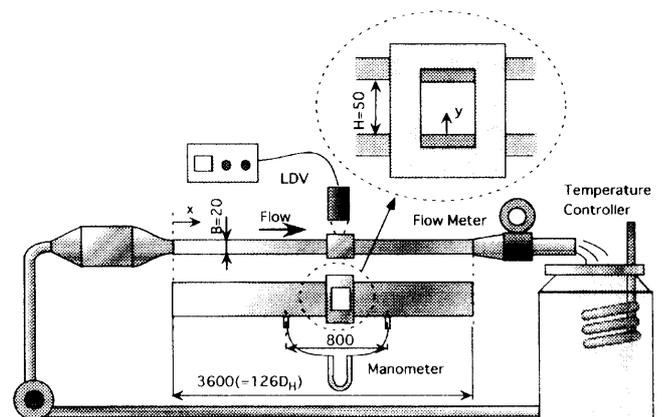


Fig. 1 Experimental Apparatus

これまでの報告で、速度の y 方向成分が小さいことがわかっており、本研究では、同一 y 位置にある流体が、下流域の同一 y 位置に到達すると仮定して、その間に得たせん断履歴から下流域の応力を算出した。その際の時間特性の見積もりには、下流の応力の漸進値が、上流より積算された応力以上の場合には、ミセル形成時間を用い、下流の応

力の漸近値が上流の応力以下の場合には、応力緩和時間を用いた。ミセルの形成時間には、前報³⁾と同様クエット流で測定した以下の式を用いた。

$$\lambda = 7 \times 10^3 \dot{\gamma}^{-1}$$

また、応力緩和時間はせん断速度の影響を受けず、約 12s であったので、これを用いた。また、溶質粘度には、Bird-Carreau モデル⁴⁾で適定した値を用いた。

4. 結果と考察

図2に流れ方向速度 U [m/s]の y 方向分布を示す。水に関しては、いずれの断面位置においてもほぼ同様の分布であり、十分発達した乱流の速度分布であったので、これを実線で示した。また同時にニュートン流体の層流の分布および擬塑性流体の分布を示す。

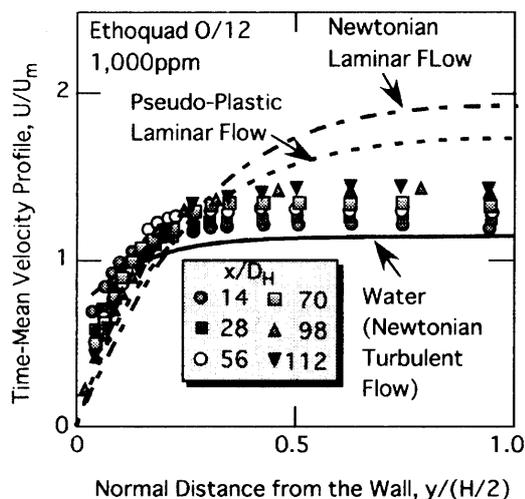


Fig. 2 Time-mean velocity Profiles

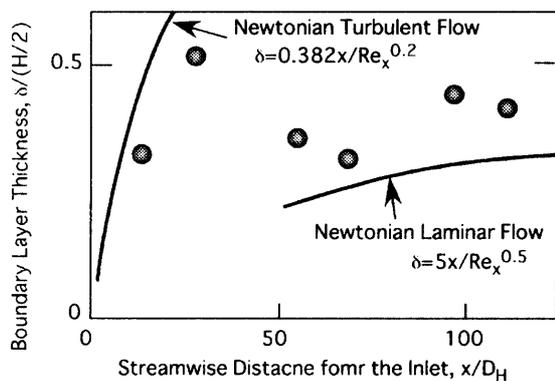


Fig. 3 Boundary Layer Thickness

図より、界面活性剤溶液は、入り口部近傍では、水の乱流の速度分布に比較的近い値を示すが、流れ方向に徐々に発達し、層流の速度分布に近づいていくのがわかる。また、流路中央部には、平坦部が存在し、境界層流れとなっているとみることができる。図3に流路中央速度の99%の値を基準とした境界層厚さ δ を示す。図には、ニュートン流体に関する乱流および層流の境界層厚さの発達式を示した。図中の式で Re_x は流れ方向長さ x [m]を基準としたレイノルズ数である。図より、 $x/D_{H1} < 28$ においては、境界層は乱流の様式で、 $x/D_{H1} = 56$ においては急減し、以降は層流の様式で発達しているものと考えられる。すなわち界面活性剤ミ

セル構造の乱流抑制機能により、溶液は層流的特性を有するものと思われる。流れが十分発達するまでの助走区間を見積もるために、境界層厚さが、層流の境界層の発達様式にしたがって発達するものとし、境界層厚さが流路中央に到達するまでの距離 x_E [m]を算出すると以下のようになる。

$$x_E = \frac{U_0}{\nu} \left(\frac{H}{10} \right)^2 = 989 D_H$$

ここで U_0 [m/s]は流路中央の速度であり、擬塑性流体の十分発達した速度分布の値を採用した。これより界面活性剤溶液の助走区間は水力直径の約 1,000 倍であることがわかる。これはミセル形成時間から見積もった値 875 倍に極めて近い。

図5に重畳法によって計算された応力分布を示す。せん断応力は、摩擦速度 u_τ [m/s]および密度 ρ [kg/m³]で無次元化した。図には Kawaguchi らによって測定された粘性せん断応力と乱流せん断の値を示す。また十分発達したニュートン流体の流れ場においては、粘性せん断応力と乱流せん断応力の和はダクト内では図中実線で示したように、直線分布となることがわかっている。

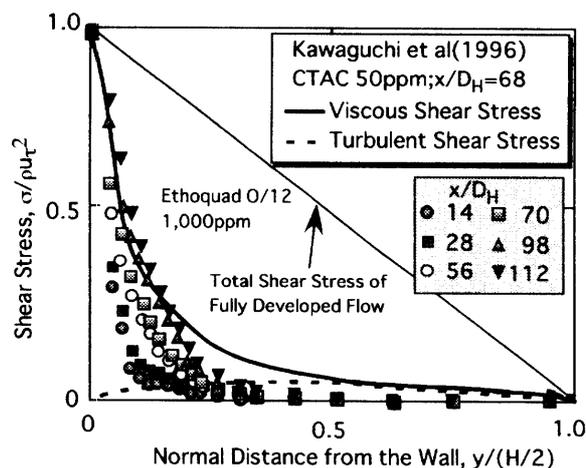


Fig. 4 Shear Stress Distribution

図より、本手法により粘度場の発達に伴って生ずるせん断応力場は、壁近傍に偏在しており、十分発達した応力場に対して欠損を生じている。また本結果の $x/D_H = 63$ 近傍の結果は Kawaguchi らの結果とよく一致しており、一見 Kawaguchi らが指摘した”応力欠損”の存在を支持している。しかしながらこれまで見てきたように、流れ場は十分発達しておらず、また本結果で示したせん断応力場は、流れ方向に向かって発達し、全応力場に近づく傾向を示しており、せん断応力の壁近傍への偏在は、流れの未発達によるものと考えられる。Kawaguchi らは同時に弾性による応力輸送モデルを提示したが、少なくとも定量的に議論するためには、十分に発達した流れ場の測定が不可欠である。

参考文献

- 1) 薄井洋基, 鈴木洋:機論 B 編, 67-658, (2001), 1305.
- 2) Y. Kawaguchi, Y. Tawaraya, A. Yabe, K. Hishida & M. Maeda: Proc. 8th Int. Sym. App. Laser Tech. Fluid Mech., (1996), 29.4.1, Lisbon.
- 3) H. Usui, T. Itoh & T. Saeki: Rheol Acta, 37, (1998), 122.