界面活性剤水溶液の抵抗減少流れにおける乱流組織構造

Coherent Structures in Drag-Reducing Turbulent Flows of Aqueous Surfactant Solution

正 伊藤基之 (名工大)

Motoyuki Itoh, Department of Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology, Showa-ku, Nagoya 466-8555

Our experimental studies on the turbulent characteristics of two-dimensional channel flows of drag-reducing surfactant solutions are described with keeping the accent on the visual studies on the coherent structures of near-wall turbulence, i.e. low-speed streaks, bursting phenomena and quasi-streamwise vortices. The hydrogen-bubble technique was widely used for the flow visualization. The results show that, with increasing drag reduction, DR, the mean spanwise streak spacing increases, the ejections become faint and the averaged ejection period increases, and the quasi-streamwise vortices diminish and the distance from the wall increases. It should be emphasized that the quasi-streamwise vortices were confirmed to be present even when DR was above 60%.

Key Words: Surfactant Solution, Drag Reduction, Low-Speed Streaks, Bursting Phenomena, Quasi-Streamwise Vortices.

1. はじめに

ある種の界面活性剤水溶液は、希薄高分子溶液の場合と同様、乱流状態において著しい摩擦抵抗減少効果を示すことが知られている⁽¹⁾。高分子溶液は機械的せん断や摩擦による劣化現象を生じるため、閉回路の流れ系において継続的な流動抵抗低減効果が得られないという難点を有するが、界面活性剤水溶液は機械的せん断による劣化を受けにくく、閉回路の流れ系においても継続的な流動抵抗低減効果が期待できる。このことから、界面活性剤水溶液についての研究が基礎と応用の両面から近年活発に行われるようになった⁽²⁾。中でも、地域冷暖房システムの熱輸送媒体として界面活性剤水溶液を利用して省エネを図ろうとする実用化研究が各国で精力的に推進されている⁽³⁾。筆者らの研究室では約 10 年前から界面活性剤水溶液の流れにおける乱流摩擦抵抗低減メカニズムの解明に向けて基礎研究を行ってきたが、ここでは主として、2次元チャンネル流における壁近傍のストリーク構造、バースト現象、縦渦構造などの乱流組織構造が、抵抗減少率によってどのように異なるかについて調査した結果を述べる。

2. 実験装置および供試流体

実験には幅 $H=40$ mm、高さ $B=400$ mm、全長 $L=4$ m の透明なアクリル製 2 次元チャンネルを使用した⁽⁴⁾。速度分布の測定および乱流組織構造の可視化観察のため、主として水素気泡法による可視化実験を行った。Fig.1 は水素気泡法を用いた実験を行う際の測定部詳細を示す。水素気泡発生用の電極線は直径 $30\ \mu\text{m}$ のステンレス線で、チャンネル入口から $70H$ 下流にスパン方向に配置した。界面活性剤水溶液としては、水道水中のイオンと不純物を取除いた純水を溶媒とし、これに n -テトラデシル(またはセチル)トリメチルアンモニウムブロミド(またはクロリド)とサリチル酸ナトリウムを等モル量溶解させたものを用いた。以下では簡単のため、これら界面活性剤水溶液を $C_{14}\text{TASal}$ 、 $C_{16}\text{TASal}$ などと表すことにする。これらの界面活性剤水溶液中には、ある臨界濃度を越えると最初は球状ミセルが形成され、さらに濃度が増すと棒状ミセルが形成されるが、抵抗減少効果を得るためには溶液中に棒状ミセルが形成されていることが必要条件である⁽²⁾。Fig.2 は、 $C_{14}\text{TASal}$ について細管式粘度計で測定したせん断粘度 η とせん断速度 $\dot{\gamma}$ の関係を示す⁽⁵⁾。界面活性剤水溶液中に棒状ミセルが形成されている場合、せん断速度が臨界値を越えると多数のミセルが会合して巨大構造を作り、せん断粘度が急増する特有の現象(Shear Induced State, SIS)が知られて

いるが、図においてはこの SIS が $\dot{\gamma}=3\sim 5$ 付近で生じているのが分かる。なお、以下に示す実験結果は、SIS の生じていない低せん断速度におけるせん断粘度を用いて整理したものである。

Fig. 1 Test section

Fig. 2 Shear viscosity of a surfactant solution.

3. 圧力損失

Fig. 3 は濃度 1000 ppm の C_{14} TASal (Br) についての管摩擦係数 f とレイノルズ数 Re の関係を種々の液温について示す⁽⁵⁾. この場合, 抵抗減少率 $DR=(f_w-f_s)/f_w$, f_w : 溶媒の管摩擦係数, f_s : 溶液の管摩擦係数) は最大 70% 程度に達しているが, 図にみられるように, 界面活性剤水溶液の抵抗減少挙動は液温によって大きく異なることがわかるであろう.

Fig. 3 Friction factor of 1000ppm solution

4. 速度分布

Fig. 4 は, 水素気泡のタイムライン間隔から求めた時間平均速度分布を示す. また, このときの流れ方向速度変動強さ分布を Fig. 5 に示す. DR が 50~60% では平均速度分布は Virk の極限分布(ultimate profile)にほぼ一致し, このとき流れ方向の速度変動強さのピーク値は, 摩擦速度で無次元化して比較するとニュートン流体の場合よりかなり大きくなっていることが分かる. 一般的に, 抵抗減少流れでは流れ方向の速度変動強さのピーク位置は DR の増大とともに壁から遠ざかる傾向が見られる. また, 壁垂直方向の速度変動強さは DR の増大とともに著しく減少し, DR の大きな場合には, レイノルズせん断応力は壁から流路中心までの全領域でほぼ 0 となることが知られている⁽⁶⁾.

Fig. 4 Mean velocity distribution

Fig. 5 Distribution of turbulence intensity

5. 乱流組織構造

5-1 ストリーク構造 水素気泡のタイムラインを用いて求めた低速ストリークの時間発展を Fig. 6 に示す⁽⁵⁾. (a) に示すように, ニュートン流体の流れにおいては, 壁に近いほどストリークが密に分布するが, 界面活性剤水溶液の抵抗減少流れにおいては, (b) に見られるように壁から少し離れた位置でストリークが最も多く観察される. これと同様な現象は, 希薄高分子溶液の抵抗減少流れにおいても観察されている⁽⁷⁾. また, Fig. 6(b) においては, 低速ストリークが間欠的に発生している様子が見られ, これはニュートン流体の場合に層流から乱流への遷移領域において観察される現象に類似している. よって, DR の大きな流れにおいては流動状態が完全な乱流とは異なるものと考えられる. Fig. 7 は C_{14} TASal の濃度 1000 ppm の界面活性剤水溶液について, 低速ストリークのスペン方向平均間隔 λ^+ が壁からの距離によって変化する様子を求めたものである. 先にも述べたように, 抵抗減少流れにおいては低速ストリークの平均間隔が最小となるのは壁からやや離れた位置であり, 低速ストリークが壁近傍の縦渦によって生成されるものとするれば, 抵抗減少流れにおいては縦渦の中心がニュートン流体の場合に比べて壁から離れているものと推測される. 種々の界面活性剤濃度および抵抗減少率のもとで低速ストリークの観測を行い, 壁のごく近傍 ($y^+=1$) における平均ストリーク間隔を実験データの外挿により求めた結果を, 抵抗減少率 DR に対してプロットしたのが Fig. 8 である. 同図には Tiederman ら⁽⁷⁾ が希薄高分子溶液の抵抗減少流れについて染料注入法による可視化実験から求めた次の関係式を実線で示す.

$$\lambda^+ = 90.4 + 2.01 DR$$

上式の関係は界面活性剤水溶液の場合の実験結果よりも大きな平均ストリーク間隔を与える. この相違の原因として, 流れの可視化法の違いも考えられるが, 希薄高分子溶液と界面活性剤水溶液のレオロジー特性が異なる(希薄高分子溶液では SIS は生じない)ので, Fig. 8 にみられる相違は流体の違いによるものが大きな原因と考えられる.

(a) Water, Re=10000

(b) C_{14} TASal, Re=10000, DR=55%

Fig. 6 Time evolution of low-speed streaks

Fig. 7 Variation of mean spanwise streak spacing

Fig. 8 Dependence of λ^+ on DR

5-2 パースト現象 パースト現象を可視化観察するため、前述の Fig. 1 に示す水素気泡発生用電極線から連続的に水素気泡膜を発生させ、側面から x - y 面に平行なスリット光で照明してチャンネル上側から観察を行った。電極線の壁からの距離は $y^+=15$ 、スリット光のスパン方向厚さは $\Delta z^+ \approx 100$ とした。Fig. 9 は壁近傍流体のイジェクション運動を示す連続可視化画像の 1 例で、矢印で示す部分が下流に移動するにつれて急激に壁から遠ざかる運動をしているのが見られる。種々の条件下においてこのようなイジェクション運動を注意深く観察した結果、以下のことが明らかとなった。はじめに、イジェクションの強さが抵抗減少率によって変化する様子を Fig. 10 に示す。ただし、 $\Delta y^+_{\max}$ は電極線から下流方向に $\Delta x^+=350$ の範囲内において、気泡膜が外向きに移動した最大量である。この図から、抵抗減少率が 55% を越えるような場合は、イジェクションは発生しないといえる。なお、 $\Delta y^+_{\max}$ は DR のみでなく Re 数によっても異なる。イジェクションの平均発生周期が抵抗減少率によって変化する様子を Fig. 11 に示す。ここで、イジェクションの検出基準としては、Bogard ら⁽⁸⁾ と同様な基準を用いた。すなわち、次の二つの条件が満足される場合をイジェクションと判定するものである。(1) 壁から離れる向きの運動が $y^+=15$ 以下の領域から始まる。(2) 流れ方向に $\Delta x^+=350$ の範囲内で、少なくとも $\Delta y^+=20$ を越える壁から遠ざかる向きの運動が認められる。Fig. 11 から、DR が 50% を越えるとイジェクションの周期が急激に長くなることが分かる。Fig. 12 は、イジェクションの平均的な強さが抵抗減少率によってどのように変化するかを調べるため、電極線の下流 $\Delta x^+=350$ の範囲でのイジェクションによる流体の移動量の平均値 $\overline{\Delta y^+}$ を測定した結果を示す。図から、抵抗減少率の増加とともにイジェクションは徐々に弱くなることが分かる。

 $C_{16}TASal(Cl)$, $Re=10000$, $DR=27\%$, every 1/10 sec

Fig. 9 Photographs of an ejection

Fig. 10 Maximum outward displacement

Fig. 11 Averaged period of ejections

Fig. 12 Averaged outward displacement due to ejections

5-3 縦渦 壁近傍に形成される流れ方向に軸をもつ渦(縦渦)は、ストリーク構造やバースト現象と密接な関係をもつことが良く知られている。ここでは、この縦渦の断面構造を可視化するため、前述の Fig. 1 に示した電極線取り付けプロングに、壁垂直方向に 3 mm 間隔で電極線を 3 本平行に張り、直流電圧を印可することにより 3 枚の気泡膜を生成した。Fig. 13 は、水および DR=25% の界面活性剤水溶液の流れにおいて、電極線の 20~25 mm 下流で流れに垂直な断面をスリット光(幅 5 mm)で照明して下流タンクの後方から撮影した画像である。なお、図に示す y^+ の値は 3 本の電極線の壁からの距離である。水流においては特に壁近傍で気泡膜の変形が顕著に見られ、多数の縦渦が壁近傍に存在することが分かる。これに対して、界面活性剤水溶液の流れでは、気泡膜の変形が少ない。このことから、抵抗減少流れでは縦渦の数は少なく、また渦の強度も弱くなることが分かる。なお、Fig. 13 と同じ断面位置では DR=60% の場合には縦渦の存在が明確でなかったが、電極線から 50~55 mm 下流の断面を観察したところ、非常に弱いながらも縦渦が存在することが確認された。

Fig. 13 Visualization of quasi-streamwise vortices

Fig. 14 は縦渦中心の位置が抵抗減少流れにおいてどのように変化するかを示した図である。渦中心位置については連続した可視化画像をもとに $\Delta z^+=750$ の範囲を観察し、①気泡線の 1 本目より壁側、② 1 本目と 2 本目の間、③ 2 本目と 3 本目の間、④ 3 本目より外側、の 4 領域に渦中心位置を分類して渦本数をカウントした。連続する渦断面画像において、新しい渦が確認されるごとに渦中心の領域を前述の①~④に分類してカウントを行ったが、同一の渦の中心が領域を移動した場合には、それぞれの領域で 1 回カウントした。つま

り、1 本の渦が異なる二つの領域にまたがって存在する場合には、それぞれの領域に 1 本ずつ、合計 2 本の渦が存在するものとしてカウントした。この様にして、それぞれの場合について 100 箇程度の渦中心位置の領域を識別し、単位時間当たり観察される渦の本数を示したのが Fig. 14 である。図から、抵抗減少流れにおいては、渦中心が相対的に壁から離れた位置に存在することが分かる。

Fig. 14 Centers of quasi-streamwise vortices

6. まとめ

界面活性剤水溶液の抵抗減少流れにおける乱流構造に関して、特に壁近傍の乱流組織構造を詳細に調べた結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 抵抗減少流れにおいては、壁面からやや離れた位置で低速ストリークの数が最大となり、壁面近傍における低速ストリークの平均スパン方向間隔は抵抗減少率 DR の増大に伴い増加する。
- (2) イジェクションは DR の増大とともに徐々に弱くなると同時に、発生周期が長くなる。そして、DR が 55% 程度を越える場合には、イジェクションと呼ばれるような運動は観察されない。
- (3) 壁近傍の縦渦中心位置は、抵抗減少流れにおいてはニュートン流体の場合に比べて、平均的に壁から離れている。

参考文献

- (1) Shenoy, A. V., Colloid Polymer Sci., 262 (1984), 319.
- (2) Gyr, A. and Bewersdorff, H.-W., Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives, (1995), 157. Kluwer Academic.
- (3) Hammer, F., Hellsten, M. and Uneback, I., Proc. 11th Euro. Drag Reduction Working Meeting, (1999), 21.
- (4) 伊藤基之・ほか 2 名, 機論, 61-590, B (1995), 3664.
- (5) 伊藤基之・ほか 2 名, 機論, 63-605, B (1997), 40.
- (6) Warholic, M. D., Schmidt, G. M. and Hanratty, T. J., J. Fluid Mech, 388 (1999), 1.
- (7) Tiederman, W. G., ほか 2 名, J. Fluid Mech. 156 (1985), 419.
- (8) Bogard, D. G. and Tiederman, W. G., Proc. Symposium on Turbulence, Missouri-Rolla, (1983), 289.