界面活性剤水溶液の抵抗減少流れにおけるストリーク構造*

伊藤基之^{*1}, 今尾茂樹^{*2}, 杉山耕一^{*3}Characteristics of Low-Speed Streaks in the Flow
of Drag-Reducing Surfactant Solution

Motoyuki ITOH, Shigeki IMAO and Koichi SUGIYAMA

The characteristics of low-speed streaks in turbulent channel flow of a drag-reducing surfactant solution are studied by employing the hydrogen-bubble flow visualization method. The mean velocity profiles and the distributions of streamwise turbulence intensity are also obtained. It is shown that at large values of the drag reduction ratio DR, the profile of the streamwise turbulence intensity has a plateau region around its peak. In the flow of drag-reducing surfactant solution, the mean spanwise streak spacing reaches a minimum at some distance from the wall. In the flow of drag-reducing high density (1 000 ppm) surfactant solution, low-speed streaks appear intermittently at a Reynolds number smaller than those for the 'hump' of the $f-Re$ curve (f : friction factor). The mean spanwise streak spacing very near the wall increases as DR increases. It is speculated that the nondimensional wall-normal distance y^+ of the center of streamwise vortices is larger for the flow of large DR compared with that for Newtonian fluid flow.

Key Words: Turbulent Flow, Non-Newtonian Fluid, Flow Visualization, Velocity Profile, Drag Reduction, Surfactant Solution, Low-Speed Streak

1. 緒 言

壁面乱流の壁近傍には、流れ方向に長く伸びた局所的な低速領域と高速領域がスパン方向に交互に並んだ組織構造(ストリーク構造)が存在し、低速領域(低速ストリーク)の上昇、振動、崩壊の一連の過程(バースティング現象)が、乱れの生成や運動量輸送に深く関わっている。乱流状態において著しい摩擦抵抗減少を示す希薄高分子溶液の流れにおいては、この乱流摩擦抵抗減少の増大とともに低速ストリークのスパン方向平均間隔は広くなり、平均バースト周期は長くなることが報告されている⁽¹⁾。界面活性剤水溶液の摩擦抵抗減少流れにおいても同様な現象が見られるものと予想されるが、界面活性剤溶液と希薄高分子溶液とは抵抗減少のメカニズムが異なるという推測⁽²⁾もなされており、両者ではストリーク構造に差が見られる可能性もある。そこで本研究では、界面活性剤水溶液の二次元チャンネル乱流について水素気泡法を用いた流れの可視化実験を行い、乱流摩擦抵抗の減少とともにスト

リーク構造がどのように変化するかを明らかにした。また、ここで得られた結果を、希薄高分子溶液の流れに関する過去の報告⁽¹⁾と比較検討した。

2. おもな記号

DR: 摩擦抵抗減少率

 f : 管摩擦係数 H : チャンネル幅 m : 水力半径 Re : レイノルズ数 $= 4mU/\nu$ U : 断面平均流速 u' : 平均流方向の変動速度成分 u_τ : 摩擦速度 y : 壁からの垂直距離 λ : 低速ストリークのスパン方向間隔 η : ゼリ粘度 ν : 動粘度

添 字

() $\bar{}$: アンサンブル平均または時間平均量() $^+$: u_τ および ν による無次元量

3. 実験装置および方法

実験に使用した二次元チャンネル回流装置は、前

* 原稿受付 1996年5月21日。

^{*1} 正員、名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)。^{*2} 正員、岐阜大学工学部 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)。^{*3} 東邦ガス(株) (〒458 名古屋市熱田区桜田町)。

報⁽³⁾に示したものと同一であり、二次元チャンネル部は幅 $H=40$ mm、高さ $B=400$ mm、全長 $L=4$ m のアクリル製である。圧力損失測定にはチャンネル入口から $55\sim 90H$ 下流位置に設けた静圧測定孔を用いた。図1は水素気泡法を用いた実験の測定部詳細を示す。水素気泡発生用の細線は直径 $25\ \mu\text{m}$ 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。水素気泡発生用の直流電源にはDCパルスジェネレータ(菅原研究所 MN-305)、水素気泡のタイムライン撮影には CCD カメラ (SONY AVC-D 7)、VTR (NATIONAL NV-8950) を用い、VTR に記録した画像は画像処理ボード(テクニカルサポート DIG 98)を介してパーソナルコンピュータに取込んだ後に必要な画像解析を行った。界面活性剤水溶液としては、純水器と $5\ \mu\text{m}$ フィルタにより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 -テトラデシルトリメチルアンモニウム・プロマイドとサリチル酸ナトリウムを同モル量溶解させたものを用いた。本研究では、これら混合物の濃度が $500\ \text{ppm}$ および $1000\ \text{ppm}$ の場合について実験を行った。

図2に細管式粘度計により測定した、ずり粘度 η と

Fig. 1 Test section

Fig. 2 Shear viscosity of a surfactant solution

壁面ずり速度 $\dot{\gamma}_w$ の関係を、濃度 $1000\ \text{ppm}$ の界面活性剤水溶液について示す。前報⁽³⁾で述べたように、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、ずり速度が臨界値を越えると多数のミセルが絡み合って巨大構造を作り、ずり粘度 η が急増する⁽⁴⁾。このようにして η が増大した状態は、せん断誘起状態 (Shear Induced State, SIS) と呼ばれるが、図2において SIS が明確に観察される。前報に示した濃度 $400\ \text{ppm}$ の場合と比較すると、界面活性剤の濃度が $1000\ \text{ppm}$ に増加することにより、低ずり速度における η の値が増大するとともに、SIS の形成による η の増加率も大きくなることがわかる。なお、以下に示す実験結果は、前報と同様、SIS の生じていない低 $\dot{\gamma}_w$ における η の値 ($\dot{\gamma}_w$ によらず一定) を用いて整理したものである。

4. 実験結果および考察

4.1 圧力損失 図3は濃度 $1000\ \text{ppm}$ の界面活性剤水溶液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の場合について示す。同図中には、ニュートン流体の層流に対する理論式

$$4f = 1.313 \times 64 / Re \quad \dots\dots\dots (1)$$

乱流についての Blasius の式

$$4f = 0.3164 Re^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (2)$$

さらに、次式で与えられる Virk⁽⁵⁾ の最大抵抗減少漸近線を実線で示した。

$$1/\sqrt{4f} = 9.5 \log(Re\sqrt{4f}) - 19.06 \quad \dots\dots\dots (3)$$

界面活性剤水溶液の乱流域における f の値は液温により大きく変化し、液温が高いほど摩擦抵抗減少が小さくなるが、この原因は前報⁽³⁾でも述べたように、液温の上昇とともに溶液中に含まれる棒状ミセルの長さが短くなる⁽⁴⁾ ことによるものと考えられる。

ところで、今回の水素気泡法を用いた可視化実験において、水素気泡発生用のパルス電圧の印加時間(累

Fig. 3 Friction factor of 1000 ppm solution

Fig. 4 Degradation of surfactant solution

Fig. 5 Drag reduction DR

積)に応じて、図4に見られるように抵抗減少効果が徐々に小さくなる現象が見出された(同図には記号説明の括弧内に水素気泡発生用パルスジェネレータへの通電時間が示されている)。このように、通電時間の増加に伴い抵抗減少率の低減が見られるのは、溶液の電気分解により Br^- イオンの濃度が減少して棒状ミセルが短くなるため⁽⁶⁾と考えられる。なお、図5に示す液温と濃度では、通電時間が3.5時間を超えた後は f の変化が見られなかった。しかし、この状態においても依然として抵抗減少効果が見られることから、溶液の電気分解のみによって抵抗減少効果が完全に消失することはないものと考えられる。

以下に示す水素気泡法を用いた実験においては、各 Re 数のもとでの通電時間は、溶液の電気分解による抵抗減少率の低下がほとんど問題にならない程度の短時間(約10分以内)とした。

図5は、抵抗減少率 DR を次式で定義し、図4のデータを再プロットしたものである。

$$DR = (f_w - f_s) / f_w \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 f_w は水の場合の管摩擦係数、 f_s は界面活性剤水溶液の場合の管摩擦係数である。図5において、最大77%の抵抗減少が示されている。また、 $Re = 10000 \sim 15000$ の領域において、3.5時間通電後のものを除き、いずれも Re の増大により DR がいったん低下

(a) 1000 ppm solution

(b) 500 ppm solution

Fig. 6 Mean velocity distribution

する現象が見られる。この現象に対応する変化は、図4の $f-Re$ 関係においては“こぶ”状の部分として現れており、Ohlendorfら⁽⁴⁾は、このような現象はバッファ層内の平均ずり速度がSISを引き起こす臨界値を超えることにより生じると報告している。以下で述べる壁近くのストリーク構造においては、このような $f-Re$ 関係曲線の“こぶ”状の部分よりも低 Re 数側では、流動状態が層流から乱流への遷移領域のものに類似していることがわかった。

4.2 平均速度と乱れ強さの分布 流速の測定には、一定時間間隔のパルス電圧の印加により発生する水素気泡列のタイムライン間隔を計測して求める方法⁽⁷⁾を用いた。すなわち、電極線の下流の1本めと2本めのタイムライン間隔 Δx をタイムライン発生の時間間隔 Δt で割り、 Δt 間の平均速度とした。本実験では Δt を 1/30, 2/30, 3/30 秒の3種類の中から流速に応じて適当に選び、画面のサンプリングもこれに合せて設定した。電極線の後流の影響については、熱膜プローブ校正用の回転水槽⁽³⁾を用いて各種作動流体についてあらかじめ調べておき、前記の $\Delta x / \Delta t$ として求めた速度に補正を施した。以下に示す平均速度 u や乱れ強さ u'_{rms} などの時間平均量は、各測定点ごとに上述のようにして求めた時間的に連続する256個の速度データから算出した値であるが、データの平均個

数を2倍(512個)にしても結果に差が見られないことは確認しておいた。

図6(a), (b)は平均速度分布を対数プロットしたもので、 $U^+ = \bar{u}/u_\tau$, $y^+ = yu_\tau/\nu$ である。ただし、 u_τ は摩擦速度で、水の場合は対数速度分布式($U^+ = 5.75 \log y^+ + 5.5$)が成立することが確認されているので、この関係式を用いて求めた。一方、界面活性剤水溶液の場合には現在のところ確立された速度分布式がないので、圧力損失から u_τ を求めた。図6(a)は濃度1000 ppm、図6(b)は濃度500 ppmの界面活性剤水溶液の場合の結果を水の場合と比較して示したものであり、これらの図から、界面活性剤水溶液の抵抗減少率 DR が55~62%の流れでは、対数領域における速度分布が、Virk⁽⁴⁾の極限分布(ultimate profile)

$$U^+ = 26.9 \log y^+ - 17 \quad \cdots \cdots \cdots (5)$$

にほぼ一致するのがわかる。また、 $DR = 26\%$ の場合には、対数領域において水の場合の関係式

$$U^+ = 5.75 \log y^+ + 5.5 \quad \cdots \cdots \cdots (6)$$

を表す直線にほぼ並行な線上に並ぶ、なお前報⁽³⁾では、抵抗減少率の大きな流れにおいてS字状の速度分布が得られ、 y^+ の大きな領域でVirkの極限分布よりも大きな速度が得られることを示したが、図6にそのような傾向が見られないのは、ここでの実験条件における抵抗減少率が前報のものより小さいためと考えら

れる。

図7に主流方向の乱れ強さ u'_{rms} の分布を示す。作動流体が水の場合には、図中に曲線で示すKimら⁽⁸⁾の直接数値シミュレーション(DNS)の結果と比較して、 y^+ の大きな領域で本実験データが若干大きな値を示しているが、これは電極線の影響を受けて乱れが少し大きくなったためと思われる。前報⁽³⁾でも述べたように、一般に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壁面から離れた位置で主流方向の乱れ強さが最大となるが、図7において注目値するのは、 u'_{rms}/u_τ のピーク値が水の場合に比べてかなり大きいこと、そして DR の大きい場合はピーク領域が壁垂直方向に広い幅をもっている点である。またこの場合、壁のごく近傍のみでなく、 y^+ の大きな領域でも y 方向の急激な変化が見られることも特徴的な分布である。

4.3 ストリーク構造

水素気泡法を用いた低速ストリークの測定は、ニュートン流体の流れについてSmithら⁽⁸⁾、入谷ら⁽⁹⁾によって報告されている。ここでは入谷らと同様な定義を採用して、低速ストリークの検出を行った。すなわち、電極線下流のタイムラインに局所的なピークが一定時間 Δt 以上継続して見られる場合(図8)を低速ストリークとした。タイムラインの間隔は測定条件に応じて1/60~1/15秒の間で適当に設定し、 $\Delta t = 0.2$ 秒とした。VTR画像は1/15~1/5秒のサンプリング間隔でモニターに再生し、横軸に時間軸をとった1枚のOHPシート上に各再生画像中の低速ストリークを順にマークしていった。このようにして得られた低速ストリークの時間発展を図9、10に示す。各図において、横軸は時間を ν/u_τ^2 、縦軸はスパン方向長さを ν/u_τ の単位で表示してある。

図9(a)は水流についての結果であり、Smithら⁽⁸⁾、入谷ら⁽⁹⁾と同様、壁に近いほどストリークが密に分布しているのがわかる。図9(b), (c)はいずれも濃度500 ppmの界面活性剤水溶液の $Re = 10\,000$ における流れについての結果であるが、図9(b)は図9(c)に比べて抵抗減少率 DR がかなり小さい場合の結果である。図からわかるように、抵抗減少流れにおいてはは

(a) 1000 ppm solution

(b) 500 ppm solution

Fig. 7 Distribution of turbulence intensity

Fig. 8 Definition of low-speed streak

Fig. 9 Time evolution of low-speed streaks

Fig. 10 Time evolution of low-speed streaks

DR が大きいほどストリークのスパン方向間隔が平均的に大きくなる。また、水流の場合とは異なり、壁から少し離れた場所においてストリーク間隔が壁近傍よりも狭くなっている。

図 10(a), (b) は濃度 1000 ppm の場合のストリーク観察結果である。図 10(a) に示す $Re=10\,000$ の場合には、ストリークスのスパン方向間隔が間欠的に大きくなったり小さくなったりする現象が見られるが、これは図 11 に示す水流の層流から乱流への遷移領域において観測される現象に類似している。よって図 10(a) の流れは、まだ完全な乱流状態には至っていないものと推測される。

Fig. 11 Intermittency of low-speed streaks (water flow, $Re=4\,900$)

次に、図 9, 10 に示した低速ストリークの時間発展の図から、 Δt の間隔で低速ストリークのスパン方向間隔を測定した結果を、ヒストグラムにして図 12 に示す。図中に示す曲線は平均ストリーク間隔 λ^+ および変異係数 $\phi_\lambda (= \sigma_\lambda / \lambda^+)$, σ_λ : λ^+ の標準偏差) に基づく

 (a) $C_{14}TASal$ 500 ppm
 $Re = 10,000$, $DR = 60\%$

 (b) $C_{14}TASal$ 1000 ppm
 $Re = 20,000$, $DR = 62\%$

Fig. 12 Histogram of spanwise streak spacing

対数正規分布⁽⁹⁾を表す。Smith ら⁽⁹⁾、入谷ら⁽¹⁰⁾は、ニュートン流体の壁乱流において、バッファ領域から壁側ではこのようなヒストグラムが対数正規分布に従うことを報告しているが、本実験でも水流については同様のことが確認された。しかし、界面活性剤水溶液の抵抗減少流れにおいては、図 12 に見られるように、壁近傍では λ^+ のかなり大きなところ [図 12(a)では $\lambda^+ = 250$ 付近、図 12(b)では $\lambda^+ = 300$ 付近] にも二つめの小さなピークが見られる。このような複数のピークをもつ分布は、ニュートン流体の場合には壁から離れた場所において見られるものであり⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、このことから、抵抗減少流れにおいては低速ストリークの平均的位置は壁から少し離れた場所にあるものと考えられる。

図 13 は平均ストリーク間隔 $\bar{\lambda}^+$ の y^+ に対する変化について、抵抗減少率が $DR = 60\%$ 、 26% の界面活性

Fig. 13 Variation of mean spanwise streak spacing

Fig. 14 Variation of mean spanwise streak spacing

剤水溶液(濃度 500 ppm)の場合を水の場合と比較して示したものである。水の場合には入谷ら⁽¹⁰⁾の結果とよく一致し、壁に近いほど $\bar{\lambda}^+$ が小さくなる。一方、抵抗減少率の大きな界面活性剤水溶液の流れでは、 y^+ の小さな領域において壁に近づくにつれて $\bar{\lambda}^+$ が急増する現象が見られる。これと同様な現象は、希薄高分子溶液の流れにおいても観測されている⁽¹¹⁾。低速ストリークが壁近傍の縦渦により形成されるもの⁽¹²⁾とすれば、抵抗減少流れにおいては壁からやや離れた位置においてストリーク間隔が最も密になることから、壁近傍の縦渦の中心がニュートン流体の場合に比べて壁から遠い位置にあるものと推測される。

図 14 は濃度 1000 ppm の界面活性剤水溶液について $\bar{\lambda}^+$ の分布を示す。この場合、 $\bar{\lambda}^+$ の最小値が濃度 500 ppm の場合と比較してかなり大きな値となっており、 $\bar{\lambda}^+$ の分布は Re と DR のみによらないことが

Fig. 15 Dependence of λ^+ on DR

わかる。

図 13, 14 などに示す結果をもとに、極めて壁に近い場所 ($y^+ = 1$) における平均ストリーク間隔 λ^+ の値を実験データからの外挿により求め、抵抗減少率 DR との関係で示したのが図 15 である。図中の直線は Tiederman ら⁽¹⁾ が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表している。

$$\lambda^+ = 90.4 + 2.01DR \quad \cdots \cdots (7)$$

上式の関係は本実験結果よりもやや大きな λ^+ の値を与えることがわかる。この相違の原因として、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場合とは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、図 15 に見られる結果の相違は流体の違いによるもの大きいと考えられる。しかし、 DR の増大とともに壁のごく近傍のストリーク間隔が広くなることは、いずれの流体においても明らかである。

以上の実験結果を総合して、抵抗減少率が大きいほど壁近傍の縦渦のスケールが大きいことが結論できる。

5. 結 言

界面活性剤水溶液の流れにおける摩擦抵抗減少のメカニズムを明らかにするため、二次元チャンネル流の抵抗減少流れについて水素気泡法を用いた可視化実験を行い、平均速度分布、乱れ強さ分布、ストリーク構造の測定を行い、以下の結論を得た。

(1) 界面活性剤水溶液の抵抗減少率の大きな流れにおいては、壁変数で無次元化された主流方向の乱れ強さ u'_{rms}/u_τ の最大値が、ニュートン流体の場合に比べてかなり大きくなる。そして、 u'_{rms}/u_τ の壁垂直方向分布形状は、その最大値付近で平坦なものとなる。

(2) 抵抗減少流れにおいては、壁からある程度離れた場所で低速ストリークが最も多く観察され、これより壁に近づくにつれて低速ストリークが急激に少なくなる。

(3) 界面活性剤の濃度が高い水溶液 (1 000 ppm) では、管摩擦係数とレイノルズ数の関係 ($f-Re$ 曲線) において、“こぶ”状の変化が見られる領域よりもやや低いレイノルズ数では、ストリーク構造が間欠的に疎密となり、完全な乱流状態にないものと思われる。

(4) 界面活性剤水溶液の流れにおいても、希薄高分子溶液の場合と同様、壁のごく近傍の平均ストリーク間隔 λ^+ は抵抗減少率 DR に応じて変化し、 DR の増大とともに λ^+ は大きくなる。

(5) 界面活性剤水溶液や希薄高分子溶液などの粘弾性流体の抵抗減少流れにおいては、抵抗減少率 DR が大きいほど壁近傍の縦渦構造のスケールが大きくなり、渦中心の位置が壁から遠ざかるものと考えられる。

文 献

- (1) Tiederman, W. G., ほか 2 名, *J. Fluid Mech.*, **156**(1985), 419-437.
- (2) Gyr, A. and Bewersdorff, H.-W., *Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives*, (1995), 172-174, Kluwer Academic.
- (3) 伊藤基之・ほか 2 名, 機論, **61**-590, B(1995), 3664-3670.
- (4) Ohlendorf, D., ほか 2 名, *Rheol. Acta*, **25**(1986), 468-486.
- (5) Virk, P. S., *AIChE J. Basic Eng.*, **94**(1975), 625-656.
- (6) Imae, T. and Kohsaka, T., *J. Phys. Chem.*, **96**-24(1992), 10030-10035.
- (7) Kline, S. J., ほか 2 名, *J. Fluid Mech.*, **30**(1976), 741-773.
- (8) Kim, J., ほか 2 名, *J. Fluid Mech.*, **177**(1987), 133-166.
- (9) Smith, C. R. and Metzler, S. P., *J. Fluid Mech.*, **129**(1983), 27-54.
- (10) 入谷陽一郎・ほか 2 名, 機論, **51**-470, B(1985), 3092-3099.
- (11) Oldaker, D. K. and Tiederman, W. G., *Phys. Fluids*, **20**-10(1977), 133-144.
- (12) Robinson, S. K., *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **23**(1992), 601-639.