界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層に及ぼす溶液温度の影響*

玉野真司^{*1}, 伊藤基之^{*1}
井上武文^{*2}, 横田和彦^{*1}Effects of Temperature of Surfactant Solutions on Drag-Reducing
Turbulent Boundary LayerShinji TAMANO^{*3}, Motoyuki ITOH,
Takefumi INOUE and Kazuhiko YOKOTA^{*3} Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

In this study, the influence of a drag-reducing surfactant on the turbulent boundary layer was extensively investigated under different solution temperatures using a two-component laser-Doppler velocimetry system. The surfactant solution used here was a mixture of cetyltrimethyl ammonium chloride (CTAC) with sodium salicylate as counterion, which was dissolved in tap water. The temperature of surfactant solution was $T=20, 25, 30$, and 35°C . It is found that the drag reduction ratio DR for $C=65$ and 100 ppm becomes smaller with the increase of the temperature from $T=25$ to 35°C , and the DR at $T=20^{\circ}\text{C}$ is smaller than DR at $T=25^{\circ}\text{C}$. We introduced three distinct regimes of drag reduction, which were referred to as low drag reduction (LDR), high drag reduction (HDR), and maximum drag reduction (MDR) regimes. The distributions of the mean velocity, the wall-normal turbulence intensity, and the Reynolds shear stress could be clarified by these three regimes, while the streamwise turbulence intensity profile could not be explained.

Key Words: Non-Newtonian Fluid, Turbulent Flow, Boundary Layer, LDV, Velocity Distribution, Surfactant Solution, Drag Reduction

1. 緒 言

著者ら⁽¹⁾は, 界面活性剤添加による抵抗低減メカニズムの解明のためには, 内部流れにおける知見に加えて外部流れにおける知見も必要であるという考えのもと, 外部流れである界面活性剤水溶液の抵抗低減境界層流れの速度場計測を行ってきた. これにより, 高分子水溶液の抵抗低減乱流境界層流れ^{(2) (3)}ならびに界面活性剤水溶液の円管内乱流^{(4) (5)}およびチャネル乱流^{(6)~(10)}においては見られない境界層中央部付近における主流方向乱れ強さ分布の付加的な極大値の存在を明らかにした⁽¹⁾. また, ごく最近著者ら⁽¹¹⁾は, 溶液濃度 65 ppm, 100 ppm および 150 ppm, 溶液温度 20°C において界面活性剤水溶液の濃度の影響を調べることににより, この付加的な極大値の存在と抵抗低減率との関係について報告している. しかしながら, 界面活性剤水溶液の温度の影響は調べられておらず, 利用可能な実測データは円管内乱流およびチャネル乱流

のものと比べると不十分である. 特に, 界面活性剤水溶液の抵抗低減流れの速度場は溶液温度の影響を強く受けることから, 溶液濃度 65 ppm, 100 ppm および 150 ppm, 溶液温度 20°C において観察されている主流方向乱れ強さ分布の付加的な極大値が他の溶液温度においても同様に見られるかどうかについては不明である.

最近, 実験的研究に加えて, 粘弾性流体の抵抗低減乱流境界層の直接数値シミュレーション (DNS) が行なわれるようになってきた^{(12)~(14)}. しかしながら, これらの数値的研究では, 主に希薄高分子水溶液における抵抗低減乱流境界層を対象としており, 界面活性剤水溶液に特有のレオロジー特性は考慮されていない. そのため, 界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層の抵抗低減メカニズムに関する知見, 特に, 境界層中央部付近において見られる主流方向乱れ強さ分布の付加的な極大値に関する知見についてはこれまでに得られていない.

本研究では, 2次元レーザドップラー流速計 (LDV) を用いて, 既報⁽¹¹⁾の溶液濃度 65 ppm および 100 ppm, 溶液温度 20°C に加えて, 溶液温度 25°C , 30°C および 35°C におけるゼロ圧力勾配平板上乱流境界層の平均速

* 原稿受付 2007年10月24日.

^{*1} 正員, 名古屋工業大学大学院工学研究科(☎466-8555 名古屋市昭和区御器所町).^{*2} 川崎重工業(株)明石工場(☎673-8666 明石市川崎町1-1).

E-mail: tamano.shinji@nitech.ac.jp

Fig. 1 Effect of solution temperature on shear viscosity: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

度および乱れ統計量の分布を計測し、界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層に及ぼす溶液温度の影響を明らかにした。特に、粘弾性流体の抵抗低減流れを抵抗低減率の大きさにより、低抵抗低減 (Low Drag Reduction: LDR), 高抵抗低減 (High Drag Reduction: HDR), 最大抵抗低減 (Maximum Drag Reduction: MDR) の3つに分類することで⁽¹⁵⁾, 平均速度分布および乱れ統計量の分布を整理した。

2. 実験装置および方法

実験には、300×300×1500 mm のアクリル製の開水路測定部を持つ回流水槽を用いた。測定部には20×295×1700 mm のアクリル製のテストプレートと底面に対して垂直に設置した。テストプレート前縁から100 mm の位置に直径2 mm のトリップワイヤを取り付けることにより、テストプレート上に乱流境界層を発達させた。

界面活性剤水溶液として、水道水を溶媒とし、これに陽イオン界面活性剤であるヘキサデシルトリメチルアンモニウムクロライド ($C_{16}TACl$, CTAC) と対イオンであるサリチル酸ナトリウム (NaSal) を同モル量溶解したものを使用した。本研究では、界面活性剤 (CTAC) の重量濃度を65 ppm および100 ppm とした。

流速の測定には2次元LDV (Model 1543-A-A03, 日本カノマックス(株)製)を使用した。主流速度 $U_e \approx 300$ mm/s のもと、チャンネル底面からの高さ150 mm, 前

Table 1 Effect of solution temperature on boundary layer parameters and friction velocity for surfactant solutions of $C = 65$ and 100 ppm.

	T (°C)	δ (mm)	δ^* (mm)	θ (mm)	u_τ (mm/s)
CTAC 65 ppm	20	23.0	4.87	2.65	8.50
	25	22.2	5.13	2.58	7.70
	30	28.1	4.69	3.25	11.3
	35	29.8	4.79	3.43	13.0
CTAC 100 ppm	20	22.2	5.45	2.90	9.60
	25	20.1	4.89	2.52	8.50
	30	24.3	4.74	2.75	10.5
	35	29.3	4.60	3.21	12.5

縁からの主流方向距離 $x = 1000$ mm の位置においてLDV計測を行なった。LDV計測時の作動流体の温度 T は、20°C, 25°C, 30°C, および35°Cと変化させた。また、2台の循環式冷却器により、測定中の溶液温度を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に保った。

なお、実験装置ならびにLDV計測の詳細については既報⁽¹⁾⁽¹¹⁾を参照されたい。

3. 実験結果および考察

3.1 セン断粘度 溶液濃度65 ppm および100 ppm の界面活性剤水溶液について、溶液温度 $T = 20, 25, 30, 35^\circ\text{C}$ におけるせん断速度 $\dot{\gamma}_w$ 1/s とせん断粘度 η Pa·s の関係をそれぞれ図1(a) および1(b)に示す。せん断粘度の測定には内径 $d = 5.07$ mm の細管粘度計を使用し、細管全体をウォータージャケット構造にすることにより、溶液温度 T を設定温度の $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内に保ち測定を行った。溶液濃度65 ppm の場合、 $T = 20^\circ\text{C}$ および 25°C ではそれぞれ、せん断速度が10 1/s および20 1/s 付近において、せん断粘度は急激に上昇し (SIS)⁽¹⁶⁾, その後、せん断速度の増加に伴いせん断粘度は単調に減少する (Shear-thinning) のに対して、 $T = 30^\circ\text{C}$ および 35°C ではSISは見られない。また、同じ温度の水の値と比較して、せん断粘度の値は $T = 20^\circ\text{C}$ および 25°C では大きく、 $T = 30^\circ\text{C}$ および 35°C ではほぼ同じである。

一方、溶液濃度100 ppm の場合、溶液温度 $T = 20^\circ\text{C}$, 25°C および 35°C では、せん断速度 $\dot{\gamma}_w = 10$ 1/s 付近においてSISとなるが、 $T = 30^\circ\text{C}$ ではSISは見られずほぼ一定値となる。また、溶液温度 $T = 20^\circ\text{C}$ および 25°C ではデータのばらつきはあるもののShear-thinningが見られるが、 $T = 30^\circ\text{C}$ および 35°C では見られない。なお、溶液濃度100 ppm の場合、溶液温度に依らず、界面活性剤水溶液のせん断粘度は同じ温度の水のものよりも大きくなる。

3.2 境界層パラメータ 溶液濃度 $C = 65$ ppm および100 ppm について、溶液温度 $T =$

Fig. 2 Effect of solution temperature on stream-wise evolution of friction coefficient: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

20, 25, 30, 35°Cにおける境界層厚さ δ , 排除厚さ δ^* , 運動量厚さ θ , および摩擦速度 u_τ の値を表1に示す. 界面活性剤水溶液の u_τ の値は, 粘性底層内での平均速度の測定値を最小2乗法により直線近似して得られる平均速度勾配の値ならびに界面活性剤水溶液のせん断粘度(図1参照)の値を用いることにより求めた. 溶液濃度 $C = 65$ ppmおよび100 ppm共に, 境界層厚さ δ , 運動量厚さ θ , および摩擦速度 u_τ は, 溶液温度が20°Cから25°Cに高くなると一旦小さくなり, その後, 溶液温度が25°Cから35°Cまで高くなるのに伴い大きくなる. これらの温度依存性は抵抗低減率 DR のものに対応している(表2参照). 排除厚さ δ^* については, その発達度合いと抵抗低減率の主流方向変化(表2参照)との間には明確な関連性は見られない.

溶液濃度 $C = 65$ ppmおよび100 ppmについて, 壁面摩擦係数 $C_f = 2(u_\tau/U_e)^2$ の運動量厚さレイノルズ数 $Re_\theta = U_e\theta/\nu$ 依存性を図2(a)および2(b)に示す. ここで, ν は動粘度であり, 界面活性剤水溶液の場合, 壁面せん断速度により決定される. 水の場合の C_f の測定データ⁽¹¹⁾($T = 25^\circ\text{C}$, $x = 300, 500, 800, 1000$ mm)はColesの曲線⁽¹⁷⁾と良く一致している. 界面活性剤水溶液の場合, 溶液濃度に依らず, C_f の値は $T = 25^\circ\text{C}$ で最小となり, 溶液温度が25°Cから35°Cまで高くなるのに伴い急激に大きくなり, 水の値に近づく.

溶液濃度 $C = 100$ ppmおよび150 ppmについて, 形状係数 $H = \delta^*/\theta$ の Re_θ 依存性を図3(a)および

Fig. 3 Effect of solution temperature on stream-wise evolution of shape factor: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

Table 2 Effect of solution temperature on drag reduction ratio DR (%).

C (ppm)	$T = 20^\circ\text{C}$	$T = 25^\circ\text{C}$	$T = 30^\circ\text{C}$	$T = 35^\circ\text{C}$
65	62	69	33	11
100	52	62	42	18

3(b)に示す. 水の場合の H の測定データはColesの曲線⁽¹⁷⁾と良く一致している. 界面活性剤水溶液の H の値は, $T = 20^\circ\text{C}$ から25°Cに高くなると一旦大きくなり, その後, $T = 25^\circ\text{C}$ から35°Cまで高くなるのに伴い急激に小さくなり, 水の値と同程度になる. また, 界面活性剤水溶液における H の急激な減少は, C_f の急激な増加に対応している.

3.3 抵抗低減率 溶液濃度 $C = 65$ ppmおよび100 ppmにおける抵抗低減率 DR の溶液温度依存性を表2に示す. $DR = (C_{f,water} - C_{f,surfactant})/C_{f,water} \times 100$ は, 主流方向距離 $x(=1000$ mm)ならびに主流速度 $U_e(\approx 300$ mm/s)が等しい界面活性剤水溶液と水の壁面摩擦係数を用いて定義される. ここで, 水の壁面摩擦係数については, 水温 $T = 25^\circ\text{C}$ の測定データ⁽¹¹⁾を用いた. 溶液濃度 C に依らず, 抵抗低減率 DR は溶液温度 T が20°Cから25°Cに高くなると一旦大きくなり, その後, 溶液温度が25°Cから35°Cまで高くなるのに伴い小さくなる.

粘弾性流体の抵抗低減流れは抵抗低減率の大きさにより, 低抵抗低減(Low Drag Reduction: LDR), 高抵

Fig. 4 Effect of solution temperature on mean velocity: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

抵抗低減 (High Drag Reduction: HDR), 最大抵抗低減 (Maximum Drag Reduction: MDR) の3つに大別される⁽¹⁵⁾. 本研究では, 抵抗低減率が $0 < DR < 40\%$ の場合を LDR 領域, $40 \leq DR < 60\%$ の場合を HDR 領域, $DR \geq 60\%$ の場合を MDR 領域と定義する. 以下に示す平均速度分布および乱れ統計量の分布の考察には, LDR 領域, HDR 領域, および MDR 領域の分類を使用する.

3.4 平均速度分布 溶液濃度 $C = 65$ ppm および 100 ppm について, 溶液温度 $T = 20, 25, 30, 35^\circ\text{C}$ での主流速度 U_e により正規化された平均速度 U/U_e の分布をそれぞれ図 4(a) および 4(b) に示す. 図の横軸には壁面からの無次元距離 y/δ が用いられている. 図中の実線および破線はそれぞれ $1/n$ 乗則 ($n=6$) およびブラジウスの層流分布⁽¹⁸⁾を表す. 溶液濃度 $C = 65$ ppm では, $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) の平均速度 U/U_e は, 水の速度分布とブラジウスの層流速度分布のほぼ中間

Fig. 5 Effect of solution temperature on mean velocity in wall coordinates: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

に位置し, $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 69\%$) の平均速度 U/U_e は, さらに層流速度分布に近づく. また, $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 33\%$) および $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 11\%$) の平均速度 U/U_e は水の分布とほぼ一致する. 一方, $C = 100$ ppm では, $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 52\%$) および $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) の分布は互いに良く一致し, 水の速度分布とブラジウスの層流速度分布のほぼ中間に位置する. また, $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 42\%$) の分布は, $T = 20^\circ\text{C}$ および $T = 25^\circ\text{C}$ よりも水の分布に近くなり, $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 18\%$) の分布は, 水の分布にほぼ一致する.

以上の結果より, 外層スケールの平均速度分布は, LDR 領域 ($0 < DR < 40\%$) では水の分布にほぼ一致すること, HDR 領域 ($40 \leq DR < 60\%$) では抵抗低

減率の増加と共にブラジウスの層流速分布に近づくこと、およびMDR領域($DR \geq 60\%$)では水の水の速度分布とブラジウスの層流速分布のほぼ中間に位置することが明らかになった。

溶液濃度 $C = 65$ ppm および 100 ppm について、摩擦速度 u_τ により正規化された平均速度 $U^+ = U/u_\tau$ の分布をそれぞれ図5(a)および5(b)に示す。図の横軸には壁面からの無次元距離 $y^+ = u_\tau y/\nu$ が用いられている。また図には比較のため、 $U^+ = y^+$ の分布、ニュートン流体の対数速度分布 ($U^+ = 2.44 \ln y^+ + 5.0$)、および Virk の極限速度分布⁽¹⁹⁾ ($U^+ = 11.7 \ln y^+ - 17$) が示されている。溶液濃度 $C = 65$ ppm および 100 ppm 共に、 U^+ の値は $y^+ > 10$ において、抵抗低減率の増加に伴い大きくなる。このことは、壁変数で正規化された平均速度 U^+ の分布は抵抗低減率で良く整理できることを意味しており、従来の実験結果⁽¹⁾ ⁽¹¹⁾ ならびに DNS 結果⁽¹⁴⁾ とも良く整合している。図5より、LDR 領域 ($0 < DR < 40\%$) では、平均速度の対数則領域の傾きは乱流の水のものとはほぼ等しく、平均速度分布は DR が大きい程より上方にシフトすること、HDR 領域 ($40 \leq DR < 60\%$) では、平均速度の対数則領域の傾きが DR が大きい程大きくなるが、Virk の極限速度分布のものよりは大きくならないことが分かる。また、抵抗低減率 $DR = 62\%$ の場合 ($C = 65$ ppm, $T = 20^\circ\text{C}$ および $C = 100$ ppm, $T = 25^\circ\text{C}$) には、平均速度分布の対数則領域の傾きは Virk の極限速度分布のものとはほぼ等しく、抵抗低減率が最も大きい $DR = 69\%$ の場合 ($C = 65$ ppm, $T = 25^\circ\text{C}$) には、対数則領域の傾きが Virk の極限速度分布のものよりも大きくなる。つまり、MDR 領域 ($DR \geq 60\%$) では、内層スケールの平均速度の対数則領域の傾きは Virk の極限速度分布のものと同程度またはそれ以上となる。

以上の結果より、平均速度 U^+ の分布は、LDR 領域、HDR 領域、および MDR 領域により良く整理されることが明らかになった。

3-5 主流方向乱れ強さ分布 図6(a)および6(b)にそれぞれ、溶液濃度 $C = 65$ ppm および 100 ppm における u_τ により正規化された主流方向乱れ強さ u_{rms}^+ の分布を示す。溶液濃度 $C = 65$ ppm の場合、 $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) および $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 69\%$) では、 u_{rms}^+ の壁面近くの最大値は水のものよりかなり小さくなり、最大位置 y/δ は水のものより大きくなる。 $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 33\%$) では、 u_{rms}^+ の値は水のものより大きい。 $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 11\%$) では、 u_{rms}^+ の最大値は水のものより僅かに大きい、

Fig. 6 Effect of solution temperature on stream-wise turbulence intensity: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

その分布は水のものとはほぼ一致する。一方、溶液濃度 $C = 100$ ppm の場合、 $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) では、 u_{rms}^+ の壁面近くの最大値は水のものよりかなり小さくなり、最大位置 y/δ は水のものより大きくなる。 $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 52\%$) では、 u_{rms}^+ の壁面近くの最大値は水のものと同程度である。また、その最大位置 y/δ は水のものより大きい、 $T = 25^\circ\text{C}$ の場合と比べるとその差は小さい。 $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 42\%$) では、 u_{rms}^+ の最大値は水のものより大きく、最大位置 y/δ は水のものより大きい。 $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 18\%$) では、 u_{rms}^+ の最大値は水のものより僅かに大きい、その分布は水のものとはほぼ一致する。

以上の結果から、主流方向乱れ強さ分布、特に壁面近くの最大値の大きさは抵抗低減率 DR の大きさだけでは整理できないことが明らかになった。この理由として、レイノルズ数 Re_θ の大きさが異なること、な

らびに乱流境界層の発達度合いが異なることが考えられる。

界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層では、境界層中央部付近に主流方向乱れ強さの付加的な極大値が現れることが著者らの以前の研究により明らかにされている^{(1) (11)}。 u_{rms}^+ の付加的な極大値が現れる原因は、境界層外縁近くでは、せん断速度がゼロである境界層外のポテンシャル流れと境界層内の乱流とが混合されるため、紐状ミセルの巨大構造が局所的に存在しなくなり、それに伴い粘弾性効果が小さくなるまたは消失し、主流方向乱れ強さが増大すること起因していると考えられている^{(1) (11)}。本研究において、抵抗低減率が比較的小さい場合 [$C = 65$ ppm, $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 33\%$), $C = 65$ ppm, $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 11\%$), $C = 100$ ppm, $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 42\%$), および $C = 100$ ppm, $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 18\%$)] には、境界層中央部における付加的な極大値は見られない。この原因としては、界面活性剤水溶液の主流方向乱れ強さが $y/\delta < 0.5$ において水のものと同程度または水よりも大きくなるためと考えられる。一方、抵抗低減率が比較的大きい場合 [$C = 65$ ppm, $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$), $C = 100$ ppm, $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 52\%$), および $C = 100$ ppm, $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$)] には、境界層中央部における付加的な極大値が現れる。この原因としては、界面活性剤水溶液の主流方向乱れ強さが、 $0.3 < y/\delta < 0.5$ においては水のものよりも小さく、 $y/\delta > 0.5$ においては水と同程度または水よりも大きくなるためと考えられる。ここで、付加的な極大値の大きさは上記の3つのケースでほぼ同じであるが、付加的な極大位置は、 $C = 100$ ppm の $T = 20^\circ\text{C}$ および $T = 25^\circ\text{C}$ の場合 ($y/\delta \simeq 0.7$) は、 $C = 65$ ppm, $T = 20^\circ\text{C}$ の場合 ($y/\delta \simeq 0.6$) よりも境界層外縁に近くなる。また、抵抗低減率が最も大きい $DR = 69\%$ の場合 ($C = 65$ ppm, $T = 25^\circ\text{C}$) には、主流方向乱れ強さ分布に付加的な極大値が見られず、 $0.5 < \delta/y < 0.8$ において u_{rms}^+ はほぼ一定値となる。

3.6 壁面垂直方向乱れ強さ分布 図7(a)および7(b)にそれぞれ、溶液濃度 $C = 65$ ppm および 100 ppm における壁面垂直方向乱れ強さ v_{rms}^+ の分布を示す。溶液濃度 $C = 65$ ppm の場合、 $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) および $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 69\%$) では、 v_{rms}^+ の分布には水の場合に見られる明確な極大値が現れず、境界層内全体にわたってほぼ一定値 ($v_{rms}^+ \simeq 0.5$) となり、水の場合と比べてかなり小さくなる。 $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 33\%$) および $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 11\%$) では、 v_{rms}^+ は水の値よりも大きい。一方、溶液濃度 $C = 100$

Fig. 7 Effect of solution temperature on wall-normal turbulence intensity: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

ppm の場合、 $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) では、 v_{rms}^+ は水のものよりもかなり小さくなり、境界層内全体にわたってほぼ一定値 ($v_{rms}^+ \simeq 0.5$) となる。 $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 52\%$) では、 $y/\delta \simeq 0.2$ において最大値が見られるものの、水の値に比べるとかなり小さくなる。 $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 42\%$) では、 v_{rms}^+ は、 $T = 20^\circ\text{C}$ および 25°C の分布と水の分布とのほぼ中間に位置し、その最大位置は水のものよりも大きくなる。 $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 18\%$) では、 v_{rms}^+ の分布は水のものとほぼ一致する。

以上の結果から、壁面垂直方向乱れ強さ分布は、LDR 領域 ($0 < DR < 40\%$) では、水の値よりも僅かに大きいまたは水のものと同程度であること、HDR 領域 ($40 \leq DR < 60\%$) では、抵抗低減率が大きくなるほど v_{rms}^+ が小さくなること、MDR 領域 ($DR \geq 60\%$) では、境界層内全体にわたってほぼ一定値となり、水

Fig. 8 Effect of solution temperature on Reynolds shear stress: (a) 65 ppm, (b) 100 ppm.

の場合と比べてかなり小さくなることが示された。つまり、壁面垂直方向乱れ強さ分布は、LDR 領域、HDR 領域、および MDR 領域により整理されることが明らかになった。なお、主流方向および壁面垂直方向乱れ強さ分布の変化に伴う乱流構造の変化については、今後、PIV 計測により明らかにする予定である。

3.7 レイノルズせん断応力分布 摩擦速度 u_τ により正規化されたレイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}^+$ の分布を図 8 に示す。溶液濃度 $C = 65$ ppm の場合、 $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) および $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 69\%$) では、境界層全体にわたって $-\overline{u'v'}^+$ の値は極めて小さく、水の場合に見られる壁面近傍の明確な極大値は見られないが、境界層中央部付近 ($y/\delta \simeq 0.6$) に僅かな極大値が現れる。この極大値は主流方向乱れ強さ分布において見られた付加的な極大値と対応している (図 6 参照)。 $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 33\%$) では、 $-\overline{u'v'}^+$ は水の値よりも大きくなり、 $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 11\%$) では水の分布とほぼ一致する。一方、溶液濃度 $C = 100$ ppm

Table 3 Comparison of mean velocity and streamwise turbulence intensity between two cases that the drag reduction ratio and the Reynolds number are similar.

Case	DR(%)	Re_θ	$C(\text{ppm})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$x(\text{mm})$	U^+	u_{rms}^+
1	62	601	65	20	1000	○	○
	62	543	100	25	1000		
2	21	357	65	20	300	○	×
	19	346	150	20	500		
3	55	535	65	20	800	○	×
	52	512	100	20	1000		
4	49	483	100	20	500	○	×
	46	444	65	20	300		
5	37	403	100	20	500	○	×
	34	463	150	20	1000		
6	12	339	100	20	300	○	○
	8	301	150	20	300		

の場合、 $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 52\%$) および $T = 25^\circ\text{C}$ ($DR = 62\%$) では、 $-\overline{u'v'}^+$ の値は境界層全体にわたって極めて小さいが、境界層中央部付近 ($y/\delta \simeq 0.7$) に極大値が現れる。溶液濃度 $C = 100$ ppm の $-\overline{u'v'}^+$ の極大位置は、 $C = 65$ ppm のものよりも壁面から離れており、この大小関係は主流方向乱れ強さ分布の付加的な極大位置の大小関係と同じである (図 6 参照)。 $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 42\%$) では、 $-\overline{u'v'}^+$ は、水のものよりも小さく、その最大位置 y/δ は水のものよりも大きくなる。 $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 18\%$) では、 $-\overline{u'v'}^+$ は水の分布とほぼ一致する。

以上の結果より、レイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}^+$ の値は、LDR 領域では水の値よりも僅かに大きいまたは水のものと同程度であること、ならびに MDR 領域では境界層内全体にわたってほぼゼロとなることが明らかになった。また、HDR 領域では抵抗低減率が大きくなる程 $-\overline{u'v'}^+$ は小さくなる。ただし、 $C = 100$ ppm の $T = 20^\circ\text{C}$ ($DR = 52\%$) と $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 42\%$) とでは、 $-\overline{u'v'}^+$ の値がかなり異なることに注意されたい。

3.8 同程度の抵抗低減率およびレイノルズ数における平均速度分布と主流方向乱れ強さ分布の比較 抵抗低減率 DR とレイノルズ数 Re_θ が同程度の場合について、平均速度 U^+ および主流方向乱れ強さ u_{rms}^+ の分布を比較する。抵抗低減率 DR とレイノルズ数 Re_θ が同程度の場合として、表 3 に示す 6 つのケースを取り上げる。表 3 には、本論文で示した異なる溶液温度の測定データに加えて、既報⁽¹¹⁾において示した異なる溶液濃度ならびに主流方向位置における測定データも使用されている。また、表 3 には、 U^+ および u_{rms}^+ について、 DR と Re_θ が同程度である 2 つの測定データが互いにほぼ一致する場合には○で、一致

しない場合には×で示されている。ここで、 U^+ についてはその差が 5% 未満の場合を、 u_{rms}^+ についてはその値と壁面近傍の最大位置が共に 10% 未満の場合をそれぞれ一致するとした。

表 3 より、 DR と Re_θ が同程度の場合、平均速度 U^+ の分布は全てのケースにおいて互いに良く一致するが、主流方向乱れ強さ u_{rms}^+ の分布については互いに良く一致する場合と一致しない場合があり、 DR と Re_θ だけでは整理できないことが分かる。なお、 DR と Re_θ が同程度の場合において、せん断粘度 η の一致の有無は、主流方向乱れ強さ分布の一致の有無には寄与しないことを確認している。

4. 結 言

界面活性剤水溶液の溶液温度がゼロ圧力勾配平板上乱流境界層の平均速度分布および乱れ統計量分布に及ぼす影響を明らかにするために、溶液濃度 $C = 65$ ppm および 100 ppm について、溶液温度を $T = 20^\circ\text{C}$, 25°C , 30°C , および 35°C と変化させて、2 次元レーザードップラー流速計 (LDV) による速度場計測を行い、以下の結論を得た。

(1) 抵抗低減率 DR は溶液濃度 T が 20°C から 25°C になると大きくなり、 $T = 25^\circ\text{C}$ で最大抵抗低減率となる。さらに、溶液温度が 30°C , 35°C と高くなると抵抗低減率は小さくなる。

(2) 外層スケールの平均速度分布は、LDR 領域 ($0 < DR < 40\%$) では水の分布にほぼ一致し、HDR 領域 ($40 \leq DR < 60\%$) では抵抗低減率の増加と共にブラジウスの層流速度分布に近づき、MDR 領域 ($DR \geq 60\%$) では水の速度分布とブラジウスの層流速度分布のほぼ中間に位置する。

(3) 壁変数で正規化された平均速度 U^+ は抵抗低減率 DR の増加に伴い大きくなり、その分布形状は LDR 領域、HDR 領域、および MDR 領域により良く整理される。

(4) 主流方向乱れ強さ分布および壁面近くの最大値の大きさは抵抗低減率の大きさだけでは整理できない。また、抵抗低減率が比較的大きい場合 ($DR > 50\%$) に、境界層中央部において付加的な極大値が現れる。

(5) 壁面垂直方向乱れ強さ v_{rms}^+ の値は、LDR 領域では水の値よりも僅かに大きいまたは水のものと同程度であり、HDR 領域では抵抗低減率が大きくなる程小さくなり、MDR 領域では境界層内全体にわたってほぼ一定値となり、水の場合と比べてかなり小さくなる。

(6) レイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}^+$ の値は、LDR 領域では水の値よりも僅かに大きいまたは水のものと

程度であり、HDR 領域では抵抗低減率が大きくなる程 $-\overline{u'v'}^+$ は小さくなり、MDR 領域では境界層内全体にわたってほぼゼロとなる。

(7) 抵抗低減率 DR とレイノルズ数 Re_θ が同程度の場合、平均速度 U^+ の分布は互いに良く一致するが、主流方向乱れ強さ u_{rms}^+ の分布については互いに良く一致する場合と一致しない場合があり、 DR と Re_θ だけでは整理できない。

謝 辞

本研究の一部は、平成 19 年度科学研究費補助金基盤研究 (C) (課題番号 No.19560170) の補助を受けている。また、本研究に精力的に協力された名古屋工業大学大学院生 竹内俊介氏に感謝する。

文 献

- (1) Itoh, M., Tamano, S., Yokota, K., and Ninagawa, M., *Phys. Fluids*, **17**, No. 075107, (2005).
- (2) White, C. M., Somandepalli, V. S. R., and Mungal, M. G., *Exp. Fluids*, **36**, (2004), 62-69.
- (3) Hou, Y., Somandepalli, V. S. R., and Mungal, M. G., *Exp. Fluids*, **40**, (2006), 589-600.
- (4) Chara, Z., Zakin, J.L., Severa, M. and Myska, J., *Exp. Fluids*, **16**, (1993), 36-41.
- (5) Nowak, M., *Exp. Fluids*, **34**, (2003), 397-402.
- (6) Itoh, M., Imao, S., and Sugiyama, K., *JSME Int. J., Ser. B*, **40**, (1997), 550-557.
- (7) Warholic, M.D., Schmidt, G.M. and Hanratty, T.J., *J. Fluid Mech.*, **388**, (1999), 1-20.
- (8) Kawaguchi, Y., Segawa, T., Feng, Z. and Li, P., *Int. J. Heat Fluid Flow*, **23**, (2002), 700-709.
- (9) Yu, B., Li, F., and Kawaguchi, Y., *Int. J. Heat Fluid Flow*, **25**, (2004), 961-974.
- (10) Li, F.-C., Kawaguchi, Y., Segawa, T., and Hishida, K., *Phys. Fluids*, **17**, No. 075104, (2005).
- (11) Tamano, S., Itoh, M., Inoue, T., Yokota, K., Effects of concentration of surfactant solutions on drag-reducing turbulent boundary layer, *Trans. JSME, Ser. B*, No. 07-0969, submitted.
- (12) Dimitropoulos, C. D., Dubief, Y., Shaqfeh, E. S. G., Moin, P., and Lele, S. K., *Phys. Fluids*, **17**, No. 011702, (2005).
- (13) Dimitropoulos, C. D., Dubief, Y., Shaqfeh, E. S. G., and Moin, P., *J. Fluid Mech.*, **566**, (2006), 153-162.
- (14) Tamano, S., Itoh, M., Hoshizaki, K., and Yokota, K., *Phys. Fluids*, **19**, (2007), No. 075106.
- (15) Li C.-F., Sureshkumar R., and Khomami B., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **140**, (2006), 23-40.
- (16) Gyr, A. and Bewersdorff, H.-W., *Drag Reduction of Turbulent Flows by Additives*, Kluwer, Dordrecht, the Netherlands (1995).
- (17) Coles, D.E., *Rand Rep.*, R-403-PR, (1962).
- (18) Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory 7th edn*, McGraw-Hill, (1979).
- (19) Virk, P.S., *AIChE J.*, **21** (4), (1975), 625-656.