界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層における乱れ構造* (抵抗低減率の異なる流れ場の比較)

玉野 真司^{*1}, 伊藤 基之^{*2}
竹内 俊介^{*3}, 横田 和彦^{*1}

Turbulence Structures in Drag-Reducing Turbulent Boundary Layer of Surfactant Solution (Comparison between Flow Fields of Large and Small Drag Reduction Ratios)

Shinji TAMANO^{*4}, Motoyuki ITOH,
Shunsuke TAKEUCHI and Kazuhiko YOKOTA

^{*4} Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 466-8555 Japan

In this study, turbulence structures of the drag-reducing turbulent boundary layer in the surfactant solution at the momentum-thickness Reynolds number $Re_\theta \approx 800$ were compared between at the large and small drag reduction ratios. Turbulence statistics and structures were obtained by the two-component LDV system and the PIV system for the streamwise and wall-normal ($x-y$) section and the streamwise and spanwise ($x-z$) section. 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 concentration of CTAC was 65 ppm, and the molar ratio of counterion to CTAC was two. The drag reduction ratios $DR=78\%$ and 34% were obtained at the solution temperature $T=30^\circ\text{C}$ and 35°C , respectively. The quadrant analysis of streamwise and wall-normal velocity fluctuations revealed that at $DR=78\%$, the positive contribution of the sweep and ejection events to the Reynolds shear stress was comparable with the negative contribution of the inward-interaction and outward-interaction events, so that the Reynolds shear stress was almost zero. At $DR=78\%$, both streamwise and spanwise velocity fluctuations were attenuated largely across the turbulent boundary layer. On the other hand, at $DR=34\%$, turbulence structures were similar to those of water as a whole, although the scale was larger compared to the water.

Key Words: Turbulent Flow, Boundary Layer, Drag Reduction, Flow Control, PIV, LDV, Turbulence Structure, Surfactant Solution

1. 結 言

界面活性剤水溶液の抵抗低減チャネル乱流の速度場計測に関して, Warholic ら⁽¹⁾は LDV 計測により乱流統計量の詳細を, Kawaguchi ら⁽²⁾および Li ら^{(3)~(5)}は PIV 計測により乱れ構造の詳細を明らかにしている. 一方, 抵抗低減乱流境界層流れでは, ポリマーまたは界面活性剤ミセルのネットワーク構造と乱れとの干渉の履歴効果により, 乱流統計量および乱れ構造が非常に複雑な挙動を示すこと, 抵抗低減率と粘弾性応力の流れ方向分布には位相差があること等, チャネル

乱流との相違が, 実験^{(6)~(9)}および DNS^{(11)~(14)}により明らかにされてきている. しかしながら, 抵抗低減チャネル乱流に比べて, 抵抗低減乱流境界層に関する実験的および数値的データは少なく⁽¹⁵⁾, その抵抗低減メカニズムの解明には, さらなるデータの蓄積が求められている.

著者ら⁽⁷⁾はこれまでに, 界面活性剤水溶液の抵抗低減境界層流れの LDV 計測を行い, 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ている. さらに, 最近, 界面活性剤水溶液の濃度ならびに温度の影響を明らかにし, 主流方向乱れ強さ分布の付加的な極大値の存在の一般性を立証すると共に, せん断速度が大きい壁面近傍の流れは SIS (Shear-Induced Structure), 壁面から離れたせん断速度の小さい領域の流れは non-SIS とした 2 層モデルを提案し, 付加的な極大値の形成理由を説明してい

* 原稿受付 2009 年 6 月 19 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} 正員, 愛知工科大学機械システム工学科 (☎ 443-0047 蒲郡市西迫町馬乗 50-2).

^{*3} 新日本製鐵(株) (☎ 100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3).
E-mail: tamano.shinji@nitech.ac.jp

る⁽¹⁰⁾。しかしながら、抵抗低減率が大きい場合にはレイノルズ数が小さくなり、抵抗低減率が小さい場合にはレイノルズ数が大きくなるという問題があり、同程度のレイノルズ数において、抵抗低減率が異なる流れ場における乱れ構造の比較を行えていない。また、乱流統計量に比べて、界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層における乱れ構造に関する知見が不足している⁽¹⁰⁾。

本研究では、陽イオン界面活性剤と対イオンとのモル比を従来の1対1から1対2へと変化することにより、同程度のレイノルズ数において、抵抗低減率が異なる流れ場における乱れ構造の比較を行った。本論文では、2成分のLDV計測ならびにPIV計測を行い、特に、抵抗低減率の大小による確率密度関数、速度コンター、および変動速度ベクトルの相違について明らかにする。PIV計測においては、従来の壁面に直交する流れ方向断面に加えて、テストプレートに平行な断面におけるPIV計測も行った。

2. 実験装置および方法

実験には、300 × 300 × 1500 mmの亚克力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の亚克力製のテストプレートを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1 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。実験装置の詳細については既報⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾を参照されたい。

LDV計測では、2次元LDV(Model 1543-A-A03, 出力: 300 mW, 日本カノマックス^(株)製)を使用した。GreenおよびBlueレーザ光を亚克力製の流路底面から入射させ、チャンネル底面からの高さ150 mm, 前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。トレーサ粒子としてナイロンパウダー(粒径: 約4.1 μm , 比重: 1.02, 日本カノマックス^(株)製)を作動流体中に約5 ppm懸濁させて使用した。サンプリングデータ数は壁面近傍においては約15000個、壁から十分に離れた位置においては約25000個とした。

主流および壁面垂直方向($x-y$)断面におけるPIV計測では、レーザーシート光(LYPE-2SG-WL532CW, 出力: 1.5 W, 厚さ: 2 mm, ^(株)日本レーザー製)によりテストセクションの主流および壁面垂直方向($x-y$)断面を光切断し、流路底面の下方に設置された高速度ビデオカメラ(FASTCAM-1024PCI, ^(株)フォトロン製)により撮影した。また、平板に平行な主流およびスバ

Fig. 1 Shear viscosity.

ン方向断面($x-z$ 断面)におけるPIV計測では、流路底面の下方からレーザーシート光によりテストプレートと平行な断面を光切断し、流路側壁方向から、高速度ビデオカメラにより撮影した。 $x-y$ 断面および $x-z$ 断面共に、撮影画像の中心が $x = 1000$ mmとなる主流方向位置において測定を行なった。 $x-z$ 断面のPIV計測においては、レーザーシート光がテストプレートにより遮られる位置を壁位置とした。フレームレートは500 fps, シャッター速度は1/5000 sとした。また、撮影画像は40 × 40 mm, 画素数は1024 × 1024 pixelsである。検査領域を70 × 40 pixels, 探查領域を40 × 20 pixelsとして、各測定点における流速を求めた。また、トレーサ粒子としてオルガソール(Orgasol2002 ES4 NAT3, ポリラウラミド, 粒径: 約40 μm , 比重: 1.03, エルフ・アトケム・ジャパン^(株)製)を作動流体中に、水の場合には約70 ppm, 界面活性剤水溶液の場合には約50 ppm懸濁させて使用した。PIV解析には、相互相関法に基づく自作のPIVプログラムを用い、レイノルズ分解した変動速度ベクトル場を求めた。また、乱流統計量は3000枚の画像データを用いて算出した。

LDV計測およびPIV計測を行なう際の作動流体の温度 T は30°Cおよび35°Cとした。2台の循環式冷却器により、測定中の溶液温度変化を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に保った。また、主流速度 U_e は約300 mm/sとした。なお、LDV計測およびPIV計測の詳細については既報⁽⁷⁾⁽¹⁰⁾を参照されたい。

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(CTAC)と対イオンであるサリチル酸ナトリウム(NaSal)を、モル比1対2で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とした。

本実験で用いたCTAC 65 ppm水溶液のせん断速度

γ_w 1/s とせん断粘度 η Pa s の関係を図 1 に示す. せん断粘度の測定には内径 $d = 5.0$ 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 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ に保ち測定を行った. 溶液温度 30°C および 35°C のせん断粘度はそれぞれ, せん断速度が小さい場合には対応する水の値とほぼ同じであるが, せん断速度が 10 および 20 1/s 付近において, せん断粘度が急激に上昇する. その後, せん断速度が増加しても, せん断粘度はほぼ一定であり, 溶液温度による相違は見られない. 乱流境界層流れにおいて, 速度分布の計測位置 ($x = 1000$ mm) における壁面せん断速度は, せん断粘度がほぼ一定となる範囲内にあるため, 両者でせん断粘度がほぼ等しくなる. その結果, 溶液温度 30°C および 35°C におけるレイノルズ数も同程度となる. なお, CTAC と NaSal のモル比が 1 対 1 である従来の研究⁽¹⁰⁾では, 溶液温度が 5°C 変化すると, せん断粘度が大きく変化し, その結果, レイノルズ数も大きく変化した.

3. 比較に用いた実験データの概要

本節では, 抵抗低減率が大きい場合と小さい場合の比較に用いる実験データの概要 (抵抗低減率ならびにレイノルズ数) を示す. 抵抗低減率 DR は, 運動量厚さ θ に基づくレイノルズ数 Re_θ が同じ場合における水および界面活性剤水溶液の摩擦抵抗係数 $C_{f,water}$ および $C_{f,surfactant}$ を用いて次式で定義される.

$$DR = \frac{C_{f,water} - C_{f,surfactant}}{C_{f,water}} \times 100 \quad (1)$$

ここで, 壁面摩擦係数 $C_f = 2(u_\tau/U_e)^2$ を求めるためには, 摩擦速度 u_τ の値が必要となる. 界面活性剤水溶液の場合の u_τ の値は, 粘性底層内での平均速度の LDV 計測値を最小 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の値を用いることにより求めた. 水の場合には, 界面活性剤水溶液と同じ Re_θ での $C_{f,water}$ を, Coles の曲線⁽¹⁶⁾から直接求めた.

次節以降において乱流統計量および乱れ構造の比較に用いた, LDV 計測ならびに PIV 計測により得られた抵抗低減率 DR およびレイノルズ数 Re_θ を表 1 に示す. 本研究において, PIV 計測と記述した場合には, $x-y$ 断面での PIV 計測を意味し, $x-z$ 断面での PIV 計測については, $x-z$ 断面であることが分かるようにその都度, 明記することとする. 表 1 より, 溶液温度 $T = 30^\circ\text{C}$ では, 非常に高い抵抗低減率 ($DR = 78\%$) となり, $T = 35^\circ\text{C}$ では, 比較的小さい抵抗低減率 ($DR = 34\%$) となることが分か

Table 1 Comparison between flow fields of large and small drag reduction ratios at almost the same Reynolds number.

	T ($^\circ\text{C}$)	DR (%)	Re_θ
LDV	30	78	720
PIV	30	-	776
LDV	35	34	806
PIV	35	-	850

る. ここで, PIV 計測では, 壁面ごく近傍での速度分布を精度良く測定することができないため, C_f を平均速度勾配から求めることが出来ず, DR を算出することが出来ない. しかしながら, 後述するように, PIV 計測により得られた平均速度分布は, 同条件での LDV 計測結果とほぼ一致することから, PIV 計測での抵抗低減率 DR は LDV 計測の場合と同じであるとした. また, $T = 30^\circ\text{C}$ ($DR = 78\%$) および $T = 35^\circ\text{C}$ ($DR = 34\%$) でのレイノルズ数 Re_θ は, 800 前後であり, 大きな差がないことが確認できる.

本研究では, PIV 計測と LDV 計測とでシーディング粒子が異なるため, PIV 計測と LDV 計測を同時に行えない. その結果, PIV 計測と LDV 計測とで実験条件 (特に, 主流速度) を同じにすることが出来ず, PIV 計測と LDV 計測とで Re_θ が若干異なる. しかし, PIV 計測と LDV 計測での Re_θ の相違は僅かであり, 流れ場に及ぼす影響は無視できるものとした. なお, 比較に用いた水の場合 ($T = 25^\circ\text{C}$) のレイノルズ数は, LDV 計測および PIV 計測においてそれぞれ, $Re_\theta = 1088$ および 1075 であった.

4. PIV 計測の信頼性の確認

図 2(a) および図 2(b) に, 外層スケールおよび壁座標での平均速度 U/U_e および $U^+ = U/u_\tau$ の分布を示す. 図 2(a) および図 2(b) の横軸はそれぞれ, 境界層厚さ δ および粘性長さスケール ν/u_τ で正規化された壁からの無次元距離 y/δ および $y^+ = yu_\tau/\nu$ である. 図 2(a) には, $1/n$ 乗則 ($n = 6$) および Blasius の層流速度分布が, 図 2(b) には, $U^+ = y^+$ 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⁽¹⁷⁾ ($U^+ = 11.7 \ln y^+ - 17$) が示されている. また, 壁面ごく近傍 ($y/\delta < 0.05$) においては, PIV 計測では精度良く速度場を測定することが出来なかったため, LDV 計測の結果のみが示されている. 図 2(a) には, 異なる 4 つの $x-z$ 断面位置 ($y/\delta \simeq 0.2, 0.4, 0.6, 1$) における PIV 計測結果も示

Fig. 2 Mean velocity profiles: (a) with outer scaling, (b) in wall coordinates.

されている。図 2(a) および 2(b) より、PIV 計測により得られた平均速度分布は、外層スケールおよび壁座標共に、LDV 計測結果に概ね一致しており、PIV 計測結果 ($x-z$ 断面での PIV 計測結果を含む) の妥当性が確認された。

図 2(a) より、 $DR = 34\%$ では、 $y/\delta < 0.2$ において、水の場合よりも平均速度勾配がやや緩やかになることが分かる。また、 $DR = 78\%$ では、 $y/\delta < 0.3$ において、 $DR = 34\%$ の場合よりも速度勾配が緩やかになり、その分布は層流分布に近づく。また、図 2(b) より、 $DR = 78\%$ の場合には、水のものに比べて U^+ の値が非常に大きくなり、その傾きは Virk の極限分布よりも大きくなる。一方、 $DR = 34\%$ の場合には、対数則領域において、水の分布より少し上方にシフトする程度である。以上、 $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ での平均速度分布は、抵抗低減率が大きい場合と小さい場合の特徴的な分布⁽¹⁰⁾であることが確認された。

図 3(a)、図 3(b)、および図 3(c) にそれぞれ、主流速度 U_e で正規化された主流方向乱れ強さ u'_{rms}/U_e 、壁面垂直方向乱れ強さ v'_{rms}/U_e 、およびレイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}/U_e^2$ の分布を示す。図 3(a) には、 $x-z$ 断面における PIV 計測結果も示されている。 u'_{rms}/U_e の

Fig. 3 Turbulence statistics: (a) streamwise turbulence intensity, (b) wall-normal turbulence intensity, (c) Reynolds shear stress.

分布は、水、 $DR = 78\%$ 、 $DR = 34\%$ の全ての場合において、LDV 計測結果と PIV 計測結果が概ね近い値を取ることが分かる。壁面垂直方向乱れ強さ v'_{rms}/U_e については、水、 $DR = 78\%$ 、 $DR = 34\%$ とともに、PIV による測定値は LDV による測定値よりも値が小さい。これは、PIV 測定空間分解能の不足による影響であり、Warholic ら⁽¹⁸⁾による高分子水溶液の抵抗低減チャンネル流れの PIV 計測においても同様の傾向が見られる。また、 $DR = 34\%$ のレイノルズせん断応力分布については、LDV 計測と PIV 計測との相違が、他のケースと比べて大きいように見える。これは、抵

抗低減率が 40% 未満と比較的小さい界面活性剤水溶液はレオロジー的に不安定である (溶液温度, 溶液濃度の僅かな変化により, 速度分布が大きく変化する) こと⁽¹⁰⁾, ならびに PIV 計測時間 (6 s) が LDV 計測時間 [壁面ごく近傍 ($y = 0.1 \text{ mm}$): 約 6 分, 壁面から離れた位置: 約 2 分] よりもかなり短いことによる影響であると考えられる. 以上より, LDV 計測と PIV 計測により得られた乱れ統計量には定量的な相違は見られるものの, 本 PIV 計測により得られた乱れ構造の定性的な議論における妥当性が確認された.

図 3(a) より, $DR = 78\%$ の場合には, 主流方向乱れ強さ分布において, 壁近くでピーク (第 1 ピーク) を取り, $y/\delta \simeq 0.4$ で極小値 (谷部) を取り, 境界層中央から外縁にかけてなだらかなピーク (第 2 ピーク) を取ることが分かる. 一方, $DR = 34\%$ の場合には, 壁面近くのピーク位置が水のものよりも壁面から離れることを除き, 全体的には, 水の分布と同様な分布となることが分かる. また, $DR = 34\%$ の場合には, PIV 計測での u'_{rms}/U_e の分布に, 複数のピークが存在するように見えるが, LDV 計測ではこのようなピークは見られない. よって, この複数のピークは PIV の計測時間が短いために生じたものと考えられる. 図 3(b) より, $DR = 78\%$ では, 水のものに比べ壁面垂直方向乱れ強さが非常に小さくなり, 境界層全域に渡ってほぼ平坦な分布となるのに対して, $DR = 34\%$ では, 水と $DR = 78\%$ の間に分布することが分かる. 図 3(c) より, $DR = 78\%$ では, レイノルズせん断応力は水のものに比べてかなり小さくなり, 全体的にほぼゼロとなるのに対して, $DR = 34\%$ では, 水と $DR = 78\%$ の間に分布することが分かる. 以上, 本研究での乱れ統計量は, 抵抗低減率が大きい場合と小さい場合の特徴的な分布⁽¹⁰⁾を示すことが確認された.

5. 抵抗低減率の大小による乱れ構造の比較

5.1 確率密度関数 図 4(a), 図 4(b), および図 4(c) にそれぞれ, 水, $DR = 78\%$, および $DR = 34\%$ について, $y/\delta \simeq 0.19$ での主流方向変動速度成分 u'/U_e と壁面垂直方向変動速度成分 v'/U_e の結合確率密度 $P(u', v')$ の分布を示す. ここで, $P(u', v')$ の算出には, データ一点数が多い LDV 計測結果を用いた. また, $y/\delta \simeq 0.19$ は, $DR = 78\%$ の主流方向乱れ強さ分布において, 第 1 ピークの位置に対応する [図 3(a) 参照]. 水の場合には, 第 2, 4 象限に伸びた楕円形状をしていることから, イジェクションおよびスweep が支配的な流れであることが分かる. 一方, 界面活性剤水溶液の場合には, 抵抗低減率の大小に関わらず,

横軸方向に伸びた分布をしており, 壁面垂直方向の変動速度が抑えられていることが分かる. $P(u', v')$ の分布の第 2 象限から第 4 象限への (右下がりの) 傾きの大きさは, 水, $DR = 34\%$, $DR = 78\%$ の順に小さくなることから, この順に, u' と v' の相互相関が弱くなることが分かる. また, $DR = 78\%$ では, $P(u', v')$ の分布の傾きがほぼゼロとなり, $DR = 34\%$ の場合よりも, 図の中心の確率が高い分布となる.

次に, 結合確率密度 $P(u', v')$ における各象限がレイノルズせん断応力の生成にどの程度寄与しているかを明らかにするために, $y/\delta \simeq 0.19$ における主流方向変動速度成分と壁面垂直方向変動速度成分の重み付き結合確率密度 $W(u', v') = -u'v'P(u', v')$ の分布を図 5 に示す. 水の場合には, 第 2 象限および第 4 象限によるレイノルズせん断応力への正の寄与は大きく, 第 1 象限および第 3 象限によるレイノルズせん断応力への負の寄与は小さいことが分かる. $DR = 78\%$ の場合には, 第 1 象限と第 3 象限の確率が比較的高い分布となり, 第 2 象限および第 4 象限 (イジェクションおよびスweep) によるレイノルズせん断応力への正の寄与と, 第 1 象限および第 3 象限 (外向きおよび内向きインターアクション) によるレイノルズせん断応力への負の寄与が同程度となる. この結果, $DR = 78\%$ においては, レイノルズせん断応力がほぼゼロとなったと考えられる. 一方, $DR = 34\%$ の場合には, 水の場合と比較して, 第 2 象限および第 4 象限によるレイノルズせん断応力への正の最大の寄与は同程度であるが, 分布領域は狭くなり, 第 1 象限および第 3 象限によるレイノルズせん断応力への負の最大の寄与は同程度であるが, 分布領域は広くなる. その結果として, 水の場合よりも, レイノルズせん断応力への正の寄与と負の寄与の差が小さくなり, レイノルズせん断応力が水のものよりも小さくなったと考えられる.

5.2 瞬時の速度コンター 図 6(a), 図 6(b), および図 6(c) にそれぞれ, 水, $DR = 78\%$, および $DR = 34\%$ の $x - y$ 断面における瞬時の主流方向速度コンターを示す. 流体は図の左から右に流れている. 高速領域は赤色で, 低速領域は青色で示されている. 縦軸は壁からの距離 y/δ , 横軸は主流方向距離 x'/δ である. 縦軸の $y/\delta = 0$ の位置は壁面に, 横軸の $x'/\delta = 0$ の位置は $x = 1000 \text{ mm}$ にそれぞれ対応している. 水の場合, 壁面近傍から低速流体 (青色) が噴出している様子, ならびに高速領域 (赤色) とその他の領域 (赤以外の色) の境界が複雑に入り組んでいる様子 (ポテンシャル流と乱流との混合の様子) が見て取れる. $DR = 78\%$ の場合には, 流速域の境界が直線

Fig. 4 Joint probability density function for u' and v' at $y/\delta \simeq 0.19$: (a) water, (b) $DR = 78\%$, (c) $DR = 34\%$.

Fig. 5 Joint probability density function for u' and v' weighted with $-u'v'$ at $y/\delta \simeq 0.19$: (a) water, (b) $DR = 78\%$, (c) $DR = 34\%$.

Fig. 6 Contours of instantaneous streamwise velocity: (a) water, (b) $DR = 78\%$, (c) $DR = 34\%$. Flow is from left to right.

Fig. 7 Time variation in contours of instantaneous streamwise velocity: (a) water, (b) $DR = 78\%$, (c) $DR = 34\%$. See Fig. 6 for the contour level.

Fig. 8 Fluctuating velocity vectors and contours of instantaneous streamwise velocity fluctuation on $x - y$ plane: (a) $DR = 78\%$, (b) $DR = 34\%$.

Fig. 9 Fluctuating velocity vectors and contours of instantaneous streamwise velocity fluctuation on $x - z$ plane for $DR = 78\%$: (a) $y/\delta = 0.21$, (b) $y/\delta = 0.41$, (c) $y/\delta = 0.63$. See Fig. 8 for the contour level.

Fig. 10 Fluctuating velocity vectors and contours of instantaneous streamwise velocity fluctuation on $x - z$ plane for $DR = 34\%$: (a) $y/\delta = 0.20$, (b) $y/\delta = 0.44$, (c) $y/\delta = 0.69$. See Fig. 8 for the contour level.

Fig. 11 Fluctuating velocity vectors and contours of instantaneous streamwise velocity fluctuation on $x - z$ plane at $y^+ \simeq 30$ assuming frozen turbulence: (a) $DR = 78\%$, (b) $DR = 34\%$. See Fig. 8 for the contour level.

的であり、流れが壁面に対してほぼ平行(層状)となることが分かる。このことは、界面活性剤水溶液の抵抗低減チャンネル乱流の場合⁽²⁾と同様である。 $DR = 34\%$ の場合には、水の場合よりも乱流境界層外縁付近におけるバルジ構造が大きくなるが、 $DR = 78\%$ のような層状の構造とはならない。

図 6(b) での瞬時の速度コンターから、 $DR = 78\%$ の場合には、流れ方向に非常に長い構造が存在することが推察されるが、本 PIV 計測システムでは、十分な空間分解能を保ちながら、流れ方向に十分に長い領域における PIV 計測を行えない。そこで、主流方向速度コンターの時間変化を図 7 に示す。水の場合には、時間の経過とともに、乱流境界層の外縁付近のバルジ構造が激しく変化していることが見て取れる。一方、 $DR = 78\%$ の場合には、流れがほぼ層状であり、壁面に平行な方向の運動量の変化がほとんど見られない。また、 $DR = 34\%$ の場合には、水の場合と同様に高速流体および低速流体が境界層中央部付近まで入り込んでいるが、その界面形状のスケールは水のものよりも大きくなることが分かる。

5.3 変動速度ベクトル $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ について、 $x-y$ 断面における変動速度ベクトルと主流方向速度変動のコンターをそれぞれ、図 8(a) および図 8(b) に示す。 $DR = 78\%$ の場合、 $DR = 34\%$ の場合と比べて、壁面垂直方向の乱れが著しく抑えられていることが分かる。特に、 $0.3 \leq y/\delta \leq 0.4$ の範囲において、変動速度が抑えられているが、この領域は、主流方向乱れ強さ分布の谷部に対応している [図 3(a) 参照]。ここでは示さないが、水の場合⁽¹⁰⁾には、ニュートン流体において良く知られているヘアピン渦のパケット⁽¹⁹⁾、ならびにイジェクションやスweepが観察された。 $DR = 34\%$ の場合には、水の場合と同様に、渦やイジェクションが観察されるが、そのスケールは大きくなる。なお、変動速度ベクトル場における抵抗低減率の大小による上記の相違は、数千枚以上の静止画からなる動画からも確認している。

次に、 $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ について、テストプレートに平行な断面($x-z$ 断面)における変動速度ベクトルと主流方向速度変動のコンターをそれぞれ図 9 および図 10 に示す。縦軸はスパン方向距離 z 、横軸は主流方向距離 x' であり、共に境界層厚さ δ で正規化されている。 $x-z$ 断面位置は、 $y/\delta \simeq 0.2, 0.4, 0.6$ である。 $DR = 78\%$ の場合には、 y/δ の位置に依らず、明確な渦構造は見られない。特に、スパン方向の変動が抑制されている様子が見て取れる。 $DR = 34\%$

の場合には、壁面に近い $y/\delta = 0.20$ では、複数の渦構造が見られる。これは、ヘアピン渦のヘッドの断面領域に対応すると考えられる。また、高速と低速の流体が複雑に混在している様子が見て取れる。少し壁から離れた $y/\delta = 0.44$ では、渦構造は見られず、低速および高速領域のスケールが、 $y/\delta = 0.20$ の場合よりも大きくなる。さらに壁から離れた $y/\delta = 0.69$ では、低速と高速領域の境界がはっきりしなくなる。なお、 $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ 共に、明確な組織構造は観察されないが、この要因として、図示された領域が狭いことが考えられる。

そこで、図 11(a) および図 11(b) に、 $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ について、 $x = 1000$ mm の位置で凍結乱流を仮定することにより、流れ方向の領域を広くした場合における $x-z$ 断面での変動速度ベクトルを示す。 $x-z$ 断面の位置は、壁面に近い $y^+ \simeq 30$ ($x'/\delta = 0$ における粘性長さスケールにより正規化) とした。これは、 $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ において、それぞれ $y/\delta \simeq 0.2$ および $y/\delta \simeq 0.1$ に対応する。また、図の横軸は、凍結乱流を仮定して、 $y^+ \simeq 30$ での局所平均速度を時間軸に乗じることにより、空間軸 x'/δ としている。ここで、 $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ について、 $y^+ \simeq 30$ での局所平均速度はそれぞれ、 $U \simeq 220$ mm/s および $U \simeq 180$ mm/s である。なお、撮影領域を 40×40 mm から 70×70 mm へと拡大することにより、図 9 および図 10 の場合よりもスパン方向領域を広くしている。 $DR = 78\%$ および $DR = 34\%$ 共に、低速領域と高速領域がスパン方向に並んだ構造となっていることが分かる。また、 $DR = 78\%$ の場合、 $DR = 34\%$ の場合と比べて、低速領域(低速ストリーク)が明確ではなく、低速領域(高速領域)のスパン方向間隔は、 $DR = 34\%$ の場合の低速ストリークの間隔よりもかなり大きいことが分かる。このことは、抵抗低減チャンネル乱流⁽⁴⁾および抵抗低減乱流境界層⁽⁶⁾における知見とも整合している。ただし、主流方向速度変動のスパン方向 2 点相関係数やヒストグラムに基づくストリーク間隔に関する定量的な議論を行うためには、より壁面に近い位置($y^+ \simeq 10$)において、凍結乱流の仮定を用いずに、より広い範囲における PIV 計測を行う必要があり、現時点では、スリット光の光量不足のため、そのような計測および解析は行っていない。

6. 結 言

CTAC の濃度が 65 ppm, CTAC と NaSal のモル比が 1 対 2 である界面活性剤水溶液のゼロ圧力勾配平板上乱流境界層流れにおいて、レイノルズ数 Re_θ が

800 程度の条件において、抵抗低減率 DR が大きい場合 ($DR = 78\%$, 溶液温度 $T = 30^\circ\text{C}$) と小さい場合 ($DR = 34\%$, $T = 35^\circ\text{C}$) との乱れ構造を比較した。速度場計測には、2 成分の LDV 計測、ならびに平板に直交する流れ方向断面 ($x-y$ 断面) および平板に平行な断面 ($x-z$ 断面) における PIV 計測を用い、以下の結論を得た。

(1) $DR = 78\%$ の場合には、第 2 象限および第 4 象限によるレイノルズせん断応力への正の寄与と、第 1 象限および第 3 象限によるレイノルズせん断応力への負の寄与が同程度となり、この結果、レイノルズせん断応力がほぼゼロとなる。 $DR = 34\%$ の場合には、水の場合よりも、レイノルズせん断応力への正の寄与と負の寄与の差が小さくなり、レイノルズせん断応力が水のものよりも小さくなる。

(2) $DR = 78\%$ の場合には、流れが壁面に対してほぼ平行 (層状) となり、壁面に平行な方向の運動量の変化がほとんど見られない。一方、 $DR = 34\%$ の場合には、水の場合と同様に高速流体および低速流体が境界層中央部付近まで入り込むが、その界面形状のスケールは水のものよりも大きくなる。

(3) $DR = 78\%$ では、流れ方向およびスパン方向の速度変動が共に著しく抑えられるのに対して、 $DR = 34\%$ では、水の場合よりも乱れ構造が大きくなる程度である。

謝 辞

本研究に精力的に協力された順毛栄治氏 (当時、名古屋工業大学機械工学科卒研生) に感謝する。本研究は、平成 19, 20 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。ここに記して感謝の意を表す。

文 献

- (1) Warholic, M.D., Schmidt, G.M. and Hanratty, T.J., The influence of a drag-reducing surfactant on a turbulent velocity field, *J. Fluid Mech.*, **388**, (1999), 1-20.
- (2) Kawaguchi, Y., Segawa, T., Feng, Z. and Li, P., Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives-spatial structure of turbulence investigated by PIV system, *Int. J. Heat Fluid Flow*, **23**, (2002), 700-709.
- (3) Li, F.-C., Kawaguchi, Y., Segawa, T., and Hishida, K., Reynolds-number dependence of turbulence structures in a drag-reducing surfactant solution channel flow investigated by particle image velocimetry, *Phys. Fluids*, **17**, No. 075104, (2005).
- (4) Li, F.-C., Kawaguchi, Y., Hishida, K., and Oshima, M., Investigation of turbulence structures in a drag-reduced turbulent channel flow with surfactant additive by stereoscopic particle image velocimetry, *Exp. Fluids*, **40**, (2006), 218-230.
- (5) Li, F.-C., Kawaguchi, Y., Yu, B. Wei, J.-J., and Hishida, K., Experimental study of drag-reduction mechanism for a dilute surfactant solution flow, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **51**, (2008), 835-843.
- (6) White, C. M., Somandepalli, V. S. R., and Mungal, M. G., The turbulence structure of drag-reduced boundary layer flow, *Exp. Fluids*, **36**, (2004), 62-69.
- (7) Itoh, M., Tamano, S., Yokota, K., and Ninagawa, M., Velocity measurement in turbulent boundary layer of drag-reducing surfactant solution, *Phys. Fluids*, **17**, No. 075107, (2005).
- (8) Hou, Y., Somandepalli, V. S. R., and Mungal, M. G., A technique to determine total shear stress and polymer stress profiles in drag reduced boundary layer flows, *Exp. Fluids*, **40**, (2006), 589-600.
- (9) Hou Y., Somandepalli V. S. R., and Mungal M. G., Streamwise development of turbulent boundary-layer drag reduction with polymer injection, *J. Fluid Mech.*, **597**, (2008), 31-66.
- (10) Tamano, S., Itoh, M., Inoue T., Kato, K., and Yokota, K., Turbulence statistics and structures of drag-reducing turbulent boundary layer in homogeneous aqueous surfactant solutions, *Phys. Fluids*, **21**, No. 045101, (2009).
- (11) Dimitropoulos C. D., Dubief Y., Shaqfeh E. S. G., Moin P., and Lele S. K., Direct numerical simulation of polymer-induced drag reduction in turbulent boundary layer flow, *Phys. Fluids*, **17**, No. 011705, (2005).
- (12) Dimitropoulos C. D., Dubief Y., Shaqfeh E. S. G., and Moin P., Direct numerical simulation of polymer-induced drag reduction in turbulent boundary layer flow of inhomogeneous polymer solutions, *J. Fluid Mech.*, **566**, (2006), 153-162.
- (13) Tamano S., Itoh M., Hoshizaki K., and Yokota K., Direct numerical simulation on the drag-reducing turbulent boundary layer of viscoelastic fluid, *Phys. Fluids*, **19**, No. 075106, (2007).
- (14) Tamano S., Itoh M., Hotta S., Yokota K., and Morinishi Y., Effect of rheological properties on drag reduction in turbulent boundary layer flow, *Phys. Fluids*, **21**, No. 055101, (2009).
- (15) White C. M. and Mungal M. G., Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **40**, (2008), 235-256.
- (16) Coles, D.E., A manual of experimental boundary-layer practice for low-speed flow, *Rand Rep.*, R-403-PR, (1962).
- (17) Virk, P. S., Drag reduction fundamentals, *AIChE J.*, **21** (4), (1975), 625-656.
- (18) Warholic, M. D., Heist, D. K., Katcher, M. and Hanratty, T. J., *Exp. Fluids*, **31**, (2001), 474-483.
- (19) Adrian, R. J., Hairpin vortex organization in wall turbulence, *Phys. Fluids*, **19**, No. 041301, (2007).