

機関番号：13903

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760126

研究課題名 (和文) 非一様な界面活性剤水溶液における乱流境界層の
流動抵抗低減メカニズムの解明研究課題名 (英文) Study on drag reduction in turbulent boundary layer flow of
heterogeneous surfactant solutions

研究代表者 玉野 真司 (TAMANO SHINJI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40345947

研究成果の概要 (和文)：水の平板上乱流境界層流れに、壁面から界面活性剤水溶液を注入した場合の抵抗低減 (DR) メカニズムの解明を目的として、溶液注入システムを構築し、流れ場の可視化観察ならびに LDV 計測を行った。本研究により、界面活性剤水溶液を注入した (非一様な) 場合、壁面に平行な層状の流れが下流に向けて発達し、壁面垂直方向の拡散が著しく抑制されること、ならびに一様な場合と同様に DR により速度分布が整理できることが判った。

研究成果の概要 (英文)：In this study, first a slot injection system of surfactant solution was constructed. Next, the flow visualization and LDV measurements were performed in the flat-plate turbulent boundary layer flow with water or surfactant solution injection from the wall, in order to clarify the mechanism of drag reduction. It is found that in the case of surfactant solution injection, layered-structures parallel to the wall developed in the streamwise direction, and the wall-normal turbulence near the wall is strongly attenuated. Moreover, in both cases of homogeneous and heterogeneous (injected) surfactant solutions mean velocities scaled by the friction velocity are well arranged by the amount of the drag reduction, in which the mean velocity increases with the increase in the drag reduction ratio.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体工学、抵抗低減、乱流境界層、界面活性剤

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来の界面活性剤水溶液や高分子水溶液の乱流抵抗低減流れに関して、内部流れであるチャンネル乱流の研究は多数あるものの、外部流れである乱流境界層の研究は非常に少ない。

(2) White ら(2004)は、高濃度高分子水溶液の注入による乱流境界層流れの LDV 計測により、乱流統計量の流れ方向変化を明らかにしている。また、研究代表者ら(2005)は、一様な界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層流れの主流方向乱れ強さ分布において、水の場合に見られる壁面近くの極大値に

加えて、これまでに報告されていなかった第2の極大値の存在を世界に先駆けて見出した。

(3) しかしながら、界面活性剤を乱流境界層中に注入して抵抗低減効果を得ようとする研究は行われていなかった。

2. 研究の目的

(1) 水の平板上乱流境界層流れに、壁面から抵抗低減界面活性剤水溶液を注入した場合の濃度場および速度場の詳細を明らかにし、抵抗低減メカニズムを解明することを本研究の目的としている。本研究目的を達成するため、以下の順序で研究を推進した。

- ① テストプレート及び溶液注入システムの構築
- ② トラバースシステムの構築
- ③ 可視化観察による乱流構造の解明
- ④ LDV計測によるDR効果及び乱流統計量の解明

3. 研究の方法

(1) 本実験で使用した実験装置の概略図を図1に示す。回流水槽は300 mm × 300 mm × 1500 mmの亚克力製の開水路測定部を持ち、測定部内には底面に垂直にテストプレートが設置されている。テストプレートは亚克力製で、テストプレート前縁から $x=100$ 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でプレート上に乱流境界層を発生させた。

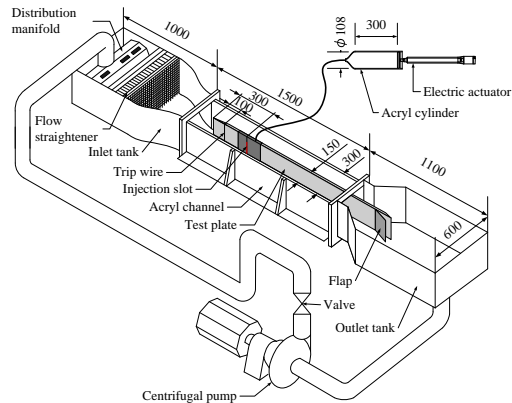


図1 回流実験装置

(2) 溶液注入スロット部(図2)は、ステンレス製(図2斜線部)であり、上流・下流のテストプレート(図2淡灰部)と段差なく接続されている。スロットサイズは、主流およびスパン方向に1.0 mmおよび200 mmであり、 $x=300$ mmの位置に設けられている。また、スロットは、流れ方向に対して壁面垂直方向に30度傾けられている。スロット内部に85 mm

×16 mm × 230 mmの与圧室を設けてあり、スロット部はチューブにより加圧シリンダに接続されている。ピストンの押し込み量をPC制御することにより、スロットから一定流量を一定時間、注入することが可能である。

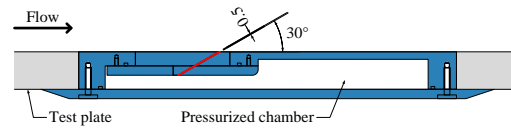


図2 溶液注入スロットの断面図

(3) 界面活性剤には、生分解性に富む非イオン性界面活性剤であるアロモックス(AROMOX、ライオン・アクゾ(株)製)500 ppmを用いた。主流速度は300 mm/sとした。また、流体温度は20 °Cとし、実験中は循環式冷却器により温度変化を±0.1 °Cの範囲に保った。水およびAROMOX 500 ppmの注入流量は共に14.5 ml/sであり、スロット断面積で除した断面平均流速は145 mm/sである。

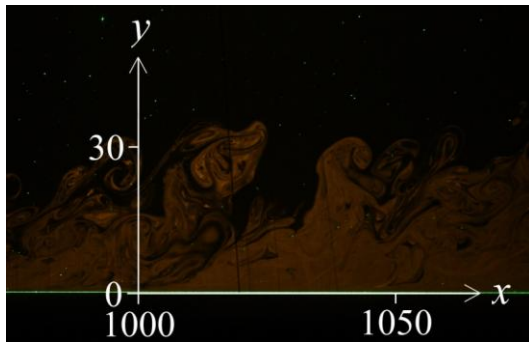
(4) 注入流体をローダミンBによって着色し、流路側壁方向からレーザーシート光(LYPE-2SG-WL532CW、出力:1.5 W、厚さ:2 mm、株日本レーザー製)により主流方向および壁面垂直方向断面(x - y 断面)を光切断し、流路底面の下方に設置された高解像度デジタルビデオカメラ(EOS 7D、有効画素数:5184×3456 pixels、シャッター速度:1/2000 s、キヤノン(株)製)により撮影した。撮影は、画像の中心が $x=300$ 、500、1000 mmとなる主流方向位置において、流れが十分に発達したと推察される時刻(溶液注入から約20秒後)に行なった。主流方向およびスパン方向断面(x - z 断面)における撮影は、レーザーシート光源とデジタルビデオカメラの位置を取り替えることにより行なった。

(5) 高解像度デジタルビデオカメラを電動アクチュエータ機能付きのトラバース装置に設置し、それらをPC制御する。これにより、テスト流路の側面方向ならびに鉛直方向の直交する2方向からの撮影を行った。

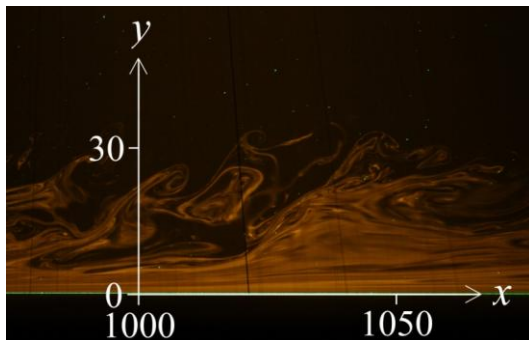
(6) 速度場計測に後方散乱式レーザードップラー流速計(LDV)(Model 543-A-A03, 300 mmW、日本カノマックス(株)製)を使用し、トレーサ粒子にナイロンパウダー(粒形:球、粒径:約4 μm、比重:1.02、日本カノマックス(株)製)を使用した。 $x=500$ 、1000 mmにおいて、主流方向および壁面垂直方向速度成分のLDV計測を実施した。その他の実験条件は可視化観察の場合と同じである。

4. 研究成果

(1) 図 3 に $x = 1000$ mm において水および AROMOX 500 ppm を注入した際に得られた流れ方向および壁面垂直方向断面の可視化画像を示す。水注入の場合、染料がかなり薄くなっていることから、十分に拡散・混合していることが判る。一方、AROMOX 500 ppm 注入の場合、壁面近くにおいて、染料が壁面に平行な層状に流れており、壁面垂直方向の乱れがかなり抑制されていることが判る。以上より、界面活性剤水溶液を注入した場合、水注入の場合よりも壁面垂直方向の拡散が著しく抑制されることが明らかになった。



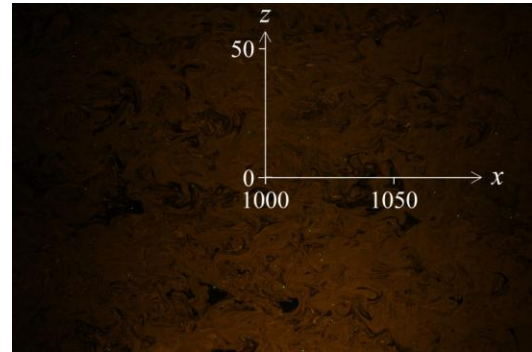
(a) 水注入



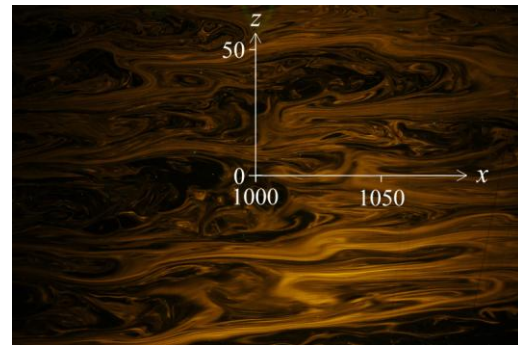
(b) 界面活性剤水溶液 (AROMOX) 注入

図 3 流れ方向および壁面垂直方向断面における可視化観察結果 ($x = 1000$ mm)

(2) 図 4 に $x = 1000$ mm、 $y = 5$ mm において水および AROMOX 500 ppm を注入した際に得られた流れ方向およびスパン方向断面の可視化画像を示す。水を注入した場合には、全体に染料の見られない領域が点在しているのに対し、界面活性剤水溶液を注入した場合には、流れ方向に伸びた染料濃度の低い領域が広がることを見て取れる。このような染料濃度の低い領域の側面には低速ストリーク構造が存在していると考えられる。界面活性剤水溶液を注入した場合、水を注入した場合よりもこの領域が広がることから、壁面近傍のストリーク構造のスパン方向間隔が広がることを推察される。



(a) 水注入



(b) 界面活性剤水溶液 (AROMOX) 注入

図 4 流れ方向およびスパン方向断面における可視化観察結果 ($x = 1000$ mm、 $y = 5$ mm)

(3) 本研究において、抵抗低減率 DR は、同じ運動量厚さレイノルズ数 Re_θ における水と界面活性剤水溶液の摩擦抵抗係数を用いて、次式により定義される。

$$DR(Re_\theta) \equiv \frac{C_{f-water} - C_{f-surfactant}}{C_{f-water}} \times 100 \%$$

界面活性剤水溶液の管摩擦係数は、平均速度分布から求められる壁面速度勾配と界面活性剤水溶液のせん断粘度を用いて評価される。同濃度の様な界面活性剤水溶液の場合、 $x = 500$ mm および 1000 mm における DR はそれぞれ 18% および 50% であったのに対して、界面活性剤水溶液注入の場合には、 DR はそれぞれ 21% および 59% であった。以上より、界面活性剤水溶液注入の場合には、様な界面活性剤水溶液の場合よりも、効果的に (少ない界面活性剤水溶液の量により) 大きな抵抗低減率が得られることが明らかになった。

(4) 図 5 に界面活性剤水溶液 (AROMOX 500 ppm) を注入した場合、注入無しの場合、および様な AROMOX 500 ppm 水溶液流れについて、摩擦速度で正規化された平均速度 \bar{u}^+ の分布を示す。横軸は壁座標 y^+ である。図より、 $y^+ > 10$ において、AROMOX を注入した場合の \bar{u}^+ は、水のものに比べて値が大きく、また測定位置 x の増加、つまり抵抗低減率の増加に

伴い U^+ の値も増加することが判る。界面活性剤水溶液注入の場合、 $x = 1000 \text{ mm}$ において、 $y^+ > 30$ では、一様な界面活性剤水溶液の結果のほぼ同じ傾き、 $10 < y^+ < 20$ では、Virk の極限分布 ($U^+ = 11.7 \ln y^+ - 17$) とほぼ等しい傾きとなる。ここで、 $y^+ > 10$ における平均速度 U^+ は、抵抗低減率が大きくなるほど、大きくなるのがこれまでに報告されている。抵抗低減率 DR は、 $x = 500 \text{ mm}$ において、界面活性剤水溶液の注入および一様な界面活性剤の場合、 $DR = 21\%$ および 18% となりほぼ等しく、平均速度分布がほぼ等しいことと整合している。また、 $x = 1000 \text{ mm}$ では、界面活性剤水溶液注入および一様な界面活性剤水溶液の DR はそれぞれ、 59% および 50% であり、界面活性剤水溶液注入の方が U^+ が大きいことと整合している。以上より、界面活性剤水溶液の注入の場合、一様な界面活性剤水溶液の場合に関わらず、壁変数で正規化された平均速度分布は抵抗低減率 DR により良く整理されることが明らかになった。

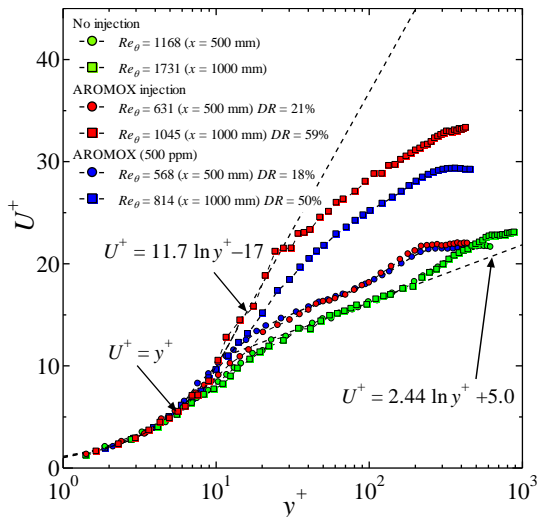


図 5 平均速度分布

(5) 図 6 に摩擦速度で正規化された主流方向乱れ強さ分布を示す。図の横軸は境界層厚さ δ により正規化された壁からの距離である。 $x = 500 \text{ mm}$ では、界面活性剤水溶液注入および一様な界面活性剤水溶液の場合共に、主流方向乱れ強さのピーク値は水よりも小さくなり、ピーク位置は壁面から僅かに遠ざかる。一方、 $x = 1000 \text{ mm}$ では、注入の場合、一様な場合共に、主流方向乱れ強さのピーク値は水よりも大きくなり、ピーク位置は $x = 500 \text{ mm}$ の場合よりもさらに壁面から遠ざかる。このことは、抵抗低減率が大きくなるほど主流方向乱れ強さのピーク値が大きくなり、ピーク位置が壁面から遠ざかることを意味している。主流方向乱れ強さ分布におけるこれらの傾向は、高分子水溶液の抵抗低減流れの場合と同じである。また、界面活性剤水溶液注入

の場合と一様な界面活性剤水溶液の場合とで、主流方向乱れ強さ分布において明確な相違が見られないことが明らかになった。

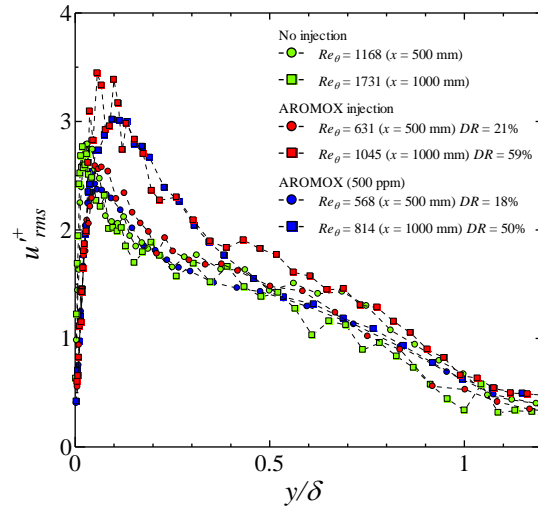


図 6 主流方向乱れ強さ分布

(6) 図 7 に壁面垂直方向乱れ強さ分布を示す。界面活性剤水溶液を注入した場合の壁面垂直方向乱れ強さは、 $y/\delta < 0.1$ において、注入無しの場合ならびに一様な界面活性剤水溶液の場合よりも小さい。界面活性剤水溶液注入の場合、壁面垂直方向乱れ強さは、 $y/\delta < 0.1$ では一様な界面活性剤水溶液の場合よりも大きくなり、 $y/\delta > 0.4$ では注入無し(水流)の場合と同程度の値となる。これより、界面活性剤水溶液の壁面スロットからの注入により、特に壁面近傍における壁面垂直方向乱れを抑制することで、一様な界面活性剤水溶液流れの場合よりも大きな抵抗低減効果が得られたものと推察される。

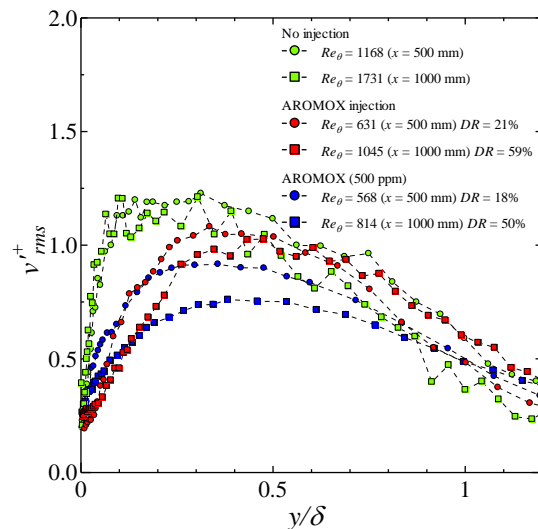


図 7 壁面垂直方向乱れ強さ分布

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

① Shinji TAMANO and Motoyuki ITOH、Comparison of turbulence structures at large and small drag reduction ratios in turbulent boundary layer of surfactant solutions、*Journal of Turbulence*、査読有り、Vol. 12, No. 18, 2011、pp. 1-22。

② Shinji TAMANO、Motoyuki ITOH、Katsuo KATO、and Kazuhiko YOKOTA、Turbulent drag reduction in nonionic surfactant solutions、*Physics of Fluids*、査読有り、Vol. 22, No. 055102, 2010、pp. 1-12。

[学会発表] (計2件)

① 松野裕樹、玉野真司、森西洋平、乱流境界層内への界面活性剤注入による抵抗低減、日本機械学会東海支部第60期総会講演会、(2011. 3. 15)、pp. 175-176、豊橋技術科学大学。

② 宮川洗太郎、玉野真司、森西洋平、回流式円管流における非イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減、日本機械学会第88期流体工学部門講演会、(2010. 10. 30)、pp. 383-384、山形大学工学部。

[その他]

ホームページ等

<http://tamano.web.nitech.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉野 真司 (TAMANO SHINJI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40345947