

平成 21 年 6 月 10 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560170

研究課題名 (和文) 生分解性界面活性剤水溶液における乱流抵抗低減メカニズムの解明

研究課題名 (英文) Study on drag-reducing mechanism of biodegradable surfactant solutions

研究代表者

伊藤 基之 (ITO H. MOTUYUKI)

名古屋工業大学・工学研究科・教授

研究者番号：30024334

研究成果の概要:生分解性界面活性剤[オレイルジメチルアミンオキシド(ODMAO) 500 ppm 及びアルキルポリグリコシド(APG) 6000 ppm]の抵抗低減効果を、直径 5 mm の円管内流れの圧力損失測定により調べた。さらに、2次元 LDV 計測ならびに PIV 計測により、非イオン性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ける平均速度分布、乱れ統計量分布、及び乱れ構造を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2008 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：抵抗低減、乱流、界面活性剤、境界層流れ、円管流れ、非ニュートン流体、LDV、PIV

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 界面活性剤の流動抵抗低減効果についてはこれまでに数多く研究されてきており、その幾つかは既に実用化されている。界面活性剤は、陽イオン性、陰イオン性、両イオン性、及び非イオン性に大別されるが、これまでに研究対象となっている、または実用化されている界面活性剤のほとんどが陽イオン性界面活性剤である。その理由として、陽イオン性界面活性剤は、最大抵抗低減率が約 80%と非常に高いことに加えて、機械的せん断に対する劣化の影響を受けにくく、長期間

に渡り使用できるという利点があることが考えられる。しかしながら、陽イオン性界面活性剤は僅かではあるが毒性を有し、生分解性が悪いため環境負荷が高い。このため、陽イオン性界面活性剤の流動抵抗低減添加剤としての利用は閉ループ系の流れに限定されている。また、環境問題への対策が今後ますます求められることを勘案すると、環境負荷が小さい抵抗低減界面活性剤の開発を推進する必要があると言える。

(2) 毒性のほとんどない界面活性剤として、

非イオン性界面活性剤が挙げられる。非イオン性界面活性剤は陽イオン性界面活性剤に比べて、生分解性が良く、環境負荷が非常に小さい界面活性剤であり、その抵抗低減効果は1970年初頭におけるZakinらによる報告以来、今日まで30年以上に渡り研究が行なわれている。近年、Matthysらのグループは、非イオン性界面活性剤(SPE 95285, 主にオレイルアルコールとエタノールアミンの混合物)を使用し、管直径と抵抗低減効果との関係、ならびに熱伝達特性を明らかにしている。最近、Gurkaらはアルキルポリグリコシド(APG)を主成分とする非イオン性界面活性剤を使用し、チャンネル流路内流れのPIV計測を行なっているが、平均速度分布、乱流統計量、抵抗低減率等については不明である。以上のように幾つかの非イオン性界面活性剤については、円管内流れにおける抵抗低減効果が明らかにされてきているものの、陽イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減効果に関する研究と比べると、その報告例は極めて少ない。

(3) 界面活性剤水溶液の抵抗低減メカニズムの解明には速度場計測が有効である。界面活性剤水溶液の抵抗低減流れの速度場計測に関して、Warholićらは陽イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減チャンネル乱流のLDV計測により乱流統計量の詳細を、KawaguchiらはそのPIV計測により乱流構造の詳細を明らかにしている。また、我々は、陽イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減乱流境界層流れにおいて、LDV計測及びPIV計測により、抵抗低減チャンネル乱流との乱流統計量及び乱流構造における相違を明らかにしている。しかしながら、これまでに速度場計測の対象となっている抵抗低減界面活性剤はほとんどが陽イオン性であり、非イオン性(生分解性)界面活性剤の抵抗低減流れの速度場に関する実験データはGurkaらのもの以外には見当たらない。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究課題では、研究報告例がほとんどない2種類の非イオン性界面活性剤(ODMAO及びAPG)水溶液の抵抗低減効果を明らかにすることを目的とする。流れ場として、地域冷暖房空調システム等の配管への適用を考慮して円管流を、船舶等への適用を考慮して平板上境界層流れをそれぞれ研究対象とした。円管流では圧力損失測定を、平板上境界層流れではLDV計測ならびにPIV計測を実施した。これにより、非イオン性界面活性剤水溶液の円管内乱流における抵抗低減効果、ならびに境界層流れにおける平均速度分布、乱れ統計量分布、及び乱流構造の詳細を明らかにする。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究において使用した非イオン性(生分解性)界面活性剤は、オレイルジメチルアミンオキシド(ODMAO)及びアルキルポリグリコシド(APG)をそれぞれ水道水に溶解させたものである。ODMAO[アロモックス(AROMOX), ライオン・アクゾ株式会社製]は、オレイルジメチルアミンオキシドを主成分とする混合物である。一方、APG(AGNIQUE PG 264-U, Cognis Ltd. 製)は、C12-16アルキルポリグリコシドを主成分とする混合物である。なお、実用的な観点から、溶媒としてイオン除去水や蒸留水ではなく、水道水を用いた。本研究では、ODMAO水溶液及びAPG水溶液の重量濃度をそれぞれ500 ppm及び6000 ppmとした。

(2) ODMAO水溶液及びAPG水溶液の作成においては、攪拌器により水溶液を約12時間攪拌し、その約1時間後に実験を開始した。一般に、陽イオン性界面活性剤水溶液では、サリチル酸ナトリウム等の対イオンを混合することにより紐状ミセルのネットワーク構造が形成され、抵抗低減効果が発現すると言われている。一方、非イオン性界面活性剤水溶液の場合には、対イオンを混合しなくても紐状ミセルのネットワーク構造が形成される。このことは、非イオン性界面活性剤の利点の一つでもある。

(3) 非イオン性界面活性剤水溶液のせん断粘度の測定には、細管粘度計を使用した。ODMAO 500 ppm水溶液のせん断粘度は、水の値よりも僅かに大きい。また、せん断速度が70 1/s以下の範囲内においては、ODMAO 500 ppm水溶液のせん断粘度はほぼ一定値となり、その後、せん断速度の増加と共にせん断速度が僅かに大きくなるshear-thickening特性が現れる。一方、APG 6000 ppmのせん断粘度は、水の値よりも大きく、測定したせん断速度の範囲内においては、ほぼ一定値となる。なお、陽イオン性界面活性剤水溶液の場合には、せん断速度の増加と共にせん断粘度が急激に上昇するSISと呼ばれる現象が報告されているが、本研究で用いた非イオン性界面活性剤水溶液の場合には、SISは観察されなかった。

(4) 非イオン性界面活性剤水溶液の円管内流れにおける管摩擦係数の測定のための実験装置は加圧流下式であり、圧力ヘッドは約0.5 MPaとした。実験に使用した円管は、内径 $d = 5.0$  mmの流体力学的に滑らかなステンレス管である。助走区間の長さは700 mm(140 d)、測定区間の長さは $L = 70$  mm(14 d)である。圧力損失 $\Delta P$ はフルスケールが20 kPaの差圧変換器(GE Drunck 株式会社製)により測定した。流量はニードルバルブにより調節

し、重量法により測定した。測定中の溶液温度は  $T \approx 25^\circ\text{C}$  とした。

(5) 実験には、 $300 \times 300 \times 1500$  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  $20 \times 295 \times 1700$  mm のアクリル製のテストプレートが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。

(6) LDV 計測では、2次元 LDV (出力: 300 mW, 日本カノマックス(株)製)を使用した。主流速度  $U_m = 300$  mm/s のもと、Green 及び Blue レーザ光をアクリル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  $x = 300, 500, 800, 1000$  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  $4.1 \mu\text{m}$ , 比重: 1.02) を作動流体中に約 5 ppm 懸濁させて使用した。

(7) PIV 計測では、レーザーシート光源 (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及び壁面垂直方向 ( $x - y$ ) 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 ((株)フोटロン製) により撮影した。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。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  $40 \times 40$  mm, 画素数は  $1024 \times 1024$  pixels である。検査領域を  $70 \times 40$  pixels, 探査領域を  $40 \times 20$  pixels とし、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 (粒径: 約  $40 \mu\text{m}$ , 比重: 1.03) 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。

(8) LDV 計測及び PIV 計測を行なう際の作動流体の温度  $T$  は  $25^\circ\text{C}$  とした。また、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、非イオン性界面活性剤水溶液では、回流水槽の作動流体を循環させるのに使用する遠心ポンプによって機械的劣化が見られた。そこで、速度場計測を行う間、一定の抵抗低減効果が得られるように、ポンプで予め 16 時間作動流体を循環させ、溶液特性を安定させた後に速度場計測を開始した。

#### 4. 研究成果

(1) ODMAO 500 ppm 水溶液及び APG 6000 ppm 水溶液の管摩擦係数  $\lambda$  とレイノルズ数  $Re$  の関係を図 1(a) に示す。図には、ニュートン流体の層流の理論式である Hagen-Poiseuille の式 ( $\lambda = 64 / Re$ ), ニュートン流体の乱流の経験式である Blasius の式 ( $\lambda = 0.3164 Re^{-0.25}$ ), 希薄高分子水溶液に対する Virk の最大抵抗低減漸近線 (MDRA) ( $\lambda = 2.32 Re^{-0.58}$ ,  $4000 < Re < 40000$ ), 及び界面活性剤水溶液に対する Zakin の MDRA ( $\lambda = 1.28 Re^{-0.55}$ ) がそれぞれ示されている。

(2)  $Re, \lambda$  はそれぞれ次式により定義される。

$$Re = \rho U_m d / \eta \quad (1)$$

$$\lambda = d \Delta P / (L \rho U_m^2 / 2) \quad (2)$$

ここで、 $U_m$  及び  $\rho$  はそれぞれ、管断面平均速度及び密度である。非イオン性界面活性剤水溶液の場合において、密度  $\rho$  及びせん断粘度  $\eta$  には同じ溶液温度における水の値を用いた。レイノルズ数の定義において、溶液のせん断粘度ではなく、溶媒(水)のせん断粘度を用いているが、これは、せん断粘度の影響を含めて抵抗低減効果を議論できるようにするためであり、従来の研究におけるレイノルズ数の定義と同じである。なお、溶液のせん断粘度を用いて  $Re$  を定義した場合には、 $Re$  と  $\lambda$  の関係は、層流域においては Hagen-Poiseuille の式に従うようになり、乱流域においては、溶媒のせん断粘度を用いた場合と若干異なることになる。しかしながら、溶液のせん断粘度がせん断速度に対してほぼ一定であるため、ここでは図に示さないが、乱流域においてレイノルズ数の定義の違いによる定性的な相違は見られない。

(3) ODMAO 500 ppm 水溶液の場合、 $Re < 2000$  において、 $\lambda$  は  $Re$  の増加に伴い Hagen-Poiseuille の式と同勾配で減少する。また、 $Re < 2000$  において、 $\lambda$  の値は水のものよりも大きい。これは、 $Re$  の定義において、溶媒(水)のせん断粘度の値を使用しているためである。 $Re > 2500$  において、 $\lambda$  は水のものよりも小さく、抵抗低減効果を示している。 $\lambda$  が最小値に達すると、 $Re$  の増加に伴い  $\lambda$  は大きくなり、Blasius の式に近づく。その変化の割合は、陽イオン性界面活性剤水溶液の場合と同程度である。 $\lambda$  は Virk の MDRA よりも僅かに小さくなるが、Zakin の MDRA までには至らない。一方、APG 6000 ppm 水溶液の場合には、 $\lambda$  の値は Virk の MDRA には至らない。また、 $\lambda$  が最小値に達すると、 $Re$  の増加に伴い  $\lambda$  は大きくなり、Blasius の式に近づくが、その変化の割合は ODMAO 水溶液の場合に比べて緩やかである。

(4) 図 1(b) に ODMAO 500 ppm 水溶液及び APG

6000 ppm 水溶液の抵抗低減率 DR とレイノルズ数 Re の関係を示す。DR は、同じ Re におけるニュートン流体の管摩擦係数  $\lambda_s$  と界面活性剤水溶液の管摩擦係数  $\lambda$  を用いて次式により定義される。

$$DR = (\lambda_s - \lambda) / \lambda_s \times 100 \quad (3)$$

図 1(b) より、ODMAO 500 ppm 水溶液及び APG 6000 ppm 水溶液共に、DR は Re の増加に伴い大きくなり、最大となった後、減少することが分かる。ODMAO 500 ppm 水溶液及び APG 6000 ppm 水溶液の最大 DR はそれぞれ、70%及び 65% である。

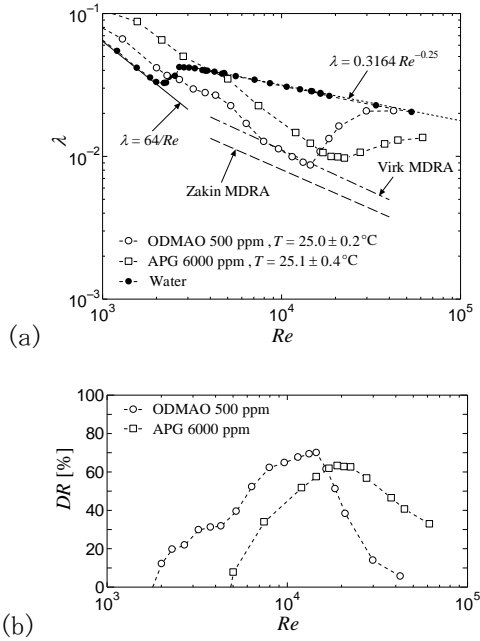


図 1 円管内流れにおける抵抗低減効果：(a)  $\lambda$  v. s. Re, (b) DR v. s. Re.

(5) ODMAO 500 ppm 水溶液及び APG 6000 ppm 水溶液の乱流境界層流れにおける抵抗低減率 DR を表 1 に示す。DR は、 $Re_0$  が等しい界面活性剤水溶液の壁面摩擦係数  $C_{f, surfactant}$  と水の壁面摩擦係数  $C_{f, water}$  を用いて次式のように定義される。

$$DR = (C_{f, water} - C_{f, surfactant}) / C_{f, water} \times 100 \quad (4)$$

ここで、 $C_{f, water}$  は Coles の曲線から求めた。ODMAO 500 ppm 水溶液の DR は下流に向かうにつれて大きくなり、最大 DR は 50% である。一方、APG 6000 ppm 水溶液の DR は、主流方向位置に関わらず、15% 前後であり、DR 算出の不確かさが  $\pm 5\%$  あることを考慮すると、ほとんど抵抗低減効果は得られていないと言える。このことは、後述する平均速度分布及び主流方向乱れ強さ分布が水の分布とほぼ同じであることから推察される。

表 1 境界層流れにおける抵抗低減率 DR

x (mm)	300	500	800	1000
ODMAO	-5	18	40	50
APG	13	16	13	12

(6) ODMAO 500 ppm 及び APG 6000 ppm 水溶液の円管内流れ (内径  $d = 5$  mm) では、それぞれ最大 DR 70% 及び 65% が得られている [図 1(b) 参照]。境界層流れでは円管流れよりも抵抗低減効果が小さくなる原因を明らかにするために、乱流境界層流れにおける壁面せん断応力  $\tau_w$  と円管内流れにおいて抵抗低減効果が得られた壁面せん断応力との大小関係を調べた。乱流境界層流れにおいては、主流方向位置  $x = 1000$  mm において、ODMAO 500 ppm 及び APG 6000 ppm 水溶液の壁面せん断応力  $\tau_w$  はそれぞれ 0.1 Pa 及び 0.2 Pa であった。円管内流れにおいて抵抗低減効果が得られる  $\tau_w$  の範囲は、ODMAO 500 ppm 水溶液の場合には、 $\tau_w > 0.7$  Pa であり、境界層流れのものと同じオーダーであるのに対して、APG 6000 ppm 水溶液の場合には、 $\tau_w > 4.3$  Pa であり、境界層流れのものよりも 1 オーダー大きい。陽イオン性界面活性剤水溶液の場合、紐状ミセルのネットワーク構造が形成されない程にせん断応力が小さい場合、ならびに紐状ミセルのネットワーク構造が破壊される程にせん断応力が大きい場合には共に、抵抗低減効果が得られないことが知られている。本研究において、APG 6000 ppm 水溶液の境界層流れでの  $\tau_w$  は、抵抗低減効果が得られる  $\tau_w$  の範囲よりもかなり小さかったため、大きな抵抗低減効果が得られなかったものと推察される。

(7) ODMAO 500 ppm 水溶液及び APG 6000 ppm 水溶液の摩擦速度  $u_\tau$  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 2(a) 及び 2(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 ( $U^+ = 2.44 \ln y^+ + 5.0$ )、及び Virk の極限速度分布 ( $U^+ = 11.7 \ln y^+ - 17$ ) が示されている。ODMAO 500 ppm 水溶液の場合、 $U^+$  の値は  $y^+ > 10$  において、DR の増加に伴い大きくなる。これは、高分子水溶液及び陽イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減チャンネル乱流ならびに抵抗低減乱流境界層流れにおいても共通に見られる特徴である。一方、APG 6000 ppm 水溶液においては、 $U^+$  の分布は対数則領域において、水のものよりも僅かに上方にシフトするのみであり、抵抗低減率が 15% 程度と小さいことと整合している。

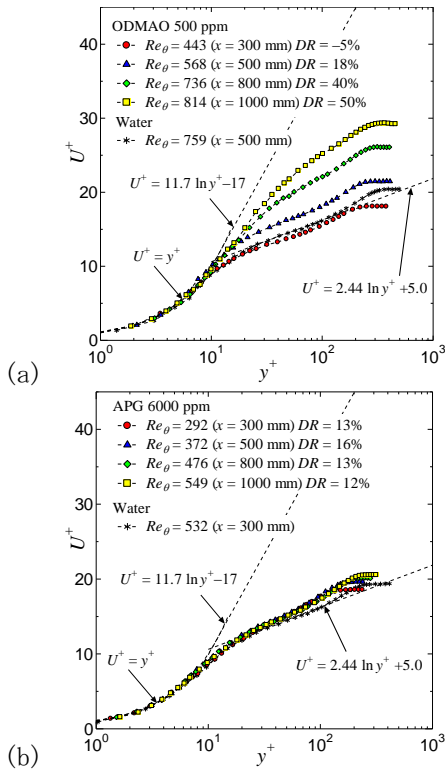


図2 平均速度分布：(a) ODMAO 500 ppm, (b) APG 6000 ppm.

(8) 図3(a)及び3(b)にそれぞれ、ODMAO 500 ppm水溶液及びAPG 6000 ppm水溶液の $u_r$ 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。ODMAO 500 ppm水溶液の場合、DRの増加に伴い、 $u'^+_{rms}$ の最大値は大きくなり、 $x = 800$  mm (DR = 40%)及び $x = 1000$  mm (DR = 50%)においては、水のものよりも大きくなる。DRが比較的大きい場合に、 $u'^+_{rms}$ の最大値が水のものよりも大きくなることは、従来の抵抗低減流れにおいても数多く報告されている。しかしながら、著者らは、陽イオン性界面活性剤の乱流境界層流れにおいて、 $u'^+_{rms}$ の最大値は、 $Re_\theta$ やDRのみでは整理できないことを異なる溶液濃度、溶液温度におけるLDV計測により確認しており、非イオン性界面活性剤の場合も、さまざまな実験条件下における調査が必要であると考えられる。また、陽イオン性界面活性剤水溶液の場合には、主流方向乱れ強さ分布に付加的な極大値が現れることが我々により報告されている。さらに、ごく最近、せん断速度が大きい壁面近傍の流れはSIS、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層モデルを用いることにより、付加的な極大値の存在を説明している。本研究で使用した非イオン性界面活性剤水溶液においては、陽イオン性界面活性剤水溶液の場合に見られたような付加的な極大値は観察されなかった。この原因としては、非イオン性界面活性剤水溶液のせん断粘度において、SISが観察されな

かったことが考えられる。一方、APG 6000 ppm水溶液の場合には、主流方向位置に依らず、水の分布との明確な相違は見られない。よって、APG 6000 ppm水溶液の場合には、平均流れ場及び乱れ場共に水のものほとんど違いが無いと言える。

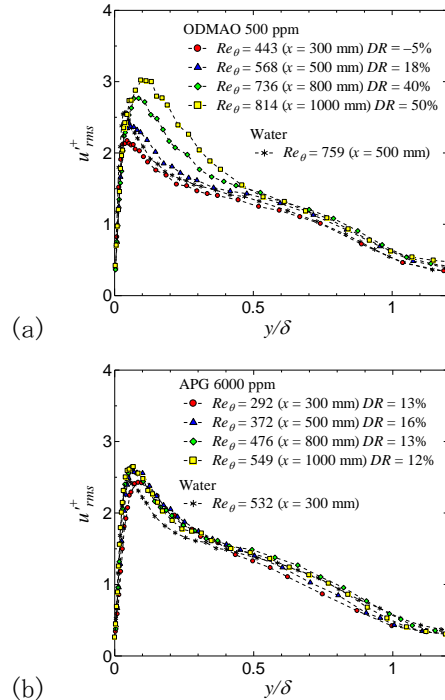


図3 主流方向乱れ強さ分布：(a) ODMAO 500 ppm, (b) APG 6000 ppm.

(9) 図4(a), (b)に、0.06 s間隔の連続した2時刻におけるレイノルズ分解により得られた水の変動速度ベクトル場を示す。横軸の $x' = 0$ は解析画像の左端を、縦軸の $y = 0$ は壁面を示しており、両軸共に境界層厚さ $\delta$ により正規化されている。PIV計測により得られた乱流統計量の分布から、その信頼性が確認された $0.1 < y/\delta < 1.2$ の領域が図示されている。図4(a)において、境界層中央部付近から壁面近傍にかけて、スイープ(領域A)が観察される。また、領域B及び領域Cに渦(渦B及び渦C)が確認できる。以降、ある領域内に存在する渦をその領域の記号を用いて表記する。図4(b)より、時間の経過とともに、渦Cは下流方向に移動し、渦Bは画像内から消え、渦Dが画像内に現れることが分かる。ここで、渦B, C, D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パケットを構成しているように見える。その後、ここでは示さないが、イジェクションが発生し、境界層外縁付近にまで及ぶ。これらの一連の乱流構造は、これまでにニュートン流体の壁乱流において観察されている壁面近傍渦の自己維持メカニズムと整合している。

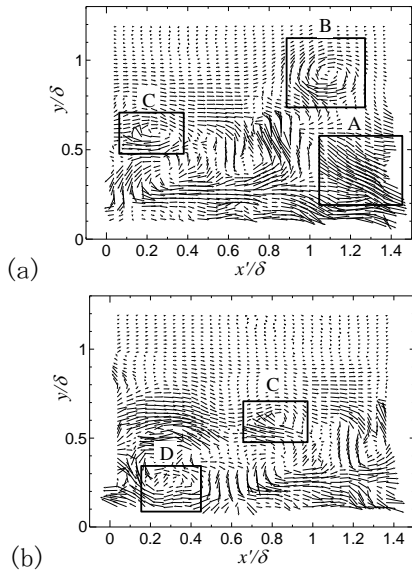


図4 水の変動速度ベクトル場：(a)  $t = t_1$  s, (b)  $t = t_1 + 0.06$  s.

(10) 図5(a), (b)に、異なる連続した2時刻におけるODMAO 500 ppm水溶液の変動速度ベクトル場を示す. ODMAO 500 ppm水溶液の場合、水の場合[図4(a), (b)]に比べて、流れ場全体において乱れが抑制され、そのスケールも大きくなるのが分かる. 水の場合には画像内に複数の渦がしばしば見られたが[図4(a), (b)], 図5(a)では、渦Eが単独で存在している. また、領域E及びその下方では、イジェクションが見られる. 図5(b)では、境界層中央部から壁面近傍にかけて、主流方向変動速度が負となる帯状の構造(領域F)が見られる. このような帯状の乱れ構造は陽イオン性界面活性剤水溶液の乱流境界層流れにおいても観察されている.

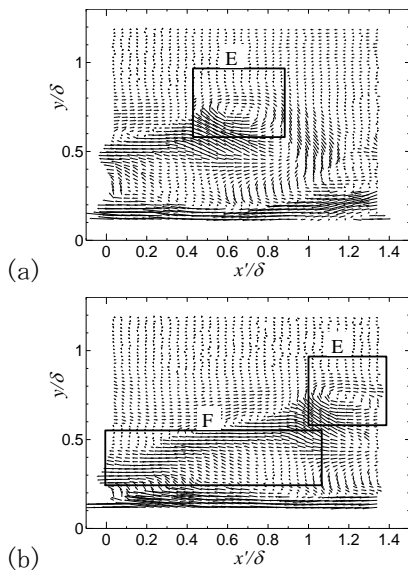


図5 ODMAO 500 ppm水溶液の変動速度ベクトル場：(a)  $t = t_2$  s, (b)  $t = t_2 + 0.06$  s.

## 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1件)

- ① 玉野真司, 伊藤基之, 加藤克雄, 横田和彦, 非イオン性界面活性剤水溶液の抵抗低減効果, 日本機械学会論文集, B編, 2009, 掲載決定, 査読有.

[学会発表] (計6件)

- ① 竹内俊介, 抵抗低減界面活性剤水溶液の乱流境界層流れにおける乱れ構造に関する実験的研究, 日本機械学会 東海支部第58期総会講演会, 2009.3.17-18, 岐阜大学, 岐阜.
- ② 竹内俊介, 界面活性剤水溶液の乱流境界層流れにおける乱れ構造, 日本流体力学会 年会 2008, 2008.9.4-7, 神戸大学, 神戸.
- ③ Motoyuki ITOH, Drag reduction of turbulent flows of surfactant solutions, Proceedings of the 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference, PL-3, pp.1-5. (Plenary Lecture), 13-16 October, 2008, Hokkaido, Japan.
- ④ Motoyuki ITOH, Turbulence structures in turbulent boundary layer flows of cationic and non-ionic surfactant solutions, Proceedings of the XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, No.11752, pp.1-2., 25-29 August, 2008, Adelaide, Australia.
- ⑤ 鈴木淳二, 界面活性剤水溶液の平板上乱流境界層流れの乱れ構造, 日本機械学会 東海支部第57期総会講演会, 2008.3.10, 名古屋大学, 名古屋.
- ⑥ 加藤克雄, 非イオン性界面活性剤水溶液の乱流境界層流れに関する実験的研究, 日本機械学会第85期流体工学部門講演会, 2007.11.18, 広島大学, 東広島.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 基之 (ITO MOTUYUKI)

名古屋工業大学工学研究科・教授

研究者番号：30024334