

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04271

研究課題名（和文）界面活性剤抵抗低減流れにおけるミセル組織構造と壁面近傍乱れ構造との関係

研究課題名（英文）Relationship between micelle structure and near-wall turbulence in surfactant drag-reduced flow

研究代表者

脇本 辰郎 (Wakimoto, Tatsuro)

大阪公立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10254385

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：管内を流れる水流に、ある種の界面活性剤を微量添加すると著しく抵抗が低減される。このような抵抗低減流れでは、溶液中で活性剤分子が集合してミセルを形成し、さらに管内に生じるせん断流れでミセルが結合して巨大なせん断誘起構造 (Shear Induced Structure, 以後SISと表記) を形成している。このSISが乱れの成長を抑制していると考えられている。

本研究では、溶液に微量添加した蛍光物質の蛍光強度からSISを局所で検出するとともに、レーザー流速計で速度を測定して、SISの形成と壁面の乱れ構造、および抵抗低減効果の発現との関係について考察した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

管内流にある種の界面活性剤を添加すると著しく抵抗が低減される。このような抵抗低減は、流動下で活性剤分子が集合し、巨大なせん断誘起構造 (Shear Induced Structure, 以後SISと表記) を形成するためであると考えられている。抵抗低減された流れでは乱れの成長が抑制されるが、SISがどこで、どのようなタイミングで生成・消滅し、乱れを抑制しているのかが不明であった。乱れの構造とSISの生成・消滅の関係を明らかにできれば、SISによる抵抗低減機構を明らかにできる学術的意義がある。また、より効果的な抵抗低減法を提案することが可能となり、省エネルギー社会の実現の一助となる社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：When a small amount of a certain type of surfactant is added to the water flow in a pipe, drag is significantly reduced. In the drag-reducing surfactant flow, the surfactant molecules in the solution aggregate and form micelles. Furthermore, the micelles combine under the shearing flow and form large shear-induced structures (referred to as SIS). It is believed that this SIS suppresses the growth of turbulence and results in the drag reduction. However, detecting the SIS, which can only be formed under flow conditions, is extremely challenging. As a result, there are still many uncertainties regarding the relationship between drag reduction and SIS formation. In this study, we added trace amounts of fluorescent material to the surfactant solution and detected the formation of SIS locally in the solution flow by fluorescence intensity. We also measured the flow velocity using a laser velocimeter to analyze the relationship among SIS formation, turbulent structure and drag reduction.

研究分野：流体工学

キーワード：抵抗低減 界面活性剤 トムズ効果 せん断誘起構造 蛍光

1. 研究開始当初の背景

管内を流れる水流に、ある種の界面活性剤を微量添加すると著しく抵抗が低減されていることが知られている。このような抵抗低減流れでは、溶液中で活性剤分子が集合してミセルを形成し、さらに管内に生じるせん断流れでミセル同士が結合して、巨大なせん断誘起構造(Shear Induced Structure, 以後 SIS と表記)を形成している(図1)。この SIS が乱れの成長を抑制していると考えられているが、流動中に形成される SIS を検出することは難しく、明確にはこの仮説は実証されていない。そこで、本研究では、微量の蛍光物質を溶液に添加し、巨大な SIS の形成を蛍光強度の変化で検出する手法を用いて(図2)、SIS 形成による抵抗低減の発現機構について検討することを思い至った。

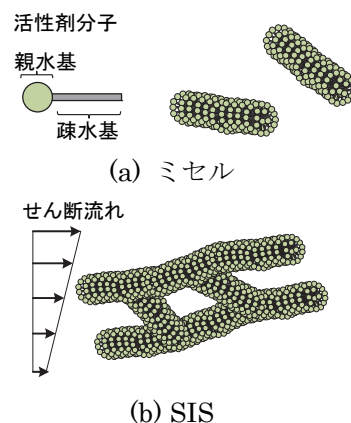


図1 ミセルと SIS

2. 研究の目的

本研究の目的は局所的な SIS の形成や消失と壁面近傍での乱れ(渦)の成長・抑制との関係を明らかにすることである。静止状態におけるミセルの構造は溶液を瞬間的に冷凍するクライオ電子顕微鏡で観察することが可能であり、数百 nm 程度の長さのひも状のミセルの構造が実際に可視化されている。しかし、流動中のミセルの構造を特定することは極めて困難である。そこで溶液に微量の疎水性蛍光色素を溶解させ、この物質からの蛍光の強度からミセルの組織構造を検出する手法を開発した。この手法はミセル同士が結合して巨大な構造を呈すると、多くの疎水性蛍光プローブ分子がミセルの中に取り込まれ、蛍光が減光する現象を利用している(図2)。溶液からの蛍光の強度を局所的に、かつ短いサンプリング速度で測定すれば、SIS の形成・消滅の時空間特性を知ることができる。さらに、局所的な速度計測を行えば、SIS の形成・消滅と乱れの成長・減衰との相関関係を明らかにすることができる。

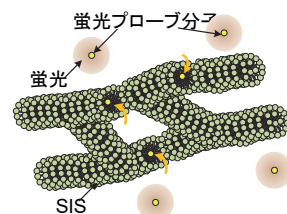


図2 SIS 内部への蛍光分子の取り込み

3. 研究の方法

実験装置を図3に示す。内径 10.6mm の石英製水平円管③を用い、助走区間を 1220 mm, 測定区間を 565 mm として、流量と測定区間における差圧を流量計⑤および差圧計④で測定して管摩擦係数を算出した。供試液体は、蛍光物質である 1-ピレンカルバルデヒドの飽和水溶液に抵抗低減界面活性剤である TTAB とサリチル酸ナトリウムを同モル量溶解させて作成した。供試液体の臨界ミセル濃度は 250 ppm であるので、0 ppm と 300 ppm の濃度で測定して、SIS の有無による乱流抑制効果について調べた。

供試液体に波長 375 nm のレーザー⑦を照射すると波長 487 nm をピークとする 415~650 nm のバンド幅の蛍光が發せられ、SIS が形成されると蛍光強度が低下する。図4に示すように蛍光の受光位置を管半径方向にトラバースさせ、円管内における SIS の発生・消失を局所的に測定した。また、受光光学系の中には波長 410 nm 以上の光のみを透過するロングパスフィルターが設

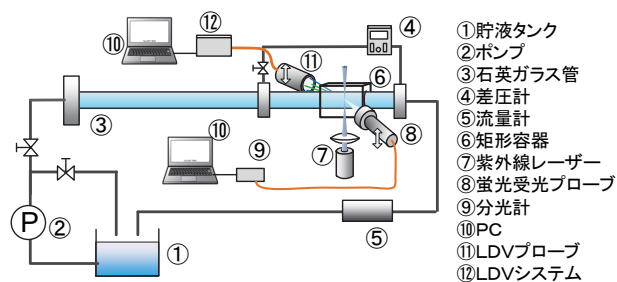


図3 実験装置

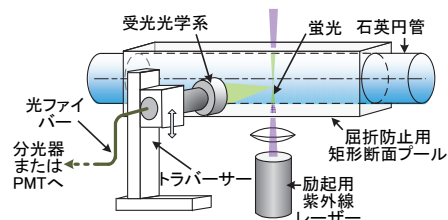


図4 蛍光強度測定装置

けられており、蛍光測定時の励起光の混入を防いでいる。蛍光強度は分光器もしくはフォトマルチプライヤ (Photomultiplier Tube, 以下 PMT と表記) で測定する。PMT は高感度・高応答な光センサーであり、PMT による測定で流動中における SIS の消滅・再形成についても検出することができる。また、トレーサ粒子として粒径 $0.5\mu\text{m}$ のラテックス粒子を供試液体に添加し、測定区間内に設置したレーザードップラー流速計 (Laser Doppler Velocimeter, 以下 LDV と表記) により管軸方向の速度を測定した。LDV のプローブも半径方向への移動が可能であり、平均速度および乱れ強さの半径方向の分布を測定した。

以上の測定により、SIS の形成・消滅の時空間特性、および乱れの成長・減衰の空間特性との相関関係を明らかにすることができる。

4. 研究成果

(1) 管摩擦係数と時間平均蛍光強度の関係

分光器により測定した時間平均蛍光強度および管摩擦係数 λ とレイノルズ数 Re との関係を活性价濃度 300 ppm の場合について図 5 に示す。蛍光強度は流動時の各 Re における波長 487 nm の蛍光強度値 I_{487} を、静止時の蛍光強度値で除した相対蛍光強度 I_{487}^* で評価した。半径位置 $R=0, 2, 5.1, 5.3\text{ mm}$ における測定値を上から順にずらして示している。図 5 の下部に λ と Re の関係が示されている。

図より、 300 ppm 水溶液の層流から乱流へと遷移し始める臨界レイノルズ数 Re_c は約 15000 であるのがわかる。相対蛍光強度 I_{487}^* が 1 未満が SIS の形成を意味するので、管壁付近 ($R=5.0, 5.1\text{ mm}$) では、 $2000 < Re < 40000$ の範囲で SIS が形成されていると解釈できる。特に $R=5.0\text{ mm}$ では遷移臨界レイノルズ数 $Re = 15000$ で I_{487}^* が最小値となっており、SIS 形成と乱流抑制効果との高い相関が認められる。 $Re=15000$ の $R=5.0\text{ mm}$ の位置は粘性長さで無次元化した壁指標では $y^+=20$ 程度であり、バッファ層に存在する SIS が乱流抑制に大きく寄与していることが窺える。

そこで、特に Re の増大とともに管壁付近の SIS が発達し λ が低下する $Re=8000\sim 14000$ (摩擦レイノルズ数 $Re_\tau=315\sim 845$) の条件と、 Re の増大とともに SIS の崩壊が進行して λ が増大する $Re=16000\sim 33000$ (摩擦レイノルズ数 $Re_\tau=315\sim 845$) の条件に注目し、速度の乱れ強さの測定を行った。以下では $Re=8000\sim 14000$ の条件を SIS 発達域、 $Re=16000\sim 33000$ の条件を SIS 崩壊域と呼ぶ。

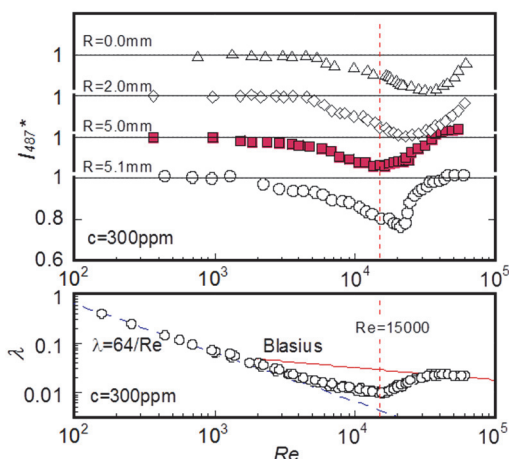


図 5 管摩擦係数と時間平均蛍光強度

(2) SIS 形成時の乱れ強さの分布

SIS 発達域と SIS 崩壊域における速度の乱れ強さの分布を図 6(a)(b) に示す。図 6 の横軸は粘性長さで無次元化した壁面からの垂直方向座標 y^+ 、縦軸は摩擦速度で無次元化した乱れ強度 u'^+ である。また、図中には活性价濃度 0 ppm の結果も参考として併記している。 0 ppm の場合、 Re_τ によらず乱れ強度の分布はほぼ同じで、何れの Re_τ においても $y^+=11$ で u'^+ が最大となり、約 2.7 の値を示す。一方、 300 ppm の場合、SIS 発達域では乱れの u'^+ のピークは $y^+=30\sim 50$ に存在し、最大値の値は 2.7 より小さい。 u'^+ のピークの値は SIS 崩壊域に入ると急速に増大し、 $Re_\tau=315$ で

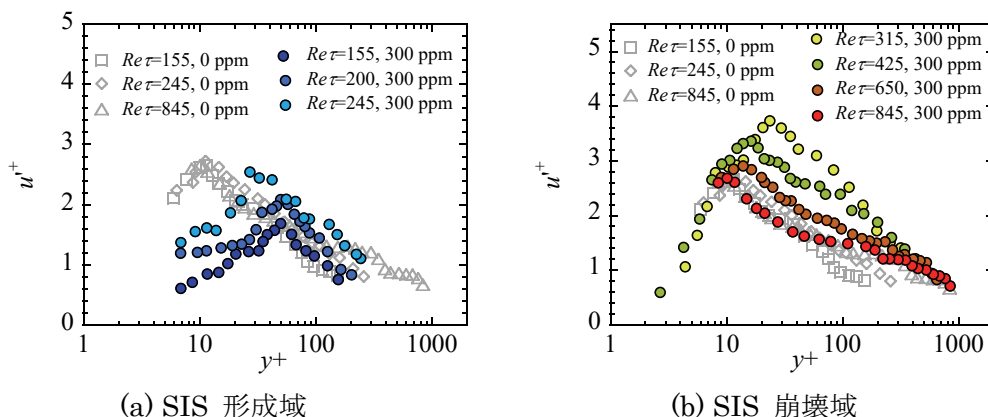
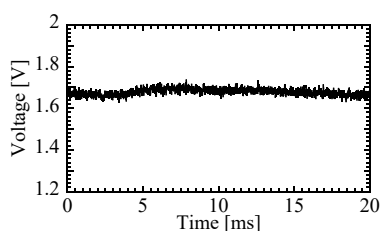


図 6 乱れ強さの測定結果

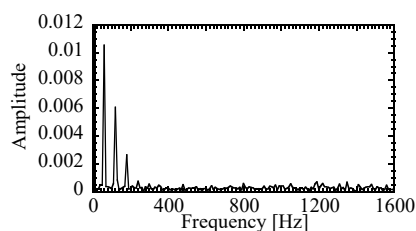
は 3.8 まで増大する。SIS 崩壊域では Re_r での増大とともに u^+ のピークの位置とピークの値が減少し、 $Re_r=845$ では u^+ の分布が $0ppm$ の分布とほぼ一致するようになる。すなわち SIS 形成域では $y^+ = 10 \sim 30$ のバッファ層にある乱れが抑制され、SIS 崩壊域では乱れが成長する。これらを図 5 の結果と比較すると、 $y^+=20$ 付近に形成されている SIS が乱れの成長を抑制し、抵抗が低減されていると解釈できる。

(3) SIS の崩壊と再形成の可能性の検討

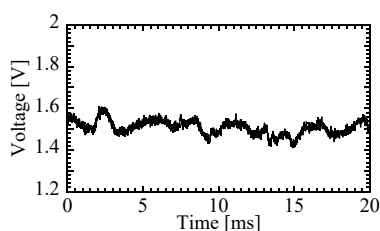
SIS はせん断流れで誘起されるが、図 5 に示したように、 Re が一定値を超える極端に大きなせん断強度の流れでは逆に崩壊する。一方、一般に乱流流れのバッファ層では、局所的な強い渦が間欠的に発生する、いわゆるバースト現象が生じている。このような渦は強いせん断場を局所的に発生させるので、この渦で SIS が崩壊することが考えられる。崩壊した SIS は強いせん断が緩和されれば再形成するので、流動中に SIS の崩壊と再形成が交互に繰り返されている可能性がある。本実験の条件ではバースト現象の周期は数 ms \sim 20ms 程度と見積もられるので、1ms の時間分解能で蛍光を測定し、SIS の崩壊と再形成の繰り返しの可能性について検証した。蛍光の測定の半径位置を $R=5.0mm$ に固定し、 $Re=600, 15000, 50000$ の条件で測定した蛍光強度の時系列変化を図 7 に示す。図 7(a)(c)では 1.7V 程度の出力で出力値の変動が小さいのに対して、図 7(b)では出力が 1.5V 程度と小さく、一方変動は大きい。図 7(a) \sim (c)の出力に対するパワースペクトルを図 8(a) \sim (c)に示す。何れの Re の条件にも表れている 60, 120 180Hz のピークは電源周波数とその高調波によるノイズである。図 8(a)(c)ではこのノイズ以外のスペクトル強度が殆ど見られないのに対して、図 8(b)では 300 \sim 1000Hz の周波数帯に有意な強度のスペクトルが存在する。このような蛍光強度の変動は、SIS が形成される条件でのみ観察されることから、SIS の不均質な構造に由来するものと考えられる。現段階では、 $R=5mm$ 以外の半径位置でしか測定を行っておらず、不均質な構造が壁面付近のみに限られるものであるのかどうかは不明である。したがって、蛍光強度の変動が、壁面近傍における間欠的な渦の発生に呼応した SIS の崩壊と再形成に依るものとの確証が得られていないが、蛍光強度の変動周波数帯は本実験の条件で予想されるバースト周波数とも一致するため、その可能性が十分考えられる。



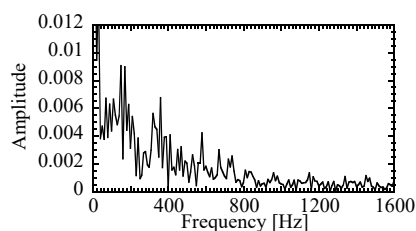
(a) $Re=600$



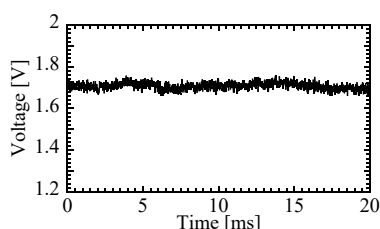
(a) $Re=600$



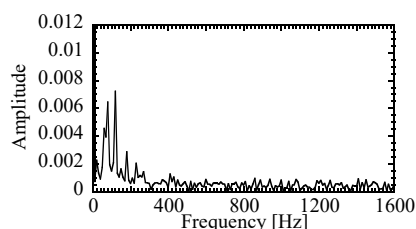
(b) $Re=15000$



(b) $Re=15000$



(c) $Re=50000$



(c) $Re=50000$

図 7 蛍光強度の時系列変化

図 8 蛍光強度変動の周波数スペクトル

(4) まとめ

界面活性剤を添加した円管内の抵抗低減流れを対象として、管内の速度乱れの分布を計測するとともに、独自に開発した蛍光法により、管内の SIS の形成の状態を調べた。計測の結果から、 $y^+=20$ 付近のバッファ層付近に形成される SIS が乱れの成長を抑制し、乱流への遷移を遅らせ

て、抵抗が低減されていると解釈できることがわかった。また、SIS が不均質な構造をしていることを明らかにした。壁付近で間欠的に生成される局所的な渦により、SIS の崩壊や再形成が生じて、不均質な構造となっていることが一つの仮説として考えられる。これまでは、流動下における SIS の形成の局所的な検出が難しく、乱れの低減に対する SIS 形成の寄与が明確ではなかった。また、SIS の不均質な構造を指摘した研究例もなく、本課題の研究結果は、界面活性剤による抵抗低減機構の解明に新たな視点からの知見を与えたものとする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 荒賀浩一, 三橋康平, 脇本辰郎, 加藤健司
2. 発表標題 抵抗低減界面活性剤水溶液流れのミセル構造変化と速度分布計測
3. 学会等名 日本実験力学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒賀浩一, 小澤海斗, 脇本辰郎, 加藤健司
2. 発表標題 抵抗低減界面活性剤水溶液流れの壁面近傍における乱れ計測
3. 学会等名 日本実験力学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	荒賀 浩一 (Araga Koichi)		
研究協力者	加藤 健司 (Katoh Kenji)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------