

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02065

研究課題名（和文）界面活性剤水溶液の壁面高速注入による乱流境界層の完全再層流化と最大抵抗低減流れ

研究課題名（英文）Relaminarization and maximum drag reduction in turbulent boundary layer flow due to high speed injection of surfactant solution

研究代表者

玉野 真司 (Tamano, Shinji)

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：40345947

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートン流体（水）および非ニュートン流体（界面活性剤水溶液）を平板上乱流境界層流れに壁面高速注入（主流の数倍程度大きい速度で壁面に沿って注入）することで「流れの完全再層流化」の可能性を調査した。実験においては、溶液の高速注入が可能な注入機構を構築し、可視化観察、およびPIV計測を実施した。数値計算においては、溶液の高速注入に対応した流入境界条件および界面活性剤水溶液のレオロジー特性を再現したDNSを実施した。実験および数値計算の両面から、高速注入の効果と粘弾性効果の複合効果が明らかにされた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

界面活性剤や高分子等の粘弾性流体の抵抗低減流れはニュートン流体の壁乱流とは乱流構造や乱流統計量が全く異なり、流体力学分野における未解明現象の一つであり、そのメカニズムを解明することの学術的意義は高い。また、粘弾性流体の抵抗低減流れは著しい流動摩擦低減を引き起こすことから、省エネ技術としても注目されており、カーボンニュートラル社会を目指す我が国において本研究課題を推進することの社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：We have performed PIV measurements for the drag-reducing turbulent boundary layer flows by high-speed injection of surfactant aqueous solution parallel to wall. In addition, we performed DNSs of turbulent boundary layer flows with the wall injection of Newtonian and viscoelastic (FENE-P) fluids. We clarified the synergetic effect of drag reduction due to the high-speed wall injection and viscoelastic properties.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流境界層 界面活性剤 抵抗低減

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートン流体(水)にある種の界面活性剤を微量(ppm オーダ)添加した溶液は粘弾性流体となり、乱流状態において著しい流動抵抗低減(Drag Reduction、DR)効果を示すことが知られている。添加剤による抵抗低減は高額なセンサーや特殊な壁面加工が不要であることから実用的な「流れの省エネ技術」として注目されており、DRが最大となる「MDR(Maximum DR、最大抵抗低減)流れ」に関する研究が活発になされている。粘弾性流体のMDR流れの流動様式はニュートン流体の壁乱流で見られるような「渦の生成・崩壊サイクル」とは全く異なり、MDR流れに至るメカニズムやその維持機構、ならびに粘弾性の役割については未だ不明である。一方、Kuhnenら(Nature Phys.、2018)はごく最近、内部流れである円管内流れにおいて、壁面に沿って水(ニュートン流体)を高速注入(断面平均流速の数倍大きい流速で注入)することで、「流れが完全再層流化する」(乱流から層流に再層流化し、層流が十分下流でも維持される)という知見を報告している。現時点では、完全再層流化のメカニズムについてはほとんど言及されておらず、外部流れである乱流境界層流れにおいても水の高速注入による完全層流化が実現可能であるのかは不明である。

### 2. 研究の目的

本研究では、粘弾性流体の特異な流動現象である「最大抵抗低減流れ(MDR流れ)」の生成・維持における「粘弾性」の役割を明らかにすることを目的とする。そのため、ニュートン流体(水)および非ニュートン流体(粘弾性流体である界面活性剤水溶液)を平板上乱流境界層流れに壁面高速注入(主流の数倍程度大きい速度で壁面に沿って注入)することで「流れの完全再層流化」(層流が十分に下流でも維持される)を図る。実験においては、溶液の高速注入が可能な注入機構を構築し、可視化観察、およびPIV計測を実施する。数値計算においては、溶液の高速注入に対応した流入境界条件および界面活性剤水溶液のレオロジー特性を忠実に再現したDNSを実行する。「溶液の壁面高速注入による完全再層流化の効果」と「粘弾性流体の持つ抵抗低減効果」の類似性に着目しつつ、実験と計算の両面から「MDR流れの生成・維持機構」を解明する。

### 3. 研究の方法

#### (1)実験的アプローチ

実験装置は回流式水槽であり、開水路チャンネル(1500mm × 300 mm × 300 mm)内にテストプレート(1280 mm × 300 mm × 20 mm)が設置されている(図1参照)。加圧タンク(圧力調整機能付き)を用いた溶液注入システムを構築した(図2参照)。ステンレス製注入器は上部と下部の2つから構成されており、加圧の際に内部空気の漏れや破損が生じないように溶接で接合されている。また、流れが注入器から受ける影響を最小限に抑えるために、注入器の主流に接する面の厚みを1.0 mmとし、テーパ加工を施し、出口部分は滑らかに縮流している。本PIVシステムは、高速度カメラ、シートレーザー、パーソナルコンピュータ、および解析ソフトから構成される。主流および壁面垂直方向断面をシートレーザー光(最大出力は4 W)で光切断し、高速度カメラで撮影を行う。焦点距離105 mmのカメラレンズを使用した。シートレーザーはレーザー設置台に、高速度カメラは流路下部に設置された主流方向トラバースに取り付けられている。水、界面活性剤水溶液、および高分子水溶液を壁面に平行に高速注入した場合の可視化観察ならびにPIV計測を実施した。主流(300 mm/s)に対する注入速度比は1.0倍および1.4倍とした。

## (2) 数値的アプローチ

本研究で取り扱う流体は非圧縮性流体であり、境界層流れの支配方程式は運動方程式と連続の式である。本数値計算領域は、ドライバ部とメイン部の2つの計算領域から成る。ドライバ部においてニュートン流体の十分発達した乱流境界層流れ場を生成し、メイン部の流入条件としている。粘弾性流体の構成方程式モデルには FENE-P モデルを用いた。壁面注入方法は、メイン部の流入面において注入速度  $U_{inj}$  を壁面に平行に付加することで、壁面注入の流れを模擬した。注入する範囲は、粘性底層内とした。注入速度比は  $U_{inj} / U_e = 1, 2, 3$  の3ケースとした。以降、注入速度比 ( $U_{inj} / U_e = 1, 2, 3$ ) のニュートン流体、および粘弾性流体の数値計算を Newtonian-1HI, -2HI, -3HI、および FENE-P-1HI, -2HI, -3HI と表記する (HI: High-speed Injection)。空間離散化手法には2次精度中心差分法を用いた。構成方程式の対流項については2次精度風上差分法を用いた。また、粘弾性流体の計算では数値安定性の観点から、構成方程式に人工拡散項を付加した。時間進行法には、3段3次 Runge-Kutta 法と Crank-Nicolson 法の混合手法を用いた。境界条件として、流入面には流入境界条件、流出面には対流流出条件、一様境界面には一様流境界条件、スパン方向には周期境界条件、壁面には滑りなし条件を課した。また、レイノルズ数は  $Re_{\theta_0} = 670$ 、ワイゼンベルク数は  $Wi = 20$  とし、格子数は  $256 \times 64 \times 64$ 、計算領域は  $200\theta_0 \times 30\theta_0 \times 20\pi\theta_0/3$  とした。

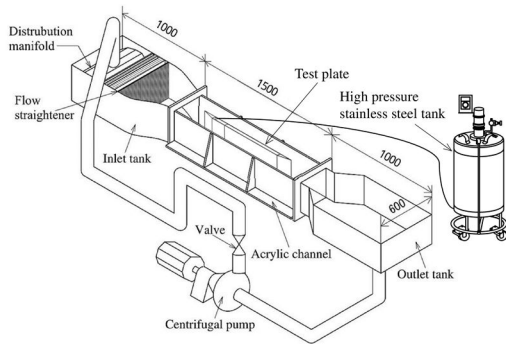


図1 実験装置の概略図

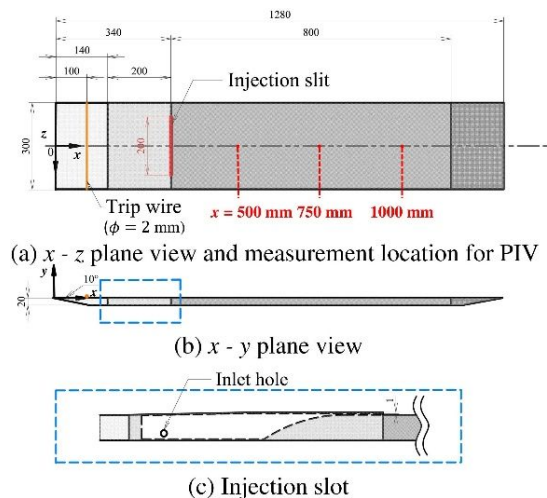
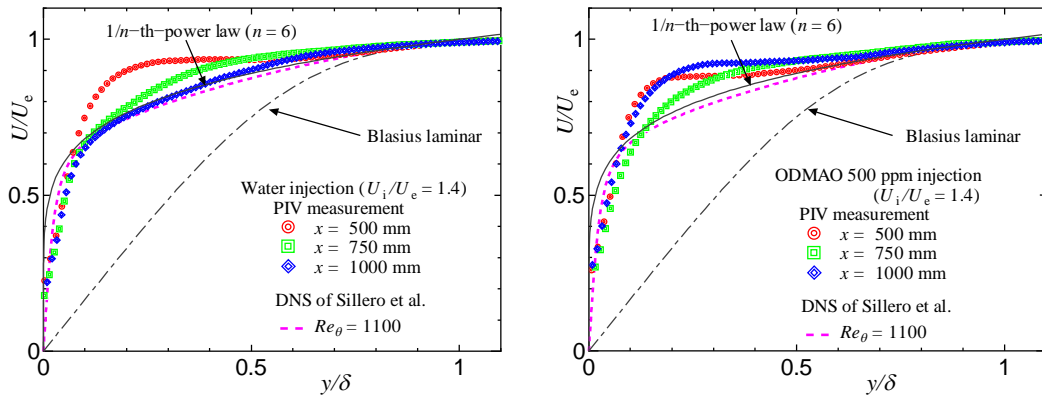


図2 テストプレートの概略図

## 4. 研究成果

### (1) 実験的アプローチ

図3(a)および(b)にそれぞれ水および界面活性剤を  $U_i/U_e = 1.4$  で壁面平行高速注入した際の主流方向平均速度分布を示す。横軸は境界層厚さ  $\delta$  で正規化された壁面からの距離  $y/\delta$  である。水を注入した場合には(図3(a))、主流方向測定位置に依らず、注入無しのDNS結果よりも主流方向平均速度が大きくなる。水の壁面高速注入により、平均速度分布の境界層の中央部付近において平坦な領域が現れることが明らかになった。スリット注入位置に最も近い  $x = 500$  mm で、壁面平行高速注入の影響が最も大きい。界面活性剤を注入した場合には(図3(b))、主流方向測定位置に依らず、 $0.1 < y/\delta < 0.7$  で、注入無しのDNS結果よりも主流方向平均速度が大きくなる。また、界面活性剤を注入した場合は、水を注入した場合よりも、壁面平行高速注入の影響がより下流まで持続する。これは、界面活性剤水溶液の壁面高速注入の効果と粘弾性効果との複合効果によると考えられる。

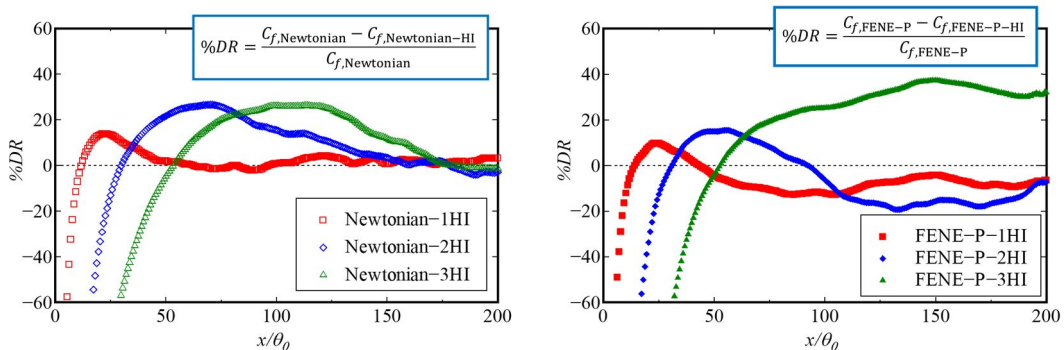


(a) 水注入 (b) 界面活性剤溶液注入

図3 PIV計測により得られた平均速度分布

(2) 数値的アプローチ

本実験に対応した数値計算を実現するため、壁面平行高速注入を伴う乱流境界層流れの DNS を実施した。ニュートン流体中にニュートン流体を注入した場合について (図 4(a)) 上流では抵抗低減率%DRが負(抵抗増加)となるが、下流に向かいDRが急激に増加し、正(抵抗低減)となる。注入速度比が大きい程、抵抗低減率が正となる流れ方向位置は下流側に移動する。下流域では壁面注入の影響が薄れ、注入速度比に依らずDRがゼロに収束する。これにより、内部流れと同様に外部流れにおいてもニュートン流体の壁面注入により、過渡的な抵抗低減効果が得られることが明らかになった。ただし、外部流れでは再層流化には至らなかった。次に粘弾性流体中に粘弾性流体を注入した場合について (図 4(b)) 注入速度比が大きい程、抵抗低減率が正となる流れ方向位置が下流に移動する。この傾向はニュートン流体の場合と同様である。また、ニュートン流体の場合 (図 4(a)) とは異なり、FENE-P-1HI, 2HI の場合には、一度極小値を取ってからゼロに漸近する。FENE-P-3HI の場合には極大値のみが見られ、下流においても抵抗低減が維持されている。ここで、図 4(b)における%DR = 0は注入無しの粘弾性流体の抵抗低減率と等しいことを意味することに留意されたい。したがって、粘弾性流体と壁面注入による複合効果により、本計算条件においては注入無しの粘弾性流体よりも高い抵抗低減効果を発現することが明らかになった。つまり、粘弾性流体の場合、実験と同様に、高速注入の効果と粘弾性効果の複合効果が観察された。ただし、より実現象の条件に近づけるため、濃度(数密度)の方程式と FENE-P モデルの構成方程式とをカップリングした場合には、粘弾性流体の壁面平行高速注入により抵抗低減効果は得られなかった。



(a) ニュートン流体の注入 (b) 粘弾性流体の注入

図4 DNSにより得られた抵抗低減率の流れ方向変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 玉野真司	4. 巻 42(164)
2. 論文標題 界面活性剤水溶液の乱流制御の可視化	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 可視化情報	6. 最初と最後の頁 10-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 矢野克幸, 玉野真司
2. 発表標題 壁面平行高速注入による抵抗低減乱流境界層流れの実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会東海支部第71期総会講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中野靖久, 玉野真司
2. 発表標題 粘弾性流体の壁面注入による乱流境界層流れの抵抗低減に関する数値解析
3. 学会等名 日本機械学会第99期流体工学部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 玉野真司, 中野靖久, 山田格, 森西洋平
2. 発表標題 構成方程式を用いた希薄界面活性剤水溶液のモデリング
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 玉野真司
2. 発表標題 非ニュートン流体の流れの計測と抵抗低減
3. 学会等名 第2回次世代モビリティセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平野真琴，玉野真司，山田格，森西洋平
2. 発表標題 機械学習による抵抗低減乱流境界層流れの大規模流れ構造の解析手法の検討
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井勇樹，玉野真司，山田格，森西洋平
2. 発表標題 円管内流れにおける混合界面活性剤の抵抗低減効果ならびにせん断誘起構造の可視化に関する検討
3. 学会等名 第18回日本流体力学会中部支部講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 斉藤友泰，玉野真司，山田格，森西洋平
2. 発表標題 攪拌機を用いた抵抗低減効果を有する界面活性剤水溶液の円筒容器内流れに関する実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会第98期流体工学部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大澤啓海, 武藤真和, 玉野真司
2. 発表標題 濃度と温度変化を伴う粘弾性流体の乱流境界層流れのDNS
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川透馬, 武藤真和, 玉野真司
2. 発表標題 抵抗低減乱流境界層流れにおける大規模乱流構造と壁面せん断応力との関係
3. 学会等名 日本機械学会第100期流体工学部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shinji Tamano, Hiromi Osawa, and Masakazu Muto
2. 発表標題 Effect of local relaxation time on drag reduction in turbulent boundary layer flow of viscoelastic fluids
3. 学会等名 8th Pacific Rim Conference on Rheology (PRCR2023), Vancouver, Canada (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinji Tamano, Touma Yoshikawa, Masakazu Muto
2. 発表標題 Role of large-scale flow structures on drag reduction in turbulent boundary layer flow due to surfactant injection
3. 学会等名 XIXth International Congress on Rheology (ICR2023), Athens, Greece (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023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 分担者	森西 洋平  (Morinishi Yohei)  (40222351)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授   (13903)	
研究 分担者	山田 格  (Yamada Toru)  (40772067)	名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・助教   (13903)	

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
---------	---------