

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：13903

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21931

研究課題名（和文）抵抗低減効果を有する界面活性剤水溶液の緩和時間に基づく熱と流体のアナロジー

研究課題名（英文）Analogy between heat and flow of drag-reducing surfactant aqueous solution based on relaxation time

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：界面活性剤水溶液の一樣流れにおいて圧力損失測定および熱伝達率測定を行い、流動と伝熱のアナロジーが成立しないことを示した。一樣な界面活性剤水溶液の平均速度分布はニュートン流体の層流の理論式にほぼ一致し、レイノルズせん断応力がほぼゼロとなる。また、界面活性剤水溶液を注入した非一樣流れにおいては、最下流測定区間において、一樣な界面活性剤水溶液の場合とほぼ同じ抵抗低減効果が得られることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

配管系の流動抵抗を低減することができれば、ポンプ動力を削減することが可能となり、省エネ化に繋がる。本研究成果は配管系でしばしば用いられる円管内の流れに抵抗低減剤として界面活性剤を注入した際の抵抗低減効果を明らかにしたものである。本研究では、界面活性剤水溶液を壁面近傍に効率よく注入することにより、下流域において一樣な界面活性剤水溶液の場合と同程度の高い抵抗低減効果を得られることを明らかにしている。抵抗低減界面活性剤の効率的な使用法が確立されれば、さらなる省エネ化に繋がるものと期待される。（246文字）

研究成果の概要（英文）：To clarify the analogy between the drag reduction (DR) and the heat transfer reduction (HTR) of a nonionic surfactant aqueous solution in pipe flows, the pressure loss and flow rate were measured for the DR measurement, while the fluid temperature and pipe outer wall temperature were measured for the HTR measurement. It was found that the DR and HTR as a function of the Reynolds number were similar to one another, but the DR was smaller than the HDR under the present experimental condition. In addition, we performed the PIV measurements of turbulent pipe flows with and without surfactant injection. For the case of without injection, we found that the mean streamwise velocity profile was modified according to the amount of drag reduction, and the Reynolds shear stress was almost zero at the high drag reduction. For the injection case, it was revealed that the drag reduction ratio approached that of homogeneous surfactant solution in the streamwise direction.

研究分野：流体工学、レオロジー

キーワード：抵抗低減 界面活性剤 粘弾性流体

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)に微量(ppmオーダー)の高分子や界面活性剤を添加した希薄水溶液は粘弾性流体(非ニュートン流体)となり、乱流状態において著しい流動抵抗低減効果(Drag Reduction、DR効果)を示すことが知られている。界面活性剤はある濃度(臨界ミセル濃度)以上になると、せん断流れにおいて球状ミセルから紐状ミセルへと変化し、ネットワーク構造が形成される。この時、界面活性剤水溶液は粘弾性流体となり、DR効果を発現する。界面活性剤はポンプ等の機械的せん断による劣化をほとんど受けないため、地域冷暖房の冷温水循環系に界面活性剤を添加して省エネ効果を獲得しようとする応用研究も行われてきている。実用化においては、流動摩擦が低減すると熱伝達率特性も同時に低下するという「熱と流体のアナロジー(相似則)」により、流動摩擦低減に伴う熱交換機の性能低下が懸念される。しなしながら、実機試験においては流動摩擦低減(DR)に伴いポンプ動力が削減されるのみであり、熱伝達率低減(Heat Transfer Reduction、HTR)は報告されていない。このことは、粘弾性流体である希薄界面活性剤水溶液においては、ニュートン流体とは異なり必ずしも熱と流体のアナロジーが成立しないことを示唆している。近年、その原因を究明すべく、完全発達円管内流れを対象として熱と流体のアナロジーに関する研究室実験がなされているが、熱と流体のアナロジーがほとんどの場合において成立しており、実機実験と実験室実験との不一致の原因については不明であった。界面活性剤添加によるDRメカニズムの解明ならびに省エネ技術のさらなる普及には、粘弾性流体における熱と流体のアナロジーの解明が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、DR効果を有する界面活性剤水溶液を円管内流れの壁面スリットより円周方向に一樣に注入した場合の、界面活性剤ミセルのネットワーク構造が形成される過程(流れ方向変化)に着目する。局所的な管摩擦係数と熱伝達率の多点同時計測を駆使して、抵抗低減率(DR)と熱伝達率低減率(HTR)の流れ方向変化を明らかにする。そして、溶液濃度、温度、およびレイノルズ数を様々に変化させ、熱と流体のアナロジーの成立・不成立条件を見出す。さらに、流れの可視化観察とPIV計測(粒子画像流速測定法)を実施し、乱流場での界面活性剤水溶液の「緩和時間」(界面活性剤ミセルのネットワーク構造の形成に関する特性時間)の評価方法を探求することで、粘弾性流体における緩和時間に基づく新しい熱と流体のアナロジーの提案を目指す。

3. 研究の方法

(1) 熱と流体のアナロジーの計測

最初に、熱と流体のアナロジーを計測できる実験装置の製作を行った。装置は回流水槽であり、ステンレス製の上流タンク、下流タンク、遠心渦巻きポンプ、ポンプのモーターを制御するインバータ、ステンレス製ゲートバルブ、流量測定のためのレンジの異なる2種の電磁流量計(高流量計:東京計装(株)製、低流量計:(株)キーエンス製)および耐熱塩ビ樹脂製と銅の円管流路からなる。助走区間およびテストセクションで用いた銅管の内径 d は13.9 mm、助走区間、加熱距離、差圧測定間距離はそれぞれ2000 mm($\approx 150d$)、1500 mm、1553 mmである。流量はインバータ、バルブで制御した。圧力損失は圧力レンジ500 mmAqの微差圧計(GEセンシングジャパン(株)製)により測定した。熱伝達率は管壁の温度測定用のT型熱電対((株)タカハシサーモセンサー製)、および管路流入部、流出部測定用標準温度計((株)マザーツール製)を使用した。これらは恒温槽内で比較法により温度校正した。流出流体温度における半径方向の温度分布を均一化するため、スタティックミキサー((株)ノリタケカンパニーリミテド製)を使用した。本実験では低流量から高流量までインバータで流量を調節し、各流量での水温測定、差圧測定、加熱状態の管壁温度を測定した。また、非イオン性界面活性剤には、カデナックス(ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ(株))を用いた。カデナックスは、主成分ODMAO(Oleyl dimethylamine oxide)を40.3 wt%含む混合物であり、界面活性剤を用いた実験ではODMAO濃度を500 ppmとした。物性値の評価には作動流体のバルク温度を用いた。

(2) 注入なしの一樣な流れの圧力損失および速度場計測

円管内流れの可視化装置およびPIV計測システムの製作を行った。可視化装置については、石英ガラス円管(内径14.0 mm)と矩形の石英スリーブから構成されている。スリーブ内部に水を満たすことで、円管外周の屈折の影響を出来るだけ小さくした。助走区間および差圧測定間距離はそれぞれ1500 mm($\approx 107d$)、2000 mm($\approx 150d$)である。

PIV計測では、トレーサー粒子としてナイロンパウダーを使用し、高速度カメラにより光切断面を撮影する。シートレーザー((株)日本レーザー製:DPSS Green Laser Model: DGGL-4W)、高速度カメラ((株)フォトロン製:FASTCAM-Mini WX100)、およびカメラレンズ(タムロン(株)製:TAMRON SP AF 180 mm)を使用した。可視化観察では、可視化染料であるローダミンBを用い、シートレーザーで円管中央断面を光切断し、切断面を一眼レフカメラ(SONY製:a7R IV)により撮影した。実験はいずれも、低流量から高流量になるようにインバータで調節し、各流量での水温測定、差圧測定、およびPIV計測を行った。

(3) 流体の壁面注入による非一様な流れの圧力損失および速度場計測

流体注入器はアクリル製のシリンダとピストン、電動アクチュエータから構成される。ピストンの押し込み量はPC制御されており、分解能0.01 mm/sで制御可能である。注入機構については、管内流れにおいて界面活性剤水溶液を局所的かつ円周方向に一樣に注入可能な機構(幅1 mmのスリットを円周上に設けた円錐形状の機構)とした。注入角度は流れ方向に対して30°であり、注入機構は助走区間直後に設置されている。また、多点圧力差圧計測システムを構築し、注入位置から100 ~ 400 mmを第1区間とし、1300 ~ 1600 mmの第5区間までの5つの区間ごとの差圧測定を可能とした。

4. 研究成果

(1) 熱と流体のアナロジーの計測

溶液温度10および20での圧力損失測定および熱伝達率測定を行い、レイノルズ数 Re と管摩擦係数の関係、ならびにレイノルズ数 Re とヌセルト数 Nu の関係を明らかにした。水流について、圧力損失の測定結果は層流域($Re < 2000$)ではHagen-Poiseuilleの式に、乱流域($Re > 3000$)ではPrandtl-Kármánの式によく一致することを確認した。界面活性剤水溶液について、層流域では抵抗増加となるが、乱流域($3000 < Re < 9000$)では抵抗低減を示した。また、熱伝達率測定について、層流域ではSieder-Tateの式とほぼ一致し、乱流域ではColburnの式よりもわずかに小さくなった。界面活性剤水溶液について、層流域では若干のばらつきは見られるものの、概ねSieder-Tateの式に近い結果が得られ、乱流域では界面活性剤水溶液の h はColburnの式よりも小さくなり、 $Re > 10000$ ではその変化の勾配がColburnの式のものと同様となった。ODMAO 500 ppmの場合について、 Re に対するDRとHTRの関係について、DRとHTRが急激に減少するレイノルズ数(臨界レイノルズ数)は共に約5500であり、最大DRは48%、最大HTRは73%であった。 Re に対するHTRとDRは定性的に同様の挙動を示すものの、値はDRの方が小さく、流動と伝熱のアナロジーが成立しないことが明らかになった。

(2) 一様な流れの圧力損失および速度場計測

次に、新たに製作した可視化ユニットを用いて、一様な界面活性剤水溶液および水の流れの可視化観察、PIV計測、および圧力損失測定を実施した。界面活性剤水溶液については、層流域では抵抗増加となるが、乱流域では抵抗低減を示した。ODMAO 500 ppmの場合、 $Re = 7500$ で最大抵抗低減率60%を示した。PIV計測により、ODMAO 500 ppmの一樣流れにおいて、 $Re = 5000$ 、7500で速度分布がニュートン流体での層流の理論式(Hagen-Poiseuille)にほぼ一致し、管全体にわたって乱れが抑制され、レイノルズせん断応力がほぼゼロとなることを明らかにした。

(3) 流体の壁面注入の場合の圧力損失および速度場計測

新たに製作した溶液注入機構を用いて、水および界面活性剤水溶液を注入した場合の圧力損失(管摩擦係数)の流れ方向変化を測定し、抵抗低減率の流れ方向分布を明らかにした。管断面平均速度に対する注入速度比を0.2、0.4、0.6、0.8と変化させることで、注入速度比が抵抗低減率の流れ方向変化に及ぼす影響を明らかにした。水流にODMAO 500 ppmを注入した非一樣流れにおいて、 $Re = 5000$ 、7500の場合には共に、第5区間において最大抵抗低減率54%が得られた。また、 $Re = 5000$ 、7500での最適な注入速度比はそれぞれ0.6、0.4であった。 $Re = 5000$ の場合、最下流の第5区間においては、一様な界面活性剤水溶液の場合と同様DR効果が得られることが明らかになった。このことは、局所的に界面活性剤水溶液を注入することで、作動流体を全て界面活性剤水溶液にする必要がなくなり、界面活性剤の使用量を大幅に削減できる可能性を示唆している。

次に、水および界面活性剤水溶液を注入した場合のPIV計測を実施することで、乱流渦構造および乱流統計平均量(平均速度分布、乱流強度分布、レイノルズせん断応力分布)の流れ方向変化を調べ、抵抗低減率との関係を明らかにした。測定位置は、第1区間(注入位置から下流に $x = 250$ mm)、第3区間($x = 850$ mm)、第5区間($x = 1450$ mm)の3箇所とした。ODMAO 500 ppmを注入した非一樣流れにおいては、 $Re = 5000$ の場合、第1区間において、管全体にわたって乱れが抑制され、下流側の第5区間においてさらに乱れが抑制されることを乱流統計量の壁面垂直方向分布により明らかにした。また、瞬時の変動速度ベクトルと主流速度コンターから、管全体にわたって乱れが抑制され、壁面近傍にシート状の構造が確認された。

以上、本研究課題においては、熱と流体のアナロジーの計測、一様な流れの場合と流体の壁面注入の場合での圧力損失および速度場計測を実施した。熱計測については十分な精度での測定が出来なかったため、新しい熱と流体のアナロジーの提案には至らなかった。しかし、従来測定が困難であった、円管内流れの速度場計測を様々な注入速度比で実施出来たことで、抵抗低減メカニズムの解明を進めることが出来た。なお、今後は、一様な場合と注入した場合での圧力損失測定と速度場計測を比較検討することで、界面活性剤ミセルのネットワーク構造の下流方向への変化についてのさらなる解析ならびに構成方程式モデルの提案を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

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 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

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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