

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2020

課題番号：19K14893

研究課題名（和文）界面活性剤添加による乱流低減現象の物理モデル構築

研究課題名（英文）Physical modeling of turbulence reduction by surfactant additives

研究代表者

堀本 康文（HORIMOTO, Yasufumi）

北海道大学・工学研究院・特任助教

研究者番号：60822525

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：発達した乱流への界面活性剤添加による壁面摩擦抵抗低減現象を調べるため、世界有数の大きさのTaylor-Couette流の実験装置を製作した。水の乱流における角運動量輸送が微量な界面活性剤添加により劇的に抑制され、最大で50%低減もの抵抗低減が達成された。また、速度場計測より、水の乱流との明確な相違点として、抵抗低減状態での平均流速分布は単調でないことがわかった。さらに、上記の抵抗低減の結果と水溶液中の界面活性剤ミセル構造の存在との関連を蛍光プローブ法により調査した。抵抗が低減する場合は蛍光が弱くなり、抵抗低減の発現と蛍光弱化の間の相関が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

持続可能な社会実現のためには、工業の場面での省エネルギー化が喫緊の課題である。本研究では、パイプライン中の乱流によるエネルギーの摩擦損失を低減する技術とされる、界面活性剤添加による抵抗低減現象のメカニズム解明に取り組んだ。測定原理の異なる計測手法を組み合わせることで、抵抗低減の発現と特異な平均流速分布、水溶液中の界面活性剤ミセル構造の存在を関連付けることができた。これは、抵抗低減の予測には欠かすことのできない、現象の数値モデルの構築に寄与する結果である。

研究成果の概要（英文）：To experimentally investigate the drag reduction by surfactant additives into high-Reynolds number turbulence of water, we produce a very large apparatus of Taylor-Couette flow. By the addition of surfactant to the turbulence of water with concentrations of the order of 0 (10) ppm, angular momentum transfer is drastically suppressed, which achieves the reduction of drag by 50%. By velocity measurements, we reveal that in such a drag-reduced state, the mean velocity distribution between the rotating inner and outer cylinders is not monotonical. In addition, we conduct fluorescence probe method to relate the drag-reduced state to the existence of micellar structures. We confirm that a correlation between the above measurements when the drag reduction occurs.

研究分野：流体工学

キーワード：抵抗低減 乱流 Taylor-Couette流 粒子画像流速測定 PIV 蛍光プローブ法 界面活性剤水溶液

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

微量の(典型的には質量濃度で数十~数百 ppm の)界面活性剤の添加により、液体の乱流の壁面摩擦抵抗を数十%も低減することが知られており、とくに閉じた循環系のパイプラインの省エネルギー化に有用な乱流の制御法である。しかしながら、その抵抗低減現象は界面活性剤の複雑なレオロジー特性、とくに粘弾性に起因するものであり、現象のメカニズムは未だ完全には解明されていない。抵抗低減現象の予測には現象のメカニズムの理解が不可欠であり、抵抗低減に対する水溶液の粘弾性の寄与の解明が求められている。

2. 研究の目的

高い Reynolds 数の乱流を制御できる実験装置として、Taylor-Couette 流の実験装置を製作し、計測原理の異なる種々の計測手法を用いて、抵抗低減が生じる乱流を系統的に調査する。特筆すべき点として、流動化での界面活性剤ミセル構造の存在を調べるための蛍光プローブ法を採用する。これにより、従来は壁面応力や流速測定を用いて調査されてきた界面活性剤水溶液の流れに対する界面活性剤ミセルのネットワーク構造の寄与を明らかにする。さらに、抵抗低減とミセルネットワーク構造の存在の関連を解明する。

3. 研究の方法

本研究で製作した Taylor-Couette 流の実験装置では、内外円筒の回転を独立に制御できる。これにより、円筒間の空隙に充填した流体に印加するせん断の大きさを変化させて、乱流の発達程度を変えた実験を実施した。円筒の回転状態を表すパラメータは内円筒の回転角速度に対する外円筒の回転角速度の比である。この報告書では、Taylor-Couette 乱流の先行研究に倣って、その角速度比に負号を付けたパラメータ a を用いる。つまり、 $a > 0$ が二つの円筒が逆方向に回転していることを示す。また、流れに対する遠心力の大きさを表すパラメータとして、Taylor 数も用いる。Newton 流体では、Taylor 数が 10 の 9 乗のオーダーになると円筒側面の境界層も乱流化した流れが維持される。

水と希薄な界面活性剤水溶液を作動流体として実験以下の 3 項目について実験を行った。

(a) トルク計測

Taylor-Couette 流の利点として、トルク計測により容易に円筒壁面の壁面摩擦応力を取得できる点が挙げられる。本研究では、トルクメーターにより計測した内円筒にかかるトルクから、円筒側面における摩擦抵抗の低減を定量化した。評価には壁面摩擦係数 C_f を用いた。

(b) 乱流速度場計測

シート状レーザーによる流体中のトレーサー粒子の運動から、画像解析を用いて流速場を計測した。計測したのは、円筒の軸に垂直な面上における半径-周方向の 2 次元速度分布である。

(c) 蛍光プローブ法

流体中の蛍光分子が水溶液中の界面活性剤ミセル構造内に取り込まれることで蛍光が弱化する。その性質を利用して、蛍光強度の変化から流動中の水溶液中における界面活性剤ミセルの存在を定性的に調べる。本研究では、紫外線 LED と分光器を組み合わせた光学系を実験装置に組み込み、流れ場中の定点での蛍光スペクトルを取得した。また、光学系を半径方向にトラバースして、蛍光強度の空間分布も計測した。

4. 研究成果

よく発達した乱流を維持するために、大型の Taylor-Couette 流の実験装置を製作した。内外円筒の半径はそれぞれ 150mm と 205mm であり、Taylor-Couette 流の実験装置としては世界有数の大きさである。本研究で設計した装置では、それぞれの円筒の半径と角速度で定義される Reynolds 数が最大で 10 の 5 乗のオーダー (Taylor 数では 10 の 10 乗) の高 Reynolds 数乱流が実現される。

(1) 壁面摩擦抵抗低減の定量化 (トルク計測)

図 1 に、 $a=0.33$ (もっとも乱流が発達する角速度比) における C_f の計測結果を示す。横軸は内円筒の半径と角速度にもとづく Reynolds 数である。先行研究によれば、Newton 流体の場合、Reynolds 数が 1 万のオーダーから境界層は乱流化し、ultimate turbulence とよばれる発達した乱流へと遷移する。その発達した乱流に対して界面活性剤を添加することで、顕著な乱流抑制が生じ、それにともない摩擦抵抗も低減した。また、抵抗低減の程度は Reynolds 数とともに単調に大きくなり、もっとも高い Reynolds 数では最大で 50%もの抵抗低減率を達成することが明らかとなった。さらに、界面活性剤濃度が 50ppm と 100ppm の場合では結果に明確な差は確認できない。つまり、抵抗低減効果を得るためには、本研究の実験では 50ppm 程度の微量な界面活性剤で十分であることも確認できた。

また、ultimate turbulence では、規格化した内円筒上の壁面摩擦応力は Taylor 数のべきで予測できることが知られている。図 2 は、そのべき指数の回転速度比 a に対する依存性である。先行研究で明らかにされているように、水の場合にはべき指数が $a=0.33$ 付近で極大値をとるの

に対し、界面活性剤を添加した場合には 1/4 程度の値となった。これは、界面活性剤水溶液では乱流が抑制されたために内円筒壁面からの角運動量輸送も抑制されたことを表す。

(2)乱流速度場変調の計測 (PIV)

図 3 は $a=-0.33$ における乱流の内外円筒の半径と角速度で規格化した主流方向平均流速の半径方向分布ある。界面活性剤濃度が 50ppm、100ppm の場合では、円筒間の広い領域にわたって水の場合とは逆の速度勾配をもつ。この傾向は逆方向回転 ($a>0$) と同方向回転 ($a<0$) のいずれにも共通するが、同方向回転時に顕著である。なお、図の例では、濃度 100ppm の場合には抵抗低減率は -190%、つまり抵抗増加を示した。この速度分布を理解するためには、界面活性剤水溶液のもつ粘弾性的な性質、第一法線応力差などを考慮する必要がある。つまり、界面活性剤添加により発現する流体の粘弾性は、抵抗低減、抵抗増加のいずれの要因ともなり得て、とくにその性質が強く表れる場合には、抵抗低減から抵抗増加へと転じる。この特異な速度分布は、先行研究では粘弾性流体の Taylor-Couette 流の数値計算で数例報告されているのみであり、実験による実証は今回の計測が初じめての例である。この抵抗低減状態から抵抗増加状態への遷移をさらに詳細に調査することで、界面活性剤添加による抵抗変調現象への粘弾性への寄与のさらなる理解の深化が期待される。

(3)抵抗低減現象と界面活性剤ミセルネットの存在の関連付け (蛍光プローブ法)

すでに述べたように、本研究の特色の一つには蛍光プローブ法による乱流中における界面活性剤ミセル構造の存在の調査がある。図 4 に示すように、蛍光の弱化は高い Taylor 数(つまり、高い Reynolds 数)において明確に確認できた。図は $a>0.33$ の場合の結果であり、1 点鎖線は抵抗低減が生じた下限 Taylor 数を示す。その Taylor 数より高い領域で蛍光弱化が発現していることは、水溶液中におけるミセル構造の占める体積の増加を意味している。この結果は、希薄な界面活性剤水溶液のレオロジーの分野で研究されてきた、界面活性剤ミセルのネットワーク構造の存在を示唆するものであり、これまでは(流れの存在しない条件下での)電子顕微鏡による撮影で確認されてきたミセルネットワーク構造が、乱流中でも形成される可能性を示す。なお、この結果は Taylor 数の変動に対して履歴をもたないことも明らかになった。

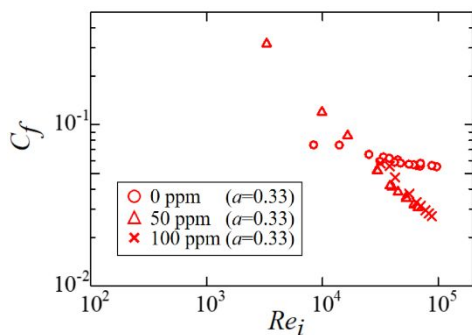


図 1: 界面活性剤添加による壁面摩擦抵抗係数の変化。本研究の実験では、およそ 2 万以上の Reynolds 数から抵抗低減が確認できた。

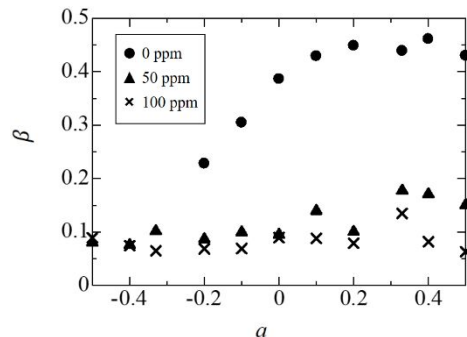


図 2: 壁面摩擦応力の Taylor 数への依存性の変調。角速度によらず、界面活性剤添加により角運動量輸送が抑制される。

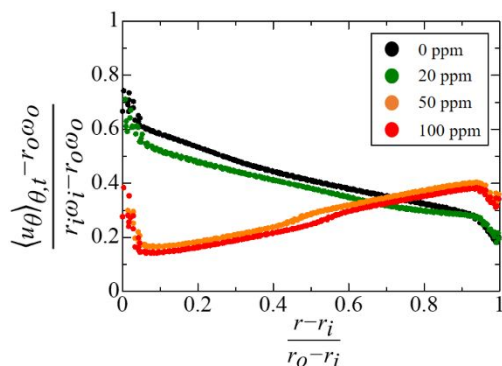


図 3: 乱流の平均速度分布 ($a=-0.33$)。界面活性剤水溶液の粘弾性的性質により、平均速度は特異な分布を示す。

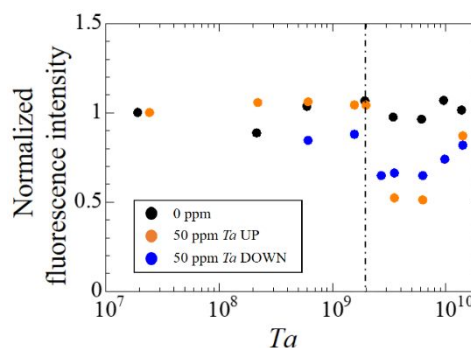


図 4: 乱流中の蛍光の Taylor 数依存性。抵抗低減が発現する値 (1 点鎖線) 以上の Taylor 数では、蛍光弱化が確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yasufumi Horimoto, Taisei Hayama, Hiroki Matsukawa, Yosuke Imai, Yasuo Kawaguchi
2. 発表標題 Angular momentum transport in turbulent Taylor-Couette flow modified by surfactant additives
3. 学会等名 The 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics (ICTAM 2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021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
---------	---------