

平成 30 年 5 月 4 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03918

研究課題名(和文)粘弾性流体の乱流境界層流れにおける最大抵抗低減領域とシート状構造との関係解明

研究課題名(英文) Investigation of maximum drag reduction and sheet-like structures in turbulent boundary layer flow of viscoelastic fluids

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)・准教授

研究者番号：40345947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、粘弾性流体の最大抵抗低減領域(MDR領域)における抵抗低減メカニズムを解明するために、実験および数値計算を実施した。実験においては、マルチカメラPIV計測により壁面近傍においてシート状構造が形成されること、その上方に大規模な乱流構造が間欠的に形成され、その流れ方向の大きさが境界層厚さの2.5倍程度になることを見出した。数値計算においては、流動性の方程式とFENE-Pモデルとをカップリングした構成方程式モデルを提案した。また、ポリマーエネルギー収支ならびに弾性ポテンシャルエネルギー収支を算出した。

研究成果の概要(英文)：One of the most striking feature of rheological drag reduction phenomenon is the existence of a so-called maximum drag reduction (MDR) asymptote. In this study, we performed time-resolved and multi-camera PIV measurements for turbulent boundary layer at the high drag reduction ratio beyond 70% and clarified turbulence statistics and the feature of very large-scale coherent structures observed in the MDR region. It was found that the streamwise maximum length scale was up to 2.5 times larger than the boundary layer thickness. Regarding the numerical approach, we proposed a new constitutive equation model for dilute surfactant aqueous solutions with shear-banding and evaluated its rheological properties. In addition, we clarified the elastic potential energy budget for the drag-reducing turbulent boundary layer flow.

研究分野：流体工学

キーワード：抵抗低減 乱流境界層流れ 粘弾性流体

1. 研究開始当初の背景

トムズ効果と呼ばれる流動抵抗低減効果(以降、「DR効果」と呼ぶ)については、半世紀以上にわたり数多くの実験および数値計算が実施されており、抵抗低減率が40%未満の低抵抗低減(LDR)領域と40~60%の高抵抗低減(HDR)領域におけるDRメカニズム(平均速度分布の上方シフト、レイノルズせん断応力の減少など)については解明されつつあると言える。研究代表者は特に、抵抗低減乱流境界層流れに着目し、実験とDNSの両面から境界層流れに特有のDR現象を多数見出し、同分野で世界をリードしている。しかしながら、抵抗低減率が60%を超える最大抵抗低減(MDR)の領域においては、壁面近傍における乱流構造がシート状になることが実験により明らかにされているものの、MDR領域でのDRメカニズムについては解明されておらず、現在、抵抗低減流れの研究分野において特に注目されている。MDR領域では、DR剤の種類、濃度、温度などの物性に関する条件や流れ場の条件によらない普遍的な速度分布(Virkの最大抵抗低減分布)となり、レイノルズせん断応力がほぼゼロであるにも関わらず主流方向変動速度が維持されるが、そのメカニズムはSDR領域やHDR領域での知見では説明できない。

2. 研究の目的

本研究では、粘弾性流体の最大抵抗低減領域(MDR領域)における抵抗低減メカニズムを解明するために、界面活性剤水溶液を注入した乱流境界層流れにおける実験、ならびに実験に対応した直接数値シミュレーション(DNS)を実施する。MDR領域では、抵抗低減率が60%を超え、壁面に平行な大規模なシート状構造が形成される。この大規模なシート状構造の全体像を捉えるために、実験ではマルチPIV(粒子画像流速測定法)とダイナミックPIVを組み合わせた計測手法を、DNSではコサイン変換法に基づく高速計算手法を構築する。また、ニュートン流体の遷移領域との類似点に着目し、物性制御や乱れ制御などの独自の解析手法を導入することで、MDR領域におけるシート状構造の役割を、実験と計算の両面から吟味する。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

本研究で使用した大型回流式実験装置を図1に示す。テストプレート長さは約3mであり、乱流境界層のMDR領域でのPIV計測を行うには十分な大きさを有する実験装置である。テストセクションはアクリル製閉水路測定部(400×400×3000mm)である。遠心式のポンプ(200IFWM2015, 荏原製作所(株)製)をインバータ(FR-A720-11K, 三菱電機(株)製)で周波数制御することで作動流体の流速を設定する。また装置内の作動流体の温

度は循環式冷水器(RKL-5500-D, オリオン機械(株)製)を用いてほぼ一定に保たれる。テストセクションには底面に垂直な全長2796mm、幅387mm、厚さ20mmのアクリル製テストプレート(図2参照)が設置されている。測定部内の座標は、テストプレート前縁からの流れ方向距離を x 、テストプレート壁面からの垂直方向距離を y とする。界面活性剤水溶液はテストプレート内に設けられたスロットより注入される。注入スロットは、主流方向に1.0mm、スパン方向に200mmであり、流路幅は0.5mmである。注入スロット位置は $x=400$ mmであり、流れ方向に対して壁面垂直方向に30度傾けられている。加圧シリンジのピストン押し込み量をPC制御することで、スロットからの注入量(1.45×10^{-2} L/s)は一定に保たれる。

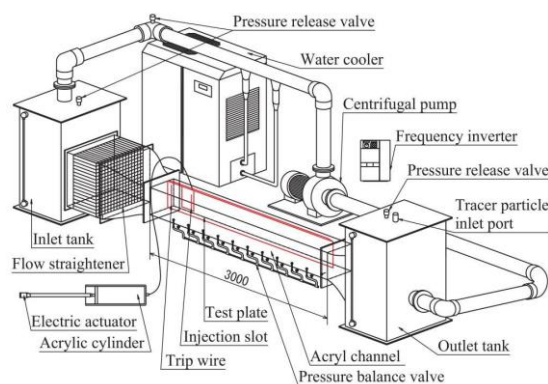


図1 本研究の実験装置

(2) 計測システムおよび界面活性剤

MDR領域で観察されるシート状構造の全体像を捉えることができるように、図2に示すようなマルチPIVシステムを構築した。測定断面をダブルパルスYAGシートレーザー(Ever Green 70, Quantel(株)製)で光切断し、光切断面の撮影には4台のCCDカメラ(AM-200GE, (株)JAI製)を用いた。レーザーとCCDカメラは同期装置(VSD 1000, (株)フローテックリサーチ製)で同期(パルス間隔: 1ms, サンプリング周波数: 10Hz)される。1台のカメラで1度に600ペア(1分間)の画像(1200×1600 pixels)を得た。一連の乱流構造の変化を撮影するため、隣接した画像は5mm程度オーバーラップさせた。

使用する界面活性剤は生分解性に富む非イオン性界面活性剤カテナックス(主成分: オレイルジメチルアミンオキシド(ODMAO)、ライオン・スペシャリティ・ケミカルズ(株)製)である。本実験ではODMAO濃度500ppmの水溶液を用いた。

本研究では、主流速度を $U_0 = 300$ mm/s、作動流体と注入液温度を 20 ± 0.3 °Cとした。

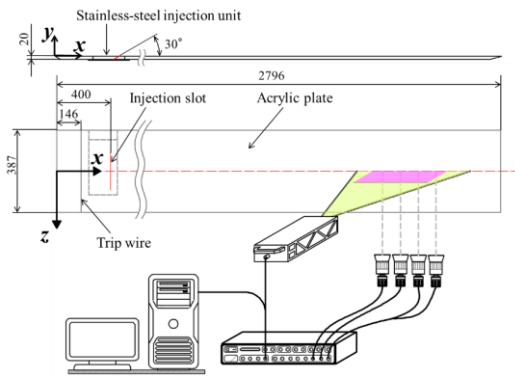


図2 本研究のマルチ PIV 計測システム

(3) 界面活性剤水溶液の構成方程式モデルの構築

FENE-Pモデルと流動性 ϕ の方程式はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial c_{ij}}{\partial t} + u_k \frac{\partial c_{ij}}{\partial x_k} - \frac{\partial u_i}{\partial x_k} c_{jk} - \frac{\partial u_j}{\partial x_k} c_{ki} + \left(\phi - \frac{Wi}{f} \frac{D\phi}{Dt} \right) E_{ij} = 0$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{1}{R_{bu} Wi} (1 - \phi) + R_{bd} Wi (Sv - \phi) E_{ij} D_{ij}$$

上式中の Wi はワイゼンベルグ数である。また、 f はPeterlin関数であり、次式で定義される。

$$f = \frac{L^2}{L^2 - c_{ii}}$$

ここでは、本構成方程式モデルを f -FENE-Pモデルと呼ぶ。上記の方程式をカップリングし、得られた流動性 ϕ についての方程式を解くことで各種特性値が得られる。定常せん断粘度および伸長粘度の評価においては、 ϕ の二次方程式となるため、解が一意的に決められる。

(4) 抵抗低減乱流境界層のDNS

流れ方向には等間隔格子を使用し、速度の境界値を与えていることから、流れ方向にコサイン変換を用いることができる。そこで、流れ方向にコサイン変換、スパン方向にFFTを用いた数値計算コードを新たに構築した。その結果、チャンネル乱流と同様に実質的に1次元問題として取り扱えるようになり、大幅な高速化を達成した。また、流れ方向変化を考慮した平均弾性ポテンシャルエネルギーの輸送方程式を導いた。

4. 研究成果

(1) 主な実験結果

MDR領域では、抵抗低減率が60%を超え、壁面に平行な大規模なシート状構造が壁面近傍に形成される。また、シート状構造の上方には大規模な流れ構造が現れる。その大規模構造の全体像を捉えるために、4台のカメラによるマルチカメラPIV計測手法を実施した。水流およびMDR領域である界面活性剤の場合のPIV結果を図3に示す。上図

の水流の場合には、流れ場の壁面近くにおいて大小様々な渦構造が観察される。一方、下図の抵抗低減流れの場合には、水流で見られるような小さな渦構造は見られなくなり、壁面極近傍にシート状構造が境界層厚さの0.2倍程度の領域まで存在する。また、シート状構造の上方に、流れ方向に非常に大きく引き伸ばされた乱流構造が観察される。その構造の大きさは流れ方向に境界層厚さの2~2.5倍程度、壁面垂直方向に境界層厚さの0.8倍程度である。また、大規模構造の発生頻度は0.5~1秒の間隔が最も高い。以上のように、乱流境界層流れにおけるMDR領域に特有の乱流構造の詳細が明らかにされた。

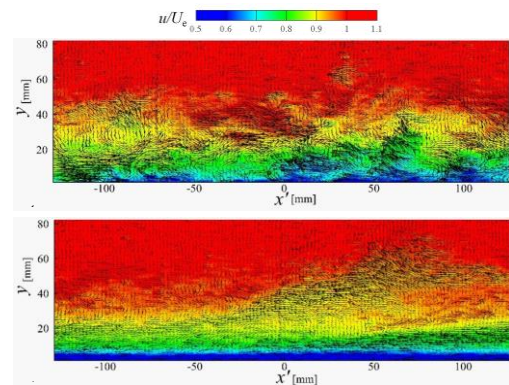


図3 マルチ PIV により得られた瞬時の速度変動ベクトルと流れ方向速度コンター。上図: 水流、下図: 抵抗低減流れ (最大 DR = 70%)

(2) モデル構築に関する主な結果

本研究で提案するモデル (f -FENE-Pモデル)の定常せん断粘度 η_s/η_0 とせん断速度の関係を図4に示す。ここでは、最大伸長 L を $10^1 \sim 10^5$ まで変化させた5ケースを考え、それ以外のモデルパラメータは固定する($\beta = 0.9$ 、 $R_{bu} = R_{bd} = 1.0$ 、 $Sv = 0.10$)。図4より、どのケースでもshear-thickeningとshear-thinningの両特性を示すことが確認できる。また L の増加に伴い、せん断粘度がせん断速度の変化に依らず一定となる領域が広がる。このことは、 f -FENE-Pモデルにより、shear-bandingの領域を任意に決定できることを意味している。

FENE-Pモデルと流動性の方程式をカップリングすることにより、shear-banding特性の再現が可能な構成方程式(f -FENE-Pモデル)を構築した。本研究で提案する f -FENE-Pモデルはshear-bandingの領域を任意に決定できる利点を有することが明らかになった。さらに、 f -FENE-Pモデルは、抵抗低減効果を有する粘弾性流体の数値計算において最もよく用いられるFENE-Pモデルがベースであるため、レオロジー特性と乱流抵抗低減の関係性を調査する際に有効な構成方程式モデルになり得ると期待される。

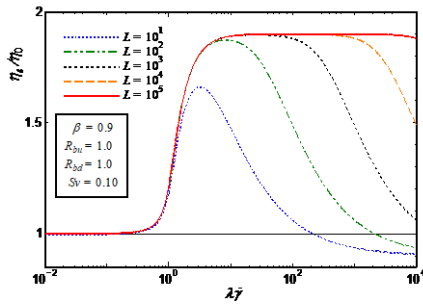


図4 新たに構築した f -FENE-P モデルの定常レオロジー特性

(3) 主なDNS結果

粘弾性流体の乱流境界層流れのDNSを実施し、弾性ポテンシャルエネルギー収支、ポリマーエネルギー収支に着目し、各収支が流れ場に与える影響について調査した。平均弾性ポテンシャルエネルギー収支を図5に示す。内層においては、平均場の生産項 P_{pm} と平均場の散逸項 ε_{em} および人工拡散項 D_{ad} とが釣り合い、外層においては、平均場の生産項 P_{pm} および乱流場の生産項 P_{pt} と平均場の散逸項 ε_{em} とが釣り合う。これらの結果は、 D_{ad} の影響を除き、チャンネル乱流のものと同様であることが明らかになった。今後、各種エネルギー収支の流れ方向変化について、さらなる調査を進める予定である。

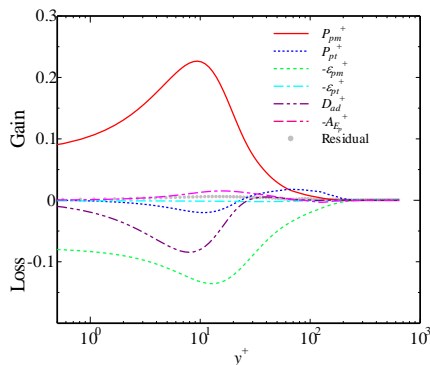


図5 平均弾性ポテンシャル収支

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5件)

1. Shinji TAMANO, Yota OHASHI, and Yohei MORINISHI, Dynamics of falling droplet and elongational properties of dilute nonionic surfactant solutions with drag-reducing ability, *Physics of Fluids*, Vol. 29, No. 053104, 2017. 5, pp. 1-12. (審査有り)
2. Shinji TAMANO, Shunsuke KATSURAGAWA,

Daiki YAMAMOTO, Toru YAMADA, and Yohei MORINISHI, Very large-scale coherent structures in highly drag-reducing boundary layer flow due to surfactant injection, *Proceedings of the Ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Okinawa, Japan, 28-30 October, 2017. 10, pp. 1-2. (審査有り)

3. Yasushi YAMAMOTO, Takashi ARAI, Takashi TOMITA, Zameer SHERVANI, Akihiro YOSHINO, Keihiro TAGA, Shinji TAMANO, Motoyuki ITOH, Yoshitaka TAGUCHI, Physical properties in aqueous solutions for a series of alkyltrimethylammonium salicylates (C12TA-Sal through C16TA-Sal): From a view point of drag reduction, *Soft Nanoscience Letters*, Vol. 6, 2016. 10, pp. 45-55. (審査有り)

4. Shinji TAMANO, Hiroki UCHIKAWA, Shunsuke KATSURAGAWA, Yohei MORINISHI, and Toru YAMADA, Turbulence structures at maximum drag reduction in boundary layer flow with surfactant injection, *Proceedings of the XVIIth International Congress on Rheology 2016*, Kyoto, Japan, 8-13 August, 2016. 8, pp. 1-2. (審査有り)

5. Shinji TAMANO, Jun ITO, Hiroki UCHIKAWA, and Yohei MORINISHI, Turbulence Statistics of Turbulent Boundary Layer Flow Following Injection of Drag-Reducing Surfactant Solution, *Proceedings of the fifteenth European Turbulence International Symposium of Turbulence Conference*, Delft, The Netherlands, 25-28 August, 2015. 8, pp. 1-2. (審査有り)

[学会発表] (計13件)

1. 柳田貴大, 玉野真司, 森西洋平, 山田格, 粘弾性流体の抵抗低減乱流境界層流れにおけるエネルギー収支, 日本機械学会東海支部第67期総会講演会, (2018. 3. 13-14), 名古屋大学, pp. 1-2.

2. Shinji TAMANO, Shunsuke KATSURAGAWA, Daiki YAMAMOTO, Toru YAMADA, and Yohei MORINISHI, Very large-scale coherent structures in highly drag-reducing boundary layer flow due to surfactant injection, *The ninth JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, Okinawa, Japan, 28-30 October, 2017.

3. 渡部拓, 玉野真司, 山田格, 森西洋平, 多賀圭次郎, エチレングリコール水溶液における非イオン性界面活性剤添加による抵抗低減効果の溶液温度依存性, 第65回レオロジー討論会, (2017. 10. 17-19), 朱鷺メッセ,

pp. 1-2.

4. 浜中駿, 玉野真司, 森西洋平, 山田格, Shear-banding 特性を有する希薄溶液の構成方程式モデルの構築とその評価, 第65回レオロジー討論会, (2017.10.17-19), 朱鷺メッセ, pp. 1-2.

5. 玉野真司, 界面活性剤を用いた流れの抵抗低減, 第40回名古屋駅前イノベーションハブ技術シーズ発表会, 愛知県産業労働センター, (2017.6.2), (依頼講演)

6. 名倉祥平, 大脇健太, 玉野真司, 山田格, 森西洋平, 界面活性剤水溶液の抵抗低減効果における温度依存性, 日本機械学会東海支部第66期総会講演会, (2017.3.15-16), 静岡大学, pp. 1-2.

7. 米川航平, 玉野真司, 山田格, 森西洋平, 非イオン性界面活性剤の抵抗低減効果におけるEG水溶液濃度依存性, 第14回日本流体力学会中部支部講演会, (2016.12.2-3), 下呂温泉 温泉旅館会館, p.1.

8. 桂川駿典, 玉野真司, 山田格, 森西洋平, 界面活性剤注入による抵抗低減乱流境界層流れにおける大規模乱流構造のPIV計測, 日本機械学会第94期流体工学部門講演会, 山口大学, (2016.11.12-13), No. 0318, pp.1-2.

9. Shinji TAMANO, Hiroki UCHIKAWA, Shunsuke KATSURAGAWA, Yohei MORINISHI, and Toru YAMADA, Turbulence structures at maximum drag reduction in boundary layer flow with surfactant injection, The XVIIth International Congress on Rheology 2016, Kyoto, Japan, 8-13 August, 2016.

10. 玉野真司, 希薄界面活性剤水溶液のレオロジー特性と乱流抵抗低減効果, 機能創成セミナー, 大阪大学, (2016.6.10), (依頼講演)

11. 浜中駿, 玉野真司, 山田格, 森西洋平, 希薄界面活性剤水溶液の構成方程式モデルの構築とそのレオロジー特性の評価, 日本レオロジー学会第43年会, (2016.5.11-12), pp. 27-28.

12. 内川裕貴, 玉野真司, 森西洋平, 界面活性剤注入による乱流境界層流れの最大抵抗低減に関する実験的研究, 日本機械学会第93期流体工学部門講演会, 東京理科大, (2015.11.7-8), No. 0608, pp.1-2.

13. Shinji TAMANO, Jun ITO, Hiroki UCHIKAWA, and Yohei MORINISHI, Turbulence Statistics of Turbulent Boundary Layer Flow Following Injection of Drag-Reducing Surfactant Solution, The fifteenth

European Turbulence International Symposium of Turbulence Conference, Delft, The Netherlands, 25-28 August, 2015.

[その他]
ホームページ等
<http://tamano.web.nitech.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

玉野 真司 (TAMANO, Shinji)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40345947

(2) 研究分担者

森西 洋平 (MORINISHI, Yohei)
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 40222351