

粘弾性流体の流動性および濃度変化を伴う 抵抗低減乱流境界層流れの DNS

DNS of drag-reducing turbulent boundary layer flows with variations in fluidity and concentration of viscoelastic fluids

- 杉浦 諒哉, 名工大院生, 〒 466-8555 愛知県名古屋市中区昭和区御器所町, E-mail : cls13098@stn.nitech.ac.jp
 玉野 真司, 名工大院, 〒 466-8555 愛知県名古屋市中区昭和区御器所町, E-mail : tamano.shinji@nitech.ac.jp
 山田 格, 名工大院, 〒 466-8555 愛知県名古屋市中区昭和区御器所町, E-mail : yamada.toru@nitech.ac.jp
 森西洋平, 名工大院, 〒 466-8555 愛知県名古屋市中区昭和区御器所町, E-mail : morinishi.yohei@nitech.ac.jp

Junya SUIGURA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Syowa, Nagoya, Aichi,
 Shinji TAMANO, Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Syowa, Nagoya, Aichi,
 Toru YAMADA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Syowa, Nagoya, Aichi,
 Yohei MORINISHI, Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Syowa, Nagoya, Aichi,

We performed direct numerical simulations of turbulent boundary layer flows of viscoelastic fluids by using constitutive equation models based on the FENE-P model which take into account either concentration variation or fluidity variation (we call them the “*c*-FENE-P” and the “*f*-FENE-P” models, respectively). For the *c*-FENE-P model, the initial and boundary conditions were set such that the additives were injected from the wall surface. The *f*-FENE-P model can express complex rheological properties such as shear-thinning and shear-thickening. We compared various turbulence statistics for the FENE-P, *c*-FENE-P, and *f*-FENE-P models at the Reynolds number $Re_{\theta_0} = 670$ and the Weissenberg number $Wi = 50$.

1. 緒言

希薄高分子溶液や界面活性剤水溶液に代表される粘弾性流体では、高分子構造やミセル構造により渦構造が抑制されることで、流動抵抗低減効果が得られることが知られている。これらの粘弾性流体の抵抗低減流れに関しては、近年実験的研究に加えて、抵抗低減乱流の DNS (Direct Numerical Simulation, 直接数値計算) による数値的研究が行われるようになってきた。数値計算を行う際に必要となる、高分子溶液のレオロジー特性を表現可能なモデル方程式は多数存在するが、界面活性剤水溶液に特有な shear-thickening 特性や shear-thinning 特性、有限の伸長粘度特性の全てを同時に再現することができるモデルはほとんどない。また、従来の抵抗低減乱流境界層流れの数値計算の多くが一様濃度を仮定しており⁽¹⁾、濃度の非一様性を考慮したものは Dimitropoulos らの LES⁽²⁾ 以外には見当たらない。一方、著者らは実験的研究⁽³⁾により、濃度が一様な場合と非一様な場合とでは、抵抗低減率の流れ方向変化が大きく異なることを報告している。

以上より本研究では、乱流境界層流れにおいて界面活性剤水溶液の注入による抵抗低減効果の発現と維持のメカニズムを明らかにすることを目的とし、その第一段階として、界面活性剤水溶液のレオロジー特性が表現できる構成方程式モデル (*f*-FENE-P モデル) と、粘弾性流体の濃度の非一様性を表現できる構成方程式モデル (*c*-FENE-P モデル) の乱流境界層流れの DNS を行う。 *f*-FENE-P モデルの場合は粘度の逆数で定義される流動性が、 *c*-FENE-P モデルの場合は濃度の数密度がそれぞれ FENE-P モデルとカップリングされる。両モデルおよび FENE-P モデルにおける各種乱流統計量を比較することで、FENE-P モデルの拡張の可能性を検討した。

2. 数値計算手法

2.1 非圧縮性流体の支配方程式

非圧縮性流体の支配方程式として連続の式および運動方程式を用いる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\beta}{Re_{\theta_0}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{(1-\beta)}{Re_{\theta_0}} \frac{\partial E_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで u_i , p , E_{ij} はそれぞれ、速度成分、圧力、粘弾性応力成分である。また β はせん断粘度比 $\beta (= \eta_N / (\eta_N + \eta_{p0}))$ である (η_N は溶媒のせん断粘度、 η_{p0} は溶質のゼロせん断粘度)。式 (2) 中のレイノルズ数 Re_{θ_0} は次式で定義される。

$$Re_{\theta_0} = \frac{\rho U_e \theta_0}{\eta_0} \quad (3)$$

ここで、 ρ , U_e , θ_0 , および η_0 はそれぞれ、密度、一様流速、ドライバ部流入面での運動量厚さ、および溶液のゼロせん断粘度である。本数値計算では、ドライバ部においてニュートン流体の十分に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⁽¹⁾。

2.2 濃度変化を考慮した構成方程式モデル (*c*-FENE-P model)

粘弾性流体の濃度変化の影響を考慮した FENE-P モデル⁽²⁾ (ここでは、*c*-FENE-P model と呼ぶ) について説明する。次に示す conformation テンソル C_{ij} の方程式を

Tab. 1: Computational conditions

	Newtonian	FENE-P	c-FENE-P	f-FENE-P
Re_{θ_0}	670			
Sc	1	—	1	—
Wi	—	50		
R_{bu}, R_{bd}, Sv	—			0.1, 0.1, 0.1
$L_x \times L_y \times L_z$	300 $\theta_0 \times 30\theta_0 \times 20\pi\theta_0/3$			
$N_x \times N_y \times N_z$	384 \times 64 \times 64			

解くことにより、粘弾性応力場が得られる。

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_{ij}}{\partial x_k} - \frac{\partial u_i}{\partial x_k} C_{kj} - \frac{\partial u_j}{\partial x_k} C_{ik} + nE_{ij} = 0 \quad (4)$$

粘弾性応力 E_{ij} と C_{ij} の関係は次式で表される。

$$E_{ij} = \frac{1}{Wi} (fC_{ij} - \delta_{ij}) \quad (5)$$

ここで、 $f(= L^2/(L^2 - C_{ii}))$ は Peterlin 関数、 $Wi(= \lambda U_e/\theta_0)$ はワイゼンベルグ数である。また、 λ , L , δ_{ij} , n はそれぞれ緩和時間、ポリマーの最大伸長粘度、クロネッカーのデルタ、溶液中の添加剤 (高分子または界面活性剤ミセル) の数密度 (濃度) である。 n の支配方程式は次式で表される (2)。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + u_j \frac{\partial n}{\partial x_j} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 n}{\partial x_j \partial x_j} \quad (6)$$

上式中のペクレ数 $Pe(= U_e/D = Re_{\theta_0} Sc)$ は移流と拡散の比を表す無次元数である。また、 D は拡散係数、 $Sc(= \eta_0/\rho D)$ はシュミット数である。また壁面からの流体注入を模擬するために、メイン部流入面に次式で表される数密度 n の初期条件 (2) を課す。

$$n|_{\text{inlet}} = e^{-y^2/(\theta_{in}^2/3)} \quad (7)$$

ここで θ_{in} はメイン部流入面での運動量厚さである。

2.3 流動性変化を考慮した構成方程式モデル (f -FENE-P model)

粘弾性流体の流動性変化の影響を考慮した構成方程式モデル (ここでは、 f -FENE-P モデルと呼ぶ) について説明する。本モデルは当研究室で提案中のモデルであり、既存の FENE-P モデルと流動性の方程式 (4) をカップリングしたものである。次に示す conformation テンソル C_{ij} の方程式を解くことにより、粘弾性応力場が得られる。

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial t} + u_j \frac{\partial C_{ij}}{\partial x_k} - \frac{\partial u_i}{\partial x_k} C_{kj} - \frac{\partial u_j}{\partial x_k} C_{ik} - \left(\frac{Wi}{f} \frac{D\phi}{Dt} - \phi \right) E_{ij} = 0 \quad (8)$$

粘弾性応力 E_{ij} と C_{ij} の関係は次式で表される。

$$E_{ij} = \frac{1}{Wi\phi} (fC_{ij} - \delta_{ij}) \quad (9)$$

ここで $\phi(= 1/\eta_p)$ は溶質のせん断粘度の逆数として定義される流動性である。 ϕ の支配方程式は次式で表される。

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{1}{R_{bu}} (1 - \phi) + R_{bd} Wi (Sv - \phi) E_{ij} D_{ij} \quad (10)$$

ここで D_{ij} は変形速度テンソルである。また各無次元パラメータは $R_{bu}(= \lambda_{bu}/\lambda)$, $R_{bd}(= \lambda_{bd}/\lambda)$, および $Sv(= \phi_{\infty}/\phi_0)$ である。ここで λ_{bu} , λ_{bd} , ϕ_{∞} , ϕ_0 はそれぞれ build up 緩和時間, break down 緩和時間, 変形速度無限大における流動性, ゼロ変形速度における流動性である。

2.4 計算手法

空間離散化手法として、スタガード格子系における 2 次精度中心差分法を用いる。ただし構成方程式 (4) の対流項については 2 次精度風上差分法を用いた。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る。本計算手法の詳細については文献 (1) を参照されたい。

2.5 計算条件

Tab.1 に本計算の無次元パラメータならびにメイン部の計算領域と格子数を示す。

3. 結果

3.1 濃度コンター

Fig. 1 および 2 にそれぞれ、流体注入開始から無次元時間 $tU_e/\theta_0 = 500$ 後における Newton 流体および粘弾性流体の主流 - 壁面垂直方向 ($x - y$) 断面の瞬時濃度コンター図を示す。Newton 流体では乱流拡散によって濃度が上流から下流に向かい減少する様子が確認できる。一方、粘弾性流体については、 $0 < x/\theta_0 \leq 70$ の上流域では水流と同様の乱流拡散の影響が見られ、それよりも下流ではシート状の構造が形成される。

3.2 平均濃度分布

Fig. 3 および 4 にそれぞれ Newton 流体および粘弾性流体の平均濃度 n_{avg} の壁面垂直方向 (y 方向) 分布を示す。横軸は各流れ方向位置 (x/θ_0) における境界層厚さ δ により正規化されている。Newton 流体と比較し、粘弾性流体では全ての主流方向位置で壁面近傍からの濃度の拡散が抑えられている。このことは Dimitropoulos ら (2) の結果とも整合している。粘弾性流体では下流に向かうにつれて平均濃度分布の流れ方向変化が小さくなり、 $x/\theta_0 \geq 100$ においては主流方向位置に依らずほぼ変化しなくなる。これは、FENE-P モデルの抵抗低減効果の発現により壁面垂直方向速度変動が抑えられるためと考えられる。

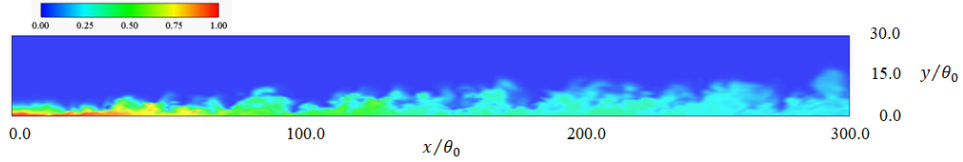


Fig. 1: Concentration contour for Newtonian fluid

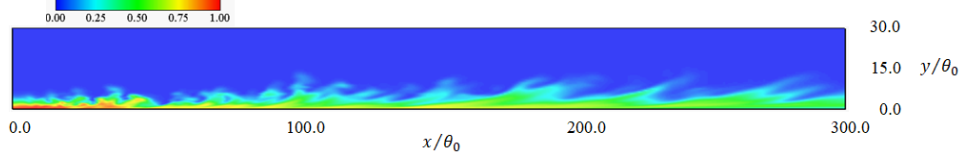


Fig. 2: Concentration contour for viscoelastic fluid (*c*-FENE-P)

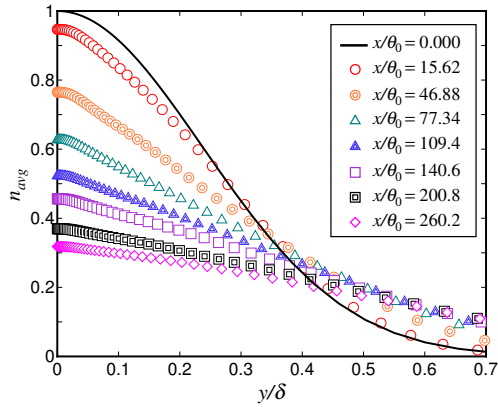


Fig. 3: Mean concentration profile for Newtonian fluid

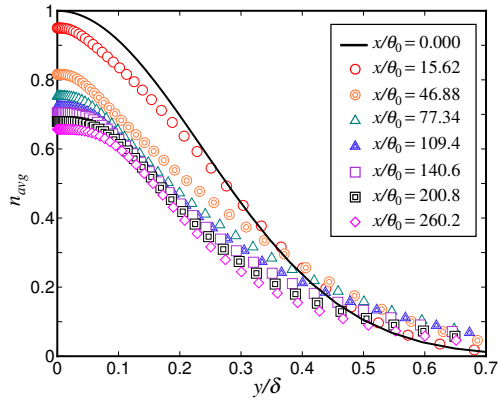


Fig. 4: Mean concentration profile for viscoelastic fluid (*c*-FENE-P)

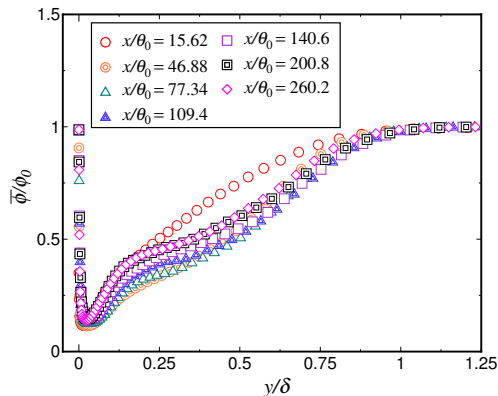


Fig. 5: Mean fluidity profile for *f*-FENE-P

3.3 平均流動性分布

Fig. 5 に *f*-FENE-P モデルにおける平均流動性 $\bar{\phi}/\phi_0$ の壁面垂直方向分布を示す。主流方向位置に依らず、せん断速度が大きい壁面近傍では $\bar{\phi}/\phi_0$ は 1 よりかなり小さく、境界層外縁(ゼロせん断速度域)に向かい 1 に近づく。また、各主流方向位置で比較すると、流入面最近傍である $x/\theta_0 = 15.62$ を除いて $0.125 \leq y/\delta \leq 1$ における差異はわずかである。

3.4 抵抗低減率

Fig. 6 に各モデルによる抵抗低減率 %DR の主流方向分布を示す。抵抗低減率は次式によって定義される。

$$\%DR = \frac{C_{f\text{Newtonian}} - C_{f\text{viscoelastic}}}{C_{f\text{Newtonian}}} \times 100 \quad (11)$$

ここで C_f は壁面摩擦係数であり、以下のように定義される。

$$C_f = 2 \left(\frac{u_\tau}{U_e} \right)^2 \quad (12)$$

ここで u_τ は摩擦速度である。FENE-P モデルと比較して、濃度変化を考慮した *c*-FENE-P モデルでは抵抗低減率の発現位置が下流側へとシフトし、得られる抵抗低減効果が FENE-P モデルよりも小さい。一方、流動性変化を考慮した *f*-FENE-P では抵抗低減効果の発現位置が上流側へとシフトしており、FENE-P モデルとは異なり抵抗増加 (%DR < 0) の領域がほとんど見られない。

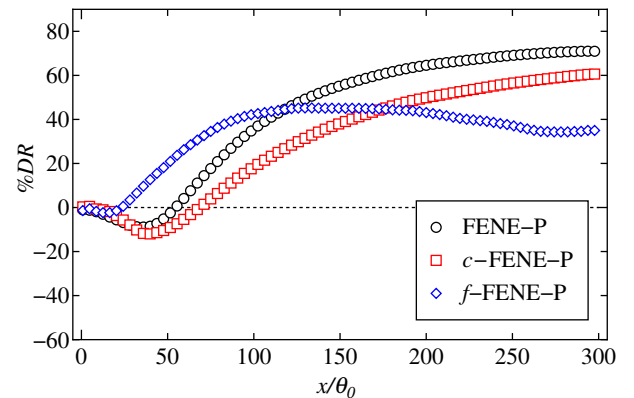


Fig. 6: Streamwise variation of drag reduction ratio

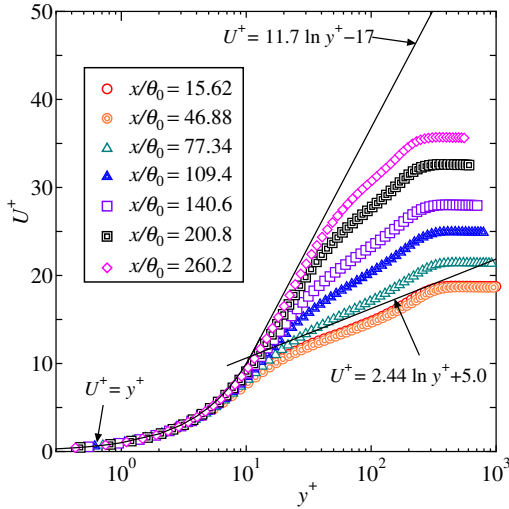


Fig. 7: Mean velocity profile for FENE-P

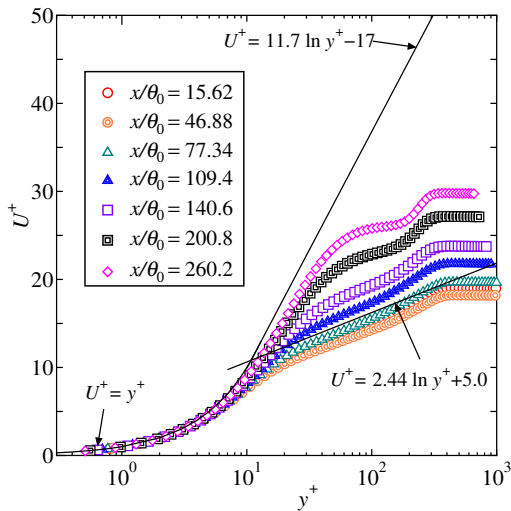


Fig. 8: Mean velocity profile for *c*-FENE-P

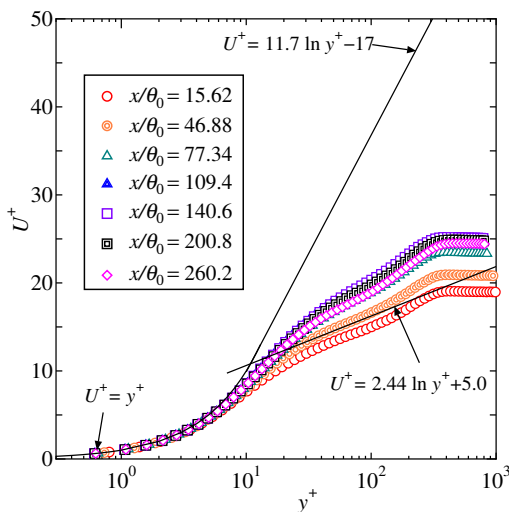


Fig. 9: Mean velocity profile for *f*-FENE-P

3.5 平均速度分布

Fig. 7, 8, および 9 に FENE-P, *c*-FENE-P, および *f*-FENE-P における内層スケールで正規化された平均速度分布をそれぞれ示す. FENE-P モデルと比較して, 濃度変化を考慮した *c*-FENE-P モデルでは下流における速度上昇幅は小さく, $x/\theta_0 = 140.6$ よりも下流の速度分布の挙動が FENE-P のものとは異なる. これは濃度のシート状構造による影響であると推察される. 一方, 流動性を考慮した *f*-FENE-P モデルについては, FENE-P のものよりも下流における速度上昇がかなり小さい.

4. 結言

FENE-P モデルをベースとして, 流動性変化を考慮した *f*-FENE-P モデルおよび濃度変化を考慮した *c*-FENE-P モデルを用いた粘弾性流体の乱流境界層流れの直接数値計算 (DNS) を行い, 以下の知見を得た.

- Newton 流体に比べて粘弾性流体の場合には, 平均濃度の壁面垂直方向への拡散が抑えられる. また, 下流域において濃度のシート状構造が形成される.
- *f*-FENE-P モデルにおいて平均流動性分布の流れ方向位置による差はわずかである.
- 抵抗低減率の流れ方向変化を FENE-P モデルと比較すると, 濃度変化を考慮することにより, 抵抗低減効果の発現位置がより下流側へとシフトし (*c*-FENE-P モデル), 流動性変化を考慮することにより, より上流側へとシフトする (*f*-FENE-P モデル).

5. 謝辞

本研究は, JSPS 科研費 JP15H03918 の補助を受けている. ここに記して感謝の意を表す.

参考文献

- (1) Tamano, S., Graham, M. D., and Morinishi, Y., "Streamwise variation of turbulent dynamics in boundary layer flow of drag-reducing fluid," *J. Fluid Mech.*, (2011), **686**, 352-377.
- (2) Dimitropoulos, C. D., Dubief, Y., Shaqfeh, E. S. G., and Moin, P., "Direct numerical simulation of polymer-induced drag reduction in turbulent boundary layer flow of inhomogenous polymer solutions," *J. Fluid Mech.*, (2006), **566**, 153-162.
- (3) Tamano, S., Kitao, T., and Morinishi, Y., "Turbulent drag reduction of boundary layer flow with non-ionic surfactant injection," *J. Fluid Mech.*, (2014), **749**, 367-403.
- (4) Bautista, F., de Santos, J. M., Puig, J. E., Manero, O., "Understanding thixotropic and anti-thixotropic behavior of viscoelastic micellar solutions and liquid crystalline dispersions. I. The model," *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, (1999), **80**, 93-113.