

離散要素モデルが粘弾性流体の伸張変形に与える影響

Effect of Discrete Element Model on Elongational Deformation in Viscoelastic Fluid Flow

- 藤村将成, 東京農工大学大学院, 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail : 50014833010@st.tuat.ac.jp
- 守裕也, 東京理科大学, 東京都葛飾区新宿 6-3-1, E-mail : mamori@rs.tus.ac.jp
- 岩本薫, 東京農工大学, 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail : iwamotok@cc.tuat.ac.jp
- 村田章, 東京農工大学, 東京都小金井市中町 2-24-16, E-mail : murata@mmlab.mech.tuat.ac.jp
- 増田光俊, 産業技術総合研究所, 茨城県つくば市東 1-1-1, E-mail : m-masuda@aist.go.jp
- 安藤裕友, 海上技術安全研究所, 東京都三鷹市新川 6-38-1, E-mail : ando@nmri.go.jp

Masanari Fujimura, Tokyo Univ. of Agri. and Tech., 2-24-16 Nakamachi, Koganei-shi, Tokyo
 Hiroya Mamori, Tokyo Univ. of Sci., 6-3-1 Nijuku, Katsushika-ku, Tokyo
 Kaoru Iwamoto, Tokyo Univ. of Agri. and Tech., 2-24-16 Nakamachi, Koganei-shi, Tokyo
 Akira Murata, Tokyo Univ. of Agri. and Tech., 2-24-16 Nakamachi, Koganei-shi, Tokyo
 Mitsutoshi Masuda, Natl. Inst. of Adv. Ind. Sci. and Tech., 1-1-1 Higashi, Tsukuba-shi, Ibaraki
 Hirotomo Ando, Natl. Maritime Res. Inst., 6-38-1 Shinkawa, Mitaka-shi, Tokyo

Friction drag in wall turbulence is known to decrease due to additive of small amount of high-molecular polymer. We performed a numerical simulation of a turbulent channel flow including discrete element models. The discrete element model consists of some beads linked by non-linear springs. In turbulent flows, the discrete element model can expand and increase the elongation viscosity. In the present study, the elongational deformation of fluid is divided into uniaxial and biaxial elongations and the relationships between the elongational deformations and the models are investigated. Our results show that polymer models in the biaxial elongation area largely elongate and weaken the turbulence.

1. 緒言

ポリマー添加による乱流摩擦抵抗の低減は Toms 効果⁽¹⁾として広く知られ, パイプライン, 空調システム, 船底塗料といった様々な工業分野で応用されている. しかしながら, 抵抗低減メカニズムの物理的説明は未だ不十分であり, 多くの研究がなされている. 提案されている抵抗低減メカニズムの一つに粘性理論⁽²⁾がある. 高分子ポリマーはコイル構造となっており, ブラウン動力学法を用いた計算⁽³⁾により乱流中ではポリマーは伸張することが明らかになっている. 粘性理論は, ポリマーの伸張に伴って増加した伸張粘度の効果によって, 緩和層が厚くなり, 抵抗低減効果が発現するとしている.

粘性理論をもとに伸張粘度の効果に関する研究が多く行われており, Angelis ら⁽⁴⁾はチャンネル壁から線形増加する粘度を人工的に乱流に与え, 基礎的な統計量を算出した. その結果, 壁から緩和層までの領域において, 緩和層厚さの増加や乱れの非等方化といったポリマー添加による抵抗低減乱流の傾向を示すことがわかった.

Toonder ら⁽⁵⁾は流体が伸張変形する領域を特定し, その領域に局所的に粘度を与えることで抵抗低減効果が発現するかを検証した. 流体の伸張変形は伸びパラメータ R によって 2 種類に分類される.

$$R = 3 \frac{III_D}{II_D} = 6 \frac{\det D}{tr D^2}, \quad (1)$$

伸びパラメータ R は変形速度テンソルの第二不変量に対する第三不変量の比であり, それぞれずれ運動と伸張運動の強さを示す. したがって, 伸びパラメータ R の絶対値が大きな領域は伸張運動が相対的に強く, その値が負の場合は図 1 のように流体の微小部分が 2 軸伸張し, 正の場合は 1 軸伸張する. Toonder ら⁽⁵⁾は強い 2 軸伸張領域に人工的に粘度を与えると抵抗低減効果が得られることを確認した. また Terrapon ら⁽⁶⁾は流体に追従する FENE (Finitely Extensible Non-linear Elastic) モデルをラグランジュ的に解析した. 彼らの計算は流体からモデルへの一方向の作用 (one way) しか考慮されていない

ことに注意する必要があるが, ラグランジュ的に解析することでモデル一つ一つの運動を追うことができる. 解析結果から, 流体の 2 軸伸張運動によるモデルの伸張が確認され, 2 軸伸張とポリマーの関係が抵抗低減乱流において重要な役割を担っていることが示唆された.

本研究では Terrapon ら⁽⁶⁾の計算とは異なり, 流体とポリマー間の相互作用 (two way) を考慮した離散要素モデルを用い, 摩擦抵抗低減乱流の数値計算を行う. そして, 伸張領域におけるポリマー運動をより詳細に調査することを目的とする.

2. 計算方法

本研究では図 2 に示すビーズスプリング鎖モデルを用いる. Atsumi ら⁽⁷⁾によって報告されたように, 乱流中ではポリマー分子が絡み合うことで目視できる程の集合体を形成し, それらが抵抗低減効果に大きく寄与するとされている. 本モデルはビーズを多連結することで, そのようなポリマー集合体を模擬している. e 番目のビー

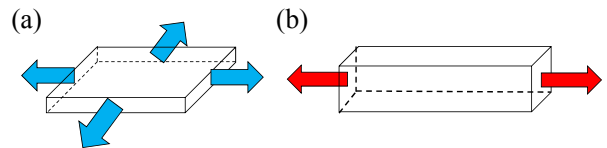


Fig. 1: Elongation deformation; (a) biaxial, (b) uniaxial elongation.

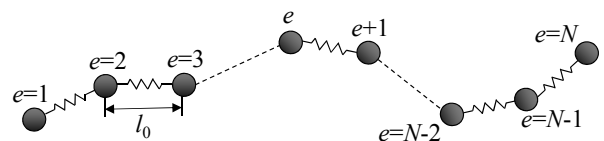


Fig. 2: Bead-spring chain model.

ズの運動方程式は式 (2) となる.

$$m \frac{dv_{e,i}}{dt} = f_{e,i} + T_{e,i}. \quad (2)$$

ここで m はビーズの質量, t は時間, $f_{e,i}$ は流体との相互作用であるストークス抵抗, $T_{e,i}$ は弾性力である. また, 下付の $i(=1...3)$ はそれぞれ主流方向, 壁垂直方向, スパン方向を示す. ストークス抵抗は式 3 のように e 番目のビーズの速度 v_e とそのビーズの位置での流体速度 u_e の差から計算される.

$$f_{e,i} = -6\pi\mu r(v_{e,i} - u_{e,i}), \quad (3)$$

ここで μ は流体の粘性, r はビーズ半径である. 弾性力を表現するばねは非線形であり, 最大伸びは自然長の 2 倍とする.

本研究ではモデルをチャンネル乱流に添加する. 流体の支配方程式は非圧縮の連続の式と Navier-Stokes 方程式である. Navier-Stokes 方程式にはモデルとの相互作用の項が体積力として付加されている. 主流, スパン方向は等間隔格子, 壁垂直方向は壁面近傍で格子を密にした不等間隔格子を設定する. 流体の境界条件は, 壁面上では滑りなし条件, 流れ方向とスパン方向には周期境界条件とした. また, 離散要素モデルの境界条件は, 壁面では弾性反射条件, 流れ方向とスパン方向には周期境界条件とした.

主流方向の平均圧力勾配は一定とし, チャンネルの半幅 δ と壁面摩擦速度 $u_{\tau 0}$, ニュートン流体の動粘度 μ で定義されるレイノルズ数は $Re_{\tau 0}=180$ とした. モデルのパラメータはビーズ半径 r^+ , ばねの自然長 l_0^+ , モデルの自然全長 L_0^+ , ばね定数 k^+ である. ビーズ半径はストークス近似の条件である流体とビーズの速度差, ビーズ半径, 流体の動粘度から求められる相対レイノルズ数が 1 以下になるよう決められる. 本研究ではビーズ半径 r^+ を 0.08 とする. 歌田ら⁽⁸⁾ はばねの自然長 l_0^+ が 4 以下であると, 抵抗低減率はばねの自然長に依存しないと示したことから, 本研究ではばねの自然長 l_0^+ を 2 とする. モデルの自然全長 L_0^+ は 64, ばね定数 k^+ を 7 とした. 本計算条件では, ニュートン流体へのモデルの添加によって, 抵抗低減率 12% が得られる.

3. 結果

本研究ではポリマーと伸張領域との関係を明確にするため, 伸張運動が強い領域にのみ注目する. 伸びパラメータ $R^* < -40$ で抽出された領域を 2 軸伸張領域とし, $R^* > 40$ を 1 軸伸張領域とする. これらの領域に存在するモデルを抽出し, モデルの伸び率とストークス抵抗を算出した. 図 3 にモデルの自然長からの伸び E^+ の分布を示す. 比較のために添加した全モデルの平均も示す. モデルは伸張領域で大きく伸張する. また, 2 軸伸張領域内のモデルは 1 軸伸張領域よりも大きく伸張しており, Terrapon ら⁽⁶⁾ の結果と一致する.

図 4 は主流方向のストークス抵抗力の分布である. Toonder ら⁽⁵⁾ は 2 軸伸張領域への粘度の付加によって抵抗低減効果を得たが, モデルを添加した抵抗低減乱流でも強い粘度が 2 軸領域でも確認された.

なぜ 1 軸伸張領域よりも 2 軸伸張領域において, モデルの大きな伸びと相互作用が得られるのかを明らかにするために, 伸張方向とポリマーのなす角を調査した. ここで角度 θ と ϕ を定義する. 1 軸伸張時は 1 方向にのみ伸張するが, その伸張方向とモデルのなす角を θ とする. 一方, 2 軸伸張では圧縮性の伸びであるため, 伸張面とモデルのなす角を ϕ とする. 図 5 に θ と ϕ の分布を示す. なす角 ϕ が θ よりも小さいことがわかる. 2 軸伸張領域はモデルの配向に近い方向に伸張するため, モデルの伸びとストークス抵抗が大きくなったと考えられる.

4. 結言

流体と相互作用を持つ離散要素モデルをチャンネル乱流に混入し, ポリマー添加による抵抗低減乱流の数値計算を行った. 流体の伸張運動を 1 軸と 2 軸伸張の 2 つに分類し, それら領域内のモデルを解析した. モデルの配向は 1 軸伸張よりも 2 軸伸張の伸張方向と近くなるため, 特に 2 軸伸張領域においてモデルが大きく伸張し, 流体と強い相互作用を働くことがわかった.

参考文献

- (1) Toms, 1st Int. Cong. Rheol., 2 (1948) 135-141.
- (2) Lumley, Macromol. Rev., 7 (1973) 263-290.
- (3) Jin and Collins, New J. Phys., 9 (2007).
- (4) Angelis *et al.*, Rhys. Rev. E, 7 (2004).
- (5) Toonder *et al.*, Appl. Sci. Res., 54 (1995) 95-123.
- (6) Terrapon *et al.*, J. Fluid Mech., 504 (2004) 61-71.
- (7) Atsumi *et al.*, 8th Int. Symp. Turbulence, Heat and Mass Transfer, (2015).
- (8) 歌田ら, 機論 B 編, 79 (2013), 1937-1950.

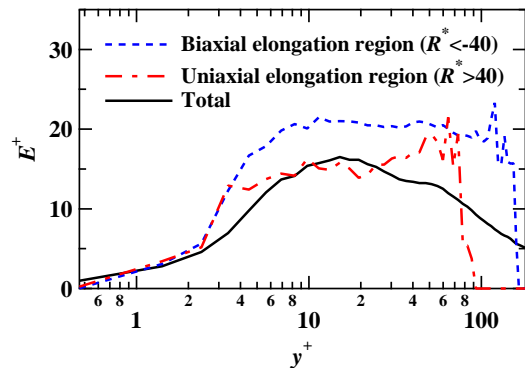


Fig. 3: Elongation rate.

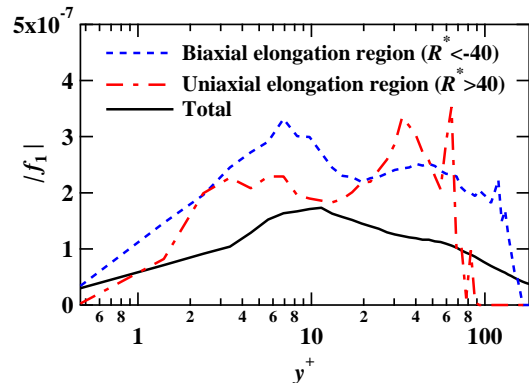


Fig. 4: Stokes resistance.

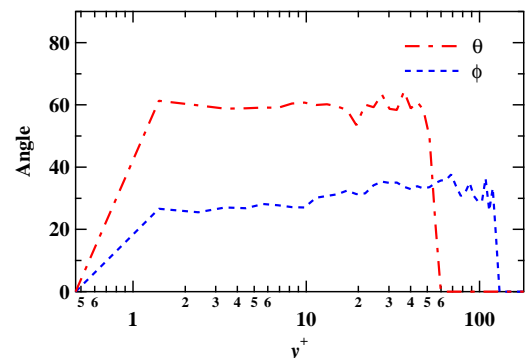


Fig. 5: Angle θ and ϕ .