粘弾性流体の抵抗低減壁乱流に関する直接数値シミュレーション

Direct Numerical Simulation of Drag-Reducing Wall-Bounded Turbulent Flow of Viscoelastic Fluid

○ 堀田慎太郎 (名工大院生) 正 玉野真司 (名工大院)
正 伊藤基之 (名工大院) 正 横田和彦 (名工大院)

Shintaro HOTTA, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, 466-8555

Shinji TAMANO, Nagoya Institute of Technology

Motoyuki ITOH, Nagoya Institute of Technology

Kazuhiko YOKOTA, Nagoya Institute of Technology

Key Words: Drag Reduction, Viscoelastic Fluid, Turbulent Flow, Boundary Layer, DNS,
Constitutive Equation, Oldroyd-B Model, Giesekus Model, FENE-P Model

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は高い抵抗低減効果を示すことが知られている。粘弾性流体の抵抗低減チャンネル乱流に関してはこれまでに数多くの直接数値シミュレーション (DNS) が行われている^{(1)~(5)}。しかしながら、抵抗低減乱流境界層の DNS^{(6)~(8)} については、抵抗低減チャンネル乱流の DNS に比べると非常に少ない。

これまでの数値的研究^{(3)~(8)}により、高い抵抗低減率を得るには高い伸長粘度特性が重要となることが明らかにされている。そこで本研究では、伸長粘度特性を等しくすることで他のレオロジー特性の相違による抵抗低減への影響を明らかにすることを目的とする。構成方程式モデルとして異なるレオロジー特性を有する Oldroyd-B モデル, Giesekus モデル, および FENE-P モデルを用いて、ゼロ圧力勾配下における粘弾性流体の抵抗低減乱流境界層の DNS を実行する。

2 計算手法および条件 乱流境界層の数値計算手法として Lund ら⁽⁹⁾により提案された流入条件生成手法を用いる。空間的離散化手法として、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。時間進行法として、2次精度の Crank-Nicolson 法と3次精度の Runge-Kutta 法の混合手法を用いる。

本論文では、ニュートン流体、ならびに Oldroyd-B モデル, Giesekus モデル, および FENE-P モデルで表される粘弾性流体の数値計算例を示す。レイノルズ数 $Re_{\theta_0} = \rho U_e \theta_0 / \eta_0 = 500$ 、ワイゼンベルグ数 $We = \lambda U_e / \theta_0 = 25$ 、計算領域 ($200\theta_0, 30\theta_0, 20\pi\theta_0/3$)、格子数 (256, 64, 64) である。ここで、 θ_0 , λ , U_e , ρ , および η_0 はそれぞれ、ドライバ部入口における運動量厚さ、緩和時間、主流速度、密度、およびゼロせん断粘度である。溶液のゼロせん断粘度に対する溶媒のせん断粘度の比 β は 0.9 とした。また、Giesekus モデルのモビリティ係数 α と FENE-P モデルの最大伸長 L は、 $L^2 = 1/\alpha$ の関係を満たすとき最大伸長粘度が等しくなる⁽³⁾。本研究では、 $\alpha = 0.01, 0.001, 0.0001$, $L^2 = 100, 1000, 10000$ とした。

3 計算結果 抵抗低減率 %DR の主流方向変化を図??に示す。

Oldroyd-B の場合の最大抵抗低減率は %DR = 42 である。一方、Giesekus モデルの場合にはモビリティ係数 α が小さくなるほど抵抗低減率が大きくなり、 $\alpha = 0.0001$ で最大 %DR = 45 となる。FENE-P モデルについては L^2 が大きくなるに伴い抵抗低減率が大きくなる。これらの計算結果より、伸長粘度が高いほど高い抵抗低減効果が得られることが分かる。また、同伸長特性を持つ場合を比較すると Giesekus モデルの方が FENE-P モデルより高い抵抗低減効果を示すことから、shear-thinning 特性や第二法線応力差係数も抵抗低減効果に影響を与えられ。

Fig. 1: Streamwise variation in drag reduction ratio

なお、FENE-P モデルについては定常な流れ場を得るのにまだ十分な計算時間が得られておらず、現在計算途中である。

謝辞

本数値計算の一部は統計数理研究所の Altix3300 と SR11000 を使用した。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1) Sureshkumar R., Beris A. N., and Handler R. A., *Phys. Fluids*, **9**, (1997), 743-755.
- (2) Min T., Yoo J. Y., Choi H., and Joseph D. D., *J. Fluid Mech.*, **486**, (2003), 213-238.
- (3) Housiadas K. D. and Beris A. N., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **122**, (2004), 243-262.
- (4) Li C.F., Sureshkumar R., and Khomami B., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **140**, (2006), 23-40.
- (5) Yu B. and Kawaguchi Y., *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **27**, (2006), 887-894.
- (6) Dimitropoulos C.D., Dubief Y., Shaqfeh E. S. G., Moin P., and Lele S. K., *Phys. Fluids*, **17**, (2005), No. 011705.
- (7) Shin M. and Shaqfeh E. S. G., *Annual Research Briefs 2005, Center for Turbulence Research, NASA Ames/Stanford Univ.*, (2005), 389-405.
- (8) Tamano S., Itoh M., Hoshizaki K., and Yokota K., *Phys. Fluids*, **19**, (2007), No. 075106.
- (9) Lund T. S., Wu X., and Squires K. D., *J. Comp. Phys.*, **140**, (1998), 233-258.