

トムズ効果の乱流摩擦抵抗の低減機構について

On the mechanism of drag reduction by Toms effect

○黒田明慈(北大工), 鈴木潤(北大工院), 工藤一彦(北大工)

Akiyoshi KURODA, Jun SUZUKI and Kazuhiko KUDO
Div. of Mech. Sci., Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

A model to simulate the drag reduction by dilute addition of polymer or surfactant (Toms effect) is proposed based on the discrete element model. The dimension of the discrete element, which represents the polymer or the rod-like micelle, is very small compared to that of the velocity fluctuation of the fluid. So it is assumed that the element is in equilibrium state in the fluid and turns to the direction of an eigenvector of the velocity gradient tensor. And the macroscopic effect of the discrete elements is modeled as the stress assuming the elements are independent each other. Direct numerical simulations are carried out with this new model using the rigid dumbbell element as a discrete element model and it is shown that the drag reduction up to 37% drag reduction rate is reproduced. The mechanism of the drag reduction is discussed based on the DNS database.

1. はじめに

水に微量の鎖状高分子あるいは棒状ミセルを形成する界面活性剤を添加すると、乱流域での抵抗が著しく低減することは Toms 効果として知られている。著者ら¹⁾は、微小なダンベル要素で高分子を模擬し、流体の変動に対してこれらが平衡状態にあるとの仮定を用いて、鎖状高分子混入流れのモデル化を行った。またこのモデルを用いて二次元チャンネル内乱流の DNS を行い、抵抗低減現象が再現されることを示した。本研究では、このモデルを用いて、抵抗低減流れを再現し、微小要素と流れ場との干渉を観察することを通じて、抵抗低減メカニズムについて考察を行った。

2. モデルの概要

2.1 モデルの概念

鎖状高分子や界面活性剤の添加溶液中では、高分子鎖が複雑に絡み合ったり²⁾、棒状ミセルがネットワークを組む³⁾ことによって巨大な構造を形成し、これが流れ場と干渉することによって抵抗低減効果を生じるという指摘もある。しかしながらこれらの巨大構造が抵抗低減を起こしている乱流中で直接観察された例はない。本研究ではこのような巨大構造の存在は考えずに、ニュートン流体中に多数の鎖状高分子あるいは棒状ミセルが相互干渉せずに存在している状態を想定している。本研究では、鎖状高分子あるいは棒状ミセルを2つの質球とそれらを結ぶ接続子で構成されるダンベル状の要素で模擬する。このダンベル要素が流体中に非常に多く存在していることから、ダンベル要素が流体に与える効果に対して連続体近似を行う。さらに、要素が微小であることから常に平衡状態にあることを仮定してモデル化を行う。

2.2 定式化

紙面の都合上、モデル化の詳細は省略するが、最終的に以下のように定式化される。

要素を添加した流れの運動方程式は次の通りである。

$$\dot{u}_i + u_j u_{i,j} = -\frac{1}{\rho} p_{,i} + \nu u_{i,jj} + \frac{1}{\rho} \sigma_{ji,j} \quad \dots\dots(1)$$

右辺最終項が要素の添加によって付加される応力項であり、次式のように表される。

$$\sigma_{ji} = N_V l_j f_i = N_V l_j c \lambda_{\max} l_i \quad \dots\dots(2)$$

ここで N_V は要素の数密度、 l_i は2つの質球を結ぶ位置ベク

トル(大きさは要素長)の i 方向成分、 c は質球の流体抵抗係数でストークス抵抗を仮定し、 $c = 6\pi\mu r$ とする(μ : 媒体の粘性係数、 r : 質球の半径)。また、 $\lambda_{\max}$ は流体の速度勾配テンソルの固有値のうち最大のものを表す。

本モデルが流体に及ぼす物理的效果は、局所の伸張運動に対する抵抗として捉えることができる。

3. 抵抗低減流れの計算

本節では、離散要素として最も単純な剛体ダンベルモデル(接続子が伸び縮みしない場合)を用いた場合の計算を行った。流れ場は十分に発達した平行平板間乱流とする。本計算では流れ方向の圧力勾配を一定とし、チャンネル半幅と摩擦速度で定義されるレイノルズ数 $Re_\tau = 150$ とした。計算領域は、流れ方向、壁垂直方向、スパン方向に $1.85\pi\delta \times 2\delta \times 0.75\delta$ 、格子数は $48 \times 96 \times 48$ とした。空間の離散化にはスタガード格子を用い、2次精度中心差分によって離散化した。時間進行にはフラクショナル・ステップ法を用い、対流項および離散要素による付加項をアダムス・バッシュフォース法、拡散項をクランク・ニコルソン法で求めた。壁面上では滑りなし条件、および圧力変動分に関してはノイマン条件を、流れ方向とスパン方向には周期境界条件を与えた。この場合独立なモデルパラメータは

$$\frac{6\pi\rho a r l^2}{b Re_\tau} \quad \dots\dots(3)$$

a : 要素の重量濃度、 b : 要素の分子量、 l : 要素長
 ρ : 媒体の密度、 r : 質球の半径

であるが、一例として、媒体が水($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$)、要素の分子量が 10^8 、要素長が $10 \mu\text{m}$ 、質球の半径が $0.1 \mu\text{m}$ の場合を想定して、要素濃度(重量比)が 50ppm, 100ppm, 200ppm の場合の計算を行った。

3.1 摩擦係数

表1に摩擦係数を示す。ニュートン流体の場合と比べて要素を 50ppm 加えたときに 31%、100ppm 加えたときに 37% の抵抗低減が得られている。弾性の効果を有さない剛体モデルの混入によって比較的大きな抵抗低減が得られていることは、抵抗低減を得るために弾性の影響が重要であるとする従来の構成方程式を用いた計算と対照的である。一方、200ppm 加えたときには約 16% 抵抗が増大している。

Table 1 Friction Coefficient

ppm	Newtonian	50	100	200
$C_f(\times 10^{-3})$	8.9	6.1	5.6	10.3

3.2 セン断応力

図1にレイノルズせん断応力, 図2にレイノルズせん断応力と粘性によるせん断応力の和を示す. また本流れ場におけるせん断応力のバランスは,

$$1 - \frac{y^+}{\text{Re}_\tau} = \frac{\partial U^+}{\partial y^+} - \overline{u^+ v^+} + \Sigma_{12} \quad \dots\dots (3)$$

となる. ここで Σ_{12} は要素混入により生じる付加応力である. この式からレイノルズ応力と粘性応力の和の対角直線 (全せん断応力) からの差 (応力欠損) は要素混入により生ずる付加応力が担っていることが分かる. 図1, 2から混入した要素はレイノルズ応力を減少させる効果と付加せん断応力 Σ_{12} を生ずる効果の2つの効果を内在しており, 濃度などのパラメータによって前者が後者を上回れば抵抗低減が顕現し, 後者が前者を上回ると抵抗増加が顕現するものと考えられる. 付加せん断応力の発生機構は次のように説明することができる. すなわち速度勾配のある場において, ダンベル要素の一方の球が高速側に, もう一方の球が低速側にあるとダンベル要素の存在によって高速側流体は減速され, 低速側流体は加速されるが, この効果を巨視的に見た場合に応力として観察される.

3.3 壁近傍の縦渦構造と要素の関係

流れ方向の渦度方程式は次式のようになる.

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} = \omega_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{1}{\text{Re}_\tau} \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_{3,2} - f_{2,3} \quad \dots\dots (3)$$

ここで, 付加項は要素混入による寄与であり, $f_i = \sigma_{ji,j}$ である. 図3に条件付抽出法で得た壁近傍の典型的な縦渦構造を x (流れ方向) 断面図 (上流側から見た図) で示す. 濃淡は渦度変動値に対応し, 明るい領域が正值 (時計回り), 暗い領域が負値である. また, 図中の線は $\omega_1 = 0$ の境界である. 渦度が大きい中心部分は剛体回転に近い運動をしている. 図4は図3と同じ断面で式(3)の付加項 $f_{3,2} - f_{2,3}$ の分布を示したものである. また図中の棒線は要素の向きと要素に働く力を表したものである. 渦度が正の領域では付加項は負に, 渦度が負の領域では付加項が正となり, 要素の存在によって渦度の絶対値を減少させる作用があることがわかる. またこの作用は, 流体の回転運動に対して要素が半径方向に横切る配置をとることによって生じている. ただし, 剛体運動をしている渦の中心部では要素は流れ方向を向き, 式(3)の付加項にはほとんど寄与していない.

参考文献

- 1) 黒田, 工藤, 第17回日本数値流体力学シンポジウム講演論文集, A1-6 (WEB) (2002).
- 2) Hagiwara, Y. et al., *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **21** (2000), 589-598.
- 3) Zakin, J.L. and Qi, Y., *Proc. 2nd Symp. on Smart Control of Turbulence*, (2001), 43-58.

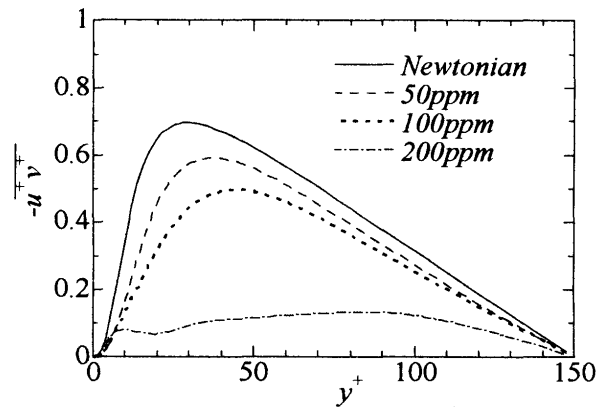


Fig.1 Reynolds shear stress

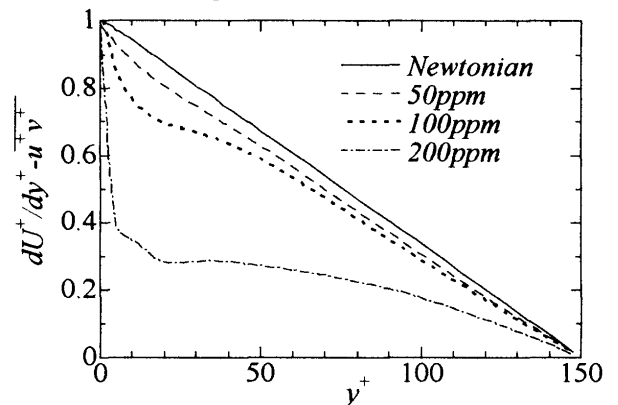


Fig.2 Sum of Reynolds and viscous shear stresses

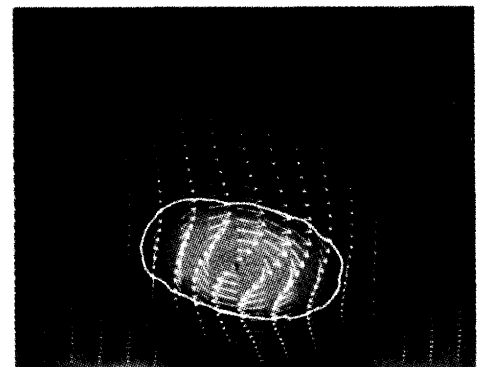


Fig.3 Vorticity and velocity vectors in x-cross section

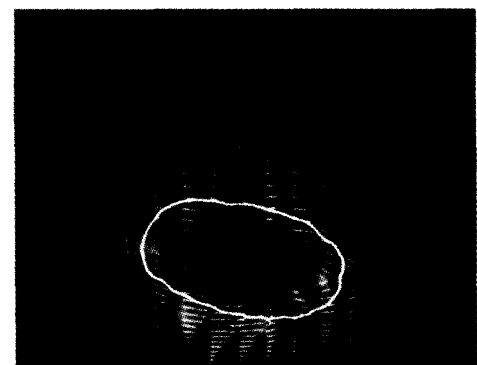


Fig.4 additional term in Eq.(4) and disposition of elements