

界面活性剤による抵抗低減現象の数值的・実験的解析

Numerical and experimental analysis of drag reduction phenomena by surfactant additives

川口靖夫、宇 波、高木 周、松本洋一郎、李 鳳臣、菱田公一

液体の高レイノルズ数流れに化学物質を微量添加することにより乱流運動が抑制され、摩擦抵抗が大幅に低下する現象はトムズ効果と呼ばれ、抵抗低減率は 80%にも及ぶ。近年、耐久性に富み環境影響の小さい界面活性剤系抵抗低減用添加物が開発され、地域冷暖房やビル空調の省エネルギー化のための利用が進みつつある。また小さなエネルギー投入によって界面活性剤棒状ミセルの性状を変えられることから、添加剤を含む溶液は機能性を持つため、管路の所定の部分で乱流抑制効果を On-Off できる有利性がある。

本稿では、こうした機能の発現機構を理解し、その制御方法を検討するための基盤となる数値解析の試みについて報告する。2次元水路内の抵抗低減流れに対して差分法に基づく DNS を行った。計算手法については詳細資料に譲るが、解析対象とする方程式系は以下の通りである。

$$\frac{\partial u_i^+}{\partial x_i^+} = 0, \quad \frac{\partial u_i^+}{\partial t^*} + u_j^+ \frac{\partial u_i^+}{\partial x_j^*} = -\frac{\partial p^+}{\partial x_i^*} + \frac{b}{\text{Re}_t} \frac{\partial}{\partial x_j^*} \left(\frac{\partial u_i^+}{\partial x_j^*} \right) + \frac{1-b}{\text{We}_t} \frac{\partial c_{ij}^+}{\partial x_j^*}$$
$$c_{ij}^+ - d_{ij} + a(c_{im}^+ - d_{im})(c_{mj}^+ - d_{mj}) + \frac{\text{We}_t}{\text{Re}_t} \left(\frac{\partial c_{ij}^+}{\partial t^*} + \frac{\partial u_m^+ c_{ij}^+}{\partial x_m^*} - \frac{\partial u_i^+}{\partial x_m^*} c_{mj}^+ - \frac{\partial u_j^+}{\partial x_m^*} c_{mi}^+ \right) = 0$$

粘弾性を表現する構成方程式は拡散項に相当する項を持たないため数値不安定を生みやすいが、本解析では高精度風上差分法を使用して高いワイゼンベルグ数 (We_t) の領域まで計算を行っていることが特徴である。 $\text{We}_t=12.5, 30, 45$ に対して、抵抗低減率 $\text{DR}\%$ はそれぞれ 12.1, 42.8, 53.2 であった。在来の研究において、シミュレーション計算で再現しえた抵抗低減率が高々 30% であることを考えると、差分法の改良の効果が現れている。

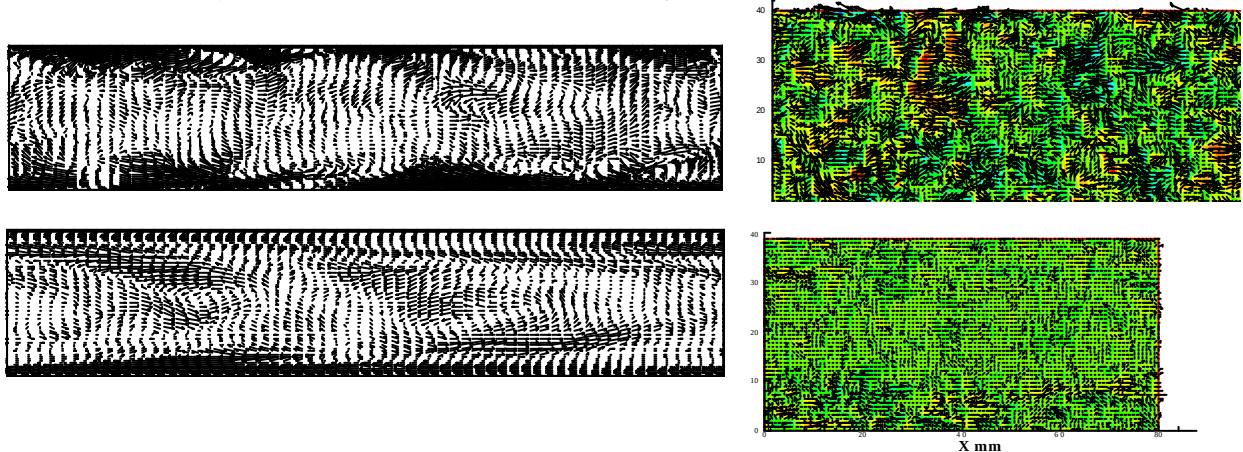


図 1：水路内流れ、 x - y 平面内における速度変動の計算結果（左）および PIV による実験結果（右）
計算： $\text{Re}_t=150$, 上： $\text{We}_t=0$, 下： $\text{We}_t=45$, $\text{DR}\%=53.2$ 、実験： $\text{Re}_t=380$, 上： $\text{We}_t=0$, 下：CTAC 40ppm, $\text{DR}\%=60$

現在 LDV, PIV による水路内流れのデータとの対照、粘弾性パラメータの吟味を行っているところであるが、図 1 をみると計算結果は実験結果を定性的によく再現していると言える。