

開水路流れにおける界面活性剤溶液の表面加速現象

九州工大 正 員 藤崎一裕
九州工大 学生員 〇上田 宏

1. まえがき

界面活性剤を含む流体の表面流速に差が生じると活性剤の濃度差をもたらす、表面張力の場所的相違が生じる。この表面張力差が流体運動の境界条件として作用して、界面活性剤を含まない水の挙動とは非常に異なった現象を示す。濃度マランゴニ効果として知られるこの現象は、水中での気泡の挙動、水表面での乱れの減衰、液膜における物質移動等と深い関連があり、古くから知られている¹⁾が、現象を十分に記述するモデルはまだ確立されていない。

筆者らは、流体の保存式や運動方程式に加えて、界面活性物質の保存や吸着速度過程などを考慮したモデルを用い、表面加速現象に関してこのモデルを適用してその妥当性を調べ、活性剤の種類とパラメータの値との関連等について検討した。

2. 基礎式

図1の様に座標軸をとり、層流開水路における流出現象を考える。この場合のモデルとして以下の式を用いる²⁾

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$-\frac{d\sigma}{dx} = \mu \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = \tau_s \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 - k \cdot \Gamma \frac{\Gamma^\infty}{\Gamma^\infty - \Gamma} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx} (u_s \Gamma) = D \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (6)$$

$$D \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=0} = K_a \{ c_s (\Gamma^\infty - \Gamma) - a \Gamma \} \quad (7)$$

ここに u, w は x, z 方向の流速、 p は圧力、 c は界面活性剤の濃度、 $D (=4.2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s})$ は分子拡散係数、 τ_s は表面せん断力、 σ_0 および σ は清水および溶液の表面張力、 Γ は表面過剰吸着量、 k, a, Γ^∞, K_a は活性剤により異なる物性定数である。また、添字 s は水表面における値であることを示す。(1)式は流体の運動方程式、(2)(3)式は流体および活性剤の保存則でバルク流体内の式である。一方(4)~(7)式は水表面での式で、(4)式は流下方向表面張力勾配と鉛直流速勾配の関連を、(5)式は表面張力と活性剤の濃度との関連を、(6)式は水表面における活性剤の収支を表す。また、(7)式には活性剤の吸着速度過程が考慮されている。

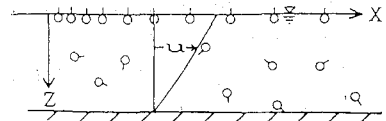


図1. 座標系

3. 実験および考察

図2に実験装置の概略を示す。幅10cm、長さ2mの水路の上流端よりマイクロポンプで活性剤溶液を流入させ、下流端部で流出に伴う表面流速の増加が起こる様子をトレーサ法により観測した。使用した界面活性剤はドデシルベンゼンスルホン酸ナトリウム(SDBS)、ドデシル硫酸ナトリウム(SDS)で、水はイオン交換樹脂で処理したものを用いた。測定結果は写真や図3に示されている。この表面加速は下流端部水表面での界面活性剤の濃度を低下させ、表面張力が上流部より大きくなる。そのため、下流部は上流を引きずり、表面加速現象が生じる。図3中にプロットしている点は実験値で、図中の曲線はいずれも前項の(1)~(7)式を連立させて求めた計算結果である。数値計算では流れ関数 $\psi (= \int u dz)$ を導入し、通常の有限差分法を用いた³⁾。その際 $\Delta x = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、 $\Delta \psi = 5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ((1),(4)式)、 $\Delta x = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、 $\Delta \psi = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ((3),(6),(7)式)とし、他のパラメータの値は表1に示されている。

図3によると活性剤の濃度が濃いほど表面加速現象が著しく出ている。図4には図3に対応して、流下に伴う表面張力の増加、表面吸着量の減少の過程を示す。また図5は水面下の流速分布の計算例である。これらの曲線はいずれも表1の値を用いている。

(7)式中の K_a の値は前述のように吸着反応速度過程に関するもので $K_a \rightarrow \infty$ で Langmuir の吸着式の成立を意味し、物質により一定値をとることが望ましいと言われている²⁾が、実験によりこの値を求めることは実験の精度上、非常に困難な状況である。しかし、今回の解析では表2に示すように個々の活性剤に対して近い値を用いて現象を再現することができた。今後さらに検討を加えて、種々の活性剤とこの値の関連について検討する予定である。

終わりに本研究に協力された本学学生徳永健二君に感謝する。

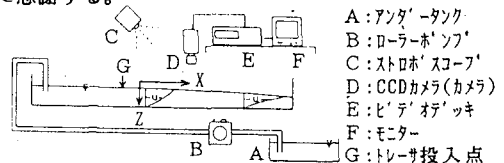


図2. 実験装置概略

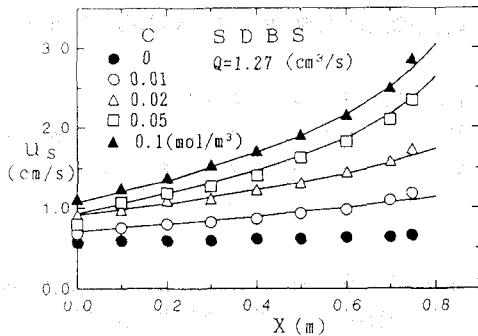


図 3-1. 表面流速分布 (SDBS)

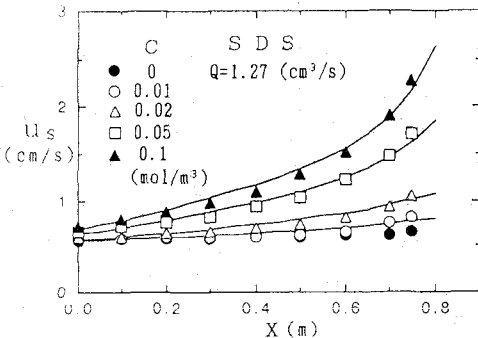


図 3-2. 表面流速分布 (SDS)

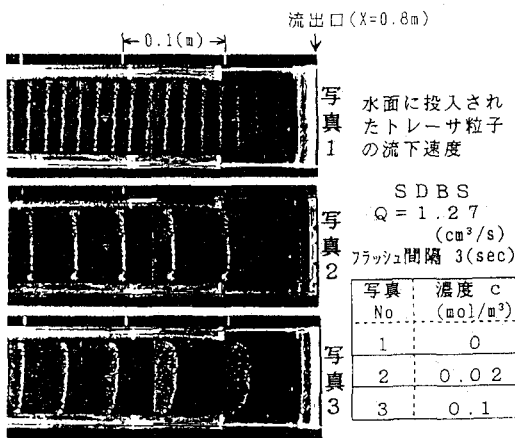


図 4-1. 表面張力および表面吸着量分布 (SDBS)

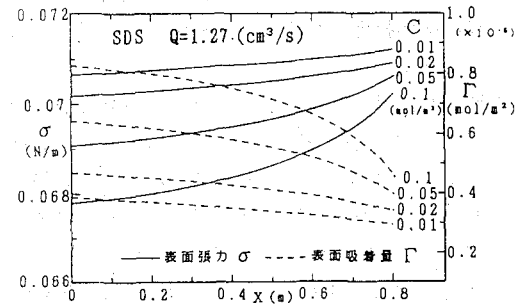


図 4-2. 表面張力および表面吸着量分布 (SDS)

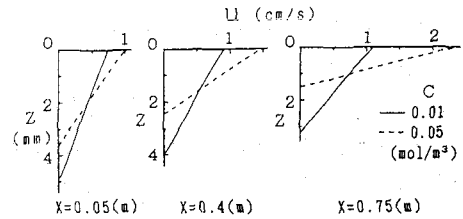


図 5-1. 流速分布 (SDBS)

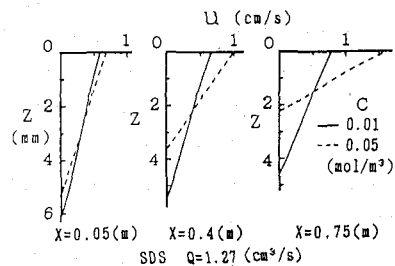


図 5-2. 流速分布 (SDS)

表 1. 計算に用いた諸パラメータ

	SDBS	SDS
k (N/m)	9.60	12.18
a (mol/m³)	0.0022	0.047
Γ [*] (mol/m²)	1.97×10 ⁻⁶	2.5×10 ⁻⁶

表 2. K a の値

C (mol/m³)	SDBS	SDS
0.01	0.29	0.07
0.02	0.29	0.065
0.05	0.29	0.068
0.1	0.27	0.064

参考文献

- 1) 藤縄克彦: レイリー運動とマランゴニ運動, 化学工学 第49巻 第11号 (1985) PP.56-61
- 2) 今石, 中村, 庄野, 井野, 宝沢, 藤縄: 界面活性剤の表面流動特性, 化学工学 第8巻 第2号 (1982) PP.136-143
- 3) Fujisaki K., Ono T., Murakami T. and Awaya Y.: Effect of surfactants on two-dimensional laminar surface flow, Jour. of Hydrosoci. and Hydraulic Eng. vol.7 no.2 (1990) PP.39-49