

九州工業大学 正員 ○藤崎一裕

九州工業大学 白根昭二

九州大学工学部 正員 栗谷陽一

1. まえがき

界面活性剤を含む液中に、層流の表面噴流が噴出する場合の現象について調べた。水表面に界面活性物質が吸着すると表面張力が低下する。また、表面張力の場所的な相違は、流体運動の境界条件として作用し、流れの様相を変化させる。他方、活性剤の拡散や吸着も当然のことながら、この流体運動に影響される。

本報は上記のような表面弾性効果が表面噴流に及ぼす影響について調べたものであるが、最終的にはその成果を表面はっ気などの現象の解析に応用することを目的としている。

2. 基礎式

図1のように座標軸をとると、この場合の基礎方程式が以下のように表わされる

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

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

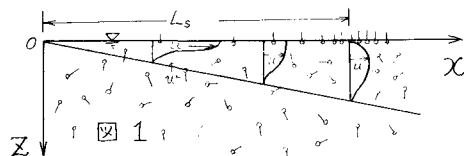
$$\frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma_0} = K \cdot \ln \left(1 + \frac{C_s}{a} \right) \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx} (u_s S) = D \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (6)$$

$$D \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} = k_a \left\{ C_s (S^\infty - S) - a S \right\} \quad (7)$$

C : 界面活性剤濃度, D : 分子拡散係数, τ_s : 表面剪断力, σ_0, σ : 清水または溶液の表面張力, S : 表面過剰吸着量 (以下吸着量と略記), K, a, S^∞, k_a は、いずれも定数であり、添字 s は水表面における値を意味する。

(1) が流体の運動方程式, (2), (3) はそれ



れ活性剤および流体の保存則である。(4), (6), (7) 式は水表面における式であり, (6) 式は表面での活性剤の拡散を表わし, (7) 式は活性剤の吸着速度過程を考慮した式である

式の取扱いを簡略化するため、独立変数を x, z から x, ψ に変換すると以下の式がえられる

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\nu}{2} \frac{\partial^2 u^2}{\partial \psi^2} \quad (8), \quad \frac{\mu}{2} \frac{\partial u^2}{\partial \psi} \Big|_{\psi=0} = -\frac{d\sigma}{dx} \quad (9)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial}{\partial \psi} \left(u \frac{\partial c}{\partial \psi} \right) \quad (10)$$

$$\frac{d}{dx} (u_s S) = D u \left. \frac{\partial c}{\partial \psi} \right|_{\psi=0} \quad (11)$$

$$D u \left. \frac{\partial c}{\partial \psi} \right|_{\psi=0} = k_a \left\{ C_s (S^\infty - S) - a S \right\} \quad (12)$$

$$\text{ただし} \quad \psi = \int u dz \quad (13)$$

であり, (1) 式の $\partial p / \partial x = 0$ とした。

(8) ~ (12) 式と (4) 式を差分表示して数値解を求める。計算方法の概略は、まず① $x + \Delta x$ における表面流速 u_s を仮定し, (8), (10), (11), (12) 式から C, S を求めて (5) 式から $\sigma_{x+\Delta x}$ を求める。②えられた σ の値を用いて, (8), (9) 式から $x + \Delta x$ における表面流速 u_s^* と計算する。③ $|u_s - u_s^*| / u_s$ が一定値以下になるまで, u_s について逐次近似を行なう。同様の操作を Δx ごとに順次下流に向かって進める

3. 結果と考察

界面活性剤としてドデシル硫酸ソーダ (SDS, 分子量 288.38) を用いた場合について検討した。

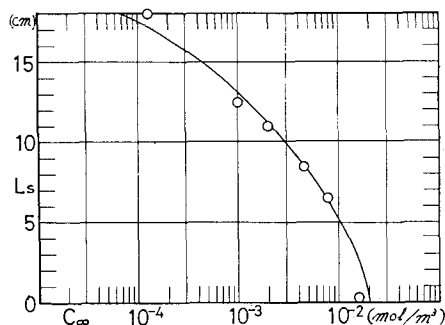
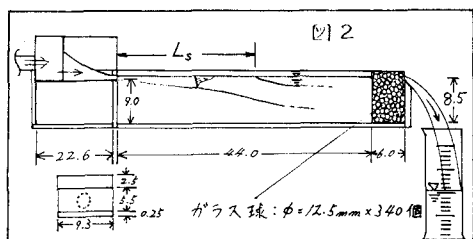


図 3

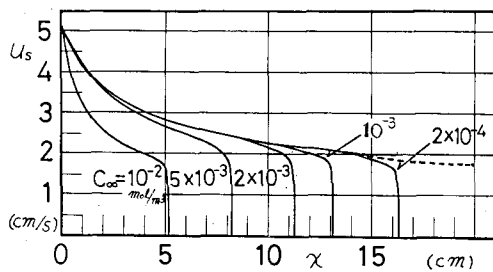


図 4

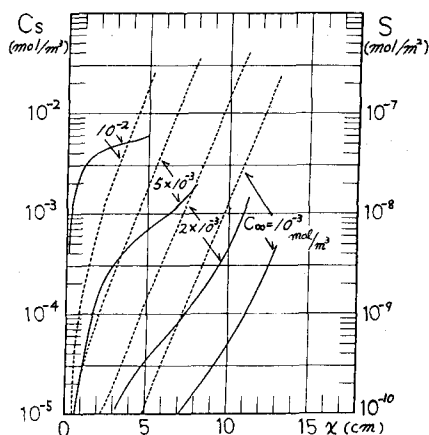


図 5

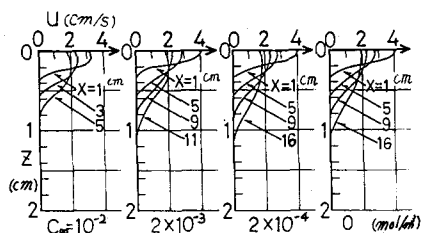


図 6

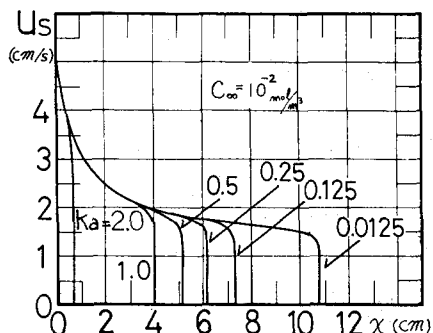


図 7

数値計算では、 $\nu = 1.15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $\mu = 1.15 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $D = 4.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $\sigma_0 K = 14.61 \text{ mN/m}$ ($\sigma_0 = 73.0 \text{ mN/m}$)
 $Re = 0.5$ 、 $a = 0.647 \text{ mol/m}^3$ 、 $S^{\infty} = 3.0 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^2$ の値
を用いた¹⁾。また、流速計算時の $\Delta x = 10^{-3} \text{ m}$ 、 $\Delta y = 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、
濃度計算時の $\Delta x = 5 \times 10^{-5} \text{ m}$ とし、 Δy の値
は活性剤のバルク濃度 C_{∞} の値に応じて 10^{-7} ($C_{\infty} = 10^{-2} \text{ mol/m}^3$)
から 8×10^{-7} ($C_{\infty} = 2 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^3$) m^2/s の値を用いた。

図 3～図 7 に計算結果を示す。図 3 に、表面流速が
0 になるまでの距離 L_s と活性剤のバルク濃度 C_{∞} との
関係を示す。図 3 中にプロットした値は、図 2 に示す
実験装置により求めた値で、容器内の溶液（静水域）
と同じ濃度の液と厚さ 2.5 mm、幅 9.3 cm の噴出口から、
水平に水面上に噴出させた。

図 4 は表面流速の減少の過程を示し、図中の破線が
活性剤の影響がない場合に対応する²⁾。図 5 は噴流の流
下につれて水表面における活性剤濃度 C_s や吸着量 S が
増大していく様子を示し、図 6 は流速分布の変化の状
況を示す。これらの図から、吸着の進行、表面流速の
低下、表面の縮小さらには水面流速の停止などの一連
の現象と C_{∞} との関係を知ることができる。なお、図

7 は、(7) 式のパラメータ Re の影響を調べたもので、この値が大きいほど液内拡散の影響が強いことを意味
する。本報では、従来の実験例を参考にして $Re = 0.5$ としたが、この値に関してはさらに検討を要する。

参考文献

- 1) 石田 他、化学工学論文集、初巻 2 号 (1982), pp. 136～143 2) Schlichting H; Boundary-Layer Theory, (1960), pp. 170～174