

基板上の高分子溶液滴におけるマランゴニ対流の解析

(九大工) (学)南里 功美・(九大院工) (学)安松 祥平・(学)宮本 晋安・(学)Babatunde P. O.
・(九大工) (正)中曾 浩一・(正)深井 潤*

【緒言】インクジェット製膜法では、薄膜形状を制御するため、蒸発過程での液滴内部流動メカニズムの解明が重要である。著者らがこれまでにおこなった接触線後退過程における内部流動の可視化実験、数値計算から、初期溶質濃度の増加に伴い内部循環流が強くなることがわかっている¹⁾。その流動で生じる液滴表面の濃度分布に起因する表面張力勾配より、複数の循環流が発生する現象が明らかになった²⁾。そこで、蒸発過程での液滴内部流動を無次元数で解析し、循環流の発生をより一般的な移動現象論的な観点で考察した。

【解析モデル】本解析では、接触角 $\phi_c=70^\circ$ の液滴を解析対象とし、軸対称2次元円筒座標系を仮定した。実験から内部流動は濃度勾配に依存する対流が支配的であるので¹⁾、濃度勾配が誘起する密度差対流および表面張力差対流のみを考慮した。蒸発による溶媒の減少には Hu and Larson の蒸発速度式³⁾を用いた。無次元支配方程式、無次元数の定義を Table 1 に示す。表面張力、浮力に起因する対流の影響を見るため、Prandtl 数 Pr 、Schmidt 数 Sc を固定し、濃度差依存 Rayleigh 数 Ra_s 、濃度差依存 Marangoni 数 Ma_s を変化させて解析した。

【解析結果および考察】Fig. 1 に $Sc=1000$, $Pr=10$, $Ra_s=5$, 無次元時間 $\tau=1.8$ において Ma_s を 1 および 10 とした場合の液滴内の濃度場および流動ベクトルを示す。 $Ma_s=1$ の場合、循環流が 1 つ発生し、 $Ma_s=10$ の場合では、2 つ発生している。これは、複数の循環流の発生する臨界 Ma_s の存在を示唆している。

Fig. 2 に $Sc=1000$, $Pr=10$ において Ra_s が 5 および 30 の場合の対称軸中央部での無次元流速の経時変化を示す。縦軸の正は対称軸中央部での上昇流を、負は下降流を示す。液滴中央部での下降流の発生は、複数の循環流の発生によると考えられる。表面張力差対流は Ma_s 、密度差対流は Ra_s に支配されている。 Ma_s が増加すれば、表面張力差対流が強まり、液滴の中央部の流速が増加する。 Ra_s が増加すると、密度差対流が表面張力差対流に重畳する流動により、逆転が早まる。また、低 Ra_s において流動の逆転の生じなかった Ma_s においても流動の逆転が生じるようになることから、 Ra_s の増加は複数の循環流の発生する Ma_s の臨界値を減少させる効果を与える因子であることがわかった。

【参考文献】1) M. Kaneda *et al.*, *Langmuir* **24**, 9102 (2008), 2) Y. Yoshitake *et al.*, *Langmuir Article ASAP*, 3)

H. Hu and R. G. Larson, *J. Phys. Chem. B*, **106**, 1334 (2002)

Table 1 無次元支配方程式および無次元数

Equation of continuity:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

Equation of motion:

$$\frac{D\mathbf{U}}{D\tau} = -\nabla P + Pr \left[\nabla \cdot f_\mu \left\{ \nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T \right\} \right] + \left(\frac{r_c}{r_{c0}} \right)^3 Pr Ra_s C_A$$

Equation of energy:

$$\frac{D\Theta_i}{D\tau} = \frac{\alpha_i}{\alpha_{i0}} \nabla^2 \Theta_i \quad (i = l, w)$$

Equation of diffusion:

$$\frac{DC_A}{D\tau} = \frac{Pr}{Sc} f_D \nabla^2 C_A$$

Dimensionless Number:

$$Pr = \frac{\nu_0}{\alpha_{i0}}, \quad Sc = \frac{\nu_0}{D_{AB0}}, \quad Ra_s = \frac{g \beta_s r_{c0}^3 \Delta C_A}{\alpha_{i0} \nu_0}, \quad Ma_s = \frac{(\partial \sigma / \partial c_A) r_{c0} \Delta C_A}{\alpha_{i0} \mu_{i0}}$$

\mathbf{U} : Dimensionless velocity vector, Θ_i : Dimensionless temperature,

C_A : Dimensionless solute concentration, τ : Dimensionless time,

r_c : Wetting radius, σ : Surface tension Subscripts l : Droplet w : Substrate

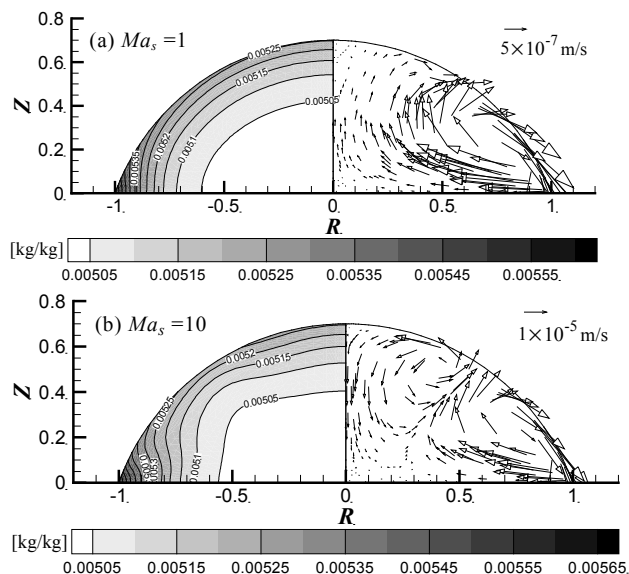


Fig. 1 溶質濃度 (左側) および流動ベクトル (右側)
($Sc=1000$, $Pr=10$, $Ra_s=5$, $\tau=1.8$)

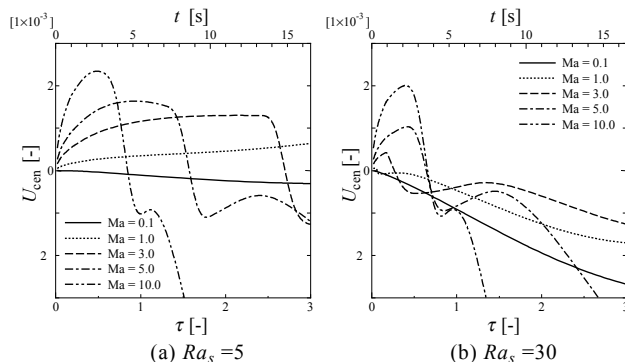


Fig. 2 中心軸での速度ベクトルの経時変化

*jfukai@chem-eng.kyushu-u.ac.jp