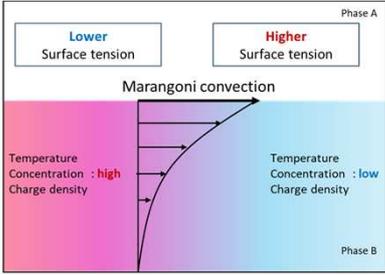


シリコンオイルの表面張力の温度・電場依存性

Temperature and Electric Field Dependence of Surface Tension of Silicone Oil

松野 千映, 矢野 大志, 西野 耕一 (横浜国立大学, 神奈川大学)

研究背景

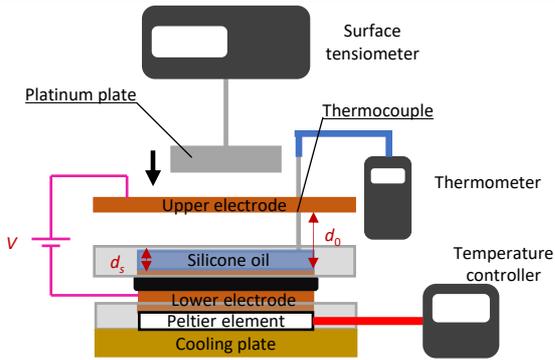


- マランゴニ対流は、自由表面における温度・濃度・電荷密度などの勾配によって生じる表面張力差を駆動力とする流れ
- 単結晶製造や物質の拡散・混合など工業利用の観点から、対流制御手法の確立は重要な課題

- 温度差マランゴニ対流に対する電場の影響に関する研究が行われている^{1,2)}
- 絶縁性流体であるシリコンオイルはマランゴニ対流研究で頻りに用いられる
- 本研究では、表面張力の温度・電場依存性を明らかにする
- 表面張力の温度・電気特性を用いて、電場環境下における温度差マランゴニ対流の挙動に関する数値解析を行う

実験概要

実験装置概略図



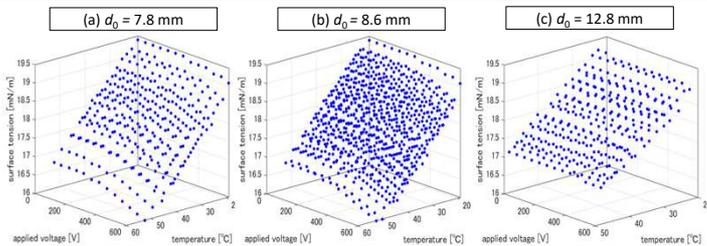
実験条件

| | |
|---|---------------------|
| Working fluid | 5 cSt silicone oil |
| Range of surface temperature (T) | 18 - 50 [°C] |
| Applied voltage (V) | 0 - 600 (by 50) [V] |
| Distance between electrodes (d ₀) | 7.8, 8.6, 12.8 [mm] |
| Thickness of silicone oil (d _s) | 3.0 [mm] |
| Diameter of silicone oil | 40 [mm] |

電気的物性値

- silicone oil
 - Dielectric constant: $\epsilon_s = 2.60\epsilon_0 \{1 - \alpha(T - T_0)\}$ [F/m]
 - $\alpha = 2.86 \times 10^{-3}$ [1/K]
 - Dielectric relaxation time: $\tau = \frac{1}{2\pi f_0} \approx 1.59 \times 10^{-11}$ [s]
- air
 - Dielectric constant: $\epsilon_a = 1.00\epsilon_0$ [F/m]
 - permittivity of vacuum

実験結果



- Tの増加に比例して表面張力は減少
- vやd₀に関わらず表面張力温度係数 $\sigma_T = -8.28 \times 10^{-2} \pm 0.115 \times 10^{-2}$ [mN/(m · °C)]
⇒ 表面張力に対する温度と電場の影響は独立
- v²に比例して表面張力は減少
- 電圧印加による表面張力の変化はvだけでなくd₀にも依存
⇒ 各相の電場の大きさや気液界面に存在する電荷量に依存

参考文献

[1] M. Haga, T. Maekawa, K. Kuwahara, A. Ohara, K. Kawasaki, T. Harada, S. Yoda and T. Nakamura, "Effect of Electric Field on Marangoni Convection under Microgravity," J. Jpn. Soc. Microgravity Appl., 12,1(1995), 19-26.

[2] K. Casson and D. Johnson, "Small voltage electrocapillary flows in the presence of ionic surfactants," Physics of Fluids, 14,8 (2002), 2935-2938.

[3] T. B. Jones, "On the Relationship of Dielectrophoresis and Electrowetting," Langmuir, 18,11(2002), 4437-4443.

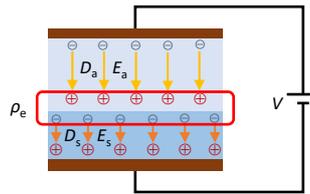
[4] D. C. Grahame, "The Electrical Double Layer and The Theory of Electrocapillarity," Chemical Review, 41,441 (1947), 441-501

考察

気液界面における表面電荷密度

<仮定>

- ✓ 上部電極のスリットを無視した単純な二相モデル。
- ✓ 気相・液相ともに完全に誘電分極が生じ、平衡状態に達している。
- ✓ 誘電体境界において電束密度の境界条件 $D_n = D_s$ が成立。



電束密度: 電極表面に現れる面電荷密度

$$D = D_o = D_s = \frac{\epsilon_a \epsilon_s}{\epsilon_a d_s + \epsilon_s d_a} V \quad [C/m^2]$$

誘電分極により気液界面に生じる表面電荷密度

$$\rho_e = D \epsilon_o \left(\frac{1}{\epsilon_s} - \frac{1}{\epsilon_a} \right) = \epsilon_o (\epsilon_s - \epsilon_a) D$$

$$= \epsilon_o \frac{\epsilon_a - \epsilon_s}{\epsilon_a d_s + \epsilon_s d_a} V \quad [C/m^2]$$

Maxwell応力³⁾

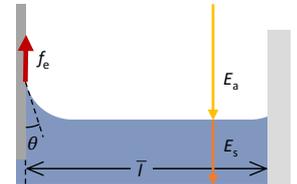
電荷が分布した気液界面において単位面積あたりに働く力 p_e

$$p_e = \frac{1}{2} \left(\frac{D^2}{\epsilon_a} - \frac{D^2}{\epsilon_s} \right) = \frac{1}{2} (\epsilon_a E_a^2 - \epsilon_s E_s^2) \quad [N/m^2]$$

白金プレートとの接触線において単位長さあたりに働く力 f_e

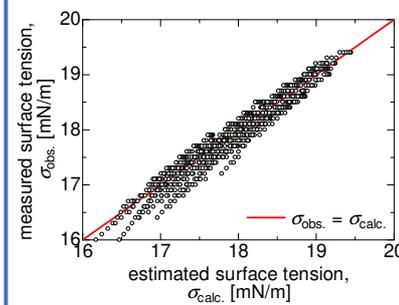
$$f_e = \frac{1}{2} (\epsilon_a E_a^2 - \epsilon_s E_s^2) \bar{l} = -\frac{1}{2} \frac{\bar{l}}{\epsilon_o} \frac{\epsilon_a \epsilon_s}{\epsilon_a d_s + \epsilon_s d_a} \rho_e V$$

$$= -\frac{1}{2} \frac{\epsilon_a \epsilon_s (\epsilon_a - \epsilon_s)}{(\epsilon_a d_s + \epsilon_s d_a)^2} \bar{l} V^2 \quad [N/m]$$



理想分極電極に対するLippmann式から得られる関係式⁴⁾と近似

表面張力の推定式



$$\sigma_{calc.} = \sigma_0 + \sigma_T T - f_e$$

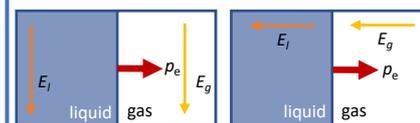
$$(\sigma_0 = 21.0 = const.) \quad [mN/m]$$

- ✓ $\sigma_{obs.} = \sigma_{calc.}$ の直線に沿ったプロット
- ↓
- 電場による表面張力測定値の低下の原因は、Maxwell応力テンソルから求まる気液界面に働く力と深い関係がある
- ✓ vが大きいほど残差が大きくなる
- ↓
- 上部電極のスリットによる電場の不均一分布を無視したことが原因

今後の研究計画

電場を考慮した液柱温度差マランゴニ対流に関する数値解析

Maxwell応力から求まる気液界面に働く圧力



$$p_e = \frac{1}{2} (\epsilon_l E_l^2 - \epsilon_g E_g^2) \quad p_e = \frac{1}{2} (\epsilon_g E_g^2 - \epsilon_l E_l^2)$$

マランゴニカ

マランゴニ対流の駆動力である表面張力勾配応力を体積力 F_b としてモデル化

単位面積を有する厚さ δr のセルに働く体積力 F_b

$$F_b = \frac{\partial \sigma}{\partial z} \frac{1}{\delta r} = \frac{\sigma(z+dz) - \sigma(z)}{dz} \frac{1}{\delta r} = \left(\sigma_T \frac{\partial T}{\partial z} - r \frac{\partial \rho_e}{\partial z} \right) \frac{1}{\delta r}$$

Laplace Equation

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

半径 r の液柱に対して, $R_1 = r, R_2 = \infty$
 ρ_e による表面張力の減少量 $-\Delta \sigma_e$

$$\therefore p_e = -\frac{\Delta \sigma_e}{r}$$

