B212 ブルースター角レーザー入射光学系と画像解析を用いた アルコール水溶液表面における擾乱励起の解析

石田 賢治[○](佐賀大), 森 康彦(慶大)

Analysis of surface disturbances induced at aqueous alcohol solution surfaces utilizing Brewster angle incidence laser optics and image processing

Kenji ISHIDA and Yasuhiko H. MORI

ABSTRACT

Novel optical surface-visualization technique has been applied to aqueous solution systems of 1-pentanol and four structural isomers for investigating relations between molecular structures of alcohols and mechanical stabilities of their aqueous solution surfaces. Experiments have been carried out systematically under condition of various alcohol concentrations up to their solubilities with several sets of surface temperature gradients imposed just on the solution surfaces. Results of the analysis show that aqueous solution systems of alcohols which involve hydroxyl groups or methyl groups on appropriate positions in the molecules, such as 3-pentanol or 2-methyl-1-butanol, have relatively small instabilities of adsorption and large potentials for inducing strong surface disturbances at the solution surfaces.

Keywords: alcohol solution, surface disturbances, visualization, image processing,

1. はじめに

界面活性物質を含む水溶液の表面では、温度・濃度場の変化により表面張力勾配に基づく流動が励起され易い。例えば吸収冷凍機／ヒートポンプ等において、このような性質を積極的に利用した熱・物質移動の促進法の開発が行われている¹⁾。本研究では、界面活性を持つアルコール分子の水溶液表面において温度・濃度場の変化に伴って擾乱が励起されるメカニズムを、アルコールの分子構造及び吸着状態の安定性との関係において調べた。

2. 実験装置

2.1 本研究の可視化法

本研究では、系に他物質を添加することなく液面における界面活性物質の吸着状態と流動を二次元的に可視化して記録し、画像処理により解析する (Fig. 1)。

偏光方向を調節された直線偏光のレーザー光は拡大され平行光とされた後、強度 50% ずつの 2 光束に分割され、光束の一つはミラー(M6)により空気-水界面に関するブルースター角 θ_B をもって試料液体の液面に入射する。入射光は、液面に到達する前に偏光子(P)により p 偏光成分のみが取り出され 1/4 波長板により円偏光に変換される。ブルースター角入射では入射光の p 偏光成分は純粋な水表面から反射されず、液面にアルコール分子の集合体や吸着膜が存在する場合にのみ反射される²⁾。

液面からの反射光は液面でのアルコール分子の吸着状態及び液面の流動を反映したものであり、検光子(A)によ

り透過する偏光成分を選択した後、デジタルビデオカメラにより記録される。録画されたデジタル画像情報は自動処理対応の画像処理ソフトウェアにより解析される。

Fig. 1 Experimental setup

2.2 測定セル

光学系と分離された密閉型構造の測定セルを製作した。試料液体の液面は、セルの内部に固定したベッセル内に形成される。セルは窒素置換等の操作により内部の気相組成を制御できる。また、熱電対による多点温度計測およびペルチェ素子とヒーターにより、溶液表面に任意の温度勾配を付加した実験が可能となっている。

2.3 可視化の 3 モード

本研究の可視化光学系は 3 つの可視化モードを持ち、それぞれ以下の光学現象を利用して可視化を行っている。

モード 1 : 低濃度から液面に形成される液体凝縮膜の

前駆体的な分子集合体構造は照射光を散乱して反射像を形成する。反射光は p 偏光成分を多く含む。

モード 2: 液面に存在する吸着膜は照射光を反射する際に p 及び s 偏光成分間に位相シフト量と振幅反射率の差異を生じさせ、楕円偏光の楕円率を変化させる。

モード 3: 高密度の吸着膜内で生じる二次元微結晶や、液体凝縮膜が破断して形成される離散的な分子集合体構造は照射光を強く散乱して反射像を形成する。

3. 実験方法及び実験条件

試料には 1-pentanol ($C_5H_{11}OH$) と構造異性体から 3-methyl-1-butanol, 2-methyl-1-butanol, 2-pentanol, 3-pentanol を選んだ。溶解度 x_c 以上までの各濃度における水溶液表面での吸着状態と流動を可視化した ($25^\circ C$)。溶液コンテナ内壁付近の液面に下端が接するよう対向させて設置した伝熱板 1, 2 を加熱することで、溶解度以下、付近及び以上の各濃度の水溶液表面に温度勾配を付加し、同様に可視化を行った。系の初期温度は $T_0 = 25^\circ C$ 、主に伝熱板 2 の温度 T_{W2} を $25^\circ C$ に固定し伝熱板温度差 $\Delta T = T_{W1} - T_{W2}$ を 5, 10, 15, $20^\circ C$ の 4 通りの条件で実験した。

4. 実験結果及び考察

(1) $25^\circ C$ における溶解度は小さい方から 1-pentanol, 3-methyl-1-butanol, 2-methyl-1-butanol, 2-pentanol, 3-pentanol の順であった。炭素直鎖の側面に水酸基やメチル基を持つアルコールの吸着膜は不均一になりやすく、吸着状態の安定性が低下することが可視化により確認された (Fig. 2)。画像解析の結果を整理して Table 1 に示す。

(2) 液面に温度勾配を付加した実験においては、低濃度の 2-methyl-1-butanol ($CH_3CH_2CH(CH_3)CH_2OH$) 水溶液系と高濃度の 3-pentanol ($CH_3CH_2CH(OH)CH_2CH_3$) 水溶液系において比較的大きな擾乱が励起され、吸着状態が不安定であった。これらの系では大きな温度勾配を付加した際に、加熱壁からの霧状の流れ (M) や溶液の白濁化 (Op) が見られた。また、高濃度の 3-pentanol 水溶液系では加熱壁から微小なレンズ状液滴が多数発生し低温側に流れる現象 (L), 低濃度の 2-methyl-1-butanol 水溶液系では他の系とは逆方向の加熱壁方向への継続的な流れ (Cf) が生じた (Fig. 3)。上記の流動現象は、吸着膜の均一さ、表面張力の濃度依存性 (負), 溶解度の温度依存性 (室温付近で負) 等の影響が作用し合い生じている。

(3) 1-pentanol, 3-pentanol, 2-methyl-1-butanol の各水溶液系の表面張力の濃度依存性を測定し、吸着モデルにより解析した。測定値はいずれも Langmuir 吸着モデルでよく近似されたことから、吸着は単分子層状で吸着分子間の相互作用は比較的弱く、表面張力値の観点からは吸着の基本形態には大きな差がないと推定される。表面張力の濃度依存性データからは必ずしも吸着状態の安定性の差異に関する情報が得られず、吸着状態の可視化等を併用した解析が必要であることがわかる。

5. まとめ

1-pentanol 及び 4 つの構造異性体の水溶液系の各濃度の液面に温度勾配を付加することで吸着状態の安定性と励起される擾乱の様相を調べる可視化・解析実験を行い、分子内の適当な位置に水酸基や側鎖メチル基を持つアルコールの水溶液系は液面での吸着状態が不安定であり液面に擾乱を励起し易いこと等の知見を得た。

Table 1 Results of experiments ($T_0 = 25^\circ C$, $T_{W2} = 25^\circ C$).

System	Solubility x_c (mass fraction)	Concentration x	Temperature difference $\Delta T = T_{W1} - T_{W2}$			
			$+5^\circ C$	$+10^\circ C$	$+15^\circ C$	$+20^\circ C$
1-pentanol	0.020	$x > x_c$	O	O	O	Δ
		$x \approx x_c$	O	O	O	Δ
		$x < x_c$	O	O	O	Δ
3-pentanol	0.059	$x > x_c$	O	Δ L, Op	Δ L, Op	Δ L, Op
		$x \approx x_c$	O	O M	Δ L, Op	Δ L, Op
		$x < x_c$	O	O	O	Δ
2-methyl-1-butanol	0.031	$x > x_c$	Δ	O	Δ M	Δ Op
		$x \approx x_c$	Δ	Δ	x	x M
		$x < x_c$	x Cf	x Cf		

Stability of solution surfaces O: Stable, Δ : rather Unstable, x: Unstable
Especially flow patterns M: Mist, Op: Opaque, L: Lens, Cf: Counter flow

Fig. 2 Visualization images of surface disturbances on 2-methyl-1-butanol system without temperature gradients ($x = 0.02$, $T_0 = 25^\circ C$, $T_{W1} = T_{W2} = 25^\circ C$).

Fig. 3 Visualization images of surface disturbances on 2-methyl-1-butanol system with temperature gradients ($x = 0.02$, $T_0 = 25^\circ C$, $\Delta T = +10, -10^\circ C$).

参考文献

- Herold, K.E., Radermacher, R., Klein, S.A.: Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press, New York (1996) Chapter 5.
- Ishida, K., Mori, Y.H.: Visualization and analysis of adsorption behavior of alcohols on aqueous alcohol solution surfaces utilizing Brewster angle videomacrography and digital image processing, Experiments in Fluids, Vol.21, No.2 (1996) pp.94-102.