

α ゲルの生成過程で生じる界面自発運動の平衡相挙動を介した理解 Understanding interfacial motion accompanied with generation of α -gel through equilibrium phase behavior

住野豊^{1*}, 本多拓也², 菱田真史³, 山田悟史⁴

¹東京理科大学理学部第一部応用物理学科, 〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

²愛知教育大学教育学部, 〒448-8542 愛知県刈谷市 井ヶ谷町広沢 1

³筑波大学数理物質系, 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

⁴高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所, 〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方 203-1

Yutaka Sumino^{1*}, Takuya Honda², Mafumi Hishida³ and Norifumi L. Yamada⁴

¹Faculty of Science, Tokyo University of Science, Katsushika, Tokyo 125-8585, Japan

²Department of Education, Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542, Japan

³Faculty of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

⁴Institute of Materials Structure Science, KEK, Tokai, Ibaraki 319-1106 Japan

1 はじめに

アメーバが示す運動に代表されるように、細胞は内部に筋肉のような運動器官を持たないにもかかわらず ATP として蓄えられた化学エネルギーを消費して自発的な運動を示す。このような細胞運動では、アクチンとミオシンからなるゲル、アクトミオシンゲルが重要な役割を果たす。ここでアクチンは ATP や ADP の介在の下、モノマー状態とフィラメント状態を行き来するタンパクであり、ミオシンはフィラメント状態のアクチン上を滑走するモータータンパクである。これらの複合体であるアクトミオシンゲルは化学エネルギーを用いて、ゲルの自発的な生成・崩壊と自発的な収縮を示す。アクトミオシンゲルはこのような機能を用いて細胞内部の流動を生み出している。また特筆すべき点として、これらアクトミオシンゲル自身は不定形であり固定された構造を持っていない。このような埋め込まれた時空間構造が存在しないにもかかわらず、細胞が運動を示す際には前後の非対称のある時空間構造を自発的に生み出している。物理学の観点からすると、このような自発的な対称性の破れがいかに生み出されるのが重要な問題であると言える。

以上の問題を解決するにあたり、最も直接的な方法としてはアクトミオシンゲルを再構築し運動する人工細胞モデル作成、さらにその振る舞いを観察・解析することが挙げられる。しかしながら、生体材料は近年比較的容易に精製できるようになったものの、依然として精製時の手順などの暗黙的なパラメータが系に含まれてしまい、再現性や普遍性を観察するには心もとない状況にある。そこで我々は、アクトミオシンゲルのような役割を果たす化学系を構築し、それをモデル系として観察・解析することを目指した。

ここではゲルに相当する会合体として、一般的に α ゲルと呼ばれる界面活性剤複合系に着目した[1]。これは、イオン性界面活性剤と補界面活性剤および水からなる会合体であり、一般にはエマルジョン安定化剤として用いられているものである。この会合体は数 10 から 100 nm におよぶ膜間距離を持つラメラ構造をもち、90 wt%以上が水である状態においても一定の降伏応力までは弾性体として振る舞う。このように α ゲルは水を多く含む弾性体という意味でゲルのように振る舞うと言える。さらに着目する点としては、この α ゲルに使用されるイオン性界面活性剤が水溶性である一方で、補界面活性剤が水に不溶な点が挙げられる。

そこで我々は初期条件として水相にはイオン性界面活性剤、油相には補界面活性剤を混合し、これらの 2 相を接触させることで 2 相の界面で α ゲルが定

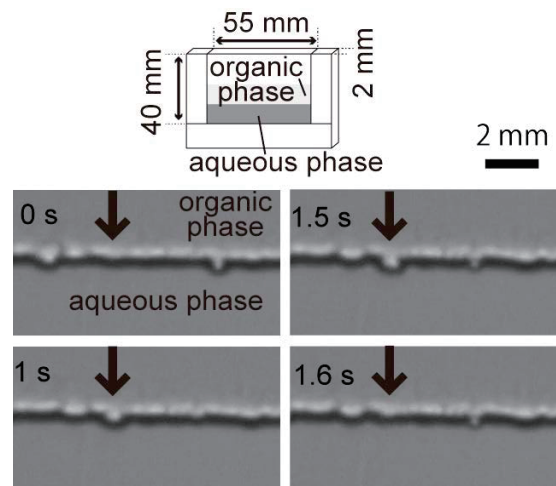


図1 油水界面の自発変形の様子

常的に生成する系を構築した。すると、油水界面で

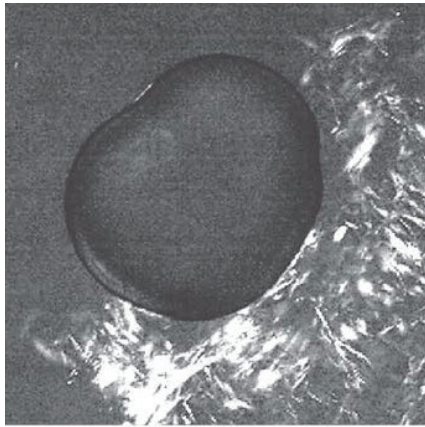


図2 偏光顕微鏡による液滴の運動の様子 (スケール: 0.5 mm)。界面からはがれた α ゲルが右下に堆積しているが、運動には寄与していない

α ゲルが生成することに伴い油水界面が球状の変形を進展・後退させる自発的な界面運動を一時間以上示した(図1)。また油相を水相上に滴下し油滴とすると、その界面は自発的に変形を示し、並進運動も示した(図2)[2]。

このような球状の変形は、一般的な油水界面活性剤系でみられるマランゴニ不安定性のような表面張力誘起の不安定性では生じない。つまり本系での界面運動は内部圧力の上昇に伴う不安定性であると類推できる。また、仮に生成した α ゲルが狭い領域で定常的に生成すると考えると、曲がった曲面の内部の圧力は上昇する。つまり液滴に関して言えば、 α ゲルがただの弾性体であると考えただけで、界面運動が説明される。しかしながら、図1に示したような平坦な界面の不安定性は説明不能である。また次元解析的な手法により、液滴内部の圧力上昇を考えると、運動に必要な会合体の厚さ h は $h \sim \gamma r / B$ で表わされる。ここで、 r は液滴の半径、 γ は界面張力、

B は会合体のヤング率である。これらに典型的な値、 $r \approx 10^2$ m, $\gamma \approx 10^2$ N/m, $B \approx 10^3$ Paを代入すると、変形に必要な界面の厚さは0.1 mmとなり、本系の顕微鏡での測定値(図2)とは矛盾してしまう[2]。このことは、界面で生成した α ゲルを単なる受動的な弾性体と考えては界面運動が説明できず、界面近傍での α ゲルの生成過程が重要となることを示唆している。

そこで我々は界面運動の機構を α ゲルの構造変化から理解するため、 α ゲルの平衡相図を作成し、その平衡構造を小角X線散乱(SAXS)を用いて測定した。

2 実験

実験系としては、 α ゲルの平衡系の作成が比較的容易な塩化セチルトリメチルアンモニウム(CTAC)とヘキサデカノール($C_{16}OH$)及び水の混合系を用いた。ここでCATC、 $C_{16}OH$ は東京化成より購入したものをを用いた。この系でも、CTACを水相、 $C_{16}OH$ をテトラデカンからなる油相に混合し2相を接触させると同様の油水界面の自発運動が観察された。

3 結果および考察

25°CでCTAC、 $C_{16}OH$ 水を混合しそのマクロな様相から相図を作成すると、ゲル相、白濁相、半透明相に区分けできることが分かった。その相図を図3に示す。また、ここで特に混合時にCTACの濃度を x [mM]、 $C_{16}OH$ の濃度を y [mM]として $x+y=160$ mMとなる条件を保ち、混合比を変えながらSAXS観察をした。データは図4に示す通り白濁相内部では繰り返し周期のはっきりしたラメラ構造に起因するピークが見られた。また、 y が上昇するにつれて、ピーク位置が低波数側へ移動することが分かった。これは、 $C_{16}OH$ 濃度 y が大きくなるとともにラメラ間隔が大きくなることを示している。またゲル相に相当する条件においては、低波数側に立ち上がりが見られるものの、繰り返しピークが弱くなっていることが分かった。

油水界面が自発運動を示している状況においては、油相中に $C_{16}OH$ が混合されていることから油水界面

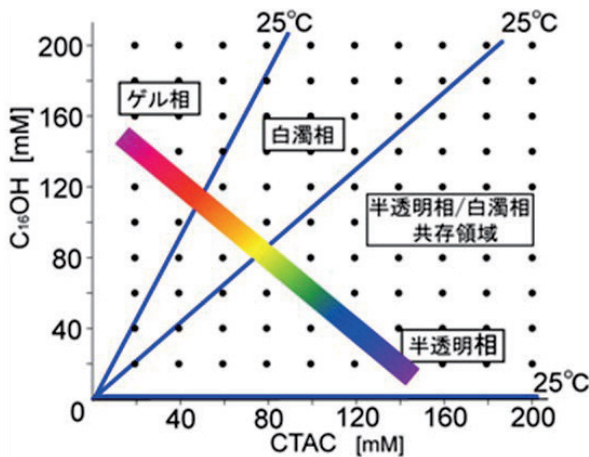


図3 平衡相図の概形

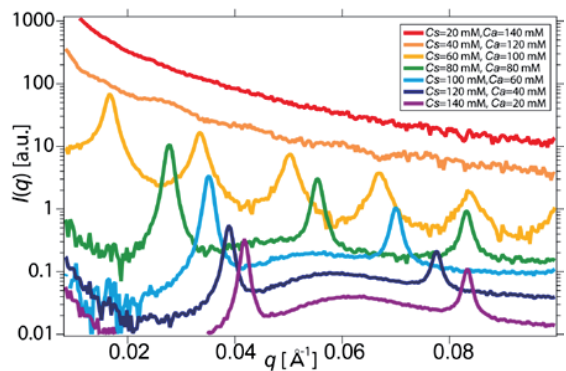


図4 濃度スキャン時のSAXSデータ

上では、バルク濃度に比較すると $C_{16}OH$ の濃度が大きいと考えられる。つまり油水界面で生成した α ゲルは徐々にラメラの膜間距離を縮めていくものと考えられる。このようなアルコールの比率の変化に伴った相挙動の変化は、油水界面の自発運動の機構に重要な役割を果たす可能性がある。

謝辞

ここに長尾道弘氏 (NIST, インディアナ大), 北畑裕之氏(千葉大), 瀬戸秀紀氏(KEK)に有意義な議論をしていただいたことを感謝します。また BL6A の実験環境の整備に関して五十嵐教之氏, 清水伸隆氏 (KEK)のご尽力に感謝します。本研究は JSPS 科研費若手研究(B) 24740287 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Yamaguchi, A. Noda, *Nihon Kagaku Kaishi* 1632 (1987); Y. Yamagata, M. Senna, *Langmuir* **15**, 4388 (1999).
- [2] Y. Sumino et al., *Langmuir* **28**, 3378 (2012); Y. Sumino et al., *Soft Matter* **7**, 3204 (2011)

*ysumino@rs.tus.ac.jp