

## 界面活性剤会合体の非平衡ダイナミクスと界面運動

住野豊<sup>1</sup>, 山田悟史<sup>2</sup>, 長尾道弘<sup>3</sup>

<sup>1</sup>東京理科大学理学部応用物理学科, <sup>2</sup>高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所, <sup>3</sup>インディアナ大学物理学科

### Nonequilibrium dynamics of surfactant aggregate and interfacial motion

Yutaka SUMINO, Norifumi L. YAMADA<sup>2</sup>, Michihiro NAGAO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Applied Physics, Faculty of Science, Tokyo University of Science,

<sup>2</sup>Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization,

<sup>3</sup>Center for Exploration of Energy and Matter, Department of Physics, Indiana University

#### Abstract

水・油・界面活性剤を混合した系では、非平衡条件で界面活性剤が界面を介して水相と油相の間を移動する。このような非平衡条件では、界面活性剤の流れが油水界面での揺動を誘起することが古くから知られている。界面揺動の主要因はマランゴニ効果であるとされている一方、界面での会合体形成も重要であることが示唆されていた (Fig. 1(a))。我々はX線及び中性子小角散乱を用いた界面運動のその場観察を行い、界面活性剤の会合体形成と会合体の構造転移が界面運動の主要素となり得ることを示唆する結果を得た。

#### 1. はじめに

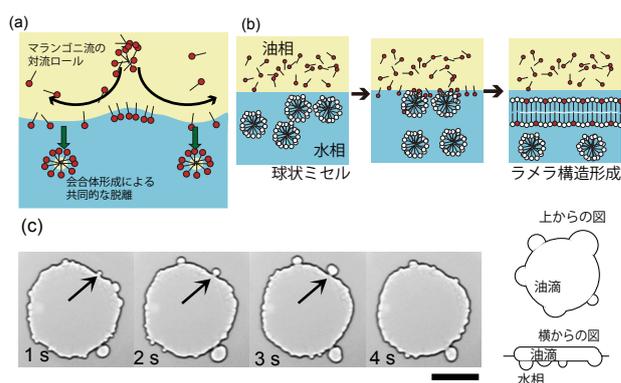
油相・水相と界面活性剤からなる系で初期の界面活性剤濃度を油水間で非平衡な条件とすると、界面での流動とそれに伴う界面運動が発生する (油水系) [1]。油水系で界面流動が生成するには、界面活性剤が油水界面を通過する際、不均一に油水界面上に吸着し、界面張力が不均一になることが重要である。界面張力の不均一はマランゴニ流と呼ばれるバルク中での対流構造を生み出す [2] (Fig. 1(a))。このような対流が界面近傍の界面活性剤濃度に正のフィードバックを与えることで持続的な界面流動構造が構成される。また、こういった界面流動構造により界面ポテンシャルの時間的な振動や [3, 4], 空間周期的なソリトン構造 [5] が生じることが知られている。他にも、一方の相をノズルから少量出すことで、ノズルによりつり下げられた液滴を構築すると液滴内部に渦が生じ、液滴形状が規則的な振動を示すことも示されている [6]。

油水系では、近年このような界面揺動の機構を用いて自発的に動く液滴を作る試みも盛んになされている [7-9]。理論的には、油水界面上でのマランゴニ効果と界面活性剤の油相・水相間の移行、および線形の吸着・脱離プロセスを仮定することで液滴の並進運動が生じることが説明できる [10, 11]。

一方、いくつかの文献においてマランゴニ効果に加えて、油水界面に吸着した界面活性剤が脱離する際の共同性が重要であることも示唆されている [4, 5] (Fig. 1(a))。これはマイクロエマルジョンのような界面活性剤の巨大な会合体が界面で生成する場合、界面活性剤の油水界面からの脱離が共同的になる必要があるとの提言である。一方実験的に

懸滴系 [6] や能動的に運動する液滴系 [7-9] での顕微鏡観察により界面近傍で会合体が生成していることが示されている。更に、積極的にこのような界面活性剤の会合体生成を仮定し、会合体の構造が溶媒中の溶質に影響されることから、油水界面の揺動を化学センサーへと応用することも試みられていた [4]。

このように、マランゴニ効果に加えて重要であると考えられる会合体の生成であるが、現在まで会合体の生成様相、



**Figure 1** (a) Interfacial instability observed in oil-water-surfactant system and its mechanism: Marangoni convection roll, and collective desorption of surfactant due to aggregate formation. (b) The manner of aggregate formation with PA (bar with red circle) and TSAC (bar with white circle). (c) Motion of 500  $\mu\text{L}$  – oil droplet on an aqueous surface ( $C_s = 20$  mmol/L and  $C_p = 10$  mmol/L). Scale: 10 mm. (b) is adapted with permission from [23], copyright (2016) American Chemical Society. (c) is reproduced from [21] with permission from the Royal Society of Chemistry.

特にその nm- $\mu$ m の構造をその場で観察することはほとんどなされていない。興味のある界面運動は mm-cm のマクロな現象であるため微小スケールの会合体構造と界面運動を同時観察するには、顕微鏡観察と小角散乱実験の同時測定が一つの手段となり得る。また、このような会合体生成過程の時間スケールは s から min 程度である。そのため会合体生成過程と界面運動を観察するには、高輝度のビームを用いた小角散乱実験が必要となる。本報告では、会合体の生成が主要な要因となる油水系に関して、小角中性子散乱 (SANS) と小角 X 線散乱 (SAXS) を用い油水界面運動が生じている条件をその場観察することで、会合体が生成すること、更には会合体が生成直後に構造転移を示していることが明らかとなったので、その様子を報告する。

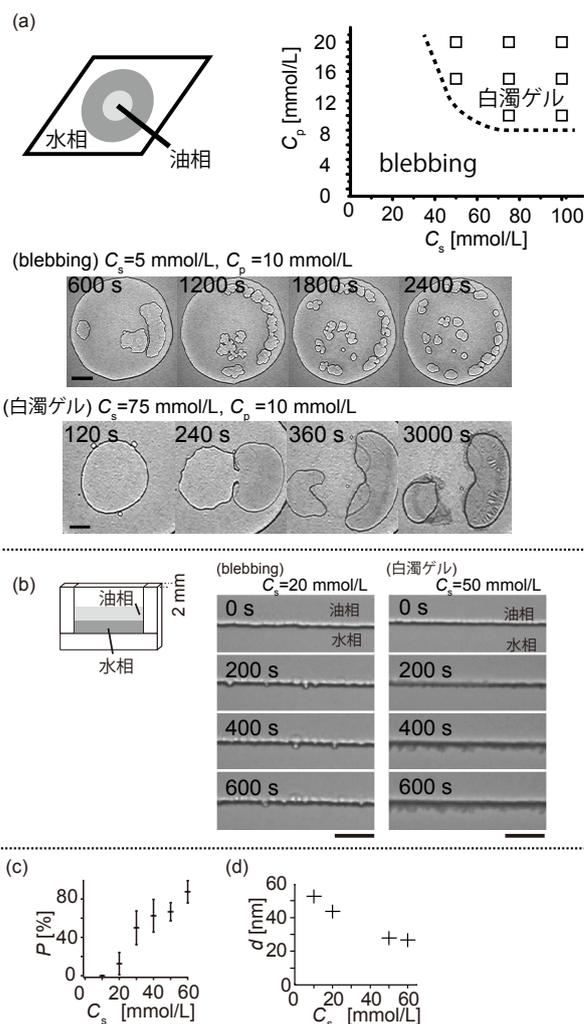
## 2. Bleb 運動する液滴と $\alpha$ ゲル生成と構造転移

本稿では界面揺動と共に界面上で nm- $\mu$ m スケールの会合体生成が実際に確認された系として、油水界面が bleb 運動を示す 4 元系を紹介する。この系では、油相としてテトラデカンにパルミチン酸 (PA) を混合したものを用い、水相には陽イオン性界面活性剤である塩化ステアリルトリメチルアンモニウム (TSAC) を混合したものを用いる。以降、初期の油相の PA 濃度を  $C_p$ 、水相中の TSAC 濃度を  $C_s$  と示す。初期条件での水相は TSAC 濃度が CMC 濃度より高い状態であり、TSAC の球状ミセルが水溶液中にできていることが確認されている。また、PA と TSAC のような中性両親媒性分子とイオン性の界面活性剤を水相中で混合すると、 $\alpha$  ゲルと呼ばれる弾性を持つ会合体が生成することが知られている [12-16]。つまり、この系では初期に油相に混合されている PA が、油水界面を通じて水相側に移行し、水相中の TSAC からなるミセルが PA を取り込んで会合体を生成すると容易に予想される (Fig. 1(b))。実際に、油相・水相を接触させた様子を示したものが (Fig. 1(c)) である。このように、油水界面では会合体が連続的に生成し続ける一方、油水界面が円弧状の変形を進展・収縮させることが示された (bleb 運動)。更に油相を液滴として水面に浮かべると、初期の誘導時間の後、油滴はアメーバ状の運動を示すことも示された [17]。

重要な点として、以上の界面運動が見られる条件でバルク中での対流構造は存在しないことが明らかとなっている。また近年の小角 X 線散乱実験により、生成した会合体は繰り返し距離  $d$  がおよそ 40 nm であるラメラ型の構造を持つ  $\alpha$  ゲルであることも示されている [17]。以上より、本系は会合体生成が主要な要因となって運動する油水系となっていることが示されているといえる。このように会合体の生成のみからマクロな運動を取り出している例として、リステリアに代表される一部の微生物があげられる [18]。寄生生物であるリステリアは周囲にアクチン単量体をゲル化する酵素をもち、寄生宿主の細胞内部に存在するアクチンの単量体をゲル化する。アクチンゲルは、リステリアの近傍でのみ定常的に生成するため、生成が進むと以前から存在するゲルは新たにできたゲルにより外部へ押し出され

てしまう。このようにして外部に押し出されたゲルは生成時に比べ進展されているため内部応力が生じリステリアの運動につながる [19]。そこで、本 4 元系での界面運動がリステリアと同様の機構で生じていることが一時提唱された [20, 21]。このモデルは、bleb サイズが液滴サイズに 1/2 乗程度で依存することを説明するなど、ある程度の実験との一致が見られていた。

ところが、以上のモデルに対して、典型的な物性値をもちいて実験と比較するとモデルとの齟齬があることが明らかとなった。このような変形を生み出すために必要な圧力はラプラス圧  $\gamma/r$  で議論ができる。このことから、変形サイズ  $r$  を mm、表面張力  $\gamma$  を 10 mN/m、とすると変形を



**Figure 2** (a) The region of the white gel formation. The phase diagram with square symbol shows the parameter where white gel was observed. As seen in the snapshots, the blebbing motion stops when white gel appears. Scale: 10 mm. (b) The manner of blebbing motion and appearance of white gel in a thin cell. Scale: 5 mm. (c) The appearance rate of white gel,  $P$ , with respect to  $C_s$ , where  $C_p$  is 20 mmol/L. (d) The repeat distance,  $d$ , of lamellar structure when blebbing motion was observed [22]. (a) is adapted with permission from [17], copyright (2009) American Chemical Society. (b, c) are adapted with permission from [23], copyright (2016) American Chemical Society.

生み出すのに必要な圧力は 10 Pa 程度である。一方、弾性体の引き延ばしが生み出す圧力はおよそ、 $B(h/r)^2$  で考えられる。ここで、会合体のヤング率  $B \sim \text{kPa}$ 、会合体の厚み  $h \sim 10^{-3} \text{ mm}$ 、液滴サイズ  $r \sim 1 \text{ mm}$  を用いると会合体生成の生み出す圧力は  $10^{-3} \text{ Pa}$  程度と桁違いに小さい。更に、界面活性剤濃度の高い領域では、マクロに様相の異なる白濁した会合体が生成し、界面運動が制止することも観察されていた (Fig. 2(a))。このことから、界面活性剤の会合体は単純な弾性体として振る舞うのみならず、生成時あるいはその前後において、何らかの力学生成につながる過程を示すことが想定される。

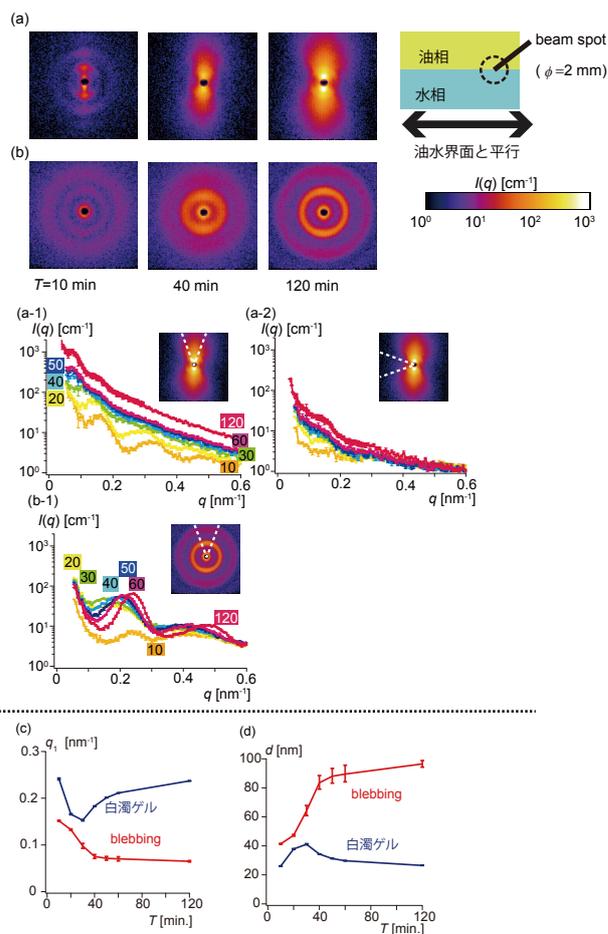
以上のような白濁ゲル生成は、擬 2 次元的なセル内部でも観察された。その様子を Fig. 2(b) に示す。Fig. 2(b) に示すように、 $C_p = 20 \text{ mmol/L}$ 、 $C_s = 20 \text{ mmol/L}$  の条件では定常的に bleb 運動が観察されたのに対して、 $C_p = 20 \text{ mmol/L}$ 、 $C_s = 50 \text{ mmol/L}$  の条件では界面近傍が白濁したゲルにより覆われ、運動が停止した。また白濁ゲルの生成は確率的で有り、白濁ゲルの生成率を  $P$  とすると、 $C_p = 20 \text{ mmol/L}$ 、 $C_s = 50 \text{ mmol/L}$  の条件では 60 % 程度であった (Fig. 2(c))。

このような状況のもと、過去には、SAXS を用いた界面活性剤会合体の構造解析が行われていた。この際、水相側の界面活性剤濃度をパラメータとして観察することで (Fig. 2(d)) のように、bleb 運動が見られる条件において、濃度が高いほどラメラ (Fig. 1(b)) の繰り返し距離が小さくなることが示されていた。ところが、界面運動が静止する条件と bleb 運動が見られる際の会合体の様子に関しては、特にその違いが見いだされていなかった。つまり、ラメラ構造を持つ  $\alpha$  ゲルの生成は bleb 運動の必要条件ではあったが、十分条件とはいえない状況にあった。そこで本研究では界面運動が静止する条件と bleb 運動が見られる条件に関して、マクロな界面運動と SANS あるいは SAXS の同時観察を行うことで bleb 運動に必須となる会合体の時系列ダイナミクスを探った [23]。

### 3. 実験系

TSAC および PA は東京化成より購入したものをそのまま用いた。また水相の溶媒としては小角中性子散乱を行うことを念頭に、重水を用いた。また、油相としてはテトラデカンを溶媒として用いた。油相の PA の初期仕込み濃度は  $20 \text{ mmol/L}$  で固定した。また水相の TSAC の初期仕込み濃度は、bleb 運動が継続的に ( $\sim 15 \text{ h}$ ) 観察される  $20 \text{ mmol/L}$  (bleb 条件) と白濁したゲルが生成し運動が停止する  $50 \text{ mmol/L}$  (停止条件) を用いた。ここで本研究では  $50 \text{ mmol/L}$  は停止条件として用いているが、過去には bleb 運動を見る濃度条件として用いている点に注意してほしい。これは、白濁ゲルが生成し運動が停止することが確率的に起こるためである。

SANS 観察はオークリッジ国立研究所の High Flux Isotope Reactor の CG-2 を用いた。この際、波長は  $6 \text{ \AA}$ 、サンプル位置でのビーム径は  $2 \text{ mm}$  であった。セルとしては厚さ  $2 \text{ mm}$  の石英セルを用いた。 $300 \mu\text{L}$  の水相を導入した



**Figure 3** SANS pattern obtained near the oil-water interface when (a) blebbing motion was observed, and (b) white gel was observed. The sector average of SANS pattern in (a-1) perpendicular and (a-2) parallel direction to the interface when the blebbing motion appeared. The sector average of SANS pattern in perpendicular direction when the interface was covered by the white gel (b-1). (c) The position of the first peak,  $q_1$ , in the perpendicular direction, with blebbing interface (red) and the interface covered with the white gel (blue). (d) The repeat distance calculated by  $d = 2\pi/q_1$ , with blebbing interface (red) and the interface covered with the white gel (blue). Adapted with permission from [23], copyright (2016) American Chemical Society.

後、界面近傍にビーム位置を調整し、その後  $150 \mu\text{L}$  の油相を上方に導入し時系列的に小角散乱像を得た。

SAXS 観察は、高エネルギー加速器研究機構、Photon Factory の BL-6A を使用した。サンプル位置でのビームサイズは  $0.25 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$  であった。セルとしては、厚さ、幅、高さがそれぞれ  $2 \text{ mm}$ 、 $40 \text{ mm}$ 、 $25 \text{ mm}$  の側壁をポリイミドフィルムとしたアクリルセルを用いた。 $600 \mu\text{L}$  の水相を導入した後、 $300 \mu\text{L}$  の油相を上方に導入し、界面運動が始まってから 30 分後に、油水界面近傍の水相にビームを照射し小角散乱像を得た。

### 4. SANS 観察による濃度依存性

中性子散乱実験の結果を (Fig. 3(a,b)) に示す。bleb 条件 (Fig. 3(a)) と停止条件 (Fig. 3(b)) のそれぞれにおいて

油水界面接触から 10 分後にはラメラ構造に由来する周期的なリングパターンが得られた。この際の第一ピークの位置は bleb 条件で運動量遷移  $q = (0.152 \pm 0.001) \text{ nm}^{-1}$ 、停止条件で  $(0.241 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$  であった。この第一ピークの位置から推定される bleb 条件でのラメラの繰り返し距離は  $(41.4 \pm 0.4) \text{ nm}$  であり過去の文献値 [22] と一致している。また停止条件で見られたラメラの繰り返し距離は  $(26.0 \pm 0.2) \text{ nm}$  であり、停止条件の濃度で確率的に bleb 運動が見られる際のラメラの繰り返し距離とこちらも一致している。このことから、25-40 nm 程度の繰り返し距離をもつラメラ構造は界面運動とは無相関に現れることがわかった。

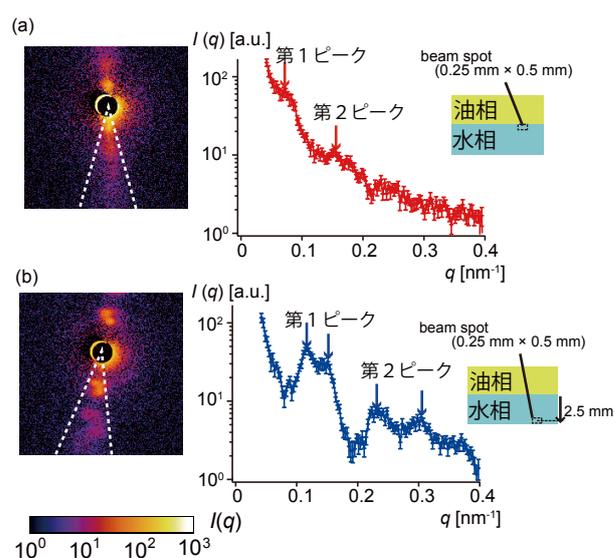
一方、油水界面接触から 10 分後以降の SANS パターンの動的振る舞いは、bleb 条件と停止条件で大きく異なっていた。bleb 条件においては、油水界面と垂直方向に強い散乱が見られるバタフライ型のパターンが現れたのに対し、停止条件においてはリング型の円環対称のあるパターンが引き続き見られた。このようなパターンの対称性の著しい違いは Fig. 3(a,b) に表れている。停止条件で得られた sector 平均図 (Fig. 3(b-1)) は界面と平行・垂直方向で得られた強度と  $q$  のグラフに大きな差異が見られないのに対し、bleb 条件 (Fig. 3(a-1,2)) においては平行・垂直方向で全く異なる散乱パターンが得られている。また、時系列変化に着目すると停止条件においては界面と平行・垂直の双方の向きで第一ピーク位置は一時的に小さな  $q$  へ変化するものの、油が接触後 30 分以降は定常的に広角側へと移動し、最終的に  $(0.2371 \pm 0.0003) \text{ nm}^{-1}$ 、ラメラの繰り返し距離としては  $(26.50 \pm 0.03) \text{ nm}$  で定常値をとった。一方、bleb 条件では平行・垂直方向ともに単調に第一ピーク位置が低角側へと移動した。界面と平行方向に関しては  $(0.13 \pm 0.03) \text{ nm}^{-1}$ 、繰り返し距離としては  $(49 \pm 18) \text{ nm}$  に値が収束したのに対し、界面と垂直側の散乱パターンは  $(0.065 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$ 、繰り返し距離としては  $(96 \pm 2) \text{ nm}$  の値に収束した (Fig. 3(c, d))。停止条件のラメラ構造に見られる繰り返し距離や、bleb 条件でも界面と平行方向のラメラ構造の繰り返し距離は過去の SAXS 観察と同程度の結果であった。一方、bleb 条件での界面と垂直方向のラメラの繰り返し距離は 2 倍程度であり、異なるラメラ構造が生み出されていることが示唆された。このような過去の研究で見いだされなかった長周期のラメラ構造が発見された理由はビーム径の違いに起因した観察領域の違いがあげられる。そもそも、油水界面は bleb 条件においては 1 mm 程度の bleb 運動を示す上、過去の SAXS を用いた研究ではビーム直径が  $5 \mu\text{m}$  程度であったため、水相中を確実に観察する目的で油水界面から 2 mm 程度離れた水相中を観察していた。このため、油水界面直上の領域での会合体の様相は観察されていなかった。ところが、今回の SANS 観察ではビームの中心を油水界面に設定し油水界面直上領域での会合体を観察したため、長い繰り返し周期をもつラメラ構造が観察されたと考えられる。

## 5. SAXS 観察による位置依存性

以上の推論を確認するため、本研究では更に高分解能で試料の時間空間的領域を観察が可能である SAXS を用い bleb 条件において長周期ラメラ構造を確認した。ここでは油水界面近傍の会合体から SAXS 像を得るため、あらかじめ水相を導入した際の気水界面の反射が見られる位置を高さ 0 として基準とし、その後油相を上方に導入した後、油水界面の位置により近いと考えられる場所で観察を繰り返し行った。その結果を (Fig. 4(a, b)) に示す。このように、油水界面近傍と想定される部分では、第一ピークの位置が  $(0.071 \pm 0.003) \text{ nm}^{-1}$ 、 $(89 \pm 4) \text{ nm}$  の繰り返し距離をもつラメラ構造が観察された。このことから、油水界面近傍においては、長周期ラメラ構造が確かに存在することが示された。また油水界面近傍より 2 mm 程度水相側で得られた SAXS 像は第一ピークの位置が  $(0.118 \pm 0.001) \text{ nm}^{-1}$ 、あるいは  $(0.144 \pm 0.002) \text{ nm}^{-1}$  とそれぞれ繰り返し距離が、 $(53.5 \pm 0.5) \text{ nm}$ 、 $(43.6 \pm 0.7) \text{ nm}$  に対応するラメラ構造のものが得られた。このことより、bleb 条件において油水界面直上で繰り返し距離が長いラメラ構造が存在するものの、水相中ではそのようなラメラ構造が存在しないことが確認できた。

## 6. 構造変化と bleb 運動

以上の結果より、油水界面が bleb 運動を示す状態では 100 nm 程度の繰り返し距離を持つ長周期ラメラ構造が油水界面上で観察されることが示された。一方、以前は bleb 運動を示す条件として考えられていた、25-40 nm 程度の繰り返し距離を持つ短周期ラメラ構造は停止条件でも観察されることが再確認された。以上のことは、ラメラ構造の長周期から短周期への転移が油水界面の bleb 運動の必要条件であることが示唆される結果となった。また、運動停止



**Figure 4** SAXS image obtained from (a) near the blebbing oil-water interface, and (b) 2.5 mm away from the oil-water interface. Adapted with permission from [23], copyright (2016) American Chemical Society.

条件で見られる白濁ゲルは、油水界面近傍で一度生成すると油水界面近傍を覆い尽くすことから、停止条件においては短周期ラメラ構造が油水界面上で最安定な構造であり、長周期ラメラ構造は準安定であることも想定される。換言すると、bleb条件においては長周期ラメラ構造が油水界面上で安定して生成すること、またbleb条件・停止条件双方ともに水相中では短周期ラメラ構造が唯一の安定構造であることが考えられる。

このようなnm- $\mu$ mスケールの会合体の転移が、いかにしてmmスケールの界面運動と結びつくかに関しては依然として推論の域を出ない。しかしながら、あえてその機構を考察すると、長周期ラメラ構造が短周期ラメラ構造に比して構造中の水の含有率が大きいことが重要であると考えられる。長周期ラメラ構造が短周期ラメラ構造に転移する際、構造中から水が追い出され、ゲルとしては収縮すると考えられる。すると、長周期ラメラ構造を基本単位とするゲルは生成直後に界面から離れる際急速に収縮し、能動的に応力を生み出すと思われる。このような視点から考えると、本研究のラメラ構造からなるゲルは構造転移をエネルギー源とした能動ゲル[24]の一種と考えられると期待される。

## 7. まとめ

油水系において界面の振動現象や、界面の自発運動を観察した過去の研究では、主にマランゴニ効果に起因する対流構造が重要であると考えられてきた。しかしながら、この発想で考えると比較的広範な油水系において、界面揺動やその応用である液滴の運動が見られることが期待されるのに対して、現実はかなり限られた実験系でのみ界面揺動や液滴の運動が見られてきた。興味深いことに、実験的な観察や理論的な観点からも界面近傍での会合体生成が油水系の界面運動のもう一つの鍵であることが強く示唆されていた。そこで本研究では、 $\alpha$ ゲルが生成する油水系を用いて会合体の生成過程が鍵となり界面運動を生み出す系を構築した。更に、その会合体生成過程を詳細にSANSおよびSAXS観察することで、会合体の構造転移が界面運動の必要条件であることを見いだした。会合体の構造転移は、ラメラ構造の長周期から短周期への急峻な変化を伴っており、ラメラ構造を基本単位とする $\alpha$ ゲルが収縮するのではないかと考えられる。このような収縮が実際に発生すると、能動的な応力生成をすることから、本系は能動ゲルの一種となっていることが期待される。これらの推察を明らかにするには、nm- $\mu$ mの構造と、その上位構造である $\mu$ m-mmの構造の関連性を明らかにする必要がある。

## 8. PFへの提言

本研究では、観察できるビーム径が重要であった。また観察しているビームスポット位置の同時観察もできるとより正確な議論が行える。つまり、ビーム径の制御、およびその観察領域の実体顕微鏡観察を並行して行えることが望ましいと思われる。このことが実現されれば、不均一で時

間変化する対象に関して小角散乱実験を行うグループによって共通して利益が生じるとと思われる。

## 引用文献

- [1] M. Dupeyrat and E. Nakache, *Bioelectrochem. and Bioenerg.* **5**, 134 (1978).
- [2] L. E. Scriven and C. V. Sterling, *Nature* **187**, 186 (1960).
- [3] V. I. Kovalchuk, H. Kamusewitz, D. Vollhardt, and N. M. Kovalchuk, *Phys. Rev. E* **60**, 2029 (1999).
- [4] K. Yoshikawa, and Y. Matsubara, *J. Am. Chem. Soc.* **105**, 5967 (1983).
- [5] S. Kai, E. Ooishi, and M. Imasaki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **54**, 1274 (1985).
- [6] T. Ban, Y. Hatada, and K. Takahashi, *Phys. Rev. E* **79**, 031602 (2009).
- [7] M. M. Hanczyc, T. Toyota, T. Ikegami, N. Packard, and T. Sugawara, *J. Am. Chem. Soc.* **129**, 9386 (2007).
- [8] S. Thutupalli, R. Seemann, and S. Herminghaus, *New J. Phys.* **13**, 073021 (2011).
- [9] Z. Izri, M. N. van der Linden, S. Michelin, and O. Dauchot, *Phys. Rev. Lett.* **113**, 248302 (2014).
- [10] S. Yabunaka, T. Ohta and N. Yoshinaga, *J. Chem. Phys.* **136**, 074904 (2012).
- [11] N. Yoshinaga, K. H. Nagai, Y. Sumino, and H. Kitahata, *Phys. Rev. E* **86**, 016108 (2012).
- [12] M. Yamaguchi and A. Noda, *Nippon Kagaku Kaishi* **1989**, 26 (1989).
- [13] C. C. Ho, R. J. Goetz, M. S. El-Aasser, J. W. Vanderhoff, and F. M. Fowkes, *Langmuir* **7**, 56 (1991).
- [14] Y. Yamagata, and M. Senna, *Colloids Surf. A* **132**, 251 (1998).
- [15] Y. Yamagata, and M. Senna, *Langmuir* **15**, 4388 (1999).
- [16] Y. Yamagata, and M. Senna, *Langmuir* **15**, 7461 (1999).
- [17] Y. Sumino, H. Kitahata, H. Seto, S. Nakata, K. Yoshikawa, *J. Phys. Chem. B* **113**, 15709 (2009).
- [18] L. G. Tilney and D. A. Portnoy, *J. Cell Biol.* **109**, 1597 (1989).
- [19] K. Sekimoto, J. Prost, F. Jülicher, H. Boukellal, and A. Bernheim-Grosswasser, *Euro. Phys. J. E*: **13**, 247 (2004).
- [20] Y. Sumino, H. Kitahata, H. Seto, and K. Yoshikawa, *Phys. Rev. E* **76**, 055202 (2007).
- [21] Y. Sumino, H. Kitahata, H. Seto, and K. Yoshikawa, *Soft Matter* **7**, 3204 (2011).
- [22] Y. Sumino, H. Kitahata, Y. Shinohara, N. L. Yamada, and H. Seto, *Langmuir* **28**, 3378 (2012).
- [23] Y. Sumino, N. L. Yamada, M. Nagao, T. Honda, H. Kitahata, Y. B. Melnichenko, and H. Seto, *Langmuir* **32**, 2891 (2016).
- [24] K. Kruse, J. F. Joanny, F. Jülicher, J. Prost, and K. Sekimoto, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 078101 (2004).

(原稿受付日：2016年12月26日)

## 著者紹介

住野豊 Yutaka SUMINO



東京理科大学理学部応用物理学科 講師

〒125-8585 東京都葛飾区新宿 6-3-1

TEL: 03-5876-1393

FAX: 03-5876-1393

e-mail: ysumino@rs.tus.ac.jp

略歴：2009年京都大学理学研究科博士課程修了，2009-2011年学術振興会特別

研究員 PDとして東京大学工学系研究科に在籍，2011-2012年愛知教育大学教育学部助教，2013年同講師，2014年より現職。博士（理学）。

最近の研究：ソフトマターを用いた生命・地球・産業プロセスの模倣と理解。

山田悟史 Norifumi YAMADA



高エネルギー加速器研究機構 助教

〒319-1111 茨城県那珂郡東海村白方 203-1

TEL: 029-284-4272

FAX: 029-284-4899

e-mail: norifumi.yamada@kek.jp

略歴：2005年3月広島大学生物圏科学

研究科博士課程後期満了（2005年12月学位取得），2005年より高エネルギー加速器研究機構で研究員，特任助教を経た後，2009年より現職。博士（学術）。

最近の研究：X線・中性子線を用いたソフトマター物理（特に生体模倣膜），および中性子装置の開発

長尾道弘 Michihiro NAGAO



Department of Physics, Indiana University

Associate Scientist

Address: NCNR, National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Dr.,

Gaithersburg, MD 20899-6102, USA

tel: +1-301-975-5505

e-mail: mnagao@indiana.edu

略歴：1997年広島大学生物圏科学研究科博士後期課程退学。1997-2006年東京大学物性研究所助手。2006-2010年 Indiana University, Staff Scientist 及び National Institute of Standards and Technology, Guest Researcher。2010年より現職。引き続き NIST, Guest Researcher。博士（理学）。

最近の研究：中性子散乱によるソフトマターの構造と運動。