

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 16 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23340124

研究課題名(和文) ずり流動場下におけるオニオン相の形成条件と転移機構

研究課題名(英文) Conditions and mechanism for onion formation under shear flow

研究代表者

加藤 直 (Kato, Tadashi)

首都大学東京・理工学研究科・教授

研究者番号：30142003

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,500,000円、(間接経費) 4,650,000円

研究成果の概要(和文)：界面活性剤と水が作るラメラ相が、ずり流動場によりオニオン相に転移する現象は、多くの系で見出されているが、オニオン相の形成条件や転移機構については不明の点が多い。本研究では、X線小角散乱/ずり応力同時測定により、オニオン相の温度領域に上限と下限が存在することを初めて見出し、これまではそれらの片方のみが観測されていたことを示した。またこのような上限・下限温度の存在を説明するために、多面体オニオンの弾性エネルギーを与える式を導いた。さらに、上限温度と下限温度それぞれの近傍におけるラメラからオニオン、オニオンからラメラへの4通りの転移過程において、ラメラ膜の配向変化が同じ道筋を辿ることを見出した。

研究成果の概要(英文)：Although shear-induced lamellar-to-onion transition has been found for many surfactant/water systems, conditions of onion formation and transition mechanism are still unclear. In this study, we have found for the first time that there exist both upper and lower limits for the temperature range of onion formation and that only one of them has been observed so far. We have also derived an expression of the elastic energy for the polyhedral onions to explain the existence of these upper and lower temperature limits. Furthermore, we have found that the change in the orientation of lamellae follows the same path in all the four kinds of transition processes, i.e., the lamellar-to-onion and onion-to-lamellar transitions near the upper and lower temperature limits.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 生物物理・化学物理

キーワード：メソスコピック系 リオトロピック相 物性実験 物性理論 レオロジー 界面活性剤 X線小角散乱  
ラメラ相

1. 研究開始当初の背景

界面活性剤・脂質・ブロック共重合体などの両親媒性分子は、濃度・温度・添加物・重合度などの諸条件に応じてリोटロピック相と呼ばれる秩序構造を形成する。一般にソフトマターは低分子に比べてはるかに遅い運動モードを有するため、 $10^{-3} \sim 10^3$  s 程度の時間スケールで変化する外場によりその構造が影響を受ける。ずり流動場はこのような外場の一つであるが、攪拌・振とう・摩擦などの身近な操作で生じるため、その効果に関する研究は、多方面から期待されている。リोटロピック相は、ソフトマターに共通した特徴に加えて、構成単位自体が分子集合体であり、かつ長距離秩序を有するという特徴を持つため、ずり流動場によりしばしば劇的な相転移や構造転移を起こす。

リोटロピック相の一種であるラメラ相が「オニオン相」に転移する現象は、20年近く前に見出されて以来、多くの研究者の注目を集めている。オニオン相は、数百～数千枚の膜が閉じた多重膜ベシクルのみで充填されているため(図1)、ラメラ相より1～3桁も高い粘度を持つ。現在までに種々の系でオニオン相の形成が報告されており、また薬物輸送システムや化学反応への応用も試みられている。しかし、オニオン相の形成条件や転移機構については、以下に述べるように不明の点が多く残されている。

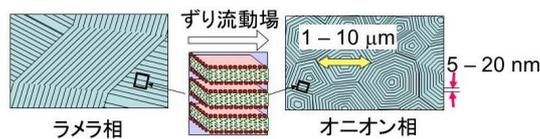


図1 ラメラ相とオニオン相

(1) オニオン相の形成条件

最初にオニオン相を発見した Roux のグループは、オニオン相が形成されるずり速度と界面活性剤濃度の範囲を調べ、これらを変数とする「動的相図」を作成した。一般に、ずり流動場がない状態(静止状態)における孤立膜の安定性は、膜の弾性率により議論されており、イオン性界面活性剤の場合、添加する co-surfactant や無機塩の濃度に大きく依存する。したがって、オニオン相の形成条件を系統的に調べるためには、これらの添加物濃度を変数に加えた動的相図が必要となるが、そのような相図が報告されている系は、これまでに1つしかない。

非イオン界面活性剤  $C_nH_{2n+1}(OC_2H_4)_mOH$  ( $C_nE_m$ ) と水の2成分系は、静止状態において、温度変化のみにより種々のリोटロピック相に転移する。これは、 $(OC_2H_4)_m$  基の conformation が温度に大きく依存し、集合体の表面曲率を変化させるためと考えられている。同様の理由で膜の弾性率も温度に大きく依存するので、 $C_nE_m$  系における温度は、イオン性界面活性剤系の添加物濃度と同等な

役割を果たす重要な変数となる。温度を連続的に変化させることは容易であり、また静電相互作用を考慮する必要がないため、オニオン相の形成条件や転移機構を調べる上で、 $C_nE_m$  系はより有用な系と言える。これまでに、 $C_{10}E_3$  系および  $C_{12}E_4$  系において、温度とずり速度を変数とする動的相図が作成されており、一定ずり速度下で温度を下降させるとラメラ オニオン転移が起こることが報告されている。これに対して、我々は本研究開始以前に、一定ずり速度下の温度上昇に伴いラメラ オニオン転移が起こることを、 $C_{16}E_7$  系において初めて見出した。 $C_nE_m$  系の場合、静止状態において、平坦な膜に対するベシクルのエネルギーは温度下降により下がることが知られており、 $C_{10}E_3$  系の転移もこれにより説明されている。しかし我々が  $C_{16}E_7$  系で見出した転移は、温度上昇により起こるため、このような孤立膜の性質では説明できない。すなわちオニオン相の形成条件としてこれまで考慮されていない因子があり、それを明らかにすることが必要となる。

(2) 転移機構

ラメラからオニオンへの転移の機構については、大きく分けて2つの機構が提案されている。Zilman と Granek は、ずり流動場により膜を伸長させる力が生じ、これが空間的に妨げられるために、多数の膜が  $\mu m$  スケールで波打つ “coherent buckling” が起こり、オニオン相に至るというモデルに基づく理論を提案している。Richtering のグループは、 $C_{10}E_3$  系の一定温度・ずり速度下の中性子小角散乱により、coherent buckling または多重膜円筒の存在を示唆する結果を得ている。我々は、 $C_{16}E_7$  系の転移温度付近におけるずり応力/X 線小角散乱同時測定 (Rheo-SAXS) により、やはりこれらの存在を示唆する結果を得たが、さらにその直前に速度勾配方向への配向が促進されることを初めて見出した。これは coherent buckling を裏付ける結果と言える。しかし、Zilman と Granek の理論により計算される転移に必要な臨界ずり速度は、実験値より  $10^3 \sim 10^6$  倍も大きい。

もう1つの機構は、ラメラ相中に元々存在する多くの欠陥がずり流動場によりオニオン相に発展するという考え方である。Roux らは、刀状転位と呼ばれる欠陥がずり流動に追従できなくなるとオニオン相に転移すると考えた。しかしこの場合の臨界ずり速度は  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  と逆に実験値よりかなり遅くなってしまい、定量的な議論が成り立たない。一方 Focal Conic Domain (FCD) と呼ばれる欠陥は多重膜ベシクルに類似した構造を持つ。したがって、FCD がオニオン相に変化する可能性もある。ただしオニオン相を構成する多重膜ベシクルのサイズは FCD に比べてはるかに小さい。

## 2. 研究の目的

前節で述べたように、これまでの研究から、オニオン相の形成条件に関して考慮されていない因子があることは明らかである。この因子を明らかにするためには、温度、濃度、ずり速度を変数とする動的相図を作成する必要がある。我々は、本研究開始直前に、 $C_{14}E_5$ 系において、温度上昇・下降の両方によるオニオンへの転移、すなわち温度変化に伴うラメラ オニオン ラメラ転移(リエントラント転移)を示唆する実験結果を得た。このことから、一般にオニオン相はラメラ相中の特定の温度範囲でのみ形成され、これまで観測されていたのは高温側か低温側のいずれかの転移のみではないかという推測が成り立つ。したがって、この系の動的相図を作成することは、オニオン相の形成条件の確立につながると考えられる。

転移機構についても、先に述べたように依存として未解明のままである。さらに、これまで提案されている機構はラメラ オニオン転移に対応するものであり、逆過程すなわちオニオン ラメラ転移には適用できない。

以上のことを踏まえ、本研究では以下の3点を目的とした。

(a) 我々が初めて見出した、ずり流動場下の温度上昇に伴うラメラ オニオン転移を支配する要因を調べ、オニオン形成条件としてこれまで考慮されていない因子を明らかにする。

(b) 温度変化に伴うリエントラントラメラ/オニオン転移を示す系について、界面活性剤濃度、温度、ずり速度を変数とする動的相図を作成し、これを再現する理論を構築する。

(c) ラメラ オニオン転移およびオニオン ラメラ転移の両方について、転移過程における構造変化を追跡し、転移機構を解明する。

## 3. 研究の方法

オニオン相を構成する多重膜ベシクルの径は1 ~ 10  $\mu\text{m}$  のオーダーであり、一方これを構成する膜の間の距離は5 ~ 20 nm のオーダーであるので、これらの空間スケールをカバーするため、主な測定手段として、ずり応力/X線小角散乱同時測定(rheo-SAXS)とずり応力小角散乱同時測定(rheo-SALS)を用いた。これらの手法を用い、リエントラントなラメラ/オニオン転移を示す  $C_{14}E_5$ /水系を主な対象系として、動的相図の作製、オニオン相の形成条件解明のための理論構築、および転移過程における構造変化の追跡を行った。

## 4. 研究成果

### (1) オニオン相の形成条件

一定ずり速度下の温度変化に対するリエントラント転移と動的相図

図2に、 $C_{14}E_5$ /水系ラメラ相(50 wt%)において、一定ずり速度( $3 \text{ s}^{-1}$ )下で測定した2次元 SAXS パターン(a, b)、ずり応力(c)の温

度依存性を示す。図中に、測定に用いた二重円筒セルにおける、流動方向(flow)、速度勾配方向(velocity gradient)、これら2方向に垂直なneutral方向と、これらの方向に積層する膜の方向(SAXSの回折ピークを与える膜の配向方向に対応)を示した。図2(d)に、これら3方向の回折ピーク強度の温度依存性を示す。低温側と高温側ではずり応力が低く、ほとんどのラメラ膜は速度勾配方向に積層しているのに対して、中間の温度領域ではずり応力が1~2桁高くなり、膜の積層方向が等方的になることがわかる。これらの結果は温度上昇に伴いラメラ オニオン ラメラとリエントラント転移が起こることを示している。

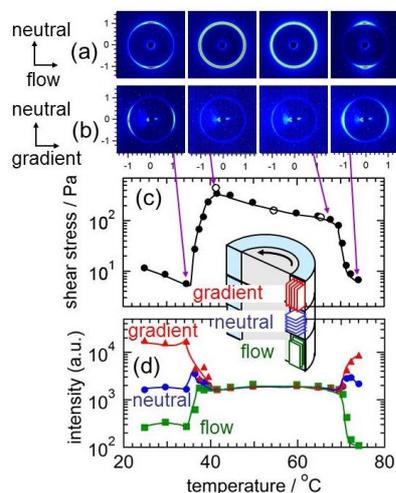


図2  $C_{14}E_5$ /水系のラメラ相(50 wt%)の一定ずり速度( $3 \text{ s}^{-1}$ )下における2次元SAXSパターン(a, b)、ずり応力(c)と各方向の回折ピーク強度(d)の温度依存性。挿入図は、二重円筒セルの断面と各方向の回折ピーク強度を与える膜の積層方向を示す。

図3(a)に  $C_{14}E_5$ /水系の静止状態の相図の一部を示す。色を塗った領域全体がラメラ相で、ずり速度  $3 \text{ s}^{-1}$  におけるずり応力測定および rheo-SAXS 測定から得られたラメラ、オニオン、および中間状態の濃度・温度領域を、色分けして図中に示した。図から、界面活性剤濃度が高くなるとオニオン相は形成されないこと、オニオン相の温度領域は界面活性剤濃度の増大と共に縮小することがわかる。

界面活性剤濃度 50 wt%において、ずり応力の温度依存性を異なるずり速度において行うことにより、図3(b)に示した温度-ずり速度相図を得た。この図から、オニオン相の温度領域は、ずり速度の減少と共に縮小することがわかる。

研究の背景の項で述べたように、これまでに  $C_{10}E_3$ 系において、一定ずり速度下で温度を下降させるとラメラ オニオン転移が起こることが報告されており、一方我々は一定ずり速度下の温度上昇に伴いラメラ オニオン転移が起こることを、 $C_{16}E_7$ 系において初め

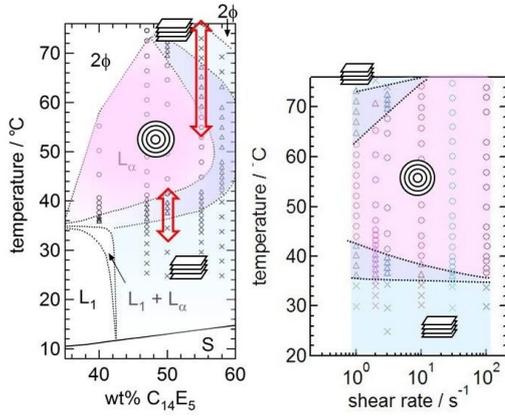


図3 (a)  $C_{14}E_5$ /水系の静止状態の相図 ( $L_1$ : ミセル相,  $L_\alpha$ : ラメラ相, S: 水和固体相,  $2\phi$ : 2相共存領域)とずり速度  $3\text{ s}^{-1}$  における温度-濃度動的相図。○: ラメラ領域, ×: オニオン領域, □: 中間領域。ブロック矢印は、図6の測定領域を示す。(b)  $C_{14}E_5$ /水系ラメラ相 (50 wt%) の温度-ずり速度相図。記号の意味は(a)と同じ。

で見出している。これらの系の温度-ずり速度相図を図3(b)と比較すると、 $C_{10}E_3$ 系の相図は図3(b)の高温側に、 $C_{16}E_7$ 系の相図は低温側に類似していることがわかる。 $C_{10}E_3$ 系の転移温度は40付近に、 $C_{16}E_7$ 系の転移温度は70付近にあることを辺併せて考慮すると、一般にラメラ相からオニオン相に転移する温度領域には上限と下限が存在し、 $C_{10}E_3$ 系では上限のみが、 $C_{16}E_7$ 系では下限のみが観測可能な温度範囲内にあると考えられる。これまで  $C_{14}E_5$ 系が示すような温度変化に対するリエントラント転移がこれまで報告されていなかったのは、このためである。したがって、オニオン相の形成条件や転移機構を調べる上で、 $C_{14}E_5$ 系はより一般性を有する系と言える。

オニオン相の弾性エネルギーの温度依存性

ラメラ相からオニオン相への転移は静止状態では通常起こらないので、オニオン相の自由エネルギーはラメラ相に比べて高いことになる。しかし、一定ずり速度下においてオニオン相が形成される温度領域に上限と下限が存在するという我々の実験結果は、ラメラ相とオニオン相の自由エネルギー差が温度に依存することを示唆している。

オニオン相の内部は多重膜ベシクルのみで充填されているので、個々のベシクルは球形ではなく多面体と考えられ(図1), 実際それを支持する電子顕微鏡画像も一例報告されている。したがって、平坦なラメラ構造を基準とした場合の弾性エネルギーは、多面体の辺と頂点に蓄積される。辺部分については、スメクチック液晶の wall の取り扱いと同様に、次式で表される曲率半径  $r_w$  の曲面と見なすことができる。

$$r_w \approx \frac{\lambda}{\theta_\infty^2} \quad (1a) \quad \lambda \equiv \sqrt{\frac{K}{B}} \quad (1b)$$

ただし、 $K$  と  $B$  はそれぞれラメラ膜(多重膜)の曲げ弾性率と圧縮弾性率、 $2\theta_\infty$ は辺を挟む2つの面の角度である。我々は、頂点部分については半径  $r_w$  の球の一部として扱い、多面体オニオンの弾性エネルギーに対する以下の表式を導出した。

$$F(R) = N_{edge}F_{edge}(R) + N_{vertex}F_{vertex}(R) \quad (2a)$$

$$F_{edge}(R) = pR^2\sigma_{eff}\theta_\infty^3 \quad (2b)$$

$$F_{vertex}(R) = (2K + \bar{K})\pi qR\theta_\infty^2 \quad (2c)$$

$$\sigma_{eff} = \frac{3\pi k_B T}{8(d - \delta)^2} \quad (2d)$$

ただし、 $R$  は多面体と同じ体積の球の半径、 $F_{edge}$  と  $F_{vertex}$  はそれぞれ辺部分と頂点部分に蓄積される弾性エネルギー、 $p$  と  $q$  はオニオン1個当たりの辺と頂点の数、 $d$  と  $\delta$  はそれぞれラメラ繰返距離と二重膜の膜厚である。

$\sigma_{eff}$  は effective surface tension と呼ばれる。我々は  $C_{14}E_5$ /水系ラメラ相の静止状態において、幾つかの濃度で SAXS を用いてラメラ繰返し距離の温度依存性を測定し、(2d)式から  $\sigma_{eff}$  を求めた。結果を図4に示す。この図から、30 ~ 40において  $\sigma_{eff}$  が温度上昇と共に急激に減少し、その後ほぼ一定になることがわかる。(2b)式からわかるように、 $F_{edge}$  は  $\sigma_{eff}$  に比例するので、オニオン相の弾性エネルギーはこの温度領域で急激に減少することになる。図3の低温側の転移、すなわち一定ずり速度下の温度上昇によるラメラからオニオンへの転移は、 $F_{edge}$  の急激な減少によるものではないかと推測される。このような因子は、これまでオニオン相の形成条件として考慮されていなかったものである。

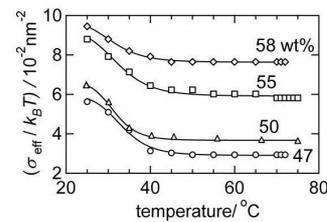


図4  $C_{14}E_5$ /水系ラメラ相の静止状態において測定したラメラ繰返し距離から求めた各濃度における effective surface tension の温度依存性。

一方、(2c)式から  $F_{vertex}$  は  $(2K + \bar{K})$  に比例することがわかる。 $K$  と  $\bar{K}$  は、それぞれ  $K = \kappa/d$ 、 $\bar{K} = \bar{\kappa}/d$  で、 $\kappa$  と  $\bar{\kappa}$  はそれぞれ二重膜の曲げ弾性率とサドルスプレイ弾性率である。これらの弾性率は、二重膜を構成する単分子膜の曲げ弾性率  $\kappa_m$ 、サドルスプレイ弾性率  $\bar{\kappa}_m$ 、自発曲率  $H_{0m}$  と以下の関係にあることが知られている。

$$\kappa = 2\kappa_m \quad (3a)$$

$$\bar{\kappa} = 2\bar{\kappa}_m - 2\delta H_{0m} \kappa_m \quad (3b)$$

非イオン界面活性剤の場合、自発曲率  $H_{0m}$  は温度上昇と共に減少し、その寄与は  $\kappa_m$  や  $\bar{\kappa}_m$  の温度変化に比べて大きい。したがって、温度上昇と共に  $\bar{\kappa}$  は増加し、 $(2K + \bar{K})$ 、したがって  $F_{\text{vertex}}$  も増加する。図3の高温側の転移、すなわち温度上昇によるオニオンラメラ転移は、 $F_{\text{vertex}}$  の増大によるものではないかと推測される。球状の多重膜ベシクルの弾性エネルギーも  $(2K + \bar{K})$  に比例することが知られており、 $C_{10}E_3$ 系および  $C_{12}E_4$ 系における一定ずり速度下の温度下降に伴うラメラオニオン転移は、同様に  $\bar{\kappa}$  の減少により説明されている。しかしこの因子だけでは低温側の転移を説明することができない。

温度上昇に伴い  $F_{\text{edge}}$  は減少し、 $F_{\text{vertex}}$  は増加するので、全弾性エネルギー  $F_{\text{total}}$  はある温度で極小値を取ることが予測される。この全弾性エネルギーがある臨界値  $F_{\text{total}}^*$  以下の温度領域でオニオンが形成されるとすれば、温度変化に伴うリエントラント転移を説明することができる。図5に  $F_{\text{edge}}$ 、 $F_{\text{vertex}}$ 、 $F_{\text{total}}$  の温度依存性を模式的に示した。

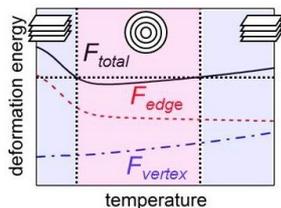


図5 平板ラメラを基準とした多面体オニオンの弾性エネルギーの温度依存性(模式図)。  $F_{\text{edge}}$ 、 $F_{\text{vertex}}$ 、 $F_{\text{total}}$  はそれぞれ多面体の辺、頂点、全体の弾性エネルギー。

$F_{\text{edge}}$  が低温側で急激に減少するため、 $F_{\text{total}}$  の極小を与える温度は、オニオンが形成される温度領域の低温側になる。このため、 $F_{\text{total}}^*$  が増大すると、オニオン相の上限温度は、下限温度に比べてより大きく変化することになる。ずり速度の増大と共に  $F_{\text{total}}^*$  が増大すると仮定すると、図3(b)の温度-ずり速度相図の特徴を良く説明することができる。

実際に  $F_{\text{total}}$  を求めるためには、(2)式に含まれる全てのパラメータの温度依存性が必要になる。またずり流動場の効果を直接理論に組み込む必要がある。これらは今後の課題である。

## (2) 転移機構

次に、低温側と高温側の転移温度近傍(図3ブロック矢印)において、rheo-SAXS測定を昇温・降温両過程で行った。図6(a)-(c)に低温側のずり応力(a)およびSAXS回折強度(b, c)の温度依存性を示す。昇温過程(ラメラオニオン転移)の回折強度(b)を見ると、ずり応力増大が起こる直前に速度勾配方向の強度が増大し、ずり応力が増大し始めると速度勾配方向の強度減少とneutral方向の強度増大が同時に起こる。これらの結果は

我々が以前  $C_{16}E_7$  系で見出した結果と同様であり、一般性が確認された。オニオンに転移する前にneutral方向の強度が極大を示すことは、 $C_{10}E_3$ 系において一定温度・ずり速度下の時分割SANS実験により示されているが、その前に速度勾配方向の強度が極大をとることは報告されていない。

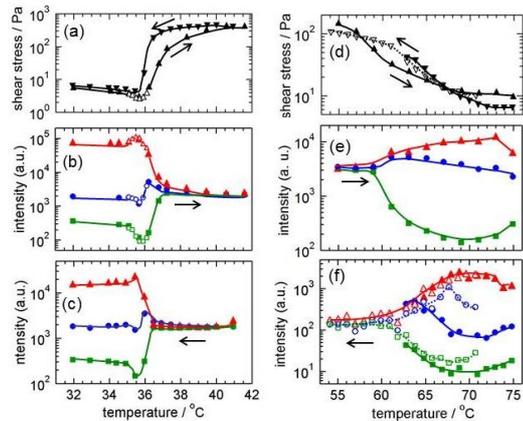


図6  $C_{14}E_5$ /水系の低温側(a~c)および高温側(d~f)におけるずり応力(a, d)およびSAXS回折強度(b, c, e, f)の温度依存性(図3(a)のブロック矢印参照)。 (b)(e)は昇温過程、(c)(f)は降温過程、(a)(b)は昇・降温過程(矢印参照)。 (a)(b)の中抜き記号は、各温度で30分~1時間保持した場合の結果。膜の配向方向の記号は図2と同じ。

ZilmanとGranekにより提案されたラメラオニオン転移のモデルでは、速度勾配方向に配向したラメラ膜が $\mu\text{m}$ スケールで“coherent buckling”を起こすことによりオニオンに転移することが予測されており、図6(b)で速度勾配方向の強度がさらに増大することと良く一致する。この増大がbucklingの前兆であれば、温度一定の下で測定を続ければ、強度は減少していくはずである。そこで、速度勾配方向の強度が極大を取る温度に1時間保持したが、強度変化は見られなかった。前後の温度でも同様の実験を行ったが、図6(a)(b)に中抜き記号で示した通り、同じ強度が再現された。この結果は、ラメラ相とオニオン相の中間状態がtransientな状態ではなく、温度とずり速度で決まる定常状態であることを示している。

降温過程(オニオンラメラ転移)の強度変化(c)は、昇温過程(b)のほぼ逆を辿っていることがわかる。この結果も上記の結論を強く支持している。

高温側の転移においても(図6(d)~(f))、ヒステリシスはより大きいものの、膜の配向方向は低温側と同様の順番となった。

したがって、ラメラとオニオンの中間状態における膜の配向は、低温側と高温側の転移の昇・降温過程において、いずれも速度勾配方向(ラメラ)速度勾配方向の増大neutral方向全方向(オニオン)の順番に

変化することがわかった。これらの結果を図7に模式的に示す。一定温度でずり速度を変化させた rheo-SAXS 実験においても同様の順番が観測されたので、これらの膜配向は、温度とずり速度で決まる定常状態に対応していると考えられる。今後これら中間領域の膜配向を説明する理論の構築が必要と考えられる。

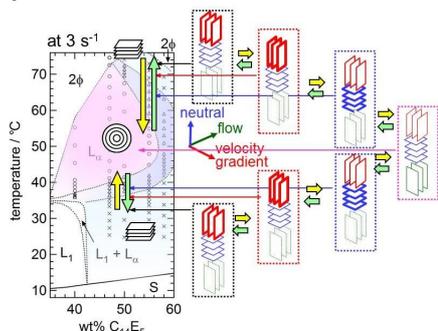


図7  $C_{14}E_5$ /水系におけるラメラ相とオニオン相の中間領域における膜の配向変化。配向が最も強い方向を太線で、最も弱い方向を破線で示す。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計6件)

M. Ito, Y. Kosaka, Y. Kawabata, and T. Kato, Transition Processes from Lamellar to Onion State with Increasing Temperature under Shear Flow in a Nonionic Surfactant/Water System Studied by Rheo-SAXS, *Langmuir*, 査読有, **27**, 7400-7409 (2011).

Y. Kawabata, T. Shinoda and T. Kato, Vesicle growth and deformation in a surfactant solution below the Krafft temperature, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 査読有, **13**, 3484-3490 (2011).

C.-Y. D. Lu, S. Komura, K. Seki, Viscoelasticity of Two-Layer Vesicles in Solution, *Physical Review E*, 査読有, **88**, 061401 (11pp) (2012).

Y. Nagai, Y. Kawabata, and T. Kato, Microscopic Investigation on Morphologies of Bilayer Gel Structure in the Mixed Polyoxyethylene-Type Nonionic Surfactant Systems, *J. Phys. Chem. B*, 査読有, **116**, 12558-12566 (2012).

D. Sato, K. Obara, M. Iwahashi, Y. Kawabata, and T. Kato, Re-entrant Lamellar/Onion Transition with Varying Temperature under Shear Flow, *Langmuir*, 査読有, **29**, 121-132 (2013).

Y. Kawabata, A. Murakami and T. Kato, Electrolyte Effect on Lamellar Domain

Morphology in a Nonionic Surfactant Solution below the Krafft Temperature, *J. Phys. Chem. B*, 査読有, **118**, 1022-1029 (2014).

[学会発表](計6件)

佐藤大治郎, 川端庸平, 加藤直, ずり流動場中の温度変化に伴うラメラ/オニオン転移過程の可逆性, 第63回コロイドおよび界面化学討論会 (2011.9, 京都)

D. Sato, Y. Kawabata, and T. Kato, Rheo-SAXS Study on Lamellar-Onion-Lamellar Transition with Varying Temperature under Shear Flow in a Nonionic Surfactant/Water System, in International Association of Colloid and Interface Scientists, Conference (IACIS2012)(2012.5, 仙台)

T. Kato, Lamellar-Onion-Lamellar Transition with varying Temperature under Shear Flow, in Association in Solution III, Self-Assembly: From Bio-Colloids to Nano-Engineering (2012.7, ビフロスト)

佐藤大治郎, 川端庸平, 加藤直, ずり流動場中の温度変化に伴うラメラ-オニオン-ラメラ転移, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012.9, 横浜)

佐藤大治郎, 川端庸平, 加藤直, Rheo-SAXS によるずり流動場中のラメラ-オニオン-ラメラ転移過程の観察, 第60回レオロジー討論会 (2012.9, 名古屋)

D. Sato, Y. Kawabata, and T. Kato, Re-entrant lamellar/onion transition with varying temperature under shear flow, in 46th Biennial Meeting of the Colloid Society (2013.9, パーダーボルン)

[その他]

研究代表者のホームページ

<http://www.comp.tmu.ac.jp/tkato/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

加藤 直(TADASHI KATO)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 2260488120

### (2)研究分担者

好村 滋行 (KOMURA SHIGEYUKI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授  
研究者番号: 2260488127

川端 庸平 (KAWABATA YOUHEI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 2260488128

### (3)連携研究者

なし