

ソフトマターにおけるメゾスコピック構造形成と構造間転移

今井正幸,太田隆夫

(受取日:2007年9月28日,受理日:2007年12月17日)

Formation and Transitions of Mesoscopic Structures in Soft Matter

Masayuki Imai and Takao Ohta

(Received September 28, 2007; Accepted December 17, 2007)

We discuss the recent development of formation of mesoscopic structures and kinetics of morphological transitions in soft matter. Special attention are paid to the so-called interconnected bicontinuous structures such as a gyroid. It is stressed that there are often intermediate metastable structures in the process of the morphological transitions. In particular, we describe *Fddd* structure and a perforated lamellar structure comparing the experiments of water-surfactant systems and block copolymers. The unsolved future problems are also emphasized.

Keywords: soft matter; mesoscopic structures; morphological transitions; gyroid; water-surfactant mixture; block copolymers

1. はじめに

原子や低分子の結晶では、それらがある対称性をもった 格子点に配置した周期構造を形成する。このことと対比し て、ソフトマターでの秩序構造の著しい特徴は、ある条件 のもとでは、分子集団が自発的にドメインを形成し、しか も、そのドメインが10~100 nmのメゾスケールの周期で 空間を埋め尽くすことである。たとえば、両親媒性分子と 水の混合系では両親媒性分子の疎水基と水分子が接触を避 けるようにドメインが自己組織的に生成される。Fig.1には 非イオン性界面活性剤・水系が示す典型的な形態相図の模 式図を示す。¹⁾L₁はミセル相、Lはラメラ相、Gはジャイロ イド相、H はシリンダー相、L3はスポンジ相を表し、温度 や濃度により様々な構造が発現することがわかる。(ジャイ ロイドにはシングルジャイロイドとダブルジャイロイドが あるが、特別に断らない限り、以下ではすべてダブルジャ イロイドを意味する。)これらの構造は親水領域と疎水領域 を分ける界面の面積を最小にしようとする力と,形成され たメソ構造の中に如何に界面活性剤分子を詰め込むかと言 うパッキングの二つの寄与のバランスにより選択されると 考えられている。

互いに非相溶なブロックからなるAB2元高分子共重合体 でも二つのブロックの分子量の比(*f*=Aブロックの分子 量/全分子量)や温度を変えると様々なメゾスケール構造 が現れる。Fig.2は自己無撞着平均場理論で計算された相図 である。²⁾縦軸は高分子共重合体の異種セグメント間の親和 性を表す相互作用パラメーターχと重合度Nの積であり, 温度の逆数に比例する。Lはラメラ相, Hはヘキサゴナル 円柱相, CPSは最密充填球相, Gはジャイロイド相である。

これらのメソ構造は脂質系や液晶分子系等でも観察され, 互いに非相溶な分子が共有結合により強制的に分子内に共 存されたときに示す普遍的構造である。その出現機構と構 造の諸性質を解明することは基礎科学として重要な研究課 題である。³⁾ さらに,異なる構造間の転移については,実験

Netsu Sokutei 35 (1) 2008

 $\ensuremath{\mathbb{C}}$ 2008 The Japan Society of Calorimetry and Thermal Analysis.



Fig.1 Phase diagram of surfactant-water mixture.1)



Fig.2 Phase diagram of microphase separation in diblock copolymers.²⁾

的研究はこの10年間盛んに行われているものの,理論的研 究は始まったばかりである。これらの研究の勃興の背後に は,新規なメゾ構造の創製や構造の制御を目指した応用的 な強い動機がある。本稿ではソフトマターにおけるメゾ構 造形成の最近の進展と将来の課題を解説する。

2. 共連結ネットワーク構造

界面によって分けられる二つの空間がそれぞれ無限に連結した領域を形成するときそれを共連結構造という。水・ 界面活性剤系の相図と高分子共重合体の相図に現れたジャ イロイド構造がその例である。3次元共連結ネットワーク 構造の特徴は、Fig.3のように様々な極小曲面をベースとし たネットワーク構造で形成されていることである。極小曲 面とは、界面面積が最小となる曲面であり、3次元共連結構



Fig.3 Representative bicontinuous structures. (a) double gyroid (b) double diamond, and (c) Primitive surface structures.⁴⁾

造を持つ極小曲面に対して20種類以上の界面が数学的に知られている。上に述べた両親媒性分子系で実際に観察される構造としてはFig.3に示したジャイロイド曲面,ダイアモンド曲面,プリミティブ曲面の三つが代表である。3者の最も大きな違いは,ネットワークの結合点における分岐数であり,各々3,4,6本となっている。従来の低分子結晶ではみられないこのような共連結周期構造はソフトマターの分子集合体が形成するメゾ構造の特徴の一つであり,基本的問題としてどのような共連結構造が実現されるかという問題がある。

これら共連結構造のうちで最も普遍的に観察されるのが ジャイロイド構造である。ジャイロイド構造は非相溶な線 状分子が結合した非イオン性界面活性剤やブロック共重合 体では、ほぼユニークに観察される3次元共連続構造であ り、この複雑な構造は透過型電子顕微鏡(TEM)-トモグ ラフィ,X線回折(空間群はIa3d)により同定されている。 一方,低分子系ではその他にもダイアモンド曲面 (Fig.3(b)), プリミティブ曲面(Fig.3(c))をベースにした 共連結曲面が観察され、注目を集めている。その例として、 モノオレイン/水系での相図をFig.4に示す。5) Fig.1の非 イオン性界面活性剤/水系と同様にシリンダー(Hn)相と ラメラ (L) 相の間にジャイロイド (G) 相が観察されるが. その希薄側にDと表示されたダイアモンド曲面をベースと した3次元共連結ネットワーク構造(空間群Pn3m)が観察 されている。DとG構造間転移は1次転移であることが実 験的に知られており、両親媒性分子の分子集合体が作るメ ゾ構造の自由エネルギーランドスケープを考える上で、ネ ットワークの組み替えの重要性が理解できる。

さらに興味深いのはこの3次元共連結構造の安定性が酸 等の添加物によって変化することである。山崎らはモノオ レイン/水系のPn3m相にオレイン酸を加えるとプリミテ ィブ曲面をベースとした3次元共連結構造(空間群Im3m) が形成されることを示している。のこの構造相転移は水溶液 のイオン強度にも依存し、水溶液に塩(NaCl)を添加した 系ではPn3m相が安定であるのに対し、塩濃度が低い系で



Fig.4 Phase diagram of monoolein-water system with representative bicontinuous structures. Chemical structure of monoolein is represented at lower right.⁵⁾



Fig.5 Molecular structure of (a) ANBC-*n* and (b) BABH-*n*, and a schematic picture of the molecule.

は*Im3m*相が安定であることが示されている。同様にモノ オレイン/dioleoylphosphatidylglycerol (DOPG)の2成 分膜が形成するマルチラメラベシクルにCa²⁺を添加する とCa²⁺イオン濃度が低いときは*Im3m*構造へと転移するの に対し、Ca²⁺イオン濃度が高いときは*Pn3m*相へと転移す る。7)これは脂質分子の極性基間の静電相互作用により分 子の膜構造へのパッキング状態が変化するためであると考 えられる。

同様な3次元共連結構造間の相転移はサーモトロピック 液晶でも観察されている。沓水らはベンゼン環からなる剛 直なコア部とそこから伸びるフレキシブルなアルキル鎖か らなるサーモトロピック液晶分子(ANBC-n ないしは BABH-n, nはアルキル鎖の炭素数, Fig.5参照)を用い, アルキル鎖の長さnの関数として出現するメゾ構造の温度n相Fig.6を作成した。⁸⁾ その結果, ANBC-nアルキル鎖長



Fig.6 Phase diagram of (a) ANBC-n and (b) BABH-n.

nが15より大きいとき,スメクティックA相とスメクティ ックC相の間にIa3d相が現れ,nの増加と共に次第にその 領域を広げるが,あるところでIm3m構造へと転移する。さ らにnを増大させると再びIa3d相が現れる。

このようにサーモトロピック液晶の秩序メゾ構造形成は コア部とアルキル鎖部のミクロ相分離と見なすことができ そうである。実際,米谷らはコア部とアルキル鎖部の相溶



Fig.7 (a) Fddd structure and (b) its Bragg spots.

性パラメーターを用いて様々なコア-アルキル鎖型サーモ トロピック液晶のコア部とアルキル鎖部の相互作用パラメ ーターを見積もり、コア部の体積分率に対して得られた秩 序メゾ構造の相図を作成し、ブロック共重合体のそれとよ く一致することを示した。のただし、ブロック共重合体や紐 状両親媒性低分子では現れる3次元共連結ネットワーク構 造は全くと言っていいほどIa3d構造であるのに対して、低 分子系では上でみてきたようにIa3d構造以外のPn3m構造 やIm3m構造が現れる。これは分子の立体構造、すなわち 親水部と疎水部の形状の非対称性、剛直性が非常に高いた めに分子を極小曲面内にパッキングするためのストレスが 大きく、特に結合部において最もストレスなく分子をパッ キングする構造として異なる極小曲面が選ばれていると考 えられ、今後の系統的な研究が特たれる。

Fig.3の三つの共連結構造は立方対称性をもっている。しかし、対称性の低い共連結構造としてFddd構造とよばれるものがある。その3次元パターンと主要ブラッグ点をFig.7に示してある。Fddd構造は最初3元高分子共重合体で熱平衡構造として出現することが実験的に示唆され、その後、自己無撞着平均場理論でそれが理論的に確認された。さらに、ごく最近では2元高分子共重合体でも熱平衡相図に現れることが理論と実験の両方で明らかになっている。10次の節では、Fddd構造は構造間転移の中間構造としても出現することを述べる。しかし、水・界面活性剤混合系などではFddd構造が観察されたことはないようである。

共連結構造ではないが、転移の途中でみられる穴あきラ メラ構造に言及しておこう。ラメラ構造を形成する2重膜 に円形の穴が3角格子の対称性をもって開いている構造を 穴あきラメラ構造 (hexagonally perforated lamellar, HPL) という。穴の位置が隣接する膜の2周期でもとにもどる, つまり、ABABAB…となる場合 (HPL^{AB}) と、3周期で元 にもどるABCABC…型 (HPL^{ABC}) の二つがある。非イオ ン性界面活性剤/水系、脂質/水系の中にも、このHPL^{ABC} 構造を示すものがあり、特に最近では生体膜の接着におけ る Stalk 中間体とこのラメラ膜にできる HPL^{ABC}構造との関



Fig.8 X-ray scattering intensities in the transition process from lamellar to gyroid structures in $C_{16}E_6$ -water mixtures.

係が注目されている。¹¹⁾ 一方,2元高分子共重合体の理論で は穴あきラメラ構造は準安定状態であることが知られてい る。

3. 構造間転移キネティクス

上に述べた極小曲面構造は、平面膜が積層したラメラ相 ないしは棒状にミセルが六方最密充填したヘキサゴナル相 と相図の上で隣接しており、これらシンプルな構造からい かにして複雑なネットワーク構造を持つ極小曲面構造へと 転移するのかは、メソ構造間相転移のキネティックパスウ エイを考える上でも重要である。そこで、そのキネティッ クパスウエイを明らかにする目的で、非イオン性界面活性 剤であるC16E6 [= (CH3(CH2)15(OC2H4)6OH)]/水系のジ ャイロイド相への構造相転移過程を小角X線散乱で追跡し た。12) Fig.8 はC₁₆E₆水溶液の温度を変えることによって得 られた散乱曲線の変化を示している。まず、高温の50℃で は典型的なラメラ相からの散乱プロファイルを示し、その 1次元プロファイルはラメラ構造による回折ピークが非対 称な裾をひくことで特徴づけられ、ラメラ状膜が波状に揺 らぐ構造を表している。温度をラメラ相からジャイロイド 相への相転移温度より数℃上の36℃に下げると、ラメラ構 造による1次のブラッグピークの低角側にブロードな散漫 散乱が現れ、さらに温度を下げると転移温度近傍の34℃に おいて散乱パターンは大きく変化し*印でマークされた数 本の新しい回折ピークが現れる。この構造はピークの指数 付けによって、菱面体対称(空間群: $R\overline{3}m$)をもつHPLABC 構造(ロンボヘドラル相: Fig.9(a))と同定した。その後,



Fig.9 Schematic representations of (a) HPL^{ABC} structure (ABC and spots represent positions of lamellar layers and holes, respectively) and (b) Least Stable Fluctuation Mode of lamellar structure..

更に温度を下げ30℃に達すると*印で表した回折ピークが 消失し, Fig.8の一番下に示した散乱パターンへと変化した。 新たに現れた回折ピークの指数付けから,空間群 Ia3d をも つジャイロイド相に対応することが判明した。以上より, 非イオン性界面活性剤/水系におけるラメラ相からジャイ ロイド相への転移過程は,二つの中間構造,すなわち,特 徴的な散漫散乱を伴うラメラ構造とHPL^{ABC}構造を経て最 終的なジャイロイド構造へと転移することがわかった。

中間構造のうち特徴的な散漫散乱を与える構造を明らか にするため,配向したラメラ構造からの小角X線散乱パタ ーンを解析した。ラメラ面に対して垂直にX線を入射する と,充分高温のラメラ相では,ブラッグピークをもたない 単調な散乱パターンが観察されるだけであるが、温度を下 げて散漫散乱が現れる温度領域になると、リング状の散漫 散乱(Fig.10)が観察され、散漫散乱がラメラ構造の面内 揺らぎに起因するものであることが示唆される。ラメラ面 に平行にX線を入射すると波数成分がそれぞれ、 $a_{7}=\pm 1/2$ $q^*, q_{x,y} = \sqrt{3} q^*/2 の 位置 に ピーク をもつ 散漫 散乱$ (Fig.10(b)) が観察される。q*はラメラ構造のブラッグ波 数である。この散乱の起原はFig.9(b)に示す様な基本的に はラメラ面の変調が2層周期(ABAB…)で繰り返してお り,疎水層(分子膜)に穴が空き,親水層(水相)が一定 の厚みを保つような揺らぎであることがわかる。これはラ メラ相がもつ最小安定揺らぎモード (Least stable fluctuation mode: LSFM) に対応する。13,14)

このLSFM をもつラメラ相の温度をジャイロイド相への 相転移温度に近づけていくと, HPL^{ABC}相へと変化する。 Fig.10(c)と(d)には配向試料を用いてL-LSFM 相から温度 を下げてHPL^{ABC}相に転移するときのラメラ面に平行, お よび, 垂直方向からの回折パターンの変化をHPL^{ABC}構造



Fig.10 2D scattering patterns from Least Stable Fluctuation Mode of lamellar structure [(a) perpendicular and (b) parallel to lamellar plane] and HPL^{ABC} structure [(c) perpendicular and (d) parallel to lamellar plane] with diffraction indexes..



Fig.11 Tripods model for HPL structure and DG structure.

に対する指数付けとともに表したものであり、その回折ピ ーク位置はHPL^{ABC}モデルからの予想と一致する。ところ で、ラメラ構造に対するLSFMによって生まれたラメラ面 の穴は、Fig.9(b)に示すようにABABの積層構造であるの に対してHPL^{ABC}構造(Fig.9(a))ではABCABCの積層構 造である。従ってL-LSFMからHPL^{ABC}相への転移はABAB からABCABCの積層構造転移になる。

次に, HPL^{AB}相から, ジャイロイド相への相転移は幾何 学的には**Fig.11**のように理解することができる。一枚の HPL 相の骨格構造はお互いに120°の角度で交わる3本足の 基本構造(トライポッド)が平面状に結合したものである と考えることができる(**Fig.11**の左)。一対のトライポッド

を結合する軸のまわりに時計方向に70.53°回転させ (Fig.11 右). それをつなげていくと系全体に3次元ネット ワークをもつ(シングル)ジャイロイド構造を作ることが できる。HPL構造の一つ下の面も同様なトライポッドの平 面状連結構造で形成されており、上のHPL 面と下のHPL 面 では、穴の位置がずれているだけである。下の面のトライ ポッドも軸の周りに70.53°回転させて行くともう一つの (シングル) ジャイロイドネットワークができ、その結果、 隣り合う二つのHPL 面から互いに交わらないダブルネット ワークが完成する。このネットワーク構造こそこれまで述 べてきた(ダブル)ジャイロイド構造であり、その極小曲 面は骨格構造がつくる二つのネットワークの中間の位置に ある曲面である。(ただし、厳密にはいたるところ平均曲 率=ゼロを満たしているわけではなく、近似的に極小曲面 である。) すなわち、HPLAB構造からジャイロイド構造を形 成するのは非常に容易であり,幾何学的な不整合も少ない。 一方、HPLABC相からジャイロイド相を構成するには非常に 大きな変形が必要なことがこの幾何学モデルから明らかで ある。実際、HPLABC相からジャイロイド相への相転移では、 構造間にエピタキシャルな関係は成立しないことがわかっ ている。それにもかかわらず、非イオン性界面活性剤/水 系での実験では多くの場合ラメラ相からジャイロイド相へ の転移過程で現れる中間構造はHPLABC構造であり、HPLAB 構造ではない。これはキネテックパスウウェイ上での HPL^{ABC}構造とHPL^{AB}構造の安定性の違いが現れているも のと考えられる。非常に興味深いことに、このHPLABC構 造はシリンダー構造をベースとしたヘキサゴナル相からジ ャイロイド相への構造転移の中間構造としても低分子系で 観察される。15) しかし、ジャイロイド相からシリンダー相 やラメラ相への転移はHPLABC相を経由しないことがわか っており、このことはHPLABC相はジャイロイド相への準 安定な"ゲート構造"であることをうかがわせる。

4. 構造間転移の理論

複雑な(高)分子が形成するメゾスコピックなスケール の構造に対して原子レベルからの記述は現時点では理論的 技術的に困難であり,必然的になんらかの粗視化した方法 をとらざるを得ない。上に述べたように,対称性の観点か らは本質的に同等であると思われる構造がソフトマターの さまざまな系で現れることに注意しよう。メゾ構造を理解 するため多くの試みが行われているが,個々の系の詳細に 入りすぎた表現では普遍性がみえなくなることを強調した い。高分子共重合体のミクロ相分離に対しては1970年代か ら理論が進歩しており,平衡相図に関して多くの成果があ る。しかし,水・界面活性剤系や液晶でのメゾスコピック ネットワーク構造形成については静的な理論さえも十分発



Fig.12 Phase diagram in the vicinity of microphase separation temperature..

達していないようである。そのため、以下では、理論的に もっとも取り扱いが簡単であるAB型2元高分子共重合体の メゾ構造間転移理論を述べる。

相転移のランダウ理論のように,2元高分子共重合体メ ルトのミクロ相分離をモノマーの局所濃度差のみの自由エ ネルギーで定式化することが可能である。¹⁰ 思い切った簡 単化をしているため,細かなところまで忠実に表現される わけではないが,メゾ構造出現が短距離引力相互作用と長 距離斥力相互作用の競合に起因することが明確に表される。 さらに、ミクロ相分離構造の周期が強偏斥(ブロック間の 非相溶性が高く,相境界でシャープな界面をもつ場合)で は重合度の2/3 乗に比例することを解析的に予言でき,か つ,弱偏斥(ブロック間の非相溶性が低く,界面がなだら かな場合)ではジャイロイド構造が熱平衡状態として存在 することを示せる,おそらく唯一の理論である。

局所濃度の時間発展を表現する偏微分方程式をモード展開で数値的に解くことによって,可能な熱平衡構造と構造 間転移のキネテックスを調べることができる。^{17,18}) Fig.12 の相図はミクロ相分離温度近傍での平衡構造を詳しく表し ている。Fddd構造が熱平衡構造として出現することを理論 的に予言していることに注意されたい。τはミクロ相分離温 度(τ=2.0)から低温側へのずれを表し,横軸は二つのブ ロックの鎖長差を表す。

Fig.12の黒丸の点で安定なジャイロイド構造から温度を 黒四角点へ急変したときの構造変化の時間発展をFig.13に 示す。最終のラメラ構造(t=20000)に行き着く前に中間 構造が現れる。この構造はフーリエ解析するとFddd構造で あることが明らかとなった。また、逆のプロセス、すなわ ちラメラ構造からジャイロイド構造への転移においても Fddd構造を中間構造として経ることが数値シミュレーショ ンで確認されている。この理論結果と整合する実験が、ご く最近、竹中、長谷川らによって報告されている。¹⁹



Fig.13 Structural transitions from gyroid structure to lamellar structure via Fddd structure.

5. 今後の課題

本稿で取り上げた界面活性剤やブロック共重合体に代表 される両親媒性分子の形成するメゾ構造とは、基本的には 相反する性質の構成体が一分子内に共存するために引き起 こされるフラストレーションをいかにして解決するのかと いう問題である。しかし、個々の分子が多数の内部自由度 をもつため理論的取り扱いが容易ではなく、様々な共連結 ネットワーク構造が出現するメカニズムの理解は十分進ん でいない。実際,実験的に得られている共連結構造はジャ イロイド構造 (Ia3d) だけではく、ダイアモンド (D) 構造 (Pn3m) とSchwartzのプリミティブ (P) 構造 (Im3m) が ある。液晶ではこれらから作られるもっと複雑なドメイン 構造が示唆され、構造間転移の実験も行われていることに も言及した。一方、理論的研究はここで述べた理論以外に、 静的動的自己無撞着平均場理論,20) マイクロエマルジョン に対する格子ボルツマンシミュレーション法,21)2元共重合 体メルトの格子モンテカルロ法,22) 共重合体溶液に対する シミュレーテッドアニール法,23) ブラウニアン動力学法24) など、さまざまな方法でミクロ相分離構造の研究が行われ ているが、文献25)でプリミティブ曲面構造が得られている 以外は、共連結構造としてはジャイロイド構造しか実現さ れていない状況である。ダイアモンド構造やP構造が安定 化するためにはどのような要因が必要であるかを洞察し, 適切なモデルを構築してこれらの共連結構造の生成とダイ ナミクスを可能な限り解析的に解明することが今後の重要 な課題の一つである。

解明すべきもう一つの基本的問題は、ジャイロイドのよ うな立方対称な共連結構造と、一軸的対称性しかもたない ラメラ構造やヘキサゴナル構造との転移がどのように起こ るかということである。上に述べたように、水・界面活性 剤系では温度を緩やかに変化させたとき、ラメラージャイ ロイド転移の中間準安定構造としてHPL構造が出現する。 高分子共重合体(2元共重合体のブレンドや溶液)でも、同 様な状況では準安定なHPL構造が報告されている。^{26,27)}一 方、前節で示したように、2元共重合体メルトで温度を急冷 したときのラメラージャイロイド転移ではFddd構造が中間 構造として出現することが実験と理論の両面から得られて いる。HPL構造は共連結でないのに対し,Fddd構造は立方 対称ではないが共連結構造である。何がこのような違いを 生む要因であるかを明らかにすることによって,ジャイロ イドのような共連結構造の自己組織的形成に対するわれわ れの理解が深めていく必要がある。

文 献

- R. Strey, R. Schomacker, D. Roux, F. Nallet, and U. Olsson, J. Chem. Soc. Faraday Tran. 86, 2253 (1990).
- M. W. Matsen and F. S. Bates, *Macromolecules* 29, 1091 (1996).
- 今井正幸,「ソフトマターの秩序形成」,シュプリン ガー・ジャパン (2007).
- (4) 陣内浩司,西川幸宏,長谷川博一,高分子論文集 56, 837 (1999).
- 5) S. T. Hyde, S. Andersson, B. Ericsson, and K. Larsson, Z. Kristallogr. 168, 213 (1984).
- Y. Aota-Nakano, S. J. Li, and M. Yamazaki, *Biochim. Biophys. Acta.* 1461, 96 (1999).
- T. S. Awad, Y. Okamoto, S. Md. Masum, and M. Yamazaki, *Langmuir* 21, 11556 (2005).
- 8) 沓水祥一, 齋藤一弥, 固体物理 41, 379 (2006).
- M. Yoneya, K. Araya, E. Nishikawa, and H. Yokoyama, J. Phys. Chem. B 108, 8099 (2004).
- C. A. Tyler and D. C. Morse, *Phys. Rev. Lett.* 94, 208302 (2005).
- M. L. Lynch and P. T. Spicer (eds) "Bicontinuous Liquid Crystal" Tayler&Francis (2005).
- M. Imai, K. Sakai, M. Kikuchi, and K. Nakaya, J. Chem. Phys. 122, 214906 (2005).
- S. Qi and Z.-G. Wang, *Macromolecules* **30**, 4491 (1997).
- M. Imai, K. Nakaya, T. Kawakatsu, and H. Seto, J. Chem. Phys. 119, 8103 (2003).
- 15) M. Imai et al., unpublished.

- 16) T. Ohta and K. Kawasaki, *Macromolecules* **19**, 2621 (1986).
- 17) K. Yamada, M. Nonomura, and T. Ohta, *Macromolecules* 37, 5762 (2004).
- 18) K. Yamada, M. Nonomura, and T. Ohta, J. Phys.: Condens. Matter 18, L421 (2006).
- 19) M. Takenaka et al, unpublished.
- 20) T. Honda and T. Kawakatsu, *Macromolecules* **39**, 2340 (2006).
- 21) J. Harting et al, Phil. Trans. R. Soc. A363, 1895 (2005).
- 22) F. J. Martinez-Veracoechea and F. A. Escobedo, *Macromolecules* 38, 8522 (2005).
- 23) P. Sun et al, Phys. Rev. E72, 061408 (2005).
- 24) C. R. Iacovella et al, Phys. Rev. E75, 040801 (2007).
- 25) M. Nekovee and P. V. Coveney, J. Am. Chem. Soc. 123, 12381 (2001).
- 26) C.-Y. Wang and T. P. Lodge, *Macromolecules* 35, 6997 (2002).
- 27) M. E. Vigild, K. Almdal, K. Mortensen, I. W. Hamley, J. P. A. Fairclough, and A. J. Ryan, *Macromolecules* 31, 5702 (1998).

要 旨

水・界面活性剤混合系や高分子共重合体などのソフトマ ターでみられるメゾスコピック構造の形成とキネテックス に関する最近の理論的,実験的進展を解説する。特に,ジ ャイロイド構造のような,いわゆる共連結構造に焦点をあ てる。立方対称なジャイロイド構造からより対称性の低い 構造への転移においては,しばしば,中間構造が現れる。 そのうち,Fddd構造と穴あきラメラ構造について,水・界 面活性剤混合系と高分子共重合体の実験事実を比較しなが ら,詳しく述べる。未解決の重要問題にも言及する。

今井正幸 Masayuki Imai

お茶の水女子大学人間文化創成科学研究科, Graduate School of Humanities and Sciences, Ochanomizu Univ., TEL. 03-5978-5316, FAX. 03-5978-5689, e-mail: imai@phys.ocha.ac.jp 研究テーマ:ソフトマターの秩序形成 趣味:散歩・日本史・世界史

太田隆夫 Takao Ohta

京都大学大学院理学研究科, Dept. of Physics, Graduate School of Science, Kyoto Univ., TEL.&FAX. 075-781-4755, e-mail: takao@scphys.kyoto-u.ac.jp 研究テーマ:相転移論 趣味:散歩