

領域略称名：ソフトマター物理
領域番号：463

平成23年度科学研究費補助金
「特定領域研究」に係る研究成果等の報告書

「非平衡ソフトマター物理学の創成：
メソスコピック系の構造とダイナミクス」

(領域設定期間)
平成18年度～平成22年度

平成23年6月

領域代表者 京都大学・大学院理学研究科・教授・太田隆夫

目次

1. 研究領域の目的及び概要.....	2
2. 研究領域の設定目的の達成度.....	3
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況.....	4
4. 主な研究成果(発明及び特許を含む).....	4
5. 研究成果の取りまとめの状況.....	15
6. 研究成果の公表の状況(主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等).....	15
7. 研究組織と各研究項目の連携状況.....	23
8. 研究費の使用状況(設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む).....	29
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度.....	30
10. 研究計画に参画した若手研究者の状況.....	30
11. 総括班評価者による評価の状況.....	31

1. 研究領域の目的及び概要

研究領域名： 非平衡ソフトマター物理学の創成： メソスコピック系の構造とダイナミクス

研究期間： 平成18年度～平成22年度

領域代表者： 京都大学・大学院理学研究科・教授・太田隆夫

補助金交付額：

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成18年度	249,400,000	0	249,400,000
平成19年度	385,000,000	0	385,000,000
平成20年度	316,800,000	0	316,800,000
平成21年度	236,300,000	0	236,300,000
平成22年度	208,500,000	0	208,500,000
総計	1,396,000,000	0	1,396,000,000

本領域研究の研究対象であるソフトマターとは高分子、液晶、両親媒性分子、コロイド、エマルション、生体物質、ガラス、粉流体などの物質群に対する総称である。ソフトマターの構成分子は比較的大きく、分子が自己集合したとき 1～100nm のナノまたはメソスコピックな内部構造が出現する点に最大の特徴がある。ソフトマターのもう一つの特徴は、力学的に「ソフト」な応答を示し、同時に非常にゆっくりとしたダイナミクスを発現することである。すなわち、ソフトマターは小さな外場で大きな構造変化を示す非線形性と、熱平衡への緩和での著しく遅いダイナミクスを兼ね備えている。ソフトマターは食品、化粧品、電子製品などで使われており、私達の日常生活において欠かせない物質である。

本特定領域研究の目的は、流動場、電場、磁場、力学場、光などの外的刺激に対する柔らかい分子集団の構造形成と、それによってもたらされる非平衡状態を解明することである。そのために実験、理論、計算機シミュレーションを用いたメソスコピック系の構造とダイナミクスの基礎的研究を行った。具体的には

- 実験的手法とシミュレーションなどの理論的手法に基づき、分子ダイナミクスと構造形成のダイナミクスとのカップリングの詳細を明らかにした。
- ソフトマターのメソスコピック構造に外から刺激を加えたときに観察される、様々な秩序構造相転移のダイナミクスを解明し、メソスコピック構造制御の新しい方法論の確立に寄与した。
- ソフトマターが非平衡状態下で発現する非線形応答、輸送、時空間構造、非平衡ゆらぎを実験で検証、測定するとともに、メソスケールの構造変化とゆらぎを取り入れた理論構築を行うことによって、非平衡構造とダイナミクスの解明を進めた。
- 実験グループと理論グループの共同研究により、階層性をもつソフトマター構造に対する理論的解析手法とシミュレーションモデルを構築した。

最終的には、**ソフトマター物理学と非平衡物理学の融合的研究により、非平衡ソフトマター物理学という新しい学問分野を創成することを目指した。**マイクロとマクロの中間の長さをもつメソスコピック系の諸性質を解明することは、その構造の効率的かつ能動的な制御につながり、21世紀の様々な産業に資することが期待できる。

2. 研究領域の設定目的の達成度

・ 分子凝集構造のダイナミクス

高分子ブレンドやゲルにおける各成分鎖の連結性に由来するセグメントスケールでの成分濃度のゆらぎや、鎖の運動性が有限であることを反映する大きなスケールでの成分濃度のゆらぎの基礎的知見を得るため粘弾性測定や誘電測定、流動下での中性子散乱測定を行い、相分離構造成長のダイナミクスと高分子ダイナミクスのカップリングを解明した。また、メソスケールでの構造ゆらぎを実時間・実空間で測定するため、エバネッセント蛍光法や近接場光学顕微鏡を高分子ガラス研究に取り入れた実験や、高分子共重合体のマイクロ相分離において水素結合に由来する階層的メソ構造や可視光スケールの周期構造を実現する実験、さらには分子形態や秩序の直接観察などユニークな研究を遂行している。これらに關係する成果は高い評価を受け、メンバー3名が高分子学会賞を受賞している。

・ 構造転移のダイナミクス

相分離や光照射による脂質二重膜ベシクルの形態転移、化学反応によるベシクルの自己推進運動や自己生産、流動場中でのベシクルの特異な運動と形状転移などに関して、世界をリードする研究成果が得られた。また、電場・剪断流動場による非相溶流体構造転移ダイナミクス、剪断流動場下での両親媒性分子のオニオン形成とそれに伴う特異な弾性挙動、液晶場下でのコロイド粒子間相互作用などのように外場に駆動されたソフトマターに関して実験および理論的研究が進んだ。動的非対称性をもつソフトマターのレオロジーと構造に関する独自性のある研究も行われた。**特筆すべきことは、脂質二重膜の非平衡ダイナミクスに関して、実験理論両方の研究者による強力な研究連携ネットワークが構築されたことである。**これは本領域研究プロジェクトの目玉的成果の一つとして強調したい。

・ 非平衡構造のダイナミクス

非平衡構造の形成では、気体分子流とのクロス効果による液晶薄膜の集団歳差運動、高分子微結晶集合体による非平衡構造形成、相分離と架橋反応の競合を光照射で制御した構造形成、脂質二重膜とタンパク質の相互作用による膜突起の誘導など、構造制御に繋がる成果が得られた。能動輸送に関しても重要な発見があった。液晶秩序場の変調を利用した分子操作の実験的進展と、熱泳動とエントロピー力に基づくマイクロ操作法を発見し、その理論を発展させた研究である。どちらも微小空間での物質輸送の制御と関係し、非平衡統計物理学としての重要性とともに、今後の応用的発展が期待できる。また、「マクスウェルの悪魔」と關係する非平衡ゆらぎの実験は広く注目を集めている。

・ 理論・モデリング

ソフトマターでは幾つかの大きさの異なる特徴的長さが存在する多階層構造をとっているため、理論構築や大規模計算機シミュレーションを困難にしている。この点を克服することに力を注ぎ、従来の密度汎関数法に、さらに粗視化を施したギンツブルグ・ランダウ方程式を組み合わせることで、効率と精度のよい数値シミュレーション方法を開発した。その他、高分子溶液の乾燥ダイナミクス、コロイドのガラスダイナミクス、イオン溶液のマイクロ相分離などで顕著な成果が得られた。**特筆すべきことは、これらの研究はすべて、理論単体ではなく実験のグループと共同で行われるか、あるいは実験データと密接に關係しながら実行されていること**であり、理論・モデリンググループが当初の計画通り本特定領域の共通のプラットフォームとして機能していることがわかる。

以上のように、**当初計画した研究課題は十分達成できた**と認識している。むしろ、予想した以上の成果、あるいは、予想しなかったような研究の展開があったことを強調したい。特に、**脂質二重膜関係の研究活動でできあがった強力な研究連携ネットワークは、異なる分野の研究者が一堂に会**

する本特定領域研究でこそ実現できた成果である。また、本プロジェクト開始当時は必ずしもその重要性が十分認識されていなかった「非平衡ソフトマター」が今日では世界的に注目されるようになってきている事実を二つ紹介する。一つは、本プロジェクトの研究から得られた概念 Active soft matter の特集が学術雑誌 Soft Matter 7, 3025-3652 (2011) に組まれている。もう一つは、2011年7月にベルリンで行われる国際会議 Engineering of Chemical Complexity (2007年ノーベル化学賞受賞の G. Ertl 教授が名誉組織委員長)のミニシンポジウムの一つとして Non-equilibrium soft matter が企画されている。このような研究環境から、我が国では積極的に「非平衡ソフトマター」研究に入っていく若手研究者が育ってきており、「非平衡ソフトマター物理学の創成」は着実に前進している。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況

本特定領域研究の研究推進時に、問題点と言えるものは生じなかった。総括班は領域研究会などの開催を通じて、個々の研究者の主体的問題意識に基づいた自由な共同研究が遂行されるための雰囲気作りに努力してきた。その結果、当初予想し得なかったような斬新な共同研究が進展した。

平成20年度に行われた中間評価の結果は「A(現行のまま推進すればよい)」であり、「中間評価に係る意見」は以下の通りであった。『「ソフトマター」と「非平衡」を旗印として多様な研究が進められており、興味深い成果も得られ始めている。これらの旗印の下に、研究に関する議論を行う拡大総括班会議などにより有機的連携をはかりつつ、若手を中心とした研究者が主体的問題意識に基づいて研究を進める雰囲気作りに努められている。また、多成分ベシクルの相転移や形態転移などで共同研究の芽が出つつあることは評価する。今後は、普遍的な原理や法則を解明する理論的研究や、ソフトマターと非平衡系物理の融合をさらに進め、特定領域として統一感のある成果が得られることを期待する。国際的活動の強化や若手の育成についても一層の推進を期待する。』

以上のように、中間評価において特段の問題点が指摘された訳ではないので、基本的には計画当初の方針に基づいて研究を遂行してきた。本領域研究の推進により、研究者間の新しい共同研究や研究連携が行われ、その結果、数多くの新規な非平衡現象が発見され、それらに対する理論的考察や計算機シミュレーションも進んだ。また、ソフトマター分野の若手研究者たちが非平衡性に興味を持つようになった。これらは本特定領域研究が組織されたことによる著しい成果である。

中間評価に係わる意見のうち「今後は、普遍的な原理や法則を解明する理論的研究や、ソフトマターと非平衡系物理の融合をさらに進め、特定領域として統一感のある成果が得られることを期待する」については、特に留意した。幸いなことに平成21年度からの公募研究では、非平衡基礎論の中堅研究者が2、3名採択された。これらの専門家とともにソフトマターを対象として非平衡ゆらぎや応答の研究を実験・理論両面から行い、非平衡ソフトマター物理学の進展に努めた。

4. 主な研究成果(発明及び特許を含む)

○ A01 班: 分子凝集構造のダイナミクス

A01 班では、高分子系を中心として、平衡状態近傍での構造およびダイナミクスに焦点を当てた研究が遂行された。その結果、高分子均一系の鎖形態と緩和ダイナミクス、超分子型複合高分子やブロック共重合体の多様なマイクロ相分離構造とダイナミクス、ゲルやテレケリック鎖も含めた高分子会合系の構造とダイナミクス、流動場や温度場が高分子系の構造に与える効果、高分子網目系の熱力学、高分子表面の構造とダイナミクス、希薄高分子の相挙動とダイナミクス、高分子も含めた液晶系の特徴

的秩序構造などについて先端的成果が得られた。ここでは、これらの成果の内のごく一部についてのみ、概略を記載する。

(1) 超分子型複合高分子の階層的相分離構造

松下らのグループは、水素結合で異種高分子を結合したブロック共重合体のブレンド系に対して階層的相分離構造を検討した ([1]、および、その引用文献)。一例として、ポリスチレン(S; 重合度 $n = 660$)とポリ 4-ヒドロキシスチレン(H; $n = 23$)のジブロック共重合体 SH とポリイソプレン(I; $n = 810$)とポリ 2-ビニルピリジン(P; $n = 22$)のブロック共重合体 IP の 5:5 混合物のキャストフィルムの TEM 観察結果を図1に示す。水素結合が強くない条件で作成されたフィルムでは、SH マトリクス中で形成された IP のベシクル (図1(a)) および IP マトリクス中で形成された SH のベシクル (図1(b)) が観察される。一方、十分強い水素結合が生じる条件で作成されたフィルム (図1(c)) では、見かけ上は単純なラメラ構造が形成された。しかし、このフィルムをヨウ素で選択的に染色することで、水素結合部位である H/P 混合相がラメラ界面にシリンダー状に規則正しく配列されていること (図1(c)の挿入図) が見出された。これらの結果は、溶媒極性で水素結合の強度を調整することにより SH:IP 超分子系が容易に階層的マイクロ相分離構造を形成することを示し、さらに一般的には、分子間の二次的結合の物理的制御によって構造が容易に制御され得ることを示す。

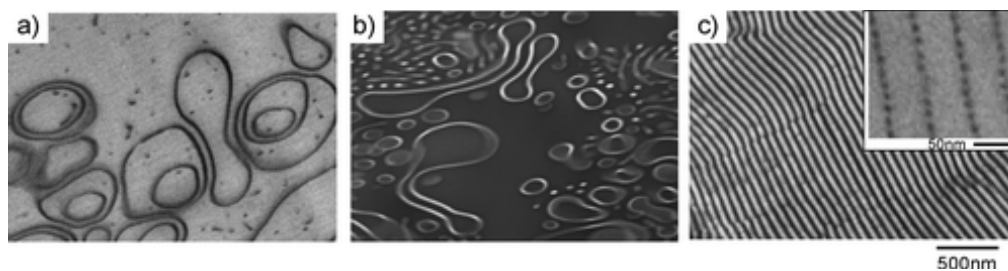


図1 SH/IP 5:5 ブレンドフィルムの TEM 画像。試料は OsO₄ で染色してある。

松下らのグループは、ポリ2-ビニルピリジン(P) とポリアクリル酸エチル (E) より成る PEP トリブロック共重合体の末端 P ブロックを H で結合した物理ゲル系についても、粘弾性緩和挙動を詳細に調べた[2]。その結果、この系の終端緩和は P-H 間の水素結合の熱的解離を反映することや、この緩和の活性化エネルギーが水素結合点数と良い相関を示すことなどが見出された。このように、水素結合のような二次的結合は昇温によって容易に切断されるが、同時に、流動場によっても可逆的に切断される。この切断のエネルギーと流動による鎖伸長のエネルギーのバランスに応じて、ずり粘度や第一法線応力係数のシックニングやシンニングなどの興味深いレオロジー挙動が発現することが、田中文彦ら

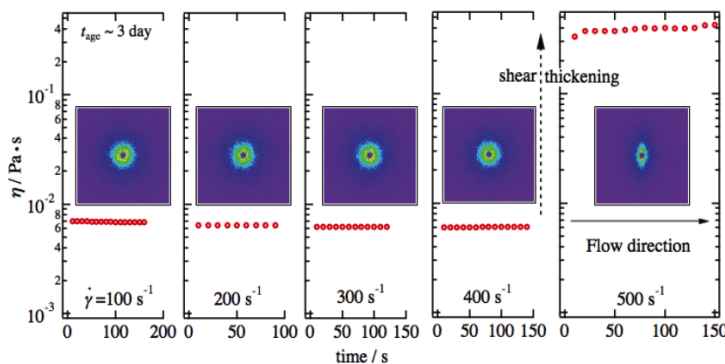


図2 クレイ・PEO 水溶液の粘度の剪断速度依存性と対応する中性子小角散乱法(SANS)パターンの変化

のグループにより理論的に明らかにされている[3]。

(2) Clay-PEO複合材料のRheo-SANS

コロイド懸濁液に高分子を添加すると、高分子との相互作用によりコロイドの安定性は大きく変化して粘度増加をもたらす、流動硬化などの多様な流動挙動が発現する[4]。しかし、このようなレオロジー的变化をもたらす構造についての知見は不十分なまま残されてきた。柴山らのグループは、粘土鉱物ラポナイト (clay) とポリエチレンオキシド (PEO) の混合物の水溶液について、濃度、混合比率の狭い領域で増粘が生じることを見出し、その構造的起源を明らかにするためにレオロジー測定と中性子小角散乱の同時測定 (Rheo-SANS 測定) を行った。図2は、増粘現象が観測された領域での粘度 η の剪断速度依存性と SANS パターンを示す。剪断速度が 500 s^{-1} 以下では高分子もクレイも散乱像は等方的であるが、 500 s^{-1} まで増加するとクレイも高分子も配向して著しいシアースクニングが起こることがわかる。

SANS では、溶媒中の軽水と重水の割合を調整して成分間の散乱コントラストを変調させ、各成分の散乱の強さを調節できる。柴山らのグループは、この特長を活かして一連のコントラスト変調実験を行い、得られたデータから各成分の部分散乱関数および相互相関を抽出して解析を行った。その結果、剪断速度が 500 s^{-1} では相互相関項が変化していることから、クレイ近傍の高分子鎖が引きはがされていることなどが結論された。この結果は、クレイ-PEO のシアースクニングの構造的起源を初めて明らかにしたものであり、興味深い。

(3) 高分子均一系の鎖形態と緩和ダイナミクス

高分子均一系の遅い緩和については、動的平均場の考えに立脚した管モデルが広く受け入れられ、粘弾性緩和の実験データと比較されている[5]。しかし、個々の鎖のダイナミクスの直接的検証は不十分であった。青木らは、蛍光色素ペリレンを導入したポリ(メタクリル酸メチル) (PMMA; $M = 200$ 万) に対し、近接場光学顕微鏡 (SNOM) [6]を用いてnmの解像度を有する蛍光イメージングを行い、絡み合いバルク内の単一高分子鎖の観察を行った (図3左)。その結果、延伸直後の鎖の延伸比 (= 微視的延伸比) λ_c は巨視的延伸比に一致し、大半のモデルが立脚しているアフィン変形の仮定が成立していることが実証された[7]。さらに、延伸後の応力緩和過程において、応力 σ は時刻 $t = 0$ から減少を開始するのに対して、 λ_c はかなり長時間域まで初期値からほとんど減少しないことが見出された (図3右)。

蛍光信号の偏光度の同時計測から、個々の鎖のセグメント配向は σ と同様の緩和を示すこと (応力-光学則の成立) も確認された。これらの結果から、鎖の収縮に対応する時間域 (10^4 s 以下) では、絡み合いが十分に緩和していないので、鎖の局所的配向緩和は進行するが鎖全体の異方性 (λ_c) は殆ど緩和しないことが結論され、管モデルの分子描像の妥当性が検証された。さらに長時間の終端緩和域における鎖ダイナミクスの詳細について、渡辺は誘電緩和と粘弾性緩和の対比を行い、現在の管

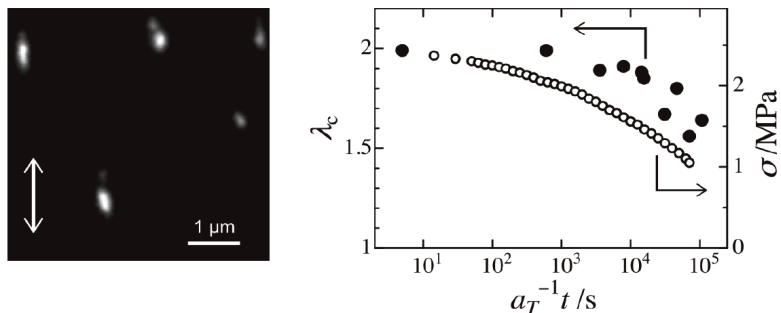


図3 近接場光学顕微鏡による高分子のコンフォーメーション変化(左)および鎖伸長比と応力の関係(右)

モデルが想定する動的管膨張の描像が必ずしも成立していないことなどを見出した[5]。このように、粘弾性緩和と構造緩和、誘電緩和の実験を組み合わせることで、高分子系のダイナミクスに関する理解は飛躍的に向上する。

- [1] K. Dobrosielska, S. Wakao, A. Takano, and Y. Matsushita, *Macromolecules* 41, 7695–7698 (2008).
- [2] A. Noro, Y. Matsushita, and T. P. Lodge, *Macromolecules* 41, 5839–5844 (2008), *ibid.* 42, 5802–5810 (2009).
- [3] T. Koga, F. Tanaka, I. Kaneda, and F. M. Winnik, *Langmuir* 25, 8626–8638 (2009).
- [4] T. Matsunaga, H. Endo, M. Takeda, and M. Shibayama, *Macromolecules* 43, 5075–5082 (2010).
- [5] H. Watanabe, *Polym. J.* 41, 929–950 (2009).
- [6] S. Ito and H. Aoki, *Adv. Polym. Sci.* 182, 131–169 (2005).
- [7] T. Ube, H. Aoki, S. Ito, J. Horinaka, T. Takigawa, and T. Masuda, *Polymer* 50, 3016–3021 (2009).

○ A02 班： 構造転移のダイナミクス

高分子・両親媒性分子・コロイド等に代表されるソフトマターは、その大きな内部自由度に起因するエントロピーとエネルギー的な相互作用が競合する結果、非常に複雑な自由エネルギーランドスケープを生み出し、そこには様々な秩序メソ構造が安定構造ないしは準安定構造として存在する。このようにソフトマターが形成する秩序メソ構造に外場を印加することにより、平衡状態からは予想もされない多様な相転移挙動が引き起こされる。A02 班ではさまざまな外場によって引き起こされるソフトマターの構造転移の機構を明らかにするとともに、メソスコピック構造制御のための新しい道筋の確立を目指してきた。その中で最大の成果は、この様なソフトマターの構造転移を生体系が生命としての機能を発現するためにどのように活用しているのかが見えてきたことである。

(1) 化学場および温度場による自己生産するベシクルの創成

生命が機能するための最小限の機能を備えた細胞をミニマルセルと呼び、それを人工的に合成する事は、物質科学与生命科学を繋ぐ重要な架け橋である[1]。ミニマルセルは、自己生産するベシクルとそのベシクル内で自己複製する遺伝情報分子(DNA)からなると考えられているが、本特定領域の菅原グループは安定に増殖を続けるミニマルセルの合成に成功した。菅原らは、カチオン性膜分子(V)を含む一定の膜組成からなるベシクルを用意し、内部に DNA 複製に必要な基質、DNA 合成酵素、プライマー、 Mg^{2+} を内包し、その膜内水相を熱サイクルにかけることで、ベシクル内部で DNA が増殖(DNA は熱サイクル 20 回で、平均 200 倍に増幅)することを、蛍光プローブで確認した[2]。次いで、そのベシクルの分散液に膜分子前駆体(V*)を添加すると、内水相で DNA が増幅したベシクルは、V*添加直後から数分の間に、複数のベシクルに分裂した。さらに、分裂後のベシクルの内水相が強い蛍光を放つことより、分裂前のベシクルの内部で増幅された DNA が、分裂したベシクルにも分配されていることが確認され、ベシクル内で DNA を複製しながら自己生産を続けるベシクルの創成に成功した(図 1)。この研究の中で、特に注目すべき現

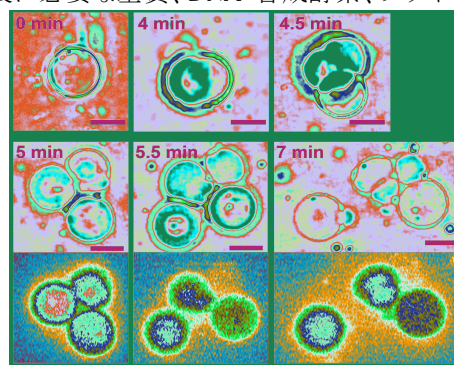


図1 菅原グループにより創成されたDNAを複製しながら増殖する人工細胞。1・2段目：自己生産するベシクルの時間発展像、3段目：ベシクル内でのDNAの自己複製を示す蛍光像

象として、DNA 自己複製と膜の自己生産が独立ではなく、相乗効果によりベシクルの増殖が加速される事が明らかとなった。これは、中に含まれる DNA のタイプによって増殖速度が異なる事実を意味し、特定の種類の DNA をもつベシクルのみが生き残るといふ、進化モデルとしての有用性が期待される。

一方、今井らは、細胞系において生命機能を維持するための基本的な膜変形機能、代謝系を支える膜変形である接着と孔形成、および増殖の基本となるベシクルの自己生産を最も単純な膜モデルである2成分脂質膜ベシクルを用いて再現する事に成功した。その基本コンセプトは2成分ベシクルの相分離と脂質分子の幾何学形状の結合によりベシクル膜に局所的な曲率を導入することである。膜同士を接着させるために逆コーン型脂質とシリンダー型脂質を混合させると、幾何学的な形状の不一致から膜内にストレスを生じる。アシル鎖の転移温度の違いを利用して、2種類の脂質を相分離させると、このストレスを解消させるために隣接するベシクル間に橋架け構造を形成し、安定にベシクルを接着させる事ができる[3]。ベシクルに孔をあける場合には、逆にコーン型脂質とシリンダー型脂質からなる2成分ベシクルを作製する。この場合はベシクルの温度を転移温度より下げてアシル鎖を秩序化させると、ベシクルの体積が一定のまま膜面積が減少するので、ベシクルの内圧が増大し、この圧力を解消する為にベシクルはバーストし孔をあける。この時コーン型脂質がその幾何学的形状により孔の縁を覆うため、孔は安定化されて継続的に存在するが、温度を上げると、相分離は解消され孔は閉じてしまう[4]。さらに脂質の頭部が小さなエタノールアミン基である PE 脂質とシリンダー型脂質からなる2成分ベシクルでは、温度の上げ下げによりベシクル内に子ベシクルを形成した後、膜を通して外側へ放出する自己増殖型ベシクルの一つである自己誕生型ベシクルができる事がわかった(図2)。さらに PE 脂質の量を制御させるともう一つの自己増殖型ベシクルである自己分裂型の経路も再現する事が明らかとなった[5]。

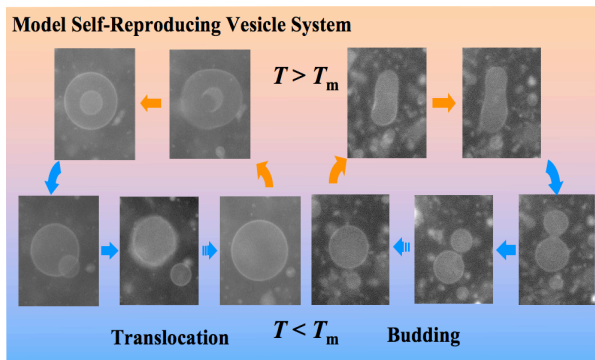


図2 温度サイクルによる自己生産するモデルベシクル系。(右)分裂型(左)自己誕生型

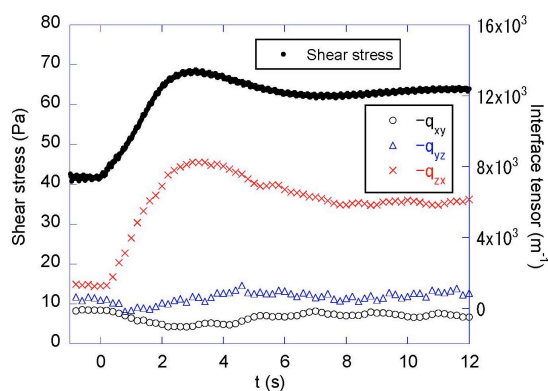


図3 PIB-LCP ブレンド系の定常剪断流下でステップ電場を印加した時の応力と界面テンソルの時間発展

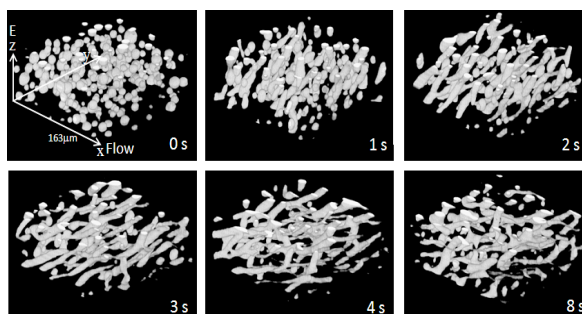


図4 定常剪断流下でドロプレットが分散した非相溶高分子ブレンドにステップ電場を印加したときの構造変化

これらの研究より、人工細胞の創成とそれを支える物理法則の解明に光が見え、ソフトマターと生命体を繋ぐ非平衡ソフトマターのシナリオが明らかになってきた。このような化学場や熱力学場のような外場とは別に、以下に述べるように、力学的な外場により秩序メソスコピック構造を制御することにより新しい物性を付与する研究も進められた。

(2) 電場・剪断流動場による非相溶流体構造転移ダイナミクス

互いに相溶しない2種類の流体を混合すると単一の流体にはない新たなレオロジー的性質が現れる事は古くから知られており、その制御は工業的に重要である。ある種の非相溶高分子ブレンド系において、流動場と電場を同時に印可するとこれらの相乗効果により平均粘度が劇的に上昇する電気粘性効果が注目を集めている。折原らのグループは、3次元動的構造とレオロジーの同時測定システムを構築することにより、電気粘性効果におけるメソ構造とレオロジーの定量的な解明に成功した[6,7]。同じ粘度を有するポリイソブチレン(PIB)と液晶性高分子(LCP)のブレンドを定常剪断流下 ($\dot{\gamma}=1 \text{ s}^{-1}$) でステップ電場(6 kV/mm)を印加したときの剪断応力の時間依存性を図3に示す。時刻 $t=0$ で電場を速度勾配の方向に印加している。電場を印加した直後に応力が増大し、極大に達した後ゆっくりと減少し、ほぼ一定となる。応力測定と同時に得られた3次元画像を併せて示す(図4)。流れの方向をx軸、電場の方向をz軸とした。電場印加前はPIB中にLCPがドロプレットとして分散している(0s)。電場印加直後にドロプレットは電場方向に伸びるとともに、合体も起こり、カラム的な構造ができる(1s)。時間が経過すると、さらにカラムは伸びるとともに剪断流れによって傾き(2-3s)、応力も増大する。傾きがさらに大きくなると(4 s)、応力は減少に転じる。最終的には、カラムが合体し、ドロプレット分散相とはトポロジー的に異なるネットワークが形成された(8s)。また、この実験で測定される応力は、界面からの寄与、バルク粘度からの寄与、マックスウェル応力の3種類ある。折原らはこの3つの応力を界面テンソルを用いて解析し、非相溶ブレンドにおける応力と構造は界面テンソルを通して関係づけられることを明らかにした[7]。

(3) ガラスやゲル相における局所構造と動的不均一性

(2)の外場下での秩序構造形成に関する研究の一方で、ソフトマターが有する特徴的な時空間階層構造を局所構造と動的構造の結合により理解する新しいパラダイムの研究が進んだ。田中肇らのグループは、球状コロイド分散系を用いて、粒子間に働く引力を制御することで、コロイド粒子の液体、クラスター、ゲル相における局所的な構造と粒子レベルでのダイナミクスを共焦点顕微鏡により実時間観察し、3次元粒子座標とその軌跡を調べた[8]。液体、クラスター、ゲルの各状態での動径分布関数を測定し、凝集状態を確認した。そして局所構造を定量解析することで、引力および隣接する粒子数に対する構造の変化の様子や、通常の結晶構造にはない局所構造が凝集体内に存在する結果を得た(図5)。また、粒子座標の時間変化を粒子ごとに追跡することで、粒子間の流体力学的相互作用を示唆する粒子間速度のベクトル相関を見出した。また、クラスター、ゲルの表面付近と、中心付近では粒子の運動性・運動様式が大きく異なることを見出した。これにより、メソスコピックな構造内の動的な不均一性が明らかにされただけでなく、隣接粒子数の少ない表面部とそれが多い中心部という空間的な特徴との相関が明らかになった。

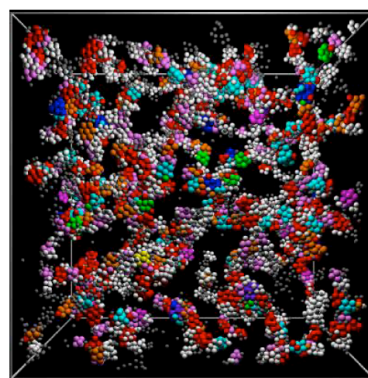


図5 コロイドゲルに見られた局所安定構造:ゲルにおける非エルゴート状態の実現、運動の凍結に、局所安定構造形成が重要であることを直接示した結果

この様な局所構造と動的構造の強い結合の理解により、結晶化、ガラス化、ゲル化などソフトマターに特徴的なメソ構造の起源を統一的に理解するための方向性を示すことができた。

- [1] K. Shohda, M. Tamura, Y. Kageyama, K. Suzuki, A. Suyama, and T. Sugawara, *Soft Matter* 7, 3750 (2011).
- [2] 菅原正, 化学で挑む生命の起源, 科学, 89(7) 712, 岩波書店, 2010
- [3] Y. Sakuma, M. Imai, M. Yanagisawa, and S. Komura, *Eur. Phys. J. E* 25, 403 (2008).
- [4] Y. Sakuma, T. Taniguchi, and M. Imai, *Biophys. J.* 99, 472 (2010).
- [5] Y. Sakuma and M. Imai, submitted.
- [6] K. Aida, Y. H. Na, T. Nagaya, and H. Orihara, *Phys. Rev. E* 80,041807 (2009).
- [7] H. Orihara, Y. Nishimoto, K. Aida, and Y. H. Na, *Phys. Rev. E* 83, 026302 (2011).
- [8] C. P. Royall, S. R. Williams, T. Ohtsuka, and H. Tanaka, *Nature Mater.* 7, 556 (2008).

○ A03 班: 非平衡構造のダイナミクス

A03 班のテーマは、外場による非平衡構造の形成と制御、非平衡状態における特異な能動輸送の解明などが主眼であった。非平衡構造の形成では、気体分子流とのクロス効果による液晶薄膜の集団歳差運動、高分子微結晶集合体による非平衡構造形成、相分離と架橋反応の競合を光照射で制御した構造形成、脂質二重膜とタンパク質の相互作用による膜突起の誘導など、構造制御に繋がる新たな成果が得られた。能動輸送に関しても重要な発見があった。レーザー等を用いて物質の濃度勾配、温度勾配、秩序度の勾配などを形成し、物質の輸送と操作を可能にする分子マニピュレーション法の発見とその原理の解明、さらには、変形を伴って自己推進運動するアクティブソフトマターの実験やその理論的枠組みを世界に先駆けて提案したことである。以下、主な研究成果の概要を述べる。

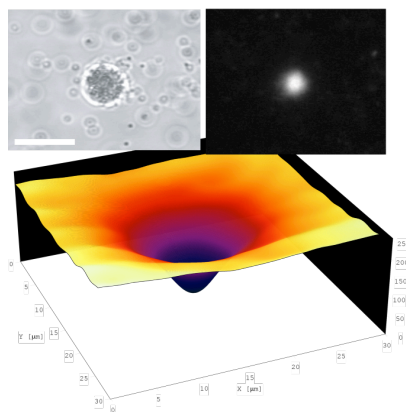


図1 非平衡枯渇力によるマイクロマニピュレーションとトラップ:200nm ビーズ(左上)、蛍光 DNA 分子(右上)、温度勾配による高分子の濃度分布の3次元表示(下)

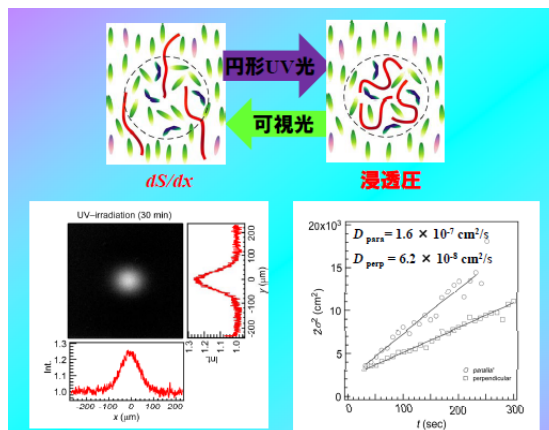


図2 分子マニピュレーターの原理(上)、分子マニピュレーターにより集められた蛍光高分子(左下)、拡散係数の測定(右下)

(1) 新原理によるマイクロマニピュレーションと分子マニピュレーター

非平衡統計物理学の基本的問題であり、かつ、応用的見地からも重要な現象が A03 班から得られた。それは、レーザー等を用いて空間中に温度や濃度、オーダーパラメータ等の勾配を形成することにより、

微小な物体や分子の輸送を引き起こし、これまで容易には集積できなかった物質を、集積し操作する新しい分子マニピュレーション方法の発見である。この効果は、A03 班の2つの研究グループが全く異なる実験系で独立に見出した。佐野グループは、高分子溶液をレーザーで局所加熱することにより高分子が熱拡散する非平衡性(ソレー効果)を用いると、温度の高い場所にコロイド粒子や DNA 分子、細胞などの種々の物質が集まる新しい現象を発見した。この効果により、通常はビーズに付着させないとレーザーでトラップできない DNA 分子や様々な微粒子を集積し、マニピュレートできることを実証するとともに、その原理を理論的に解明した[1](図1)。一方、太田グループの山本は、液晶と高分子などの混合系において、液晶の秩序変数が不純物濃度と結合する効果により、液晶の秩序度に空間的な勾配を形成すると分子をマニピュレートできることを見出した。アゾ基を有する液晶分子を用いると、紫外光でトランス-シス転移が誘起され、秩序変数の勾配が形成される。秩序度の低い領域に不純物が溶解することがエントロピー的に有利なため、高分子などの不純物が輸送される。この効果を利用して、実際に、蛍光顕微鏡を基本としたマニピュレータを試作し、高分子を捕集することに成功した[2](図2)。

(2) 液晶分子と気体流のクロス効果: キラル液晶膜の分子回転とバブルの安定性

・ キラル液晶膜の物質流による分子集団の歳差運動

キラル対称性を持った分子の液晶膜を透過するように物質流を形成すると、膜を透過する分子流によって鏡映対称性のない分子は一方向に回転し、結果として膜上に渦状のマクロな回転運動を引き起こすことを、多田グループが世界に先駆けて発見し、その分子メカニズムの解明に向けて研究を行ってきた(図3)。この特定領域の研究期間に多田らは、この現象の定量的な計測と分子機構の解明に徹底的に取り組み、回転トルクを生じさせるメカニズムに関して大きな進歩が得られた。スメクチック C*相をとる液晶を用い、透過させる分子種と膜厚を変えて液晶の回転速度を調べた実験では、水を除く中性の分子では、透過時に気体分子が失う運動量と液晶の角運動量がほぼ比例しており、古典的な衝突モデルで記述できることを明らかにした。一方、水分子の透過に関しては、歳差運動の方向は膜厚に依存し、膜厚が6~8層では回転方向が逆転する現象を見出し、分極シートが螺旋状に積層して生まれる静電的なトルクと液晶分子のねじれによるトルクの競合により起こる現象として解釈できることを示した[3]。

・ スメクチックバブルの不安定性

液晶薄膜として、半球殻状をしたバブルを用いて、膜透過する気体分子と液晶の運動の相互作用や、重力との競合、電場などの外場との相互作用を調べることで、バブルの変形や流動から極めて多くの情報が得られることを見出した。バブルの内部を空気、外部を窒素気体とすると、膜

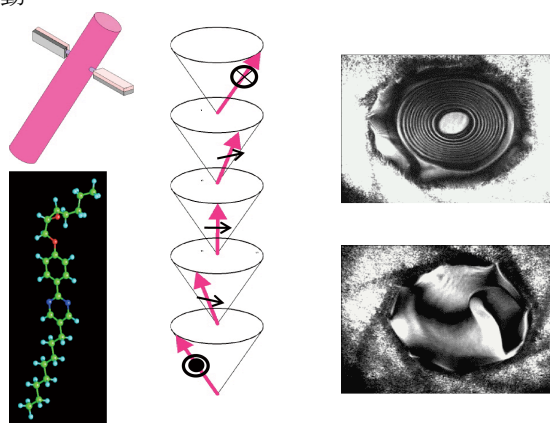


図3 物質流によるキラル液晶薄膜中の分子集団歳差運動、スメクチック液晶3層(右上)、4層の場合(右下)

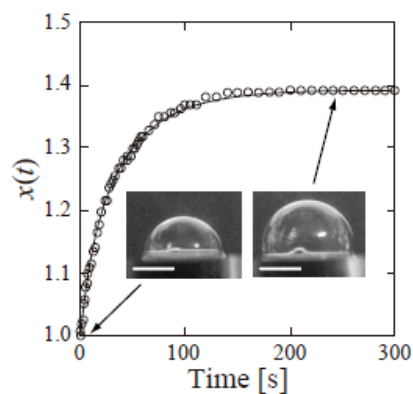


図4 スメクチックバブルの変形

の窒素に対する透過係数に応じてバブルは一定の大きさまで膨張または収縮する。このことから、バブルのサイズの測定から透過係数が高精度で求まることを明らかにした[3](図4)。さらには、電場を印加することによる変形や振動現象、密度差によるバブル膜のレイリー・テイラー不安定など多彩な非平衡現象の発見に至った。

(3) 自己推進粒子のダイナミクス

非平衡ソフトマターのこれからの重要な問題の一つとして、アクティブソフトマターがある。生体の細胞運動やマランゴニ効果による液滴の推進運動などがその例である。本特定領域研究では、菅原グループが化学反応を伴う油滴を用いて、佐野グループが細胞と非対称粒子を用いて自己推進運動の実現と測定を行っている[4]。多くの場合、ソフトマターの並進運動と形の変形は強い相関を持っており、それらを統一的に捉える理論的枠組みが求められていた。太田グループは、自己推進するソフトマタードロプレットのダイナミクスを記述するため、重心ベクトル、変形を表す2階と3階のテンソルに対する発展方程式を導入した[5]。このモデルは、運動が変形をもたらす場合と、変形により運動を生み出す場合の両方を扱うことができる特徴がある。理論解析により、系のパラメータを変化させることにより、直進運動、円運動、ジグザグ運動、カオス運動など多彩なダイナミクスが現われ、そのうちのいくつかは最近実験で観測された細胞運動の特徴と良い対応が見出された(図5)。また、空間3次元の場合の運動に関して、回転運動の他にヘリカルな運動が存在することを見出した[5]。この研究はアクティブソフトマターという新概念の発端となっており、A03 班公募研究の水野グループによる、生体ソフトマターの非平衡レオロジー特性解明の研究と結びつく他、富重グループや瀧口グループ、A02 班の菅原グループの実験研究とも深く関わっており、本特定領域が世界に先駆けて提案した概念として今後ますますその重要性を増していくものと期待される。

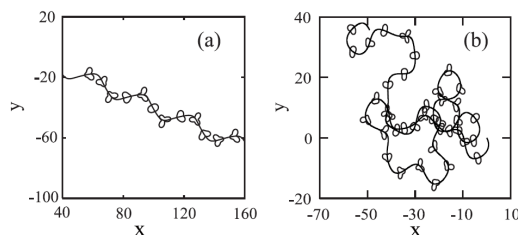


図5 変形を伴う自己推進粒子シミュレーション、(a)ジグザグ運動、(b)カオス運動

- [1] H.R. Jiang, H. Wada, N. Yoshinaga, and M. Sano, *Phys. Rev. Lett.* 102, 208301 (2009).
- [2] S. Samitsu, Y. Takanishi, and J. Yamamoto, *Nature Mat.* 9, 816-820 (2010).
- [3] K. Seki, K. Ueda, Y. Okumura, and Y. Tabe, *J. Phys.: Condens. Matter* 22, in press; Y. Ishii, S. Sugisawa, and Y. Tabe, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, in press.
- [4] 菅原の論文は、ACS Weekly Press PAC の他、New Scientists Tec で紹介された。また、佐野の論文は、APS Physics の View Point でハイライト紹介された。
- [5] T. Ohta and T. Ohkuma, *Phys. Rev. Lett.* 102, 154101 (2009), T. Hiraiwa, K. Shitara, and T. Ohta, *Soft Matter* 7, 3083-3086 (2011).

○ A04 班: 理論・モデリング

マイクロからマクロに渡る複雑な階層構造を有するソフトマターの研究においては、個々の階層の時間・空間スケールに特化した複数のモデルを有機的に結合することで、系の振る舞い全体を理解することが重要である。このような階層的なモデルの構築のためには、個別の階層に対応するモデルの整備を推進するとともに、粗視化の手法を用いた階層間接続の方法を確立する必要がある。A04 理論・モデリ

ング班では、A01～A03 班に属する実験グループおよび理論グループと共同して、理論およびシミュレーションモデルの開発を行い、さらに多階層モデルの構築を行った。ソフトマターを構成する分子や超分子構造のもつ多数の内部自由度は、優れた物性をもつ新規ソフトマターの分子設計に大きなフレキシビリティを与えている。A04 班の開発した多階層モデルを用いることで、新規材料の設計を行うことが可能となる。

(1) 高分子のマイクロ構造形成の多階層シミュレーション技術の開発と実験との連携

高分子混合体やブロック共重合体などのメソスケールの相分離構造をもつ高分子材料は、高分子機能膜材料、光機能性高分子材料など各種の機能性材料として幅広く活用されている。これらの系の特徴は、メソスケールの相分離構造が、高分子鎖のミクロスケールの配位エントロピーによって決められるという点である。このように、高分子のメソスケールの不均一構造を鎖の構造のレベルから導き出すことのできる理論体系である密度汎関数理論(自己無撞着場理論およびギンツブルグ・ランダウ理論)を用いることで、高分子系のマクロな流動特性や凝集状態の構造とダイナミクスをミクロレベルから予測・再現する計算手法を開発した。さらにこのような理論的手法を実験データと協調させることで現実系の理解をより促進し、実験では直接測定することのできない情報を引き出すことも可能となる。

図 1 は、動的自己無撞着場理論によってシミュレートされたジブロック共重合体メルトのジャイロイド構造からシリンダ構造への直流電場による構造相転移の途中段階の遷移状態[1]、図2は同じく動的自己無撞着場理論でシミュレートされた A-B-A 型のトリブロック共重合体薄膜における穴あきラメラ構造からシリンダ構造への転移の動的経路[2]である。これらの構造相転移の動的経路の正確な把握は、往々にして非平衡構造となりうる高分子材料の最終状態を予測・設計する際に重要な知見を与える。自己無撞着場理論は、寿命が短いために実験的に観測が困難な中間構造を予測するために有用だけでなく、実験からは直接得ることのできない微細な構造を予測する際にも威力を発揮する。

図 3(a)は、A02 班の陣内グループによって測定された PS-PI ジブロック共重合体のラメラ構造の 3 次元電子線トモグラフィー (TEMT) 像である。近年、このような 3 次元ドメイン構造の直接観測が可能になって

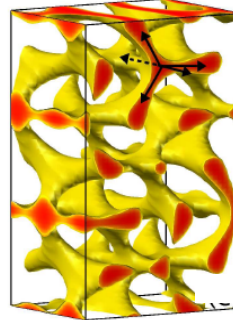


図 1 電場によるジャイロイド構造からシリンダ構造への転移の際に現れる 5 点分岐を持つ準安定な中間構造。

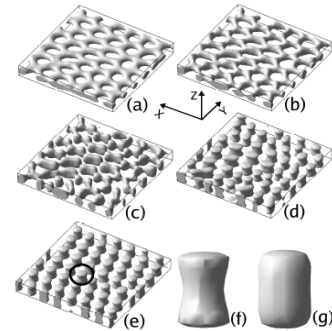


図 2 : (a)–(e) 穴あきラメラ構造に電場を印加したときの構造変化。(f) (g) 生成されたシリンダ構造。

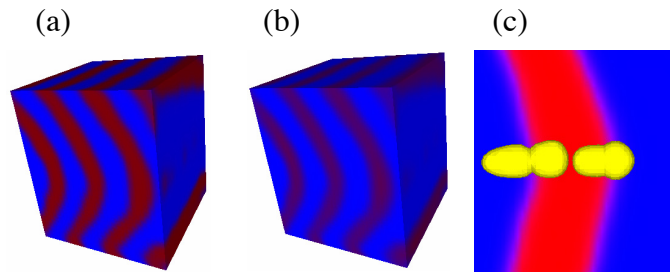


図 3 (a) PS-PI ジブロック共重合体のラメラ構造の 3 次元 TEMT 写真と、(b) それを元に構成された 3 次元自己無撞着場理論の計算結果。(c) の図は、(a) の構造中の曲がった界面近傍に存在する鎖の配位を自己無撞着場理論を用いて再現した結果。

図 3(a)は、A02 班の陣内グループによって測定された PS-PI ジブロック共重合体のラメラ構造の 3 次元電子線トモグラフィー (TEMT) 像である。近年、このような 3 次元ドメイン構造の直接観測が可能になって

きたが、その内部における鎖の配位などのミクロな情報を実験で観測することはきわめて困難である。このような場合に、TEMT 写真と自己無撞着場理論による 3 次元シミュレーションを組み合わせることで、図3(b)のようにドメイン構造を再現するだけでなく、図 3(c)に示すような個々の鎖の配位を計算することも可能となった[3]。

(2) 電解質溶液における溶媒和効果の理論および実験の連携

電解質溶液においては、イオンの選択的水和効果と相分離現象が結合することで、ブロック共重合体のミクロ相分離に類似の種々の興味深い相分離現象が生じることが小貫グループの貞包、瀬戸らによって発見された[4]。これは、水(重水)と 3 メチルピリジンの混合溶液にテトラフェニルホウ酸ナトリウム(NaBPh_4)を加えた系で、 NaBPh_4 が親水性の陽イオンと疎水性の陰イオンに解離することでそれぞれが水と 3 メチルピリジンを引きつけ、相分離を誘発するという現象である。 NaBPh_4 の濃度が高い領域で、数十ナノメートル程度の特徴的長さを持つマイクロドメイン構造が生成されることがわかった。さらに、図4に示すように、水の組成が90%以上の領域で NaBPh_4 の濃度が 85mM のときにオニオン構造が生成されることも発見された。

この現象の理論的な解明が小貫グループによってなされた。まず、選択的水和効果を取り入れた 2 成分溶液の界面近傍のイオン分布や界面張力を解析的に調べることで、界面張力のギブス公式に対してイオンの電気的相互作用の果たす役割を考慮した。この解析の結果、界面に形成される電気二重層の影響により実験で見られたようなメソスケールの相分離構造が生成されることを明らかにした[5]。さらに小貫と荒木はこのモデル系のシミュレーションを行い、図5に示すようなマイクロ相分離構造が形成されることを理論的に示した[6]。ここでも、界面近傍に形成される電気二重層の存在が、ドメイン構造の安定化に寄与していることが確認された。これらの理論的な研究により、実験で発見された電解質溶液のミクロ相分離構造の形成機構が明確になり、現象の理解を促進することができた。

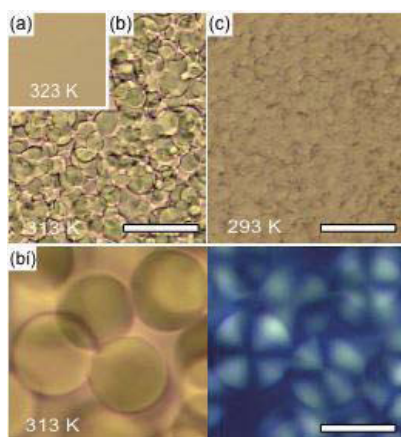


図4 水/3メチルピリジン/ NaBPh_4 系で生成されるオニオン状構造の温度変化の光学顕微鏡写真。

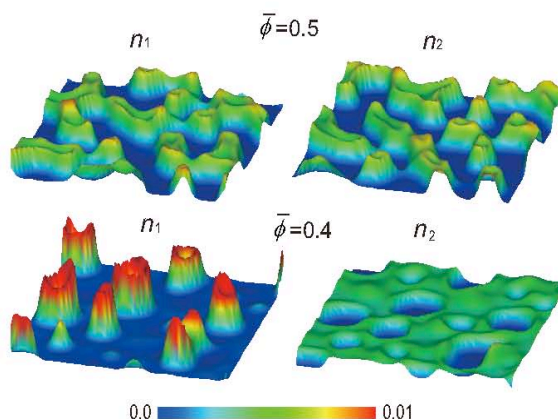


図5 水/油/親水性カチオン/疎水性アニオンの 4 成分系のシミュレーションで得られた実験に類似のマイクロ相分離構造。

(3) Onsager の変分原理に立脚したソフトマターの非平衡ダイナミクスの定式化

非平衡ソフトマター物理学の創成、および、その発展には、次世代を担う若手研究者を育てることが重要である。そのためには、先端的研究を行うと同時にその活動に基づく優れた教科書が必要である。本

特定領域研究期間中に、本メンバーによる数冊の教科書、参考書、訳書が出版されたが、ここでは土井氏の教科書「ソフトマター物理学入門」を取り上げる[7]。

「ソフトマター物理学入門」では、前半はコロイド、高分子溶液、高分子弾性体、液晶、界面活性剤の物質に即して熱平衡状態の理論を説明し、後半はダイナミクスを扱う一般理論を、特に、Onsager の変分原理を全面に出して定式化し、非線形非平衡現象としての「ソフトマターにおける物質拡散」に適用している。メソスコピックスケールの粗視化理論としては射影演算子法や Poisson 括弧法が知られているが、ソフトマターのように遅い変数が互いにカップルした複雑な系では Onsager の変分原理に立脚した方法が見通しがいいことを示している。Onsager の相反定理を仮定しているので揺動散逸定理が成立する系を対象とするが、ソフトマターでは、粉体や自己推進系などを除外すれば、強い制限とならない汎用性がある。

- [1] D.Q.Ly, T.Honda, T.Kawakatsu, and A.V.Zvelindovsky, *Macromolecules* 40, 2928 (2007).
- [2] D.Q. Ly, T.Honda, T. Kawakatsu, and A.V. Zvelindovsky, *Soft Matter* 5, 4814 (2009).
- [3] H. Morita, T. Kawakatsu, M. Doi, T. Nishi, and H. Jinnai, *Macromolecules* 41, 4845 (2008).
- [4] K. Sadakane, et al., *Phys. Rev. Lett.* 103, 167803 (2009).
- [5] A. Onuki, *Phys. Rev. E* 73, 021506 (2006), *J. Chem. Phys.* 128, 224704 (2008); *Europhys. Lett.* 82, 58002 (2008).
- [6] T. Araki and A. Onuki, *J. Phys.: Condens. Matter* 21, 224704 (2009).
- [7] 土井正男, ソフトマター物理学入門(岩波書店, 2010).

○研究成果による産業財産権の出願・取得状況

本特定領域研究では5年間で計画研究6件、公募研究10件の産業財産権を取得した。

5. 研究成果の取りまとめの状況

本特定領域研究の各年度の研究活動および研究成果は、平成18年度研究成果報告書、平成19年度研究成果報告書、平成20年度研究成果報告書、平成21年度研究成果報告書(すべて文部科学省に送付済)において取りまとめた。平成23年5月には研究成果報告書(冊子体)を作成し、5年間の研究活動および全研究成果を取りまとめた。なお、平成22年度の研究成果は、研究成果報告書(冊子体)に含まれている。

6. 研究成果の公表の状況(主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等)

(1) 主な論文等一覧

研究領域全体の発表論文(すべて査読有)数は計画研究593篇、公募研究399篇、総計992篇である。以下には計画研究と公募研究(前期・後期)の主な論文を、新しいものから年代順に記載する。

○ 計画研究(平成18年度～22年度)

1. Yuriko Kosaka, Makiko Ito, Youhei Kawabata, and Tadashi Kato*
“Lamellar-to-Onion Transition with Increasing Temperature under Shear Flow in a Nonionic Surfactant/Water System”
Langmuir, Vol. 26, 3835-3842 (2010), Times Cited: 6
2. Fumihiko Tanaka*, Tsuyoshi Koga, Hiroyuki Kojima, and Françoise M. Winnik

- “Temperature- and Tension-Induced Coil–Globule Transition of Poly(N-isopropylacrylamide) Chains in Water and Mixed Solvent of Water/Methanol”
 Macromolecules, Vol. 42, 1321-1330 (2009), Times Cited: 15
3. Hong-Ren Jiang, Hirofumi Wada, Natsuhiko Yoshinaga, and Masaki Sano*
 “Manipulation of Colloids by a Nonequilibrium Depletion Force in a Temperature Gradient”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 102, 208301-1 - 208301-4 (2009), Times Cited: 14
 4. Takao Ohta* and Takahiro Ohkuma
 “Deformable Self-Propelled Particles”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 102, 154101-1 - 154101-4 (2009), Times Cited: 13
 5. Atsushi Noro, Yushu Matsushita*, and Tim Lodge
 “Thermoreversible Supramacromolecular Ion Gels via Hydrogen Bonding ”
 Macromolecules, Vol. 41, 5839-5844 (2008), Times Cited: 27
 6. Fumihiko Tanaka*, Tsuyoshi Koga, and Françoise M Winnik
 “Temperature-Responsive Polymers in Mixed Solvents: Competitive Hydrogen Bonds Cause Cononsolvency”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 101, 028302-1 - 028302-4 (2008), Times Cited: 30
 7. Kenji Takahashi, Masatoshi Ichikawa, and Yasuyuki Kimura*
 “Force between Colloidal Particles in a Nematic Liquid Crystal Studied by Optical Tweezers”
 Phys. Rev. E , Vol. 77, 020703(R)-1 - 020703(R)-4 (2008), Times Cited: 17
 8. Sadaki Samitsu*, Takeshi Shimomura, and Kohzo Ito
 “Nanofiber Preparation by Whisker Method using Solvent-solubleconducting Polymers”
 Thin Solid Films, Vol. 516, 2478-2486 (2008), Times Cited: 13
 9. Yusuke T. Maeda*, Junya Inose, Miki Y. Matsuo, Suguru Iwaya, and Masaki Sano
 “Ordered Patterns of Cell Shape and Orientational Correlation during Spontaneous Cell Migration”
 PLoS ONE, Vol. 3, e3734-1 - e3734-14 (2008), Times Cited: 16
 10. Akihiko Toda*, Mari Okamura, Ken Taguchi, Masamichi Hikosaka, and Hiroshi Kajioaka
 “Branching and Higher Order Structure in Banded Polyethylene Spherulites”
 Macromolecules, Vol. 41, 2484-2493 (2008), Times Cited: 13
 11. Tadashi Kajiya*, Daisaku Kaneko, and Masao Doi
 “Dynamical Visualization of "Coffee Stain Phenomenon" in Droplets of Polymer Solution via Fluorescent Microscopy”
 Langmuir, Vol. 24, 12369-12374 (2008), Times Cited: 22
 12. Akira Onuki*
 “Surface Tension of Electrolytes: Hydrophilic and Hydrophobic Ions near an Interface”
 J. Chem. Phys., Vol. 128, 224704-1 - 224704-8 (2008), Times Cited: 19
 13. Miho Yanagisawa, Masayuki Imai*, and Takashi Taniguchi
 “Shape Deformation of Ternary Vesicles Coupled with Phase Separation”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 100, 148102-1 - 148102-4 (2008), Times Cited: 27
 14. Hiroshi Watanabe*, Yumi Matsumiya, Jun Takada, Hiroshi Sasaki, Yoshiaki Matsushima, Akira Kuriyama, Tadashi Inoue, Kyung Hyun Ahn, Wei Yu, and Ramanan Krishnamoorti
 “Viscoelastic and Dielectric Behavior of a Polyisoprene/Poly(4-tert-butyl styrene) Miscible Blend”
 Macromolecules, Vol. 40, 5389-5399 (2007), Times Cited: 12
 15. Yushu Matsushita*
 “The Creation of Hierarchically-Ordered Nanophase Structures In Block Polymers Having Various Competing Interaction”
 Macromolecules, Vol. 40, 771-776 (2007), Times Cited: 43
 16. Xing-Ping Qiu*, Fumihiko Tanaka, and Françoise M. Winnik
 “Temperature-Induced Phase Transition of Well-Defined Cyclic Poly(N-isopropylacrylamide)s in Aqueous Solutions”
 Macromolecules, Vol. 40, 7069-7071 (2007), Times Cited: 63
 17. Sho Miyazaki, Hitoshi Endo, Takeshi Karino, Kazutoshi Haraguchi, and Mitsuhiro Shibayama*
 “Gelation Mechanism of Poly(N-isopropylacrylamide)-Clay Nanocomposite Gels”
 Macromolecules, Vol. 40, 4287-4295 (2007), Times Cited: 34
 18. Shuichi Kimata, Takashi Sakurai, Yoshinobu Nozue*, Tatsuya Kasahara, Noboru Yamaguchi,

- Takeshi Karino, Mitsuhiro Shibayama, and Julia A. Kornfield*
 “Molecular Basis of the Shish-Kebab Morphology in Polymer Crystallization”
 Science, Vol. 316, 1014-1017 (2007), Times Cited: 55
19. Miho Yanagisawa, Masayuki Imai*, Tomomi Masui, Shigeyuki Komura, and Takao Ohta
 “Growth Dynamics of Domains in Ternary Fluid Vesicles”
 Biophysical J., Vol. 92, 115-125 (2007), Times Cited: 48
 20. Takeshi Kawasaki, Takeaki Arai, and Hajime Tanaka*
 “Correlation between Dynamic Heterogeneity and Medium-Range Order in Two-Dimensional Glass-Forming Liquids”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 99, 215701-1 - 215701-4 (2007), Times Cited: 40
 21. Kazumasa A. Takeuchi, Masafumi Kuroda, Hugues Chaté, and Masaki Sano*
 “Directed Percolation Criticality in Turbulent Liquid Crystals”
 Phys. Rev. Lett. 99, 234503-1 - 234503-4 (2007), Times Cited: 52
 22. Dung Q.Ly, Takashi Honda, Toshihiro Kawakatsu, and Andrei V. Zvelindovsky*
 “Kinetic Pathway of Gyroid-to-Cylinder Transition in Diblock Copolymer Melt Under Electric Field”
 Macromolecules, Vol. 40, 2928-2935 (2007), Times Cited: 10
 23. Toshiji Kanaya*, Go Matsuba, Yoshiko Ogino, Koji Nishida, Hirohiko M. Shimizu, Takenao Shinohara, Takayuki Oku, Junichi Suzuki, and Toshiya Otomo
 “Hierarchic Structure of Shish-Kebab by Neutron Scattering in a Wide Q Range”
 Macromolecules, Vol. 40, 3650-3654 (2007), Times Cited: 16
 24. Satoshi Okabe, Ken-ichi Seno, Shokoku Kanaoka, Sadahito Aoshima, and Mitsuhiro Shibayama*
 “Micellization Study on Block and Gradient Copolymer Aqueous Solutions by DLS and SANS”
 Macromolecules, Vol. 39, 1592-1597 (2006), Times Cited: 28
 25. C. Ishino and K. Okumura*
 “Nucleation Scenarios for Wetting Transition on Textured Surfaces: the Effect of Contact Angle Hysteresis”
 Europhys. Lett., Vol. 76, 464-470 (2006), Times Cited: 21
 26. C. Vöeltz*, Y. Maeda, Y. Tabe, and H. Yokoyama
 “Director-configurational Transitions around Microbubbles of Hydrostatically Regulated Size in Liquid Crystals”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 97, 227801-1 - 227801-4 (2006), Times Cited: 10
 27. Kohtaro Yamada, Makiko Nonomura, and Takao Ohta*
 “Fddd Structure in AB-type Diblock Copolymers”
 J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 18, L421-L427 (2006), Times Cited: 15
 28. Tohru Okuzono*, Kin'ya Ozawa, and Masao Doi
 “Simple Model of Skin Formation caused by Solvent Evaporation in Polymer Solutions”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 97, 136103-1 - 136103-4 (2006), Times Cited: 13
 29. Tadashi Kajiya, Eisuke Nishitani, Tatsuya Yamaue*, and Masao Doi
 “Piling to Buckling Transition in the Drying Process of Polymer Solution Drop on Substrate Having Large Contact Angle”
 Phys. Rev. E, Vol. 73, 011601-1 - 011601-5 (2006), Times Cited: 31
 30. Kang Kim, Yasuya Nakayama, and Ryoichi Yamamoto*
 “Direct Numerical Simulations of Electrophoresis”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 96, 208302-1 - 208302-4 (2006), Times Cited: 29
 31. Tetsu Mitsumata*, Kazuki Sakai, and Jun-ichi Takimoto
 “Giant Reduction in Dynamic Modulus of κ -Carrageenan Magnetic Gels”
 J. Phys. Chem. B, Vol. 110, 20217-20223 (2006), Times Cited: 19
- 公募研究(平成19年度～20年度)
1. Ken-ichi Ishii, Tsutomu Hamada*, Masaomi Hatakeyama, Ryoko Sugimoto, Takeshi Nagasaki, and Masahiro Takagi
 “Reversible Control of Exo- and Endo-Budding Transitions in a Photosensitive Lipid Membrane”
 ChemBioChem, Vol. 10, 251-256 (2009), Times Cited: 13
 2. Yukihiro Tamba and Masahito Yamazaki*

- “Magainin 2-induced Pore Formation in Membrane Depends on its Concentration in Membrane Interface”
J. Phys. Chem. B, Vol. 113(14), 4846-4852 (2009), Times Cited: 15
3. Yohko Tanaka-Takiguchi, Makoto Kinoshita, and Kingo Takiguchi*
 “Septin-Mediated Uniform Bracing of Phospholipid Membranes”
Current Biology, Vol. 19, 140-145 (2009), Times Cited: 14
 4. Rika Nojima, Takahiro Sato*, Xingping Qiu, and Françoise M. Winnik
 “Light Scattering Evidence for the Random Association of Flower Micelles of a Telechelic Hydrophobically Modified Poly(*N*-isopropylacrylamide) in Dilute Aqueous Solution”
Macromolecules, Vol. 41, 292-294 (2008), Times Cited: 13
 5. Toshiyuki Shikata*, Takuya Nishida, Benjamin Isare, Mathieu Linares, Roberto Lazzaroni, and Laurent Bouteiller
 “Structure and Dynamics of a Bisurea-Based Supramolecular Polymer in *n*-Dodecane”
J. Phys. Chem. B, Vol. 112, 8459-8465 (2008), Times Cited: 13
 6. Shoichi Kutsumizu*, Hiroyuki Mori, Machiko Fukatami, Shigeharu Naito, Koichi Sakajiri, and Kazuya Saito
 “Cubic Phase Formation and Interplay between Alkyl Chains and Hydrogen Bonds in 1,2-Bis(4'-*n*-alkoxybenzoyl)hydrazines (BABH-*n*)”
Chem. Mater., Vol. 20, 3675-3687 (2008), Times Cited: 16
 7. Keiji Tanaka*, Yoshihisa Fujii, Hironori Atarashi, Kei-ichi Akabori, Masahiro Hino, and Toshihiko Nagamura
 “Non-solvents Cause Swelling at the Interface with Poly(methyl Methacrylate) Films”
Langmuir, Vol. 24(1), 296-301 (2008), Times Cited: 13
 8. Kenichi Nagase, Jun Kobayashi, Yoshikatsu Akiyama, Masahiko Annaka, Hideko Kanazawa, and Teruo Okano*
 “Influence of Graft Interface Polarity on Hydration/dehydration of Grafted Thermoresponsive Polymer Brushes and Steroid Separation Using Aqueous Chromatography”
Langmuir, Vol. 40, 10981-10987 (2008), Times Cited: 13
 9. Kazuhiro Shikinaka, Hyuckjoon Kwon, Akira Kakugo, Hidemitsu Furukawa, Yoshihito Osada, Jian Ping Gong*, Yoshitaka Aoyama, Hideo Nishioka, Hiroshi Jinnai, and Takaharu Okajima
 “Observation of the Three-Dimensional Structure of Actin Bundles Formed with Polycations”
Biomacromolecules, Vol. 9, 537-542 (2008), Times Cited: 13
 10. Takeaki Araki and Hajime Tanaka*
 “Physical Principle for Optimizing Electrophoretic Separation of Charged Particles”
Europhysics Letters, Vol. 82, 18004-1 - 18004-6 (2008), Times Cited: 11
 11. Shinichi Sakurai*
 “Progress in Control of Microdomain Orientation in Block Copolymers-Efficiencies of Various External Fields”
Polymer, Vol. 49, 2781-2796 (2008), Times Cited: 22
 12. Kenji Urayama*
 “Selected Issues in Liquid Crystal Elastomers and Gels”
Macromolecules, Vol. 40, 2277-2288 (2007), Times Cited: 34
 13. Ken-ichi Niihara, Ukyo Matsuwaki, Naoya Torikai, Hironori Atarashi, Keiji Tanaka*, and Hiroshi Jinnai
 “A Novel Structural Analysis for A Cylinder-forming Blockcopolymer Thin Film Using Neutron Reflectivity Aided By Transmission Electron Microtomography”
Macromolecules, Vol. 40(19), 6940-6946 (2007), Times Cited: 10
 14. Tsutomu Hamada, Yoko Miura, Ken-ichi Ishii, Sumiko Araki, Kenichi Yoshikawa, Mun'delanj Vestergaard, and Masahiro Takagi*
 “Dynamic Processes in Endocytic Transformation of a Raft-Exhibiting Giant Liposome”
J. Phys. Chem. B, Vol. 111, 10853-10857 (2007), Times Cited: 24
 15. Yukihiro Tamba, Shinya Ohba, Masayo Kubota, Hiroe Yoshioka, Hisashi Yoshioka, and Masahito Yamazaki*
 “Single GUV Method Reveals Interaction of Tea Catechin (-)-Epigallocatechin Gallate with Lipid

- Membranes”
 Biophys. J., Vol. 92, 3176-3194 (2007), Times Cited: 25
16. Akihiro Kishimura, Aya Koide, Kensuke Osada, Yuichi Yamasaki, and Kazunori Kataoka*
 “Encapsulation of myoglobin in PEGylated polyion complex vesicles made from a pair of oppositely charged block ionomers: a physiologically available oxygen carrier”
 Angew. Chem. Int. Ed. , Vol. 46, 6085-6088 (2007), Times Cited: 41
 17. Masahiko Annaka*, Chie Yahiro, Kenichi Nagase, Akihiko Kikuchi, and Teruo Okano
 “Real-time Observation of Coil-to-globule Transition in Thermosensitive Poly(*N*-isopropyl acrylamide) Brushes by Quartz Crystal Microbalance”
 Polymer, Vol. 48, 5713-5720 (2007), Times Cited: 18
 18. Hiroshi Jinnai*, Yuki Shinbori, Tatsuro Kitaoka, Keizo Akutagawa, Naruhiko Mashita, and Toshio Nishi
 “Three-dimensional Structure of a Nano-composite Material Consisting of Two Kinds of Nano-fillers and Rubbery Matrix Studied by Transmission Electron Microtomography”
 Macromolecules, Vol. 40, 6758-6764 (2007), Times Cited: 15
 19. Jun-ichi Fukuda*, Makoto Yoneya, and Hiroshi Yokoyama
 “Surface-groove-induced Azimuthal Anchoring of a Nematic Liquid Crystalline : Berreman's Model Reexamined”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 98, 187803-1 - 187803-4 (2007), Times Cited: 27
 20. Jin Seog Gwag*, Jun-ichi Fukuda, Makoto Yoneya, and Hiroshi Yokoyama
 “In-plane Bistable Nematic Liquid Crystal Devices Based on Nanoimprinted Surface Relief”
 Appl. Phys. Lett., Vol. 91, 073504-1 - 073504-3 (2007), Times Cited: 25
 21. Takeshi Kawasaki, Takeaki Araki, and Hajime Tanaka*
 “Correlation between Dynamic Heterogeneity and Medium-Range Order in Two-Dimensional Glass-Forming Liquids”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 99, 215701-1 - 215701-4 (2007), Times Cited: 40
 22. Tomoko Tada, Alyson Simonetta, Matthew Batterton, Makoto Kinoshita, Dieter Edbauer, and Morgan Sheng*
 “Role of Septin Cytoskeleton in Spine Morphogenesis and Dendrite Development in Neurons”
 Current Biology, Vol. 17, 1752-1758 (2007), Times Cited: 52
 23. Rodney D. Priestley, Linda J. Broadbelt, John M. Torkelson*, and Koji Fukao*
 “Glass Transition and α -relaxation Dynamics of Thin Films of Labeled Polystyrene”
 Phys. Rev. E, Vol. 75, 061806-1 - 061806-10 (2007), Times Cited: 20
 24. Martin M. Hanczyc, Taro Toyota, Takashi Ikegami, Norman Packard, and Tadashi Sugawara*
 “Fatty Acid Chemistry at the Oil-Water Interface: Self-Propelled Oil Droplets”
 J. Am. Chem. Soc., Vol. 129, 9386-9391 (2007), Times Cited: 25
 25. Satoshi Tsuchiya and Akihiko Matsuyama*
 “Translocation and Insertion of an Amphiphilic Polymer”
 Phys. Rev. E, Vol. 76, 011801-1 - 011801-6 (2007), Times Cited: 12
 26. H. M. Wyss*, K. Miyazaki, J. Mattsson, Z. Hu, D. R. Reichman, and D. A. Weitz
 “Strain-Rate Frequency Superposition - A rheological probe of structural relaxation in soft materials”
 Phys. Rev. Lett, Vol. 98, 238303-1 - 238303-4 (2007), Times Cited: 46
 27. L. Berthier*, G. Biroli, J.-P. Bouchaud, W. Kob, K. Miyazaki, and D. R. Reichman
 “Spontaneous and induced dynamic correlations in glass formers. II. Model calculations and comparison to numerical simulations”
 J. Chem. Phys, Vol. 126, 184503-1 - 184503-21 (2007), Times Cited: 55
 28. Tomonari Sumi*, Kazuhiko Kobayashi, and Hideo Sekino
 “Behavior of a Polymer Chain Immersed in a Binary Mixture of Solvents”
 J. Chem. Phys, Vol. 127, 164904-1 - 164904-7 (2007), Times Cited: 5

○ 公募研究(平成21年度～22年度)

1. Yohei Tateishi, Naoki Kai, Hidenori Noguchi, Kohei Uosaki, Toshihiko Nagamura, and Keiji Tanaka*
 “Local Conformation of Poly(methyl methacrylate) at Nitrogen and Water Interfaces”

- Polym. Chem., Vol. 1, 303-311 (2010), Times Cited: 4
2. Amany S. El-Khouly*, Yoshiaki Takahashi, Akihiko Takada, A. A. Safaan, El-Refaie Kenawy, and Y. A. Hafiz
 “Characterization and Thermal Stability of Cellulose-graft-Polyacrylonitrile Prepared by Using KMnO₄/Citric Acid Redox System”
 J. Appl. Polym. Sci., Vol. 116, 1788-1795 (2010), Times Cited: 6
 3. Hiroshi Noguchi*
 “Dynamics of Fluid Vesicles in Oscillatory Shear Flow”
 J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 79, 24801-1 - 24801-10 (2010), Times Cited: 4
 4. Masamune Morita, Mun’delanji Vestergaard*, Tsutomu Hamada, and Masahiro Takagi
 “Real-time Observation of Model Membrane Dynamics Induced by Alzheimer's Amyloid Beta”
 Biophys. Chem., Vol. 147, 81-86 (2010), Times Cited: 4
 5. O. Serve, Y. Kamiya, A. Maeno, M. Nakano, C. Murakami, H. Sasakawa, Y. Yamaguchi, T. Harada, E. Kurimoto, M. Yagi-Utsumi, T. Iguchi, K. Inaba, J. Kikuchi, O. Asami, T. Kajino, T. Oka, M. Nakasako, and K. Kato*
 “Redox-Dependent Domain Rearrangement of Protein Disulfide Isomerase Coupled with Exposure of Its Substrate-Binding Hydrophobic Surface”
 J. Mol. Biol., Vol. 396, 361-374 (2010), Times Cited 6
 6. Jun-ichi Fukuda* and Slobodan Žumer
 “Novel Defect Structures in a Strongly Confined Liquid-Crystalline Blue Phase”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 104, 017801-1 - 017801-4 (2010), Times Cited: 9
 7. Hiroki Ohta* and Shin-ichi Sasa
 “A Universal Form of Slow Dynamics in Zero-Temperature Random-Field Ising Model”
 Europhys. Lett., Vol. 90, 27008-1 - 27008-5 (2010), Times Cited: 3
 8. Yanli Mao, Zhiguo Shang, Yosuke Imai, Tyuji Hoshino, Ryugo Tero, Motohiko Tanaka, Naoki Yamamoto, Katsuhiko Yanagisawa, and Tsuneo Urisu*
 “Surface-Induced Phase Separation of a Sphingomyelin/Cholesterol/Ganglioside GM1-Planar Bilayer on Mica Surfaces and Microdomain Molecular Conformation That Accelerates A β Oligomerization”
 Biochim. Biophys. Acta, Vol. 1798, 1090-1099 (2010), Times Cited: 7
 9. Kenichiro Koga*, Joseph O. Indekeu, and Benjamin Widom
 “Infinite-Order Transitions in Density-Functional Models of Wetting”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 104, 036101-1 - 036101-4 (2010), Times Cited: 3
 10. Ryojun Sekine, Hiroyuki Aoki*, and Shinzaburo Ito
 “Conformation of Single Block Copolymer Chain in Two-Dimensional Microphase-Separated Structure Studied by Scanning Near-Field Optical Microscopy”
 J. Phys. Chem. B, Vol. 113, 7095-7100 (2009), Times Cited: 4
 11. Kenji Nakamura* and Toshiyuki Shikata
 “Systematic Dielectric and NMR Study of the Ionic Liquid 1-Alkyl-3-Methyl Imidazolium”
 ChemPhysChem, Vol. 11, 285-294 (2009), Times Cited: 9
 12. Keiji Tanaka*, Yohei Tateishi, Yohei Okada, Toshihiko Nagamura, Masao Doi, and Hiroshi Morita
 “Interfacial Mobility of Polymers on Inorganic Solids”
 J. Phys. Chem. B, Vol. 113, 4571-4577 (2009), Times Cited: 7
 13. Hiroshi Noguchi*
 “Swinging and Synchronized Rotations of Red Blood Cells in Simple Shear Flow”
 Phys. Rev. E, Vol. 80, 21902-1 - 21902-8 (2009), Times Cited: 8
 14. Taro Toyota, Naoto Maru, Marthin M. Hanczyc, Takashi Ikegami, and Tadashi Sugawara*
 “Self-Propelled Oil Droplets Consuming "Fuel" Surfactant”
 J. Am. Chem. Soc., Vol. 131, 5012-5013 (2009), Times Cited: 10
 15. Shuji Fujii*, Sven Koschoreck, Peter Lindner, and Walter Richtering
 “Influence of a Triblock Copolymer on Phase Behavior and Shear-Induced Topologies of a Surfactant Lamellar Phase”
 Langmuir, Vol. 25, 5476-5483 (2009), Times Cited: 8
 16. Priyanka Dobriyal, Hongqi Xiang, Matsunaga Kazuyuki, Jiun-Tai Chen, Hiroshi Jinnai, and Thomas P. Russell*

- “Cylindrically Confined Diblock Copolymers”
 Macromolecules, Vol. 42, 9082-9088 (2009), Times Cited: 16
17. John Dupont, Guojun Liu*, Ken-ichi Niihara, Ryuhei Kimoto, and Hiroshi Jinnai
 “Self-Assembled ABC Triblock Copolymer Double and Triple Helices”
 Angewandte Chemie International Edition, Vol. 48 (33), 6144-6147 (2009), Times Cited: 20
18. Jun-ichi Fukuda*, Makoto Yoneya, and Hiroshi Yokoyama
 “Simulation of Cholesteric Blue Phases Using a Landau-de Gennes Theory: Effect of an Applied Electric Field”
 Phys. Rev. E, Vol. 80, 031706-1 - 031706-15 (2009), Times Cited: 9
19. Michio Otsuki* and Hisao Hayakawa
 “Critical Behaviors of Sheared Frictionless Granular Materials near the Jamming Transition”
 Phys. Rev. E, Vol. 80, 011308-1 - 011308-12 (2009), Times Cited: 14
20. Daisuke Mizuno*, Rommel Bacabac, Catherine Tardin, David Head, and Christoph Schmidt
 “High-Resolution Probing of Cellular Force Transmission”
 Phys. Rev. Lett., Vol. 102, 168102-1 - 168102-4 (2009), Times Cited: 10
21. Johan Mattsson*, Hans M. Wyss, Alberto Fernandez-Nieves, Kunimasa Miyazaki, Zhibing Hu, David R. Reichman, and David A. Weitz
 “Soft Colloids Make Strong Glasses”
 Nature, Vol. 462, 83-86 (2009), Times Cited: 42

(2) ホームページについて

私達はホームページによる情報発信の重要性を強く認識しており、本特定領域の発足時からホームページを開設し(<http://softmatter.jp/>)、広く研究情報の公開を行ってきた。例えば、本特定メンバーの研究成果(原著論文・総説解説、著書、国際会議、特許)はリアルタイムで公表される仕組みを構築してきた。また、本特定領域の活動内容についてはニュースレター(No.1～No.23)として、随時ホームページ上で公開した。その結果、平成18年9月のホームページ開設時から、平成23年6月10日までに94743件のアクセスを得た。その中には海外からのアクセスも多数あった。

(3) 公開発表について

○ 領域研究会の開催

計画研究と公募研究を含めた領域全体での研究情報の交換を促進し、共同研究や研究連携を推進するために、以下の5回の領域研究会を開催した。

- 第1回領域研究会 平成18年12月21～23日 熱海市 KKR ホテル熱海
- 第2回領域研究会 平成19年6月21～23日 米沢市 伝国の杜
- 第3回領域研究会 平成21年1月7～9日 九州大学 西新プラザ
- 第4回領域研究会 平成21年7月1～3日 北海道大学 学術交流会館
- 第5回領域研究会 平成23年1月6～8日 東京大学 弥生講堂

○ 公開シンポジウムの開催

本特定領域研究に係わるソフトマター物理における最新的话题を広く社会に提供するとともに、若手研究者間の活発な議論を通して研究の交流を図ることを目的として、以下の3回の公開シンポジウムを開催した。

- 第1回公開シンポジウム 平成19年3月15～16日 東京大学 参加者164名
- 第2回公開シンポジウム 平成20年1月7～8日 名古屋大学 参加者136名
- 第3回公開シンポジウム 平成21年11月20～21日 京都大学 参加者166名

○ 国際シンポジウム・ワークショップの開催

以下の国際シンポジウムやワークショップでは海外のソフトマター物理の研究者を数多く招聘し、最新の情報を交換するとともに、本特定領域研究の成果を海外に向けて積極的に発信した。

- The Second International Workshop for Far East Asian Young Rheologists 平成19年1月26～28日 京都工芸繊維大学 参加者70名
- International Workshop on Physical Phenomena in Multi-Component Membranes 平成20年3月17～19日 首都大学東京 参加者35名
- **International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 平成20年6月2～5日 京都大学 参加者211名（本特定領域研究主催の重要行事）**
- Bio-Soft Matter Workshop 平成20年6月9～10日 東京大学 参加者75名
- Knots and Soft Matter Physics 平成20年8月26～29日 京都大学 参加者65名
- Frontiers of Colloid and Interface Science 2008 平成20年12月10日 京都大学 参加者63名
- Workshop on Active Matter -Physics and Biokinetics- 平成21年7月24～25日 東京大学 参加者40名
- International Workshop on Dynamic Cross-Effect in Softly Condensed Matter 平成21年11月4～5日 国立情報学研究所 参加者33名
- **International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010 平成22年8月17～20日 奈良県新公会堂 参加者218名（本特定領域研究主催の重要行事）**
- Granek Symposium on Membrane Dynamics 平成23年3月10日 首都大学東京 参加者10名

○ 総括班による出版

- 平成20年に開催した国際シンポジウム International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter の学術的記録を、平成20年に Progress of Theoretical Physics の SUPPLEMENT として出版、173 ページ
- 平成21年に Journal of the Physical Society of Japan において Physics of Soft Condensed Matter という特集を組み、本特定領域研究の成果の一部を出版、89 ページ
- 平成22年に「機能材料」において「ソフトマター研究の最前線」という特集号を出版、64 ページ
- 平成22年に開催した国際シンポジウム International Symposium on Non-Equilibrium Soft Matter 2010 の学術的成果を、平成23年に Journal of Physics: Condensed Matter から出版予定
- 本特定領域研究の中心的な成果をまとめた Non-Equilibrium Soft Matter Physics という本を、平成23年に Series in Soft Condensed Matter (World Scientific) のシリーズとして出版予定

○ 国際会議における招待講演

研究領域全体の国際会議発表件数は計画研究498件、公募研究384件、総計882件であった。その中で招待講演は計画研究が213件、公募研究が137件、総計350件であった。

(4) 「国民との科学・技術対話」について

○ 若手勉強会の開催

助教、博士研究員、大学院生らの研究活動の活性化や人材育成を目的として、以下の4回の若手勉強会を開催した。

- 第1回ソフトマター物理若手研究会 平成19年8月27～29日 宮島 参加者79名
- 第2回ソフトマター物理若手研究会 平成20年8月21～22日 東京大学 参加者71名
- 第3回ソフトマター物理若手研究会 平成21年9月2～4日 筑波大学 参加者75名
- 第4回ソフトマター物理若手研究会 平成22年11月12～13日 大阪大学 参加者79名

第4回ソフトマター物理若手研究会においては、大学院生、ポスドク、助教らの参加者全員にアンケートを実施した(有効回答43名)。例えば、「この勉強会での講義(90分)と講演(30分)について」に対する回答では、「大変有益であった(29名)」、「ほとんどは有益であったが、いくつかはそうでもなかった(12名)」、「あまり有益ではなかった(0名)」、「一概には言えない(1名)」という結果を得た。また、「自分の知らない内容もありとても新鮮であった」、「ていねいな導入と最先端の研究をわかりやすく説明していただいたと思います」などの感想があった。

7. 研究組織と各研究項目の連携状況

○ 計画研究(平成18年度～22年度)

総括班			
研究代表者	研究代表者	太田隆夫	京都大学・大学院理学研究科・教授
	研究分担者	渡辺 宏	京都大学・化学研究所・教授
		今井正幸	お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授
		佐野雅己	東京大学・大学院理学系研究科・教授
		川勝年洋	東北大学・大学院理学研究科・教授
		加藤 直	首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
計画研究課題			
項目研究 A01：分子凝集構造のダイナミクス			
相分離過程における構造成長ダイナミクスと絡み合いダイナミクスのカップリング			
研究代表者	研究代表者	渡辺 宏	京都大学・化学研究所・教授
	研究分担者	井上正志	大阪大学・大学院理学研究科・教授
		西田幸次	京都大学・化学研究所・准教授
		連携研究者	櫻井伸一
超分子型複合高分子の階層的秩序構造とマクロ相分離ダイナミクス			
研究代表者	研究代表者	松下裕秀	名古屋大学・大学院工学研究科・教授
	研究分担者	高野敦志	名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
		川口大輔	名古屋大学・大学院工学研究科・講師
		野呂篤史	名古屋大学・大学院工学研究科・助教
ゾル・ゲル転換の分子機構			
研究代表者	研究代表者	田中文彦	京都大学・大学院工学研究科・教授
	研究分担者	古賀 毅	京都大学・大学院工学研究科・准教授
		金田 勇	酪農学園大学・酪農学部・教授
	連携研究者	Françise M. Winnik	モントリオール大学・薬学部・教授
光子相関解析によるソフトマターダイナミクス			
研究代表者	研究代表者	柴山充弘	東京大学・物性研究所・教授
	研究分担者	伊藤耕三	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
		遠藤 仁	東京大学・物性研究所・助教
項目研究 A02：構造転移のダイナミクス			
ゲスト成分が誘起するソフトマターメソ構造の相転移ダイナミクス			
研究代表者	今井正幸	お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授	

	研究分担者	田中 肇	東京大学・生産技術研究所・教授
		奥村 剛	お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授
非相溶高分子ブレンドのトポロジー転移と電気粘性効果			
	研究代表者	折原 宏	北海道大学・大学院工学研究院・教授
	研究分担者	氏家誠司	大分大学・工学部・教授
		羅 亮皓	北海道大学・大学院工学研究院・助教
リオトロピック秩序系における流動場誘起構造転移のダイナミクス			
	研究代表者	加藤 直	首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
	研究分担者	好村滋行	首都大学東京・大学院理工学研究科・准教授
		藤井政俊	島根大学・医学部・准教授
		川端庸平	首都大学東京・大学院理工学研究科・助教
ソフトマターのメソスコピック界面ダイナミクスとその応用			
	研究代表者	木村康之	九州大学・大学院理学研究院・教授
	研究分担者	下村武史	東京農工大学・大学院共生科学技術部・准教授
		市川正敏	京都大学・大学院理学研究科・講師
	連携研究者	岩下靖孝	九州大学・大学院理学研究院・助教
項目研究 A03：非平衡構造のダイナミクス			
やわらかく小さなシステムの構造変化と非平衡ダイナミクス			
	研究代表者	佐野雅己	東京大学・大学院理学系研究科・教授
	研究分担者	村山能宏	東京農工大学・大学院工学研究院・准教授
	連携研究者	原田崇広	東京大学・大学院理学系研究科・講師
二次元液晶における分子ダイナミクスの時空間変換の解明			
	研究代表者	多辺由佳	早稲田大学・理工学術院・教授
	研究分担者	米谷 慎	産業技術総合研究所・ナノテクノロジー研究部門・主任研究員
ソフトマター粘弾性場からの結晶化における非平衡構造形成			
	研究代表者	戸田昭彦	広島大学・大学院総合科学研究科・教授
	研究分担者	田中晋平	広島大学・大学院総合科学研究科・准教授
		田口 健	広島大学・大学院総合科学研究科・准教授
		山崎義弘	早稲田大学・理工学術院・准教授
ソフトマターにおける構造と輸送の動的結合			
	研究代表者	太田隆夫	京都大学・大学院理学研究科・教授
	研究分担者	山本 潤	京都大学・大学院理学研究科・教授
	連携研究者	高西陽一	京都大学・大学院理学研究科・准教授
項目研究 A04：理論・モデリング			
空間不均一を伴う高分子系のミクロからマクロにわたる動力学理論			
	研究代表者	川勝年洋	東北大学・大学院理学研究科・教授
	連携研究者	出口哲生	お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授
		佐藤勝彦	東北大学・大学院理学研究科・助教
高分子溶液の微小流動におけるレオロジー			
	研究代表者	土井正男	東京大学・大学院工学系研究科・教授
	研究分担者	奥蘭 透	名古屋市立大学・大学院薬学研究科・准教授
	連携研究者	山口哲生	東京大学・大学院工学系研究科・助教
電荷・極性の関与するソフトマターの新しい相、及びせん断の関与する非平衡現象の研究			
	研究代表者	小貫 明	京都大学・大学院理学研究科・教授
	研究分担者	八尾 誠	京都大学・大学院理学研究科・教授
		瀬戸秀紀	高エネルギー加速器研究機構・教授
		山本量一	京都大学・大学院工学研究科・教授
		金谷利治	京都大学・化学研究所・教授
	連携研究者	荒木武昭	京都大学・大学院理学研究科・准教授
ソフトマターにおける連鎖構造・ネットワーク構造のダイナミクスとレオロジー			

研究代表者	滝本淳一	山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究分担者	香田智則	山形大学・大学院理工学研究科・准教授
	谷口貴志	京都大学・大学院工学研究科・准教授

○ 公募研究(平成19年度～20年度)

項目研究 A01：分子凝集構造のダイナミクス		
応力場に置かれた高分子ゲルのスローダイナミクス		
研究代表者	浦山健治	京都大学・大学院工学研究科・准教授
絡みあった高分子マトリックス中に分散した球状マイクロドメインの配列を支配する物理		
研究代表者	櫻井伸一	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・准教授
不均一系の膨潤における非平衡構造		
研究代表者	横山英明	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授
高分子・超分子ポリマー溶液系における会合体形成とレオロジー挙動		
研究代表者	佐藤尚弘	大阪大学・大学院理学研究科・教授
物理架橋相互侵入網目の構造とダイナミクス		
研究代表者	高橋良彰	九州大学・先導物質化学研究所・准教授
サーモトロピック液晶に特異的な Im3m キュービック相		
研究代表者	齋藤一弥	筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授
界面分子鎖ダイナミクスとナノヒーリング発現		
研究代表者	田中敬二	九州大学・大学院工学研究院・教授
項目研究 A02：構造転移のダイナミクス		
脂質 2 分子膜相分離構造の側方圧依存性とラフト形成機構の解明		
研究代表者	濱田 勉	北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・助教
外来物質との相互作用や外場による生体膜のトポロジー変化のダイナミクスとメカニズム		
研究代表者	山崎昌一	静岡大学・創造科学技術大学院・教授
微細空間における 2 成分液体の構造安定性		
研究代表者	栗原和枝	東北大学・多元物質化学研究所・教授
高分子電解質の孤立高分子鎖コンフォメーション解析		
研究代表者	山崎裕一	東京大学・大学院工学系研究科・准教授
空間拘束効果を利用したソフトマターの微空間レオロジー		
研究代表者	藤井修治	長岡技術科学大学・工学部・助教
脂質類似構造を有するブロック共重合体が形成するミセルネットワークの構造転移		
研究代表者	安中雅彦	九州大学・大学院理学研究院・教授
ブロック共重合体のエピタキシャル構造転移に伴う三次元構造・ダイナミクスの解明		
研究代表者	陣内浩司	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・准教授
液晶エラストマーゲルのネットワーク構造と相変化のダイナミクス		
研究代表者	甲斐昌一	九州大学・大学院工学研究院・教授
ブルー相などの 3 次元秩序を有する液晶系の秩序構造とダイナミクスに関する数値計算		
研究代表者	福田順一	産業技術総合研究所・ナノテクノロジー研究部門・研究員
項目研究 A03：非平衡構造のダイナミクス		
荷電コロイドの電気泳動における多体効果による不規則な粒子運動の起源に関する研究		
研究代表者	荒木武昭	京都大学・大学院理学研究科・准教授
自己組織性ポリペプチドと脂質二重膜相互作用の直接観察と動力学的解析		
研究代表者	瀧口金吾	名古屋大学・大学院理学研究科・助教
光で時空間的に強制した高分子混合系の相分離ダイナミクスと新規材料の設計		
研究代表者	宮田貴章	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・教授
高分子ガラスにおける非平衡緩和機構の解明		
研究代表者	深尾浩次	立命館大学・理工学部・教授
可動性楕円高分子の非平衡構造形成ダイナミクス		

研究代表者	酒井康博	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教
チューブ状ベシクルを用いた外場応答性を示すエラスティカへの可塑性の導入		
研究代表者	菅原 正	東京大学・大学院総合文化研究科・教授
液晶化と結晶化が競合する相分離のダイナミクス		
研究代表者	松山明彦	九州工業大学・大学院情報工学院・准教授
興奮性細胞の揺らぎのダイナミクス-単一細胞解析によるアプローチ		
研究代表者	原田崇広	福井大学・大学院工学研究科・講師
液晶光バルブにおける局所構造のダイナミクス		
研究代表者	長屋智之	大分大学・工学部・教授
項目研究 A04：理論・モデリング		
ソフトマター界面の理論・シミュレーション研究		
研究代表者	藤原 進	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・准教授
結び目高分子のダイナミクスと高分子ネットワーク：マイクロなトポロジーからマクロへ		
研究代表者	出口哲生	お茶の水女子大学・大学院人間文化創成科学研究科・教授
コロイドゲルの生成ダイナミクスとレオロジー		
研究代表者	宮崎州正	筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授
大きな揺らぎの存在する媒体中での高分子挙動に関する理論的解析手法の開発とその応用		
研究代表者	墨 智成	豊橋技術科学大学・工学部・助教

○ 公募研究(平成21年度～22年度)

項目研究 A01：分子凝集構造のダイナミクス		
高分子溶液の相分離における分子鎖凝集ダイナミクス		
研究代表者	榎 靖幸	群馬大学・大学院工学研究科・助教
ブロック共重合体準希薄溶液中で選択溶媒に誘起されたマイクロ相分離構造のダイナミクス		
研究代表者	岡本 茂	名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授
多様な変形モード下での高分子網目系ソフトマテリアルのダイナミクス		
研究代表者	浦山健治	京都大学・大学院工学研究科・准教授
単一高分子鎖の直接観察に基づく高分子ダイナミクスの評価		
研究代表者	青木裕之	京都大学・先端医工学研究ユニット・准教授
感熱応答性ブロック共重合体の水溶液中におけるミセル形成の分子機構		
研究代表者	佐藤尚弘	大阪大学・大学院理学研究科・教授
異種固体との接触界面における高分子のダイナミクス		
研究代表者	田中敬二	九州大学・大学院工学研究院・教授
イオン液体中の動的秩序構造とそのダイナミクスに関する研究		
研究代表者	高橋良彰	九州大学・先導物質化学研究所・准教授
項目研究 A02：構造転移のダイナミクス		
流れによる赤血球、ベシクルの形状転移		
研究代表者	野口博司	東京大学・物性研究所・准教授
膜分子生成が誘発する奇妙なベシクル形態変化		
研究代表者	鈴木健太郎 (21年度)	東京大学・大学院総合文化研究科・助教
研究代表者	菅原 正 (22年度)	東京大学・大学院総合文化研究科・センター特任研究員
ラメラ液晶相の流動誘起構造転移・構造破壊のダイナミクスと粘弾性		
研究代表者	藤井修治	長岡技術科学大学・工学部・助教
非対称ベシクルの相分離形成と側方圧誘起構造転移		
研究代表者	濱田 勉	北陸先端科学技術大学院大学・マテリアルサイエンス研究科・助教
外来物質との相互作用や外場による生体膜のトポロジー変化のダイナミクスとメカニズム		
研究代表者	山崎昌一	静岡大学・創造科学技術大学院・教授

せん断流動誘起によるシリカサスペンションの凝集構造転移とそのレオロジー特性		
研究代表者	川口正美	三重大学・大学院工学研究科・教授
ブロック共重合体の構造転移における成長端の直接3次元観察と転移ダイナミクスの解明		
研究代表者	陣内浩司	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・准教授
液晶系の3次元秩序構造に関する連続体シミュレーションによる研究		
研究代表者	福田順一	産業技術総合研究所・ナノシステム研究部門・主任研究員
項目研究 A03：非平衡構造のダイナミクス		
非平衡基礎論とジャミング転移研究の融合		
研究代表者	佐々真一	東京大学・大学院総合文化研究科・教授
輸送分子モーターを連結したシステムの一分子観察		
研究代表者	富重道雄	東京大学・大学院工学系研究科・准教授
自己組織性蛋白質と脂質二重膜のダイナミックな相互作用の直接観察と動力学的解析		
研究代表者	瀧口金吾	名古屋大学・大学院理学研究科・助教
ジャミング・ガラス転移の統一理論の構築研究		
研究代表者	早川尚男	京都大学・基礎物理学研究所・教授
コンピュータ支援照射法を用いた高分子混合系の定常非一様な相分離挙動に関する研究		
研究代表者	宮田貴章	京都工芸繊維大学・大学院工芸科学研究科・教授
単一高分子鎖の非平衡ダイナミクスと粘弾性計測		
研究代表者	影島賢巳	東京学芸大学・教育学部・准教授
生体ソフトマターの非平衡力学計測		
研究代表者	水野大介	九州大学・大学院理学研究院・准教授
液晶場に分散した棒状コロイド粒子の秩序化とダイナミクス		
研究代表者	松山明彦	九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授
ガラス形成物質における非平衡緩和機構の解明		
研究代表者	深尾浩次	立命館大学・理工学部・教授
外場が誘起する脂質二重膜の非平衡相分離挙動の解明		
研究代表者	手老龍吾	豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・特任助教
項目研究 A04：理論・モデリング		
コロイド系のガラス転移と非線形レオロジー		
研究代表者	宮崎州正	筑波大学・大学院数理物質科学研究科・准教授
ソフトマターを対象とした液体論的マルチスケール解析手法の開発とその応用		
研究代表者	墨 智成	豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教
ソフトな界面における一次および連続濡れ転移の発現機構の解明		
研究代表者	甲賀研一郎	岡山大学・大学院自然科学研究科・教授

○ 連携状況

非平衡ソフトマター物理学の創成には各研究項目内・間の連携による研究成果の深化・普遍化が必要不可欠であるとの認識から、さまざまなレベルでの連携研究を推進してきた。それらは、本特定領域が終了した今でも継続されており、非平衡ソフトマター物理学の強力なネットワークが形成された。以下に代表的な連携研究の例を挙げる。

(1) 生体膜モデルとしてのベシクル変形の制御

ソフトマターの代表である分子膜が、様々な性質の物質と複合化していくことにより新しい構造・機能を獲得していく基本的な原理を、理論物理・実験物理・化学・生物物理の研究者が連携して研究する事により解明し、新しいベシクル研究の局面が生み出された。特に、ミニマルセルと呼ばれる生命としての最小限の機能を有する分子集合体(人工細胞)の創成に向けては、化学の立場から菅原グループが遺伝情報分子(DNA)を自己複製しながら増殖するベシクル系の開発に成功した。また、その物理モデルの

構築に向けて、温度サイクルにより分裂、誕生、接着、孔形成する多成分ベシクル系を今井グループが見出した。このような外場(化学場、温度場、光場)が誘起する膜変形に対して**実験家(菅原、今井、濱田ら)と理論家(谷口、好村、梅田、太田、川勝ら)の共同研究によりその理論モデルの構築が行われ、それが実験研究者にフィードバックされ、新たな研究が展開するなど、極めて有機的なネットワークが形成された。**その成果は本特定領域が主催するワークショップにより世界のベシクル研究者に向けて発信された。

[公表された論文 14件]

“Shape Deformation of Ternary Vesicles Coupled with Phase Separation”, M. Yanagisawa, M. Imai, and T. Taniguchi, *Phys. Rev. Lett.* 100, 148102(1-4) (2008)他

(2) アクティブソフトマター

液滴が自己駆動する現象は、最近のソフトマターや数理科学分野でも最もホットな話題の一つである。佐野グループでは単一細胞の変形と運動の相関を測定する実験を行なった。太田グループは、佐野グループの実験から液滴の変形運動との類似性があることに着目し、2次元ドメインの並進運動をベクトル、変形を2階テンソルで表し、それらの結合方程式を対称性から導いた一般的理論を提案した。この結果は、液滴や細胞運動まで共通に扱える可能性を示した点で、この分野に新たな突破口を拓く成果となった。太田らが提案した2つの理論モデルに基づき、佐野グループも変形ドメインの界面方程式を位相変数で記述する研究を行い、2つのモデルの関係やパラメータを変化させた場合の分岐現象やカオス発生などを明らかにした。さらに、菅原グループでもマイクロメートルサイズの油滴の3次元自己推進運動を実現することに成功している。**これらの連携研究から自己駆動するソフトマター(アクティブソフトマター)という新しい研究分野が創成され、今後の発展が期待されている。**

[公表された論文 12件]

“Dynamics of a Deformable Self-propelled Domain”, T. Hiraiwa, M. Y. Matsuo, T. Ohkuma, T. Ohta, and M. Sano, *Europhys. Lett.* 91, 20001(1-6) (2010)他

(3) 溶媒和効果に基づくイオン性溶液のメソ構造形成

本研究では、水と有機溶媒の混合系に陽イオンが親水性、陰イオンが疎水性である拮抗的な塩を加えることにより、ナノスケールの周期的構造ができることを見出した。これは、最初、小貫グループが理論的に示した。瀬戸グループは柴山グループと協力し、中性子小角散乱により臨界点付近でCDW構造を観察し、更に水リッチな組成でのラメラ構造形成を明らかにした。またラメラ構造出現によるオニオン形成については、金谷グループと共に光学顕微鏡を用いて調べた。これらのナノ構造の出現は拮抗的な塩が界面活性剤のような働きをするという理論結果と一致する。

[公表された論文 5件]

“Multilamellar Structures Induced by Hydrophilic and Hydrophobic Ions Added to a Binary Mixture of D_2O and 3-Methylpyridine”, K. Sadakane, A. Onuki, K. Nishida, S. Koizumi, and H. Seto, *Phys. Rev. Lett.* 103, 167803(1-4) (2009)他

(4) ブロック共重合体マイクロ相分離構造の階層構造解析

ブロック共重合体のマイクロ相分離構造は、その特徴的長さが数10nm程度のマイクロドメイン構造を持っており、その3次元的な配置を知ることは、系の静的特性ばかりでなく粘弾性のような動力学特性を理解する上でも重要である。近年では3次元トモグラフィーの手法(TEM)を用いて3次元構造を直接観察する

ことが可能となってきたが、その内部における鎖の配位などのミクロな情報を実験で直接に観測することはきわめて困難である。このような場合に、**TEM写真と自己無撞着場理論による3次元シミュレーションを組み合わせることで、鎖を構成するモノマーのレベルでの詳細な情報を引き出す方法論を確立した**。具体的には、A03班の陣内グループが計測したTEM写真をA04班の土井グループおよび川勝グループの開発した自己無撞着場理論を用いたシミュレーション手法に入力として与え、TEM写真の与える濃度場の構造の下での鎖の平衡配位を計算することで、欠陥を含んだドメイン構造内での鎖の実際の配位を予測することができた。

[公表された論文 1件]

“Three-Dimensional Visualization of a Single Block Copolymer in Lamellar Nanodomains”, H. Morita, T. Kawakatsu, M. Doi, T. Nishi, and H. Jinnai, *Macromolecules* 41, 4845-4849 (2008)

上記以外にも様々なトピックスについて

- 流動場による構造変化と粘弾性挙動(A01 渡辺、A01 松下、A01 高橋、A01 柴山、A04 金谷)
- キラル液晶膜における物質流透過による動的な配向秩序(A03 多辺、A04 土井、A02 福田)

他10件の研究連携が進められた。

8. 研究費の使用状況(設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む)

本特定領域研究の目的に照らし合わせて、実験系のグループではメソスコピック構造の観察に必要な不可欠な実験装置を導入した。以下は、各研究項目の具体的な使用状況である。

• 分子凝集構造のダイナミクス

平成22年度までに、本特定領域研究の研究費を用いて、高周波誘電緩和測定装置、動的光散乱装置、レーザー光源、高真空用ターボ分子ポンプ、ハイパフォーマンス計算サーバー、非接触型レオロジーモニター、小型卓上引張試験機、高感度示差走査熱量測定装置などを購入した。また、同研究費を用いて、既設の力学試験装置やレオメーターなどを超低速化・高感度化、既設の近接場光学顕微鏡の解像度向上などを実現した。さらに、A01 班の班会議、班内ワークショップを開催し、また、本特定領域全体としての国際会議に海外から外国人研究者を招聘した。

• 構造転移のダイナミクス

メソ構造形成の観察手段として、数台の共焦点レーザー顕微鏡を購入したが、これらはそれぞれのグループで独自に開発した技術を取り入れ、共通の基盤の上でその特徴を生かした情報交換ができるように工夫した。その他にも、粘弾性測定装置および小角X線散乱/ずり応力同時測定用自動ステージとずり流動下での光散乱計測システムを開発し、これら実空間観察装置、散乱測定装置を相補的に使用することにより多角的なメソ構造形成に関する研究が進んだ。一方、理論面では博士研究員を雇用し、理論および計算機シミュレーションによるメソ構造形成の研究を推進した。

• 非平衡構造のダイナミクス

高精度のX線コリメータを組み込んだ回転対陰極型の高輝度X線源を導入した。また、共焦点顕微鏡を購入し、単一の細胞が運動に際して発生する応力の微小接着面内での分布と細胞内のタンパク質分子の局在などを測定することが可能となった。その他、水中で使用可能な原子間力顕微鏡(AFM)を購入し、単一タンパク質の動的測定が可能となり、中間構造の計測などに成功した。さらに、電場・化学ポテンシャル勾配下における液晶薄膜の高速応答を調べるため、高速カメラを購入した。これによりDC電場による半球殻状液晶薄膜の高速発振検出に成功した。

・ 理論・モデリング

A04 班の主要研究テーマは理論・モデリングであるので、主要な研究費の使途は、ワークステーションの購入、共同研究のための旅費および研究支援者の雇用である。ほとんどのグループで、本特定領域の予算によって PC クラスタが購入され、並列計算等を用いたシミュレーションによる理論の検証と実験の予測が効果的に行われている。また、平成19～20年度には3つのグループで、平成21年度以降は2つのグループで若手研究者を研究支援者として雇用し、彼らが研究に専念できる環境を提供してきた。本特定領域の研究支援者として雇用された若手研究者は、その後大学の助教等の職に就いている。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度

○ 報道等

- ・ 2009/12/07 A04 瀬戸秀紀（高エネルギー加速器研究機構）研究論文の内容が JST のインターネットテレビ番組「サイエンスニュースオンデマンド」に取り上げられた。
- ・ 2009/11/24 A03 佐野雅己（東京大学）研究論文が米国物理学会の Viewpoint で紹介された。他15件の研究成果が新聞等に掲載された。

○ 教科書等の執筆

- ・ 今井正幸著「ソフトマターの秩序形成」（シュプリンガー・ジャパン、2007）399 ページ
- ・ 田中文彦著「ソフトマターのための熱力学」（裳華房、2009）240 ページ
- ・ ウィッテン、ピンカス著 好村滋行、福田順一訳「ソフトマター物理学」（吉岡書店、2010）402 ページ
- ・ 土井正男著「ソフトマター物理学入門」（岩波書店、2010）275 ページ

○ 解説等の執筆

日本結晶学会誌 2009 年第 36 巻 1 号特集「複合高分子により形成される疑似結晶構造の最前線」、高分子学会誌「高分子」2010 年 7 月号特集「ソフトマターの新しい潮流」、流体力学学会誌「流れ」2010 年第 29 巻 5 号特集「ソフトマターと流体力学」のそれぞれに数名の本特定領域メンバーが執筆し、関連分野の研究者に非平衡ソフトマターの最新成果を解説した。

○ メンバーの受賞

領域全体として5年間で国際的な賞も含めて27件の受賞があった（学生の受賞は項目10に記載）。

○ 特筆すべき波及効果

- ・ A01 班の伊藤耕三氏が発明した**環動高分子材料が携帯電話のコーティングとして実用化された**。特に環動エラストマーが顕著な耐傷特性を示すことにより、自動車、携帯電話、コンピュータなどへの応用が盛んに進められている。
- ・ A03 班の佐野雅己氏は微小空間での非平衡研究の道を拓く「**マックスウェルの悪魔**」を再現する**実験に世界で初めて成功**し、多くの報道やインターネット上で取り上げられた。

10. 研究計画に参画した若手研究者の状況

- 本特定領域研究に係わった若手研究者のうち18名が昇進した。

- 本特定領域研究で雇用した博士研究員の状況
 - 竹内一将(佐野 G) 2010/4/1-2010/5/31 → 2011/4/1より東京大学・理学部特任助教
 - Sathish K. Sukumaran(滝本 G) 2010/1/1-2010/3/31 → 山形大学・大学院理工学研究科・テニユアトラック助教
 - 松尾美希(佐野 G) 2009/4/1-2011/3/31 → 東京大学・特任研究員
 - Sanoop Ramachandran(加藤 G) 2009/4/1-2011/3/31 → 海外ポスドク
 - 小林美加(今井 G) 2008/11/1-2011/3/31 → 東京大学(田中研)・特任助教
 - 印出井努(滝本 G) 2008/7/1-2009/11/31 → Illinois Institute of Technology 博士研究員
 - 江 宏仁(佐野 G) 2008/4/1-2009/4/30 → 2011/9より国立台湾大学応用物理学研究所 Assistant Professor
 - 田原大輔(深尾 G) 2007/6/15-2009/3/31 → 立命館大学・非常勤講師
 - 岡本隆一(小貫 G) 2007/5/1-2011/3/31 → 京都大学(小貫研)・博士研究員
 - 佐藤勝彦(川勝 G) 2007/4/1-2008/9/30 → 2008/10より東北大学大学院理学研究科・GCOE 助教
 - 山田耕太郎(加藤 G) 2007/4/1-2009/3/31 → 阿南高等専門学校・講師

- 大学院生の博士号の取得と進路

本特定領域研究メンバーに係わる88名の大学院生が博士号を取得し、その後、大学や研究所、民間企業等に就職した。

- 学生の受賞等

本特定領域研究メンバーに係わる学部学生、大学院生が延べ84件の受賞をした。

1 1 . 総括班評価者による評価の状況

- 西敏夫氏 (東北大学・原子分子材料科学高等研究機構・教授)

本特定領域は、高分子、液晶、コロイド、生体物質などソフトマターの広い分野をカバーしているが、その基本にある「非平衡ソフトマター物理学の創成:メソスコピック系の構造とダイナミクス」の推進、確立に十分な貢献があったと言える。シンポジウムなどでは、ベテランだけでなく若手を含めた活発な討論が印象的であった。国際シンポジウムでは、海外からの若手研究者の発表、討論が興味深かった。前回と同様に、ネット検索すると、Soft Material で 13900 万件、Soft Matter で 10400 万件と倍増し、この分野の急速な拡大が分かる。尚、メンバーの若手による「高分子溶液の液滴乾燥過程のダイナミクス」は、スイスの Quadrant Award 2011 の1位となった。MIT、ETH、イリノイ大など全世界43件の応募からである。今後もこの特定研究を元にして、国際的に活躍する人材が育って欲しい。可能なら、この後継特定研究を検討すべきである。

- 和達三樹氏 (東京理科大学・理学部・教授)

5年間にわたる、特定領域研究「非平衡ソフトマター物理学の創成:メソスコピック系の構造とダイナミクス」、の活動・成果についての評価を行う。項目研究として、A01:分子凝縮構造のダイナミクス、A02:

構造転移のダイナミクス、A03:非平衡構造のダイナミクス、A04:理論・モデリング、の4つの柱があるが、研究遂行が特に遅れた項目研究はない。外場下でのメソスコピック構造相転移、非平衡構造のダイナミクス、生体膜や生体高分子系のモデル化、ソフトマター材料開発など、実験・理論ともに多くの良質な成果を挙げている。基礎科学として、非平衡現象、遅い動力学、熱力学第二法則、などへの新しい考察も進展した。以上に述べた成果は、科学・技術の他分野でも貴重な知見であり、より広い成果交換・研究交流が強く望まれる。研究成果の出版・公表は、学術雑誌、研究集会において、十分に行われていると判定する。

この特定研究は、対象・現象・手法・応用の多様性が大きな魅力である。実際、物理学、化学、生物学、工業、の諸分野を含み、極めて大きな広がりが見られる。一方、基礎と応用のバランス、理論と実験の整合性など、難しい面もある。基礎物理学との関連、ナノテクノロジーへの発展、を視野にいれた研究が重要になるであろう。この5年間の研究遂行と成果は貴重な財産であるが、まだ多くの基礎的な問題が残されている。研究進展を減衰させることなく、新しい概念や手法の導入・確立に向けて、「ソフトマター物理」のさらに大きな進展を期待したい。

○ 吉川研一氏（京都大学・大学院理学研究科・教授）

物理学は全ての自然現象についてその本源を探る学問である。物性物理に目をやった時、固体物理学の領域では、実験・理論が双方とも、物理学として捉えられてきたが、ソフトマターについては、実験が化学や工学領域に属し、理論物理的な研究は脇役的なものに留まってきた。しかしながら、学問が実体論から本質論に進むにつれて、実験・理論両面から物理学的な方法論の必要性が高まってきている。このような近年における世界的な学問の潮流を俯瞰するとき、本特定領域が「非平衡」のキーワードのもと、5年間に渡って活動を展開してきたことの、学問的な意義は極めて大きいと評価される。21世紀初頭の現代にあって、ソフトマター物理は、国際的にはいまだその多くが平衡論的な枠組みに留まっている。それに対して、この特定領域では、特に20-30代の若手研究者の養成に力を注ぎ、活発な取り組みを行ってきた。研究会やセミナーにおいて、その主役は、常に若手研究者であり、ユニークな発想や解析手法が次々と提案されてきた。本特定領域においては優れた研究成果が挙げられてきているが、最も大きな成果は、日本がこの分野において世界を先導しうるような人材を育て上げてきたことにあると言える。

○ 中浜精一氏（元産業技術総合研究所・研究コーディネータ・東京工業大学名誉教授）

バイオ、高分子、分子集合体など多様な物質、現象を対象とする研究者に対して非平衡物理、ダイナミクスを通して「ソフトマター物理」という新しい学問領域の基本的な概念を提示して、これからの研究の総合的な方向を指し示し、参加した研究者とその周辺の研究者がこの概念を基盤として今後研究を推進出来るようになることが本領域研究の目的であり、その目標はほぼ達成出来たと考えられる。特に、後半では具体的な研究対象を絞り込むのではなく、多様な若手研究者を採択して本領域の基盤強化と連携研究の促進を諮ったことは有効であった。全研究期間を通して開催された研究会、公開シンポジウムでは非平衡物理、ダイナミクスを中心テーマとして、研究対象の異なる研究者が一堂に会して議論する形で行われた。この方式は本領域スタート時から一貫してとられて来た方針であり、多様な研究対象と理論、実験、シミュレーションなどの研究手法の違いを超えて問題に立ち向かう姿勢が明示されていた。本領域研究が終了した後も研究対象や研究手法の異なる研究グループ間の連携が継続的に研究者に受け継がれて行くことを期待する。本研究領域の提案は単に国内に留まらず、海外若手研究者との積極的な研究交流を通じて世界に定着して行くことを強く希望している。