

戦略的創造研究推進事業

発展研究（SORST）

研究終了報告書

研究課題「液晶ナノシステム」

研究期間：平成16年10月01日～

平成20年7月31日

保全活動期間：平成20年8月1日～

平成21年3月31日

研究代表者

横山 浩

(独)産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門

研究代表者代行・保全活動責任者

米谷 慎

(独)産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門

1. 研究課題名

液晶ナノシステム

2. 研究実施の概要

以下の3つの研究テーマについて実験グループと理論グループが密接な連携のもとに研究を推進した。

(1) 表面配向マイクロパターン

表面配向マイクロパターンのテーマは、メモリー性液晶デバイスの実用化を目指した研究で、ERATO/SORST 液晶ナノシステムプロジェクトにおいて最も注力してきたものである。フォトマスクを使用して紫外偏光照射によりパターンを作製する光配向技術と、ナノインプリント金型を用いてパターンを作製するナノインプリント配向技術による大面積配向処理技術の開発に取り組み、40mmX40mm の面積にわたって完全なメモリー性を実現することに成功した。H18 年度後半には、ナノインプリント技術の展開を図るうえで極めて有意義な理論考察を報告した。これは、液晶の標準的な教科書にも掲載され、提唱から 30 年以上を経過している、Berreman の理論（アンカリングと表面形状の関連を弾性論により考察）に根本的な誤りが含まれており、アンカリングのエネルギーの方位角依存性も Berreman が導いたものとは全く異なることを発見した。この新しい発見は、実験事実をより正しく説明し、加えて、新たな液晶デバイスの設計に大変有意義であると考えられる。ナノインプリントは新理論の検証とその応用に最も適した技術であり、理論と実験との理想的な共鳴によって多くの先駆的な結果を得ることができた。また、材料メーカーの協力によって、液晶配向に適したナノインプリント材料が開発されたことは、このプロジェクトの進行に大きく貢献したことを、ここで記して感謝したい。

(2) 液晶コロイド

液晶場の中に微細な粒子、気体、液体を導入した液晶コロイドは、ERATO, SORSTプロジェクトを通じてのメインテーマの一つであるが、その間、世界的にも液晶研究の新分野として定着してきた。SORSTにおいてはとくに、液晶場と粒子との相互作用により規則的な構造を創生することを目的としてきた。理論グループと実験グループが相互に連携して研究を進め、世界的な競争のなかで、気泡をベースとした新しい液晶コロイドを提案し、ユニークな結果を出すことができた。気泡の注入や光応答性を付与したコロイド粒子/液晶混合系において規則的な配列構造が構成された。これらの理論的な検討と、構成過程の動画像観察、液晶コロイドのテラヘルツ分光、THG (Third Harmonics Generation) スペクトロスコピーなどによる高度な物性測定により液晶コロイドの理解が進展している。スメクティック液晶に気泡を注入し、規則正しい格子構造をとらせることに成功し、世界全体で特許を申請した。この成果は応用面で大きな飛躍が期待できる。

(3) 分子ダイナミカルシステム

当グループで発見したキラル液晶単分子膜に見られる集団運動について実験と理論の両面で現象の考察を進め、液晶分子の回転運動の直接観察、集団運動との相関など難

解な課題について検討した。ナノ秒領域で起こる初期的分子回転と、分のオーダーで起こるマクロな回転との階層的なつながりを実験的に追究したが、種々の実験的な困難のために、必ずしも当初の目的を達することができなかった。しかしこれと並行して、キラルスメクチック液晶の自立膜および生体膜に類似した水中膜について、水以外の種々の輸送と分子回転との関係を調べ、化学構造に由来する興味深い挙動を見出すことができた。さらに分子動力学シミュレーションを実行し、液晶分子モーターから古典的レーマン回転現象にいたるまで、分子のキラリティーと非対称回転の関係について多くの知見を集積することができ、今後の展開の素地を築くことができた。

3. 研究構想

- * 本研究のねらいは、ERATO液晶微界面プロジェクトの成果を継承発展して、ナノ構造液晶を基本的な構成要素として、分子秩序に基づいて動的機能を果たす分子ナノシステムを実現することである。研究の志向性は、実用化を意識した表面配向マイクロパターンによるメモリー効果液晶デバイスの研究開発という産業技術・製品開発に近いものから、自己組織的分子ナノシステムの構築、ナノシステムの理論・シミュレーション技術の開発といった、将来的にはナノテクノロジーの展開に大きなインパクトを持つことが期待されるものの、現時点では基礎的研究に属するものまで、広いスペクトルを包含する。

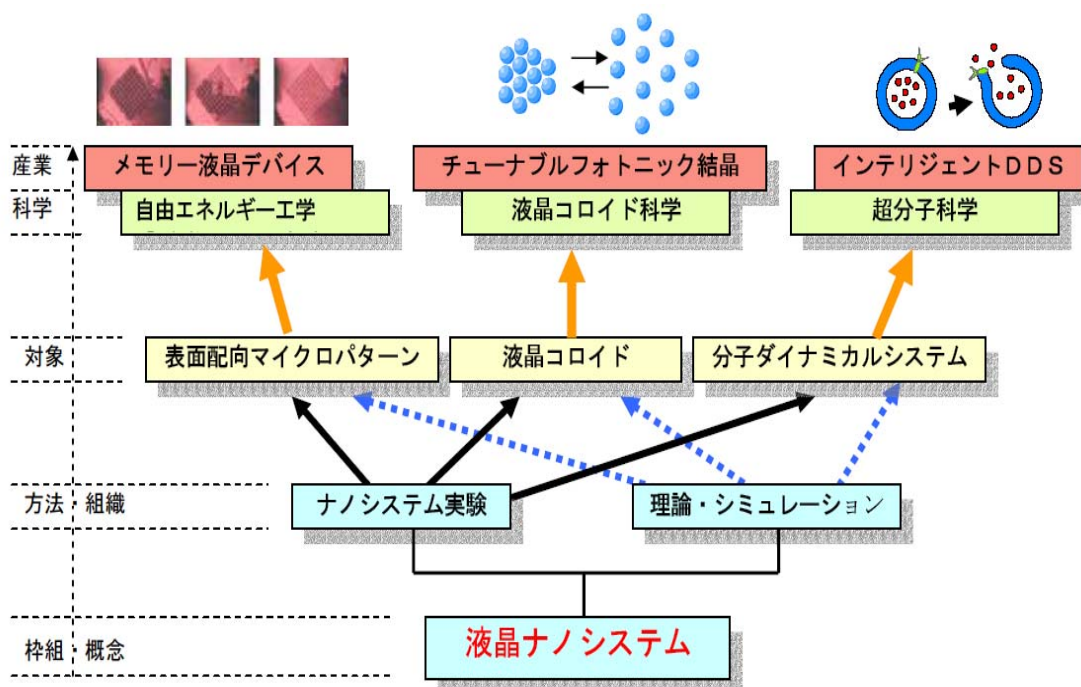
[科学面の研究成果・目標]

- ・ ネマティック液晶の分子配向分布を、表面配向パターンが引き起こすフラストレーションを介して、自由エネルギー空間上で自在に操作する新しい体系的な方法論として、液晶の自由エネルギー工学を確立する。
- ・ 相補的欠陥を伴う強配向規制粒子の液晶コロイドの多体现象を明らかにし、液晶の歪による粒子間長距離相互作用による粒子配列をシステムティックに制御する手法を確立する。
- ・ 相補的欠陥と母粒子を空間的に分離した、クーロンプラズマに対応する単極液晶コロイドの長距離構造を明らかにする。
- ・ ナノメートル領域の液晶が非平衡状態で生み出す時空間散逸構造を明らかにし、生体分子モーター、筋肉の運動の発生メカニズムに示唆を与える。

[産業応用面の研究成果・目標]

- ・ 表面配向マイクロパターンに基づく超低消費電力・多重メモリー効果液晶デバイスを実現し、電子ブック等への応用展開を図る。
- ・ 液晶コロイドにおける粒子配列を光や外場で精度良く制御する技術を開発し、チューナブルフォトニック結晶を実現する。
- ・ 予め指定された条件で薬剤をリリースする機能を持つインテリジェント・ドラッグデリバリシステムの開発を目指す。

* 研究計画と進め方



液晶研究は、つねに学際的な研究によって発展してきた分野である。「液晶ナノシステム」では、ERATOプロジェクトで成功をおさめた学際的な研究体制を、物理面に焦点をあてながら一部踏襲したものとする。具体的には、ナノテクノロジー全般において、理論・シミュレーションと実験との共鳴的な発展がますます重要になってきており、液晶分野においてこの流れを先導することを一つの眼目として、ナノシステム実験グループと理論・シミュレーショングループの2グループ体制とし、設定する3つ研究項目（次項参照）に、両グループが役割分担して連携する。ナノシステム実験グループは、第一義的には構成的アプローチをとり（自然には存在しない状態を“作り出す”ことから新たな原理を探求すること）そのための構成技術、解析技術を幅広く（装置開発も含めて）開発することを特徴とする。また、実用性を意識した見えるデバイス開発を進める。理論・シミュレーショングループは、ナノシステム実験グループに新たな構成原理を提示すること、また、実験結果を深いレベルで定量的に解析し、新たな理解に到達することを担うグループである。シミュレーション手法は、マクロな連続体的取り扱いから分子シミュレーションまでを、目的に応じて使い分けることを特徴とする。

4. 研究実施内容

4.1 表面配向マイクロパターン

① 研究のねらい

ナノメートルスケールの表面配向パターンによって、メモリー効果などの今までにない、応用的にも重要な機能性を作り出せることを既に明らかにしている。この研究項目は、まずメモリー効果を持つ実用デバイスのプロトタイプを実現することを第一の目標とし、同時に、マイクロパターンニングを表面による液晶配向の自由エネルギー操作工学という観点から一般的に捉え、メモリー効果を超えた新しい機

能性の実現を目指すものである。具体的には、メモリーデバイスの原理実証に用いた原子間力顕微鏡によるナノラビングから、偏光パターン照射による光配向に作製技術を高度化し、大面積処理を実現する。さらに、スタンピングによる大面積配向技術であるナノインプリンティング技術によるマイクロパターンニングを実現する。シミュレーションサイドからは、有限要素法にもとづく液晶連続体モデルによる構造シミュレーションと、時間領域有限要素法による電磁波伝播の解析とを組み合わせることで、マイクロ表面配向パターンデバイスの電気光学応答のモデリングを行う。

② 研究実施方法

- 1) 光配向：光配向技術ならびにリソグラフィ技術を用い、大面積の液晶配向パターンを作製する。市松模様正方格子で隣接するセルの光透過率が0（黒）、1（透明）に相当する金属クロム膜のフォトマスクを外注し、ガラス基板上に作成した光配向膜と密接して、紫外直線偏光を照射する。フォトマスクによる正方格子のセルサイズを $0.7\mu\text{m}$ ～数 μm として、いくつか用意して、セルサイズの効果を検討する。光配向膜の特性により、例えば（a）逐次露光法：初めに紫外直線水平偏光で密着露光したのち、次にフォトマスクを浮上し1セルサイズの長さ移動し再密着させ、紫外直線偏光の角度を90度回転させて垂直偏光で照射する。このようにして隣接セルの配向方向を90度変えることが出来る。（b）二重露光法：最近になって、新しいアゾ色素光配向膜を用いた二重露光法が使用できるようになった。これは初めに全面水平直線偏光露光した後、フォトマスクを密着させて、垂直偏光で露光する。二重露光された部分は、他の部分とは配向方向が90度変更される。この方法はマスクの移動が不要であり、寸法制度の高い表面マイクロパターンを簡単に作成できるようになる。液晶セルを組み立て、電界によるスイッチング特性、メモリー機能等の特性を測定する。
- 2) ナノインプリンティング：各種パターンの精密金型を外注し、熱加工型のSCIVAX社製のナノインプリント装置(X-200)を用いてガラス基板上にスピコートしたポリイミド配向膜に表面マイクロパターンを作成する。ナノメータ精度の金型はパターン領域が広いと大変高価であるので、外注したパターン領域は1mm角程度のものであり、その複製を作成してナノインプリンティングを行った。高温に加熱して軟化したポリイミド配向膜に金型を圧着して凹凸を作成、冷却後金型を分離する。各種パターンの金型、各種の配向膜材料、ナノインプリントパラメータ（温度・圧力・保持時間など）に依存した液晶配向特性を測定し、最適な液晶デバイス作成条件を求める。液晶セルを組み立て、電界によるスイッチング特性、メモリー機能等の特性を測定する。
- 3) 理論・シミュレーション：光配向による水平・垂直配向混合表面マイクロパターンによる配向パターンについて3次元連続体モデルプログラムによるシミュレーションを行う。また、ナノインプリンティングによる配向技術に関連して、基板表面などの壁を連続体シミュレーションでどのように扱うべきなのか検討し、表面

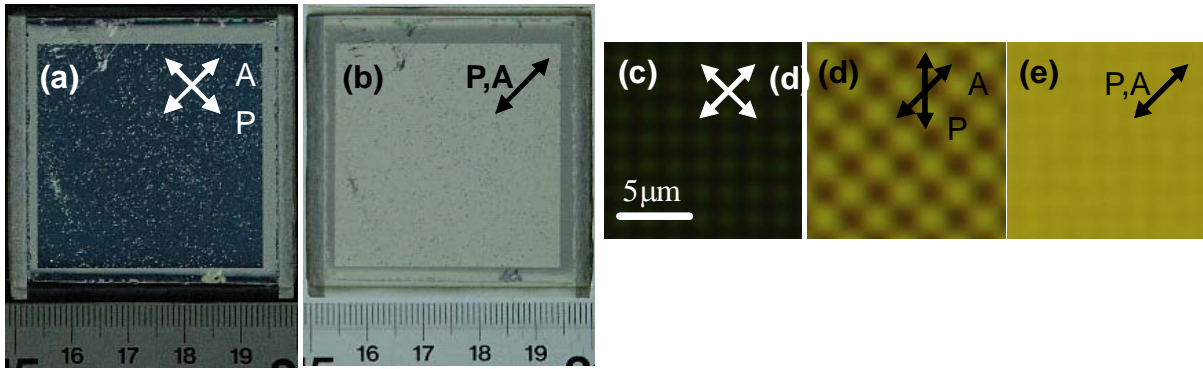
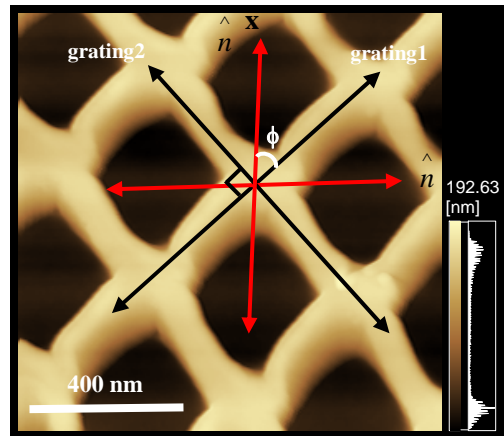


図1. ドメインサイズ $2\mu\text{m}$ の市松模様状パターン双安定セルの (a) 直交ニコル (b) 平行ニコルでの写真。パターン領域 $4\times 4\text{cm}^2$ 。P と A はポラライザーとアナライザーの方向を示す。(c) - (e) :異なる偏光子における H 状態の偏光顕微鏡像

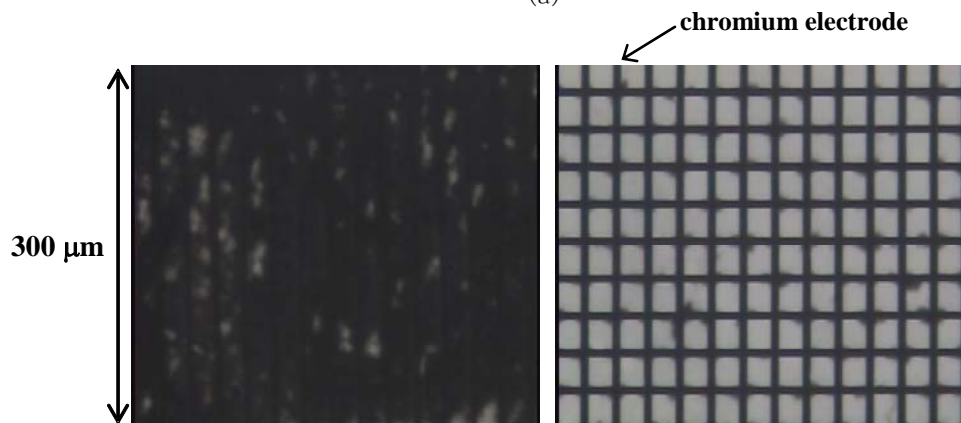
アンカリングによる表面形状の影響を調べる。

③ 現在の研究進捗状況と結果

- 1) 光配向：機器周辺の環境制御（温湿度管理・クリーン度向上）と基板とフォトマスクの密着度を改善することにより、二重露光法により最大 40mm 四方の領域に表面配向マイクロパターンを作製することができた（図1）。ERATOプロジェクトでは AFM(原子間力顕微鏡)プローブにより表面マイクロパターンを作成していたが、その領域は 0.1mm 四方程度であった。この領域を比較して格段に大面積の表面マイクロパターンの作成が可能になったことが分かる。またそのパターンの一部に電場を印加し、双安定状態が実現していることを確認した。液晶材料の誘電率が印可電界の周波数に依存して正負に変化する液晶材料が使用できれば、簡単な電極配置での双安定液晶デバイスが実現するが、良い液晶が得られていない。このため、現在は櫛歯電極を用いた液晶デバイスでの諸特性を検証している。
- 2) ナノインプリンティング：傾斜機能を有する新コンセプトのポリイミド・ナノインプリント材料を提案し、民間企業に試作を依頼した。この新材料は、液晶配向性およびナノインプリント性双方を優れて両立し、この材料を用いた試作液晶セルは、その高い熱安定性により、実際の製造工程を想定した熱エージングプロセス条件下でも非常に安定した電気光学特性を示した。さらにこの新材料により、より高温での複数回のインプリンティングも、モールドにほとんどダメージを加えることなく可能であることが明らかとなった。同様に、表面凹凸による液晶配向のより高度な制御、特に表面凹凸パターンによる双安定性に関して注力して研究を行った。結果として、面内に4回対称性を有するナノインプリントパターンを用いることにより、二方向の面内電界（閾値 $4\text{V}/\mu\text{m}$ ）でスイッチング可能な新規な双安定ネマチック素子を実現することに成功した（図2）。この双安定性は、3次元的な凹凸パターンとしての、直交する二つの表面溝の競合的效果により発現するものである。



(a)



(b)

図 2. (a) PMMA (polymethylmethacrylate) 上にナノインプリントされた表面パターンの原子間力顕微鏡像。パターンピッチは 400nm、パターン深さは 180nm。(b) 表面パターン PMMA 配向層を用いた双安定素子の明・暗二状態の偏光顕微鏡像。

双安定の方向は、上記の直行する溝の周期や深さを制御することにより制御可能である。この

永久的な双安定性を有する表示素子は、高いコントラスト比と明るさ、またインプレーンスイッチングネマチック表示モードと同様の広い視野角特性が実現可能である。

- 3) 理論・シミュレーション：これまでの市松模様による表面マイクロパターンにより実現した双安定性では、全てのセルの配向は水平配向で、セルごとに水平配向角度が 90 度異なるものを使用していた。シミュレーションでは新規な表面マイクロパターンの機能を開拓するため、セルごとに水平・垂直配向混合としたときの検討を行った。その結果、従来の基板面内電界ではなく、より一般的な垂直方向の電界により双安定スイッチングする機能の可能性を見出した。光配向技術では配向膜材料の選択とフォトマスクによるリソグラフィによりセルごとに水平・垂直配向混

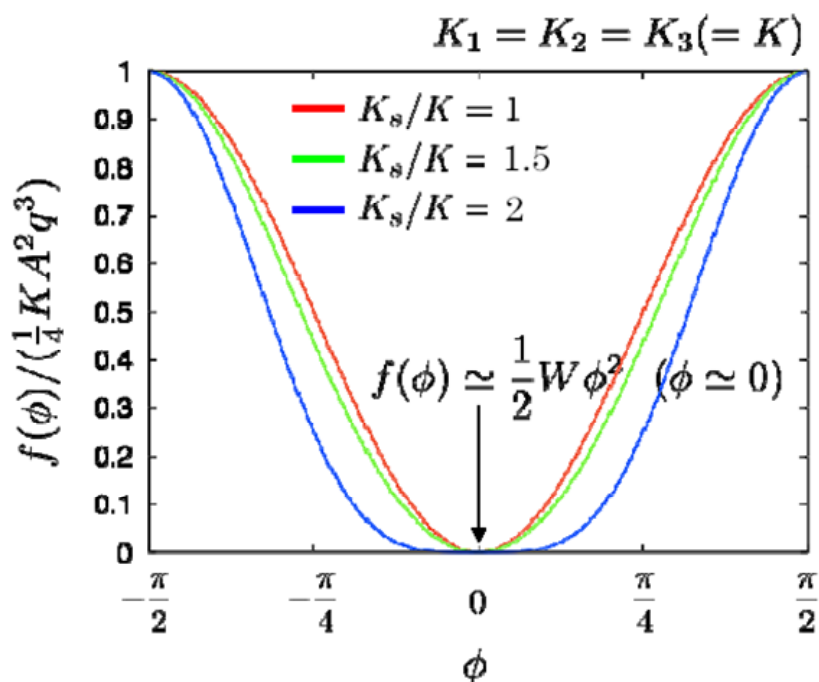


図3. アンカリングエネルギー（縦軸）の方位角（ ϕ ）依存性。 $K_s/K=1$ （赤線）が、Berremanの理論の結果。緑・青線は（パラメータの異なる）一般的な正しい理論解の結果。

合の表面マイクロパターンの作成は可能なので、このシミュレーション結果は実験グループでの新しい展開を促すものである。

ナノインプリンティング技術に関連して、「基板表面などの壁は、連続体シミュレーションでどのように扱うべきなのか」という基礎的な問題に関する考察を行い、特に流体の密度といった保存する量を扱う時には細心の注意を要することを見出した。上記の考察を踏まえて、多次元で、かつ表面の形状が平坦ではない系についての計算を可能とするスキームの構築を行なった。予備的な計算により、2次元的なパターンを有する表面上で、エネルギー的に好ましい方向に配向ベクトルが自発的に回転することや、水平配向だった表面が、表面パターンの深さを大きくすると実効的に垂直配向を示すようになるといった、興味深い現象を見出した。

さらに、提唱から30年以上を経過し、液晶の標準的な教科書にも掲載されている Berreman の理論（アンカリングと表面形状の関連を弾性論により考察した理論）に根本的な誤りが含まれており、アンカリングのエネルギーの方位角依存性も Berreman が導いたものとは全く異なる（図3）ことを、表面パターンに由来するアンカリングを解析的に考察する際に発見した。この発見は液晶の表面アンカリングの解釈に根本的な見直しを迫る可能性がある。

4. 2 液晶コロイド

① 研究のねらい

液晶を分散媒質とする固体・液体微粒子の分散体を液晶コロイドといい、液晶とコロイド粒子表面との相互作用の結果として、通常のコロイドにはない新たな粒子間相互作用が生ずることを、ERATOプロジェクトを通じて明らかにしてきた。液晶の柔軟な配向秩序によって、粒子間相互作用は、外部の電場・磁場や、組成、光励起などで大きな変調を受けるために、いままでにないコロイド構造や特性の制御性が生まれる。本テーマでは、液晶コロイドにおける粒子間相互作用を多体効果までを考慮して、実験的・理論的に解明することが一つの目標である。多ビームレーザートラッピングを用いた複数粒子の方向・位置マニピュレーション技術、微小粒子間力計測、液晶コロイド結晶制御技術などの実験研究と、アダプティブメッシュ有限要素法による液晶コロイドの構造シミュレーションとを組み合わせ、液晶コロイド科学の基盤を確立することを目指す。併行して、実験的には、これまで試みられてこなかった、新しい液晶コロイドの実現を目指す。すなわち、圧力を可制御パラメータとする気体微粒子制御、またスメクティック液晶等の層状液晶を媒質とする気体微粒子コロイドによる液晶フォームの形成、などがそれである。また、微粒子の導入により液晶中に形成される配向欠陥を制御することで、単極性の超長距離相互作用液晶コロイドの実現を目指す。これらの知見を発展させることで、外部電場や光で制御できるチューナブルフォトリック結晶を実現する。

② 研究実施方法

- 1) 光応答性液晶コロイド：光応答性を付与したコロイド粒子/液晶混合系においてコロイド超構造を作成し、液晶相転移温度を光で空間的に変調することによって液晶コロイドの構造の制御を行う。
- 2) 液晶-気体コロイド系：液晶場に微細光ホローコアファイバを用いて、エアバブル（気泡）を注入し規則的な配列構造を作成する。気泡サイズ、注入空気圧、温度、配向処理などとの各種相関を画像として観察する。規則的配列の構成や、コロイド周辺の配向欠陥の種類の変化（ヘッジホッグ \leftrightarrow サターンリング）について、その理論的な検討と、構成過程の動画像観察、電子顕微鏡を用いた微細構造観察などを行いナノ構造の解析と圧力制御により構造の制御を行う。
- 3) スペクトロスコーピー：液晶コロイド状態の粒子周辺の分子配向や構造、特性変化を各種の非線形分光技術（第2・第3高調波発生、和周波数発生）を用いて測定し、新たに液晶では比較的未踏破なテラヘルツ（THz）領域のスペクトルを測定し、THz領域での液晶物性を検討する。
- 4) 理論・シミュレーション：液晶コロイド系の、連続体理論に基づいた数値計算に関する新規な問題の発掘、その問題に関する基礎調査、数値スキームの開発を行う。具体的には、液晶の気液界面にコロイド粒子が局在している系や、電場や磁場を加えた際の、コロイド粒子のまわりのネマチック液晶の配向構造（ヘッジホッグ構造、

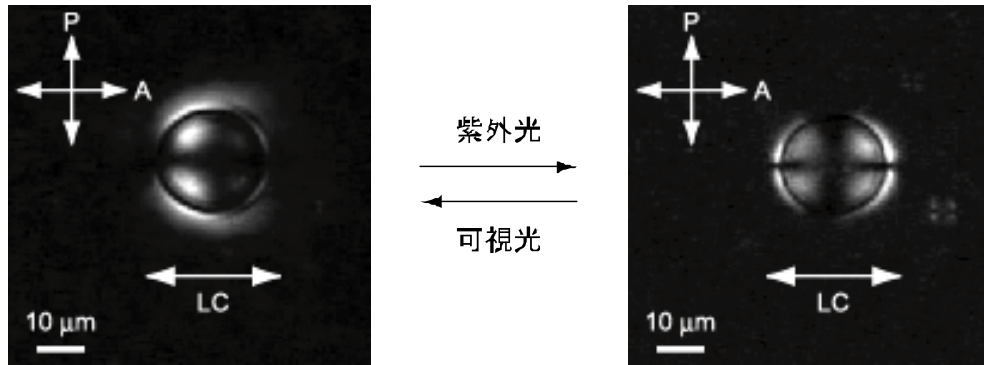


図 4. 配向欠陥の光誘起構造変化の偏光顕微鏡像（水/Azo3/5CB 系）。左の Hedgehog-like 構造は、紫外光照射によって右の Boojums に構造変化する。

サターンリング構造) の安定性 (特に, 粒子半径によってどのように安定性が変化するか) 数値計算を行う。粒子表面や基板表面などの壁が存在する時に、流体の密度などの保存量の数値的な取り扱いをどうするべきかという問題について、考察を進める。

③ 現在の研究進捗状況と結果

- 1) 光応答性分子からなる薄膜を用いて、固体微粒子が鎖状に連結した 1 次元コロイド超構造の創生と配向方位の制御が可能であることを発見した。また、コロイド粒子と液晶の複合材料である液晶コロイドにおいて、コロイド粒子表面の液晶アンカリングをアゾベンゼン化合物の光異性化反応によって変調することに基づき、コロイド粒子が形成する液晶配向欠陥構造ならびにコロイド高次構造の光制御を検討した。コロイド粒子表面に吸着したアゾベンゼン化合物のシス - トランス光異性化反応を誘起することによって、これまで報告されていなかった液晶アンカリング条件の変化を伴う配向欠陥の構造転移 (「Satrun ring - Boojum」ならびに「Hedgehog - Boojum」) を達成した (図 4)。また、配向欠陥の光誘起構造変化を利用することによって、コロイド粒子が 1 次元に高次構造化した鎖構造において、コロイド粒子間距離の光制御に成功した。
- 2) 液晶-気体コロイド系: 液晶場に微細光ホローコアファイバを用いて、エアバブル (気泡) を注入し、興味深い規則的な配列構造を作ることができた。液晶中の気泡チューブ作製: 空気は通常の液晶に対して溶解度が高いが、いったん空気を飽和させたネマティック液晶を凍結させると、再び気泡が分離される。この時気泡は、液晶の配向異方性に応じて異方的な歪を受けて、長いチューブ状の形状をとる。半径が数マイクロ、長さがセンチメートルオーダーにも及ぶチューブを、温度勾配のかけ方を変えて自在に制御することに成功した。スメクティックフォームの製作: スメクティック液晶に大きさのそろった気泡を注入し、気泡に規則正しい格子構造をとらせることに成功した (図 5)。スメクティック液晶は 1 層でも安定な構造をとるので、従来のフォームとは比較にならないほど軽くて丈夫なスメクティックフォームを作ることができ、応用面で大きな飛躍が期待できる。

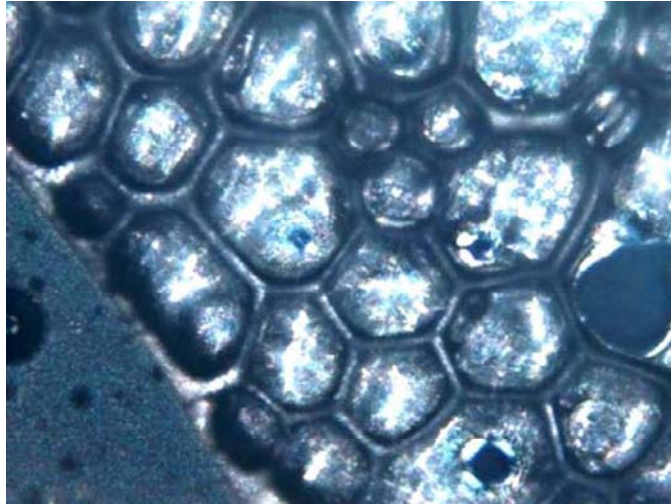


図5. スメクチック液晶（9CB）を用いて作成したスメクチックフォーム。スメクチック境界を有する気泡からなる格子構造が形成されている（観察領域幅は1.75mm）。

- 3) スペクトロスコピー：①THz time-domain spectroscopy を用いて、液晶コロイド系の0.2~2THz にわたる光学定数を測定し高周波数誘電特性を測定した。その結果、液晶コロイドの誘電応答から液晶のみの誘電応答を effective medium theory により抽出できることが分かった。抽出された液晶の誘電応答はシリカ粒子の体積容量に依存せず一致することを見出した。また、粒子はランダム配向の液晶のドメインを壊し、平均的に一様な状態をつくることが分かった。液晶コロイドの粒子周りに誘起されるトポロジカルな構造”Boojum defect” をTHGマイクروسコピーにより3次元的に観察することができた（図6）。②THG シグナルは粒子と液晶の界面における local inhomogeneity (non-linear optical susceptibility の違い) と粒子周りに誘起された液晶分子の局所的な配向分布による type II quasi-phase matching に起因することを見出した。また、入射電場方向に粒子から粒子の離れた部分に tail のように THG イメージが得られるが、これは液晶分子が粒子の離れたところまで再配向しているのではなく、粒子により局所的に分子の向きが変わったことにより、入射電場の偏光状態が変化したことによることが分かった。
- 4) 理論・シミュレーション：①ヘッジホッグ構造とサターンリング構造の自由エネルギー：エネルギーが等しくなる外場の強さが、粒子半径の関数として極を持つという結果が得られた。②ヘッジホッグ構造が絶対不安定になる外場の強さ：粒子半径が大きくなるとヘッジホッグ構造が絶対不安定になる外場の強さは、ほぼ一定値に近づく傾向があることを見出した。③壁表面において流体の密度など保存量がどう時間発展するかについて、分散化を行なう際に注意を要することを見出した。このことは、これまでの同種の問題に関する数値的取り組みにおいては、ほとんど全く注意を払われていなかったことで大きな成果である。

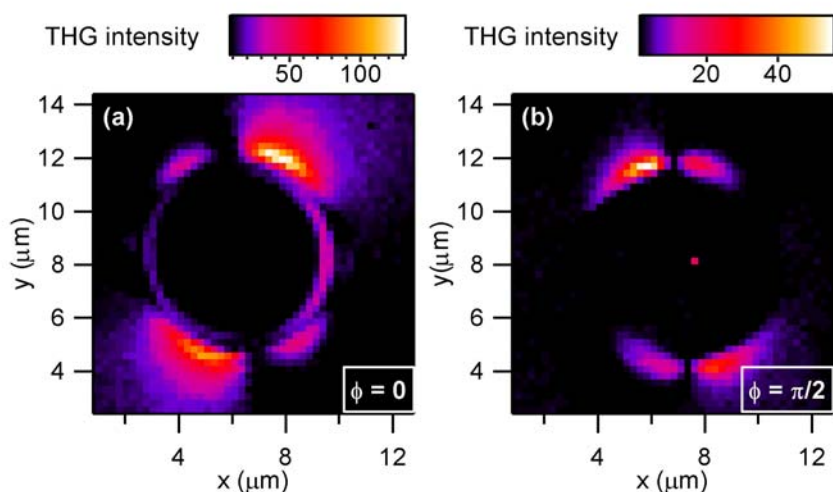


図 6. ポリスチレン粒子表面に形成された” Boojum defect” の THG イメージング像。左) 入射偏光方向 $\phi = 0$ 、右) $\phi = \pi/2$ 。

4. 3 分子ダイナミカルシステム

① 研究のねらい

E R A T O プロジェクトでは、液体表面に展開された単分子膜液晶が、分子スケールの動的過程を直接反映する多彩なダイナミクスを示すことを発見し、ボトムアップによる分子システム実現の一ステップを刻んだ。液晶ナノシステムプロジェクトでは、端緒の得られたこれらの分子ダイナミクスの起源を解明するとともに、インテリジェントな薬剤放出を実現したドラッグデリバリーシステムへの適用を目指した、分子システムの構築を目標とする。

② 研究実施方法

時間分解顕微システムなど、分子運動の高精度解析技術を新たに開発し、個々の分子運動が液晶の集団運動に転換されるプロセスを世界に先駆けて明にかすることを目指す、ここでは分子動力学シミュレーションとの連携が不可欠である。このために、実分子でのシミュレーション精度を向上するための計算システムの構築とシミュレーション方式の開拓を行う。本研究項目では、とくに合目的的な分子合成が分子システムの重要な部分となることから、国内外の関連有機合成グループとの協力関係を積極的に確立し、ダイナミカルな機能を果たす人工的分子システムを実現する。

③ 現在の研究進捗状況と結果

- 1) 擬似生体膜：液体中のキラル液晶薄膜をプロトンが移動した際に、分子が集団で一方向に歳差運動する様子の観察に成功し、この液晶薄膜が原理的に分子モーターの埋め込まれた擬似生体膜としての機能を持つことを確かめた。
- 2) 自己保持膜の液晶分子運動計測：空気-空気界面に張られたキラル液晶薄膜に水分

Transferred material (M.W.) [dielectric C.]	Precession direction	
	FELIX019	FELIX013
Water (18) [81]	CW	CCW
Methanol (32) [33]	CW	CCW
Ammonia (17) [25]	CW	CCW
Ethanol (56) [24]	CW	CW
Acetone (58) [20]	CW	CW
Chloroform (119) [4]	CW	CW
Benzene (78) [2]	CW	CW

表 1. 代表的な透過物質に対する、液晶分子の集団歳差運動の方向。歳差方向は、液晶膜の裏から表に物質が流れた時の、表から見た回転方向。

子を透過させ、水分子衝突により液晶分子に与えられるトルクと電場によるトルクを競合させ、力の変換効率を測定した。その結果、蛋白モーターのエネルギー変換効率に比べて、2桁ほど低い効率で回転が生じることがわかった。

- 3) 蛍光偏向解消実験による分子運動測定：キラル液晶単分子膜に見られる集団運動と、個々の分子の運動との相関を確かめるため、蛍光偏向解消実験で分子運動を調べた。しかし現在の実験精度では、分子の自転方向に誤差範囲を超える偏差が確認できなかった。このことから、ミクروسケールの運動とマクロ運動との関連は単純な古典的モデルでは説明できず、より複雑な相互作用を考慮した解析と、精度の高い実験系が必要であることがわかった。
- 4) 選択的な物質透過による液晶の集団回転：空気-空気界面に張られたキラル液晶薄膜に様々な気体を透過させたところ、その種類によってキラル液晶は回転運動の方向も速度も変えることがわかった（表 1）。このことは、古典力学的な衝突モデルでは、キラル液晶の一方向回転が説明できないことを意味している。定量的な物質流とキラル分子の関係は現在調査中だが、回転によって分子種を選択透過させる機能は、応用面で大きな意味を持つと期待される。
- 5) キラル液晶分子のラングミュア膜のガス分子膜透過シミュレーションの分子モデリング（図 7 a）を行い、膜を構成する液晶分子のキラリティと液晶分子長軸廻りの回転との関係、さらにその回転運動へのガス分子膜透過の影響について詳細に解析を行った。
キラル液晶分子として、最も一般的な、不斉中心(炭素)を有する分子(MHPOBC)系において、その水面展開単分子膜と膜透過水素分子ガスをモデル化・シミュレーションし、膜透過に伴う膜液晶分子の分子長軸周り回転ダイナミクスの解析を行った。この系では、シミュレーション時間の範囲(~10ns)では、膜透過に起因した膜液晶分子の有意な長軸周り回転の偏りは見られなかった。そこで、液晶相における分子長軸

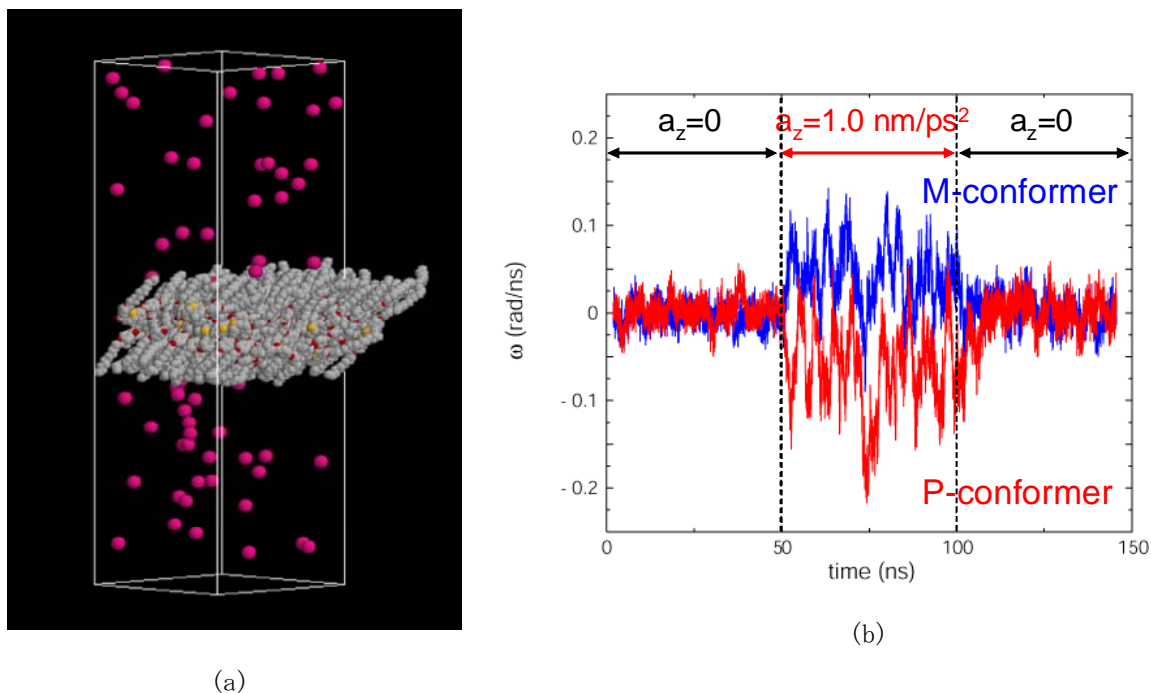


図 7. (a)キラル液晶単分子膜と膜透過ガス分子のシミュレーションモデル。(b)アルゴン膜透過ガス流 (50-100ns の間のみ) による分子軸不斉キラリティ (M・P体) に異存した軸不斉液晶分子長軸周り回転の回転方向の偏り。

周り回転の再確認を目的として、回転相(柔粘性結晶)との共通点が従来から指摘されていた、高次スメクチック相について、分子シミュレーションを行った。シミュレーションにおいて長軸周り回転を確認し、回転相と高次スメクチック相との類似性をシミュレーションの観点から初めて示した。

上記の回転相類似の液晶相系において、液晶分子を仮想的に軸不斉とすることにより、得られた長軸周り回転が膜透過と膜分子(軸性)キラリティに依存して変化するか調べた。その結果、膜透過分子としてメタン分子を用いた場合に、期待したキラリティに依存した長軸周り回転方向の偏りが確認できた。さらに、上記の仮想的な軸不斉分子に代えて、実在の軸不斉液晶分子の単分子膜について同様の膜透過シミュレーションを行ったところ、膜透過分子としてメタンあるいはアルゴン分子を用いた場合に、同様に分子の軸性キラリティに依存した長軸周り回転方向の偏りが確認できた(図 7 b)。この結果は、分子レベルでの液晶分子モーターの最初のステップの機構解明の糸口となるものと考えられる。

5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

1) 表面マイクロパターン

液晶TVに代表される液晶デバイスは表面配向膜を機械的にラビング処理を行い一様配向をしたものを用いているが、ERATO/SORST プロジェクトにおいて、一様配向でなく表面にパターン配向をすることで液晶デバイスにメモリー性を与える事ができることを世界に先駆けて報告し、液晶科学の理解を進めると同時に新しい機能の液晶デバイスの実現性を実証した。その後、表面マイクロパターンについては多くの機関が光配向技術、あるいはレーザービーム走査技術などを用いて、研究開発を進め、常に当プロジェクトの成果が引用されている。当プロジェクトでは、すでに報告しているようにナノインプリント技術の応用展開を図っているほか、優れた理論・シミュレーショングループとの密接な連携で、より新しい機能の実現と実用化を目指した研究が進んでいる。また、光配向技術、ナノインプリント技術のそれぞれに適した配向膜材料については専門の民間企業との協力関係が得られており、全ての意味で世界を先導していると自負できる。

2) 液晶コロイド

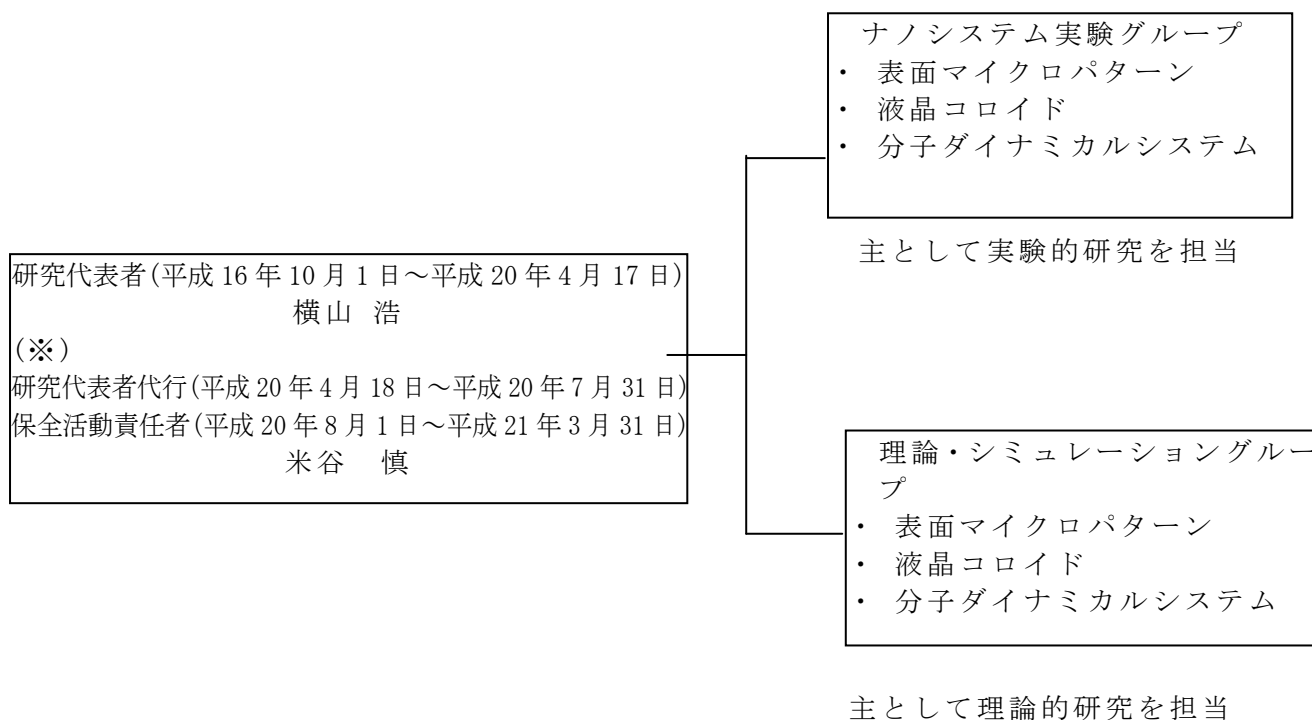
日本液晶学会討論会、国際液晶学会講演会などにおいて、液晶コロイドのセッションが設けられて、研究発表がだんだんと増加しているのが現状である。当プロジェクトでは関連の著名な国内外の研究グループとの協力関係を築き意見交換を進めている。当グループでは実験と理論の両面で多くの口頭講演・論文報告を行って、世界最先端の地位を保っている。

3) 分子ダイナミカルシステム

最先端の科学分野であって、国内外の研究集会で招待講演を依頼されている。現象の理解、理論的検討など今後も積極的に研究を行う必要がある、研究テーマと将来の応用分野は学際的なものであり、化学・物理・ライフサイエンスなどより広い分野での、協力関係が必要と思われる。

6. 研究実施体制

(1) 体制



※ 一身上の都合により横山浩研究代表者が、平成 20 年 4 月 18 日より本プロジェクト研究代表者を辞した為、その後の研究期間(平成 20 年 4 月 18 日～平成 20 年 7 月 31 日)における研究代表者代行および保全活動期間(平成 20 年 8 月 1 日～平成 21 年 3 月 31 日)における保全活動責任者を米谷慎が務めた。

(2)メンバー表

ナノシステム実験グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
多辺 由佳	産総研 早稲田大学	グループリ ーダ 兼業	・ 表面マイクロパタ ーン ・ 液晶コロイド ・ 分子ダイナミカル システム	平成16年10月～ 平成21年3月
大江 昌人	(株)日立ディ スプレイズ	出向研究員 JST 研究員	・ 表面マイクロパタ ーン ・ 液晶コロイド	平成16年10月～ 平成20年9月
三橋 慶喜	個人	JST 研究員	・ 表面マイクロパタ ーン	平成16年10月～ 平成21年3月
井上 嘉	帝京科学大学	JST 研究員	・ 液晶コロイド	平成16年10月～ 平成21年3月
前田 洋治	個人	JST 研究員	・ 液晶コロイド	平成17年4月～ 平成18年9月
Camilla Voeltz	Univ. Magdeburg (ドイツ)	JST 研究員	・ 液晶コロイド	平成17年7月～ 平成19年6月
新妻 潤一	物質・材料研 究機構	JST 研究員	・ 表面マイクロパタ ーン	平成17年10月～ 平成21年3月
郭 進碩	BOE-Hides (韓国)	JST 研究員	・ 表面マイクロパタ ーン	平成18年1月～ 平成19年6月
Ishtiaque Syde	Case Western Reserv Univ. (バングラ ディシュ)	JST 研究員	・ 分子ダイナミカル システム	平成18年4月～ 平成18年12月
山本 貴広	産総研	共同研究員	・ 液晶コロイド	平成16年10月～ 平成21年3月
Shih-Hsien Liu	ITRI (台湾)	共同研究員	・ 表面マイクロパタ ーン	平成17年10月～ 平成17年11月
Ann-Cheng Chen	ITRI (台湾)	共同研究員	・ 表面マイクロパタ ーン	平成17年11月～ 平成17年12月

関 一義	早稲田大	JST 研究員	・ 分子ダイナミカルシステム	平成 18 年 6 月～ 平成 19 年 3 月
Thet-Naing Oo	長岡技術科学大学	JST 研究員	・ 表面マイクロパターン	平成 19 年 9 月～ 平成 21 年 3 月

理論・シミュレーショングループ

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
米谷 慎	(株)日立製作所 産総研	グループリーダー JST 研究員 兼業	・ 表面マイクロパターン ・ 液晶コロイド ・ 分子ダイナミカルシステム	平成 16 年 10 月～ 平成 21 年 3 月
奥 透	産総研	JST 研究員	・ 分子ダイナミカルシステム	平成 17 年 4 月～ 平成 17 年 5 月
福田 順一	産総研	共同研究員	・ 表面マイクロパターン ・ 液晶コロイド	平成 16 年 10 月～ 平成 20 年 12 月
青木 圭子	計算流体力学研究所	JST 研究員	・ 分子ダイナミカルシステム	平成 19 年 6 月～ 平成 21 年 3 月

事務所

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
藤原 英樹	筑波大学	事務参事		平成 17 年 4 月～ 平成 21 年 3 月
斉賀 稚津子	JST	事務員		平成 17 年 4 月～ 平成 21 年 3 月

7. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等
なし

(2) 招聘した研究者等

氏名（所属、役職）	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Philippe Poulin（CNRS パスカル研究所フランス）	液晶コロイドによる ナノ構造機能材 料の創生	液晶ナノシステ ムプロジェクト、 他	H17年7月25 日～8月6日

8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表（英文論文 48 件 邦文論文 3 件）

01. J. Niitsuma, M. Yoneya and H. Yokoyama: Improved micro-photopatterning on azo film for a practical nematic crystal bistability, *Jpn. J. of Appl. Phys.* 2009, *in press*
02. J. Fukuda, M. Yoneya and H. Yokoyama: Simulation of cholesteric blue phases using Landau-de Gennes theory: Effect of an applied electric field *in preparation*
03. J. Fukuda and S. Zimmer: Confinement effect on the interaction between colloidal particles in a nematic crystal: an analytical study, *submitted to Physical Review E*, 2009
04. J. Fukuda: Liquid Crystal Colloids: A Novel Composite Material Based on Liquid Crystals, *J. of the Physical Society of Japan*, *in press*
05. J. Fukuda, M. Yoneya and H. Yokoyama: Consistent numerical evaluation of the anchoring energy of a grooved surface, *Physical Review E*, **77**, 011705 (2009)
06. J. Fukuda, M. Yoneya and H. Yokoyama: Critical reexamination of Berreman's theory on surface anchoring, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, *in press*
07. T. Yamamoto, I. Nishiyama and H. Yokoyama: Photo-control of chirality-induced liquid-crystalline 3D structures, *Ferroelectrics* **365**, 1, 39 (2008).
08. B. Lev, B. Chernyshuk, T. Yamamoto, J. Yamamoto and H. Yokoyama:

- Photochemical switching between colloidal photonic crystals at the nematic-air interface, *Physical Review E*, **77**, 020701, 2008
09. J. Seog. Gwag, M. Oh-e, K. R. Kim, M. Yoneya, H. Yokoyama, S. Itami and H. Satou: A functionally separated nanoimprinting material tailored for homeotropic liquid crystal alignment, *Nanotechnology* **19**, 395301(2008)
 10. M. Yoneya, T. Yamamoto, I. Nishiyama and H. Yokoyama: Molecular dynamics simulation study of the influence of chirality on the stability of the smectic Q liquid crystal phase, *J. Phys. Chem.* **112**, 8452 (2008)
 11. J. Niitsuma, M. Yoneya and H. Yokoyama: Contact photolithographic micropatterning for bistable nematic liquid crystal displays, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 241120(2008)
 12. M. Yoneya, Y. Tabe and H. Yokoyama: Molecular dynamics simulation study of gas transport through chiral liquid crystalline monolayer, *Ferroelectrics* **365**, 1, 139 (2008).
 13. M. Yoneya, S. Takada, Y. Maeda and H. Yokoyama: Electro-optic response of cubic liquid crystal compounds in Kerr cell geometry, *Liq. Cryst.* **35**, 339(2008)
 14. J. Seog. Gwag, J. Hoon. Kim, M. Yoneya and H. Yokoyama: Surface nematic bistability at nanoimprinted topography, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 153110 (2008).
 15. J. Fukuda, M. Yoneya and H. Yokoyama: Anchoring of a nematic liquid crystal induced by surface grooves: A numerical study, *Physical Review E*, **77**, 030701, 2008
 16. J. Fukuda and H. Yokoyama: Effect of an external field on the director profile of a nematic liquid crystal around a spherical particle, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **475**, 165-172, 2007
 17. J. Fukuda, J.S. Gwag, M. Yoneya, H. Yokoyama: Theory of anchoring on a two-dimensionally grooved surface, *Physical Review E*, **77**, 011702, 2008
 18. 山本貴広、多辺由佳、横山浩: Photochemical manipulation of colloidal structures in liquid-crystal colloids, *Proceedings of SPIE*, **6587**, 658707(2007)
 19. 西山伊佐、山本貴広、山本潤、横山浩: Super-structured smectics and their application, *Proceedings of SPIE*, **6654** , 66540E (2007)
 20. 山本貴広、西山伊佐、横山 浩: Novel photo-induced phase transition observed in three-dimensional liquid-crystalline phase of azobenzene compound, *CHEMISTRY LETTERS*, **36** (9). 1108-1109, 2007
 21. G. Watanabe, Y. Tabe: Tilted and non-tilted liquid crystalline langmuir monolayers: Analogy to bulk smectic phases, *J. Phys. Soc. Jpn.* **76** (9), Art. No. 094602, 2007
 22. Masahito Oh-e, Hiroshi Yokoyama, Mattijs Koeberg, Euan Hendry, Mischa

- Bonn; Liquid crystal colloids studied by THz time-domain spectroscopy, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **480**, 21(2008)
23. Jun-ichi FUKUDA: Configuration of a chiral smectic-C film with a circular inclusion --Pathological contribution of spontaneous bend?--, *物性研究*, **89**, 105-106, 2007
 24. J. Fukuda, M. Yoneya and H. Yokoyama: Erratum: Surface-groove-induced azimuthal anchoring of a nematic liquid crystal: Berreman's model reexamined, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 139902 (2007)
 25. Jun-ichi FUKUDA: Configuration of a chiral smectic-C film with a circular inclusion, *European Physical Journal E*, **24**, 91-98, 2007,
 26. Jin Seog Gwag, Masahito Oh-e, Makoto Yoneya, Hiroshi Yokoyama: Advanced nanoimprint lithography using a graded functional imprinting material tailored for liquid crystal alignment, *J. Appl. Phys.*, **102**, 063501. 2007
 27. Jin Seog Gwag, Jun-ichi Fukuda, Makoto Yoneya, Hiroshi Yokoyama: In-plane bistable nematic liquid crystal devices based on nanoimprinted surface relief, *Appl. Phys. Lett.* **91**, 073504, 2007
 28. J. Fukuda and H. Yokoyama: Effect of an external field on the director profile of a nematic liquid crystal around a spherical particle, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, **475**, 165-172, 2007
 29. 福田順一、米谷慎、横山浩; On the Numerical treatment of the dynamics of a conserved order parameter in the presence of impenetrable walls, *物性研究*, **87**, 170, 2006
 30. J. Fukuda and H. Yokoyama; Stability of the director profile of a nematic liquid crystal around a spherical particle under an external field, *European Physical Journal E*, **21**, 341, 2006
 - 31. J. Fukuda, M. Yoneya and H. Yokoyama; Surface-groove-induced azimuthal anchoring of a nematic liquid crystal: Berreman's model revisited, *Physical Review Letters*, *Physical Review Letters*, **98**, 187803, 2007
 32. Masahito Oh-e, Hiroshi Yokoyama, Mattijs Koeberg, Euan Hendry, Mischa Bonn; THz time-domain spectroscopy of liquid crystal colloids, *Proc. SPIE*, **6487**, 648706, 2007
 33. Masahito Oh-e, Hiroshi Yokoyama, Mattijs Koeberg, Euan Hendry, Mischa Bonn; Imaging colloidal particle induced topological defects in a nematic liquid crystal using third harmonic generation microscopy, *Optics Express*, **14**, 12976, 2006
 34. Masahito Oh-e, Hiroshi Yokoyama, Mattijs Koeberg, Euan Hendry, Mischa Bonn; High-frequency dielectric relaxation of liquid crystals: THz time-domain spectroscopy of liquid crystal colloids, *Optics Express*, **14**, 11433, 2006
 - 35. C. Voeltz, Y. Maeda, Y. Tabe, H. Yokoyama; Director-Configurational

- Transitions around Microbubbles of Hydrostatically Regulated Size in Liquid Crystals, *Physical Review Letters*, **97**, 227801, 2006
36. Y. Maeda, H. Yokoyama, A. Yoshizawa, T. Kusumoto; Phase behaviour under pressure of a dichiral liquid crystal with an optically isotropic cubic phase: 2-{4-[(R)-2-fluorohexyloxy]phenyl}-5-{4-[(S)-2-fluoro-2-methyldecanoyloxy]phenyl} pyrimidine, *Liquid Crystals* **34**, 1,9-18,2007
 37. Y. Maeda, E. Nishikawa, H. Yokoyama; Morphological phase behaviour under pressure of polycatenar mesogens with a perfluorinated moiety, *Liquid Crystals* **33** 865-874 2006
 38. J. Fukuda, M. Yoneya and H. Yokoyama; Numerical treatment of the dynamics of a conserved order parameter in the presence of walls, *Physical Review E* **73** 066701, 2006.06
 - 39. Takahiro Yamamoto, Yuka Tabe and Yokoyama Hiroshi; Photonic manipulation of topological defects in liquid-crystal emulsions doped with azobenzene derivatives, *Thin Solid Films*, **509**, 81. 2006.06
 - 40 Keiko M. Aoki, Makoto Yoneya, and Hiroshi Yokoyama; Constant surface-tension molecular-dynamics simulation methods for anisotropic systems, *J. Chemical Physics*, **124**, 064705, 2006
 41. Masahito Oh-e, Hiroshi Yokoyama, Shinichi Yorozyua, Kazuo Akagi, M.A. Belkin, Y. R. Shen: Chirality probed by sum-frequency vibrational spectroscopy for helically structured conjugated liquid, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, **436**, 76
 42. 福田順一、横山浩; Separation-insensitive attractive interaction between particles mediated by the elastic distortions of a nematic liquid crystal, *物性研究* **84**, 929-930, 2005
 43. Jun-ichi Fukuda, Holger Stark, Makoto Yoneya, and Hiroshi Yokoyama; Effect of a hydrodynamic flow on the orientation profiles of a nematic liquid crystal around a spherical particle, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, **435**, 734-745.
 44. Jun-ichi Fukuda, Holger Stark, Makoto Yoneya, and Hiroshi Yokoyama; Interaction between particles in a nematic liquid crystal: Numerical study using the Landau-de Gennes continuum theory, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, **435**, 723-734.
 - 45. Jun-ichi Fukuda, and Hiroshi Yokoyama; Separation-Independent Attractive Force between Like Particles Mediated by Nematic-Liquid-Crystal Distortions, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 148301 (2005)
 46. Jun-ichi Fukuda, Holger Stark, and Hiroshi Yokoyama; Friction drag of a spherical particle in a liquid crystal above the isotropic-nematic transition, *Phys. Rev. E* **72**, 021701 (2005)
 47. Isa NISHIYAMA, Takahiro YAMAMOTO, Jun YAMAMOTO, John W. GOODBY,

Hiroshi; Molecular design controlling smectic stability and clinicity, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 2005, **439**, 55-70.

48. Yoji Maeda, Hiroshi Yokoyama; Pressure-scanning DTA measurements of the cubic-smectic C phase transition of 1,2-bis-(4-n-octyloxy- and 1,2-bis-(4-n-dodecyloxy benzoyl) hydrazines, Thermochemica Acta **441**, 156-161, 2006
- 49. Jun Yamamoto, Isa Nishiyama, Miyoshi Inoue & Hiroshi Yokoyama; Optical isotropy and iridescence in a smectic 'blue phase', Nature **437**, 525-528, 22 September 2005
50. Makoto Yoneya, Masuyuki Ohta and Katsumi Kondo; A robust design against comb electrode spacing variations for in-plane switching mode thin-film transistor liquid crystal display, J. Appl. Phys. **98** 13102 2005.07
51. Makoto Yoneya, Yuka Utsumi and Yoshiyuki Umeda; Depolarized light scattering from liquid crystals as a factor for black level light-leakage in liquid crystal displays, J. Appl. Phys. **98** 016106 2005.06

(2)口頭発表：151 件

①学会

国内 82 件, 海外 37 件

②その他

国内 13 件, 海外 19 件

(2-2)ポスター発表：62件

①学会

国内 36 件, 海外 25 件

②その他

国内 1 件, 海外 0 件

(3) 特許出願

	件数
国内出願	5
海外出願	4
計	9

(4) その他特記事項

なし

(9) 結び： (自己評価)

3つのテーマ、表面マイクロパターン、液晶コロイド、分子ダイナミカルシステムのそれぞれについて実験グループと理論・シミュレーショングループの密接な連携による研究は、所期の目標をほぼ順調に達成した。3つのテーマでの特許出願は実用に近いテーマから順に、表面マイクロパターン：国内出願4件(内3件はPCT海外出願済み)、液晶コロイド：国内出願1件(PCT海外出願済み)、基礎科学である分子ダイナミカルシステムでは0件となっており、液晶科学の基礎分野の特徴と責務を示している。

表面マイクロパターンのテーマでは、メモリー性液晶デバイスの実用化に向けて着々と成果が生み出されている。今後の実用化に向けた研究開発には、エンジニアリングの人員の増強や、開発研究に必要な機器、消耗品の手配など、特に高価なナノインプリント金型の購入などに制約があり、実用化にむけたはやる気持ちにさいなまれている。別途研究開発予算の調達が必要な段階に到達した。

理論面では、H18年度後半に画期的な発見があった。すなわち Berreman の理論(アンカリングと表面形状の関連を弾性論により考察)に根本的な誤りが含まれており、アンカリングのエネルギーの方位角依存性も Berreman が導いたものとは全く異なることを発見し、論文にまとめた。この新しい発見は、実験事実をより正しく説明するばかりでなく、表面形状を通じた液晶配向制御の本格的デザインに道を拓くもので、表面パターンを用いた液晶デバイスのバラエティの拡大に強力な武器を提供するものと期待される。今後の展開が楽しみである。

液晶コロイドの研究では、固体、液体、気体の粒子を、制御された条件で液晶中に導入し、その基本的な物性を明らかにしながら、チューナブル・フォトリッククリスタルへの展開を図るべく、研究を展開している。中でも、気体粒子、すなわちバブルをネマティック液晶に導入して、粒子径を静水圧で制御することで、これまで実験的な裏づけの乏しかったコロイド粒子周囲の液晶配向状態について、詳細な実験が可能となった。この結果、粒径の減少が引き起こす四重極状態から双極状態への転移の直接検証に成功したことは、大きな進歩である。他方、実用面では、バブル系の液晶コロイドをベースに、実用化につながるスメクティックフォームを発想し、その予備的検討をもとにして特許申請を行ったことは、特筆できることと考えられる。当初計画した多ビームレーザートラッピングを用いた複数粒子の方向・位置マニピュレーション技術は、十分な光学技術を持つ研究員の手当てが遅れていることから、残念ながら計画通りに進んでいないが、バブル系液晶コロイドをさらに発展させる上で、早急に実現しなくてはならない課題である。

分子ダイナミカルシステムのテーマでは、ナノ秒域の分子回転の異方性を解明するという、液晶科学の基本的問題に直結する観点から、液晶分子モーターの素過程の解明に取り組んでいるが、実験技術そのものの立ち上げの困難と、異方性回転に伴う微弱信号の抽出にともなう困難がまだ完全に克服できておらず、説得力のあるデータを得るまでにはしばし時間がかかる状況である。しかしながら、時間分解実験と平行して、キラル液晶単分子

膜の分子回転制御因子に関する実験研究と分子動力学シミュレーションとを連携させることで、実験・理論の両面で多くの成果を蓄積し、理解が進んでいる。液晶コロイドのテーマとあわせて、世界的に見て、この分野の指導的地位にあると自負している。