

機関番号：12608
 研究種目：学術創成研究費
 研究期間：2006～2010
 課題番号：18GS0205
 研究課題名（和文） 生物の構造色を生み出すナノ周期構造の解明とその創生技術の確立
 研究課題名（英文） Clarification of nano-scaled structures in biological systems resulting in beautiful colors and their artificial production for application to optical devices
 研究代表者
 渡辺 順次(WATANABE JUNJI)
 東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
 研究者番号：90111666

研究成果の概要（和文）：生物界における興味ある周期構造を、自らまた専門雑誌の情報をもとに解明するとともに、液晶、相分離、コロイド結晶場などのソフトマテリアル場を利用したナノ構造創生技術を確立し、その光学特性等に関する具体的な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：In biological systems, there are so many iridescent colors which are based on the periodic nano-scaled structures. We clarified these structures, and then created artificially the similar structures, exploiting the self-assembly of polymers in conventional fields such as liquid crystal, phase separation, colloidal crystal and so on. Optical properties of these fine materials have been also analyzed for the application to optical devices.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	77,700,000	22,310,000	101,010,000
2007年度	85,100,000	25,530,000	110,630,000
2008年度	58,900,000	17,670,000	76,570,000
2009年度	39,300,000	11,790,000	51,090,000
2010年度	38,700,000	11,610,000	50,310,000
総計	299,700,000	88,910,000	389,610,000

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学／高分子・繊維材料

キーワード：ナノ構造・生物・ナノプロセッシング・液晶・構造色

1. 研究開始当初の背景

本研究は、高分子科学、強いてはその重要な一翼を担うソフトマテリアル科学の新たな展開、新規な学問フィールドを立ち上げるという科学的インパクト、そして精緻なナノ構造を有し、高機能、高性能である一方、安価な高分子製品を作り出すという社会的インパクト、の双方のインパクトを与えることができると期待され、始まった。

2. 研究の目的

現在非常な進展を見せているナノ解析技術を駆使して、構造色を生み出す仕組み、すなわちナノ構造の解明を行い、生物がかれらの生活環境に適するために大いに利用したであろう構造機能を明らかにし、その構造がいかんして自発的に創成されてきたのかを整然とした論理でまとめることである。そして、これら基本的なデータ

基に、絶対的にボトムアップ的手法、すなわち高分子が低エネルギーで自発的にかつ歩留まり高くナノ構造を創成するという生物ナノプロセッシングを用いて、構造色材料(ナノ構造材料)を創成する手法を確立し、最後に産業材料へとポリッシュアップすることを目的とする。

3. 研究の方法

液晶、相分離、コロイド結晶場などを利用したナノ構造創生技術を確立し、光学材料として展開する。

4. 研究成果

液晶、相分離、コロイド結晶場などのソフトマテリアル場を利用したナノ構造創生技術を確立するとともに、100報を超える論文報告、20件を超える国際会議での招待講演などを通して情報活動を行い、この分野での科学の進展に寄与し

てきた。具体的には、生物界における興味ある周期構造を自らまた専門雑誌の情報をもとに解明するとともに、液晶場を中心核として、以下に示すようにナノ構造創生技術とその光学特性等に関する具体的な成果を得てきた。

(1) キラルネマチック(コレステリック)液晶の分子設計とらせん周期構造の創生研究

(1)-1. 高いらせんねじれ力 (HTP) を持つキラルドーパントの開発

液晶場にラセンを誘起することは、ラセン周期を利用したナノ構造創生には欠かすことができないプロセスである。典型的なラセン液晶にコレステリック液晶があるが、それを作り出すには、ホスト液晶であるネマチック液晶にキラルドーパントを導入するのが一般的である。その場合、ホストとなるネマチック液晶の性質を変えずにラセン周期を効果的に生み出すことが重要であり、キラルドーパントのねじれ力 (HTP) が高いことが要求される。

ねじれ形態の凍結が重要であるという指針のもと、多くのキラルドーパントの合成を試み、ナフチルエチルアミンを基盤にした誘導体が、 $140 \cdot \text{m}^{-1}$ という非常に大きな HTP を有することを見出した。これは、1%程度のドーパントの導入でらせん周期が可視波長域に入るほどの高い HTP であり、不斉炭素を含む結合回りの高い回転障壁のためねじれ形態が安定したこと由来すると説明した。さらにドーパント自身が液晶を形成するため、ホストの液晶の性質 (熱安定性、複屈折性など) を大きく変えないなどの特徴を有することもあわせて示した。

(1)-2. コレステリックらせんのモノドメイン構造の制御と液晶のガラス化

液晶のガラス化現象に対する基礎研究を行い、モノドメイン液晶を完全ガラス化し、均質透明なフィルム得る手法を確立した。下の図1は、上記キラルドーパント 1-2wt% の導入で、可視光領域に光の選択反射を示すコレステリック液晶が得られることを CD スペクトル解析を通して与え、そのコレステリック・ラセン液晶を固化することで、青、緑、赤の美しいカラーフィルムが作成できることを示したものである。

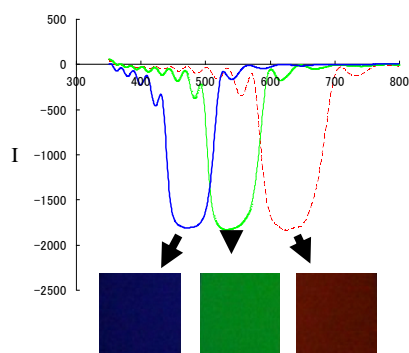


図1. コレステリック膜の反射スペクトル。1-2%のキラルドーパントの導入により可視光の波長と同程度のピッチを有するラセンねじれを誘起できる。

(1)-3. 応力場によるらせんピッチの変化と応力-光変換フィルムの創生

ざり応力下ではらせんピッチが減少し、応力フリーではもとのピッチに戻るというコレステリック液晶の特徴をエラストマーとして利用する研究であり、ルリスズメダイの変色メカニズムの模倣である。この応力-光変換の開発ため、まずネマチックエラストマーの基盤研究が進められ、コレステリックエラストマーへの展開がされてきた。

(1)-4. コレステリック液晶を用いた透明偏光板の開発

コレステリック液晶の固化フィルムは、ラセンのセンスに依存した右あるいは左円偏光を反射する。したがって、可視光の全波長域を反射するように、コレステリック膜を数枚重ねて、 $4/\lambda$ 板を配すれば、透過光波は直線偏光となる。これは、PVA-ヨウ素系の吸収型偏光板とは異なり、透過型の偏光板であり、反射された光を再利用することで、入射光の強度を減ることなく、偏光を得ることができる。フィルムの重ねあわせにより、可視光の全波長域で反射光を得る方法に加え、大きな Δn を付与 (すなわち反射幅を拡大) したり、厚み方向にピッチの傾斜をつけたりして、コレステリック液晶フィルム一枚でその機能を持ったフィルムの開発も進めてきた。後者二つの方法は、後述するように、まさに生物が行ってきている手法そのものである。

(1)-5. 自然に見るコレステリックラセン

ミヤコアオドウガネとアオドウガネの翅の色は、同じ緑色でも視覚的に異なる。その要因は、それぞれの翅がフラツ型と波うち型のコレステリック (Ch) 光反射板であるためであり、後者の波うち層系では、視野角依存性はあまり強くなく、どの方向からでも同一緑色が見える仕組みになっており、そのことが外敵から身を守る保護色として機能していることを示した。また、昆虫のように反射光角度を広げるフィルム (視野角解消フィルム) を、表面波うち構造を有するフィルム上に Ch 液晶を塗布する方法で作製した。そして、その光学特性を詳細に調査し、さまざまな意匠効果のある反射フィルム (金色のような混合色の生物メッキフィルム) を作成することが可能であることも示した。

(1)-6. コレステリックレーザ発振

コレステリック液晶内に蛍光ダイとしてピレン誘導体を混合し、分布帰還型レーザ発振に成功した。また、ピレンの量子収率 (0.85) が高いため、発振閾値が低くなる (従来の $1/6 : 43 \text{ nJ/pulse}$) こともあわせて観測し、連続発振を可能とする材料設計に向け一歩前進した (図2)。

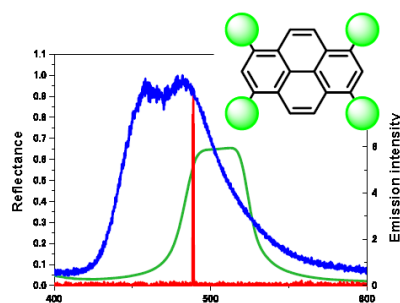


図2. レーザダイ (ピレン誘導体) を導入したコレステリック膜での分布帰還形のレーザ発振 (シャープピーク)。コレステリック膜の反射スペクトルとダイの発光スペクトルが重なるところ (ここで低波長の窓) で発振が起こる。

(2). キラルSc相のらせん構造とそれに起因するフィルム表面のアンジュレーション構造

(2)-1. キラルSc液晶のホモニアスモノドメイン構造の創生とその光学特性

コレステリック液晶のラセンが分子軸（あるいはメソゲン軸）に垂直方位に成長するのに対して、キラルSc相のラセンは、分子軸に沿った方向に成長する。したがって、同一の分子配向制御により、コレステリック液晶とは異なった意匠効果の光反射特性を持つフィルムの作成が可能となる。例えば、分子軸が面内に寝ているような（ホモニアス配向した）フィルム試料では、コレステリックラセンの場合には光の選択反射は表面反射として起こるのに対して、キラルScラセンではフィルムを透過する光が分光されることになる。いわゆる、一種の薄膜プリズムとして機能する（図3参照）。

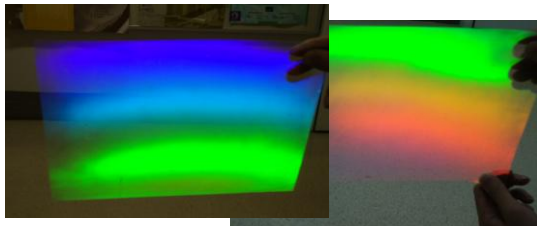


図3. キラルScホモニアス配向フィルムによる透過光の分光現象。角度を変えると見える色が変わる。

(2)-2. フィルム表面のアンジュレーション構造とその応用

キラルSc*液晶のらせんを反映して高分子自身がらせん形態をとるのも、ひとつの大きな特徴である。このようならせん状高分子が充填したホモニアス配向フィルムの最表面では、らせんの山と谷がつぶされることがないため、凸凹の周期構造が現れる。その周期は液晶のらせんピッチ(P)に相応し、山と谷の高低差は $P \tan \theta$ (なお θ はスメクチック層に対する分子のチルト角)で与えられ、らせんピッチの約20%程度の高低差が認められる(図4のAFM測定)。この系のさらなる興味は、キラルSc*相が強誘電相

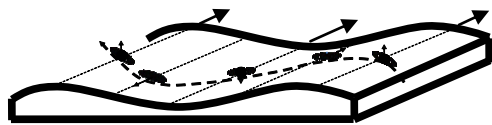
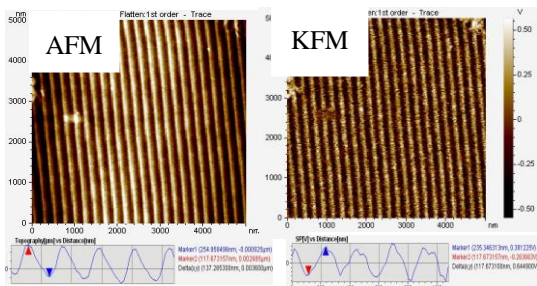


図4. キラルScのホモニアス配向フィルムの表面のAFMとKFMイメージ。表面は分極を持ったアンジュレーション構造を有する。

であるため、山と谷に逆方向きの自発分極が存在し、表面電位が周期的に分布したフィルムとなっていることである(図4のFM測定)。なお、表面電位の大きさは、強誘電スイッチング測定による自発分極値と一致する。すなわち、これらのパラメーターを調整すれば、任意に、表面ナノ周期構造と電位分布の創生が可能となる。

(3). 剛直棒状高分子の逐次液晶相転移とスメクチック層形成によるナノ周期構造の創生

(3)-1. 剛直棒状高分子の逐次液晶転移

α -ヘリックス形態を持つポリペプチドをモデルたんぱく質として、そのリオトロピック液晶(m-クレゾール溶媒)の相図を全濃度域に渡って作製し、濃度の増大とともに、等方相-コレステリック液晶-カラムナ-液晶の逐次転移を起こして、固体相へと推移することを明らかにした。また、適度な濃度で、ゲル化するようなゲル化溶剤(具体的にはDMF溶媒)を導入することで、コレステリック液晶のらせん構造を固定化することができ、美しいカラーフィルムの創生を行うことができた。これらの結果は、生体組織体を形成する基本高分子、タンパク質、キチン質、セルロースの溶液中での構造遷移のあり方を示したものであり、生物の固体組織に広くらせん構造が分布して見られるという事実を実験的に傍証するものとなった。

(3)-2. スメクチック相の形成：層形成によるナノ周期構造の創生

一方、棒状高分子の分子量が均一になると、コレステリック(いわゆるネマチック)液晶とカラムナ-液晶相の間に、スメクチック相が出現する。この棒状スメクチック液晶相では、剛直高分子の末端が偏在した低密度部位と高分子が占める高密度部位が周期的に繰り返す層構造(ホトレジスト等)で得ているよ

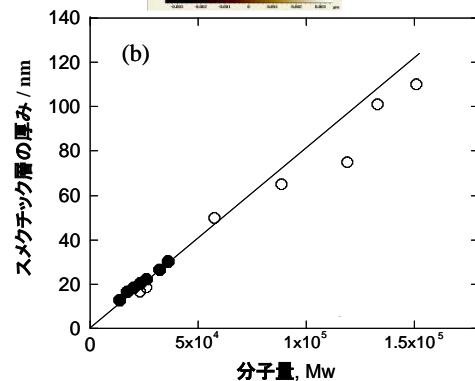
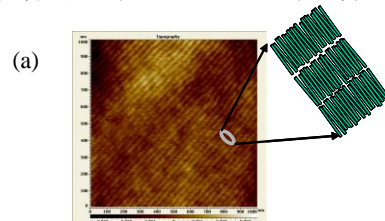


図5. ポリシラン剛直分子が形成するスメクチック層構造のAFMイメージ(上図)。剛直分子の長さに対応した層厚のスメクチック層が形成されている。下図はその層厚の分子量依存性を示す。黒丸、白丸は、それぞれ小角x線、AFMにより求めたものである。

うな板状周期構造)が形成される。ポリシランを用いた系統的研究から、そのスメクチック構造創生の実証を行い、スメクチック層周期が、もちろん分子長に相応するものとなっていること、また分子量を変えることで数ナノから数100ナノの間隔でつくり出すことができることを示した(図5参照)。

また、二種類の分子量の異なるポリシラン棒状高分子のブレンド系では、分子量比が1.5~2.5倍程度であると、長い分子が作る層内に短い分子が2分子取り込まれたSm相が形成され、さらに分子量比が3~4と大きくなると2種の高分子A、Bが相分離をしてABABの交互配列したSm層構造となることが認められた。いずれも分子長は数nm~数十nmに変えることができ、多様な屈折率変調を持ったナノ周期構造の創生が可能であることを示した。

剛直ポリシランと他成分分子あるいは粒子の2元型において、他成分分子をスメクチック層状液晶中に制限収容させ、数十から数百nm周期の層構造機能を利用することをめざした。具体的にドデカンを用いた場合、最初数%ドデカンはポリシランの分子間に、その後10~15%ほどスメクチック層間に入り、最後には巨視的に相分離をすることを解明し、他成分分子や粒子を層間に優先的に収容させることが可能であることを明らかにした。

(4) 液晶場を利用したマイクロ相分離構造の完全配向制御

一成分を側鎖型液晶高分子、他成分をPMMAあるいはポリスチレンとしたブロック共重合体をリビングラジカル手法を用いて精密合成し、その液晶挙動、マイクロ相分離挙動の特徴を抽出した。その結果、磁場、ずり応力場で相分離の完全配向制御が可能であること、球状の相分離は液晶配向に欠陥構造をもたらすため、液晶場では現われにくいモルフォロジーであること、そして柱状相分離、層

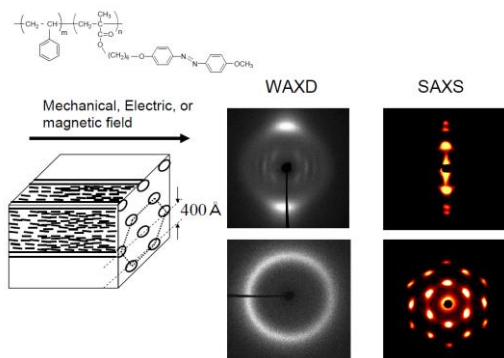


図6. 側鎖型液晶/ポリスチレンブロック共重合体の柱状相分離構造の小角、広角x線写真。高度に配向した様子が伺える。

状相分離構造の界面は液晶配向に関して強いインナーアンカリング作用を及ぼすことを認めた(図6参照)。

マイクロ相分離構造を利用した金属ナノインプリント・ワイヤグリッド偏向板の創生を目指し、その基盤材料としてブロック共重合体の設計を試みた。究極的には柱状相分離よりも層状相分離構造の利用、かつその配向制御を行う必要があるが、そのためには、層法

線方位に高分子軸を有する主鎖型液晶高分子を基盤にしたブロック共重合体を用いることが不可欠であることを示すとともに、その初めての試みとして、主鎖型高分子Aの両末端OH基に開始剤を付与して、非晶性高分子B(PMMA等)をリビングラジカル重合させBAB型ブロック共重合体を調整した。AとBの組成に関わらず層状相分離が見られ、等方相から延伸する方法で簡単に配向制御できることを示し、有力な基盤ブロック共重合材料であることを明らかにした。また、層状マイクロ相分離に際し、Aの主鎖型高分子はフォールディングし、その数を調整することで、組成分布の偏りによるひずみをなくすという興味ある挙動を捉えることができた。

(5) 高分子ネマチック液晶/低分子ネマチック液晶混合系液晶からの相分離の特徴とそのピニング現象

液晶/液晶ブレンドからの相分離は、相分離界面エネルギーと界面での配向欠陥エネルギーの競合が起こるため、通常の液/液系相分離とは異なった挙動が見られることが予想される。われわれは、側鎖型高分子液晶/低分子液晶系で相図を作成し、適切な温度ジャンプにより、均一ネマチック相から、ネマチック/ネマチック2相に相分離する系を見出し、その実証を試みた。

まず、配向処理したセル内、高温で均一ネマチックドメインを作成し、非臨界域で液晶/液晶相分離をさせ、その相分離成長過程を調べた。その結果、スピノーダル初期過程、後期成長過程を経る通常のスピノーダル分解が観測されるのに加えて、相分離が停止

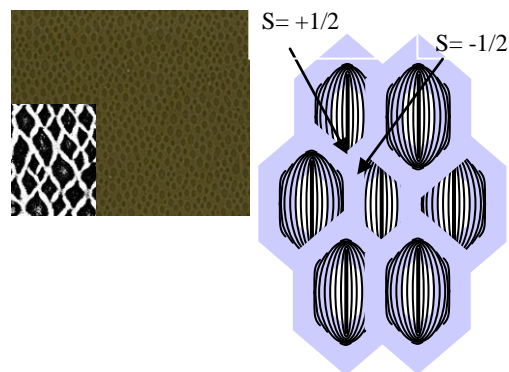


図7. 高分子ネマチック液晶/低分子ネマチック液晶混合系液晶からの相分離のピニングステージに見られるハニカムネットワーク状相分離。周期的配向欠陥により安定化される。

(ピニング) するという興味ある現象が観測された。このピニング構造は特徴的で、高分子成分リッチな液晶がネットを形成し、低分子リッチな液晶を孔の中に収容した、見事な蜂の巣状ネットワーク構造となることも明らかにした(図7左図)。また、孔のサイズは、温度を上昇すること、高分子濃度を減少することで、1から10 μ mと変化させることが可能であることも、あわせて明らかにした。

このような特徴的な相分離の停止は、周期的欠陥構造の生成によるものである。相分離がある程度成長したとき、すなわち十分な大きさの界面ができたとき、界面アンカリングにより、分子は界面に対して同じ配向を余儀

なくされる。そのため、均一初期ドメイン内にあらたな欠陥を作らざるをえなくなり、 $s=+1/2$ と $s=-1/2$ の欠陥が周期的に発生し、安定化されている（図7右図）。

また、同様なピニング現象は、ポリペプチド・リオトロピック液晶系でも見られ、例えば、Poly(γ -benzyl glutamate) (PBG) /ベンジルアルコール (BA) 系からの相分離では、PBGのネットワーク内に溶媒BAが柱状に相分離した構造が得られる。これは、海ねずみの体毛に見られる構造と類似しており、それらが液晶相分離により、生み出されたものであることを強く示唆するものとなっている。この相分離では、分子配向軸方向と垂直方向で、光散乱の程度が著しく異なるため、偏光面が配向軸と一致する光のみが通過する偏光版となることもあわせて示すことができた。

(6) 液晶欠陥の平衡緩和による周期構造の創生

弾性を持ちかつ流動可能な液晶場では、欠陥ひずみは最安定部に周期的に配置されるという性質を利用して、分子充填構造による秩序周期構造とは異なった欠陥周期構造が創生できることを様々な系で見つけた。

主鎖型高分子のモノドメインネマチック液晶を作成し、配向軸に垂直、平行方位への延伸で見られる変形モードについて調べた。興味あるのは、配向軸に垂直方位の変形である。8倍近くまで伸張し最終的に分子は配向方位を90度変化させることになるが、この変化のプロセスで、延伸方向に垂直に数 μm 幅の細い分割ドメインが形成され、個々のドメイン内で分子は傾き、傾き方位は隣接ドメイン間で逆向になるというサブミクロンの規則的ジグザグ周期構造が現れる。

また、ネマチック液晶の配向繊維を熱処理すると、数珠玉のように球が繊維上に周期的に現れる。球の大きさ、間隔は、繊維の直径が大きくなるとともに大きくなる。前者は延伸、後者は界面張力により非平衡的にもたらされた周期構造であり、弾性エネルギーの大きい高分子に特有の構造創生現象であると理解される。

(7) バナナ型スメクチック液晶におけるナノドメイン散逸構造

分極構造からの散逸により、フラストレーション（極性モジュレート）構造と呼ばれる構造が発生し、 $10\sim 100\text{nm}$ のオーダのモジュレーション構造が出現する。また、このモジュレーション構造が際立った場合、スメクチック層がブロック状に分割され、それらが相互にねじれたTGB様の螺旋構造が現れる。この後者のナノ分割ブロック構造はドメインサイズが光の波長よりはるかに小さいため複屈折性がほとんどなく、高周波電場の印加により得られる通常ドメインの高複屈折性と極をなす。この二つの状態は電場の周波数変化で可逆に作り出すことができ、新しいディスプレイ表示モードとして開発されようとしている。

バナナ型液晶は我々のグループにより発見された液晶である。ベント形状が系の対称性を低下させ、強誘電特性を生み出すこと述べた最初の論文（J. Mater. Chem., 1996）はサイテンションインデックスが800に達したことからもわかるように、その後次々と興味ある現象や新規な相を提起する出発点と

なった。今回は、そのうちの一つの相、光学的に等方的であるが大きな旋光能を有するキラリな相に関して、電顕によるモルフォロジー観測を通して、散逸ナノ構造の提案を行った。具体的には、Sm層構造を有するが、分子が層法線に対して傾いているため、ベント部の上部と下部のサイドウイングの充填環境が異なり、それにより生じたひずみをサドル型スプレイ変形により解消した散逸構造である。配向軸が連続的に向きを変えるため、見かけ上無秩序相と同様に複屈折性が消え、分子軸が傾くことにより発現する層キラリティを反映して巨視的変形構造もキラリティを有し、観測結果を満足することを明らかにした。

さらに加えて、新しいナノ散逸構造のあり方も提起し、実際に創生することに成功した。その典型的な散逸が、スメクチック層内で上下パッキング密度が異なるため、層が柱状や球状に閉じたりして、カラムナー相やキュービック相を形成したりする現象である。いずれも、5-20nmの2次元あるいは3次元格子を形成する（図8参照）。



図8. バナナ分子の作るカラムナー相のAFM像。層が柱状に閉じた20nm間隔の組織が見事に観測される

(8) クリスマンセン・フィルター効果による光散乱と呈色現象

ヒドロキシプロピルセルロース (HPC) などの両親媒性高分子がトルエンなどの有機溶媒に膨潤後、取り込んだ有機溶媒を数百分から数千ナノのサイズで球状ドメインに相分離させるという現象を見出した。取り込んだ溶媒をわざわざ相分離させるというこの奇異な現象は、HPCが両親媒的な性質のために現れたものであると考えられ、親油的な部位をトルエンドメイン方向に、親水部位をその反対方向へ向けて安定化したものと理解された。さらに興味あるのは、この相分離構造膜が美しい色を呈することである（図9右上）。この色はクリスマンセン・フィルター効果と呼ばれる散乱による。球状ドメイン内のトルエンの屈折率と高分子HPCマトリックスの屈折率はほとんど等しいが、波長依存性が異なるため、屈折率が厳密に等しいところは一点の波長のみとなり、その他の波長の光は散乱されるという散乱効果である（図9

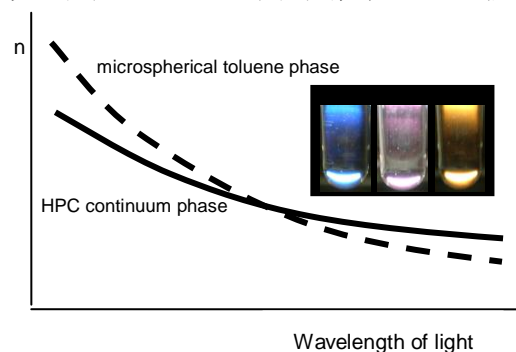


図9. クリスマンセン散乱効果による発色現象とその現象を説明する屈折率分散

参照)。一致する波長は温度により変化するため、温度可変によりさまざまな色に美しく発色すること、また散乱光は屈折率の波長依存性が両者で著しく異なるとき、鮮やかさが増すことなどを明らかにした。

(9) 孔雀の羽 微粒子結晶

PMMA を基盤にしたナノ微粒子の水分散溶液系の濃度-イオン強度の相図を作成し、コロイド結晶が精製する条件を明らかにし、固体フィルムとしてホトニックス結晶を安定的に作り出す技術の開発、すなわち孔雀の羽の歩留まり高い人工的創生に成功してきている (図 10)。カラスを孔雀に変えることができ、孔雀もオチオチしていられまい。

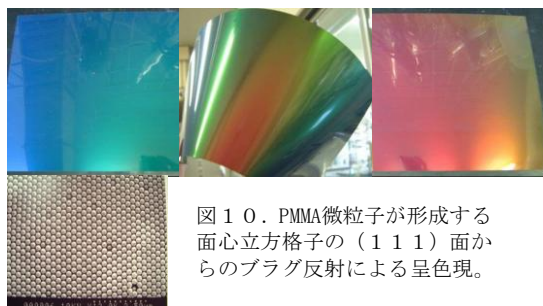


図 10. PMMA 微粒子が形成する面心立方格子の (111) 面からのブラッグ反射による呈色現。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 116 件)

1. M. Itoh, M. Tokita, H. Hegi, S. Kang, and J. Watanabe
Cholesteric Induction Power Enhanced by Macrocyclization in Liquid Crystalline Dimer Having Chiral Spacer
J. Mater. Chem., 21, 1697-1699 (2011). 審査有
2. C. Zhang, R. Ishige, R. Yasumatsu, S. Kang, M. Tokita and J. Watanabe
Regular undulation and polarization modulation observed on film surface of homogeneously aligned chiral S* polymer
Soft Matter, 7, 258-264 (2011). 審査有
3. S. Edo, K. Okoshi, S. Kang, M. Tokita, T. Kaneko and J. Watanabe
Unusual swelling of HPC with toluene, forming microspherical domain that causes beautiful coloration due to Christiansen scattering effect
Langmuir, 26, 1743-1746 (2010) 審査有
4. L.E. Hough, J. Watanabe, et al.
Thermotropic Sponge Phases: Chiral isotropic liquids from achiral molecules
Science, 325, 452-458 (2009). 審査有
5. M. Muto, H. Suzuki, K. Fukuda, S. Lee, S. Kang, M. Tokita, and J. Watanabe
Twofold helical inversion in the chiral SmC phase of optically active materials derived from (R)-(+)-1-(1-phenyl)ethylamine
J. Phys. Chem. B, 112, 15521-15523 (2008). 審査有
6. K. Takai, S. Eto, M. Inaguchi, T. Enoki, H. Ogata, M. Tokita and J. Watanabe
Magnetic Potassium Clusters in a Nanographite Host System
Phys. Rev. Lett., 98, 017203-017206 (2007). 審査有
7. M. Tokita, M. Adachi, S. Masuyama, F. Takazawa, and

J. Watanabe

Characteristic Shear-Flow Orientation in LC Block Copolymer Resulting from Compromise between Orientations of Microcylinder and LC Mesogen
Macromolecules, 40, 7276-7282 (2007) 審査有

8. W. Kim, J.H. Park, S.S. Oh, B.-H. Choi, D.-C. Shin, J.-H. Lee, B. Park, Y. Saito, N. Watanabe, H. Takezoe and J. Watanabe

Highly Efficient green electrophosphorescent single-layered organic light-emitting devices
Appl. Phys. Lett., 89, 213511-213515 (2006) 審査有

[学会発表] (計 21 件)

1. Twofold helical inversion in the chiral SmC phase of optically active materials derived from (R)-(+)-1-(1-phenyl)ethylamine
Junji Watanabe (as plenary lecturer)
In Chirality, July 12-15, 2009, Colorado Denver, USA.

2. Unusual nematic liquid crystal with polar Cs symmetry formed from aromatic polyesters with head-tail character
Junji Watanabe (as plenary lecturer)
Polycondensation, September 8-11, Tokyo Institute of Technology, Tokyo (2008)

[図書] (計 7 件)

1. どんどんつながる高分子、渡辺順次編、丸善 230 ページ (2009)

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称：ナノインプリント用モールド
発明者：渡辺順次、西村 涼
権利者：東京工業大学
種類：特願
番号：2008-246101
出願年月日：2008年9月2日
国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 順次 (WATANABE JUNJI)
東京工業大学大学院理工学研究科・教授
研究者番号：90111666

(2) 研究分担者

戸木田 雅利 (TOKITA MASATOSHI)
東京工業大学大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：30301170

川内 進 (KAWAUCHI SUSUMU)
東京工業大学大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：80504676

姜 聲敏 (KAN SONMIN)
東京工業大学大学院理工学研究科・助教
研究者番号：00523664

黒木 重樹
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号：30293046

(3) 連携研究者

大越 研人 (OKOSHI KENTO)
東京工業大学大学院理工学研究科・特任准教授
研究者番号：60500139