

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23310072

研究課題名(和文)空間閉じこめによる新規液晶構造発現と高速表示デバイスの作製

研究課題名(英文)Analysis and structure control of liquid crystal phases having sub-micrometer periodic structures

研究代表者

石川 謙 (Ishikawa, Ken)

東京工業大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：10176159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円、(間接経費) 4,110,000円

研究成果の概要(和文)：液晶は流動性があり方向秩序のない液体と、周期的な構造を持つ結晶の中間に存在する両者の特徴を兼ね備えた状態である。液晶ディスプレイに用いられているネマチック液晶以外に、多くの液晶が存在し、それらの中には、ミクロン以下の周期構造を持つナノ周期構造液晶と呼べる一群が存在する。ナノ周期構造液晶はネマチック液晶とは異なる電場応答し、高性能ディスプレイへの応用が期待できるが、そのままディスプレイを作ることができない。本研究ではナノ周期構造液晶の詳細と界面との相互作用を明らかにした上で、微小な空間に閉じ込めて界面による構造制御をおこない、液晶単体では実現できない構造の作製と制御をおこなった。

研究成果の概要(英文)：Liquid crystals are intermediate states between liquid and crystals. Nematic liquid crystal, one of liquid crystal phases, is an anisotropic fluid composed of rod-like molecules and is widely used in television and computer displays. There are many other liquid crystal phases and some of them have self-organized periodic structures of a few hundred nanometer periodicity. These phases have different opt-electric properties compared with the nematic phase and new types of liquid crystal displays using these phases are expected. In this study, we analyzed the detailed structures and emergence mechanisms of some nano-structured liquid crystalline phases. And we studied the interaction between liquid crystalline molecules and surfaces, which plays an important role on the control of the orientation structure of liquid crystals. Upon them, we made structure control of these phases by means of confinement of them inside micro-spaces.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、ナノ材料・ナノバイオサイエンス

キーワード：液晶 自発的ナノ構造 空間閉じ込め

1. 研究開始当初の背景

液晶を利用したディスプレイは世界的に広範に用いられているが、より高精細な表示や3次元表示などの実現のために、さらなる高速応答性や広視野角特性を有する液晶ディスプレイの開発が求められている。

現在の液晶ディスプレイには、棒状の分子からなるネマチック液晶が用いられている。ネマチック液晶は分子長軸の方向が巨視的に同方向に揃った流体で、セル内の界面により制御された分子長軸方向を外部電場により変化させることで光スイッチ機能を実現している。液晶ディスプレイの応答速度は立ち上がりとしち下がりとの和となるが、印加電場を高くすれば早くなる立ち上がり速度に比べて、液晶の復元力で駆動される立ち下がり電場を高くしても変化せず、液晶の応答速度を速める上でのネックとなっている。

応答速度の向上には復元力の向上が必要である。その一つの方法として自発的な周期構造を有するブルー相を活用したディスプレイが提案されている。ブルー相はサブミクロン周期の3次元構造を有する液晶相で、相自体が微細な構造を有しており、この構造が電場により変形するのを利用して光スイッチを実現している。ブルー相では現在の液晶ディスプレイに比較して、電場による初期状態から変形が大きいので復元力が高く、立ち下がり電場の応答時間も早い。しかし、ブルー相となる物質に限られていることや、電気光学応答の温度依存性が大きいことなど、実用化にあたっての大きな課題が存在している。

液晶の中には、ブルー相以外にも、コレステリック液晶や強誘電 SmC*液晶のように自発的な1次元微細周期構造を有しているものが存在する。これらの液晶群を1次元ナノ周期構造液晶と呼ぶことにする。さらに、SmC*相と反強誘電性 SmCA*相の間には構造が未解明だが周期構造を有する相や、それ以外の液晶でも微細構造を有するものがあり、これらも1次元ナノ周期構造液晶の範疇にはいるものである。これらの液晶群もブルー相と同様に外場により初期構造が大きな変調をうけるので、高速応答ディスプレイへの応用が期待できる。

さらに極性を有する液晶では、電場の正負により応答が異なるために、立ち上がりも立ち下がりも電場で積極的にコントロールできる。しかし、ブルー相は周期構造が3次元的であり光学等方体として振る舞うのに対して、コレステリック液晶や SmC*液晶を含むこれら多くの液晶の周期性は1次元的であり、光学的異方性を有するためそのままではブルー相類似のディスプレイへの適用は困難であった。

一方、液晶を微細空間に閉じ込めて新たな構造を形成する研究が行われている。このような研究は、フレキシブルディスプレイへの応用を意図した高分子分散型デバイスとし

て展開したが、その後、閉じ込めサイズを光の波長より十分に小さくすることにより、応答速度の向上が見込まれることや、基底状態で光学的に等方的に振る舞うことが期待されることから興味を持たれている。しかし、閉じ込め構造を微細かしすぎると、液晶の分率が低くなるといった問題が生じていた。

2. 研究の目的

1次元ナノ周期構造液晶は、上述のように光学的異方性を有するために、そのままではブルー相類似の液晶ディスプレイへの応用は困難である。しかし、ブルー相液晶に比べるとはるかに多様な物質の選択が可能であることや、通常の状態におけるこれらの物質群の電気光学特性の温度依存性がブルー相液晶ほど顕著でないことを考えると、これらの物質群からブルー相類似のディスプレイを作製する技術が開発されれば、液晶ディスプレイの新たな展開が可能となる。

コレステリック液晶を初めとしたナノ周期構造液晶が1次元的な周期構造となるのは、2次元以上の周期構造では、空間を欠陥構造なしに充填することは不可能であるためであると考えられている。このことは、十分に大きな体積を有する空間においては正しいが、空間の体積が小さく、しかも、空間の表面における分子の方向も均一でない場合には事情が異なり、バルク空間とは異なった配向状態が実現しうる。その時、液晶自体がナノ周期構造を有しているために、ネマチック液晶のように、閉じ込め空間サイズを100nm程度以下にしないで、次元性の上昇した構造により光学的に等方的な状態などの構築できれば、新たな液晶ディスプレイへの応用が可能となる。

上述の状況を踏まえて、本研究では、光の波長もしくはそれ以下の周期構造を有する1次元ナノ周期構造液晶に着目し、構造や発生機構が未解明の液晶相に関しては、それらの物質の応用の基板となる知見の集積のために、構造と発生機構の解明を行うこと。微小空間の閉じ込めに当たっては、界面における液晶の状態や界面特異現象が大きく関与するので、これらの界面現象に関する知見を集積すること。それらの基礎的知見を活用して、1次元ナノ周期構造液晶を微小空間へ閉じ込めて、界面部分での液晶の配向制御を利用した構造制御により周期構造の次元性を上げた構造を作り出すこと。光照射などの外的刺激による界面での配向変化を活用して、閉じ込め液晶のダイナミックな構造変調を行う事。を通して新規な液晶デバイスへ応用を開拓することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の対象となるナノ周期構造液晶は光の波長程度以下の構造を有する状態で、構造変化に応じて光学的性質にも大きな変化が観

察される。この点を活用して本研究では分光学的手法を中心に構造の解明と特性評価を行った。

強誘電 SmC*相と反強誘電 SmCA*相の中間温度領域に出現するナノ構造液晶の構造解析に当たっては、これらのナノ構造液晶が構造転移に伴い、電気光学応答と周期構造に由来する透過/反射スペクトルバンドの位置が大きく変化することに着目し、電場印加時により生じる微小複屈折とスペクトルを同時測定できる測定装置を構築した。微小複屈折測定に当たっては、短時間で精度良い測定を実現するために、光弾性変調器を用いた測定系を構築した。また、特性バンドの測定に当たっては、幅広い領域での変化を捉えるためには、なるべく広い波長領域での短時間での測定が必要であることから、可視領域のダイオードアレイ分光器と近赤外領域の FT 型分光器を組み合わせたスペクトル測定系を構築した。これらの測定系データと計算機シミュレーションにより求めたスペクトルの比較から構造解析を行った。

新規極性新規液晶物質の研究に当たっては、可視領域における複屈折の電場依存性測定に加えて、極性構造の解析に有益な光第 2 高調波発生 (SHG) 測定を行うとともに、偏光赤外分光法により、内部構造に関連する官能基の方向の測定を行った。

液晶の界面における配向状態の評価および界面における特異現象、界面から内部への配向変化に関しては、SHG も含めた光学的手法に加えて斜入射 X 線回折による表面配向の測定や高感度 DSC を用いた表面における相転移の解析も合わせて行った。

液晶の配向をダイナミックに変化させる、アゾ含有 dendrimer の照射時の挙動については、界面の構造に敏感な光第 2 高調波発生を用いて評価した。また、界面から内部への配向変化に関しては厚み方向へ高い分解能を有する 2 光子励起蛍光顕微鏡を用いての評価をおこなった。

ドロップレット内部の構造観察については、光学顕微鏡による観察を中心的に行った。特に微小な構造を有するものに関しては液浸対物レンズなどの高分解能対物レンズを用いての構造解明を行った。

これらの液晶の電気光学応答の測定に当たっては、実デバイスへの応用を意識して、太陽光に近いスペクトルの光源を用いての過渡応答測定を行っている。

4. 研究成果

4-1 強誘電-反強誘電中間状態の構造解明

強誘電性液晶は隣接層間で分子が同一方向に傾くのに対して、反強誘電性液晶では 1 層毎に逆方向へと傾いている。これらの他に、3 層周期のフェリ誘電相と 4 層周期の反強誘電層の存在が知られており、これらの相は 1 次転移により高温側から、1 層周期の SmC

相、4 層周期の AF 相、3 層周期のフェリ相、2 層周期の反強誘電相へと変化することが知られている。

近年、強誘電性を示す MC-452 と反強誘電性を示す MC-881 との混合系において、温度変化にともない、強誘電性相から反強誘電性相への連続的な変化が観察され、これが、単純に一つの相内での変化か、なんらかの相変化を伴う現象であるかについての興味が持たれていた。この点を解明するために、スペクトルと電場誘起複屈折の測定を行い、さらに、4×4 マトリックス法によるシミュレーション結果と合わせて、構造変化に対するモデル構築を行った。

強誘電性液晶かフェリ誘電性液晶に層法線方向に有限の角度で光を入射した場合には、螺旋周期構造に対応する反射バンド (フルピッチバンド) と螺旋半周期に対応する反射バンド (ハーフピッチバンド) の 2 つの反射バンドが出現する。一方、反強誘電性液晶の場合には、ハーフピッチバンドのみしか現れず、フルピッチバンドの有無が反強誘電相と他の相の区別の鍵と考えられていた。

混合系液晶においては高温側においてフルピッチ、ハーフピッチの 2 つの反射バンドが観測されるものの、降温時にハーフピッチバンドはほとんど変化しないまま、フルピッチバンドが消失し、その後ハーフピッチバンドの反射帯がレッドシフトする現象が見いだされた。従来の解釈に従えば降温により反強誘電相に転移したことになるが、電場誘起複屈折測定からは、液晶は強誘電的な振る舞いをしており、二つの測定に矛盾が生じていた。

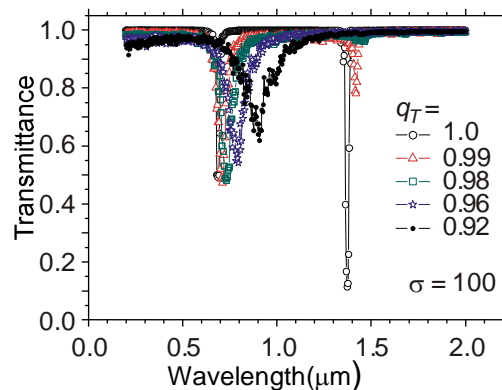


図: 4×4 マトリックス法による透過スペクトルシミュレーション。qt=0.99 (1%の欠陥) で 0.7 μm の構造はほぼ不変のまま 1.4 μm の構造が消失する。

この矛盾の解消を目指して、系を 1 次元イジング系と考えると、強誘電相中に反強誘電秩序が欠陥として熱励起されるモデルを考案し、反強誘電秩序が欠陥として導入された場合の反射スペクトル変化を 4×4 マトリックス法によりシミュレートした。その結果、図に示したように強誘電相中に 1% 程度の反強誘電秩序が欠陥として導入されると、ハーフピッチバンドの形状はほとんど変化しない

ままで、フルピッチバンドが消失することが見いだされた。さらに、螺旋周期の温度依存性が、イジングモデルに従った欠陥導入による周期変化を考えると、高温側からある温度範囲までは実験結果とよく一致することを見いだした。

以上の結果より、転移現象の高温側では、熱揺らぎによる欠陥の導入が構造変化を引き起こしているという、これまでは知られていなかった新しい機構による転移現象の存在を示すことができた。

一方、転移の低温側では、変化が段階を経る状況が見いだされているが、これに関しても、従来知られていた3,4層構造の副次相のみでは説明できない状態を示唆する結果が得られた。3,4層以外の副次相に関しては、Emelyanenkoらが10層周期の構造までについて理論的に検討して、複数の状況が安定に存在することを予想していた。実験結果は、低温側におけるEmelyanenkoらの理論の正当性を示す一方で、高温側の連続的な変化に向けての理論の不十分性をも示すものであった。Emelyanenkoとは2国間共同研究をおこなっており、本研究で得られた実権結果をもとに、理論の再構築を行い、20層構造までを含めた長周期構造まで考慮に入れることにより、高温側での連続的な変化に対応する状況も含まれる理論の構築を行った。

転移の中間状態では、低電場で系全体が大きく応答するなど、従来にない電気光学特性を示す領域の存在が発見されており、新しい液晶デバイスへの応用が考えられる。

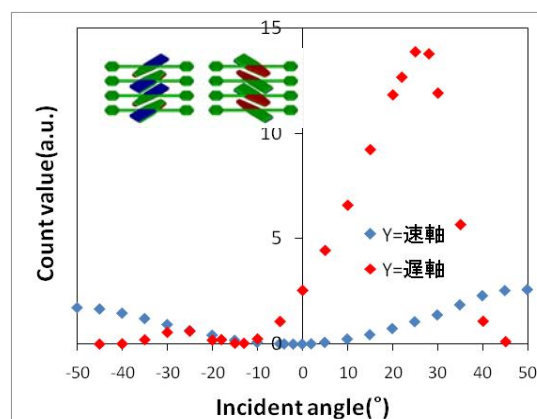
4-2 新規極性液晶の構造解明

新規に合成されたアミノ酸誘導体からなる液晶の構造解明をおこなった。この分子は分子間水素結合によりカラムを構成してカラムナール液晶相を取る。分子構造からは一つのカラム内では極性構造であることが予想され合成者らはX線解析の結果などから、このカラムナール液晶相は、分子がらせん状に積層した1次元ナノ周期構造液晶であると同定していた。この液晶相では電気光学応答が見られ、これはカラムナール液晶としては非常に興味深い性質であるばかりでなく極性構造応答であるなら高速性が期待できるため、ナノ周期構造液晶の一つとして詳細な構造の検討を行った。

合成者らの提案した構造が正しければ、積層軸をガラス基板に垂直に配向させた状態では光学的に等方になることが期待される。しかし、詳細な顕微鏡観察により、複屈折がほぼ0で光学的に等方的な状態の他に、小さい値であるが有限の複屈折を有する相の存在も見いだした。両方の状態について電気光学応答の測定を行ったところ、有限の複屈折を有する相のみが電場下で光軸の回転をすることが明らかとなった。

そこで、複屈折を有する相について、電場印加による光軸回転を精密に測定するとと

もに、SHGにより極性基の方向を、偏光赤外分光により極性構造に寄与する官能基の方向に関する測定をおこなった。電場印加による光軸回転からは、電場の方向によって回転方向が変化する他、S体試料とR体試料で回転方向が反転することから、極性と不斉構造の間に関係があることが明らかになった。SHG測定からは、電場を積層軸方向に印加しても、誘起される双極子は電場方向から傾いていることが明らかになり、さらに、偏光赤外分光で官能基の方向を調べた結果、極性構造を引き起こしているカルボニル基やアミノ基がカラム軸に対して斜めに傾いた配置になっていることが明らかになった。



図：光第2高調波発生の入射角依存性。Y速軸回りの回転では対称的であることから極性軸は分子長軸に垂直な面内で、遅軸で約9°でSHGが0になることからカラム軸からの傾きが決定された。図中左上は他の測定も合わせて構築した分子配置モデルで、隣接カラムで極性が反転し、一つのカラム内でも1分子毎に分子の方向が逆になっている。

以上の観察結果を満足させる配置として、カラム軸方向に分子が1分子毎に分子の頭としっぽが入れ替わり、1カラムとしては極性構造を有しているが、隣接カラムでは逆の極性で全体としては電場非印加時に非極性の構造となっているものを提案した。分子配置の概略を上図内に示した。

4-3 界面相互作用

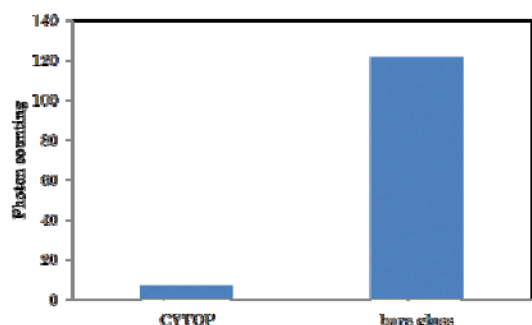
表面や界面では凝集状態とは異なった物性が発現する。液晶に限らず微小空間への閉じ込めにおいては、物質の体積は空間サイズの3乗に比例するのに対して、表面積は空間サイズの2乗に比例するため、空間が小さくなると相対的に界面の影響が大きくなる。その結果としてバルクの液晶とは転移温度などの物性値に変化が生じる。このような変化を確認することは微小空間に閉じ込めたナノ周期構造液晶の構造発現機構を理解するためにも重要である。

シリカ微粒子とネマチック液晶を混合した系において、液晶相と等方液体の転移温度が界面の存在に影響を受け、2段階となることを見いだした。転移温度が変化する理由に

については、現時点では、確定していないが、連続転移において協力関係のあるロシアグループとの共同研究で、粒子の曲率に温度シフトが関連する可能性が示されつつあり、ことなる粒子径の試料を用いた測定を継続しておこなっている。

液晶の配向は界面における液晶分子の配向により制御される。通常は界面における液晶分子の配向は固定したものであるが、界面での配向を動的に変化することができれば、従来にない新しい応用が可能になると期待される。本研究では外的要因の変化による配向転移として光照射による配向転移と温度変化による配向転移の検討を行った。

光官能基を有する液晶性 dendritic 分子 LCD2-6azo8 を液晶分子に混合してセルを作製すると液晶分子が垂直配向し、さらに光を照射すると垂直配向から水平配向に変化する。配向変化は LCD2-6azo8 に含まれるアゾ基部分が、トランス体から紫外線照射によりシス体に変化することで引き起こされると考えられているが、この物質の特異的なことは、これまで報告されているコマンドサーフェス系物質のように、あらかじめ界面にアゾ基を含む分子の薄膜を作製していなくても、液晶に混合してセルに注入するだけで基板界面に自発的に吸着して機能を発現することにある。微小空間界面にコマンドサーフェスを作製することには困難であるが、LCD2-6azo8 では液晶に混合した状態で閉じ込め操作を行っても機能発現するならば、この困難は解消される。ガラス基板に対しては LCD2-6azo8 の吸着は確認されていないため、他の物質での吸着能を評価する手法の開発が必要であった。我々は LCD2-6azo8 のような極性を有する分子が界面に吸着すると吸着層からは光第 2 高調波が発生することに着目し、ガラス面と非晶質フッ素置換高分子面のセルに LCD2-6azo8 を混合した液晶を注入した場合の SHG を行った。その結果、両者では大きな信号強度の違いを示し、SHG 測定が LCD2-6azo8 の吸着評価に有用な手法であることが確認された。



図：ガラスセルと高分子塗布セル(Cytop)における光第 2 高調波強度の比較。ガラスに比べて Cytop セルでは信号強度は極めて低く、LCD2-6azo8 の吸着がほとんどないことが分かる。

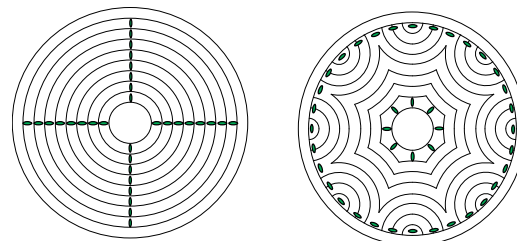
配向転移に関しては、温度変化による配向

変化と、光照射による配向変化の 2 つの方策についての知見の集積を行った。温度変化による配向転移では、非晶性フッ素系高分子であるサイトップと、大きな負の誘電異方性を有する液晶物質である CCN-47 系において、高温側で液晶が水平配向を示し、降温により垂直配向に大きなヒステリシスを持ち可逆的に変化する転移に関して、転移過程における内部の液晶分子の配向状態を 2 光子蛍光顕微鏡により明らかにすることを試みるとともに、斜入射 X 線により界面での配向状況を明らかにした。

4-4 微細空間閉じ込め液晶の構造解析と配向変化の実現

ネマチック液晶・コレステリック液晶およびスメクチック A 液晶のドロップレットを作製し、さらに光による配向転移を実現した。ネマチック液晶は、グリセリンホスト中で液晶分子は液滴表面で界面に平行に配向し双極構造となる。グリセリンに対しては LCD2-6azo8 は吸着能を有することが確認できたので、ネマチック液晶に LCD2-6azo8 を添加した混合系を用いてドロップレットを作製したところ、液晶の配向が界面に対して垂直となる構造となっていることが確認された。その後の光照射により、 dendritic の配向規制力は失われ、 dendritic を添加していない場合と同様の配向への可逆的な変化が観察された。

同様の現象はコレステリック液晶でも生じるが、コレステリック液晶はもともと 1 次元周期構造を有する系であり、単体でグリセリンホスト中のドロップレットとした場合は、螺旋軸が動径方向に配置した構造体が形成される。これに光官能性 dendritic を添加すると、界面での分子配向が垂直となるために、ドロップレット内で配向軸が乱れた構造体となるが、紫外線照射により、無添加の場合と同様の動径方向に螺旋軸がある構造となることが確かめられた。また、可視光の照射により、界面で分子が垂直配向に変化するとともに、動径方向に対してねじれが生じるような構造となることが示唆された。



図：光照射により変化させたドロップレット内部の構造変化のモデル。左が光照射前で右が光照射後である。光照射後のものは対称性よく描いているが、実際には図より乱れた構造となる。

SmA 相に関しては、添加により界面で分子が基板に垂直に配向すると、層構造が同心球

状となる。これに紫外線を照射し、界面での分子配向を平行にすると、界面では層が界面に垂直に変化するために、フォーカルコニックが出現することが分かった。

これらの光照射による構造変化により、例えばコレステリック液晶の場合には、色素を混ぜた時のコレステリック液晶レーザーの発振モードを変化させることが出来る。これを利用すると、紫外光によるレーザー光の発振波長スイッチといった応用が考えられる。

本研究では微小空間にナノ構造液晶を閉じ込めることにより構造制御を行っているが、生体系においては空間閉じ込めによらずにナノ構造液晶体から複雑な構造を構築している例も存在する。本研究の延長として、閉じ込めによる構造制御と合わせて非閉じ込め型構造制御についての展開を行いつつある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件) 全論文査読有

- 1) Photoinduced Ordering Transition in Microdroplets of Liquid Crystals with Azo-Dendrimer, G. Lee, F. Araoka, K. Ishikawa, Y. Momoi, H. Haba, K. Yonetake, H. Takezoe Particle & Particle Systems Characterization 30. (2013) 8470852.
- 2) Smooth transitions between biaxial intermediate smectic phases, V. Emelyanenko, K. Ishikawa, Soft Matter 9, (2013) 3497-3508.
- 3) Novel Bistable Device Using Anchoring Transition and Command Surface, T. Ikeda, S. Aya, F. Araoka, K. Ishikawa, O. Haba, K. Yonetake, Y. Momoi, H. Takezoe Applied Physics Express 6 (2013) 061701
- 4) Evolution of the discontinuous anchoring transition under an electric field, S. Aya, F. Araoka, K. Ishikawa and H. takezoe, Phys. Rev. E 87 (2013) 012507-5
- 5) Degeneracy lifting due to thermal fluctuations around the frustration point between anticlinic antiferroelectric SmC(A)* and synclitic ferroelectric SmC*. K. L. Sandhya, A. D. L. Chandani, A. Fukuda, J. K. Vij, A. V. Emelyanenko, and K. Ishikawa, Phys. Rev. E 87(2013), 012502
- 6) Interplay between polarity and chirality in the electric-field-responsive columnar phase of a dipeptide derivative, N. Koizumi, G. Shanker, F. Araoka, K. Ishikawa, C. V. Yelamaggad, H. Takezoe, NPG Asia Materials 4 (2012) e11-1-7, 10.1038/am.2012.20

[学会発表] (計9件)

- 1) Electro-optical properties of

unconventional subphases between ferroelectric and antiferroelectric LC, K. Isobe, K. Ishikawa, The 20th International Display Workshops, Dec, 4, 2013, Sapporo, Japan.

- 2) Orientational Structure Transition of Ferroelectric Liquid Crystal Material Observed by Two-Photon Fluorescence Microscopy, A. Ito, S. Aya, F. Araoka, K. Ishikawa, H. Takezoe, 14th International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals, Magdeburg, Germany, Sept. 5, 2013.
- 3) Azo dendrimer for device applications, H. Takezoe, T. Ikeda, G. Lee, S. Aya, O. Haba, K. Yonetake, Y. Momoi, F. Araoka, K. Ishikawa, 12th European Conference on Liquid Crystals (ECLC 2013), Rhodes, Greece, Sep. 24, 2013.
- 4) ネマチック液晶のアンカリング転移を用いた UV 光による書き換え可能なメモリーデバイス 池田卓矢, 謝曉晨, 荒岡史人, 石川謙, 竹添秀男 日本液晶学会討論会、千葉大学、千葉、2012年9月5日
- 5) SmC*-SmCA*連続転移におけるらせん特性反射と電場応答 磯部和宏, 竹添秀男, 石川謙 日本液晶学会討論会、千葉大学、千葉、2012年9月5日
- 6) 液晶の配向構造相転移における構造解析及び熱測定, 謝曉晨, 佐々木裕司, 荒岡史人, 石川謙, 江間健司, 竹添秀男, 環境・エネルギー材料熱物性シンポジウム2012、東京工業大学、東京、2012年11月20日
- 7) Flexoelectric coupling and smooth transitions between intermediate smectic phases. Six-layer subphase., Emelyanenko, A. V., Ishikawa, K., 24th International Liquid Crystal Conference, Mainz, Germany, August 19, 2012,
- 8) Non-First-Order Transition between SmC* and SmCA*, Ishikawa, K., Isobe, K., Takezoe, H., Isobe, M., Sasaki, Y., Ema, K., 24th International Liquid Crystal Conference, Mainz, Germany, August 19, 2012,
- 9) カラムナー液晶の極性転移にともなう組織変化, 向後 伶利, 石川謙, 荒岡史人, 竹添秀男, 宮島大悟, 相田卓三 日本液晶学会討論会、東京都市大学、東京、2011年9月11日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 謙 (Ishikawa, Ken)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号: 10176159