

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：32708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05981

研究課題名(和文)スメクチック液晶エラストマーを用いたフィルム型光バルブ設計の基礎的研究

研究課題名(英文)Study of Film Display Made of Smectic Liquid-Crystalline Elastomers

研究代表者

平岡 一幸 (HIRAOKA, Kazuyuki)

東京工芸大学・工学部・教授

研究者番号：50267530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：主な成果は次の通り：一軸配向したキラルスメクチックA相を持つ液晶エラストマーを合成し、広い温度範囲の電傾効果・大きな光軸変化・小さなせん断変形の特徴を持つフィルム型ディスプレイ材料を開発した。ビベンゾエート(BB)を骨格部とする主鎖型液晶ポリエステルを架橋し得られた主鎖型液晶エラストマーが昇降温により5.5倍の可逆的伸縮機能を持つことを示し、新たな触媒により合成の低温化に成功し、また光架橋剤を取り入れ電界紡糸中のUV光架橋により液晶エラストマーナノファイバーを作製した。楔形状のメソゲンを持つ側鎖型液晶エラストマーを広がり変形下で架橋することでフレクソエレクトリック分極の固定に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

架橋したゴムやプラスチックに液晶材料を化学結合させることで、液晶の電気応答機能を持つフィルムの開発を行い、フィルム型ディスプレイ用の素材開発に貢献した。液晶は流動性のある液状であるため2枚のガラスの中に充填する必要があったが、今回開発した液晶エラストマーに電極を塗布することで自立したフィルム型ディスプレイが得られる。さらに研究に用いた試料を特殊な変形下で合成することで、電気(分極)を帯びたゴム(エラストマー)の開発に成功し、電気による変形機能を持つ人工筋肉用材料として有望であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Mechanical responses to electric stimulation in a uniaxially oriented side-chain SmA* elastomer composed of cholesterol-derived mesogens were investigated. Electric-field-induced shear deformation of the elastomer was observed in the SmA* phase with a wide temperature range between 40 °C and 120 °C. Because the shear deformation is caused by the electroclinic effect, the shear deformation has a polarity. The magnitude of the deformation was estimated to be at $\pm 2.0 \mu\text{m}$ under $\pm 1.0 \text{ V}/\mu\text{m}$. An e-field-induced polar deformation resembling the motion of the flukes of a dolphin was observed in the temperature region of the pseudo-isotropic state of the elastomer prepared by cross-linking reaction under splay distortion. The emergence of polarization was also confirmed in the pseudo-isotropic phase, whereas no polarization in the SmA* phase. We conclude that the flexoelectric effect within splay distortion fixed by cross-linking caused the emergence of polarization and the polar deformation.

研究分野：化学

 キーワード：液晶エラストマー 液晶 高分子 電傾効果 フレクソエレクトリック効果 フィルムディスプレイ
液晶ディスプレイ スメクチック液晶

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

低分子系ネマチック液晶の電場誘起による分子再配列は良く知られており、液晶テレビをはじめとして広く応用されている。これらの液晶材料は液状であるため2枚のITOガラスなどの間に充填して用いる必要がある。そのため未来型ディスプレイとして注目されるフィルム型ディスプレイ用材料としてはほとんど検討されていなかった。本研究ではソフト固体でありながらメソゲンの電場応答性能を併せ持つ液晶エラストマーに注目しフィルム型光バルブ材料開発の基礎的研究を行った。特に「電傾効果(電場により配向ベクトルが層法線から傾く現象; [1] S. Garoff, R. B. Meyer, Phys. Rev. A., A19, 338 (1979))」を発現するキラルスメクチックA相(SmA^{*}相; 'はキラルの意味)相」を発現する液晶エラストマー(以下、SmA^{*}エラストマー)に着目し、形状変化を伴わない光軸制御による光バルブの開発を中心に研究を行った。

先行研究において既に、ネマチックエラストマーにおける電場印加による光軸の変化や試料変形については多くの研究例があるが、いずれもメソゲンの再配列による大変形が伴うため、ディスプレイ用材料には不適である。(例えば、[2] M. Warner, E. M. Terentjev, *Liquid Crystal Elastomer 2nd ed.*, Clarendon Press, Oxford (2007). [3] H. Yang et al. "Liquid Crystalline Elastomers" in *Handbook of Liquid Crystals 2nd Ed.*, vol. 7, J. W. Goodby et al. (Eds.), Chapter 15, Wiley-VCH: Weinheim (2014). [4] 平岡一幸, 基礎研究(C) (課題番号 25410214)「液晶エラストマーを利用したフィルム型ディスプレイ設計の基礎的研究」など)。

SmA^{*}相を持つエラストマー(SmA^{*}エラストマー)やSmC^{*}エラストマーの電場誘起による分子再配列や形状変化も報告されていた([5] W. Lehmann, N. Leister, L. Hartmann, D. Geschke, F. Kremer, P. Stein and H. Finkelmann, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 328, 437 (1999). [6] C. M. Spillmann, B. R. Ratna, J. Naciri, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 021911 (2007). など)。しかし、これら研究はメソゲンの傾き角変化による形状制御など、電場や熱による形状変化の利用に焦点を当てており、形状変化を伴わない光軸制御が必要な光バルブ用フィルム材料への検討例はほとんど無い。一方、SmC^{*}エラストマーを用いた表示素子の検討例もあるが、いずれもITOガラス基板内に液晶を充填した従来の液晶表示素子の研究の域を出ておらず、フィルム自身が光バルブ機能を持つフィルム型ディスプレイを念頭に置いたものではない([7] E. Gebhard, R. Zentel, *Macromol. Rapid Commun.*, 19, 341 (1998). [8] M. Brehmer, R. Zentel, G. Wagenblast, K. Siemensmeyer, *Macromol. Chem. Phys.*, 195, 1891 (1994). など)。

本提案は、SmC^{*}相やSmA^{*}相が電場により光軸が制御できることに加え、スメクチック層内の分子再配列の際に巨視的な形状変化を伴わない点に着目したものである。研究開始時には、これらの液晶相を持つ液晶エラストマーを用いてフィルム型ディスプレイ材料の開発を念頭に置いた系統的な研究は行われていなかった。

本研究開始当初の段階において、ビベンゾエートをメソゲンとする主鎖型液晶ポリエステルを架橋した主鎖型液晶エラストマーが室温-等方相間の加熱・冷却により5倍程度の大きな可逆変形を示すことを見出したので、当該試料の「大変形機構の解明」ならびに「合成条件の最適化」についても本研究の推進テーマとして加えた。研究途上の電傾効果による試料変形観測の際に、SmA^{*}相より高温側の等方相の温度領域において、目視で確認できる電場誘起による極性のある変形が観測されたため、この未知の電場誘起変形についても本研究の推進テーマとして加えた。

2. 研究の目的

本研究では、高分子液晶を架橋することで、ソフト固体でありながらメソゲンの電場応答性能を併せ持った液晶エラストマーの合成を試み、その諸物性を検討することでフィルム型ディスプレイ用材料の基礎研究を行うことを目的とした。低分子液晶の場合、流動性があるので分子再配列の際に形状変化を伴わない。しかし、液晶エラストマーはソフト固体なので、分子再配列の際に光軸変化と形状変化の両方生じることが予想される。ディスプレイ用材料に应用する場合、この形状変化はデメリットとなる。そこで本研究では液晶エラストマーの電界印加に伴う光軸変化に加えて形状変化についても検討することを目的とした。

本研究では、キラルな分子からなるスメクチック相、特にキラルスメクチックA(SmA^{*})相とキラルスメクチックC(SmC^{*})相に着目した。同液晶は、1次元結晶・2次元液体である。電場印加により分子が再配列し光軸が変化する一方、スメクチック層内の液体秩序の中で分子再配列が生じるため、巨視的な形状変化を伴わないことが期待される。一方、ディスプレイ材料の応用を考える場合、広い温度範囲で駆動する必要がある。そこで、光軸変化が期待できるSmC^{*}相のゴールドストーンモードやSmA^{*}・SmC^{*}相転移近傍で顕在化するソフトモードについて、広い温度範囲における電界誘起応答の検討を目的とした。

液晶の自発分極(強誘電性)や電傾効果の発現機構はほとんど未解明である。本研究ではそれらの発現機構の検討を目的とした。既述のように、キラリティ導入により自発分極や電傾効果を発現するキラルスメクチック液晶に注目し、分子を構成する原子レベルのダイナミクスと巨視的な電気的物性との関係についての知見を得ることを目的とした。キラリティと核レベルでの分子運動に焦点を当て研究を行うため、これまで検討例が少なかった¹³C-固体核磁気共鳴法(¹³C-固体NMR法)を用いて分子を構成する炭素核の運動を観測した。特に自発分極を担うと考えられるカルボニル炭素と不斉炭素のダイナミクスの解明を中心に研究し、自発分極の発現と分子運動の関係を考察した。

さらに前述のように主鎖型液晶エラストマーの熱変形挙動についても研究テーマに加えた。

主鎖型液晶エラストマーは高分子性と液晶性が直接カップリングするため、側鎖型液晶エラストマーに比べより高性能な機能が期待される。研究途上でポリエステル系主鎖型液晶エラストマーが加熱により5倍程度の大きな自発的・可逆変形機能を持つことを見出したので、大変形機能を有する試料の合成条件の最適化を研究目的に加えた。加えて側鎖型液晶エラストマーの電場誘起変形観察の途上において、同試料の等方相と目される温度領域において極性のある大きな電場誘起変形が観察されたのでその変形機構の解明も研究目的とした。

3. 研究の方法

(1) 液晶エラストマーの合成

「ポリシロキサンを主鎖とした側鎖型液晶エラストマー」と「ポリエステル系主鎖型液晶エラストマー」を主な試料とした。

前者は、ポリシロキサン主鎖へヒドロシリル化によりメソゲン基と架橋剤を側鎖として導入した側鎖型液晶エラストマーである。架橋反応過程において力場を加えることにより配向を制御した液晶エラストマーを作成した。

後者は、メソゲンとしてBibenzoateを柔軟鎖としてアルキルジオールを各々用いて主鎖型高分子液晶を重合する際に、3官能性の架橋剤(トリオール)を添加することにより得た主鎖型液晶エラストマーである。前者と同様に、応力を加えながら架橋反応を行うことにより、メソゲンが配向した液晶エラストマーを得た。3官能性の架橋剤(トリオール)を用いる場合は、合成温度の低温化を目的として、従来の触媒Titanium tetraisopropoxideに加えて、さらに反応性の高いTitanium tetrabutoxideを検討した。さらに室温での架橋を目指し、反応前駆体高分子中に光架橋剤であるDimethyl 1,4-phenylenediacylate(PDA)を加え光架橋による主鎖型液晶エラストマーも検討した。

(2) 配向状態と相転移挙動の評価

得られた試料について、X線回折、偏光顕微鏡観察、さらに赤外分光分析法を併用し、配向条件と配向秩序(スメクチック層と層内メソゲン分子の両方における配向秩序)との関係を定量的に評価した。

相転移挙動を検討するため、示差走査型熱量測定(DSC)、熱機械分析(TMA)、X線回折、ならびに顕微鏡観察を行った。TMAは針入測定法により計測を行った。

(3) ^{13}C -核磁気共鳴分光法による強誘電性液晶の自発分極の発現機構に関する研究

強誘電性のSmC相を示すキラル液晶性化合物と、キラル部以外は同じ化学構造を持つアキラル液晶性化合物の2つを試料とした。結晶相から各種液晶相を経て等方相へ至る幅広い温度範囲において ^{13}C -固体NMR測定を行った。各構成炭素の共鳴スペクトルの半値幅ならびにスピン-格子緩和時間を測定し、これらの物質の分子ダイナミクスを研究した。特に自発分極を担うと考えられるカルボニル炭素と不斉炭素のダイナミクスの解明を中心に研究し、自発分極の発現と分子運動の関係を定量的に検討し考察を行った。

4. 研究成果

スメクチック相を呈する液晶エラストマーを用いて、刺激応答材料設計の基礎研究を行った。具体的には、側鎖型液晶エラストマーの電界応答性を利用したフィルム型液晶ディスプレイの基礎研究、ならびに主鎖型液晶エラストマーを用いて熱刺激応答による大変形に関する研究を行った。さらには核レベルの分子運動と刺激応答機能との関係を検討するため、 ^{13}C -固体NMR法を用いて液晶分子のダイナミクスを研究した。主な結果は以下の通りである。

(1) フィルム型スメクチック液晶ディスプレイの研究

物質の状態は大きく固体・液体・結晶の三つに分類され、流動性や密度変化によって明確に区別される。しかし、流動性を持ちながらも液体とは全く異なる性質を持つのが液晶である。液晶エラストマーはポリマーネットワークの力学的性質と液晶の異方性を併せ持つ新しい材料である。スメクチックA相(SmA相)において液晶分子はスメクチック層面に垂直に配向している。キラル分子からなるスメクチックA(SmA^{*})相は、傾き面に垂直方向に電界Eを印加することで液晶分子が傾き、傾き面の垂直方向に分極Pが生じる。この現象を電傾効果といい光軸の変化を伴う。本研究は、この電傾効果による光軸変化を利用し、フィルム型の光バルブを設計することを目的としている。

本研究では、主鎖としてポリメチルシロキサンを反応性メソゲンとしてSmA^{*}相の出現が期待されるコレステロール誘導体モノマーと[Fig. 1(a)], 大きな極性が期待されるCl含有モノマーを用いて2種類の試料を作成した。DSC計測による相系列の検討や、X線回折実験による配向状態の検討及びその温度依存性を計測した。また、コレステロール誘導体モノマーを用いた試料については電界を印加した際の電場誘起変形と電傾効果に伴う光軸の変化の観測を行った。

X線回折実験から、コレステロール誘導体を用いたエラストマーも、Cl含有モノマーを用いたエラストマーも、ともに引っ張り変形しながら架橋をすることによって一軸配向した液晶エラストマーを得られることが分かった。試料中央部は均一に配向しており、高配向であった(配

向秩序パラメータ $S = 0.65 \sim 0.76$)。また、試料中央部の配向秩序パラメータの温度依存性から、分子の配向には昇降温による復元性があることが分かった。

主鎖としてポリメチルシロキサンを、メソゲンとしてコレステロール誘導体モノマーを用いた側鎖型液晶エラストマーは、電傾効果により印加電場の増加に伴って光軸の傾きが増加し、 $1 \mu\text{m}/\text{V}$ の電場下で $\pm 4 \sim 4.5^\circ$ の光軸変化 θ_M を観測した ([Fig. 2(a), (b)] 参照)。

同試料において SmA^* 相全体の広い温度範囲 ($40 \sim 120$) において、電傾効果に起因する層法線方向の試料の収縮が確認された。通常は SmA^* -C 相転移の前駆現象としておこる電傾効果が SmA^* 相全体で観測されたことから、 SmA^* 相におけるノーマルモードとして顕在化したものと考えられる。電傾効果によるせん断変形も観測されたが、せん断変形角度 θ_M は光軸変化角度 θ_E の $1/50$ 程度と小さかった [Fig. 2(a), (b)]。このように、「広い温度範囲」・「小さいせん断変形」・「大きな光軸変化」の3つの特徴を持つため、 SmA^* 液晶エラストマーはフィルム型液晶ディスプレイ材料の有力候補であることが分かった。

(2)側鎖型液晶エラストマーにおける「イルカの尾のような」電場誘起変形の解明

液晶エラストマーは液晶の異方性とエラストマーの力学的性質を併せ持つ新しい材料である。ソフト固体でありながら液晶相の対称性に起因する刺激応答機能を持つため、ネマチック液晶相特有のフレクソエレクトリック効果による電場誘起変形を利用した人工筋肉やアクチュエータへの応用などが期待される。

本研究では、電場で形状変化が制御できる液晶エラストマーの合成を目的とした。広がり変形により大きなフレクソエレクトリック効果が期待される楔形でアノメトリックな分子形状を持つコレステロール誘導体をメソゲンとして用い ([Fig. 1(a)] 参照)、広がり変形下で架橋反応させた側鎖型液晶エラストマーを合成し、巨視的な分極の発生並びにその電場応答による変形挙動を検討した。

実験に先立ち、試料合成に用いた楔形形状を持つコレステロール誘導体メソゲンの電気双極子モーメントを計算により求めたところ、分子長軸方向に 1.1 debye の電気双極子モーメントがあることがわかった。一軸変形した試料について偏光顕微鏡を用い配向状態を確認したところ、試料中央部は一様に一軸配向しているものの、試料末端部はネッキング状態により広がり変形していることがわかった [Fig. 1(b)]。

X線回折により、室温から 120 まではスメクチック A 構造を有し、 120 以上では等方相へ転移することがわかった。ただし等方相においても配向秩序度が $S = 0.2$ 程度残っておりネマチック構造を持つ擬似等方相であることがわかった。

チャージメータを用いて電荷を計測したところ、未配向試料と一軸配向試料中央部では、 SmA 相と擬似等方相とも電荷は発生しなかった。一方、一軸変形試料末端部は、 SmA 相では電荷は発生しないが、擬似等方相では、フレクソエレクトリック効果のため温度上昇と共に電荷が増し、 135 以上では 1200 pC に達した。

一軸変形試料末端部に擬似等方相において電場を印加すると $\pm 1.0 \text{ kV}/\text{mm}$ の電場下で、 $x = 0.30 \text{ mm}$ の「イルカの尾のような」変形が確認された [Fig. 2(c)]。この変形は極性があるため、誘電異方性ではなく分極の電場応答であることがわかった。この現象はフレクソエレクトリック効果により発生した分極が、架橋により固定化され自発分極化したため、その分極が電界に反応し大きな変形をもたらしたものと考えた。

以上より、楔形形状を持つコレステロール誘導体をメソゲンモノマーとして用い、広がり変形下で架橋させることで、電場で変形を制御できる側鎖型液晶エラストマーの合成に成功した。

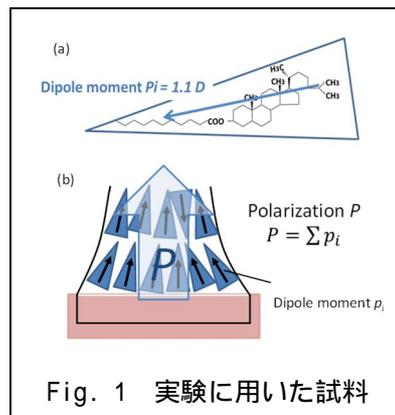


Fig. 1 実験に用いた試料

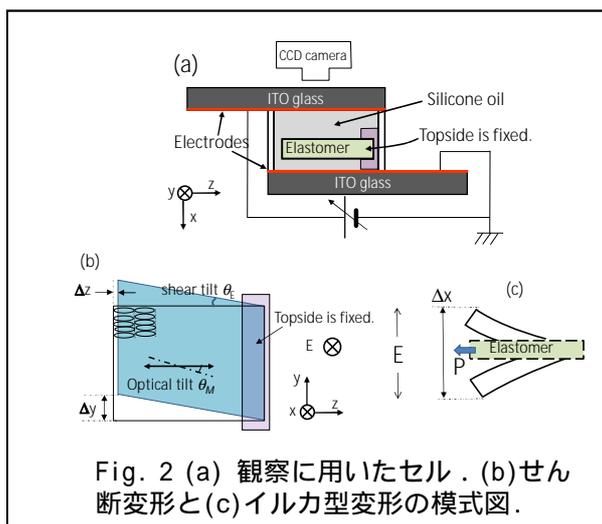


Fig. 2 (a) 観察に用いたセル. (b)せん断変形と(c)イルカ型変形の模式図.

(3)主鎖型液晶エラストマーの大変形機構と合成条件の最適化

主鎖型液晶エラストマーの大変形機構

Benzoate をメソゲン基とする主鎖型液晶エラストマーを試料とした。延伸しながら架橋反応を施すことで一軸配向した試料を得た。配向試料の X 線回折像において、鋭いが弱いスメクチック層の反射が観測されたことから、 SmA 構造を含有したサイボタクチックネマチック液晶相の出現が示唆された。

架橋反応時に 8.5 倍延伸した試料は、室温 等方相の間における加熱・冷却の際、5.5 倍程度の可逆的・自発的伸縮が観測された。1~3 倍までの伸縮における変形量は秩序パラメータに依存したが、3~5.5 倍の伸縮では秩序パラメータの変化をほとんど伴わなかった。このことから、「秩序パラメータに起因する変形」と「秩序パラメータに起因しない変形」の 2 つの変形機構があることが分かった。後者については主鎖のヘアピンの生成と消失が変形に関わっていると考えられる。サイボタクチックネマチック液晶相の高温側でスメクチック層の反射強度が増し、低温側で減少した。この結果は通常の低分子液晶と逆である。これは主鎖がメソゲンで構成される主鎖型高分子液晶においては、高温側、すなわち等方相近傍になると「主鎖のヘアピン」が増加するためと考えられる。すなわち「主鎖のヘアピン」の増加によりスメクチック構造の形成が助長されスメクチック層の反射強度が増したと推察した。詳細は今後の課題である。

触媒による主鎖型液晶エラストマーの合成条件の最適化検討

主鎖型液晶エラストマー：ビベンゾエート (BB) を骨格部とする主鎖型液晶ポリエステル BB-*n* (*n* は骨格部間のアルキル鎖の炭素数) を用いた。Dimethyl 4,4' - biphenyldicarboxylate (Bibenzoate: BB) モル比 1 に対し、1,6-hexanediol を 0.7、3-methyl-1,5-pentanediol を 0.2、架橋剤として 3 官能性の 1,2,6-hexanetriol を用いた。スメクチック相の温度領域でポリマーネットワーク形成をするために反応温度の低温化を目的として、異なる 2 つのチタン系触媒を用いて主鎖型液晶エラストマーの合成を試みた。Titanium tetraisopropoxide の場合、重合温度 230 °C、重合時間 24 時間においてゲル分率が 44%であるのに対して、Titanium tetrabutoxide の場合は 210 °C、24 時間の重合により 84%のゲル分率を持つ合成物が得られ、より低温においてポリマーネットワークの形成が可能であることが分かった。

さらに低温合成が成功した触媒Titanium tetrabutoxide を用いてより低温における応力印加架橋反応の合成最適化条件の詳細を検討するため、架橋反応時に赤外温度計を用いて材料温度を直接観測した。材料温度140 °C程度で架橋反応が進み、得られた配向試料を液晶 等方相間で昇降温すると140~133%の可逆的かつ自発的な収縮機能を発現した。

以上のように、主鎖型液晶エラストマーについて、触媒にTitanium tetrabutoxide を用いることで、反応温度の低温化に成功した。赤外温度計を用いた材料温度の直接観測も成功し、140 °Cで架橋した配向試料は、液晶 等方相間の昇降温時に140~133%の可逆的・自発的な収縮機能を発現した。

光架橋による主鎖型液晶エラストマーの合成条件の最適化と配向方法の検討

架橋反応時の温度制御を容易にするため光架橋反応を検討した。具体的には、BB-*n*を合成する際に光架橋剤としてDimethyl 1,4' -phenylenediacylate(PDA)を加えることで、光架橋が可能な主鎖型高分子液晶BB-*n*/PDAを合成した。この前駆体高分子に紫外線 (365nm、90mW) を照射し主鎖型液晶エラストマーを合成した。架橋状態を表面赤外分光法 (ATR法) とゲル分率測定にて評価した。赤外分光分析からUV照射面は60分の照射でほぼ架橋が完了しているが、裏面には360分照射後も若干の未架橋が残っている。両面から240分間UV照射架橋することでゲル分率84%の試料を得た。FT-IRよりフィルム試料は薄いものほど短いUV照射時間で架橋反応が終了することを確認した。FT-IRとゲル分率の結果から、膜厚が約30 μ mの試料は10分以下のUV照射で架橋反応がほぼ終了することがわかった。

架橋前試料をバーコーターによりせん断塗布し UV 照射により配向した架橋試料を得た。偏光顕微鏡観察から、UV 照射前後で配向状態に定性的に変化がないことを確認した。今後は偏光顕微鏡観察と X 線回折から配向状態の定量化が必要である。

以上のUV架橋の知見に基づき高延伸による機能付与を目的として、光架橋反応を用いて電界紡糸法によるナノファイバー作製に取り組んだ。前駆体高分子に光反応性の架橋部位を取り入れ、電界紡糸の最終段階でUV照射を行いin-situ架橋を試みた。その結果、サブミクロンオーダーの直径を持つ液晶エラストマーナノファイバーの作製に成功した。

(4) ^{13}C -核磁気共鳴分光法による強誘電性液晶の自発分極の発現機構に関する研究

キラリティと自発分極の発現との関係进行研究するため、キラル液晶性化合物 (S)-MH(6)POBC とアキラルな同族体 H(6)POBC を用い、 ^{13}C -固体核磁気共鳴法により各炭素レベルにおける分子ダイナミクスの違いを検討するため、不斉炭素 C23* と自発分極を担うカルボニル基の炭素 (C17, C22) を中心に共鳴ピークの半値幅やスピン - 格子緩和時間 T_1 の解析を行った。

キラル液晶とアキラル液晶の分子運動は骨格部炭素ならびにアルキル鎖炭素においてキラリティの影響は確認できなかった。しかし C23 は骨格部分子運動の影響は少ないが C23' の場合は骨格部の影響を強く受けることが分かった。同様にアキラル液晶におけるカルボニル炭素 (C22) は骨格部分子運動の影響は少ないが、キラル液晶におけるカルボニル炭素 (C22) はキラリティの影響を強く受けることが分かった。

(5) その他：色素系有機材料の検討と数理科学用の教材作成

「ベニバナ色素」が呈する筐紅色は光に晒されると短時間で紅色となる。この呈色機構を検討した。さらに本研究全体の成果をもとに大学教育用の数理科学教材を作成した。

以上。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 平岡一幸	4. 巻 41
2. 論文標題 合唱音楽にける音律の数理科学	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東京工芸大学工学部紀要	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kazuyuki HIRAOKA, Shiori TAIRA, Yuka HOSHINO, Toshio ISHIHARA, Katsumi YAMADA and Masato OSHIMA	4. 巻 47 (online)
2. 論文標題 "Electric-Field-Induced Deformation Caused by Electroclinic and Flexoelectric Effects in Liquid Crystalline Elastomer with Wedge-Shaped Mesogens Derived from Cholesterol	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Liquid Crystals	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/02678292.2020.1746423	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 平岡 一幸、齋藤 由香里、加藤 芳悠、今村 友哉、松本 英俊、戸木田 雅利、東 啓介	4. 巻 74
2. 論文標題 Bibenzoateをメソゲン基とする主鎖型液晶エラストマーを用いたナノファイバー作製の検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Fiber Science and Technology	6. 最初と最後の頁 89-94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2115/fiberst.2018-0014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 平岡 一幸、岩壁 優、山田 勝実、大嶋 正人	4. 巻 76
2. 論文標題 液晶性ポリエステルからなるポリマーネットワーク形成反応の低温化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 高分子論文集	6. 最初と最後の頁 108-111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.10.1295/koron.2018-0036	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 佐々木 麻衣子、大嶋 正人、高橋 圭子、平岡 一幸、山田 勝実、矢島 仁	4. 巻 41
2. 論文標題 ベニバナ生花を原料とする口紅「笹色紅」の伝統的な製法とその改良	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東京工芸大学工学部紀要	6. 最初と最後の頁 86-89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hitoshi Yajima, Maiko Sasaki, Keiko Takahashi, Masato Oshima, Kazuyuki Hiraoka, Morio Yashiro, Katsumi Yamada	4. 巻 28
2. 論文標題 Influence of Photo-illumination on Greenish Metallic Luster of Safflower Red Pigment Film	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bull. Soc. Photogr. Imag. Japan.	6. 最初と最後の頁 18-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 矢島 仁・佐々木麻衣子・高橋圭子・平岡一幸・大嶋正人・山田勝実	4. 巻 81
2. 論文標題 伝統的手法で抽出されたベニバナ色素膜の緑色金属光沢について 光学的手法による検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本写真学会誌	6. 最初と最後の頁 65-69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11454/photogrst.81.65	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuyuki Hiraoka, Ryo Shinozuka, Shohei Sumitomo	4. 巻 44
2. 論文標題 Large spontaneous deformation of uniaxially oriented main-chain liquid-crystalline elastomers composed of BB-n mesogens	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Liquid Crystals	6. 最初と最後の頁 287-296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/02678292.2016.1195897	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuyuki HIRAOKA, Hisashi KASHIMURA, Sota TANAKA, and Shota KANESHIMA	4. 巻 646
2. 論文標題 Electric-Field-Induced Deformation of Chiral Smectic A Liquid-Crystalline Elastomers Composed of Cholesterol Derivative Mesogens	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Molecular Crystals and Liquid Crystals	6. 最初と最後の頁 168 - 175
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/15421406.2017.1287402	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計26件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 平岡一幸
2. 発表標題 電界変形する液晶ゴム
3. 学会等名 イノベーション・ジャパン2017 大学見本市(国立研究開発法人科学技術振興機構; JST)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 南 博之、石原英朗、平 汐莉、星野優香、田島滉太、大谷悠太、角井大士、大嶋正人、平岡 一幸
2. 発表標題 コレステロール誘導体メソゲンを用いた側鎖型液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果と焦電効果
3. 学会等名 第67回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平岡 一幸, 星野 優香, 平 汐莉
2. 発表標題 アノメトリック型メソゲンを用いた液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果
3. 学会等名 2019年 繊維学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平 汐莉、星野優香、平岡一幸
2. 発表標題 アニソメトリック型メソゲンをを用いた側鎖型液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果
3. 学会等名 2019年 日本液晶学会 液晶討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 星野優香、平汐莉、古屋和志、南博之、平岡一幸
2. 発表標題 ポリシロキサンを主鎖とする側鎖型液晶エラストマーの電傾効果による光軸変化と電界誘起変形
3. 学会等名 2019年 日本液晶学会 液晶討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大村拓矢、永治匡勇、平岡一幸
2. 発表標題 13C-NMRを用いたキラルスメクチック液晶(S)-MH(6)POBCにおけるダイナミクスの研究
3. 学会等名 2019年 日本液晶学会 液晶討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大谷悠太、田島滉太、平岡一幸
2. 発表標題 光架橋による主鎖型液晶エラストマーの合成と電界紡糸法によるナノファイバー作製の検討
3. 学会等名 2019年 日本液晶学会 液晶討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田島 滉太、岩壁 優、平岡 一幸
2. 発表標題 チタニウム()テトラプトキシドを触媒として用いた主鎖型液晶エラストマーの配向制御と自発変形
3. 学会等名 2019年 日本液晶学会 液晶討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平岡一幸
2. 発表標題 電界変形する液晶ゴム
3. 学会等名 イノベーション・ジャパン2019 大学見本市(国立研究開発法人科学技術振興機構; JST)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平岡 一幸, 齊藤由香里, 加藤 芳悠, 今村 友哉, 松本 英俊, 戸木田 雅利, 東 啓介
2. 発表標題 Bibenzoateをメソゲン基とする主鎖型液晶エラストマーを用いたナノファイバー作製の検討
3. 学会等名 平成31年度繊維学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Hiraoka, Shiori Taira, and Yuka Hoshino
2. 発表標題 Flexoelectric and Electroclinic Effects of Side-chain Type Liquid-crystalline Elastomers Composed of Cholesterol Derivative Mesogens
3. 学会等名 27th International Liquid Crystal Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuyuki Hiraoka, Yuka Hoshino, Shiori Taira, Hidetoshi Matsumoto, Masatoshi Tokita, and Keisuke Azuma
2. 発表標題 Trial Manufacture of Nanofibers Made from a Main-Chain Liquid-Crystalline Elastomer Composed of Bibenzoate Mesogens
3. 学会等名 27th International Liquid Crystal Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuya Omura and Kazuyuki HIRAOKA
2. 発表標題 Molecular Dynamics of Chiral and Achiral Smectic Liquid Crystals Studied by ¹³ C-NMR Spectroscopy
3. 学会等名 27th International Liquid Crystal Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田島滉太、大谷悠太、平岡一幸、松本英俊、戸木田雅利、東啓介
2. 発表標題 Bibenzoateをメソゲン基とする主鎖型液晶エラストマーを用いたin-situ UV架橋によるナノファイバー作製の検討
3. 学会等名 2018年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 星野優香、香田志龍、平岡一幸
2. 発表標題 ポリシロキサンを主鎖とする側鎖型液晶エラストマーの電傾効果による光軸変化と電界誘起変形
3. 学会等名 2018年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石原 英朗、平 汐莉、山下 耀央、星野優香、平岡一幸
2. 発表標題 コレステロール誘導体をメソゲン側鎖とする液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果と電界誘起変形
3. 学会等名 2018年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大村拓矢、永治匡勇、平岡一幸
2. 発表標題 13C-NMRを用いたキラルスメクチック液晶(S)-MH(6)POBCのカルボニル炭素のダイナミクスの研究
3. 学会等名 2018年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平 汐莉、星野 優香、大嶋 正人、平岡 一幸
2. 発表標題 アノソメトリック型メソゲンをを用いた側鎖型液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果
3. 学会等名 2019年第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平岡一幸、田中聡太、平汐莉、星野優香
2. 発表標題 側鎖型液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果と焦電特性
3. 学会等名 平成30年度繊維学会年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今村友哉、加藤芳悠、平岡一幸
2. 発表標題 Bibenzoateをメソゲン基とする主鎖型液晶エラストマーの可逆変形とナノファイバー化の検討
3. 学会等名 2017年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平 汐莉、星野優香、田中聡太、平岡一幸
2. 発表標題 コレステロール誘導体を側鎖とした液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果と焦電特性
3. 学会等名 2017年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大村拓矢、中田智大、平岡一幸
2. 発表標題 13C-NMRを用いた強誘電性液晶MH(6)POBCのカルボニル炭素のダイナミクスの研究
3. 学会等名 2017年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 星野 優香、平 汐莉、平岡 一幸
2. 発表標題 側鎖型液晶エラストマーのフレクソエレクトリック効果と電界誘起変形
3. 学会等名 第7回ソフトマター研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平 汐莉、星野 優香、平岡 一幸
2. 発表標題 コレステロール誘導体をメソゲンとした液晶エラストマーの電傾効果とフレクソエレクトリック効果
3. 学会等名 2018年第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Hiraoka, S. Tanaka, S. Taira, and Y. Hoshino
2. 発表標題 Flexoelectric effect and pyroelectric properties of side-chain type liquid-crystalline elastomers composed of polysiloxane backbone
3. 学会等名 9th International Liquid Crystal Elastomer Conference (ILCEC 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Hiraoka, S. Tanaka, S. Taira, and Y. Hoshino
2. 発表標題 Electroclinic and Flexoelectric Properties of Side-Chain Type Smectic-A* Liquid-Crystalline Elastomers Composed of Polysiloxane Backbone
3. 学会等名 16th International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals (FLC 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 電界変形エラストマー	発明者 平岡一幸	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020 - 027869	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 電界変形する液晶エラストマー	発明者 平岡一幸	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2018 - 131496	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 液晶エラストマーの製造方法	発明者 平岡一幸	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特許第6504552	取得年 2019年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

ベニバナ生花を原料とする口紅「笹色紅」の伝統的な製法とその改良 https://kougei.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=1982&item_no=1&page_id=13&block_id=21 合唱音楽における音律の数理科学 https://kougei.repo.nii.ac.jp/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=1935&item_no=1&page_id=13&block_id=21
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----