

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18722

研究課題名（和文）トポロジカル欠陥の空間制御による等方性液晶の創成と偏光無依存高速光デバイスの開発

研究課題名（英文）Optically isotropic liquid crystal based on designed defect-distribution and polarization-independent electrooptic device

研究代表者

尾崎 雅則（Ozaki, Masanori）

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50204186

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：液晶光デバイスは液晶の異方性を活用するため、その特性が入射光の偏光状態に依存し応用が制限される場合が多い。一方、異方性を生み出す分子配列は、配向場の不整合（トポロジカル欠陥）を内包する場合が多い。本研究では、従来、有害なものと考えられてきた欠陥の空間配列を制御することにより、光学的に等方な液晶を実現し新しい発想の新規光デバイスを探索することを目的とした。具体的には、元トポロジカル欠陥との共存により三次元螺旋構造を安定化するブルー相液晶に着目し、ブルー相液晶の格子配列の精密制御を目指して、素子基板表面への配向容易軸の付与と電界印加によって格子面ならびに格子軸のマクロな制御を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光学的等方性電気光学効果を実現するための一つの候補材料が、三次元螺旋構造を有するコレステリックブルー相液晶である。ブルー相液晶は、偏光無依存な光位相変調や高速応答性などの魅力的な性質を有しているが、分子配列のみならず格子構造の配列制御が困難であった。本研究では、電界印加処理によりブルー相液晶の格子配列、すなわち、欠陥配列を大面積高品位に制御することを可能としている。このことは、液晶の自己組織性とトップダウン的配向制御を融合することにより、デバイスレベルでの広範囲での結晶方位制御を可能とし、液晶光デバイスの応用可能性を広げた点で意義がある。

研究成果の概要（英文）：Since liquid crystal optical devices utilize the anisotropy of liquid crystals, their properties often depend on the polarization state of the incident light, limiting their application. On the other hand, molecular arrays that produce anisotropy often contain inconsistencies in the alignment field (topological defects). In this study, we aimed to realize optically isotropic liquid crystals and explore novel optical devices by controlling the spatial arrangement of defects which have been conventionally considered detrimental. Specifically, we focused on blue-phase liquid crystals that stabilize a three-dimensional helical structure by coexistence with topological defects, and achieved macroscopic control of the lattice plane and lattice axis by providing an easy-axis for orientation on the device substrate surface and applying an electric field, aiming at precise control of the lattice arrangement of the blue-phase liquid crystal.

研究分野：電気電子材料

キーワード：液晶 コレステリックブルー相 格子配列 配向制御

1. 研究開始当初の背景

液晶の特徴は分子の自己組織的な配列に基づく様々な性質の異方性であり、なかでも誘電的、光学的異方性を利用したものが液晶光制御デバイスである。しかしながら、これらのデバイスの特性は入射光の偏光状態に強く依存し、応用が制限される場合が多い。一方、異方性を生み出す分子配列は、強いキラリティの導入やデバイスの基板界面・外部電界印加の影響により、配向場の不整合（トポロジカル欠陥）を内包する場合が多い。

2. 研究の目的

従来の液晶デバイスでは有害なもの不要なものと考えられてきた欠陥の配列を空間的に制御することにより、光学的に等方な液晶を実現し、新しい発想の新規光デバイスを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

トポロジカル欠陥の三次元空間内での配列を制御する目的で、元々必然的に系内にトポロジカル欠陥を内包するコレステリックブルー相(BP)液晶を採用し、その欠陥の配列制御を試みた。すなわち、強いキラリティを有する液晶は、三次元的に分子ねじれを誘起しようとするが、すべての空間を三次元ねじれ構造で欠陥なく埋め尽くすことは不可能であり、BP液晶は欠陥を内包して安定化する。BP液晶は、体心立方晶系をなすブルー相 I (BP I) と単純立方晶系をなすブルー相 II (BP II) のサブフェーズが存在するが、光デバイスなどの応用を考えた時、素子全体に渡って規則的な欠陥配列を実現するためには、BP液晶の格子構造を素子全体に渡って配列制御する必要がある。本研究では、電界印加による過渡的な相転移を実現することにより、BP液晶の格子配列、すなわち、素子基板に対する結晶面方位ならびに配向容易軸方向に対する結晶軸方位を制御を試みた。

4. 研究成果

これまでもコレステリックブルー相 (BP) 液晶の格子配列制御に関する研究は多くなされてきた。しかしながら、それらは、素子基板面に対して同一の格子面を均一に配列させたものであった。しかしながら、本研究で目指す、反射型波面制御素子を実現するためには、各配向パターン内での格子の自在制御も不可欠である。そこで、ブルー相 I (BPI) に電界を印加して、一旦螺旋構造の消失したホメオトロピック・ネマチック (N) 相を経て、再び電界を除去する際の BP 格子の配列挙動を明らかにし、面内格子方位制御を試みた。

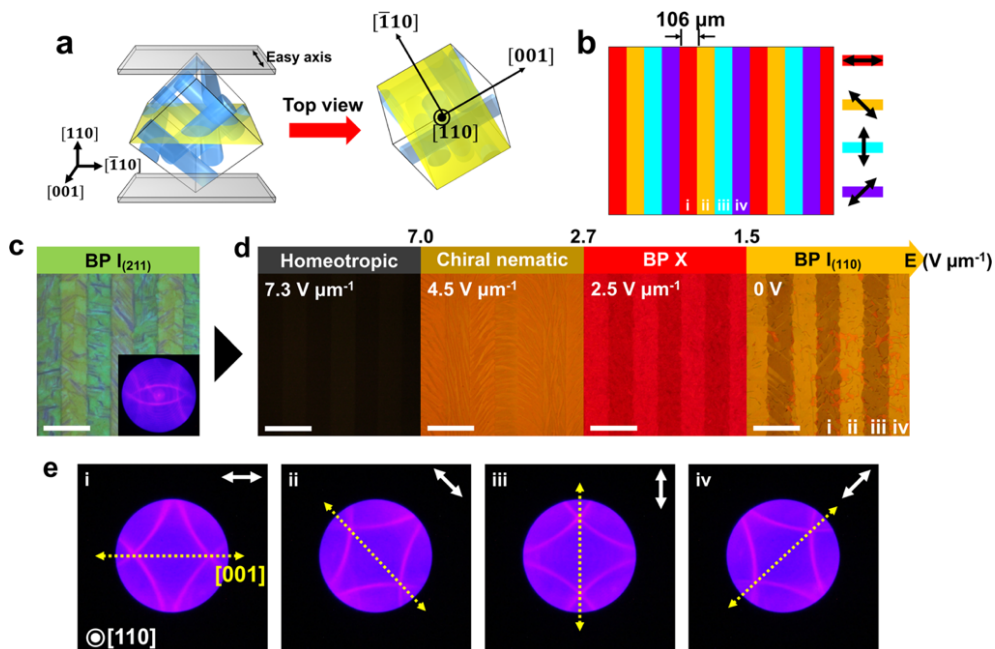


図1 BPIの電界誘起相転移と再配向。(a) BPI₍₁₁₀₎とその結晶格子を2枚のガラス基板で挟んだ模式図。(b) 配向パターンの方位を示し、各ドメインの幅は106 μm 、隣接するドメインの内の配向容易軸方向が45°ステップで変化している。(c) 電界印加前のBPI₍₂₁₁₎のPOM画像。挿入図は対応するコッセル図。(d) 様々な電場における電場誘起相のPOM画像。POM画像は、クロスニコル間の反射モードで撮影されたものである。(c)と(d)のスケールバー：200 μm 。(e) 配向容易軸の方向が異なるそれぞれの領域における電界再配向したBPI₍₁₁₀₎のコッセル図。白い両矢印と黄色の点線矢印は、それぞれBP格子の配向容易軸と[001]結晶軸の方向を示す。

図1 (a)にサンドイッチセル内のBPI格子の方位の様子を示す。本研究では、(110)格子面が基板に平行、すなわち、[110]軸が基板面に垂直な格子配列を実現する。その上で、[110]軸周りの結晶格子の面内方位、すなわち、[001]軸の面内方位の制御を試みた。図1 (b)は、実験に用いた各領域内の配向容易軸方位のパターンを示したものである。配向容易軸の方位設定には、アズ系光配向膜を用いて、独自に開発したマスクレスパターン配向装置を用いた。

図1 (c)は、電界印加前のBPIの偏光顕微鏡 (POM) 像とコッセル回折像を示す。電界印加前では、図中の2回対称のコッセル像からわかるように、(211)面が基板に平行に配列した構造を取っている。また、各配向領域内での格子配列状態に僅かな違いが確認されるが、領域内での一様な配列状態は実現されていない (そのことは、複数のコッセル像が重なって観測されていることからわかる)。いったん高電界 ($7.3\text{V}/\mu\text{m}$) を印加して螺旋構造が消失したホメオトロピック N 相を実現した後に、1分間に $0.05\text{V}/\mu\text{m}$ の割合で電界を除去した過程で観測される偏光顕微鏡像を図1 (d) に示す。ホメオトロピック N 相では複屈折がなくなり消光位が確認される。電界の減少に伴い、 $7.0\text{V}/\mu\text{m}$ 以下では、カイラルネマチック (ChN) 相のフォーカルコニック組織が確認され、さらに電界を下げて、 $2.7\text{V}/\mu\text{m}$ 以下では格子の歪んだブルー相 X (BPX) が観測された。さらに電界を下げると、 $1.5\text{V}/\mu\text{m}$ 以下で最終的に BP が確認された。電界除去後の BP のコッセル像を図1 (e) に示す。(i)~(iv)は、図1 (b)内の配向パターン領域(i)~(iv)のコッセル像であることを示している。このコッセル像からわかるように各配向領域内では、単一の2回対称のコッセル像が観測され、反射色も電界印加前の $\text{BP}_{(211)}$ と異なり、 $\text{BP}_{(110)}$ が実現できていることを示している。また、コッセル像の方位が各領域内の配向容易軸方向 (実線の両矢印) と一致していることもわかる。このことは、電界印加処理により、結晶の面配列 (基板と平行な面の配列) と格子方位 (セル面内での結晶軸[001]の方位) の制御が実現できたことを示している。

次に、BP の格子配列を決定する要因を明らかにした。すなわち、電界印加によって発現する ChN 相と BPX が格子配列に及ぼす影響について調べた。その結果を図2 に示す。図2 (a)は電界印加前の $\text{BPI}_{(211)}$ の POM 像とコッセル像を示す。まず、(b)に示すように、一旦ホメオトロピック N 相を実現したのち、ChN の発現する電界までステップ状に電界を減少させ、ChN 相の状態ですぐに電界を完全に除去して BPI を実現した。その場合、(d)からわかるように、面内での格子軸方位 (破線矢印) は配向容易軸 (実線両矢印) に揃っているが、面方位は一意には決まっていない。一方、(e)に示すように、ホメオトロピック N 相から ChN 相を経ずにステップ状に BPX まで電界を減少させた場合、BPX で面方位は(110)に揃っており、その状態を維持したまま最終的に $\text{BPI}_{(110)}$ が実現されている事がわかる。しかしこの場合、結晶軸方位、すなわち、[001]軸の面内方位は決まっていない。以上の実験結果から、ホメオトロピック N 相から電界を除去していった場合、ChN 相で格子の面内軸方位が決定され、BPX で格子面の配列が決まることがわかる。

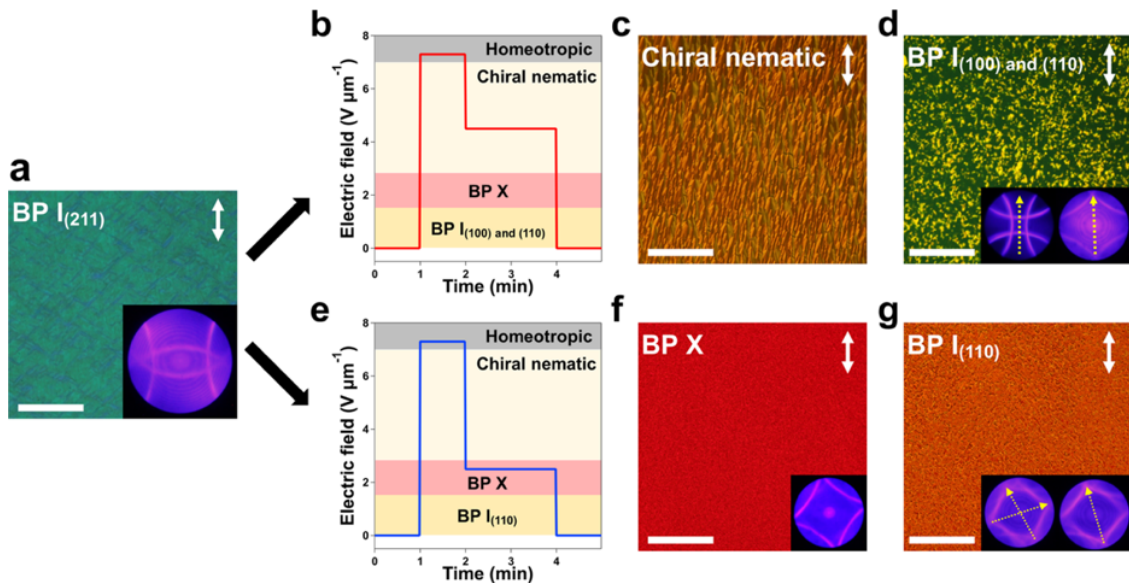


図2 電界誘起再配向機構の検討。(a) 電界印加前のブルー相 (BP) I₍₂₁₁₎ の POM 像と対応するコッセル図 (挿入図)。(b) ホメオトロピック N 相-ChN 相-BP I 相を得るための電界シーケンス。(c), (d) 電界誘起 ChN 相と BPI の POM 画像とコッセル像。(e)ホメオトロピック N 相-BP X- BP I 相を得る電界シーケンス。(f), (g) 電界誘起 BP X と BP I の POM 画像と対応するコッセル像。(a, c, d, f, g)のスケールバー: 200 μm 。白い両矢印と黄色の点線矢印は、それぞれ BP 格子の配向容易軸と[001]結晶軸を示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yuji Tsukamoto, Hiroyuki Yoshida, Masanori Ozaki	4. 巻 60
2. 論文標題 Generation of coaxial vortex beams with doubled topological charges using a stacked liquid crystal structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 120906 (6pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3182	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 Yuji Tsukamoto, Hiroyuki Yoshida, Masanori Ozaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Generation of a focused optical vortex beam using a liquid crystal spiral zone plate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 8667 ~ 8675
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.451293	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 Seong Yong Cho, Hiroyuki Yoshida, Masanori Ozaki	4. 巻 30
2. 論文標題 Tunable polarization volume gratings based on blue phase liquid crystals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 1607 ~ 1614
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.448301	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 Yuxian Zhang, Hiroyuki Yoshida, Fan Chu, Yu-Qiang Guo, Zhou Yang, Masanori Ozaki, Qiong-Hua Wang	4. 巻 18
2. 論文標題 Three-dimensional lattice deformation of blue phase liquid crystals under electrostriction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soft Matter	6. 最初と最後の頁 3328 ~ 3334
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2SM00244B	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 該当する

1. 著者名 Kazuma Nakajima, Yuji Tsukamoto, Shogo Mitsuhashi, Masanori Ozaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Frustrated lattice orientation of cholesteric blue phase II induced by micro-patterned surface alignment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 071007(4pages)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac75aa	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 Yuxian Zhang, Hiroyuki Yoshida, Qiong-Hua Wang, Masanori Ozaki	4. 巻 122
2. 論文標題 Electro-optics of blue phase liquid crystal in field-perpendicular direction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 36130-36137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0142383	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 該当する

〔学会発表〕 計22件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 三橋将吾、長谷川遼、趙成龍、尾崎雅則
2. 発表標題 くさび型セルを用いたコレステリックブルー相の相転移挙動に及ぼす界面効果に関する研究
3. 学会等名 2021年日本液晶学会討論会、PE16、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山雄介、吉田浩之、鍛冶静雄、横山知郎、尾崎雅則
2. 発表標題 ネマティック液晶のツイストウォールを利用した点欠陥の生成
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会、20aM2、オンライン
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuma Nakajima, Ryo Hasegawa, Shogo Mitsuhashi, Yuji Tsukamoto, and Masanori Ozaki
2. 発表標題 Lattice Orientation of Cholesteric Blue Phase on Patterned Alignment Surface
3. 学会等名 Global Nanophotonics 2022 (GNP 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲嶋一真、三橋將吾、尾崎雅則
2. 発表標題 キラリティにより誘起されるコレステリックブルー相 の格子配向方位の回転
3. 学会等名 2022年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲嶋一真、三橋將吾、塚本脩仁、尾崎雅則
2. 発表標題 フラストレート配向パターンを有する液晶セル内におけるコレステリックブルー相 の格子配向
3. 学会等名 2022年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三橋將吾、尾崎雅則
2. 発表標題 パターン配向したコレステリックブルー相の透過型電子顕微鏡観察
3. 学会等名 2022年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三橋將吾、尾崎雅則
2. 発表標題 Grandjean欠陥を含むコレステリック相からのブルー相の発現挙動に関する研究
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仲嶋一真、塚本脩仁、三橋將吾、尾崎雅則
2. 発表標題 競合する配向パターンにより誘起されるコレステリックブルー相の格子配向特性
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuma Nakajima, Ryo Hasegawa, Shogo Mitsuhashi, Yuji Tsukamoto, and Masanori Ozaki
2. 発表標題 Lattice Orientation Characteristics of Cholesteric Blue Phase II on Micropatterned Surface Alignment
3. 学会等名 The 28th International Liquid Crystal Conference (ILCC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanori Ozaki, Kazuma Nakajima, Shogo Mitsuhashi, Seong Yong Cho and Yuji Tsukamoto
2. 発表標題 Lattice Orientation Control of Blue Phase Liquid Crystal on Photoaligned Surface
3. 学会等名 OLC2021 Satellite WorkShop (SWS2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuma Nakajima, Ryo Hasegawa, Shogo Mitsuhashi, Yuji Tsukamoto and Masanori Ozaki
2. 発表標題 Orientation Control of Cholesteric Blue Phase II using Micropatterned Surface Alignment
3. 学会等名 OLC2021 Satellite WorkShop (SWS2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masanori Ozaki
2. 発表標題 Fabrication of Molecularly Oriented Organic Semiconductor Thin Film Utilizing Its Potential as a Liquid Crystal
3. 学会等名 SPIE Organic Photonics + Electronics, Liquid Crystals XXV (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
中国	Beihang University		