

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21975

研究課題名（和文）三次元トポロジカル欠陥の意図的導入による等方性液晶の創成

研究課題名（英文）Creation of isotropic liquid crystals by intentionally introducing 3D topological defects

研究代表者

尾崎 雅則（OZAKI, Masanori）

大阪大学・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）：液晶は、本来一様な分子配向状態を形成する。本研究では、液晶内に三次元トポロジカル欠陥を意図的かつ制御して導入し、新たな液晶秩序の創成とその応用の可能性を探った。すなわち、従来、有害なもの不要なものとして排除されてきた液晶内の配向場の不整合（トポロジカル欠陥）を積極的に活用・制御することにより、これまで自然界ではごく限られた条件下でのみ現れていた液晶秩序（コレステリックブルー相と呼ばれる光学的等方状態と類似）を人工的に発現させることを目的として、局所的配向技術を駆使して、ウォール欠陥構造の生成・安定化とそれらの電界印加による状態遷移をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来、有害なもの不要なものとして排除されてきた液晶内のトポロジカル欠陥を積極的に活用・制御することにより、これまで自然界ではごく限られた条件下でのみ現れていた等方的な液晶秩序を人工的に発現させることは独創的で学術的に意義がある。すなわち、液晶は一様配向するべきもので光学的異方性媒質であるという従来の液晶の描像を覆す発想に基づいている。このようなデバイスの実現により、従来の液晶デバイスにおいて不可欠であった偏光子が不要となり、分子の初期配向プロセスも不要となり、しかも従来の液晶デバイスに比べ応答速度が二桁高速な光デバイスが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The liquid crystal originally forms a uniform molecular orientation state. In this research, we intentionally and controlledly introduced three-dimensional topological defects in liquid crystals, and explored the possibility of creating a new liquid crystal order and its application. That is, by actively utilizing and controlling the alignment field mismatch (topological defect) in the liquid crystal, which has been conventionally excluded as harmful and unnecessary, We aimed to artificially realize the optically isotropic liquid crystal order that has been formed in a limited environment. Using the local photo-alignment technique, the wall defect structures were generated and stabilized, and the state transitions were performed by applying their electric fields.

研究分野：電子工学

キーワード：液晶 配向欠陥 光学的等方性 ウォール欠陥

1. 研究開始当初の背景

液晶は分子の平均的な配向方向である配向ベクトル（ダイレクタ）でその構造を特徴付ける。したがって、通常の結晶のける欠陥の他に、配向欠陥が存在する。この液晶中における配向欠陥は、特異性のある欠陥と特異性のない欠陥に大別され、特異性のある欠陥はディスクリネーション（トポロジカル欠陥）と呼ばれ、液晶の配向方向、すなわちダイレクタが定義できない線状、もしくは点状の領域に出現する。このトポロジカル欠陥は、バルク中の液晶とは異なる性質を示すことが知られており、例えば、トポロジカル欠陥を有する配向場に円偏光を入射することで光渦を生成できることや、トポロジカル欠陥がコロイド粒子の鋳型として機能することなど味深い性質を示す。しかしながら、トポロジカル欠陥は高エネルギーを持つために、安定化することは困難であり、トポロジカル欠陥の生成や制御を目指す研究が盛んにおこなわれている。

一方、特異性のある欠陥とは対照的に、平行平板セルにおいての特異性のない欠陥が安定化する報告は少ない。特異性のある欠陥とは異なり、特異性のない欠陥ではダイレクタが基板垂直方向に立ち上がっており、ねじれ角が  $2\pi$  異なる 2 つの領域、すなわちトポロジ的に等価である 2 つの領域を壁のように隔てていることから、特異性のない欠陥、またはウォールと呼ばれている。このウォール内部では電界無印加時においても液晶分子が基板垂直方向に立ち上がっており、急峻な配向変形が存在するため、一様な液晶配向に基づく従来の液晶デバイスとは異なる機能の発現が期待できるが、高い得るギを有することから安定に生成することは困難であり、等方相から液晶相への相転移の際にウォールが生成されたとしても収縮により消滅してしまう。

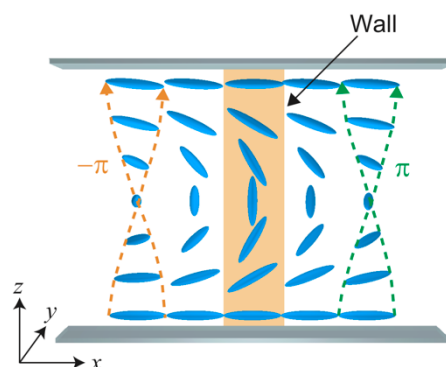


図1 ねじれ方向が  $2\pi$  異なる領域間に生じるウォールの模式図

2. 研究の目的

本研究では、光配向法による基板界面の配向制御技術を用いて配向場のトポロジーを制御することで、特異性のない欠陥であるウォール配向構造の生成と安定化を実現する。また、電界印加により、ウォールの生成、消滅間の状態遷移を実現することにより、ダイナミックな新たな三次元秩序構造の創製を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、マスクレス露光装置を用いて任意の配向容易軸分布を光配向基板に与え、基板界面における液晶ダイレクタの配向方向を制御した。図2 (a)にループ状線欠陥を生成するために光配向基板に与えた配向容易軸分布を示す。配向容易軸分布は、中心から放射状、かつ線形に方位が変化し、中心から  $r_0$  の位置で方位が  $\pi$  変化する。また、図2 (b)に一様配向基板界面における配向容易軸分布を示す。また、光配向基板を上基板、一様配向基板を下基板として重ね合わせたときの素子の概略図を図2 (c)に示す。

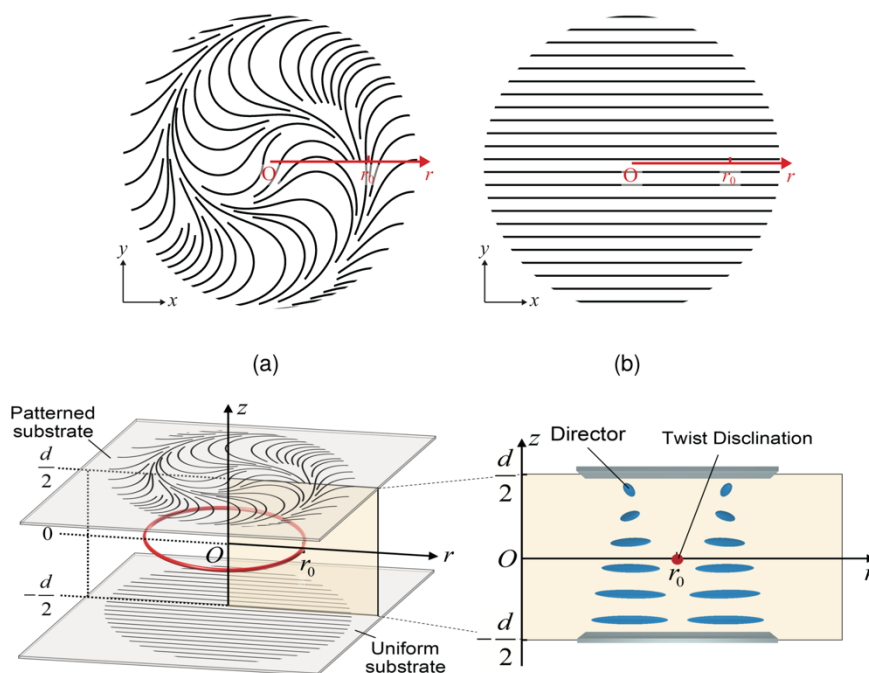


図2 セル基板表面における(a)パターン配向容易軸（上基板）、(b)一様配向容易軸（下基板）および、(c)素子の模式図

図3に、図2で示し

たセル内でのねじれ角分布を示す。パターンを中心を原点として、半径方向に  $r$  軸とすると、パターン中心でねじれ角は  $-\pi/2$  であり、 $r = r_0/2$  の位置では上下基板の配向容易軸が等しく、ねじれ角は 0 である。 $r$  の増大に伴ってねじれ角は大きくなる。しかし、ダイレクタのねじれ角が  $\pi/2$  を超える  $r = r_0$  の位置でねじれの向きが反転し、ループ状線欠陥の生成が期待できる。ここで、 $r_0$  をパターン半径と呼ぶ。

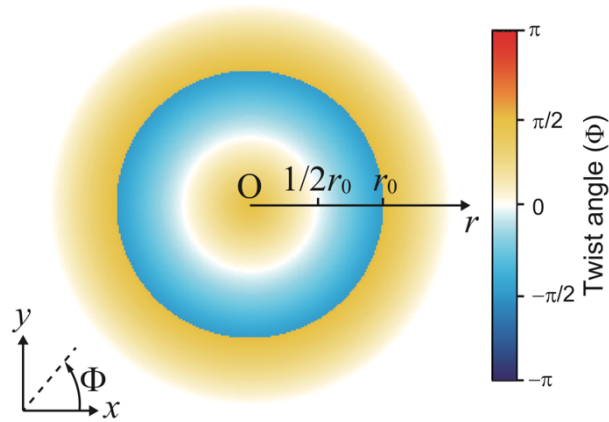


図3 図2のセル内でのねじれ角分布

#### 4. 研究成果

図4にパターン半径  $r_0 = 107\mu\text{m}$  としたときのセルの偏光顕微鏡写真を示す。オープンニコル下で、図4 (a)のように  $r = r_0$  の位置にループ状の線欠陥が観測され、図3の設計通りの配向欠陥が生成されていることを示している。鋭敏色板の挿入観察により、図3のねじれ角であることも確認できた。

次に、上下基板間に 1kHz、2.5V の電圧を印加した。電圧印加に伴って、ループ状線欠陥は徐々に収縮し、最終的に消滅した。一方、線欠陥が消滅した後に、電圧を除去してもループ状線欠陥が再び現れることはなく、図4 (b)に示すループ状のウォールの生成が確認された。このループ状ウォールは、等方相まで昇温しない限り消滅することはなかった。

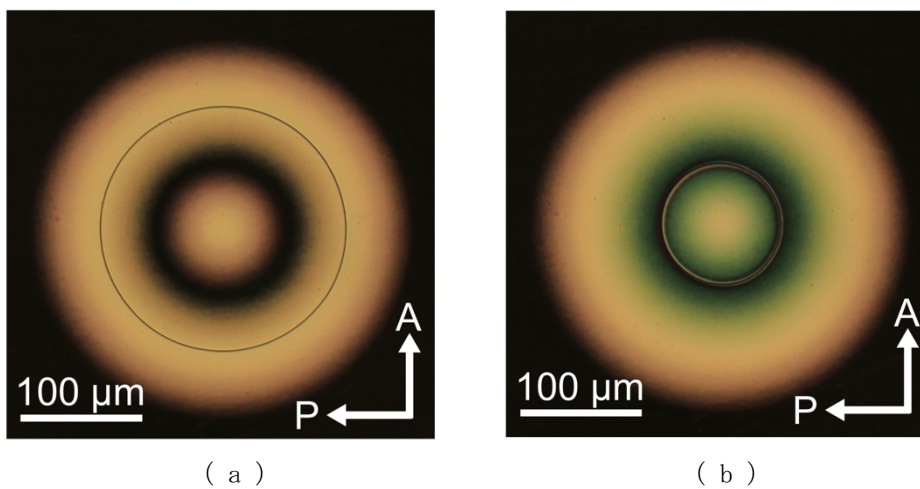


図4 ループ状線欠陥(a)および電圧印加後に生成されたループ状ウォール(b)の偏光顕微鏡写真

ループ状線欠陥からループ状ウォールが生成されるメカニズムを以下考察する。図5に、ループ状線欠陥からループ状ウォールが生成される過程の  $r$  軸方向のねじれ角分布を示す。電圧印加前において線欠陥は高いエネルギーを持つため収縮しようとするが、線欠陥はねじれ角  $\pi$  の不連続性を持つため、線欠陥が収縮した時に通過した領域のねじれ角を  $\pi$  増加させ、捩れ変形に起因する弾性エネルギーを増加させる。すなわち、捩れ変形の弾性エネルギー増加量と線欠陥のエネルギー減少量が釣り合うとき、ループ状線欠陥は消滅することなく  $r = r_0$  近傍で安定化される (図5 (a))。ここで、上下基板間に電界が印加されると、捩れ変形の弾性エネルギーが減少するためエネルギーバランスが崩れる。その結果、線欠陥は欠陥エネルギーを減少させるように収縮をはじめ、最終的に消滅する。線欠陥消滅後、線欠陥がある配向場とはトポロジーが異なって

いるため、電界除去時の線欠陥の生成は抑制される。このとき、 $r = 0$ でねじれ角が  $3\pi/2$  になると予想されるが、液晶の弾性エネルギーはねじれ角の2乗に比例し、強くねじれた状態はエネルギー的に不安定となるため、トポロジ的に等価かつ弾性エネルギーが減少する配向場への緩和が生じると考えられる。ここで、 $r = r_0/2$ の位置にウォールを生成することで、 $r < r_0/2$ の領域でねじれ角を  $2\pi$  減少させ、全体のねじれ角を最大 $|\pi|$ までで抑えることができる (図5(c))。

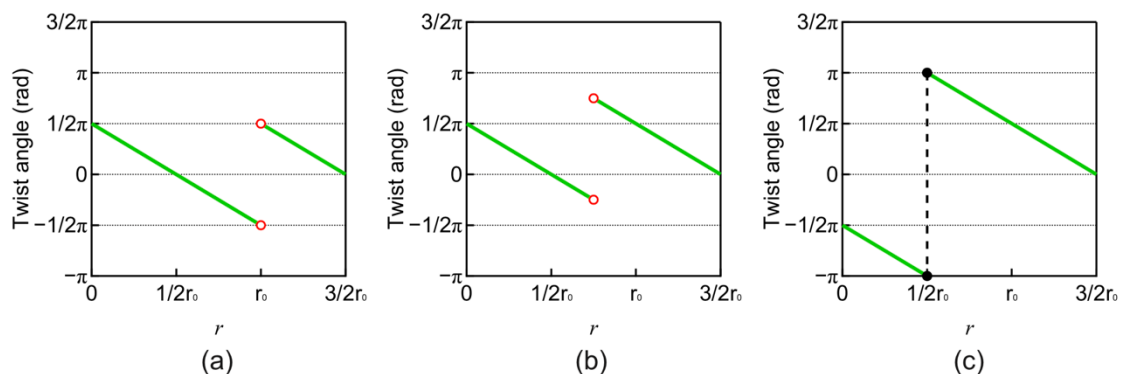


図5 ループ状線欠陥からループ状ウォールが生成されるまでの $r$ 軸に沿ったねじれ角の変遷。(a) ループ状線欠陥が  $r = r_0$ にあるとき、(b) ループ状線欠陥がわずかに収縮したとき、(c) ループが完全に収縮し、電界を除去したときのねじれ角分布図

ウォール欠陥生成後の安定性について理解するために液晶の弾性エネルギーを理論的に解析した。ウォール欠陥は収縮によって弾性エネルギーを減少させる。一方で、収縮によりウォール欠陥が通過した領域はねじれ角が  $2\pi$  増加するため、弾性エネルギーは増加する。これらのエネルギーの総和を考え、ウォール欠陥が安定な位置を解析すると、 $r=51.0 \mu\text{m}$  となり実験値と良い一致を示した。これらのことより、ウォール欠陥が安定化されていることが確認された。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1 . 発表者名 Masanori Ozaki, Koki Imamura, and Hiroyuki Yoshida
2 . 発表標題 Giant Light Deflection based on Electromechanical Modulation of Cholesteric Liquid Crystal Micro-disc in Nonuniform Nematic Elastic Field
3 . 学会等名 18th edition of Optics of Liquid Crystals (OLC 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Masanori Ozaki
2 . 発表標題 Transparent hologram based on patterned cholesteric liquid crystal with self-organized helical nano-structure
3 . 学会等名 Global Nanophotonics 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 SeongYong Cho, Hiroyuki Yoshida, Masanori Ozaki
2 . 発表標題 Photo-patterned Cholesteric Liquid Crystals for Transparent Computer-generated Waveguide Holography with Visible Playback Capability
3 . 学会等名 The 26th International Display Workshops (IDW 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 SeongYong Cho, Hiroyuki Yoshida, Masanori Ozaki
2 . 発表標題 Transparent computer-generated waveguide hologram based on a photo-patterned cholesteric liquid crystal
3 . 学会等名 Optics & Photonics Japan 2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 西川朋紘、大内智弘、吉田浩之、尾崎雅則
2. 発表標題 ネマティック液晶中に誘起されたリバースツイスト欠陥の光減衰機
3. 学会等名 2019年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 張宇賢 (Yuxian ZHANG)、吉田浩之、高橋美咲、尾崎雅則
2. 発表標題 コレステリックブルー相液晶における双晶の構造
3. 学会等名 2019年日本液晶学会討論会
4. 発表年 2019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