

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K04934

研究課題名(和文) マイクロパターン配向処理による新規な双安定型液晶デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of a novel bistable liquid crystal device with a microscale alignment pattern

研究代表者

本間 道則 (HONMA, MICHINORI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授

研究者番号：90325944

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：微細な配向パターンを有するツイステッドネマチック液晶セルにおいて発現する双安定な液晶配向状態において、双安定発現の条件、配向状態および遷移過程について考察した。まず、安定状態および準安定状態の弾性エネルギーが等しくなるような液晶層の厚みを求めた。次に、安定状態および準安定状態における液晶分子配向モデルを提案し、モデルに基づいて弾性エネルギーの厚み依存性を理論的に求めた。さらに、二次元的な配向処理パターンを形成したハイブリッド配向液晶セルを提案し、適切な電圧の印加と熱処理によって双安定性が得られることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年急速に普及しているスマートフォンやタブレットなどの携帯型端末機器は、災害時や緊急時における重要な情報伝達および情報入手ツールとなり得るが、このような用途においては、低消費電力で長時間駆動できる双安定表示デバイスが有用である。本研究では、マイクロパターン配向を導入することによって高い安定性を有する双安定液晶デバイスの実現に向けた基礎特性の考察を行った。本研究によって、双安定性が得られる具体的な素子条件が明らかとなった。この研究成果によって、通常の液晶デバイスにマイクロパターン配向を適用することによる色相スイッチングデバイスの実現の可能性が見いだされた。

研究成果の概要(英文)：We discussed the condition for bistability, the realizable LC molecular orientation states, and the possible transition process in the bistable twisted nematic liquid crystal (LC) cells with microscale alignment patterns. First, we investigated the best combination of the two microrubbing patterns of a pair of substrates. We found an optimum LC layer thickness so that the elastic energies in the stable and metastable states were equal. Furthermore, LC molecular orientation models in the stable and metastable states were proposed. The relationship between the elastic energies in the two states and the LC layer thickness was evaluated theoretically. Finally, the hybrid-aligned-nematic LC cells with the two-dimensional orientation patterns were introduced. As a result, we demonstrated a bistable LC molecular orientation state via an appropriate voltage application and thermal processes.

研究分野：光電子デバイス

キーワード：液晶 マイクロラビング 双安定液晶素子

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、安心・安全・快適な社会の構築のために様々な技術的な需要が増加しており、表示デバイスにおいてもその高性能化・多機能化に関する要求（高精細、高輝度、高速応答、低消費電力、双安定性など）が益々高まっている。中でも、スマートフォンやタブレットなどの携帯型端末機器は、災害時や緊急時においては生命の安全確保に直結する有用な情報伝達ツールとなり得るため、低い消費電力で長時間駆動できる双安定モードでの表示機能が注目されている。今後、個別の用途に応じたよりきめの細かな機能性を有する双安定表示デバイスの需要が予想される。これまでに提案されてきた従来型の双安定液晶デバイスの多くは、液晶層の「弾性」エネルギーがほぼ等しい 2 つの異なる配向状態間のスイッチングに基づくものであった。この既存のアプローチは、液晶に限らず様々な双安定デバイスに共通して見られる特徴である。

一方、申請者はマイクロラビング処理法を用いて、周期が数～数十 μm 程度の微細な配向パターンを有する液晶セルを作製したところ、弾性エネルギーが大きく異なる 2 つの配向状態が同一の液晶セルにおいて容易に実現することを示した。本研究では、それらの 2 つの配向状態間の効率的な切り替えスキームの確立や最適な表示特性のための素子配置の探索などについて考察した。本研究において具体的に取り組んだ研究課題は以下の通りである。

- (1) 双安定性が得られる液晶セルの条件の考察
- (2) 遷移過程の考察と双安定性発現メカニズムの解明
- (3) 高性能な双安定表示デバイスのための素子構造の検討
- (4) 二次元的な配向処理パターンを有する双安定液晶セルの提案

2. 研究の目的

本研究では、微細な配向パターンを有する液晶セルにおいて見出されている双安定性について、液晶分子配向状態とその遷移過程を実験結果に基づいて議論し双安定性発現のメカニズムを考察する。さらに色相変化のコントラストの高い双安定液晶表示デバイスを実現するための位相板の条件について考察する。また、より高性能な双安定液晶表示デバイスの実現を目指して、二次元的な配向処理パターンを導入した結果についても考察する。

3. 研究の方法

本研究における具体的な検討項目ごとにその研究方法を述べる。

(1) 双安定性が得られる液晶セルの条件の考察

種々のセル条件（パターン周期およびセル厚）を有する評価セルを作製し、双安定性が得られるセル条件について考察した。具体的には、2 つの配向状態が共存した液晶セルを作製し、それらの配向状態のドメイン境界の移動速度から、双安定な配向状態が安定的に得られる条件を導いた。

(2) 遷移過程の考察と双安定性発現メカニズムの解明

液晶分子配向モデルの提案および液晶層における弾性エネルギーの見積もりから、双安定性が発現するメカニズムについて定量的な議論に基づいて考察した。

(3) 高性能な双安定表示デバイスのための素子構造の検討

液晶セルに位相板と偏光板を組み合わせたタイプの色相スイッチング素子において、色相の変化のコントラストが最大となるような位相板のリタデーションおよび光学軸の角度について考察した。

(4) 二次元的な配向処理パターンを有する双安定液晶セルの提案

一次元的な配向処理パターンを用いた場合においては、安定状態と準安定状態において液晶分子配向状態がほとんど変化しない領域が存在し、そのためスイッチング前後での色彩の変化に限界があった。そこで、さらに大きな配向状態の変化を実現することを目指し、二次元的な配向処理パターンを導入した場合の双安定性について考察した。

4. 研究成果

上記の具体的な検討項目に関する研究成果は以下の通りである。

(1) 双安定性が得られる液晶セルの条件の考察

本研究において作製した液晶セルにおけるマイクロラビングパターンを図 1 に示す。まず、透明電極として ITO (indium tin oxide) 膜を有したガラス基板に、配向膜としてポリイミド膜 (SE2170, 日産化学工業) を塗布した基板を作製した。その後、曲率半径が $25 \mu\text{m}$ の微小な針を用いて表面を周期的に走査することによってマイクロラビング処理を行った。このとき、図 1 に示すように半円を描くように針を操作した。このようにして処理を施した 2 枚の基板を一定のギャップを

保持した状態で組み合わせ、間に液晶 (K15 もしくは E170, メルク) を注入することによって評価セルとした。

作製した評価セルにおいては、ラビングパターンの向きおよびラビングの向きに応じて、図 1 (a) ~ (d) に示すように 4 つの組み合わせが考えられる。それぞれの組み合わせに応じて双安定な液晶配向状態が実現し得るかどうか実験により確かめた。その結果、ラビングパターンを逆向きに、ラビングの向きを等しく組み合わせた場合 (図 1 (a)) にのみ、液晶の配向状態において外場によって切り替え可能な双安定性が発現することが見いだされた。一方、図 1 (c) および (d) の場合は、液晶層はホモジニアス配向状態をとりエネルギー的に安定であるが、双安定性を示さない。図 1 (a) および (b) の場合にはディスクリネーションの発生を伴ったツイステッドネマチック (TN) 配向状態となる。すなわち、図 1 (c) および (d) よりも大きな弾性エネルギーが蓄積される。さらに、図 1 (a) の場合には 2 つの配向膜のラビングの向きが等しいが、これによって、液晶のダイレクタが基板に対して立ち上がり易くなり、よりエネルギー的な不安定さを増すものと考えられる。以上の理由から、ラビングパターンを逆向き、ラビングの向きを等しく組み合わせた場合において、安定状態から準安定状態への遷移が最も円滑に生じると考えられる。

作製した液晶セルの偏光顕微鏡画像を図 2 に示す。図 1 に示すようなマイクロラビング処理を施すと、2 種類の異なる液晶分子配向状態が得られる。評価セルを加熱し、一旦等方相とした後ネマチック相に転移させると、図 1 (a) に示すような細いディスクリネーションの発生が確認された。このディスクリネーションは $\pm\pi/2$ リバースツイストによるものと考えられる。一方、評価素子に 10 V を印加し除去した場合には図 1 (b) に示すような太いディスクリネーションが確認され、これは $\pm\pi$ リバースツイストによるものと推測される。

評価セルの作製直後にはそれらのディスクリネーションが混在した状態となり、時間の経過とともに $\pm\pi/2$ リバースツイストが $\pm\pi$ リバースツイストに転移する (もしくは逆に $\pm\pi$ から $\pm\pi/2$ に転移する場合もある) 様子が確認された。そこで、それら 2 種類の液晶分子配向状態間の遷移の速度を測定したところ図 3 に示す結果を得た。すなわち、パターン周期に対してセル厚が相対的に大きいときは、 $\pm\pi/2$ から $\pm\pi$ ツイストモードへの遷移が生じ、逆にセル厚が相対的に小さいときは $\pm\pi$ から $\pm\pi/2$ ツイストモードへの遷移が優位となる。

また、2 つの配向状態の遷移の速度はそれらの弾性エネルギーの差に依存すると考えられる。すなわち、2 つの弾性エネルギーが等しいならば遷移の速度は 0 になる。図より、セル厚が $10\ \mu\text{m}$ の場合がこれに相当し、外場の印加により円滑な双安定スイッチングを実現するために適した厚みであると言える。

(2) 遷移過程の考察と双安定性発現メカニズムの解明

生じたディスクリネーションの偏光顕微鏡観察の結果に基づき、図 4 に示すような液晶分子配向モデルが考えられる。図 4 (a) において、上下の基板表面におけるダイレクタは 90° だけ異なっており、バルクの配向はねじれ角が 90° の TN 配向となっている。図の右側および左側領域

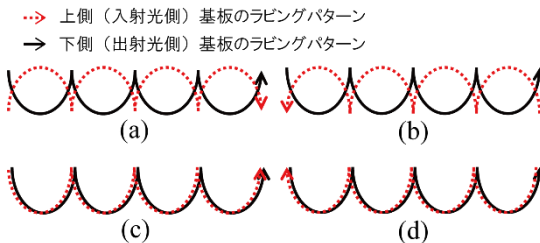
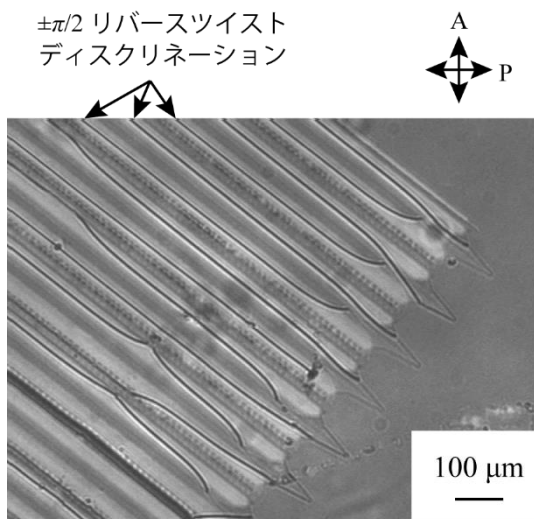
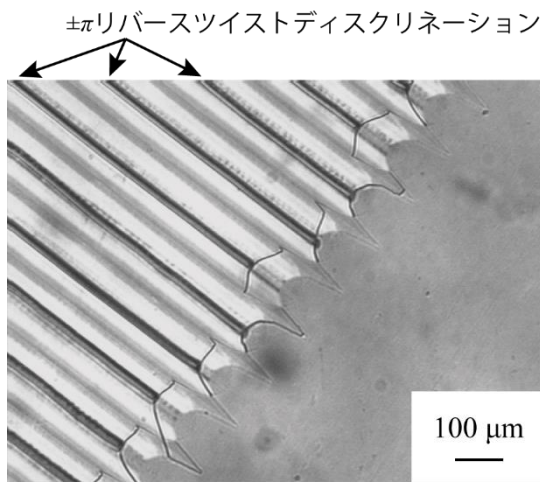


図 1 作製した液晶セルのマイクロラビングパターン。2 枚の基板のラビングパターンを重ねる向きおよびラビングの向きに応じて 4 種類の評価素子を作製した。



(a)



(b)

図 2 (a) $\pm\pi/2$ ツイストモードおよび (b) $\pm\pi$ ツイストモードにおける液晶セルの偏光顕微鏡画像 (セル厚: $20\ \mu\text{m}$, 周期: $80\ \mu\text{m}$, 液晶: K15)。

においてはねじれの向きが逆になっており、その結果として図の中央部に $\pm\pi/2$ リバースツイストディスクリネーションが生じる。一方、図4(b)においては、上下の基板表面におけるダイレクタの方位の差は 180° であり、その結果として $\pm\pi$ リバースツイストディスクリネーションが生じる。ただし、右側領域と左側領域のねじれ角の差が大きいため、大きな弾性エネルギーが狭い領域に集中するのを避けるために、図に示すようにディスクリネーションの幅が太くなると考えられる。

図4に示した液晶分子配向モデルに基づき、「液晶層の弾性」エネルギー密度を定量的に求めた。ここで、「弾性」エネルギー密度の算出においては、「フランクの弾性」エネルギーの式を用いた。また、計算の簡略化のため、スプレイ、ツイスト、ベンド弾性定数がすべて等しい（一定数近似、 $K=6.4\text{ pN}$ ）とおいた。求めた「弾性」エネルギー密度とセル厚の関係を図5に示す。図より、セル厚が大きいときは $\pm\pi$ ツイストモードが優位となり、逆にセル厚が小さいときは $\pm\pi/2$ ツイストモードが得られることが理論的に裏付けられた。

(3) 高性能な双安定表示デバイスのための素子構造の検討

作製した液晶セルを用いて双安定な色相スイッチング素子を試作した例を図6(a)および(b)に示す。ここで、素子の構成は以下の通りである：ポーラライザ（透過軸： 0° ）、液晶セル、位相板（進相軸： 45° ）、アナライザ（透過軸： 90° ）。ここで、液晶としてK15を用いた。位相板のリタデーションは、図6(a)および(b)においてそれぞれ λ および $\lambda/2$ である（ $\lambda=546\text{ nm}$ ）。図において、 $\pm\pi/2$ ツイストモードは液晶セルの加熱・冷却処理により得られた。また、 $\pm\pi$ ツイストモードは10Vの印加・除去により得られた。

図6に示したカラー画像について、HSV空間による色解析を行ったところ、 λ 板を用いた場合（図6(a)）には、 $\pm\pi/2$ ツイストモードでの色相の値は244（赤紫に対応）、 $\pm\pi$ ツイストモードでの色相は206（青紫に対応）となった。すなわち、色相の差は38であった。また、 $\lambda/2$ 板を用いた場合（図6(b)）には、 $\pm\pi/2$ ツイストモードでの色相は141（緑）、 $\pm\pi$ ツイストモードでの色相は98（黄緑）であった。このとき、色相の差は43であり、 λ 板を用いたときの色相の差に概ね等しい。このような大きな色相のスイッチング効果は位相板を挿入しないとき（すなわちリタデーションが0の場合）には得られず、リタデーションが色相の差に大きく影響することを示している。また、色相の差は位相板の進相軸が偏光板の透過軸に対して 45° をなすときに大きくなり、進相軸の設定角度の重要性が確認された。

(4) 二次元的な配向処理パターンを有する双安定液晶セルの提案

図1に示した一次的に分布したマイクロラビングパターンを用いて作製した双安定液晶セルにおいては、図4に示すような $\pm\pi/2$

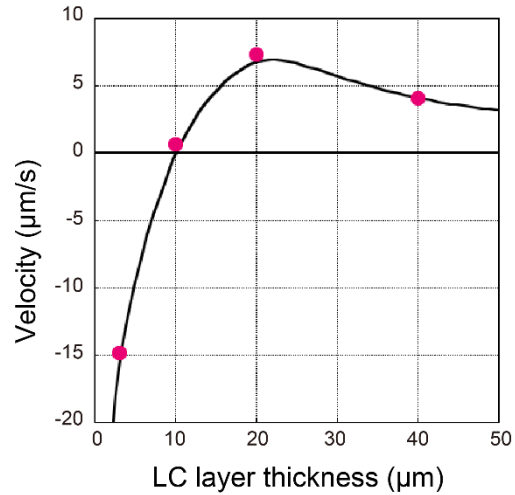


図3 $\pm\pi/2$ ツイストモードと $\pm\pi$ ツイストモードの遷移の速度とセル厚の関係（周期： $80\text{ }\mu\text{m}$ 、液晶：K15）。

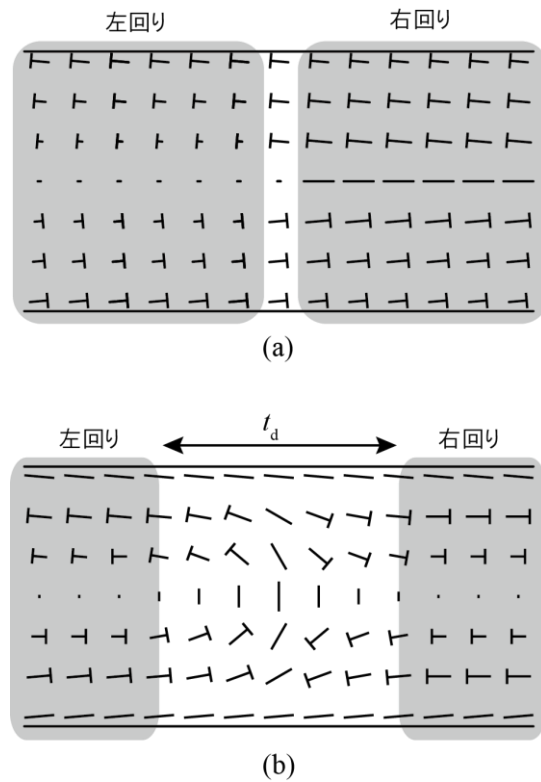


図4 (a) $\pm\pi/2$ および (b) $\pm\pi$ ツイストモードにおける液晶分子配向モデル。

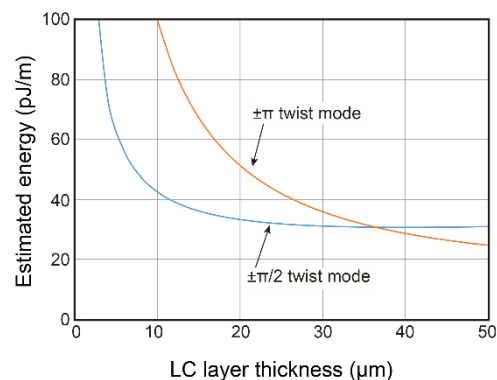


図5 弾性エネルギー密度のセル厚依存性の計算結果。

および $\pm\pi$ ツイストモードと名付けた液晶分子配向状態が得られる。これらの配向状態においては、ディスクリネーション近傍の配向状態は大きく異なるが、ディスクリネーションから離れた領域においては配向状態がほぼ等しくなる。よって、配向状態がほぼ等しい領域においては、双安定スイッチングの前後で色相の変化が小さくなる。この問題を解決するために、2つの配向状態(安定状態および準安定状態)が大きく異なるような、新たなマイクロラビングパターンの導入を試みた。

(図7)ここで、双安定スイッチングの円滑な遷移を期待して二次元的に分布したマイクロラビングパターンを採用した。このパターンでは、単位胞は3つのラビング領域から成り、それぞれの領域を反時計回りに横切るとき、ラビングの向きが単調に増加する($\Psi_R = 0^\circ, 90^\circ$ および 225°)ように設定した。このようなマイクロラビング処理を施した基板と、垂直配向膜(SE7511L, 日産化学工業)を塗布した基板を組み合わせることによって液晶セルを作製した。なお、ネマチック液晶としてE170(メルク)を用いた。

作製した液晶セルに100 V (1 kHz) を印加・除去したところ図8に示すような配向状態の遷移が観察された。印加電圧の除去直後にはブロッホウォールに類似の欠陥構造が得られたが、10秒経過後(図8(b))にはその欠陥構造が崩壊し、単位胞に対応するサブドメインの収縮が生じた。それらのサブドメインは最終的には消滅し、均一な配向状態が得られ、配向遷移が完了した。(図8(c))現時点において、安定状態および準安定状態の詳細な液晶分子配向状態は明らかになっていないが、通常ハイブリッド配向状態(安定状態)とリバースチルトを形成したハイブリッド配向状態(準安定状態)の間での遷移が生じていると推測している。 $\pm\pi/2$ および $\pm\pi$ ツイストモード間の遷移を利用する場合と異なり、大部分の領域において配向状態が大きく切り替わるため、今後、さらに色相変化の大きな双安定表示素子の実現が期待できる。

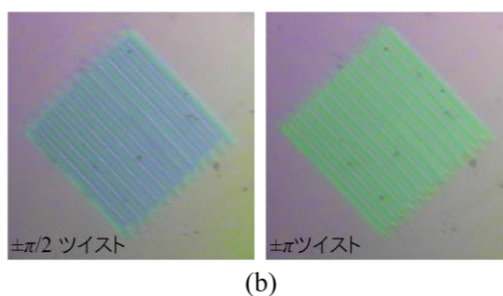
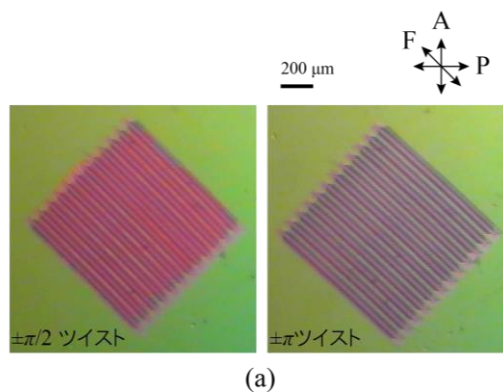


図6 試作した色相スイッチング素子の偏光顕微鏡画像。(a) λ 板および(b) $\lambda/2$ 板を用いた場合。

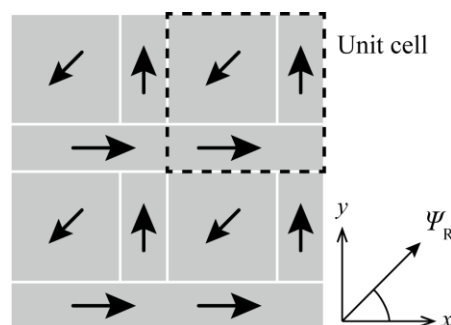


図7 二次元的なマイクロラビングパターンを有する液晶セル。

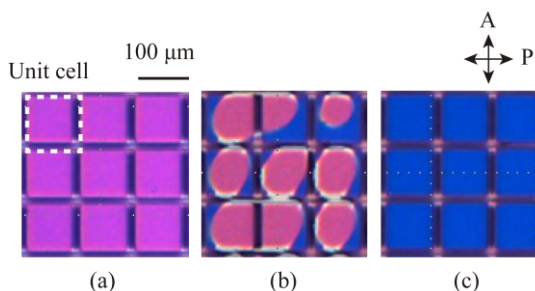


図8 試作した液晶セルの偏光顕微鏡画像 (a) 初期状態(電圧印加前), (b) 遷移時(電圧除去10秒後), (c) 遷移完了時(電圧除去60秒後)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Michinori Honma, Natsuki Takahashi, and Toshiaki Nose	4. 巻 57
2. 論文標題 Simple Stokes polarimeter using a liquid crystal grating with ternary orientation domains	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 10183-10190
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/AO.57.010183	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 Honma Michinori, Nose Toshiaki	4. 巻 10941
2. 論文標題 Optical properties of two-dimensional liquid-crystal gratings fabricated by microrubbing and their application to Stokes polarimetry	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 109410S
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2515508	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 本間道則, 能勢敏明	4. 巻 21
2. 論文標題 広がるマイクロパターン液晶デバイスの魅力	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 液晶	6. 最初と最後の頁 361-364
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 Michinori Honma, Wataru Toyoshima, and Toshiaki Nose	4. 巻 120
2. 論文標題 Bistable liquid crystal device fabricated via microscale liquid crystal alignment	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 143105
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.4964746	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 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Michinori Honma and Toshiaki Nose
2. 発表標題 Optical properties of two-dimensional liquid-crystal gratings fabricated by microrubbing and their application to Stokes polarimetry
3. 学会等名 Photonics West 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高橋夏輝, 本間道則, 能勢敏明
2. 発表標題 3つの液晶配向領域から成る二次元回折格子の光学的特性
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 安藝諭宇馬, 本間道則, 能勢敏明
2. 発表標題 マイクロラビング処理法により作製したマイクロパターン液晶セルおける分子配向特性
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Michinori Honma, Tatsuya Miura, and Toshiaki Nose
2. 発表標題 Optical Properties of Liquid Crystal Gratings with Ternary Orientation Domains for Stokes Polarimetry
3. 学会等名 Advanced Photonics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Michinori Honma and Toshiaki Nose
2. 発表標題 Bistability in Liquid Crystal Gratings with Three Orientation Domains
3. 学会等名 Optics of Liquid Crystals (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間道則, 能勢敏明
2. 発表標題 微細な配向処理パターンを有するハイブリッド配向液晶セルにおける双安定特性
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

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----