

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13950

研究課題名(和文) 異方性構造体と液晶弾性場の協奏によるメモリー性高速応答反射型ディスプレイ

研究課題名(英文) Competitive contribution of dielectric and elastic free energies to rotation of anisotropic micro-particles dispersed in liquid crystal host

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、液晶性モノマーを光重合することによって、光学的・誘電的異方性を有する任意形状のマイクロ構造体を作製し、それを液晶配向場内においたときに期待される構造体自体の誘電異方性と構造体周囲の液晶弾性場の協奏による電界応答挙動の検討を行った。その結果、粒子が負の誘電異方性を有し、その粒子自体の寄与と周囲ホスト液晶の誘電異方性の寄与とが拮抗することにより、粒子の特異な振る舞いが観測されることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We demonstrated electric field-induced rotation control of liquid crystal (LC) micro-particles in a LC host, and unravel its mechanism by theoretically calculating the contributing free energies. Cuboid-shaped micro-particles with inner molecular alignment along the long axis are fabricated via two-photon excited direct laser writing, and dispersed in a dual-frequency LC to be electrically driven by a voltage applied in the in-plane direction of the cell. Under an electric field, the particles rotate either clockwise or anticlockwise to align the inner molecular alignment parallel or perpendicular to the applied field. The complex motion is found to be the result of a delicate balance between the elastic energy of the host LC around the particle and the electrostatic energies of the host and the particle.

研究分野：電子工学

キーワード：液晶 光重合 誘電異方性 弾性場 マイクロ粒子

1. 研究開始当初の背景

液晶ディスプレイは大画面、高品位、高精細の表示を可能として、今日の表示素子として成熟したと言える。一方、液晶ディスプレイに残された課題は、アンビエントデバイスの基盤となる超省電力ディスプレイに必須のメモリー性を有する反射型表示モードの実現である。我々は、新しい反射型ディスプレイとして、微小反射体を液晶中に分散させたデバイスを提案し、その実現に向けて研究を進めてきた。特に、光重合性液晶により作製した分子配向性マイクロ粒子（フレーク）を反射構造体として用いることにより、構造体周囲に発生する複雑な弾性場により、メモリー性応答も期待できる。

光重合性液晶より作製した分子配向性マイクロ粒子は、内部の分子配列に基づく屈折率、誘電率などの異方性を有する。これまでも、等方性媒質中の異方性微小粒子の電界などの外場刺激に対する応答に関する研究が行われてきた。一方、我々は、分子配向性マイクロ粒子を液晶中に導入した場合に、粒子表面と周囲のホスト液晶との強い相互作用とホスト液晶の弾性場の効果によって、ホスト液晶と粒子内分子配向を一致させる向きに粒子が配列することを見いだした。

2. 研究の目的

本研究では、ホスト液晶内に分子配向性マイクロ粒子を導入し、そのセル面内電界に対する応答特性を解析検討した。このとき、分子配向性マイクロ粒子自体の誘電異方性トルクと、周囲のホスト液晶の誘電トルクと弾性場によるトルクが複雑に作用するものと考えられる。そこで、特に、ホスト液晶として印加電圧の周波数によって誘電異方性  $\Delta\epsilon$  の符号および大きさを制御可能な二周波駆動特性を有する液晶を採用し、それぞれのトルクの寄与を分離して解析を行った。さらに、得られた実験結果の解析に、マイクロ粒子の周囲のホスト液晶の弾性ひずみを三次元的に解析し検討を行った。

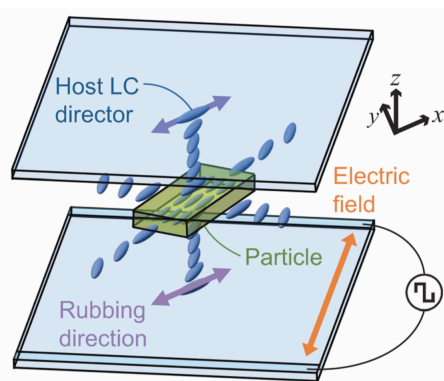


図1 サンドイッチセル内のホスト液晶中に導入したマイクロ粒子

3. 研究の方法

図1に作製した素子の構成を示す。光重合

性液晶 (Merck, RMM141C) に光重合開始剤 (TCI, IRGACURE 369) を 2.8wt% 混合した液晶試料を用意した。本試料は液晶相を示す 30°C において二周波駆動特性を有しており、クロスオーバー周波数 ( $f_c$ ) は 17.5 kHz である。ラビング処理を施した楕円電極付きガラスサンドイッチセル内に液晶試料を封入し、一軸配向を確認のうえ、二光子励起光造形法によりセル内に浮遊したマイクロ粒子 ( $7 \times 3 \times 1 \mu\text{m}^3$ ) を作製した。このとき、粒子内部の分子配向方向と粒子の長軸方向を一致させた。30°C において、ラビング方向から 45° 方向に矩形波交流電界を印加したときのマイクロ粒子の応答を偏光顕微鏡下で観察した。また、マイクロ粒子まわりのホスト液晶に誘起される三次元的な配向変形を考慮したモデルにより粒子の電界応答を解析した。

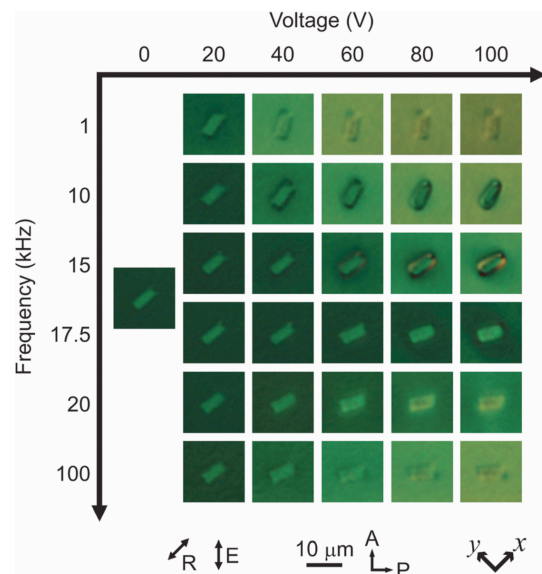


図2 種々の電圧および周波数の電圧を印加したときのマイクロ粒子の方位を示す偏光顕微鏡写真

4. 研究成果

セル面内に周波数および強度の異なる電界を印加したときのマイクロ粒子の偏光顕微鏡像を図2に示す。印加電界強度および周波数に依存して、粒子の回転方向および回転角度が変化していることがわかる。この顕微鏡観察の結果を基にして、 $x$  軸(ラビング方向)から  $y$  軸方向へ回転する向きを正と定め、粒子の回転角度を評価した (図3丸印)。 $f_c$  から十分に離れた周波数である 1 kHz、100 kHz の電界印加時には、粒子はホスト液晶の応答と同一方向への回転をした。すなわち、1kHz ではホスト液晶は  $\Delta\epsilon > 0$  であり正の向きに回転する。一方、100kHz では  $\Delta\epsilon < 0$  となり負の方向に回転する。これは、ホスト液晶の誘電異方性の絶対値が大きく、粒子がホスト液晶に駆動される力が支配的となっているためと考えられる。

一方、印加電界周波数が  $f_c$  近傍である場合には、異なる粒子の挙動が観測された。周波

数 10 kHz の電界を印加した場合、粒子の回転角度は低電界時には正方向に回転するが、6 V/ $\mu\text{m}$  以上の電界では回転方向が逆転した。さらに、周波数 15 kHz、20 kHz の場合には、ホスト液晶がそれぞれ正の方向および負の方向へ回転するにもかかわらず、マイクロ粒子はいずれの周波数においても負の方向へ回転した。また、周波数 17.5 kHz、すなわちホスト液晶の誘電異方性  $\Delta\epsilon$  が 0 となる  $f_c$  の電界を印加した場合においても、マイクロ粒子の回転が確認された。これは、ホスト液晶が電界に対して応答しない状態にもかかわらず、マイクロ粒子が回転することを示している。これらの挙動は、粒子の誘電異方性  $\Delta\epsilon$  が負であることを示唆するとともに、粒子自体の誘電異方性に基づく回転トルクがホスト液晶配向場の歪みによる回転トルクを上回ったことを示唆している。

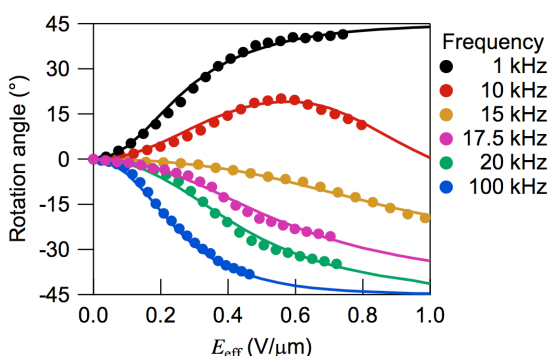


図3 マイクロ粒子の回転角の実効電界依存性. 丸印: 実験結果, 実線: シミュレーション結果

以上の観測結果を理解するために、粒子まわりのホスト液晶の三次元配向変形を考慮した理論モデルを用いてマイクロ粒子の電界応答特性を解析した。ここで、マイクロ粒子の誘電異方性について負の値を仮定し、さらに楕円電極間にかかる電界として、ホスト液晶のダイレクター場の分布を考慮した実効電界強度 ( $E_{\text{eff}}$ ) を仮定した。その結果、図3の実線に示すように、実験で得られたマイクロ粒子の回転角度の印加電界依存性がよく再現された。さらに、マイクロ粒子まわりのホスト液晶に誘起される弾性歪は、印加電界に応じて、それぞれ異なる様相を呈することも明らかとなった。

次に、マイクロ粒子の動的な光学応答について検討した。ここでは、光重合性液晶として RMS03-013C (Merck) を用いてマイクロ粒子を作製し、作製した粒子をネマチック液晶 5CB (Merck) 内に導入して実験を行った。図4に、マイクロ粒子および液晶の応答時間の電界強度依存性を示す。粒子サイズの減少に伴い、ホスト液晶単体の応答時間に近づいている。サイズ 10 $\mu\text{m}$  の粒子の場合、過去の報告と比べて 1000 倍程度高速な応答 ( $\sim 100\text{ms}$ ) を達成できた。また、液晶と同様に、立ち上がり時間は電界強度の増加に伴い速くなる

が、立下り時間はほぼ一定であった。これらの実験結果を解析するために、一次元モデルによりマイクロ粒子の応答機構の解析を行った。すなわち、粒子と基板間のホスト液晶の弾性歪効果のみを考慮した。また、粒子回転の駆動力は、粒子自体の誘電異方性に基づく誘電トルク、および粒子表面と基板表面の規制力により誘起されたホスト液晶中の弾性歪に起因する弾性トルクの双方に由来すると仮定した。図4の実線に示すように、実験結果をよく再現していることがわかる。

さらに、マイクロ粒子の回転におよぼす誘電および弾性トルクの寄与を解析した結果、誘電トルクが弾性トルクよりも支配的であることが明らかとなった。また、マイクロ粒子の立ち上がり時の応答は、ホスト液晶の場合とは異なる電界依存性を示し、これが誘電トルクと弾性トルクの大きさの比で決まることを明らかにした。

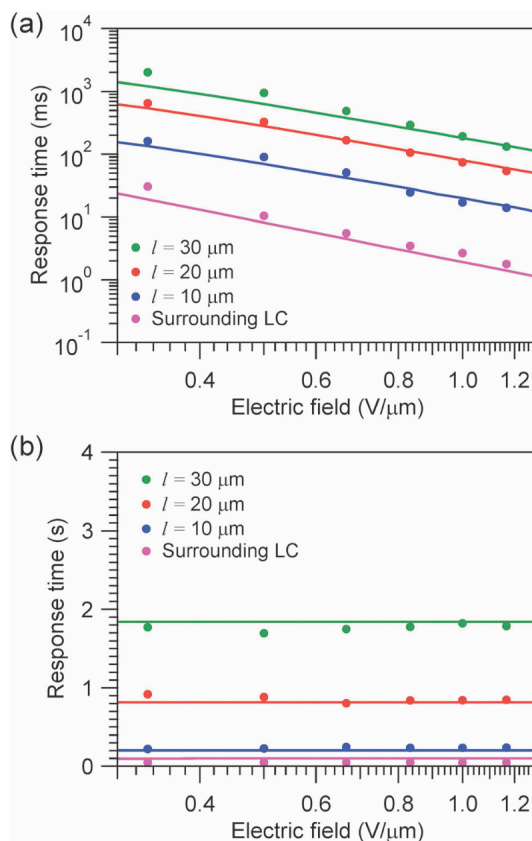


図4 種々の大きさのマイクロ粒子とホスト液晶 (5CB) に電界を印加したときの応答時間の電界依存性. (a) 立ち上がり時間, (b) 戻り時間. 丸印: 実験結果, 実線: シミュレーション結果

## 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 3 件)

- ① Koki Imamura, Hiroyuki Yoshida and Masanori Ozaki, "Field strength and

frequency tunable, two-way rotation of liquid crystal micro-particles dispersed in a liquid crystal host”, *Soft Matter*, 査読有, vol.13, 2017, 印刷中, DOI: 10.1039/c7sm00535k

- ② Koki Imamura, Hiroyuki Yoshida and Masanori Ozaki, “Field-induced dynamics of liquid crystal/liquid crystal micro-particle composites”, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 査読有, vol.647, 2017, pp.125-131, DOI: 10.1080/15421406.2017.1285097
- ③ Koki Imamura, Hiroyuki Yoshida and Masanori Ozaki, Reversible switching of liquid crystal micro-particles in a nematic liquid crystal, *Soft Matter*, 査読有, vol.12, 2016, pp.750-755, DOI: 10.1039/C5SMO1956G

[学会発表] (計 8 件)

- ① K. Imamura, “Field-induced orientation of liquid crystal micro-particles in a dual-frequency liquid crystal host”, 3<sup>rd</sup> Asian Conference on Liquid Crystals (国際学会), 2017年2月13日～15日, Tainan (Taiwan)
- ② 今村弘毅 「液晶配向場中における分子配向性マイクロ粒子の電解印加による運動制御」, 平成28年電気関係学会関西支部連合大会, 2016年11月22日～23日, 大阪府立大学(堺市)
- ③ K. Imamura, “Electrical Switching Behavior of Liquid Crystal Micro-Particles in Nematic Liquid Crystals”, 20<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Display Material and Devices (国際学会), 2016年10月19日～21日, Shanghai (China)
- ④ 今村弘毅 「二周波駆動液晶中における分子配向性マイクロ粒子の電解印加による方位制御」, 2016年日本液晶学会討論会, 2016年9月5日～7日, 大阪工業大学(大阪市)
- ⑤ K. Imamura, “Reversible Field-Induced Switching of Anisotropic Micro-Particles in Nematic Liquid Crystals”, 26<sup>th</sup> International Liquid Crystal Conference (国際学会), 2016年7月31日～8月5日, Kent (USA)
- ⑥ 今村弘毅 「二周波駆動液晶中における分子配向性マイクロ粒子の電解応答特性」, 第304回電気材料技術懇談会, 2016年7月14日, 三菱電機(尼崎市)
- ⑦ K. Imamura, “Static and Dynamic Electro-Optic Properties of Liquid Crystal Micro-Particles in a Nematic Liquid Crystal Host”, 8<sup>th</sup> Japanese-Italian Liquid Crystal Workshop (国際学会), 2016年7月5日～7日, 京都市国際交流会館(京都市)

- ⑧ 今村弘毅 「液晶配向場中における分子配向性マイクロ粒子まわりの面内弾性歪」, 2016年第63回応用物理学会春季学術講演会, 2016年3月19日～22日, 東京工業大学(東京都)

## 6. 研究組織

### (1) 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