

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 12 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760265

研究課題名(和文)機能性色素を添加した液晶中での空間光ソリトンの形成と制御

研究課題名(英文)Formation and Control of Spatial Optical Solitons in Dye-Doped Liquid Crystals

研究代表者

佐々木 友之(Sasaki, Tomoyuki)

長岡技術科学大学・その他部局等・准教授

研究者番号：90553090

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：液晶中での高効率な空間光ソリトンの形成と外場による制御を目指し、色素ドープ低分子ネマチック液晶を用いて作製した液晶セル中の光伝搬特性を検討した。入射光の偏光方位と液晶の配向方向が直交する場合において、光強度が高くなるにつれて回折による光ビームの広がりが緩和される様子の確認されたことから、色素ドープ液晶中での空間光ソリトン形成の可能性が示された。温度制御下での伝搬特性を調査した結果、今回観察された非線形性の起源は、色素の光吸収によって液晶中に温度分布が生じたことによるものと推察された。また、ネマチック相と等方相間の屈折率差に起因すると思われる光の閉じ込め現象も観測された。

研究成果の概要(英文)：We investigated light propagation in dye-doped nematic liquid crystals in order to form spatial optical solitons in liquid crystalline materials with high efficiency and to control their propagation. As a result, nonlinear soliton-like propagation was observed in the dye-doped liquid crystals when the polarization azimuth was orthogonal to the orientation direction of the liquid crystal. We clarified that the observed nonlinearity is due principally to the photothermal effect, which was induced by light absorption of the dye and the resultant temperature distribution in the material. In addition, we observed a light confinement effect related to the difference in refractive indices between nematic and isotropic phases.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電子デバイス・電子機器

キーワード：空間光ソリトン 液晶 色素 光熱効果

### 1. 研究開始当初の背景

空間光ソリトン(以下、単に「ソリトン」と記す)は、ビームの空間的形狀が変化せずに伝搬する光波であり、線形な効果である回折と、非線形光学効果である自己収束が打ち消し合うことで生じる。光導波路のようにあらかじめ微細な領域で屈折率を制御した構造を用いずとも、低損失での光伝送を可能にすることから、時間ソリトンとともに、光通信や光インターコネクトの分野で注目された研究テーマとなっている。デバイスへの応用を考える上では、低強度の光に対するソリトン形成が要求されるため、高い非線形屈折率と透明性を併せ持つ材料の探索が続けられている。

近年、液晶材料中でのソリトン形成に関する研究が行われ始めている。液晶は、ディスプレイ素子用材料という輝かしい応用実績を有する一方で、非線形光学材料としても魅力的である。例えば、棒状分子から成るネマチック液晶は、偏光の照射によって外部電圧の印加によるフレデリクス転移のような配向変化の生じることが知られている。また、この効果(光フレデリクス転移)に起因する非線形感受率は、一般的なガラス材料と比べて8桁程度大きい場合があることも確かめられている。即ち、液晶中では高効率な(低光強度での)ソリトン形成が期待される。また、液晶中でのソリトンは、別途外部電圧の印加などによりその伝搬を制御できると考えられ、応用上新たな展開も期待されるとともに、光学的異方性媒質中でのソリトン発生、液晶分子と光の相互作用など、学術的見地からしても興味深いテーマを内包している。

一方で、液晶の非線形光学効果については、ソリトン形成に目的を限らず、これまでに多くの研究が行われてきている。例えば、液晶中に少量の色素を添加することで、非線形感受率が大幅に増大することが知られており、可変焦点レンズなどの機能性光学素子への応用が期待されている。しかしながら、これまでに行われている液晶中でのソリトン形成に関する研究は、光フレデリクス転移と外部印加電圧による配向変化を併用して回折による広がりを補正するものがほとんどである。液晶が示す非線形光学効果の多様性を鑑みるに、外部印加電圧に頼らずともより高効率にソリトンを形成できる可能性は十分にあると思われる。

### 2. 研究の目的

上述のような背景のもと、本研究では、液晶中での高効率ソリトン形成とその外場制御を目的とし、機能性色素を添加した低分子ネマチック液晶中における非線形な光伝搬特性に関する実験的検討を行った。また、観察された非線形性の起源を明らかにすべく、光伝搬の偏光依存性、温度依存性等についても調査した。

### 3. 研究の方法

色素ドープ液晶としては、低分子ネマチック液晶 4-pentyl-4'-cyanobiphenyl (5CB, Wako) に対し、アゾ色素 *N*-ethyl-*N*-(2-hydroxyethyl)-4-(4-nitrophenylazo)aniline (Disperse Red 1; DR1, Aldrich) を 0.5wt%の割合で添加したものをを用いた。Polyvinyl alcohol (PVA) 配向膜を塗布した上でラビング処理を施した2枚のガラス基板を、厚さ 30  $\mu\text{m}$  のスペーサーを介して重ね合わせ、その空壁へ上記の色素ドープ液晶を注入することにより、ホモジニアス配向の液晶セルを作製した。作製したセルの透過スペクトルの測定結果を図1に示す。参考までに色素を添加しない5CBを用いて作製したセルに対する測定結果も示してあるが、DR1を添加することで、波長 500 nm 付近の吸収量の増加することが分かる。本研究においては、このセルをスラブ型導波路とみなして光を結合させるため、結合端面に、メニスカスの形成や配向の乱れを防ぐため、PVA 配向膜を塗布した上でラビング処理を施したガラス基板を取り付けた(図2参照)。なお、3枚の基板におけるラビング方向はそれぞれ平行となるようにした。このセルへ、図2に示す実験配置のもとで、波長 633 nm の直線偏光のレーザー光を結合させ、セル内部での光伝搬の様子を顕微鏡を用いて観察した。なお、セルの温度はペルチェ素子を用いて制御した。

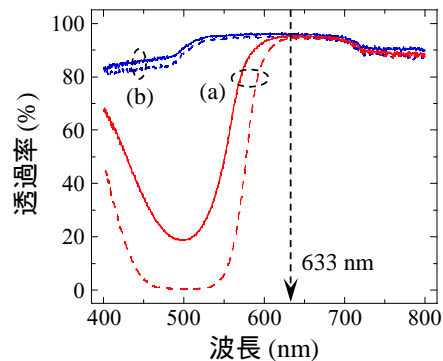


図1 液晶セルの透過スペクトル。(a)は色素ドープ液晶、(b)は色素をドープしない液晶。実線はダイレクタと直交した直線偏光、破線はダイレクタと平行な直線偏光に対する測定結果。

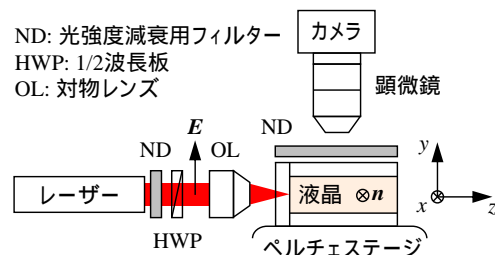


図2 実験配置図。NDにより光強度を、HWPにより偏光方向を変化させて光伝搬を観察。

#### 4. 研究成果

結合させる光の強度及び偏光状態を変化させたときの光伝搬の観察結果を図3に示す。但し、ステージの温度は26℃とした。光波の偏光状態によらず、伝搬の様子は光強度によって変化した。即ち、非線形な光伝搬が観測された。入射直線偏光の電界ベクトル $E$ と、液晶の配向方向(ダイレクター) $n$ が平行な場合、光強度を高くしてもソリトンの形成は確認されず、光強度が高くなると、回折によるビームの広がり度合いも大きくなるような傾向が観測された。一方、 $E$ と $n$ が直交している場合、光強度を高くするにつれ、ビームの広がりが抑制される場合のあることが分かった。図4にビームの伝搬距離と光強度の関係の測定結果を示す。但し、ビームの伝搬距離は、ビーム中心位置の強度が、ビーム入射位置における中心位置強度の90%までに減衰する距離とした。図4に示されるように、色素ドープ液晶セルにおいては、光強度が6 mWくらいまでは、光強度が高くなるにしたがって、伝搬距離も長くなることが確認された。また、6 mW程度よりさらに光強度を上げた場合、図4にも示したように、光伝搬の様子が著しく変化し、ある位置でビームが急激に広がるような現象が見られた。一方で、図4には、色素を添加しない5CBを用いて作製したセルにおける測定結果も示してあるが、この場合、色素ドープ液晶とは異なり、顕著な非線形性は見られなかった。従って、今回観察された非線形な光伝搬は色素の添加に起因

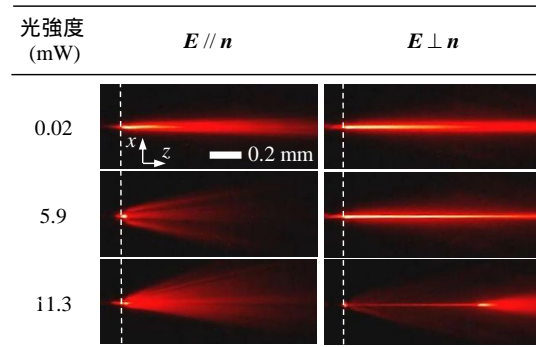


図3 光伝搬の観察結果。白い破線より右側が液晶領域。

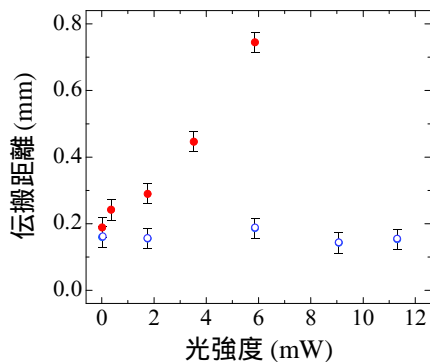


図4 伝搬距離の光強度依存性。赤いプロットが色素ドープ液晶、青いプロットが色素をドープしない液晶での測定結果。

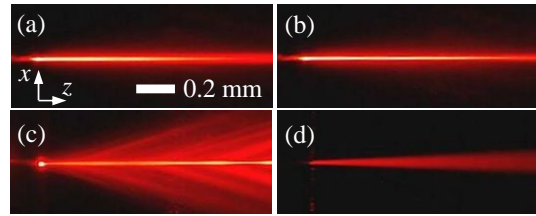


図5 光伝搬の温度依存性(入射光の電界ベクトルは配向方向と直交)。(a)20、(b)26、(c)32、(d)36。

するものと考えられる。

本研究で用いた低分子ネマチック液晶 5CB の常光或いは異常光屈折率は、ネマチック相と等方相の転移温度(NI 転移温度)である35℃程度付近において、温度上昇とともに、それぞれ著しく増加或いは減少する。本実験において、入射ビームのプロファイルはガウシアンであるため、もし光吸収により温度分布が生じると考えると、 $E // n$ の場合は凹レンズのような屈折率分布が、 $E \perp n$ の場合は凸レンズのような屈折率分布がそれぞれ形成されることになる。即ち、 $E \perp n$ の場合には自己収束効果が得られる可能性がある。実験においても $E \perp n$ に対してビームの広がりが抑制される様子が見られたため、今回観察された非線形性の起源は、光吸収に伴う温度上昇(光熱効果)に起因することが考えられる。なお、 $E // n$ の場合における非線形性も、光熱効果に基づく自己位相変調による回折によるものと推察される。そこで、光強度は一定とし、温度を変化させたときの光伝搬の観察を行った。 $E \perp n$ の場合に対する結果を図5に示す。温度を上げることで、光強度を上昇させたときと同様、自己収束の効果(図5(b))及び光伝搬の様子の著しい変化(図5(c))が観察された。また、温度をNI転移温度以上にした結果、非線形性はほとんど見られなくなり、ビームは比較的緩やかに広がりながら伝搬した。以上のことから、本研究で観測された非線形光伝搬の起源は、色素ドープ液晶の光熱効果にあるものと推察している。

なお、図3において光強度が11.3 mWの場合の $E \perp n$ に対する観察結果や、図5(d)に示したような結果は、光強度がある程度高い場合、ビーム伝搬に沿って部分的にネマチック相から等方相への転移が生じ、相間の屈折率差によってビームがある程度閉じ込められて伝搬している様子を表していると考えられる。特に図3においては、伝搬したビームがある位置で急激に散乱しているが、これは伝搬による光減衰のため、光強度が、等方相へ転移させるためのしきい値を下回ったことにより、その部分において等方相とネマチック相の境界が生じていることを示す結果だと考えられる。このような相の違いによる光の閉じ込めは、調べた限り報告されていない新規の結果である。本研究のソリトン形成とは少し目的を異にするが、自己形成導波路等にも展開可能な応用上興味深い現象であ

と思われる。

以下に、本研究で得られた研究成果をまとめる。(一)アゾ色素を少量添加した低分子ネマチック液晶中で非線形な光伝搬を観察した。(二)非線形性の起源は光熱効果に基づく屈折率変化であると推察された。(三)光の偏光状態によっては自己収束の効果が見られ、数 mW と比較的低強度の光に対してソリトン形成の可能性が示された。(四)相の違いにより光が閉じ込められて伝搬する新規な現象も観察された。

#### 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5件)

T. Sasaki, T. Shoho, K. Kawai, K. Noda, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Effects of plasticizer on the transient diffraction properties of polarization holographic gratings made from polarization-sensitive polymeric films," Japanese Journal of Applied Physics, in press, 査読有

T. Sasaki, T. Shoho, K. Noda, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Temporal characteristics of polarization holographic gratings formed in a photosensitive polymeric film containing *N*-benzylideneaniline derivative side groups," Journal of Applied Physics, Vol. 115, pp. 153102-1-5, 査読有

T. Sasaki, E. Nishioka, K. Noda, M. Kondo, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Analysis of nonsinusoidal surface relief structures formed by elliptical polarization holography on azobenzene-containing polymeric films," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 53, pp. 02BB06-1-5, 2014, 査読有

T. Sasaki, M. Izawa, K. Noda, E. Nishioka, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Temporal formation of optical anisotropy and surface relief during polarization holographic recording in polymethylmethacrylate with azobenzene side groups," Applied Physics B, Vol. 114, pp. 373-380, 2014, 査読有

T. Sasaki, K. Miura, O. Hanaizumi, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Observation of optical soliton-like propagation in dye-doped nematic liquid crystals with homogeneous alignment," Key Engineering Materials, Vol. 596, pp. 139-143, 2014, 査読有

[学会発表](計3件)

佐々木友之、小歩岳史、野田浩平、川月喜弘、小野浩司、側鎖に4-mthoxy-N-bnzylideneanilineを有する光架橋性高分子液晶への偏光ホログラム記録、第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月19日

T. Sasaki, M. Izawa, E. Nishioka, K. Noda, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Effects of photoinduced optical anisotropy on holographic surface relief gratings recorded in azobenzene-containing polymer films," The 4th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies, June 18, 2013

佐々木友之、小野浩司、三浦健太、花泉修、川月喜弘、色素ドーブネマチック液晶中における空間光ソリトンの観察、2012年日本液晶学会討論会、2012年9月6日

[その他]

ホームページ等

<http://optik.nagaokaut.ac.jp>

<http://www.nagaokaut.ac.jp/j/annai/NUT-toprun/sasaki0.html>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

佐々木 友之 (SASAKI, Tomoyuki)

長岡技術科学大学・産学融合トップランナー養成センター・産学融合特任准教授

研究者番号：90553090