

令和元年6月18日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14663

研究課題名(和文)光機能性液晶材料を用いた偏光アドレス型空間光変調と特異光波発生システムの創出

研究課題名(英文) Development of optical vortex generator based on the polarization address type spatial light modulation using photo-reactive liquid crystal polymers

研究代表者

坂本 盛嗣 (Sakamoto, Moritsugu)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：60757300

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：光機能性液晶へのベクトルビーム照射によって1軸配向アゾ色素高分子液晶複合体中に形成される螺旋状の異方性構造体に基づいた新しい光渦の発生装置を提案した。光渦発生における異方性構造体の配向分布依存性を数値計算により詳細に解析し、高効率且つ広帯域な波面変換特性が得られる条件を見出した。実際にベクトルビームと等価な偏光分布を持つ光を光機能性液晶へと投影するシステムを構築し、偶数次・奇数次の光渦を発生できることを実証すると共に、トポロジカルチャージの切り替えが可能であることを示した。更に、切り替え特性の高速化に向けた検証を行い、いくつかの知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

その特異な光学的性質が注目され、近年飛躍的に応用の幅を広げている光渦の実験研究では、特異光波を発生させるための位相の空間制御デバイスが必要不可欠であり、とりわけその光制御の柔軟性・広帯域性・偏光選択性は特異光波の応用の可能性を拡大する基盤要素となる。本研究成果は、我々が提案する光機能性液晶材料を用いた偏光アドレス型の光渦発生装置が、これらの要素を併せ持つ位相制御装置として機能する事を理論的・実験的に示したものであり、今後の光渦の応用研究の発展に貢献するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：We proposed and developed new method for generating optical vortices by using three-dimensional twisted anisotropic structure fabricated in the uniaxially-aligned azo-dye-doped liquid crystal polymer composite by illuminating the vector beam. Alignment structure dependencies on optical vortex generation were numerically investigated, and we found that a purity and conversion efficiency of the optical vortex generated from the structure can be improved by changing the liquid crystal alignment distribution. Optical vortex generator was assembled by using scanning type polarization pattern illuminator consisting of polarization modulator and MEMS mirror. Generation of odd and even numbered order vortices were experimentally demonstrated. Also, we tried to accelerate response time of azo-dye-doped liquid crystal by investigating temperature dependency and composition ratio of materials.

研究分野：応用光学

キーワード：光渦 空間光変調 ベクトルビーム 光機能性液晶

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光渦と呼ばれる位相特異点を有する特殊な光波について、ドーナツ状の強度分布や軌道角運動量を運搬するなどの特異な光学的性質が注目を集め、加工分野・計測分野・通信分野など多岐に亘って応用に向けた研究が進められている。これらの応用研究においては、光渦を発生させる為の何らかの空間光変調素子・装置が必要となるが、これには現在、液晶空間光変調器や軸対称偏光素子が主に利用されており、それぞれがその位相変調原理に基づく特徴を有している。例えば前者の液晶空間光変調器は、外部電場で液晶の実行屈折率を画素単位で制御することで、光渦の発生を実時間で任意に制御することができる。この性質は、モードのスイッチングが必要な通信分野への応用に活用されている。一方で後者の軸対称偏光素子は、偏光変化に伴う幾何学的位相により位相を制御するものであり、広帯域な波面変換が可能・偏光選択的な光制御が可能等の特徴を持つ。この性質は、物質加工における光渦の超短光パルス化や偏光多重による量子通信の分野で活用されている。

液晶空間光変調器と軸対称偏光素子の間には互いに相反の関係にある短所も存在する。例えば、液晶空間光変調器は媒質透過の際の光路長差で波面を変化するため物質の波長分散が避けられず、広帯域光に対しては複雑な分散補償系が不可欠となる。また、偏光選択的な位相制御が容易ではない。一方で、軸対称偏光素子は位相制御特性が異方性の空間分布により一意に決まる為、素子単体では生成可能な光渦のトポロジカルチャージが限定される。さらに透過率の制御が難しく、振幅の空間分布変調が必要な光渦の生成には利用できない。つまり、従来の空間光制御装置には、「波面変換の柔軟性・振幅制御」と「広帯域性・偏光選択性」の間にトレードオフの関係が存在した。この問題を克服できれば、空間光制御の広帯域性・位相及び振幅制御の柔軟性・偏光選択性を両立した画期的な光渦発生装置が実現されることとなり、光渦の応用の可能性を拡大する要因と成り得る。

2. 研究の目的

上記の背景の一方で申請者らは、軸対称偏光素子とは全く異なる3次元的な螺旋状の異方性構造にも光渦への波面変換特性が発現する事を先の研究で明らかにした。この螺旋異方性構造体は、偏光応答性を有する光機能性液晶中に、ベクトルビームと呼ばれる偏光特異点を有する光波を照射する事により受動的に光誘起される。光誘起される螺旋異方性構造体は照射するベクトルビームの偏光分布及び強度分布に応じて動的に制御可能であり、これにより発生する光渦のトポロジカルチャージと振幅分布の制御が可能である。また、波面変換特性における波長依存性が小さい事を数値計算と実験により見出して射る。さらに、発生する光渦のトポロジカルチャージの符号を入射偏光の振動方向に応じて変えられる(偏光選択性)事も明らかにしている。これらの成果から、ベクトルビーム照射によって光機能性液晶中に誘起される3次元螺旋異方性構造体には、波面変換の柔軟性と広帯域性・偏光選択性を両立できるという特徴があり、本手法の機能をより実用的な性能へと発展させることにより画期的な光渦発生装置を開発できると考えた。

本研究では、光渦発生における波面変換の柔軟性・広帯域性・偏光選択性の両立を実現するために、我々が先に報告した3次元螺旋異方性構造体を用いた光渦生成法に基づいて、光機能性液晶を用いた偏光アドレス型光渦発生装置を新規に開発する事を目的とする。

3. 研究の方法

以下の方法により研究を実施した。

- (1) 螺旋異方性構造体の構造パラメータの最適化
- (2) 走査型偏光投影システムと光機能性液晶を組み合わせた偏光アドレス型光渦発生装置の開発
- (3) アゾ色素ドーブ高分子液晶複合体の応答速度の高速化

なお、各々の具体的な内容と成果については次節に述べる。

4. 研究成果

- (1) 螺旋異方性構造体の構造パラメータの最適化

図1は(a)ベクトルビームの外部偏光記録により形成される螺旋型異方性構造体を用いた光渦発生の概略図と、(b)螺旋異方性構造体中の液晶配向分布の一例を示したものである。図1(a)に示すように、1軸配向させたアゾ色素ドーブ液晶にベクトルビームを入射させると、液晶の元々の異方性に起因して形成される偏光状態の3次元分布とアゾベンゼン分子の光異性化反応戸により、図1(b)のような液晶分子の3次元的な光配向構造が形成される。この異方性構造に液晶の初期の配向軸に平行又は垂直な方向に振動する直線偏光を透過させると、入射前と直交する直線偏光成分が光渦へと変換される。このため、透過光を偏光子に通して、光渦に変換される成分のみを抽出すると、光渦を生成する事ができる。

螺旋異方性構造体では、直線偏光のガウシアン光が異方性構造中を透過する際の連続的な偏光・位相変化の過程を経て光渦が発生する為、その変換特性は液晶の配向分布に強く影響する。螺旋型異方性構造体中の液晶配向分布には大きく分けて、図1(b)に示すように、構造体全体の媒質厚、液晶の擦れ配向の周期、液晶の最大擦れ角度の3つのパラメータがある。擦れ配向の周期は記録するベクトルビームに生じるリタレーションが2となる媒質厚に相当し、材料の

複屈折及び記録光の波長 ρ に依存する。一方で液晶の最大捩れ角度は、光と材料の間の相互作用の強さに関係する事から、記録光のパワー密度 I_p に依存する。そこで今回我々は、媒質厚 d 、記録光のパワー密度、記録光の波長を変えながら発生する光渦のモード純度と変換効率に焦点をあて、Jones 行列計算とフーリエ解析に基づいて数値解析を行った。なお、解析はトポロジカルチャージが $\ell = 2$ の光渦が発生する配向分布の条件で行った。

図2に数値解析で得られた(a) $\ell = 2$ の光渦の割合(モード純度)と(b)変換効率の波長分散を示す。なお、本解析は入射光を90度直線偏光とした場合の透過光に含まれる0度直線偏光成分に対して行っており、モード純度についてはフーリエ級数展開による軌道角運動量スペクトルの解析法により求めた。変換効率は【透過光の0度直線偏光成分の強度/透過光の全偏光成分の強度】として算出した。(I)、(II)、(III)はそれぞれ媒質厚 d を変数に ($I_p = 4.5$ [W/cm²], $\rho = 532$ [nm]、記録光のパワー密度 I_p を変数に ($d = 4.5$ [μ m], $\rho = 532$ [nm])、記録光の波長 ρ を変数に ($d = 4.5$ [μ m], $I_p = 4.5$ [W/cm²]) した場合の計算結果である。材料の屈折率異方性の波長分散はネマチック液晶E7のものを用いており、液晶分子の際配向も出る及び光に対する感度は我々の先行研究と同様のものを用いた。図2のいずれの結果を見ても、高いモード純度と高い変換効率を得られる帯域幅は互いにトレードオフの関係にあることが分かる。なお、モード純度を低下させている要因は、主に $\ell = -2$ の光渦成分が混入する事にある。特に(I)から媒質の厚膜化は高いモード純度を得られる帯域幅を狭帯域化させる事が分かる。一方で、(II)及び(III)の結果から、記録光強度に対しては高モード純度の狭帯域化は(I)に比べて緩やかであり、高変換効率を得られる帯域幅は記録光波長が長い程広帯域になることが分かる。このため、高いモード純度と高い変換効率を両立できる配向分布の条件は、薄い媒質厚、大きな最大捩れ配向角及び長い捩れ配向周期にある事が推測される。そこで、図2(d)は $d = 4.5$ [μ m]、 $I_p = 12.5$ [W/cm²]、 $\rho = 780$ [nm]の条件で計算したモード純度と変換効率の波長分散である。530~900 [nm]の広い帯域幅にわたり 99%以上のモード純度と 30%以上の変換効率を得られることが分かる。以上の結果から、3次元螺旋異方性構造体は、液晶の配向分布に応じてモード純度と発生効率を広い帯域幅に亘って向上できることが理論的に示唆された。今後より系統的な解析を進めることで、100%近い変換効率とモード純度を達成できる構造パラメータを導出できると期待される。

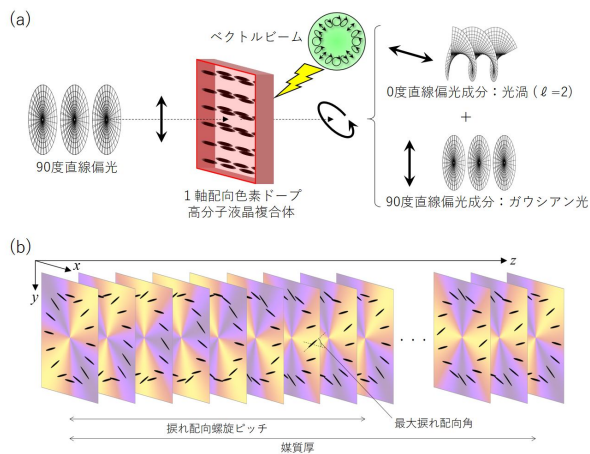


図1 (a) ベクトルビーム照射により形成される螺旋異方性構造体を用いた光渦発生概念図
(b) 螺旋異方性構造体中の液晶配向分布

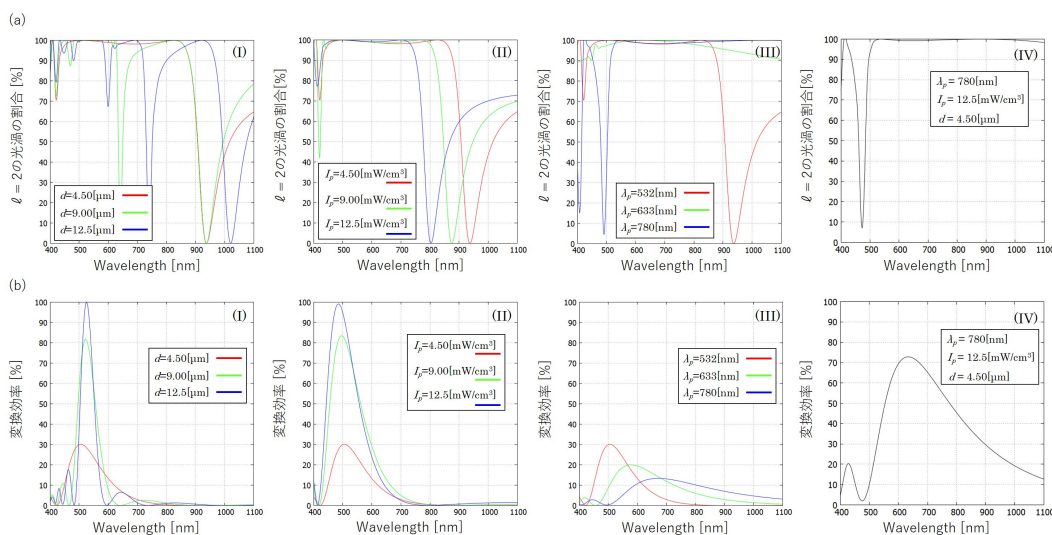


図2 波長軸に対してプロットした螺旋異方性構造体を用いて生成される光渦のモード純度と変換効率の液晶配向分布依存性

(2) 走査型偏光投影システムと光機能性液晶を組み合わせた偏光アドレス型光渦発生装置の開発

螺旋異方性構造体の形成には、1軸配向色素ドーブ高分子液晶複合体に照射するアドレス光が必要となる。先の報告で我々は、空間光変調器を用いて偏光分布を制御することでアドレス光であるベクトルビームを発生させていた。しかし、空間光変調器を用いた方法には、安定的に発生出来るベクトルビームのパターンに制約がある。具体的には、方位方向に対する偏光変化の周期数が奇数のものは安定的に生成できない。これは、該当するビームの場合、位相不連続線がビーム断面内に生じる為であり、空間的にコヒーレントな光波を用いて発生させると回折によって強度暗線が生じてしまう。この影響は、液晶の光配向に悪影響を及ぼすことが懸念される。そこで、MEMSミラーと外部偏光変調器を組み合わせ、時間平均でベクトルビームと等価なアドレス光を発生させる機構を新たに構築することを試みた。

図3の破線で囲まれた部分が、構築したMEMSミラーと電気光学変調器を組み合わせた走査型偏光投影システムである。本装置ではまず、レーザー光源から発信された光を、偏光子、電気光学変調器からなる偏光変調器に透過させ、偏光状態を時間的に連続制御可能な光へと変換する。このとき、電気光学変調器に印可する電圧波形を鋸歯状波とすると、ポアンカレ球上のS2-S3軌道上を等速度で回転する偏光変化を経る。次に、偏光変調器を射出した光をMEMSミラー及び結像レンズから成る2次元操作装置へと入射させる。MEMSミラーで反射方向を高速制御することで、結像スポットの位置を高速に走査することが出来る。ここで、走査の軌道をリング状にし、偏光変調器の変調周波数と同期させることで、図3の下図のように時間平均でベクトルビームと等価な光を投影することが出来る。

本手法では、外部偏光制御と照射位置制御を同期させることで、時間平均でベクトルビームと等価な光を発生させている。このため、空間光変調器等で発生させるコヒーレントな波動のベクトルビームとは異なり、奇数次の回転周期を有する偏光パターンであっても回折の影響で強度暗線が生じる事が無い。また、回転周期は外部偏光変調器とMEMSミラーの駆動周波数の比率で制御できる。

発生させたアドレス光を1軸配向色素ドーブ高分子液晶複合体へと照射し、光渦の生成実験を行った。実験光学系は図3上部に示した通りである。アドレス光の波長は色素の吸収帯である532nmのレーザーを、再生光には非吸収帯である633nmのレーザーをそれぞれ用いた。発生させた光渦の位相分布を解析するために、発生した光渦と平面波を干渉させ、フーリエ変換法により位相分布を復元した。得られた光渦の強度分布と位相分布を図4に示す。光渦特有のドーナツ状の強度分布と螺旋状の位相分布が得られている事が分かる。光渦のトポロジカルチャージは露光するアドレス光の偏光パターンに応じて同一サンプル中で切り替えられ、奇数次・偶数次何れのトポロジカルチャージの光渦も生成できることを確認できた。従って、光機能性液晶を用いた偏光アドレス型の光渦発生装置を構築する事に成功した。

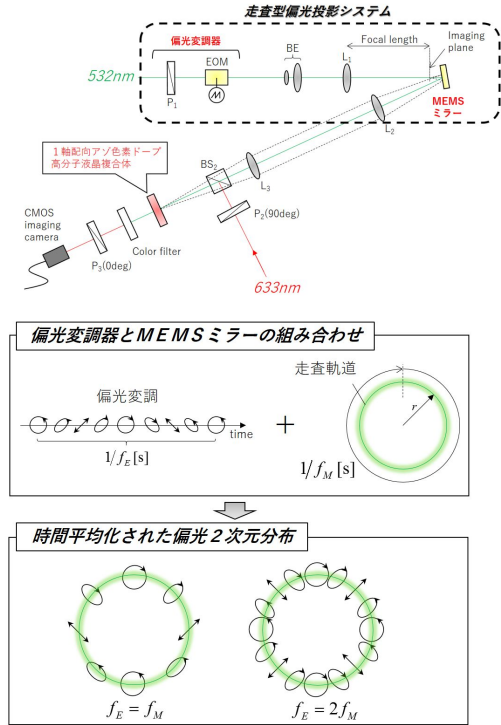


図3 構築した偏光アドレス型光渦発生装置の概略図とアドレス光の生成原理

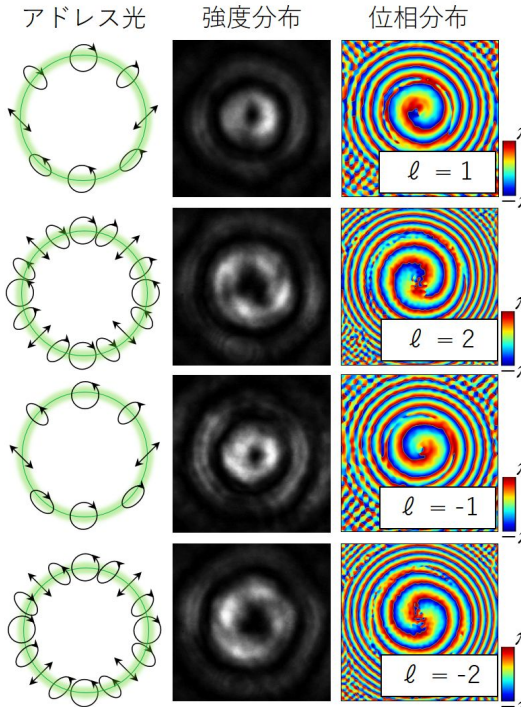


図4 構築した偏光アドレス型光渦発生装置で生成したトポロジカルチャージ $l = \pm 1, \pm 2$ の光渦の強度分布及び位相分布

(3) アゾ色素ドーブ高分子液晶複合体の応答速度の高速化

開発した偏光アドレス型光渦発生装置では、色素ドーブ高分子液晶複合体の光配向速度から、現状では1分程度の応答速度しか得られていなかった。実際の実用化を目指すにあたり、応答速度を更に高速化することが望ましい。そこで、応答速度の高速化に向けて以下の2点について検証した。

A) 色素ドーブ高分子液晶複合体の冷却による応答速度の高速化

B) 色素ドーブ高分子液晶複合体の組成比の検討

これまでの研究成果から、色素ドーブ高分子液晶を低温度の環境化で光配向すると、応答速度が向上する傾向が得られていた。そこで、ペルチェ式の温度コントローラを自作し、記録材料を冷却しながら配向速度の高速化を試みた。結果として、30秒程まで応答速度を高速化する事に成功した。

本研究で用いている色素ドーブ高分子液晶複合体は、アゾ色素 DR1、低分子液晶 E7、側鎖型高分子液晶を 1:59:40 の比率で混ぜ合わせたものである。この内、側鎖型高分子液晶が最も粘性が高く、応答速度の低下を招く主要因と推測される。そこで、側鎖型高分子液晶の比率を下げ、粘度を低下させることで応答速度の高速化が見込めるか検証した。結果として、粘度の明らかな低下が確認されたものの、光渦への変換特性が消失することが確認された。これは、側鎖型高分子液晶が主に光配向により形成される異方性構造の空間分解能に寄与していることから、螺旋異方性構造体自体の形成が阻害されているものと考えられる。

(4) まとめ

配向分布依存性の解析から広帯域且つ高効率な光渦発生が可能である事を明らかにすると共に、光機能性液晶を用いた偏光アドレス型光渦発生装置を構築し、動的な光渦制御が可能である事を示した。以上の結果は、本研究が目的としてきた偏光選択性・広帯域性・柔軟性を兼ね備えた光渦発生装置としての応用が可能である事を示すものである。しかし一方で、光配向の応答速度が未だ30秒程度と長い点が課題として残る。高速化の為に、光機能性材料の特性面からの改良も必要になると考えられ、今後この問題を解決する事で光渦の応用研究において実用性の高い技術となるよう研究開発を推進していく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

M. Sakamoto, Y. Nakamoto, T. M. Tien, K. Kawai, K. Noda, T. Sasaki, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Functionalized liquid crystal polymers generate optical and polarization vortex beams," Proc. SPIE 10361, Liquid Crystals XXI, 1036108 (2017). <https://doi.org/10.1117/12.2273100> 査読有り

[学会発表](計14件)

坂本盛嗣, 中元勇貴, 金子裕亮, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "液晶偏光回折格子を用いた光渦・ベクトルビームの生成と検出," 電子情報通信学会総大会, C-3-13, 東京(2019.3.20). 【招待講演】

中元勇貴, 河合孝太郎, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "2つのベクトル渦ビームによる光機能性液晶へのベクトルホログラム記録," 第66回応用物理学会春季学術講演会, 12p-M116-2, 東京(2019.3.12).

膝附拓也, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 後藤耕平, 小野浩司, "光渦同軸干渉光を利用したレーザー描画露光法によるフォトレジストへの回折限界を超えた曲線パターンの形成," 第66回応用物理学会春季学術講演会, 10p-W631-8, 東京(2019.3.10).

松尾直人, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "光学的非線形性を有する1軸配向液晶中を伝搬する光渦の自己位相変調効果," 第66回応用物理学会春季学術講演会, 9a-M116-1, 東京(2019.3.9).

松尾直人, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "ゲスト・ホスト液晶中における径偏光の伝搬特性と光学的非線形性の影響," Optics & Photonics Japan 2018, 2aC4, 東京(2018.11.1-2).

中元勇貴, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "複数の液晶製軸対称偏光素子を用いた複数の偏光特異点を有するベクトルビームの生成," Optics & Photonics Japan 2018, 1aC5, 東京(2018.11.1-2).

坂本盛嗣, 金子裕亮, 中元勇貴, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "フォーク型偏光回折格子を用いたベクトルビームのモード検出光学系," Optics & Photonics Japan 2018, 1aC4, 東京(2018.11.1-2).

金子哲, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "走査型偏光投影システムと光機能性液晶を用いた光渦の生成," 第 79 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-232-2, 名古屋(2018.9.20).

M. Sakamoto, S. Kaneko, K. Noda, T. Sasaki, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Three-dimensional photoalignment of azo-dye-doped liquid crystal polymer composite using scanning polarization projection system," 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018), Kyoto, Japan (2018.7.26).

Y. Nakamoto, M. Sakamoto, K. Noda, T. Sasaki, N. Kawatsuki and H. Ono, "Polychromatic generation of topological wave by using liquid crystal polarization grating and 4-f configuration," 27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018), Kyoto, Japan (2018.7.26).

坂本盛嗣, 小野浩司, "液晶光配向技術を使った偏光エレクトロニクス素子の最新動向," 第 40 回ポリマー光部品研究会, 東京(2018.7.13). 【招待講演】

坂本盛嗣, 金子哲, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "3次元螺旋異方性構造体を用いた光渦発生における配向分布依存性," Optics & Photonics Japan 2017, 東京(2017.10.30-11.2).

松尾直人, 坂本盛嗣, 野田浩平, 佐々木友之, 川月喜弘, 小野浩司, "ねじれ配向液晶中における径偏光の伝搬特性," Optics & Photonics Japan 2017, 東京(2017.10.30-11.2).

M. Sakamoto, Y. Nakamoto, T. M. Tien, K. Kawai, K. Noda, T. Sasaki, N. Kawatsuki, and H. Ono, "Functionalized liquid crystal polymers generate optical and polarization vortex beams," SPIE Organic Photonics + Electronics, 10120-5 San Diego, California United States (2017.8). 【招待講演】

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

研究代表者ホームページ：<http://sakamoto-optics-nagaokaut.net/Top.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者
無し

(2)研究協力者
無し