

液晶におけるトポロジカル欠陥の自己組織化を利用した 光渦アレイの作成とその近接場干渉

Fabrication of optical vortex arrays using self-organization of topological defects in liquid crystals and their near-field interference

研究代表者 北海道大学大学院工学研究院 助教 佐々木 裕司

Yuji Sasaki

The generation of structured light beams, such as optical vortices and vector beams, with spatially varying phase and polarization, is interesting for optical applications. It is challenging to find a strategy to control structured light beams in a compact space with a simple procedure. Here, to realize the wavefront shaping of multiple optical vortices and vector beams, we prepare a microarray of q-plates using a self-organization technique that permits the precise positioning of topological defects in nematic liquid crystals. Highly periodic patterns allow us to observe a near-field interference effect. The Talbot self-image, which is reconstructed near the q-plates microarray, enables the lensless compact imaging. Moreover, we observe a Talbot self-healing effect of the optical vortices using a sample cell with a slightly disordered area.

要旨

ネマチック液晶は棒状分子が一様な方向に並んだ状態であり、光学的異方性を有することから、偏光を操作する光学材料として有用である。特に、分子の並びがトポロジカルな構造をもつ場合、通常のガウシアンビームとは異なる特殊な光波の発生へと応用可能であることが知られている。本研究では、液晶が自発的に形成するトポロジカル欠陥のパターンを光学実験へと応用する。試料セルにレーザー光を照射し、光渦を発生させるアレイ素子としての性質を調べた。特に Talbot 効果による自己結像効果を用いて、試料近傍での光波の変換について検証した。実験の結果、光渦のような光波においても Talbot 効果を観察し、それを用いた偏光操作が可能であることを示した。

1. まえがき

ネマチック液晶とは棒状分子から構成され、長軸が平均的にある方向に揃った状態である。分子の重心には秩序がなく流動的である。分子長軸の平均方向を配向と呼ぶ。ネマチック液晶では配向方向に様々な物理的異方性が現れる。特に代表的な異方性として、誘電異方性と屈折率異方性がある。誘電異方性は配向を電場によって変化させることを可能としている。配向の変化によって、見かけの屈折率異方性を制御できる。これら二つの性質によって、液晶材料は電気光学的な用途に幅広く利用されている。

一般に、液晶材料をデバイスに用いるためには配向の制御が重要となる。これまでに、試料セル内部全体で一様な配向を得る技術は十分に確立されてきた。近年では、微小領域において空間的变化を伴う分子配向の作成が注目を集めている。中でも図1に示したような分子配向のトポロジカル欠陥はネマチック液晶においてしばしば観察され、光学への応用においても非常に興味深い。複屈折をもつ液晶物質がその光軸を面内で変化させている場合、幾何学的位相の効果⁽¹⁾によって、光波に位相を付与することができるからである。トポロジカル欠陥の場合、原点を中心に配向が回転した構造をとっている。(図1は原点周りに1回転と-1回転を示している。)これによって、トポロジカル欠陥を通過した光波は、光渦となることが知られている。このような液晶のトポロジカル欠陥を利用した素子は一般に軸対象偏光素子やq-plate⁽²⁾と呼ばれている。ここでqは分子配向におけるトポロジカルチャージであり、図1はq=1, -1に対応する。

q-plateの作成とはトポロジカル欠陥を安定化させることであると言える。ただし、液晶材料は流動

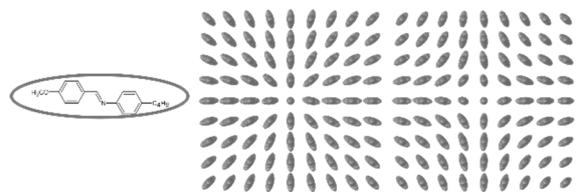


図1 液晶におけるトポロジカル欠陥の例

性をもっているため、トポロジカル欠陥は時間的・空間的に安定化させる技術が必要となる。現在、一つの欠陥を内包した光学素子は光配向法によって作成されている。この方法は、アゾ化合物の直線偏光に対する応答性を用いて、界面の配向を定める手法である。作成できる構造の自由度は高い反面、細かな構造をパターンにして作成することが難しい。そのため、現時点ではトポロジカル欠陥のパターンを作成した例は限られており、それを使った光学実験は殆どなされていない。

このような状況の中、私たちは近年、液晶に交流電圧を印加した際に、トポロジカル欠陥が自発的にパターン形成する現象を見出している。⁽³⁾ この系を光学的にみると、微小な q-plate が集まっている状況とみなすことができる。さらに、表面処理のアイデアを加えることにより、数十 μm 程度の構造を数 mm の広範囲にわたって均一なドメインとして得ることができるようになった。⁽⁴⁾ そのため、自己組織化で作成したトポロジカル欠陥のアレイ構造に、レーザー光を照射することで、光渦のアレイとしての実験ができるかと期待される。

本研究ではトポロジカル欠陥のパターン近傍における光波の振る舞いについて調べる。一般に周期構造の近傍では Talbot 効果⁽⁵⁾ と呼ばれる現象が観察される。これは、試料セルにおける像(電場ベクトル)と同様の像(自己像, self-image)が、試料からある一定の距離毎に観察される現象である。液晶材料のパターンを光学素子として用いることで、光渦のような光波であっても Talbot 効果が観察可能であるかについて調べた。さらに、Talbot 効果による自己結像効果を用いて、マイクロな q-plate を使った波面の変換ができるかについて調べた。

2. 実験方法

2.1 試料セルの作成

試料セルの準備について述べる。一般に液晶材料は図2のような二枚の平行に配置されたガラス基板の隙間に挟まれて使用される。液晶層の厚みはおよそ 10 μm である。透明電極(ITO)膜付きガラスを使用することで、セルの厚さ(z)方向に電場を印加する。ITO 電極では膜の表面において分子の配向を定めることが出来ないため、基板表面を適切に処理するこ

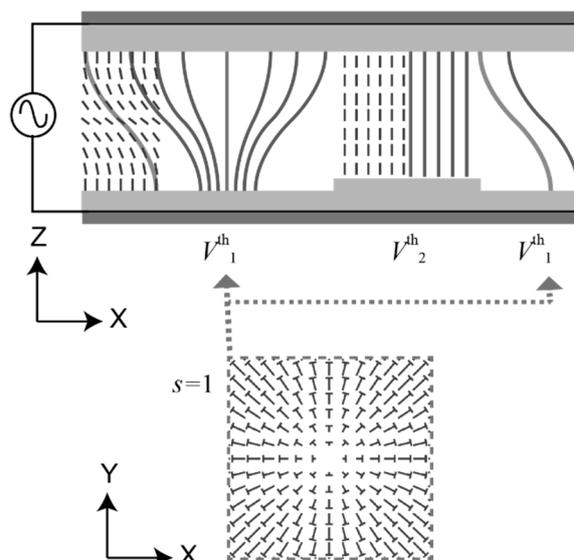


図2 試料セルの断面の模式図と形成される配向場の様子

とが必要である。一般的には、ITO 電極の表面に高分子の膜を塗布する。本研究ではシリコーンレジン(KR-251, 信越化学)をスピコートした。膜の厚さはおよそ 500 nm 程度あり、電気的な絶縁を保つためにも利用される。後述するが、このシリコーン樹脂の膜の膜厚には薄い部分と厚い部分が設けてある。さらに、膜の表面で液晶分子が垂直になるようにシランカップリング剤(この場合は、N,N-dimethyl-N-octadecyl-3-aminopropyl trimethoxysilyl chloride, DMOAP)による処理を行っている。

試料セルには負の誘電異方性をもつ液晶材料が注入される。誘電異方性が負の場合、配向は電場に対して垂直方向に傾く性質がある。ただし、傾く向きはxy平面内で定まらない。そのため、図2のように、試料セルを上側から見た場合、2種類のトポロジカルな欠陥構造を生じる。本実験系では、膜が窪んでいる部分に優先的に+1の欠陥が生成される。

続いて、シリコーン樹脂の表面の改質方法について述べる。図3のように、TEM グリッドを基板の上に乗せ、紫外線オゾン(UVO)処理を行う。UVO 処理は表面を親水性にするためによく使われる。表面の改質時に、炭素などの有機物が取り除かれる。そのため、表面の改質に加えて、ナノスケールの凹凸を表面に作り出すことが可能である。その基板の表面を上述したシランカップリング剤で処理することで、液晶分子を垂直に配向させることが可能となる。

2.2 AFMによる基板の観察

実際にKR-251の表面に凹凸構造が得られているかについて調べた。図3aのようにTEMグリッドを被せた状態でUVO処理した基板を準備し、原子間力顕微鏡(AFM)による観察を行った。その様子が図3bである。ここでは六角形タイプのTEMグリッドを用いている。処理時間はおよそ2時間である。暗い部分が凹みに対応しており、深さはおよそ50 nm程度である。図3bの通り、メッシュの穴に対応する部分が窪んでいることが分かる。期待したように、UVO処理によって表面に凹凸をつけることが可能であることを確かめた。なお、処理時間によって深さは変化するが、いくらでも薄くすることができる訳ではない。2時間程度処理を行うとそれ以上処理を行っても厚さは殆ど変化しなくなる。これは表面に分解可能な炭素などが無くなったためであると考えられる。

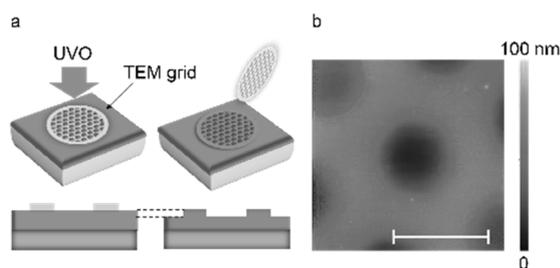
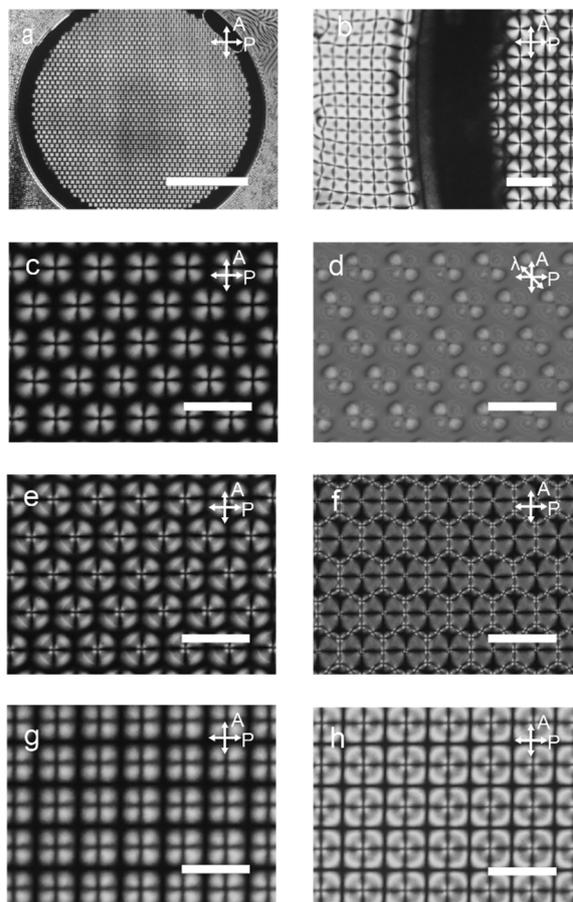


図3 UVO処理によるレリーフ構造のAFM像

2.3 偏光顕微鏡による観察

続いて、試料セルに電圧を印加し、偏光顕微鏡で観察した時の様子について述べる。主な結果は図4に示されている。電圧を印加する前は垂直配向のため、偏光顕微鏡では暗い様子が観察される。電圧を上昇させていき、それが閾値を超えると、配向が傾く様子が顕微鏡で観察される。その時の全体の様子が図4aであり、拡大したものが図4b, d, e, fに示されている。十字模様を伴う円形の領域が三角格子に並んで配置されている。鋭敏色検板の様子や偏光子を回転させることによって、十字の中心は強度+1のトポロジカル欠陥となっていることが確かめられる。図4から明らかのように、TEMグリッドの穴の部分から模様が現れている。穴の部分はUVO処理が行われる部分であり、改質された部分の膜厚が減少するため、液晶内部での電圧降下に変化が生じていると考えることができる。シリコーン樹脂の膜厚が薄い



場図4 作成した素子の偏光顕微鏡画像

合、周囲と比べて相対的に電気抵抗が小さくなり、膜内部での電圧降下が小さくなる。逆に言えば、膜厚が薄い部分の方が、液晶に印加される電圧が大きくなることを意味している。したがって、膜が窪んでいる部分から優先的に配向が変化していることは矛盾していない。図4cはTEMグリッドで処理した部分とそうでない部分の境界を示している。写真から分かるように、本来の様子は左側の欠陥が正方格子状に並んだものである。これは+1と-1の二種類のトポロジカル欠陥が交互に並んでいる。つまり、今回用いた表面処理の方法によって、一方の強度の欠陥をのみを選択的に誘起することができ、またその配置を任意に制御できることを示している。メッシュを四角形のタイプに変化させると、図4gのように、形成するパターンの違いも変化することがわかる。電圧を上昇させていくと凹んでいない部分の電圧も閾値を超え、配向が変化することによって試料全体が欠陥のパターンで満たされる。

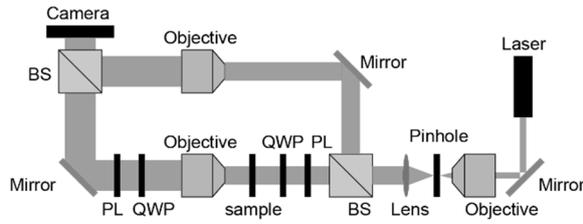


図5 実験系の概略図

3. 光学実験

3.1 光学系

作成した試料セルを用いた光学実験について述べる。実験のセットアップを図5に示す。He-Ne レーザーからの光を空間フィルターを通して平面波を準備した。試料セルに平面波が照射されることで、周期構造に起因する自己像が試料セルの近傍に現れると期待される (Talbot 効果)。これを観察するために対物レンズを使って試料セルの近傍を観察し、その様子を CMOS カメラで撮影した。対物レンズと試料セルはそれぞれ移動ステージに取り付けてあり、観察位置などを調整可能にした。偏光状態を様々に変化させるため、必要に応じて試料の前後に光学素子を配置する。直線偏光を使った実験では、偏光子 (PL) と検光子 (PL) を使ってカメラに届く偏光を変化させて観察を行った。光渦に関連する実験を行う際には偏光子と検光子の間に2枚の1/4波長板 (QWP) を追加し、通過する円偏光が直交するように配置する。

試料として使用するトポジカル欠陥の表し方は下記の通りである。xy 平面の点 (x, y) における配向の方位角を $\alpha(x, y)$ とし、原点 (欠陥の中心) から (x, y) への角度を ϕ とする。このとき、 $\alpha(x, y)$ は半整数 q を用いて、 $\alpha(x, y) = q\phi$ と書くことができる。 q はチャージを表しており、欠陥の中心周りに配向ベクトルが q 回転していると読み替えることができる。このように光軸が α 方向を向いているときの配向のジョーンズ行列は、リタデーションを δ とした場合、下記の通りに与えられる。

$$M_q = \cos \frac{\delta}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - i \sin \frac{\delta}{2} \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{pmatrix}$$

特に、半波長板の場合には、 $\delta = \pi$ であるので、 M_q はより簡単に表すことができる。

$$M_q = \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & -\cos 2\alpha \end{pmatrix}$$

今回の実験では、 δ の値は分子の傾きの割合によって

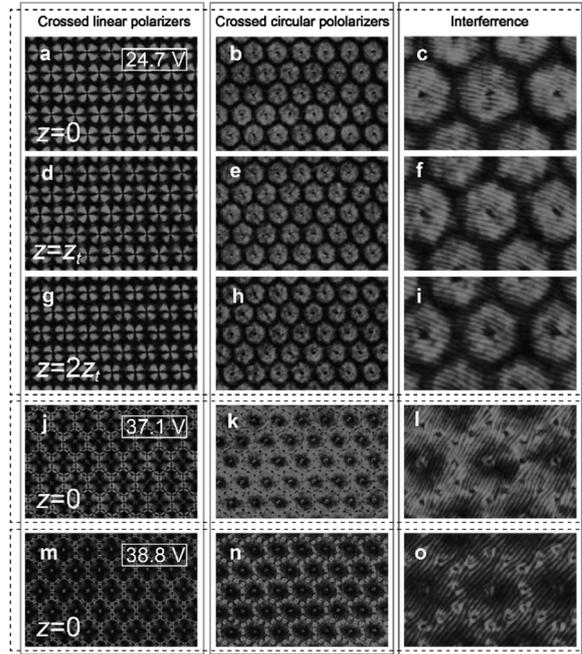


図6 単一の試料セルの自己像

変化するため、印加する電圧によって調整することができる。電圧を印加しない場合、 $\delta = 0$ となり、通常の半波長板の表記と一致する。実験では、レーザー光の波長に対しておおよそ半波長のリタデーションをもつポロジカル欠陥になるように試料に印加する電圧を調整する。円偏光を入射した場合、透過光はジョーンズ計算で簡単に求めることができる。欠陥を通過した光波は逆回りの円偏光になるのに加え、出射光の位相が変化し光渦が生成されることが計算から求めることができる。

さらに、干渉実験を行う際にはマッハツェンダー型の干渉計を準備した。光渦を特徴づける実験のために実施する。図5のように入射光をビームスプリッター (BS) で分割して後方の経路で干渉させる。試料を通過した光と参照光をうまく干渉させるには、似たような波面を準備する必要がある。今回、観察を対物レンズで行っているため、平面波のビーム系を広げただけでは干渉がうまくいかなかった。対物レンズを透過した光が若干球面波になっていることが予想される。これを解決するために、参照光側のレーザー光も対物レンズに通過させた。両者を干渉させることによって、完全に平行ではないが、干渉縞が観察されるようになった。

3.2 試料セル一枚のとき

1枚の試料セルで光学実験を行ったときの結果について述べる。図6は試料セルを異なる偏光条件下で観察したものである。まず左側に並べられている画像は、試料セルに直線偏光を照射し、直交ニコルで観察したときの様子である。 z の値は顕微鏡の通常の焦点位置における画像($z = 0$)から遠ざけた距離を表している。 $z = 0$ の場合には偏光顕微鏡画像と同質の様子が観察されていることがわかる。この十字を伴った強度分布が一番明るく見えるとき、リタデーションが半波長($\delta = \pi$)に近づいていることを意味している。偏光顕微鏡画像と大きく異なる点は、 z の値を変化させたときに見出すことができる。対物レンズを試料から遠ざけていくと、Talbot 距離($z_t = 0$)において再び同様の像が観察される。なお、今回の系は六方対称であるため、 z_t は下記のように記述される。⁽⁶⁾

$$z_t = \frac{3d^2}{2\lambda}$$

d は格子間隔、 λ は波長を表している。ここではその二倍の距離でも同様の様子が観察された。これは十分な広さで周期構造が得られていることを示すものである。電圧を印加してくと、明るい部分が暗くなり、逆に周囲の暗くなった部分が明るくなる。この明暗の逆転はリタデーションが 2π に近づいていることを示している。

続いて、 $1/4$ 波長板を試料の前後に挟んで観察したときの様子が中央に示されている。直交ニコルの場合とは異なり、中心部が暗い円形の強度分布を示している。Talbot 効果も同様に観察することができる。得られたドーナツ状の強度分布が光渦としての性質を有しているかを調べるために、干渉実験を行ったときの様子が図6の右側の列である。ドーナツ状の明るい部分に干渉縞が現れているのがわかる。さらに、その中心部分をよく観察すると、縞模様の数が左右で異なっており、フォーク状の干渉縞となっていることが確認できた。これは光渦の特徴であり、その干渉縞の特徴は $q=1$ の欠陥から得られるものと同じであることが分かった。興味深いことに、対物レンズの位置(z)を変化させた場合でも干渉縞は得ることができる。すなわち、Talbot 距離においても光渦が自己像として観察されていることを確か

めることができた。さらに電圧を上昇させると、リタデーションの増加に伴い、明暗が逆転している様子が観察される。その際に、周囲に新たに生成されたトポロジカル欠陥に関する黒いスポットが見出される。

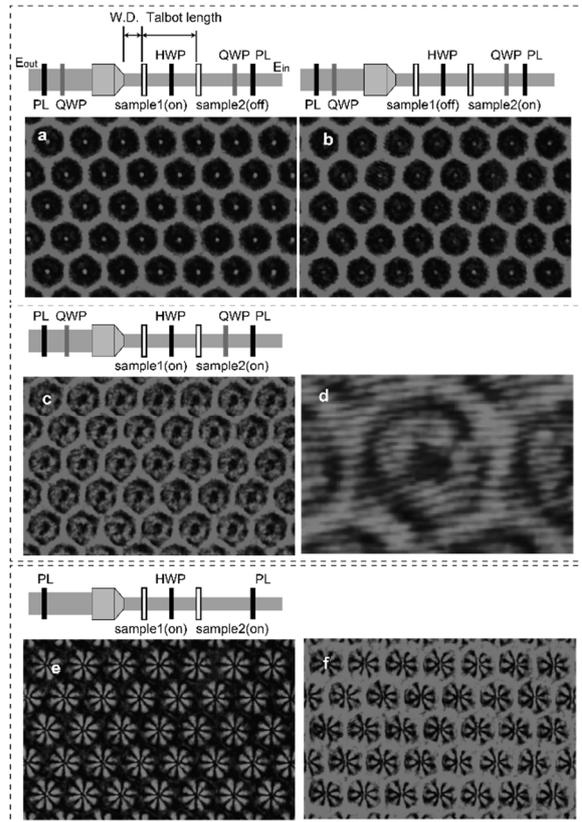


図7 二枚のサンプルを重ね合わせたときの様子

3.2 高次の光渦アレイの作成

上記の系では、個々のトポロジカル欠陥が光渦を発生させる素子として利用できることを示してきた。これを応用し、高次の光渦アレイを作成することを検討した。一方で、本研究で扱う自己組織化がもたらす構造は ± 1 の強度をもつトポロジカル欠陥しか作ることが出来ない。高次の光渦を発生させるには1つの試料セルを用いるだけでは不十分である。そこで私たちは、複数の素子を組み合わせることで、複雑な光渦アレイを作を試みた。q-plate には、複数の素子を適切に組み合わせることで、様々な q の値をもつビームを発生させることができるという性質がある。⁽⁷⁾例えば $q=1$ のトポロジカルチャージをもつq-plateを二枚用意し、その間に半波長板(HWP)を挟むことを考える。よく知られているよう

に、半波長板のジョーンズ行列は

$$\text{HWP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

である。先ほど示した M_q についての式を用いて次のようなジョーンズ計算の式が成り立つ。

$$M_q \cdot \text{HWP} \cdot M_q = \begin{pmatrix} \cos 4\phi & \sin 4\phi \\ \sin 4\phi & -\cos 4\phi \end{pmatrix} = M_{2q}$$

つまり、チャージの足し算を行うことが可能となる。この原理を用いて、高次の光渦のアレイを作成することを検討した。多数の光渦を一度に変換する上で、周期構造による回折の影響が問題となってくる。本実験系では、ミクロな領域で複屈折が周期的に変化した構造を持っているため、透過光は平行には進まず、遠方では回折像として現れる。そのため、1つのトポロジカル欠陥を含む q-plate を平行に配置する場合とは状況が異なってくる。二つの試料セル内に含まれる小さなトポロジカル欠陥同士を用いた光の変換を行うには工夫が必要である。これを解決するために、Talbot 効果による自己像を使った変換を提案した。そのときの光学系の配置と結果が図 7 に示されている。二つの液晶セルの距離を Talbot 距離となるように配置した。実際には、自己像が得られる場所は空气中を仮定しているため、中央に半波長板を挟むとその位置が若干変化する。同様にレーザー側にある試料セルの影響も受ける。その影響を考慮して素子を配置する必要があることが分かった。実際の手順を述べる。まず、図 7a のように、レーザー側の素子にのみ電圧を印加し、カメラで観察する。もう一つの試料セルは分子が傾いておらず、垂直配向のままであるため、複屈折の影響は出てこない。そのため、カメラ側の試料セルを取り外すことなく、レーザー側の試料セルの像のみを観察することができる。さらに、半波長板の存在によって、カメラで観察される像が変化することを考慮する。半波長板は円偏光の回転方向を反転させるため、カメラには図 7a のように明暗が逆転した画像が得られる。このときに、反転したドーナツ状の模様ははっきりと見えるように対物レンズの位置を調整することで、焦点の位置を実効的な Talbot 距離に設定することができる。これは半波長板と二枚目の試料セルの影響が考慮されているため、異なる厚みの光学素子でも対応することができる。続いて、カメラ側の試料セル

の位置を合わせる。その時の様子が図 7b である。レーザー側の試料セルの電圧を切り、対物レンズ側の試料セルのみに電圧を印加する。電圧を印加していない試料セルは偏光を変化させることがないため、入射した円偏光は半波長板を通過して二枚目の試料セルに入射すると思えばよい。したがって、半波長板の効果によって、回転方向が反転した円偏光が入射されるため、先ほどと同様に明暗が逆転した画像が得られる。ここで、対物レンズの位置を動かすことなく、2枚目の試料セルの位置を動かすことで、はっきりとした像が得られるようにする。最後に、両方の試料セルに電圧を印加したときの様子が図 7c である。欠陥があった部分の周りにドーナツ状の強度分布が観察される。さらに干渉実験を一緒に行うと、図 7d のような縞模様を得られた。図 6 の場合と比べると、縞の数が中心の左右で 2 本異なっており、 $q=2$ の光渦となっていることが確かめられた。同質のものを確かめるために、1/4 波長板(QWP)を取り除いた状態での結果を図 7e, f に示した。この場合は、直線偏光を入射していることになり、計算すると

$$M_q \cdot \text{HWP} \cdot M_q \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 4\phi \\ \sin 4\phi \end{pmatrix}$$

という電場ベクトルが得られることになる。これは、欠陥の周りに一周するときに、電場ベクトルは 4 回転していることを意味している。実際に、直交ニコルで観察すると、8 本の暗い線が出ており、期待した変換が行われていることを示す。図 7f のように検光子の向きを回転させても暗くなる線の本数は変化していない。

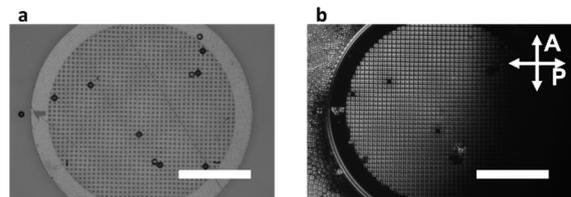


図8 二枚のサンプルを重ね合わせたときの様子

3.3 自己修復現象

これまででは、おおよそ均一とみなせる液晶パターンから生じる Talbot 効果とそれを使った用いた光学実験を紹介してきた。それに対してここでは、Talbot 効果に関連する別の特徴的な性質として自己修復効

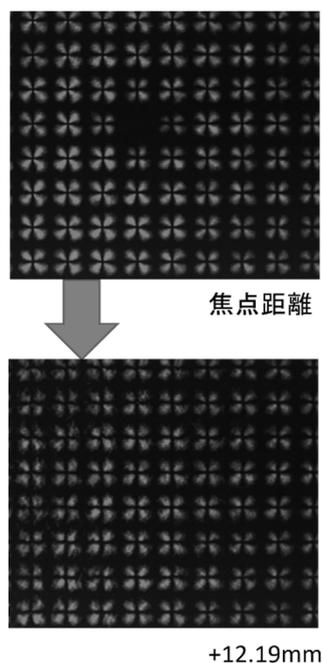


図8 二枚のサンプルを重ね合わせたときの様子

果を紹介する。本研究で用いる試料セルは通常の実験室で作成しているため、ゴミなどが混入してしまうことや、スピコートが十分でない場合がある。すると、不完全な部分の周辺は、液晶に電圧を印加しても、パターンが乱れてしまう。不均一な状況は Talbot 効果を用いる上では望ましくない。しかしながら、このような状況にレーザーを照射すると、試料から離れた部分では、周囲の乱れていない場所からの Talbot 効果によって、乱れた像が修復することが知られている。つまり、Talbot 像は不完全な影響を取り除き、理想的な場合の像を再現することができる。実際に、このことを確かめるために、パターンの一部の表面改質の方法を変化させて実験を行った。その顕微鏡での様子が図 8 である。ここでは表面改質を行うための TEM グリッドの上にガラスビーズを撒いている。いくつかのビーズが TEM グリッドのホールに収まっているのがわかる。つまりビーズを乗せたところも UVO 処理の影響が届かないと期待できる。実際に改質した基板を使って試料セルを作成し、液晶に電圧を印加したときの様子が図 8b である。期待した通り、ビーズがあった部分は垂直配向が維持され、暗い様子が観察される。この状況に、レーザー光を照射し、得られる像が対物レンズの位置に応じてどのように変化するかを調べた。そのと

きの様子が図 9 である。ここでは直線偏光を照射し、直交ニコルで観察したときの様子を示している。上の黒い部分にパターンが現れていない部分が見られる。それに対して、対物レンズの距離を変化させると Talbot 距離においてはパターンが無かった部分にも同様のパターンが見られていることがわかる。これは光渦の場合でも同様であり、広範囲に渡って均一な構造であることで、自己修復効果が見られたことを示している。

4. まとめ

自己組織化で作成したトポロジカル欠陥のパターンを用いて、光渦アレイを作成し、試料セル近傍における光波の振る舞いについて調べた。試料セル近傍において、Talbot 効果に伴う光渦アレイの自己像を得ることが出来た。即ち、光渦のような偏光が空間的に一様でない光波でも Talbot 効果を用いることができることがわかる。液晶素子は電場によってリタデーションを制御可能であるため、自己像もまた電場によってスイッチングが可能である。さらに二枚の素子を組み合わせ、多数のトポロジカル欠陥の間で光波の変換を行う方法を提案した。Talbot 効果の自己像を用いることで光渦アレイであっても、個々のトポロジカル欠陥を通過した波面の変換が可能である。本研究では、自己結像に関して研究を行ったが、Talbot 距離以外でも様々な振る舞いを示すため、今後は光軸方向の光波の変化についても調べることができると考えられる。さらに、その光を応用した実験や、光配向技術を検討したいと考えている。

5. 謝辞

本研究は公益財団法人 マツダ財団の助成を受けて行われました。関係者の皆様に心より御礼申し上げます。

発表論文

- [1] Y. Sasaki, K. Yamazaki, N. Murakami, K. Yamane, H. Orihara, "Lensless Wavefront Parallel Processing of Vector Beams by Self-Images of a Self-Organized Q-Plates Microarray" *Adv. Photon. Res.*, 3, 2100368 (2022).
- [2] Y. Sasaki, N. Murakami, K. Yamane, H. Orihara,

” Near-field diffraction from self-organized topological defects arrays in nematic liquid crystals”, 19th Optics of Liquid Crystals, オンライン, 2021年9月.

- [3] 佐々木裕司, 村上尚史, 山根啓作, 折原宏, ” 液晶のトポロジカル欠陥を用いた光渦アレイの回折現象” 2021年度日本物理学会第周秋季大会, オンライン, 2021年9月.

参考文献

- (1) G. Biener, A. Niv, V. Kleiner, E. Hasman, “Formation of helical beams by use of Pancharatnam-Berry phase optical elements” *Opt. Lett.*, 27, 1875 (2002).
- (2) L. Marrucci, C. Manzo, D. Paparo, “Optical spin-to-orbital angular momentum conversion in inhomogeneous anisotropic media” *Phys. Rev. Lett.*, 96, 163905 (2006).
- (3) Y. Sasaki, V. S.R. Jampani, C. Tanaka, N. Sakurai, S. Sakane, K. V. Le, F. Araoka, and H. Orihara. “Large-scale self-organization of reconfigurable topological defect networks in nematic liquid crystals” *Nat. Commun.*, 7, 13238 (2016).
- (4) Y. Sasaki, J. Takahashi, S. Yokokawa, T. Kikkawa, R. Mikami, H. Orihara, “A General Control Strategy to Micropattern Topological Defects in Nematic Liquid Crystals Using Ionically Charged Dielectric Surface” *Adv. Mater. Interfaces*, 8, 2100379 (2021).
- (5) H. F. Talbot, “LXXVI. Facts relating to optical science. No. IV” *Philos. Mag.* 9, 401 (1836).
- (6) G.-X. Wei, L.-L. Lu, C.-S. Guo, “Generation of optical vortex array based on the fractional Talbot effect” *Opt. Commun.*, 282, 2665 (2009).
- (7) S. Delaney, M. M. Sánchez-López, I. Moreno, J. A. Davis, “Arithmetic with q-plates” *Appl. Opt.*, 56, 596 (2017).