

液晶の自己組織化能を活用した 偏光体積ホログラム

大阪大学大学院工学研究科

電気電子情報通信工学専攻 講師 吉田 浩之

1. はじめに

光を曲げたり、反射したりする最も代表的な素子はレンズとミラーであるが、IoTやウェアラブルデバイスの台頭により、小型高機能な光学素子が注目を集めている。近年では回折光学素子の発展形として複雑な微小構造体を基板上に高密度に並べたメタサーフェスが提案され、光の波長以下の薄みでありながら光波の透過率、位相および偏光を成形できる素子として精力的に研究されている[1]。ディスプレイ材料としてよく知られる液晶も、電圧によって屈折率を変化させられるため、メカレスなレンズや偏向素子などの新応用が期待されている[2]。

液晶は電界によって屈折率を変調する以外にも、その配向方位の制御により光波の位相を変調できる。重合性の材料を用いれば、透過あるいは反射によって光を回折する固体光学フィルムとして用いることができる。この素子は厚みが数ミクロンであるため積層による機能の複合化が可能であり、偏光依存性などの液晶独自の性質をもつことから、AR（拡張現実）スマートグラスやHUD（ヘッドアップディスプレイ）などへの応用が期待される。本稿では筆者が開発を進めている、コレステリック液晶を用いた反射型体積ホログラムについて紹介する。

2. コレステリック液晶を用いた反射波面制御

「液晶」といえば多くの方がテレビを思い浮かべると思うが、実際には液相と固相の中間相であり、棒状または円盤状の異形状をもつ分子が流動性を保ちながら配向秩序をもつことを特徴とする。液晶は分子構造によって特定の温度範囲（サーモトロピック液晶）または溶液濃度範囲（リオトロピック液晶）で発現する。電子デバイスに应用される液晶はサーモトロピックであるが、リオトロピック液晶は身近なところでは石鹸やDNAなどの水溶液でも見られ、生体機能の観点から研究が広がりを見せている。

液晶は分子形状に加え、分子配向によって異なる相に分類される。ディスプレイに用いられているのは棒状分子が集団として一方向に配向したネマティック相であり、ダイレクタと呼ばれる平均の配向方向に沿って屈折率や

誘電率などが一軸異方性を示す。液晶は流動性をもつため、電界印加時には誘電率の大きい方向が電界に並行となるよう、ダイレクタが再配向する。その結果、実効的な複屈折が変化し、偏光子と組み合わせることで光シャッターとして機能し、ディスプレイに応用できる。実際の応用では電気抵抗率、粘性、液晶温度範囲などの様々なパラメータも重要となるため、複数の分子を混合した状態で用いられる。しかし、多数の分子が混合した液晶であっても、その振舞いは平均的な配向方向であるダイレクタの変化として説明することができる。

液晶の構成分子がキラリティを持つ場合、液晶のダイレクタにねじれが誘起される。つまり、図1に示すように、特定の方向に沿って螺旋構造が自発的に誘起される。このような液晶相はキラルネマティックまたはコレステリック液晶（CLC）と呼ばれる。螺旋周期は構成分子のキラリティの強さに依存し、数百nmから数百 μm まで調整できる。CLCの螺旋周期が可視光波長と同程度の場合、

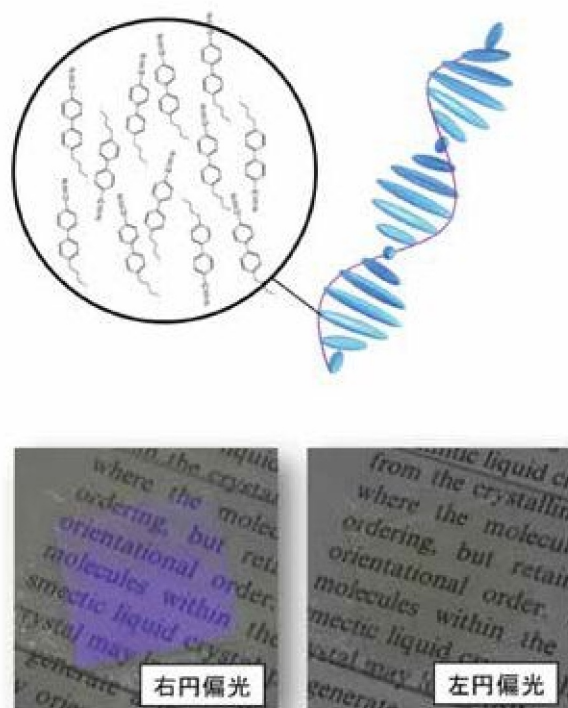


図1：コレステリック液晶と選択反射の例

光は周期的な屈折率変化を感じ、ブラッグ反射される。CLCは螺旋構造を有するため、実際には螺旋の巻き方向と一致する回転方向を持つ円偏光のみが反射される。反射光も円偏光であるため、CLCを円偏光フィルターを通して観察すると、反射の有無が切り替わる(図1下)。このように特定の波長域・特定の円偏光のみがブラッグ反射される現象は選択反射と呼ばれる。

CLCは自発的な構造形成能や円偏光依存性など興味深い特性をもつが、鏡面的な反射しか示さないため、用途が限られる課題があった。学会で会う企業研究者の方からもコレステリック液晶の反射特性を変化させたい、というニーズを聞くことがあった。なかなか良案を思いつくことは難しかったが、その後、文頭のメタサーフェスの研究に取り組んだことをきっかけに、CLCの螺旋構造の位相を変化させれば鏡面反射に限らない反射を実現できると着想した[3]。図2(a)に示すように、通常の素子では、液晶を保持する基板表面で液晶分子は一様に配向しており、螺旋軸は基板に対し垂直に存在している。これに対し、基板上の配向を変化させることを考えた(図2(b))。図から直感的に理解できると思うが、基板表面において分子の配向を変えることは螺旋構造の位相を変えることに対応する。その結果として、素子中の反射面の形状が変化し、反射特性が変化する。実際、数値解析を行うと、配向方位をパターン化したCLCは反射型回折光学素子として機能することが明らかとなった。すなわち、

配向パターン設計により、CLCを体積ホログラムとして使えることを見出した。

3. 偏光体積ホログラムの実現例

液晶は偏光依存性をもつため、パターン配向したCLCは偏光体積ホログラムと呼ばれる。汎用的な光学素子であるホログラム素子は回折挙動の設計により様々な応用が考えられるが、以下では任意波面の実現例を示した後、実用化の期待される偏光体積グレーティングを紹介する。

ホログラムという用語はリングや硬貨などのターゲットにレーザーを照射し、感光材に干渉縞を転写することで物体が立体に見えるものを想像される場合が多いかもしれないが、近年では任意の物体像構成に必要な干渉縞を数値的に求めるコンピュータ生成ホログラム技術の進展により、デジタルな設計が可能である。図3には大阪大学「ワニ博士」を像形成する素子をGerchberg-Saxtonアルゴリズムにより設計し、光配向技術により液晶素子に実装した例を示す[4]。設計した配向分布は約2.5ミクロンの空間解像度で液晶素子に書き込み、赤色レーザー光を照射しその反射光分布を観察した。この素子はただのフィルムに見えるが、反射光をスクリーンに投影すると、設計通りの像が観察される。なお、反射色はコレステリック液晶の螺旋周期を調整することで調節可能であり、紫外から赤外域まで変化させることができる。さらに、重合性の材料を用いることで、例えば、フレキシブルな基板に固体の素子を塗布成膜することもできる。

偏光体積グレーティングは図2(b)に示したようにCLCの反射面が特定の方向に傾いた素子であり、通常回折格子のように入射光を特定の角度に回折する。液晶を用いてこの素子を実現すると、1次回折光のみ発生する(高効率)、入射偏光に依存して反射回折/透過の切替ができるなどの独特の光学特性を示す。この素子の実用化が期待される応用先の一つにAR用の光結合器がある。眼鏡型のAR機器ではフレームに小型ディスプレイが設置され、それを眼に投影することで現実世界の上に情報をオ

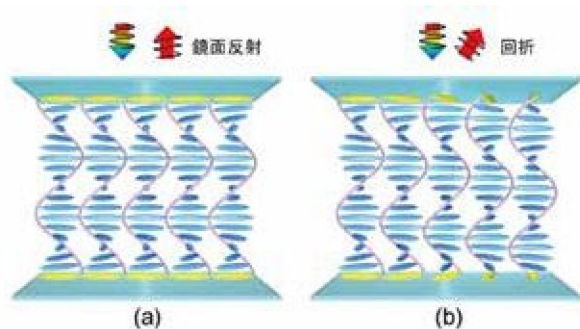


図2 (a) 一様配向および (b) パターン配向したコレステリック液晶とその反射特性

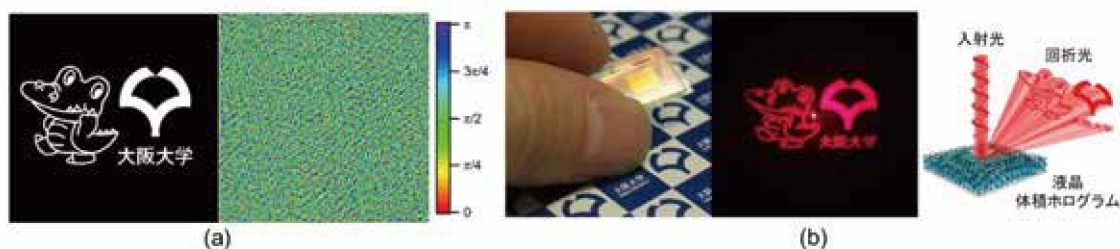


図3 (a) ターゲット画像と波面生成に必要な位相分布 (b) 素子外観とホログラム再生像および動作模式図

ーバレイしている。この実現方法には複数のアプローチがあるが、光を回折により高屈折率の導波路に閉じ込め、眼の前で光を取り出す導波路型ディスプレイは主流の技術となりつつある（図4）。光を導波路に結合するための微細グレーティングは既存の素子では微細加工技術によって製造されるが、CLC素子はコストや明るさの点などの点でアドバンテージが期待できる。筆者の研究グループでは高品質の素子の作製やイメージングの実験などを行っているが、最近ではMeta社が米国の液晶関連ベンチャーを買収するなど、世界的にも活発な動きがある。コロナの影響でVR/AR機器の社会浸透が大きく加速されたことから、そこに貢献できるように開発を進めている。

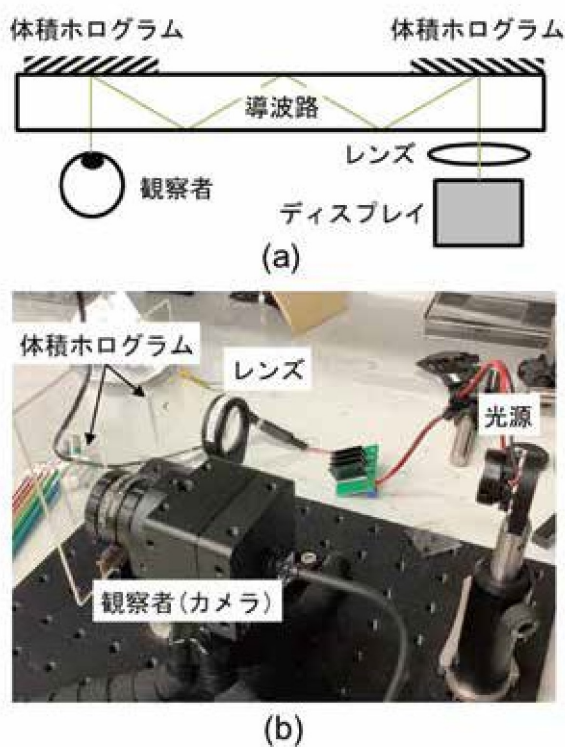


図4 (a) 導波路ディスプレイの動作模式図 (b) 導波路イメージングの実験風景

4. おわりに

液晶の形成する高次秩序構造を高度に制御することで、通常材料では実現し難い光学特性が得られる。その本質は3次元的に複雑な屈折率分布を形成できることであるが、その作製手法はボトムアップ的な自己組織化構造とトップダウン配向制御を融合している点で学術的にも興味深い。応用を目指す一方で、例えば、分子集団である液晶はどこまで微細なパターンで配列することができるのか？といった物質の極限に挑戦するような課題にも取り組んでいる。筆者は大阪大学に学生として入学しそのまま教員となったが、応用と基礎の両輪で研究を進められることは、大学という研究の場の魅力であると感じている。真に使える技術を創ることの難しさを日々痛感しているが、研究を進め、社会実装を目指したい。

謝辞

本研究の一部は大阪大学工学研究科電気電子情報通信工学専攻の尾崎雅則研究室にて実施しました。また、本研究の一部はJST さきがけおよび大阪大学IBグラントの支援を受けました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

1. 高原淳一：メタサーフェス—新しい平面光学素子の原理と産業化への展望—, 電子情報通信学会誌, Vol. 105, No. 1, pp. 39-46, (2022).
2. 澁谷義一, 李彞里, 吉田浩之, 尾崎雅則：フレネル型大口径液晶レンズの応用, 液晶, Vol. 23, No. 2, pp. 105-112 (2019).
3. J. Kobashi, H. Yoshida, and M. Ozaki, Nat. Photonics 10, 389-392 (2016).
4. J. Kobashi, H. Yoshida, and M. Ozaki, Sci. Rep. 7, 16470 (2017).

(電子 平成18年前期 電気電子情報 平成21年後期)