

液晶光学デバイスの研究動向

佐藤 進

液晶は比較的小さな外部電界印加によりその分子配列状態や光学的特性を容易に変化させることができるという、他の光学材料にはみられないすぐれた特徴を有している¹⁾。液晶におけるこの電気光学効果を利用した光学素子に関する研究もこれまで種々報告されている。たとえば、液晶における屈折率の異方性と液晶と基板との界面における全反射効果を利用して光ファイバー間の信号光を切り替える光ファイバースイッチ^{2,3)}や、2組の偏光ビームスプリッターとプリズムの間にTN液晶セルを挟み込んだ構造で、TN液晶セルによる偏光面の回転効果を利用して光の進行方向を切り替える光スイッチ⁴⁾などが考案されている。また、2軸性の複屈折を示す光学結晶とTN液晶セルを組み合わせた光バイパス切り替えスイッチ⁵⁾なども、すでに20年ほど以前に作られている。

筆者は本誌第12巻第3号⁶⁾および第18巻第12号⁷⁾において、非平行平面電極構造のネマティック液晶セルの分子配向と光学的特性として、液晶くさび(プリズム)による光偏向デバイス⁸⁾や、レンズ構造の液晶セルによる焦点可変レンズ⁹⁾、光学材料としての液晶の特性¹⁰⁾や液晶レンズの特性の改善¹¹⁾、さらに軸対称不均一電界を利用した液晶マイクロレンズ¹²⁾などの研究を紹介したことがあるが、液晶ディスプレイの華々しい発展に対比して、液晶光学デバイスはまだまだ実用されるに至っていない。しかし、この20年間の液晶における科学技術の進歩発展は目覚ましいものがあり、さまざまな特性を有する新規な液晶材料や分子配向技術も開発されつつあるので、液晶を利用した光学デバイスの実用化に向けての努力がこれからますます必要とされるものと思われる。

本報告では、他の光学材料では実現できない機能を有す

る光学デバイスとして、低電圧印加により焦点可変の機能をもつ液晶レンズ、液晶を用いた自由空間光ビームステアリング(光偏向)デバイス、液晶による偏光変換・制御デバイス等を中心として、これまでの研究の展開や最近の動向等について概観する。なお、液晶レンズに関しては、Optical Review Vol. 6, No 12 (1999)¹³⁾にまとめてあるので、ここでは液晶レンズの原理等について簡単に触れた後、前記の解説にまとめた以外の特性の改良や応用等を中心に、最近の状況について述べる。

1. 液晶の焦点可変レンズへの応用

1.1 レンズ構造の液晶セルによる焦点可変液晶レンズ

透明導電膜を付けた平凹レンズまたは平凸レンズとガラス基板の間に、液晶分子が基板に一方方向に平行に配向(ホモジニアス配向)するように誘電異方性が正のネマティック液晶を封入した液晶セルを作製し、電圧を加えて液晶分子の配向状態を制御することで、それぞれ焦点距離を連続的に可変できる凸レンズや凹レンズが構成される⁹⁾。しかし、液晶セルに電圧を印加・除去して液晶セルを駆動する場合の応答・回復特性は液晶層の実効的な厚みの2乗に依存することが知られている。また、液晶層が厚くなるとともに、液晶分子の配向のゆらぎに伴うレイリー散乱に関連する光散乱効果により液晶セルが白濁するという問題が生じる⁹⁾。このような問題点を解消するために、液晶層を同心円状に細分化して液晶層を実効的に薄くしたフレネル構造の液晶レンズ¹¹⁾が提案され、1秒以下の応答・回復特性をもつ透明なレンズが作製されている。

液晶レンズは焦点可変特性という他のレンズにみられない特徴を有する反面、液晶分子配向の異方性に基づく非点収差が生じるという問題点がある。このような収差は、液晶分子配向を軸対称的な同心円もしくは放射状とすること

秋田大学電気電子工学科 (〒010-8502 秋田市手形学園町 1-1)
E-mail: satosu@ipc.akita-u.ac.jp

で軽減することができる¹⁴⁾。また、液晶レンズの焦点可変効果は入射光の異常光成分に対してのみ有効であり、偏光板の特性から30%程度の透過効率になってしまう。そこで、2枚の同一の特性をもつ液晶レンズのダイレクターの方向が直交するように重ねることで、偏光板を使用しない明るい液晶レンズが構成される¹¹⁾。

液晶レンズの応用としては、フレネル構造とすることで直径を大きくし応答を改善した焦点可変眼鏡として白内障患者へ適用した例¹⁵⁾があり、また共通光路干渉計における複屈折性レンズとして用いることもできる¹⁶⁾。最近、低い周波数の電圧を印加すると液晶分子が電界方向に配向するが、高い周波数の電圧印加では電界に垂直な方向に配向するという特性を有する液晶(2周波駆動用液晶)を用いた焦点距離を高速で切り替えることができる液晶レンズにより、立体表示を行う方式が提案されており^{17,18)}、液晶レンズの応用として注目される。

液晶レンズでは、電圧除去時および液晶分子が基板に垂直な方向に配向するような十分大きな電圧を加えた場合には比較的良好なレンズ特性が得られているが、閾値以上の電圧を印加して焦点距離を変化している状態でのレンズ特性や、液晶分子の配向方向と直交方向との間で収差が生じることなどが問題である。

1.2 電極分割構造による屈折率の空間分布を利用した焦点可変液晶レンズ

平行平面構造の光学媒質であっても屈折率が空間的に分布しているような構造とすることで入射光の屈折や集光・発散効果等が生じ、特に屈折率分布が空間的に2乗特性をとる場合にはレンズ効果を得ることができる。たとえば、平行に分割された多数のストライプ状の電極にそれぞれ少しずつ異なった電圧を印加して液晶分子の配向制御を行い、屈折率分布を形成した円筒レンズや、このような2組の円筒レンズを互いに直交するように重ね合わせた焦点可変の液晶レンズが作られている¹⁹⁾。また最近、同様の原理に基づき多数の微細化した線状の電極を有する開口数(NA)可変液晶レンズが作られ、DVD-CDの切り替え用として応用が試みられている²⁰⁾。なお、通常の液晶ディスプレイに使用されている電極基板間に、ホモジニアス配向のネマティック液晶を封入した液晶パネルを用いて、ストライプ状やリング状のパターンを構成する画素群に加える電圧を制御して、実効的な屈折率分布を形成することでレンズ効果を得ることもできる。この場合には、透過光の利用効率が低いことや、連続的な屈折率分布特性を得ることが困難であるなどの問題がある。

1.3 不均一電界による分子配向効果を利用した液晶マイクロレンズ

1.3.1 軸対称不均一電界による液晶分子配向とマイクロレンズ効果

一方の通常の平板電極基板および電極膜を直径数100 μm の円形穴型パターン状に除去した基板を用いて作製した、ホモジニアス配向液晶セルでは、両電極間に電圧を印加することにより電界は穴型パターンの電極端付近で最も大きく、穴型パターンの中央部に近くなるとともに小さくなるような軸対称的な電界分布が形成される¹²⁾。電圧を加えていない場合には、液晶分子が基板の配向方向に一樣に配向しているため屈折率分布は生じない。しかし、閾値以上の電圧を加えると電極基板界面における液晶分子に対する配向規制力および液晶の弾性力と軸対称的な電界による配向力の釣り合いで決まる分子配向状態となり、ダイレクターの方向に偏光成分を有する異常光入射に対して軸対称的な屈折率分布が生じる。すなわち、電極の端部では屈折率が小さく円形パターンの中央部に近づくほど屈折率が大きくなるような屈折率分布となっており、凸レンズ特性が得られることが期待される。同一の円形穴型パターンを形成した2枚の電極基板の間にネマティック液晶を封入した液晶セルではより大きな電界分布特性が得られ、すぐれた特性の液晶マイクロレンズを構成することができる。液晶マイクロレンズのパターン直径方向における光路長の分布は、図1に示すようにほぼ2次曲線(放物線)状の特性となり、また電圧が大きくなるとともに2次曲線の曲率は大きくなり、最大となった後に再び減少するような変化、すな

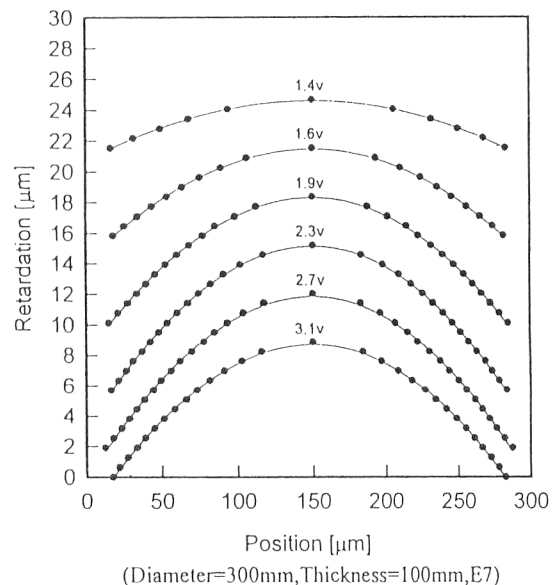


図1 液晶マイクロレンズの屈折率分布特性。

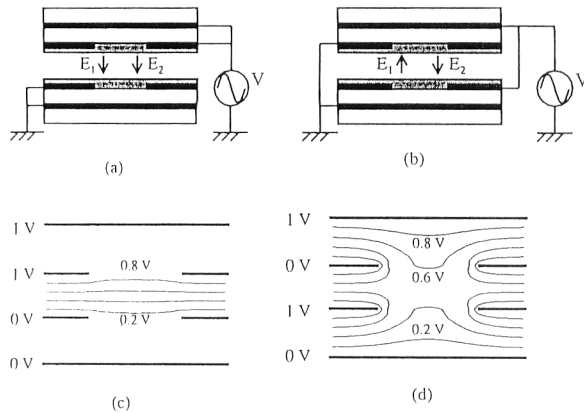


図2 積層電極構造液晶マイクロレンズにおける電圧印加方法. (a) addition type, (b) subtraction type と (c), (d) 各電位分布²⁶⁾.

わちレンズの焦点距離も同様に電圧とともに最小となった後長くなるような焦点可変特性が得られている。

液晶マイクロレンズの開口数 (NA) は印加電圧に依存し、焦点距離が最小となる電圧付近で最大の NA が得られている。また、NA の最大値は液晶における複屈折や誘電異方性²¹⁾、弾性係数²²⁾等の材料パラメータおよび円形パターンの直径や液晶層の厚み等の構造パラメータに依存することが知られており、パターン直径と厚みの比が 2~3 のときに NA が最大となることが示されている²¹⁾。なお、閾値よりも少し大きな電圧を印加した液晶マイクロレンズでは、ラビング方向に伸びた干渉縞パターンとなって大きな収差が生じることが知られているが²³⁾、このような液晶マイクロレンズにおける異方性に基づく非点収差は後述の電極分割型液晶マイクロレンズや外部電極構造の液晶マイクロレンズにより補正することができ、その結果として焦点可変特性を向上することができる。現在では、液晶材料パラメータおよび構造パラメータを最適化することで、回折限界に近い半値幅 (FWHM) の集光特性を有する良好な液晶マイクロレンズが作られている²³⁾。

1.3.2 液晶マイクロレンズの高機能化

(1) 楕円パターン電極構造液晶マイクロレンズ

楕円形状の穴型パターン電極を有する液晶マイクロレンズでは、パターン電極の長軸および短軸方向における焦点距離がそれぞれ異なるアナモルフィック液晶マイクロレンズ特性が得られる²⁴⁾。アナモルフィック液晶マイクロレンズでは、印加電圧により制御可能な非点収差特性を有するため、レーザーダイオードなどの大きな非点収差をもった光源のコリメートやアライメントなどへの応用²⁵⁾において有用であると考えられ、またラビング方向に生じた非点収差を楕円パターンにより補償することにも利用できる。

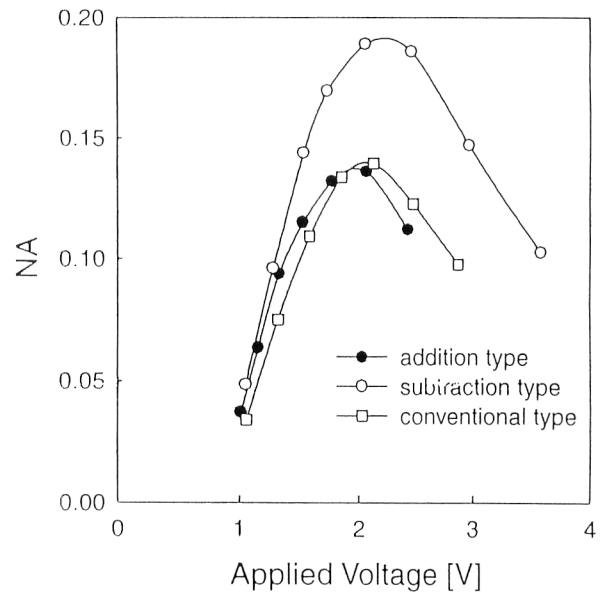


図3 積層電極構造による開口数 NA の改善²⁶⁾。

(2) 積層電極構造の液晶マイクロレンズ

図2に示したように、通常の液晶マイクロレンズを構成する円形穴型パターン電極を付けた基板の外側に、1対の透明電極を設けた積層電極構造とすることで多様な電界分布が実現され、液晶マイクロレンズの高性能化および多機能化が期待される²⁶⁾。積層電極構造では電極端子が4か所あり、種々の電圧印加方法が考えられるが、比較的単純な2種類の方法として (a) のように電圧を印加すると、円形穴型パターン内部では (c) のように電界が強め合うように、また (b) のように電圧を印加すると (d) のように電界が弱め合うように作用する。いずれの場合にも、電圧印加による光路差分布特性は放物線状となって良好なレンズ特性が得られるが、(b) のような印加方法では円形パターンの中央部での電界が弱くなっているため、実効的な光路差を大きくとることができ、その結果図3に示したように開口数 NA を大幅に増大することが可能となる。さらに、積層電極構造とすることで収差特性の改善を行う²⁷⁾ことや、それぞれの電極に加える電圧を可変することで、1個の凸レンズ→屈折率分布なし→1個の凹レンズ、および1個の凸レンズ、2個の凹レンズ→1個の凹レンズ、のように種々のレンズ形態を可逆的に選択することも可能である。

(3) 外部電極構造を有する液晶マイクロレンズ

液晶マイクロレンズは円形パターン内に形成される軸対称電界による液晶分子配向効果を利用しているが、多数の液晶マイクロレンズをアレイ状に集積した場合には、穴型パターンの間隔が短くなるに従って屈折率分布がラビング方向に引き伸ばされた楕円形状になってしまうという効果

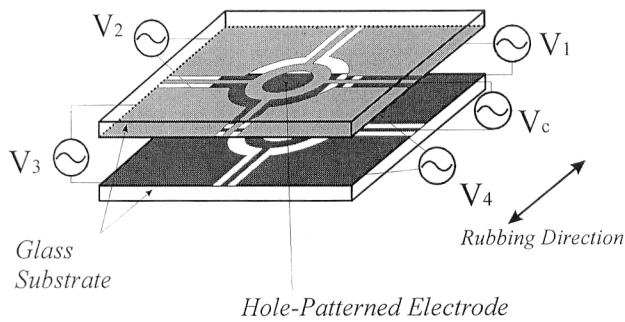


図4 外部電極構造の液晶マイクロレンズ²⁸⁾。

から、液晶分子の配向効果は円形パターンの外部の影響も受けることが知られている。この効果を積極的に利用することで、液晶マイクロレンズの高機能化を行うことができる。図4に示すように円形穴型パターンの外部にスリットにより分割された外部電極を設け、外部電極に印加する電圧でレンズ特性を制御することを試みた²⁸⁾。この場合に、内側の電極に電圧を印加するとともに外部電極にも電圧を印加することで、レンズ特性が悪化する原因となるディスクリネーションの発生を抑えて良好なレンズ特性を得ることができ、さらに外部電極に印加する電圧によっても焦点距離を可変制御することができる²⁹⁾。なお、図4に示した外部電極を4分割した構造において、各外部電極に異なる電圧を印加することで、焦点位置を3次元的に制御するというさらなる高機能化を行うこともできる²⁸⁾。

(4) 液晶マイクロレンズの応答特性の改善

液晶マイクロレンズは、その構造上どうしても液晶層の厚みが数10 μm 以上と通常の液晶ディスプレイ等に比べて厚くなっているため、電圧印加に対する応答回復特性が非常に遅いことが難点である。液晶マイクロレンズにおける応答回復特性の改善として、これまで2周波駆動用液晶の使用やバイアス電圧印加法³⁰⁾などが試みられている。また、液晶マイクロレンズにおけるパターン電極を2分割し、電圧除去時に分割した電極間に電圧を印加することで図5に示したように回復特性を 10^{-3} 秒程度まで改善することができる³¹⁾。さらに、(2)で述べた積層電極構造液晶マイクロレンズにおいて、積層電極に大きな電圧を短時間印加した後パターン電極に通常の駆動電圧を加えることで、ディスクリネーションの発生を抑えて液晶マイクロレンズの応答特性を改善することもできる。なお、ネマティック液晶に紫外線硬化型液晶モノマーを10数%添加して安定化することで応答および回復特性を 10^{-3} 秒程度まで短縮できることが示されている³²⁾が、焦点距離の電圧による可変範囲が制限されるという問題が生じる。

これまで液晶マイクロレンズに関する研究は主として著

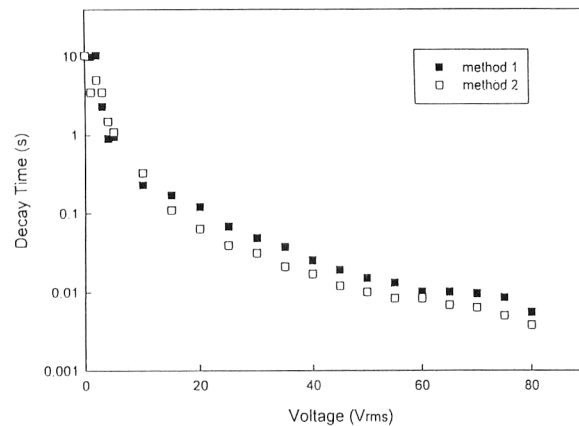


図5 液晶マイクロレンズの回復特性の改善効果³¹⁾。method 1: 駆動電圧除去後に横方向電界を印加, method 2: 片側の分割電極に印加する電圧の位相を反転する。

者の研究室を中心として行われてきたが、近年ロシアの研究者らが、垂直配向処理を行った穴型パターン電極基板間に、誘電異方性が負の液晶を挟み込んだ構造の、液晶マイクロレンズの特性について研究を行っている^{33,34)}。また、スイスの研究者らは片側にのみ円形穴型パターン電極を有する基板を用いた液晶マイクロレンズについて、分子配向のシミュレーションを含めた研究を始めている³⁵⁾。いずれもすでに著者らにより一部研究が行われていたもの^{12,30)}ではあるが、液晶マイクロレンズに関わる分野における研究者が増すことで、研究のさらなる発展が期待される。

2. 液晶による自由空間光ステアリング (偏向) デバイス

2.1 くさび構造液晶セルによる自由空間光ステアリングデバイス

互いに傾いている2枚の透明導電膜付きガラス基板間にホモジニアス配向のネマティック液晶を封入したくさび型液晶セル⁸⁾では、外部電圧印加により入射光の偏向方向を連続的に変化させることができる³⁶⁾。フレネル構造のくさび型液晶セルを用い、各フレネル溝部に加える電圧を可変して入射光ビーム配列の誤差を調整し、実際に光ファイバーへのカップリングを行った例が報告されている³⁷⁾。

2.2 電極分割構造液晶マイクロレンズによる自由空間光ステアリングデバイス

液晶マイクロレンズの円形パターン電極をスリットで分割し、各電極に異なる電圧を印加することで、パターン内の軸対称的な電界分布や屈折率分布を非対称的な分布に変換することができる³⁸⁾。たとえば、電極を8分割した液晶マイクロレンズの各電極間の電位差が均等になるように電圧を印加することで、良好な集光特性を維持し90%以上

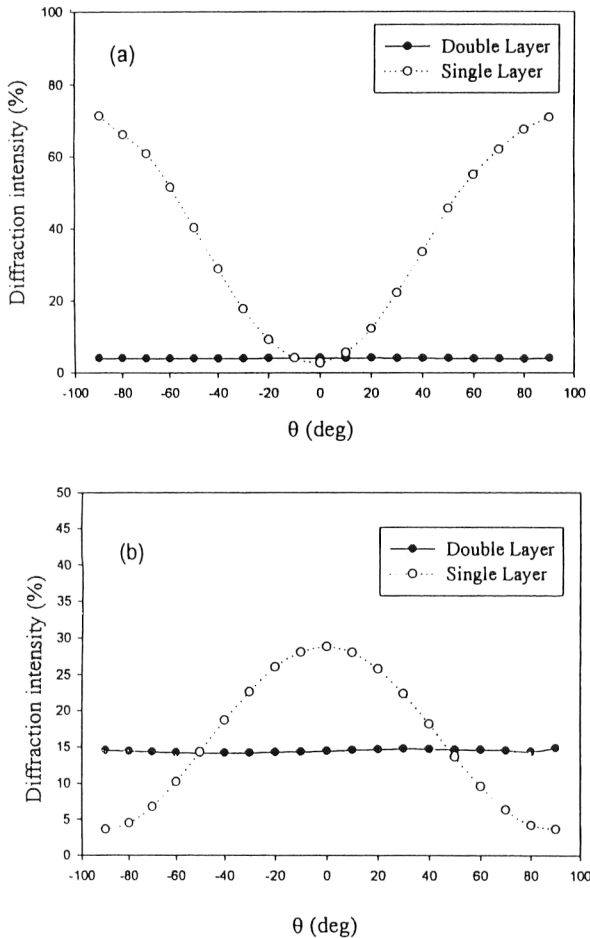


図6 相分離により作製した液晶回折格子による偏光無依存特性⁴⁰⁾。(a) 0次回折光, (b) 1次回折光。

の光強度を保った状態で±16 μm以上の焦点移動特性が得られ、集光および偏向機能の3次元的な制御特性を有する液晶光学デバイスが構成されている¹³⁾。また、前述の外部電極を利用した液晶マイクロレンズにおいて、図4に示した分割した外部電極にそれぞれ異なった電圧を印加することにより、同様に偏向効果を得ることができる²⁸⁾。

このような電極分割構造の液晶マイクロレンズにより、自由空間光インターコネクションや能動型光ファイバーカップラーへの応用が期待される。

2.3 液晶回折格子による光ステアリングデバイス

等間隔に配列したストライプ状の電極を有する液晶セルにおいて、電圧印加により液晶分子の配向方向が周期的に変化して入射光が透過（または反射）する領域としない領域が交互に繰り返すような構成にすると、電圧により回折効果を可変できる液晶回折格子を構成することができる。また、液晶回折格子では透過光強度変化のみならず、位相変化に対する可変制御が可能な位相回折格子も構成できるという特徴がある。液晶回折格子を構成するためには、通常は透明導電膜やアルミニウム薄膜等を付けたガラス基板

をフォトリソグラフィ技術により等間隔にエッチングを行い、回折格子状の電極を形成した基板間に液晶を封入するという手法が行われる。

一方、ラビング配向処理を行ったITO基板間に光重合性モノマーと液晶の混合物を封入し、回折格子パターンを形成したマスクを通して紫外線を照射することでポリマーと液晶の相分離を行うという、単一のプロセスにより液晶回折格子を形成する方法が開発されている³⁹⁾。この方法によると、非常に簡単な手法で1次の回折率が30%で、10 ms程度の応答・回復特性を示す液晶回折格子が得られている。また、ラビング方向を互いに直交とした2層構造のモノマー・液晶混合セルにマスクを通して紫外線照射による相分離を1度行うことで、図6に示したような偏光無依存型の液晶回折格子を作製することもできる⁴⁰⁾。

アルミニウム薄膜に等間隔にスリット状の開口部を設け、スリット方向にラビング処理を行った電極基板、および一様な透明導電膜を付けた平板電極基板間にホモニアス配向のネマティック液晶を封入して作製した液晶回折格子では、電圧を印加しない場合には液晶分子は両基板に平行に配向した光学的に一様な特性となっているため、入射光に対して通常回折格子と同様の回折効果を示す。この液晶回折格子に電圧を印加すると、スリット間に誘起された横方向の電界成分により、液晶分子はスリットの中央部からラビング方向に対称に平板電極基板側にねじれながら傾いた配向状態となり、入射光は複屈折およびねじれ（ツイスト）効果を受けて透過し、回折される。この液晶回折格子の0次の回折光は入射光と同じ偏光状態になっているが、±1次以上の回折光は印加電圧の変化に対して互いに反対称の特性を示すという、特異な偏光特性が見いだされている⁴¹⁾。このような正負の回折光に対する反対称的な特性は位相変調型の液晶回折格子においても同様に得られている⁴²⁾。また、フォトリソグラフィ技術と2度のラビング処理により、±45°となるように逆ねじれ構造とした液晶回折格子においても同様の反対称的な回折特性が得られている⁴³⁾。このような特異な偏光特性を示す回折効果は反対称的な液晶分子配向モデルにより説明されており⁴⁴⁾、新規な光学デバイスとして期待される。

また、透明導電膜上に周期が1.5 μmで高さが1.4 μmのテーパ状の微細な溝構造を設け、溝部に液晶を封入した構造の液晶回折格子が作られている⁴⁵⁾。電圧印加による屈折率のマッチング効果を利用することで、0次光と高次の回折光の効率的な切り替えが行われている。

ほかに、光ステアリングデバイスではないが回折格子特性を有する液晶ファイバーを構成した報告もみられる。す

なわち、4 μm 径の中空コアを有するファイバーに液晶を平行配向となるように充填し、クラッドの外部から 483 μm 周期の櫛状の電極部を設けて 250 V の電圧を加えることで、帯域幅 15 nm で、6 dB の制御効果が得られている⁴⁶⁾。

液晶回折格子では、液晶セルに電圧を印加することで光偏向効果が得られるが、偏向角を連続的に可変することは困難である。ところで、ネマティック液晶セルの一方の基板に LiNbO_3 のような圧電性結晶板を用いて弾性表面波を励振すると、液晶分子が基板に平行方向に配向したホモジニアス配向の場合には、液晶セルに直流もしくは低周波の電圧を印加した場合にみられるウィリアムズドメインに似た液晶層の厚み程度の縞状ドメインが生成される⁴⁷⁾。一方、液晶分子が基板に垂直な方向に配向しているホメオトロピック配向の場合には、弾性表面波の周波数（波長）に関連する縞状のドメインが観察される⁴⁷⁾。そこで、広帯域のトランスデューサーを用いて弾性表面波の周波数を可変することで、回折格子の周期を可変できる液晶回折格子が作られている⁴⁸⁾。この液晶回折格子では連続的な光ステアリングを行うことが可能である。

3. 液晶による偏光変換・制御デバイス

3.1 軸対称・ホモジニアス (RH) 配向液晶セルによる偏光変換デバイス

通常の液晶デバイスで用いられている分子配向状態とは異なり、同心円や放射状のような軸対称的な特殊な分子配向を有する液晶セルを用いると、新規な偏光変換・制御素子を構成することができる。軸対称的な分子配向は、液晶セル基板を放射状または同心円状にラビングすることで得られ、焦点可変の液晶レンズにおける収差の改善法として著者らによりすでに提案されている¹⁴⁾。直径が 1 mm 程度以下の小さな領域でラビング処理を行うことは困難であるが、微小領域で放射状の分子配向を行う方法として、液晶マイクロレンズを作製する場合と類似の方法である、電界による分子配向制御と配向のメモリー効果を組み合わせた電界印加熱処理法⁴⁹⁾を適用することができる。また、液晶セルの一方の基板面では液晶分子が放射状 (radially: R) に配向しているが、他方の基板面ではラビング等により基板面に平行で一方向に配向しているホモジニアス (homogeneous: H) 配向をとる液晶セル（以下、RH 液晶セルという）では、ホモジニアス配向すなわちラビングを行った基板側から偏光方向がラビング方向と一致した入射光に対して、透過光は液晶分子のねじれに従って直線偏光が放射状に分布するような偏光状態となる⁵⁰⁾。したがっ

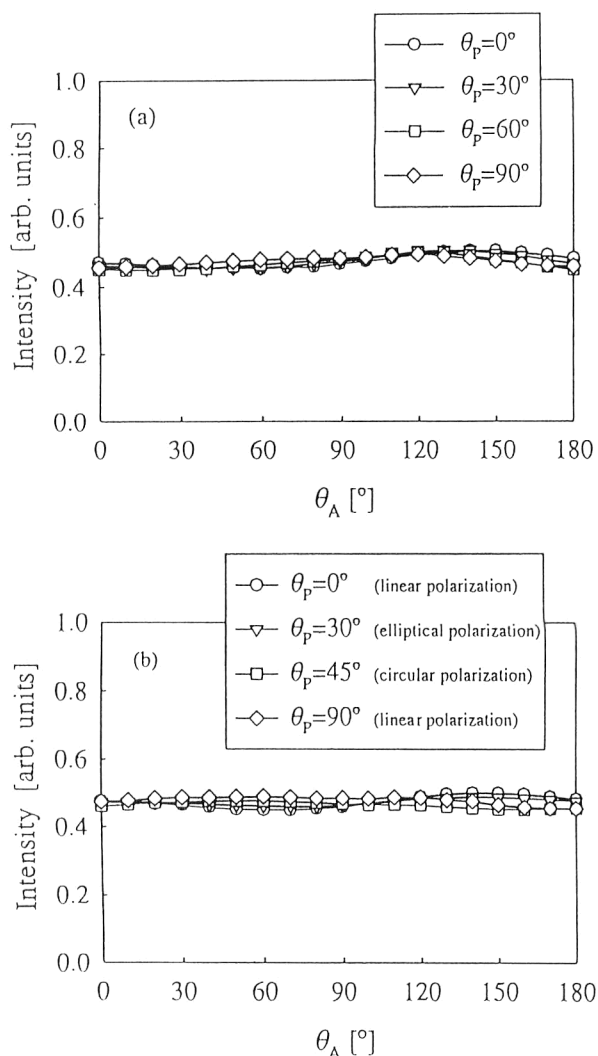
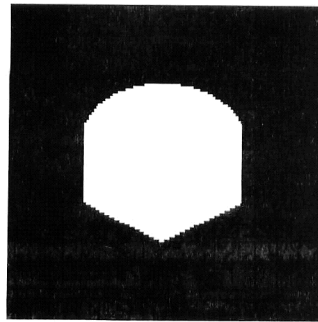


図7 液晶偏光変換デバイスによる偏光無依存透過強度特性⁵¹⁾。(a) 直線偏光入射, (b) 円偏光入射。

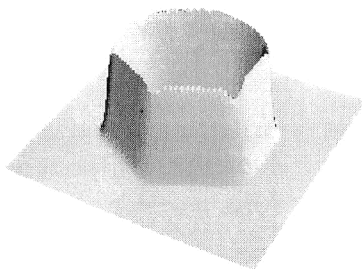
て、検光子を回転しても光透過領域と遮断領域が検光子と一緒に回転するだけで、円形パターン内を透過する全光量は一定となっている。また、ラビング方向に垂直な偏光が入射した場合には同心円状に分布するような偏光状態が得られる。逆に、放射状に配向している基板側から直線偏光が入射する場合には、どのような偏光方向の場合でも RH 液晶セルを透過した後ではラビング方向に偏光した出射光となるような偏光制御を行うことができる⁵⁰⁾。さらに、検光子を透過後の光量は図7に示すように一定となっており⁵¹⁾、またこの RH 液晶セルでは液晶層の厚み d がある程度以上厚い場合（モーガン条件： $d > \lambda/2\Delta n$, Δn は液晶の複屈折）には波長依存性がないという特徴がある。

3.2 RH 液晶セルの Haar ウェーブレット変換への応用

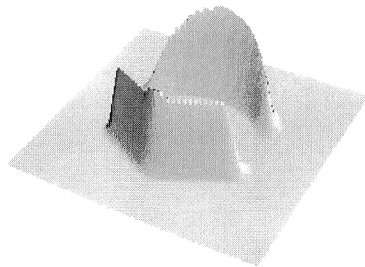
光学的ウェーブレット変換は実時間の画像処理等へ応用されており、特に Haar ウェーブレットを用いる光学的ウェーブレット変換は入力画像の特徴抽出に利用され、たと



(a)



(b)

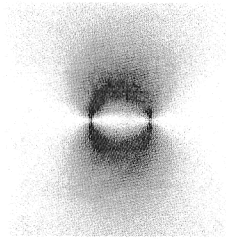
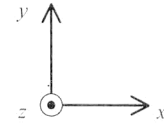


(c)

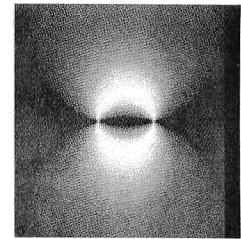
図8 RH 液晶セルによる円形 Haar ウェーブレットを用いた入力画像のエッジ特徴抽出⁵⁵⁾.

例えばシャドウキャスティングシステムはエッジまたはコーナーの抽出に有用である⁵²⁾。この Haar ウェーブレットを光学的に実現するためには、入射光を $-1, 0, +1$ の3状態に符号化する必要があるが、位相の変化と考えて、偏光符号化により実現することができる。筆者らは液晶セルを用いた円形 Haar ウェーブレットを用いたエッジおよびコーナーの同時抽出法⁵³⁾を提案し、液晶マイクロレンズアレイを用いたシャドウキャスティングシステムによりエッジおよびコーナーの抽出を行った結果について報告した⁵⁴⁾。

ところで、前節で述べた RH 液晶セルは出力光の電界方向が放射状に分布するような機能を有しているため、円形 Haar ウェーブレットとして使用することができる⁵⁵⁾。このような円形 Haar ウェーブレットとして RH 液晶セルを用いると、ダイレクションファクターを変化してもエ



(a)



(b)

図9 RH 液晶セルの中心をずらして重ねた場合の透過光強度分布⁵⁷⁾。(a) 直交偏光子、(b) 平行偏光子。

ッジとコーナーの強度比が一定であり、また図8に示すように任意の方向のエッジ抽出が可能であるという特徴がある⁵⁴⁾。

3.3 RH 液晶セルの液晶セルパラメーター測定への応用

ホモジニアス配向側の基板を外側にした2枚の RH 液晶セルを、軸対称の中心をわずかにずらして重ね合わせ、偏光子と検光子の偏光方向をそれぞれのダイレクターの方向に一致するように配置すると、透過光の強度分布は図9(a)のようになる。一方、検光子の偏光方向が直交するように配置すると同図(b)のように(a)と明暗が反転した強度分布特性が得られる。ここで、明部と暗部の極値となる座標はそれぞれ偏光子と検光子を平行または直交とした場合に対応し、中間の明るさの状態では各々の角度と座標が対応することになる。すなわち、通常の偏光解析においては、偏光子や検光子をそれぞれ回転させることで測定を行っているが、2枚の RH 液晶セルの組み合わせにより回転等の可動操作を行わずに偏光の解析が可能となる。

TN 液晶セル等における液晶分子配向のねじれの角度を検出する方法として、液晶セルのストークスパラメーターを測定して角度を求める方法が開発されている⁵⁶⁾。しかし、ストークスパラメーターの測定にはある程度の時間が必要であるため、ねじれの角度が時間変化するような場合には測定が困難であった。そこで、前述の RH 液晶セルの間に被測定試料を挿入し、透過光の強度分布をビデオカメラにより測定記録した後、画面ごとに透過光強度が極値をとる座標を求めて液晶分子配向のねじれの角度変化を求めるという方法を適用することで、ビデオレートに対応した高速でねじれの角度変化を測定することが可能となった⁵⁷⁾。

3.4 液晶による偏光制御デバイス

電極分割構造の液晶マイクロレンズと同様の構成で、液晶分子を基板に垂直に配向させた液晶セルの各分割電極に電圧を印加することで、液晶分子の配向方向を液晶セル基板に平行方向に傾け、電界方向をセル基板面内で回転することで回転波長板を構成することができる⁵⁸⁾。この液晶回転波長板を2組用い、それぞれ1/2波長板および1/4波長板として用いることで、シングルモード光ファイバーからの出射光の偏光状態を常に一定とするための偏波スタビライザーが構成されている^{59,60)}。液晶回転波長板は機械的可動部分がなく、無限に回転できるという特徴がある。

また、同様の電極構造をもち、通常配向膜を塗布した後ラビング処理を行った基板と、非常に弱い配向規制力を有するポリマー膜を塗布した基板間にネマティック液晶を封入した液晶セルにおいて、分割電極基板間に電圧を印加することで直線偏光を任意の方向の直線偏光に、また任意の偏光方向の直線偏光を一定の偏光方向に変換する液晶偏光制御デバイスも構成されている⁶¹⁾。

数ボルト以下の低電圧により光学的特性を大幅に変えられるというすぐれた特徴をもつ液晶を利用した光学デバイスとして、これまで提案され研究が行われてきた焦点可変の液晶レンズ、自由空間光ビームステアリングデバイス、偏光制御デバイス等について概説した。

液晶を用いることで、従来の光学材料では実現できなかった種々の新規な光学デバイスを構成することができるので、具体的な素子への応用が今後の課題である。

文 献

- 1) 岡野光治, 小林駿介: 液晶(基礎編, 応用編)(培風館, 1985).
- 2) R. A. Kashnow and C. R. Stein: "Total reflection liquid-crystal electrooptic device," *Appl. Opt.*, **12** (1973) 2309-2311.
- 3) R. A. Soref: "Liquid-crystal fiber-optic switch," *Opt. Lett.*, **4** (1979) 155-157.
- 4) R. E. Wagner and J. Cheng: "Electrically controlled optical switch for multimode fiber applications," *Appl. Opt.*, **19** (1980) 2921-2925.
- 5) R. A. Soref and D. H. McMahon: "Calcite 2×2 optical bypass switch controlled by liquid-crystal cells," *Opt. Lett.*, **7** (1982) 186-188.
- 6) 佐藤 進: "液晶における諸現象とその光学素子への応用の可能性", *光学*, **12** (1983) 160-165.
- 7) 佐藤 進: "液晶レンズの研究", *光学*, **18** (1989) 668-673.
- 8) 佐藤 進, 菊池 明: "ネマチック液晶セルによる光偏向", *応用物理*, **45** (1976) 938-942.
- 9) S. Sato: "Liquid-crystal lens-cells with variable focal length," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18** (1979) 1679-1683.
- 10) 山口留美子, 佐藤 進: "ネマチック液晶における屈折率分

散特性", *電子情報通信学会論文誌*, **J71-C** (1988) 1241-1247.

- 11) S. Sato, A. Sugiyama and R. Sato: "Variable-focus liquid-crystal Fresnel lens," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24** (1985) L626-L628.
- 12) T. Nose and S. Sato: "Liquid-crystal microlens obtained with a nonuniform electric field," *12th Int. Liq. Cryst. Conf.*, AP36 (1988) 382. *Liq. Cryst.*, **5** (1989) 1425-1433.
- 13) S. Sato: "Application of liquid crystals to variable focusing lenses," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 471-485.
- 14) S. Sato, T. Nose, R. Yamaguchi and S. Yanase: "Relationship between lens properties and director orientation in a liquid crystal lens," *Liq. Cryst.*, **5** (1989) 1435-1442.
- 15) 酒井文明, 高橋久志, 内山博之, 佐藤 進: "焦点距離可変液晶レンズ", *日本眼科学学会誌*, **9** (1988) 30-37.
- 16) T. Nose, S. Masuda and S. Sato: "Application of a liquid crystal lens to a double-focusing common-path interferometer," *Proc. SPIE*, **3143** (1997) 165-170.
- 17) S. Suyama, M. Date and H. Takada: "Three-dimensional display system with dual-frequency liquid crystal varifocal lens," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 480-484.
- 18) 陶山史朗: "液晶レンズを用いた立体表示システム", *光学*, **30** (2001) 33-34.
- 19) S. T. Kowel, D. S. Cleverly and P. G. Kornreich: "Focusing by electrical modulation of refraction in a liquid crystal cell," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 278-289.
- 20) H. Yoshikawa, S. Hasegawa and T. Uchida: "An advanced active optical pickup with crossed-stripe liquid crystal device for compensation of spherical aberration," *18th Int. Liq. Cryst. Conf.* 27D-18-p (2000).
- 21) S. Masuda, S. Fujioka, M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Dependence of optical properties on the device and material parameters in liquid crystal microlenses," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 4668-4672.
- 22) S. Masuda, M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Influence of elastic constants on the optical properties of liquid crystal microlens," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 2765-2770.
- 23) M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Optimization of device parameters for minimizing spherical aberration and astigmatism in liquid crystal microlenses," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 139-143.
- 24) M. Honma, S. Masuda, T. Nose and S. Sato: "Optical properties of an anamorphic liquid crystal microlens using an elliptically patterned electrode structure," *Proc. SPIE*, **3143** (1997) 208-213.
- 25) M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Optical properties of anamorphic liquid crystal microlenses and their application for laser diode collimation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 89-94.
- 26) M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Enhancement of numerical aperture of liquid crystal microlenses using a stacked electrode structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 4799-4802.
- 27) M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Improvement of aberration properties of a liquid crystal microlens with a stacked electrode structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2000) (in press).
- 28) T. Nose, Y. Yamada and S. Sato: "Improvement of optical properties and beam steering functions in a liquid crystal microlens with an extra controlling electrode by a planar

- structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 6383-6387.
- 29) T. Nose, Y. Yamada and S. Sato: "Molecular orientation effects in the LC cell utilizing the nonuniform electric field by the extra controlling electrode," *18th Int. Liq. Cryst. Conf.*, 27D-17-P (2000) p. 438.
 - 30) 能勢敏明, 佐藤 進: "液晶マイクロレンズの光ファイバスイッチへの応用", 電子情報通信学会論文誌 C-1, **J75-C-I** (1992) 155-163.
 - 31) Y. Mao, M. Honma and S. Sato: "Improvement of decay properties of a liquid crystal microlens with a divided electrode structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) L1412-L1415.
 - 32) H. Kusanagi, S. Masuda, T. Nose and S. Sato: "Graded index type liquid crystal microlens using a small amount of polymer," *Mater. Sci. Forum*, **308-311** (1999) 591-596.
 - 33) A. Gvozdev and G. E. Nevskaya: "Optical properties of homeotropical-aligned liquid crystal microlens," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **304** (1997) 423-428.
 - 34) A. Gvozdev and G. E. Nevskaya: "Comparative characteristics of nonsymmetrical liquid crystal microlens with different alignment," *18th Int. Liq. Cryst. Conf.*, 26D-12-P (2000) 438.
 - 35) T. Scharf: "High quality liquid crystal microlenses with planar alignment," *18th Int. Liq. Cryst. Conf.*, 25E-25-P (2000) 801.
 - 36) 田中亨子, 佐藤 進: "くさび形液晶セルにおける分子配列と電気光学的特性", テレビジョン学会技術報告, ED627, IPD70-13 (1982) 33-38.
 - 37) K. Hirabayashi, T. Yamamoto and M. Yamaguchi: "Free-space optical interconnections with liquid-crystal microprism arrays," *Appl. Opt.*, **34** (1995) 2571-2580.
 - 38) S. Masuda, S. Takahashi, T. Nose, S. Sato and H. Ito: "Liquid-crystal microlens with a beam-steering function," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 4772-4778.
 - 39) W.-T. He, T. Nose and S. Sato: "Novel liquid crystal grating with a relief structure by a simple UV irradiation process," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 4066-4069.
 - 40) W.-T. He, T. Nose and S. Sato: "A double-layer polymer/liquid-crystal grating with polarization direction-independent diffraction properties," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) L795-L797.
 - 41) Z. He, T. Nose and S. Sato: "Diffraction and polarization properties of a liquid crystal grating," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) 3529-3530.
 - 42) Z. He, T. Nose and S. Sato: "Polarization properties of a liquid crystal phase grating," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **301** (1997) 295-300.
 - 43) Z. He and S. Sato: "Polarization properties of inversely twisted nematic liquid-crystal grating," *Appl. Opt.*, **37** (1998) 6755-6763.
 - 44) Z. He, T. Nose and S. Sato: "Polarization properties of an amplitude nematic liquid crystal grating," *Opt. Eng.*, **37** (1998) 2885-2898.
 - 45) H. Sakata and M. Nishimura: "Switchable zero-order diffraction filters using fine-pitch phase gratings filled with liquid crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 1516-1521.
 - 46) Y. Jeong, B. Yang, B. Lee, H. S. Seo, S. Choi and K. Oh: "Electrically controllable long-period liquid crystals fiber gratings," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (2000) 519-521.
 - 47) S. Sato and H. Ueda: "Effects of surface acoustic waves on molecular orientation in nematic liquid crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) 511-514.
 - 48) H. Moritake, T. Seike and K. Toda: "Acoustooptic effects of nematic liquid crystals induced by elastic wave propagating in glass substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 3076-3079.
 - 49) T. Nose, S. Masuda and S. Sato: "Memory effects in nematic liquid crystals by a surface molecular reorientation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 3450-3455.
 - 50) S. Masuda, T. Nose and S. Sato: "Optical properties of a polarization converting device using a nematic liquid crystal cell," *Opt. Rev.*, **2** (1995) 211-216.
 - 51) M. Honma and S. Sato: "Polarization-independent optical properties of liquid crystal polarization-converting devices," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 3442-3446.
 - 52) X. Yang, H. H. Szu, Y. Sheng and H. J. Caulfield: "Optical Haar wavelet transforms of binary images," *Opt. Eng.*, **31** (1992) 1846-1851.
 - 53) Z. He and S. Sato: "Generation of optical Haar wavelets by zone plate," *Opt. Lett.*, **19** (1994) 686-688.
 - 54) Z. He, M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Optical Haar wavelet transforms with liquid crystal elements," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 6433-6438.
 - 55) M. Honma, T. Nose and S. Sato: "Optical Haar wavelet for extracting edge features along arbitrary directions," *Opt. Rev.*, **7** (2000) 9-13.
 - 56) Y. Zhou, Z. He and S. Sato: "A novel method for determining the cell thickness and twist angle of a twisted nematic cell by Stokes parameter measurement," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 2760-2764.
 - 57) M. Honma, R. Yamaguchi and S. Sato: "Application of a circularly homogeneously aligned liquid-crystal cell to real time measurements of twist angles in twisted-nematic liquid-crystal cells," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 2727-2731.
 - 58) Y. Ohtera, T. Chiba and S. Kawakami: "Liquid crystal rotatable waveplate," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **8** (1996) 390-392.
 - 59) T. Chiba, Y. Ohtera and S. Kawakami: "Polarization stabilizer using liquid crystal rotatable waveplate," *J. Lightwave Technol.*, **17** (1999) 885-890.
 - 60) 大寺康夫, 千葉貴史, 川上彰二郎: "回転電界駆動による液晶偏光制御デバイス", 光学, **30** (2001) 29-30.
 - 61) T. Yamanaka, R. Yamaguchi and S. Sato: "In-plane switching micro optical devices using weak anchoring effects," *18th Int. Liq. Cryst. Conf.*, 25D-29-p (2000) 302.

(2000年10月26日受理)