



## 液晶レンズの研究

佐藤 進

秋田大学鉱山学部電子工学科 〒010 秋田市手形学園町 1-1

(1989年8月2日受理)

### Research on Liquid Crystal Lens

Susumu SATO

Department of Electronics, Akita University, 1-1, Tegata Gakuenmachi, Akita 010

#### 1. はじめに

ネマティック液晶は、液体のような流動性および結晶のような異方性をもち、さらに外部電界、磁界、熱、圧力等により容易にその分子配向状態や光学的、電気的性質を変化させることができるという特徴をもっている。

とくに、液晶の電気光学効果、すなわち液晶の光学的性質が印加電界により大幅に変化する現象は、半導体技術と融合して液晶テレビジョンを始めとする各種のディスプレイ素子に広く応用されている。このような液晶における電気光学効果を利用すると、比較的小さな電圧印加により液晶の実効的な屈折率を異常光に対する値から常光に対する値まで連続的に変化させることができるという、他の光学材料に見られない優れた特性を示すことが知られており、これまでディスプレイ素子以外にもさまざまな光学素子への応用が試みられている<sup>1,2)</sup>。

ここでは、まず始めに液晶を光学材料として用いる場合の基礎特性として、液晶の屈折率および複屈折の温度依存性、ならびに波長分散特性<sup>3,4)</sup>について述べる。液晶の光学素子への応用として、筆者らはこれまで液晶を曲面構造をもつレンズの形状をした容器(液晶セル)中に封入し、外部電圧を加えることにより液晶の屈折率を一樣に変化させて、可変焦点特性を示すレンズ<sup>5,6)</sup>を作製し、その特性の改善<sup>7,8)</sup>および駆動法<sup>9-12)</sup>について報告してきた。さらに、基板の電極をピンホール状に除去して軸対称状の不均一電界分布を作り、この電界による液晶分子の配向効果に基づく軸対称の屈折率分布特性を利用したマイクロレンズ<sup>13,14)</sup>を作製し、その特性につい

て報告してきた。ここでは、比較的小さな電圧を印加することによりその焦点距離を連続的に可変できるという特徴をもっている液晶によるレンズについて、筆者らによる実験結果およびその応用例について述べる。

#### 2. 光学材料としての液晶の特性

##### 2.1 屈折率の温度依存性

液晶分子の長軸方向に偏光した光線、すなわち異常光に対する屈折率  $n_e$  は比較的大きいので、高屈折率プリズムを有するアッペ屈折計(アタゴ 4-T)を用いて液晶の  $n_e$  および  $n_o$  (常光に対する屈折率)を測定した。図1にネマティック液晶の屈折率の温度依存性を示す<sup>3,4)</sup>。ネマティック液晶は分子の長軸方向に光軸をもつ一軸性光学結晶と同様の屈折率異方性(複屈折)を示し、複屈折  $\Delta n$  は  $n_e - n_o$  で与えられる。図で、シアノビフェニル系液晶である K15 は、液晶-等方性液体の相転移温度  $T_c$  が  $34^\circ\text{C}$  付近であり、 $T_c$  より高い温度で複屈折が消失していることがわかる。また、 $T_c$  が室温に近い場合、室温付近での屈折率の温度による変化が大きく、温度の上昇とともに  $n_e$  は減少し、 $n_o$  は増加している。相転移温度が高い E44 や CP では、室温付近における屈折率変化も小さいことがわかる。

##### 2.2 液晶の屈折率の波長分散特性

種々のネマティック液晶における  $n_o$ ,  $n_e$ , および等方性液体状態での屈折率  $n_i$  の波長分散特性を測定し、その分散の度合を示すアッペ数  $\nu$  を算出した<sup>3,4)</sup>。図2にアッペ数  $\nu$  と液晶の屈折率  $n_d$  の関係を示す。図で実測値の右上部分が異常光、左下の部分は常光に対するもの

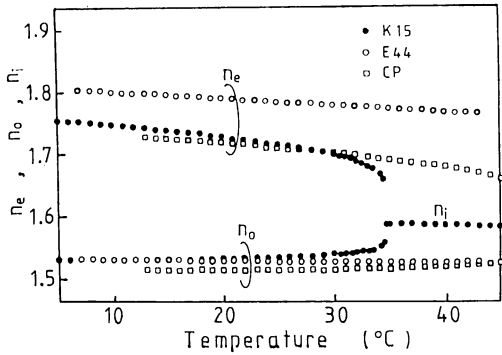


図 1 液晶の屈折率の温度依存性<sup>4)</sup>

である。MBBA は同程度の  $n_d$  を示すシアノビフェニル系液晶よりもアッペ数が小さく、したがって分散が大きいことがわかる。シアノシクロヘキサン系混合液晶である ZLI 1083 はアッペ数が大きく、異常光の分散が他の液晶の常光の分散程度しかないことがわかる。また、温度が高くなるとともに常光における値は右上に、異常光における値は左下に移り、おのおの値は弓なりの曲線で結ぶことができる。図には参照データとして光学ガラス SF 1~SF 10 の  $n_d$  と  $V_d$  の関係も併せて示してある。液晶は光学ガラスと比較してかなり分散の大きい光学材料であるといえる。

### 3. 曲面構造液晶セルによる可変焦点レンズ

#### 3.1 レンズ構造ネマティック液晶セルの特性

液晶ディスプレイ素子では、液晶セルを構成する電極基板は平行平面構造となっている。一方、両方の基板が

互いに傾いたくさび構造となっている場合には、前述のように、電圧印加により液晶の見かけの屈折率を異常光に対する値から常光に対する値まで可変できるため、入射光の偏向角を連続的に変化させることができる<sup>15,16)</sup>。くさびの角度が連続的に変化したものがレンズである。したがって、たとえば、透明導電膜をコートした平凹レンズおよびガラス基板の間に、液晶分子が基板に平行に配向 (ホモジニアス配向) するような処理を行ない、ネマティック液晶を封入した液晶セルを構成し、電圧を印加して液晶分子の配向状態を制御することで、凸レンズとして動作する可変焦点レンズを構成することができる<sup>5,6)</sup>。

#### 3.2 フレネル構造および直交 2 層構造による液晶レンズの特性の改善

液晶層が凸レンズ状となっている液晶セルではその中心部で、一方凹レンズ状のセルでは周辺部で液晶層がきわめて厚くなり、液晶が白濁して透過特性が低下 (散乱) するとともに応答・回復時間が著しく長くなり<sup>6)</sup>、実用的な面で重大な欠陥となっている。そこで、液晶層をフレネル構造とすることで実効的に薄くし、これらの特性の改善を試みた<sup>7)</sup>。使用したアクリル製フレネルレンズのピッチは 200  $\mu\text{m}$ 、焦点距離は -7.6 cm であり、表面には透明導電膜 (ITO) がコートされている。フレネル構造液晶レンズの印加電圧に対する焦点距離の変化を図 3 に示す<sup>10)</sup>。この液晶によるレンズの焦点距離は、異常光に対する値  $f_e$  から常光する値  $f_o$  まで連続的に可変できることがわかる。

図 4 に液晶レンズの印加電圧に対する応答・回復特性

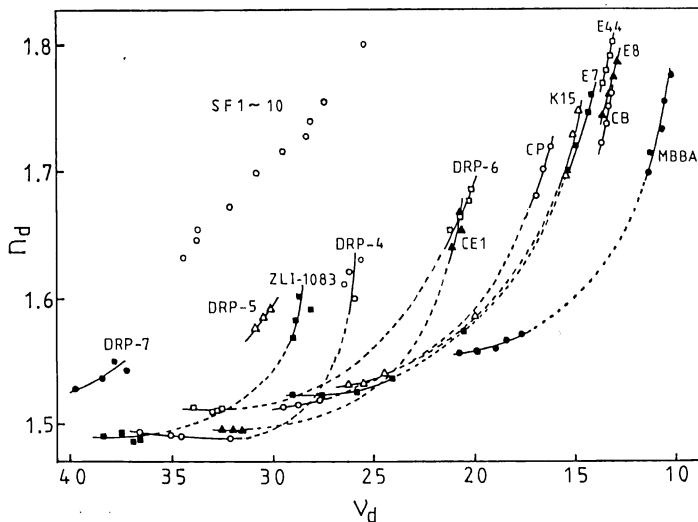
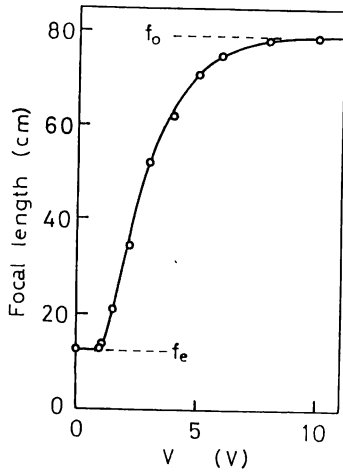
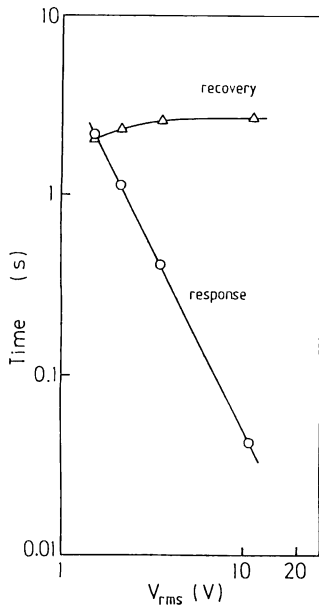


図 2 屈折率とアッペ数の関係<sup>4)</sup>

図3 液晶レンズの可変焦点特性<sup>10)</sup>図4 液晶レンズの応答・回復特性<sup>7)</sup>

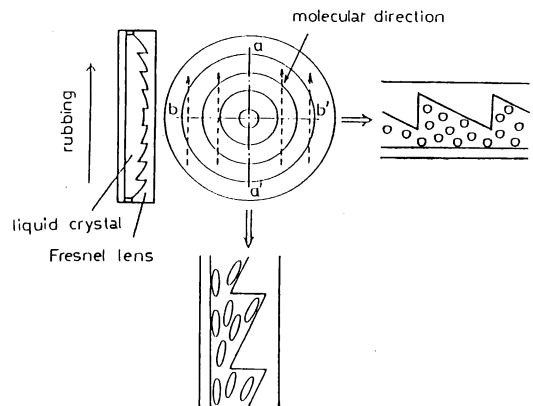
を示す<sup>7)</sup>。応答時間は印加電圧のほぼ2乗特性で短くなり、一方回復時間は数秒程度と一定となっている。このように、液晶層をフレネル構造とすることで、液晶レンズセルの応答・回復特性いずれも同程度の焦点距離可変範囲を有する、直径が2cmの液晶レンズの場合と比べて2桁以上も大幅に改善することができた。また、偏光板を除いた場合の透過率として、可視光領域で90%程度と透過率の高い液晶レンズを構成することができた。しかし、偏光板の透過率は通常30~40%程度と低いので、液晶レンズ全体の透過率はかなり低くなってしまふ。そこで、同一の特性を示す2枚の液晶レンズを、液

晶分子の配向方向(すなわち光軸)が互いに直交するように重ね合わせた液晶セルを作製した<sup>7)</sup>。このように2層構造の液晶レンズとすることで、偏光板を用いず、全体の透過率が約80%の明るいレンズを構成することができた。

### 3.3 液晶分子配向に基づく収差と軸対称分子配向による特性の改善

前述したように、液晶層が凸レンズ状となるようにするためには、基板となる凹レンズの面上で液晶分子を一方方向に配向させなければならない。この場合には、液晶分子の配向に基づく異方性により、図5に示すように、液晶分子の配向方向と平行な方向(図5でaa'方向)と垂直な方向(bb'方向)ではそれぞれ異なった特性を示すことが考えられる<sup>8)</sup>。図5でaa'方向においては、レンズの中心付近では液晶分子が互いにほぼ平行に配向しているが、レンズの周辺部に向かうほど凹レンズ面の傾きが大きくなるので、液晶分子は両側の基板面に対しては平行に配向しているが、液晶層内部では傾いて配向することになる。一方、図5でbb'方向ではこのような効果は見られず、屈折率は半径方向で変化せず一定である。すなわち、液晶レンズの各領域で屈折率が異なるような分布が生じ、液晶レンズを通る光線は一点で集光せず、収差が生じることになる<sup>8)</sup>。

このような非点収差を軽減するためには、屈折率分布を考慮した非球面レンズとするか、または同心円状のような軸対称の分子配向をとる液晶セル<sup>17,18)</sup>を構成することが考えられる。この場合には、いずれの場所においてもbb'方向と同様の分子配向となり、集光特性も同様となる。軸対称の分子配向法としては、基板を回転しながらラビングを行なう方法<sup>17,18)</sup>や、基板を回転しながらスリットを通して斜方蒸着を行なう方法<sup>19)</sup>等がある。

図5 レンズ構造と液晶分子配向<sup>8)</sup>

なお、軸対称状の分子配向をとる液晶レンズにおいては、軸対称の偏光特性を有する偏光板が必要となる。このためには、同心円状にラビングを行なったガラス板上にメチレンブルーの溶液をスピコートしたもの<sup>20)</sup>、またはホモニアス・同心円ラビングにより作製した液晶セルと直線偏光板の組合せによる軸対称偏光板<sup>21)</sup>等が考案されている。とくに、後者では液晶分子の配向方向と直線偏光板の方位の設定により、同心円および放射状の偏光を得ることができ、偏光特性も非常に良好である<sup>21)</sup>。

3.4 液晶レンズ駆動時における非線形特性の改善

液晶レンズは、図3に示すように、電圧に対する焦点距離の変化特性が徐々に緩やかになり飽和するという、非線形的な特性を有している。液晶レンズを種々の装置へ応用する場合には、このような非線形特性は大きな欠点となる。そこで、次に液晶レンズの特性に対し逆関数的な特性を有する素子または回路を用いてレンズを駆動することにより、液晶レンズの電圧-焦点距離特性における非線形特性を補償する方法について述べる。

液晶レンズの印加電圧-焦点距離特性と類似した形状の変化を示す、ホモニアス配向のゲスト・ホスト

(GH) 液晶セルにおける印加電圧-透過光強度特性<sup>9,10)</sup>、またはホモニアス配向の液晶セルにおけるセルの静電容量の電圧依存性を利用して逆関数特性を作り、液晶レンズの駆動に用いることを試みた<sup>11,12)</sup>。試作回路のブロック図を図6に示す。また、本方式による補償結果を図7に示す<sup>10)</sup>。図から、立上り付近での補償特性にやや難が見られるが、ほぼ入力信号に比例して焦点距離が変化していることがわかる。

4. 液晶によるマイクロレンズ

4.1 軸対称不均一電界による液晶分子配向とレンズ効果

ディスプレイ素子等の通常の液晶素子においては、両電極間に加えられた電圧による均一な電界の強度変化を利用して動作している。これに対して、不均一な電界分布を利用して電圧印加時に特別な分子配向状態を実現する<sup>16,22)</sup>ことで、新しい光学素子への応用の可能性が期待される。ここでは、円形の穴形パターンをもつ電極と平板電極との組合せによる、軸対称の電界分布中での液晶分子の再配向効果を利用したマイクロレンズ効果<sup>13,14)</sup>について述べる。

境界要素法により、円形穴形パターンと平板電極間に生じる電界分布を計算した結果<sup>14)</sup>を図8に示す。同図から、電極パターンの端の部分で電界が集中し、その方向が基板に垂直な方向から最も傾いていること、およびパターンの中心部では電界が弱く、かつ基板に垂直な方向に向いていることがわかる。このような不均一電界中における液晶分子の配向状態は、模式的に図9(a)~(c)のようになっているものと思われる<sup>14)</sup>。図9(a)は電圧を加えていない場合で、液晶分子は基板に平行に様に配向している。比較的小さい電界を加えた場合が図9(b)である。パターンの中心部では電界が弱いので液晶分子は基板に平行に配向しているが、パターンの端付近では基板に垂直な方向にある角度傾いた配向となり、パターン中心部から周辺部に向かって異常光に対する屈折

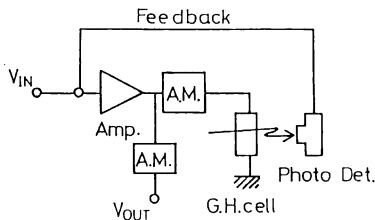


図6 液晶レンズの特性補償回路<sup>10)</sup>

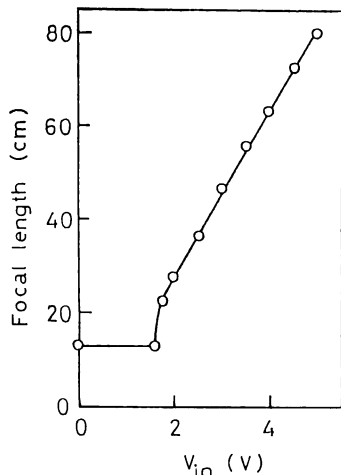


図7 入力電圧と補償された可変焦点特性<sup>10)</sup>

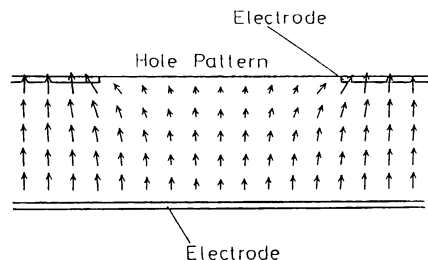
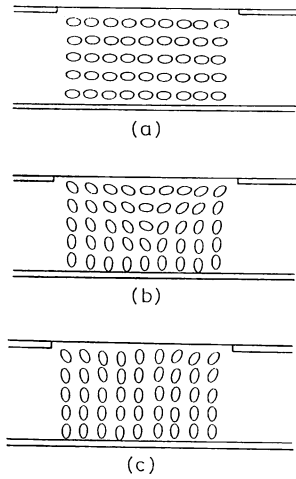


図8 円形パターンによる電界分布<sup>14)</sup>

図9 不均一電界による液晶分子配向<sup>14)</sup>

率が小さくなるような屈折率の空間分布 (凸レンズに対応する) が得られる。さらに印加電圧を大きくしたものが図9(c)であり, この場合には液晶分子のほとんどが電界方向に配向しているものと考えられる。したがって, 図9(b)とは逆に, パターンの中心部から周辺部に向かって屈折率が小さくなるような分布 (凹レンズに対応する) となるものと思われる。

以上のように, 円形の穴形パターン電極を有するホモジニアス配向の液晶セルにおいて同心円状の屈折率分布が得られ, 電圧の大きさに応じて凸レンズ効果から凹レンズへとその光学的特性が変化することが期待される。なお, 円形穴形パターンの寸法は非常に小さなものとするのが可能であるので, 液晶によるマイクロレンズを構成することができる。

#### 4.2 マイクロレンズ効果による集光特性

A1 電極上にエッチングにより穴形パターンを形成

し, 対向電極としては ITO ガラスを用いた。両電極基板上に PVA 塗布およびラビングによる配向処理を行ない, 適当な厚みのスペーサを介して液晶を封入し, ホモジニアス配向の液晶マイクロレンズを構成した。

He-Ne レーザー光を液晶マイクロレンズに入射し, 透過光の強度分布を測定した<sup>14)</sup>。なお, 穴形パターンの直径は  $750\ \mu\text{m}$ , スペーサ厚は  $50\ \mu\text{m}$  で, 液晶は K15 を使用した。電圧を加えない場合は, 円形パターンを通過した光はそのまま進行する。図10(a)は液晶セルに4Vの電圧を加えたときのもので, 凸レンズ状の集光特性が得られていることがわかる。図10(b)は20Vと大きな電圧を加えた場合で, 集光特性を示すようなピークは見られず, むしろ凹レンズ状にビームが広がっている様子が見られる。

### 5. 液晶によるレンズの応用

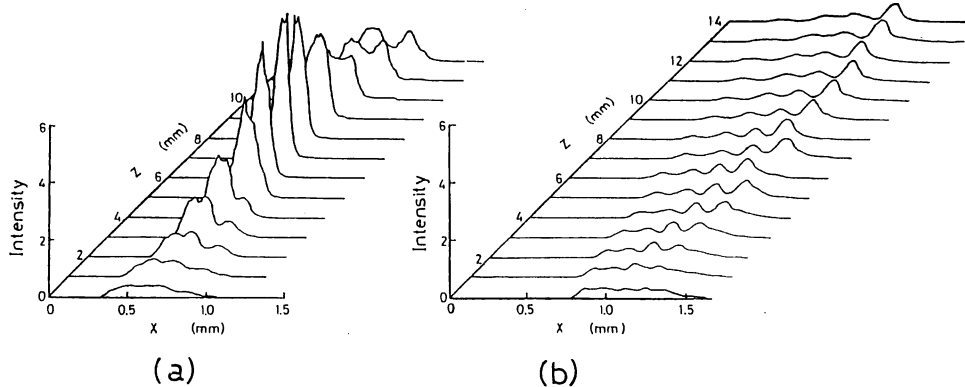
#### 5.1 可変焦点液晶レンズの応用例

低い電圧により焦点距離を連続的に可変できるという液晶によるレンズの特長を利用すると, 遠近両用眼鏡や白内障用の眼鏡への応用の可能性が考えられる。たとえば, 試作した可変焦点レンズを眼鏡試験枠に装着し, 適当なジオプター値のレンズを併用して白内障手術後の患者に試用した結果が報告されている<sup>23)</sup>。

一方, プロジェクタのレンズ部に液晶レンズを取り付け, 3.4節で述べた非直線特性の補正回路および超音波による距離センサーを用いて, スクリーンとの距離に自動的に追従してピントの合う自動焦点プロジェクタが試作されている。同様の原理により, 可動部分のない自動焦点カメラへの応用も考えられる。

#### 5.2 液晶マイクロレンズの応用例

円形穴形パターンを用いた液晶マイクロレンズでは焦

図10 液晶マイクロレンズ効果<sup>14)</sup>

点距離が数 mm と非常に短いため、多数のマイクロレンズを構成すると、レンズから離れるとともに強い光散乱効果が認められる。すなわち、電圧を印加していない場合には液晶セルは透明であるが、電圧印加により白濁して見えることになり、ディスプレイへの応用が期待される。液晶セル厚が  $25\ \mu\text{m}$  で、直径が  $100\sim 160\ \mu\text{m}$  の穴形パターンを多数設けた試料で、 $2\ \text{V}$  程度の電圧により  $20\sim 30$  程度のコントラスト比が得られている<sup>24,25)</sup>。このマイクロレンズ効果による液晶ディスプレイ素子は、特性が急峻で、視角が非常に広いという特徴がある。

一方、液晶マイクロレンズにおける集光特性 ( $20\ \mu\text{m}$  以下のスポットが得られる) および可変焦点特性を利用すると、結合効率を電氣的に制御できる光ファイバカップリング素子に応用することができる。これまで、パターン径  $350\sim 750\ \mu\text{m}$  の液晶セルおよびコア径  $10\sim 100\ \mu\text{m}$  の光ファイバの組合せにより実験を行ない、on/off 比で  $23\ \text{dB}$  程度の値が得られている<sup>26)</sup>。

## 6. おわりに

低電圧・低消費電力で動作し、屈折率等の光学的特性を大幅に変えられる液晶について、その光学用材料としての諸特性、ならびに光学素子への応用として、液晶による可変焦点レンズおよび軸対称不均一電界による液晶分子配向に基づく屈折率分布を利用したマイクロレンズについて、筆者らの実験結果を中心に述べてきた。いずれも、従来のガラス等による光学レンズと比べてそれぞれの特性に欠点が多く、まだ改善すべき余地が多いものではあるが、今後のいっそうの発展を期待したい。

## 文 献

- 1) 佐藤 進: 液晶とその応用 (産業図書, 東京, 1984).
- 2) 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.
- 3) 佐藤留美子, 佐藤 進: “ネマティック液晶の屈折率分散特性”, 第12回液晶討論会講演予稿集, 2連G17 (1986).
- 4) 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.
- 5) 佐藤 進: “焦点距離可変ネマティック液晶レンズセル”, 電子通信学会技術報告, ED 79-30 (1979) 55-61.
- 6) S. Sato: “Liquid-crystal lens-cells with variable focal length,” Jpn. J. Appl. Phys., **18** (1979) 1679-1684.
- 7) S. Sato, A. Sugiyama and R. Sato: “Variable-focus liquid-crystal fresnel lens,” Jpn. J. Appl. Phys., **24** (1985) L626-L628.
- 8) S. Sato, T. Nose, R. Yamaguchi and S. Yanase: “Relationship between lens properties and molecular orientation in a liquid-crystal lens,” 12th Int. Liq. Cryst. Conf., AP 37 (1988) 383. Liq. Cryst., **4** (1989) in press.
- 9) 能勢敏明, 佐藤 進: “液晶レンズにおける特性直線化のための一駆動方法”, 第13回液晶討論会講演予稿集, 1T 09 (1987).
- 10) T. Nose and S. Sato: “Linearising method for non-linear properties in a liquid-crystal lens,” Electron. Lett., **23** (1987) 878-879.
- 11) 能勢敏明, 佐藤 進: “液晶レンズにおける特性直線化のための一駆動方法II”, 第14回液晶討論会講演予稿集, 2D302 (1988).
- 12) 能勢敏明, 佐藤 進: “液晶レンズの可変焦点特性における非直線性の補償”, 電子情報通信学会論文誌, **J72-C1** (1989) 619-625.
- 13) 能勢敏明, 有明 毅, 佐藤 進: “不均一電界中での液晶分子配向によるレンズ効果”, 第48回応物学会予稿集, 20 aZG 8 (1986).
- 14) T. Nose and S. Sato: “Liquid-crystal microlens obtained with a nonuniform electric field,” 12th Int. Liq. Cryst. Conf. AP 36 (1988) 382. Liq. Cryst., **4** (1989) in press.
- 15) 佐藤 進, 菊地 明: “ネマチック液晶セルによる光偏向”, 応用物理, **45** (1976) 938-942.
- 16) 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”, TV 学会技術報告, ED 672, IPD 70-13 (1982) 33-38.
- 17) 山口留美子, 能勢敏明, 佐藤 進: “同心円状及び放射状分子配向ネマティック液晶セルの特性”, 電子通信学会技術報告, EID 86-14 (1986) 21-24.
- 18) 山口留美子, 能勢敏明, 佐藤 進: “軸対称分子配向ネマティック液晶セルの特性”, 電子情報通信学会論文誌, **J71-C** (1988) 259-264.
- 19) 高橋 猛, 佐藤 進: “回転真空蒸着による同心円及び放射状液晶分子配向”, 昭 61 電気関係学会東北支部連大, 2F9 (1986).
- 20) 能勢敏明, 山口留美子, 佐藤 進: “メチレンブルー薄膜の偏光特性およびネマチック液晶分子配向特性”, 電子情報通信学会論文誌, **J71-C** (1988) 1188-1194.
- 21) R. Yamaguchi, T. Nose and S. Sato: “Liquid crystal polarizers with axially symmetrical properties,” Jpn. J. Appl. Phys., **28** (1989) 1730-1731.
- 22) 佐藤孝生, 佐藤 進: “不均一電界における液晶セルの光学的特性”, 第45回応物学会予稿集, 14aD5 (1984).
- 23) 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”, 日本眼光学学会誌, **9** (1988) 30-37.
- 24) 能勢敏明, 佐藤 進: “液晶マイクロレンズ効果による光散乱特性”, 電子情報通信学会技術報告, EID 88-4 (1988) 23-28.
- 25) T. Nose and S. Sato: “Liquid crystal display devices obtained with scattering properties of microlens effects,” 9th Int. Display Res. Conf. (Japan Display) to be published.
- 26) 能勢敏明, 佐藤 進: “ネマティック液晶素子による光ファイバスイッチ”, 電子情報通信学会技術報告, EMC 88-42 (1988) 7-12.