ネマティック液晶の電界センサへの応用

正員 佐藤 進 (秋田大) 非会員 九嶋 正仁 (秋田大)

1. ま え が き

液体のように自由に流れ、かつ光学的、電気的、磁氣的、また力学的な特性に異方性を有する液晶を2枚の電極基板間に封入した素子（一般に液晶セルと呼ばれる）では、比較的小さな電圧を加えることにより容易にその分子の配向状態や光学的特性などを制御できる（電気光学効果）という特徴がある。この液晶における電気光学効果は、薄形軽量で、かつ低消費電力で動作するパネルタイプの表示素子として近年広く応用されている。

このような種々の特徴を有する液晶は様々なセンサ素子への応用の可能性を有している⁽¹⁾⁽²⁾。例えば、コレステリック液晶におけるらせねじり力が液晶の温度や雰囲気ガスなどによって大幅に変化するという効果を利用した温度センサやガスセンサがある。また、同様にコレステリック液晶のらせねじり力の放射線照射による変化を利用した γ 線センサ⁽³⁾などが試みられている。液晶における電気光学効果を利用したものとしては、導体部からの漏れ電界による液晶分子の配向効果から、電流の異常箇所を可視像化するものなどが報告されている⁽⁴⁾。

ところで、表示素子として広く応用されている液晶セルは、一般に透明導電膜をコートした2枚のガラス基板の間に液晶を入れ、両電極間に直接電圧を印加することにより液晶分子の配向制御を行うような構成となっている。しかし、著者らは液晶セルに直接電圧を印加しなくても、液晶セルを単に電界中に挿入するだけで液晶分子の配向の状態を変化させ得ることを見だし、このような効果を利用した液晶による電界センサを提案してきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。

一方、光学結晶を用いた電界センサとしては、既に LiNbO_3 や BSO ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) などにおけるポッケルス

効果を利用して、電界強度や電圧を光学的に検出するものがあるが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、空間の電界分布を乱すことなく非接触で光学的に電界強度を測定できるという利点のほかに、薄形軽量で低廉であるという特長をもつ液晶は有機物として多種多様な可能性を有し、高感度でかつ動作範囲（ダイナミックレンジ）が広い素子を構成できるという可能性が期待される⁽⁷⁾。

本研究では、ネマティック液晶を電界センサ素子へ応用することを目的として、電界中における液晶分子の再配向効果について液晶分子の配向方向と電界の方向の関係、更に液晶材料の電気抵抗や誘電率などの電気的特性や印加電界の周波数との関係を中心に検討を行った。その結果について述べる。

2. 実験方法

液晶分子の長軸方向に対する誘電率と短軸方向に対する誘電率の差、すなわち誘電異方性 $\Delta\epsilon$ が正のネマティック液晶であるK15（BDH製、 $\Delta\epsilon=+11.0$ ）、およびより大きな異方性を示すネマティック液晶ZLI3096（メルク製、 $\Delta\epsilon=+21.4$ ）を用い、ポリビニルアルコール（PVA）膜をコートし一方にラビング処理を行ったガラス基板および適当な厚みのスペーサを用いて、両基板間で液晶分子の配向方向が 90° ねじれているTN形の液晶セルを作製した。この液晶セルの有効面積は $7\times 7\text{ mm}$ である。なお、TN形としたときにディスクリネーション（ねじれの向きが互いに異なる領域の境界部）が発生せず、良好な分子配向が得られるよう、ネマティック液晶にねじり力を与えるために、塩化コレステリル（CC）を $5\times 10^{-2}\text{ wt\%}$ 添加した。また、液晶の抵抗値を調整するために、TBAB（tetra-n-butylammonium bromide）を微量添加した。

図1に本研究で用いた装置（センサヘッド部）の構成を示す。（a）図は1 kHzで変調したLED（FH-511 スタンレー電気（株）製、波長 $\sim 660\text{ nm}$ ）の光をプラスチック製光ファイバ（直径1 mm）で導き、偏光ビームスプリッタ（日東真空被膜（株）製）により直線偏光とした光を液晶セルに入射し、透過光を同様に偏

Applications of Nematic Liquid - Crystals to Electric - Field Sensors. By Susumu Sato, Member & Masahito Kushima, Non-member (Mining College, Akita University).

佐藤 進：正員，秋田大学鉱山学部電子工学科

九嶋正仁：非会員，秋田大学鉱山学部電子工学科

光ビームスプリッタおよび光ファイバにより取出すもの(I形)である。センサヘッド部を90°回転することにより、液晶セルの配向面(液晶セルの基板)を電界方向に対して垂直または平行、もしくは任意の角度に設定することができる。なお、光ファイバと偏光ビームスプリッタ間にロッドレンズ(日本板ガラス(株)製セルフォックレンズ)を挿入し、光結合効率の改善を試みている。

図(b)は光ファイバを使用せず、光源としてHe-Neレーザ(1mW)光を用いるもの(II形)で、この場合は液晶セルの配向面は電界方向に平行である。いずれも透過形(平行偏光子)の構成となっており、フォトダイオードおよびロックインアンプ(NF LI-570)により透過光強度の変化を検出している。このセンサヘッド部を2.5~3.5 cm間隔に固定した2枚の銅板製の電極板(直径30 cm)の間に挿入し、低電界強度範囲(~200 V/cm)までは発振器と低周波増幅器およびオーディオ用変圧器の組合せを用い、高電界強度範囲ではネオントランス(50 Hz)または高周波耐圧試験装置(パルス電子技術(株)製、0.2, 0.5, 1, 3 kHz)により最大15 kVの電圧を印加し、電界強度に対する液晶セルの透過特性の測定を行った。また、液晶の比抵抗および誘電率は万能ブリッジ(YHP 4255 A)またはインピーダンスアナライザ(YHP 4192 A)を用い、測定電界により液晶分子が再配向しないよう低電圧(0.2~0.3 V_{p-p})において測

定した。なお、特に言及しない場合には、測定温度はすべて室温(22~25℃)である。

3. 実験結果および考察

〈3・1〉 配向面が電界と垂直な場合 I形のヘッドを用い、液晶セルの配向面(セルの基板)が電界に垂直となるようにした場合には、通常のTNセルと同様に透過光強度はあるしきい電界以上で急増し、飽和する⁽¹⁰⁾という特性が得られたが、しきい電界は液晶の抵抗値にほぼ逆比例するという関係⁽⁷⁾が見られた。例えば、高・低の2種類の抵抗値を有する液晶を用いた場合の印加電界の周波数をパラメータとした透過光強度と電界強度との関係を図2および図3に示

図2 高抵抗(6.3 MΩ)セルにおける基板が電界と垂直な場合の透過光強度と電界強度の関係(I形,ZLI 3096, 100 μm厚)

Fig. 2. Transmission light intensities versus electric field in the high resistance (6.3 MΩ) cell when the substrate is perpendicular to the field.

図3 低抵抗(450 kΩ)セルにおける基板が電界と垂直な場合の透過光強度と電界強度の関係(I形,ZLI 3096, 100 μm厚,TBAB: 3.9×10⁻³%)

Fig. 3. Transmission light intensities versus electric field in the low resistance (450 kΩ) cell when the substrate is perpendicular to the field.

図1 液晶セルによる電界センサの構成
Fig. 1. Structure of liquid-crystal electric field sensors.

図 4 電極に直接電圧を印加した場合の透過光強度と電界強度の関係 (I 形, ZLI 3096, 100 μm 厚)
Fig. 4. Transmission light intensities versus electric field when the voltage is directly applied across the electrodes.

す。図 2 に示すように、液晶セルの抵抗が高い場合 (6.3 M Ω) にはしきい電界の周波数依存性はあまり見られないが、図 3 に示すように TBAB を添加して抵抗を低くする (450 k Ω) と、周波数依存性が強くなり、低周波になるに従いしきい電界が増加し、200 Hz 以下では測定範囲内では透過光強度に変化が見られないことがわかる。通常の表示素子と同様に液晶セルに直接電圧を印加した場合の特性は、図 4 に示すようにしきい電界 (電圧) は周波数によらず一定となっており、また液晶の抵抗を変化させてもほとんど変化が見られなかった。

〈3・2〉 配向面が電界と平行な場合 前節の初めの実験と同様に、透明電極をコートしないガラス板を用いて作製した TN セルを、液晶分子の配向面 (基板) が電界方向に平行になるようにした場合の電界強度と透過光強度の関係を測定した。この場合は、配向面が電界と垂直な場合と異なり、しきい特性は見られず、電界強度と共に透過光強度が連続的に増加するという結果が得られた。

図 5 は、15 μm または 100 μm 厚のスペーサを用いた場合の透過光強度の電界 (50 Hz) 依存性を両対数グラフに示したものである。透過光強度は傾きがほぼ 2 の直線状に増加し、飽和に至る変化を示すことがわかる。また、低電界側では液晶層が厚い方が透過光強度が大きいが、電界強度が大きくなるとこれらの関係が逆転していることがわかる。図 6 はスペーサの厚みをパラメータとして 1 kHz の電界を印加した場合の特性を示したものであり、スペーサが厚くなるほど透過光強度の変化が大きくなり、100 μm 厚以上では 20 V/cm 程度の電界強度でも透過光強度が変化する

図 5 基板が電界と平行な場合の透過光強度と電界強度の関係 (II 形, ZLI 3096, 50 Hz)
Fig. 5. Transmission light intensities versus electric field when the substrate is parallel to the field.

図 6 基板が電界と平行な場合の透過光強度と電界強度の関係 (II 形, ZLI 3096, 1 kHz)
Fig. 6. Transmission light intensities versus electric field when the substrate is parallel to the field.

という結果が得られた。

液晶分子の配向面が電界方向に平行な場合には、電界により液晶分子の配向におけるねじれ角が付録に示したように変化することになる。電界強度が小さい場合には、透過光強度は液晶分子の電界によるねじれ角

図 7 基板が電界と平行な場合の透過光強度と $(E \times d)^2$ の関係 (II 形)

Fig. 7. Transmission light intensities versus $(E \times d)^2$ when the substrate is parallel to the field.

の変化 ϕ に比例すると仮定すると、(付 5) 式よりしきい電界がなく、また透過光強度は電界の 2 乗に比例することがわかる。同様に、液晶層の厚み d の 2 乗に依存し、スペーサが厚いほど透過光強度の変化が大きいことも説明される。図 6 より電界強度およびスペーサの厚みの積の 2 乗 $(E \times d)^2$ と透過光強度の関係を求め、再プロットしたものを図 7 に示す。図でスペーサ厚が $15 \mu\text{m}$ の場合を除いて、(付 5) 式と同様に傾きがほぼ 1 の同一の直線上に分布していることがわかる。スペーサ厚が $15 \mu\text{m}$ の場合に他の結果とずれている原因としては、液晶層が薄い場合には基板による配向の効果が支配的な領域が相対的に大きくなること、また経験上液晶層の厚みはスペーサ厚よりも $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度厚くなる場合が多いことから、液晶層の厚みは実効的にはスペーサ厚よりもかなり厚くなっていると思われること、などが考えられる。

なお、液晶材料として K 15 を用いた場合には、ZLI 3096 に比べて電界に対する感度が $1/2$ 以下と低くなっており、これは K 15 のほうが $\Delta\epsilon$ がほぼ半分と小さいことによるものと思われる。これらの結果より、電界強度センサとして 10 V/cm 程度から十数 kV/cm の動作範囲を有することがわかる。

なお、ガラス板を用いて作製した液晶セルを、配向面が電界と平行な方向 (角度 $\theta = 0^\circ$) からある角度 θ だけ傾けた場合には、透過光強度は電界方向と成す角度 θ に依存し、 $\theta = 0^\circ$ または 180° の場合 (電界方向に平行) に最大となり、 $\theta = 90^\circ$ の場合には $\langle 3 \cdot 1 \rangle$ 節で述べた電極を有する液晶セルの場合とは異なり、 6 kV/cm 付近までは電界による効果は認められな

図 8 基板が電界と平行な場合の透過光強度と電界強度の温度依存性 (I 形, ZLI 3096, $100 \mu\text{m}$)

Fig. 8. Temperature dependence of transmission light intensities as a function of electric field when the substrate is parallel to the field.

図 9 基板が電界と平行な場合の透過光強度の周波数依存性 (II 形, ZLI 3096, $100 \mu\text{m}$)

Fig. 9. Frequency dependence of transmission light intensities when the substrate of molecular orientation is parallel to the field.

った。また、透過光強度は θ に関して $(\cos \theta)^2$ 関数で変化するという結果が得られた。すなわち、電界に対する透過光強度の角度依存性を利用すると、電界強度と共に電界の方向をも検出することが可能となる。

図 8 は液晶による電界センサの温度依存性を示したものであり、温度の上昇と共に透過光強度の変化の割合が低くなる傾向が見られる。等方性液体状態への相転移温度 (K 15: 35.3°C , ZLI 3096: 62°C) から離れるほど、液晶の諸物性の温度依存性が小さくなるので、相転移温度のより高い液晶物質を用いることにより温

図 10 比抵抗の周波数特性(ZLI 3096)
Fig. 10. Frequency dependence of resistivities.

度依存性を低減することができる。

液晶セルの抵抗が低下すると、電界に対する透過光強度の変化の割合が少なくなり、この効果は電界の周波数が低くなると一層顕著になるという結果が得られた。例えば、電界強度を 140V/cm (または 100V/cm) 一定とした場合の周波数と透過光強度の関係を図 9 に示す。高抵抗の場合には 200Hz 以下の周波数で透過光強度の変化が急激に低下 (電界に対する感度が減少) しているが、低抵抗の場合にはより高い 1kHz 以下で透過光強度の減少が起こることがわかる。

〈3・3〉 液晶の比抵抗および誘電率の周波数特性

前節まで述べた結果により、電界に対する液晶セルの透過特性は液晶に対する添加物 (電気抵抗) や電界の周波数に強く依存することが示された。本節では、液晶セルの抵抗および静電容量の周波数特性を測定することにより、これらの特性について考察する。

ZLI 3096 および TBAB を添加した液晶を用いて、液晶分子が基板に平行に配向した (ホモジニアス配向) 場合の比抵抗の周波数特性を図 10 に示す。比抵抗が周波数によらずほぼ一定であり、TBAB の添加により比抵抗が減少することがわかる。一方、比誘電率の周波数特性を図 11 に示す。比誘電率は 1kHz 以上ではほぼ一定であったが、周波数が低くなると共に比誘電率が増加し、特に TBAB 添加の場合にその増加が著しいことがわかる。このような低周波領域における比誘電率の増加は液晶中の可動イオンの効果によるものと思われる。

〈3・1〉節で示した結果 (図 2 および図 3) は、この可動イオンが電界により基板近くに移動して逆方向の電界を形成し、液晶に加わる実効電界強度が減少するため、しきい電界強度が高電界側にシフトするものと

図 11 比誘電率の周波数特性(ZLI 3096)
Fig. 11. Frequency dependence of dielectric constants.

考えられる。また、この効果は周波数が高くなるほど弱くなり、 1kHz 以上では影響がなくなることとも図 11 の結果から説明される。一方、液晶セルの両電極に直接電圧を印加した場合 (図 4) には、電極界面において電極とイオンの間で電荷の移動が可能であるため、液晶における不純物 (セルの電気抵抗) いかんにかかわらず、しきい電界 (電圧) は変化せず一定となるものと思われる。液晶分子の配向面が電界の方向と平行な場合の特性の液晶の抵抗および電界の周波数依存性 (図 9) も、上述のイオンの効果により説明することができる。

4. あとがき

TN 液晶セルをセンサ部とし、LED および光ファイバまたは He-Ne レーザを用いた電界センサ素子を試作し、電界強度に対する透過光強度特性を測定した。

液晶セルの配向面が電界方向と垂直な場合には、しきい特性をもつ透過光強度特性が得られ、液晶セルの抵抗が低いほどしきい電界が高くなること、また電界の周波数が低いほどしきい電界が高くなり、このことは特に液晶セルの抵抗が低いほど顕著になることが示された。

液晶セルの配向面が電界に平行な場合にはしきい特性が見られず、透過光強度が電界強度のほぼ 2 乗特性で連続的に増加し、更に低電界領域では液晶層の厚みが厚いほど電界に対する感度が大きいという結果が得られ、これらは電界による液晶分子の配向モデルにより考察された。また、配向面が電界方向と垂直な場合と同様に、電界強度と透過光強度の特性に液晶の抵抗

や電界の周波数依存性が見られたが、液晶中の可動イオンの効果により説明がなされた。従って、液晶中の不純物イオンを除去し、液晶の抵抗を高くすることが重要である。

このような液晶による電界センサは、金属などを使用していないので本質的に無誘導であり、被測定電界を乱すことなく、光学的に、また非接触で電界の方向および電界強度を高感度（ $\sim 10 \text{ V/cm}$ 以下）で、かつ広範囲（ $\sim 10 \text{ kV/cm}$ ）にわたって測定できるという特徴がある。更に、配向面を電界方向と垂直にした場合には、空間の電界強度に対してスイッチング動作などを行わせることもできる。

本研究では、センサ部として TN 液晶を用いたが、有機物である液晶材料としては他にも種々多様な物質があり、また分子配向や動作モードにも様々な方式が考えられるので、今後更に高感度化の実現の可能性が期待される。

最後に、高周波耐圧試験装置の使用に際しご便宜いただいた本学電気工学科吉村 昇教授、また本研究を行うに際し種々ご援助いただいた能勢敏明氏に感謝いたします。
(平成元年 1 月 25 日受付)

文 献

- (1) 佐藤：液晶とその応用，p. 181 (昭 59) 産業図書
- (2) 岡野・小林 編：液晶（応用編），p. 204 (昭 60) 培風館
- (3) S. Sato, H. S. Yang & Y. Suzuki: "The effects of γ -ray irradiation in cholesteric liquid crystals and application to r -ray sensors", Proc. 3rd Sensor Symposium, p. 267 (1983)
- (4) D. J. Burns: "Microcircuit analysis techniques using field-effect liquid crystals", IEEE Trans. Electron Devices, ED-26, 90 (1979)
- (5) 佐藤・岩田・九嶋：「液晶の電界センサへの応用」，第 11 回液晶討論会，1 N14 (昭 60)
- (6) S. Sato & M. Kushima: "Liquid-crystal electric and magnetic field sensors", 11th Int. Liq. Cryst. Conf., M42AP (1986)
- (7) S. Sato & M. Kushima: "Liquid-crystal electric and magnetic field sensors", Mol. Cryst. & Liq. Cryst., 141, 229 (1986)
- (8) K. Hidaka & H. Fujita: "A new method of electric field measurements in corona discharge using Pockels device", J. Appl. Phys., 53, 599 (1982)
- (9) 日高・室岡：「ポッケルス素子による長ギャップコロナ放電中の電界測定」，電学論 A，103, 241 (昭 58)
- (10) 岡野・小林 編：液晶（基礎編），p. 27 (昭 60) 培風館

付 録

電界による液晶分子の配向効果

液晶は誘電異方性をもっており、電界印加により液晶分子の配向方向を変化させることができる。ここで

付図 1 液晶分子の配向方向と電界の関係
app. Fig. 1. Relationship between molecular orientation and the direction of an electric field.

は、液晶中のイオンの流れなどの効果がない場合について、また TN 液晶セルにおける基板面に平行方向に電界を加えた場合について解析する。ここで、付図 1 に示すような座標系を考える。 z 方向は液晶層の厚み方向である。 $z=0$ で液晶分子は x 方向に配向し、 $z=d$ で y 方向を向くように束縛されているものとする。電界がない場合の位置 z での弾性変形によるねじれ角 θ_0 を

$$\theta_0 = \pi z / 2d \quad \text{..... (付 1)}$$

とし、電界による変形のねじれ角を ϕ とすると、ひずみの自由エネルギー F は、 K_{22} をねじれの弾性係数、 E を電界として

$$F = \frac{1}{2} \int_0^d \left[K_{22} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{\pi}{2d} \right)^2 - \Delta \epsilon E^2 \cos^2 \left(\phi + \frac{\pi z}{2d} \right) \right] dz \quad \text{..... (付 2)}$$

となり、 F を最小にする条件から、Euler-Lagrange の式により

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{\Delta \epsilon E^2}{K_{22}} \cos \left(\phi + \frac{\pi z}{2d} \right) \sin \left(\phi + \frac{\pi z}{2d} \right) = 0 \quad \text{..... (付 3)}$$

が得られる。これより ϕ は、

$$\phi = - \frac{\Delta \epsilon E^2}{2K_{22}} \left(\frac{d}{\pi} \right)^2 \sin \left(2\phi + \frac{\pi z}{d} \right) \quad \text{..... (付 4)}$$

となる。変形の角 ϕ が小さい [$2\phi \ll \pi z/d$] とすると

$$\phi = - \frac{\Delta \epsilon E^2}{2K_{22}} \left(\frac{d}{\pi} \right)^2 \sin \left(\frac{\pi z}{d} \right) \quad \text{..... (付 5)}$$

が得られる。従って、電界強度が小さい場合には近似的に θ は次のようになる。

$$\theta = \frac{\pi z}{2d} - \frac{\Delta \epsilon E^2}{2K_{22}} \left(\frac{d}{\pi} \right)^2 \sin \left(\frac{\pi z}{d} \right) \quad \text{..... (付 6)}$$