モノづくりとスペクトロスコピー 第2講 液晶ディスプレイを作る

一ノ瀬 秀 男

メルク・ジャパン 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4084 (〒240-03)

(1994 年 2 月 23 日受理)

Looking at New Materials II. Liquid Crystal Displays

Hideo ICHINOSE

Merck Japan Limited, 4084, Nakatsu, Aikawa-machi
Aikou-gun, Kanagawa 243-03

(Received February 23, 1994)

1. はじめに

モノづくりとスペクトロスコピーの第2講として、フラットパネルディスプレイとして、盛んに研究開発が行われている液晶ディスプレイについて解説する。

液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display) は、ますます身近なものになってきている。例えば、実験室では、以前は電卓などでのみ目にしていたものが、最近ではパーソナルコンピュータや、計測器に至るまでブラウン管の代わりに LCD を使用するようになってきている。しかも、カラー LCD を用いているものもあり、非常に見やすくなっている。本解説は、特に分光学とのかかわりについて説明するが、LCD に関するハンドブック¹⁾や成書^{2,3)}も発行されているので、更に詳しく知りたい場合はそちらを参考にして頂きたい。

2. LCD の動作原理

2.1 液晶材料

ある物質は、固体と液体との間に液晶状態を示すものがある。液晶とは、液体と固体 (結晶) の中間の特性を

示す状態を言う。つまり、流動性を持ちながら、分子の配列に関して規則性がある。液晶はその配列状態によって大きく3つに分けられている。図1にその様子を示す²⁾。(b)に示すように、分子の重心の位置には規則性がないが、分子軸がある方向を向いているものを、ネマティック液晶と呼ぶ。さらに(d)に示すように、分子軸がねじれているものをコレステリック液晶という。また(c)に示すように分子が層構造を形成しているのを、スメクティック液晶と呼ぶ。なお、図中で n はダイレクタ、つまり巨視的に分子が配列している方向を表す。

以上のように、温度によって固体、液晶、液体と変化するものをサーモトロピック液晶と呼んでいる。一方、溶質の濃度変化により液晶相を示すものをリオトロピック液晶と呼んでいる。リオトロピック液晶は、生体系などで良く観測されるが、LCD に使用されている液晶はサーモトロピック液晶のみである。

LCD は電場により液晶分子の配列状態を制御することによって、画像表示を行っている。これは、次のような原理に基づいている。次の構造式、

図1 液体と液晶の分子配列

誘電率異方性が正 ($\epsilon_{\parallel} > \epsilon_{\perp}$) の場合には
(b) の配列形態が安定, 負 ($\epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$) の場合には (a) が安定.

図2 電界中でのダイレクタの配列形態

で表される液晶は 8CB と呼ばれる. $22\sim 35^{\circ}\text{C}$ でスメクティック相, $35\sim 41^{\circ}\text{C}$ でネマティック相を示す. 8CB の構造式から容易に推定でき, もうすでに図1でモデル的に表記しているように, 液晶分子は棒状の形状をしている. この形状により, 液晶分子長軸方向と短軸方向の光学的特性が異なっている. 一方向に配列した液晶に光が入射する時, 光の偏波面が液晶分子長軸の配列方向に垂直な時 (常光) と平行な時 (異常光) とで屈折率が異なる. 常光に対する屈折率を n_o , 異常光に対する屈折率を n_e とすると, 複屈折率 Δn は $n_e - n_o$ で定義される.

同様に, 誘電率にも形状に起因した異方性がある. 液晶分子長軸方向の誘電率を $\epsilon_{\parallel}$, 短軸方向を $\epsilon_{\perp}$ とするとその異方性 $\Delta\epsilon$ ($=\epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$) は分子構造によって正, 負両方の値を取り得る. 液晶に電場を印加する事により図2に示すように²⁾, $\Delta\epsilon$ が正の場合は電場方向と液晶分子長

図3 TN方式の動作説明 (偏光板を直交させたと
き: 電界ゼロで光透過)

軸が平行に (b), また $\Delta\epsilon$ が負であれば垂直に配列する (a). このように, 電場印加により液晶分子の配列状態を変えることができ, 液晶層の光学的特性 (複屈折性, 旋光性, 光散乱) を制御する事が可能になる. つまり, 液晶素子は電場で制御可能な光スイッチング素子の働きをする. さらに印加電圧は数 V 程度で良く, 何種類かの液晶材料を混合する事により広い温度範囲で動作する液晶混合材料が得られており, LCD の普及の一因となっている.

2.2 動作モード

これまでに LCD の動作モードは種々提案されている. ここでは現在広く利用されているモードに限りて説明する.

TN (Twisted Nematic) モード

このモードは液晶の旋光性を利用している. LCD は液晶を電極が形成されているガラス基板で挟んでいるサンドイッチ構造をしている. TN ディスプレイでは図3に示したように³⁾, 電圧が印加されていない場合は液晶分子が 90 度ねじれた配列をするような配向処理を行っている. ここで使用する液晶材料は, $\Delta\epsilon$ が正の材料である. さらにこの液晶セルを, 1組の偏光板で, 偏光軸が両側で液晶分子の配列方向と一致するように挟む. 入射側の偏光板を透過した直線偏光の光が液晶層に入射した後5 液晶分子のねじれによって偏光方向が 90 度回転 (旋光) し, 反対側の偏光子を透過する. 一方, 液晶に充分高い電圧を印加すると, 液晶分子が基板に対して垂直になるように配列する. そうすると液晶の旋光性が消失し入射光の偏光方向の回転はなくなり, 出射側の偏光板を透過できなくなる. このようにして, 光の透過, 遮断を電圧印加によって制御している.

上述のような 90 度のねじれは, 2枚の基板の配向処理方向を 90 度ずらせば得られる. しかし, 右回りでも

表 1 代表的なカイラルドーパントの構造と特性
(* は不斉炭素位置を表す)

(a)	コレステリックノナノエイト (左巻きらせん)
(b)	E. メルク社略称 C15 (左巻きらせん, らせん形成力は (a) の約 1/3)
(c)	E. メルク社略称 CB15 (右巻きらせん, らせん形成力は (a) の約 1.5 倍)
(d)	E. メルク社略称 S811 (左巻きらせん, ただし、絶対配置が変われば右巻きになる (同略称 R811), らせん形成力は (a) の約 2 倍)

左回りでも液晶のエネルギー状態は等しいので、両方の状態が存在し得る。これを無くすために、表1に示すようなコレステリック相を持つ液晶材料を添加する²⁾。これらはカイラルドーパントと呼ばれているが、特徴は不斉炭素を持っているということである。(a), (b), (d) は左巻きのらせんを形成し, (c) は右巻きのらせんを形成する。使用したいらせん方向と、カイラルピッチ長により添加するカイラルドーパントの種類、量を決めるが、TN モードの場合 50~100 μm 程度になるようにしている。

図3では電圧無印加の場合に光が透過する状態であるが、出射側の偏光板の偏光軸を 90 度回転させることにより、電圧無印加で暗、印加で明状態が得られる。このような偏光板の組み合わせ方の違いは、それぞれノーマリホワイト、ノーマリブラックと呼ばれる。ノーマリホワイトは高コントラスト（明、暗の透過率比）が得やすい、ノーマリブラックは配向欠陥がコントラストに影響を与えにくいという特徴を持っているが、LCD の応用目的によって選択使用されている。

STN (Super Twisted Nematic) モード

このモードは液晶の複屈折率を利用している。TN モードを用いた LCD の開発が進められたが、時分割駆動のデューティ比（後に説明する）が本質的に上がらない、つまり大容量表示ができないという問題が生じた。これ

図 4 種々のねじれ角を持つカイラルネマティック液晶セルの電極間中央における分子の傾き角の電圧による変化

を解決する方法として提案された⁴⁾。TN モードでは 90 度ねじっていた液晶のねじれを、STN モードでは 180 度から 270 度ねじらせている。これだけのねじれ角を液晶に付与すると次のような利点を生じる。図4はねじれ角を変えたときの電圧印加に対する、液晶層中心での液晶分子のプレティルト角（液晶分子とガラス基板とのなす角）の計算結果である⁴⁾。グラフの急峻性に注目すると、90 度ではそれほどでなかったものが、270 度まで角度が大きくなるに従って鋭くなる。これは、時分割駆動

で動作させることができる電極数が増えること、つまりパネルの表示容量を増やすことができることを意味する。さらに、270 度を越えると S 字を描くようになるが、これは時分割駆動では、ヒステリシスを生じてしまいディスプレイ表示ができなくなってしまうことを意味する。

STN の大きなねじれ角は、TN モードの説明で述べたカイラルドーパントの添加量を増やすことによって得られている。カイラルピッチ長で $10\ \mu\text{m}$ 前後に調整する場合が多い。また、180 度以上のねじれ角を安定に得るためには、5 度以上の大きなプレティルト角がなければならない、配向処理方法も STN 固有の工夫を行っている。

最初に提案された STN モードは、SBE (Super-twisted Birefringence Effect) モードとも呼ばれている。液晶セルの構成を図 5 に示す¹⁾。この構成では、表 2 に示すように出射側の偏光板の偏光軸の角度を変えることにより、背景色が黄色で表示色が濃紺になるイエローモードと、背景色が青で表示が白になるブルーモードがある。

SBE モードでは白黒表示は行えないので、その後、それが可能なモードが数多く提案されている。一つは表 2 に示しているように液晶素子のリターデーション ($\Delta n \cdot d$: 液晶の複屈折率と液晶層厚の積) を 0.6 程度に小さくする方法 (OMI モード)。また、液晶材料に 2 色性色素を添加する方法。駆動用の STN パネルの他に、位相補償用のパネルまたは、位相差板を用いる方式などである。現在では、高精度の位相差フィルムを用いる方法が主流になっていて、白黒のみならずカラー表示も行っている。その原理について説明する。

図 6 に位相差板を用いた STN ディスプレイの原理図を示す²⁾。液晶に電圧が印加されていない場合は、STN パネルを通過した直線偏光の光は、振動方向が回転した

図 5 STN 系液晶セルの構成 (左ねじれ)

図 6 フィルム型位相補償方式 STN パネルの例

表 2 各表示モードの主なパラメータの値

表示モード	ねじれ角 (Φ)	リターデーション ($\Delta n \cdot d$)	プレティルト角 (θ_0)	偏光子の方位角 (β, γ)
SBE モード	270°	*	$\approx 2.0^\circ$	イエローモード $\beta=30^\circ, \gamma=60^\circ$ ブルーモード $\beta=30^\circ, \gamma=-30^\circ$
STN モード	180°	$0.9\ \mu\text{m}$	$\approx 1^\circ$	$\beta=45^\circ, \gamma=45^\circ$
OMI モード	180°	$0.5\ \mu\text{m}$	$\approx 1^\circ$	$\beta=0^\circ, \gamma=90^\circ$

* $\Delta n \cdot d \cos^2 \langle \theta \rangle \approx 0.8\ \mu\text{m}$

$\langle \theta \rangle$: off 状態における液晶分子の平均のティルト角

楕円偏光になる。それが位相差板を通過すると、出射側の偏光子の偏光軸と直行する直線偏光になり遮断される。一方、液晶に電圧を印加すると、STN パネルのリターデーションが小さくなり、位相差板と位相差を生じる。この位相差が可視光の $1/2$ 波長に相当するとき、位相差板を通過した光は、出射側の偏光子の偏光軸と平行な方向に長軸を持つ楕円偏光になるので、偏光板を透過した光は白色光になる。このようにして、位相差板を使用することによって白黒表示を行っている。現在では、位相差板を 2 枚、3 枚と用いてリターデーションと光軸の最適化を行い、さらに高画質のディスプレイを得ている。

2.3 駆動方法

LCD の駆動方法として大きく分けて、スタティック駆動、単純マトリックス駆動、アクティブマトリックス駆動の 3 種類がある。以下でそれぞれの駆動方法を説明する。

2.3.1 スタティック駆動

この駆動方法は、英数字などの固定パターンで、表示容量の少ない LCD に用いられる。ノーマリホワイトモードでの印加電圧と、光透過率の関係をグラフにすると図 7 のようになる。選択した電極に飽和電圧 (V_{sa}) 以上の高い電圧を印加して、画面表示を行う。

2.3.2 単純マトリックス駆動

この駆動方法を用いる LCD は、図 8 に示すように、多数の短冊状に形成された電極を持つガラス基板で、液晶を挟む構成になっている。それぞれの電極を走査電極、信号電極と呼び、交点が画素となる。 $N \times M$ 個の画素の表示を行う場合、スタティック駆動では $N \times M + 1$

図 7 液晶素子の電気光学特性
(V_{th} : しきい電圧, V_{sa} : 飽和電圧)

図 8 液晶パネルの構造

図 9 スタティック駆動の印加波形

本の電極が必要なのに比べ、マトリックス駆動では $N+M$ 本で済み、取り出す電極数が大幅に削減され大容量表示も可能になる。

この駆動方法では線順次駆動法が用いられる。つまり、走査電極を順番に走査していく一方で、信号電極には走査している各画素のオン、オフ信号を順に印加していく。走査、非走査、オン、オフの具体的な波形を図 9 に示す。例えば Y_1 の列がずっとオンの場合は X_1, Y_1 電極には、(c) のような波形が、また、 Y_1 の列がずっとオフの場合には、 X_1, Y_1 電極には (d) の様な波形が印加されることになり、液晶にはそれぞれ図示してあるような波形が印加される。

次に、駆動波形と走査できる電極数に関して考察する。TN, STN 液晶は、印加電圧の実効値によって動作する。実効電圧 V_{eff} は次式で定義される。

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \{V(t)\}^2 dt} \quad (1)$$

ここで T は画面を書き込むフレーム時間、 $V(t)$ は印加電圧を表す。液晶には図 9 で示したような波形が印加されるとすると、オン、オフそれぞれの実効電圧は、電極数を N とすると次式で表される。

$$V_{\text{on}} = \sqrt{\frac{1}{N} (V_1 + V_2)^2 + \frac{N-1}{N} V_2^2} \quad (2)$$

$$V_{\text{off}} = \sqrt{\frac{1}{N} (V_1 - V_2)^2 + \frac{N-1}{N} V_2^2} \quad (3)$$

$V_{\text{on}}, V_{\text{off}}$ の比を最大にするのは

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{N} \quad (4)$$

の時であり、これより最大になる場合の電圧比は N に依存することになり

$$\frac{V_{\text{on}}}{V_{\text{off}}} = \sqrt{\frac{\sqrt{N}+1}{\sqrt{N}-1}} \quad (5)$$

で表される。(5)式から分かるように、 N の数が増大すれば $V_{\text{on}}/V_{\text{off}}$ の比が 1 に近づくために、液晶のスイッチングを行うためには、急激なしきい値特性を持った材料が必要となる。しかし図 4 に示したように TN モードでは急峻性が良くなく、液晶材料の改良を行っても駆動できる電極数は、60 本前後が最大であった。さらに表示容量を増やそうと、先に述べた STN モードの研究が進んだのである。現在では液晶材料や、配向処理方法の改良も進み、STN-LCD では 200~480 本駆動できるパネルが作製されている。これによって、ワードプロセッサ、パーソナルコンピュータなどのディスプレイとして LCD が広く用いられている。

2.3.3 アクティブマトリックス駆動

LCD の各画素に能動素子を設け、これによって液晶に電圧を印加する方法を、アクティブマトリックス駆動法と言う。基本構成を図 10 に示す²⁾。液晶が、各能動素子によって駆動されるので、単純マトリックス駆動に対して、高コントラストが得られ、中間調の制御も行い易いので、高画質の LCD が得られる。能動素子としては、薄膜ダイオード (TFD, Thin Film Diode)、薄膜トランジスタ (TFT, Thin Film Transistor) が用いられる。

TFD は 2 端子素子の電圧と抵抗の非線形性を利用し

図 10 アクティブマトリックス駆動 LCD の基本構成

て、液晶に電圧を印加する。つまり、液晶にはオン時には高電圧が、オフ時には低電圧が印加されることになる。TFD 素子として種々提案されているが、駆動特性の制御が困難で実用化はされていない。実用化されているのは非線形素子である、MIM (Metal Insulator Metal) 素子である。MIM 素子は TFT に比較して構造が簡単のために高歩留まり、また形状が小さいために高開口率 (光の利用効率がよく、明るいディスプレイになる) が期待される。

一方 TFT の構成は、走査をゲートで行い、信号をソースに印加し、画素電極とドレインを結んでいる。TFT-LCD の場合も線順次駆動を行うが、液晶には、1 ラインの走査時間のみ電圧が印加され、その後のフレーム時間は蓄積された電荷を保持することによってスイッチングさせる。TFT は、3 端子素子であるので、MIM よりも性能が良く、フルカラーの高画質 LCD が得られる。しかし構造が複雑なために、歩留まり向上が困難であるという点もある。それにもかかわらず、最近のパーソナルコンピュータにおける、カラーディスプレイを備えた携帯性のある機器の要求の高まりにより、生産量が増えている。

3. LCD パネル構造と作製方法

LCD は、図 11 に示すように液晶を電極、配向膜が形成されたガラス基板で挟んでいる構成になっている²⁾。このようなパネルを作成する工程を大きく分けると、パターン基板作製、セル作製、モジュール作製の三つになる。以下で、それぞれの工程について簡単に説明する。なお、最近ではより軽量の LCD を開発するために、ガラスの代わりにプラスチックを基板として用いたパネルの研究も盛んに行われているが、ここではガラスを例にして話を進める。

3.1 パターン基板作製

ガラス基板に、必要とされる電極等を形成する工程をいう。単純マトリックスの場合には透明電極膜 (ITO Indium Tin Oxide: 酸化インジウムにスズを添加した

図 11 液晶パネルの基本構造

もの) を、アクティブマトリックスの場合にはさらに金属薄膜や、半導体薄膜を形成する。ガラス基板全面に薄膜を形成後、パターン化するためにレジスト塗布、露光、現像、エッチング、レジスト剥離を行う。単純マトリックスは ITO が形成されているだけなので、この工程が一回で済むが、アクティブマトリックスの場合は膜の種類を変えて何回か行うことになる。成膜法には、真空蒸着法、スパッタ法、気相成長 (CVD: Chemical Vapor Deposition) 法があり、膜の種類によって使い分けている。

カラー LCD を作製する場合は、画素に R (赤), G (緑), B (青) のフィルタが形成された基板を用いる。カラーフィルタの形成方法としては、顔料を用いる印刷法、顔料分散法、電着法、染料を用いる染色法がある。使用目的に応じて使い分けている。なお、STN パネルでは後に述べるようにセルギャップを精度良くコントロールしなければならないので、カラーフィルタと後から成膜する ITO の中間に、カラーフィルタの保護も目的とした平坦化膜を設ける。使用されるのは、エポキシ、シリコン、ポリイミド系などの耐熱性の熱硬化性樹脂である。平坦化膜はスピンコートによって塗布され、加熱後必要に応じて研磨が行われ $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以下の平坦さで形成される。

パターン基板作製は、クリーンルーム内で行われる。これは、 $350 \times 400 \text{ mm}$ 程度の大きさのガラス基板に、欠陥なく電極等を形成しなければならないため、欠陥の最大の原因であるゴミの付着を防止するためである。クリーンルームの管理と共に、基板の洗浄技術の確立も重要な技術課題であり、各々のプロセスに合った物理的、化学的な洗浄方法が行われている。

3.2 セル作製

パターン基板作製が、カラーフィルタの形成を除けば半導体を作る工程と非常に似ているのに対し、セル作製は LCD 固有の工程になる。手順を表 3 に示す。TN, STN どちらのモードも液晶分子は、基板と平行になっているホモジニアス配向をしている必要がある。均一な配向状態を得るために、配向膜をパターン基板上に塗布している。さらに配向膜には、プレティルト角を付与するという重要な役割がある。STN においては、ねじれ状態を安定に実現するために 5 度以上のプレティルト角が必要である。また、TFT-LCD でも画質向上の目的で、プレティルト角を、STN 程ではないにしろある程度大きくしなければならない。配向膜として通常用いられているのは、ポリイミドである。理由としては、耐熱性、高いガラス転移温度、ガラスとの密着性等が挙げら

表 3 液晶セル作製行程

れる。プレティルト角の調整や、電気的特性の向上のために様々な種類のポリイミド材料が検討されている。大きく分けると、加熱することによってイミド化を行う材料と、溶剤に可溶性になっているものがある。どちらの材料も、転写式印刷法によって基板にパターン化された膜を形成した後、加熱する必要がある。配向膜の膜厚は、 $0.1\ \mu\text{m}$ 以下の場合が多い。特に、STN の大型基板では膜厚の均一性も要求されている。

液晶分子は、ポリイミド膜上でホモジニアス配向するが、配向の方向を揃えるためにラビングを行う。ラビングとは、配向膜をナイロンやレーヨンなどの布で一方にこすることである。ラビング装置は、ローラーに布を巻き付けて回転させて基板上をこする方式で量産化を図っている。ラビングによって静電気やゴミが発生したりするので、ラビングを行わない配向処理方法も検討されているが、まだ実用には至っていない^{5,6)}。

次に、パターン基板を貼り合わせる工程になる。一方の基板にはシール材を、スクリーン印刷などによって所定の形状に塗布する。シール材には、熱硬化性のエポキシ樹脂や、紫外線硬化性樹脂が使用されている。もう一方の基板には、スペーサを散布する。スペーサは、パネルのギャップを均一に保つ役割をしている。非常に粒径の揃ったプラスチックを使用する場合が多い。パネルのギャップは動作モードによって異なるが、通常 $10\ \mu\text{m}$

以下である。STN ではギャップが変わると色むらが発生したりするので、均一性を $\pm 0.05\ \mu\text{m}$ 以下に制御しなければならず、スペーサの散布状態や、貼り合わせ時やシール材焼成時の加圧条件などに注意を払っている。

LCD の生産性を上げるために大型の基板に何枚かのパネルを作製し、それを一緒に貼り合わせている。パネルに液晶を注入する前には、一枚ずつに切断する。ダイヤモンドやサファイヤ等の超硬材料でガラスに筋をつけて、叩いて割っている。

液晶の注入は、真空槽の中でパネルを十分に真空中に引いた後、パネルの注入孔を液晶に接触させ、毛細管現象を利用して液晶を入れる。ある程度液晶が入ったら真空槽を大気圧に戻し、加圧して完全にパネル内に注入を行う。

注入が終わったら、注入孔を封止する。封止剤としては、紫外線硬化性樹脂やエポキシ樹脂が用いられる。

最後に、できあがったパネルに偏光板や、位相差板を貼り付ける。位相差板、偏光板共に接着剤が着いているので、ゴミを取り込まないようにすると、静電気が発生しないように貼るのが重要である。

3.3 モジュール作製

液晶を動作させるために、駆動回路を LCD に接続しなければならない。接続方法としては、ゴム・コネクション法、ヒートシール接続法、異方性導電フィルム接続法、TAB (Tape Automated Bonding) 接続法、COG (Chip on Glass) 法がある。LCD の方式によって使い分けているが、現在は TAB 法が主流となっている。

さらに、透過型の LCD では、バックライトを取り付けて LCD ユニットが完成する。

4. 分光学との関わり

第2章で LCD の原理、第3章で LCD の作製方法を説明した。本章では、LCD と分光学の関わりについて、主に材料評価の面から解説したいと思う。

4.1 液晶の屈折率異方性

LCD に用いられる液晶材料は、第2章でも述べたように、1種類の材料によって、要求される温度範囲、 Δn 、 $\Delta\epsilon$ 等の全ての物性値を満足することはできず、何種類かの材料を混合してミクスチャーを作り、必要とする物性値を持った材料を開発している。従って、液晶材料開発においては、種々の物性値を精度良く測定する必要がある。ここでは特に、液晶の光学的性質を決める Δn に関して説明する。

液晶の屈折率は、アッペの屈折率計を用いて測定する⁷⁾。プリズム内面に垂直配向処理を行い、液晶を垂直

図 12 PCH-5 の屈折率の波長依存性

図 13 PCH-5 の屈折率の温度依存性

配向（ホメオトロピック配向）させる。接眼部の偏光子の角度を切り換えて、常光屈折率 n_o 、異常光屈折率 n_e を測定する。光源を変えることによって、波長依存性の

測定ができる。主に用いられるのは、Na ランプ (589 nm)、He-Ne レーザー (632.8 nm)、Hg-Cd ランプと干渉フィルタの組み合わせ (435.8 nm, 508.5 nm, 546.1

nm) である。PCH-5 の測定例を図 12 に示す⁹⁾。 n_o , n_e 共に、コーシーの分散式の第二項までで充分良い近似になっていることが分かる。このように 5 点の測定を行いコーシーの分散式でフィッティングをすれば、可視光域の任意の波長での Δn を求めることができる。

また、 Δn の温度依存性は、プリズム部分を本体から分離した構造の装置を用い、温度制御をすることにより測定する。波長依存性と同様に、PCH-5 の測定例を図 13 に示す⁹⁾。 Δn は LCD の使用する温度範囲で一定であることが望ましい。ここで、 Δn の温度依存性を考察する⁹⁾。 Δn は密度 ρ と、秩序パラメータ S を用いて近似的に以下のように書き表される。

$$\Delta n \sim \sqrt{\rho} S \quad (6)$$

ネマティック相では密度はほぼ一定なので、秩序パラメータの温度に対する振る舞いを考察することにより、 Δn の温度依存性が分かる。 S はダイレクターに対する分子長軸の平均的な配向を表すパラメータであり、次のように定義される。

$$S = \langle \frac{1}{2}(3 \cos^2 \theta - 1) \rangle \quad (7)$$

(θ : ダイレクタと分子長軸とのなす角)

S の値は液体では 0, 固体では 1 になり、液晶相ではその中間の値をとる。Maier-Saupe の剛体モデルによれば S は次のように書き表される。

$$S = \left(1 - 0.98 \frac{T}{T_{NI}} \cdot \frac{V^2}{V_{NI}^2} \right)^{0.22} \quad (8)$$

(T , V : 液晶の温度, 体積)

(T_{NI} : ネマティック-液体転移温度)

(V_{NI} : T_{NI} での体積)

(8) 式を用いた計算例を図 14 に示す⁹⁾。これより、ネマティック-液体転移温度が高い方が、LCD を動作させる温度領域において Δn の温度依存性は小さくなると

図 14 Maier-Saupe 理論による秩序パラメータ S の温度変化。横軸は換算温度 τ

図 15 投射型液晶ディスプレイの光学系

図 16 ベンゼンの $\pi \rightarrow \pi^*$ の電子遷移のエネルギーレベル

推定される。しかし、転移温度が高くなるとネマティック相を示す下の温度が上昇して、低温で LCD の表示ができなくなるので、一般には $80^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ で転移点を示す液晶が使用されている。

4.2 液晶材料の紫外光吸収

直視型の 40 インチ以上の LCD の作製には解決しなければならぬ課題が多く、現在のところ投射方式で大画面表示を行っている。投射型 LCD には図 15 に示すようにスクリーンの裏側から投射するリア型と表から投射するフロント型がある⁹⁾。どちらの場合も、高輝度の光源 (主にメタルハライドランプが使用される) を用いており、紫外 (UV) 光の発光がある。UV 光は液晶の劣化の原因になるために、必要に応じて UV カットフィルタを用いるが、吸収スペクトル端の短い液晶材料が求められている。

液晶材料の分子構造と、UV 吸収に関して次のような研究報告がある¹⁰⁾。ミクスチャ液晶 ZLI-2359 に表 4 に示すような 13 種類の液晶を 1 重量 % 混合させたものを試料とする。配向処理を行った BaF_2 基板で、ギャッ

表 4 液晶材料の分子構造と物性値

LC	STRUCTURE	NEMATIC RANGE (°C)	Δn	$\Delta \varepsilon$	$\nu_{20^\circ\text{C}}$ (mm ² /S)	ΔH (KCal/ Mole)
1. 5PCH		30-55	0.12	13	22	5.1
2. 3NCS		39-41	0.20	13	8	3.6
3. 5CB		22-35	0.20	17	24	4.1
4. 5OCB		52-69	0.23	17	37	6.9
5. 5CDP		77-(71)	0.30	10	40	6.9
6. 3OCDP		98-103	0.32	12	40	5.0
7. PTP-502		61-89	0.27	0.2	20	5.6
8. PTP-502FF		57-61	0.25	-4.4	17	6.2
9. T-33FF		132-149	0.24	-1.9	33	6.8
10. T-3FF3		95-131	0.24	-1.7	31	5.8
11. 5CT		131-240	0.30	16	86	6.1
12. PTPT-35		72-(40)	0.35	0.5	26	7.5
13. PTTP-55		86-111	0.36	0.8	32	4.6

Δn は 20°C, 589 nm の測定値. $\Delta \varepsilon$, ν (フロー粘度) も 20°C での測定値. ΔH は融解エンタルピー.

ブが約 6 μm になるようにセルを作り, 液晶を注入して, 185 nm~400 nm で UV 光の偏光方向が配向方向と平行な場合と垂直な場合の吸収スペクトルを測定している. 構造式から分かるように, 液晶はベンゼン環を持っており, ベンゼンの $\pi \rightarrow \pi^*$ の電子遷移に伴う吸収スペクトルを基に考察している. この吸収スペクトルは, 図 16 に示すように 180 nm ($^1A_{1g} \rightarrow ^1E_{1u}$), 203 nm ($^1A_{1g} \rightarrow ^1B_{1u}$), 256 nm ($^1A_{1g} \rightarrow ^1B_{2u}$) の 3 本あり, 便宜的にそれぞれ λ_1 , λ_2 , λ_3 と呼ぶ.

種々の液晶材料分子について, $^1A_{1g} \rightarrow ^1B_{1u}$ 遷移である λ_2 の波長, 吸収係数の測定結果を表 5 に示す. 共役効果は, ベンゼン環の数の異なる 5PCH, 5CB, 5CT を比較すると明確である. ベンゼン環が増えると λ_2 バンドが 235 nm, 282 nm, 306 nm と長波長側にシフトしている. また, 吸収係数も大きくなり, 2 色比 (偏光方向が配向方向に垂直と平行な吸収係数の比) も大きくなっている. これは, 液晶材料の Δn が大きくなっているためである.

表 5 液晶の λ_2 の波長及び吸収係数
(測定温度: 換算温度 0.865)

LC	λ_2 (nm)	$\alpha_{\parallel}$ (μm^{-1})	$\alpha_{\perp}$ (μm^{-1})	$\alpha_{\parallel}/\alpha_{\perp}$
1. 5PCH	235	26.6	4.8	5.6
2. 3NCS	272	27.2	4.2	6.5
	284	28.8	4.4	6.5
3. 5CB	282	52.6	9.5	5.6
4. 5OCB	298	51.8	8.3	6.2
5. 5CDP	304	56.0	9.0	6.2
	323	55.2	9.2	6.0
6. 3OCDP	318	58.5	8.7	6.7
	334	56.7	8.6	6.6
7. PTP-502	294	47.9	7.1	6.8
	313	42.4	6.0	7.1
8. PTP-502FF	292	72.1	10.9	6.6
	311	67.5	10.0	6.8
9. T-33FF	287	53.9	7.8	6.9
10. T-3FF3	283	55.4	7.5	7.4
11. 5CT	306	54.3	6.2	8.8
12. PTPT-35	304	73.6	11.5	6.4
	324	69.0	11.5	6.0
13. PTTP-55	296	46.3	5.8	8.0
	315	60.9	7.8	7.8
	336	49.3	6.9	7.1

5CB と 5OCB のように、末端基のみが異なっていて、それぞれアルキル (C_nH_{2n+1}) とアルコキシ ($C_nH_{2n+1}O$) になっている液晶がある。この場合、 λ_2 はアルコキシの方が長波長になり、2 色比が大きくなったが、配向方向と平行な偏光の吸収係数はほぼ同じであった。これは、X 線を用いた研究より、5OCB の方が、分子のパッキング密度が小さく、オーダーパラメータが小さいと推定されていて¹¹⁾、それが原因ではないかと述べている。

以上のように、分子が長くなるとベンゼン環の電子遷移による UV 吸収端が、長波長側にシフトする傾向がある。このような研究結果に基づいて、UV 吸収が問題にならない液晶材料設計が行われている。

4.3 プレティルト角の測定-クリスタルローテーション法

本解説で何度か述べているように、液晶のプレティルト角は LCD の光学特性に大きな影響を与えるので、パネルを作製する上で非常に重要なパラメータとなる。プレティルト角の測定方法は、静電容量から求める方法¹²⁾や、磁場印加によって求める方法¹³⁾があるが、本節では光学的に測定するクリスタルローテーション法¹²⁾について説明する。

図 17 に示したように、偏光軸が 90 度異なっている一組の偏光板の間に、液晶の配向方向が偏光軸と 45 度の角度をなすように液晶素子を設置する。液晶素子を透過する光をモニターしながら、素子を回転させる。透過

図 17 プレティルト角測定装置

図 18 透過率と位相差の計算例
計算条件; 液晶厚 50 μm , プレティルト角 5° , $n_e=1.74$, $n_o=1.55$, 波長 632.8 nm

光強度の変化より以下の式を使って、プレティルト角 α を求めることができる。液晶素子の位相差 $\delta(\phi)$ は次のように書き表される¹⁵⁾。

$$\delta(\phi) = 2\pi \frac{d}{\lambda} \left[\frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \sin \alpha \cos \alpha \sin \phi + \frac{1}{c} \left(1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \sin^2 \phi \right)^{1/2} - \frac{1}{b} (1 - b^2 \sin^2 \phi)^{1/2} \right]$$

(ただし, $a = \frac{1}{n_e}$, $b = \frac{1}{n_o}$)

$$c^2 = a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha \quad (9)$$

液晶素子の透過率 $T(\phi)$ は $\delta(\phi)$ を用いて

$$T(\phi) = \frac{1}{2} \sin^2 \left\{ \frac{1}{2} \delta(\phi) \right\} \quad (10)$$

となる。 $\delta(\phi)$ と $T(\phi)$ の計算例を図 18 に示す。 $T(\phi)$ は ϕ_x で対称になり、また位相差は極大値をとるので、

$$\left. \frac{d\delta(\phi)}{d\phi} \right|_{\phi=\phi_x} = 0 \quad (11)$$

を満足する。式(9)を用いれば

$$\begin{aligned} & \frac{1}{c^2} (a^2 - b^2) \sin \alpha \cos \alpha \\ & - \frac{a^2 b^2}{c^3} \left(1 - \frac{a^2 b^2}{c^2} \sin^2 \phi_x \right)^{-1/2} \sin \phi_x \\ & + b (1 - b^2 \sin^2 \phi_x)^{-1/2} \sin \phi_x = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

と書き表される。液晶の屈折率を別に測定し、 ϕ_x の測定値より、プレティルト角 α を求めることができる。クリスタルローテーション法の測定精度を向上させようと、液晶素子のギャップの均一性が良くない場合の測定法が提案されている¹⁶⁾。

液晶のプレティルト角を決定するメカニズムは、次のように考えられている。配向膜界面における液晶分子配向は、両者間の分散力、双極子-双極子相互作用、立体障害の斥力からなる自由エネルギーを極小にする条件で決まる。このような観点に立ち、プレティルト角を大きくする分子構造の検討を液晶材料、配向膜材料の両面から進めている^{17,18)}。

図 19 位相差測定光学系

4.4 配向膜の評価

布によって配向膜表面をこするラビング処理によって液晶が配向するメカニズムを解明する目的で、AFM (Atomic Force Microscopy) 等でラビング後の配向膜の表面の微細溝の観測が盛んに行われている¹⁹⁾。一方、光学的に配向膜の状態変化を評価する方法も研究されている。一例を紹介する²⁰⁾。

基板上に高分子膜を、200~400 Å 形成し、図 19 に示すような光学系を用いて高分子膜の位相差を測定する。この測定装置では、1/4 波長板を透過した光を、回転している試料を透過させ、透過光強度変化をモニターすることにより次式を用いて位相差 θ を測定している。

$$\theta = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{V_{rms}}{V_0} \quad (13)$$

(V_{rms} : 回転させた場合の透過光強度)

(V_0 : 最大透過光強度)

試料としてポリエチレンテレフタレート (PET)、ナイロン (NYLON)、ポリビニルアルコール (PVA)、ポリメチルメタクリレート (PMMA)、ポリスチレン (PS) を測定している。ラビング後、PET, NYLON, PVA は正の位相差を示したのに対し、PMMA は 0, PC は負であった。位相差が正であるということは、高分子主鎖がラビング方向に配列していると考えられる。次にこの基板を用いてネマティック液晶の配向状態を観測したところ、PET, NYLON, PVA では均一配向であったが、PMMA, PC では配向欠陥が生じていた。このことより、ラビングによって高分子主鎖の配列が引き起こされることによって液晶が配向すること、高分子主鎖の配列は高分子膜の位相差として測定できることが分かる。配向膜の位相差を測定する方法としては種々提案されているが、最近図 20 に示すようなウォラストンプリズムを用いた簡易

a: 光源, b: 偏光子, c: 資料, d: 1/4 波長板, e: ウォラストンプリズム, f: チョッパ, g: コリメータプリズム, h: 受光素子

図 20 位相差測定光学系

図 21 LCD の光学系

な方法が報告されている²¹⁾。

4.5 投射型 LCD における γ 補正

投射型 LCD は、EDTV や HDTV として開発が進められている。従って、LCD には高精細、高階調性が要求されている。本説では、高画質を得るための γ 補正について述べる²²⁾。

図 15 に示した LCD の部分を、光学系が分かるようににしたものが図 21 である²³⁾。高画質の映像を得るために、光源からの光をダイクロックミラーにより R, G, B 三色に分けて、それぞれに光パルプの役割をする、液晶パネルを設置する。液晶パネルを透過した光を光学系により再び一緒にし、投射する。この液晶パネルは、テレビ信号によって駆動するが、テレビ信号をそのまま利用すると、諧調制御がかなり困難になる。理由は、LCD の諧調は、液晶への印加電圧を変えることによって、透過率を制御して行っているが、印加電圧と透過率が比例関係にならないためである。比例にするために、テレビ信号を液晶パネル駆動回路に入力する前に γ 補正と呼ばれる調整を行う。

γ 補正の条件を決定するために、投射型 LCD を構成する個々の部品の光学特性を知る必要がある。具体的には、光源の発光スペクトル、ダイクロックミラーの分

図 22 γ 補正有無の中間調

光特性、液晶パネルの電気光学特性である。それらのデータを組み合わせて、R, G, B 三枚のパネル別々に γ 補正を行った場合と、行わない場合の違いを図 22 に示す。これより分かるように、 γ 補正により、印加電圧と透過光強度が比例関係になるので、中間調を容易に制御することができるようになる。このような技術を応用して、HDTV 用高画質 LCD を作製している。

LCD は液晶の配列を変えて光のスイッチングをして画面表示を行っているので、分光学との関係も非常に深いものがある。今後、分光学で得られた知見が、よりよい LCD を作製することに役立つことを願いたい。最後に、本講座の執筆を勧めていただいた上智大学理工学部、水谷由宏先生に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本学術振興会 第 142 委員会編 “液晶デバイスハンドブック”, 日刊工業新聞社.
- 2) 佐々木昭夫, 苗村省平編著 “液晶ディスプレイのすべて” 工業調査会.
- 3) 岡野光治, 小林駿介編 “液晶・基礎編” “液晶・応用編” 培風館.
- 4) T. J. Scheffer and J. Nehering: Appl. Phys. Lett. **45**, 1021 (1984).
- 5) H. Ikeno, A. Oh-saki, M. Nitta, N. Ozaki,

- Y. Yokoyama, K. Nakaya, and S. Kobayashi: Jpn. J. Appl. Phys. **27** L1163 (1988).
- 6) H. Ichinose, M. Suzuki, and T. Goto: Mol. Cryst. Liq. Cryst. **203** 25 (1991).
- 7) 苗村省平, ベルンハルト・ショイブレ: 日本学術振興会 第 142 委員会 A 部会, 第 41 回研究会資料 (1988).
- 8) L. Pohl and U. Finkenzeller: “LIQUID CRYSTALS, APPLICATION AND USES” Vol. 1 edited by Briendra Bahadur (World Scientific).
- 9) W. H. de Jeu: “Physical properties of liquid crystalline materials”, Gordon and Breach, London (1980), (日本語訳, 液晶の物性, 共立出版).
- 10) S. T. Wu, E. Ramos, and U. Finkenzeller: J. Appl. Phys. **68**, 78 (1990).
- 11) S. T. Wu and H. T. Nguyen: J. Appl. Phys. **65**, 2332 (1989).
- 12) F. J. Kahn: Mol. Cryst. Liq. Cryst. **38**, 109 (1977).
- 13) K. Toriyama and T. Ishibashi: “Nonemissive Electrooptic Displays” edited by A. R. Kmetz and F. K. von Willisem (Plenum, New York).
- 14) G. Baur, V. Witterr, and D. W. Berreman: Phys. Lett. **A56**, 142 (1976).
- 15) T. J. Scheffer and J. Nehering: J. Appl. Phys. **48**, 1783 (1977).
- 16) K. Y. Han, T. Miyashita, and T. Uchida: Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L277 (1993).
- 17) 澤田 温, ベルンハルト・リーガー, 吉竹廣輝, 苗村省平: 信学技報 EID 91-72 (1991).
- 18) 磯貝英之, 鶴岡義博, 佐藤暉美, 袋 裕善, 阿部豊彦: ディスプレイアンドイメーシング, **1**, 211 (1993).
- 19) T. Ito, K. Nakanishi, M. Nishikawa, Y. Yokoyama, and Y. Takeuchi: SID '92 Digest of Technical Paper, 393 (1992).
- 20) J. M. Geary, J. W. Goodby, A. R. Kmetz, and J. S. Patel: J. Appl. Phys. **62**, 4100 (1987).
- 21) N. A. J. W. Van Aerle, M. Barmentlo, and R. W. J. Hollering: Euro Display '93 Digest of Technical Paper, 5 (1993).
- 22) M. Sakamoto, M. Imai, H. Moriyama, S. Tsujikawa, H. Ichinose, S. Kaneko, H. Hayashi, H. Honjyo, K. Urano, T. Ueno, T. Yanase, and N. Nishida: SID '91 Digest of Technical Paper, 419 (1991).
- 23) 日経 BP 社, 電子グループ編 “フラットパネル・ディスプレイ 1990” 日経 BP 社.