

## 斜め入射透過偏光解析法による液晶セルの評価

木村 宗弘・赤羽 正志

### Evaluation of Liquid Crystal Cell by Means of Oblique Incident Transmission Ellipsometry

Munehiro KIMURA and Tadashi AKAHANE

A liquid crystal display (LCD) is truly a device which makes use of optical polarization. On the other hand, a method for analyzing the state of polarization, so-called 'ellipsometry,' has been established as an evaluation technique of physical properties of a dielectric medium. Therefore, ellipsometry must be an effective tool for evaluating characteristics of the LCD. We have reported a method to observe a liquid crystal (LC) reorientation dynamics at the LC/alignment layer interface by means of the reflection ellipsometry and several techniques to determine the device parameters of the LCD. In the present article, we describe a concept of a symmetric oblique incident transmission ellipsometry (SOITE) and a procedure to determine the surface anchoring energy by the SOITE method.

**Key words:** liquid crystal, ellipsometry, anchoring energy, birefringence, multiple reflection

液晶表示素子 (LCD) は、まさしく“偏光”という光学的性質を基礎として作られたデバイスである。ところが、筆者らが知る限りにおいては、偏光解析手法すなわちエリプソメトリーをベースに LCD を評価しようといった試みは意外と少なかった。いうまでもなく、エリプソメーターは薄膜などの厚さや複素屈折率の測定に広く用いられている。しかし、LCD の主役たる液晶層は、まさしく有機薄膜であるにもかかわらず、エリプソメーターが用いられることはほとんどなかったのである。LCD のデバイスパラメーター (屈折率・プレティルト角・アンカリングエネルギーなど) の測定には光学的手法を用いるが、それぞれのパラメーター決定のための個別の専用装置が使われていた。例えば、屈折率測定にはアッペの屈折計が用いられ、プレティルト角の決定には結晶回転法<sup>1)</sup>がよく用いられており、LCD 専用の結晶回転法測定装置も市販されている。

筆者らのグループは、時間分解分光エリプソメトリー法のすぐれた能力に着目し、LCD の研究への応用を目的として、液晶-配向膜界面近傍における液晶分子再配向過程

を選択的に観測する手法を開発した<sup>2,3)</sup>。さらに、長年の課題でもある「界面アンカリングエネルギー」の測定手法や、液晶の屈折率波長分散の測定手法などを提案してきた<sup>4-13)</sup>。LCD の偏光解析においては、薄膜表面の反射測定とは異なる難しさがある。その 1 つは、液晶が異方性を有することである。もう 1 つは、LCD の構成は光学的にみると複雑であり、LCD 内部における多重反射・多重干渉の影響が無視できるほどは小さくないことである<sup>14)</sup>。このため、多重干渉の影響を無視した解析においては、比較的強いアンカリングエネルギーを測定しようとした場合には大きな誤差を生じてしまう<sup>14)</sup>。2001 年に筆者らは、全反射エリプソメトリー法による極角アンカリングエネルギー測定法を報告した<sup>7)</sup>。しかし、全反射エリプソメトリー法では、LCD の基板として高屈折率ガラスとプリズムが必要である。また本質的に、多層膜解析であるため、配向膜や透明電極の屈折率と厚さをあらかじめ求めておかなければならなかった。このように、必ずしも決して取り扱いが容易な汎用法とはいえなかった。

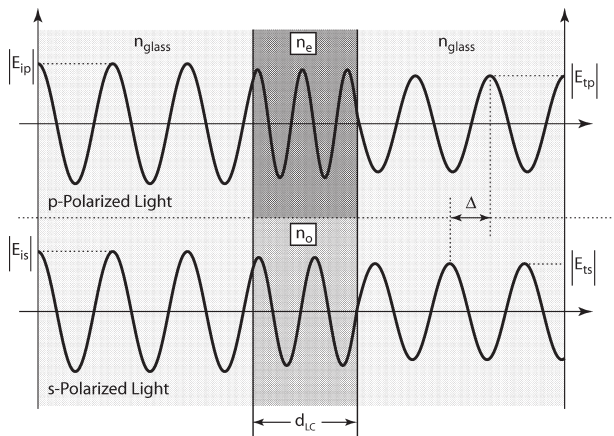


図1 異方性薄膜における光学的リタデーション。

本稿では、最近筆者らが取り組んでいる透過エリプソメトリーを用いた LCD のデバイスパラメータ決定法について解説する。はじめに、対称斜め入射による透過エリプソメトリー解析法 (symmetric oblique incident transmission ellipsometry: SOITE 法) を紹介する。SOITE 法の特徴は、1つのセルで多くの LCD のデバイスパラメータを決定できることである。次に、高プレティルト角を有する捩ねネマチック (twisted nematic: TN) LCD の方位角アンカリングエネルギーの決定法について解説する。これらの手法は、従来の方法と比べて2つの大きな利点がある。1つは、特殊な被測定用 LCD の作製や、LCD 用に特化したエリプソメトリー装置が必要ではないことである。すなわち、汎用のエリプソメーターを用い、一般的な構造を有する LCD から多くのデバイスパラメータを決定することができる。もう1つは、SOITE 法においては LCD セル内における多重反射・多重干渉の効果を相殺することができるため、配向膜や透明電極の屈折率と厚さをあらかじめ求めておく必要がないことである。

### 1. 斜め入射透過エリプソメトリー<sup>15,16)</sup>における多重反射・多重干渉の相殺

光が物質を透過する際の偏光状態の変化を観測することを透過偏光解析といい、英語では polarimetry とよぶことも多いが<sup>17)</sup>、本稿では透過エリプソメトリーとよぶことにする。液晶や位相差フィルムのような一軸異方性 (複屈折率を有する) 媒質を光が透過する場合、媒質の2つの主軸に平行な偏光透過光の間には位相のズレを生じる。一軸異方性媒質として、2枚のガラス基板間でホモニアス配向した液晶層を考える。図1は、液晶の2つの主軸 (進相軸および遅相軸とよぶ) に平行に同相の光が垂直入射した場合、透過光 (常光および異常光とよぶ) が媒質を出たとき

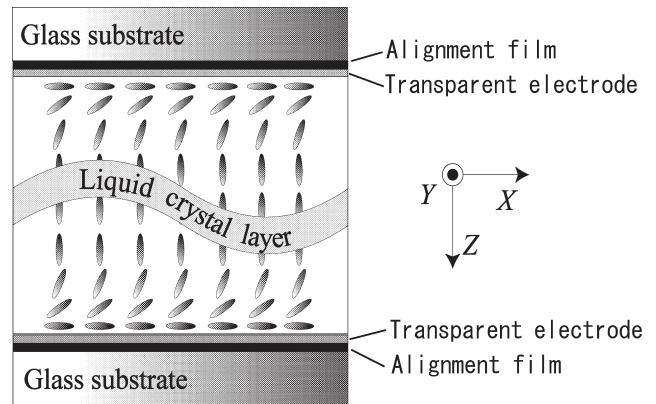


図2 液晶セルの基本構造。

の位相のズレを表している。LCD の分野においては、この位相のズレを“リタデーション R”とよび、以下のように表す。

$$R = \frac{2\pi(n_e - n_o)d_{lc}}{\lambda} \quad (\text{rad}) \quad (1)$$

ここで、 $n_e$  と  $n_o$  はそれぞれ常光と異常光に対する屈折率、 $\lambda$  は入射光波長である。 $d_{lc}$  は液晶層の厚さであるが、液晶層を挟むガラスの間隔でもあることから、LCD 分野ではセルギャップとよばれることが多い。R は、LCD のプレティルト角や界面アンカリングエネルギーを評価するときに用いている。ところで、現在の LCD はきわめて複雑な構造をしている。しかし、デバイスパラメータを決定する場合には、複雑な構造をした LCD は不向きなので、図2のようなシンプルな構造をした測定用セルを用いる。このセルは一般に、液晶セルとよばれる。液晶の“容器”でもあるガラス基板の内側には、液晶を一様に配向させるための薄膜 (配向膜とよばれる) が塗布され、液晶に電界を印加するための透明電極も配置されている。これらの構成要素は屈折率が異なるため、液晶セル内部では多重反射・多重干渉が生じている。このため、透過エリプソメーターで測定される位相差  $\Delta$  と R は必ずしも一致しない<sup>14)</sup>。液晶層におけるリタデーションを精度よく求めるには、そのような多重反射・多重干渉も考慮に入れた多層膜解析を行うか<sup>6,7)</sup>、この後述べるような多重反射・多重干渉を相殺できるような手法を採用するか、のいずれかしかない。

液晶薄膜内部における多重反射・多重干渉を相殺する方法について考えてみることにする。ここでは、液晶に光が斜め入射した場合における光路を、図3および図4をもとに考えてみることにする。簡単化のために、自己保持膜のような液晶層のみが存在しているとし、層内で液晶分子は角度  $\theta$  だけ傾いて配向しているとする。図3は、液晶層に

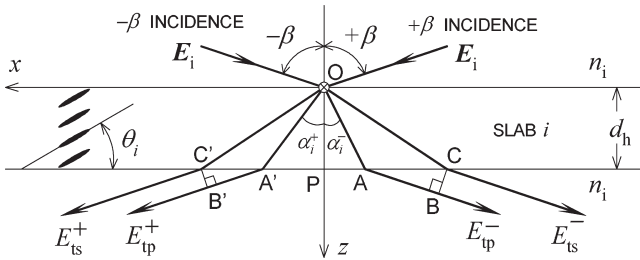


図3 薄膜への斜め入射透過光の光路.

光が入射角 $\pm\beta$ で斜め入射し、内部で多重反射・多重干渉が起こっていない場合の光路を示す。斜め入射の場合のリタデーション $R$ は、透過p偏光と透過s偏光の間の位相のズレである。すなわち、 $R$ には層内での多重反射・多重干渉成分は含まれていない。入射角度 $-\beta$ 入射時と $+\beta$ 入射時のリタデーションをそれぞれ $R^-$ および $R^+$ とする。斜め入射の場合、複屈折(屈折率異方性)のためs偏光とp偏光では光路が異なる。さらに、液晶がティルト配向しているときは、入射角が $+\beta$ の場合と $-\beta$ の場合ではp偏光の光路が異なる。図3のように入射面で液晶がティルト配向している場合、s偏光は入射角が $+\beta$ の場合と $-\beta$ の場合とで対称的である。そこで、p偏光についてのみ考えてみることにする。実際には、液晶層内部で多重反射が起きているため、p偏光の光路は図4のようにになっている。すなわち、実際に異方性媒体を透過した光を検出すると、多重反射・多重干渉光が重畳しているために、出射光の位相差 $\Delta$ においても多重反射・多重干渉の効果が含まれる。ここでいう位相差 $\Delta$ とは、多重反射光も含んだ出射光p偏光と出射光s偏光の間の位相差である。このため、リタデーション $R$ と位相差 $\Delta$ は一般に等しくない。区別のために、以後は「リタデーション $R$ 」と書けば多重反射・多重干渉を考慮していないものとし、「位相差 $\Delta$ 」と書けば多重反射・多重干渉を含んでいるものとする。多重反射・多重干渉によって生じる位相差を、入射角 $+\beta$ および $-\beta$ に対してそれぞれ $\delta^+$ と $\delta^-$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} \Delta^- &= R^- + \delta^- \\ \Delta^+ &= R^+ + \delta^+ \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

と形式的に書くことができる。筆者らは最近、 $+\beta$ から入射したときと $-\beta$ から入射したときの多重反射・多重干渉の効果は等しいという大変興味深い事実に気づいた。式で書くならば、 $\delta^- = \delta^+$ である。詳しい証明は文献16)を参照されたい。直感的な理解のために、もう一度図4の多重反射光に注目してほしい。光路AGとG'H', GHとA'G'は平行かつ長さが等しく、AF=A'F'である。さらに、高次の反射光の光路についても同様で、 $+\beta$ から入射したときと $-\beta$ から入射したときの反射光の光路長が等しい組が存在する。結果として、 $+\beta$ から入射したときと $-\beta$ から入射したときの多重反射光の成分は等しい。よって、

$$\Delta^- - \Delta^+ = R^- - R^+ \quad (3)$$

となる。すなわち、対照的な2方向から斜め入射で位相差を測定すれば、多重反射・多重干渉の影響を相殺することができる。得られる情報は、上式のようにリタデーションの差という形になっている。このため、液晶層厚を $d$ 、プレティルト角を $\theta$ 、 $\nu = (n_e^2 - n_o^2)/n_o^2$ としたとき、

$$\Delta^- - \Delta^+ = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \beta \int_0^d \frac{\nu \cos \theta \sin \theta}{1 + \nu \sin^2 \theta} dz \quad (4)$$

が導かれる。右辺は簡単な楕円積分であるので、数値計算も容易である。

図5に、実験結果の一例として、ティルト配向したLCDでの透過光の位相差 $\Delta$ の波長依存性を示す。入射角 $\beta$ は $60^\circ$ とした。ティルト配向しているため、 $+\beta = +60^\circ$ の場合と $-\beta = -60^\circ$ の場合とでは得られた位相差が異なる。また、それぞれの波長依存性についても単純な曲線ではなく波打っているが、これは多重反射・多重干渉が原因である。この結果からも明らかのように、多重反射・多重干渉の影響を無視して解析を行うと、深刻な誤差が生じることは容易に推察できる。しかし、 $\Delta^- - \Delta^+$ 曲線においては多重反射・多重干渉による影響が相殺されて消えていることがわかる。

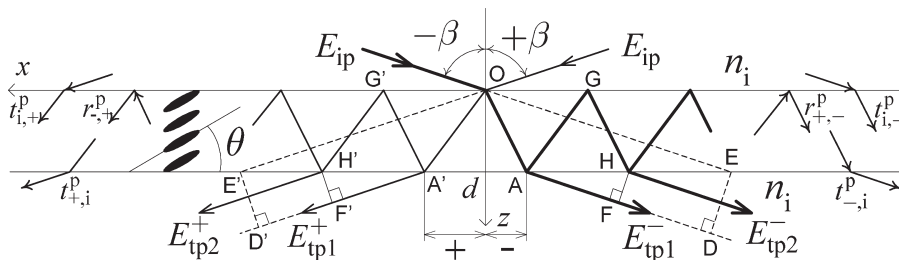


図4 薄膜への斜め入射光の多重反射.



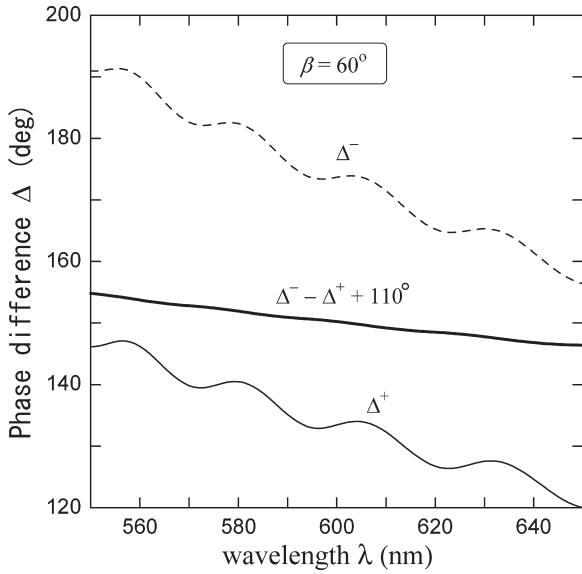


図5 斜め入射によるホモジニアス配向液晶セルでの位相差  $\Delta$  の波長依存性。

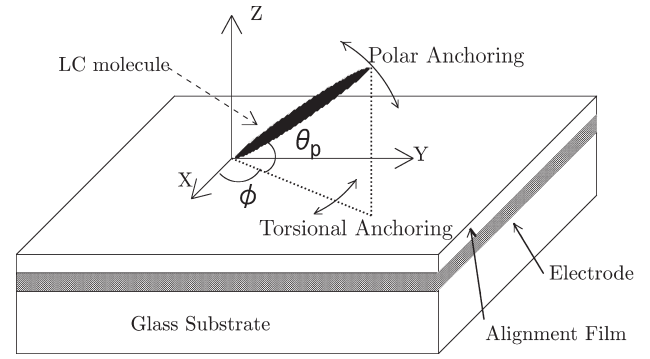


図6 界面アンカリングエネルギー。

## 2. 斜め入射透過エリプソメトリーによる極角アンカリングエネルギーの決定法<sup>15,16,18)</sup>

アンカリングエネルギーは、LCDの配向に関する情報としてきわめて有用である。図6にその概念を示す。高分子膜に配向処理を施すと、処理によって液晶が一定の方向に配列させられるが、これを配向といい、その方向を配向容易軸という。特に、配向容易軸と基板とのなす角をプレティルト角  $\theta_p$  という。液晶分子を基板から  $\theta$  方向に起き上がらせようと外場を加えたとき、液晶分子を束縛しておこうとするエネルギーを極角アンカリングエネルギー  $A_\theta$  という。また、液晶分子が基板面内で  $\phi$  回転する方向について束縛するエネルギーを、方位角アンカリングエネルギー  $A_\phi$  という。

ホモジニアス配向した液晶セルに電場を印加し、配向変形を起こしたときのリタデーション  $R$  の変化から極角アンカリングエネルギー  $A_\theta$  を求めることを考える。連続体理論からの導出<sup>16,18)</sup> の詳解は略するが、 $A_\theta$  と位相差の関係式を導くと次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta^- - \Delta^+ = R^- - R^+ = \frac{16\pi}{\lambda} \frac{K_{11} \sin \beta}{A_\theta \sin 2(\delta\theta_0)} \\ \sqrt{\frac{(1 + \kappa \sin^2 \theta_0)(\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta_0)}{1 + \gamma \sin^2 \theta_0}} \\ \times \int_{\theta_0}^{\theta_m} \frac{\nu \sin \theta \cos \theta}{1 + \nu \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{(1 + \kappa \sin^2 \theta)(1 + \gamma \sin^2 \theta)}{\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta}} d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $\kappa = (K_{33} - K_{11})/K_{11}$ 、 $K_{11}$  と  $K_{33}$  はそれぞれネマチ

ック液晶のスプレー変形とベンド変形に対する弾性定数であり、 $\gamma = \epsilon_a / \epsilon_\perp$ 、 $\epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_\perp$ 、 $\epsilon_{\parallel}$  と  $\epsilon_\perp$  はそれぞれ、電界がダイレクターに平行ないし垂直のときの液晶の比誘電率である。また、 $\theta_0$  および  $\theta_m$  は、電界印加時における界面およびセル中央でのダイレクターのティルト角、 $\delta\theta_0 = \theta_0 - \theta_p$  である。 $\theta_p$  はあらかじめ測定された既知の値である。式(5)は一見複雑な印象があるが、収束計算とは違い、数値計算は発散のおそれのない楕円積分である。よって、位相差の測定から  $A_\theta$  を求めるに当たっては、 $\Delta^- - \Delta^+$  の印加電場依存性もしくは  $\Delta^- - \Delta^+$  の入射角依存性から求めることができる。セル内でのダイレクター分布を求める必要がないために、 $4 \times 4$  マトリクス法のような複雑な数値計算も必要ないことから、これまでに筆者らが報告した全反射エリプソメトリー法と比べると、数値計算は格段に簡単である。 $A_\theta$  決定の一例として、 $\Delta^- - \Delta^+$  の印加電場依存性を図7に示す。決定手順を説明する。あらかじめ予想される  $A_\theta$  の範囲についてのマスターカーブを引く。まず、仮定した  $A_\theta$  について、電圧を印加したときの  $\theta_0$  および  $\theta_m$  を次式から求める。

$$V = 2 \sqrt{\frac{K_{11}}{\epsilon_0 \epsilon_a}} \sqrt{1 + \gamma \sin^2 \theta_m} \int_{\theta_0}^{\theta_m} \sqrt{\frac{1 + \kappa \sin^2 \theta}{(1 + \gamma \sin^2 \theta)(\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta)}} d\theta \quad (6)$$

$$A_\theta = \frac{4K_{11}}{d \sin 2(\delta\theta_0)} \sqrt{\frac{(1 + \kappa \sin^2 \theta_0)(\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta_0)}{1 + \gamma \sin^2 \theta_0}} \int_{\theta_0}^{\theta_m} \sqrt{\frac{(1 + \kappa \sin^2 \theta)(1 + \gamma \sin^2 \theta)}{\sin^2 \theta_m - \sin^2 \theta}} d\theta \quad (7)$$

次に、式(6)、(7)から求めた  $\theta_0$  および  $\theta_m$  を式(5)に逐次代入しながら、 $\Delta^- - \Delta^+$  の電圧依存性のマスターカーブを引く。その上に  $\Delta^- - \Delta^+$  の測定値をプロットする。実験値のプロットと最も近いマスターカーブを見つけることから  $A_\theta$  を決定する。図7のLCDの場合、 $A_\theta = 7.5 \times 10^{-4}$  J/m<sup>2</sup> が最も測定値に近いマスターカーブである。測定精

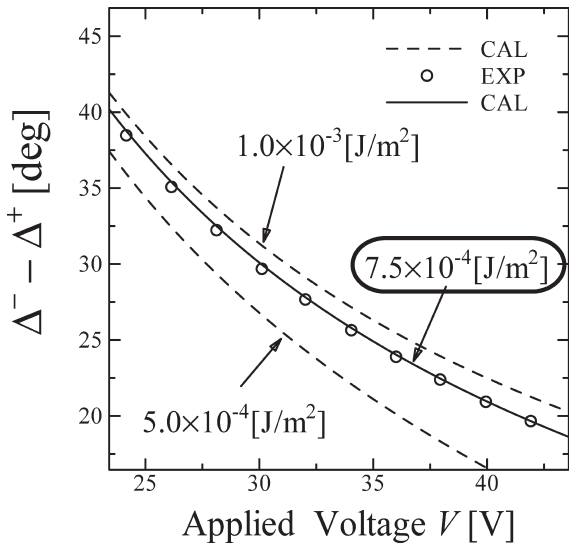


図7 SOITE法による極角アンカリングエネルギーの決定の一例。

度について質問を受けることがあるが、繰り返し再現性は実用上十分である。液晶セルのアンカリング測定においては、測定誤差よりも液晶セルの個体差のほうが大きいように思われる。

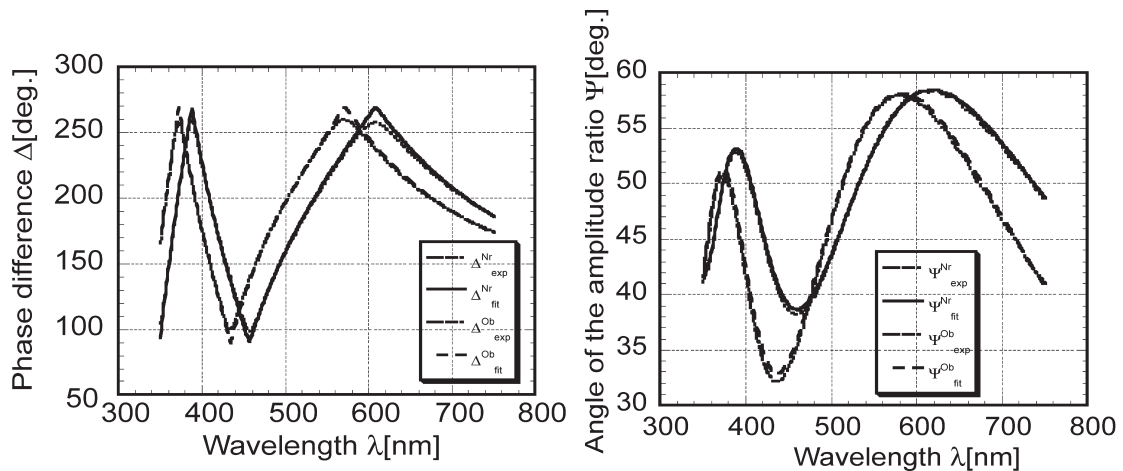
実際の極角アンカリングエネルギーを求める手順は次の通りである。はじめに、弾性定数、屈折率、誘電率が既知の液晶が注入された被測定液晶セルを用いる。入射角  $\beta$  を数点選び、 $\Delta$  の波長依存性を測定し、それぞれのデータから最小二乗法フィッティングでセル厚  $d$  とプレティルト角  $\theta_0$  を求める。つづいて、波長および入射角を適切に設定して  $\Delta^- - \Delta^+$  の印加電界依存性を測定し、 $A_\phi$  を振ったマスターカーブからアンカリングエネルギー  $A_\phi$  を決定する。

波長および入射角などの測定条件については、用いる液晶セルのセル厚や液晶の屈折率により  $\Delta$  測定における感度が最もよい条件を選ぶ。

### 3. 斜め入射透過エリプソメトリーによる方位角アンカリングエネルギーの決定法<sup>19,20)</sup>

TN 液晶セルにおける方位角アンカリングエネルギー  $A_\phi$  の測定には、トルクバランス法がよく用いられる。界面における液晶ダイレクターの配向容易軸からのズレ角を測定することで  $A_\phi$  を決定する。ところが、これまで報告されている測定手法は、界面におけるプレティルト角の影響を無視した測定がほとんどであった。最近注目されているいくつかの液晶表示モードにおいては、プレティルト角が高い配向を必要としており、高ティルト配向膜における  $A_\phi$  はどれほどであるのかについて関心が寄せられていた。また、結晶回転法は TN 液晶セルにはそのまま適用できないため、同一の配向条件でホモジニアス配向セルを作製し、プレティルト角を測定していた。ところが、この測定値を鵜呑みにして TN 液晶セルのデバイス設計シミュレーションに代入すると、現実には合わないということがよく見受けられる。このため、ホモジニアスセルからの類推ではなく、TN セルでプレティルト角を直接測る手法の確立が求められていた。

一般に、被解析量が1つ増える場合は、情報(被測定量)も1つ増やさなければならない。プレティルト角を考慮に入れた  $A_\phi$  測定を行うには、やはり被測定量を増やすことが有効である。筆者らは2つの測定、すなわち垂直入射と斜め入射の透過偏光解析を行うことで、TN 液晶セルにお



$$d=5.50 \mu\text{m} \quad \theta_{[0]}=10.12 \text{ deg.} \quad \phi_{[0]}=88.05 \text{ deg.} \quad \phi_i=-0.02 \text{ deg.}$$

図8 高プレティルト配向膜を用いた TN セルでの  $\Delta$ ,  $\Psi$  の測定結果とポリトープ法による数値計算のフィッティング。

けるセル厚とプレティルト角および方位角アンカリングエネルギーを同時に決定するアルゴリズムを構築した。

$A_\phi$  測定の一例を図8に示す。まず、垂直入射で位相差  $\Delta$  と振幅比角  $\Psi$  を測定する。図8の破線で示される  $\Delta^{Nr}$  と  $\Psi^{Nr}$  が垂直入射での測定結果である。次に、斜め入射で同様に  $\Delta$  と  $\Psi$  を測定する。図8の破線で示される  $\Delta^{Ob}$  と  $\Psi^{Ob}$  が斜め入射での測定結果である。次に解析である。液晶分子配向分布を求める連続体理論の計算を行い、それによって得られた分子配向分布を  $4 \times 4$  マトリクス法に代入する。こうして得られる  $\Delta$  と  $\Psi$  を実験結果にフィッティングすることによって、 $d_{LC}$ 、 $\theta_p$  および  $A_\phi$  を求める。フィッティングは多変量解析法（ポリトープ法）により行う。このようにして、測定した4本の  $\Delta$ - $\Psi$  曲線を同時に最適フィットする  $d_{LC}$ 、 $\theta_p$  および  $A_\phi$  を一度に求めることができる。図8中の実線は、 $\Delta^{Nr}$ 、 $\Psi^{Nr}$ 、 $\Delta^{Ob}$  および  $\Psi^{Ob}$  の4本の曲線に最も近いフィッティング曲線である。結晶回転法に基づく従来法では、液晶セル内部におけるダイレクターの極角のセル厚方向への空間分布は無視していたため、高ティルト配向の液晶セルの解析に問題があった。本手法では、TN液晶セル内部におけるダイレクター分布を再現することができるので、正確にプレティルト角を求めることができる。

誌面の都合上割愛したが、2章で述べた手法から、垂直配向用配向膜の極角アンカリングエネルギーも測定可能である。ハイブリッド配向LCDを用いるのであるが、ポリイミド系垂直配向膜の場合には、定説よりも1桁ほどアンカリングエネルギーは強いことが明らかとなった。現在、MVA (multidomain vertical alignment) モードとして市場に出回っているLCDに用いられている配向膜であることから、そのアンカリングが強いことが明らかとなったので、配向膜メーカーは意を強くしているという。また、LCD製品パネルの評価にも取り組んでおり、良品/不良品の峻別にも成功している。

従来は桁を決めるのがやっとなっていたアンカリングエネルギー測定であるが、上述のような改善から、扱いが容易

でかつ確度が高い手法が確立できた。さらに、1台のエリプソメーターで、液晶の屈折率波長分散、配向膜の厚さのみならず、LCDのアンカリングエネルギーやセル厚、プレティルト、弾性定数といったさまざまなデバイスパラメーターを決定できることは、きわめて有意義なことである。

## 文 献

- 1) T. J. Scheffer and J. Nehring: J. Appl. Phys., **48** (1977) 1783-1792.
- 2) T. Tadokoro, T. Fukazawa and H. Toriumi: Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) L1207-L1210.
- 3) T. Fukazawa, T. Tadokoro, H. Toriumi, T. Akahane and M. Kimura: Thin Solid Films, **313/314** (1998) 799-802.
- 4) S. Okutani, M. Kimura, T. Akahane, H. Toriumi, T. Tadokoro and K. Akao: Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) L600-L602.
- 5) S. Okutani, M. Kimura, T. Akahane, H. Toriumi, T. Tadokoro and K. Akao: Mol. Cryst. Liq. Cryst., **329** (1999) 269-281.
- 6) S. Okutani, M. Kimura, H. Toriumi, K. Akao, T. Tadokoro and T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) 244-249.
- 7) S. Okutani, M. Kimura, H. Toriumi, K. Akao, T. Tadokoro and T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) 3288-3293.
- 8) T. Tadokoro, K. Akao, S. Okutani, M. Kimura, T. Akahane and H. Toriumi: Thin Solid Films, **393** (2001) 53-58.
- 9) T. Tadokoro, K. Akao, T. Yoshihara, S. Okutani, M. Kimura, T. Akahane and H. Toriumi: Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) L453-L455.
- 10) T. Tadokoro, H. Toriumi, S. Okutani, M. Kimura and T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **42** (2003) 4552-4563.
- 11) N. Tanaka, M. Kimura and T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **41** (2002) L1502-L1504.
- 12) N. Tanaka, M. Kimura and T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **42** (2003) 486-491.
- 13) 田所利康, 木村宗弘, 赤羽正志, 鳥海弥和: 応用物理, **73** (2004) 759-763.
- 14) T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) 3428-3435.
- 15) 赤羽正志, 木村宗弘, ラフング チオング: 特願 2004-55128.
- 16) L. T. Hung, M. Kimura and T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **43** (2005) 932-939.
- 17) 藤原裕之: 分光エリプソメトリー (丸善, 2003) pp. 1-11.
- 18) Y. Abe, M. Kimura and T. Akahane: *Proceedings of IDW '04* (2004) pp. 175-178.
- 19) N. Tanaka, M. Kimura and T. Akahane: Jpn. J. Appl. Phys., **44** (2005) 587-590.
- 20) N. Tanaka, M. Kimura and T. Akahane: *Proceedings of IDW '04* (2004) pp. 171-174.

(2004年12月16日受理)