

# 液晶セルパラメーター二次元解析装置

佐 藤 進

## Two Dimensional Measurements of Cell Parameters in Liquid Crystal Displays

Susumu SATO

Two dimensional (2D) measurement methods of cell parameters such as a thickness of liquid crystal (LC) layer, twist angle of LC molecular orientation, and pretilt angle in LC display (LCD) panels are reviewed. The distributions of LC thickness and twist angle in the transmissive-type LCDs can be measured by using Stokes parameters at only one wavelength. The pretilt angle can also be determined using two wavelengths. These methods are easily applied for measuring the cell parameters in reflective-type LCDs, and their 2D distributions can be determined by using three different wavelengths.

**Key words:** cell parameters, cell thickness, twist angle, pretilt angle, two dimensional measurement, transmissive-type LCD, reflective-type LCD

平板型ディスプレイとして広く実用されているネマチック液晶は、低電圧印加により分子の配向状態や光学的特性を容易に可変制御できるという、他の材料にはないすぐれた特徴を有しており、種々の光学デバイスへの応用開発も始まっている。また、液晶ディスプレイに使用されている液晶セルともよばれている液晶パネルの表示特性は、液晶層の厚みや液晶分子配向のねじれの角度、プレティルト角とよばれる液晶分子が基板面に対してなす角度、基板界面における液晶分子配向規制力（アンカリングエネルギー）などのパラメーターに強く依存することが知られている。したがって、これらのパラメーターを迅速にかつ高精度で測定し評価する技術は、液晶パネルの製造工程のみならず、表示における欠陥部の解析や液晶分子配向を利用した光学デバイスにかかわる研究開発においてもきわめて重要である。これまで、液晶層の厚みやねじれの角度を測定する手法が報告されているが<sup>1-3)</sup>、装置が複雑で測定に長時間を要することや、液晶セルを回転する必要があるためパラメーターの二次元分布の測定ができないこと、分子配向にねじれの成分がある場合にはプレティルト角を測定でき

ないなどの問題点があった。さらに、反射型の液晶ディスプレイでは、液晶セルに垂直に入射した光は同一の経路を通過して反射されるため、液晶分子配向のねじれ角やプレティルト角の測定は困難であった。本稿では、筆者らにより提案された液晶デバイスの液晶層における各パラメーターの測定法として、異方性光学材料の光学定数にかかわるストークスパラメーター<sup>4)</sup>を用いる方法（ストークスパラメーター法）による二次元分布測定<sup>5)</sup>および最近の研究<sup>6-13)</sup>について述べる。

### 1. ストークスパラメーター法による測定の原理

TN（ねじれネマチック）液晶セルのように液晶層内で液晶分子配向にねじれの成分を有する液晶セルに垂直に入射する光線について、図1に示す座標系を定め、液晶分子の長軸すなわちダイレクターの方向と $x$ 軸とのなす角を $\alpha$ 、液晶層を透過後に偏光方向がねじれた角を $\phi$ とする。この場合に、液晶層の光学特性は次のジョーンズマトリクスを用いて表示することができる<sup>1)</sup>。

$$LC(\phi) = e^{j\frac{\pi d}{\lambda}(n'_e + n_o)} \begin{bmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $a$ 、 $b$  は

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \sin \phi \sin(\sqrt{1+u^2}\phi) + \cos \phi \cos(\sqrt{1+u^2}\phi) \\ &\quad + j \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \cos \phi \sin(\sqrt{1+u^2}\phi) \\ b &= \frac{1}{\sqrt{1+u^2}} \cos \phi \sin(\sqrt{1+u^2}\phi) - \sin \phi \cos(\sqrt{1+u^2}\phi) \\ &\quad + j \frac{u}{\sqrt{1+u^2}} \sin \phi \sin(\sqrt{1+u^2}\phi) \end{aligned} \quad (2)$$

また、式(2)で

$$\begin{aligned} u &= \frac{\pi d}{\lambda \phi} (n'_e - n_o) \\ &= \frac{\pi d}{\lambda \phi} \left( \frac{n_e}{\sqrt{1 + ((n_e/n_o)^2 - 1) \sin^2 \theta}} - n_o \right) \end{aligned} \quad (3)$$

である。なお、常光および異常光に対する屈折率を  $n_o$ 、 $n_e$  とし、液晶層の厚みを  $d$ 、プレティルト角を  $\theta$  としている。式(1)で位相係数の部分はここでは特に関係しないので省略し、式(4)の回転行列を用いると、液晶層を透過後の電界成分は式(5)のように示される。

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = R(\alpha) LC(\phi) R(-\alpha) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

なお、式(5)で入射光の電界  $E$  は正規化されている。一方、この電界成分と液晶層のストークスパラメーター  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  との間には式(6)のような関係がある。

$$\begin{aligned} S_1 &= E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ S_2 &= E_x E_y^* + E_x^* E_y \\ S_3 &= j[E_x E_y^* - E_x^* E_y] \end{aligned} \quad (6)$$

また、式(6)で表されるストークスパラメーター  $S_1 \sim S_3$  は、液晶セルにおける各種の偏光透過強度 ( $I_x$ 、 $I_y$ 、 $I_{xy}$ 、 $I_{qxy}$ ) の測定から式(7)を用いて求めることができる。

$$\begin{aligned} S_0 &= (I_x + I_y) / (I_x + I_y) = 1 \\ S_1 &= (I_x - I_y) / (I_x + I_y) \\ S_2 &= [2I_{xy} - (I_x + I_y)] / (I_x + I_y) \\ S_3 &= [2I_{qxy} - (I_x + I_y)] / (I_x + I_y) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} = S_0$  の関係がある。なお、式(7)において、図1に示したように偏光子の方向を  $y$  軸、検光子の方向を  $x$  軸として1/4波長板の光軸方向を  $y$  軸方向としたときの透過光強度を  $I_x$ 、検光子および1/4波長板を  $y$  軸方向としたときの透過光強度を  $I_y$  とし、検光子および1/4波長板を  $x$  軸および  $y$  軸に対して  $45^\circ$  の方向としたと

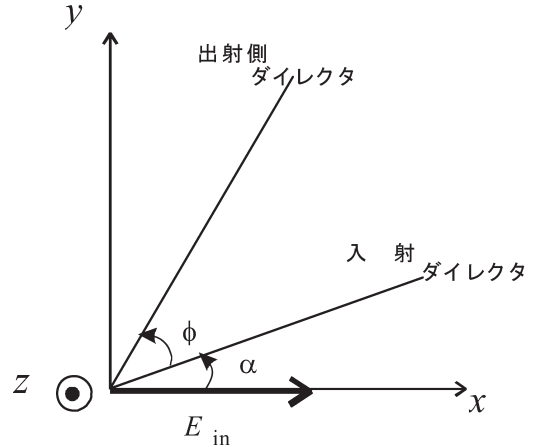


図1 座標系と  $\alpha$  および  $\phi$  の定義。

きの透過光強度を  $I_{xy}$ 、さらに1/4波長板を  $y$  軸方向に向けたときの透過光強度を  $I_{qxy}$  としている。以上のように、液晶層を透過したおのおのの偏光成分  $I_x$ 、 $I_y$ 、 $I_{xy}$ 、 $I_{qxy}$  から、式(7)を用いて液晶層のストークスパラメーターを求めることができる。液晶セルパラメーターとしては、液晶層の厚み  $d$ 、分子配向のねじれ角  $\phi$ 、プレティルト角  $\theta$  の3未知数があるのに対して、 $S_0=1$  として規格化されたストークスパラメーター  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  は互いに独立ではないため、3つのセルパラメーターすべてを同時に決定することはできない。したがって、たとえばプレティルト角  $\theta$  を設計値などの所定の値に定めると、式(1)~(7)の関係を用いることで、液晶層の厚み  $d$ 、液晶分子配向のねじれの角度  $\phi$  を算出することができる<sup>5)</sup>。

以上、ストークスパラメーター法によると、液晶セルを回転するなどの操作は必要でないため、撮像素子を光検出器として用いておのおのの画素ごとに上記の演算を行い、その結果として液晶層の各パラメーターを二次元分布として表示することが可能となった<sup>6)</sup>。また、偏光顕微鏡と撮像素子を併用することで、液晶パネルの各画素内の微細な領域におけるセルパラメーターの分布を拡大して表示することも可能である。なお、カラー液晶パネルにおける三原色のカラーフィルターはすべて近赤外光を透過するので、本ストークスパラメーター法において近赤外の波長の光を利用することで、赤、緑、青の全画素を含む液晶層のパラメーターを二次元で測定し、表示することができる<sup>11)</sup>。

一方、反射型液晶ディスプレイの場合には、入射光は液晶セル内で同一の液晶層を往復することになる。そこで、式(8)の回転行列を用いて、式(5)は式(9)のように拡張される<sup>10)</sup>。

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

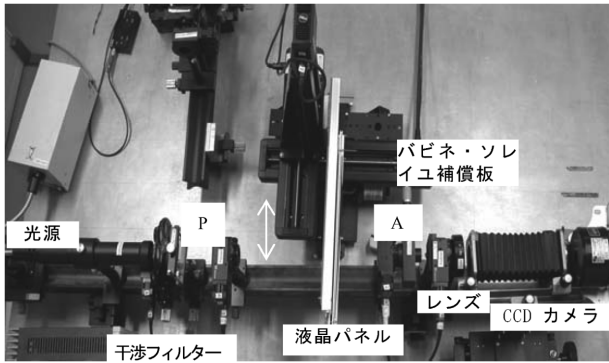


図2 多波長光源を用いた液晶セルパラメーター測定装置。

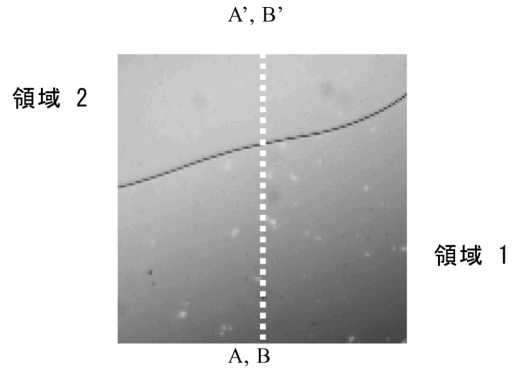


図4 ディスクリネーションライン。領域 1: 右ねじれ, 2: 左ねじれ。

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & -b \\ b^* & a^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{xin} \\ E_{yin} \end{bmatrix} \quad (9)$$

なお、反射型液晶セルの場合には、液晶セルに入射した光は同一の経路を通過して反射され、分子配向のねじれによる効果が打ち消されるように働くことで、ストークスパラメーターから求められるセルパラメーターに関する情報が透過型液晶セルの場合に比べて少なくなる。したがって、この場合には、液晶分子配向のねじれ角  $\phi$  およびプレティルト角  $\theta$  として所定の設計値を用いることで、式 (9) を用いて液晶層の厚みに関係する二次元分布が得られる<sup>10)</sup>。

## 2. 単一波長を用いた液晶セルパラメーターの測定方法および結果

本ストークスパラメーター法により透過型液晶パネルにおけるセルパラメーターを測定する装置の構成を図2に示す。本測定装置の構成において、次章で述べる複数の波長での測定ができるように、近赤外光を含む種々の波長帯の光源として白色ランプおよび図3に透過スペクトルを示す

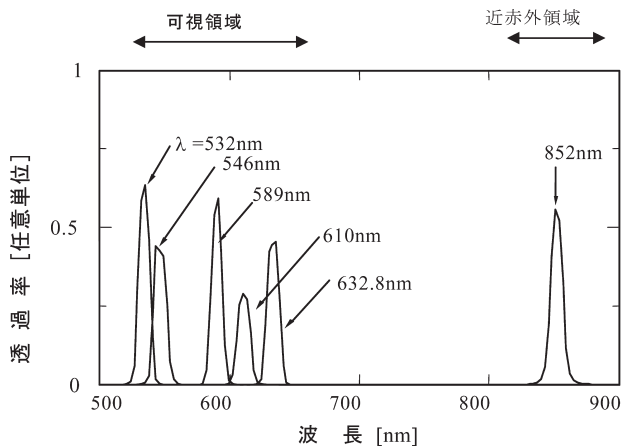


図3 近赤外線および可視光線用干渉フィルターの透過スペクトル<sup>11)</sup>。

干渉フィルターを使用した。なお、式 (7) からストークスパラメーターを求めるためにはおのおのの波長に対応する  $1/4$  波長板が必要となるが、バビネ・ソレイユ補償板を用いて、各波長において光波の位相差がそれぞれ  $1/4$  波長となるように調整して用いた。また、図中で矢印は液晶パネルの移動を示している。

TN 液晶セルにおいて、液晶分子配向のねじれの方向が互いに逆になっている領域 (リバースツイスト) が生じることがあり、表示の品質が悪化する原因となる。また、このリバースツイストの境界部に、図4に示したような分子配向が不連続となるディスクリネーションラインとよばれる欠陥領域が現れる。近赤外の波長域である  $852 \text{ nm}$  の単一波長を用いて、ディスクリネーションラインを横切るように液晶層の厚みおよびねじれ角の分布を測定した結果を図5に示す。図から、ディスクリネーションラインを挟んで液晶層の厚みには変化がほとんど認められないが、液晶分子配向のねじれ角は  $\pm 90^\circ$  変わっていることがわかる。なお、本ストークスパラメーター法とトルクバランス法を併用することで、ポリイミド配向膜などにおける強アンカリング状態を含む、液晶セル基板界面における液晶分子の配向規制力 (アンカリングエネルギー) を高精度で測定することも可能となった<sup>13)</sup>。

## 3. 複数の波長を用いたストークスパラメーター法による測定方法および結果

前述したように、単一波長の光源を使用した場合には、透過型パネルではプレティルト角を一定値として与えることで液晶層の厚み  $d$  とねじれ角  $\phi$  が、また反射型パネルでは液晶層の厚み  $d$  などの限られたパラメーターのみが測定できるだけであり、3種類のセルパラメーターを同時

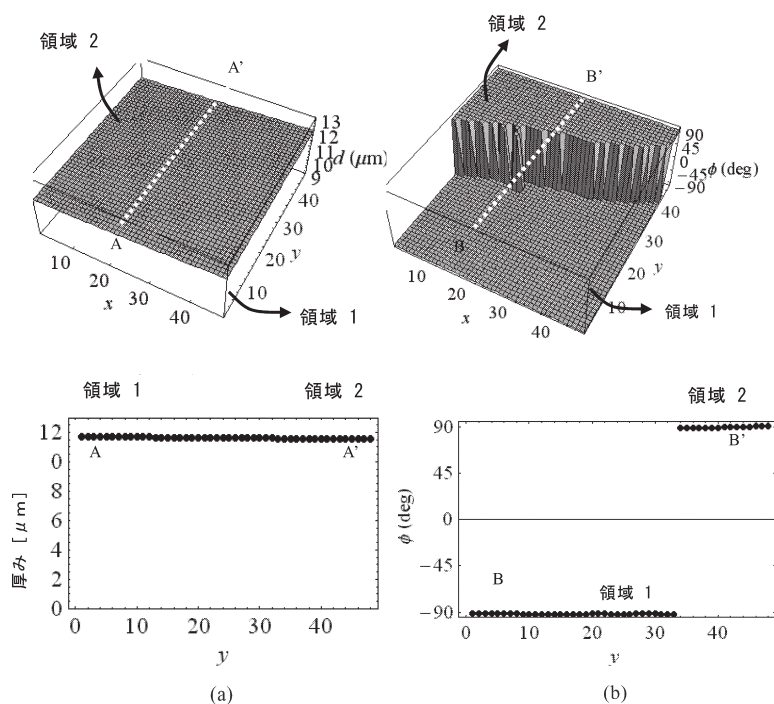


図5 ディスクリネーションを含む領域における液晶層の厚みおよびねじれ角の分布特性. (a) セル厚の分布, (b) ねじれ角の分布.

に測定することはできなかった。しかし、式(2)におけるパラメータ  $u$  は式(3)に示すように波長  $\lambda$  の関数であるので、たとえば透過型液晶セルにおいて2波長の光源を用いて各波長における連立関係を利用することで、液晶層の厚み  $d$  および液晶分子配向のねじれ角  $\phi$  のほかにプレティルト角  $\theta$  も含むすべての液晶セルパラメータを測定することが可能となった<sup>11)</sup>。また、透過型液晶セルにおいて、2波長または3波長の光源を用いて液晶セルパラメータを測定した結果を比較すると図6のようになり、測定波長が増すに従って測定データの誤差(ばらつき)の範囲も小さくなっていることがわかる<sup>11)</sup>。

次に、図7に示した同一の液晶セル内でラビング強度を連続的に変化できるような装置により、配向処理を行った基板を用いて作製した液晶セルにおける各セルパラメータの二次元分布特性を図8に示す<sup>11)</sup>。液晶層の厚みおよびねじれ角は均一であるが、ラビング強度に従ってプレティルト角が増加している様子がわかる。

#### 4. ストークスパラメータ法の反射型液晶パネルへの適用

反射型液晶パネルにおける各液晶セルパラメータの測定装置を模式的に図9に示す。ここでは、ハーフミラーを用いて入射光と反射光とを分離し、液晶パネルの裏側に反射板(AI)を設けることで、透過型セルとして各パラメータを測定した結果と比較できるようにしている。また、透過型液晶セルの場合と同様に式(3)における波長  $\lambda$  依

存性を利用することで、反射型液晶セルでは、3波長光源を用いて液晶セルの  $d$ ,  $\phi$ ,  $\theta$  すべてのパラメータを二次元分布として求めることが可能となった<sup>12)</sup>。

反射型液晶パネルでは、液晶セル表面などからの反射光の影響により、各パラメータの測定に誤差が生じることがある<sup>14)</sup>が、反射光の影響およびハーフミラーの偏光特性を考慮して各パラメータの二次元分布特性を測定した結果を図10に示す<sup>12)</sup>。液晶層の厚みのみならず、ねじれ角およびプレティルト角も同時に測定し、二次元表示できることがわかる。

#### 5. まとめ

本稿では、液晶ディスプレイパネルにおける液晶層のストークスパラメータを用いて、液晶セルにおける液晶層の厚み、液晶分子配向のねじれ角、およびプレティルト角の各パラメータを二次元分布として測定し表示するストークスパラメータ法について述べた。この液晶パネルの評価法はすでに実用化され、透過型液晶セル検査装置 LCD アナライザ LCA-LU4<sup>15)</sup>として市販されている。なお、本手法は液晶材料に限らず、光学異方性を有する有機薄膜などに対しても適用することが可能であると思われる。

#### 文献

- 1) A. Lien and H. Takano: "Cell gap measurement of filled twisted nematic liquid crystal displays by a phase compensation method," J. Appl. Phys., **69** (1991) 1304-1309.
- 2) Y. Iimura, N. Kobayashi and S. Kobayashi: "A new method

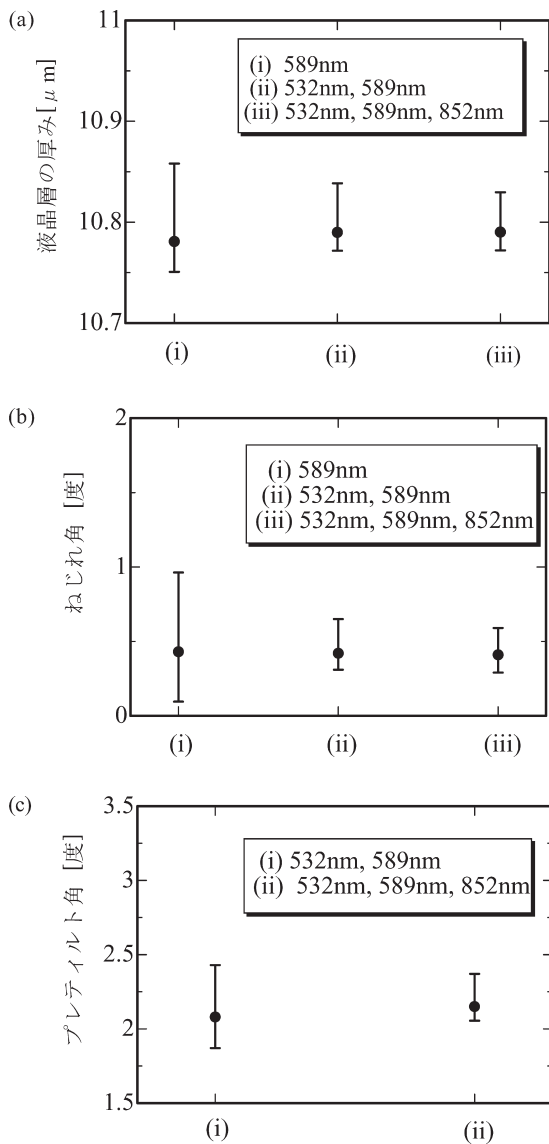


図6 透過型液晶セルにおけるセルパラメータの測定波長による測定誤差<sup>11)</sup>. (a) 液晶層の厚み, (b) 分子配向のねじれ角, (c) プレティルト.

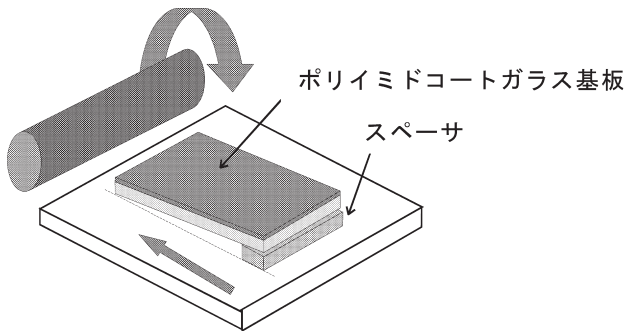


図7 ラビング法の模式図<sup>11)</sup>.

for measuring the azimuthal anchoring energy of a nematic liquid crystal,” Jpn. J. Appl. Phys., **33** (1994) L434-L436.

- 3) T. Akahane, H. Kaneko and M. Kimura: “Novel method of measuring surface torsional anchoring strength of nematic

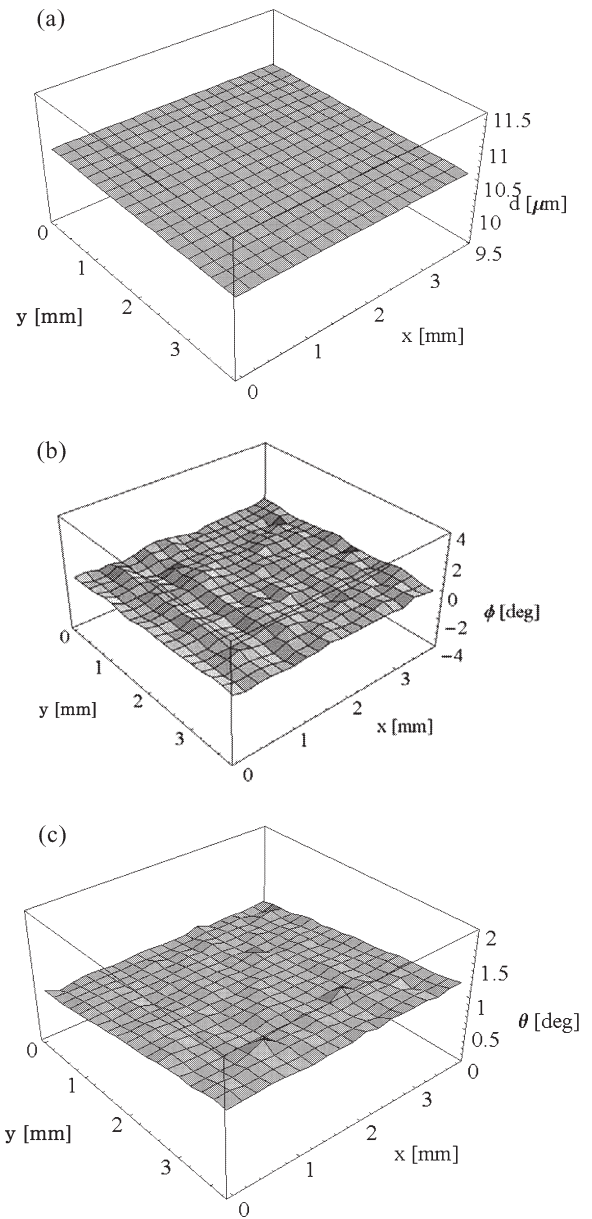


図8 透過型液晶パネルにおけるセルパラメータの二次元分布特性<sup>11)</sup>. (a) セル厚の二次元分布特性, (b) ねじれ角の二次元分布特性, (c) プレティルト角の二次元分布特性.

liquid crystals,” Jpn. J. Appl. Phys., **35** (1996) 4434-4437.

- 4) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 5th ed. (Pergamon Press, New York, 1975) pp. 30-32.
- 5) Y. Zhou, Z. He and S. Sato: “A novel method for determining the cell thickness and twisted angle of a twisted nematic cell by Stokes parameter measurement,” Jpn. J. Appl. Phys., **36** (1997) 2760-2764.
- 6) Z. He, Y. Zhou and S. Sato: “A two-dimensional Stokes parameter method for determination of cell thickness and twist angle distributions in twisted nematic liquid crystal devices,” Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) 1982-1988.
- 7) Y. Zhou, Z. He and S. Sato: “An improved Stokes parameter method for determination of the cell thickness and twisted angle of twisted nematic liquid crystal cells,” Jpn. J. Appl. Phys., **37** (1998) 2567-2571.

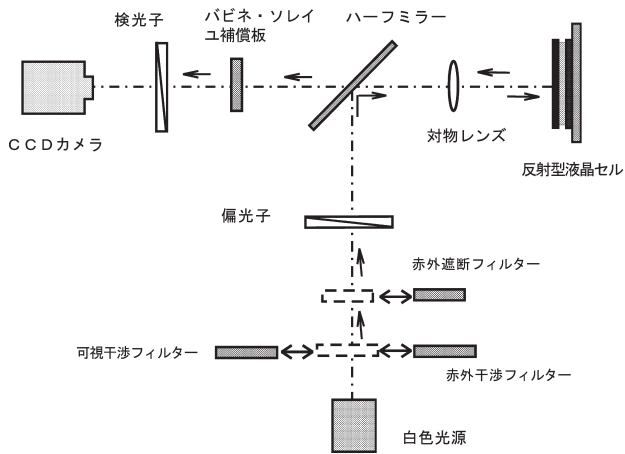


図9 反射型液晶パネルにおけるセルパラメーター測定の様式図。

- 8) M. Okabe, M. Kaneko, T. Maehara, Y. Togashi and S. Sato: "Evaluation of cell parameters of TN liquid crystal cell parameters by using a Stokes parameter method," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **367** (2001) 771-778.
- 9) M. Kawamura, A. Okamoto and S. Sato: "Measurements of cell parameters in reflective liquid crystal cells by using a Stokes parameter method," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **367** (2001) 763-770.
- 10) M. Kawamura and S. Sato: "Measurements of cell thickness distributions in reflective liquid crystal cells using a two-dimensional Stokes parameter method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L621-L624.
- 11) M. Kawamura, Y. Goto and S. Sato: "A two-dimensional pretilt angle distribution measurement of twisted nematic liquid crystal cells by using Stokes parameters at plural wavelengths," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 709-714.
- 12) M. Kawamura, Y. Goto and S. Sato: "Two-dimensional measurements of cell parameter distributions in reflective liquid crystal displays by using multiple wavelengths Stokes parameters," *J. Appl. Phys.*, **95** (2004) 4371-4375.
- 13) M. Kawamura, Y. Goto and S. Sato: "Determination of anchoring energy in nematic liquid crystal cells with controllable twist angles using a Stokes parameter method," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43** (2004) 6239-6242.
- 14) W. K. Choi: "Reflective liquid-crystal cell-gap measurement using input-polarization-angle dependence," *Int. Disp. Technol. Dig.*, **43** (2002) 530-533.
- 15) 前原利昭, 佐藤 進: "透過型液晶セル検査装置—LCDアナライザ LCA-LU4", 月刊ディスプレイ, **7** (2001) 12-19.

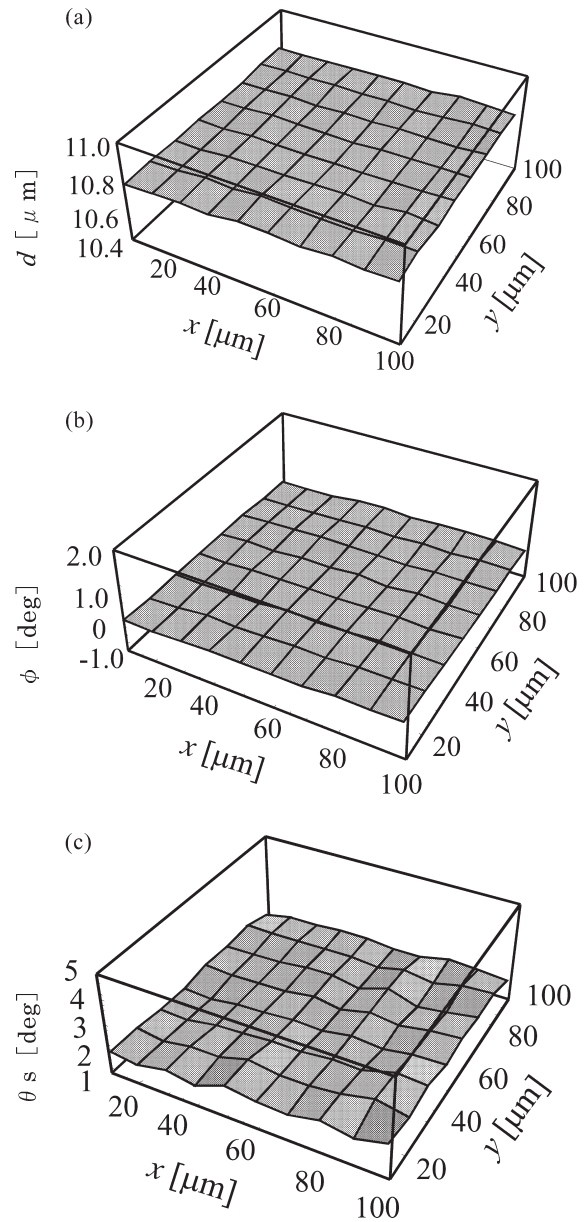


図10 反射型液晶セルにおけるセルパラメーターの二次元分布特性<sup>12)</sup>. (a) 液晶層厚分布, (b) ねじれ角の分布, (c) プレティルト角の分布。

(2004年12月9日受理)