

# Accounts of Materials & Surface Research

## Investigation of Interface between Liquid Crystal and Alignment Layer in LCD

Yukio Hirano

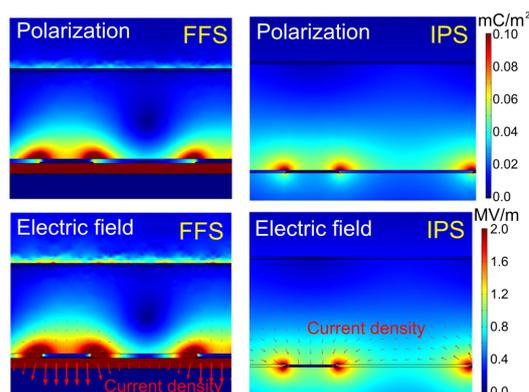
JNC Petrochemical Corporation Ichihara Research Center.  
5-1, Goi-Kaigan, Ichihara, Chiba, 290-8551, Japan  
y.hirano@jnc-corp.co.jp

Recently, owing to technological advancements, liquid crystal displays (LCDs) have improved significantly in terms of their display quality. Despite these technological advancements, display failures are still a problem for LCDs. Display failures are difficult to predict from drive circuit design, manufacturing processes, or material properties alone, and an understanding of the generation mechanism is considered to be a critical issue to the improvement of LCD visual quality. In addition, display failures and LCD design are dominated by the interface region between the liquid crystals and alignment films.

There are various kinds of display failures and flicker phenomena are one of them. Research on flicker phenomena is essential for improving LCD quality. Because we are the only supplier of both liquid crystals and alignment films, we have investigated the region continuously. However, it is very difficult to predict the phenomena that dominate at the interface, for example, owing to the difficulty in directly measuring the electrical state and LC alignment state at the interface.

Recently, Fringe-field switching (FFS) LCDs have developed excellent properties such as a wide viewing angle, high transmittance, high definition, and a low voltage drive. However, FFS-LCDs have a problem wherein the display quality deteriorates easily and the flicker phenomenon is also a serious issue. Even though the asymmetrical electrode structure and electrical state in an FFS-LCD are considered to be its causes, this problem is not completely understood.

Finite-element-method (FEM) simulation studies show that the interface region between liquid crystals and alignment films that constitute the LCD have an influence on flicker phenomena. To further understand the generation mechanism of display failures, a physical approach, especially one using nonequilibrium statistical physics, can be valuable for liquid crystal materials. In this paper, we introduce some aspects of the correlation between the state of the interface region and display failures, and the alignment material, which has a self-organization mechanism.



**Keyword:** Fringe-field switching (FFS), flicker, image sticking, COMSOL Multiphysics, nonequilibrium

Yukio Hirano is a chief researcher of Ichihara Research Center at JNC Petrochemical Corporation. The company name changed from the Chisso Petrochemical Corporation to JNC Petrochemical Corporation in 2011. He received his Ph. D. degree from Toho University in 2000. His special field is theory of condensed matter physics. His research interest is nonequilibrium statistical physics and interface between alignment layer and liquid crystal in LCD, CAE simulation, evaluation technique for LCD.



# LCD における液晶・配向膜界面の研究

平野幸夫

JNC 石油化学株式会社 市原研究所 研究第2センター

## 1. はじめに

現代の私たちの生活に、液晶ディスプレイは、欠かせないデバイスとなっている。スマートフォン、パソコン用モニター、テレビ等、液晶ディスプレイを目にしない日は無いだろう<sup>1,2)</sup>。近年、有機 EL ディスプレイの実用化が達成されたが、日々目にする多くのディスプレイは、未だ液晶ディスプレイである。

液晶ディスプレイは、電気光学応答を担う液晶材料を始め、液晶材料と直接触れる配向膜、カラー表示を可能にする RGB のカラーフィルター、駆動を担う TFT 素子、透明電極 (ITO)、TFT 素子などの構造部材を平坦化させるオーバーコート、ガラス、偏光板など様々な材料で構成されている (Figure 1.)。特に液晶材料と直接触れる配向膜は、液晶ディスプレイの表示モードを決定付け、材料間の界面の特性によって品質が左右され、まさに液晶ディスプレイの鍵を界面が決定付けていると言っても過言ではない<sup>1)</sup>。

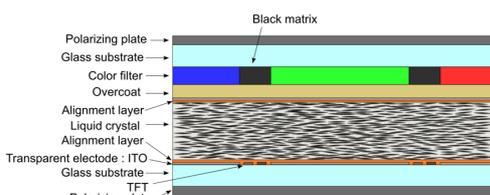


Figure 1. Cross section structure of LCD.

液晶材料がディスプレイとしての機能を発現するためには、駆動電圧によってバックライトからの透過光の強さを変調させる電気光学応答を行う必要がある。この電気光学応答による透過光の明／暗の幅を最大限利用するために、駆動電圧 OFF 時の液晶分子長軸方向と、駆動電圧 ON 時に発生する電場分布を考慮し、電極の配置を設計する。

駆動電圧 OFF 時、液晶分子の長軸方向の配

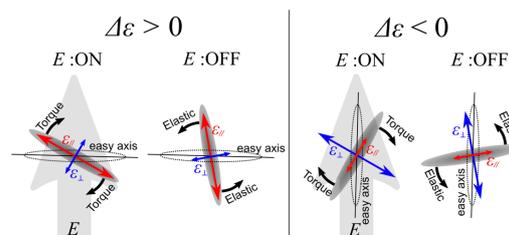
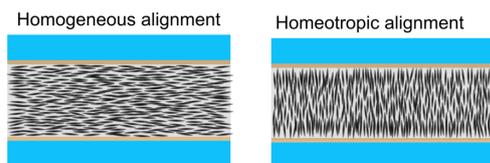


Figure 2. Response of the liquid crystal molecules due to an electric field.

向角は、容易軸 (easy axis) と呼ばれ、一般的に基板全体に液晶分子が均一に並ぶ様に配向処理される。一方、駆動電圧 ON 時、液晶材料が電場によって駆動させる為には、分子長軸の誘電率  $\epsilon_{//}$  と分子長軸に垂直な分子短軸の誘電率  $\epsilon_{\perp}$  との差である誘電率異方性  $\Delta\epsilon (= \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp})$  が必要不可欠で、 $\Delta\epsilon > 0$  の液晶材料はポジ型液晶、 $\Delta\epsilon < 0$  はネガ型液晶と呼ばれる (Figure 2.)。

$\Delta\epsilon > 0$  のポジ型液晶の場合、分子長軸が電場ベクトルに平行になろうとする駆動力を得る。 $\Delta\epsilon < 0$  のネガ型液晶の場合、反対に分子長軸は電場ベクトルに垂直 (短軸が平行) になろうとする駆動力を得る。一方、駆動電圧 OFF にすると液晶材料の持つ弾性力で元の容易軸に戻ろうとする。これら駆動電圧 ON/OFF に対する液晶分子のスイッチングと、液晶分子の屈折率異方性  $\Delta n$ <sup>3)</sup> を利用し、電気光学応答を得る。

液晶ディスプレイの表示モードは、大きく分けると液晶分子の長軸方向が基板面に沿って水平配向したホモジニアス (Homogeneous) 配向と、基板面に垂直に配向したホメオトロピック (Homeotropic) 配向とに別けられ、配向膜表面の分子形状<sup>4)</sup> や表面エネルギー<sup>5)</sup> の異方性によって決定される (Figure 3.)。容易軸の方向は、表面エネルギーの異方性である異方性分散力が支配的な事が示されている。<sup>6-8)</sup>



**Figure 3.** Homogeneous alignment and homeotropic alignment.

ホモジニアス配向の表示モード<sup>9)</sup>である In-Plane Switching (IPS)<sup>10)</sup>モードや Fringe Field Switching (FFS)<sup>11,12)</sup>モードでは、ポジ型液晶ネガ型液晶の両タイプの液晶材料を適用する事が可能であり、Twisted Nematic (TN)モード<sup>13)</sup>ではポジ型液晶が適用され、電極間に発生する電場分布と光学特性を考慮し設計される。初期配向である容易軸は、ポジ型液晶の場合、電場ベクトル方向に分子長軸が概ね垂直になる様に、またネガ型液晶の場合は、分子長軸が電場ベクトルに平行になる様に配向処理される。これらホモジニアス配向の配向処理は、ガラス基板上に製膜された配向膜表面を金属ローラーに巻き付けた布を一方向に回転させ擦る(ラビング)<sup>14,15)</sup>事によって、異方的な相互作用を誘起させるラビング法が広く普及し<sup>16)</sup>、工業的に完成され、長年適用されてきた。ラビング法は、擦る方向に配向膜表面の分子を延伸させ、液晶分子は基板面にチルト角を有し配向する軸が決定される<sup>17-22)</sup>。しかし、ラビング法は、配向膜表面を直接擦る為、ラビング布からの粉塵の発生や、静電気の発生による TFT 素子の破損等の課題があった。近年、これら課題を克服する為に、非接触による配向処理方法として、製膜された配向膜に偏光紫外光を照射させ、配向膜表面にエネルギー的な異方性を誘起させる光配向法<sup>23-26)</sup>が検討され、実用化に至り、現在適用が進んでいる。

一方、ホメオトロピック配向の表示モードでは、配向膜表面の表面エネルギーを低くする事で、液晶分子の長軸が立ち上がる現象が利用され、電極の配置によって液晶が駆動する方向が制御される。例えば、Vertical Alignment (VA) モー

ドでは、対向する上下基板に透明電極が設けられ、電場ベクトルが基板面に垂直になる場合、ネガ型の液晶材料が用いられ、電圧 OFF 時の初期配向が基板面に垂直な状態から、電圧 ON 時に、基板面に対して液晶分子が水平になる事による電気光学応答が利用される。

配向膜材料は、耐薬品性や耐熱性などの観点から、一般的なディスプレイ用途としては、ラビング法、光配向法に関わらずポリイミドが用いられている。ポリイミド材料は、可溶性ポリイミドまたは前駆体であるポリアミック酸を溶剤に溶かした状態で、TFT 素子、カラーフィルター、オーバーコートが設けられた基板に印刷法またはインクジェット法で塗布され、最終的に約210℃~230℃、30~60分程度焼成処理され、製膜化される、この時、ポリアミック酸タイプの材料はイミド化が進行する。製膜された後に配向処理がなされ、上下基板を合わせてモジュール化される。

従来の液晶の充填は、モジュール化された後、真空注入法でなされてきたが、大きくなればなるほど時間を要する為、モジュール化する前に、片方の基板に無数の液晶注入ノズルから、液晶を滴下(滴下注入法)し、反対側の基板を合わせモジュール化する。この滴下法による液晶充填法が工業的に確立したことで、TV の様な大型の液晶ディスプレイが効率的に製造可能になり普及が進んだ。

## 2. 液晶ディスプレイにおける課題

液晶ディスプレイ用材料開発は、表示不良を発生させない事が最も重要と言ってよい。

表示不良は、ディスプレイの製造に関わる業界では、残像(image sticking)と呼ばれる事が多く、製造した直後に発生する表示不良から、数時間~数百時間後に顕在化するような長時間に及ぶ表示不良もあり、様々な因果関係が絡み合った現象と考えられる。

表示不良は液晶材料や配向膜材料が持つ物性や、接する界面の物性が影響を及ぼしあって顕在化される課題である(Figure 4.)。特に現

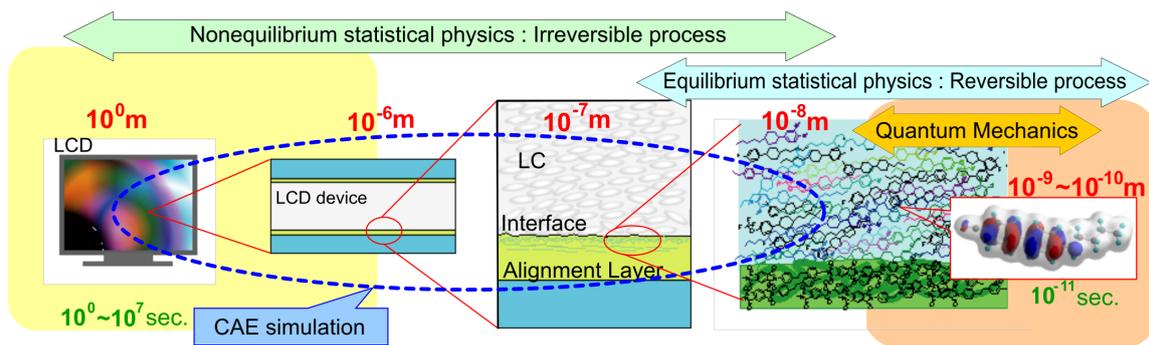


Figure 4. Relationship of applicability of field of physics to space scales and time scales in LCD.

象を理解する事も難しく、克服する事が難しい表示不良は、長時間後に顕在化する表示不良である。

液晶材料や配向膜材料の分子構造の設計イメージは、概ね $\sim 10^{-9} \sim 10^{-10} \text{m}$ 、また時間的なスケールは $\sim 10^{-11}$ 秒、接する界面の現象的な空間のスケールは $\sim 10^{-8} \text{m}$ 、と微視的であるのに対し、表示不良で課題とする空間的なスケールは、実際のディスプレイを目視で確認するに至るので $\sim 10^0 \text{m}$ 、時間スケールは $\sim 10^0 \sim 10^7$ 秒であり、空間的および時間的なスケールに大きな隔りがある。この大きな隔は、表示不良となる現象が、階層的に複数の科学分野にまたがっている事を推察させ、表示不良の全体像を俯瞰し解明する事を困難させている。そのことが結果として、材料開発や製造現場では、対処法的な対応を余儀無くさせている。

### 3. FFS モード

近年、スマートフォンの普及にともない、液晶ディスプレイの表示品位の向上がより一層求められ、普及が進んでいるのが FFS モードである。

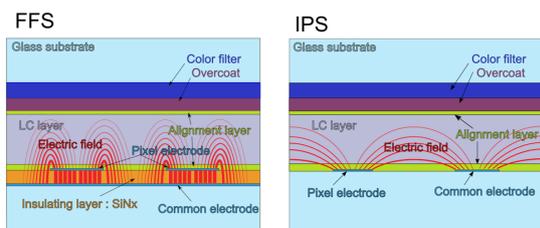


Figure 5. Cross section structure of FFS-LCD and IPS-LCD.

FFS モードは、IPS モードと同様のホモジニアス配向の表示モードで(Figure 5.)、TN モードやホメオトロピック配向の表示モードである VA モードに比べ、バックライトの利用効率が高く、視野角特性に優れ、類似のホモジニアス配向の表示モードである IPS モードよりも電極エッジ近傍で電場が強くなることにより、低電圧駆動が可能なことなどからも適用が広がっている。

Figure 5.で示すように、FFS モードと IPS モードの構造的な違いは、画素 (Pixel) 電極とコモン (Common) 電極の間の絶縁層 (SiNx 層)の有無で、IPS モードでは、画素電極とコモン電極が交互に櫛歯電極を形成しているのに対し、FFS モードでは絶縁膜を挟んで、上側が櫛 (又はスリット) 状の画素電極、下側にコモン電極が設けられている。

優れた表示品位で適用が進む FFS モードだが、他の表示モードに比べ構造は複雑で、製造負荷は大きい。また電極エッジ近傍の強い電場が原因と思われる不具合が顕在化し易く、ディスプレイ製造の現場、液晶材料および配向膜材料の材料開発で困難さが伴っている。

電極エッジ近傍や液晶材料と配向膜材料の界面領域で、電場強度が強くなり、表示不良が引き起こされると考えられているが、科学的な解明が成されないまま、対処法的な対応により普及が進められているのが実情と言える。

FFS モード用の材料開発や製造現場では、表示不良への対処として、液晶材料や配向膜材料の電気抵抗性や誘電率など、電気的な要因と考えられる表示不良と、液晶材料と配向膜の相互作用に由来すると考えられる配向性が

要因の表示不良とに分け議論される事が多い。しかし、液晶材料と配向膜材料の界面では電場によるストレスが強く、その為の高い配向安定性が求められると考え、この両課題の要因について完全に切り分ける事は、困難とも言える。

#### 4. フリッカー

液晶ディスプレイの電氣的な要因で発生する表示不良の代表的な現象に、フリッカー現象 (Figure 6.)があり、FFS モードでは特に深刻である。この現象は、駆動電圧の周期に依存した透過光のチラツキ現象であり、フリッカー現象が顕在化すると、表示された画面は非常に見辛くなる。

フリッカー現象は、FFS モードが普及する以前から課題であったが、FFS モードでは、他の表示モードに比べて顕在化し易く、液晶材料や配向膜材料の開発において、常に大きな課題となっている。

このフリッカー現象は、液晶が電場によって駆動させられた時に生じる液晶配向の歪によるフレクソエレクトリック効果<sup>27-31)</sup>や、液晶材料と配向膜材料の界面に発生する電気二重層の電位差や残留電荷もその一因<sup>32-34)</sup>と考えられる。

電極間に生じる電位ポテンシャルについて考察すると (Figure 7.)、TN モードや IPS モードの様な電極が液晶層に対して対称的に配置されたモードでは、画素電極とコモン電極の入れ替

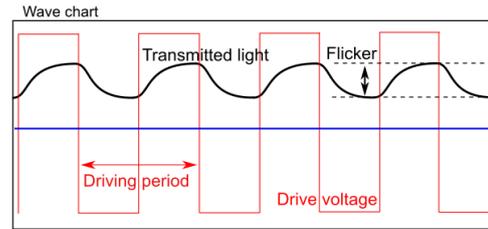


Figure 6. Flicker wave chart. Fluctuation of the transmitted light depending on the wave period of drive voltage.

えや、電極に与える電場の極性を入れ替えても、構造的に対称的であり、電氣的な非対称性は生じない。これは、駆動用の印加電圧の極性が反転したとしても、交流電圧による駆動において残留電荷は発生し辛い。一方、FFS モードでは、上述した対称性が構造的に崩れ、電荷密度、残留電荷、電流密度、分極密度等に偏りを生じさせ、この偏りがフリッカーの一因になる事が想定される。

液晶材料と配向膜材料の界面で生じる電気二重層を最小限に抑える為、電気抵抗性の調整や、界面を形成する材料の電位ポテンシャルを可能な限り揃えることなどが有効な手段となる。

#### 5. FFSモードのCAEシミュレーション<sup>34-36)</sup>

表示不良の因果関係を解明するには、シミュレーション法が有効な検討手段となる。

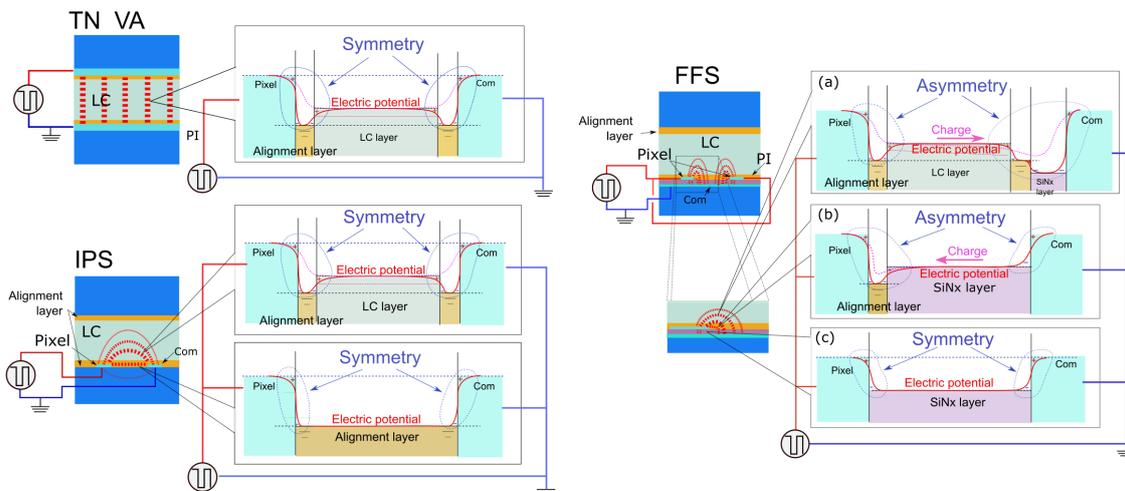


Figure 7. Diagram of the electric potential. The electric potential of TN, VA, and IPS mode is symmetry, but FFS mode is asymmetry.

検討する表示不良は、Figure 4.で示すように  $10^0$ 秒以上であり、分子軌道計算や分子動力学計算で扱える時間スケールと隔たりがあることから、CAE(Computer Aided Engineering)シミュレーションは有効である。COMSOL Multiphysics®によって液晶ディスプレイ内で発生す電場強度、電流密度、分極密度などの電氣的な物性について検討を行った。

Figure 8.は、FFS モードと IPS モードの分極密度、電場強度、電流密度のシミュレーション結果を示す。液晶層内の電極エッジの近傍で、電場強度が強く、分極密度も高くなっている事が分かる。FFS モードでは、画素電極エッジ近傍の電場強度が顕著に強く、分極密度も高くなることが分かる。更に、FFS モードでは、画素電極とコモン電極に挟まれた領域に非常に強い電場と高い分極密度が発生し、矢印は電流密度を表し過密になる。分極密度が高い領域では、駆動電圧の極性が時間反転するときに過渡電流を発生し、チラツキ(フリッカー)の原因になると考えられる。電場強度や高い分極密度、電流密度が液晶材料や配向膜材料にストレスを与えることから、高い配向安定性が要求される事も推察される。

さらに、FFS モードでは、上側基板の界面にも電場および分極の発生が確認でき、上下基板の構造的な非対称性が、電極が無い上側基板にも影響し、電氣的な歪を生じさせ、フリッカーの一因になることが推察される。この偏りを改善するには、コモン電極と同電位の層を上側の配向層の下(液晶層の反対側)に設ける事が考えられる。

Figure 9.は、FFS モードにおいて、配向膜層の比抵抗  $R = 10^{13} [\Omega \cdot \text{cm}]$ と  $R = 10^{14} [\Omega \cdot \text{cm}]$ における分極分布の計算結果を示す。配向層の電気抵抗性によって分極分布が大きく異なり、 $R = 10^{13} [\Omega \cdot \text{cm}]$ では、分極密度が低く、フリッカー現象のリスクが低い事が推察される。

## 6. 配向性

配向膜の機能である配向特性に関して、次の3つに整理する(Figure 10.)。

### ① 配向の均一性

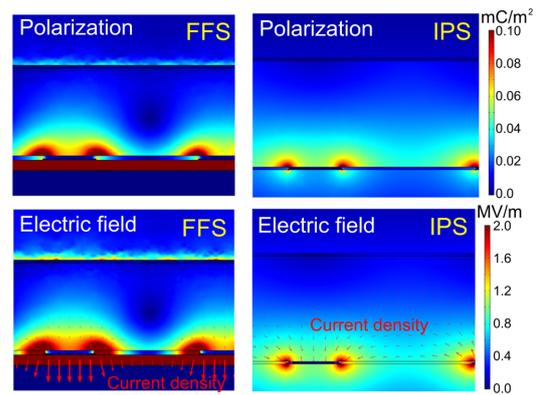


Figure 8. Polarization, electric field and current density in FFS-LCD and IPS-LCD.

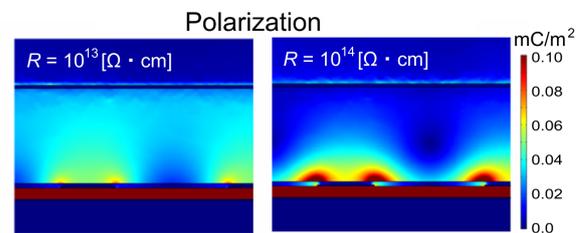


Figure 9. Polarization distribution due to the resistance of the alignment layer in FFS-LCD.

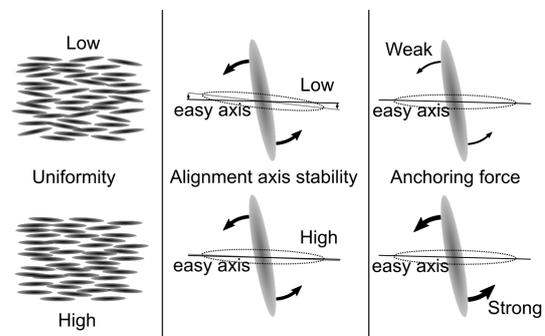


Figure 10. Index of alignment ability, uniformity, alignment axis stability and anchoring force.

液晶ディスプレイの明/暗のコントラストに影響する。ナノ、マイクロ、マクロ、どの階層スケールで均一に並んでいるかにより、得られる配向分布も異なり、配向膜材料の開発および配向処理法など改善のアプローチも異なる(Figure 11.)。一般的に、光配向法による配向処理は、ラビング法よりも均一性が高く、コントラストも高い。ラビ

ング法はラビング布で配向膜表面を機械的に擦る処理であり、分子スケールにおける均一性は光配向法の方が高い。

② 容易軸の安定性

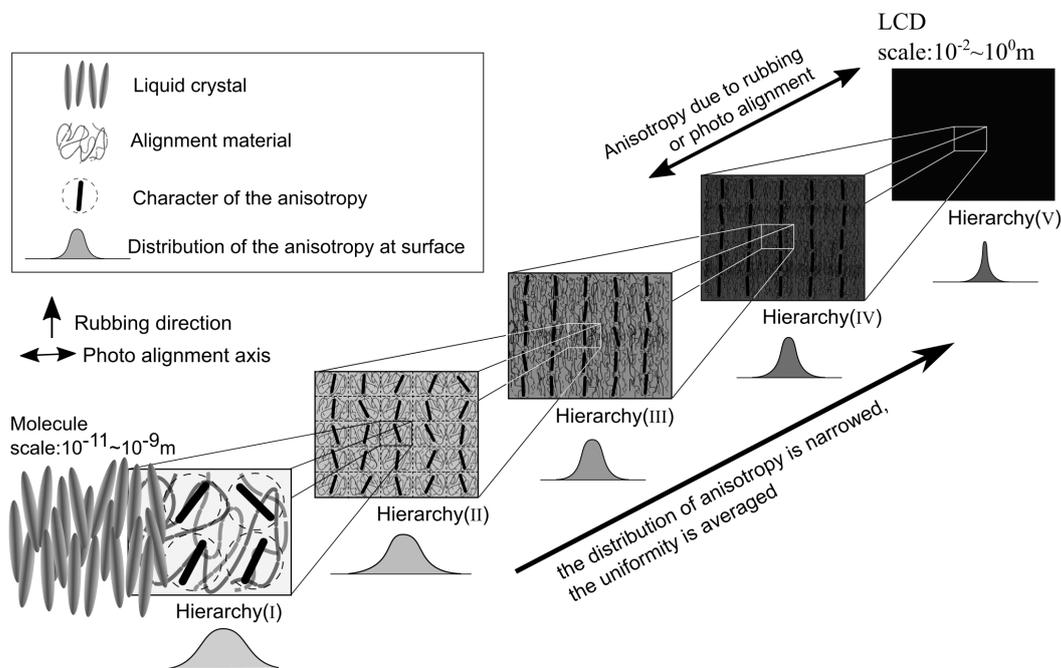
液晶を駆動電圧ONの交流電場によって長時間駆動させたとき、容易軸は液晶から力学(弾性的)ストレスと電場ストレスを受ける。これらストレスによって容易軸が塑性変形を起こすと、その変位量によって透過光は変動する。また駆動電圧を OFF 状態にし、液晶が元に戻った時、塑性変形を受けた容易軸からずれた配向軸までしか戻れない為、変位の大きさによって透過光が変動することになり、これは配向安定性に

かかわる表示不良となる。

③ 液晶分子を配向軸に固定する力(アンカリング力)

液晶分子が配向軸にどのくらい固定されているかの指標となる。電圧 OFF において、液晶が配向軸に戻ろうとする応答性への寄与の殆どは、液晶の弾性力であるが、僅かにアンカリング力にも依存し、アンカリング力が強い方が、速やかに配向軸に戻る。容易軸が十分安定であれば、液晶が戻る配向軸と容易軸は概ね一致するので、同義で扱われる事が多い。

7. 自己組織化能を有する配向膜



**Figure 11.** Anisotropy hierarchy scheme. The microscopic limit corresponds to the scale of the LC molecules ( $10^{-11}\sim 10^{-9}\text{m}$ ), whereas the macroscopic limit corresponds to the display area of the LCD ( $10^{-2}\sim 10^0\text{m}$ ).The uniformity of the surface deformation anisotropy obtained in the rubbing or photo alignment process is not necessarily high, considering the scale of the LC or polymer molecules; as the hierarchy of the alignment scheme expands to a wider range, the uniformity is consequently improved ((I) $\rightarrow$ (II) $\rightarrow$ (III) $\rightarrow$ (IV) $\rightarrow$ (V)). When the order parameter of the alignment is compared with respect to the surface deformation anisotropy between the bulk of the LC and the alignment film, it is lower in the surface deformation anisotropy of the alignment film; the order parameter of the alignment of the LCs in the vicinity of the interface of the LC and alignment film is reduced by this influence.

これまでの配向膜材料の材料開発において、容易軸安定性(指標②)と配向力(指標③)に優れた配向膜材料では、これら2つの指標は相関し、ラビング処理または光配向処理等の処理法によらず、配向膜の基板の面内異方性が時間経過とともに自発的に増強される事を見出した。例えば、面内異方性が大きくなると、配向膜の光学的異方性<sup>37)</sup>が上昇する。

この分子配向の自己組織化的な現象は、自発的に進行する場合もあれば、熱エージングによって進行が促進される場合もあることから、熱力学的過程として解釈でき、配向膜材料であるポリイミドの分子構造に依存する。例えば、結晶性や液晶性を有する材料を元にした、ポリイミド材料やポリアミック酸材料を含有する配向膜材料では、この自己組織化的な現象が発現し易い。

ラビング法による配向処理で得られる配向膜表面の分子軸の均一性は、先に述べた様に、ラビング法が物理的処理であることを考えると、その均一性は、分子スケールでは必ずしも高いとは言えない。一方で、液晶材料は、分子同士の凝集性により、ネマチック液晶では、1軸の配向秩序(1次の配向オーダー)を持つ、このことから分子スケールの均一性は、配向膜よりも高い。

界面において、液晶分子と配向膜の分子間力の影響が強く反映された場合、界面近傍の液晶分子は、配向膜の最表面の影響を強く受け、液晶バルク層よりも配向均一性を下げる事になる。その結果、ディスプレイの明/暗のコントラストを下げる事になる。このことから、明/暗のコントラストの改善を目指した場合、配向膜最表面の配向均一性を向上させる事が求められる。上述した、自己組織化能を有する配向膜では、配向膜材料であるポリイミド高分子の分子鎖が分子スケールで揃う方向に熱緩和することから、界面近傍の液晶分子の配向性も高くなることが期待される。

## 8. 液晶材料と表示不良

一般的な液晶ディスプレイに用いられる液晶材料は、ネマチック相状態を維持し、電気光学応答など、必要な物性を発現させる為に、10~

15種類程度の棒状分子の種類や組成比が調整される。

電気応答性に関わる誘電率異方性 $\Delta\epsilon$ 、応答時間に関わる粘弾性 $\gamma$ 、光学性に関わる屈折率異方性 $\Delta n$ 、TFT駆動の特性を左右する電気抵抗性と誘電率などがあり、可能な限りディスプレイの動作温度が広がる様に、材料調整を行う。

電気光学応答を早め描画表示を早める為には、 $\Delta\epsilon$ の絶対値を出来るだけ大きく、かつ、粘性を下げる事が求められる。液晶材料を構成する棒状分子の整列度合いを表わす指標としてオーダーパラメータがあるが、配向のオーダーパラメータを高くすると $\Delta\epsilon$ や $\Delta n$ が高くなるが、ネマチック相の低温での閾値温度(スメクチック-ネマチック転移温度)が高く(ネマチック相の温度範囲が狭く)なってしまうので、液晶ディスプレイの使用用途に合わせ設計を行う。

液晶材料の相状態および粘弾性は、無極性分子による誘起双極子による分子間力(ロンドン力)と理解でき、一方で、永久双極子を持った極性分子によって $\Delta\epsilon$ が発現させる。例えば、高速な応答用途として設計された液晶材料は、無極性液晶分子で分子間力を下げ、粘弾性を下げつつ、極性液晶分子の比率を高くし $\Delta\epsilon$ を発現させる様に組成設計を行う事になる。

さらに表示不良について考察<sup>38)</sup>すると、液晶分子の極性の有無は、お互いに異種分子である為、分子間力が異なる。また無極性液晶同士、極性液晶同士の分子間力とも異なる。液晶相状態において、分子が熱的に揺らいだ状態では、この分子間力は分子の凝集性に影響を及ぼす。

液晶材料と配向膜材料が相互作用する界面では、分子間力の影響による凝集性の差異が顕在化し易いと考えられる。無極性液晶-ポリイミド分子間よりも、極性液晶-ポリイミド分子間の方が、(引力又は斥力)相互作用が大きくなると考えられ<sup>39-43)</sup>、液晶分子から見ると、液晶層(バルク)内と配向膜界面とで、受ける相互作用が異なり凝集性に影響する。

ネマチック相の液晶は、分子自身は位置が固定されない熱的に揺らいだ状態でありながら、

ある程度の束縛状態にある。配向膜界面の束縛力の影響を統計物理学的に考察すると、熱的に揺る異種混合分子状態に対し、配向膜による界面は外力となる、つまり陽動力として作用する<sup>44,45)</sup>。

液晶分子の揺らぎの自由度は、分子自身の並進運動の自由度として、並進のブラウン運動、回転運動の自由度として、回転のブラウン運動となる。界面はそれぞれのブラウン運動に陽動力として作用し、液晶分子組成の統計的対称性を崩し、混合状態に変化をもたらす。界面およびバルクの液晶組成の混合状態の変化は、界面近傍の液晶の屈折率異方性  $\Delta n$  や誘電率異方性  $\Delta \epsilon$  を変位させ、界面の電気二重層も変位する事にある。電気二重層の変位は、電位ポテンシャルの変位させることから、液晶層に作用する電位が変化することになる。これら変化が一因となり、フリッカー現象が顕在化に至ると解釈できる。

## 9. おわりに

工業製品として既に完成の域にあると考えられる液晶ディスプレイ技術ではあるが、液晶材料および配向膜材料の材料開発は、これら材料が接する界面の特性がその良し悪しを決定する領域であり、科学的に解明し尽くされたとは言えない分野である、まさに残されたフロンティアとも言うべきフィールドである。

界面に関わる表示不良を俯瞰し理解するためには、分子のスケールの微視的領域からディスプレイのマクロな領域に至る現象を考察し理解を深める事も不可欠である。

統計物理学の立場では、微視的な領域の現象は平衡系統計物理学的な解釈で理解可能であるが、数時間～数百時間、さらには数千時間に及ぶ現象の理解にいたっては、非平衡系統計物理学的な解釈が必要と思う。

統計物理学のフィールドとして、液晶ディスプレイを眺めてみると、平衡系統計物理学から非平衡系統計物理学に至る現象を目視で確認する事が可能という意味で、非常に面白い対象と思う。

## 参考文献

- 1) Shoichi Ishihara, *Journal of Display Technology*, **2005 Sep;1(1)**, 30-40
- 2) Shoichi Ishihara, Shunsuke Kobayashi and Yasuhiro Ukai, *High Quality Liquid Crystal Displays and Smart Devices*, **2019**, IET *Materials, Circuits and Devices Series 68*
- 3) C. Mauguin, *Bull. Soc. Fr. Min.*, **1911**, 34, 71.
- 4) D. W. Berreman, *Phys. Rev. Lett.*, **1972**, 28, 1683-1686.
- 5) L. T. Creagh and A. R. Kmetz, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **1973**, 24, 59-68.
- 6) K. Okano, N. Matsuura, and S. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1982**, 21, L109-L110.
- 7) S. Ishihara, H. Wakemoto, K. Nakazima, and Y. Matsuo, *Liq. Cryst.*, **1989**, 4, 669-675.
- 8) T. Uchida, E. S. Lee, and T. Miyashita, *Tech. Rep. IEICE (EID94-86)*, **1994**, 94.
- 9) H. Aoyama, Y. Yamazaki, N. Matsuura, H. Mada, and S. Kobayashi, *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Lett.*, **1981**, 72, 127-132.
- 10) M. Oh-E and K. Kondo, *Appl. Phys. Lett.*, **1995**, 67, 3895-3897.
- 11) S. H. Lee, S. L. Lee, and H. Y. Kim, *Appl. Phys. Lett.*, **1998**, 73, 2881-2883.
- 12) Seung Hee Lee, *液晶*. **2009**, 第13巻第1号, 49-55.
- 13) M. Schadt and W. Helfrich, *Appl. Phys. Lett.*, **1971**, 18, 127-128.
- 14) J. S. Patel, T. M. Leslie, and J. W. Goodby, *Ferroelectrics*, **1984**, 59, 137-144,
- 15) J. M. Geary, J. W. Goodby, A. R. Kmetz, and J. S. Patel, *J. Appl. Phys.*, **1987**, 62, 4100-4108.
- 16) Y. Takahashi, *Month. Semiconductor World*, **1996**, no. 1, 140-144.
- 17) H. Fukuro and S. Kobayashi, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **1988** 163, 157-162.
- 18) J. C. Dubois, M. Gazardand, and A. Zann, *J. Appl. Phys.*, **1976**, 47, 1270-1274.
- 19) T. Miyamoto, S. Kawamura, M. Nishikawa, Y. Tsuda, R. Natsui, and Y. Ohta, *Proc. 19th*

- Jpn. Liq. Cryst. Conf.*, **1993**, *19*, 106–107.
- 20) M. Nishikawa, K. Sano, T. Miyamoto, Y. Yokoyama, N. Bessho, D.-S. Seo, Y. Iimura, and S. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1994**, *33*, 4152–4153.
- 21) K. Sakamoto, R. Arafune, N. Ito, S. Ushioda, Y. Suzuki, and S. Morokawa, *J. Appl. Phys.*, **1996**, *80*, 431–439.
- 22) D.-S. Seo, K. Araya, N. Yoshida, M. Nishikawa, Y. Yabe, and S. Kobayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1995**, *34*, L503.
- 23) W. M. Gibbons, P. J. Shannon, S.-T. Sun, and B. J. Swetlin, *Nature*, **1991**, *351*, 49–50.
- 24) M. Schadt, K. Schmitt, V. Kozinkov, and V. Chigrinov, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1992**, *31*, 2155–2164.
- 25) M. Hasegawa and Y. Taira, *J. Photopolymer. Sci. Technol.*, **1995**, *8*, 241–248.
- 26) S.-T. Sun, W. M. Gibbons, and P. J. Shannon, *Liq. Cryst.*, **1992**, *12*, 869–874.
- 27) Meyer, R. B., *Phys. Rev. Lett.*, **1969**, *22*, 918–921.
- 28) 尾崎雅則、吉野勝美, *液晶*. **2002**, *第6巻 第1号*, 22–33.
- 29) Jeong, I. H., Jang, I. W., Kim, D. H., Han, J.S., Kumar, B. V., & Lee, S. H., *SID Int. Symp. Dig. Tech. Pap*, **2013**, *44*, 1368–1371.
- 30) Hong-Yu, X., Wen-Jiang, Y., Zhi-Dong, Z., & Li, X., *Commun. Theor. Phys.*, **2011**, *56*, 939.
- 31) Seung-Won Oh, Jong-Min Baek, Jung-Wook Kim, and Tae-Hoon Yoon, *Jap. J. Appl. Phys.*, **2016** *55*, 094101-1-094101-4.
- 32) H. Horiguchi and S. Ariga, *Proc. 37th Jpn. Appl. Phys. Conf., Mar*, **1990**, 1016.
- 33) H. Mada and H. Suzuki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **1987**, *26*, L1092.
- 34) Yukio Hirano, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **2017**, *647*, 56-65.  
<http://dx.doi.org/10.1080/15421406.2017.1289430>
- 35) Yukio Hirano, *26th International Liquid Crystal Conference (ILCC2016)*, **2016**  
Displays 305 P2-2
- 36) Yukio Hirano, *27th International Liquid Crystal Conference (ILCC2018)*, **2018**, Displays P4-C2-30
- 37) N. A. Uchida, J. M. van Aerle, M. Barmentlo, and R. W. J. Hollering, *J. Appl. Phys.*, **1993**, *74*, 3111.
- 38) Yukio Hirano, *The 11th International Meeting on Information Display (IMID2011)*, **2011**, 42-1
- 39) S. Ishihara, H. Wakemoto, F. Yokotani, and Y. Matsuo, *Proc. 15th Jpn. Liq. Cryst. Conf.*, **1989**, 356–357.
- 40) Y. Nakazono, H. Ichinose, A. Sawada, and S. Naemura, *Tech. Rep. IEICE*, **1997**, EID96-89.
- 41) S. Miyake, M. Adachi, H. Takasuna, and A. Ishizu, *Tech. Rep. IEICE*, **1992**, EID91-111.
- 42) L. T. Creagh and A. R. Kmetz, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **1973**, *24*, 59–68.
- 43) T. Sato, K. Sawahata, H. Endo, and H. Fukuro, *Dig. SID98*, **1998**, 738–741.
- 44) R. Kubo, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **1957**, *12*, 570–586.
- 45) 久保亮五、戸田盛和、齋藤信彦、橋爪夏樹, 「現代物理学の基礎[第2版] 統計物理学」(岩波書店、**1978**) .