

令和三年度博士学位論文

2次元面内対称の液晶配向構造を用いた  
高速応答ディスプレイに関する研究

Study on Fast-Response Displays Using Two-Dimensional In-  
Plane Symmetrical Liquid Crystal Orientation

東北大学大学院 工学研究科

電子工学専攻

松島 寿治

# Study on Fast-Response Displays Using Two-Dimensional In-Plane Symmetrical Liquid Crystal Orientation

**ABSTRACT:** Liquid crystal displays (LCDs) have been required to improve their performance with the evolution of information terminals. The high-resolution LCD that has been developed along with this trend is suitable as displays for virtual reality (VR) applications. In VR applications, there is a great demand for video response performance. In this study, the concept of two-dimensional orientation control is introduced, and its implementation and realization are intended to achieve LCDs with fast-response behavior that meet the requirements of VR applications.

A conventional LCD consisting in-plane switching mode (IPS) contains liquid crystal is contained between two glass substrates with transparent electrodes and driven by applying voltage. The liquid crystal is anchored so that it is parallel to the surfaces of these two substrates. The elastic force exerted by the liquid crystal on the surface of the fixed substrate generates a falling response that restores it to its initial state. I proposed a two-dimensional in-plane symmetrical liquid crystal orientation with elastic forces in two directions by regulating the liquid crystal orientation in the in-plane direction. The increased elasticity is intended to speed up the liquid crystal response.

In the existing IPS, the liquid crystal orientation changes in the thickness direction, and the elastic force acts in only one direction. To make the elastic force work in the direction orthogonal to this, I considered a state in which the liquid crystal orientation also changes in the in-plane direction. The elastic force of the liquid crystal orientation has a large anisotropy in the in-plane direction relative to the thickness direction. As a result of the analytical calculation, I predicted that the response time of the IPS can be reduced to one-third of that of the conventional device by introducing the two-dimensional orientation regulation.

I developed a method to achieve the IPS with the introduction of two-dimensional orientation regulation using the same fabrication method as the conventional IPS. This method only requires changing the electrode shape and liquid crystal orientation direction in the same layer structure as the conventional IPS. The liquid crystal orientation rotated by the electric field is balanced, and the orientation is regulated to the balanced position. The position where the liquid crystal orientation is regulated by this is called the imaginary boundary. I developed a double-branched electrode structure that rotates the liquid crystal molecules stably to generate the imaginary boundary. I fabricated a test device using a double-branched electrode structure and measured the fall optical response time of this test device. As a result, the response time of the two-dimensional IPS was approximately one-third that of the conventional IPS. I also confirmed that the response time depended on the distance between the imaginary boundaries. These results show that the response time of LCDs can be shortened using a two-dimensional in-plane symmetric transverse electric field display method.

When a high-resolution LCD is fabricated using a double-branch electrode structure, a region that does not contribute to the amount of transmitted light occurs in the trunk portion of the electrode. Since the size of the cadaver depends on the manufacturing method, the decrease in the amount of transmitted light increases as the resolution of the LCD increases. To solve this problem, I developed a single-branch electrode structure, in which the trunk portion that does not contribute to the amount of transmitted light can be placed in a position that overlaps the light-shielding layer between the apertures. I estimated the amount of transmitted light in an LCD with a resolution of 1000ppi using both electrode structures. When the amount of transmitted light of the parallel polarizer is 100%, the amount of transmitted light improves from 15% in the case of the double-branch electrode structure to 33% in the case of the single-branch electrode structure.

I fabricated an LCD using a single-branch electrode structure and confirmed the display. At this time, the imaginary boundary of the display area is curved. This curvature creates a long distance between the imaginary boundaries, a defect that increases the response time. I simulated the liquid crystal orientation and confirmed the generation of the electric field and found that the electric field under the light-shielding layer was not parallel to the upper electrode's trunk segment but had a tilt. The torque of the liquid crystal orientation due to the direction of the electric field is thought to have caused the imaginary boundary to be unstable because the position of the torque balance is not continuous between the light-shielding layer and the aperture portion. As a method of generating an electric field to resolve this discontinuity, I proposed to attach a convex part to the lower trunk under the light-shielding layer. I fabricated an LCD with a convex single-branch electrode structure and confirmed that the imaginary boundary is straight. I fabricated a high-resolution LCD of 1001ppi using a two-dimensional in-plane symmetrical liquid crystal orientation with a convex single-branch electrode structure. The response time of this LCD was less than 2.2 ms for all tone levels. This is the response time for a VR display with a refresh rate of 120 Hz and 2432 scanning lines.

In summary, I have studied an IPS using two-dimensional in-plane symmetrical liquid crystal orientation to achieve a fast-response LCD suitable for VR applications.

It has been a long-standing issue to improve the response time of LCDs. I believe that our method, which places less burden on the materials used and the manufacturing process, can contribute to many fields other than VR applications, including automotive applications.

第 1 章	緒言	1
1-1	情報社会の発達とフラットパネルディスプレイの用途	1
1-2	VR の進化とディスプレイへの要求条件	2
1-2-1	VR ヘッドセットの構成	2
1-2-2	VR 用途のディスプレイの発展と動画表示性能に対する要求	3
1-2-3	液晶ディスプレイの動画表示性能	5
1-2-4	動画表示性能の改善方法	12
1-3	横電界駆動方式ディスプレイと高速化	15
1-3-1	液晶ディスプレイの原理	15
1-3-2	横電界駆動方式の液晶ディスプレイの優位性	21
1-3-3	従来の応答時間の短縮手法	32
1-4	本研究の目的	35
1-5	本論文の構成	36
第 2 章	2 次元液晶配向規制による高速応答ディスプレイの原理 提案	37
2-1	液晶配向規制を考察するための配向分布モデル	37
2-2	弾性連続体理論による液晶の応答時間の算出	40
2-2-1	従来の横電界駆動方式の応答時間	40
2-2-2	2 次元液晶配向規制時の応答時間の導出	41
2-3	まとめ	43
第 3 章	2 次元面内対称の液晶配向を実現する電極構造の提案	44
3-1	2 次元面内対称の液晶配向によるトルクバランス	44
3-2	電界分布を利用した水平方向の配向規制	47
3-2-1	縞状電極構造を用いた 2 次元面内対称の横電界駆動方式	47
3-2-2	両枝電極構造を用いた 2 次元面内対称の横電界駆動方式	53
3-3	2 次元面内対称の横電界駆動方式の表示応答特性	62
3-4	まとめ	67
第 4 章	2 次元面内対称の横電界駆動方式を用いた高解像度液晶 ディスプレイの作製と V R 応用	68
4-1	2 次元面内対称の横電界駆動方式の高解像度ディスプレイへの適用	68
4-1-1	2 次元面内対称の横電界駆動方式の透過光量に関する考察	68
4-1-2	高解像度化と高透過光量を両立させるための片枝電極構造	74

4-1-3	凸部付き片枝電極構造による固定端の直線化 .....	80
4-2	VR用高解像度液晶ディスプレイの作製 .....	85
4-3	2次元面内対称の横電界駆動方式の長所と短所 .....	88
4-4	2次元面内対称の横電界駆動方式の発展性 .....	91
4-5	まとめ .....	92
第5章	結言 .....	93
	謝辞 .....	95
	参考文献 .....	96
	本研究に関わる業績のリスト .....	103

## 第1章 緒言

この章では、液晶ディスプレイの発展の経緯を踏まえ、本研究の目的およびその重要性を述べる。

### 1-1 情報社会の発達とフラットパネルディスプレイの用途

液晶ディスプレイ技術は目覚ましい発展を遂げたが、これは情報社会の発展と共にあった。長年テレビジョン規格として使用されていたアナログの NTSC 規格では、垂直の有効走査線数は 525 本であり、この表示技術の担い手はブラウン管であった。しかし、デジタル化により急速に走査線数が増加して、それと共にテレビジョン受像機が大型化した。このような変化に、高解像度、薄型、大型化が可能、軽量、低消費電力といった特徴を持つ各種フラットパネルディスプレイ技術が進化を遂げ、その主役は液晶ディスプレイ技術であった。表示を求められる情報量は近年飛躍的に増え、スーパーハイビジョンが採用している規格である BT.2020 において、走査線数は 4320 本と定められている[1]。液晶ディスプレイ技術はこれを実現可能とする進歩を遂げている。

テレビジョン放送は、人が集まって観る映画を家庭内に持ちこむことで社会に変化を起こした。これは情報の、集団から家庭への個別化と言える。情報化社会は更に情報の個別化を進め、情報サービスが家庭から個人へと細分化された。スマートフォンによって急速に発展した携帯情報端末の登場である。移動通信システムが 3G から 4G, 5G と発展していくなかで、ディスプレイにおいては転送可能な情報量が増加していることに対応した表示画素数の向上、長時間駆動のための低消費電力化、携帯利便性のための薄型軽量化が要求された。フラットパネルディスプレイ技術はこの用途にも最適であり、液晶ディスプレイ技術の高解像度化も進化した。この高解像度化は例えば次の様である。1980x1080 本の画素数を持つハイビジョンディスプレイでは、大型テレビジョンの対角 100 インチであれば 1 表示画素の大きさは約 1153 $\mu\text{m}$  角である。一方、スマートフォンなどの対角 3.5 インチであれば 1 表示画素の大きさは約 40 $\mu\text{m}$  角となる。

情報化社会の、特に情報量の増加による発展は臨場感を高めてきた。これにより眼前に対象物が無くてもあたかも共に在るような感覚をもたらすようになってきた。この技術背景の下に近年市場の拡大しているディスプレイの用途に、

VR (virtual reality, 仮想現実) がある。この用途においてもフラットパネルディスプレイ技術は重要であり、最先端の技術を必要とされるディスプレイの用途となっている[2]。

## 1-2 VRの進化とディスプレイへの要求条件

### 1-2-1 VRヘッドセットの構成

VRヘッドセットは既に50年以上前から提案されて、開発が進められている[3]。現在開発されているVRヘッドセットは図1-1のような形状であり、図のように装着して使用する。小型のディスプレイを格納した密閉されたゴーグル形状の箱を頭部に装着することで表示画像の観察を行う。



図 1-1 VRヘッドセット例

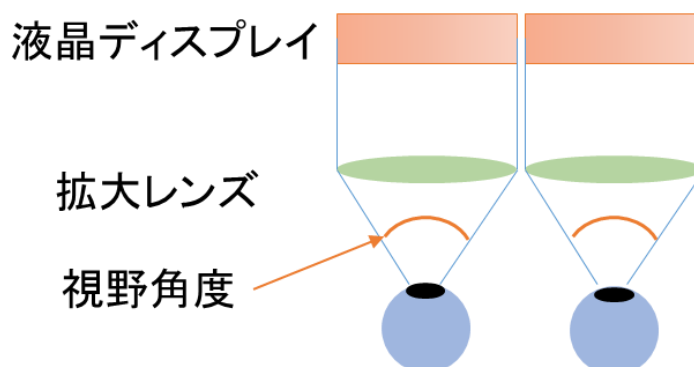


図 1-2 VRヘッドセットの光学系



VR ヘッドセットの光学系は図 1-2 のように構成されている[4,5]。液晶ディスプレイに表示する画像を拡大して観察することによって、非現実の世界を現実にいるかのように感じる事が出来る。ここで、非現実世界への没入感を得るためには広い視野角度が必要である[6]。現在主流の VR ヘッドセットは、液晶ディスプレイと目の間にあるレンズによって 90 度以上の視野角度を持つ。このレンズによって、拡大した虚像を生成する。拡大して観察するため、解像度の低い液晶ディスプレイを用いた場合には画素が独立して見えてしまい現実感が損なわれる。このため、高解像度化が必要となる。

### 1-2-2 VR 用途のディスプレイの発展と動画表示性能に対する要求

VR ヘッドセットは、2016 年にコンシューマー機が発売されて以降、急速に注目が集まり始め普及が始まった。本機種に搭載されたフラットパネルディスプレイは走査線数 1080 本、リフレッシュレート（ディスプレイデバイスの書き換え周波数）90Hz であり、高解像度と高い走査周波数を持つものであった。どちらも高臨場感を得るために必要とされるが、十分な臨場感を得るためには、視力 1.0 に相当する 1 度あたり 60 画素(60pixels per degree)、すなわち視野角度 100 度では走査線数で 6000 本以上が必要という報告もある [7]。2021 年現在においては、走査線数 1440 本、リフレッシュレート 144Hz や、走査線数 2160 本、リフレッシュレート 90Hz といった仕様のディスプレイを搭載したものが発売されている。解像度、リフレッシュレート共に増加している（図 1-3）。

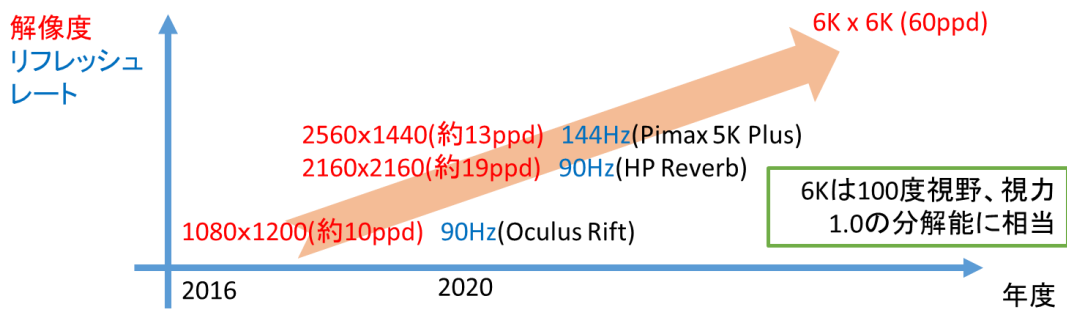


図 1-3 VR用途のディスプレイの解像度とリフレッシュレートの進化

この高解像度、高リフレッシュレートを満足する VR 用途のディスプレイとして利用されている、または利用が期待されている技術として、液晶ディスプレイ、有機 EL ディスプレイ、 $\mu$ -LED ディスプレイがある[8]。以下の表 1-1 にまとめて比較する。

表 1-1 VR用途に必要な主な性能と各種フラットパネルディスプレイ技術

	液晶	有機EL	$\mu$ -LED
解像度	◎	○	△
リフレッシュレート (90Hz以上駆動)	○	○	○
消費電力	○	○	◎
動画表示性能	△	○	△ (パルス幅変調)
コスト	○	△	×

$\mu$ -LED ディスプレイは VR を含めた小型情報端末用途に使用する技術として期待されている。しかし現状では高解像度化に難があり、また高コストのため量産に至っていない。液晶および有機 EL ディスプレイは共に VR 用途の重要なデバイスとして使用されている。液晶ディスプレイは高解像度化で優位であり、有機 EL ディスプレイは応答時間が短いため動画表示性能に優位である。VR 用途

のディスプレイの高性能化に伴い、解像度やリフレッシュレートが高くなる。このとき、高解像度化が容易な液晶ディスプレイが有利となりやすい。

テレビジョンやスマートフォンに搭載されている液晶ディスプレイは走査型でホールド型駆動のディスプレイである。走査ホールド型ディスプレイでは動画を表示した際の歪みとぼやけが課題となっている[9,10]。VR用途においてはディスプレイが頭部に固定されていることに起因して静止画を表示した場合にも歪みとぼやけが発生し、さらに重要な課題となる。走査ホールド型ディスプレイの駆動方法、歪みとぼやけの発生原理、液晶ディスプレイにおいてこれらを低減する方法を考察する。

### 1-2-3 液晶ディスプレイの動画表示性能

液晶ディスプレイは表示データを一行ずつ表示していく、走査型と呼ばれる駆動方式を用いて表示を行っている。この駆動方式は高解像度ディスプレイを実現するために重要であるが、一方で歪みが発生させることで動画表示性能を低下させる。以下、走査型駆動による表示の方法および歪みの発生理由について述べる。

走査型ディスプレイは、マトリクス型のディスプレイに一行ごと表示情報を書き込み表示するディスプレイである。図 1-4 を用いて説明する。

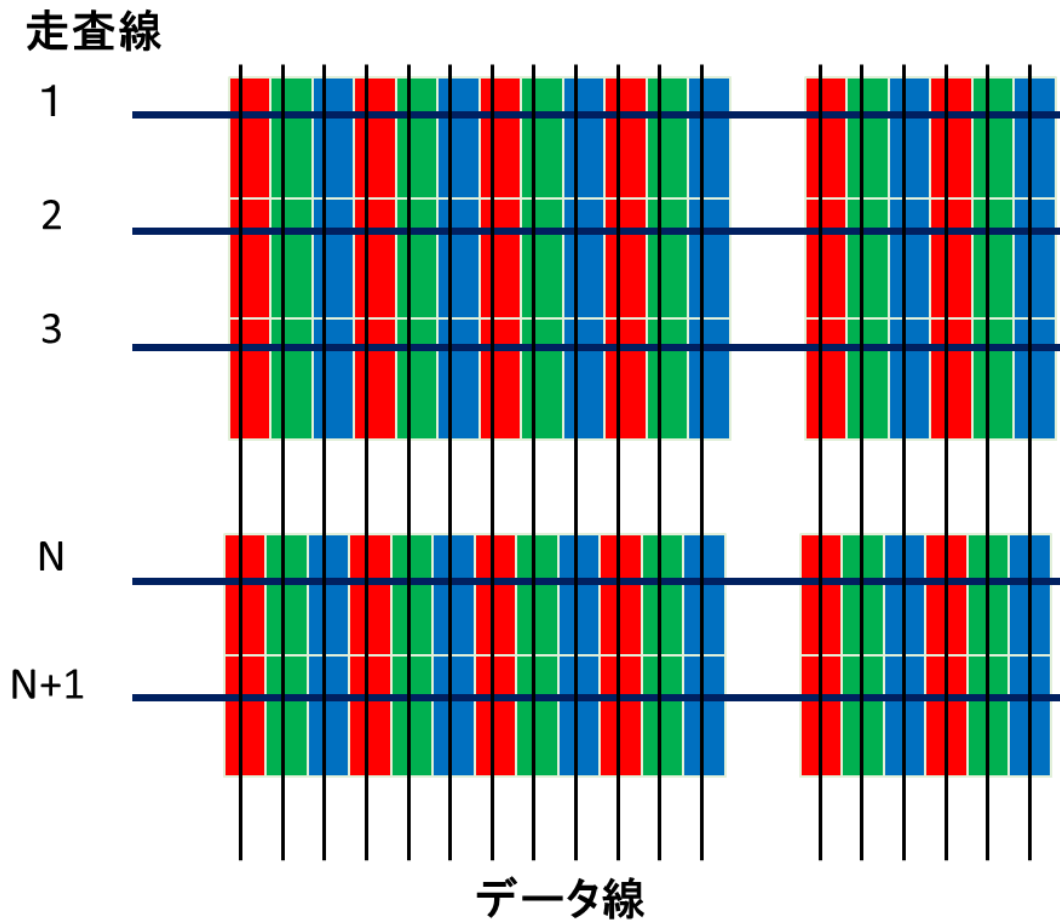


図 1-4 走査型ディスプレイの概念図

図 1-4 にマトリクス型ディスプレイを走査型で駆動する場合の概念図を示す。画素一つ一つに走査線とデータ線が直交するように配置されている。各走査線の表示データに対応する電圧をデータ線より供給して表示を行う。これを全走査線に対して順次に行う。この全画面を書き換える時間は 1 フレーム時間であり、1 秒当たりの書き換え回数をリフレッシュレート(垂直走査周波数)と呼ぶ。リフレッシュレートが 60Hz の液晶ディスプレイであれば 1 フレーム時間は 16.7ms である。このときの駆動タイミングを図 1-5 によって説明する。

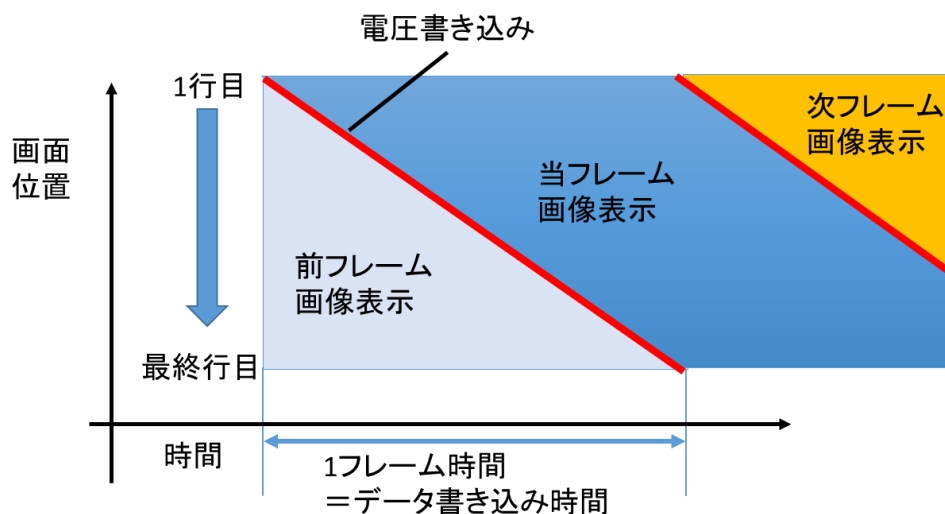


図 1-5 走査型ディスプレイの駆動タイミング

図 1-5 に、走査型ディスプレイの駆動タイミングを示す。横軸に時間、縦軸に画面位置とした。画面最上部から順次表示データを電圧データとして書き込む。書き込むタイミングを、1 フレーム時間の起点と 1 行目から、1 フレーム時間の終点と最終行目を結んだ直線で示す。次フレームの表示データ書き込みは当フレームの表示データ最終行の書き込み終了直後に行われる。また、走査型ディスプレイの表示は電圧書き込みと同時に表示を開始する。

以上説明したように、走査型駆動では一つの画像を表示するタイミングが画面の位置によって異なっている。VR 用途においてはディスプレイが頭に固定されているため、この 1 フレーム時間の中に頭の位置や方向がぶれることによる画像の歪みが問題となる。すなわち、視線の位置に本来表示しようとする画像は、1 フレームという時間を掛けて表示を完了するが、頭のぶれによって意図しない位置に表示が観察されてしまう。この現象について、1 行目の走査線を選択している時に頭部が上方を向いており、画面全体の走査が完了するまでに頭部が下方を向く場合を例にとって説明する。



図 1-6 正常な走査画像

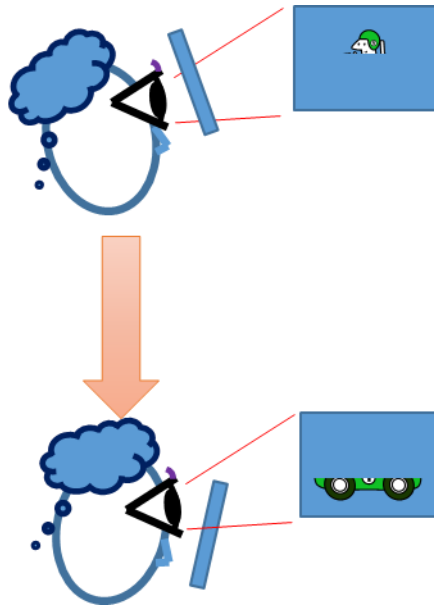


図 1-7 走査中に頭部が動いた場合の描画位置のずれ

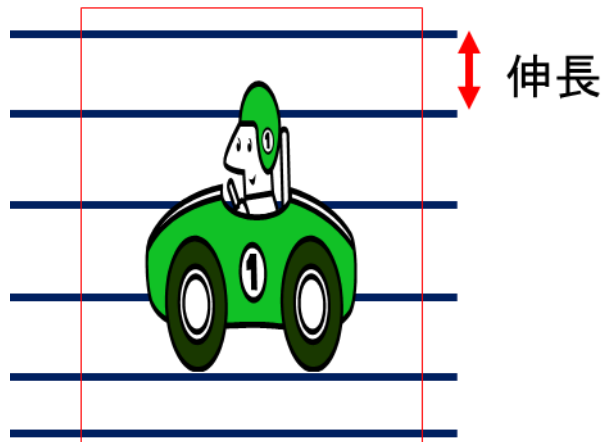


図 1-8 歪みが生じて観察される画像

図 1-6 は正常な走査画像であり、液晶ディスプレイにはこの通りに表示されている。枠線は表示エリア、横線は便宜上配置した任意の走査線の位置であり、車と運転手が画像として表示されているものとする。これを VR ヘッドセットに搭載した走査型駆動をする液晶ディスプレイに表示を行い、頭部を下に動かした様子を示したのが図 1-7 である。上を向いている時に走査を開始しているため、表示画像の運転手部分は頭部が上方を向いている時に描画される。一方、表示画像のタイヤ部分は頭部を動かし下方を向いている時に描画される。この時、走査線の間隔と頭部の動作量の合計が表示画像の走査線間隔となって観察されるため、図 1-6 の横線の間隔は図 1-8 に示すように長くなる。その結果、表示画像は縦長に観察されることになる。この画像の歪みは頭部の動く方向に依存するため、伸び縮みするだけでなく、左右に平行四辺形のような歪みとしても現れる。VR ヘッドセットに用いられる液晶ディスプレイでは、このような歪みの発生しない駆動を行う必要がある。

また、ホールド型ディスプレイはぼやけが生じるという問題がある。これは1フレーム時間の間、同じ表示を保つディスプレイである。図 1-4 の各走査線に対応する行では、データが書き込まれたのち次のフレームまでの時間に新しいデータが書き込まれず表示が維持される。

走査かつホールド型であるディスプレイの表示画像の時系列は図 1-9 のようになる。これは図 1-5 の駆動タイミングを表示画像に着目して書き直したものである。



図 1-9 走査ホールド型ディスプレイの表示画像の時系列

元々Aと表示されていたディスプレイに、次のフレームでB、さらに次のフレームでCを表示する場合を示している。新しいフレームの開始走査線から順にAからBへと書き変わっていき、1フレームの時間を掛けて完全に書き変わる。リフレッシュ完了時のみ画面全体がBと表示され、次のフレームが開始すると開始走査線から順に次のCが順々に表示される。1フレーム時間の間、同じ画像表示がホールド（保持）されることから、ホールド型ディスプレイと呼ばれている。

以上説明したように、ホールド型では1フレーム時間中表示を続ける。VR用途においてはディスプレイが頭に固定されているため、この1フレーム時間の中に頭の位置がぶれることによって画像がぼやけて観察されるという問題が生じる。歪みの場合と同様に、1フレーム時間の中で頭部が上方から下方を向く場合を例にとって説明する。



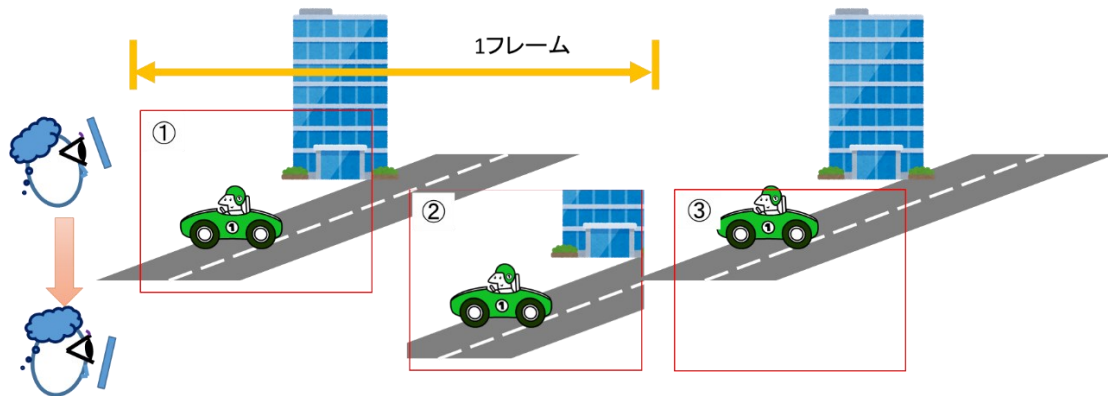


図 1-10 ホールド型ディスプレイにおける表示位置



図 1-11 上下に頭部を動かした時の表示したい画像と人が認識する画像

図 1-10 の左に歪みの時と同様に観察者の頭部の動きを示している。その右側に、左から順に時間を追って液晶ディスプレイに表示されている画像を実線枠内に示している。ここでは便宜上走査を行わないホールド型ディスプレイとして 1 フレームの間全画面で同一の表示を行っている状態として説明を行う。すなわち、1 フレーム時間中、実線枠内に表示されている画像はホールドされている。枠外の画像は、VR 空間を示しており、枠内に表示される画像はその空間の一部を切り取ったものとなっている。

まず、1 フレーム時間の最初に頭部の向いている方向に相当する VR 空間の画像が液晶ディスプレイに表示される（図 1-10 の①）。1 フレーム時間中に頭部が上向きから下向きに動いた場合であってもホールド型であるために液晶ディスプレイに表示されている画像は変化しない（図 1-10 の②）。フレーム終了時と次フレーム開始時の頭部の位置は同位置であり、次フレーム開始時に液晶ディスプレイにはその時の頭部の向いている方向に相当する VR 空間の画像が液晶ディスプレイに表示される（図 1-10 の③）。この時、VR 空間上では①と③の表示位置が正しいものとして表示を行っている。これは 1 フレームの間に①と②の間で意図しない画像の移動があることを意味しており、人間には画像が重なって見えることによるぼやけとして認識される。すなわち、図 1-11 の左に示す液晶ディスプレイに表示される車の画像は、図 1-10 の頭部の動作の結果、図 1-11 の右に示す上下方向にぼやけた車として人に認識される。

#### 1-2-4 動画表示性能の改善方法

VR ヘッドセットにおいて動画表示性能として歪みやぼやけが生じる問題があることとその原因について述べた。この問題は人間の身体が常に微動していることを考慮すると致命的であることが理解出来、解消は必須である。歪みは走査型であることに起因し、ぼやけはホールド型であることに起因しているため、VR ヘッドセット用ディスプレイでは非走査かつ非ホールド型が採用されている。

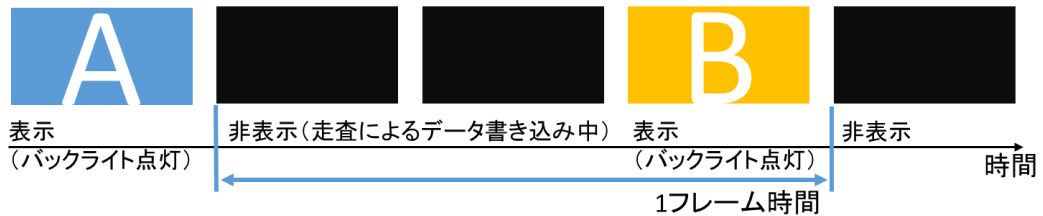


図 1-12 非走査・非ホールドの表示時系列

非走査かつ非ホールド型では図 1-12 に示す時系列で表示を行う。走査型では表示データを書き込みと同時に表示を行っていたが、非走査型においては表示データ書き込みと表示が独立している。フレームが開始してから表示データの書き込みをはじめ、書き込みが完了したのち、ディスプレイ全画面を同時に短時間点灯させる [11,12]。これにより走査による歪みとホールド表示によるぼやけを解消している。

非走査かつ非ホールド型の駆動方式による表示を、液晶ディスプレイで実現する方法について図 1-13 によって詳しく説明する。

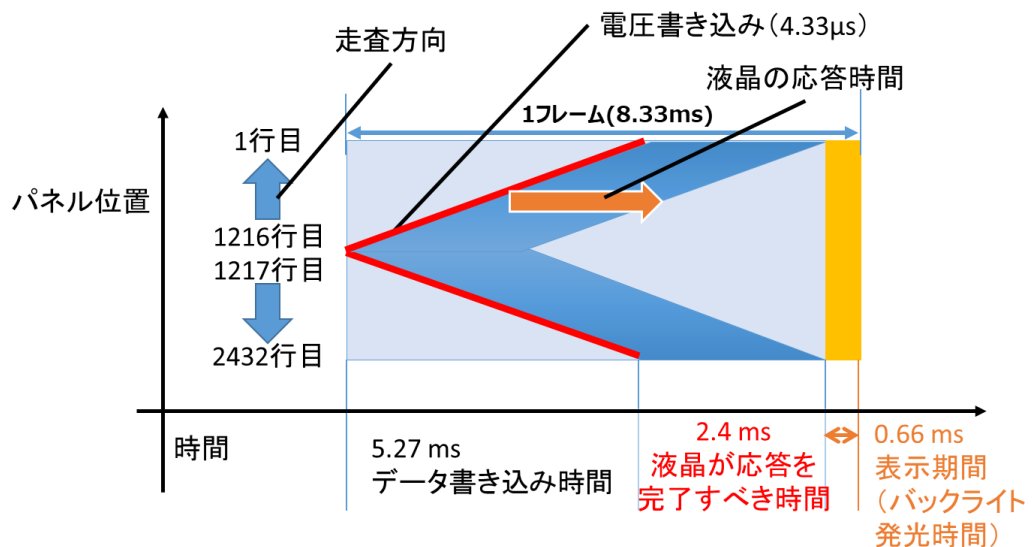


図 1-13 全画面同時表示の駆動タイミング

現状の VR 用途 (図 1-3) を超えた走査線数 2432 本およびリフレッシュレート 120Hz の液晶ディスプレイを目標とする。1 フレーム時間は約 8.33ms である。一本の走査線ごとにデータの書き込み時間が必要であり、4.33 $\mu$ s である。走査線への書き込みは、液晶ディスプレイの中央から上下に方向に同時に行い、走査時間を短縮している。最後の表示データが書きこまれるのはパネルの上から 1 本目の走査線と 2432 本目になる。2432 本分の表示データを全て書き込むためには、4.33 $\mu$ s x1216 本で 5.27ms の時間が掛かる。バックライトの発光時間は短いほどぼやけが少なくなるが、平均透過光量を確保するためある程度の時間は必要であり、ここでは 0.66ms とした。最後の表示データの書き込みが完了してから液晶が動作を開始し、表示データに対応した状態になった後にバックライトを発光し、液晶ディスプレイ全体を表示する。これによって図 1-12 の表示時系列を実現することが可能である。

ここで、表示データの書き込みが行われてから、液晶がその表示データに対応した状態になるまでに時間が掛かることが問題となる。開始の走査位置である 1216,1217 行目では、表示データの書き込みが終了してから点灯まで 7.67ms の時間があるが、1 行目および 2432 行目では 2.4ms と短時間になる。同一の表示データの書き込みを行った際に同一の表示を得るためには液晶の動作が 2.4ms 以内に完了していることが望ましい。表 1-1 に示した液晶ディスプレイが他方式のディスプレイと比較して動画表示性能に劣るのは液晶の応答時間を 2.4ms 以下とすることが困難であるためである。しかし一方で、液晶が 2.4ms 以下で応答可能であれば、非走査非ホールド型を採用した際に液晶ディスプレイは他方式のディスプレイと比較して動画表示性能で同等となる。

### 1-3 横電界駆動方式ディスプレイと高速化

ここでは液晶ディスプレイの構造から表示原理、特に視野角特性に優れた横電界駆動方式の液晶ディスプレイについて説明する。また、横電界駆動方式の液晶ディスプレイに新しい概念を導入することによって液晶動作応答時間の短縮を提案する。

#### 1-3-1 液晶ディスプレイの原理

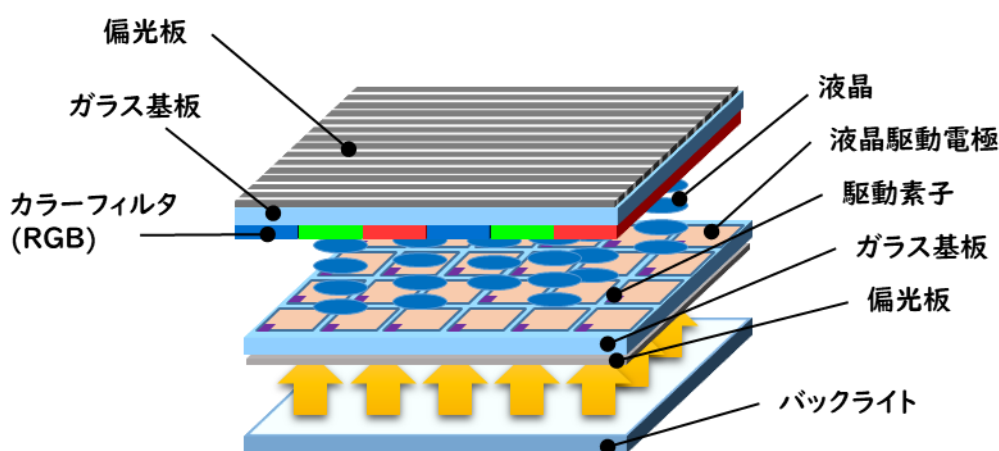


図 1-14 液晶ディスプレイの断面構造

まず、液晶ディスプレイについて説明する。一般的な液晶ディスプレイの断面的構造は図 1-14 の様に表される。

二枚のガラス基板の間に液晶をサンドイッチする構造になっている。片方の基板には液晶を動かすための液晶駆動電極（画素電極）があり、この電極に電荷を供給するための駆動素子が接続されている。この駆動素子は薄いトランジスタであり、TFT（Thin Film Transistor）と呼ばれる。走査線がゲート、データ線がソース（またはドレイン）となる。走査線で選択されている画素に、表示に対応した電荷をデータ線より画素電極に供給する。この供給された電荷を走査線が非選択である期間も保持し、画素電極と共通電極の電位差により液晶の方向を変化させる構造である。

もう一方の基板にはカラーフィルタが配置してあり、画素電極と対応して三原色 RGB の画素を構成する。この場合、RGB の画素セットで1つの表示画素を構成する。2枚のガラス基板の外側には、それらをさらに挟むように偏光板が配置され、さらに視認側とは反対側に光源としてバックライトが配置される。バックライトの光が偏光板によって偏光となり、液晶の配向方向に従って偏光状態が変化し、視認側の偏光板を光が通過する量によって透過光量が変化する。

液晶の配向方向の制御方法および偏光状態の変調の様子についてさらに解説する。

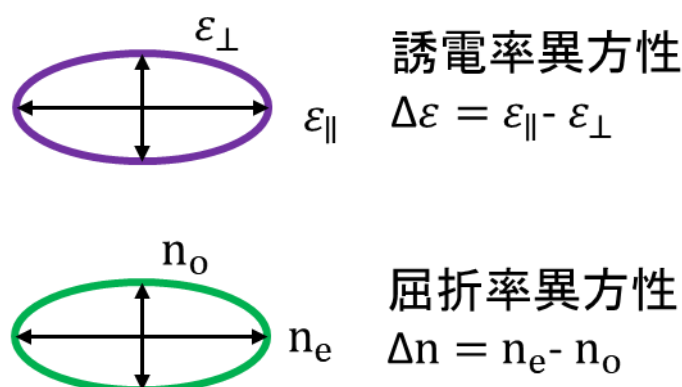


図 1-15 配向した液晶分子の異方性

図 1-15 は、液晶分子の配向の異方性を示す概念図である。液晶分子は長軸を中心に回転対称である性質を持ち、誘電率および屈折率は長軸に沿った方向に異方性を持っている。誘電率は、長軸に沿った方向の誘電率を $\epsilon_{\parallel}$ 、短軸に沿った方向の誘電率を $\epsilon_{\perp}$ と呼ぶ。添え字は平行と垂直の意味である。屈折率は、長軸に沿った方向を $n_e$ 、短軸に沿った方向を $n_o$ と呼ぶ。添え字は extra-ordinary と ordinary の意味である。それぞれの差分である $\Delta\epsilon$ が0ではない異方性を持つことにより、駆動電圧の電界により液晶が再配向し、 $\Delta n$ が0ではないことに基づく複屈折効果により光変調を起こすことが可能となる。

液晶の配向方向によって光変調が起き、透過光量が変化する原理について図 1-16 により説明する。

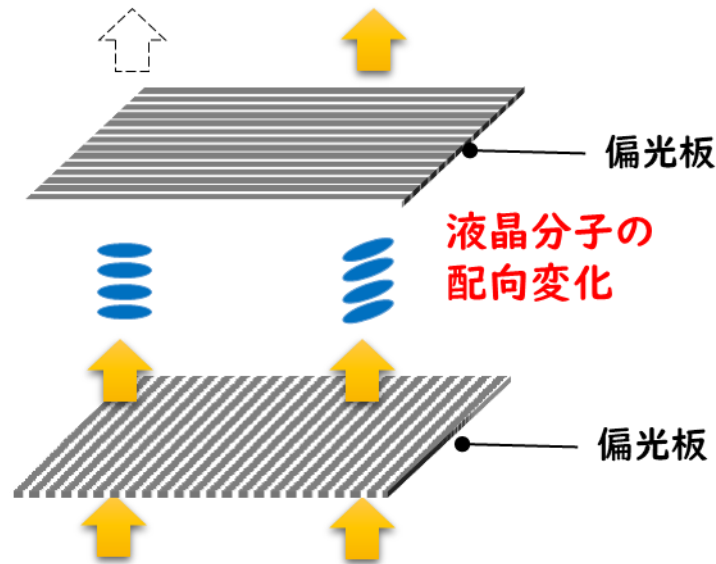


図 1-16 液晶の光変調原理

図 1-16 の細長い楕円は液晶分子の配向方向を示し、それを挟む縞模様の平面が直線偏光板である。これら直線偏光板は直交して配置されている。液晶の初期配置は図 1-16 の左側のように偏光板の偏光方向に平行もしくは直交する方向に配置する。バックライトからの光は下側の偏光板で直線偏光に変換される。この直線偏光は液晶の屈折率により位相変調するのみで偏光状態は変化しないため、直交に配置した上側の偏光板により遮光される。これが黒表示となる。液晶分子の配向方向が変化している場合には、下側の偏光板により得られた直線偏光は液晶分子の屈折率異方性（複屈折）により偏光状態が変化し、上側の偏光板を透過する。この透過量は液晶分子の配向方向により変化させることが出来る。

ここでは偏光が液晶によって状態変化する様子と、透過光量について説明する [13,14]。図 1-16 の光源から下側の偏光板によって得られた直線偏光と屈折率異方性を持つ液晶（図 1-15）の関係を図 1-17 に示す。液晶の  $n_o$  方向を  $x$  軸、 $n_e$  方向を  $y$  軸にとり、入射直線偏光と  $y$  軸のなす角度を  $\phi$  としている。この時入射光の電界は式 (1-1) で表わすことが出来る。ここで  $\omega$  は角振動数、 $\lambda$  は波長、 $z$  は奥行き方向で光の進行方向である。

$$\begin{aligned}
 E_x &= \sin \phi \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z \right) \\
 E_y &= \cos \phi \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z \right)
 \end{aligned}
 \tag{1-1}$$

この入射偏光の x, y 成分はそれぞれの軸に対応した液晶の屈折率により位相に遅れが生じる。この時の出射光の電界は式 (1-2) で表される。d は液晶層の厚さである。

$$\begin{aligned}
 E_x &= \sin \phi \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z - \frac{2\pi}{\lambda} d n_e \right) \\
 E_y &= \cos \phi \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} z - \frac{2\pi}{\lambda} d n_o \right)
 \end{aligned}
 \tag{1-2}$$

$n_e$  と  $n_o$  が異なっているために、電界の x 軸成分と y 軸成分の位相がずれる。これによって偏光の状態が変わる。偏光の状態は式 1-2 を描画することで得られる楕円によって表わすことが出来る。

図 1-18 に  $\phi = 45$  度の場合を例にとり楕円偏光の変化の様子を示す。 $d(n_e - n_o)/\lambda$  が 0 の時は入射直線偏光を示している。 $\phi$  が大きくなるに従い偏光状態は変化する。偏光状態は、1/4 変化すると円偏光、1/2 変化すると入射光と直交する直線偏光となる。



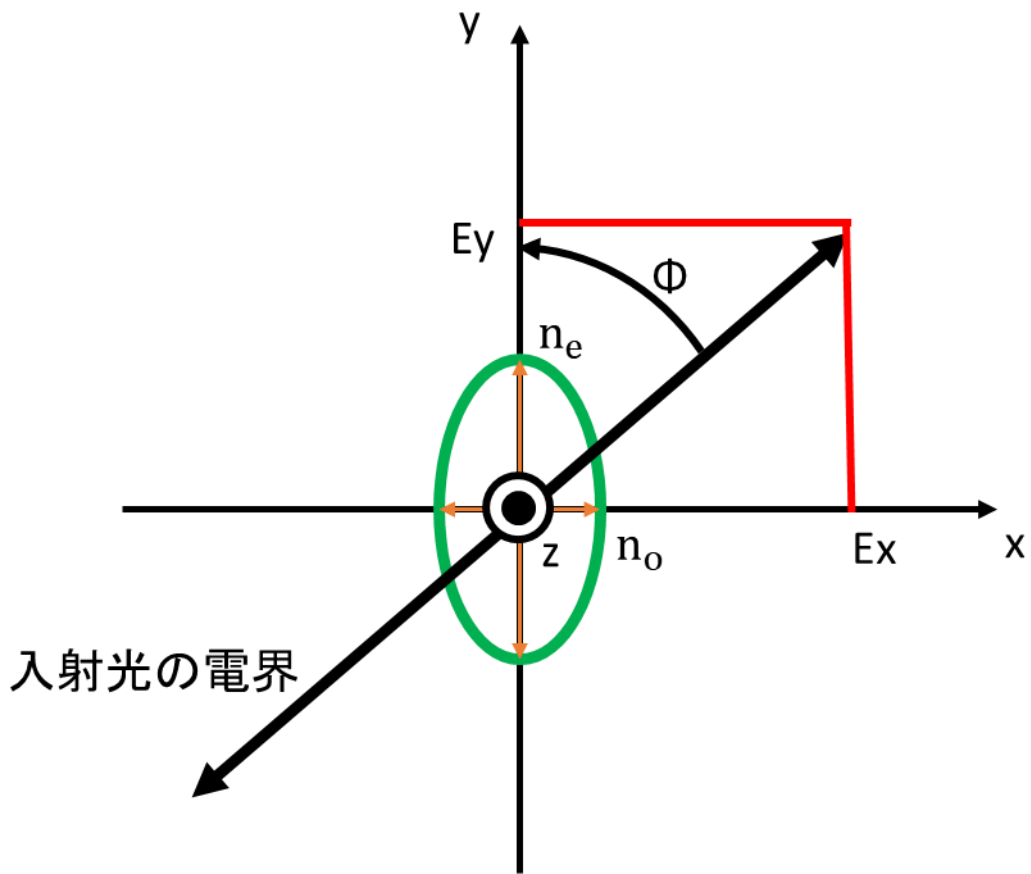


図 1-17 入射直線偏光と屈折率異方性を持つ液晶

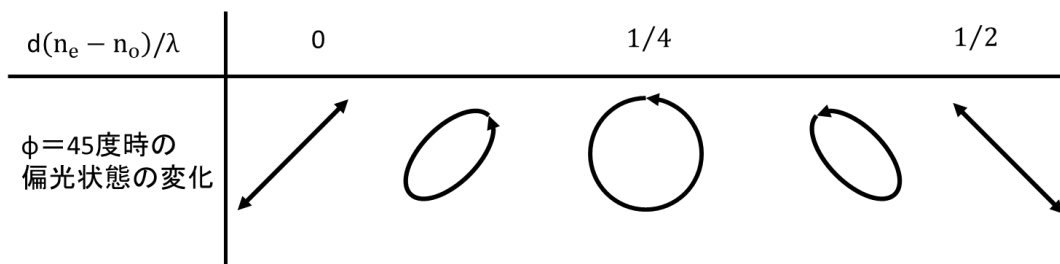


図 1-18 複屈折量と偏光状態変化の様子

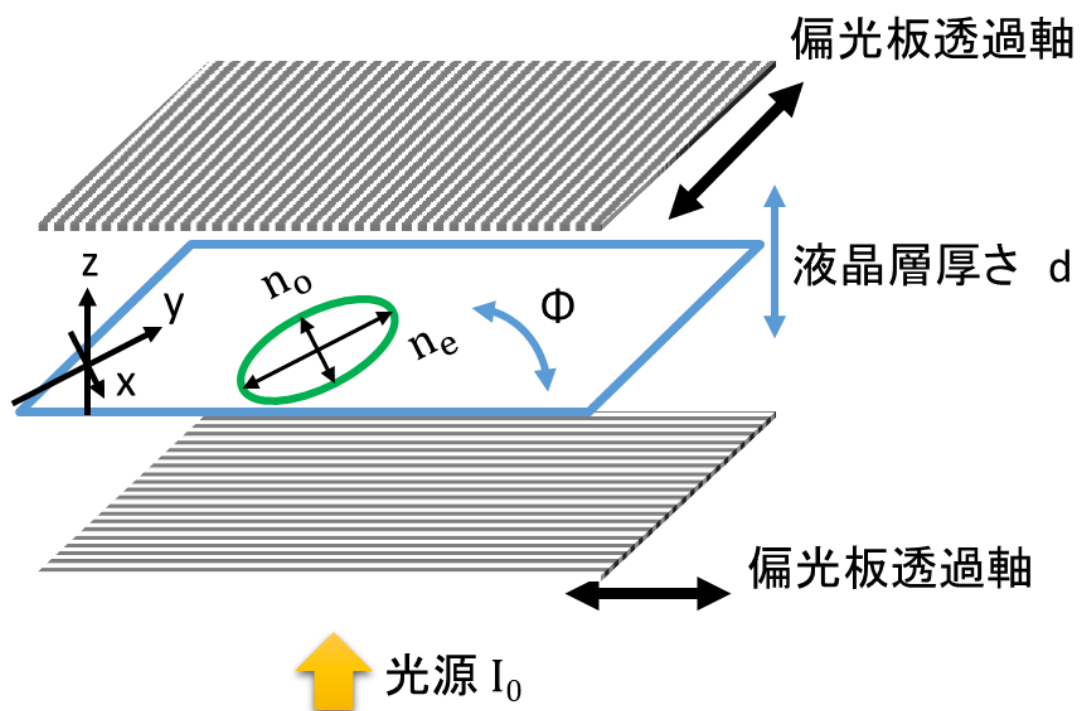


図 1-19 透過光量を説明する軸定義

上側の偏光板を透過する光量を説明するため、計算モデルを図 1-19 のように定義する。光源の光量を  $I_0$  とする。液晶分子は液晶層内で均一に配向するものとして、異常軸の方向を下側偏光板の透過軸を 0 度として、角度  $\phi$  とする。この時透過光量は式 1-3 として表わすことが出来る [13,14]。光の強度は電場の振幅の二乗であり、式 1-3 は式 1-2 で表した偏光状態の入射偏光と直交する成分を二乗したものである。

$$I(\lambda) = \frac{1}{2} I_0(\lambda) \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\pi d \Delta n}{\lambda} \quad (1-3)$$

液晶デバイスの透過光量は、液晶分子の方向  $\phi$  および、液晶層の厚さ  $d$  と  $\Delta n$  の積 ( $d \Delta n$ ) に依存する。液晶分子の方向  $\phi$  の項は、上下偏光板の間である 45 度の場合に最大となる。 $d \Delta n$  の項は入射光の波長 ( $\lambda$ ) に依存し、波長の半分に相当する ( $d \Delta n = \lambda/2$ ) 場合に、透過光量が最大となる。なお、直線偏光板は理想的な偏光板としているため、光源の光量は下側の偏光板を通過した時点で半分になる。そのため、係数  $1/2$  が付与されている。

液晶ディスプレイを実現する方式は大きく二種類ある。透過光量  $I(\lambda)$  を液晶分子の角度  $\phi$  を変化させる、つまり液晶分子の回転によって変化させる方式と、複屈折量である  $d \Delta n$  を変化させる方式である。前者は横電界駆動方式[15]、後者は縦電界駆動方式[16]と呼ばれている。

### 1-3-2 横電界駆動方式の液晶ディスプレイの優位性

図 1-20 に横電界駆動方式の液晶ディスプレイにおける液晶の動きを示す。初期状態では液晶分子を基板表面により基板面と平行に固定している。隣接する液晶分子同士は分子間力に基づく弾性力により同一方向に配向する性質を持っており、上下基板に接する液晶分子の配向方向が同一であれば、液晶層全体を均一に配向させることが出来る。これが図 1-20 の左図の状態、初期状態である。直線偏光板を図 1-16 のように配置して初期状態で黒表示を得ることが出来る。これに電界を加えて液晶分子の配向方向を変化させた状態が図 1-20 の右図の状態となる。この時液晶層の厚み方向から見て垂直方向、すなわち基板の横方向に電界を発生させることで、液晶分子の配向方向を変化させる。図 1-15 に示した液晶分子の誘電率異方性により、液晶分子は横方向の電界によって再配向するためのトルクを受ける。このトルクの向きは、誘電分極により誘電率の大きな方向が電界の方向に向こうとすることによって決定される。 $\Delta\epsilon$  が正の液晶の場合、液晶分子の長軸が電界と平行の方向となる。この結果、液晶分子は水平面内で回転するのみであり基板垂直方向から観察される  $d \Delta n$  は変化しない。これにより、式 1-3 において  $\phi = 0$  を初期状態とし、電界により分子配向を変化させることで透過光量が変化する。

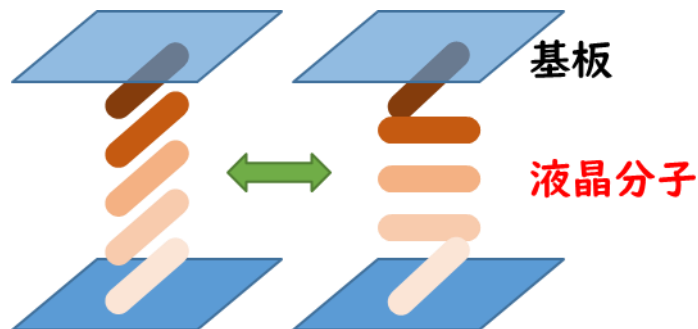


図 1-20 横電界駆動方式の液晶ディスプレイにおける液晶分子の動き

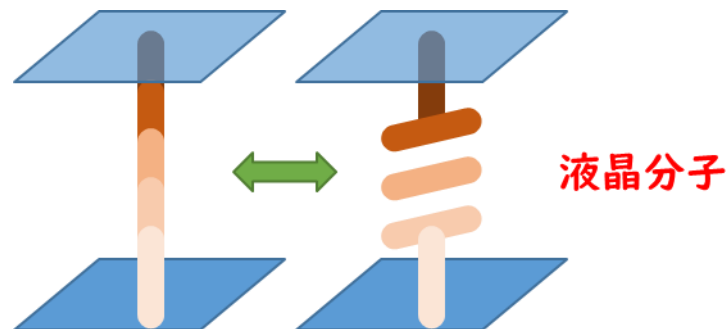


図 1-21 縦電界駆動方式の液晶ディスプレイにおける液晶分子の動き

図 1-21 に縦電界駆動方式の液晶ディスプレイにおける液晶の動きを示す。初期状態で液晶分子を基板平面と垂直に固定している。隣接する液晶分子同士は横電界駆動方式の時と同様に一様に配列するため、液晶層全体が基板と垂直に配向する。これが左図の状態である。この時、液晶分子は先に述べたように長軸に対して回転対称であり、基板と垂直に配向している場合の基板平面における  $d \Delta n$  は 0 となり、透過光量が 0 となって黒表示を得る。

これに電界を加えて液晶分子の配向方向を右図のように変化させる。この時、液晶層の厚み方向に平行に電界を発生させることで、液晶分子の配向方向を変化させる。横電界駆動方式同様に、図 1-15 に示した液晶分子の誘電率異方性により液晶分子は縦方向の電界によって再配向するためのトルクを受ける。このトルクの向きは横電界駆動方式同様に、誘電率の大きな方向が電界の方向へ向くことで決まる。この時、基板平面と平行になるように液晶分子を動かすために、

液晶分子の短軸の方が長軸より誘電率が大きい、 $\Delta\epsilon$ が負となる液晶を使用する。液晶分子を垂直方向から水平方向へ倒す方向は $\phi=45$ 度であり、液晶が倒れる角度による垂直方向の複屈折量 $d\Delta n$ の変化により、透過光量が変化する。

以上説明したように、電界が加わった状態において液晶分子は横電界駆動方式においては主に水平回転し基板平面とは平行のままであり、縦電界駆動方式においては基板平面と傾きを持つ。図 1-22 に示す方位の違いで $d\Delta n$ が異なり、基板平面に対して垂直ではない方向の表示特性に影響する。

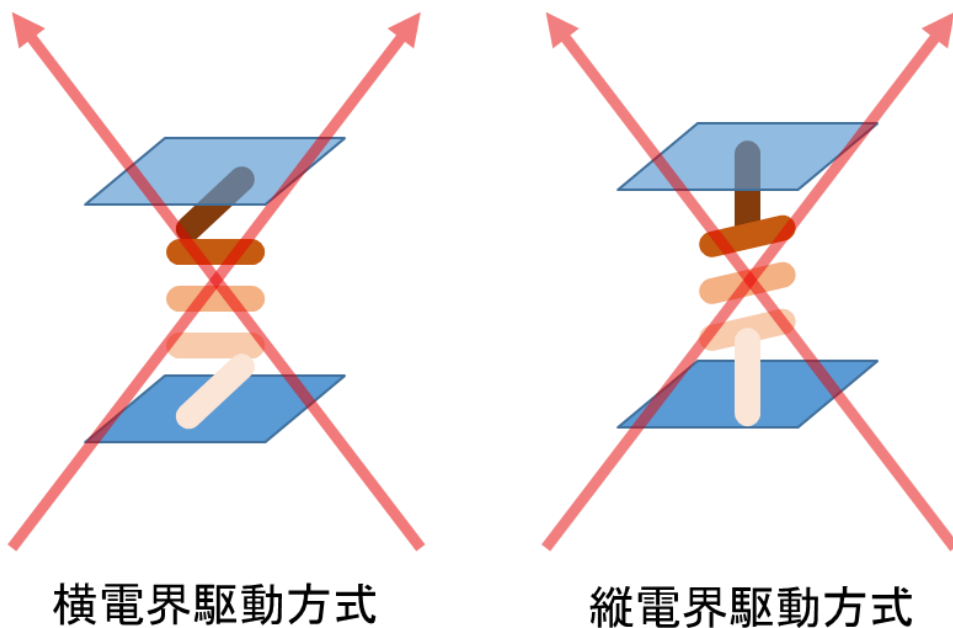


図 1-22 斜め方向の光線と液晶分子の傾きの関係

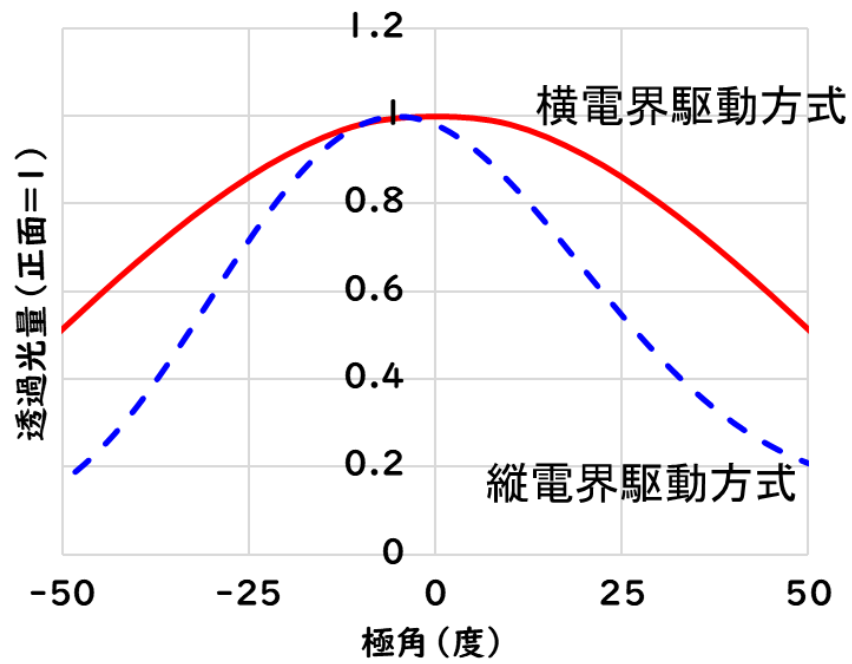


図 1-23 横電界駆動方式と縦電界駆動方式の視野角透過光量特性

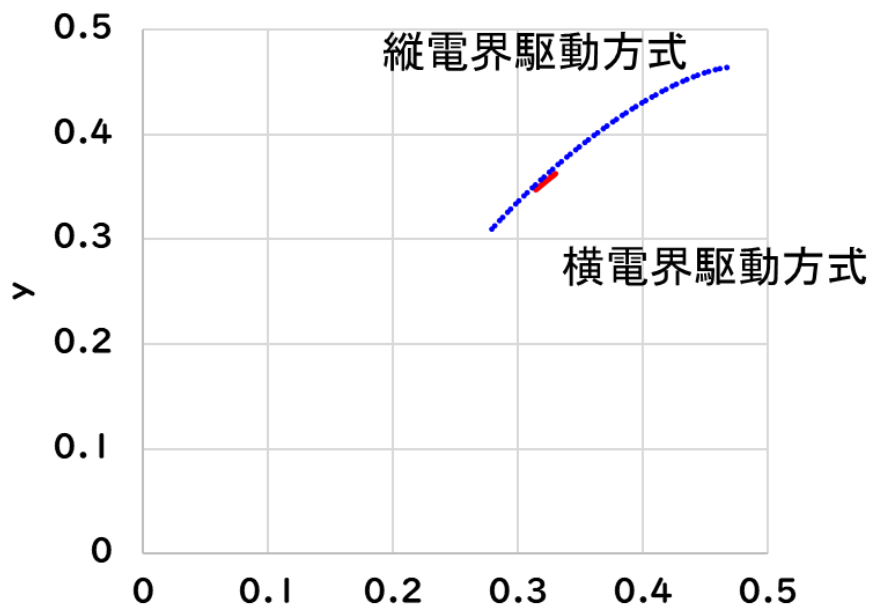


図 1-24 横電界駆動方式と縦電界駆動方式の視野角色度特性

図 1-23,24 に、横電界方式と縦電界方式における視野角特性を、光学シミュレーションによって計算した結果を示す。図 1-23 は偏光板の透過軸もしくは吸収軸の方位における透過光量の極角依存性を示している。また、図 1-24 は、極角 30 度方向の全方位角に対する色度変化を、CIE1931 表色系の xy 色度図上に示している。透過光量変化、色度変化ともに横電界駆動方式の優位性が分かる [17,18]。表示部位を拡大して視認し、かつ全体を常に見回す使用方法である VR 用途においては、視野角依存性がないことが望ましく、横電界駆動方式が相応しい。

この横電界駆動方式を実現する方法として次のような構造がある。図 1-25 は IPS(In-Plane Switching)構造 [19]、図 1-26 は FFS(Fringe Field Switching)構造 [19]と呼ばれている構造であり、それぞれ断面図と表示画素を示している。

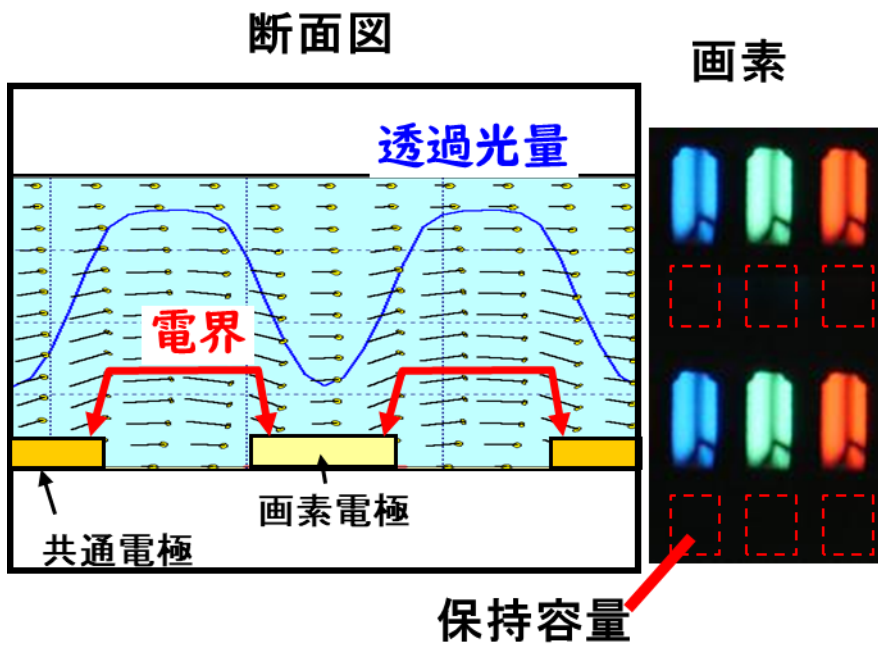


图 1-25 IPS(In-Plane Switching)構造

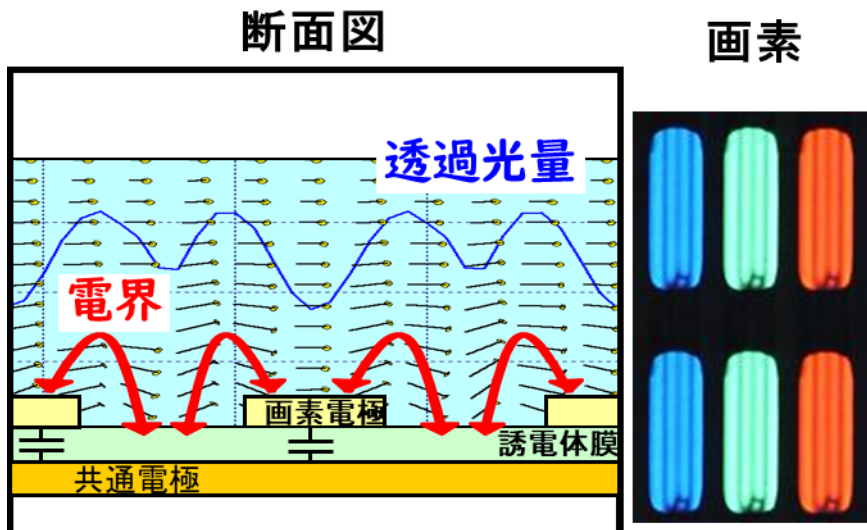


图 1-26 FFS(Fringe Field Switching)構造



図 1-25,26 の断面図は画素電極および共通電極の位置関係を模式的に示しており、この時の配向光学シミュレーション結果を重ねている。細線で液晶分子の方向を示す。図中左右に繋がっている波線が光の透過光量分布を表しており、各位置における透過光量を表している。縦軸に透過光量の高さ、横軸は断面図内の対応する位置とした。画素写真はそれぞれ6画素分の顕微鏡写真である。

横電界駆動方式を実現させるためには、液晶分子に水平方向に回転するトルクを与える必要がある。IPS 構造、FFS 構造共に画素電極に電圧を印加し、水平方向に電界成分を発生させることの出来る構造である。液晶分子は電界の水平方向成分によって回転する。

IPS 構造は水平方向に間隔を置いて配置した電極の一方（共通電極）の電位を固定し、もう一方の電極（画素電極）に電圧を印加する構造である。IPS 構造の場合に発生する電界は、電極間では水平成分が支配的であり電極上では垂直成分が大きくなる。このため電界の水平成分が水平方向の位置により大きく変化し、液晶分子の回転角度に影響する。結果、電極間と電極上では透過光量が大きく変化し、透過光量の水平位置依存性が高くなる。

FFS 構造は画素全体に配置した共通電極の上に誘電体膜を配置し、その上に画素電極を配置する構造である。FFS 構造では水平方向に画素電極と共通電極の両方が存在しない。IPS 構造と比較して画素電極の縁部に強い斜め電界が発生し、この電界の水平成分（横電界）に応じて液晶分子が回転する。横電界が弱い画素電極中央および画素電極間中央の液晶は弾性力により画素電極縁部の液晶に倣って配向する。横電界が強い部分と弱い部分の間の距離が IPS 構造に比べて短いため、横電界が弱い部分でも液晶分子は十分に回転し、透過光量の水平位置依存性が低くなる。このため、FFS 構造の方が画素内の透過光量均一性が高くなり平均的な透過光量が大きいの。

IPS 構造と FFS 構造の顕著な違いとして、画素電極と共通電極の間に大きな静電容量があることが挙げられる。1-3-1 項で説明したように、画素電極と共通電極の間の電位差は、画素電極に電荷を溜めることで実現する。この電荷を保持するために保持容量を必要とする。IPS 構造では表示部と別の領域に保持容量を

配置する必要がある(図 1-25)が、FFS 構造は画素電極と共通電極間に十分な静電容量があるため保持容量を配置する必要がない(図 1-26)。

以上のことから横電界駆動方式を実現する構造として、高い透過光量を得ることが可能な FFS 構造の採用が主流となっている。

液晶ディスプレイの断面構造を図 1-27 により説明する。図 1-27 は、図 1-14 の断面構造を、特に液晶を動かすための電極部を詳しく示した図となっている。横電界駆動方式のディスプレイを実現する電極構造として先に述べたように FFS 構造を採用している。液晶配向は基板と接している面で配向膜により固定されており、それ以外は電界によって再配向させることが出来る。図 1-26 で示す電界を発生させるために上下電極を、誘電体膜を挟んで設置してある。1 画素に一つの TFT を配置し、これにより表示データに対応する電位を供給する。

対向するガラス基板にはカラーフィルタ(Color Filter)を配置してあり各画素の画像データに対応する色のみを透過する領域を作っている。画素間には遮光層が配置される。これは、液晶層の厚さおよびカラーフィルタに厚さがあるため、隣接画素データの混色を防ぐために必要となる。

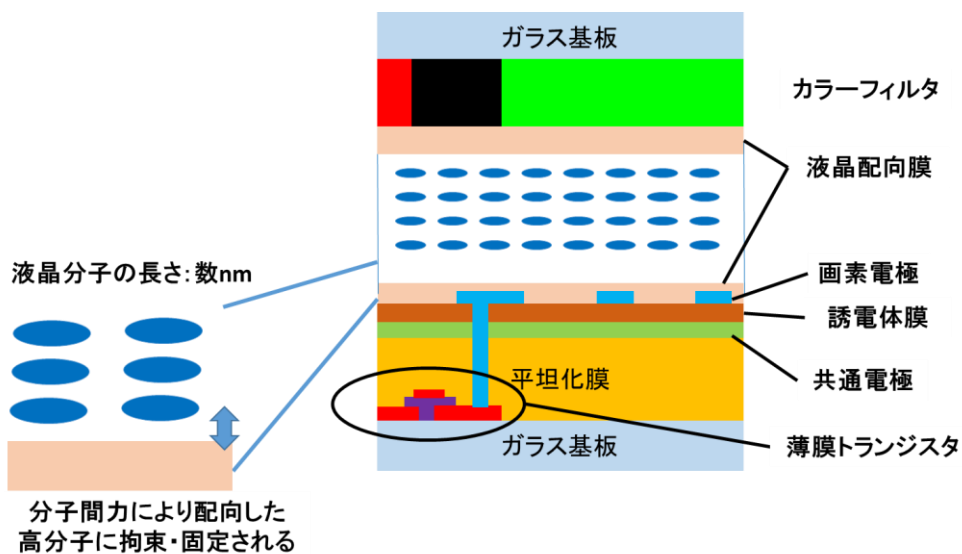


図 1-27 横電界駆動方式ディスプレイの断面図

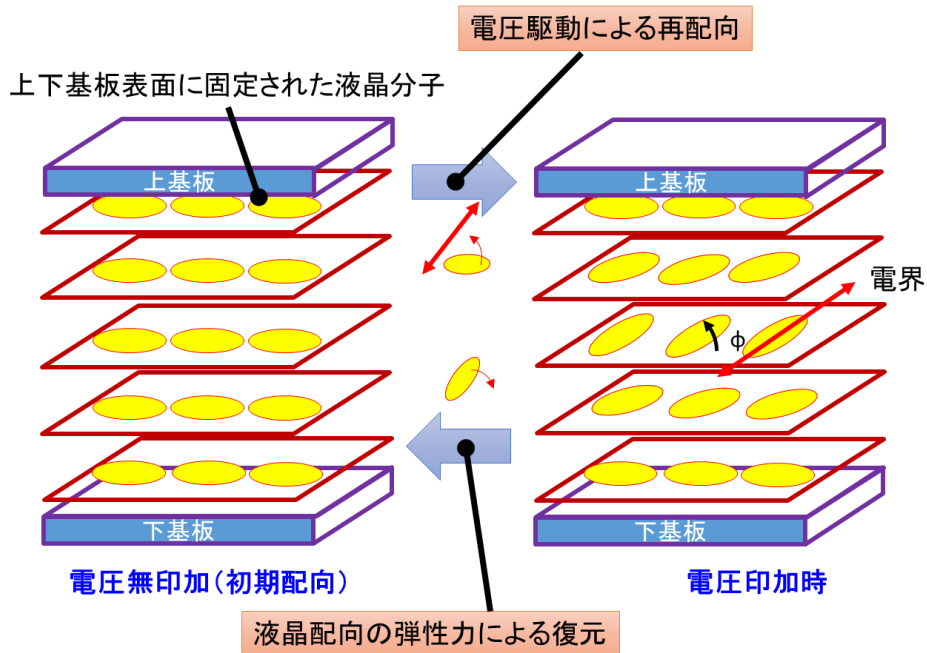


図 1-28 従来の横電界駆動方式の液晶分子の動き

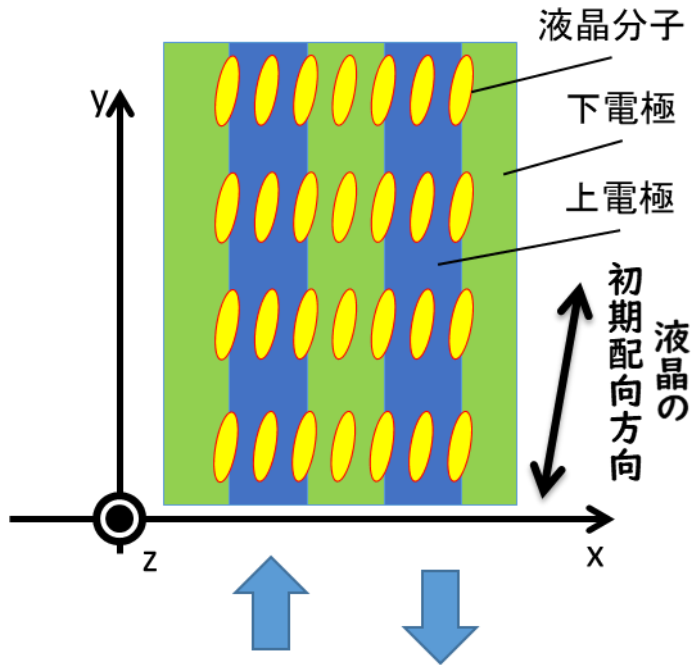
従来の横電界駆動方式における液晶の動きについて図 1-28 によって改めて詳説する。

液晶分子は数  $\mu\text{m}$  の距離を挟んだ上下基板の間に封入されている。また、内側表面にある液晶分子を配向膜によって固定する。配向膜へは分子間力により液晶分子 1 層が固定されている。液晶分子の短軸方向の長さは 1nm 以下であり、殆どの液晶分子は自由に動くことが出来る。一方で液晶分子は弾性力により近傍の液晶分子同士が同一の方向に並ぼうとする性質を持っている。このため、上下基板に固定された液晶分子を平行にすることで、上下基板間の液晶分子全体の方向を平行にすることが出来る。これが左図に示した初期状態である。

この初期配向方向に、電圧印加により、基板面内に平行な電界を発生させる。液晶分子はその誘電率の異方性(図 1-15)により、電界と液晶分子長軸が平行となる方向へ再配向する。上下基板間に均一に電界が発生させた場合には液晶分子全体が電界方向に向くトルクを受け、液晶分子は面内で回転する。基板表面にある液晶分子が固定されているため、液晶分子の回転角度は上下基板間で変化する。これが右図に示した電圧印加状態となる。

電圧印加状態から電圧無印加状態にした場合には外場がなくなり、液晶の弾性力により左図の初期状態に復元する。

### 電圧無印加状態



### 電圧印加状態

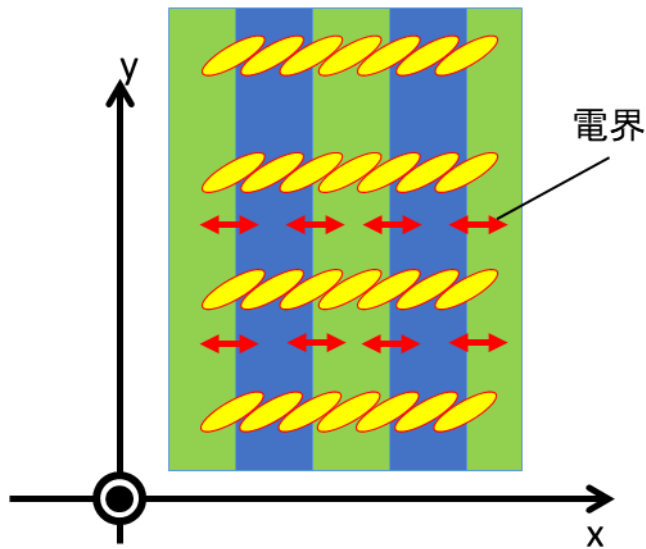


図 1-29 従来の横電界駆動方式の平面図

FFS 構造と液晶配向の方向の関係について、平面図によって説明する。図 1-27 の共通電極（下電極）および画素電極（上電極）は図 1-29 に示す形状をしている。液晶分子は上下基板間の任意の位置の配向方向を示している。

上電極と下電極が、液晶層の下部に面内平行で y 軸方向に向かって縞状に配置されている。液晶の初期配向は、この平行に配置された電極と y 軸方向に対して一定の角度を持たせている。この上下電極間に電位差を生じさせることで、電界を発生させた場合の図が下図となる。この電極構造により、図 1-28 で示した配向変化を得る。

電圧無印加状態（初期状態）から電圧印加状態への変化は外場を強くすることにより応答時間の短縮が可能である [20-23] が、電圧印加状態から初期状態への変化は液晶の弾性力により復元するため、液晶の特性のみによって応答時間が決定される。本論文で、この電圧印加状態から初期状態への復元時間を短縮する方法を議論する。

### 1-3-3 従来の応答時間の短縮手法

横電界駆動方式の初期配向へ復元する応答時間を短縮する手法として、従来提案されている代表的な手法を二つ示す。一つは初期配向に復元するためにも電界による外場を用いる電極を増やす方法、もう一つは液晶の弾性力による初期配向への復元の効果を高めるために、液晶層の厚さを薄くする方法である。

前者の手法は、縦電界駆動方式と横電界駆動方式を組み合わせた方式が報告されている [24,25]。縦と横の異なる方向の電界を発生させ、片方の電界方向を液晶の初期配向とするものである。この駆動方式で、液晶分子は 1-3-2 で述べた縦電界駆動方式と同様の動きをするため、視野角特性で不利となる。近年では FFS 構造の上下電極間に誘電体と電極を一層ずつ追加し、図 1-30 に示す電極構造によって液晶の初期配向方向にも電界を発生させる報告もある [26]。これらの 2 方向へ電界を発生させる手法は、平面的に複雑な構造となるだけでなく、付加した電極を駆動するために TFT の数を増加させる必要があり、生産上大きな課題がある。

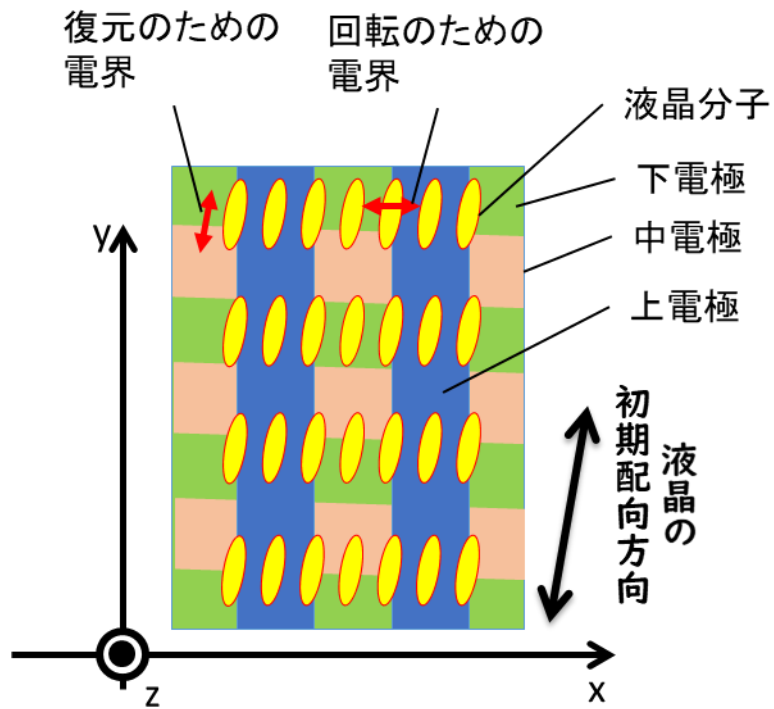


図 1-30 電極を増やす方法の平面図

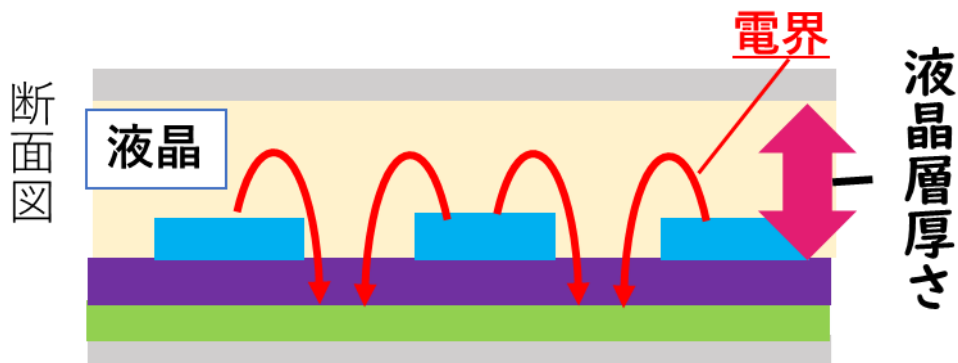


図 1-31 液晶層の厚さを薄くする方法

後者の手法は従来より利用されている（図 1-31） [27]。液晶層の厚さを薄くする方法による応答時間の短縮は、基板上の液晶配向が固定されていることによる弾性力を利用したものである。しかし、液晶層の厚さを薄くすることは生産上の課題がある。また、液晶の  $\Delta n$  を大きくすることにも課題があり、 $d \Delta n$  が小さくなることで透過光量が下がる要因ともなる。そのため、液晶層の厚さを薄くする以外の方法による応答時間の短縮を目指す必要がある。



## 1-4 本研究の目的

本研究の目的は、VR用途に適した応答時間の液晶ディスプレイを実現するため、表示の立下り応答時間を短縮することに設定した。

筆者は、液晶の弾性力を液晶層の厚さと垂直の方向、すなわち基板平面に対して水平方向にも発生させることを提案した。

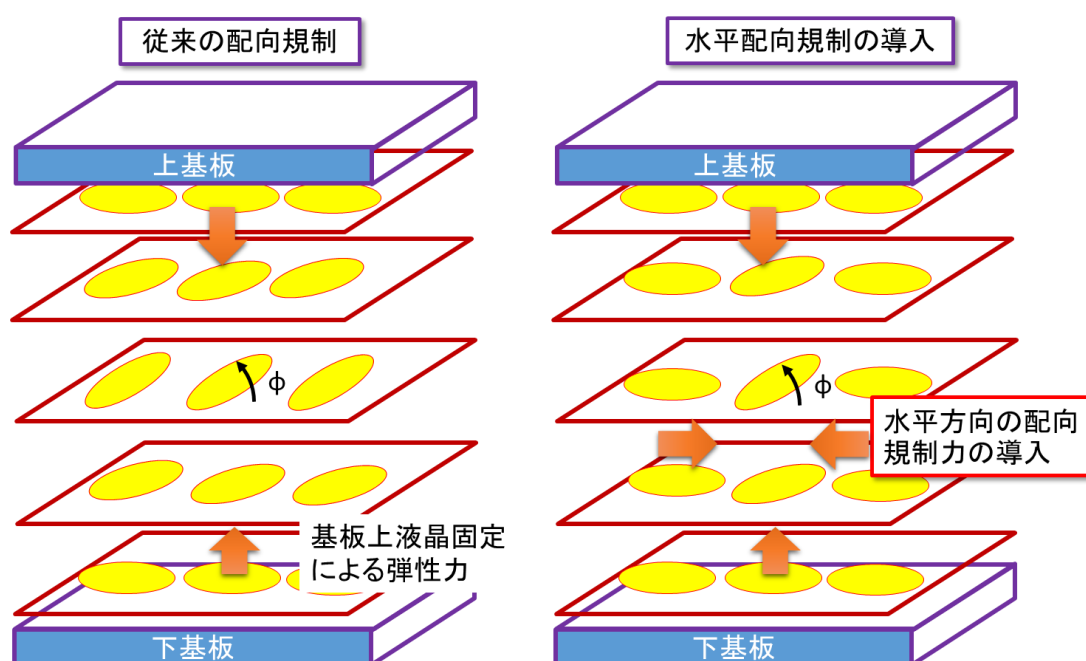


図 1-32 水平配向規制導入による弾性力向上概念

図 1-32 の左図に、図 1-28 を使い従来の横電界駆動方式に働く液晶の弾性力を示した。液晶の配向が固定されているのは上下基板表面のみであるため、弾性力は上下基板から 1 次元的に働いている。これを液晶層の厚さ方向だけでなく、水平方向の面内にも液晶を固定させることを考える。その様子の概念図が右図である。上下方向と左右方向に固定された液晶分子を設けることで、復元力の 2 次元化により、液晶ディスプレイの応答を高速化し、応答時間の短縮を図るものである。

## 1-5 本論文の構成

第1章の緒言では、液晶ディスプレイの発展の経緯を踏まえ、本研究の目的およびその重要性を述べた。

第2章では、従来の1次元の場合と比較し、液晶配向規制を2次元で考えた場合の応答時間を考察することで、液晶応答時間が短縮する原理について述べる。

第3章では、2次元面内対称の配向規制を、従来の横電界駆動方式において電極構造を変えるだけで実現する方法を述べる。また、応答時間短縮の効果について実験の結果を述べる。

第4章では、2次元面内対称液晶配向を開口部全体で実現する電極構造を提案することで、高解像度液晶ディスプレイにおいて透過光量を向上させる手法を述べる。また、それにより作製したVR用途の液晶ディスプレイの特性を述べる。

第5章の結言では、本研究で得られた結論をまとめる。

## 第2章 2次元液晶配向規制による高速応答ディスプレイの原理提案

この章では、液晶配向規制を従来の1次元の場合と比較し、2次元で考えた場合の応答時間を考察する。これにより、液晶応答時間を短縮する原理の提案と従来の横電界駆動方式と比較した液晶応答時間短縮の見積もりを行う。

考察に当たって、液晶を方向性を持った分子の塊（ダイレクター）と扱い、連続的に変化するものとする弾性連続体理論を用いる[28-30]。この理論は液晶の巨視的な挙動を記述する理論として知られる。

### 2-1 液晶配向規制を考察するための配向分布モデル

まず、従来考察されている1次元液晶配向規制時の系を、図2-1に示す。

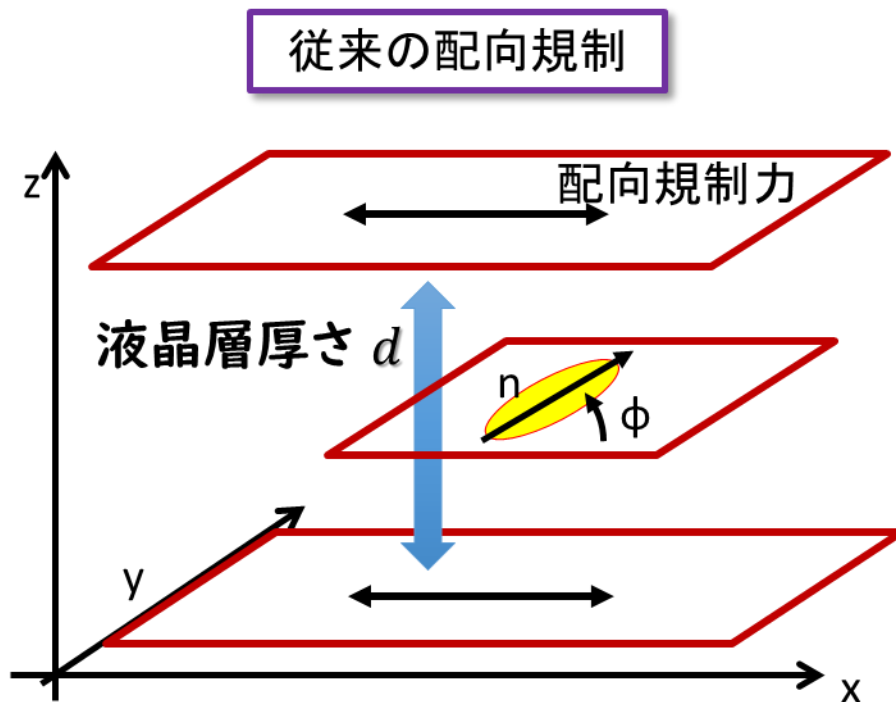


図 2-1 従来の液晶ディスプレイにおける配向規制

上下基板に液晶が挟まれており、液晶のダイレクターをベクトル  $\mathbf{n}$  で示す。 $x, y, z$  座標系において、上下基板を  $x, y$  平面に平行に配置し、 $z$  軸方向に距離  $d$  を離して配置する。液晶は上下基板表面に配向が規制されて固定されており、 $x, y$  平面と平行な位置では一様な配向を持つ。即ち、ダイレクター  $\mathbf{n}$  は変数として  $z$  のみを持ち、 $d$  は上下基板間の距離で定数である。横電界駆動方式として、液晶の配向方向を  $x, y$  平面内で回転するものとした場合、次のように表わすことが出来る。  $\phi$  は  $x$  軸からの角度とする。ただし、 $\phi(0) = \phi(d) = 0$  である。

$$\mathbf{n}(z) = (\cos \phi(z), \sin \phi(z), 0) \quad (2.1)$$

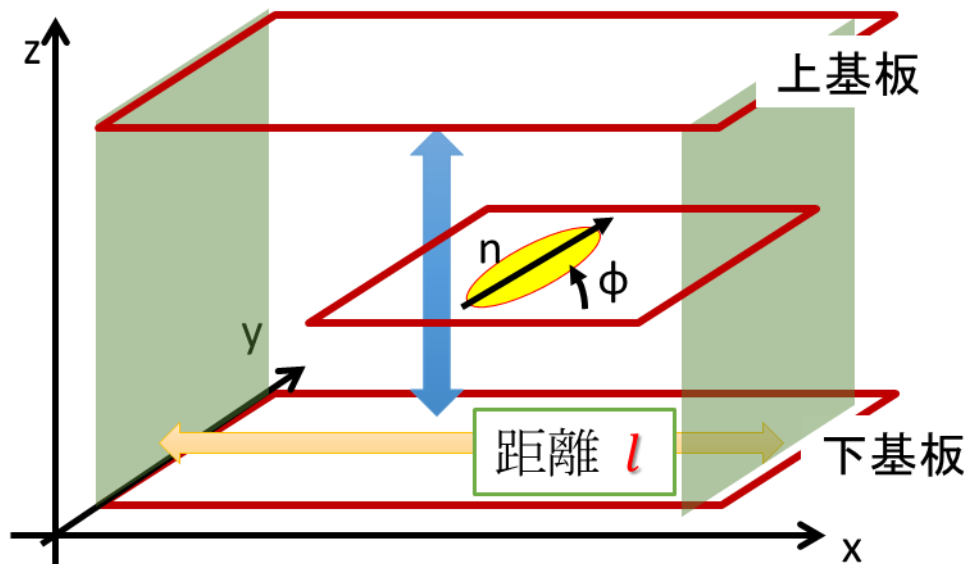


図 2-2 水平方向への配向規制力の導入

2次元液晶配向規制の系はこれを拡張し、図 2-2 を用いて示す。1次元の時と同様に上下基板に液晶を固定するが、加えて  $x$  方向にも固定する  $y, z$  界面を考える。この時液晶のダイレクター  $\mathbf{n}$  は  $x$  方向にも変化し、定数としてこの界面間距離  $l$  を持つ。液晶の配向方向を同様に  $x, y$  平面内の回転のみを考えた場合、ダイレクター  $\mathbf{n}$  は次のように表わすことが出来る。ただし、 $\phi(x, 0) = \phi(x, d) = 0$ 、 $\phi(0, z) = \phi(l, z) = 0$  である。

$$\mathbf{n}(x, z) = (\cos \phi(x, z), \sin \phi(x, z), 0) \quad (2.2)$$

液晶分子は弾性力により連続的に変化している。液晶が固定されている基板間の中央で最も回転している時の状態は、図 2-3 のように表わせる。

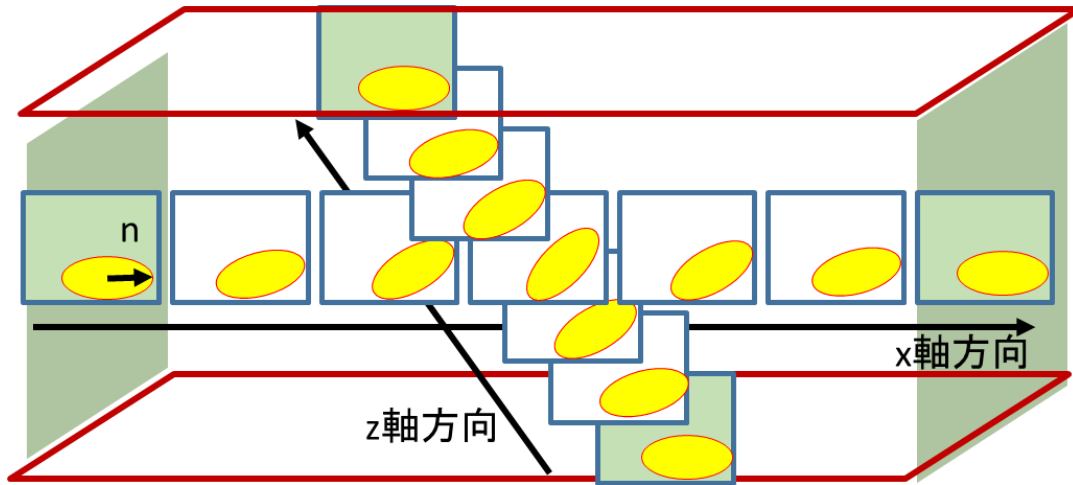


図 2-3 水平方向の配向規制力を導入した横電界駆動方式の液晶配向

ダイレクターを含む四角は各概略位置の  $x, y$  平面であり、 $x=l/2$  かつ  $z=d/2$  の位置を中心としてダイレクターの方位を示している。 $x=0, l$  および  $z=0, d$  平面において同一方向に固定されており、基板平面から離れるに従い液晶の回転角度が大きくなる。 $x=l/2$  かつ  $z=d/2$  で回転角度が最大になり、これらの変化は連続的である。最大回転角度を  $\phi_m$  としたとき、連続的に変化する液晶配向を三角関数で表わすと次式のようなになる。2次元液晶配向規制を導入した場合の項が

$$\phi(x, z) = \phi_m \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) \quad (2.3)$$

追加されている。

## 2-2 弾性連続体理論による液晶の応答時間の算出

### 2-2-1 従来の横電界駆動方式の応答時間

液晶の弾性連続体理論は、連続的に変化する配向間に弾性力が働くとし、弾性により自由エネルギーを持つとする理論である。この時、液晶は 3 種の弾性変形があると考えられ、それらは広がり、ねじれ、曲がりの変形である。弾性定数としてそれぞれ  $K_{11}$ ,  $K_{22}$ ,  $K_{33}$  と記述する。それぞれの変形を図 2-4 に示した。

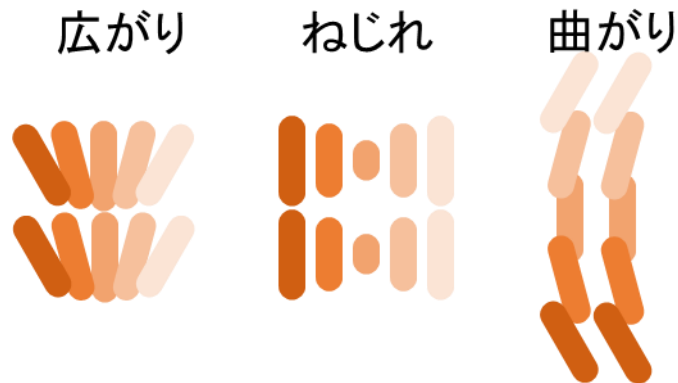


図 2-4 液晶配向における 3 つの弾性変形

この時、自由エネルギー密度は、フランク-オセーンの弾性自由エネルギー密度と呼ばれ、それぞれの変形に対して次のように与えられる。

$$F = \frac{1}{2}K_{11}(\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2}K_{22}\{\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})\}^2 + \frac{1}{2}K_{33}(\mathbf{n} \times \nabla \times \mathbf{n})^2 \quad (2.4)$$

この自由エネルギー密度を用いて、従来考察されている 1 次元液晶配向規制時の配向変形の時間応答について説明する。液晶は同一方向に一様に配向している時に自由エネルギーが最小となる。前項で考察した横回転により連続的に

変形している状態から一様に配向している状態への時間変化は、この自由エネルギー密度を使った運動方程式によって求めることが出来る。液晶が重心の移動を伴わず回転のみによって変形する場合、さらに式 2.1 で記述するように x,y 平面の回転のみを考えた場合、液晶の回転角度  $\phi(z)$  の運動方程式は、次式 2.5 で記述される。

$$K_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \gamma_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.5)$$

ここで、 $\gamma_1$  は液晶の回転に対応する粘性係数である。変形した配向方向を表わす式 2.3 に緩和の時定数  $\tau$  の項を加え、x 軸方向に配向変化する項を除いた式 2.6 を解として運動方程式に与えると、応答の時定数は式 2.7 として求まる。

$$\phi(z, t) = \phi_m \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (2.6)$$

$$\tau_{1D} = \gamma_1 / \left[ \frac{K_{22}}{d^2} \right] \pi^2 \quad (2.7)$$

式 2.7 が示す通り、緩和の液晶応答は液晶層の厚さの二乗に比例することが広く知られている [27,31,32]。この式は液晶分子の配向の応答を表わすものであるが、光学の応答とも比例関係にある [33]。

## 2-2-2 2次元液晶配向規制時の応答時間の導出

2次元液晶配向規制時の配向変形の時間応答について、1次元の場合と同様に考察する。この場合の液晶の回転角度  $\phi(x,z)$  の運動方程式は、式 2.8 のように

記述出来る。一般的に液晶の広がり と 曲がりの弾性係数が近いことから  $K_{11}=K_{33}$  と仮定する。

$$K_{22} \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + K_{11} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = \gamma_1 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2.8)$$

配向方向の解は 1 次元の場合と同様に緩和の時定数  $\tau$  の項を加え、式 2.9 とし て与えることが出来る。式 2.3 で示した通り、水平方向に固定されている距離の  $l$  の項が 1 次元の場合と比較して加わっている。

$$\phi(x, z, t) = \phi_m \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{d}\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (2.9)$$

この時、時定数  $\tau$  は式 2.10 で表わせる [34-36]。

$$\tau_{2D} = \gamma_1 / \left[ \frac{K_{22}}{d^2} + \frac{K_{11}}{l^2} \right] \pi^2 \quad (2.10)$$

2 次元液晶配向規制の導入により、式 2.7 に対して分母に  $K_{11}/l^2$  が加わる。これは正数であるため、 $\tau$  を小さくする効果が期待出来る。液晶の  $K_{11}$  は一般的におおよそ  $K_{22}$  の 2 倍である [37]。距離  $l$  を液晶層の厚さ  $d$  と同値とし、 $K_{11}=2K_{22}$  とした場合、式 2.10 は式 2.11 のように変形することが出来る。

$$\tau_{2D} = \gamma_1 / \left[ \frac{K_{22}}{d^2} + \frac{K_{11}}{l^2} \right] \pi^2 = \gamma_1 / \left[ \frac{K_{22}}{d^2} + \frac{2K_{22}}{d^2} \right] \pi^2 = \gamma_1 / 3 \left[ \frac{K_{22}}{d^2} \right] \pi^2 \quad (2.11)$$

これにより 2 次元液晶配向規制の導入により従来の横電界駆動方式と比較して、応答時間を 1/3 程度短くすることが予想出来る。



## 2-3 まとめ

2次元液晶配向規制の導入による緩和応答時間の短縮について、液晶の弾性連続体理論に基づき考察した。

垂直方向に加えて水平方向に液晶配向を固定する平面を配置し、2次元液晶配向規制を導入した場合に連続的に配向する液晶分布を示した。この時の応答時間を、弾性連続体理論を用いて算出し、水平方向の配向規制による応答時間への影響を見積もった。

## 第3章 2次元面内対称の液晶配向を実現する電極構造の提案

この章では、2次元面内対称の液晶配向を、従来の横電界駆動方式と同様の製造法を用い電極構造の工夫によって実現する手法を提案する[34,38]。また、その電極構造を用いて作製したテストデバイスの光学評価結果によって、液晶応答時間の短縮が実現している様子を示す。

### 3-1 2次元面内対称の液晶配向によるトルクバランス

まず、2次元面内対称の液晶配向を実現するにあたり、基板に対して配向膜で固定するのと同様に液晶を物理的に固定する方法を考察する。

図 3-1 は構造物の配置など物理的な固定によって水平方向に配向規制を導入した場合の液晶デバイスの概念図である。ガラス基板上に液晶を固定するための配向膜を配置し、液晶分子を基板と平行方向に固定している。ここまでは従来のデバイス構造と同様であり、ここに2次元配向規制を実現するため、水平方向に液晶を固定するために設けた構造物を加える。この構造物は、上下基板に配置した配向膜と平行に液晶を固定する機能を持つ。これにより液晶分子は、液晶デバイス全体として同一方向を向く初期状態を持つ。このデバイスに横電界を印加することにより、固定されていない液晶を回転するよう駆動する。上下基板の距離  $d$  と構造物間距離  $l$  を同程度にすることで、応答時間の短縮を期待することが可能である。液晶層中に壁を作製する手法として、液晶高分子を用いる手法が報告されている[39,40]。この手法には、上下基板間距離と同程度の距離での構造物の配置や構造物表面への配向処理といった実現そのものに対する課題や、構造物の幅による透過光量の損失、信頼性の低下といった課題も考えられる。

そこで、図 3-2 に示すように液晶回転方向のトルクバランスにより液晶が初期配向から回転しない固定端を生じさせることを考えた。トルクバランスにより液晶を初期配向から動かない部位を生じさせる方法としては、本論文とは異なり垂直配向を初期配向にもち、上下基板に横電界を印加させることによって、立下り応答時間を短く出来ることが報告されている[41]。しかし、この方式では

上下基板上に TFT 回路を形成する必要がある、実現が困難であることが分かっている。そのため、従来の横電界駆動方式の構造を検討した。

面内で左回りする部位と右回りする部位を作り、回転トルクの釣り合う領域を作る。この領域では液晶が回転せず固定端となり、水平方向への配向規制を実現させる。また、このトルクバランスを、従来の横電界駆動方式と同様の電極層構造を用いて実現することは、製造上の課題も少なく工業的な利点の多い方式となる。

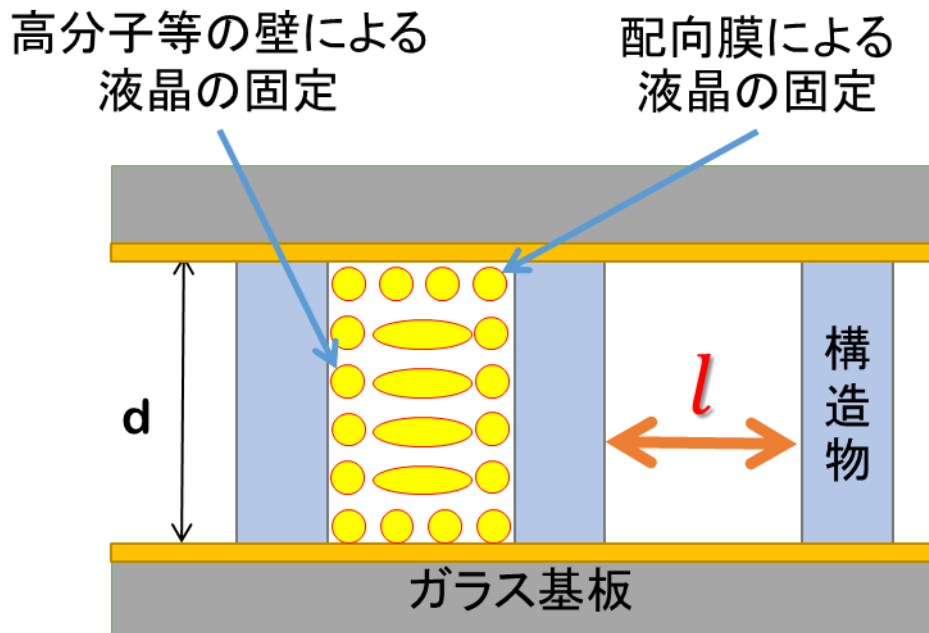


図 3-1 物理的な固定による水平方向配向規制の概念図

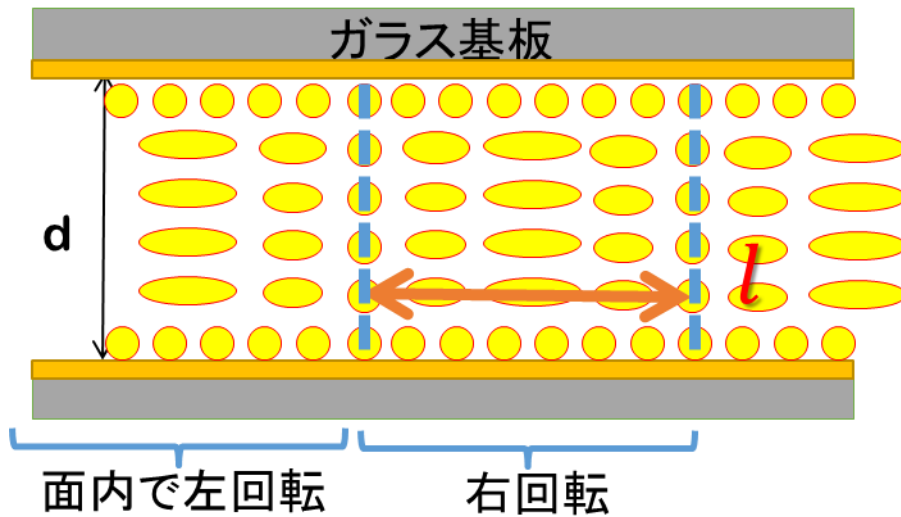


図 3-2 液晶配向のトルクバランスによる固定端導入の概念図

## 3-2 電界分布を利用した水平方向の配向規制

### 3-2-1 縞状電極構造を用いた2次元面内対称の横電界駆動方式

従来の横電界駆動方式を、図 1-27 の断面図、図 1-29 の平面図によって説明した。この平面図に表わした電極構造および液晶の初期配向方向を工夫することにより、固定端を実現する方法を考案した。

図 1-27 に示す断面構造をそのまま利用する。また、液晶を駆動するための電極構造も図 1-29 の電極構造をそのまま用いる。すなわち、図 3-3 に示すように下電極は基板面内に一様に配置、上電極を縞状に配置する。ここで液晶分子の初期配向を縞状の上電極と平行となるように設定する。図中の楕円によって液晶分子の配向方向を示している。上下電極間に電圧を印加した場合に生じる電界を図 3-4 に矢印で示す。この電界により、誘電分極を起こして液晶分子には電界と平行となる方向への回転するトルクが働く。このトルクにより右回りと左回りの液晶回転方向が交互に生じれば、その中間にある液晶分子はバランスが取れ、初期配向方向が維持される。この初期配向方向が維持されている部分が固定端となる。縞状の上電極の中央、および上電極間の中央に固定端を生じさせることが出来るため、応答時間の短縮に關与する固定端間距離 $l$ は、縞状電極ピッチの半分になる。

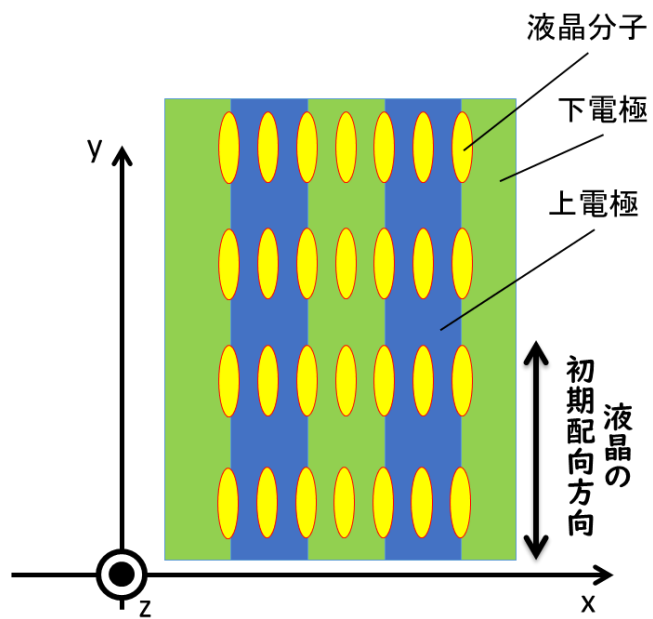


図 3-3 配向固定端形成時の電圧無印加状態の配向分布

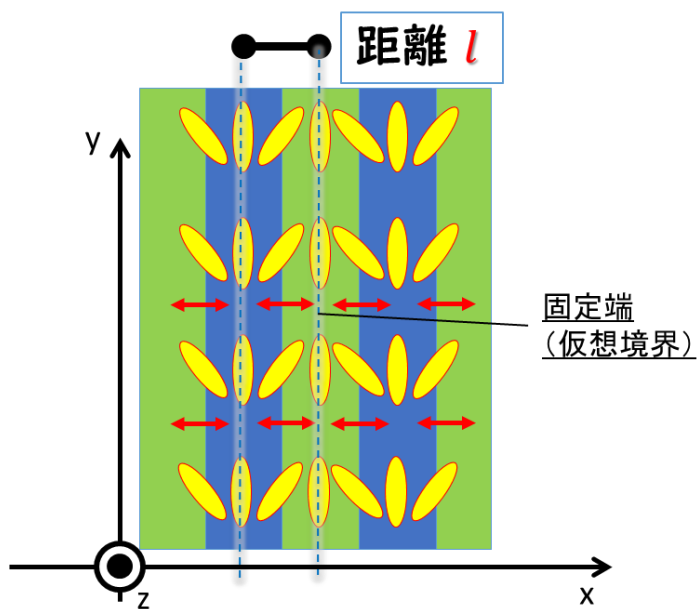


図 3-4 配向固定端形成時の電圧印加状態の配向分布

この縞状電極構造を使い、テストデバイスを作製し表示状態を確認した。デバイスの電極構造を図 3-5 に、断面構造を図 3-6 に示す。

電極構造を下ガラス基板に形成する。ガラス基板上駆動部分全体に ITO(Indium Tin Oxide)の薄膜を形成する。その上に絶縁膜として窒化シリコン薄膜を約 200nm 形成する。その上に ITO の薄膜を形成し、縞状にパターンニングを行う。ITO の膜厚はともに 70nm とした。最後に、液晶を配向させるため、全面を覆うように異方性化したポリイミド膜を配向膜として形成する。もう一方のガラス基板には配向膜のみを形成する。これらのガラス基板を配向膜が内側となるよう対向して貼り合わせ、液晶材料を封入する。液晶層の厚さは 2.5 $\mu\text{m}$  とした。

図 3-5 は図 3-3 に示した電極構造と同様であり、上述した 2 層の ITO によって上下電極を構成する。縞状となる上電極の幅は 2.5 $\mu\text{m}$  とし、電極間隔も 2.5 $\mu\text{m}$  とした。配向膜による液晶の初期配向は、縞状電極と平行である。図 3-5 の上に示す楕円は液晶分子の模式図であり、後に示す図と参照しやすくするため図示したものである。

液晶の初期配向と平行方向および直交方向に偏光軸を持つ 2 枚の偏光板間にこのテストデバイスを挟み、上下電極間に 1kHz の矩形波で液晶分子が十分動作する電圧を印加した状態で、顕微鏡により表示状態の観察を行った。

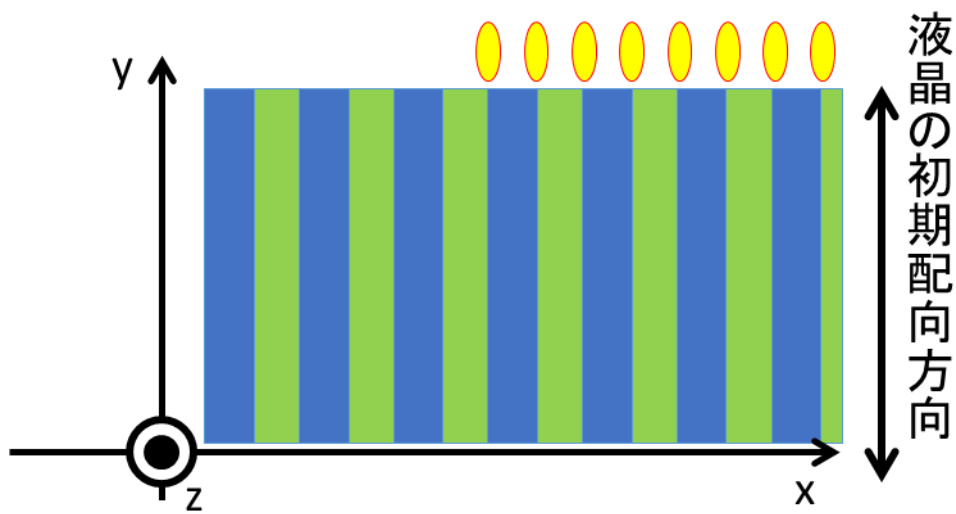


図 3-5 テストデバイスの電極構造平面図

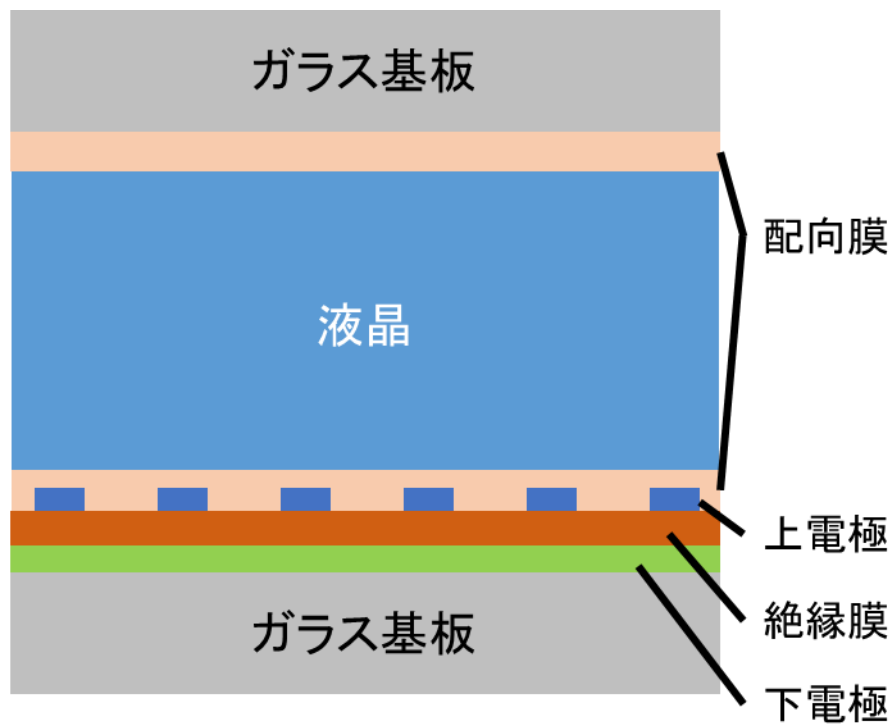


図 3-6 テストデバイスの電極構造断面図



このテストデバイスは、場所により異なる表示状態を示した。図 3-7 は、図 3-4 において想定した液晶配向が実現し、電圧印加時に 2 次元面内対称の液晶配向を得られている部位の観察像である。直交した偏光板により、液晶が回転しない部位は暗く、回転している部位は明るく観察される。明るく観察されている部位は縞状電極の辺の部分であり、暗い部位は縞状電極中央および電極間中央であった。これは液晶回転方向が、明るい部分で交互に反対方向になっており、観察像の上に示した楕円の方向に液晶が回転していることが推測出来る。この液晶分子の回転方向が反対方向になっていることによりバランスが取れ、液晶分子の回転しない固定端が実現している。

別の場所では図 3-8 のように観察された。図 3-7 と同様に明暗が観察され、液晶分子の回転方向が推測出来る。暗状態の部分が図 3-7 の場合と比較して明るくなっている領域が観察されている。これは縞状電極中央もしくは電極間中央の液晶分子も、ある程度回転していることを示している。これは、電界により生じた液晶分子の回転方向が、固定端を実現したい部位の左右で同一方向になっており、左右の回転によるトルクのバランスが取れていないと考えられる。この表示画像から推測する回転方向を図 3-8 の上側に示す。枠で囲った部分では、液晶分子の回転方向が全体として同一方向であり、固定端が実現しない。また、これらの固定端は電圧を印加、無印加と切り替えるごとに発生場所が変わり不安定であった。

本テストデバイスの作製および観察により、縞状電極構造を用いた横電界駆動方式により 2 次元面内対称の液晶配向構造の実現が可能であることを確認した。一方でこの液晶配向構造を実現する固定端位置を安定させるに至らなかった。このことは固定端間距離が一定にならないことを意味し、再現性をもって安定した応答時間の短縮を得られないことになる。2 次元面内対称の液晶配向構造を、液晶ディスプレイとして使うためには、この固定端の安定化を行わなければならない。

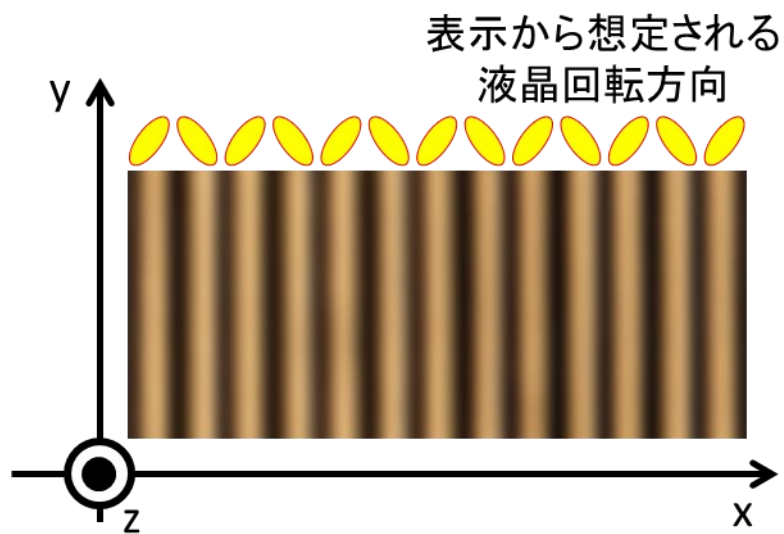


図 3-7 テストデバイスの電圧印加時に望ましい表示状態

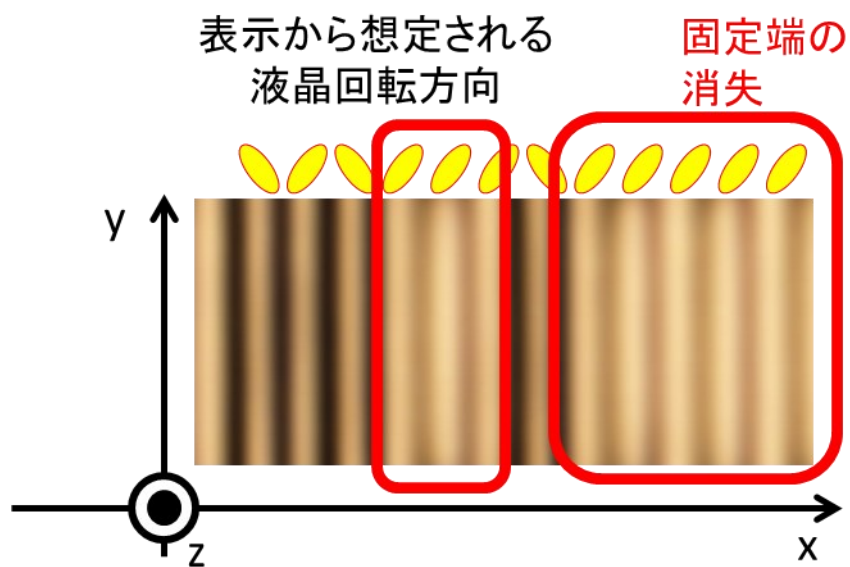


図 3-8 テストデバイスの電圧印加時に望ましくない表示状態

### 3-2-2 両枝電極構造を用いた 2 次元面内対称の横電界駆動方式

縞状電極構造を利用したテストデバイスを作製し、電圧を印加することによって 2 次元面内対称の液晶配向を実現可能であることを示した。一方で 2 次元面内対称の液晶配向を実現するために不可欠である固定端を、安定的に形成することが必要となる。図 3-4 において、初期状態の液晶分子長軸が y 軸に平行であるのに対して、液晶分子を回転させるための電界が y 軸直交である。この場合、右回り、左回りの自由度があり液晶分子の回転方向を必ずしも決定出来ない。この回転方向を決定する手段を考える。

液晶分子は 2 章および前項で指摘した通り、弾性力により隣接する液晶分子と同一方向に向こうとする性質を持つ。この性質を利用するため、部分的に液晶分子の回転方向を右回りもしくは左回りとなる部分を作り出す。デバイス全体の回転方向の決定のため、この性質を利用する。

まず、液晶の回転方向と電界の関係について図 3-9 を用いて改めて説明する。 $\Delta\epsilon$ が正の液晶分子は電界と平行となるように回転するため、楕円で示した液晶分子は赤矢印で示した電界によって再配向する。左図のように電界と液晶分子が直交している場合、電界の向きへ液晶が配向するための回転方向は、点線矢印で示した左回りと破線矢印で示した右回りのどちらになるか決定されない。一方で右図のように電界と液晶分子を直交でない角度とした場合は、鋭角となる方向に液晶分子は回転し配向する。この場合右回りの破線矢印方向である。

電極構造によって電界を液晶分子と鋭角となるようにするため、図 3-10 に示すように縞状電極構造の一部に y 軸と平行でない構造を設け、発生する電界を x 軸平行と違えるようにする。これにより、変更した電極構造部位では液晶分子の回転方向が破線矢印で示した方向に定まる。隣接する液晶分子の回転方向が弾性力により揃い、縞状電極の辺部分の液晶分子全体が、同一方向に回転することを期待する。この場合、変更した電極構造部位から遠く離れると液晶分子の回転方向は一方向に決定されにくくなる。

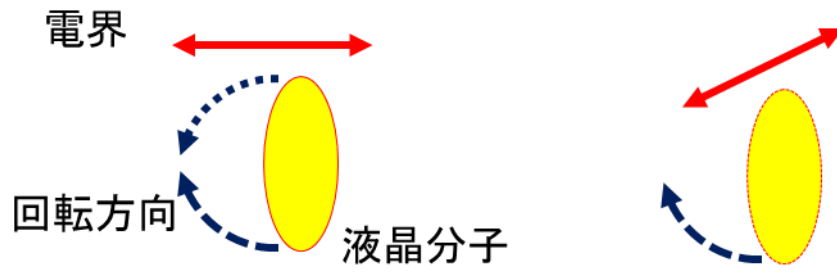


図 3-9 電界と液晶分子の回転方向

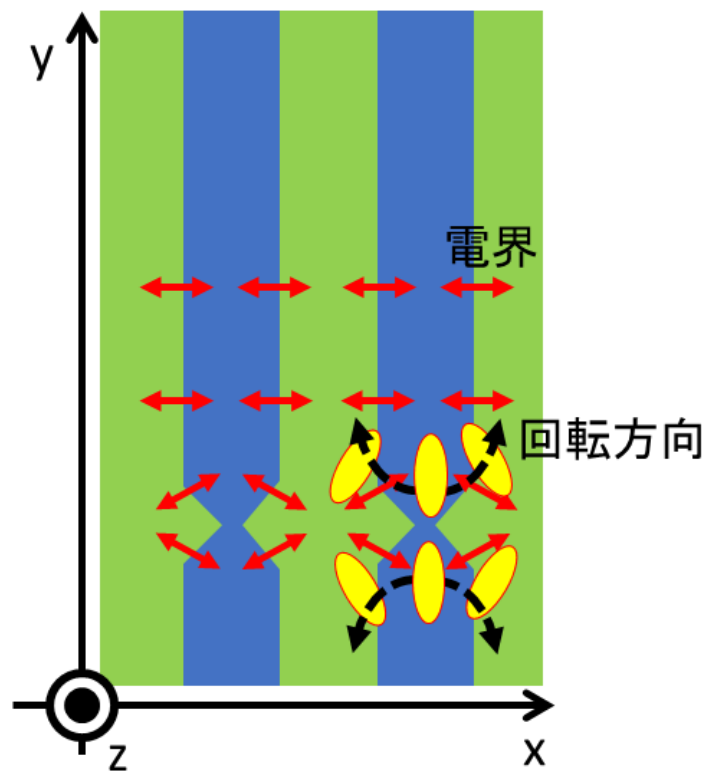


図 3-10 縞状電極構造の設計例 1

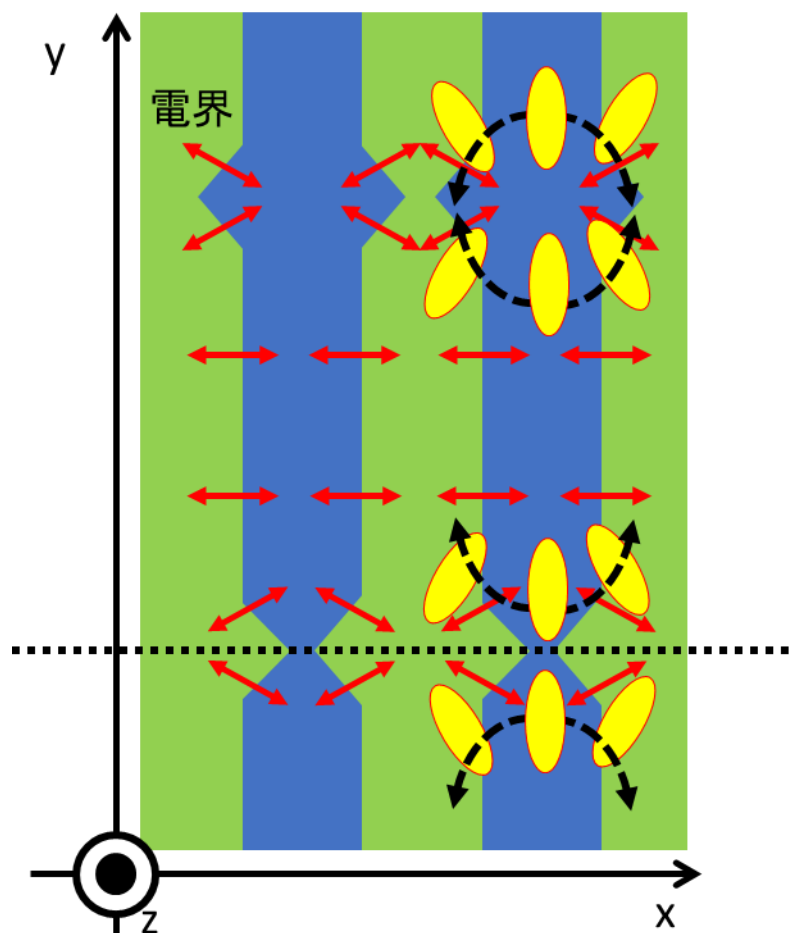


図 3-11 縞状電極構造の設計例 2

次に、 $x$  軸に平行な電界によって回転する液晶分子の回転方向を、より確実に決定する方法として、液晶分子の回転方向が同一である部位に囲まれる領域を作製することを考える。図 3-11 のように縞状電極を膨らませた部分とへこませた部分を周期的に作製することにより、 $x$  軸に平行な電界部分を、 $x$  軸と非平行でかつ同一方向の電界で挟む方法である。これによって回転方向の定まった同一の部位により挟みこみ、縞状電極辺部分の液晶分子全体の回転方向が弾性力により揃う効果が高まると考えられる。

図 3-11 の不連続な縞状電極構造では、液晶分子の回転方向を特定方向に決定することを期待出来るが、その回転方向は y 軸方向に右回りと左回りが交互に現れる。これは y 軸と平行に実現しようとする固定端の左右の液晶分子の回転方向が、点線を境界に y 軸方向に交互に変わることを意味する。回転方向が変わる部位で固定端が不安定となり、不連続化することを回避するため、図 3-11 の考え方を発展させた構造として両枝電極構造を提案した。

図 3-12 に 2 次元面内対称の液晶配向を安定的に実現させるために考案した両枝電極構造の平面図を示す。下電極は縞状電極構造と同様にデバイス全体に一樣に形成する。上電極は x 方向に延びた幹部分から y 軸方向の上下両側へ枝を伸ばした構造とする。枝部分は幹部分を挟んだ上下において x 軸方向に半ピッチずらした位置に形成する。植物の枝葉でいう互生の配置である。

幹部分から上半分の範囲の電界から考察する。枝部分の辺部分は縞状電極構造の時と同様に x 軸方向に平行であるが、枝部分の先端部分において図中右側では右上方向、左側では左上方向に向いている。また、枝部分の根元部分においては図中右側では右上方向、左側では左上方向に向いている。液晶分子の初期配向が y 軸平行である場合、枝部分の右側では先端、根元共に液晶分子は右回りが優位となり、枝部分の左側では左回りが優位となる。枝部分の辺部分は同一の回転方向に挟まれているため、全体として枝部分の右側で液晶分子は右回りし、左側では左回りする。

幹部分から下半分も同様に考えることが出来る。こちらの液晶分子は、枝部分の左側で右回りし、右側では左回りする。

これらにより、枝部分を挟んで液晶分子の右回りと左回りが安定的に実現し、これらのバランスにより固定端の実現が期待出来る。また、枝部分を互生配置していることにより幹部分を挟んだ上下で液晶分子の回転方向を同一にすることを可能としている。これにより、y 軸に平行に形成される固定端を挟んだ液晶分子の回転方向が同一となるため、連続して安定した固定端の形成が期待出来る。

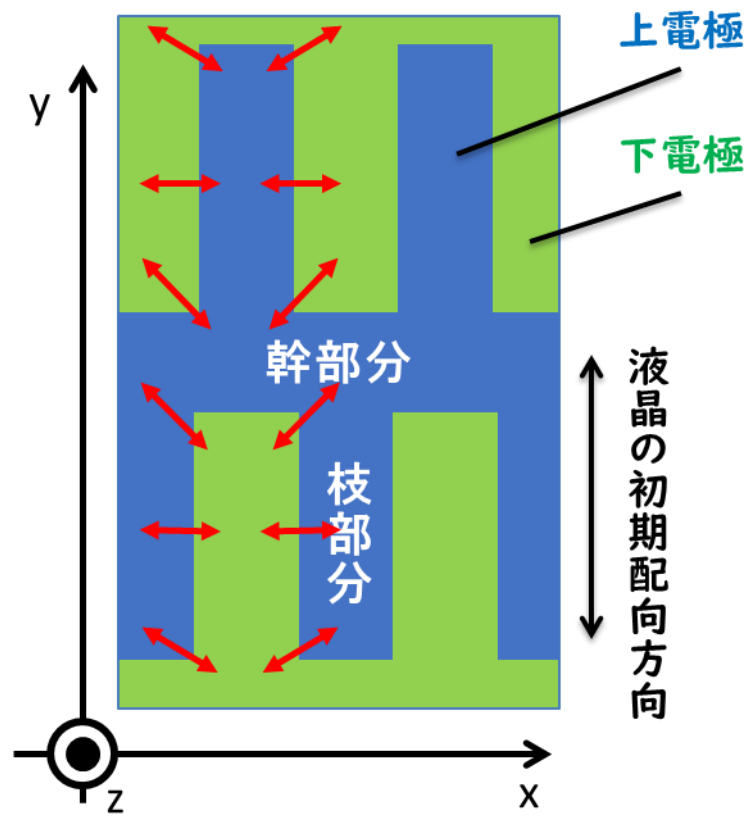


図 3-12 両枝電極構造の平面図

図 3-12 に示した両枝電極構造を用いた場合の液晶分子配向方向を配向シミュレーションにより算出した結果を図 3-13 に示す。両枝電極構造の液晶分子配向状態を 2 章に紹介した弾性連続体理論によって計算した（シンテック株式会社製 LCD master 3D を使用）。境界条件は x 方向、y 方向共に連続周期境界条件とした。

図 3-13 では図 3-12 の両枝電極構造に重畳し、電圧印加時の液晶分子配向方向を先端に楕円を付けた黒棒で表した。また、液晶配向方向は液晶層の厚さ方向で変化するが、電極を形成した基板に近い位置の電界が強いため、液晶配向は厚さ方向で偏りが生じる。そのため、ここでは電極を形成した基板から液晶層の厚さ方向の 1/3 の距離の液晶配向方向を示した。

電圧無印加の初期状態で液晶分子は y 軸平行である。図 1-13 において液晶分子の y 軸に対して傾いている方向により、電圧印加によって起きる回転方向が見て取れる。x 軸方向に図中右から右回り、左回り、右回り、左回りの領域が確認出来る。それぞれの領域間では液晶分子の回転のバランスにより初期配向から液晶分子が回転しない領域が、y 軸方向と平行に形成している。初期配向方向から最も大きな角度に電界が発生する枝部分の辺の部分で液晶が大きく回転しているが、その回転方向が先端と根元の液晶回転方向と同一方向である。

以上示した通り、両枝電極構造を採用することにより、2次元面内対称の液晶配向を実現出来ると考えられる。



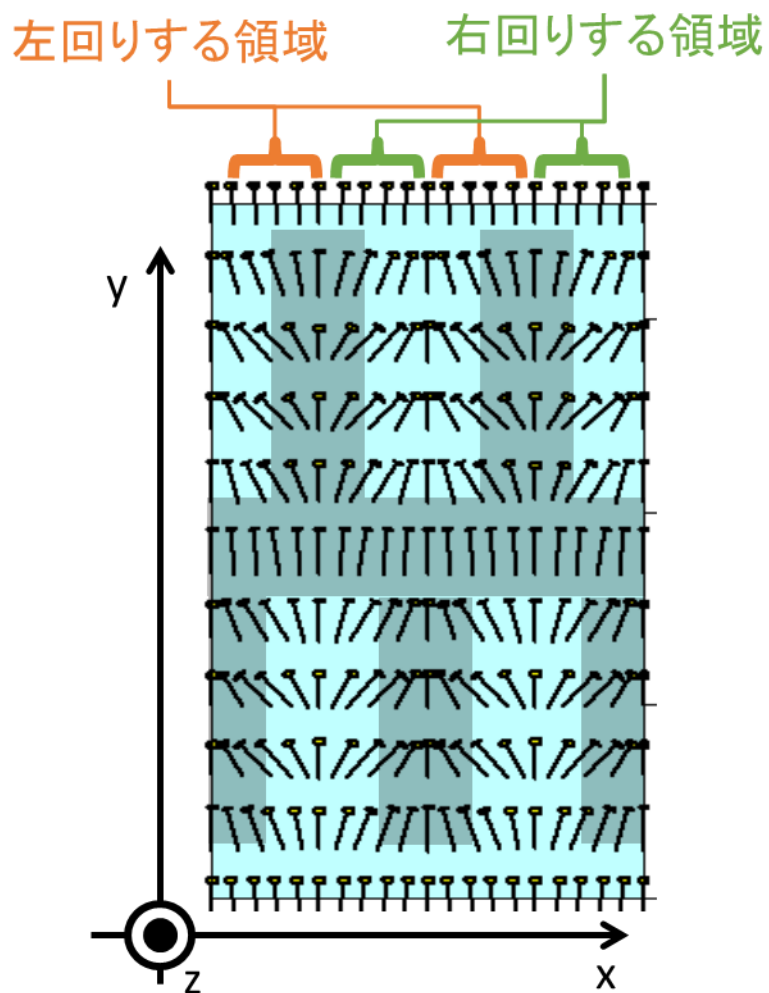


図 3-13 両枝電極構造における電圧印加時の液晶配向分布

この両枝電極構造を使い、縞状電極構造の時と同様にテストデバイスを作製して表示状態を確認した。層構造は全て縞状電極のテストデバイスと同様であり、上電極のITO薄膜の形状のみを変更している。両枝電極構造の設計は、幹部分のy軸方向の長さを $3\mu\text{m}$ 、枝部分のx軸方向の長さを $2.5\mu\text{m}$ 、隣り合う枝部分間の距離を $2.5\mu\text{m}$ 、y軸方向の長さを $12\mu\text{m}$ とした。このテストデバイスを同様に電圧駆動し直交偏光板に挟んで顕微鏡により光学観察を行った結果が図3-14である。

半透明な両枝電極構造の位置を模式的に重ねて表示している。図3-12,13で説明した液晶分子の右回り、左回りが枝部分の両辺に発生し、その部位が明るく表示されている。枝部分の先端から外側と幹部分の液晶はほとんど回転しないために暗く表示されている。

暗く表示され、固定端を表わす位置は幹部分の電極をまたいで直線位置に実現していることが分かる。この固定端の一つを破線で示している。固定端間距離 $l$ はテストデバイスの点灯領域全体で安定して $2.5\mu\text{m}$ 間隔で実現した。

これにより、両枝電極構造を用いることで距離 $2.5\mu\text{m}$ の固定端間隔を持つ2次元面内対称の横電界駆動方式を得られることが分かった[12,42]。

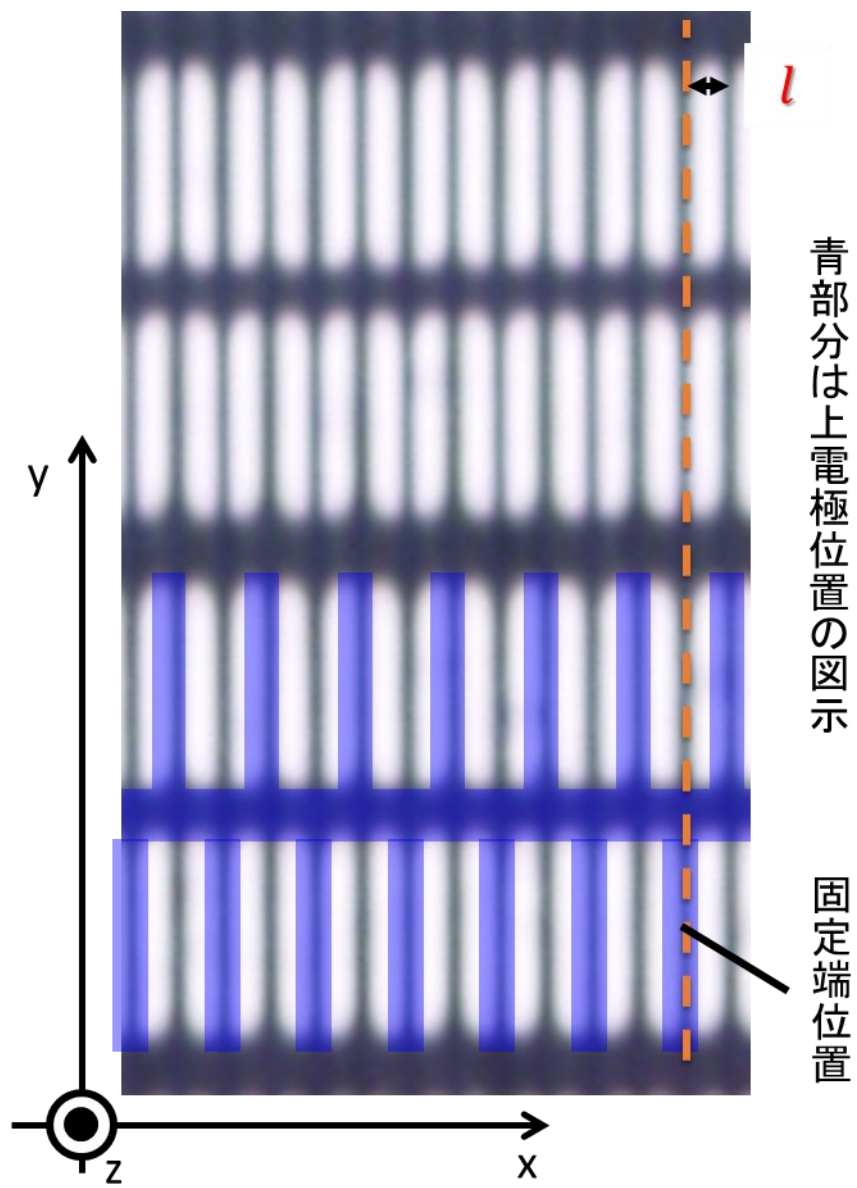


図 3-14 両枝電極構造により作製したテストデバイスの表示状態

### 3-3 2次元面内対称の横電界駆動方式の表示応答特性

2次元面内対称の液晶配向を、両枝電極構造を用いた横電界駆動方式によって実現出来ることを明らかにした。この電極構造により作製した2次元面内対称の横電界駆動方式のテストデバイスを使用し、応答時間を確認した。

顕微鏡観察時と同様に直交偏光板間に本テストデバイスを配置し拡散光源の上に設置して、応答時間を測定した。測定は大塚電子株式会社製のLCD評価装置(LCD5200)を使用した。上下電極間に任意波形発生器により1kHzの矩形波で実効電圧6Vrms(12Vp-p)を印加した状態から電圧無印加状態へ変移させることで、テストデバイスの透過光量の変化をフォトマルによって測定した。以下、特に記載がない限り測定方法は同様である。

比較として従来の横電界駆動方式のテストデバイスも測定した。従来の上電極の形状は図1-29に示した縞状電極構造であり、液晶分子の初期配向は全体を同一方向に回転させるため、縞状電極と10度の傾きを持たせた。

図3-15で2種のテストデバイスを測定し、透過光量の変化を比較した。横軸を時間、縦軸を透過光量に取った。透過光量=1は電圧印加時の最大透過光量である。時間0msは任意波形発生器の実効電圧を0Vに切り替えた時の時間とした。

点線で示す従来の横電界駆動方式と比較して、実線で示す2次元面内対称の横電界駆動方式による応答時間は短縮している。

液晶ディスプレイの立下り応答時間の評価として、透過光量が90%から10%へ変化するのに要する時間を立下り応答時間( $t_f$ )として用いることが一般的である。この時間を算出すると、従来の横電界駆動方式の場合は6.2ms、2次元面内対称の横電界駆動方式の場合では1.8msであった。液晶材料を同一、固定端間距離を液晶層の厚さと同一にした場合の2次元面内対称の横電界駆動方式による応答時間は、従来の横電界駆動方式と比べて3分の1を予測していた(式2-11)(式3-1)。本テストデバイスにより、ほぼ予測通りの応答時間の短縮を実現した[12,34,42]。

$$\tau_{2D} = \frac{\gamma_1}{\frac{K_{11}}{l^2} + \frac{K_{22}}{d^2}} \approx \frac{\gamma_1}{\frac{2K_{22}}{d^2} + \frac{K_{22}}{d^2}} = \frac{1}{3} \frac{\gamma_1}{\frac{K_{22}}{d^2}} = \frac{1}{3} \tau_{1D} \quad (3-1)$$

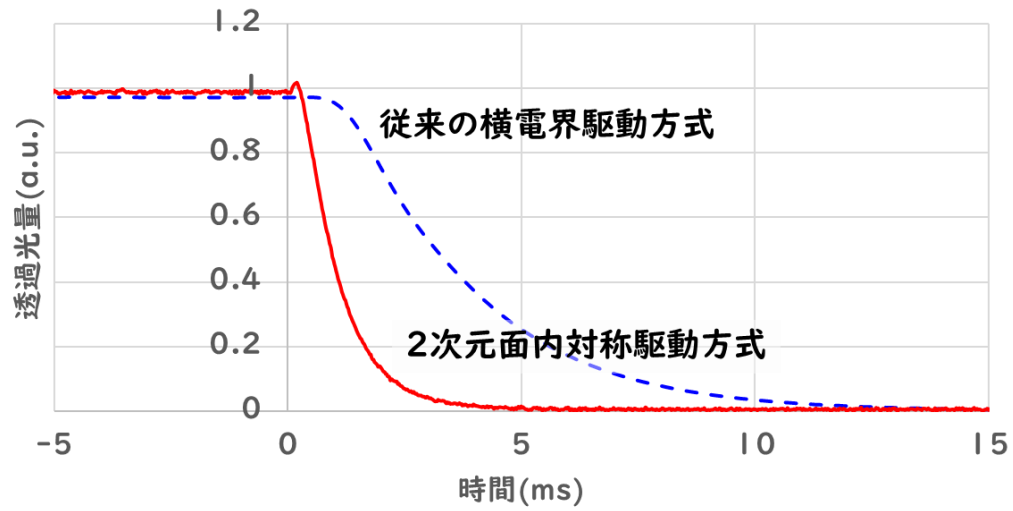


図 3-15 透過光量の時間応答特性

2次元面内対称の横電界駆動方式の応答時間は式 3-1 に従えば、固定端間の距離を短くすることにより応答時間を短くすることが可能であると予測出来る。固定端間距離を違えて作製したテストデバイスを測定することにより、応答時間の固定端間距離依存性を確認する。

両枝電極構造を用い、枝部分の幅および枝部分間を同じ長さのまま  $1.75\mu\text{m}$  から  $3\mu\text{m}$  まで、 $0.25\mu\text{m}$  おきに変化させたテストデバイスを作製した。他の条件は先と同様で、枝部分の y 軸方向の長さは  $12\mu\text{m}$ 、液晶層の厚さは  $2.5\mu\text{m}$  である。

このテストデバイスの測定結果を、立下り応答時間( $t_f$ )を縦軸、固定端間距離を横軸としてプロットしたのが図 3-16 である。応答時間が固定端間距離 $l$ に依存し、 $l$ を短くすることにより短縮することを実験によって確認出来た[12,42]。

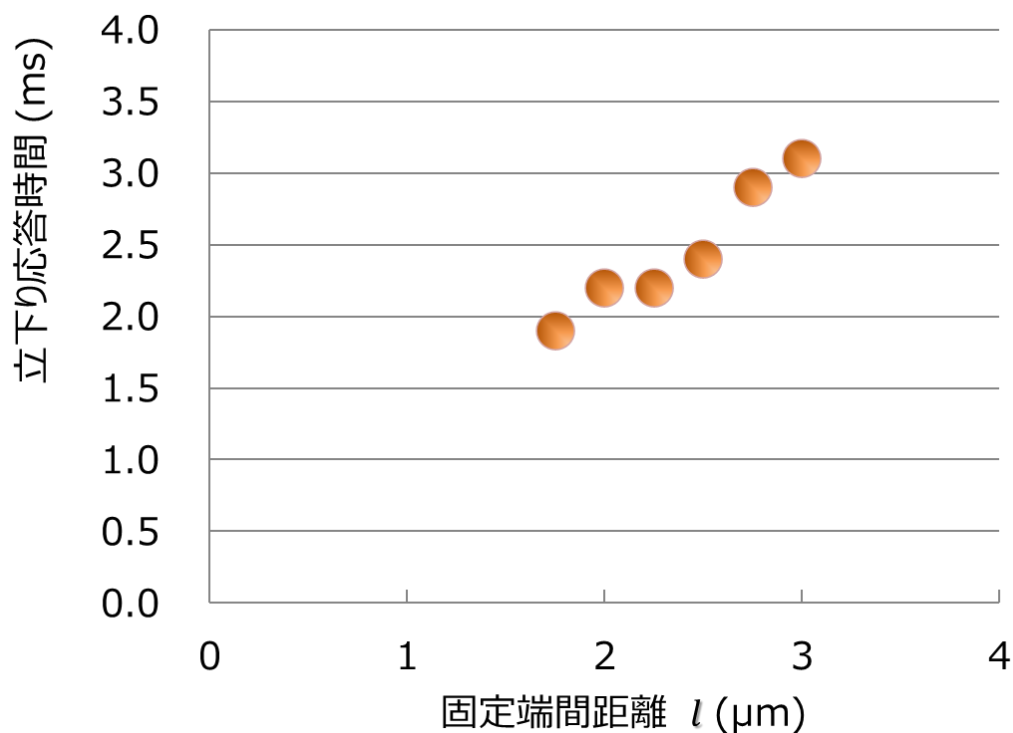
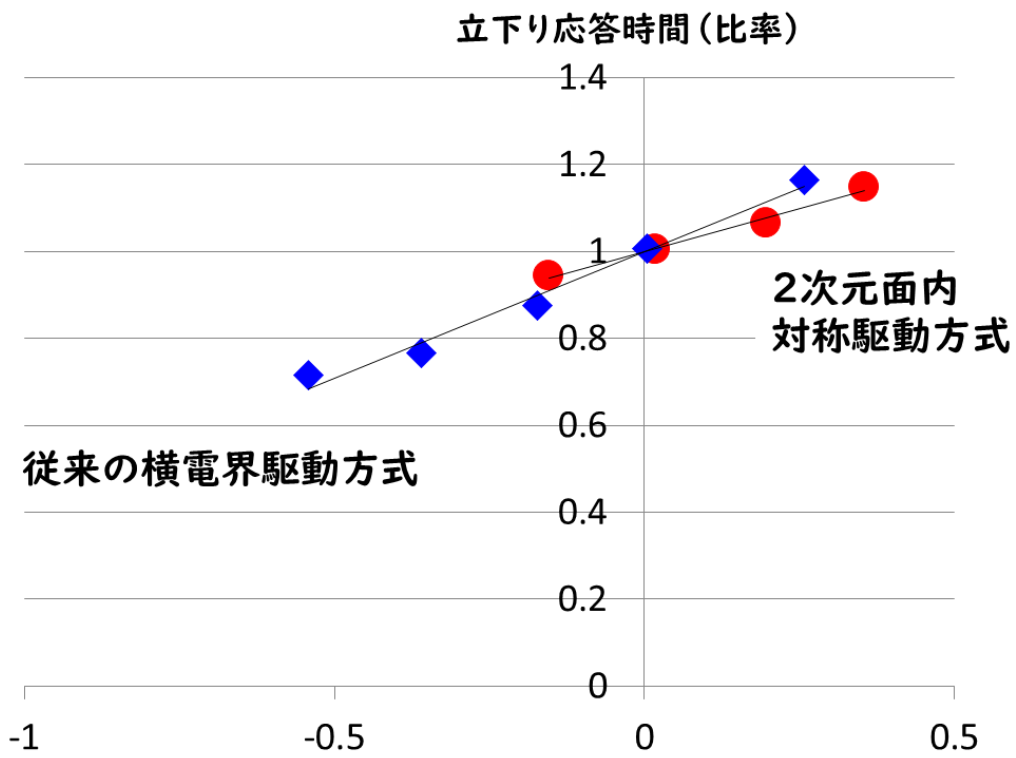


図 3-16 立下り応答時間の固定端間距離依存性

2次元面内対称の横電界駆動方式の応答時間が、固定端間距離 $l$ と液晶層の厚さ $d$ の双方に依存する予測は、液晶層の厚さ $d$ にのみ依存している従来の横電界駆動方式と比べて、液晶層の厚さの変動に対して応答時間の変動率が低いことが予想出来る。これを確認するため、液晶層の厚さを変動させたテストデバイスを、従来の横電界駆動方式と両枝電極構造を用いた2次元面内対称の横電界駆動方式で作製した。

2次元面内対称の横電界駆動方式と従来の横電界駆動方式の立下り応答時間( $t_f$ )の測定結果を図3-17に示した。応答時間の変動率を示すため、縦軸は相対的な立下り応答時間とした。横軸には液晶層の厚さの増減を示し、原点に液晶層の厚さを $1.9\mu\text{m}$ とおいた。2次元面内対称の横電界駆動方式の応答時間を菱、従来の横電界駆動方式の応答時間を丸でプロットした。なお、黒線は便宜上引いた線形近似線であるが、傾きは2次元面内対称の横電界駆動方式の場合に約0.39、従来の横電界駆動方式の場合に約0.58であった。

以上、2次元面内対称の横電界駆動方式は従来の横電界駆動方式と比較して液晶層の厚さの変動に対して応答時間の変動が小さいことが分かった。液晶層の厚さが変動した場合の応答特性のばらつきが小さく、製造上優位である特徴を持つ[12,43,44]。



液晶層の厚さ: 1.9 $\mu\text{m}$ からの増減値( $\mu\text{m}$ )

図 3-17 立下り応答時間の液晶層の厚さ依存性



### 3-4 まとめ

縞状電極構造とこの電極と平行な液晶初期配向を使用して、液晶配向のトルクバランスをとることで、従来の横電界駆動方式と同様の製造法を用いて 2 次元面内対称の液晶配向が実現可能であることを示した。一方で縞状電極構造を用いた場合には、液晶分子の回転方向が決定されず、2 次元面内対称の液晶配向に必要な配向固定端の形成が不安定であった。部分的に液晶分子の回転方向を決定する電界を発生させる両枝電極構造を採用することで、固定端の形成を安定化した。両枝電極構造を用いたテストデバイスを作製し、従来の横電界駆動方式と比較して 3 分の 1 の応答時間となる液晶ディスプレイを実現出来ることを確認した。

これによって、応答時間が短いことを特徴とする、2 次元面内対称の横電界駆動方式の液晶ディスプレイを、安定的に作製可能であることを示した。

## 第4章 2次元面内対称の横電界駆動方式を用いた高解像度液晶ディスプレイの作製とVR応用

電界によって液晶配向のバランスをとることによって2次元面内対称液晶配向を実現することにより、高速動作する横電界駆動方式液晶ディスプレイの作製が可能であることを提案[34,45]して以来、本配向技術に関わる研究が盛んになっている[36,46-57]。主な研究課題として透過光量の向上がある[54-57]。特に研究の多い手法は、固定端位置の透過光量に関するものである。

水平面内に液晶配向のバランスにより固定端を設けることは2次元面内対称液晶配向の基本であるが、高コントラスト比のノーマリーブラックにする場合、液晶が固定されていることは光源の光を透過しない部分を作ることでもある。3章では縞状電極および枝電極の両辺の液晶を反対方向に回転させることでバランスをとり、電極中央に固定端を発生させている。この固定端の有無を調整することで透過透過光量の向上を目指す報告がある[57]。この手法では透過光量の向上と引き換えに応答時間が長くなる。

本章では、高解像度液晶ディスプレイの微小画素において、応答時間に影響を与えることなく透過光量向上を目指す。これにより1章で目標とした応答時間2.4ms以下のVR用途の高解像度液晶ディスプレイを実現する。

### 4-1 2次元面内対称の横電界駆動方式の高解像度ディスプレイへの適用

#### 4-1-1 2次元面内対称の横電界駆動方式の透過光量に関する考察

3章に示したように、両枝電極を用いることで2次元面内対称の横電界駆動方式を実現するが、明るく表示される部分と暗く表示される部分が存在する(図3-14)。この暗い部分は2次元面内対称のための固定端以外に、図3-12に示した両枝電極構造の幹部分および向かい合わせに配置された枝部分の間に相当する。また1章で示したように、液晶ディスプレイは一つのデータを表示するために一組の電極ペアを用意して一つの画素を構成し、各画素間に遮光層(ブラックマ

トリックス)を設けている。この遮光層を利用することで、固定端以外による透過光量低下の要因を無くす手法を考える。

1画素に両枝電極構造を配置した場合の、上下電極と遮光層の位置関係を、平面図を用いて図4-1に示す。画素全体に配置した下電極の上に、誘電体層を挟んで上電極を配置している。隣接画素との間に遮光層を半透明で配置しており、重畳部分は下電極のみとなっている。四角で囲った領域は遮光層のない開口部分である。両枝電極構造により開口部分全体に安定した固定端を実現し、2次元面内対称液晶配向により応答時間を短縮することは3章の結果から期待出来るが、幹部分による透過光量低下も想定される。そこで、透過光量に寄与しない幹部分を、遮光層に重畳させることを考える。

両枝電極構造の一方に形成された枝部分を省略し、開口部分には上半分の枝部分の電極のみが重畳するように配置する片枝電極構造を考案した。これを、図4-2を用いて説明する。両枝電極構造と同様に幹部分を構成する電極に、枝部分が接続されている。幹部分は、図中下側の遮光層と重畳しており、図中上側の遮光層には、上側枝電極の先端に下電極が露出している部分が重畳している。この時に上電極と下電極間に発生する電界を矢印で示す。上電極枝部分の根元と先端において斜め方向の電界が発生している。液晶分子に対して、枝部分の左半分では左回りのトルクを、右半分では右回りのトルクを発生させる。よって、開口部分において、両枝電極構造の時と同様、液晶回転方向のバランスを右回りと左回りによってとることが出来、配向の固定端を実現出来る。

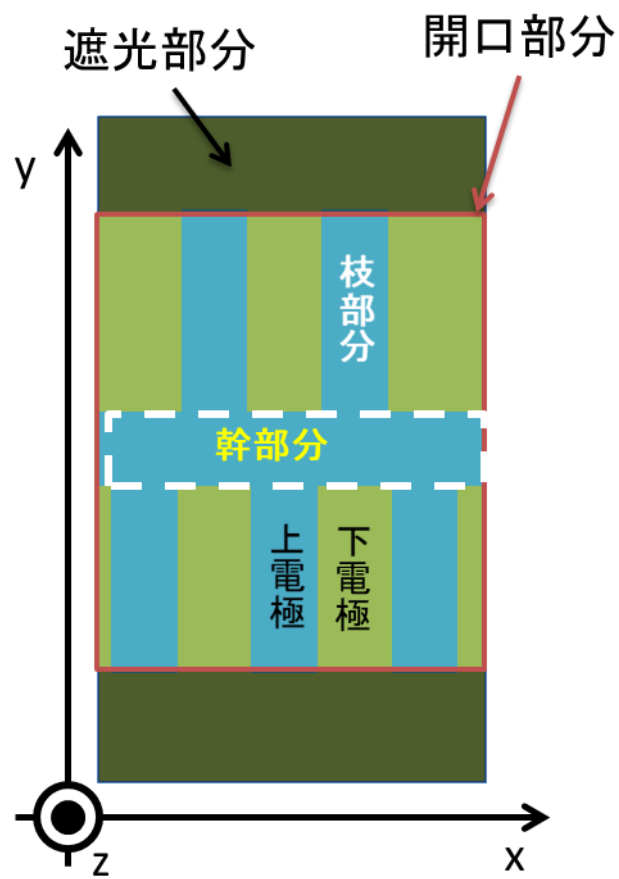


図 4-1 液晶ディスプレイの画素と両枝電極構造

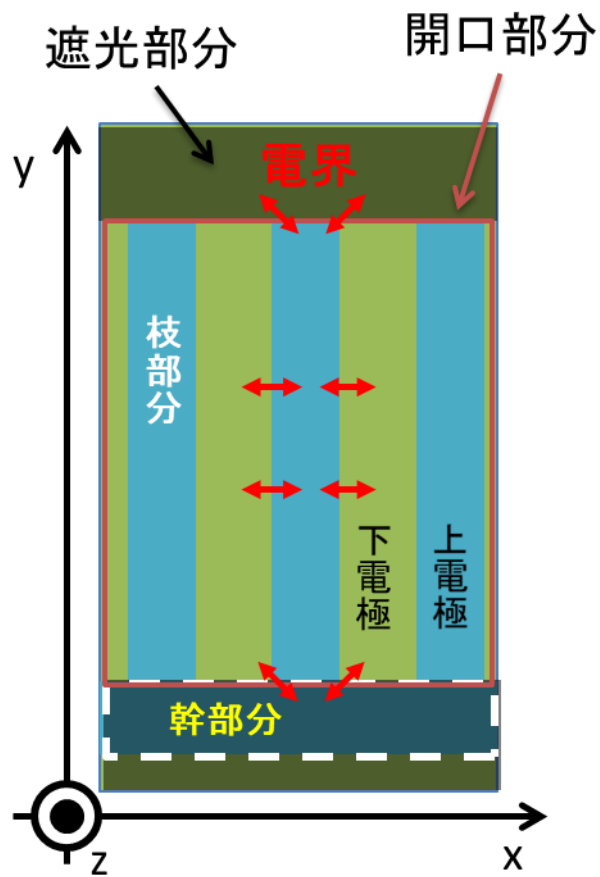


図 4-2 液晶ディスプレイの画素と片枝電極構造

両枝電極構造および片枝電極構造を採用した画素電極を設計し、これらの透過光量について光学シミュレーションを行い確認した。

画素構造は図 4-1,2 の通りで、200ppi (pixels per inch)の液晶ディスプレイを前提とした。y 軸方向に関しては、画素長さは各色 42.33 $\mu\text{m}$ 、遮光層の長さを 4.5 $\mu\text{m}$  とした。開口部分の幅は 37.83 $\mu\text{m}$  であり、片枝電極構造の枝電極の長さも同じに設定した。幹部分の電極の長さは 2.5 $\mu\text{m}$  とした。x 軸方向に関しては、枝部分の電極の長さおよび電極の間隔は 2.5 $\mu\text{m}$  とした。また、液晶層の厚さは 2.5 $\mu\text{m}$  とした。

遮光層なしで、平行偏光板の時の透過光量を 100%と取った時に、透過光量の電圧依存性は図 4-3 のようになった。破線で示す両枝電極構造と比較し、実線で示す片枝電極構造を採用することで最大透過光量は 53%から 57%へ向上している。

画素の縦幅を 42.33 $\mu\text{m}$ (200ppi)~8.47 $\mu\text{m}$ (1000ppi)の間で変化させ、同様に透過光量について光学シミュレーションにより算出を行った。諸条件については枝電極の長さのみを変えている。

その結果を図 4-4 に示す。横軸に液晶ディスプレイの解像度を、縦軸に透過光量を示している。ここでは、遮光層の幅は解像度によって変化しないため、画素全体における開口部分の比率は、解像度が高くなるに従い低下する。これにより解像度が高くなるに従い透過光量は下がる。

電極幅は製造法によって決定し、解像度によって変化しない。そのため、幹部による透過光量の減少分も解像度によらないが、開口部分に対する比率は上昇する。解像度が 1000ppi 時の透過光量は、両枝電極構造では約 15%、片枝電極構造では約 33%であった。よって、片枝電極構造と両枝電極構造の透過光量の差は、解像度が高くなるに従い大きくなる。

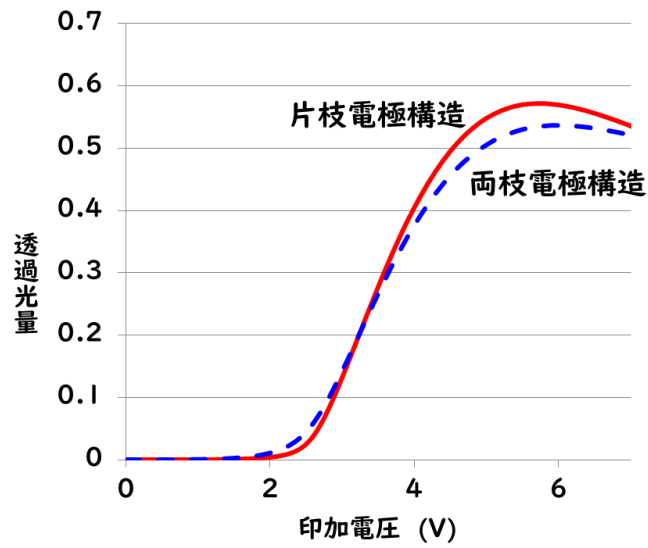


図 4-3 両電極構造の透過光量の電圧依存性

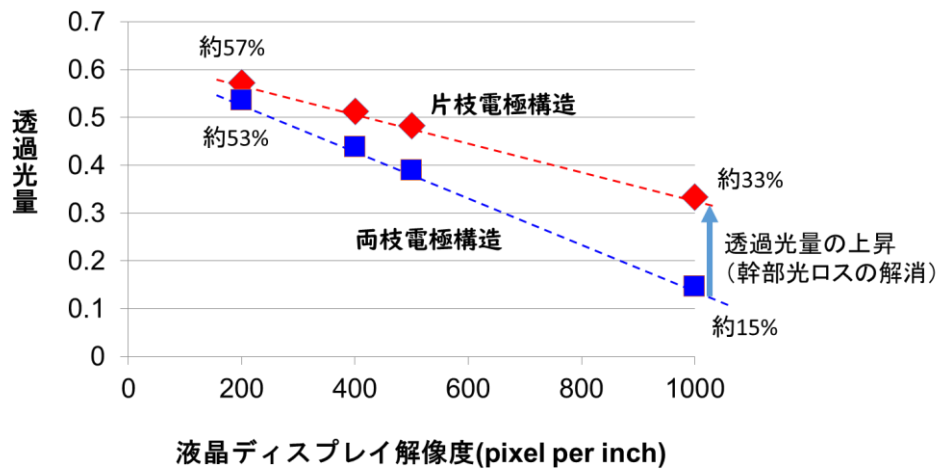


図 4-4 両電極構造における透過光量の解像度依存性

#### 4-1-2 高解像度化と高透過光量を両立させるための片枝電極構造

片枝電極構造を用いて液晶ディスプレイを実際に作製することで、2次元面内対称の液晶配向の駆動検証を実施した。ディスプレイ全体の構造図は従来の横電界駆動方式と同様で図 1-14、断面図は図 1-27 に示した通りである。TFT に使用する半導体には高速動作を可能とする LTPS(Low Temperature Polycrystalline Silicon)を採用し、616ppi の解像度で作製した。画素幅は 13.75 $\mu\text{m}$ 、遮光幅は 4.5 $\mu\text{m}$  であり開口部分の幅は 9.25 $\mu\text{m}$  である。片枝電極構造の枝部分の幅は 2 $\mu\text{m}$ 、間隔は 3 $\mu\text{m}$ 、幹部分の太さ 2.5 $\mu\text{m}$ 、枝部分の長さ 9.25 $\mu\text{m}$  とした。作製した画素の走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察像を図 4-5 の左に示す。対向基板に配置されている遮光層を破線で示しており、片枝電極構造の液晶分子の回転方向を制御している枝部分のみが開口領域に配置されている。

こうして作製した液晶ディスプレイを表示した様子の顕微鏡観察像を図 4-5 右図に示す。中央の遮光層を挟んで下側に赤カラーフィルタ、上側に緑カラーフィルタのある領域を撮影している。両枝電極構造を用いたテストデバイスの表示状態図 3-14 と比較して、帯状の明るい部分が曲がり、非対称な部分が生じている。この非対称性は高電圧印加時に発生し、透過光量上昇と立下り応答時間の延長が生じた。



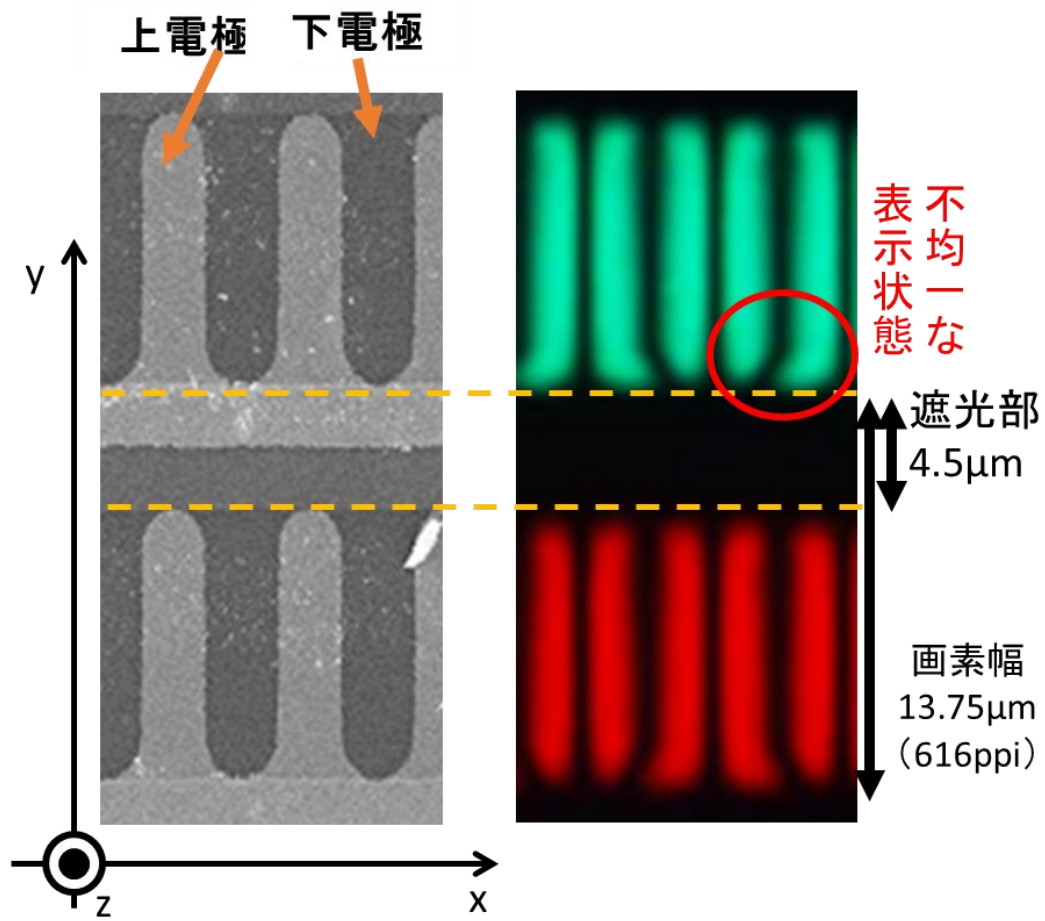


図 4-5 液晶ディスプレイに適用した片枝電極構造と表示状態

この非対称性について、図 4-5 の顕微鏡観察結果から 2 次元面内対称の液晶配向の様子により考察を行う。

図 4-6 に、電極配置および表示状態から予測される液晶配向と、その時の固定端の位置を図 4-5 の顕微鏡観察像に重ねて描画した。楕円は液晶分子の配向方向、液晶分子の配向のバランスにより生じている固定端位置を破線で示している。同図から、枝部分の根元において、固定端間距離が広がっている領域と狭まっている領域があることが見て取れる。これを両矢印で示している。

前章で見てきたように、固定端間距離が広がると応答時間は長くなり、狭まると短くなる。また、顕微鏡観察像から、固定端間距離の広がっている部分は狭まっている領域より透過光量への貢献が大きい。またこの固定端が広がったり狭まったりする現象は、枝部分の根元には発生するが先端には発生していないことも特徴である。

この部分的に固定端間距離が変化する現象は、両枝電極構造から片枝電極構造に変更したことに起因していると考えられる。遮光層と重畳した領域は、液晶分子の回転トルクを発生させる電界はなく、そのため 2 次元面内対称の液晶配向のための固定端を生成するための液晶分子回転方向制御のための電界も手当していない。この回転方向を安定化させる電界を発生させないことが、幹部分を挟んだ枝部分の根元部分へどのように影響するかを液晶配向シミュレーションにより確認した。

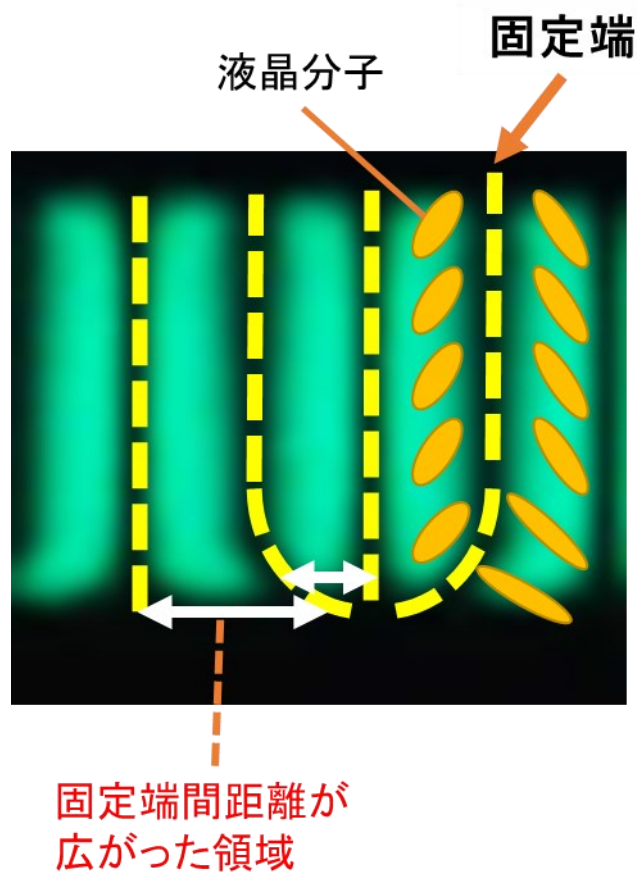


図 4-6 表示状態から予測される片枝電極構造採用時の固定端位置

液晶配向シミュレーションでは、3章と同様に行い、電極構造のみを図4-7左図のように片枝電極構造へと変更した。枝部分の幅および間隔を $3\mu\text{m}$ 、幹部部分の幅を $1.5\mu\text{m}$ 、枝部分の長さを $9\mu\text{m}$ とした。幹部部分の電極周囲の電界を注視するため1画素分の片枝電極構造を上電極として配置している。下電極は画素全体に配置している。液晶の初期配向は枝部分に平行である。

この条件下で上下電極間に電圧を印加した状態でシミュレーションを行い、等電位線を図4-7の右図に黒線で表した。液晶層の厚さ方向の電極側基板からの距離は図3-13と同様に、 $1/3$ とした。

上電極の枝部分先端および根元、さらに枝部分の幹部部分を挟んだ反対側の同x位置での電界を両矢印で示した。実線および破線は図4-6で示した湾曲した固定端のおよその位置を示した。枝部分の先端および根元に発生した電界は図4-2で想定した通りの方向に傾いているが、幹部部分を挟んだ反対側にこれらと傾きが逆転した電界が発生している。幹部部分を挟んだ領域である四角で囲った部分の電界とこの部位の液晶への回転トルク方向を、図4-8を用いて説明する。

図4-8において、電界を両矢印、電界に沿う液晶分子を楕円、液晶に働くトルクの回転方向を破線矢印で示している。上側の電界およびそれに沿う液晶分子は枝部分の根元の電界とそれによる液晶分子の回転方向を示し、下側の電界は幹部部分の下側に発生する電界と液晶分子の回転方向を示す。電界の傾き角度は異なるが、破線矢印で示した通り、液晶分子には上下左右で逆回転のトルクが働いている。トルクのバランス位置は枝部分の左右の中央だけでなく幹部部分の上下の中央にも発生し得る。このバランスの取れる位置が不定であることにより、図4-7に示した液晶の回転しない固定端は、枝部分間の直線部分から幹部部分付近に破線で示すように湾曲したと考えられる。

この固定端の湾曲を防ぎ開口部全体で2次元面内対称の液晶配向を得るために、幹部部分の上下で同じ方向への回転トルクを発生する電界を得る必要がある。

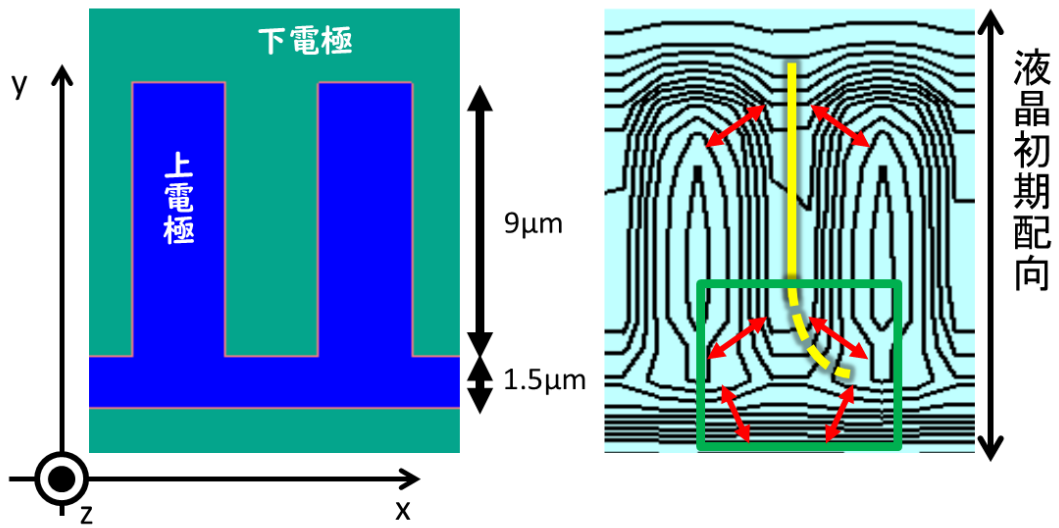


図 4-7 片枝電極構造と計算シミュレーションによる等電位線

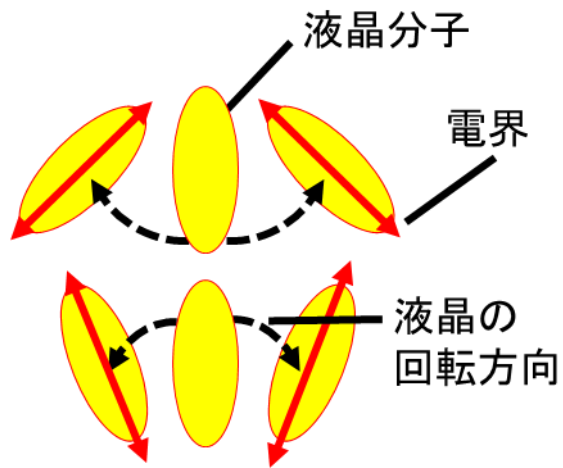


図 4-8 片枝電極構造の枝部分根元付近配向方向

### 4-1-3 凸部付き片枝電極構造による固定端の直線化

片枝電極構造の幹部下側の電界を制御し、固定端の湾曲を無くして直線化する手法を考える。

電界を制御するため、これまでと同様電極形状を変更する。開口部分に影響が出ないように、遮光層と重畳している部分の電極形状について変更を加える。非常に安定した固定端を形成出来る両枝電極構造を参考にする。以上から、幹部の両枝電極構造の下枝があった位置に凸部を形成することを考案した。

凸部付き片枝電極構造を用いた液晶ディスプレイを想定し、前項と同様に液晶配向シミュレーションを行った。この時の電極構造を図 4-9 の左図に示す。単純な片枝電極構造と比較し、両枝電極構造に有った下側の枝部分を、遮光層に隠れる程度の長さにして同位置に配置した。凸部の y 軸方向の長さは  $0.5\mu\text{m}$  である。

図 4-7 と同一の電圧を印加してシミュレーションを行い、同一平面状の等電位線を計算したものが図 4-9 の右図である。図 4-7 と同様に電界の方向を両矢印で示した。幹部分を挟んだ領域である四角で囲った部分の電界と、この部分の液晶への回転トルク方向を、図 4-8 と同様に図 4-10 を用いて説明する。

図 4-10 に示したように、幹部分の下側の電界は図 4-8 と反転している。この時の液晶分子への回転トルクは破線矢印で表される。幹部分を挟んで上下の液晶分子は同一方向に回転し、その間に固定端を発生させるトルクバランスを取る位置がない。

よって、片枝電極構造に凸部を付けることによって固定端を湾曲させず直線状態を維持することが期待出来る。

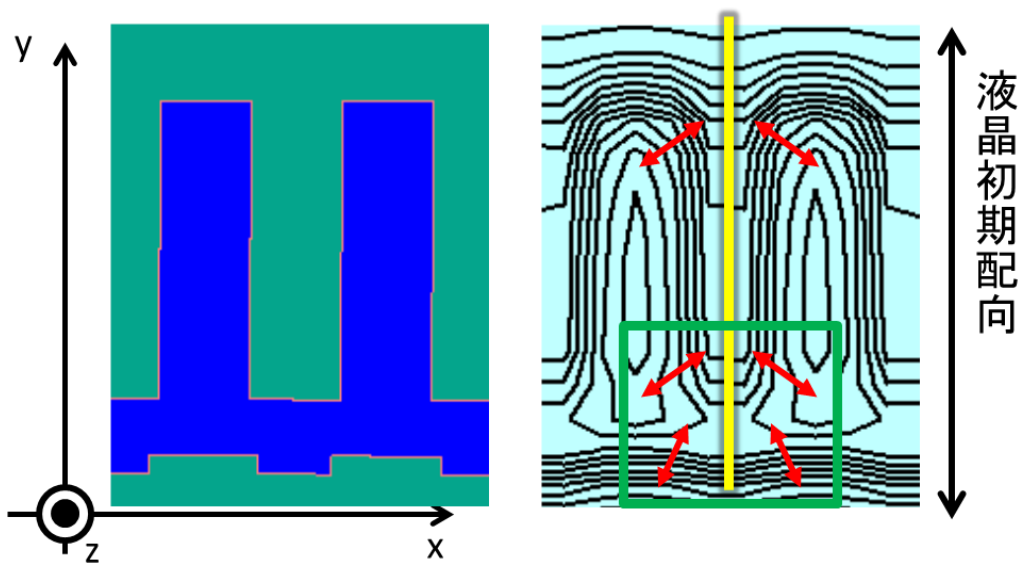


図 4-9 凸部付き片枝電極構造と計算シミュレーションによる等電位線

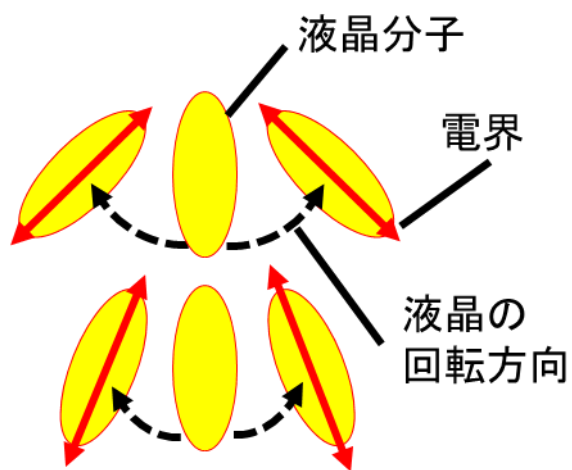


図 4-10 凸部付き片枝電極構造の枝部分根元付近配向方向

凸部付き片枝電極構造を用いて、単純な片枝電極構造の時と同様に液晶ディスプレイを作製し、2次元面内対称液晶配向の駆動検証を実施した。仕様は片枝電極構造の時と同一である。すなわち、全体の構造図は図 1-14、断面図は図 1-27 に示した通りである。TFT に使用する半導体には高速動作を可能とする LTPS を採用し、図 4-5 同様に約 616ppi の解像度で作製した。画素幅は  $13.75\mu\text{m}$ 、遮光幅は  $4.5\mu\text{m}$  であり、開口部分の幅は  $9.25\mu\text{m}$  である。

完成した画素の走査型電子顕微鏡 (SEM) 観察像を図 4-11 に示す。上電極の幹部下側に凸部を設けてあり、一つだけ半透明で示している。破線の間には遮光層が重畳されており、単純な片枝電極構造と同様、枝部分のみが開口部に配置されている。

こうして作製した液晶ディスプレイの表示状態の顕微鏡観察像を図 4-12 に示す。中央の遮光層を挟んで下側に赤カラーフィルタ、上側に緑カラーフィルタのある領域を撮影している。枝部分に対して x 軸方向に対称な表示が得られ得ている。固定端は破線に位置しており、湾曲がない。凸部付き片枝電極構造を採用することによって、固定端を直線化させることに成功した[44,58,59]。これにより印加電圧によって応答時間の延長の起きることのない液晶ディスプレイを作製出来る。



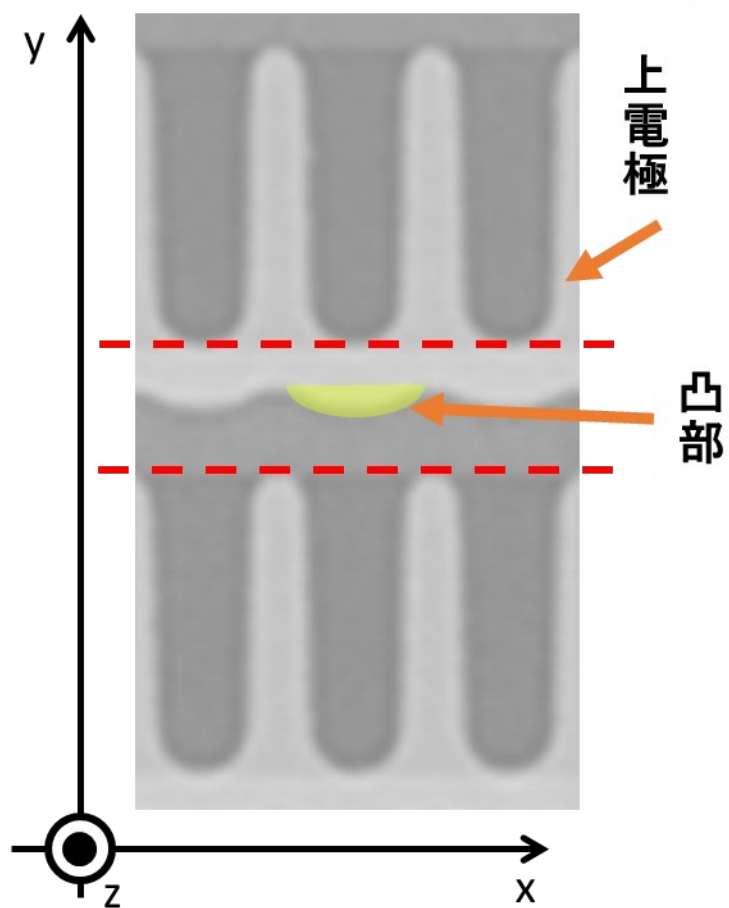


図 4-11 凸部付き片枝電極構造を用いた画素の SEM 像

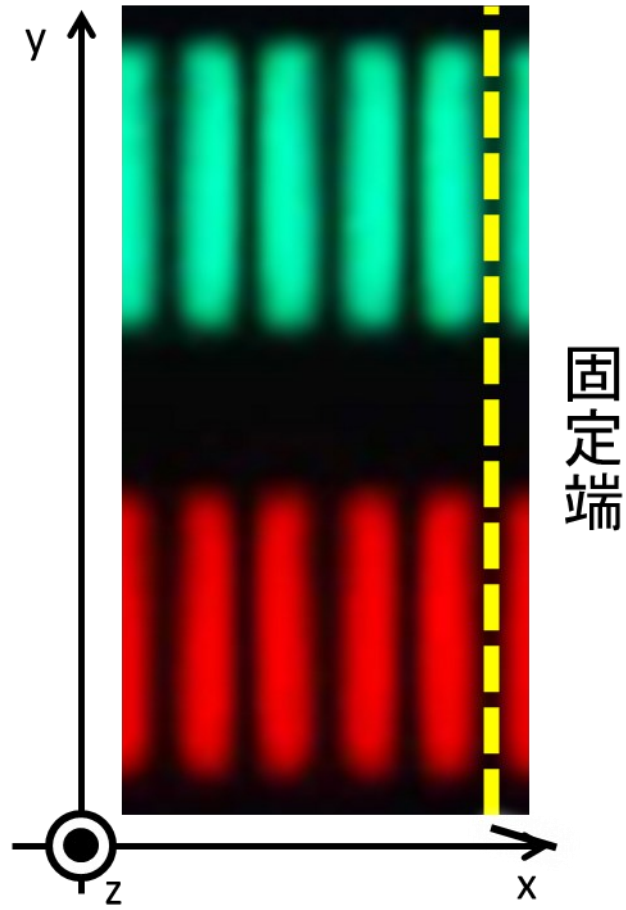


図 4-12 凸部付き片枝電極構造採用時の表示状態

## 4-2 VR用高解像度液晶ディスプレイの作製

2次元面内対称の液晶配向による横電界駆動方式を、凸部付き片枝電極構造を採用することにより、高解像度液晶ディスプレイの開口部全体で応答時間の短縮が実現可能であることを示した。この方式を用いて第1章に言及した、現状のVR用途を超える走査線数2432本、リフレッシュレート120Hzを実現する1001ppiの液晶ディスプレイを作製した。

完成した液晶ディスプレイの外観は図4-13である。また、仕様を表4-1に示した。階調間の応答時間を図4-14に示す。右の横軸が透過光量変化前の階調、左の横軸が透過光量変化後の階調で、縦軸はこの階調間の応答時間である。応答時間は、10%-90%の透過光量変化に要する時間を立ち上がり応答時間( $t_r$ )、90%から10%への透過光量変化に要する時間を立下り応答時間( $t_f$ )として、9段階に分けた階調間の  $t_r/t_f$  をまとめて棒グラフで表している。初期状態(L0)から最大階調(L8)への応答時間は2.0ms、最大階調(L8)から初期状態(L0)への応答時間は1.7ms、最も時間を要した階調間は初期階調(L0)から中間階調(L2)への変化時であり、応答時間は2.2msであった。液晶の応答時間が2.4msよりも短いため、図1-13で示す駆動を行う高解像度液晶ディスプレイを実際に作製出来たことになる。



図 4-13 作製した液晶ディスプレイの外観

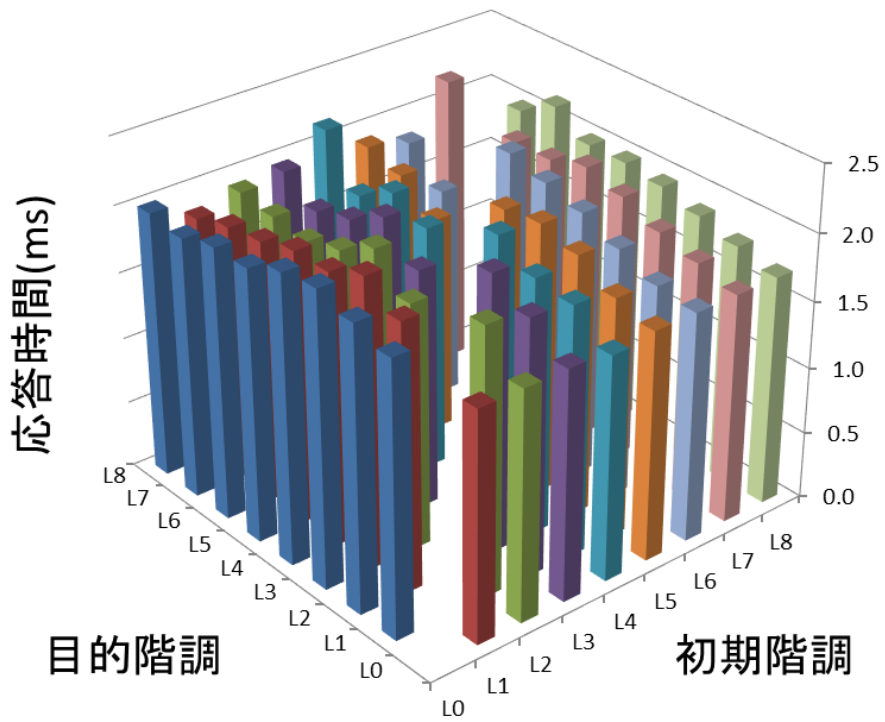


図 4-14 作製した液晶ディスプレイの階調間応答時間

表 4-1 作製した液晶ディスプレイの仕様

仕様		
画角		3.25 インチ
画素数		2160xRGBx2432
解像度		1001ppi
書き込み周波数		120Hz
応答時間	On/Off	2.0ms/1.7ms
	階調間	2.2ms(最大値)

### 4-3 2次元面内対称の横電界駆動方式の長所と短所

2次元面内対称の横電界駆動方式の長所および短所について、従来の駆動方式と比較して説明する。従来の駆動方式としては、1章で取り上げた縦電界駆動方式と従来の横電界駆動方式を挙げた。これを一覧にして表4-2に示した。

縦電界駆動方式は、横電界駆動方式と比較して黒透過光量が低いという利点があるが、視野角特性の点で横電界駆動方式に比べて大きく劣る。また、階調間の応答時間が横電界駆動方式と比べて非常に長い。これらの欠点により縦電界駆動方式はVR用途として使用するに適していない。

表 4-2 2次元面内対称の横電界駆動方式と従来の駆動方式の比較

	2次元面内対称の横電界駆動方式	従来の横電界駆動方式 Fringe Field Switching	縦電界駆動方式 Vertical Aligned Nematic
応答時間	◎	○	×
透過光量	○	◎	◎
黒透過光量	○	○	◎
視野角特性	◎	◎	×
駆動電圧	○	◎	◎
応答時間の液晶厚さ依存性	◎	○	○

横電界駆動方式として、本技術と従来の技術の表示上の大きな違いは固定端による透過光量の差にある。両枝電極構造の表示状態（図 3-14）、高解像度ディスプレイに適用した凸部付き片枝電極構造の表示状態（図 4-12）に見られるように、固定端部分周辺が表示に寄与しない部分が存在する。一方で、どちらの駆動方式も第 1 章、第 2 章で説明した通り、液晶層の厚さを厚くすることで明るく、かつ応答時間が長くなり、薄くすることで暗く、かつ応答時間が短くなる。また、2次元面内対称の横電界駆動方式は面内方向に配向規制力を持つため液晶が動きにくく、駆動するための電圧が従来の横電界駆動方式と比べて高くなる。これは同じ電圧を印加した時に従来の横電界駆動方式に対して暗くなる。

図 4-15 は液晶層の厚さを変化させたときの、立下り応答時間を透過光量の依存性として示している。従来の横電界駆動方式の結果を丸、2次元面内対称の横電界駆動方式を菱で示している。2次元面内対称の横電界駆動方式と従来の横電界駆動方式で、透過光量と応答時間の関係が直線状になっていることが分かり、同じ透過光量の時に同じ応答時間となることが予測出来る。ここで、同じ透過光量で同じ応答時間を実現するための液晶層の厚さが異なることに大きな違いがある。液晶層の厚さを薄くすることは製造上困難が伴うため、2次元面内対称の横電界駆動方式は従来の横電界駆動方式で実現困難な応答時間の短縮を可能とすることが利点となる[12,44]。

これらのため、液晶厚さの変化に対して表示特性の変化を抑えたい時や応答時間をより短くする必要がある場合には 2次元面内対称の横電界駆動方式を選択する。低消費電力などのため透過光量を必要とする場合には従来の横電界駆動方式を選択するといった使い分けが考えられる。第 1 章にて言及したように、今後 VR ヘッドセットの画素数、リフレッシュレートが大きくなる場合には更に応答時間の短さが必要となる。2次元面内対称の横電界駆動方式の重要性は高くなると考える。

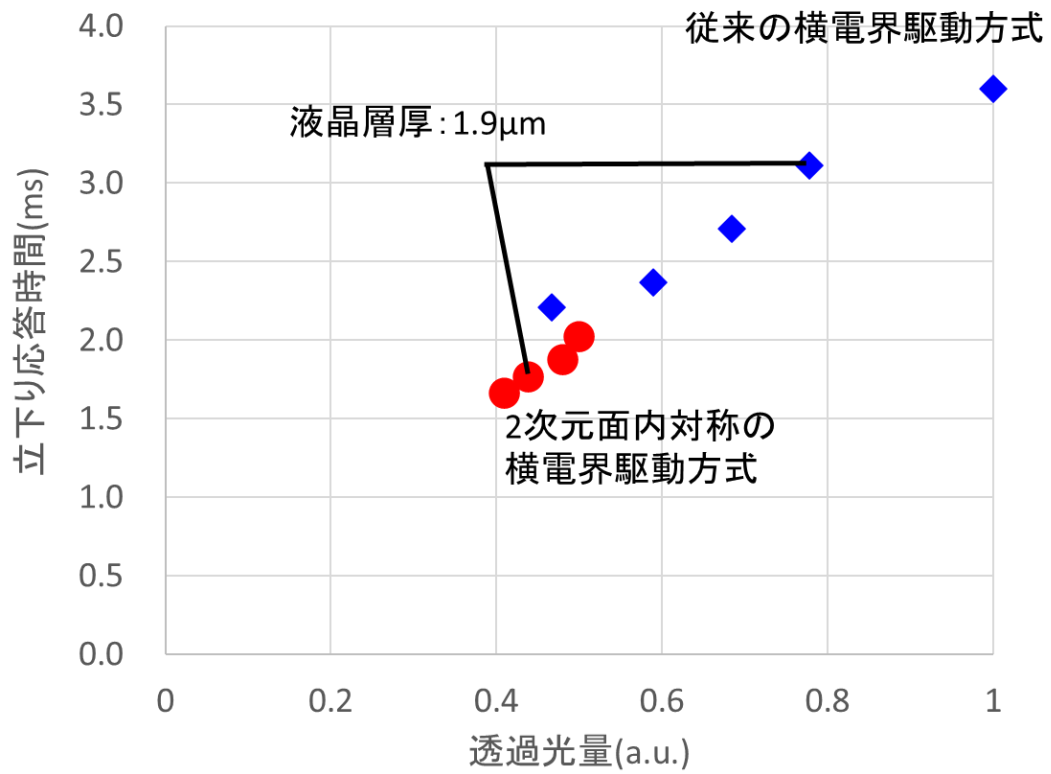


図 4-15 2次元面内対称の横電界駆動方式と従来横電界駆動方式の応答時間と透過光量の関係



#### 4-4 2次元面内対称の横電界駆動方式の発展性

本研究において2次元面内対称の液晶配向構造を用いた横電界駆動方式を提案し液晶の応答時間の短縮を実現した。また、これを電界による液晶回転のバランスにより実現した。新規材料を必要としない応答時間の短縮の実現はVR用途以外のディスプレイへの応用が期待出来る。例えば、従来の製造技術を用いて実現する本研究成果は、応答時間の温度依存性がないことから広い使用温度範囲を持つ車載用途にも適している。図4-16は2次元面内対称横電界駆動方式のテストデバイスにおいて、応答時間の温度依存性を示したものである。横軸にデバイスの表面温度、縦軸に立下り応答時間を取り、従来の横電界駆動方式と比較している。測定温度に依らず応答時間が短縮している[34,45]。

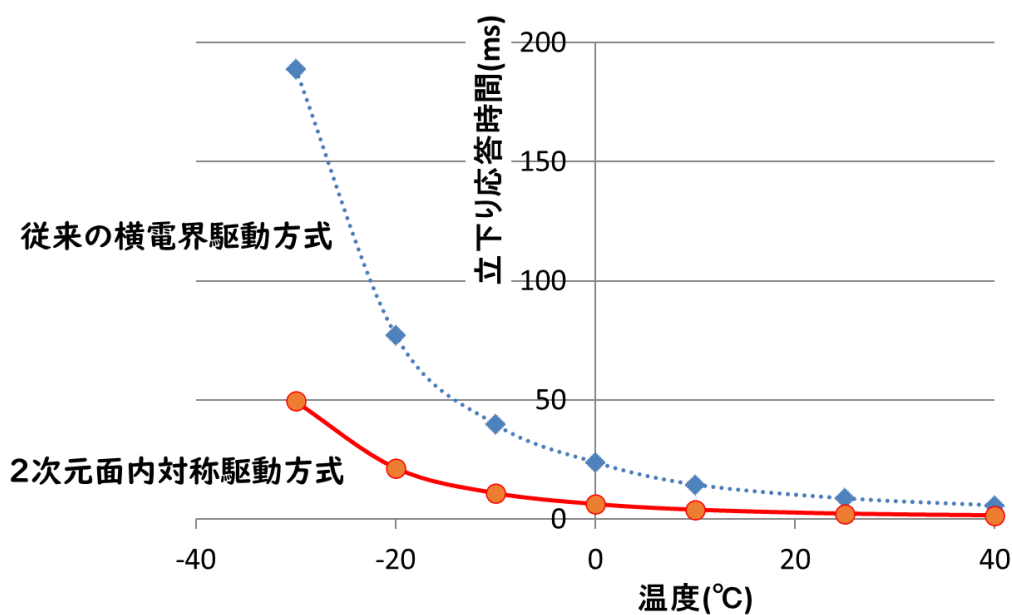


図 4-16 応答時間の温度依存性

## 4-5 まとめ

高解像度液晶ディスプレイを両枝電極構造を用いて作製した場合、電極の幹部分において透過光量に寄与しない領域が生じる。幹部分の大きさは製造方法に依存するため、解像度が向上するに従って透過光量の減少量が大きくなる。そこで、透過光量に寄与しない幹部分を開口部間の遮光層へ配置できる片枝電極構造を考案した。両電極構造を用いた 1000ppi の解像度を持つ液晶ディスプレイにおいて、透過光量の見積もりを行った。平行偏光板の透過光量を 100%とした時に、透過光量は両枝電極構造の場合の約 15%から片枝電極構造の場合には約 33%に向上する。

片枝電極構造を用いて LCD を作製したところ、表示領域中の固定端が湾曲化する現象が確認された。液晶配向シミュレーションを行い、電界の発生を確認したところ、遮光層下の電界が幹部分と直交ではなく y 軸に対して傾きを持っていた。この電界の向きにより、液晶配向のトルクバランス位置が遮光層下と開口部で連続せず、固定端が湾曲したと考えられる。この不連続を解消する電界を発生する方法として、遮光層下の幹部分に凸部を付けることを提案した。凸部付き片枝電極構造を用いた 2 次元面内対称の横電界表示方式により固定端の湾曲の無い LCD を作製することが出来た。

凸部付き片枝電極構造を用いた 2 次元面内対称の横電界駆動方式によって、VR 用途に適した 1001ppi の LCD を作製した。この LCD の応答時間は全階調間において 2.2ms 以下であった。これはリフレッシュレート 120Hz、走査線 2432 本の VR 表示を成立させる応答時間である。

以上、2 次元面内対称の液晶配向を用いた横電界駆動方式の研究を行い、VR 用途に適した高速応答ディスプレイを実現した。

## 第5章 結言

本研究で得られた結論および今後の発展性について述べる

液晶ディスプレイは、情報端末の進化に伴いその性能向上を求められてきた。特に VR 用途においては動画表示性能に対する要求が高い。本研究では 2 次元液晶配向規制の概念を導入するとともに、これを具体化し、VR 用途の要求に応える応答時間の短い液晶ディスプレイの実現したものである。

液晶の動作は従来、上下基板表面に液晶が固定され弾性力により復元するという水平面内一様の 1 次元的な配向制御が想定されてきた。これに対し水平面内に固定端を設け、水平方向にも弾性力を持つ横電界駆動方式を提案した。(1 章)

液晶の弾性連続体理論を利用し、垂直方向および水平方向の 2 次元的な液晶配向分布を考察した。理論的考察によって、2 次元液晶配向規制を導入した横電界駆動方式において応答時間が短縮することを確認し、短縮の程度についての予測を行った。(2 章)

2 次元液晶配向規制を導入した横電界駆動方式を、従来の横電界駆動方式と同様な作製法を用いて実現する方法を見出した。すなわち、電極形状および液晶配向方向のみを工夫する手法により、実現出来ることを明らかにした。これは電界によって回転する液晶配向のバランスをとり、バランスした位置を固定端とする手法である。さらに固定端を安定的に生成する手法を提案し、実験により安定化が可能であることを示した。この安定化した 2 次元面内対称の横電界駆動方式の立下り時間を実測し、従来と比較して 3 分の 1 の応答時間短縮を確認した。(3 章)

VR 用途に用いられる液晶ディスプレイは 1000ppi 程度の解像度であり表示に寄与する開口面積が他の用途と比較して小さい。2 次元面内対称の横電界駆動方式を適用するため、透過光量に寄与しない領域を開口部間の遮光層へ配置する、片枝電極構造を提案した。これにより開口部全体で固定端を直線化する電界を発生させて開口部の透過光量を最大化することに成功した。さらに遮光層の電極形状によって発生する電界が開口部の固定端を湾曲化することを見出した。片枝電極構造の場合に発生する電界についてシミュレーションを行い、固定端

の湾曲化が遮光層下の電界の影響によるトルクバランスの不連続化によるものであると考察した。この考察結果から電極形状を変更しトルクバランスの連続化を行い、固定端を直線化することが出来た。開発成果である凸部付き片枝電極構造を用いることで、全階調間の応答時間が 2.2ms 以下となる 1001ppi の液晶ディスプレイの作製に成功した。これはリフレッシュレート 120Hz、走査線数 2432 本の VR 表示を成立させる応答時間である。(4 章)

液晶ディスプレイの応答時間の短縮は長年の課題でもある。使用材料や製造工程への負担の少ない 2 次元面内対称の横電界駆動方式は、車載用を含め VR 用途以外の多方面へ引き続き貢献出来るものとする。

## 謝辞

本論文を執筆するにあたり、終始熱心なご指導、ご鞭撻を賜りました、指導教員である東北大学大学院工学研究科 藤掛英夫教授に心より感謝いたします。

本論文の審査並びに有益なご討論、ご助言を賜りました、東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 山田博仁教授、東北大学大学院医工学研究科医工学専攻 吉信達夫教授、東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 石鍋隆宏准教授に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、研究の理論的討論、実験の遂行および評価、液晶ディスプレイとして完成させるまで、多大なるご協力を頂いた株式会社ジャパンディスプレイの非常に多くの同僚諸氏、共同研究者の方々に感謝いたします。特にテストデバイスの作製、評価、討論を共にした木村駿一氏、理論的裏付けとなる数多くの討論をさせていただいた小村真一博士に深く感謝いたします。また、論文執筆中に真摯に相談にのっていただきました前出優次氏に深く感謝いたします。

液晶技術研究の楽しさ厳しさを、株式会社セイコーエプソン在職中に教えていただきました各位に深く感謝いたします。特に基礎から親身にご指導いただきました奥村治氏に深く感謝いたします。

社会人学生として博士後期課程への編入に際し、ご理解とご支援を頂きました株式会社ジャパンディスプレイの関係諸氏に深く感謝いたします。

最後に、今まで暖かく応援して頂いた両親に深く感謝いたしますと共に、完成をお見せすることの叶わなかった父の霊前に本論文を捧げたく思います。

## 参考文献

- [1] Komura, S., Okuda, K., Onoda, K., & Kijima, H. (2021). Seventeen - inch laser backlight in - plane switching liquid crystal display with 8K, 120 - Hz driving, and BT. 2020 color gamut. *Journal of the Society for Information Display*, 29(1), 17-28.
- [2] Zhan, T., Yin, K., Xiong, J., He, Z., & Wu, S. T. (2020). Augmented reality and virtual reality displays: Perspectives and challenges. *Iscience*, 101397.
- [3] Sutherland, W. R., "The Ultimate Display", *Proceedings of the IPIP Congress 2*, 506-508 (1965).
- [4] Koulieris, G. A., Akşit, K., Stengel, M., Mantiuk, R. K., Mania, K., & Richardt, C. (2019, May). Near - eye display and tracking technologies for virtual and augmented reality. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 38, No. 2, pp. 493-519).
- [5] Narasimhan, B. A. (2018, May). Ultra-Compact pancake optics based on ThinEyes super-resolution technology for virtual reality headsets. In *Digital Optics for Immersive Displays* (Vol. 10676, p. 106761G). *International Society for Optics and Photonics*.
- [6] Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual reality: how much immersion is enough?. *Computer*, 40(7), 36-43.
- [7] Fenglin Peng, Ying Geng, Junren Wang, Lu Lu, Yang Zhao, Andrew Maimone, Weichuan Gao, Yuge Huang, Jacques Gollier, Barry Silverstein. *Liquid Crystals for Virtual Reality (VR) . SID Int Symp Dig Tech. 2021 pp427-430*
- [8] Huang, Y., Hsiang, E. L., Deng, M. Y., & Wu, S. T. (2020). Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: Present status and future perspectives. *Light: Science & Applications*, 9(1), 1-16.
- [9] 下平美文, 平野哲夫, & 福家俊郎. (1985). ホールド型画像表示における動きぼけ妨害. *電子情報通信学会論文誌 B*, 68(12), 1397-1404.
- [10] Kurita, T. (2001, June). 35.1: Moving Picture Quality Improvement for Hold - type AM - LCDs. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 32, No. 1, pp. 986-989). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

- [11] Ueda, N., Okada, K., Uchida, S., Yamamoto, K., Yamamoto, K., & Yoshida, H. (2016). Liquid crystal display with ultra-high resolution and super-fast response giving super reality to VR application. IDW/AD '16, 281-284.
- [12] 高速応答を実現する新規 IPS 液晶ディスプレイ, “A Novel IPS LCD Realizing Fast Response”, “木村駿一、松島寿治、小村真一”, 液晶 : 日本液晶学会誌 : journal of the Japanese Liquid Crystal Society 23(4), 188-194, 2019
- [13] Pochi Yeh, Claire Gu., "Optics of Liquid Crystal Displays" (A Wiley Interscience Publication, 1999)
- [14] マックス・ボルン、エミル・ウォルフ、光学の原理 3、草川徹、横田英嗣訳 東海大学出版会
- [15] Oh - e, M., & Kondo, K. (1995). Electro - optical characteristics and switching behavior of the in - plane switching mode. Applied physics letters, 67(26), 3895-3897.
- [16] Takeda, A., Kataoka, S., Sasaki, T., Chida, H., Tsuda, H., Ohmuro, K., Sasabayashi, T., Koike, Y., Okamoto, K. (1998, May). 41.1: A Super - High Image Quality Multi - Domain Vertical Alignment LCD by New Rubbing - Less Technology. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 29, No. 1, pp. 1077-1080). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- [17] Kondo, K. (2005, May). 17 - 1: Invited Paper: Recent Advancements and Future Possibilities of IPS - TFT - LCDs. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 36, No. 1, pp. 978-981). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- [18] Aoki, N., Komura, S., Furuhashi, T., Adachi, M., Ito, O., Miyazawa, T., & Ohkura, M. (2007). Advanced IPS technology for mobile applications. Journal of the Society for Information Display, 15(1), 23-29.
- [19] Lee, S. H., Lee, S. L., Kim, H. Y., & Eom, T. Y. (1999, May). 16.4 L: Late - News Paper: A Novel Wide - Viewing - Angle Technology: Ultra - Trans View™. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 30, No. 1, pp. 202-205). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

- [20] Wu, S. T. (1990). Nematic liquid crystal modulator with response time less than 100  $\mu$  s at room temperature. *Applied physics letters*, 57(10), 986-988.
- [21] Okumura, H., & Fujiwara, H. (1993). A new low - image - lag drive method for large - size LCTVs. *Journal of the Society for Information Display*, 1(3), 335-339.
- [22] Okumura, H., Baba, M., Taira, K., & Kinno, A. (2005). Advanced level - adaptive overdrive (ALAO) method applicable to full - HD LC TVs. *Journal of the Society for Information Display*, 13(12), 1011-1015.
- [23] Nakanishi, K., Takahashi, S., Oura, H., Matsumura, T., Miyake, S., Kobayashi, K., Oda, K., Tahata, S. Yuuki, A., Someya, J., Yamakawa, M. (2001, June). 29.3: Fast Response 15 - in. XGA TFT - LCD with Feedforward Driving (FFD) Technology for Multimedia Applications. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 32, No. 1, pp. 488-491). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- [24] Xiang, C. Y., Sun, X. W., & Yin, X. J. (2004). The electro-optic properties of a vertically aligned fast response liquid crystal display with three-electrode driving. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37(7), 994.
- [25] Iwata, Y., Murata, M., Tanaka, K., Jinda, A., Ohtake, T., Shinomiya, T., & Yoshida, H. (2013, June). 34.1: Novel Super - Fast - Response, Ultra - Wide Temperature Range VA - LCD. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 44, No. 1, pp. 431-434). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.
- [26] Xu, D., Chen, H., Wu, S. T., Li, M. C., Lee, S. L., & Tsai, W. C. (2015, June). 43.3: Fast - Response Fringe Field Switching LCD with Patterned Common Electrode. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 46, No. 1, pp. 652-655).
- [27] M. Oh-e, K Kondo, "Response mechanism of nematic liquid crystals using the in-plane switching mode," *Appl. Phys. Lett.* 69, No. 5, 623-625 (1996)
- [28] *The Physics of Liquid Crystals*, P. G. de Gennes



- [29] Liquid Crystals, S. Chandrasekhar (液晶の物理学, 木村初男・山下護訳, 物理学叢書)
- [30] 液晶の物性 / W.H.de Jeu 著 石井 力 小林 駿介 訳 | 共立出版
- [31] J. L. Ericksen, *Trans. Soc. Rheol.*, 5, 23 (1961)
- [32] F. M. Leslie, *Arch. Rational Mech. Anal.*, 28, 265 (1968).
- [33] Xu, D., Peng, F., Tan, G., He, J., & Wu, S. T. (2015). A semi-empirical equation for the response time of in-plane switching liquid crystal display and measurement of twist elastic constant. *Journal of Applied Physics*, 117(20), 203103.
- [34] Matsushima, T., Okazaki, K., Yang, Y., & Takizawa, K. (2015, June). 43.2: New Fast Response Time In - Plane Switching Liquid Crystal Mode. In *SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 46, No. 1, pp. 648-651)*.
- [35] Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Yata, T., Watanabe, Y., & Komura, S. (2018). New fast response in - plane switching liquid crystal mode. *Journal of the Society for Information Display*, 26(10), 602-609.
- [36] Choi, T. H., Oh, S. W., Park, Y. J., Choi, Y., & Yoon, T. H. (2016). Fast fringe-field switching of a liquid crystal cell by two-dimensional confinement with virtual walls. *Scientific reports*, 6(1), 1-9.
- [37] Engel, M., Bernatz, G., Götz, A., Hirschmann, H., & Lee, S. K. (2015, June). 43.1: Invited Paper: UB - FFS: New Materials for Advanced Mobile Applications. In *SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 46, No. 1, pp. 645-647)*.
- [38] Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Yata, T., Watanabe, Y., & Komura, S. (2017). The optimal fast response LCD for VR-HMD. In *Proc. IDW (Vol. 17, pp. 145-148)*.
- [39] Kikuchi, H., Yokota, M., Hisakado, Y., Yang, H., & Kajiyama, T. (2002). Polymer-stabilized liquid crystal blue phases. *Nature materials*, 1(1), 64-68.
- [40] 鎌田崇太郎, 藤掛英夫, 古江広和, 佐藤弘人, 菊池宏, 栗田泰市郎: “分子配向ポリマーの壁とネットワークを形成したフレキシブルツイストネマチック液晶素子”, *電子情報通信学会論文誌*, vol.J92-C, no.10, pp.561-566 (2009.10)

- [41] Jiao, M., Ge, Z., Wu, S. T., & Choi, W. K. (2008). Submillisecond response nematic liquid crystal modulators using dual fringe field switching in a vertically aligned cell. *Applied Physics Letters*, 92(11), 111101.
- [42] Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Yata, T., Watanabe, Y., & Komura, S. (2018). New fast response in - plane switching liquid crystal mode. *Journal of the Society for Information Display*, 26(10), 602-609.
- [43] Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Watanabe, Y., Komura, S., Uchida, M., & Nakamura, T. (2019, June). 66 - 1: Invited Paper: Fast - response IPS - LCDs used in VR applications. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 50, No. 1, pp. 925-928).
- [44] Matsushima, T., Kimura, S., & Komura, S. (2021). Fast response in - plane switching liquid crystal display mode optimized for high - resolution virtual - reality head - mounted display. *Journal of the Society for Information Display*, 29(4), 221-229.
- [45] Matsushima, T., Takizawa, K. T. (2015)“Analysis of Novel IPS Mode for Fast Response,” *Proc. IDW'15* pp. 44-47 .
- [46] Choi, T. H., Choi, Y., Woo, J. H., Oh, S. W., & Yoon, T. H. (2016). Electro-optical characteristics of an in-plane-switching liquid crystal cell with zero rubbing angle: dependence on the electrode structure. *Optics express*, 24(14), 15987-15996.
- [47] Choi, T. H., Woo, J. H., Choi, Y., Oh, S. W., & Yoon, T. H. (2017, May). 27 - 3 2 - D Confinement of LCs with Virtual Walls for a Fast Response LCD. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 48, No. 1, pp. 385-388).
- [48] Huang, K. T., Hung, Y. W., Fang, R. X., Lee, C., Lin, S. C., Yu, C. H., & Kao, C. (2019, June). P - 155: Study on Fast Response Pixel Model for VR HMD Application with Flexoelectric Effect Comparison. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 50, No. 1, pp. 1817-1820).
- [49] Katayama, T., Higashida, S., Kanashima, A., Hanaoka, K., Yoshida, H., & Shimada, S. (2018, May). 51 - 2: Development of In - Plane Super - Fast

- Response (ip - SFR) LCD for VR - HMD. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 49, No. 1, pp. 671-673).
- [50] Won, Y., Seo, E. J., Lim, Y. J., Shin, H. S., & Lee, S. H. (2019, June). P - 152: High resolution and ultra - fast switching liquid crystal device for Virtual Reality Display. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 50, No. 1, pp. 1802-1805).
- [51] Yoon, J. H., Lee, S. J., Lim, Y. J., Seo, E. J., Shin, H. S., Myoung, J. M., & Lee, S. H. (2018). Fast switching, high contrast and high resolution liquid crystal device for virtual reality display. *Optics express*, 26(26), 34142-34149.
- [52] Yoon, J. H., Lee, S. J., Lim, Y. J., Seo, E. J., Shin, H. S., Myoung, J. M., & Lee, S. H. (2018). Fast switching, high contrast and high resolution liquid crystal device for virtual reality display. *Optics express*, 26(26), 34142-34149.
- [53] Yoon, J. H., Seo, E. J., Lee, S. J., Lim, Y. J., Shin, H. S., Song, S. M., Myoung, J. M., Lee, S. H. (2019). Fast switching and luminance-controlled fringe-field switching liquid crystal device for vehicle display. *Liquid Crystals*, 46(11), 1747-1752.
- [54] Choi, T. H., Woo, J. H., Choi, Y., & Yoon, T. H. (2016). Interdigitated pixel electrodes with alternating tilts for fast fringe-field switching of liquid crystals. *Optics express*, 24(24), 27569-27576.
- [55] Choi, T. H., Woo, J. H., Choi, Y., Oh, S. W., & Yoon, T. H. (2017, February). Fast in-plane switching of nematic liquid crystals by two-dimensional confinement with virtual walls. In *Emerging Liquid Crystal Technologies XII* (Vol. 10125, p. 1012512). International Society for Optics and Photonics.
- [56] Hanaoka, K., Katayama, T., Higashida, S., Kanashima, A., Sasaki, T., Yoshida, H., & Shimada, S. (2019, June). 13 - 2: Novel Pixel Design In - Plane Super - Fast Response (ip - SFR) LCD for Smartphone and PC Monitor. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 50, No. 1, pp. 164-167).

- [57] Talukder, M. J. R. (2019). High Performance Liquid Crystal Devices for Augmented Reality and Virtual Reality.
- [58] Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Yata, T., Watanabe, Y., Komura, S., Uchida, M., & Nakamura, T. (2018, May). 51 - 1: Optimal Fast - Response LCD for High - Definition Virtual Reality Head Mounted Display. In *SID Symposium Digest of Technical Papers* (Vol. 49, No. 1, pp. 667-670).
- [59] Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Watanabe, Y., Komura, S., Uchida, M., & Nakamura, T. (2019, March). Fast-response LCD for 1001-ppi VR head-mounted displays. In *Advances in Display Technologies IX* (Vol. 10942, p. 1094204). International Society for Optics and Photonics.

## 本研究に関わる業績のリスト

### ① 学術論文

1. Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Yata, T., Watanabe, Y., & Komura, S. (2018). New fast response in  $\pi$ -plane switching liquid crystal mode. *Journal of the Society for Information Display*, 26(10), 602-609.
2. Matsushima, T., Kimura, S., & Komura, S. (2021). Fast response in  $\pi$ -plane switching liquid crystal display mode optimized for high-resolution virtual-reality head-mounted display. *Journal of the Society for Information Display*, 29(4), 221-229.

### ② 国際会議

1. Matsushima, T., Okazaki, K., Yang, Y., & Takizawa, K. (2015, June). 43.2: New Fast Response Time In  $\pi$ -Plane Switching Liquid Crystal Mode. In *SID(the Society for Information Display) Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 46, No. 1, pp. 648-651)*.
2. Matsushima, T., Takizawa, K. T. (2015)“Analysis of Novel IPS Mode for Fast Response,” *Proc. IDW(Information Display Workshop)*'15 pp. 44-47 . (invite)
3. Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Yata, T., Watanabe, Y., & Komura, S. (2017). The optimal fast response LCD for VR-HMD. In *Proc. IDW (Vol. 17, pp. 145-148)*. (invite)

4. Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Yata, T., Watanabe, Y., Komura, S., Uchida, M., & Nakamura, T. (2018, May). 51 - 1: Optimal Fast - Response LCD for High - Definition Virtual Reality Head Mounted Display. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 49, No. 1, pp. 667-670).
5. Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Watanabe, Y., Komura, S., Uchida, M., & Nakamura, T. (2019, March). Fast-response LCD for 1001-ppi VR head-mounted displays. In Advances in Display Technologies IX (Vol. 10942, p. 1094204). International Society for Optics and Photonics. (invite)
6. Matsushima, T., Seki, K., Kimura, S., Iwakabe, Y., Watanabe, Y., Komura, S., Uchida, M., & Nakamura, T. (2019, June). 66 - 1: Invited Paper: Fast - response IPS - LCDs used in VR applications. In SID Symposium Digest of Technical Papers (Vol. 50, No. 1, pp. 925-928). (invite)

### ③ 受賞

受賞：2020年度日本液晶学会賞 技術開発賞

受賞理由：高速応答インプレーンスイッチング液晶表示モードの開発と製品適用

### ④ 解説記事

高速応答を実現する新規 IPS 液晶ディスプレイ, “A Novel IPS LCD Realizing Fast Response”, “木村駿一、松島寿治、小村真一”, 液晶：日本液晶学会誌：journal of the Japanese Liquid Crystal Society 23(4), 188-194, 2019

⑤ 登録特許

国内

登録番号, 発明等の名称, 発明者または考案者

特許05937389, 表示装置、電子機器、および、表示装置の製造方法, 松島  
寿治

特許05767186, 表示装置及び電子機器, 松島 寿治

特許06141748, 表示装置, 松島 寿治

特許06100153, 液晶表示装置及び電子機器, 松島 寿治

特許06268035, 液晶表示装置及び電子機器, 松島 寿治

特許06630068, 液晶表示装置, 松島 寿治;瀧澤 圭二;上原 利範

特許06247149, 液晶表示装置及び電子機器, 松島 寿治

特許06504990, 液晶表示装置, 松島 寿治;鈴木 大地

特許06609491, 液晶表示装置, 松島 寿治

米国

登録番号, 発明等の名称, 発明者

US9298051, "Display device, electronic apparatus, and method of  
manufacturing display device", Matsushima Toshiharu;

US9383614, Liquid crystal display device, Matsushima Toshiharu;

US9746706, Display device and electronic apparatus, Matsushima  
Toshiharu;

US9513516, Liquid crystal display device having a plurality of comb-shaped  
portions protruding from an electrode base portion and  
electronic apparatus, Matsushima Toshiharu;

US9581868, Liquid-crystal display device and electronic apparatus,  
Matsushima Toshiharu;

US9891456, Liquid crystal display device and electronic apparatus,  
Matsushima Toshiharu;

US9785021, Liquid crystal display device, Matsushima Toshiharu; Takizawa  
Keiji; Uehara Toshinori;

US9575384 , Liquid crystal display device and electronic apparatus ,  
Matsushima Toshiharu;  
US9835910 , Display device , Matsushima Toshiharu;  
US9733528 , Display device , Matsushima Toshiharu;  
US9910323 , Liquid crystal display device , Matsushima Toshiharu; Suzuki  
Daichi ,  
US10007162 , Liquid crystal display device , "Matsushima Toshiharu;"  
US10416497 , Liquid crystal display device , "Matsushima Toshiharu;"  
US10175537 , Liquid crystal display device , "Matsushima Toshiharu;"  
US10317752 , Liquid crystal display device , "Matsushima Toshiharu;"

⑥ 報道発表

- ・株式会社ジャパンディスプレイのニュースリリース（最新順）  
2019.05.08：世界最大規模のディスプレイ国際学会 『SID DISPLAY WEEK  
2019』 出展  
2018.11.27：高精細 VR ヘッドマウントディスプレイの開発  
2018.05.10：高精細 VR 専用液晶ディスプレイ 1001ppi を開発  
2017.12.12：高精細 VR 専用液晶ディスプレイ 803ppi を開発  
2016.11.21：VR 専用の超高精細・高速応答 液晶ディスプレイの開発