

博士学位論文

論文題目

電子ホログラフィック立体ディスプレイ用
液晶空間光変調素子の高解像度化に関する研究

令和2年1月

東北大学大学院工学研究科

電子工学専攻

磯前 慶友

Study on Resolution Improvement of Liquid Crystal Spatial Light Modulators for Electronic Holographic Three-dimensional Displays

Recently, three-dimensional (3D) displays attract much attention due to development of augmented reality and virtual reality technologies. However, 3D displays based on conventional stereograms cause visual fatigue and discomfort because they cannot satisfy all depth perception cues. To overcome this, electronic holographic displays are desired. They can reconstruct wavefront and direction of object light by displaying interference fringes (holograms) on spatial light modulators (SLMs).

Electronic holographic displays are not in practical use because their field of view is very narrow. The field of view of electronic holographic displays determined by the maximum light diffraction angle of SLM. Conventional liquid crystal (LC) SLM with 3- μm -pitch pixels has been suggested, however, the field of view is 10.5° and it is not practical. The field of view of 30° is required, and this means that SLMs must have 1- μm -pitch pixels. Therefore, an objective in this paper is realization of 1- μm -pitch SLM.

First, we simulated LC alignment in 1- μm -pitch pixels based on elastic continuum theory to investigate LC-SLM model containing such small pixels. Figure 1 shows the simulation result of 1- μm -pitch pixels. In this figure, the curve continuous lines are the equipotential lines and the short straight lines are LC alignment directors. Focusing on the LC alignment in the OFF-state pixel, the LC directors are rotated by the leakage of electric field and the penetration of elastic force of LC. From this result, we clarify that individual pixel driving is difficult when the pixel pitch is 1 μm . To solve this, we investigate LC materials and pixel structure individually.

In the above simulation, we supposed nematic LC (NLC), which is generally material used in prevailed displays. As LC material for high-resolution displays, ferroelectric LC (FLC) has been suggested. FLCs can modulate amplitude of light by controlling the azimuth angle of the LC directors by applying direct current voltage. FLC material is expected to change LC alignment sharply between ON and OFF-state pixels due to its steep threshold characteristics. In this paper, we clarify that FLC can achieve higher resolution than NLC and that FLC is suitable for amplitude-modulation SLMs for electronic holographic displays.

To reduce the effects of adjacent pixels by pixel structure, LC must be divided into pixel regions to block the penetration of elastic force of LC. In addition, the leakage of electric field must be suppressed. As pixel structure that meets these requirements, we suggest dielectric

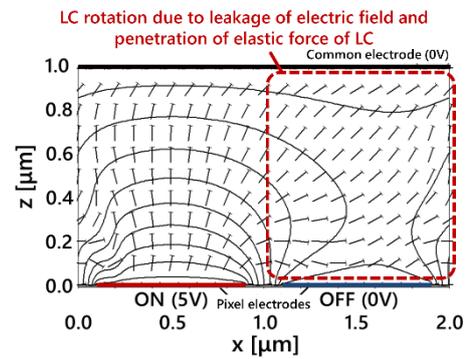


Figure 1 Simulation result of 1- μm -pitch LC pixels.

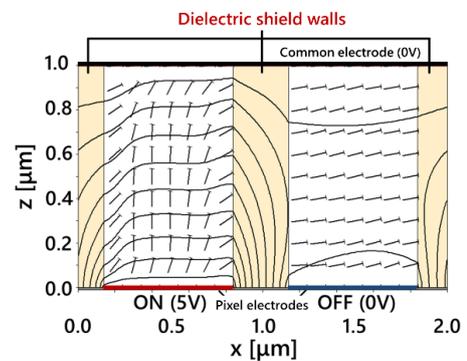


Figure 2 Simulation result of dielectric shield wall structure

shield wall structure. This pixel structure has dielectric walls between pixels. Figure 2 shows the simulation result of dielectric shield wall structure. Dielectric walls suppress the leakage of electric field, and the penetration of LC elastic force is blocked. From this result, we clarify that individual pixel driving can be realized by dielectric shield walls.

We employed optical nanoimprint technology for fabrication of dielectric walls because this technology can form nano scaled polymer structure by dielectric materials with high aspect ratio. Figure 3 (a) shows the procedure of nanoimprint technology. First, ultraviolet (UV)-curable resin is coated on the glass substrate. Next, the mold presses the resin, and the resin is polymerized by UV-exposure. Finally, the mold is peeled off. Figure 3 (b) shows the cross-sectional view of polymer walls fabricated by this technology.

In the dielectric shield wall structure, it is considered that the LC alignment is unstable because of the effects of the wall surfaces. This surface effect is dominant in the whole of the thickness direction in the LC layer. From this reason, we suggest dielectric walls with partition plates (Figure 4 (a)). The partition plates divide LC into rectangular regions. We expected that LC directors become parallel to the long axis of the LC rectangular regions with spatial anisotropy for minimizing elastic alignment deformation. Figure 4 (b) shows the cross-sectional SEM image of the dielectric shield wall structure having partition plates formed by the nanoimprint technology.

To evaluate the LC alignment uniformity, we observed the fabricated LC cell including dielectric walls with partition plates using a polarizing microscope. The observation results are shown in Figure 5. In Figure 5 (a), the angle between LC alignment direction and polarizing direction was 45° , and in Figure 5 (b), it was 0° . The LC cell exhibited uniform bright state in Figure 5 (a) and uniform dark state in Figure 5 (b). This means that uniform LC alignment was achieved. From these results, we

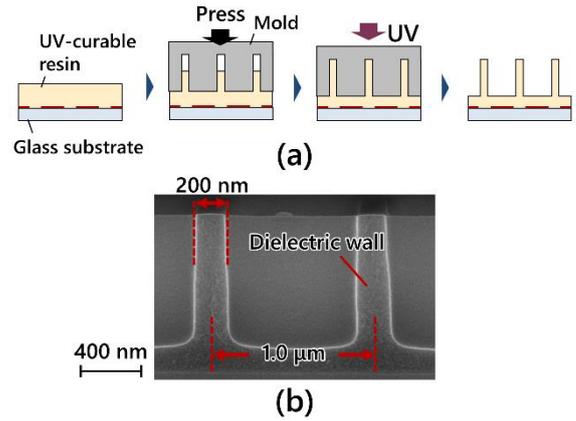


Figure 3 Fabrication of dielectric walls by nanoimprint technology: (a) procedure of nanoimprinting and (b) cross-sectional view SEM image.

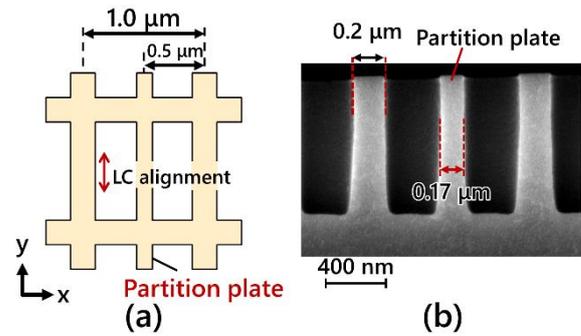


Figure 4 Dielectric shield wall structure having partition plates: (a) top view and (b) cross-sectional SEM image.

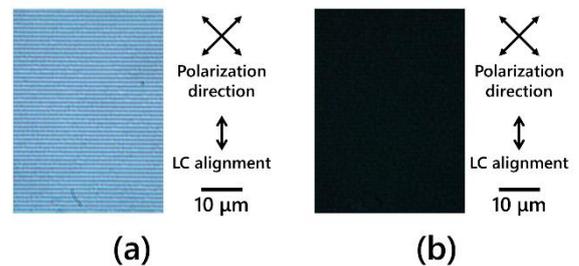


Figure 5 Photomicrographs of LC cell having dielectric walls with partition plates. The angles between LC alignment and incident light polarization are 45° (a) and 0° (b).

clarify that dielectric shield wall structure with partition plates can achieve uniform LC alignment.

We also experimentally examined individual pixel driving by 1-dimensional 1- μm -pitch pixels. In the fabricated LC cell, we used 1- μm -pitch stripe-shaped electrodes that are connected two different terminals and interdigitated (Figure 6 (a)). If one terminal is OFF state, and another is ON state, these electrodes can reproduce OFF and ON-state pixels alternatively.

Figure 6 (b) shows the observation result. When all electrodes are OFF state, we can see the lattice dielectric walls. When one terminal is ON state, individual dark and bright lines are appeared. This result shows that individual 1- μm -pitch pixel driving was achieved.

In this paper, we studied on the SLMs having 1- μm -pitch LC pixels to realize practical electronic holographic displays. We clarified that individual pixel driving is difficult due to the leakage of electric field and the elastic force of LC from adjacent pixels when the pixel pitch is 1 μm . To solve this problem, we investigated LC material and pixel structure. FLC is suitable for amplitude-type SLM because it achieves higher resolution than NLC. We also proposed the dielectric shield wall structure and clarified that this structure enable individual 1- μm -pitch pixel driving by the simulations and experiments. We also established an LC alignment technique in lattice shaped dielectric wall. These results can contribute realization of 1- μm -pitch SLM for electronic holographic displays with wide field of view in coming information-based society.

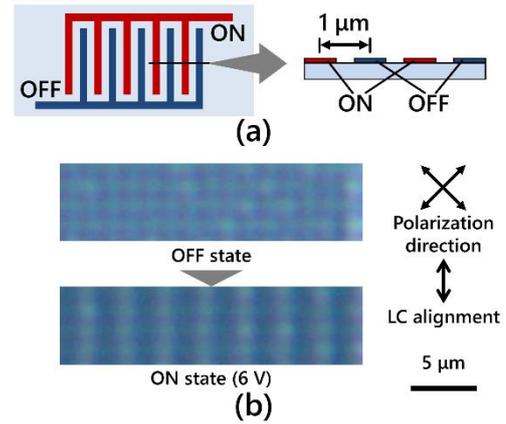


Figure 6 Examination of 1- μm -pitch pixel driving with 1-dimensional pixel array: (a) 1- μm -pitch 1-dimensional stripe electrodes and (b) observation results.

目次

第1章	序論.....	1
第2章	微細な液晶画素を有する SLM の課題.....	10
2.1	はじめに.....	10
2.2	液晶を用いた SLM の構造.....	10
2.3	液晶配向とホログラム再生像のシミュレーション方法.....	13
2.3.1	液晶の弾性連続体理論.....	13
2.3.2	光学計算によるリタレーションと位相シフトの算出.....	14
2.3.3	ホログラム再生像シミュレーションのための光学計算手法.....	15
2.4	1 μm ピッチの液晶画素で生じる問題.....	21
2.4.1	振幅変調型 SLM の液晶配向分布.....	22
2.4.2	位相変調型 SLM の液晶配向分布.....	23
2.4.3	液晶配向方向に対して直交する方向に並ぶ隣接画素の影響.....	23
2.4.4	液晶の弾性力のみを考慮した液晶配向シミュレーション.....	25
2.5	画素内で不均一な位相分布が再生像に及ぼす影響.....	33
2.5.1	画素内の不均一な位相分布を考慮した再生像シミュレーション手法.....	33
2.5.2	回折効率の比較によるシミュレーション手法の評価.....	35
2.5.3	画素内の不均一な位相分布がホログラム再生像に及ぼす影響.....	37
2.6	まとめ.....	39
第3章	強誘電性液晶を用いた振幅変調型 SLM.....	51
3.1	はじめに.....	51
3.2	強誘電性液晶とは.....	51
3.3	強誘電性液晶の解像度特性.....	54
3.4	まとめ.....	56
第4章	誘電体シールド壁構造を用いた位相型 SLM.....	63

4.1	はじめに.....	63
4.2	誘電体シールド壁構造の提案.....	63
4.3	誘電体シールド壁構造の設計.....	68
4.3.1	誘電体シールド壁構造の設計パラメータ.....	68
4.3.2	壁構造の設計パラメータの最適化.....	69
4.4	壁構造に設けた液晶注入用のスリットの影響.....	77
4.5	1次元の誘電体シールド壁構造の試作と評価.....	86
4.5.1	実験用液晶セルの構造と作製手順.....	86
4.5.2	誘電体の残膜を考慮した液晶配向シミュレーション.....	88
4.5.3	1次元の画素配列を有する誘電体シールド壁構造液晶セルの観察.....	89
4.5.4	誘電体壁を有する液晶セルの光変調による回折光の観察.....	91
4.6	格子状壁構造内の液晶配向制御技術.....	101
4.6.1	格子状の誘電体シールド壁構造の液晶配向.....	101
4.6.2	底面に微細な溝を有する誘電体シールド壁構造の液晶配向.....	102
4.6.3	間仕切り板を有する誘電体シールド壁構造の液晶配向.....	103
4.7	まとめ.....	104
第5章	結論.....	115
	参考文献.....	117
	研究業績.....	123
	謝辞.....	128

第1章 序論

情報化社会の進展に伴い、電子ディスプレイは情報と人間を繋ぐインターフェースとして我々の生活に欠かせないものとなった。

電子ディスプレイはブラウン管の発明に始まり、液晶ディスプレイの登場により大画面化と高解像度化が進み、高い臨場感をユーザーに与えられるように進化してきた[1]。近年では、スーパーハイビジョン用の超高解像度ディスプレイが開発され、没入感の高い映像体験が可能になった[2]。しかし、依然として2次元の映像を表示する方式であることから、原理上、映像の奥行きを表現することはできない。そのような背景の中で、立体ディスプレイに対する期待が高まっている。立体ディスプレイは、人間の立体視の視覚特性に基づいた映像を出力することにより、映像の奥行きを表現可能であることから、次世代の高臨場感ディスプレイとして期待されている。さらに、近年の仮想現実 (Virtual reality, VR) や拡張現実 (Augmented reality, AR) といった新たな情報提示技術の提案[3]により、立体ディスプレイの応用先が広がっている。テレビ放送や映画、ゲームといった映像コンテンツを立体表示で楽しむだけでなく、製造分野における作業支援用のディスプレイ[4]として活用されている。さらに医療分野では、ロボット精密手術において施術者が使用するディスプレイとして実用化されている[5]。これらの背景から、立体ディスプレイは社会において、今後さらに重要な役割を担っていくことが期待される。

人間が立体感を得られる映像を出力するためには、人間の立体視の機構に基づいた映像を出力する必要がある[6],[7]。立体視の機構としては両眼視差が一般的に知られているが、自然な立体表示を実現するためには、図 1.1 に示す、水晶体の調節機構、輻輳角、運動視差を加えた4つの要因を考慮する必要がある。各要因の詳細は下記のとおりである。

- 水晶体の調節機構：目に入射した物体光が網膜上に結像するように水晶体を伸

縮して調節する。この伸縮の程度から、物体との距離を知覚する。

- 輻輳角：注視している物体の距離によって両眼の視線のなす角が変わるため、両眼の角度の関係から物体との距離を知覚する。
- 両眼視差：右目と左目で見える映像の差異（空間的視差）から物体との距離を知覚する。
- 運動視差：物体や観察者が動いたときに生じる映像の差異（時間的視差）から、物体との距離や空間的な構造を知覚する。

立体ディスプレイの方式として、両目に視差画像を提示することで立体感を生じさせる二眼式が最も古くから知られている。二眼式は立体視の要因のうち、両眼視差と輻輳角を満足することができるが、目のピントは映像を提示する位置に合ったままであり、視点も1箇所のみであることから、水晶体の調節機構と運動視差を満足することが原理上困難である。特に、水晶体の調節機構と輻輳角の間で整合性が取れていない場合に、目の疲労や不快感を生じることが報告されている[8]。インテグラルフォトグラフィ（Integral Photography, IP）方式[9], [10]はレンズアレーと要素画像を提示する表示素子によって立体像を再生する方式であり、多視点での立体像の観察が可能となる。超多眼条件を満たす場合には、再生像の1点を2本以上の光線が通過するため、目のピントが再生像の位置に合う立体表示が可能である[11]。超多眼条件を満たしたIP方式は立体視の要因をすべて満たすことが可能であるが、ディスプレイから奥方向に立体像を再生する場合に十分な解像度を得るためには、要素画像を表示する素子を高密度化しなければならない[12]。また、最短視距離が限られるため、ヘッドマウントディスプレイのように目に近づけた小型ディスプレイで表示を行う方式に適用することが困難である。このことから、ディスプレイの形態としては直視型に限られるため、膨大な画素数が必要である。

これらの課題を解決可能な方式として、電子ホログラフィックディスプレイが提案

されている[13]–[16]。ホログラフィは 1948 年に Gabor Denes によって発明された[17]、光の振幅情報に加え、位相情報を記録する写真技術である[18],[19]。記録段階では図 1.2 (a)に示すように、物体に光を照射し、反射光が通過する位置に感光材料を配置する。物体に照射した光と同じ波長の参照光を感光材料に照射すると、感光材料上で干渉し、物体光の振幅情報と位相情報が干渉縞として記録される。この干渉縞のことをホログラムと呼ぶ。再生段階では図 1.2 (b)に示すように、ホログラムに対して記録時の参照光と同じ角度・同じ波長の再生照明光を入射すると、干渉縞が回折格子となり、物体光が取り出される。このとき、物体光の位相情報も再現されることから、光が進む方向を含めた物体光が出射される。観察者の眼球内では、目に届いた物体光を網膜上に結像するように水晶体が伸縮する。このため、ホログラフィでは立体視の要因の一つである水晶体の調節機構が正しく働く。物体光自体が再現されていることから、他の立体視の要因についても満足される。

ホログラムを電子デバイスで表示して立体像を再生するディスプレイが、電子ホログラフィックディスプレイである。その原理を図 1.2 (c)に示す。電子ホログラフィックディスプレイでは、空間光変調素子 (Spatial light modulator, SLM) [20],[21] にホログラムを表示する。SLM に表示するホログラムは光学計算によって作製することが可能であるため、記録の手順は不要である。感光材料を用いた従来のホログラフィと同様に、光の進む方向の情報を含めた再生像の光が再生されることから、自然な立体表示が可能である。また、ホログラムを時間的に切り替えることによって動画表示も可能である。電子ホログラフィックディスプレイは視距離や再生像を表示可能な距離に制限がないため、ヘッドマウントディスプレイ用の小型ディスプレイとして用いることができる。これらの利点から、電子ホログラフィックディスプレイは次世代の立体ディスプレイとして実用化が期待されている。

現在、電子ホログラフィックディスプレイは再生像を観察可能な範囲 (視域) が小さいため、実用化に至っていない[15]。ホログラフィは光の干渉や回折現象により再生像

を再現することから、光が進む方向は SLM の画素ピッチに由来する最大回折角 ϕ_{diff} に制限される。SLM の画素ピッチを p 、光の波長を λ とすると、視域角 ϕ_{view} は次式により求められる。

$$\phi_{view} = 2\phi_{diff} = 2 \sin^{-1} \frac{\lambda}{2p} \quad (1)$$

この式より、図 1.3 (a)に示すように、SLM の画素ピッチ p が小さければ小さいほど電子ホログラフィックディスプレイの視域角 ϕ_{view} が大きくなる関係になる。現在、電子ホログラフィックディスプレイの研究では液晶を用いた SLM が広く用いられているが、液晶方式の SLM の最小画素ピッチは $3 \mu\text{m}$ であり[22]、光の波長を 550 nm とした場合の視域角は 10.5° と非常に狭い。視域角が狭いということはディスプレイに対する観察者の位置の許容範囲が制限されるだけでなく、表示可能な立体像のサイズや距離も制限される。参考として、視域角 10.5° で幅 20 cm の像を再生する場合、図 1.3 (b)に示したように、観察者から 144 cm 以上離れた位置でなければ表示できない。

実用的な電子ディスプレイとして、ハイビジョン相当の視域を達成することを考えると、電子ホログラフィックディスプレイが有するべき視域角は 30° となる。視域角が 30° の場合、図 1.3 (c)に示したように 20 cm の物体を 49 cm の位置に再生できることから、デスクトップでの使用が可能となる。式(1)と図 1.3 (a)より、 30° を実現するために必要な画素ピッチは $1 \mu\text{m}$ であるが、液晶を用いた SLM では $1 \mu\text{m}$ ピッチの画素は実現されていない。

$1 \mu\text{m}$ ピッチの画素を有する SLM を実現するために、フォトリフラクティブポリマーを用いる方式、磁気光学効果を用いる方式、相変化記録材料を用いる方式が提案されている。フォトリフラクティブポリマー[23]を用いる方式[24], [25]では、レーザー光を用いてホログラムパターンを書き込むため、 $1 \mu\text{m}$ を下回るピッチの干渉縞を表示可能である。しかし、書き込み用の光学系を用意する必要があるため、システムが大型になるという課題を有する。磁気光学効果を用いた方式[26]–[28]は、磁性体によるカー効果やファラデー効果により直線偏光の偏光方向を回転させる方式であることから、磁性体の

微細加工により画素ピッチを小さくすることが可能である。しかし、磁気光学効果を用いた方式は偏光の回転角が小さいため、光の利用効率を向上させる必要がある。相変化記録材料を用いる方式[29], [30]は電圧や熱によって書き込みが可能であり、結晶状態とアモルファス状態の反射率の差から振幅を変調可能であるが、振幅変調型であることから光利用効率が低い。また、レーザー書き込み方式の場合は書き込み用の光学系が必要である。

一方、液晶を用いた方式は、振幅変調型とした場合は偏光方向を 90° 回転させることが可能であることから、光利用効率が高い。位相変調型とした場合は、光の位相を連続的に変調可能であることから、振幅型よりも光利用効率が高い位相型ホログラムを表示可能である[18]。さらに、プロジェクター用の反射型液晶ディスプレイに用いられる半導体回路基板を用いるため、電気的なアクセスのみで画素を制御することが可能であり、小型のディスプレイシステムを実現できるという利点を有する[20]。これらの理由から、本論文では液晶方式の SLM を用いた電子ホログラフィックディスプレイにおいて実用的な視域角を実現するために、 $1\ \mu\text{m}$ ピッチの画素の実現について検討を行った。

本論文の構成を図 1.4 に示す。第 1 章は序論である。第 2 章では微小な液晶画素において生じる課題について、液晶の弾性体理論に基づいて画素駆動とホログラム再生像の観点から議論する。第 3 章では微小な画素を有する振幅変調型 SLM の液晶層の設計として、強誘電性液晶の有用性について議論する。第 4 章では位相変調型の SLM において、画素ごとの独立した駆動を実現するための誘電体シールド壁構造を用いた液晶画素の設計について述べる。第 5 章は結論である。

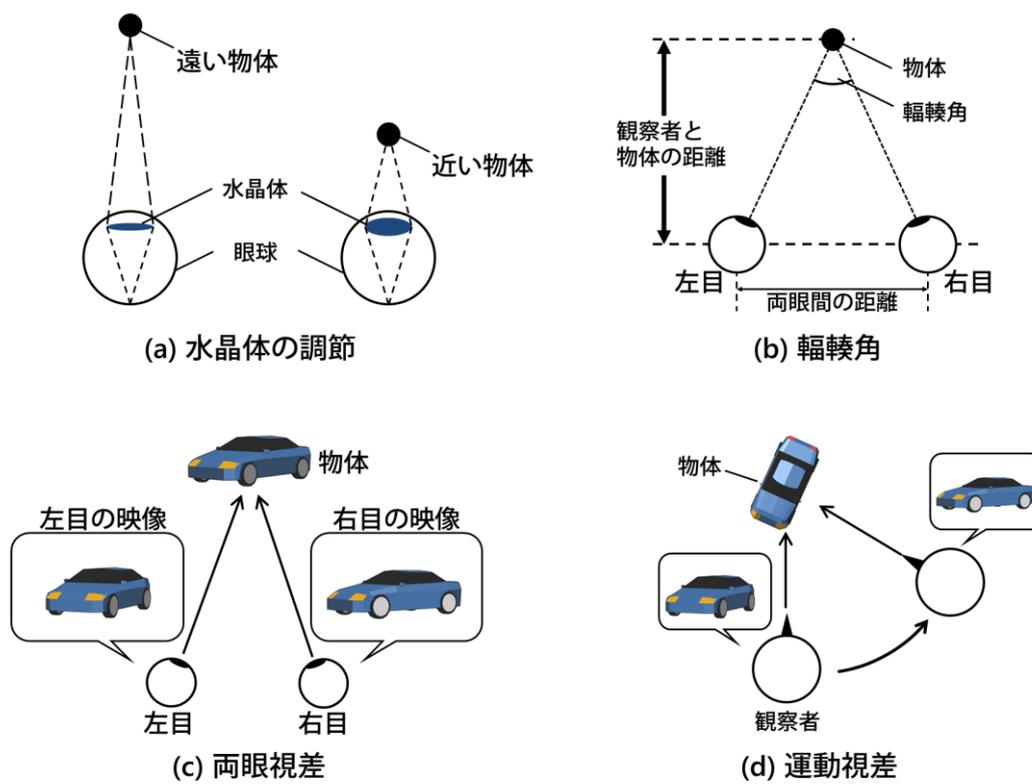


図 1.1 人間の立体視の要因：(a)水晶体の調節，
(b)輻輳角，(c)両眼視差，(d)運動視差

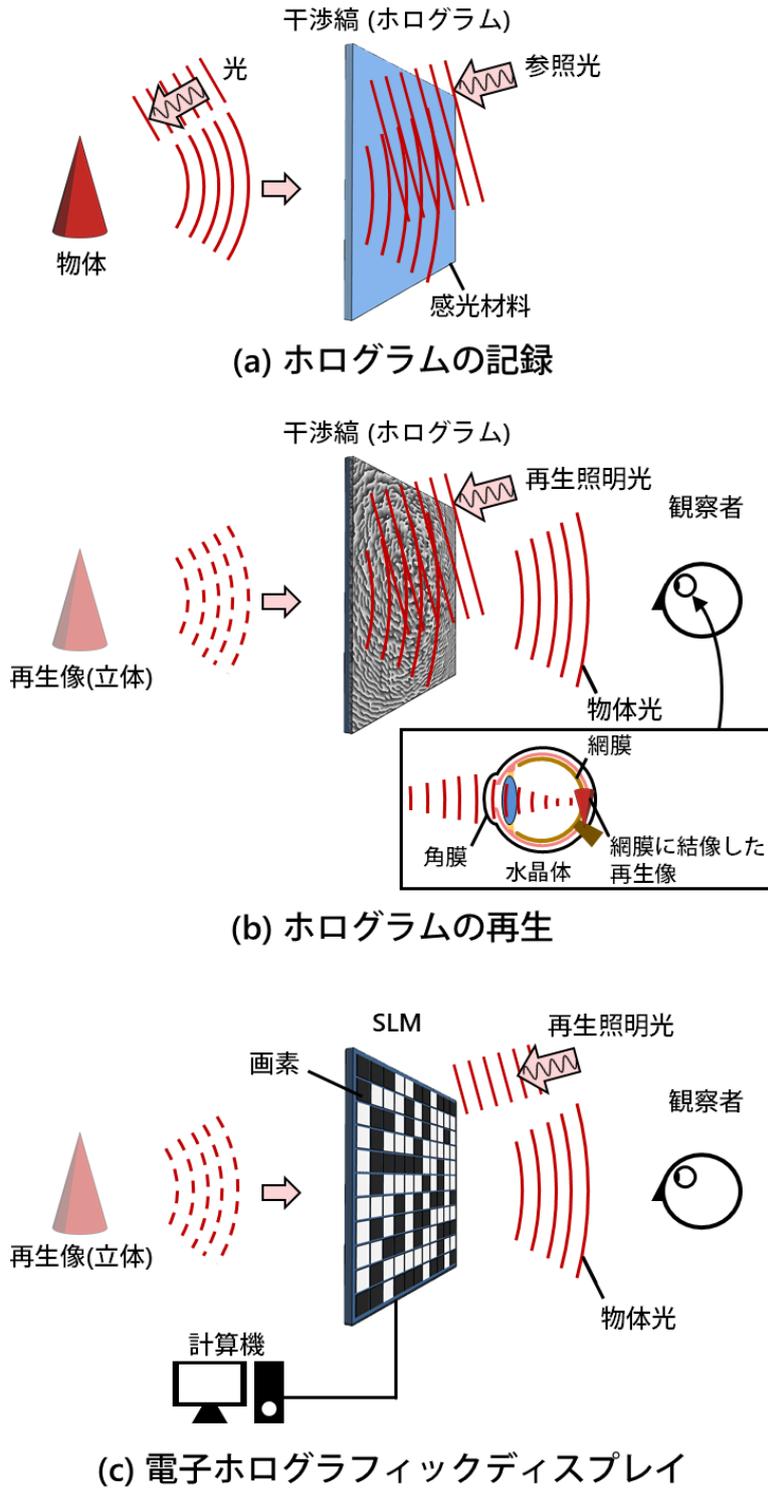
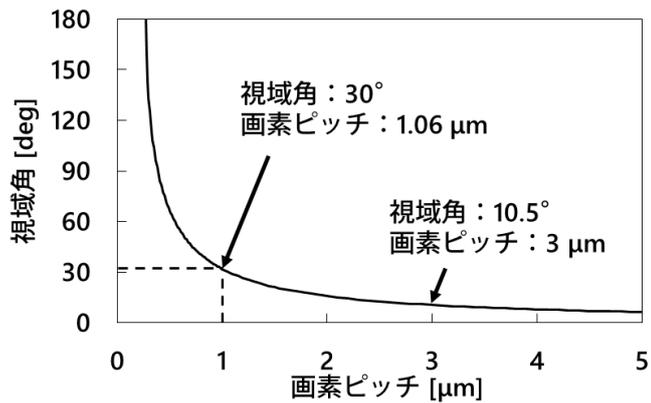
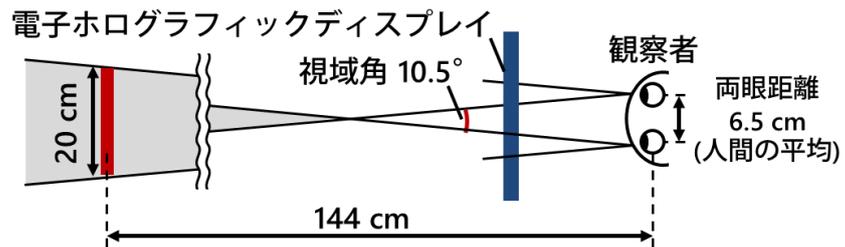


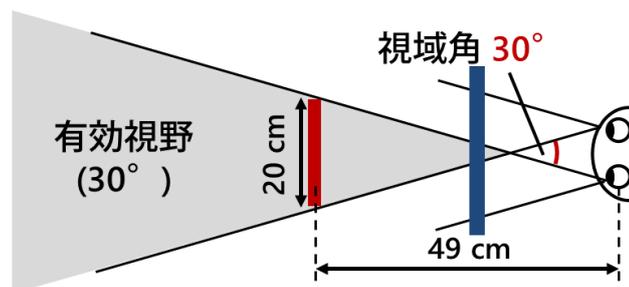
図 1.2 電子ホログラフィックディスプレイの原理：
 (a)ホログラムの記録，(b)ホログラムの再生，
 (c)電子ホログラフィックディスプレイ



(a) 画素ピッチと視域角の関係



(b) 画素ピッチが3 μm のときの視域角



(c) 画素ピッチが1 μm のときの視域角

図 1.3 電子ホログラフィックディスプレイの視域角：
 (a)画素ピッチと視域角の関係，(b)画素ピッチが3 μm のときの
 視域角，(c)画素ピッチが1 μm のときの視域角

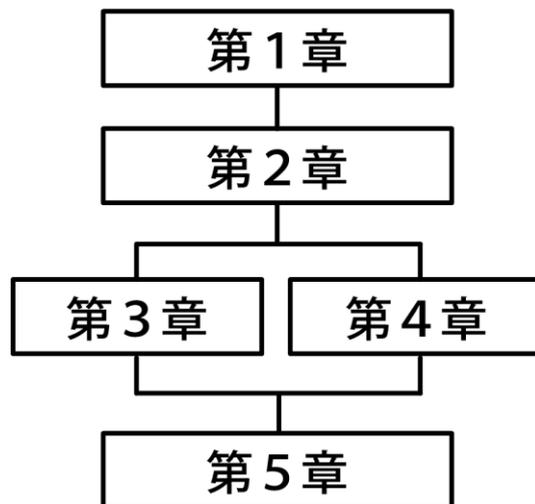


図 1.4 本論文の構成

第2章 微細な液晶画素を有する SLM の課題

2.1 はじめに

30°の視域角を有する電子ホログラフィックディスプレイを実現するためには、1 μm ピッチの微小な液晶画素を有する SLM を実現する必要がある。しかし、これまでに 1 μm ピッチの微細な液晶画素を実現した例はない。また、10 μm ピッチ程度においても画素間で生じるフリンジ電界により、隣接する画素の端部の液晶も回転するという課題が報告されている[31]ことから、1 μm ピッチの画素においても独立した画素駆動が困難となることが懸念される。

そこで、本章では 1 μm ピッチの液晶画素において生じる課題について、液晶の弾性体理論に基づいた数値シミュレーションにより検討を行った。

2.2 液晶を用いた SLM の構造

一般に液晶を用いた SLM は、図 2.1 に示すように、画素電極と駆動回路を有するシリコン回路基板と、ガラス基板で液晶を挟んだ構造をとる。共通電極である透明電極を有するガラス基板側から光を入射し、シリコン回路基板上に配置された画素電極上の反射膜で光を反射する反射型デバイスである。微細な画素を有する透過型ディスプレイと比較すると、反射型のデバイスの方が、シリコン基板内にトランジスタなどの駆動回路を作り込めるため、画素ピッチが小さくても高い開口率を実現可能であるという利点を有する。

SLM では光の変調度を十分に得ることが必要であることから、一般的に光学異方性が大きく、正の誘電異方性を有するネマティック液晶材料が用いられる[20],[32]。正の誘電異方性を有する液晶を基板に垂直な方向の電界で駆動するため、液晶分子は基板に対して平行配向とするのが一般的である。このとき、振幅変調型 SLM での液晶配向は、画素電極の配列方向に対して 45°、位相変調型では 0°（もしくは 90°）とすることが一

一般的である。

振幅型の場合は入射する光と出射する光の偏光方向が 90° となるように偏光板を配置して使用する。液晶に印加する電圧を 0 V (OFF 状態) とすると、液晶の配向は基板に対して平行であるため、入射した光の偏光状態が液晶の複屈折により変化し、出射側の偏光板を透過して、明状態となる。一方、液晶に電圧を印加すると (ON 状態)、電界の力 (クーロン力) により液晶が基板に対して垂直な方向に配向するため、偏光状態が変化せず、出射側の偏光板に吸収されることから、暗状態となる。

位相型の場合は、液晶の配向方向と平行な偏光を入射し、出射側には偏光板を設けない。画素が OFF 状態のとき、液晶が基板に対して平行であるため、入射した光に対しては屈折率が高い状態となる。画素が ON 状態のとき、液晶の配向は基板に対して垂直になるため屈折率が低くなる。このため、OFF 状態の画素と比較して ON 状態の画素から出射する光の位相が進み、光の位相が変調可能である。

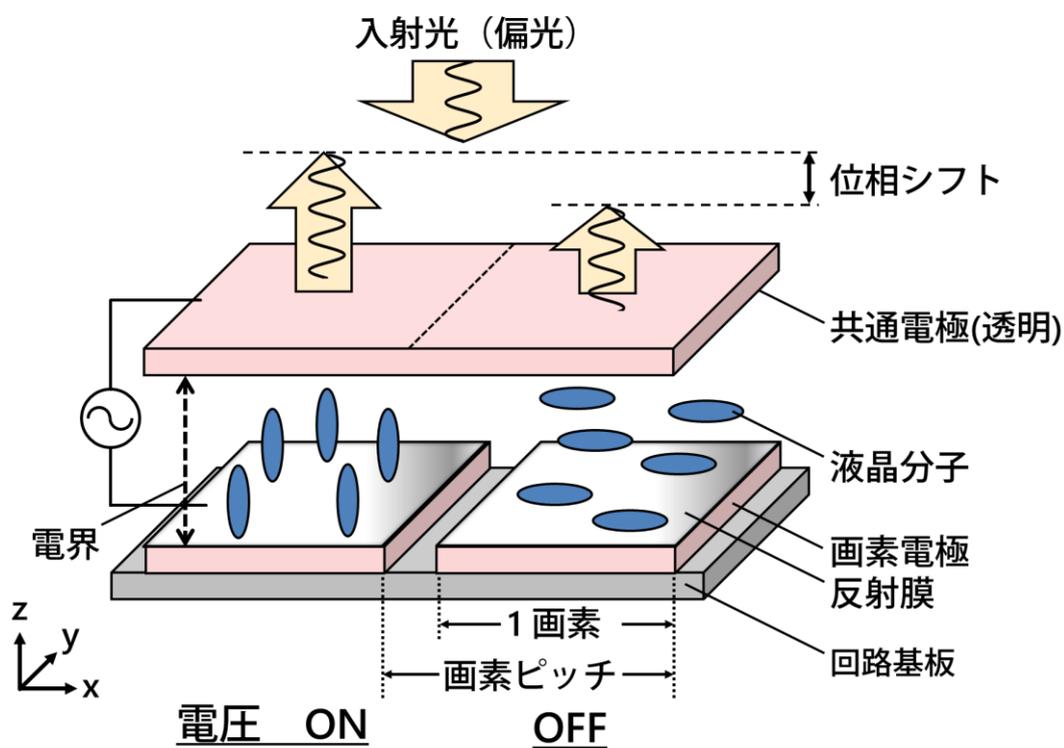


図 2.1 液晶を用いた位相変調型の SLM の基本的な構造

2.3 液晶配向とホログラム再生像のシミュレーション方法

2.3.1 液晶の弾性連続体理論

液晶の配向分布は弾性連続体理論に基づいた数値シミュレーションにより求めることができる。ここでは、液晶の弾性連続体理論[33]–[35]について簡単に述べる。

液晶分子よりも十分大きく、ある程度の体積における液晶分子の向きの平均ベクトルをダイレクタ \mathbf{n} と呼ぶ。液晶の弾性連続体理論により、単位体積あたりのダイレクタ \mathbf{n} の自由エネルギー密度は次式で求められる。

$$f_{elastic} = \frac{1}{2}k_{11}(\text{div } \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2}k_{22}(\mathbf{n} \cdot \text{rot } \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2}k_{33}|\mathbf{n} \times \text{rot } \mathbf{n}|^2 \quad (2)$$

ここで、 k_{11} 、 k_{22} 、および k_{33} はフランクの弾性定数であり、それぞれスプレイ、ツイスト、バンド変形の弾性定数である。液晶に対して電界を印加した際の配向を求めるには、電界による自由エネルギーの変化も考慮に入れる必要がある。電界 E による単位体積あたりの自由エネルギー $f_{electric}$ は次式で表される。

$$f_{electric} = \frac{1}{2}\mathbf{D} \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{2}\varepsilon\mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \quad (3)$$

さらに、基板表面では、液晶のダイレクタを配向容易軸に向けようとする力（アンカリング力）が働く。配向容易軸は極座標系で表現され、実際のデバイスでは配向条件によって決定づけられる。例えばラビング法を用いた平行配向膜の場合は、配向容易軸の方位角がラビングの方向、極角がプレチルト角に相当する。図 2.2 に示すように基板表面(x-y 平面)に対するダイレクタの極角 θ と方位角 ϕ を定義し、配向容易軸を極角 θ_e 、方位角を ϕ_e とすると、単位面積あたりのアンカリングエネルギー $f_{s,\theta}$ 、 $f_{s,\phi}$ は次式で表される。

$$f_{s,\theta} = \frac{1}{2}A_\theta \sin^2(\theta - \theta_e) \quad (4)$$

$$f_{s,\phi} = \frac{1}{2}A_\phi \sin^2(\phi - \phi_e) \quad (5)$$

ここで、 A_θ 、 A_ϕ はそれぞれ極角方向のアンカリング強度、方位角方向のアンカリン

が強度である。ここまで示した自由エネルギー密度から全自由エネルギー F を導くには体積積分をすればよいため、

$$F = \int (f_{elastic} - f_{electric} + f_{s,\theta} + f_{s,\phi}) dV \quad (6)$$

となる。

液晶配向をシミュレーションするためには、全自由エネルギーが最小になるように再帰計算を行う。このとき、電界分布はポアソン方程式を数値的に解くことにより求められる。解析法としては、解析領域を直方体で区切る差分法や、四面体で区切る有限要素法を適用可能であるが、本論文では特記しない場合は差分法を用いた。その理由は、本論文で扱う液晶画素構造が単純であり、有限要素法と比較して差分法の方が計算量を低減できるからである。

2.3.2 光学計算によるリタデーションと位相シフトの算出

全自由エネルギーの再帰計算により求めた液晶配向から、光学的な計算を行って反射率や位相シフトを算出する。振幅変調型の場合において偏光状態の変化を及ぼすリタデーション δ は、遅相軸と平行な偏光成分が受ける実効的な屈折率 n_{eff} と、それに直交する常光屈折率 n_o の差を厚み方向に積分すれば求められる。よって、リタデーション δ は次式で表される。

$$\delta = \int_0^d (n_{eff} - n_o) dz \quad (7)$$

ただし、 n_{eff} は液晶材料の異常光屈折率を n_e 、x-y平面に対するダイレクタの傾きを ψ とすると、

$$n_{eff} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \psi + n_o^2 \cos^2 \psi}} \quad (8)$$

で示される。

位相変調型の場合、プレチルトを考慮した初期配向の見かけの屈折率を n_{init} とすると、電圧印加により液晶が垂直に近づき、位相が進むことになる。このため、初期配向に対して位相が進む場合を正とすると、位相シフト θ_{PS} は次式で表される。

$$\theta_{PS} = - \int_0^d (n_{eff} - n_{init}) dz \quad (9)$$

マイナスが乗算されているのは、考慮するデバイスにおいて初期配向から電圧を印加した際に実効的な屈折率 n_{eff} が減少するからである。なお、反射型のデバイスである場合は液晶層を光が1往復するため、リタレーションと位相シフトはそれぞれ2が乗算される。

2.3.3 ホログラム再生像シミュレーションのための光学計算手法

ホログラムは光の干渉縞であることから、光学計算により作製することが可能である[36]–[40]。同様に、ホログラムの再生についても光学計算によりシミュレーションすることが可能である。ここでは、光学計算手法とホログラムを作製する手順を述べる。

本論文では、光学計算手法として角スペクトル法[41]を採用した。角スペクトル法は開口に近接した領域の複素振幅分布を算出可能なレーリー・ゾーマンフェルトの回折式と同等の結果を導くことができるため、計算機ホログラムにおいて広く用いられている光学計算手法である[42]。角スペクトル法は、ある面における光の波面を平面波に分解し、それぞれの平面波を伝搬した後、重ね合わせることで伝搬後の光の波面を算出する。図 2.3 に示すように、複素振幅分布 $U(x, y, 0)$ を、 z_0 の距離だけ伝搬したあとの複素振幅分布を $U(x, y, z_0)$ とすると、角スペクトル法における平面波への分解(10)、平面波の伝搬(11)、平面波の重ね合わせ(12)の式は次のように表される。

$$A(f_x, f_y; 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) \exp\{-j2\pi(f_x x + f_y y)\} dx dy \quad (10)$$

$$A(f_x, f_y; z_0) = A(f_x, f_y; 0) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2} z_0\right) \quad (11)$$

$$U(x, y, z_0) = \iint_{-\infty}^{\infty} A(f_x, f_y; z_0) \exp\{j2\pi(f_x x + f_y y)\} df_x df_y \quad (12)$$

ここで、 f_x と f_y は空間周波数であり、 $A(f_x, f_y; 0)$ は $U(x, y, 0)$ の角スペクトルである。また、 z_0 の符号が正のときは光の進む方向の伝搬計算、 z_0 の符号が負のときは光が進む方向とは逆向きの伝搬（逆伝搬）計算となる。

計算によりホログラムを作製するためには、再生する物体の複素振幅分布を、ホログラムを設置する位置まで光伝搬計算する。例えば再生する物体の複素振幅分布を $U_{img}(x, y, 0)$ とし、ホログラムまでの距離を z_0 とすると、ホログラムの複素振幅分布は $U_{img}(x, y, z_0)$ となる。一般的な SLM は、光の振幅分布または位相分布を変調可能であることから、ホログラム面の複素振幅分布 $U_{img}(x, y, z_0)$ から振幅分布のみを取り出した場合は振幅型ホログラムとなり、位相分布のみを取り出した場合は位相型ホログラムとなる。

位相型ホログラムの場合、光伝搬計算の初期値である物体面における位相情報が不明であることから、1回の光伝搬計算のみでは再生像の画質が著しく低下する。このため、位相型ホログラムの場合は物体面における位相情報を算出するために、位相回復計算を行うことが一般的である。本論文では、容易なアルゴリズムで効果的に位相回復を行うことが可能であるという理由から、Gerchberg-Saxton 法 (GS 法) [43], [44] により位相回復を行い、位相型ホログラムを作製した。図 2.4 に GS 法のアルゴリズムの概要を示す。まず初期値として、物体面の振幅分布を再生したい像とする。位相分布は任意の値でよいため、本論文ではランダムな位相分布とした。次に、物体面からホログラム面まで光伝搬計算を行う。光伝搬計算を行うと、ホログラム面における振幅分布は不均一となるが、実際には均一な振幅分布をもった再生照明光をホログラムに照射する。すなわち、ホログラム面において振幅分布は均一でなければならないという制限があるため、光伝搬計算により求められた位相分布はそのままに、均一な振幅分布を反映する。このようにして作られた複素振幅分布を物体面まで逆伝搬すると、ノイズが乗った像が再生される。物体面では再生したい像の振幅分布でなければならないという制限があるため、これを反映し、光伝搬計算を行う。このように、物体面とホログラム面それぞれにおける振幅分布の制限を反映しながら、物体面とホログラム面の間で伝搬と逆伝搬の計算を繰り返すことにより、物体面における位相分布を回復することができる。回復した位相分布を用いて物体面からホログラム面に光伝搬計算を行ったあとの位相分布が位相型

ホログラムとなる.

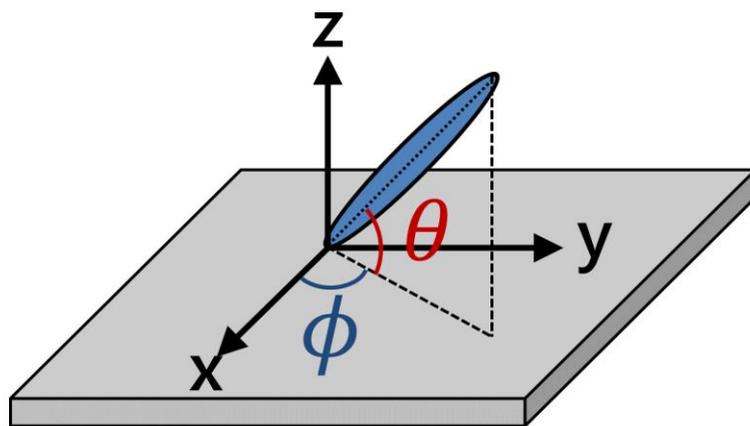


図 2.2 基板表面に対するダイレクタの極角 θ と方位角 ϕ の定義

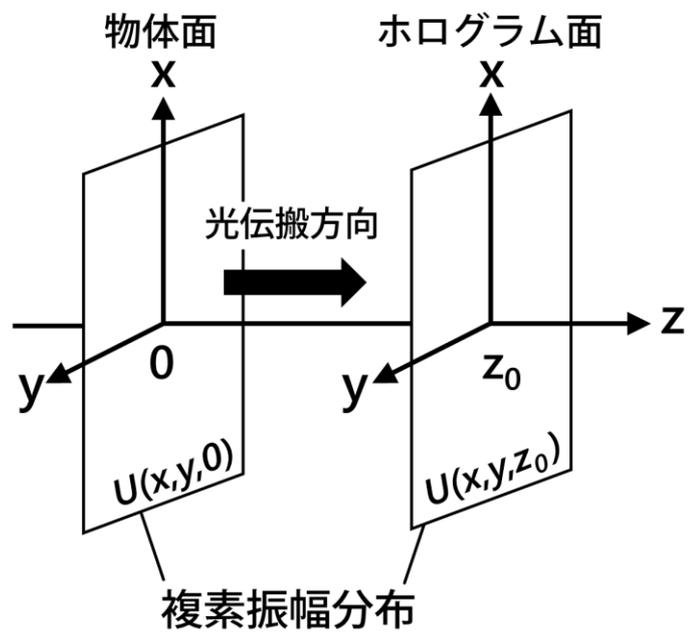


図 2.3 光伝搬計算の座標系

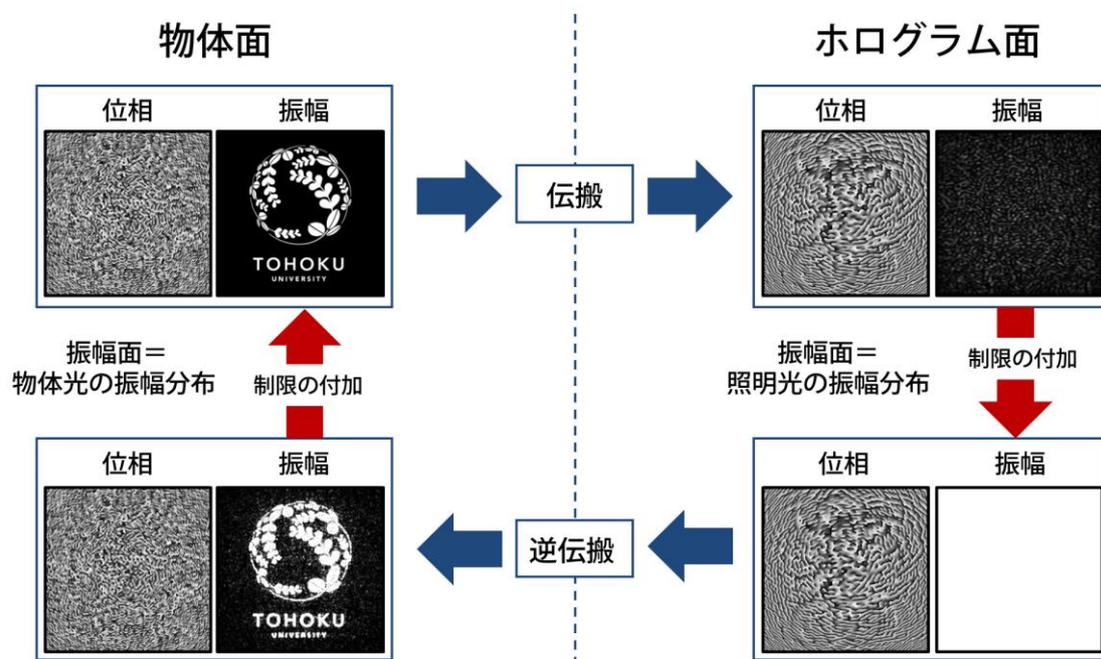


図 2.4 Gerchberg-Saxton 法の概要

2.4 1 μm ピッチの液晶画素で生じる問題

1 μm ピッチの画素内における液晶配向を、弾性連続体理論に基づいた数値シミュレーションにより算出した。シミュレーションで用いたモデルを図 2.5 に示す。画素ピッチは 1 μm に加え、比較として一般的なプロジェクター用のデバイスを想定した 10 μm ピッチについてもシミュレーションを行った。画素電極の幅はそれぞれ 0.8 μm , 8 μm とし、印加する電圧は 5 V とした。液晶が電圧に応答して傾く方向を均一化するために、上下基板に対する液晶のプレチルト角は 10° とした。上下基板の表面においては、液晶のダイレクタが完全に固定されているとした（強アンカリング条件）。配向方位は画素の配列方向（x 軸方向）に対して平行な直線偏光を入射することを想定し、振幅変調型の場合は方位 45°、位相変調型の場合は方位 0° とした。ここで、SLM の用途では、小さい液晶層の厚みで高い変調度を得るために、高い複屈折を有する液晶材料を使用することが望ましい。そこで、シミュレーションに用いる液晶材料の物理パラメータは、文献[45]の 1760-2 の値を使用した。この液晶材料の物理パラメータを表 1 に示す。

表 1 液晶 1760-2 の物理パラメータ[45]

弾性定数	k_{11}	22 pN
	k_{22}	13.2 pN
	k_{33}	23.2 pN
比誘電率	ϵ_p	23.1
	ϵ_s	6.4
屈折率 (@633 nm)	n_e	1.91
	n_o	1.54
	Δn	0.37

振幅変調型では、電圧 OFF 時に半波長分のリタレーションが得られれば、透過率が 0 から最大まで変調できる。プレチルト角と液晶材料の Δn を考慮すると、必要な液晶層の厚さは 0.45 μm となる。一方、位相変調型では OFF 時と ON 時で位相シフトが 2π 得

られることが必要であるため、必要な液晶層の厚さは振幅変調型の2倍となる。ただし、数V程度の電圧印加では、すべての液晶が完全に90°に傾かないため、単純に液晶層の厚さを2倍にただけでは 2π の位相シフトを得ることができない。このことから、十分な変調量を稼ぐために液晶層の厚さを1.0 μm とした。

x軸方向の境界条件は、周期境界条件とした。これにより、ON状態の画素とOFF状態の画素が交互に並んで、独立駆動が最も困難となる状況をシミュレーションすることができる。

2.4.1 振幅変調型 SLM の液晶配向分布

10 μm ピッチの画素を有する振幅変調型 SLM のシミュレーション結果を図 2.6 に示す。図 2.6 (a)より、10 μm ピッチの場合は画素の幅に対して液晶層が十分に薄いため、ON状態の画素では電界は垂直に向く。電界の力を受けて液晶が回転し、垂直に配向していることがわかる。OFF状態の画素では液晶が基板に対してほぼ水平を維持したことから、画素ごとの独立した駆動が実現していることがわかる。また、図 2.6 (b)に示した反射率分布をみると、ON状態の画素で反射率が0に近づく一方で、OFF状態の画素では最大反射率が維持されたことから、画素が独立に駆動されたことがわかる。なお、ここで最大反射率が90%程度であるのは、空気と基板、基板と液晶の境界において反射による光損失が発生するためである。

一方、1 μm ピッチの振幅変調型 SLM のシミュレーション結果は図 2.7 のようになった。図 2.7 (a)と比較して、液晶層に対する画素の幅が小さくなったため、ON状態の画素の中心では電界は垂直方向を向いているものの、端にいくに従って斜め方向を向き、OFF状態の画素にもれ出していることがわかる。液晶のダイレクタに着目すると、もれ出した電界により、OFF状態の画素の液晶も回転したと思われる。図 2.7 (b)に示した反射率分布においても、OFF状態の画素の反射率が画素周辺部で低下した。また、OFF状態の画素における反射率のピーク値も90%より低くなったことから、OFF状態の画素の中心付近でも、隣接するON状態の画素の影響を受けたことがわかる。以上のこと

から、1 μm ピッチの画素を有する振幅変調型の SLM では画素ごとの独立した駆動が困難となることが明らかとなった。

2.4.2 位相変調型 SLM の液晶配向分布

位相変調型の SLM は、振幅変調型と比較して液晶層が倍以上に厚いため、電界のもれ出しが大きくなることが予想される。振幅変調型の場合と同様に、10 μm ピッチと 1 μm ピッチの画素についてシミュレーションを行い、隣接する画素がどのように影響するか確かめた。

10 μm ピッチの場合の液晶配向分布及び電界分布のシミュレーション結果を図 2.8 (a)に示す。振幅変調型のときと同様、画素の幅に対して液晶層が十分薄いため、電界は垂直方向を向き、ON 状態の画素の液晶のみが垂直方向を向いた。図 2.8 (b)に示した位相分布をみても、ON 状態の画素の位相が 2π 進んだ一方で、OFF 状態の画素の位相は変化しなかったことから、画素ごとの独立した駆動が実現したことがわかる。

1 μm ピッチの場合のシミュレーション結果を図 2.9 に示す。図 2.9 (a)より、液晶層の厚みと画素の幅がどちらも 1 μm となることから、ON 状態の電極から放射状に電界が広がり、隣接する OFF 状態の画素に漏れ出していることがわかる。液晶配向分布をみると、OFF 状態の画素の液晶が回転したことがわかる。振幅変調型の結果(図 2.7 (a))と比較すると、液晶層が厚くなった分、電界のもれ出しや OFF 画素の液晶の回転が著しくなったことがわかる。また、図 2.9 (b)に示した位相分布より、OFF 状態の画素の位相が 0 から進むと同時に、ON 状態の画素の周辺部における位相が 2π よりも遅れた。このことから、1 μm ピッチの画素を有する位相変調型の SLM においても、画素ごとの独立した駆動が困難となることがわかった[46]。

2.4.3 液晶配向方向に対して直交する方向に並ぶ隣接画素の影響

2.4.2 に示したシミュレーションでは、液晶配向方向に対して平行に並ぶ画素配列の場合について議論してきた。実際の SLM では画素は 2 次元に配列するため、液晶の配向方向に対して直交する方向(図 2.1 の y 軸方向)に並ぶ画素も存在する。そこで、液

晶配向に対する画素配列方向の違いによる液晶駆動への影響を議論するために、位相変調型 SLM において液晶配向方向に対して直交する方向に並ぶ画素配列のシミュレーションを行った。液晶の配向方位以外の条件は 2.4.2 のシミュレーションと同じとした。

シミュレーションにより算出された液晶配向分布と電界分布を図 2.10 (a)、位相分布を(b)に示す。初期配向は紙面に垂直な方向であるため、液晶に対して理想的な電圧印加が実現した場合、 y 軸に垂直な面 (x - z 平面) 内で液晶が回転する。しかし、図 2.10 (a) より、もれ出した電界により液晶が方位角方向 (x - z 面外) に回転していることがわかる。また、図 2.10 (b)に示した位相分布では、OFF 状態の画素の位相が液晶の方位角方向の回転に伴って進んでいる。液晶配向方向と平行に並ぶ画素の場合 (図 2.9 (b)) と比較すると、液晶配向方向に対して直交する方向に並ぶ画素の方が OFF 状態の位相の進みはより大きく、広い範囲で生じている。以上のことから、液晶配向方向に対して平行に並ぶ画素よりも、直交して並ぶ画素の方が隣接する画素からもれ出す電界の影響が大きいことがわかった[47]。

液晶配向方向に対して平行に並ぶ画素よりも直交する方向に並ぶ画素の方が隣接画素の影響が大きくなった理由として、もれ出し電界が液晶を方位角方向に回転させやすいことが挙げられる。画素の配列方向と液晶配向方向が平行な場合、液晶層の下部では液晶の配向方向に対して平行な方向にもれ出し電界が生じるため、液晶は回転しにくい。液晶層の上部では電界が斜め上方向にもれ出すため、この部分ではもれ出し電界によって液晶が極角方向に回転する。一方、方位 90° に並ぶ画素の場合、液晶配向方向に対して直交する方向に電界がもれ出し、もれ出し電界からの力を受けて液晶が方位角方向に回転しやすくなったと考えられる。液晶が方位方向に回転した場合、OFF 状態の画素の位相が進むだけでなく、入射した直線偏光が楕円偏光などに変化するため、振幅変調型では意図しない振幅変調となり、位相変調型では偏光状態の変化による回折効率の低下が予想される。

2.4.4 液晶の弾性力のみを考慮した液晶配向シミュレーション

図 2.9(a)の OFF 状態の画素の上方をみると、もれ出した電界強度がほとんど無いにも関わらず、液晶が大きく回転していることがわかる。液晶は周囲の液晶配向に揃おうとする弾性力を有していることから、この部分では液晶の弾性力による回転が支配的であったことが予想される。そこで、1 μm ピッチの画素における液晶の弾性力の影響について検討するために、電界を印加しない条件下で、液晶の弾性力のみを考慮したシミュレーションを行った。

シミュレーション条件を図 2.11 (a)に示す。液晶層の厚さは位相変調型を想定し、1 μm とした。ON 状態の画素を想定し、画素電極上の 0.8 μm の幅に垂直に配向した液晶が存在すると仮定した。その他の領域では、液晶はプレチルト 10°の平行配向であるとし、上下基板の表面は強アンカリング条件とした。また、x 軸方向の境界条件は周期境界条件としたため、ON 状態を想定した垂直配向の液晶画素と OFF 状態を想定した平行配向の液晶画素が交互に配置された場合と等価である。

シミュレーション結果は図 2.11 (b)のようになった。OFF 状態の液晶配向をみると、45°近くまで液晶が回転したことがわかる。このシミュレーションでは電界を印加していないため、OFF 状態の液晶画素の両隣に存在する垂直配向の液晶画素から伝搬した弾性力のみにより、OFF 状態の液晶が回転したことになる。この結果は、OFF 状態の画素の液晶を基板表面のアンカリング力のみにより平行配向を維持しようとする場合、1 μm ピッチで個別駆動することが困難であることを示している。以上の結果から、1 μm ピッチの液晶画素において、画素ごとの独立した駆動を実現するためには、電圧を印加した画素からもれ出す電界の抑制だけでなく、液晶の弾性力の伝搬を抑制するような新たな画素構造が必要であることが明らかとなった。

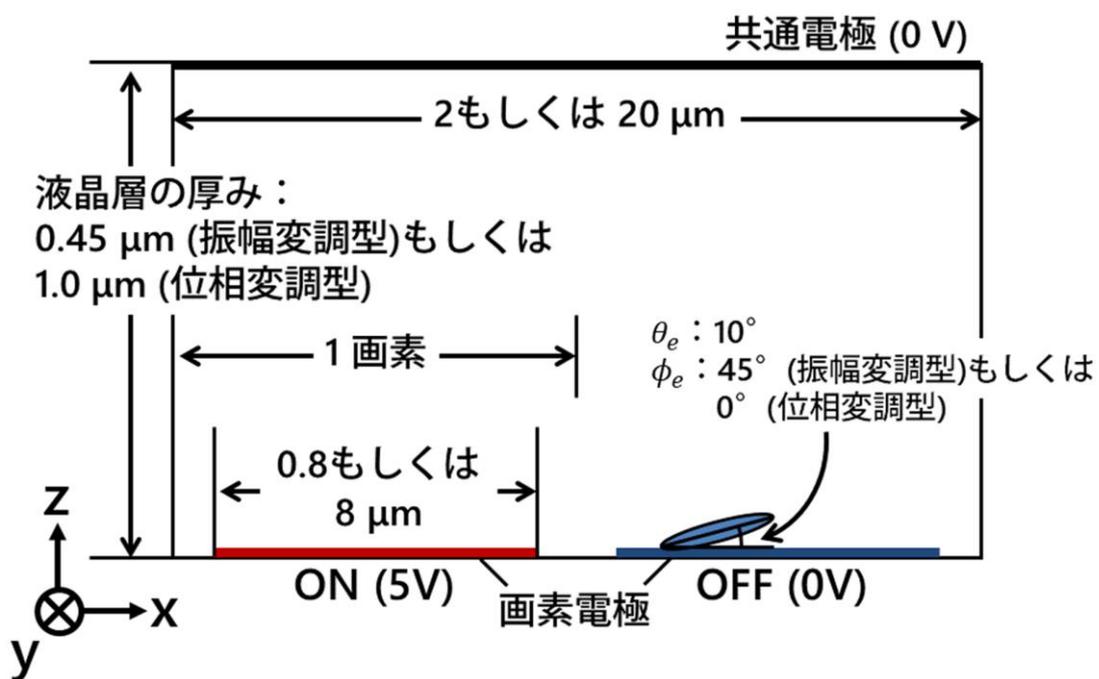
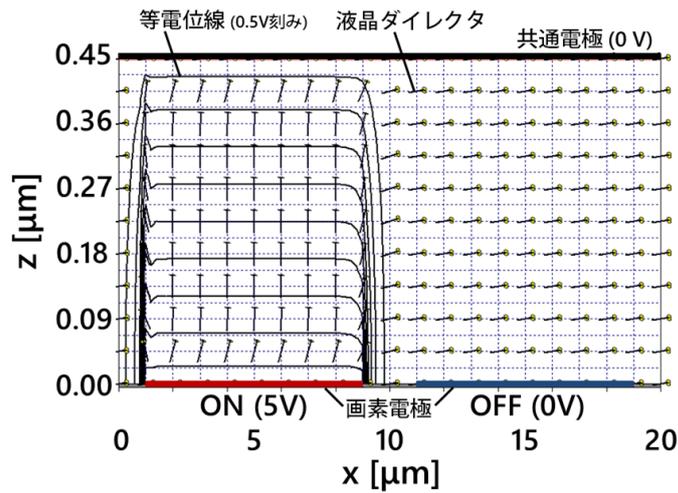
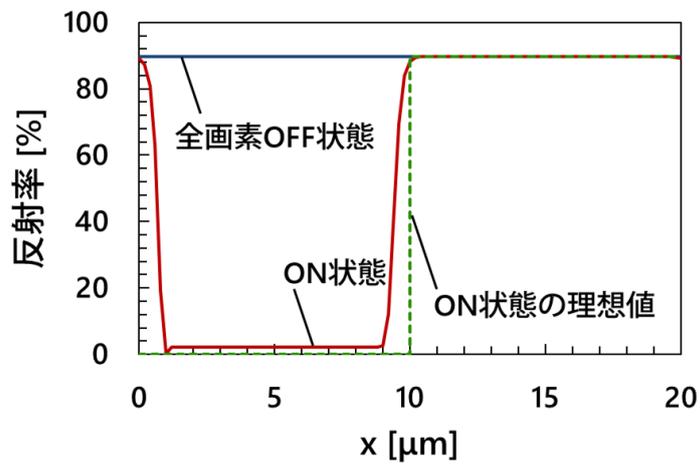


図 2.5 振幅型および位相型の SLM の
配向分布シミュレーション用モデル

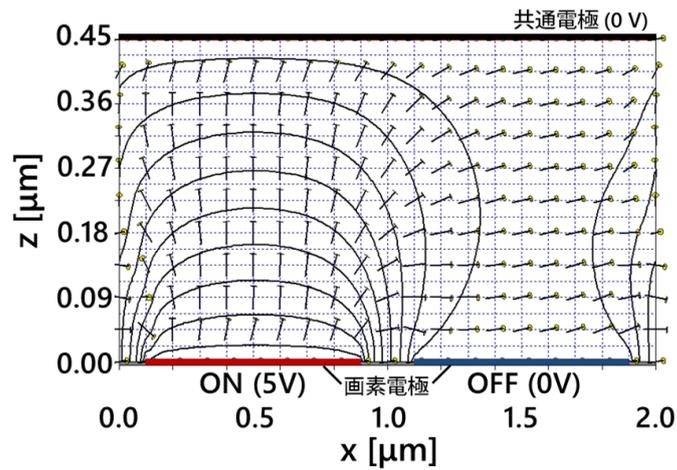


(a)

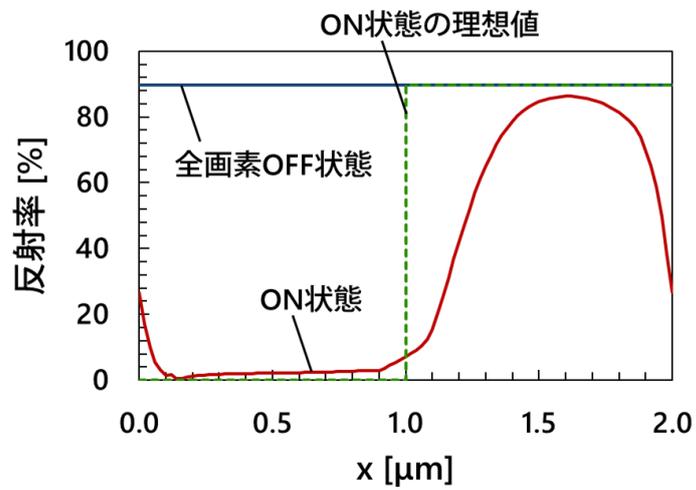


(b)

図 2.6 10 μm ピッチの画素を有する振幅変調型 SLM のシミュレーション結果：(a)液晶配向分布と電界分布(等電位線)，(b)反射率分布

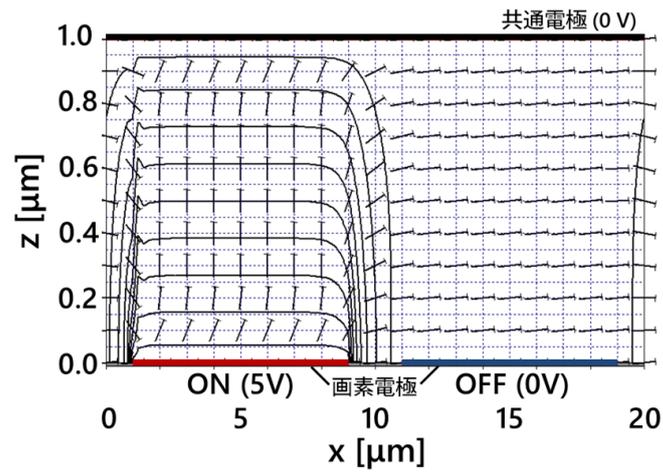


(a)

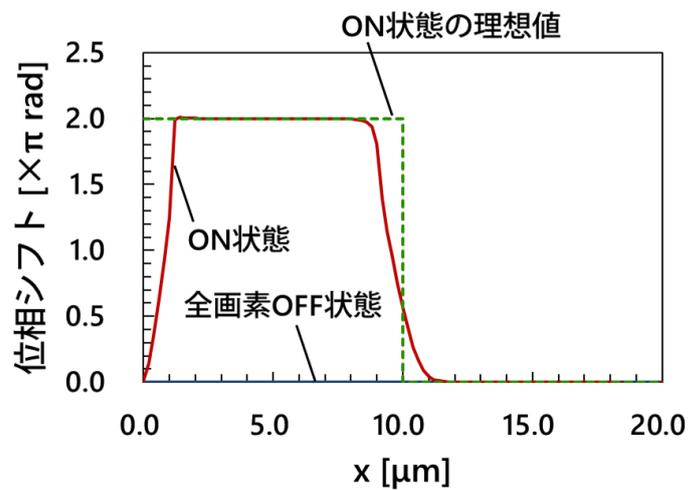


(b)

図 2.7 1 μm ピッチの画素を有する振幅型 SLM のシミュレーション結果：(a)液晶配向分布と電界分布，(b)反射率分布



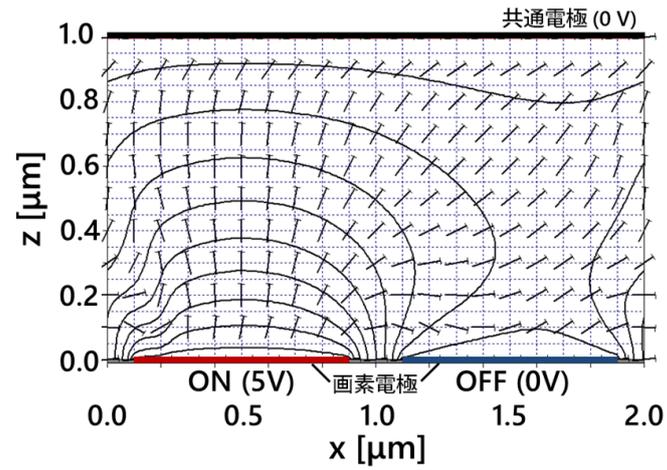
(a)



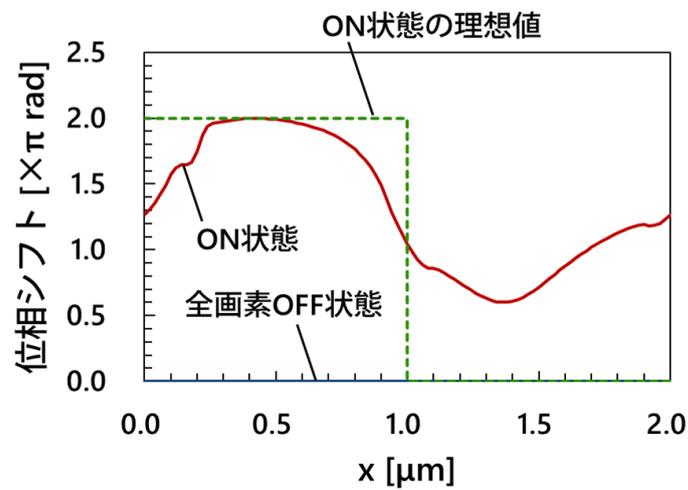
(b)

図 2.8 10 μm ピッチの画素を有する位相型 SLM のシミュレーション結果：

(a)液晶配向分布と電界分布, (b)位相分布



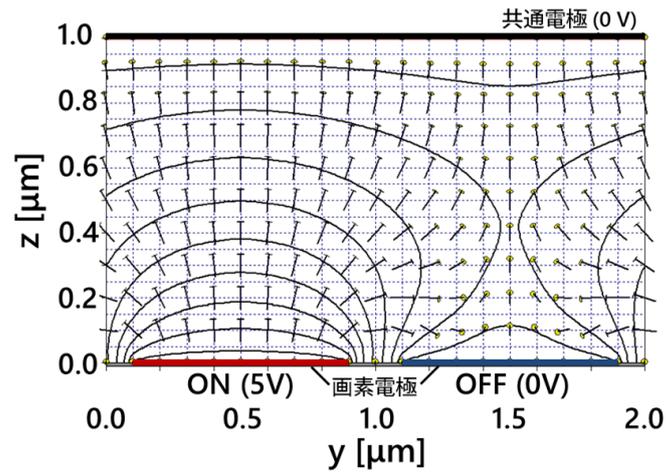
(a)



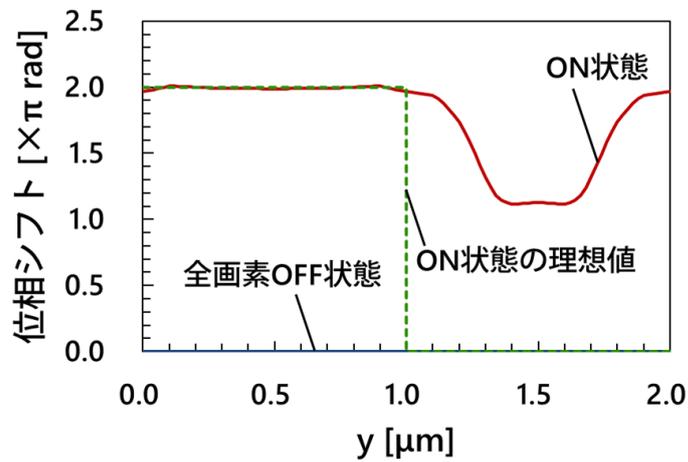
(b)

図 2.9 1 μm ピッチの画素を有する位相型 SLM の
シミュレーション結果：

(a)液晶配向分布と電界分布, (b)位相分布



(a)



(b)

図 2.10 1 μm ピッチの画素を有する位相型 SLM のシミュレーション結果 (液晶配向方向に対して 90° 方向に並ぶ画素の場合) :

(a)液晶配向分布と電界分布, (b)位相分布

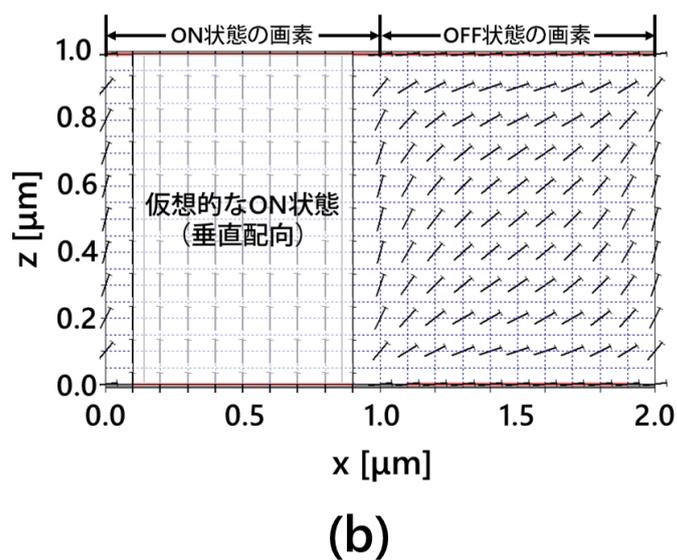
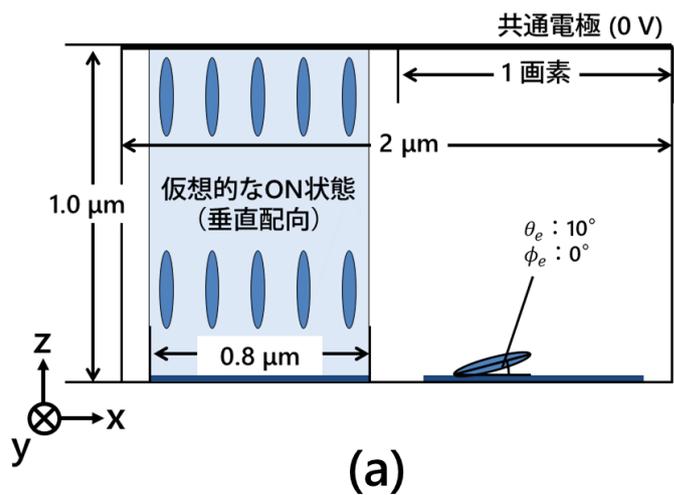


図 2.11 液晶の弾性力のみを考慮した液晶配向シミュレーション：
(a)シミュレーションモデル，(b)液晶配向分布

2.5 画素内で不均一な位相分布が再生像に及ぼす影響

微細な画素を有する位相変調型 SLM では、図 2.9 に示したように、隣接する画素の電界のもれ出しや液晶の弾性力の伝搬により、画素内の位相分布が不均一となる。加えて、図 2.8 に示した画素ピッチが $10\ \mu\text{m}$ の場合においても、ON 状態の画素の周辺部における位相分布は理想値からずれたものになる。このことから、画素ピッチが大きい場合においても、隣接する画素の影響により、画素内の位相分布が不均一になることが予想されるが、不均一な位相分布がホログラム再生像に及ぼす影響は明らかになっていない。位相変調特性がホログラム再生像にどのような影響を与えるのかについて理解することは位相変調型 SLM を設計する上で重要であると考えられる。そこで、本節では画素内で不均一な位相分布を考慮した再生像シミュレーション手法を確立し、位相変調型 SLM の画素内で不均一な位相分布とホログラム再生像の関係を明らかにする。

2.5.1 画素内の不均一な位相分布を考慮した再生像シミュレーション手法

位相変調型 SLM のある 1 画素の位相分布は、隣接する画素からもれ出す電界や液晶の弾性力の伝搬を受けることから、周囲の 8 画素に印加される電圧値によって変化すると考えられる。周囲の 8 画素に対して中間調を含めた様々な電圧値を印加することを考えると、全ての場合に対してシミュレーションを行うことは困難である。そこで、隣接画素の影響を簡略化してモデル化することを試みる。

隣接画素の影響により画素内で不均一になる位相分布について検討するために、 $8\ \mu\text{m}$ ピッチの液晶画素において 1 画素のみを ON 状態とした場合の位相分布をシミュレーションした。その結果を図 2.12 に示す。図 2.12 (a) が斜めに隣接する画素が ON 状態だった場合の位相分布を示しているが、中心の赤く囲われた画素の位相シフトはほぼ均一な 0 であったことから、斜め方向に隣接する画素の影響は小さいことがわかる。一方、図 2.12 (b) は辺を共有するように隣接する画素が ON 状態の場合の位相分布を示しているが、中心の画素のおよそ $1/4$ の領域において、隣接する画素の影響を受けて位相

が進んだ。以上のことから、斜めに隣接する画素の影響を無視し、辺を共有するように隣接する 4 つの画素からの影響のみを考慮して中心の画素の位相分布を決定するような計算モデルを構築すれば良いことがわかった。

隣接する画素の影響を受けて不均一となる位相分布を求めるためには、隣接する 2 つの画素の位相値のすべての組み合わせに対して、液晶配向をシミュレーションするべきであるが、仮に 1 画素の階調数を 256 とすると、 256^2 パターンの配向分布計算を行わなくてはならず、すべての場合をシミュレーションすることは難しい。そこで、以下に示す手順により中間調の位相分布を線形近似により算出した。まず、最も位相分布が不均一になる場合、すなわち最大電圧を印加した画素 (ON_{max} 状態の画素) と 0 V の画素 (OFF 状態の画素) が隣接した場合に生じる位相分布を算出する。次に、1 画素内の位相分布を $n \times n$ に分割してシミュレーションするために、算出された位相分布を $n \times n$ のブロックに分割し、各ブロック内における位相の平均値をそれぞれのブロックの位相の値とする。これを基本位相分布モデルとする。1 画素内におけるブロックの座標を k, l ($k, l = 0, 1, 2, \dots, n - 1$) とすると、算出された基本位相分布モデルは図 2.13 のようになる。図中の α は ON_{max} 状態の画素の不均一な位相分布、 β は OFF 状態の画素の不均一な位相分布を示している。また、添字 U, D, R, L はそれぞれ Up, Down, Right, Left を意味し、画素の中心からみた不均一な位相分布の位置を示している。中間調の画素を考慮する際は、図 2.14 のように基本位相分布モデルの位相分布を線形で変化させることにより、すべての階調に対する不均一な位相分布を近似的に作製可能とした。なお、図 2.15 に示すように、基本位相分布モデルを適用する際に重複する領域については、重複した画素どうしの平均値とした。

以上の手順により、ホログラムパターン全体に液晶画素内の不均一な位相分布を適用し、ホログラム再生シミュレーション (光伝搬計算) を行うことで、再生像への影響を検討可能である。

2.5.2 回折効率の比較によるシミュレーション手法の評価

位相変調型 SLM に位相回折格子を表示して計測した回折効率と、画素内の位相分布を考慮した回折シミュレーションによって算出した回折効率を比較することで、シミュレーション手法の妥当性を確認した。図 2.16 にシミュレーションと実験に用いた SLM の基本構造を示す。液晶材料として、標準的な液晶組成物である E7 を用いた。表 2 にシミュレーションで用いた E7 の物性パラメータを示す[48]–[51]。

表 2 液晶材料 E7 の物性パラメータ

弾性定数	k_{11}	11.1 pN
	k_{22}	10.3 pN
	k_{33}	17.1 pN
比誘電率	ϵ_p	19.6
	ϵ_s	5.1
屈折率 (@633 nm)	n_e	1.73
	n_o	1.51
	Δn	0.21

液晶層の厚さは、屈折率差 0.21 で 2π の位相変調が可能な $1.9 \mu\text{m}$ とした。基板表面におけるプレチルトは 5.5° であり、配向方位は x 軸に平行とした。画素間の距離は $0.5 \mu\text{m}$ であるため、画素電極の幅は $7.5 \mu\text{m}$ である。画素電圧に印加する電圧の最大値は 3.3 V とした。

不均一な位相分布の基本モデルを作製するために、図 2.13 に示した 4 つの駆動パターンの位相分布をシミュレーションした結果を図 2.17 に示す。図 2.17 (a), (b) より、異なる状態の画素が y 軸方向に並んだ場合、OFF 状態の画素の端が ON 状態の画素の影響を受けて位相が進んだことがわかる。図 2.17 (c) の場合は OFF 状態の画素の端の位相が進んだが、ON 状態の画素にも位相が遅れる部分が生じた。これは液晶の立ち上がり方向が面内で逆転することにより、液晶の配向不連続が生じたことが原因であると考え

られる。一方、図 2.17 (c)を逆の配置にした図 2.17 (d)では隣接画素の影響は小さかった。図 2.17(c)と(d)で差異が生じた原因は、プレチルトの方向により液晶配向の挙動が異なるからである。また、x 軸方向に並んだ画素よりも y 軸方向に並んだ画素の方が隣接画素の影響が大きかった理由は、もれ出し電界の方向が配向方向に対して垂直であることから、もれ出し電界により OFF 状態の画素の液晶が方位角方向に回転したことが考えられる[47]。シミュレーションにより求めた 4 つの駆動パターンの位相分布をブロックに分割し、基本モデルを作製する。分割数は現実的な計算時間でシミュレーション可能な 8×8 とした。

回折効率の計測に用いた光学系を図 2.18 (a)に示す。光強度の測定にはフォトディテクター (MA9802A, アンリツ社) と光パワーメーター (ML910B, アンリツ社) を使用し、光源として He-Ne レーザー (05-LHP-151, MELLES GRIOT 社) を使用した。入射光強度を I_{in} , n 次回折光の強度を I_n とすると, n 次回折光の回折効率 η_n は次式で表される。

$$\eta_n = \frac{I_n}{I_{in}} \quad (13)$$

本実験では、SLM の開口による損失や、ガラスの反射による損失を除去するために、SLM に何も表示していない状態でレーザー光を入射した際の反射光強度を入射光強度 I_n として計算に使用した。SLM に表示する位相格子パターンは、図 2.18 (b)に示すように 0 と π の位相シフトが交互に連なる 1 次元の位相格子を表示した。0 次, 1 次, 2 次回折光を測定し、それぞれの回折効率を算出した。

回折効率のシミュレーション結果および計測結果を図 2.18 (c)に示す。灰色のカラムは画素内で均一な位相変調が実現した場合の理想値、青色のカラムは本論文が提案する手法により算出した値、赤色のカラムは実測値を示している。画素内で均一な光変調が実現した場合、偶数次の回折光は出射されず、奇数次の回折光のみとなる。しかし、画素内の位相分布を考慮した場合、0 次回折光と 2 次回折光がともに増加した。画素内の位相分布を考慮して算出した回折効率の値が実測値に近かったことから、本論文が提案する手法により、実際に近い回折光を再現可能であることが示された。

なお、2次の回折効率については実測値の方が大きい値となった。これは、実際のデバイスでは画素の開口が1 μm ピッチで存在するため、画素の周期構造による回折光が2次回折光に含まれていることが原因として考えられる。

2.5.3 画素内の不均一な位相分布がホログラム再生像に及ぼす影響

画素内の不均一な位相分布が再生像に及ぼす定性的な影響を明らかにするために、8 μm ピッチの位相変調型 SLM において画素内の位相分布を考慮した再生像シミュレーションを行った。ホログラム再生シミュレーションに使用するホログラムは、以下の光学計算により作製した。光伝搬計算は角スペクトル法[41]を採用し、GS 法による再帰計算によりホログラムパターンを最適化した。ホログラムの作製と再生シミュレーションで想定した光学的な配置を図 2.19 に示す。また、シミュレーションに使用したパラメータを表 3 に示す。

表 3 ホログラムの作製および再生シミュレーションのパラメータ

伝搬距離	500 mm
光の波長	633 nm
画素ピッチ	8 μm
再生像の大きさ	16.4 mm \times 16.4 mm
再生像の画素数	2048 \times 2048
ホログラムの大きさ	8 mm \times 8 mm
ホログラムの画素数	1000 \times 1000
GS 法の再帰回数	50 回

再生する物体は平面の東北大学ロゴとし、ホログラム面と物体面の距離は 500 mm としたため、再生時には位相型 SLM から 500 mm 離れた位置に平面の像が再生される。再生に使用する光は、実験において He-Ne レーザーを使用することを想定して 633 nm とした。再生像の画素数は高速フーリエ変換が可能な 2048 \times 2048 画素としたため、これに 8 μm を乗算し、再生像の大きさは 16.4mm \times 16.4mm となる。実験に使用する位相

変調型 SLM の画素数の都合上、ホログラムは 2048×2048 画素から中心の 1000×1000 画素を切り取って再生したため、ホログラムの大きさは $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ である。また、GS 法の再帰回数は再生像のノイズ低減に十分な 50 回とした。画素内の位相分布を再現するために 1 画素を 8×8 に分割するため、ホログラムは計算上、 8000×8000 画素のデータとなる。

図 2.20(a)に光学計算により作製したホログラム、(b)に作製したホログラムに画素内の不均一な位相分布を適用したものを示す。どちらも見やすさのために一部を拡大して示した。同図より、位相の値が異なる画素間で隣接画素の影響が反映され、画素内で不均一となる位相分布が再現されたことがわかる。

ホログラム再生実験の光学系を図 2.21 に示す。レーザー光源は He-Ne レーザーとし、ビームエキスパンダーを用いて、ビーム径を位相変調型 SLM よりも大きくした。ハーフミラーを用いて垂直に位相変調型 SLM に照射し、反射面から 500 mm 離れた位置にスクリーンを置いて、カメラで撮影することにより再生像を取得した。

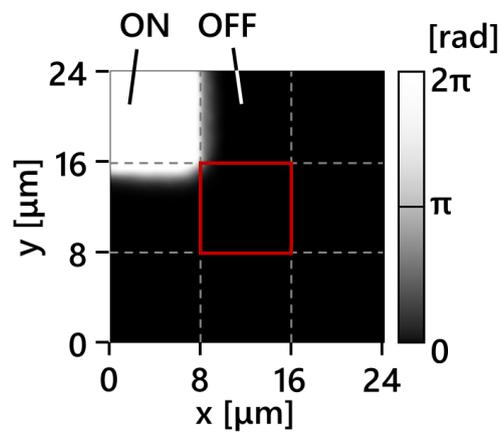
図 2.22 にシミュレーションにより得られた再生像およびホログラム再生実験により得られた再生像を示す。図 2.22 (a)はホログラム作製に使用した元画像（東北大学ロゴ）である。(b)は画素内の位相分布が均一な場合のホログラム再生像である。(c)に画素内の位相分布が不均一な場合の再生像を示す。再生像の周囲のノイズが増加すると同時に、再生像に重畳して矩形の明るい領域が現れた。この矩形の大きさがホログラムの大きさとほぼ等しかったことから、位相型 SLM から正反射した 0 次回折光であると考えられる。ホログラム再生像の周辺に現れるノイズや 0 次回折光は、実験的に得られた(d)の再生像でも確認された。この結果より、位相型 SLM の画素内の位相分布が不均一な場合、ホログラム再生像のノイズが増加すると同時に、0 次回折光が発生することが明らかとなった[52]。0 次回折光は光学系により除去可能であることが知られているが[53]–[56]、再生像の画質や光利用効率を向上させるためには、画素内で均一な位相分布となるような画素構造の設計が必要である。

2.6 まとめ

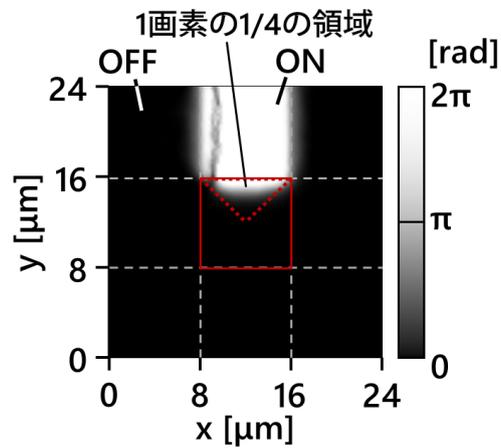
本章では、 $1\ \mu\text{m}$ ピッチの微小画素を有する SLM において生じる問題を検討するために、液晶の弾性体理論に基づく数値シミュレーションを行った。この結果、振幅変調型と位相変調型の両方において、隣接する画素からもれ出す電界と、液晶の弾性力の伝搬により画素ごとの独立した駆動が実現しないことが判明した。独立駆動を実現するためには、電界のもれ出しと液晶の弾性力の伝搬を抑制する液晶画素設計が必要であることを明らかにした。

また、位相変調型の SLM において、画素内の位相分布が不均一な場合のホログラム再生像をシミュレーションする手法を確立し、画素内の不均一な位相分布が 0 次回折光を生じさせることを示した。位相変調型の SLM においては画素内で均一な位相分布が得られる画素構造の設計が必要であることを示した。

第 3 章と第 4 章では、画素ごとの独立駆動が困難となる課題を克服するための液晶材料や、画素構造についてそれぞれ議論する。



(a)



(b)

図 2.12 8 μm ピッチの位相変調型 SLM の位相分布：(a)斜め方向に隣接する画素の影響，(b)辺を共有して隣接する画素の影響
(Copyright(C) 2017 IEICE, 文献[52]の Fig. 1, 2)

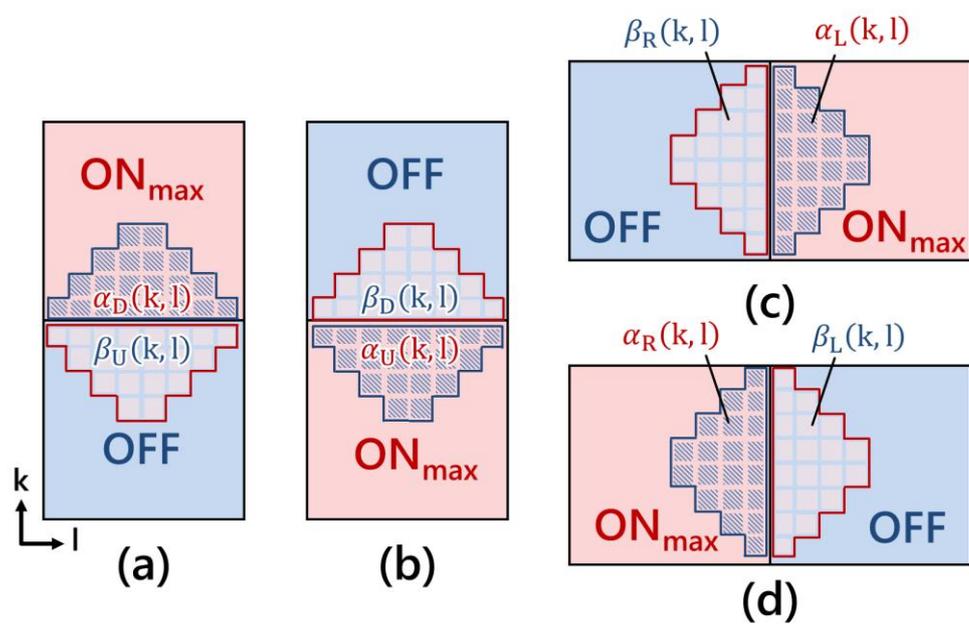


図 2.13 不均一な位相分布の基本モデル

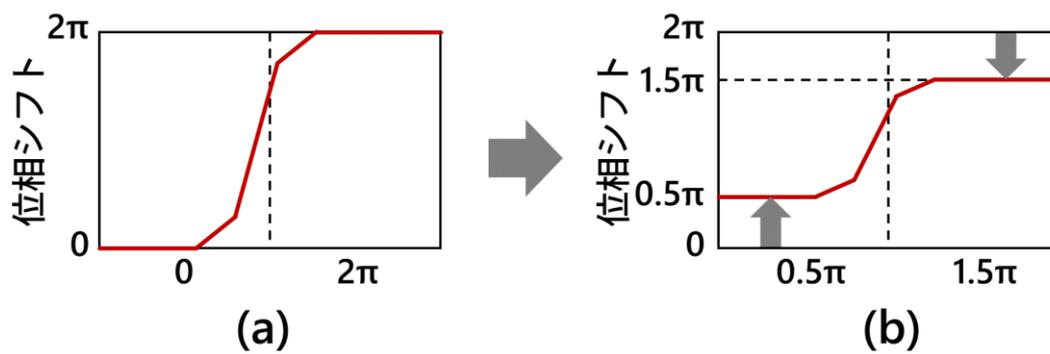


図 2.14 線形近似による中間調の画素の位相分布の算出：

(a) 0 と 2π の画素が隣接する基本モデル,

(b) 0.5π と 1.5π の画素が隣接する場合

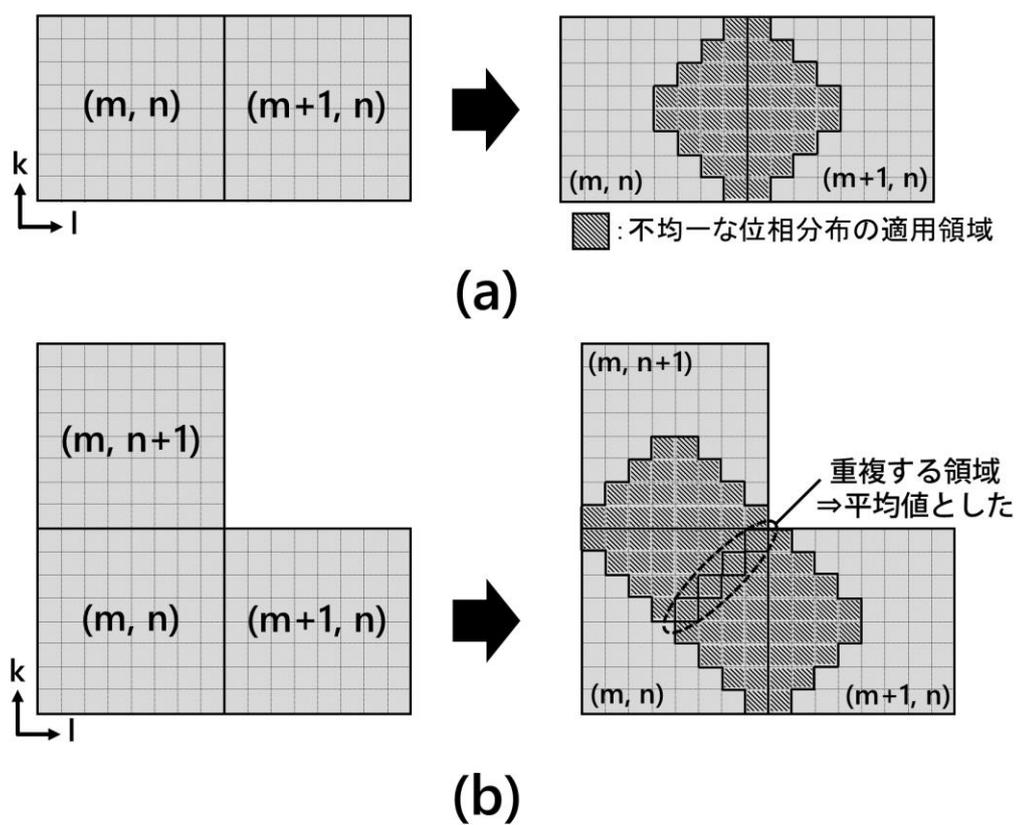


図 2.15 画素内で不均一な位相分布の適用方法：(a)互いの画素の 1/4 の領域への不均一な位相分布の適用，
(b)画素の 1/4 の領域が重複する部分

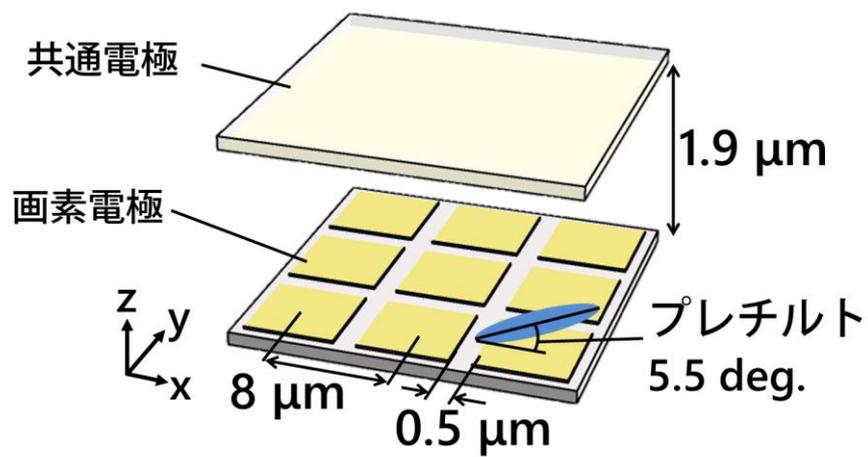


図 2.16 シミュレーションに用いた位相変調型 SLM の構造
(Copyright(C) 2017 IEICE, 文献[52]の Fig. 5)

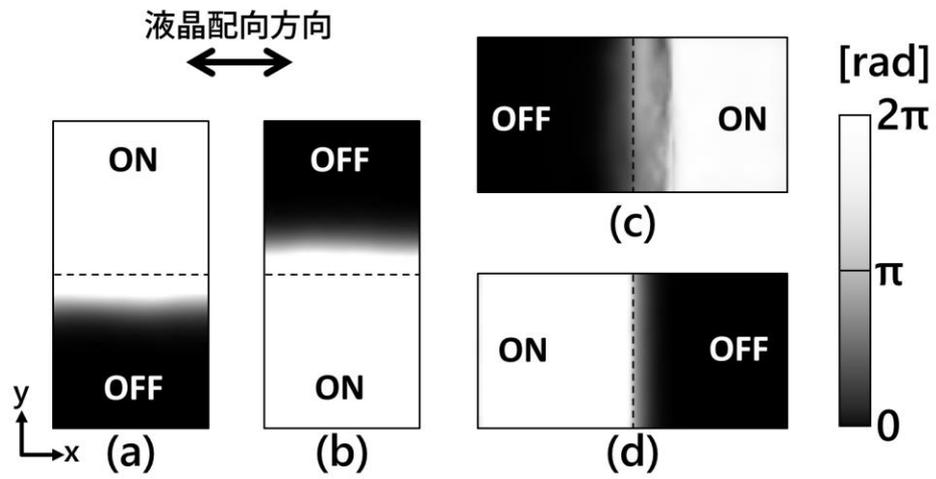


図 2.17 画素内で不均一な位相分布の基本モデル (図 2.13 と対応)

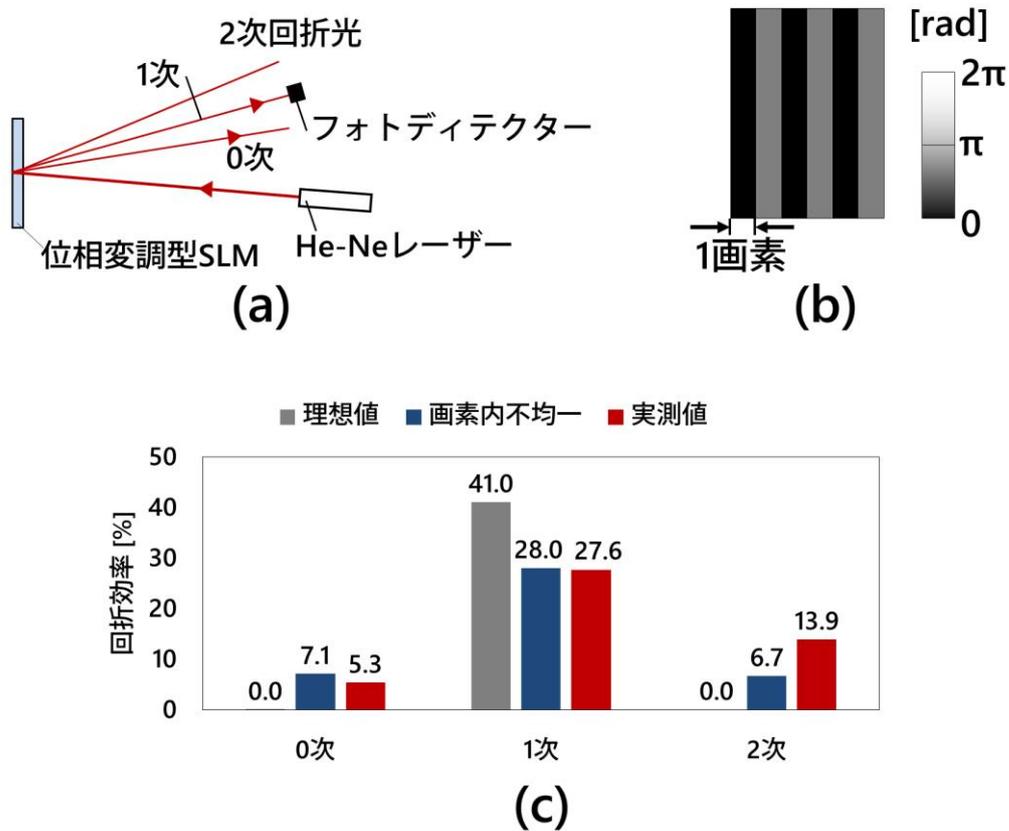


図 2.18 回折効率による画素内の位相分布を考慮したシミュレーション手法の評価：(a)回折効率の計測に使用した光学系，(b)位相変調型 SLM に表示した位相回折格子，(c)回折効率の理論値，画素内の位相分布を考慮した場合の計算値，実測値の比較

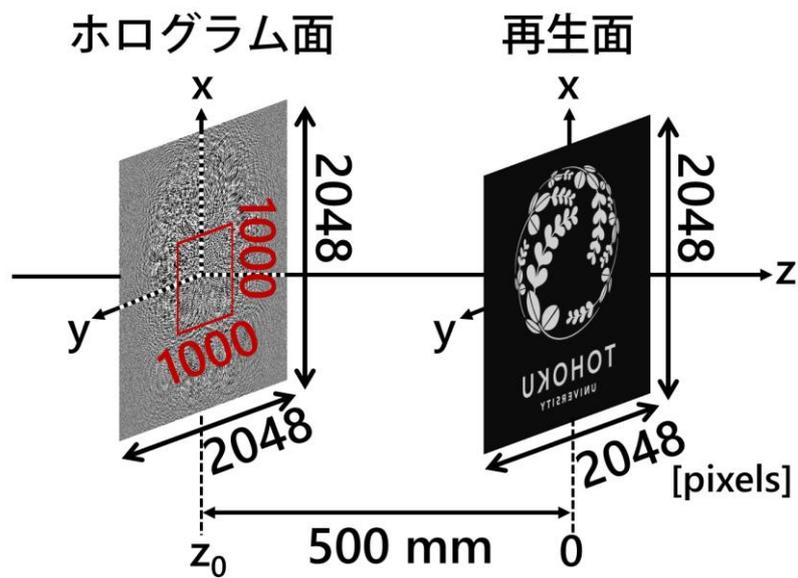


図 2.19 ホログラムの光学系
 (Copyright(C) 2017 IEICE, 文献[52]の Fig. 7)

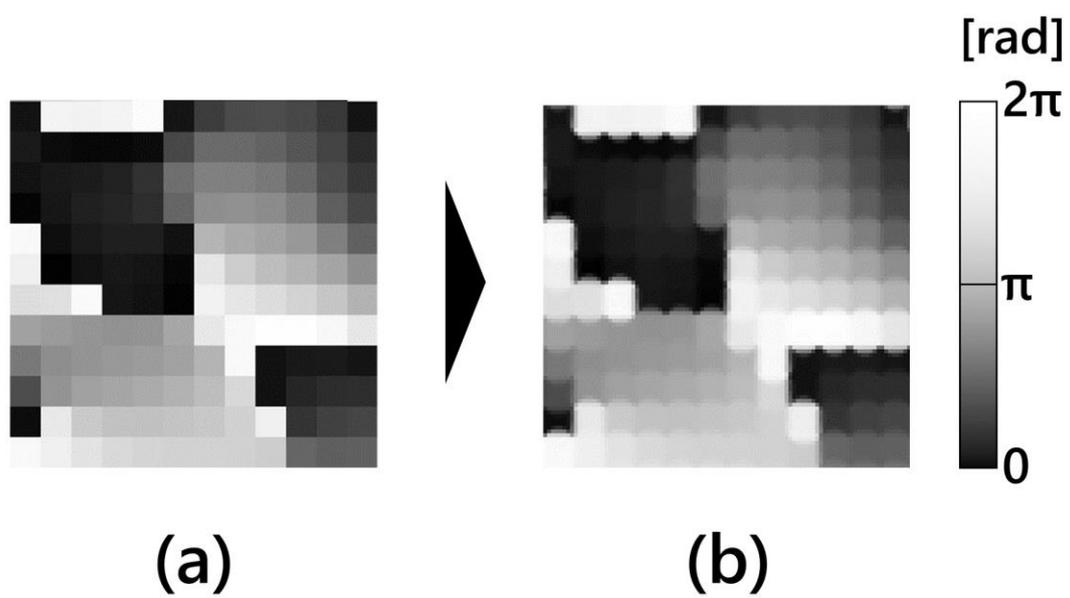


図 2.20 不均一な位相分布を適用したホログラム（一部）：

(a)適用前, (b)適用後

(Copyright(C) 2017 IEICE 文献[52]の Fig. 8)

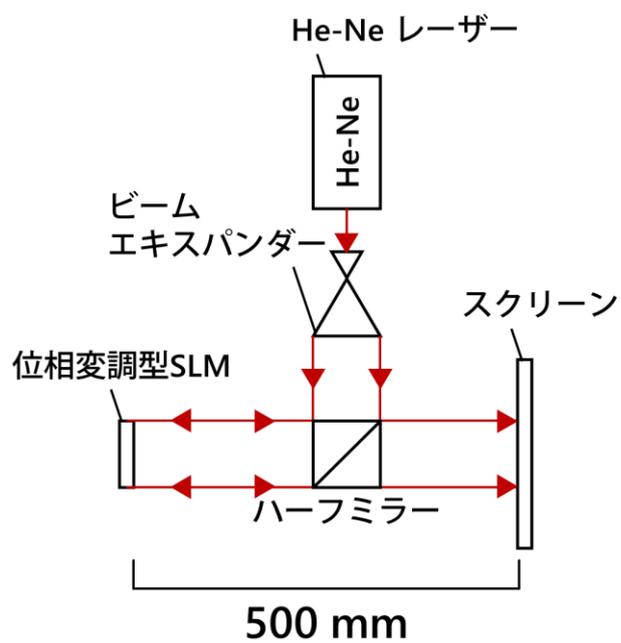


図 2.21 位相変調型のホログラム像観察に使用した光学系
 (Copyright(C) 2017 IEICE, 文献[52]の Fig. 10)

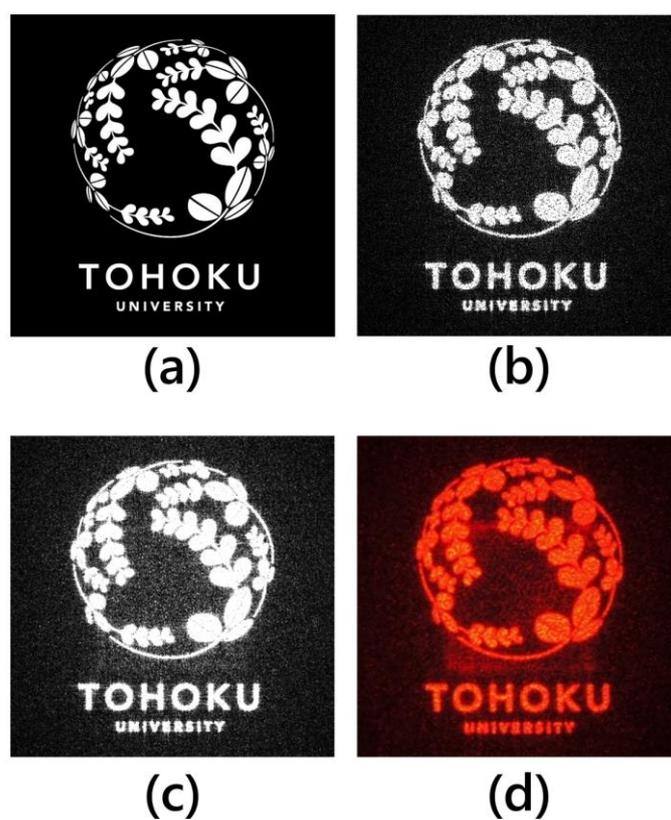


図 2.22 位相変調型ホログラムの再生像：(a)元画像, (b)画素内で均一な位相変調が実現した場合の再生像, (c)画素内の位相分布を考慮した再生像, (d)実験的に得られた再生像

(Copyright(C) 2017 IEICE, 文献[52]の Fig. 9)

第3章 強誘電性液晶を用いた振幅変調型 SLM

3.1 はじめに

1 μm ピッチの画素を有する SLM では、隣接する画素からもれ出す電界や、液晶の弾性力の伝搬により、画素ごとの独立した駆動が困難となる。本章では、従来の液晶デバイスでは OFF 状態の画素の液晶を束縛する力が基板表面の配向規制力のみであることに着目し、OFF 状態の画素にも電圧を印加して規制力を強くすることで隣接画素の影響を低減する方式を試みた。通常のネマティック液晶では、極性に依らず、電圧印加の有無に応答して液晶が回転するが、表面安定化を施した強誘電性液晶は印加する電圧の正負により液晶の回転方向を制御できることから、すべての画素に電圧を印加した状態で光の振幅を変調することが可能である。

3.2 強誘電性液晶とは

液晶は、その相の状態によりネマティック液晶とスメクティック液晶に大別される。ネマティック相は分子の位置に自由度がある一方で、スメクティック相は層構造を形成する性質を有する。スメクティック相の中でも、層の境界面に対して液晶が垂直なものをスメクティック A 相、その垂直方向から液晶が傾いているものをスメクティック C 相とよぶ。スメクティック C 相を発現する液晶材料の中で、分子構造に不斉炭素原子を有する場合、層ごとに液晶分子の傾きの方位が変化するため、螺旋を描くように液晶分子が回転して配向する場合がある。このような相を特にキラルスメクティック C 相と呼び、キラルスメクティック C 相を発現する液晶材料を強誘電性液晶と呼ぶ[57]。強誘電性液晶の層構造を図 3.1 に示す。図 3.1 (a)が強誘電性液晶の螺旋構造を示している。層に垂直な線を螺旋軸と呼び、強誘電性液晶の分子と螺旋軸がなす角をチルト角と呼ぶ。通常、強誘電性液晶は螺旋ピッチを 1 周期として回転し続けているため、光変調には適さない。面内一様な光変調するための素子として強誘電性液晶を用いる場合は、配向膜

を形成した上下基板を用いて液晶層の厚さが 1 - 2 μm 程度になるようにセル化することにより、表面安定化状態[58]にすることが一般的である。図 3.1 (b)に表面安定化状態の強誘電性液晶を示す。配向処理方向は x 軸に平行とし、基板の厚さ方向は z 軸方向とした。表面安定化状態の強誘電性液晶では螺旋が解け、液晶分子が基板に対して平行な双安定状態となる。液晶分子は双極子モーメントを有するため、z 軸の正方向と負方向それぞれに電界を印加することで、x-y 面内における液晶分子の方位を 2 値で制御することが可能である。仮に図 3.1 (b)の左側の液晶配向方向に対して偏光方向が平行となるように直交偏光板を配置すると、液晶層を通過した光は偏光状態が変化せず、検光子に吸収されるため暗状態となる。一方、z 軸の負の方向に電界を印加することにより図 3.1 (b)の右側の配向とした場合、液晶層を通過した光は偏光状態が変化し、検光子を透過する。このことから、強誘電性液晶は 2 値の振幅変調型の SLM として用いることが可能である。なお、強誘電性液晶は x-y 面内の方位角のみ制御可能であることから、直線偏光を維持しなければならない位相変調型 SLM には適さない。

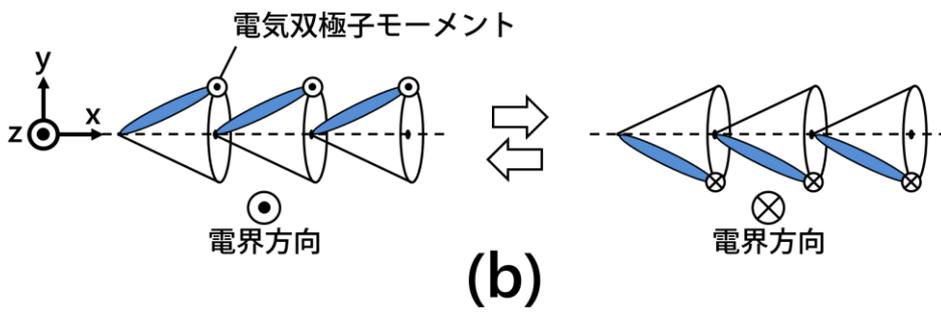
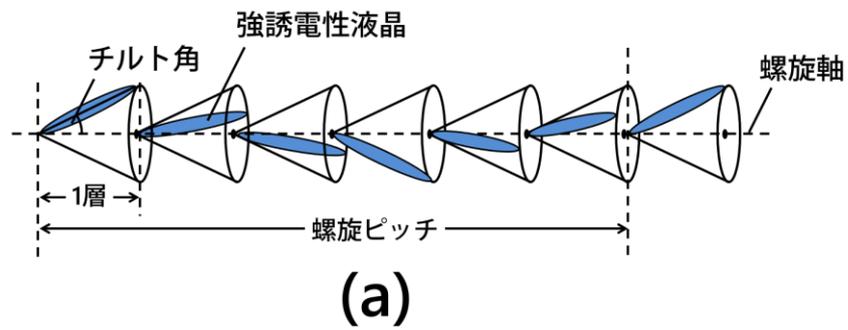


図 3.1 強誘電性液晶の基本的な配向挙動：(a)強誘電性液晶の螺旋構造，(b)表面安定化状態の強誘電性液晶

3.3 強誘電性液晶の解像度特性

ネマティック液晶を用いた SLM の場合、電圧を印加しない画素において液晶が回転しないよう束縛する力は、配向膜による表面配向規制力のみであるため、隣接する画素からもれ出す電界や液晶の弾性力の伝搬により、液晶が回転する。一方、強誘電性液晶を用いた振幅変調型の SLM では、光を透過する画素と光を吸収する画素の両方に電界を印加することで、両方の画素の液晶が電界の力により束縛されるため、画素ごとの独立した駆動が実現する可能性がある。そこで、ネマティック液晶と強誘電性液晶の解像度特性を比較するために、1次元の微細な画素電極を有する液晶セルを作製し、電圧印加時の透過率の面内分布を評価した。

図 3.2 に作製した液晶セルの構造を示す。図 3.2 (a)が電極構造の上面図を示しているが、2つの端子それぞれに接続されたストライプ状の電極が交互に組み合わさるように配置されている。x 軸方向を画素の配列方向とみなすと、2つの端子に異なる電圧を印加することにより、画素ごとに交互に異なる電圧が印加されるため、このときの液晶駆動の様子を観察することにより解像度特性を評価できる。電界のもれ出し方向に対する液晶配向方向の影響を確認するために、液晶配向方向は x 軸に平行な方位 0° と、x 軸に垂直な方位 90° とした。図 3.2 (b)は作製した液晶セルの断面図を示している。上基板は透明な共通電極を有しており、下基板は先述のストライプ状の画素電極を有している。この実験では解像度特性を評価するため、ストライプ状の電極のピッチは 1, 2, 3, 5, 10 μm とした。上下基板の電極面にはそれぞれ平行配向膜 (AL-1254, JSR 社) を塗布形成し、ラビング処理により配向方向を定めた。ネマティック液晶材料として E7 (LCC 社) を使用した。強誘電性液晶材料はコーン角が約 23° の材料を使用したため、電圧印加により液晶の方位角を約 45° 回転させることが可能であり、振幅変調に適している。液晶層を 1 μm とすることにより、強誘電性液晶が表面安定化状態になるようにした。基板間の厚さの保持は、ビーズスペーサーを混合したシール材を基板の周辺部に塗布することにより、液晶層にビーズスペーサーが分散して配向欠陥が生じることを防止した。

また、液晶セルの観察には偏光顕微鏡 (BX50, オリンパス社) を使用した。対物レンズは収差補正環を有する LCPlanFl 100×/0.80 LCD を使用することにより、上基板で発生する収差を補正し、1 μm ピッチの光変調を観察可能とした。ネマティック液晶セルの場合、端子 A に 1 kHz の方形波を印加し、端子 B は共通電極と同電位 (0 V) とした。強誘電性液晶セルの場合、端子 A に正の直流電圧、端子 B に負の直流電圧を印加した。電圧を印加したセルで観察される光変調パターンのイメージ図を図 3.3 に示す。画素ごとの独立した液晶駆動が実現した場合、図 3.3 (a) のように等幅の明線と暗線が観察されるはずである。一方、隣接する画素どうしが影響し合う場合、図 3.3 (b) や (c) のように、明線と暗線がぼやけるか、幅が不均一になることが予想される。

図 3.4 にネマティック液晶と強誘電性液晶の観察結果を示す。それぞれの顕微鏡写真は見やすいように縮尺を調整している。ネマティック液晶の場合、x 軸に対する方位 0° 配向および 90° 配向の両方において、画素ピッチが小さくなるにつれ、明線と暗線がぼやけたことがわかる。特に、方位 90° 配向の場合は 3 μm ピッチを下回ると、明線と暗線の幅が不等になったことから、電圧を印加していない画素が電圧を印加した画素からの影響を受け、液晶が回転したことが考えられる。方位 0° 配向の強誘電性液晶セルの場合、1 μm ピッチの電極においても等幅の明線と暗線が観察されたことから、画素ごとの独立駆動が実現し、高い解像度が得られたことがわかる。方位 90° 配向の 1 μm ピッチでは、明線と暗線がぼやけて、暗線部分の黒輝度が上昇したが、明線と暗線の幅は等しかった。強誘電性液晶セルでは明線と暗線の幅が常に等しかったことから、すべての画素上の液晶が電界により束縛され、隣接する画素の影響が低減されたと推察される。

図 3.4 の結果を定量的に評価するために、変調度 R_{mod} を次のように定義し、ネマティック液晶セルと強誘電性液晶セルの観察結果から算出した。

$$R_{mod} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} \quad (14)$$

ただし、 T_{max} と T_{min} はそれぞれ画素領域における最大透過率と最小透過率である。画素配列方向の透過率変化が大きくなればなるほど変調度 R_{mod} が 1 に近づくため、画素ピッ

ちごとの変調度を算出することによりネマティック液晶と強誘電性液晶の解像度特性を評価できる。

図 3.5 にネマティック液晶と強誘電性液晶の画素ピッチと変調度の関係を示す。青の点と線がネマティック液晶の結果を示しており、赤の点と線は強誘電性液晶の結果を示している。また、実線が方位 0° 配向の結果であり、破線が方位 90° 配向の結果である。ネマティック液晶の場合、 $3\ \mu\text{m}$ ピッチ以下になると変調度が急激に低下した。一方、強誘電性液晶の場合は $3\ \mu\text{m}$ ピッチ以下でもネマティック液晶よりも高い値を維持し、方位 0° 配向の $1\ \mu\text{m}$ ピッチの画素では変調度が 0.9 を超えていた。方位 90° 配向の $1\ \mu\text{m}$ ピッチにおいて変調度は 0.8 程度まで低下したが、同ピッチのネマティック液晶の変調度より高い値であった。これらの結果から、ネマティック液晶と比較して強誘電性液晶が高い解像度を実現可能であることが明らかとなった。

方位 90° 配向の強誘電性液晶セルにおいて、画素ピッチが $1\ \mu\text{m}$ のときに変調度が低下した原因として、強誘電性液晶の螺旋軸に対する電界のもれ出し方向が異なることが挙げられる。ストライプ状の電極において電界がもれ出す方向は x 軸と平行であり、方位 0° 配向の場合は図 3.6 (a) のように電界のもれ出し方向と強誘電性液晶の螺旋軸が平行となる。このとき、強誘電性液晶の電気双極子モーメントはもれ出し電界の方向に対して直交するため、液晶の配向に影響しない。一方、方位 90° 配向の場合、図 3.6 (b) のように、もれ出し電界の方向に対して螺旋軸が直交し、強誘電性液晶の電気双極子モーメントがもれ出し電界の方向と平行になるように液晶分子が回転する。以上のことから、方位 0° 配向のときはもれ出し電界が液晶配向に影響しないのに対し、方位 90° 配向のときはもれ出し電界が液晶配向を変化させるため、方位 90° 配向の場合において解像度が低下したと考えられる。

3.4 まとめ

本章では、振幅変調型 SLM の液晶材料として、強誘電性液晶について検討を行った。

この結果、強誘電性液晶は正負の電圧印加により液晶配向を制御可能であるため、すべての画素において液晶を電界の力により束縛可能であり、ネマティック液晶と比較して高い解像度を実現可能であることを明らかにした。ただし、微細な電極においてもれ出し電界の方向に対して螺旋軸が平行な場合と比較すると、直交する場合の解像度が低下することがわかった。この原因として、電界のもれ出し方向と螺旋軸が直交する場合は、強誘電性液晶分子の電気双極子モーメントが電界方向を向くように液晶分子が回転することが考えられる。

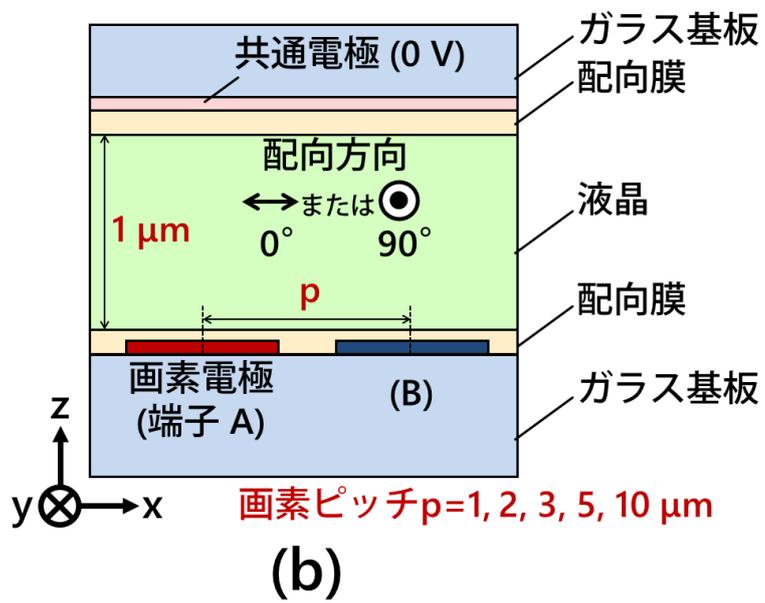
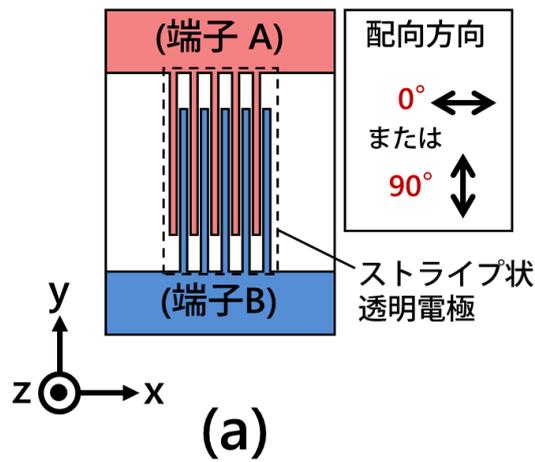
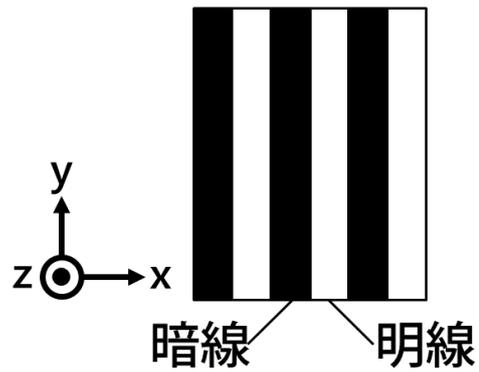
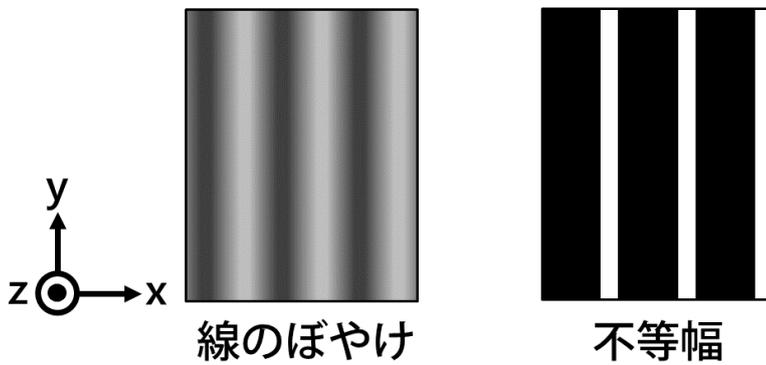


図 3.2 強誘電性液晶の解像度特性調査用セルの構造：
 (a)電極構造の上面図，(b)液晶セルの断面図



(a)



(b)

(c)

図 3.3 想定される光変調パターン：(a)独立した画素駆動による等幅の明線と暗線，(b)隣接画素の影響によるぼやけた線，(c)隣接画素の影響による不等幅の線

		ネマティック液晶		強誘電性液晶	
配向方向		$\leftrightarrow 0^\circ$	$\updownarrow 90^\circ$	$\leftrightarrow 0^\circ$	$\updownarrow 90^\circ$
偏光板		\times	\times	\times	\times
画素ピッチ	10 μm				
	5 μm				
	3 μm				
	2 μm				
	1 μm				

図 3.4 ネマティック液晶セルと強誘電性液晶セルの解像度の比較

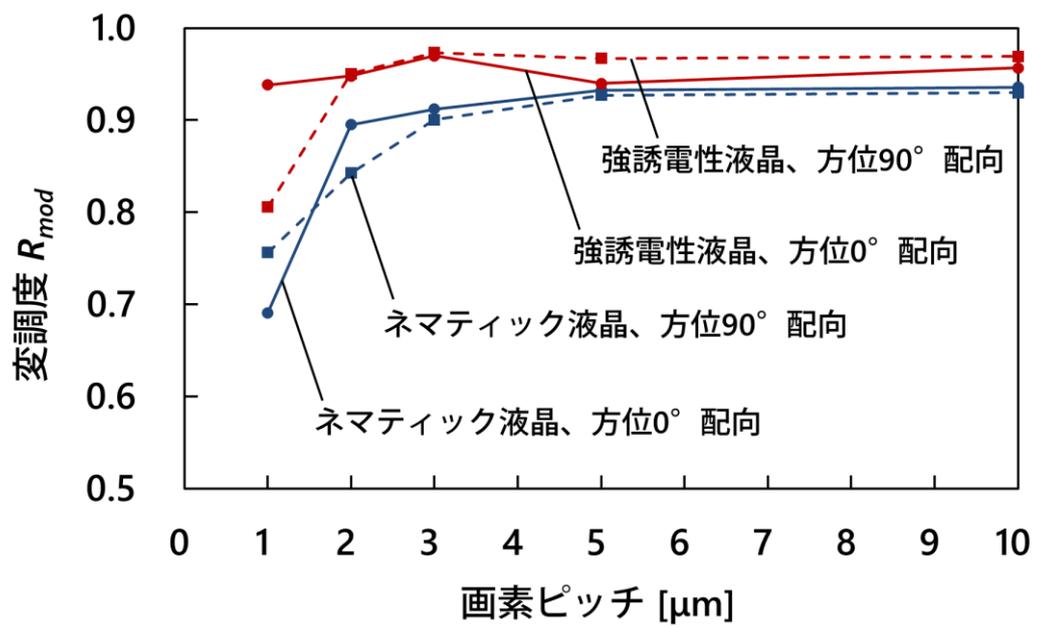
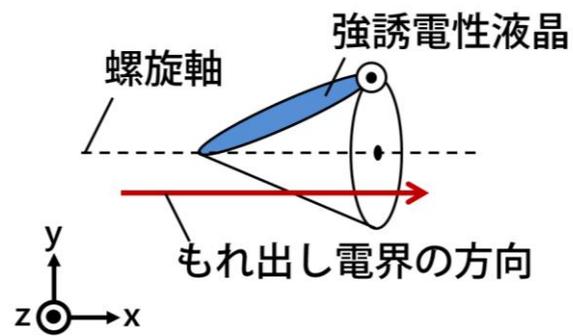
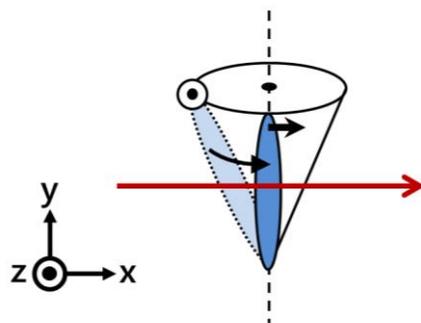


図 3.5 ネマティック液晶と強誘電性液晶の変調度と画素ピッチの関係



(a)



(b)

図 3.6 もれ出し電界の方向に対する強誘電性液晶の挙動の違い：
(a)0°配向, (b)90°配向

第4章 誘電体シールド壁構造を用いた位相型 SLM

4.1 はじめに

第2章では、 $1\ \mu\text{m}$ ピッチの液晶画素における液晶配向シミュレーションを行った結果、隣接する画素の電界のもれ出しや液晶の弾性力の伝搬により、画素ごとの独立した駆動が困難となることを明らかにした。本章では、電界のもれ出しと液晶の弾性力の伝搬を抑制するために、誘電体シールド壁構造という新たな画素構造を考案し、その有効性を検証する。また、誘電体シールド壁構造の設計方針を構築するために、数値シミュレーションに基づいて最適な壁の幅や壁表面のアンカリング強度、液晶の注入用のスリット幅について検討を行う。さらに、ナノインプリント技術を用いて誘電体シールド壁構造を試作し、誘電体シールド壁構造を有する液晶素子の作製方法を確立するとともに、画素の独立駆動や格子壁構造内における液晶配向制御技術について検討する。

4.2 誘電体シールド壁構造の提案

電界のもれ出しを抑制するためには、共通電極と画素電極を同一基板に交互に配置することで液晶層に対して横方向に電界を印加する方法[46]などが考えられるが、液晶の弾性力の伝搬を抑制するためには、画素領域ごとに液晶を分断することが必要である。画素と画素の間に壁を設けることによりこれは実現するが、分断する壁の材料としては電界の分布の観点から、導体とする場合と誘電体とする場合が考えられる。画素と画素の間に導体を挿入し、電位を $0\ \text{V}$ とした場合、図 4.1 に示したように、電界のもれ出しは完全に遮蔽されるが、画素電極から導体の壁に向かって電界が印加されるため、液晶層の厚さ方向に電界が印加されない。導体の壁を浮遊電圧とした場合や $5\ \text{V}$ とした場合においても同様の問題が生じる。

そこで、本論文では誘電体の壁を画素と画素の間に挿入した構造を提案し、この構造を誘電体シールド壁構造と呼ぶことにする。誘電体シールド壁構造が画素ごとの独立駆

動を実現するかを確かめるため、液晶の弾性連続体理論に基づく液晶配向シミュレーションを行った。本シミュレーションでは壁の幅を 300 nm, 画素電極の幅を 700 nm とした。壁の比誘電率は 4 と仮定し、壁の表面は強アンカリング条件であるとした。また、液晶配向方向に対して平行な画素配列と、直交する画素配列の両方についてシミュレーションを行った。その他の条件は 2.4.2, 2.4.3 で行った位相変調型 SLM のシミュレーションと同じである。

誘電体シールド壁構造の液晶配向シミュレーション結果を図 4.2 と図 4.3 に示す。図 4.2 は配向方向に平行に並ぶ画素, 図 4.3 は液晶配向方向に対して直交する方向に並ぶ画素のシミュレーション結果である。図 4.2 (a)の液晶配向分布と電界分布より、電界はシールド壁内部において密になるように分布し、OFF 状態の画素へのもれ出しが抑制されていることがわかる。また、液晶が画素領域ごとに分断されたことから、液晶の弾性力の伝搬も遮断され、画素ごとの独立した駆動が実現している。図 4.2 (b)に示した位相分布より、OFF 状態の画素では位相シフトはほぼ 0 であった一方で、ON 状態の画素は 2π の位相シフトが得られたことがわかる。同様に、図 4.3 に示した配向方向に対して直交する画素配列の場合でも、電界のもれ出しと液晶の弾性力の伝搬が抑制され、OFF 状態の画素の位相シフトがほとんど抑えられたことがわかる。以上のシミュレーション結果より、誘電体シールド壁構造により画素ごとの独立した駆動が可能になることがわかった[46]。

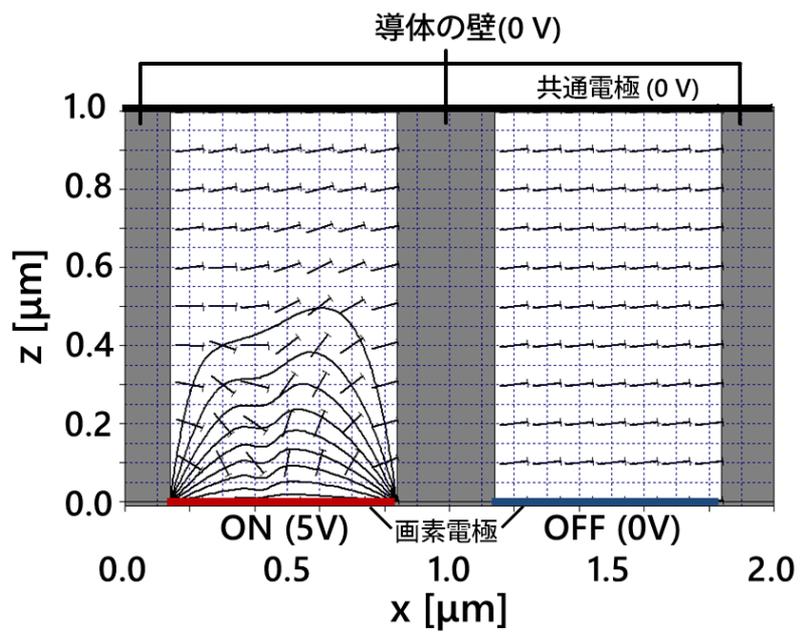
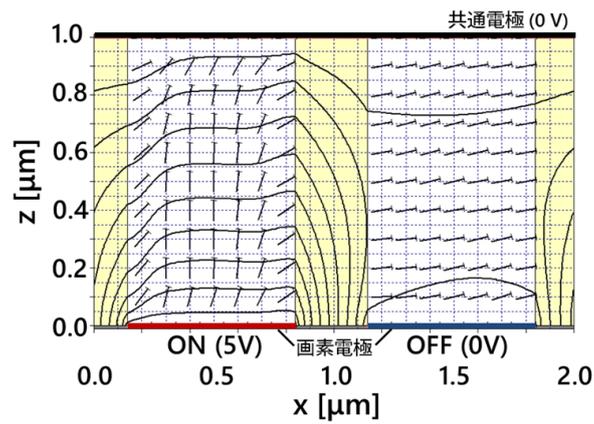
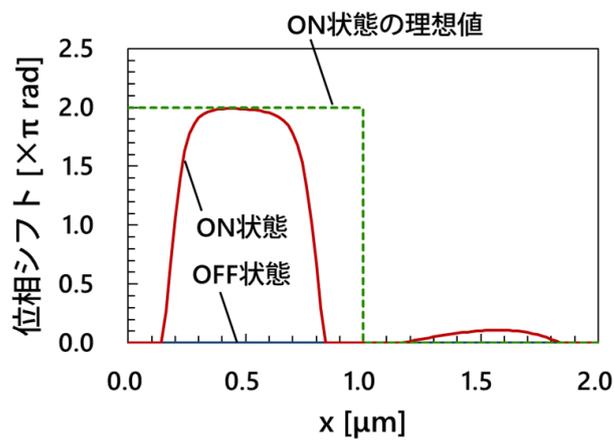


図 4.1 画素間に導体の壁を配置した画素構造の
液晶配向分布と電界分布

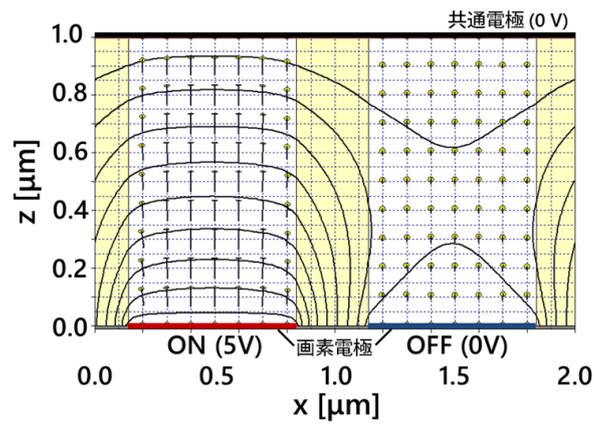


(a)

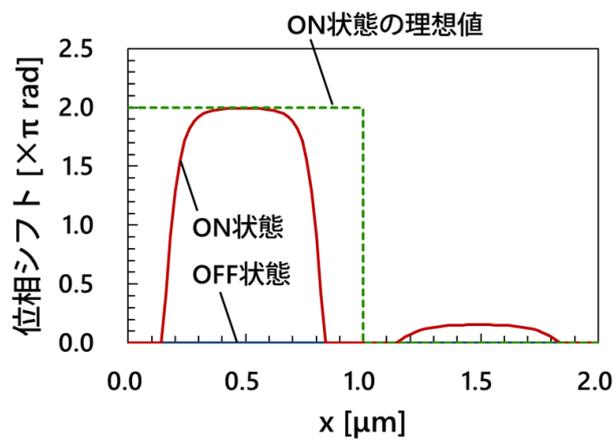


(b)

図 4.2 方位 0° 配向の場合の誘電体シールド壁構造のシミュレーション結果：(a)液晶配向分布と電界分布，(b)位相分布



(a)



(b)

図 4.3 方位 90°配向の場合の誘電体シールド壁構造のシミュレーション結果：(a)液晶配向分布と電界分布，(b)位相分布

4.3 誘電体シールド壁構造の設計

4.3.1 誘電体シールド壁構造の設計パラメータ

誘電体壁の電界シールド効果を高めるためには、壁の幅を厚くし、低い比誘電率を有する材料を使用すればよい。一方で、壁の部分は光変調に寄与しないため、壁部分に照射された光は損失となる。光利用効率を高めるためには壁の幅を薄くする必要があることから、電界のシールド効果と光利用効率はトレードオフの関係にある。

さらに、壁表面における液晶のアンカリング強度は、電圧印加に対する液晶挙動に大きな影響を与える。アンカリング強度と液晶挙動の定性的な関係を明らかにするために、壁の表面を強アンカリング条件と弱アンカリング条件 ($A_\theta = A_\phi = 10^{-5} \text{ J/m}^2$) とした場合のシミュレーション結果をそれぞれ図 4.4 と図 4.5 に示す。このシミュレーションでは、アンカリング強度と液晶挙動の関係を明確にするために、壁の幅を狭くし (幅 100 nm)、電界がわずかにもれ出す条件とした。強アンカリング条件の場合、図 4.4 に示したように、ON 状態の画素の壁表面付近の液晶が回転しにくくなり、ON 状態の画素の周辺部分で位相シフトが減少したことがわかる。画素内の位相分布が不均一な場合、2.5 で述べたように 0 次回折光が生じ、光利用効率が低下する。このため、壁表面のアンカリング強度を弱くして、画素全体の液晶が均一に回転するようにし、画素内で均一な位相分布が得られるようにすることが望まれる。アンカリング強度が弱い場合、図 4.5 に示したように、ON 状態の画素で均一な位相分布が得られる一方で、強アンカリング条件の場合と比較して OFF 状態の画素の位相シフトが増加した。これは、壁の表面のアンカリング力が初期配向を維持するように働くが、アンカリング強度が弱い場合はもれ出した電界により液晶が回転し、位相シフトが増加したためであると考えられる。以上の結果より、アンカリング力は ON 状態の画素の位相分布を不均一にする一方で、OFF 状態の画素では液晶配向を保持して位相シフトが増加しないようにする働きを有することがわかった。OFF 状態の画素への電界のもれ出しは、壁の幅や比誘電率に関係

することから、高い光利用効率と画素内で均一な位相分布を両立するためには、壁の幅、壁表面のアンカリング強度、壁材料の比誘電率を総合的に最適化する必要がある。

4.3.2 壁構造の設計パラメータの最適化

壁構造の比誘電率は、微細加工が容易なアクリル樹脂や SiO_2 などの材料に依存する。本項では、余裕をもった設計にするために、これらの材料よりも比較的大きな比誘電率である 4.0 として、壁の幅と壁表面のアンカリング強度の最適化を行う。

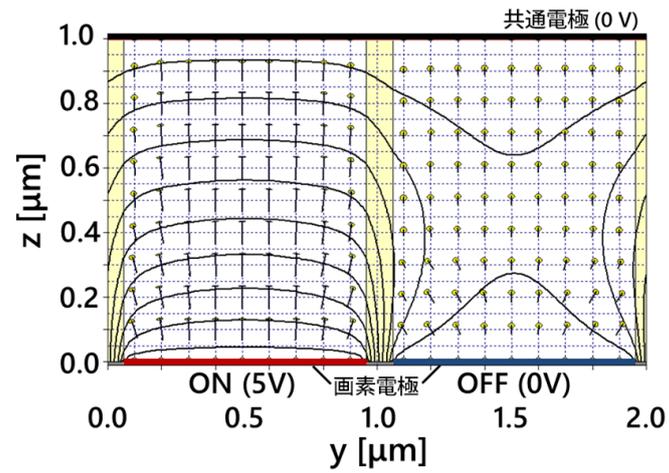
設計パラメータを最適化するためには、画素の独立駆動と画素内の位相分布の均一性を定量的に評価する必要がある。そこで本論文では、可変調領域という評価パラメータを定義する。図 4.6 にその定義を示す。図 4.6(a)に示した位相分布の図は、 $10\ \mu\text{m}$ ピッチの位相変調型 SLM を想定したものである。このとき、ON 状態の画素と OFF 状態の画素が交互に並んでいる場合に生じる位相分布とする。この位相分布を最大位相シフトが 1 となるように規格化する。規格化した位相分布を図 4.6(b)に示す。規格化した位相分布において、ON 状態の画素において値が 1 に近い領域を ON 状態の画素の可変調領域、OFF 状態の画素において値が 0 に近い領域を OFF 状態の画素の可変調領域とそれぞれ定義した。隣接画素や壁表面のアンカリング力により均一な位相分布が得られなかった場合、画素の周辺部は可変調領域でなくなるため、値が小さくなる。一方、画素ごとの独立した液晶駆動が実現し、画素内で均一な位相分布が得られた場合は画素全体が可変調領域となり、値が大きくなる。なお、配向シミュレーションや実際のデバイスでは、規格化した位相が広い範囲で 1 や 0 に等しくなることはまれであるため、本論文では許容誤差を 10%とした。このため、ON 状態の画素では 0.9~1、OFF 状態の画素では 0~0.1 の規格化位相シフトを生じる領域がそれぞれの可変調領域となる。また、壁の部分は光を変調できないため、この部分は可変調領域には含まないとした。例えば、 $300\ \text{nm}$ 幅の壁構造を有する $1\ \mu\text{m}$ ピッチの画素においては、画素の幅に対する可変調領域の割合は最大で 70%となる。壁の幅も考慮した可変調領域を算出することから、この値が最大となるように最適化することで電界のシールド効果と光利用効率を両立した

壁の幅の最適値を求めることができる。

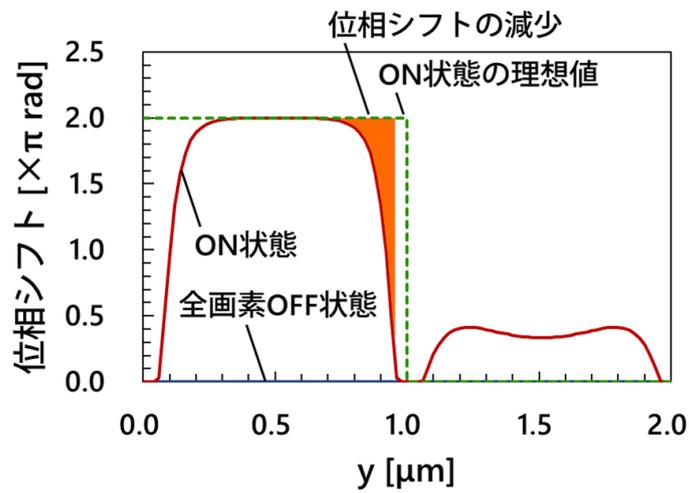
壁の幅と壁表面におけるアンカリング強度を最適化するために、アンカリング強度を $10^{-5} \text{ J/m}^2 \sim 10^{-2} \text{ J/m}^2$ 、壁の幅を $100 \sim 300 \text{ nm}$ の範囲で変化させながら液晶配向シミュレーションを行い、それぞれの条件に対して可変調領域を算出した。その結果を図 4.7 に示す。図 4.7 (a) が ON 状態の画素の可変調領域を示しているが、すべての壁の幅において、アンカリング強度が強いときに可変調領域が低いことがわかる。これは、アンカリング強度が強いほど、壁表面の液晶が束縛され、画素の周辺部で液晶が回転しなくなり、十分な位相シフトが得られなくなることを意味している。この結果より、すべての壁の幅において、アンカリング強度が 10^{-4} J/m^2 以下になるとそれぞれの壁の幅における最大値に達することがわかった。一方、図 4.7 (b) に示した OFF 状態の画素の可変調領域をみると、壁の幅が $100 \sim 200 \text{ nm}$ の場合はアンカリング強度が弱くなると可変調領域が低下したことがわかる。この結果は、壁の幅が狭い場合には OFF 状態の画素に対して電界がもれ出すため、壁の表面のアンカリング強度が弱くなると OFF 状態の画素の液晶が回転し、OFF 状態の画素の位相シフトが増加したことを示している。壁の幅が 250 nm 以上の場合は電界のもれ出しが抑制されるため、アンカリング強度が弱くなった場合でも可変調領域がそれぞれの壁の幅の最大値をとった。

図 4.7 (a) と (b) より壁の幅が 100 nm の場合と 250 nm の場合を抽出し、ON 状態と OFF 状態の画素の可変調領域を同一グラフにプロットしたものを図 4.8 に示す。図 4.8 (a) が壁の幅が 100 nm の場合を示している。アンカリング強度が 10^{-4} J/m^2 以下で ON 状態の画素の可変調領域が最大値の 90% に達するが、OFF 状態の画素の可変調領域は 0 となる。同様に、アンカリング強度が 10^{-2} J/m^2 のときは OFF 状態の画素の可変調領域が 90% に達するが、ON 状態の画素の可変調領域が 60% 程度まで低下したことがわかる。この結果は、壁の幅が不十分な場合は電界のシールド効果が不足し、壁の表面におけるアンカリング強度を変化させても ON 状態の画素と OFF 状態の画素の可変調領域を両立することができないことを示している。

図 4.8 (b)は壁の幅が 250 nm の場合の結果を示している。アンカリング強度が 10^{-4} J/m^2 以下において ON 状態と OFF 状態の画素の両方で可変調領域の最大値である 75%に達することがわかる。壁の幅が 250 nm の場合、もれ出し電界が十分に抑制されるため、壁表面のアンカリング強度を弱くした場合でも OFF 状態の画素において初期配向が維持される。また、アンカリング強度を弱くすることで ON 状態の画素の位相分布が均一化され、ON 状態の画素と OFF 状態の画素の両方において最大の可変調領域となった。この結果より、壁の幅を 250 nm、アンカリング強度を 10^{-4} J/m^2 以下とすることで、壁部分における光の損失を抑制し、画素内で均一な位相変調が可能となることがわかった[59]。同様の手法により、壁材料の比誘電率が 4.0 と異なる場合でも、壁の幅と壁表面のアンカリング強度を最適化することが可能である。

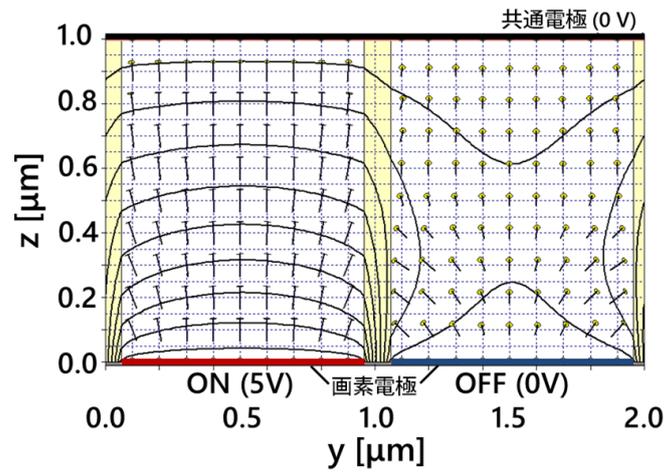


(a)

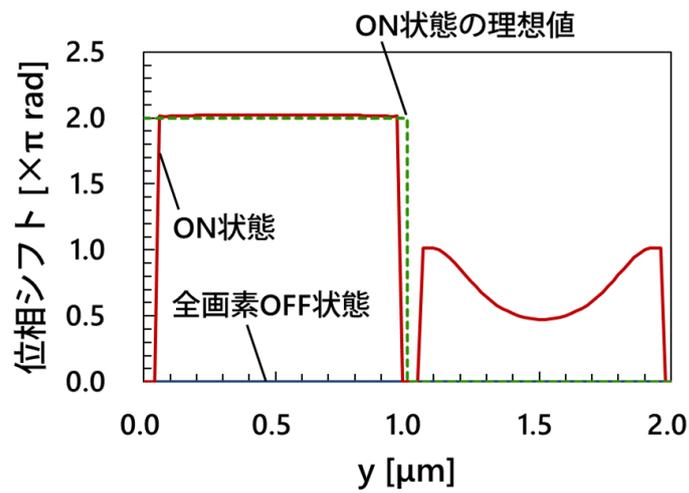


(b)

図 4.4 壁の幅が狭く、表面が強アンカリング条件の場合の誘電体シールド壁構造のシミュレーション結果：
(a)液晶配向分布と電界分布，(b)位相分布

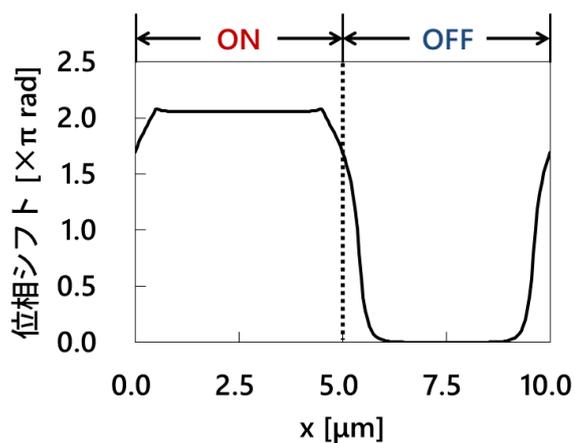


(a)

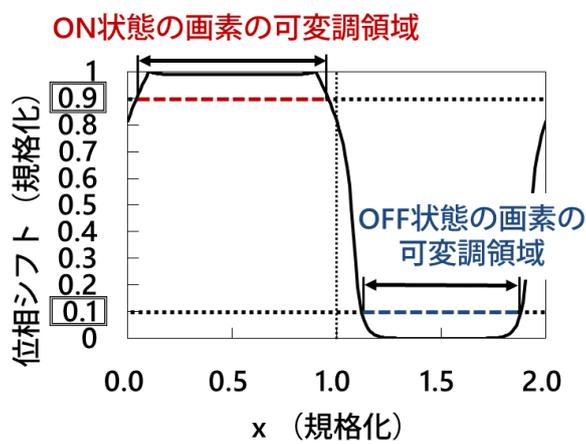


(b)

図 4.5 壁の幅が狭く、表面が弱アンカリング条件の場合の誘電体シールド壁構造のシミュレーション結果：
(a)液晶配向分布と電界分布，(b)位相分布

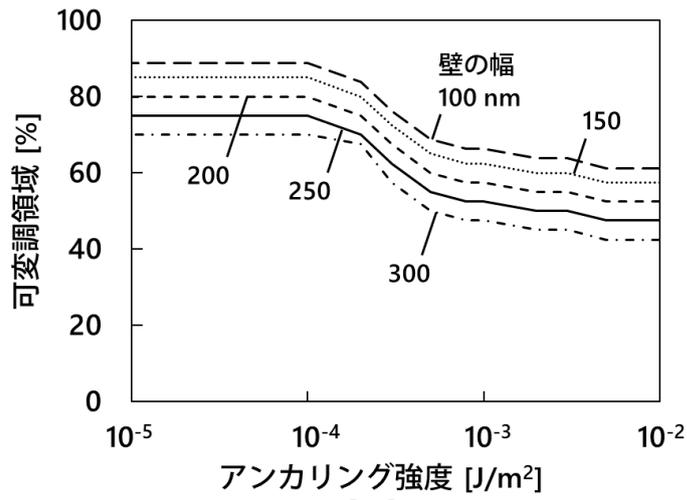


(a)
↓ 規格化

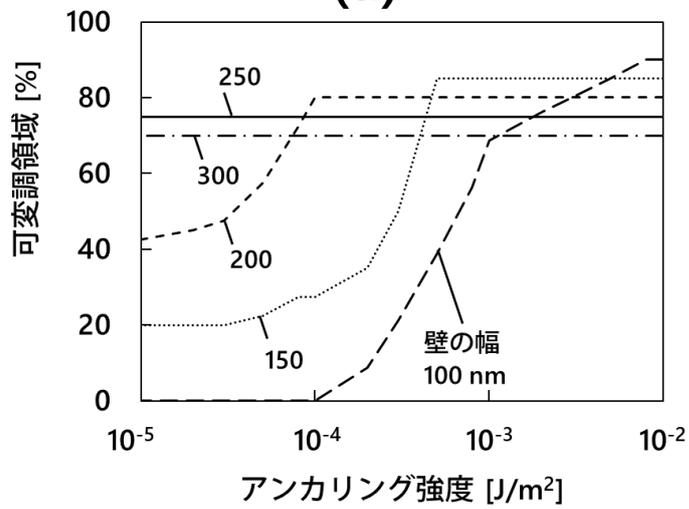


(b)

図 4.6 可変調領域の定義：(a)規格化する前の位相分布，(b)ON 状態の画素と OFF 状態の画素それぞれにおける可変調領域

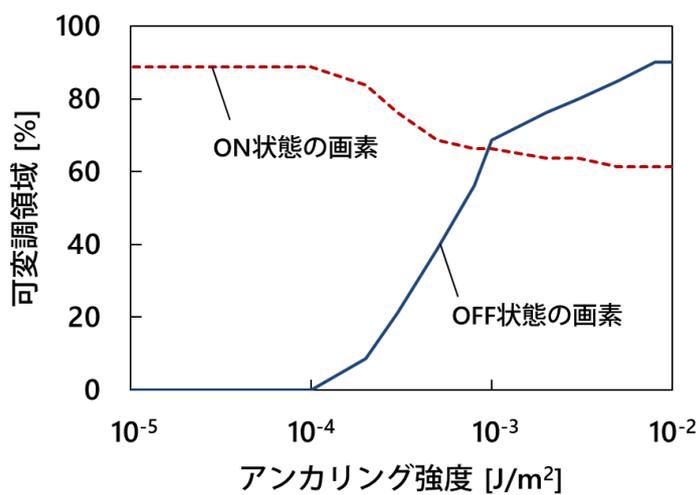


(a)

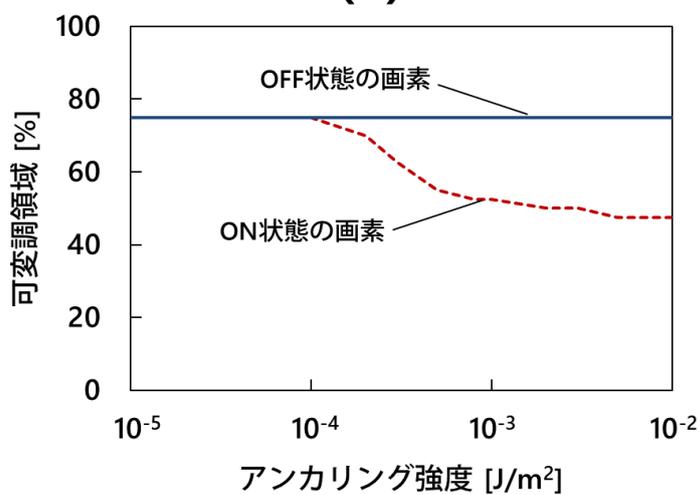


(b)

図 4.7 アンカリング強度と可変調領域の関係：(a)ON 状態の画素における可変調領域，(b)OFF 状態の画素における可変調領域



(a)



(b)

図 4.8 アンカリング強度と可変調領域の関係：
 (a)壁の幅が 100 nm の場合、(b)壁の幅が 250 nm の場合

4.4 壁構造に設けた液晶注入用のスリットの影響

誘電体シールド壁構造は、画素と画素の間に誘電体の壁を有するため、2次元の画素配列では格子状となり、各画素を空間的に分け隔てている。SLMの作製プロセスを考慮すると、誘電体の壁を作製したあとに液晶を注入しなければならないが、壁構造が格子状に存在するために液晶の注入が困難となることが予想される。そこで、壁構造に液晶注入用のスリットを設ける必要があると考えられる。ここでは、壁構造に設けるスリットの位置と幅が、シールド効果や画素駆動にどのような影響を与えるのかについて検討を行う。

スリットの位置については様々なパターンが考えられるが、壁の中心にスリットを設ける場合と、壁の交差する部分にスリットを設ける場合の2つに大別される。このことから、この2つのパターンにおいて壁構造のシールド効果を比較する。図4.9にこれらのパターンのシミュレーションモデルを示す。図4.9(a)は壁の中央にスリットを有する壁構造、図4.9(b)は壁の交差部分にスリットを有する壁構造のモデルである。このシミュレーションでは、標準的なアクリル樹脂を想定して比誘電率を3.0としたため、これに伴って壁の幅は200 nmとした。画素電極の大きさは800 nmとし、スリットの幅はどちらのシミュレーションモデルでも500 nmとした。また液晶配向はセル全体で 10° のプレチルトを有する平行配向とした。壁構造の各表面においてもx軸からz軸へ 10° 傾いた配向とした。このシミュレーションでは3次元的な複雑な空間での液晶配向分布を計算する必要があることから解析手法は有限要素法とし、計算の簡略化のためにすべての表面において強アンカリング条件とした。液晶材料は2章のシミュレーションで用いた1760-1とし、液晶層の厚さは1 μm とした。ON状態の画素の電圧値を4 V、OFF状態の画素の電圧値を0 Vとし、8つのOFF状態の画素に囲まれたON状態の画素と、ON状態の画素に囲まれたOFF状態の画素それぞれについてシミュレーションを行った。

比較として、図4.10にスリットがない場合のシミュレーション結果を示す。図4.10

(a)はシミュレーションモデルを示している。図 4.10 (b)は OFF 状態の画素に囲まれた ON 状態の画素、(c)は ON 状態の画素に囲まれた OFF 状態の画素の場合を示しているが、ON 状態の画素では位相シフトが増加し、OFF 状態の画素では位相シフトが 0 を維持したことから、画素ごとの独立駆動が実現していることがわかる。

壁の中心にスリットを設けた場合のシミュレーションモデルを図 4.11 (a)に、シミュレーション結果を(b)および(c)に示す。図 4.11 (b)をみると、中心の ON 状態の画素だけでなく、スリットを通して周囲の 4 画素においても部分的に位相シフトが増加していることがわかる。特に y 軸方向に並ぶ画素の位相が進んだが、これは 2.4.3 で議論したように、液晶の配向方向に対して直交する方向に並ぶ隣接画素の影響が大きいことが理由であると考えられる。図 4.11 (c)では、中心の OFF 状態の画素が周囲の ON 状態の画素の影響により、位相が π 程度まで進んだことがわかる。

壁構造の交差部分にスリットを設けた場合のシミュレーションモデルを図 4.12 (a)に、シミュレーション結果を(b)および(c)に示す。図 4.12 (b)ではスリットのある画素の角の部分で位相が進んでいるが、隣接する OFF 状態の画素の位相はほぼ 0 を維持した。図 4.12 (c)においても、中心の OFF 状態の画素の位相はわずかに進んだが、壁の中心にスリットを設けた場合の図 4.11 (c)と比較すると位相の進みは抑制されていることがわかる。

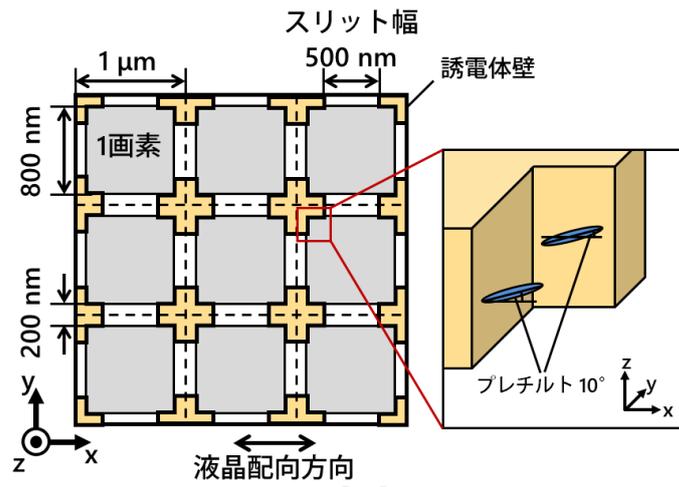
以上の結果から、壁の中心にスリットを設けた場合と比較して、壁の交差部分にスリットを設けた場合の方が壁構造のシールド効果が高いことがわかった。これは、2.5 で議論したように、上下左右の 4 方向に並ぶ画素の影響が支配的であるため、これらの画素間にスリットがある場合は電界のもれ出しや液晶の弾性力の伝搬が発生しやすいことが理由であると考えられる。

壁の交差部分にスリットを設けた場合におけるスリットの幅と画素駆動の独立性の関係を明らかにするために、スリット幅を 200 nm から 900 nm まで 100 nm きざみで変化させながら、同様の液晶配向シミュレーションを行った。画素駆動の独立性の評価に

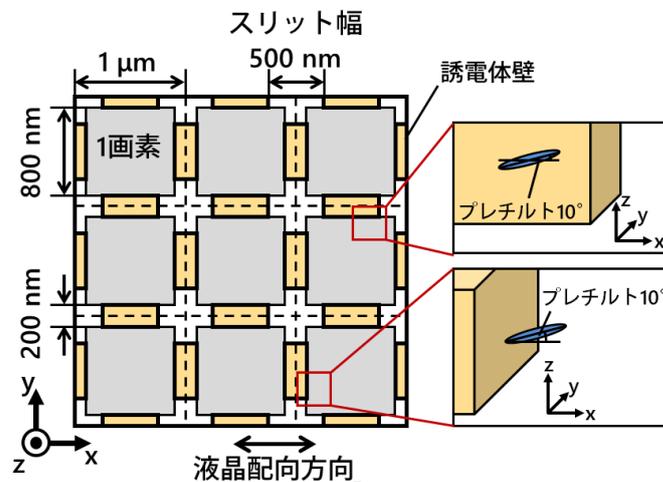
は、4.3.2 で定義した可変調領域を画素領域の面積に拡張して適用し、画素領域に対する可変調領域の割合を算出した。なお、壁やスリットの部分を含めて可変調領域を求めた場合、光変調に使用しないスリットの部分の位相の進みや遅れも含めて反映されてしまうため、このシミュレーションでは壁やスリットを含まない内側の領域を評価領域とした。

シミュレーションにより求めたスリットの幅と可変調領域の関係を図 4.13 に示す。OFF 状態の画素では、スリットの幅を 400 nm 以下にすることで 50%以上の可変調領域を維持可能であることがわかった。このシミュレーションでは壁の表面を強アンカリング条件と仮定したため、ON 状態の画素の可変調領域が狭くなっている。ON 状態の画素の可変調領域を広くするためには、4.3.2 で議論したように、壁の表面におけるアンカリング強度を小さくする必要がある。

スリットで生じる電界のもれ出しや液晶の弾性力の伝搬を視覚的に説明するために、スリット幅が大きく 700 nm 幅の場合の ON 状態の画素に囲まれた OFF 状態画素の位相分布と液晶配向シミュレーション結果を図 4.14 に示す。図 4.14 (a)の位相分布をみると、スリットを通して隣接画素が中心の画素に対して影響を与えている。図 4.14 (a)の赤い破線部分の断面における液晶配向分布と電界分布を図 4.14 (b)に示す。スリットの部分では、壁構造をもたない従来の画素構造と同様に、隣接する画素の電界のもれ出しや液晶の弾性力の伝搬の問題が生じる。このことから、画素ごとの独立した駆動を実現するためには、スリットはなるべく小さくする必要があるが、注入する液晶の粘性などを考慮してスリット幅を決定する必要があるといえる[60]。



(a)



(b)

図 4.9 スリットを設けた誘電体シールド壁構造の分類：

(a)壁の中央にスリットを設けた場合、

(b)壁の交差部分にスリットを設けた場合

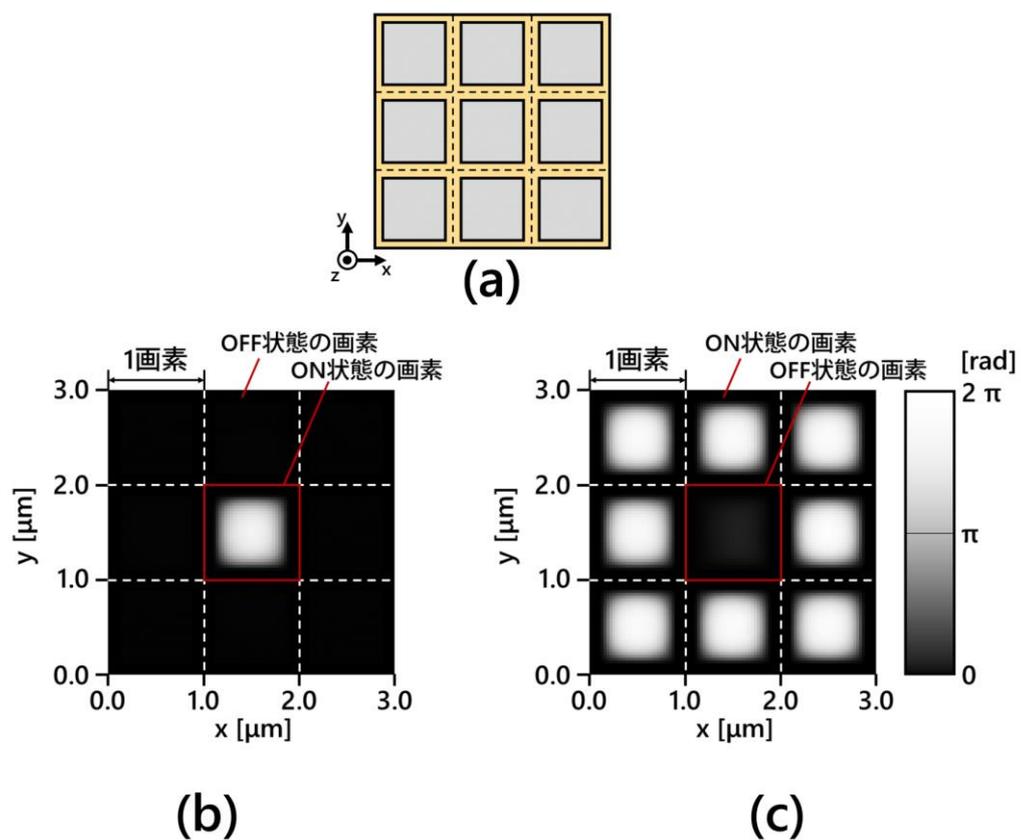


図 4.10 8方向を異なる状態の画素に囲まれた画素の位相分布：
 (a)壁構造の形状，(b)OFF状態の画素に囲まれたON状態の画素，
 (c)ON状態の画素に囲まれたOFF状態の画素

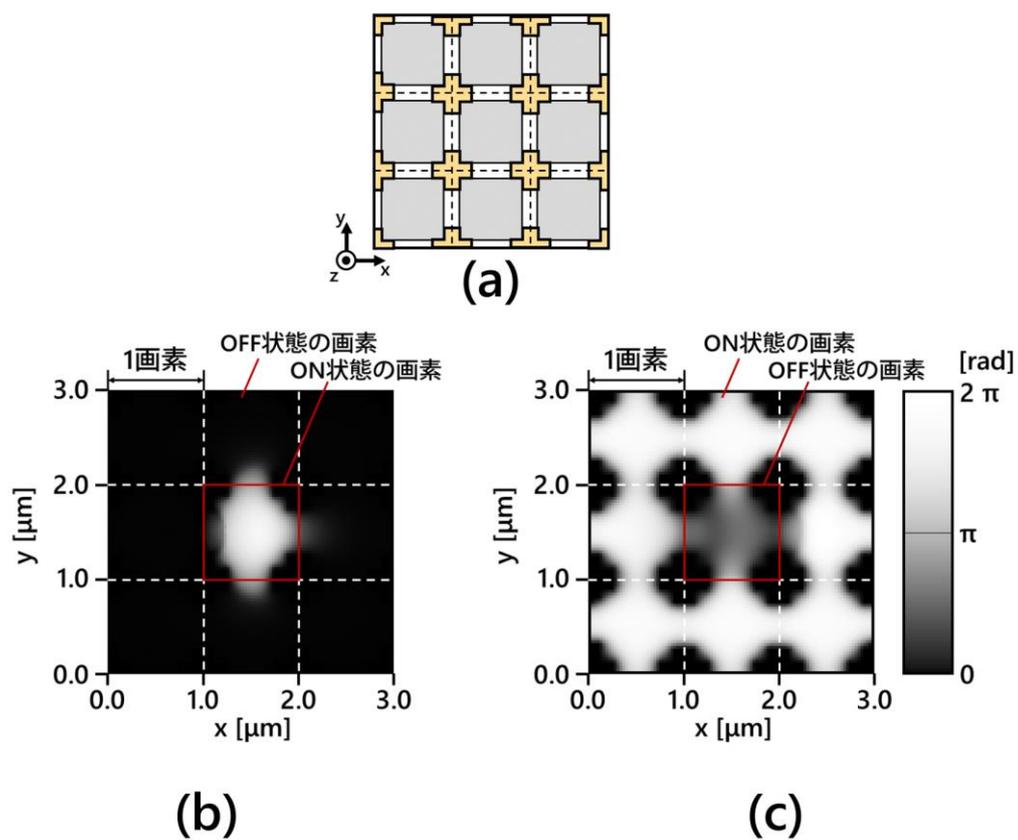


図 4.11 壁の中央にスリットを有する壁構造において 8 方向を異なる状態の画素に囲まれた画素の位相分布：(a)壁構造の形状，
 (b)OFF 状態の画素に囲まれた ON 状態の画素，
 (c)ON 状態の画素に囲まれた OFF 状態の画素

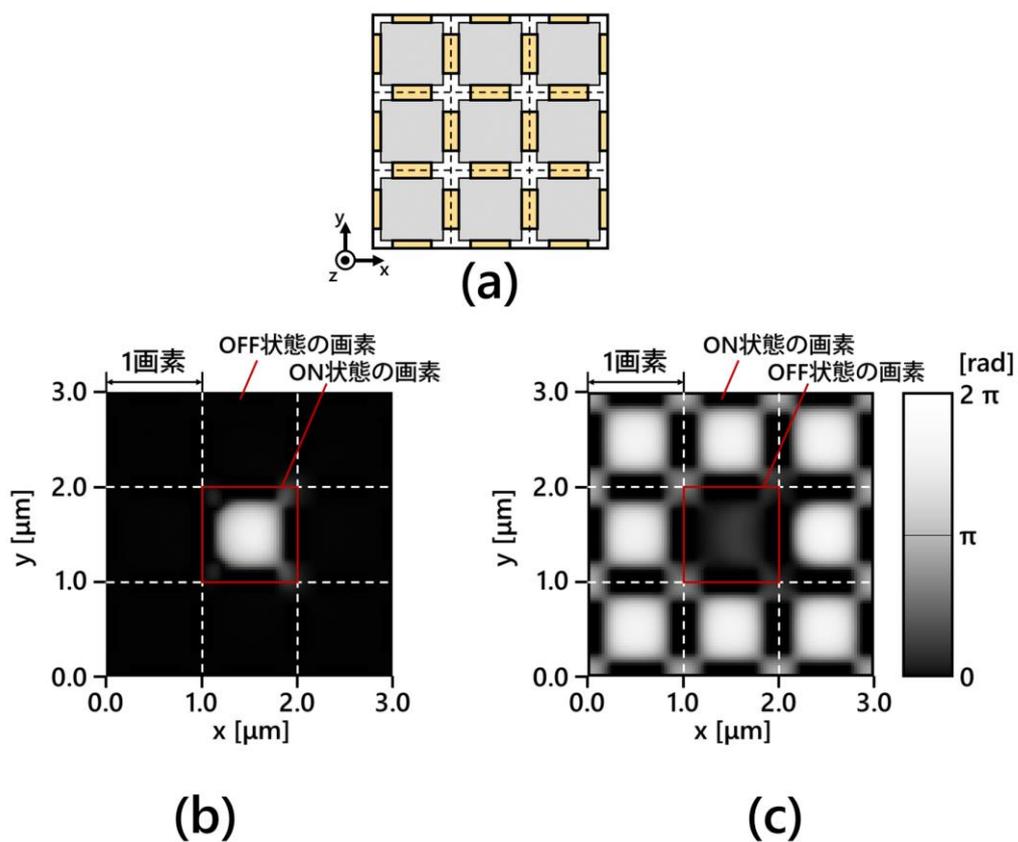


図 4.12 壁の交差部分にスリットを有する壁構造において 8 方向を異なる状態の画素に囲まれた画素の位相分布：
 (a)壁構造の形状，(b)OFF 状態の画素に囲まれた ON 状態の画素，
 (c)ON 状態の画素に囲まれた OFF 状態の画素

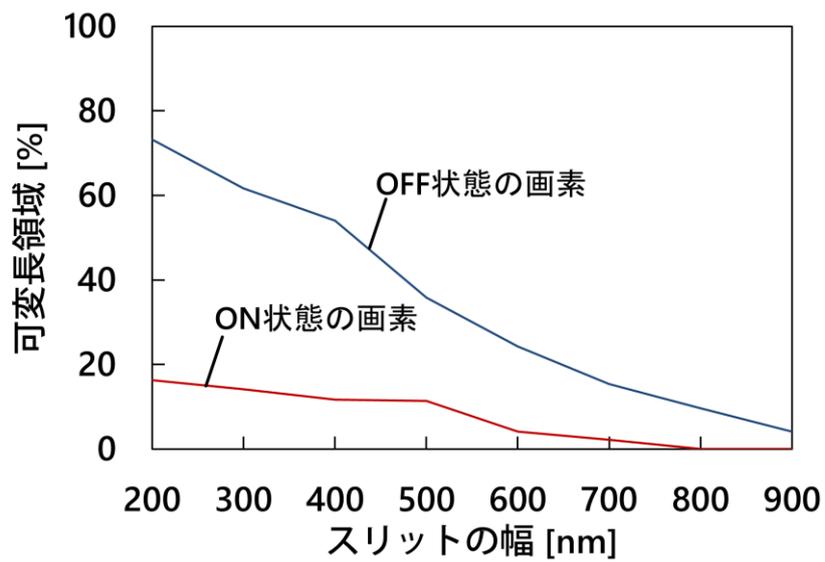
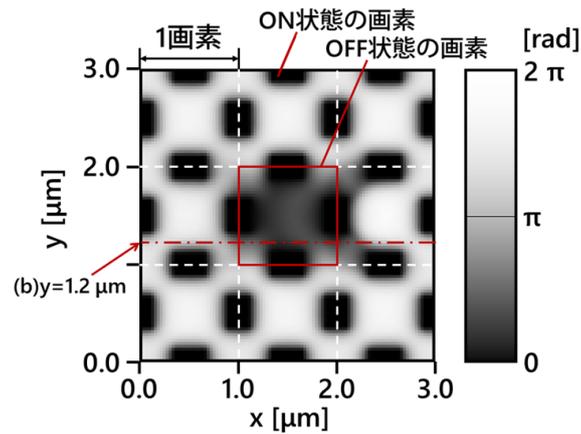
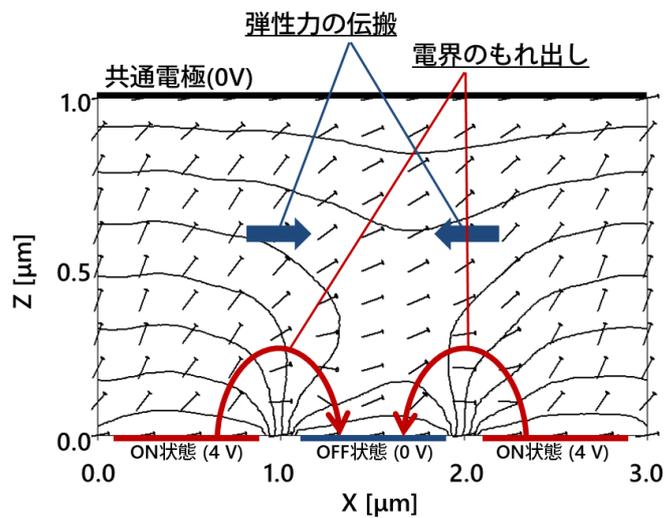


図 4.13 壁の交差部分にスリットを有する壁構造における
スリットの幅と可変調領域の関係



(a)



(b)

図 4.14 壁の交差部分にスリットを有する壁構造における液晶配向分布（スリットが大きい場合）：(a)ON 状態の画素に囲まれた OFF 状態の画素の位相分布，(b)スリット部分の液晶配向分布

4.5 1次元の誘電体シールド壁構造の試作と評価

4.2 では、誘電体シールド壁構造が $1\ \mu\text{m}$ ピッチ画素の独立駆動を可能にすることをシミュレーションにより明らかにしたが、これまでに誘電体シールド壁構造のような微細で寸法的なアスペクト比が高い構造を、液晶層内に作製した例はない。そこで、誘電体シールド壁構造の作製プロセスを構築し、誘電体壁のシールド効果を実験的に確認するために、単純な 1 次元の画素配列用の誘電体シールド壁構造を試作した。

4.5.1 実験用液晶セルの構造と作製手順

図 4.15 に作製した液晶セルの構造を示す。電極は 3.3 で用いたストライプ状の電極と同様の形状を有し、2 端子に異なる電圧を印加することにより、1 次元の画素に対して交互に異なる電圧を印加することが可能である。シールド効果を確認するために、比較として図 4.15 (a) に示すように壁構造のない従来の画素構造を有する液晶セルも作製した。従来の構造を模したセルでは、上下基板に配向膜 (AL-1254, JSR 社) を形成し、ラビング処理により y 軸方向に液晶が配向するようにした。配向方向を y 軸方向とした理由は、2.4.3 で示したように液晶の配向方向に対して直交する方向のもれ出し電界の影響が大きいためである。上基板は透明な共通電極を有するガラス基板を使用し、下基板にはストライプ状の電極を有するガラス基板を使用した。電極の幅は $700\ \text{nm}$ で電極間の距離は $300\ \text{nm}$ とした。上下基板の間はフォトリソグラフィを用いて作製したスペーサーにより厚さが $1.1\ \mu\text{m}$ になるようにした。誘電体シールド壁構造を有する液晶セルの場合は、図 4.15 (b) に示すように、くし歯電極を有する下基板上に $1\ \mu\text{m}$ ピッチの壁構造を形成した。壁の高さは $1.1\ \mu\text{m}$ であることから、液晶層の厚さは従来構造のセルと同じである。上基板と壁構造を密着させる必要があることから、上基板には柔軟なポリカーボネート基板を使用した。配向膜は上基板のみに形成し、y 軸方向にラビング処理を施した。下基板は配向膜を持たないが、一般

的にストライプ状の壁構造のような形状に対して、液晶は平行に並ぶ性質を有する [61], [62] ことから、液晶セル全体で均一な液晶配向を実現可能である。液晶材料は E7 (LCC 社) を用いた。E7 の屈折率差は光の波長 550 nm で 0.23 であり、液晶層の厚さが 1.1 μm であることから、配向方向に対して 45° の直線偏光を入射した場合、p 偏光と s 偏光の位相差は 0.93π となる。ここから透過率を算出すると 98.7% となることから、直交偏光板に挟んだ状態で液晶セルに電圧印加し、透過光を観察することで、液晶の挙動や画素の独立駆動を評価することが可能である。

誘電体の壁構造はナノインプリント技術 [63], [64] により下基板上に形成した。ナノインプリント技術は誘電体樹脂を微細に加工することが可能であり、高い形状的なアスペクト比をもつ微細構造を形成可能である。本論文で採用したナノインプリント技術の手順を図 4.16 (a) に示す。まず、基板上にアクリルを主成分とする紫外線 (Ultra violet, UV) 硬化樹脂モノマーを塗布する。実験に使用した UV 硬化樹脂の硬化後の比誘電率は 3.8 であり、屈折率は波長 590 nm で 1.5107、波長 633 nm で 1.5085 であった。次に、予め壁構造を形成したモールドを、UV 硬化樹脂を押し付け、UV 硬化樹脂の形状がシールド壁構造の形状になるようにした。このときの圧力は 0.5 MPa、押し付け時間は 10 秒であった。モールドを押し付けたまま UV 硬化樹脂を UV 光で露光することで、パターンを保ったまま重合させる。このときの UV 露光波長は 365 nm、強度は 1 J/cm^2 であった。最後にモールドを取り外すことで、基板上に微細な構造を形成することができる。なお、ナノインプリント技術では、塗布した樹脂にモールドを押し付けて微細構造を形成するため、構造の下部に残膜が生じる。残膜のシールド効果に対する影響については後述のシミュレーションにより検討を行った。

図 4.16 (b) はナノインプリント技術により基板上に形成された壁構造の走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 画像である。この画像から、壁構造の高さが 1.1 μm 、幅が 180 nm の高いアスペクト比で壁構造が形成できたことがわかる。

また、UV 硬化樹脂の残膜の厚さは 330 nm であった。

4.5.2 誘電体の残膜を考慮した液晶配向シミュレーション

誘電体壁が底部に残膜を有する場合でも画素の独立駆動が可能かどうか確かめるために、試作した液晶セルの構造に基づき、液晶配向と光学的な特性をシミュレーションした。誘電体壁の比誘電率は 3.8、残膜の厚さは 330 nm とした。ON 状態の画素と OFF 状態の画素が交互に並んだ状態をシミュレーションするために、周期境界条件とした ON 状態と OFF 状態の 2 画素をモデルとしてシミュレーションを行った。

図 4.17 (a)に液晶配向分布と電界分布のシミュレーション結果を示す。ON 状態の画素では電圧印加により液晶が垂直に立ち上がっているのに対し、OFF 状態の画素の液晶は y 軸方向を向いていたことから、残膜がある場合においても画素ごとの独立した駆動が可能となることがわかる。図 4.17 (b)は液晶の配向方向に平行な直線偏光を入射した場合の ON 状態での位相分布を示している。ON 状態の画素における位相シフトは 0.6π と小さい値であったが、これは上基板の表面において液晶が束縛されており、ON 状態の画素内のすべての液晶が完全に垂直にならないためである。また、ON 状態の画素の位相分布は不均一である理由として、壁表面のアンカリング力の影響に加えて、図 4.17 (a)より残膜で電界が広がり、液晶層に印加される電界分布が不均一になったことが考えられる。残膜では横方向にも電界が広がることから、OFF 状態の画素にもれ出す電界強度が増加していることが予想される。

作製した液晶セルの観察では、図 4.17 (c)に示すように、直交させた偏光板に挟んだ状態で透過する光を観察することから、図 4.17 (a)の液晶配向分布のシミュレーション結果から直交偏光板に挟んだ状態での光透過率を算出した。その結果を図 4.17 (d)に示す。OFF 状態の画素の透過率は中心がわずかに低下したが、全体として高い値を保った。一方で、ON 状態の画素は中心の透過率が低くなったことから、作製した液晶セルにより、画素の独立駆動が可能であることがシミュレーションにより確認された。

比較として、誘電体の残膜を除去した場合のシミュレーション結果を図 4.18 に示す。

残膜がある場合は、液晶層に十分な電圧が印加されるように ON 状態の画素電極に 7 V の電圧を印加していたのに対し、残膜を除去した場合は 3 V の電圧を印加することで、ON 状態の液晶を駆動可能である。図 4.18 (b)に示した位相分布をみると、残膜がある場合と比較して、ON 状態の画素と OFF 状態の画素の位相分布がともに均一になったことがわかる。印加された電界は残膜中を広がるように分布するため、残膜を除去することにより画素内に印加される電界分布が均一になると同時に、隣接画素への電界のもれ出しが抑制されるため、残膜の厚さを低減することが望ましい。

4.5.3 1次元の画素配列を有する誘電体シールド壁構造液晶セルの観察

従来構造の液晶セルと壁構造を有する液晶セルを直交偏光板下で観察し、透過光を観察した。図 4.19 にその顕微鏡写真を示す。この観察では、補正環付き対物レンズ (LCPlanFl 100× /0.80 LCD, Olympus 社) を使用し、液晶セルの上基板により発生する収差を補正して観察した。図 4.19 (a)は従来構造のセルの観察結果を示しており、電圧印加前のストライプ状の線は電極の位置を示している。電圧印加前は液晶の屈折率差により、入射した直線偏光の状態が変化し、検光子を透過することで全体が明るく見える。電圧を印加すると液晶が垂直方向を向き、入射光の偏光状態が維持されるため、検光子で吸収され暗く見える。このことから、電極ごとの独立した駆動が実現した場合、ストライプ状の電極に交互に電圧を印加することで 2 μm ピッチの明暗が観察されるはずである。しかし、従来構造のセルでは、ストライプ状の電極に対して 0 V と 3 V を交互に印加した結果、ON 状態の電極だけでなく、OFF 状態の電極上も暗くなった。この結果は、OFF 状態の電極上の液晶が ON 状態の画素の影響により回転したことを示している。

図 4.19 (b)に誘電体シールド壁構造の場合の観察結果を示す。従来の画素構造の場合と比較して、電圧印加前の輝度が低いように見えるが、これは誘電体材料とガラスの境界で生じる反射や、壁構造による回折により、透過光量が減少したことが原因であると考えられる。誘電体材料の残膜によって液晶層に印加される電圧が減少することを考慮

し、0 V と 7 V の電圧を印加した結果、ON 状態の電極上が暗くなった一方で、OFF 状態の電極上は明るいままであったことがわかる。

電極や壁構造による透過率低下の影響を取り除くため、顕微鏡による観察結果から、電圧印加前の透過率に対する電圧印加中の透過率の比 R_{trans} を算出した。透過率の比 R_{trans} の定義を次式に示す。

$$R_{trans} = \frac{T_{ON}}{T_{OFF}} \quad (15)$$

ただし、 T_{OFF} はすべての電極の電圧を 0 V とした場合の観察点における透過率、 T_{ON} はストライプ状の電極を交互に ON 状態と OFF 状態とした場合の観察点における透過率である。この比では、電圧印加中の透過率を電圧印加前の透過率で除算するため、電圧印加中の透過率が電圧印加前と等しい場合は 1 となり、電圧印加中の透過率が減少した場合は 1 以下の数値となる。このことから、電極や壁構造による透過率低下を除外した状態で電圧印加に伴う透過率の低下のみを抽出することができる。

図 4.20 に電極の配列方向 (x 軸方向) の透過率比の分布を算出した結果を示す。図 4.20 (a) は従来の画素構造の結果であるが、電圧印加により OFF 状態の電極上の透過率も減少したため、電極が存在する領域全体の透過率が下がったことがわかる。この結果は、従来の画素構造では、1 μm ピッチの画素の独立した駆動が困難となる事を示している。一方、図 4.20 (b) に示した誘電体シールド壁構造の場合の透過率比分布では、2 μm ピッチで明暗のパターンが現れたことがわかる。理想的には、電極ごとの独立した駆動が実現した場合、矩形波のような透過率比の分布が得られるはずであるが、この結果では矩形波の角が鈍り、三角波のようなパターンが得られた。このような透過率比分布が得られた理由として、光学顕微鏡の解像限界が関わっていると考えられる。観察に使用した対物レンズの解像限界は、光の波長を 550 nm としたレイリーの分解能の式[65]より、0.4 μm である。1 μm の幅の画素の中の液晶駆動の均一性を評価するには不十分な解像度であることから、光学顕微鏡を用いた観察では矩形波のような透過率比分布を得ることが困難であり、三角波のような透過率比分布が得られたと推察される。電極上の

液晶駆動の均一性の評価は困難であるが、OFF 状態の電極上の透過率が電圧を印加する前とほぼ同程度の透過率であったことから、誘電体シールド壁構造により 1 μm ピッチの画素の独立した駆動が可能となることが実験的に示された[66].

4.5.4 誘電体壁を有する液晶セルの光変調による回折光の観察

ホログラフィックディスプレイ用の位相型 SLM としての用途を想定し、作製したデバイスによる回折光を観察した。作製した液晶セルは 1 μm ピッチの電極と 1 μm ピッチの壁構造を有することから、電圧を印加していない状態では 1 μm ピッチの構造に由来する回折光が観察されることが予想される。また、ストライプ状の電極を交互に ON/OFF 状態とした場合は、液晶が 2 μm ピッチの位相格子となるため、2 μm ピッチの位相変調に由来する回折光が観察されるはずである。

図 4.21 に回折光の観察に使用した光学系を示す。光源は He-Ne レーザー (05-LHP-151, MELLES GRIOT 社) を使用し、焦点距離 f が 100 mm のレンズを用いてビーム径を縮小した。レンズに入射するレーザー光のビーム径 (直径) を D とすると、縮小したあとのビーム径 D' およびレイリー長 z_R は、近軸近似が成立する場合に次式より求められる [65], [67].

$$D' = \frac{4\lambda f}{\pi D} \quad (16)$$

$$z_R = \frac{\pi D'^2}{4\lambda} \quad (17)$$

光源に使用したレーザー光の波長は 633 nm、ビーム径は 0.8 mm であるため、縮小したあとのビーム径 D' は 101 μm 、焦点深度の程度を示すレイリー長 z_R は 12 mm となる。ただし、レンズの収差やレーザー光のビーム伝搬率[68]については無視している。縮小したレーザー光を液晶セルの画素領域に当て、50 mm 離れたスクリーン上に投影することで回折パターンを観察した。なお、作製した液晶セルのストライプ状の電極は長さが 50 μm 、本数が 20 本であるため、画素領域の大きさは 50 μm \times 20 μm である。画素領域よりも縮小したビーム径の方が大きいため、画素領域に当たらなかったレーザー光はそ

のまま液晶セルを透過し、スクリーン上に 0 次回折光と重なって投影される。

図 4.22 にスクリーン上で観察された回折パターンを示す。図 4.22 (a)はすべての電極を OFF 状態とした場合の回折パターンであり、図 4.22 (b)は電極を交互に ON/OFF 状態とした場合の回折パターンを示している。中心の明るい点が 0 次回折光であり、上下 (y 軸方向) に伸びる回折光は、短い間隔で回折スポットが並んでいたことから、50 μm の間隔で配置された引き出し電極による回折光であると考えられる。(a)と(b)を比較すると、(a)では観察されなかった位置に回折光が現れた。0 次回折光からの距離は 17 mm であり、スクリーンと液晶セルの距離が 50 mm であることから計算すると、回折角は 19° である。この値は、波長を 633 nm として式(1)より算出した、2 μm ピッチの周期構造によって生じる回折光の角度 (18.5°) と近い値であった。この結果より、誘電体シールド壁構造を有する液晶セルにおいて 1 μm ピッチの画素が独立に駆動され、2 μm ピッチの光変調が実現したことが確認された。また、図 4.22 (a)と(b)の両方において、0 次回折光から 41 mm 離れた左右の位置生じた光の回折角は 39° であった。1 μm ピッチのパターンにより生じる回折光の角度は、 39.3° であることから、観察された回折スポットは 1 μm ピッチの電極や壁構造によるものであると判断できる。

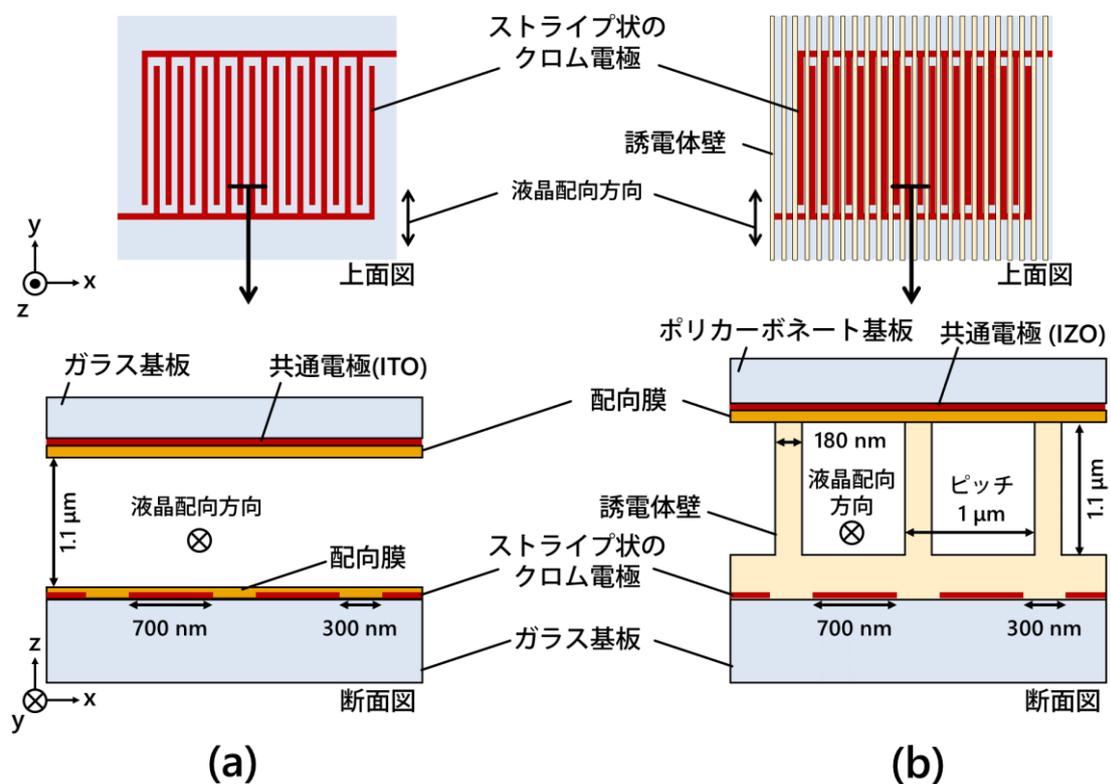


図 4.15 1 μm ピッチのストライプ状の電極を有する液晶素子：
 (a)従来の画素構造, (b)誘電体シールド壁を有する画素構造

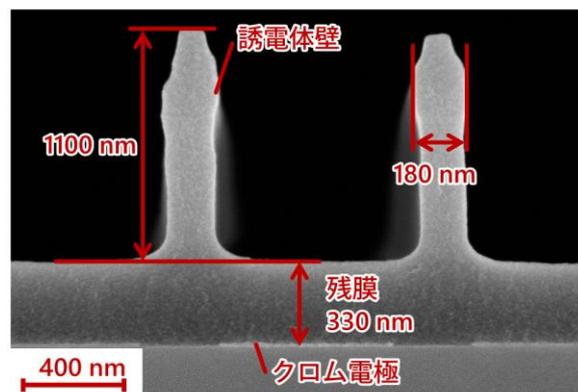
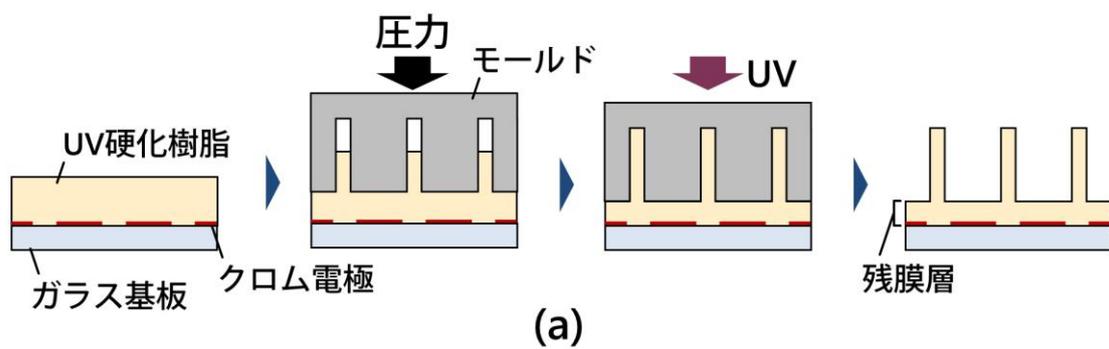


図 4.16 ナノインプリント技術による壁構造の形成：(a)ナノインプリントの手順，(b)ナノインプリント技術により形成された壁構造の断面 SEM 画像

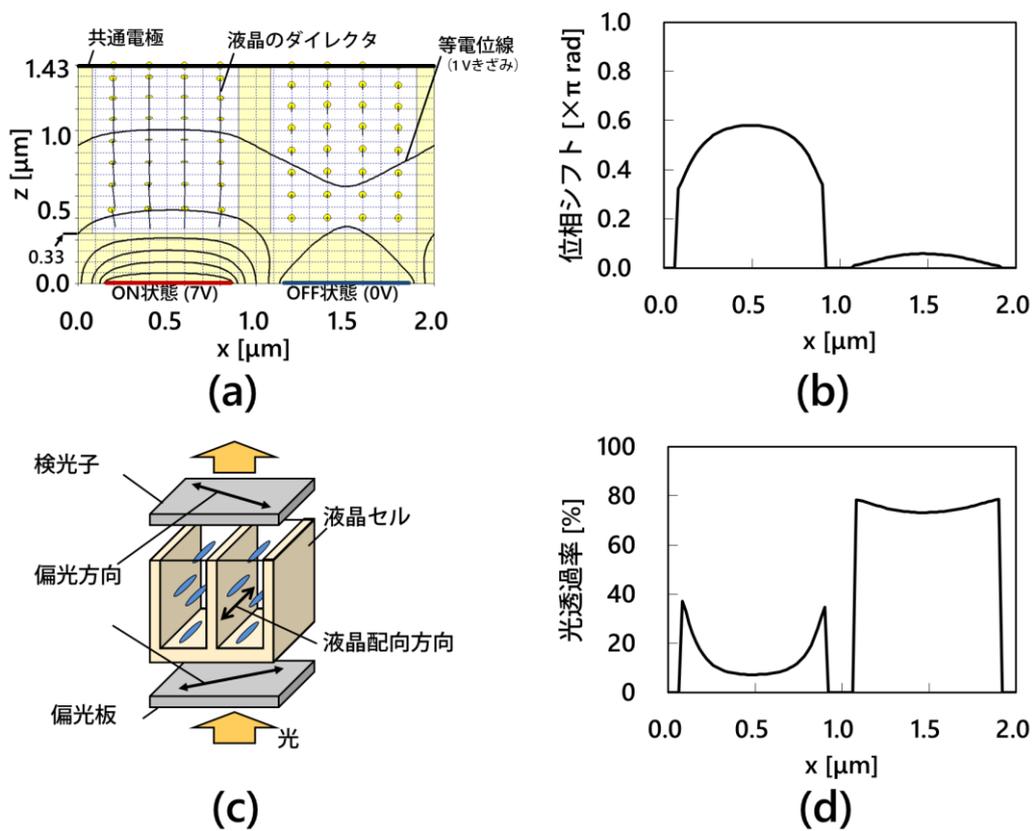
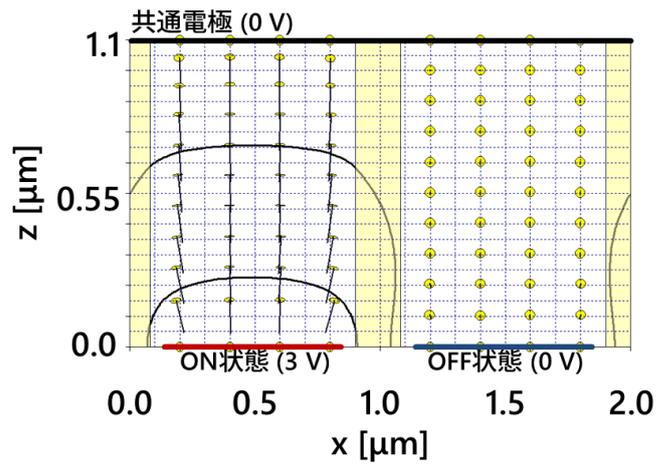
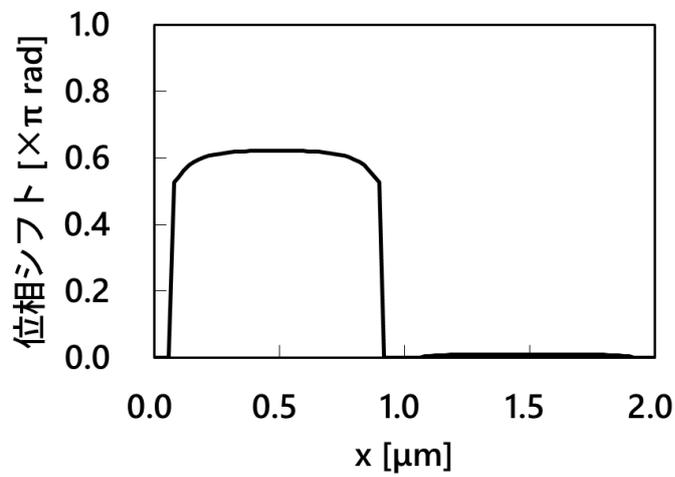


図 4.17 誘電体の残膜の影響についてのシミュレーション：
 (a)液晶配向分布と電界分布，(b)位相分布，
 (c)液晶セルの観察系，(d)直交偏光板下での光透過率分布



(a)



(b)

図 4.18 残膜が除去された場合のシミュレーション結果：(a)液晶配向分布と電界分布，(b)位相分布

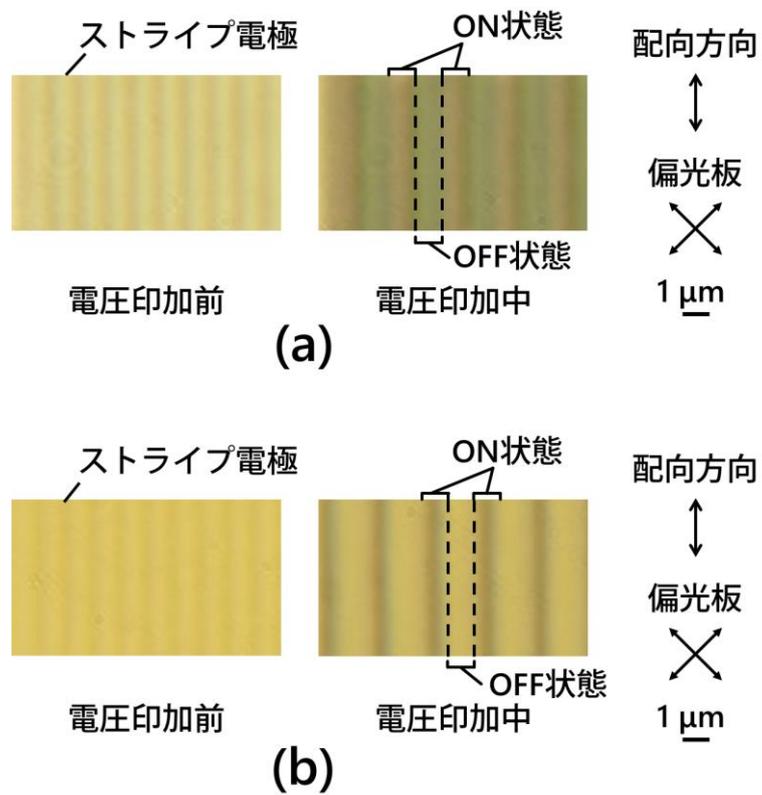
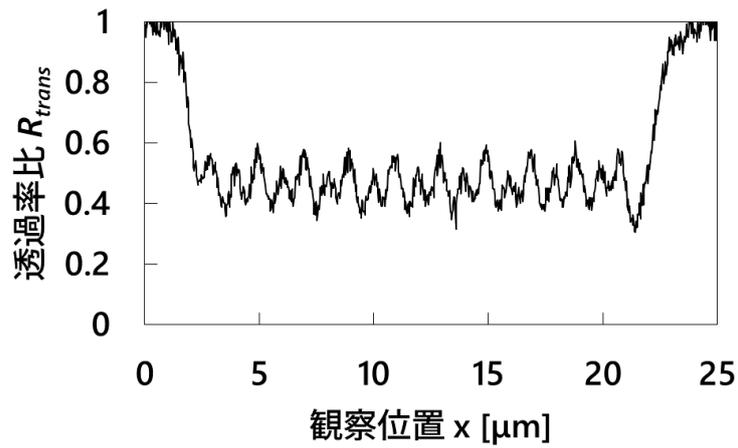
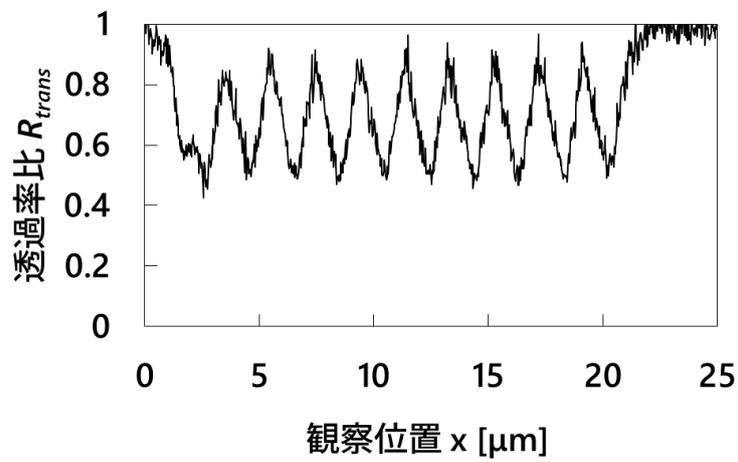


図 4.19 直交偏光板下でストライプ電極に交互に電圧を印加した場合の液晶セルの様子：(a)従来の画素構造，
(b)誘電体シールド壁を有する画素構造



(a)



(b)

図 4.20 透過率比分布の比較：(a)従来の画素構造,
(b)誘電体シールド壁を有する画素構造

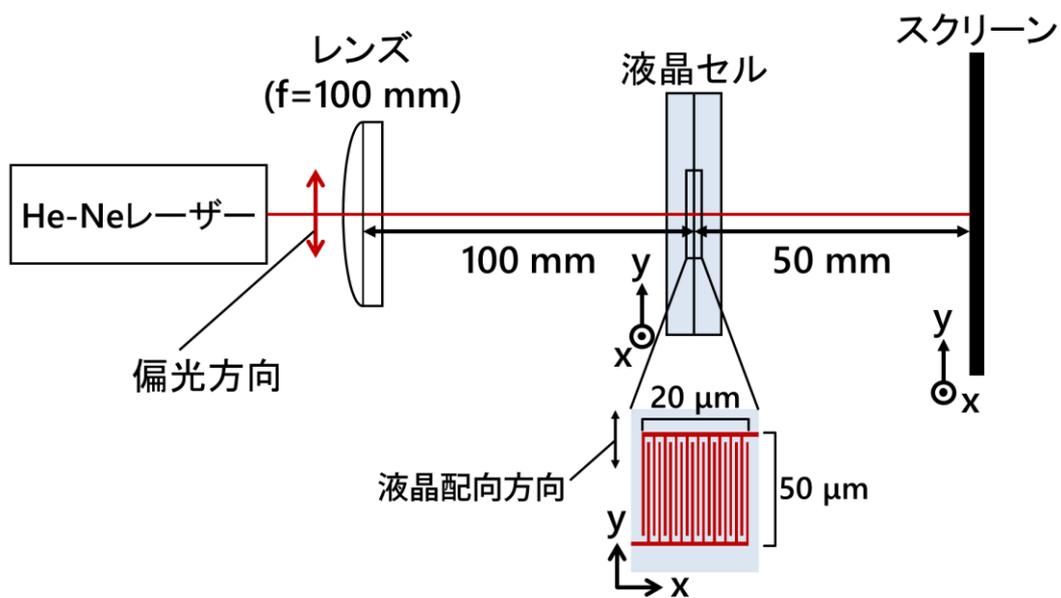
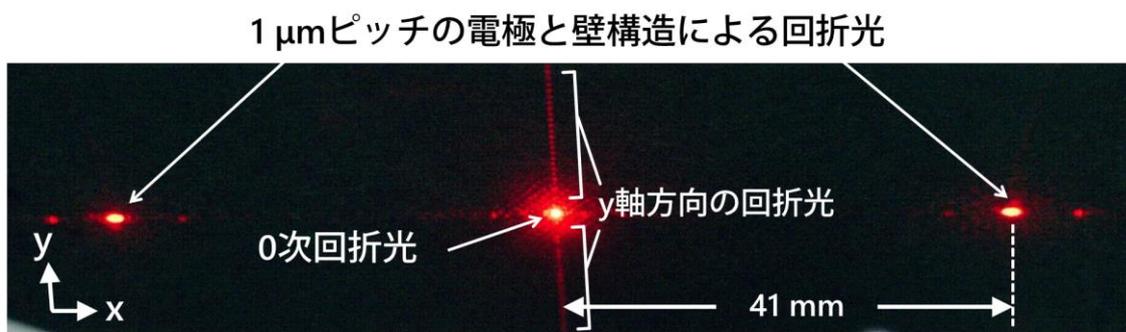
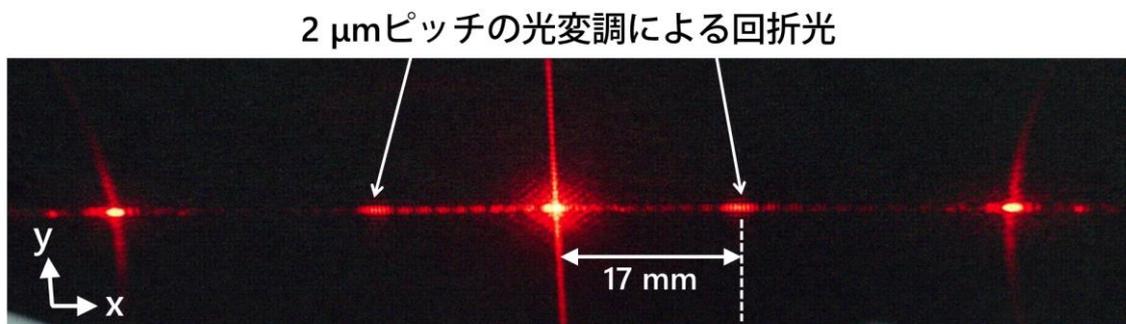


図 4.21 $1 \mu\text{m}$ ピッチのストライプ電極を有する
液晶素子の回折光の観察に用いた光学系



(a)



(b)

図 4.22 誘電体シールド壁を有する液晶セルによる回折光：(a)すべての電極を 0 V とした場合, (b) 0 V と 7 V を交互に印加した場合

4.6 格子状壁構造内の液晶配向制御技術

4.5 では、1次元の画素配列において誘電体シールド壁構造により、画素ごとの独立駆動が実現することを確認した。下基板の壁構造の底部にのみ選択的に配向膜を形成することが困難であったが、ストライプ状の壁構造に対して液晶が平行に配向する性質があったことから、下基板に配向膜が無くても均一な液晶配向が実現していた。しかし、ホログラフィックディスプレイ用の SLM は2次元の画素を有することから、壁構造は図 4.23 に示すように格子状でなければならない。液晶配向方向に対して垂直な壁表面 (x-z 面) に対しても液晶は平行になろうとすることから、格子状の壁構造の内部では液晶配向が乱されることが予想される。本節では、誘電体シールド壁構造を有する液晶素子において均一な液晶配向を実現するために、格子状の壁構造の内部での液晶配向を明らかにし、液晶配向制御技術の確立を試みた。

4.6.1 格子状の誘電体シールド壁構造の液晶配向

格子状の誘電体シールド壁構造を有する液晶セルを作製し、直交偏光板下で観察を行うことで格子状の誘電体シールド壁構造内における液晶配向を観察した。図 4.24 (a) および(b)に作製した液晶セルの構造を示す。(a)は上面図、(b)が断面図である。配向膜 (AL-1254, JSR 社) は上基板のみに形成し、壁構造と上基板を密着させるために上基板として変形が可能なポリカーボネート基板を使用した。液晶層の厚さは $1\ \mu\text{m}$ であり、液晶材料は E7 (LCC 社) を使用した。液晶を注入する際に、格子状の壁構造内に空気層が形成されることが懸念されたため、下基板に液晶を滴下したのち、真空中に置くことで気泡を除去してから上基板で挟んだ。格子状の誘電体壁は 4.5 のストライプ状の壁構造と同様にナノインプリント技術により形成した。図 4.24 (c)に形成した壁構造の断面 SEM 画像を示す。同図より幅 $200\ \text{nm}$ で $1\ \mu\text{m}$ ピッチの格子状の壁構造が形成されたことがわかる。

図 4.25 に格子状の壁構造を有する液晶セルの直交偏光板下での観察結果を示す。図

4.25 (a)は配向方向に対して偏光方向が 45° となる配置, (b)は配向方向と偏光方向が平行 (配向方向と偏光方向のなす角が 0°) になる配置で観察した。均一な液晶配向が得られていた場合, 45° 配置の場合は液晶層で直線偏光の偏光状態が変化し, 検光子を透過するため, 面内で均一な明状態が得られる。一方, 0° 配向の場合は偏光状態が変化せず, 検光子に吸収されるため, 面内で均一な暗状態が得られるはずである。しかし, 図 4.25 (a)は部分的に暗くなり, (b)は部分的に明るくなった。この結果は, 液晶配向が均一に配向方向を向いていないことを示している。このことは, 上基板にのみ配向膜を有する場合, 格子状の壁構造内部において均一な液晶配向を実現することが難しいことを示している。そこで, 格子壁構造内部における液晶配向を改善するために, 壁構造の底面において液晶配向軸を安定させるような処理や構造について検討を行った。

4.6.2 底面に微細な溝を有する誘電体シールド壁構造の液晶配向

誘電体壁の底面において液晶の配向軸を安定化させるためには, 底面に液晶配向膜のような構造が必要である。そこで, 微細な溝構造を壁構造の底面に形成することで液晶の配向軸の安定化に試みた。溝構造は形状性の配向規制力により, 溝の方向と平行に液晶を配向させる性質を有する[61], [62]。作製した液晶セルの構造を図 4.26 (a), (b)に示す。壁構造内の液晶配向を安定化させるため, 上基板の配向膜の配向方向に対して微細な溝構造が平行になるように液晶セルを作製した。図 4.26 (c)は微細溝構造を有する壁構造の断面 SEM 画像であり, 同図より幅が $0.1 \mu\text{m}$, 高さが $0.07 \mu\text{m}$ の微細な溝構造が形成されたことがわかる。

偏光方向に対して液晶配向が 45° と 0° の状態を観察した結果をそれぞれ図 4.27 (a), (b)に示す。均一な液晶配向が実現した場合, (a)は均一な明状態, (b)は均一な暗状態となるはずであるが, どちらも不均一な輝度分布となったことから, 微細な溝構造を有する誘電体シールド壁構造においても均一な液晶配向が実現しないことがわかった。

上下基板表面付近では, 配向規制力が働くため, 液晶の配向軸は安定化されていると考えられる。しかし, 基板表面から離れた液晶層の中間付近では, 基板表面の配向規制

力が届かず、格子状の壁構造の表面の影響が支配的になり、液晶配向が乱されたことが予想される。このことから、液晶層の厚さ方向（z 軸方向）全体に液晶の配向軸を安定させるような構造が必要であると考えられる。

4.6.3 間仕切り板を有する誘電体シールド壁構造の液晶配向

液晶層の中間領域でも液晶配向軸を安定化させるために、図 4.28 (a), (b)に示すような格子壁の中に間仕切り板を有する画素構造を考案した。間仕切り板は上基板の配向膜の配向方向に対して平行な方向に設置する。液晶配向方向に平行な面の距離が短くなるため、この表面に対して液晶が平行になろうとする力が液晶層内で支配的になり、液晶配向が均一化されることが期待される。間仕切り板を有する壁構造の断面 SEM 画像を図 4.28 (c)に示す。間仕切り板は電界をシールドする必要がなく、間仕切り板部分に入射する光はすべて損失となるため、光利用効率を高くする目的でシールド壁よりも狭い $0.17 \mu\text{m}$ 幅とした。

図 4.29 に間仕切り板を有する液晶セルの観察結果を示す。図 4.29 (a)が液晶配向方向に対して偏光方向を 45° に配置した場合であるが、面内で均一な明状態となった。図 4.29 (b)の 0° 配置の場合も均一な暗状態となった。以上の結果より、間仕切り板を有する格子壁構造において均一な液晶配向が実現したことがわかった。

ここまでに示した 3 種類の壁構造における液晶配向の均一性を定量的に比較するために、明状態と暗状態それぞれの平均透過率の比を算出した。平均透過率比 R_{ave} を次式で定義する。

$$R_{\text{ave}} = \frac{T_{45^\circ}}{T_{0^\circ}} \quad (18)$$

T_{45° と T_{0° はそれぞれ 45° 配置（明状態）の平均透過率と 0° 配置（暗状態）の平均透過率である。液晶配向が均一であればあるほど明状態の平均透過率が高くなり、かつ暗状態の平均透過率が低くなるため、平均透過率比が大きいほど均一な液晶配向が実現したといえる。

図 4.30 に格子壁構造, 微細溝構造を有する格子壁構造, 間仕切り板を有する格子壁構造の平均透過率比を示す. 単純な格子壁構造と微細溝構造を有する格子壁構造の平均透過率比は 10 に満たなかったのに対し, 間仕切り板を有する格子壁構造では 800 を超える高い値をとった. 以上の結果から, 間仕切り板を有する格子壁構造が最も均一な液晶配向であったことが定量的に確かめられた[69].

ストライプ状の誘電体壁により, 画素ごとの独立した駆動が可能になることは 4.5 で確認したが, ここでは間仕切り板を有する格子状の壁構造においても独立駆動が可能か確かめるために, $1\ \mu\text{m}$ ピッチのストライプ状の電極を用いて電圧を印加した. 液晶セルの構造は, 壁構造を除き 4.5 と同じとした. 偏光顕微鏡による観察結果を図 4.31 (a) に示す. 電圧を印加する前に見えている格子状の線が格子壁である. ストライプ電極に電圧を印加すると, 独立した暗線が観察された. 透過率の変化から電極や壁構造の影響を除去するため, 4.5 同様に透過率比の分布を算出し, その結果を図 4.31 (b)に示す. 同図より, $2\ \mu\text{m}$ ピッチの光変調パターンが確認されたことから, 間仕切り板を有する格子壁構造においても, 画素ごとの独立した駆動が可能であることが示された.

4.7 まとめ

本章では, $1\ \mu\text{m}$ ピッチの独立した画素駆動を実現するために, 隣接画素からもれ出す電界を抑制し, 液晶の弾性力の伝搬を遮断する誘電体シールド壁構造を提案し, 最適な設計パラメータを探索した. この結果, 壁材料の比誘電率が 4.0 の場合, 壁の幅を 250 nm, 壁の表面におけるアンカリング強度を $10^{-4}\ \text{J/m}^2$ 以下とすることで, 画素内の位相分布を均一化できることを示した. また, 液晶注入用のスリットは, 壁構造の交差する部分に配置することが望ましいことを明らかにした. さらに, ナノインプリント技術により 1 次元配列の画素を有する誘電体シールド壁構造を作製し, 壁構造のシールド効果を実験的に確認した. 2 次元配列の画素では壁構造が格子状となることから, 壁構造の表面の影響により液晶配向が乱されるが, 間仕切り板を挿入することにより, 格子状

の壁構造内において均一な液晶配向が得られることを明らかにした。

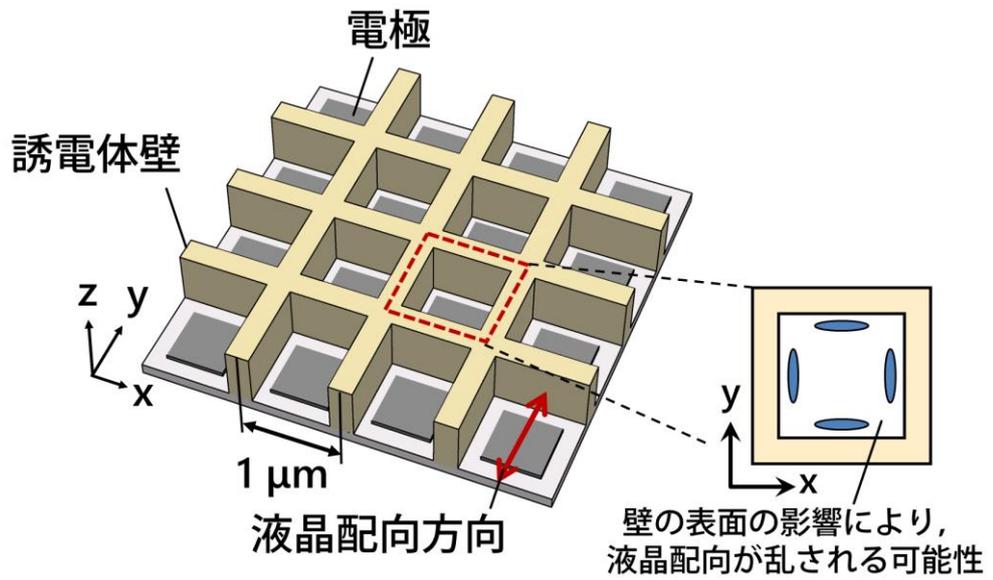


図 4.23 格子状の壁構造における液晶配向制御の課題

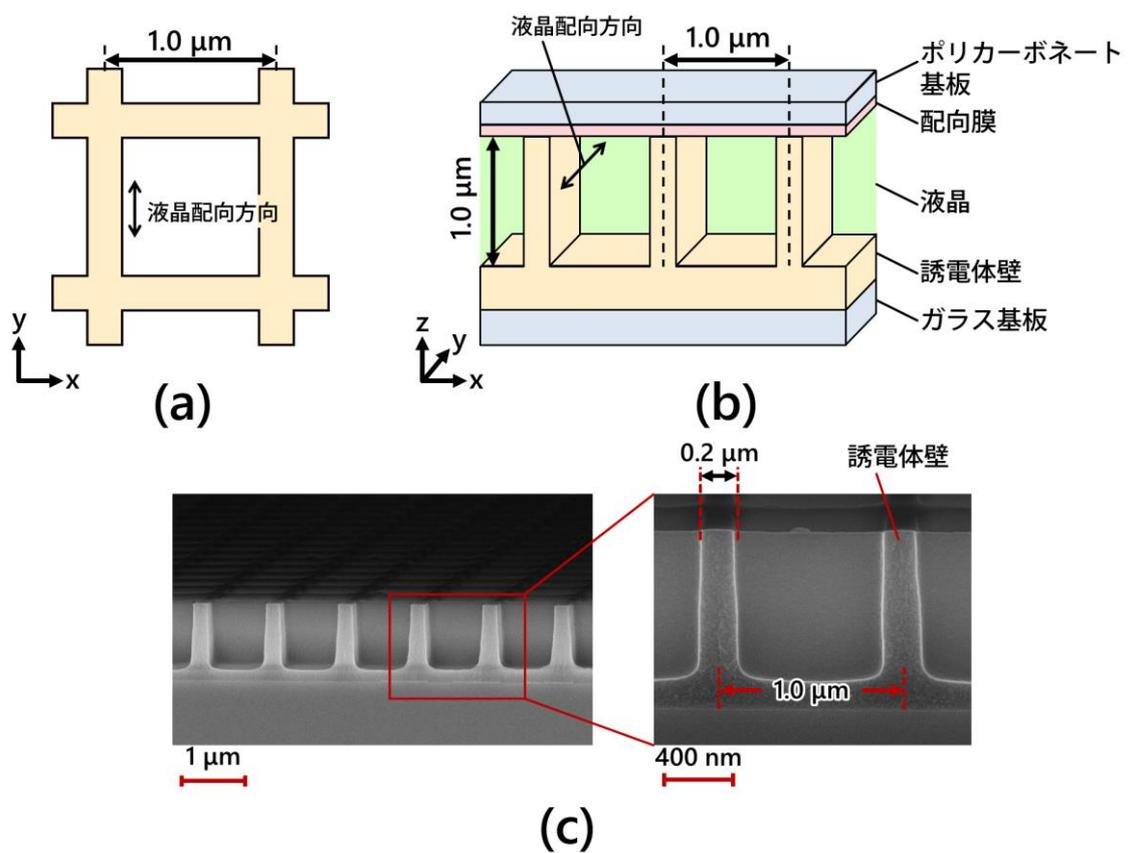


図 4.24 格子状の誘電体壁を有する液晶セル：(a)格子壁の上面図，
 (b)格子壁を有する液晶セルの断面図，(c)ナノインプリント技術により
 形成した格子壁の SEM 画像

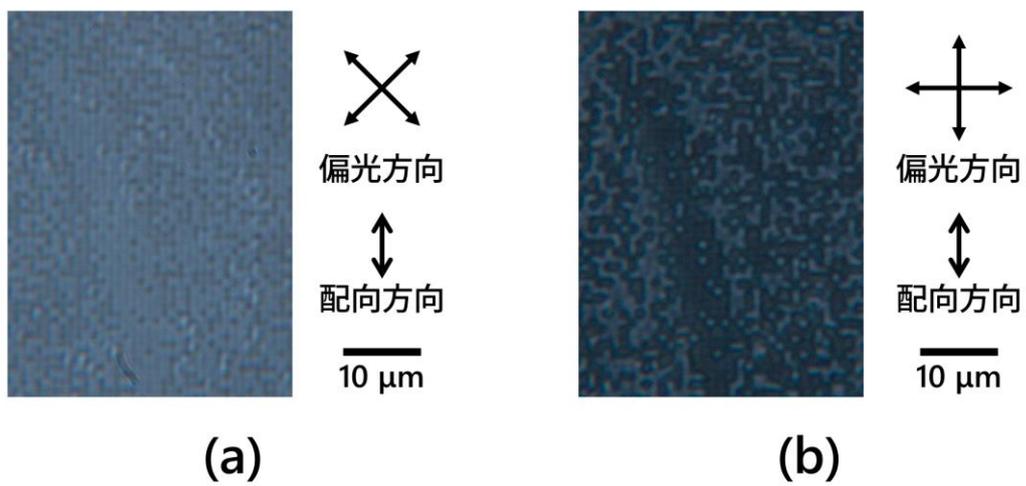


図 4.25 格子状の壁構造内の液晶配向観察：(a)直交偏光板を 45° に配置した場合，(b) 0° に配置した場合

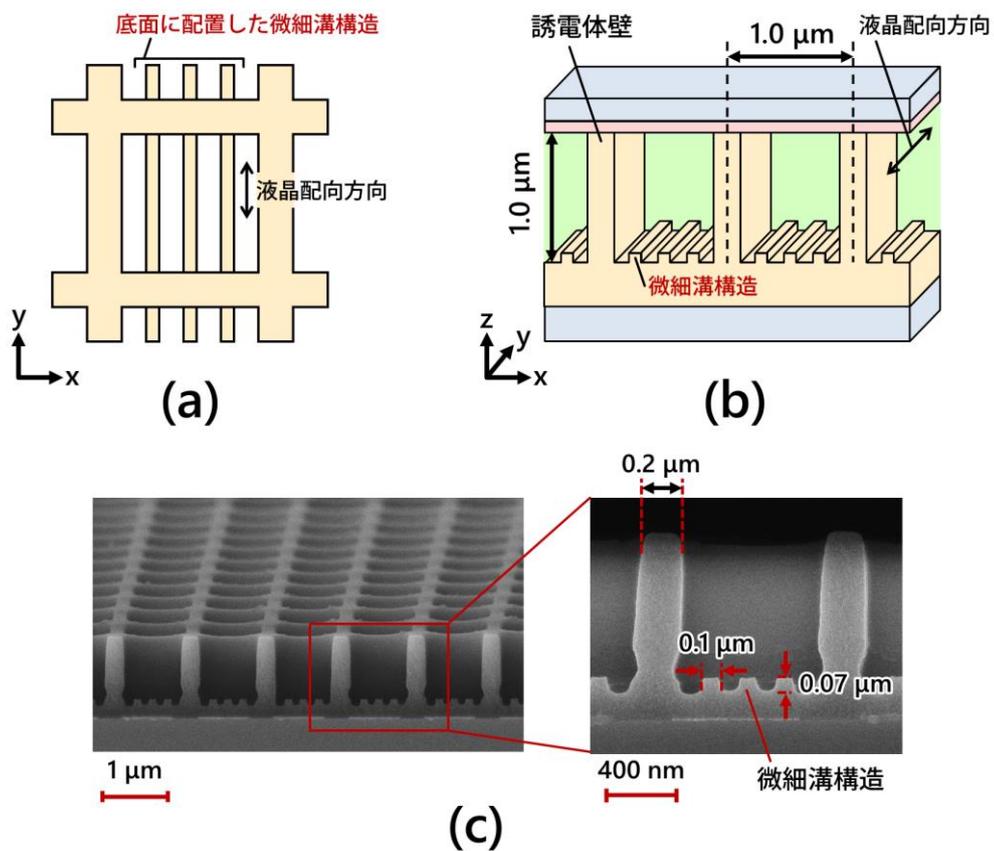


図 4.26 微細な溝構造を底面に有する格子壁構造：(a)微細溝と格子壁の上面図，(b)微細溝と格子壁を有する液晶セルの断面図，(c)微細溝構造を有する格子壁の SEM 画像

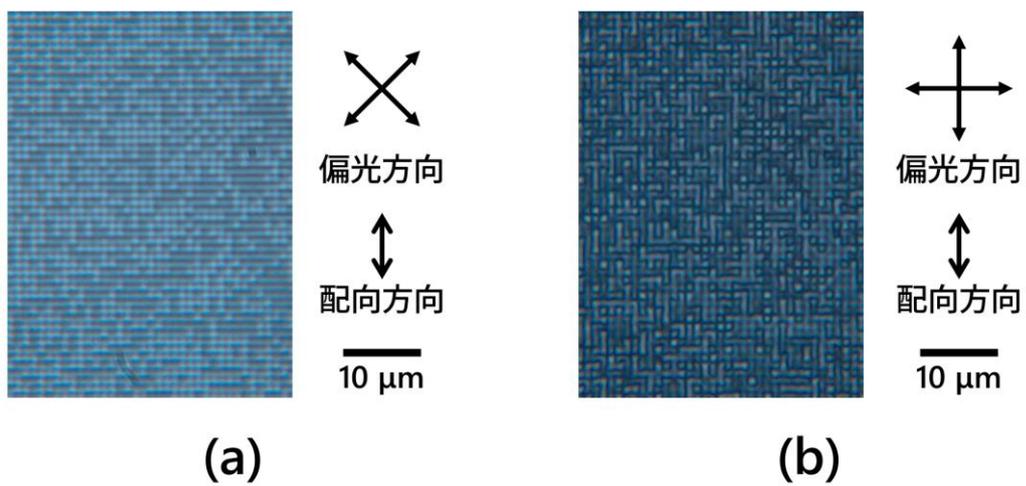


図 4.27 底面に微細溝を有する格子壁構造内の液晶配向観察：
 (a)直交偏光板を 45° に配置した場合, (b) 0° に配置した場合

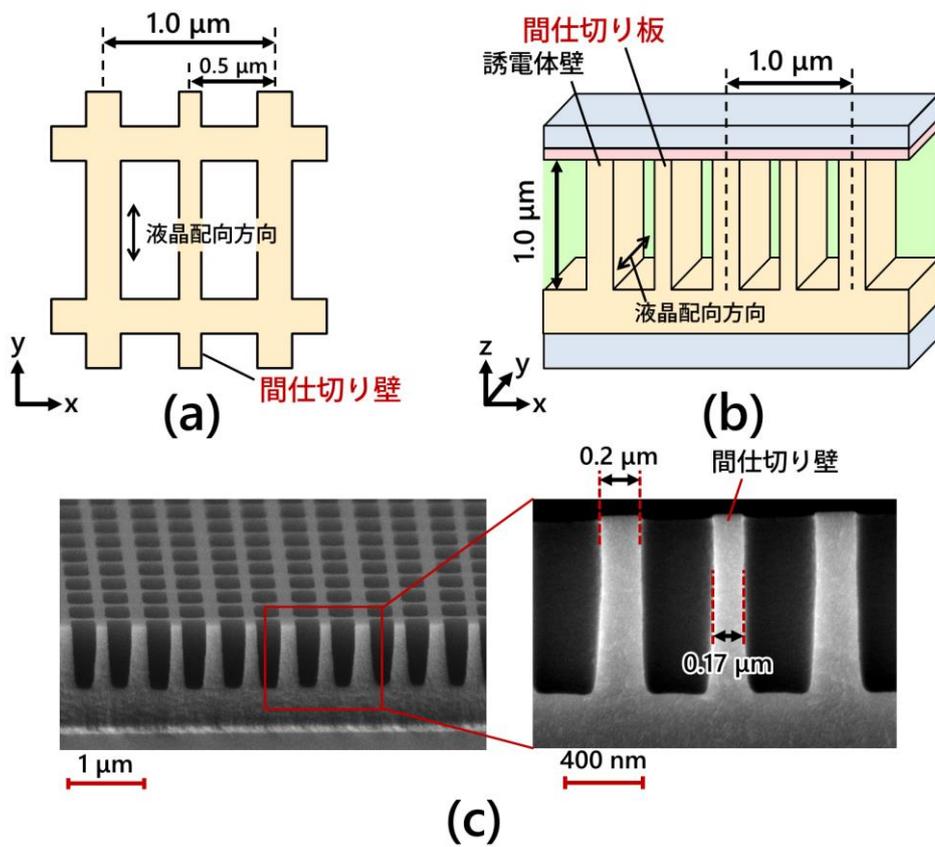


図 4.28 間仕切り板を有する格子壁構造：(a)間仕切り板と格子壁の上面図，(b)間仕切り板と格子壁を有する液晶セルの断面図，(c)間仕切り板を有する格子壁の SEM 画像

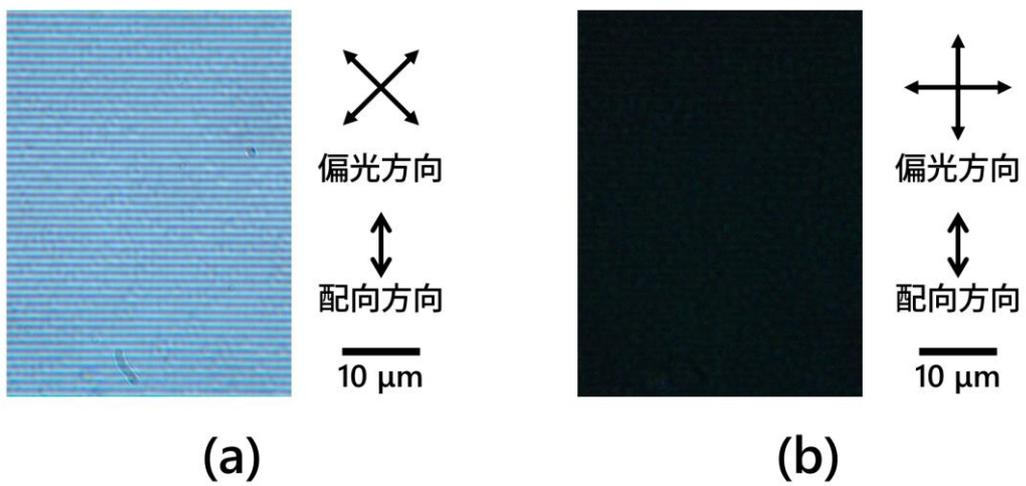


図 4.29 間仕切り板を有する格子壁構造内の液晶配向観察：
 (a)直交偏光板を 45° に配置した場合，(b) 0° に配置した場合

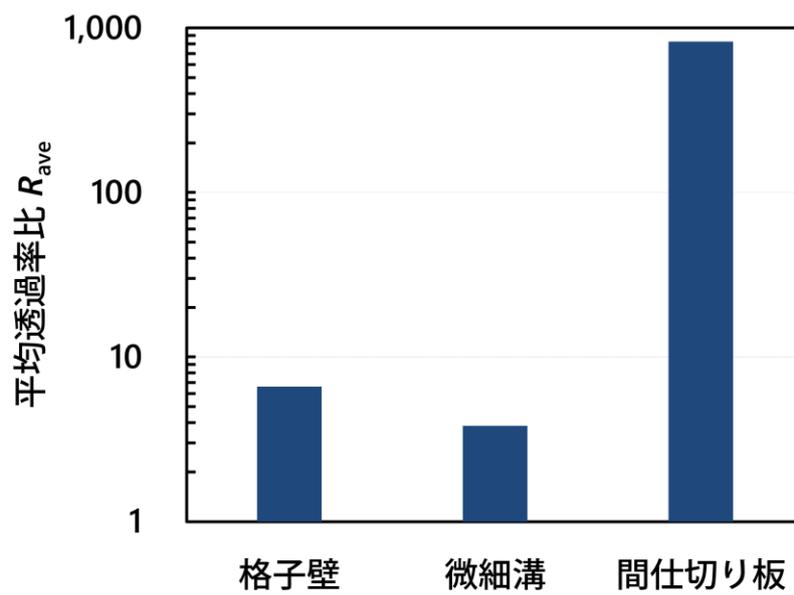


図 4.30 格子壁，微細溝を有する格子壁，
間仕切り板を有する格子壁の平均透過率比の比較

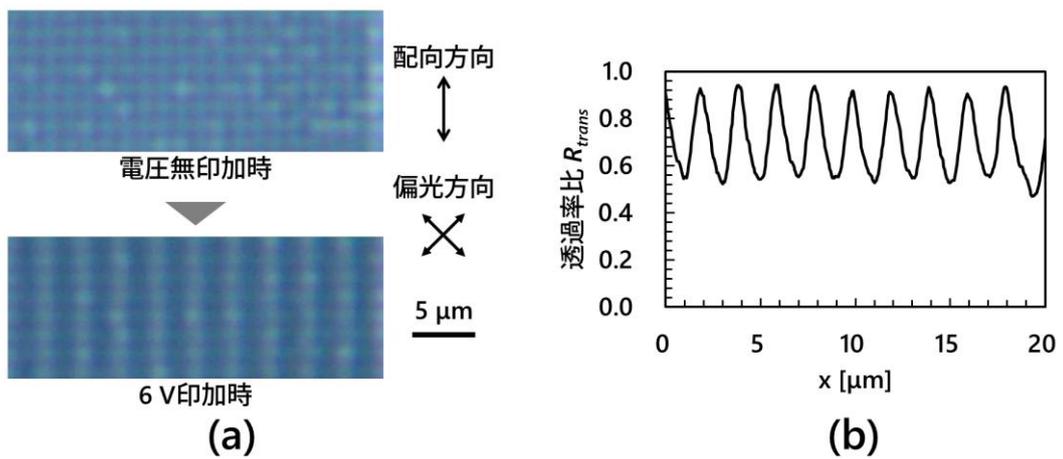


図 4.31 間仕切り板を有する格子壁構造の電圧駆動：
 (a)観察結果，(b)透過率比の分布

第5章 結論

本論文では、広い視域角を有する電子ホログラフィックディスプレイの実現に向け、 $1\ \mu\text{m}$ ピッチの微細な液晶画素を有する SLM の設計について検討を行った。この結果、以下の事項を明らかにした。

1. $1\ \mu\text{m}$ ピッチの液晶画素では、隣接する画素からもれ出す電界と液晶の弾性力の伝搬により、画素ごとの独立した駆動が困難となる。特に、位相変調型の SLM では、液晶の配向方向に対して直交する方向にもれ出す電界は液晶を方位角方向に回転させる力となり、入射した光の偏光状態が変化するため、配向方向に対して直交した方向に並ぶ隣接画素では影響が大きくなる。
2. 隣接する画素の影響により 1 画素内の位相分布が不均一になる場合のホログラム再生像を光学計算により再現するシミュレーション手法を確立した。シミュレーション結果と実験結果より、画素内の位相分布が不均一である場合に 0 次回折光が生じることを示した。
3. 強誘電性液晶は、正負の電圧を印加することで液晶配向を制御可能であることから、すべての画素の液晶を電界の力により束縛可能であり、ネマティック液晶と比較して高い解像度が実現可能である。ただし、強誘電性液晶の螺旋軸に直交する方向にもれ出す電界に対して、強誘電性液晶が回転しやすいため、螺旋軸に対して直交する方向に並ぶ隣接画素の影響を受けやすい。
4. 画素と画素の間に誘電体の壁を挿入した誘電体シールド壁構造は、隣接画素からもれ出す電界を抑制し、液晶の弾性力の伝搬を遮断するため、 $1\ \mu\text{m}$ ピッチの画素の独立した駆動を実現可能である。
5. 壁構造の比誘電率を 4.0 とした場合、壁の幅は 250 nm、壁表面のアンカリング強度を $10^{-4}\ \text{J/m}^2$ とすることで、光利用効率の最大化し、独立した画素駆動と画素内で均一な位相変調を実現する。
6. ナノインプリント技術を用いて形状的に高いアスペクト比を有する誘電体シー

ルド壁構造を形成した。また、1次元の画素配列を有する誘電体シールド壁構造において、1 μm ピッチの画素の独立駆動が実現することを実験的に示した。

7. 2次元の画素配列を有する誘電体シールド壁構造では、液晶の配向方向に対して垂直な壁の表面の影響により、均一な液晶配向を実現することが難しい。この課題に対して、配向方向に形成した間仕切り板は、液晶配向方向に平行な壁の表面の影響が支配的になるため、均一な液晶配向を実現する。

以上、本論文では、広い視域角を有する電子ホログラフィックディスプレイを実現するために、液晶を用いた SLM の画素構造について検討を行った。この結果、1 μm ピッチの液晶画素の独立駆動を可能にし、高効率かつ高画質なホログラム像を再生可能な画素構造の設計手法を確立した。現状、1 μm ピッチの画素電極[70]は実現しつつあることから、将来的には誘電体シールド壁構造と組み合わせることで、1 μm ピッチの画素を有する SLM を実現することが可能となる。近い将来は、少ない画素数を有する小型の SLM で表示可能なヘッドマウント型やヘッドアップ型の電子ホログラフィックディスプレイが実用化され、AR 技術や VR 技術を組み合わせて社会に実装されていくだろう。さらに先の未来では、SLM の多画素化と光学計算の高速化を通して、より多用途な直視型の立体ディスプレイとして実用化されていくと期待される。

参考文献

- [1] 松本正一, 電子ディスプレイデバイス, 1st ed. 東京: オーム社, 1984.
- [2] 原田益水, テレビジョン技術のすべて, 1st ed. 東京: 電波新聞社, 2002.
- [3] P. Milgram and F. Kishino, “A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,” *IEICE Trans. Inf. Syst.*, vol. E77-D, no. 12, pp. 1321–1329, 1994.
- [4] D. Gorecky, M. Schmitt, M. Loskyll, and D. Zuhlke, “Human-machine-interaction in the industry 4.0 era,” in *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2014, pp. 289–294.
- [5] J. Leven *et al.*, “DaVinci Canvas: A Telerobotic Surgical System with Integrated, Robot-Assisted, Laparoscopic Ultrasound Capability,” in *Miccai 2005*, vol. 3749, 2005, pp. 811–818.
- [6] 畑田豊彦, “立体視のメカニズム,” *応用物理*, vol. 40, no. 3, pp. 291–300, 1971.
- [7] 増田千尋, 3次元ディスプレイ, 1st ed. 東京: 産業図書, 1990.
- [8] D. M. Hoffman, A. R. Girshick, K. Akeley, and M. S. Banks, “Vergence–accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue,” *J. Vis.*, vol. 8, no. 3, p. 33, Mar. 2008.
- [9] G. Lippmann, “Épreuves réversibles donnant la sensation du relief,” *J. Phys. Théorique Appliquée*, vol. 7, no. 1, pp. 821–825, 1908.
- [10] Y. Ichihashi, R. Oi, T. Senoh, K. Yamamoto, and T. Kurita, “Real-time capture and reconstruction system with multiple GPUs for a 3D live scene by a generation from 4K IP images to 8K holograms.,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 19, pp. 21645–55, 2012.
- [11] 高木康博, 空間立体表示とユーザインタフェース, 1st ed. 東京: S&T出版, 2019.
- [12] H. Hoshino, F. Okano, H. Isono, and I. Yuyama, “Analysis of resolution limitation of integral photography,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 15, no. 8, p. 2059, Aug. 1998.
- [13] Y. Takaki, “Super multi-view and holographic displays using MEMS devices,” *Displays*, vol. 37, pp. 19–24, 2015.
- [14] H. Sasaki, K. Yamamoto, K. Wakunami, Y. Ichihashi, R. Oi, and T. Senoh, “Large size three-dimensional video by electronic holography using multiple spatial light modulators,” *Sci. Rep.*, vol. 4, p. 6177, 2014.
- [15] L. Onural, F. Yaraş, and Hoonjong Kang, “Digital Holographic Three-Dimensional Video

- Displays,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 4, pp. 576–589, Apr. 2011.
- [16] T. Kakue, T. Nishitsuji, T. Kawashima, K. Suzuki, T. Shimobaba, and T. Ito, “Aerial projection of three-dimensional motion pictures by electro-holography and parabolic mirrors.,” *Sci. Rep.*, vol. 5, no. May, p. 11750, 2015.
- [17] D. GABOR, “A New Microscopic Principle,” *Nature*, vol. 161, no. 4098, pp. 777–778, May 1948.
- [18] 大越孝敬, ホログラフィ, 3rd ed. 東京: 電子通信学会, 1980.
- [19] 久保田敏弘, ホログラフィ入門, 新版第3刷. 東京: 朝倉書店, 2017.
- [20] Z. Zhang, Z. You, and D. Chu, “Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices,” *Light Sci. Appl.*, vol. 3, no. 10, p. e213, 2014.
- [21] J. A. Neff, R. A. Athale, and S. H. Lee, “Two-dimensional spatial light modulators: a tutorial,” *Proc. IEEE*, vol. 78, no. 5, pp. 826–855, May 1990.
- [22] C.-S. Hwang *et al.*, “46-2: Invited Paper: Ultimate Resolution Active Matrix Display with Oxide TFT Backplanes for Electronic Holographic Display,” *SID Symp. Dig. Tech. Pap.*, vol. 49, no. 1, pp. 610–612, May 2018.
- [23] S. Ducharme, J. C. Scott, R. J. Twieg, and W. E. Moerner, “Observation of the photorefractive effect in a polymer,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 66, no. 14, pp. 1846–1849, Apr. 1991.
- [24] S. Tay *et al.*, “An updatable holographic three-dimensional display,” *Nature*, vol. 451, no. 7179, pp. 694–698, Feb. 2008.
- [25] X. Li *et al.*, “High-Efficiency Video-Rate Holographic Display Using Quantum Dot Doped Liquid Crystal,” *J. Disp. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 362–367, 2016.
- [26] W. E. Ross, D. Psaltis, and R. H. Anderson, “Two-Dimensional Magneto-Optic Spatial Light Modulator For Signal Processing,” *Opt. Eng.*, vol. 22, no. 4, pp. 477–540, Aug. 1983.
- [27] K. Aoshima *et al.*, “Active Matrix Magneto-Optical Spatial Light Modulator Driven by Spin-Transfer-Switching,” *J. Disp. Technol.*, vol. 12, no. 10, pp. 1212–1217, Oct. 2016.
- [28] H. Takagi, K. Nakamura, T. Goto, P. B. Lim, and M. Inoue, “Magneto-optic spatial light modulator with submicron-size magnetic pixels for wide-viewing-angle holographic displays,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 11, p. 3344, Jun. 2014.
- [29] Q. Wang *et al.*, “Optically reconfigurable metasurfaces and photonic devices based on

- phase change materials,” *Nat. Photonics*, vol. 10, no. 1, pp. 60–65, Jan. 2016.
- [30] C.-Y. Hwang *et al.*, “Rewritable full-color computer-generated holograms based on color-selective diffractive optical components including phase-change materials,” *Nanoscale*, vol. 10, no. 46, pp. 21648–21655, 2018.
- [31] K.-H. Fan Chiang, S.-T. Wu, and S.-H. Chen, “Fringing Field Effect of the Liquid-Crystal-on-Silicon Devices,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. Part 1, No. 7A, pp. 4577–4585, Jul. 2002.
- [32] G. Lazarev, A. Hermerschmidt, S. Krüger, and S. Osten, “LCOS Spatial Light Modulators: Trends and Applications,” in *Optical Imaging and Metrology*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012, pp. 1–29.
- [33] P. Sheng, “Introduction to the Elastic Continuum Theory of Liquid Crystals,” in *Introduction to Liquid Crystals*, E. B. Priestley, P. J. Wojtowicz, and Pi. Sheng, Eds. Boston, MA: Springer US, 1975, pp. 103–127.
- [34] H. Gruler, T. J. Sheffer, and G. Meier, “Elastic Constants of Nematic Liquid Crystals,” in *Zeitschrift für Naturforschung*, vol. 27, 1972, pp. 966–976.
- [35] 折原宏, 液晶の物理, 1st ed. 東京: 内田老鶴圃, 2004.
- [36] 伊藤智義, 下馬場朋祿, ホログラフィ入門, 1st ed. 東京: 講談社, 2017.
- [37] 早崎芳夫, デジタルホログラフィ, 1st ed. 東京: 朝倉書店, 2016.
- [38] 谷田貝豊彦, 光とフーリエ変換, 3rd ed. 東京: 朝倉書店, 2015.
- [39] K. Matsushima and S. Nakahara, “Extremely high-definition full-parallax computer-generated hologram created by the polygon-based method,” *Appl. Opt.*, vol. 48, no. 34, pp. H54–H63, 2009.
- [40] Y. Ichihashi *et al.*, “HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 16, pp. 13895–13903, 2009.
- [41] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier optics*, 3rd ed. Roberts & Co. Publishers, 2005.
- [42] K. Matsushima and E. Engineering, “自由空間における光波伝搬計算手法とその応用 Numerical techniques for free-space propagation of wave-fields and their application,” 第12回情報フォトニクス研究グループ研究会(秋合宿)講演予稿集, vol. 18, pp. 13–18, 2011.
- [43] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase

- from image and diffraction plane pictures,” *Optik (Stuttg.)*, vol. 35, no. 2, pp. 237–246, 1972.
- [44] 坂倉政明, “ガラス・ホログラムとフェムト秒レーザーによるガラス内部の高速・高精度3次元一括加工,” in 先端ガラスの産業応用と新しい加工, 平尾一之, Ed. 東京: シーエムシー出版, 2009, p. 334.
- [45] J. Dziaduszek, R. Dabrowski, A. Ziolkowski, S. Gauza, and S. T. Wu, “Syntheses and mesomorphic properties of laterally fluorinated phenyl isothiocyanatobenzenes and their high birefringent mixtures,” *Opto-Electronics Rev.*, vol. 17, no. 1, pp. 20–24, 2009.
- [46] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Design of 1- μ m-pitch liquid crystal spatial light modulators having dielectric shield wall structure for holographic display with wide field of view,” *Opt. Rev.*, vol. 24, no. 2, pp. 165–176, Apr. 2017.
- [47] 磯前慶友, 柴田陽生, 石鍋隆宏, 藤掛英夫, “隣接画素の液晶配向方向が微小画素に与える影響,” 映像情報メディア学会誌, vol. 72, no. 2, pp. J51–J55, 2018.
- [48] J. Li, S. T. Wu, S. Brugioni, R. Meucci, and S. Faetti, “Infrared refractive indices of liquid crystals,” *J. Appl. Phys.*, vol. 97, no. 7, 2005.
- [49] S. W. Leonard *et al.*, “Tunable two-dimensional photonic crystals using liquid-crystal infiltration,” *Phys. Rev. B*, vol. 61, no. 4, pp. 2389–2392, 2000.
- [50] R. D. Polak, G. P. Crawford, B. C. Kostival, J. W. Doane, and S. Žumer, “Optical determination of the saddle-splay elastic constant K_{24} in nematic liquid crystals,” *Phys. Rev. E*, vol. 49, no. 2, pp. R978–R981, Feb. 1994.
- [51] S. D. Jacobs, “Liquid crystals for laser applications,” in *Handbook of Laser Science and Technology*, 1986.
- [52] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Simulation of Reconstructed Holographic Images Considering Optical Phase Distribution in Small Liquid Crystal Pixels,” *IEICE Trans. Electron.*, vol. E100.C, no. 11, pp. 1043–1046, 2017.
- [53] H. Zhang, J. Xie, J. Liu, and Y. Wang, “Elimination of a zero-order beam induced by a pixelated spatial light modulator for holographic projection,” *Appl. Opt.*, vol. 48, pp. 5834–5841, 2009.
- [54] Y. Zhang, Q. Lü, and B. Ge, “Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography,” *Opt. Commun.*, vol. 240, no. 4–6, pp. 261–267, 2004.

- [55] T. Mishina, F. Okano, and I. Yuyama, “Time-alternating method based on single-sideband holography with half-zone-plate processing for the enlargement of viewing zones,” *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 17, p. 3703, Jun. 1999.
- [56] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Phase-Only Holographic Head Up Display Without Zero-Order Diffraction Light for Automobiles,” *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 8, no. 5, pp. 99–104, Sep. 2019.
- [57] 福田敦夫, 竹添秀男, 強誘電性液晶の構造と物性, 1st ed. 東京: コロナ社, 1990.
- [58] N. A. Clark and S. T. Lagerwall, “Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 36, no. 11, pp. 899–901, Jun. 1980.
- [59] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Dependence of optical phase modulation on anchoring strength of dielectric shield wall surfaces in small liquid crystal pixels,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, no. 3S2, p. 03EG06, Mar. 2018.
- [60] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Dielectric Walls with Slits for Pixel Driving and Fabrication of Holographic Liquid Crystal Phase Modulators,” *ITE Trans. Media Technol. Appl.*, vol. 6, no. 4, pp. 269–273, 2018.
- [61] B. Jerome, “Surface effects and anchoring in liquid crystals,” *Reports Prog. Phys.*, vol. 54, no. 3, pp. 391–451, Mar. 1991.
- [62] D. W. Berreman, “Solid Surface Shape and the Alignment of an Adjacent Nematic Liquid Crystal,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 28, no. 26, pp. 1683–1686, Jun. 1972.
- [63] S. Y. Chou, “Nanoimprint lithography,” *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, vol. 14, no. 6, p. 4129, 1996.
- [64] L. J. Guo, “Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements,” *Adv. Mater.*, vol. 19, no. 4, pp. 495–513, 2007.
- [65] 左貝潤一, 光学機器の基礎, 1st ed. 東京: 森北出版, 2013.
- [66] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Experimental study of 1- μm -pitch light modulation of a liquid crystal separated by dielectric shield walls formed by nanoimprint technology for electronic holographic displays,” *Opt. Eng.*, vol. 57, no. 06, pp. 061624-1-061624-7, Jun. 2018.
- [67] S. A. Self, “Focusing of spherical Gaussian beams,” *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 5, p. 658, 1983.

- [68] T. TAIRA, "Concept for Measuring Laser Beam-Quality Parameters.," *Rev. Laser Eng.*, vol. 26, no. 10, pp. 723–729, 1998.
- [69] Y. Isomae, T. Ishinabe, Y. Shibata, and H. Fujikake, "Alignment control of liquid crystals in a 1.0- μm -pitch spatial light modulator by lattice-shaped dielectric wall structure," *J. Soc. Inf. Disp.*, vol. 27, no. 4, pp. 251–258, Apr. 2019.
- [70] J. H. Choi *et al.*, "The new route for realization of 1- μm -pixel-pitch high-resolution displays," *J. Soc. Inf. Disp.*, no. April, p. jsid.821, Jun. 2019.

研究業績

学術論文

- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Design of 1- μm -pitch liquid crystal spatial light modulators having dielectric shield wall structure for holographic display with wide field of view,” *Optical Review*, vol. 24, no. 2, pp. 165–176, 2017.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Simulation of Reconstructed Holographic Images Considering Optical Phase Distribution in Small Liquid Crystal Pixels,” *IEICE Transactions on Electronics*, vol. E100–C, no. 11, pp. 1043–1046, 2017.
- [招待論文] 磯前 慶友, 柴田 陽生, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫, “隣接画素の液晶配向方向が微小画素に与える影響”, *映像情報メディア学会誌*, vol. 72, no. 2, pp. J51–J55, 2018.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Dependence of optical phase modulation on anchoring strength of dielectric shield wall surfaces in small liquid crystal pixels,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 3S2, p. 03EG06, Mar. 2018.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Experimental study of 1- μm -pitch light modulation of a liquid crystal separated by dielectric shield walls formed by nanoimprint technology for electronic holographic displays,” *Optical Engineering*, vol. 57, no. 06, p. 1, Jun. 2018.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Dielectric Walls with Slits for Pixel Driving and Fabrication of Holographic Liquid Crystal Phase Modulators,” *ITE Transactions on Media Technology and Applications*, vol. 6, no. 4, pp. 269–273, 2018.
- Y. Isomae, T. Ishinabe, Y. Shibata, and H. Fujikake, “Alignment control of liquid crystals in a 1.0- μm -pitch spatial light modulator by lattice - shaped dielectric wall structure,” *Journal of the Society for Information Display*, vol. 27, no. 4, pp. 251–258, Apr. 2019.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Phase-Only Holographic Head Up

Display Without Zero-Order Diffraction Light for Automobiles,” IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 8, no. 5, pp. 99–104, Sep. 2019.

国内学会

- 磯前 慶友, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫, 「誘電体シールド壁構造を有する微小液晶画素の光位相変調特性」, 日本液晶学会 討論会, 2015, PA41
- 磯前 慶友, 柴田 陽生, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫, “液晶弾性とフリッジ電界が微小画素の光変調に及ぼす影響” 応用物理学会春季学術講演会, 2016, p. 03–370.
- 磯前 慶友, 柴田 陽生, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫, “液晶画素内の配向分布を考慮した位相ホログラム再生像の解析”, 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ 大会, 2016, p. 28.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Relation between Quality of Reconstructed Images and Quantization of Phase Hologram,” in 電気関係学会東北支部連合大会, 2017, 2B09.
- 磯前 慶友, 柴田 陽生, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫, 「ナノインプリント形成高分子シールド壁を用いた超高解像度液晶駆動実験」, 発光型／非発光型ディスプレイ合同研究会, 2018, pp. 101-104.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Optical system to eliminate zero-order diffraction light for phase-type holographic displays,” in Optics & Photonics Japan, 2018, p. 2aP3.
- 磯前 慶友, 柴田 陽生, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫, 「ホログラフィックディスプレイ用強誘電性液晶素子の電気光学効果の解像度特性」, 発光型／非発光型ディスプレイ合同研究会, 2018, pp. 129-132.
- 磯前慶友, 石鍋隆宏, 柴田陽生, 藤掛英夫, 「空間的な異方性を有する格子状高分子壁内における液晶配向解析」, 電気学会電子・情報・システム部門大会, 2019,

pp. 1359–1363.

- 磯前慶友, 石鍋隆宏, 柴田陽生, 藤掛英夫, 「1 μm ピッチの画素を有する電子ホログラフィックディスプレイ用光変調素子の構造設計」, ホログラフィック・ディスプレイ研究会, 2019, pp. 8–14.

国際学会

- Y. Isomae, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Design and Light Modulation of Sub-micron LC Pixels with Dielectric Shield Walls for Wide-Angle Holographic Displays,” in International Display Workshops, 2015, pp. 910–911.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “P-199L: Late-News Poster : Optical Phase Modulation Properties of 1 μm -Pitch LCOS with Dielectric Walls for Wide-Viewing-Angle Holographic Displays,” in Society for Information Display Display Week, 2016, vol. 47, no. 1, pp. 1670–1673.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Holographic Images Analysis Considering Phase Distribution in Small Liquid Crystal Pixels,” in International Display Workshops, 2016, pp. 1663–1664.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Effects of anchoring strength of dielectric shield wall surfaces on phase modulation in small liquid crystal pixels,” in International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, 2017, p. 237.
- [Invited] Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “1- μm -Pitch Pixel Structure Using Dielectric Shield Walls in Liquid Crystal Spatial Light Modulators for Electronic Holographic Displays,” in International Display Workshops, 2017, pp. 833–836.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Phase hologram 3D head mounted displays without zero order diffraction,” in 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2018, pp. 469–470.

- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Influence of Dielectric Wall Slits to Individual Pixel Driving in Electronic Holographic Devices,” in International Liquid Crystal Conference, 2018, pp. P2-C1-42.
- Y. Isomae, Y. Shibata, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Driving Experiment of Ferroelectric Liquid Crystal Using 1- μm -pitch Stripe Electrodes for Holographic Displays,” in International Display Workshops, 2018, pp. 66–68.
- Y. Isomae, T. Ishinabe, Y. Shibata, and H. Fujikake, “Alignment Control of Liquid Crystals in a 1.0- μm -pitch Spatial Light Modulator by Lattice-shaped Dielectric Wall Structure,” in Society for Information Display Display Week, 2019, vol. 50, no. 1, pp. 66–69.

受賞

- Outstanding Poster Paper Award, International Display Workshop, Y. Isomae, T. Ishinabe, and H. Fujikake, “Design and Light Modulation of Sub-micron LC Pixels with Dielectric Shield Walls for Wide-Angle Holographic Displays,” 2015.
- 映像情報メディア未来賞フロンティア賞, 映像情報メディア学会, 磯前 慶友, 石鍋 隆宏, 藤掛 英夫, 「ホログラフィック立体表示用の超解像度液晶素子構造の開拓」, 2017.
- Distinguished Paper Award, Society for Information Display, Y. Isomae, T. Ishinabe, Y. Shibata, and H. Fujikake, “Alignment Control of Liquid Crystals in a 1.0- μm -pitch Spatial Light Modulator by Lattice-shaped Dielectric Wall Structure,” 2019.
- 研究会奨励賞, 電気学会, 磯前慶友, 「ナノインプリント形成高分子シールド壁を用いた超高解像度液晶駆動実験」, 2019.
- RIEC Award 東北大学学生賞, 東北大学 電気通信研究所, 磯前慶友「電子ホログラフィックディスプレイ用の超高解像度液晶位相変調素子に関する研究」, 2019.

- 情報ディスプレイ研究会 学生奨励賞, 映像情報メディア学会, 磯前慶友, 「ホログラフィックディスプレイ用強誘電性液晶素子の電気光学効果の解像度特性」, 2019.

著書

- 磯前慶友, 柴田陽生, 石鍋隆宏, 藤掛英夫, S&T 出版 「空間立体表示とユーザインタフェース」 3 章 9 節 ホログラム表示用高精細液晶パネルの構造設計, pp. 175-182, 2019.

謝辞

本研究は、東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 教授 藤掛英夫先生のご指導のもと行われました。藤掛先生には丁寧かつ熱心なご指導とご助言を賜るだけでなく、研究者としてのあり方をご教示いただきました。ここに深い感謝の意を表します。

また、多角的な見地から有益なご議論を頂きました。東北大学大学院工学研究科電子工学専攻 教授 川又政征先生、ならびに東北大学電気通信研究所 教授 塩入諭先生に心から感謝いたします。

研究を進めるにあたり、適切なお助言を賜り、研究生活においても様々なご指導をいただきました東北大学大学院工学研究科電子工専攻 准教授 石鍋隆宏先生に深く感謝致します。石鍋先生には研究の細部にわたる適切なお指導をしていただきました。

また、研究を進める上で直接ご指導、ご助言をいただきました東北大学大学院工学研究科電子工専攻 助教 柴田陽生先生に心より感謝申し上げます。

ナノインプリント技術による微細な壁構造の作製において、技術的なご支援をいただきました大日本印刷株式会社に御礼申し上げます。

また、ネマティック液晶と強誘電性液晶の解像度評価において、評価用電極基板の作製にご協力いただきました NHK 放送技術研究所に感謝申し上げます。

研究生活を支えていただいた高田 めぐみ様と、藤掛・石鍋研究室の学生の皆さまに感謝いたします。

最後に、心の支えとなった友人たちと、長きにわたって応援し続けてくれている父 磯前勝則、母 喜代美、妹 奏恵、弟 侑宏に深く感謝申し上げます。