

超音波と液晶による高速フィルムレンズの開発

High-speed film lens using ultrasound and liquid crystal

同志社大学理工学部 准教授 小山 大介

Faculty of Science and Engineering, Doshisha University, Daisuke Koyama

要旨

現在液晶材料はディスプレイなどの光学デバイスとして産業界において広く利用されている。本研究ではまず、超音波振動を用いた液晶の分子配向制御手法について検討した。次に、その技術を利用して可変焦点機能を持つ薄型レンズを作成した。超音波が液晶の分子配向に与える影響を検討するため超音波液晶セルを作製した。セルは2枚のガラス基板間に厚さ数10 μm の液晶層を有し、ガラス基板上に超音波振動子を接着した構造を持つ。振動子に電気信号を入力すると、基板上にたわみ振動モードが励振され、液晶層に音響放射力が作用することにより液晶分子の配向が変化する。クロスニコル配置下で超音波駆動時におけるセルの透過光強度分布を測定した結果、たわみ振動の腹の位置を中心として液晶の分子配向が変化することがわかった。円形ガラス板を用いた類似構造の液晶レンズでは、超音波による液晶分子配向制御に伴う実効的な屈折率変化を利用して可変焦点機能を得た。

1. はじめに

一般的なカメラモジュールにおいて、高速で画面奥行き方向（光軸方向）に移動する物体を撮影する場合、常に撮影対象にピントを合わせる必要があり、そのためにはアクチュエータとギア機構を通じてレンズを連続的かつ高速に光軸方向へ移動させなければならない。一方、携帯電話などの小型電子機器にカメラモジュールを組み込む場合、これらアクチュエータなどの動作機構が必要となるため4~5 mm程度に大型化する傾向があり、現在応答速度の高速化とデバイスの小型化の両立が課題となっている。

本研究では上記の課題を解決するため、超音波と液晶を組み合わせた光学レンズを提案する。液晶は固体と液体の中間状態であり、液晶分子の配列はランダムであるが、類似したダイレクタを持つ。また液晶は構成する分子の多様性や凝集機構により様々な相をとる。異方性材料である液晶分子は電気磁気双極子を持ち、その配向秩序によって一般的にはnematic, smectic, cholestericの3種類の液晶相に分類される。その中でもnematic液晶は流動性が高く、分子配向を電界によって容易に制御できるため、液晶ディスプレイ等の光学デバイスに幅広く応用されて

いる[1,2]。液晶の光デバイスへの応用例として、これまでに佐藤らは液晶の複屈折を利用した可変焦点液晶レンズを報告している[3-5]。このような液晶デバイスは、アクチュエータ等の機械的可動部を必要としない構造であるため、薄型化や多用途化に利点がある。

一方で液晶を用いた一般的な光デバイスでは、外部電界を加えることによって液晶の分子配向を制御するため、電気伝導性、透明度の高い酸化インジウムスズ (ITO) などの透明電極が必要不可欠である。しかしながらITO電極は材料にレアメタルを含み、その成膜工程において多くの大型設備や時間を要することや[6]、抵抗率と長波長側の透明度にトレードオフの関係があるため、ITO電極を用いない液晶デバイスの開発が求められている[7]。近年フレキシブルな液晶光学デバイスの開発が行われているが、可塑性のある樹脂フィルム上にITO電極を成膜するためには低温条件が必要となるだけでなく、紙のような曲げ特性が要求されるため、ITOのような無機材料では限界がある[8]。

これまでにいくつかのグループによって超音波伝搬がnematic液晶に及ぼす影響について報告されている[9,10]。著者らのグループでは、超音

波が液晶分子に与える影響について検討しており、超音波の放射力によって液晶分子の配向を制御できることを発見した[11]. そこで本研究では、ITO電極を用いず、超音波によって液晶の分子配向を高速に変化させることにより、液晶層の透過光を空間的・時間的に高速制御する技術を利用した可変焦点レンズの開発を行った。

2. 超音波による液晶配向制御

超音波による液晶配向制御について検討した。図1は試作した超音波液晶セルの構造である。2枚のガラス基板((a)80×80×0.7 mm³, (b)50×50×0.7 mm³)表面に、ポリイミド製垂直配向膜(SE-5811, 日産化学)を成膜している。ガラス基板(a)の四隅に圧電振動子(PZT, 富士セラミックス, 10×10×1 mm³)を接着した。基板間周辺部に球形シリカガラス(φ=25 μm)をスペーサとして挟み、毛細管現象を利用することによってnematic液晶(DIC製RDP-85475, 転移温度-10°C (SN点), 123.7°C (NI点), 粘度93.7 mPa・s)を基板間スペースに注入し厚さ25 μmの液晶層を形成した。各振動子に連続正弦波信号を入力すると、セルの共振周波数において基板上には様々な振動モードが励振される。音波は液晶層を伝搬し、液晶層とガラス基板では音響インピーダンスが異なるため両媒質間において音響エネルギー密度差が発生し、エネルギー差に応じた静圧(音響放射力)が液晶層に加わり、液晶分子の配向が変化すると考えられる。

直交配置(クロスニコル配置)した偏光板と検光板間に、試作した超音波液晶セルを平行に設置し、入射光(He-Neレーザー, λ=632.8 nm, ビーム径2 mm)をセルに垂直に入射し、超音波駆動に伴う透過光強度分布の変化をフォトディテクタ(PD, 2051-FS, Newport)で、基板振動分布をレーザードップラ振動計(LDV, NLV-2500, PI Polytec)で測定した。2枚の偏光板とセルの面内回転角度を変化させながら透過光分布を測定することによって、液晶分子の配向方向を推定することができる[12]. 図2はセル中心部分(30×30 mm²)の基板振動分布(コンター図)と液晶配向分布(ベクトル図)である。超音波駆動によってガラス基板には格子状の共振たわ

み振動が発生し、周波数(a) 43.9 kHz, (b) 70.7 kHzでそれぞれ半波長は約8.9 mm, 6.5 mmであった。超音波OFF時は、液晶分子は配向膜によって垂直に初期配向されているため、クロスニコル配置下では透過光強度は測定範囲全体にわたって極めて小さいことを確認している。一方で、駆動電圧50 V_{pp}, 43.9 kHzおよび70.7 kHzの場合、透過光強度分布は超音波OFF時に比べ大きく変化したことから、基板のたわみ振動によって液晶分子の配向が変化したと考えられる。透過光強度が大きい部分では、入射光は液晶分子によって楕円偏光され検光子を透過することを意味する。同図より、液晶分子は基板の超音波振動が大きい腹の位置から湧き出す様に変化しており、振動の小さい節線に沿って配向しているこ

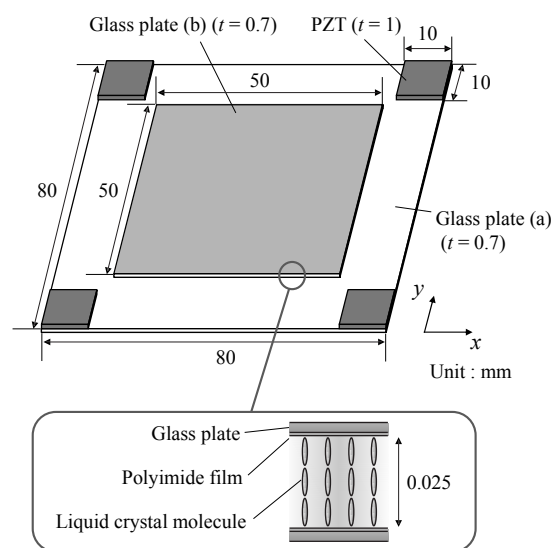


図1 超音波液晶デバイス

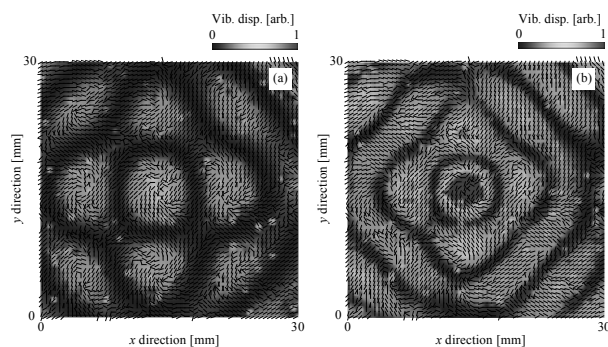


図2 超音波振動分布と液晶配向の関係
(a) 43.9 kHz, (b) 70.7 kHz

とがわかる。またセルへの入力電圧，すなわち超音波振動が大きいほど液晶分子の配向変化は増加することがわかった。本結果より，超音波周波数および振幅を変化することで液晶の配向を変化し，透過光分布を制御できることが明らかとなった。

3. レンズ構造

超音波によって焦点距離を制御可能な可変焦点液晶光学レンズを試作した。図3は提案する超音波液晶レンズの構造である。厚さ0.7 mmの2枚の円形ガラス基板 ((a) $\phi = 15$ mm, (b) 30 mm) 表面に，液晶垂直配向用配向膜を成膜した。ガラス基板(b)の外周に厚さ1 mmのアニユラ型圧電超音波振動子 (PZT, 外径30 mm, 内径20 mm, 厚み方向分極) をエポキシ樹脂で接着した。2枚のガラス基板間周辺部に厚さ50 μm のシリコンフィルムをスペーサとして挿入し，それぞれの配向膜側が内側となる様に2枚のガラス基板を接着した。液晶を両基板間のスペースに注入し，その後エポキシ樹脂で周囲を封入することにより，厚さ50 μm の円形液晶層を形成した。駆動電圧によって液晶層に働く音響放射力を調整することで，液晶レンズにおける液晶分子配向の空間分布とその光学的屈折率分布の制御が可能となり，焦点距離を変化することができる。

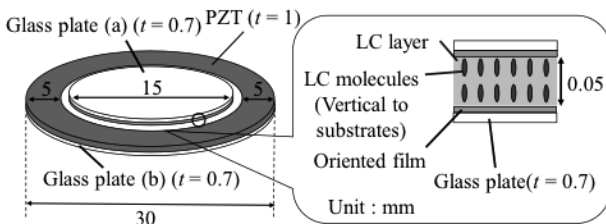


図3 超音波液晶レンズ

4. 液晶分子配向

超音波駆動下の液晶レンズ中の液晶分子の配向について検討した。試作した液晶レンズには周波数20 kHz以上でいくつかの共振周波数が存在した。本報告では比較的低下の63.6 kHz (節線0, 節円1のたわみ振動モード) を用いた。クロスニコル配置下の偏光板と検光板間に液晶レンズを平行に設置した。液晶レンズに対して垂直

にレーザ光を入射し，その透過光をPDで測定した。超音波による液晶分子配向の変化を調べるため，クロスニコル配置を保ったまま液晶レンズのみを面内方向に回転させ，レンズ内透過光強度分布と回転角度の関係から複屈折分布を測定した。また，基板表面に発生する面外方向振

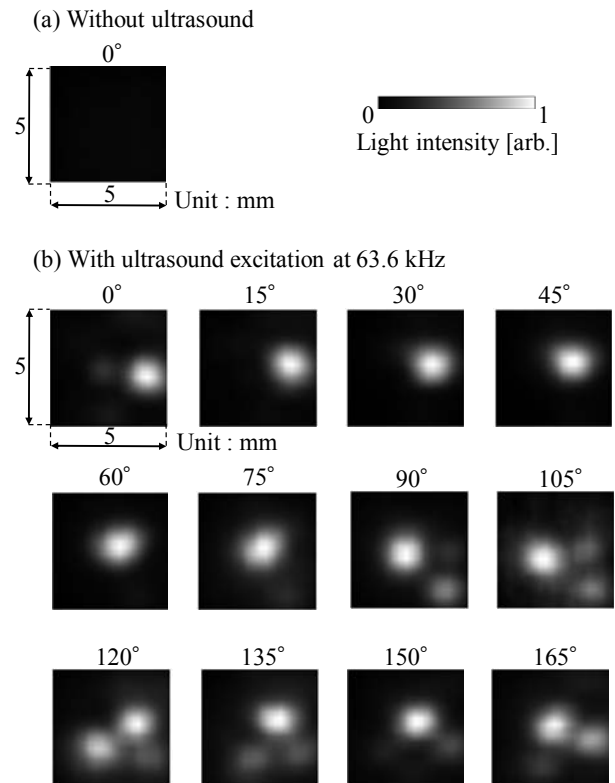


図4 各回転角におけるレンズ透過光強度分布

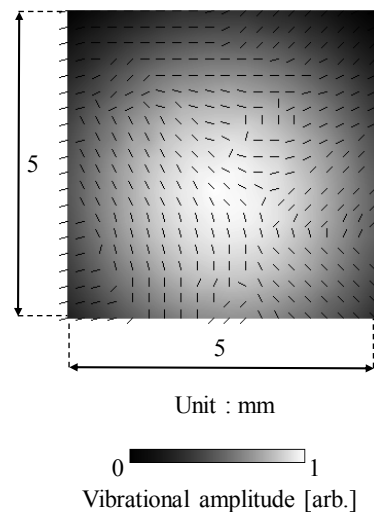


図5 レンズ面外方向振動と液晶分子配向分布

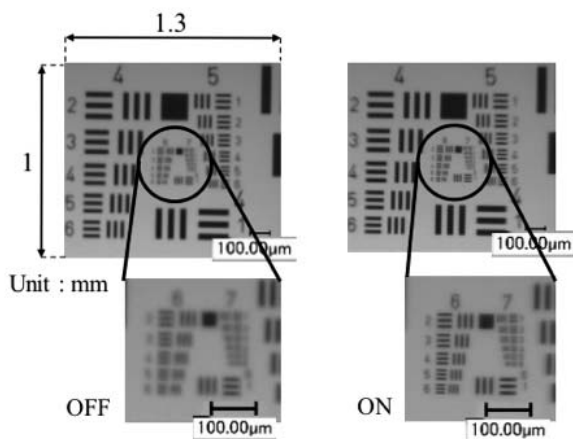


図6 焦点変化のようす

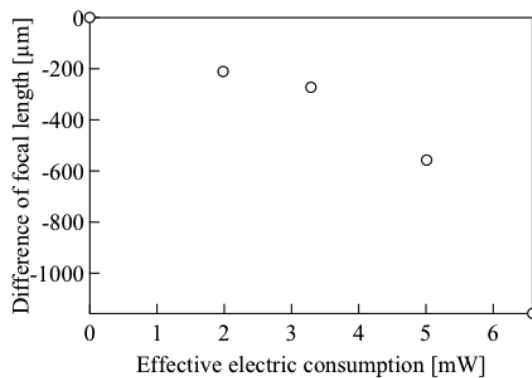


図7 消費電力と焦点位置の関係

動分布をLDVで測定した。測定範囲は液晶レンズ中心の $5 \times 5 \text{ mm}^2$ の範囲である。

図4は超音波非駆動時、および各面内回転角度における駆動時の透過光強度分布である。超音波非駆動時(同図(a))は、液晶分子は垂直に配向しているため、クロスニコル配置下では直線偏光は検光板を透過せず透過光強度は極めて小さい。一方、駆動電圧 $2 V_{pp}$ の場合(同図(b))、透過光強度分布は非駆動時に比べ大きく変化した(透過光強度は各条件での最大値で規格化している)。透過光強度が大きい部分では、レンズに入射する直線偏光は液晶分子によって楕円偏光となり、その後検光板を透過したと考えられる。レンズ内の各位置において最大透過光強度が得られる入射光偏波面の面内角度を調べることで、液晶の面内分子配向を推定した。

図5はレンズガラス板の面外振動分布と液晶分子配向分布を示しており、振動分布はグレー

スケールで、分子配向分布は黒棒で表している。液晶の分子配向分布はたわみ定在波の腹の中心付近から湧きだしており、接線に沿って配向する傾向が確認でき、二つの分布には強い相関が見られる。本結果より、超音波振動によって液晶分子の配向が軸対称に変化し、液晶分子配向に沿って入射光が屈折する光偏向効果によって焦点が変化すると考えられる。また超音波振動の共振モードによって液晶レンズの光学特性を制御することが可能であると考えられる。

5. フォーカシング特性

レンズのフォーカシング特性を評価するため、透過型光学顕微鏡を用いて単ニコル観測を行った。テストターゲット(1951 USAF, Edmond optics)を観測対象とし、対物レンズ、テストターゲット間に対物レンズ側から順に液晶レンズと偏光板を設置した。超音波非駆動時において、あらかじめ光学顕微鏡の焦点をテストターゲット表面に合わせ撮像した。撮像範囲はレンズ中心部の $1 \times 1.3 \text{ mm}^2$ である。レンズの超音波駆動によって焦点距離が変化するため、ピントが合う位置までテストターゲットを光軸方向に移動させることによって焦点距離を測定した。焦点位置を定量的に決定するため、撮影画像の明暗境界部分の輝度変化の微分係数(すなわち顕微鏡画像のシャープネス)を算出し、最大の位置を焦点位置とした。

図6は超音波非駆動時および駆動時における、光学顕微鏡による代表的な撮影画像である。同図より、超音波駆動によって液晶レンズの焦点距離が変化することがわかる。レンズの消費電力と焦点距離変化量の関係を図7に示す。光学性能は用いた顕微鏡の光学システムにも依存するため、ここでは焦点距離変化量は超音波非駆動時を基準に設定($0 \mu\text{m}$)し、液晶レンズから遠ざかった距離を正の焦点移動距離とした。レンズの駆動電圧を $2 V_{pp}$ (1.98 mW) $\sim 3.5 V_{pp}$ (6.59 mW)の範囲で増加させると、焦点距離は徐々に液晶レンズ側に近づき短くなった。この結果から、試作した液晶レンズは音圧の増加に伴い凸レンズの特性を持ち、その曲率半径が徐々に小さくなることをわかる。駆動電圧が $4 V_{pp}$ を超

えた場合、レンズの光学的軸対称性が崩れることにより撮影画像に歪みが生じ、液晶層中での白濁化が見られた。これは駆動超音波の増加によって生じる液晶の動的散乱モードによる光散乱効果の影響と考えられ、同じ現象が一般的な電界制御型液晶デバイスでも観測される[13].

6. おわりに

超音波を利用した可変焦点液晶レンズを提案した。円形ガラス基板、垂直に初期配向する液晶層、アニュラ型超音波振動子を用いることで超音波型可変焦点液晶レンズを作成した。液晶層に超音波振動を印加することで、液晶レンズ中心付近で焦点距離が変化した。超音波振動子に印加された有効消費電力と焦点距離の変化量には相関があり、有効消費電力、及び液晶層内の音圧が増加するにつれ、レンズパワーの強い凸レンズ（曲率半径の小さい凸レンズ）特性へと変化した。超音波振動により振動の腹の位置付近において液晶の分子配向が変化し、これにより透過光が光偏向されることによって焦点距離が変化することがわかった。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人京都技術科学センターによる研究助成により行われた。

参考文献

- [1] 日本液晶学会, シグマ出版社, “液晶科学入門”.
- [2] M.F. Schiekkel and K. Fahrenshon, *Appl. Phys. Lett.* **19**, 391 (1971).
- [3] S. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.* **18**, 1679 (1979).
- [4] T. Nose and S. Sato, *Liq. Cryst.* **5**, 1425 (1989).
- [5] T. Nose, S. Masuda, S. Sato, *Jpn. J. Appl. Lett., Part 1* **30**, 2110 (1991).
- [6] K. Azuma, K. Sakajiri, H. Matsumoto, S. Kang, J. Watanabe, M. Tokita, *Mater. Lett.*, **115**, 187 (2014).
- [7] P. Perkowski, *Opto-Electron. Rev.*, **17**, 180 (2009).
- [8] M. Vosguritchian, D. Lipomi, Z. Bao, *Adv. Funct. Mater.*, **22**, 421 (2012).
- [9] H. Mailar, K. L. Likins, T. R. Taylor, J. L. Ferguson, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 105 (1971).
- [10] W. Helfrich, *Phys. Rev. Lett.* **29**, 1583 (1972).
- [11] S. Taniguchi, D. Koyama, Y. Shimizu, A. Emoto, K. Nakamura, M. Matsukawa, *Appl. Phys. Lett.* **108**, 101103 (2016).
- [12] Y. Shimizu, D. Koyama, S. Taniguchi, A. Emoto, K. Nakamura, M. Matsukawa, *Appl. Phys. Lett.* **111**, 231101 (2017).
- [13] G. H. Heilmeyer, L. A. Zaroni, L. A. Barton, *Proceeding of the IEEE.* **56**, 1162 (1968).