

令和元年6月10日現在

機関番号：34310

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14204

研究課題名（和文）超音波による液晶配向制御と高速マイクロ光デバイスへの応用

研究課題名（英文）Control of liquid crystal orientation by ultrasound and its application to high-speed micro optical devices

研究代表者

小山 大介 (Daisuke, Koyama)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：50401518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では超音波による液晶配向制御技術について検討した。液晶と超音波振動子を組み合わせたデバイスを作製し、超音波が液晶配向に与える影響を実験的に評価した。デバイスへの入力電気信号によって液晶配向変化を時間的・空間的に制御することに成功した。また本手法を利用した可変焦点レンズを開発した。レンズ内の液晶分子配向は入力電気信号によって制御可能であり、機械的可動部を持たない薄型の可変焦点レンズの開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、超音波が液晶分子配向に与える影響の一部が明らかとなった。この技術を利用した可変焦点レンズでは、アクチュエータなどの機械的可動部が不要であり、大幅な薄型化が可能であるため、今後携帯電話等への搭載を考えた場合、デバイス全体の小型・薄型化に貢献できる。また、その高速応答性を利用することによって、今後体内診断技術などに利用可能な高速マイクロ光デバイスへの発展が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, control of liquid crystal molecular orientation using ultrasound was investigated. Ultrasound liquid crystal devices were fabricated and the effects of ultrasound vibration on the molecular orientation were evaluated experimentally. The molecular orientation of liquid crystals could be controlled spacially and temporally by the input signals to the devices. Variable-focus optical lenses using this technique were also developed. The molecular orientation of liquid crystal in the lens could be controlled by the input voltage and the focus point of the lens could be successfully controlled.

研究分野：超音波工学，アクチュエータ工学，計測工学

キーワード：超音波 液晶 レンズ 光デバイス

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

高速で画面奥行き方向（光軸方向）に移動する物体をカメラで撮影する場合、常に撮影対象にピントを合わせる必要があり、そのためには一般的なカメラモジュールでは、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。このような従来の機械式レンズの応答速度はおよそ数十 ms であり、現在高速応答化が急務とされている。一部研究室レベルでは高速アクチュエータを利用した高速応答レンズ[1]が開発されているものの、装置自体が大型化し、耐久性の問題が生じる。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。

これを解決するため、いくつかの研究グループにより、水と油の様な混ざり合わない2種の液体を用いた光学レンズ（いわゆる液体レンズ）が報告されている。これは2液の屈折率差を利用し、2液界面をレンズ表面として利用するレンズであり、界面形状を何らかの方法によって変形することにより可変焦点レンズとして動作する。2液界面の変形方法としては、導体に電圧を印加し、その濡れ性を変化させるエレクトロウエットがほとんどであるが、小型化は実現できるものの、応答速度は少なくとも機械式レンズと同等の数十 ms を要する[2]。これに対し我々のグループでは、音波の放射力を利用した液体レンズを世界で初めて発表しており、時間応答性が高い超音波を用いることにより、従来型と比較して1桁程度速い応答速度 6.8 ms を達成し小型・高速化を実現している[3]。しかしながら、いずれの液体レンズにおいても使用環境温度によるレンズの光学特性の不安定性、長期間使用に伴いレンズ内に気泡や曇りが発生するなど実用上の致命的欠点を有する。

### 2. 研究の目的

以上の背景より本研究では、音速で伝搬する音波の放射力と光を組み合わせ、光路中の屈折率分布を高速かつ大振幅で変化させることにより、光を空間的・時間的に高速制御する技術について検討する。光の屈折手法としては、主に音波によって液晶分子の配向を変化させ、屈折率分布を制御する手法を提案する。これについて特に以下の2項目について検討する。

- (1) 提案手法の実現可能性を確認するための第一段階として、まず音波による液晶の屈折率変化に関する基本特性について検討する。
- (2) 第二段階として、本手法を応用した光デバイスを開発する。その一つとして、焦点位置を高速に変化可能な可変焦点光学レンズを開発する。本レンズはレンズ位置を動かすのではなく、レンズ内の屈折率分布を変化させ、その焦点位置を変化する可変焦点レンズである。レンズ中を高速で伝搬する超音波の放射力により光路の屈折率が変化するため、従来技術である機械式と比較して速い時間応答性が期待でき、1桁程度速い 1 ms を目指す。レンズは機械的可動部を持たず、ガラス基板、液晶、超音波振動子のみで構成されるため大幅な小型・薄型化が可能である。音波による液晶配向制御技術についてはこれまでに報告はなく、この特長を利用した光計測技術への展開を行う。

### 3. 研究の方法

- (1) 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)  $80 \times 80 \times 0.7 \text{ mm}^3$ , (b)  $50 \times 50 \times 0.7 \text{ mm}^3$ ）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,  $10 \times 10 \times 1 \text{ mm}^3$ ）を接着した。基板間周辺部に真球形シリカガラス（ $\phi = 25 \mu\text{m}$ ）をスペーサとして挟み、ネマチック液晶（RDP-85475, DIC）を基板間スペースに注入し厚さ  $25 \mu\text{m}$  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。

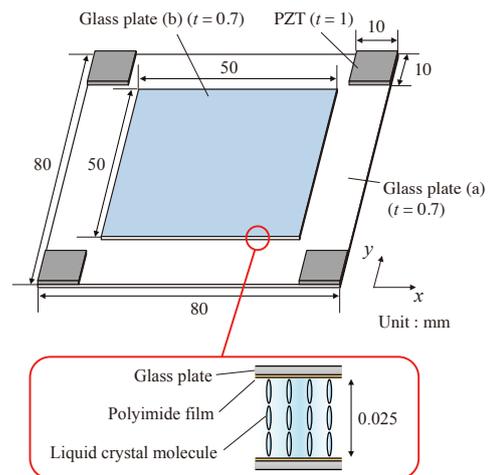


図1 超音波液晶デバイス

クロスニコル配置の2枚の偏光板間に、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）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と基板振動分布を測定した。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。振動子入力信号の周波数、振幅を変化することによって、液晶分子配向の超音波特性を評価した。

- (2) 上記の超音波による液晶配向技術を用いた光学レンズについて検討した。図2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)  $\phi = 15 \text{ mm}$ , (b)

30 mm) 表面に垂直配向膜を成膜した. ガラス基板(b)の外周に厚さ 1 mm のアニュラ型圧電超音波振動子 (PZT, 外径 30 mm, 内径 20 mm) を接着した. ガラス基板間周辺部に厚さ 50  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  の円形液晶層を形成した. 上述の液晶デバイスと同種の液晶, 配向膜, 圧電材料をそれぞれ用いた. 振動子に連続正弦波信号を入力すると, 液晶レンズ全体の共振周波数で液晶層を介して 2 つのガラス基板上にたわみ定在波が励振され, その結果液晶分子の配向が変化する. 駆動電圧を調整することで, 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.

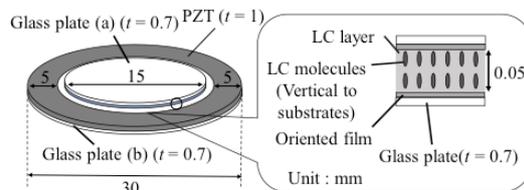


図 2 超音波液晶レンズ

#### 4. 研究成果

- (1) 図 3 はセル中心部分 (30×30 mm<sup>2</sup>) 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は確認している. 一方で, 駆動電圧 50 V<sub>pp</sub>, 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.

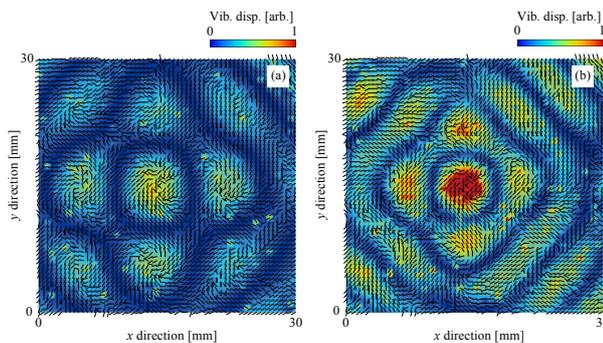


図 3 超音波振動分布と液晶配向の関係 kHz

- (2) 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 low 次 (節線 0, 節円 1 のたわみ振動モード) を用いた. 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, 顕微鏡対物レンズ, 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. 撮像範囲はレンズ中心部の 1×1.3 mm<sup>2</sup> 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. ま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 4 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. レンズの駆動消費電力と焦点距離変化量の関係を図 5 に示す. 光学性能は用いた顕微鏡の光

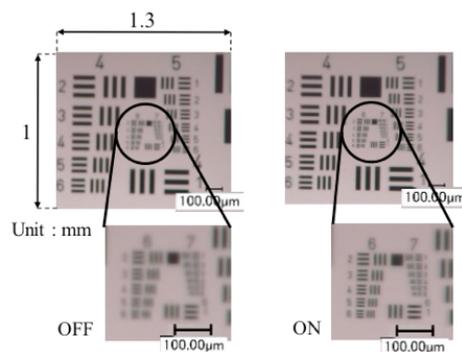


図 4 焦点変化のようす

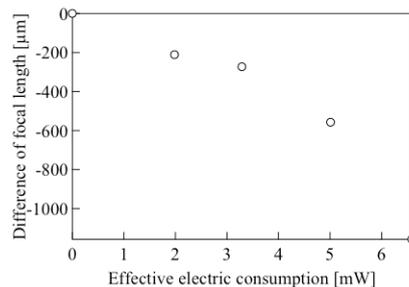


図 5 消費電力と焦点位置の関係

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、液晶レンズに近づく距離を負の焦点移動距離とした。レンズの駆動電圧を 0~3.5 V (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駆動電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わかる。駆動電圧が 4 V 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。

#### <引用文献>

- [1] H. Oku and M. Ishikawa, Appl. Phys. Lett. 94, 221108 (2009)
- [2] B. Berge and J. Peseux, Eur. Phys. J. E. 3, 159-163 (2000)
- [3] D. Koyama et al., Opt. Express 18, 25158-25169 (2010)

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- [1] 小山大介, 極薄液晶レンズの作製とその車載カメラへの応用の可能性, Material Stage, Vol. 19, No. 1, pp. 19-23 (2019) (査読なし) (<https://ls.ipros.jp/product/detail/2000140137/>)
- [2] Y. Shimizu, D. Koyama, M. Fukui, A. Emoto, K. Nakamura, M. Matsukawa, Ultrasound liquid crystal lens, Appl. Phys. Lett., Vol.112, No. 16, p.161104 (2018) (査読有り) (<https://doi.org/10.1063/1.5027131>)
- [3] Y. Shimizu, D. Koyama, S. Taniguchi, A. Emoto, K. Nakamura, M. Matsukawa, Periodic pattern of liquid crystal molecular orientation induced by ultrasound vibrations, Appl. Phys. Lett., Vol.111, No. 23, p. 231101 (2017) (査読有り) (<https://doi.org/10.1063/1.5010213>)

[学会発表] (計 21 件)

- [1] Y. Harada, D. Koyama, H. Yasui, M. Fukui, Y. Shimizu, Y. Shibagaki, M. Matsukawa, Control and evaluation of liquid crystal molecules using ultrasound vibration, 176th Meeting of the Acoustical Society of America (2018)
- [2] (招待講演) D. Koyama, Variable-Focus Lens Using Ultrasound Vibration, The 7th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (2018)
- [3] Y. Shimizu, D. Koyama, Y. Harada, A. Emoto, M. Matsukawa, Focus control in the radial direction using an ultrasound liquid crystal lens, 174th Meeting of the Acoustical Society of America (2017)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: 液晶可変焦点レンズおよび焦点距離制御方法

発明者: 小山大介, 清水 裕貴

権利者: 学校法人同志社

種類: 特許

番号: 6414994

取得年: 2018 年

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

同志社大学理工学部超音波エレクトロニクス・応用計測研究室

<https://use.doshisha.ac.jp/Welcome2.html>

#### 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 中村 健太郎

ローマ字氏名: Kentaro Nakamura

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：科学技術創成研究院

職名：教授

研究者番号（8桁）：20242315

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。