

山梨県若手研究者奨励事業 研究成果報告書

所属機関名 国立大学法人 山梨大学

職名・氏名 助教・原田 裕生

1. 研究テーマ

超高周波強力超音波による屈折率変調型可変焦点レンズの開発

2. 研究の目的

小型電子機器やマシンビジョン（産業ロボットなどの視覚系）に搭載されているカメラモジュールは、複数枚のレンズをアクチュエータ等の機械的可動部によって奥行き方向に移動させることで光学的な焦点調整が行われている。しかし、機械的可動部を有するカメラモジュールでは将来的な小型化や高速化には限界があり、さらに現状の光学システムでは部品点数が多くなってしまったため、製造コストやロバスト性、製品寿命の観点においても更なる技術革新が必要である。以上のことから、高速焦点制御および光学システム全体の薄型・小型化、さらにロバスト性の向上を実現したカメラモジュールの開発が求められている。そこで本研究では従来技術と比較して格段に大きな屈折率変化（Harada, Appl. Phys. Lett., 2024：図1）を実現可能な高周波強力超音波による屈折率制御技術を基盤とした機械的可動部を必要としない可変焦点光流体レンズを開発することを目的とする。

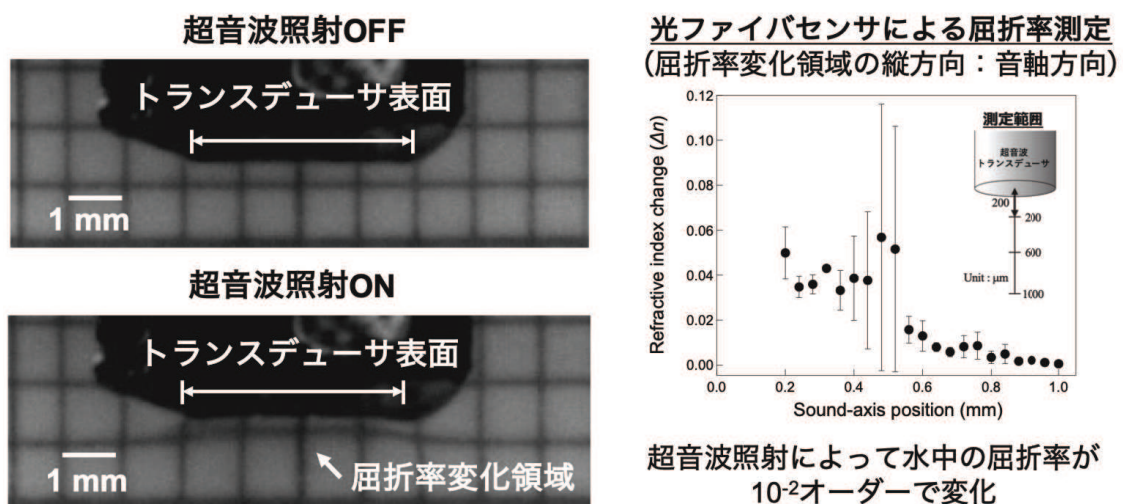


図1 超高周波超音波照射によって水中に誘起される屈折率変化の様子，光ファイバセンサを用いた屈折率変化領域における屈折率測定結果

人間と機械が協働する社会において、小型電子機器のみならずロボットやドローンなどのマシンビジョンに搭載されるカメラモジュールの高性能化に関する研究開発は極めて重要なテーマである。その重要性は製造業や物流における自動化・効率化、危険な環境下でのセンシングによる作業安全性の向上、製品検査における欠陥検出精度の向上など多様な観点から明らかである。しかし、現在主流の機械式や電磁式による光学制御では焦点可変量の制約やトルク不足といった技術的限界に直面している。よって焦点可変量の大幅な向上と小型薄型化・高速化・高口バラスト性を同時に実現した次世代光学系カメラモジュールのための可変焦点レンズの基盤技術の構築が必要である。本研究を通して、高周波強力超音波による光の時間的・空間的な制御技術を確立し、新たな可変焦点レンズを開発することができれば、学術的のみならず産業応用の観点からも極めて意義深い研究となる。

3. 研究の方法

3.1 水熱合成法を用いた KNbO_3 圧電薄膜の成膜とレーザー加工

高周波強力超音波トランスデューサに利用する KNbO_3 圧電薄膜は、水熱合成法を用いて、(100) SrTiO_3 -La 基板上に 240°C で堆積させた。成膜条件としては、 KOH 溶液 (6.8 mol/L, 合計 25 mL) と Nb_2O_5 粉末 (0.5 g) の合成溶液を作製し、こちらの合成溶液をテフロン容器に入れ、テフロン材料で試作した治具によって基板 (図 2 中のターゲット) をテフロン容器内で合成溶液と接するように設置し、オートクレーブ容器にて密封した。そしてオートクレーブをオープンに入れ、 240°C まで加熱し、その温度を 2 時間維持した。この工程を 1 サイクルとし、数サイクル繰り返して成膜を行った。その後、得られたサンプルを蒸留水中で超音波洗浄処理を施した。洗浄後、サンプルを大気中で乾燥させ、成膜基板からの KNbO_3 圧電薄膜の剥離作業を行った。そして剥離された KNbO_3 膜をレーザーマーカ (KEYENCE 製, MD-U1000C) を用いて加工し、膜を円盤・円環形状へと成形した。

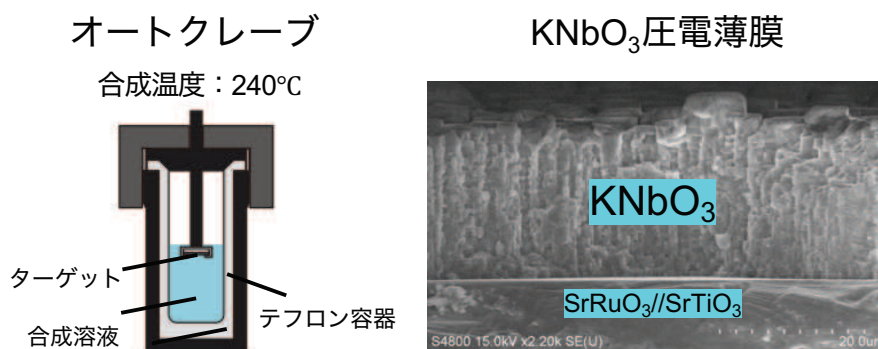


図 2 オートクレーブを用いた水熱合成法と KNbO_3 圧電薄膜

3.2 高周波強力超音波トランスデューサの設計開発

水熱成膜法によって得られたレーザ加工後の KNbO_3 圧電薄膜を利用して，図 3 に示す構造を有する円盤・円環型高周波強力超音波トランスデューサをそれぞれ作製した．作製した超音波トランスデューサは，真空蒸着器によって KNbO_3 圧電薄膜の両面に金電極処理を施し，真鍮パイプの端部に膜を接着させ，中空構造（空気バッキング構造）とした．また超音波トランスデューサの振動面は平面（フラット）構造とした．



図 3 円盤・円環型の高周波強力超音波トランスデューサ

4. 研究の成果

4.1 超高周波強力超音波照射用の KNbO_3 膜の成膜とレーザ加工

3.1 にて述べた成膜・レーザ加工プロセスによって得られた円環型の KNbO_3 膜の例を図 3 に示す．本研究では，得られた KNbO_3 圧電薄膜を，レーザマーカにより加工し，円盤あるいは円環形状（外径：約 4 mm，内径：約 1 mm）へと成形するというプロセスを取った．しかし現在，成膜・レーザ加工プロセスにおいて新たな課題に直面しており，成膜基板上の圧電薄膜を，安定的に基板から剥離させる方法が確立できていない．本研究を通して，水熱合成法により，成膜基板上にて安定的に成膜が行える段階までは到達したものの，圧電薄膜の基板からの剥離に成功したケースは極めて少ない状況である．今後，研究協力者と連携して本課題の解決に取り組み，圧電薄膜の剥離技術の構築を図りたいと考えている．

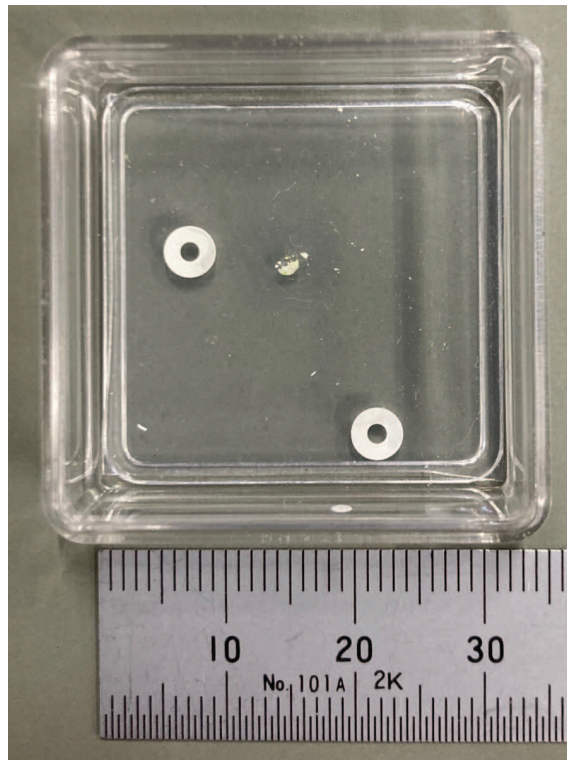


図4 レーザ加工により得られた円環形状の KNbO₃ 圧電薄膜

4.2 各種高周波強力超音波照射条件下による屈折率制御手法の評価

3.2 にて述べた構造で作製した高周波強力超音波トランスデューサを用いて、入力波形として、先行研究にて屈折率変化が観測されていた連続正弦波の条件に加えて、正弦波パルス波の条件においても同様に屈折率変化領域が形成されるかについて、シュリーレン光学観測系を構築して評価を行った。その結果、パルス波（超音波周波数：35 MHz，印加電圧：57 V_{pp}，繰返し周波数：200 kHz（周期：5 μs），パルス数（バースト内サイクル数）：10，20，30，40，50）の全条件において、超音波トランスデューサ表面近傍にて、屈折率変化領域が形成されることが確認された。以上より、パルス波条件においても屈折率変化が形成可能であることが明らかとなった。

4.3 高周波強力超音波照射による屈折率変化と超音波音場の関係性の評価

ニードル型ハイドロフォンおよび光ファイバセンサを用いて、屈折率変化領域における屈折率変化と超音波音場の関係性を評価した。水槽内（水）で超音波トランスデューサとニードル型ハイドロフォン／光ファイバセンサを対向に配置し、音軸方向に沿って屈折率および音圧変化を測定した。光ファイバセンサを用いた測定系を図5に示す。その結果、屈折率変化は連続波条件で $\Delta n \approx 10^{-2}$ オーダであったのに対し、パルス波条件では $\Delta n \approx 10^{-4}$ オーダであった。一方で、

音圧変化については、屈折率変化領域より、やや離れた位置においては超音波波形を観測できたものの、屈折率変化領域（約 0.5 mm 以下）においては、超音波トランスデューサ構造に起因するリングングおよび電磁ノイズの影響を受けてしまい、音圧の正確な評価ができなかった。現在、これらの影響の低減を目的とした超音波トランスデューサ構造の再設計および波形解析手法の確立を進めている。

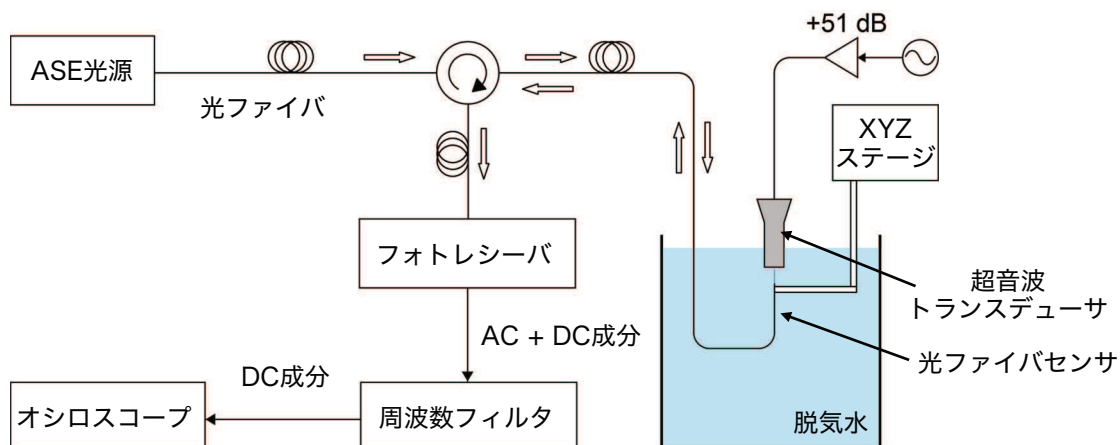


図 5 光ファイバセンサを用いた屈折率測定系

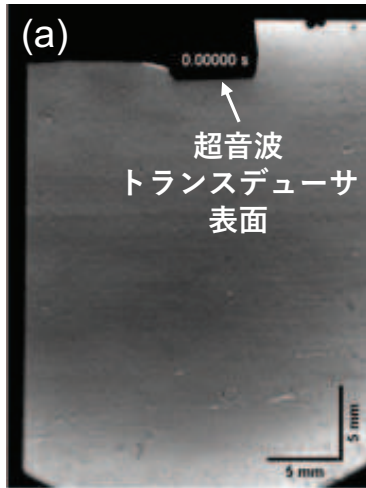
4.4 水以外の媒質における高周波強力超音波照射による屈折率変化の評価

水以外の媒質として、グリセリン溶液（濃度：29 wt%，屈折率：1.374）を用いて、高周波強力超音波照射による屈折率変化について、図 5 の実験系を利用して評価を行った。測定としては、上述のパルス波条件と同一条件で実施した。その結果、パルス数の増加に伴い、屈折率変化 Δn は増大し、最終的には $\Delta n \sim 10^{-3}$ オーダに達した。単一のグリセリン溶液条件での結果ではあるが、水と比較すると、グリセリン溶液の方が、超音波照射によって誘起される屈折率変化が大きいことが示唆された。

4.5 高周波強力超音波によって発生した音響流による屈折率変化領域の形成

水中への高周波強力超音波照射（超音波周波数：70 MHz, 印加電圧：63 V_{pp}, 繰返し周波数：200 kHz（周期：5 μs）, パルス数（バースト内サイクル数）：100）によって、照射前（図 6 (a)）には存在しなかった屈折率変化領域（屈折率分布）が、超音波トランスデューサ表面近傍にて形成されることを確認した（図 6 (b)）。さらに水中への高周波強力超音波照射によって、音響流が発生し（図 6 (c)から (e)）、低速度で移動する塊状の屈折率変化領域②（図 6 (f)）が超音波トランスデューサ表面から音軸方向の遠方にて形成されることが、シュリーレン法によって確認された。つまり、超音波照射によって超音波トランスデューサ表面近傍にて静的な屈折率変化領域①がまず形成され、その後、音響流によって超音波トランスデューサ表面から 20 mm 程度離れた地点にて、新たに静的な屈折率変化領域②が形成されることが明らかとなった。熱電対を用いて形成された屈折率変化領域②とその周辺の温度を測定した結果、屈折率変化による温度上昇（1°C程度）が確認された。しかしながら、熱電対によって測定された屈折率変化領域②とその周辺の温度変化はかなり限定的であることから、屈折率変化領域の形成の主要因ではないと言える。以上の内容を踏まえて、こちらの屈折率変化領域の形成の主要因はキャビテーションの影響ではないかと、現時点では考えており、引き続き調査を行う。

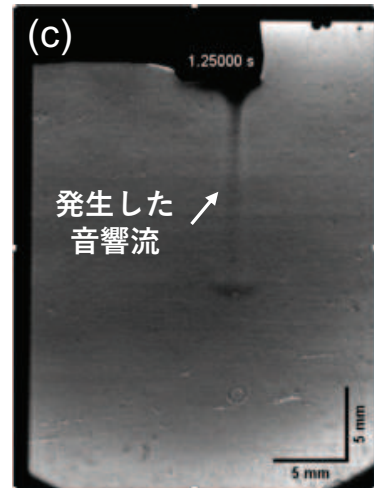
超音波照射OFF
($t = 0$ s)



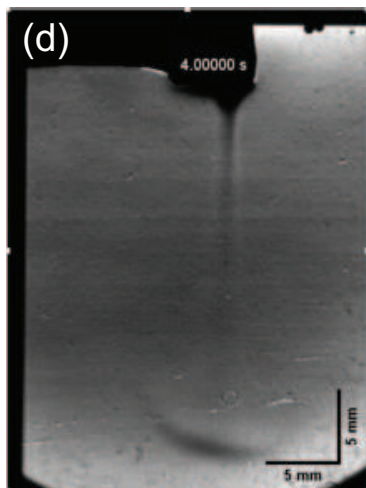
超音波照射ON後
($t = 0.25$ s)



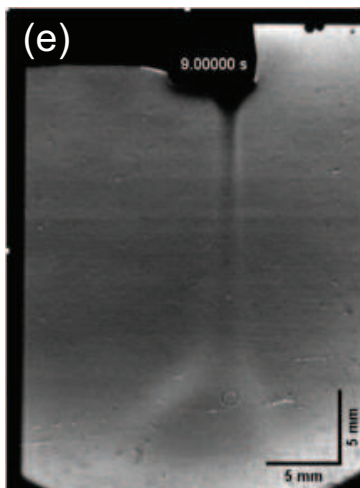
超音波照射ON後
($t = 1.25$ s)



超音波照射ON後
($t = 4.00$ s)



超音波照射ON後
($t = 9.00$ s)



超音波照射ON後
($t = 18.0$ s)

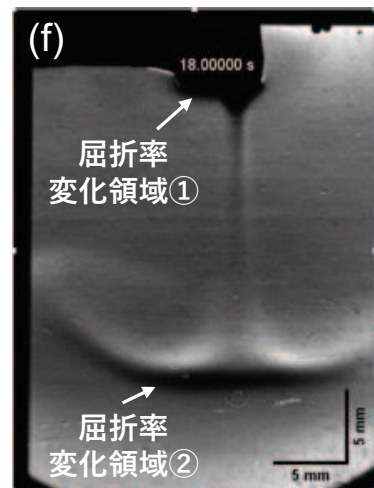


図 6 高周波強力超音波照射によって、超音波トランスデューサ表面および音軸方向の遠方にて形成された静的な屈折率変化領域の様子 (シュリーレン撮影)

5. まとめと今後の展望

本研究を通して、主に以下の 3 点に関する成果が得られた。また本研究の最終目標は、高周波強力超音波による屈折率制御手法を確立し、可変焦点レンズへと展開することにある。これを踏まえ、今後は下記内容で研究を推進する計画である。

5.1 高周波強力超音波照射による屈折率制御手法の開発

これまでは連続波条件での屈折率制御を想定していたが、本研究により、パルス波条件においても屈折率変化領域を形成可能であることが明らかとなった。ただし、パルス波条件は連続波条件に比べて、屈折率変化が小さいため、今後はパルス波条件で屈折率変化が最大となる駆動条件（超音波周波数、入力電圧、パルス数、バースト周期等）の最適化を並行して進めていく。

5.2 可変焦点レンズの開発に向けた光学媒質（屈折率変化媒質）の選定

これまでの研究では、水中における高周波強力超音波照射によって誘起される屈折率変化について、主に検討を行ってきた。しかし本研究を通して、数十 MHz 帯の超音波（連続波およびパルス波）を水およびグリセリン溶液に照射した場合、グリセリン溶液の方が大きな屈折率変化が得られることが示唆された。今後はグリセリン溶液の濃度、粘度、温度などの各種パラメータを系統的に変化させた際の屈折率変化を評価し、グリセリン溶液における屈折率変化の最適条件を模索する。

5.3 高周波強力超音波を用いた新たな屈折率制御手法の可能性

高周波強力超音波照射によって、これまでに観測されていた超音波トランスデューサ表面近傍での屈折率変化領域に加えて、超音波トランスデューサ表面から数十 mm 程度離れた地点においても、静的な屈折率変化領域が形成可能であることが明らかとなった。現時点では、超音波トランスデューサの遠方にて形成される屈折率変化領域には、音響流とキャビテーションが関係していると考えている。同現象を利用することで、屈折率変化の制御領域の拡大につながる可能性があり、新たな超音波光デバイスの創出が期待できる。

以上より、パルス波条件および光学媒質条件の最適化、音響流による新たな屈折率制御手法の可能性を通じて、屈折率変化 Δn の増大および屈折率制御領域の拡大が期待される。さらに得られた最適条件に基づいて、今後、屈折率変化の制御性を向上させることで、可変焦点レンズへの実装に向けた設計指針を確立させる。

6. 研究成果の発信方法（予定を含む）

高周波強力超音波照射によって誘起される屈折率制御技術および水熱合成法を利用した圧電薄膜の成膜技術に関する研究成果を下記、国際・国内学会にて発表を行った。

【国際学会】

・ Y. Harada, R. Mizuno, M. Ishikawa, M. Matsukawa, D. Koyama, Refractive index change under high-frequency, high-intensity ultrasonic irradiation and its relation to nanobubble density distribution, IEEE IUS 2025, Utrecht, Netherland (2025.9).

【国内学会】

・ 藤井 利津, 吳 沢農, 原田 裕生, 石河 睦生, 小山 大介, 水熱合成法による KNbO_3 を用いたフィルム状圧電振動子の検討, 日本音響学会第 155 回(2026 年春季)研究発表会, 日本大学 理工学部 駿河台キャンパス (2026. 3)

・ 吳沢農, 原田裕生, 藤井利津, 石河睦生, 小山大介, 100 MHz 帯超音波による音響流の光学的観測, 電子情報通信学会 超音波研究会, 日本大学 駿河台キャンパス (2026.5)

その他, 本研究により得られた成果を含めて, 現在, 学術論文として投稿する準備を進めている。

ここに改めて本研究助成に対して, 感謝の意を表する。