

[研究助成 (C)]

高 MHz 帯域の強力超音波を用いた小型光流体レンズの開発と
マシンビジョンへの応用

2247015

研究代表者
(助成金受領者)同志社大学
(理工学部)

研究開発推進機構

日本学術振興会
特別研究員 PD

原 田 裕 生

共同研究者

同志社大学 理工学部

教 授

小 山 大 介

桐蔭横浜大学 医用工学部

講 師

石 河 睦 生

[研究の目的]

近年、スマートフォンやウェアラブルデバイス、医療用内視鏡などの様々な分野において、高性能かつ小型な光学システムの需要が急速に高まっている。従来の光学機器では、フォーカシング特性や光軸調整を機械的可動部（アクチュエータやギア機構）によって行っており、これに伴う応答速度と耐久性の低下、装置の大型化といった課題が存在する。これらの課題を克服するためには、非機械的かつ高速応答が可能な光制御技術の開発が不可欠である。光伝搬を制御する手段として、従来は可動式のガラスレンズやミラーが用いられてきたが、これらは小型・薄型化が困難であり、応答速度の制約も生じてしまう。そのような背景から近年、メタレンズや液晶レンズといった超薄型レンズ等の新技術が注目されているものの、これらは依然として構造の複雑さや製造工程の難易度、応答の遅さといった問題を抱えている。

一方で、超音波によって光路媒質中の屈折率を変化させる音響光学（AO）効果は、高速に光を制御できる有望な手法である。しかし、従来の AO デバイスは超音波の時間周期や空間波長に同期した屈折率変化を利用しており、従来のレンズやミラーのように光を静的に屈折・反射させることができず、さらに得られる屈折率変化（ $\Delta n=10^{-5}$ から 10^{-4} オーダ）は非常に

小さい。他方で、我々の研究グループは高周波強力超音波を液体中に照射することで、巨大な屈折率変化を誘起できる新現象を発見した（図1）。同現象によって、従来の光制御手法では困難であった屈折率変化領域（ $\Delta n=10^{-2}$ オーダ）の形成が可能となり、光の伝搬方向や集光特性の制御性能が飛躍的に向上させることが期待できる。

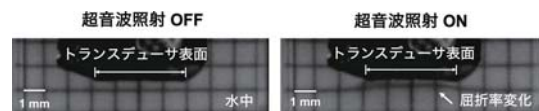


図1 高周波強力超音波照射によって誘起された屈折率変化領域（ Δn ）を高速度カメラで撮影した画像

そこで本研究は、100 MHz 帯域の強力超音波により液体中に生じる屈折率変化を利用し、小型・薄型化を実現した可変焦点光流体レンズの開発を目的としている。さらにレンズ性能の制御性の観点から、高周波強力超音波照射によって、液体中に屈折率変化が生じる物理メカニズムを明らかにすることを重要な課題として位置付け、実験およびシミュレーションの両面から検討を行った。

[研究の内容、成果]

本研究では、高周波強力超音波照射によって液体中に誘起される屈折率変化現象の物理メカ

ニズムの解明と小型光流体レンズの開発を目的として、以下の多角的な手法を用いて実験・解析を行った。

1. 屈折率勾配中の光線追跡シミュレーション

高周波強力超音波照射によって、誘起された屈折率勾配が光伝搬に与える影響を理論的に評価するため、光線追跡シミュレーションを実施した。これは超音波照射によって誘起される屈折率が空間的に不均一な領域において、入射光がどのように屈折・偏向されるかを定量的に理解するために重要である。

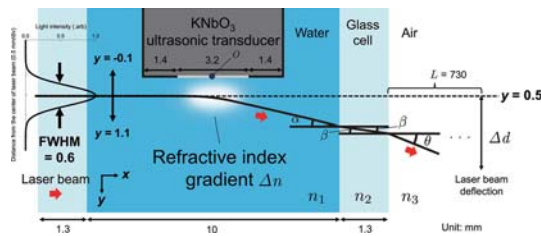


図2 高周波強力超音波照射により誘起された屈折率勾配に対し、入射位置を変化させたレーザー光の光強度分布のシミュレーション条件

超音波照射によって誘起される屈折率勾配は、実験で得られたデータを基に、2次元ガウス関数としてモデル化した。そして作成した屈折率勾配モデルをもとに、水・ガラス・空気の境界を考慮した光線追跡シミュレーションを行った(図2)。光線追跡シミュレーションでは、レーザー光が水中を通過し、ガラス壁を抜けて空气中に到達するまでの一連の光路を追跡し、スクリーン上に到達する位置のレーザー光の軌跡変化(レーザー光の偏向量: Δd)を算出した。その結果、屈折率勾配モデルの形状を最適化することで、レーザー光の偏向量が最大で約69 mmに達することが示され、これは実験で観測された偏向量とよく一致した(図3)。この光線追跡シミュレーションの結果は、構築した屈折率勾配モデルの妥当性を示すものであると同時に、本手法により超音波照射によって生じる屈折率勾配の空間的構造を視覚的・定量的に再現可能であることを意味している。すなわち、本モデル

を用いることで、従来は定性的な観察にとどまっていた超音波照射によって誘起される屈折率変化現象を、数値的に可視化・解析することが可能となった。

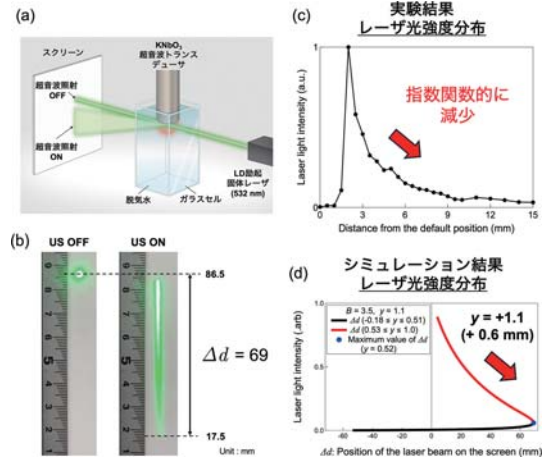


図3 (a) レーザ光の軌跡変化を評価するための実験系 (b) 高周波強力超音波照射の有無によるスクリーン上に投影されたレーザー光の変化 (c) 実験により得られた屈折率勾配を通過後のレーザー光の光強度分布の変化 (d) シミュレーションにより得られた屈折率勾配を透過後のレーザー光の光強度分布の変化

2. 超音波照射によって誘起される屈折率変化の物理メカニズム解明とナノバブルの特性評価

超音波照射により液体中にどのような物理的变化が生じ、それが屈折率変化とどのように関係しているのかを明らかにすることは、本研究の重要な課題である。そこで高速度カメラを用いて高コントラスト比での撮影を行い、屈折率変化現象の観測を行った。その結果、図4(a)より超音波照射によって誘起された屈折率変化領域と同じ位置で輝度変化が生じ、その後、超音波照射を継続した結果、図4(b)より超音波トランスデューサ表面付近で、多数のマイクロバブルが形成される様子が観測された。以上のことから、超音波照射によって誘起される屈折率変化には音響キャビテーション、特にナノバブルが関与していると考えた。そこで動的光散乱法(DLS)を用いて、高周波強力超音波照射によって超純水中で生成されたナノバブルの粒径分布を評価した。実験ではKNbO₃圧電薄膜

を用いて作製した超音波トランスデューサによって高周波強力超音波を水中に照射した。測定サンプルとして、ガラスセル内に超純水を注入し、高周波強力超音波（周波数：160 MHz、入力電圧：101 V_{pp}）を60秒間連続で照射した。そして超音波照射を合計50サイクル繰り返し行い、各サイクルにてガラスセル内で発生したナノバブルの粒径分布をDLSシステムで測定した。その結果、高周波強力超音波照射によって、平均粒径が100 nm程度のナノバブルの形成が確認できた。さらに超音波照射のサイクル数の増加に伴って、平均粒径が増大していく傾向が観測された（図4c）。以上より、高周波強力超音波照射のサイクル数の増加によって、より大きなナノバブルが生成される可能性が示唆された。

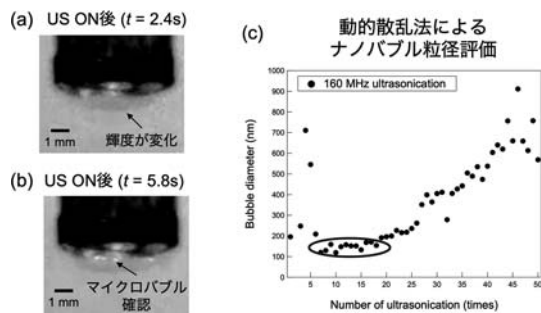


図4 高周波強力超音波照射後（ $t=0$ s）に、超音波トランスデューサ表面付近にて観察された高周波キャビテーションの撮影写真（a: $t=2.4$ s, b: $t=5.8$ s）（c）高周波強力超音波照射（周波数：160 MHz、入力電圧：101 V_{pp}）のサイクル数（50サイクル）と測定サンプル中のナノバブルの平均粒径の関係

こちらの理由としては、現時点では第2ビヤークネス力によるナノバブル間の凝集または合体が影響している可能性について考えている。

さらに超音波照射によって発生したナノバブルの安定性を評価するため、ゼータ電位、溶存酸素量（DO）等の測定を行った。これらの評価は、バブルの表面特性や周囲環境との相互作用を把握する上で重要である。まずゼータ電位の測定結果では、超音波照射後のサンプル内の微粒子（ナノバブル）のゼータ電位は -10 から -30 mV の範囲で分布し、またその平均値は -25.2 mV であった（図5）。一般的にナノ

バブルは -10 から -50 mV 程度の負の電荷を帯び、液体中で安定的に存在していることが知られており、今回の測定値はその範囲内にあることから、本実験で発生したナノバブルが高い安定性を有している可能性が示唆された。

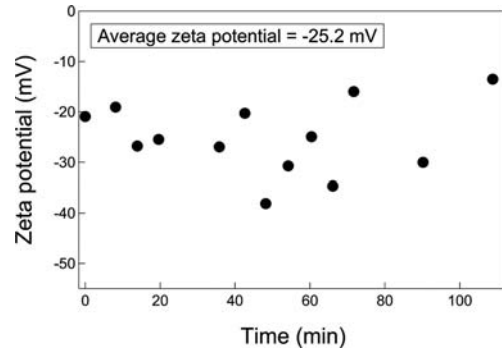


図5 超音波照射（超音波周波数：160 MHz、入力電圧：101 V_{pp}）を50サイクル実施後に測定したサンプル内の微粒子（ナノバブル）のゼータ電位の経時変化

次に溶存酸素量（DO）の測定においては、超音波照射のサイクル数の増加に伴い、DO値が減少する傾向が確認された。この傾向は、上述の超音波照射の平均粒径の増大と同様に、生成されたナノバブルやマイクロバブルが凝集または合体によって、より大きなバブルとなり、それらが水面から大気中に放出されることで、DO値が減少したと考えている。

3. 有効媒質近似モデルによるナノバブル体積分率の算出

超音波トランスデューサ表面付近のナノバブル密度分布を求めるために、Bruggemanの有効媒質近似（EMA）モデルを適用して屈折率勾配モデルから見かけの体積分率を算出した。同モデルを用いることで光線追跡シミュレーションによって得られた屈折率勾配モデルから、超音波トランスデューサ表面付近に分布するナノバブルの体積分率を推定することが可能となる。具体的には、光線追跡シミュレーションにより得られた屈折率変化モデル $n(x, y)$ を誘電率変化モデル $\varepsilon(x, y)$ へと変換し、その後、Bruggemanモデルを利用して、体積分率

モデル $f_b(x, y)$ へと変換することで、各座標におけるナノバブルの局所的な体積分率を導出した。解析の結果、屈折率変化が最大となる位置 ($\Delta n=0.04$) における見かけの体積分率は 0.12 であった。また算出したナノバブル体積分率分布の幅は、屈折率変化の観測結果と比較してやや狭いという結果が得られたが、これは用いた屈折率勾配モデルが 2 次元ガウス関数に基づいているためと考えられる。以上より、屈折率変化モデルと有効媒質近似モデルを用いることで体積分率を 2 次元モデル化し、屈折率変化分布とナノバブル密度分布の空間的対応関係を評価することができた。

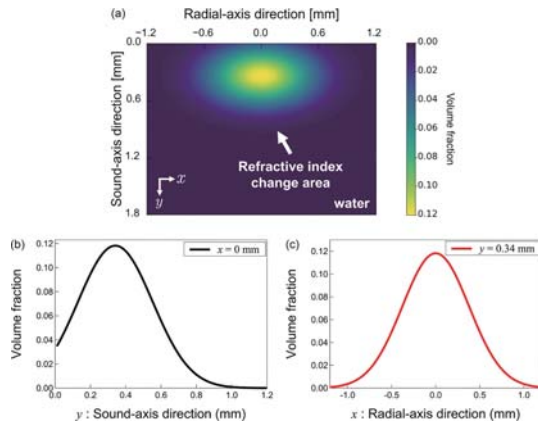


図6 (a) 有効媒質近似 (EMA) を用いて算出したナノバブルの見かけの体積分率分布 (b) $x=0$ mm における超音波伝搬方向の見かけ体積分率の変化 (c) $y=0.34$ mm における超音波トランスデューサの半径方向の見かけの体積分率の変化

4. 円環形状の KNbO_3 圧電材料の作製

小型可変焦点光流体レンズの開発に向けて、円環形状の圧電材料を作製した。圧電材料の成膜方法としては水熱合成法を採用した。オートクレーブ内に (100)c Nb-SrTiO₃ 基板を設置し、240℃で処理することで、厚さ数 10 μm 程度の KNbO_3 圧電薄膜を基板上に成膜した。その後、UV レーザマーカを利用して成膜した KNbO_3 圧電材料を円環形状に加工した。以上より、小型可変焦点光流体レンズの基盤となる円環形状圧電材料の作製に成功した。

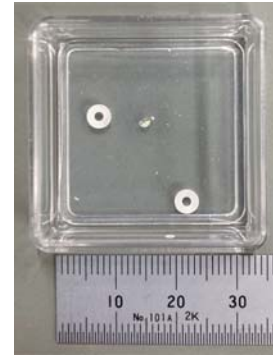


図7 水熱合成法で成膜した KNbO_3 圧電薄膜を円環形状に加工した試料の写真

[まとめと今後の展望]

本研究では、高周波強力超音波照射によって液体中に生じる屈折率変化を小型光流体レンズとして応用するため、その物理メカニズムの解明とデバイス構築の基礎検討を行った。まず光線追跡シミュレーションにより、超音波照射によって誘起される屈折率勾配がレーザー光の偏向に与える影響を定量的に評価し、実験結果と良好な一致を示した。次にナノバブルの生成が屈折率変化と関係する可能性に着目し、動的光散乱法やゼータ電位・溶存酸素量の測定を通じて、ナノバブルの粒径やその安定性を評価した。さらに有効媒質近似モデルを適用することで、屈折率変化モデルからナノバブル体積分率分布を算出し、両者の空間的対応関係を明確に示した。加えて、小型光流体レンズの基盤となる円環形状の KNbO_3 圧電材料を、水熱合成法および UV レーザ加工によって試作し、その加工に成功した。今後は、さらなるモデルの高度化、三次元的な屈折率制御、異なる液体媒体や周囲環境条件における性能評価を行う。そして将来的に開発する小型可変焦点光流体レンズは、機械的可動部を有しない光学デバイスとして、マシンビジョンをはじめとする広範な分野への展開が期待される。

[成果の発表, 論文など]

【学術雑誌 (査読あり)】

1. **Y. Harada**, M. Ishikawa, M. Matsukawa, D. Koyama, Ultrasonically induced microscopic refractive index gradient and the relationship with high-frequency ultrasonic cavitation, J. Appl. Phys., 137, Issue. 11, p. 113102 (2025).
2. **Y. Harada**, M. Ishikawa, Y. Kuroda, M. Matsukawa, D. Koyama, Simulation of light propagation in medium with an ultrasonically induced refractive index gradient, J. Appl. Phys., Vol. 135, Issue. 19, p. 193104 (2024).

【国際学会】

1. **Y. Harada**, M. Ishikawa, M. Matsukawa, D. Koyama, Refractive Index Change and Nanobubble Cluster Induced by 100-Megahertz-Range, High-Intensity Ultrasonic Irradiation, 2024 IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control joint Symposium (2024.9)
2. **Y. Harada**, M. Ishikawa, Y. Kuroda, M. Matsukawa, D. Koyama, Light Propagation in a Refractive Index Gradient Induced by High-Intensity Ultrasound in the

100-Megahertz Range, 21st International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications (2024.7)

【国内学会】

1. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, 100 MHz 帯の高強度超音波によって誘起される不均一屈折率場中の光伝搬解析, 2024 年第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (2024.9)
2. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, 高周波強力超音波照射によって誘起される屈折率変化とナノバブル密度分布の関係, 日本音響学会第 152 回 (2024 年秋季) 研究発表会 (2024.9)
3. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, 高周波強力超音波による屈折率制御技術と超音波光デバイスへの展開, 弾性波素子技術コンソーシアム研究会 (2024.8)
4. **原田裕生**, 石河睦生, 松川真美, 小山大介, VHF 帯域の強力超音波照射によって誘起される屈折率勾配中の光伝搬シミュレーション, 電子情報通信学会超音波研究会 (2024.6)