

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 17 日現在

機関番号：32651

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04028

研究課題名（和文）アダプティブ・フォノニック・メタ構造を用いた超音波収束システムの基礎設計

研究課題名（英文）Fundamental design of ultrasound focusing system using adaptive phononic metastructure

研究代表者

植田 毅（UETA, Tsuyoshi）

東京慈恵会医科大学・医学部・教授

研究者番号：30251185

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：頭蓋骨の外部から照射する超音波を経頭蓋で脳内の移動する焦点に即時的適宜的に集束させるフォノニックレンズの基礎研究を行ってきた。当初、音響ホログラフィーを用いてレンズを構成するインピーダンスの異なる物質の分布を有限要素法により決定した。しかし、構造の最適化、適時的にすることが困難であるため、頭部を覆う水様物質内に気泡を配列することにより音響レンズ構成することとした。気泡を点状散乱体としてモデル化し、頭蓋内の焦点では音場が極大となり、それ以外では0になるように散乱体の最適配置を決定し、進行方向の垂直な方向に回折限界、進行方向にその2倍程度に集束できるレンズが実現可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波平面波を頭蓋骨内に集束させるレンズは音響ホログラフィーの原理を用いて設計、製作され、集束特性が調べられていた。このレンズでは、頭蓋骨形状、焦点位置によりレンズを作り直す必要があった。本研究では、任意形状の頭蓋骨、移動する焦点に対して適時的に焦点を結ぶレンズを提案し、十分な機能を実現できることを示した。泡を適切に配列することでレンズとして機能させ得ること、その配列の最適化に用いる目的関数の定義、高速な音場の計算法の開発など学術的意義は大きい。得られた成果は脳梗塞の解消のみならず、近年精力的に研究されている超音波による脳刺激によるアルツハイマー病の治療にも応用でき、社会的波及効果も大きい。

研究成果の概要（英文）：Fundamental research on a phononic lens that instantly and appropriately focuses an ultrasonic plane wave emitted from the outside of the skull at a moving focal point in the brain transcranially has been performed. Initially, I determined the distribution of materials with different impedances composing the lens using acoustic holography by the finite element method. Since it is difficult to optimize the structure of such a system instantly, however, we decided to construct a phononic lens by arranging bubbles in the water-like substance that covers the head. A bubble is modeled as a point-like scatterer, and the optimum arrangement of the scatterer is determined so that the sound field becomes maximum at the focal point in the skull and 0 elsewhere. It was shown that it is possible to realize a lens that can focus up to the diffraction limit in the direction perpendicular to the incident direction of ultrasonic waves and up to about twice of the limit in the incident direction.

研究分野：メタマテリアル

キーワード：フォノニックレンズ 点状散乱体 配置最適化 経頭蓋 クロスバースイッチ 積分方程式法 有限要素解析

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

脳梗塞に対する処置は、血栓溶解薬である組織プラスミノゲンアクチベーターを発症後 3 時間以内に静脈内投することにはほぼ限られる。低出力近赤外線レーザー照射 LLLT (low level laser therapy) に創傷治癒の促進、炎症・浮腫の軽減、末梢神経痛の軽減効果があることが知られていることから、防衛医大の研究グループが経頭蓋 LLLT によって脳梗塞に対する治療開始時間が発症 24 時間に延長できる可能性の基礎研究を行っている。その結果、経頭蓋 LLLT はマウス局所脳血流を上昇させ得ること、中枢神経系を活性化させる可能性があること、虚血再灌流障害に対して神経保護作用があること等が示されている。そのため、経頭蓋 LLLT は脳循環の基礎的、臨床的研究の手法として期待されている。近赤外線は比較的深達性が高く、頭皮に照射して、大脳皮質に到達する。しかしながら、大脳皮質より深い部分には到達しない。他方、急性期の脳梗塞の非侵襲的治療法として、血栓溶解剤の効果を促進するために、投与に加えて閉塞部位に経頭蓋的に超音波を照射する方法が有効とされている。超音波は脳深部まで到達可能で、適用範囲が広く、臨床応用が期待される。しかし、頭蓋内での超音波の干渉により脳にダメージを与えることが問題となっている。

2. 研究の目的

頭蓋および脳内組織をもフォノンニック構造として取り込むことにより、脳内での干渉を起こさせることなく必要な範囲に特異的に刺激に十分な強度の超音波を集中させるシステムを設計する。フォノンニック構造が生体内の変化にリアルタイムに対応し、変形するリアルタイムアダプティブ性を実現する。近年、アリゾナ州立大学の William Tyler が率いる研究チームが外部から多数の脳回路を刺激できる「経頭蓋パルス超音波」を開発している。しかしながら、日本人の高齢者では側頭骨の超音波透過性が低いと指摘されており、対策が必要である。本研究では頭蓋骨をフォノンニック構造とすることで超音波の波動性を用いて透過させることを試みるものである。

超音波を収束させる技術は、光を制御するためのフォトニック結晶のアナロジーとして 2000 年前後から研究され始めたフォノンニック構造を用いる。図 1(a)はフォノンニック構造を用いたアコースティック・レンズの例である。体外のフォノンニック構造は MEMS 技術を用いてマイクロチューブを作製し、そのチューブで頭部全体を覆うようなメッシュ構造を作製する (図 1(b))。図 2 のようにチューブ内に液体金属を注入し、その金属液滴の位置を制御することによりフォノンニック構造をリアルタイムにアダプティブに変形させる。また、頭蓋骨もポーラス構造であり、超音波の局在、反射が起こりやすい。そこで、頭蓋骨、脳などの生体組織も MRI データを元にフォノンニック構造として繰り返し、最適な 3 次元的なフォノンニック構造を設計する。

3. 研究の方法

当初の研究計画における研究方法

- ・これまで電磁波について、ランダムレーザー、ミミズや青色の野鳥ルリビタキの構造色の解明のため複雑なフォトニック構造の周りの電磁場解析を行ってきた。特に、円柱状物体をクローキングする (散乱波をなくす) 周辺誘電体構造をレベルセット法を用いたトポロジカル最適化により決定した。シンガポールの研究グループが 3D プリンタを用いてテフロンでその決定した構造を作製し、実際に散乱波が極めて小さくなることを実験的に確認した。この経験から、電磁波のカーペット・クローキングのように、頭部にベールのようなフォノンニック構造で覆い、その構造をリアルタイムで制御、変化させることにより、医療的に脳を刺激するのに理想的な超音波場分布を実現できると考えている。2 次元的に質量分布している有限の厚さの板に超音波を照射した場合の音場を波動場解析ソフトを用いて解析し、超音波に対するアコースティックレンズ効果を確認し、計算メッシュと計算精度を確認する。同時に MRI 画像を質量密度分布に変換する手法を開発する。

この段階で、テキサス A&M 大学の亀岡遵教授に、直径数百 μm のマイクロ流路系にガリウムなどの液体金属を注入し、インク・ジェット・エンジンの原理を用いてチューブ内の気体を制御することにより、液体金属液滴の位置を制御する技術を開発を依頼する。

- ・市販波動場解析ソフトにレベルセット法を用いたトポロジカル最適化プログラムを実装し、平面超音波の入射に対し、指定した超音波場を実現する最適な質量分を計算可能にする。

この段階で、テキサス A&M 大学の亀岡遵教授に、マイクロ流路系内の液体金属液滴の制御の高精度化、高速化を図りつつ、マイクロ流路系を用いて 2D、あるいは 3D のメッシュを製作する手法の開発を依頼する。

- ・体外のマイクロ・チューブ・メッシュ (マイクロ流路系) の計算モデルの 3 次元化、頭部質量部分をフォノンニック構造として取り込み、頭蓋内の超音波の分布を計算する。トポロジカル最適化によりマイクロ・チューブ・メッシュ内の金属液滴の最適な配置を決定する。

この段階で、マイクロ流路系アダプティブフォノンニックレンズと超音波発信器を頭部超音波ファントム模型に装着し、計算で得られた金属液滴の配置を実現し、模型頭部内の超音波場の分布を測定し、理論計算と比較する。

予備実験として、テキサス A&M 大学の亀岡遵教授に依頼し、マイクロ流路を作成し、その中に

液体金属（ガリステン）を注入，金属格子を作製し，そのレンズ特性測定を岡山大学大学院の鶴田健二教授に依頼した。また，境界要素法を用いた数値的解析を名古屋大学大学院工学研究科の高橋徹准教授に依頼した。その結果，数値計算と実験結果は良好な一致を見たが，表面張力の影響でマイクロ流路に液体金属を注入するのが極めて困難で，内部での液滴として位置を制御することは不可能であることが分かった。他方，ポーラス構造の物体による超音波の反射特性の解析において，水中の小さな泡でも非常に強く超音波を反射することが明らかとなった。また，頭蓋骨内に焦点を設定し，頭蓋外から平面超音波（参照波）を入射させた場合の音響ホログラフィーによりデザインした音響レンズの構造は極めて細かくなることが分かった。

これらの知見から，頭部を（エコー検査時のゼリーのような）水様の物質で覆い，その中にクロスバースイッチなどを用いて適時，適所に非常に小さな泡を発生させることにより音響レンズ構成するように方針を変更した。

空気の泡を点状散乱体としてモデル化し，点状散乱体は頭蓋外の設計領域に正方格子上に置くものとして，各格子点に散乱体があるかないかによりレンズを構成する。音場を記述するダイソン方程式を近似的に解く計算法を開発する。散乱体の配置は計算した音場強度が頭蓋内の焦点では極大となり，それ以外の点では0になるように目的関数を定義し，モンテカルロ法を用いて目的関数が最小化するように最適化する。

当初は頭蓋骨を円形でモデル化し，点状散乱体の配置の集束特性を調べ，その後，より現実的なCTデータを用いたモデルにより集束特性を調べる。

4. 研究成果

- 本研究のキーポイントはPDMSで作製したマイクロ流路に液体金属を適切に配置し，音響レンズを構成することである。PDMSの吸収による超音波の減衰の懸念があったが，6月時点で，Texas A&M UniversityのKameoka教授の協力でマイクロ流路を作製し，岡山大学の鶴田健二教授の協力により，PDMS膜1枚による減衰は，測定精度の範囲内では無視できる程度（10%以内）であることが確認できた。

- トポロジー最適化による音響レンズの数値計算の実績のある名古屋大学大学院機械システム工学専攻の松本敏郎教授の研究室との共同研究で，マイクロ流路内に液体金属を配置するという拘束条件の下で液体金属の配置を試みる計算を行った。液体金属の形状を流路に沿った円柱状に制限した場合，流路内での変形を許す場合でのレンズの最適形状を決定した。その形状を用いて，暫定的にPDMSロッドに金属塗装する方法によりデバイスを作成した。レンズ効果の測定依頼をしているが，デバイスが小さすぎるために測定方法を検討中である。また，松本研究室による数値計算法の改良により，レンズによる集束強度をこれまでの2倍とすることに成功している。更に，最適化の初期形状として，フネレルレンズ形状を用いることにより最適化計算の集束を加速することができた。

- メッシュ状のマイクロ流路に液体金属を適切に分布させることにより音響レンズを構築するために，マイクロ流路内という制約の下，指定の位置に焦点を結ぶような液体金属の配置を決定する。これは散乱体である液体金属のトポロジーを最適に設計する最適設計問題と捉えることができる。この最適化問題を解くためには3次元音響波動散乱問題を解くことが必要となるが，その解法として境界要素法を採用し，設計対象の表面形状をレベルセット関数（LSF）の等値面として表現し（レベルセット法），トポロジー導関数を熱源とする熱方程式に従ってLSFを決定する手法（随伴変数法に基づくトポロジー最適化手法）を用いた。これまでの研究では，固定設計領域を単一もしくは複数の直方体として扱っており，本研究が想定するようなマイクロチューブあるいはより一般の複雑な形状の固定設計領域を扱うことはできなかった。本研究では，生成すべき境界メッシュの品質向上に留意しつつ，任意形状の固定設計領域に対応し得るトポロジー最適化システムの構築を試みた。その結果，既存のトポロジー最適化手法を基として，固定設計領域の任意形状化および境界メッシュの良質化を実現した。前者に関しては有限要素法ソルバーに四面体一次要素を導入することにより，後者に関してはquadric edge collapse decimation法（QECD法）とLoop surface subdivision法（LSS法）の併用することにより行った。開発した最適化システムを用いて，特定の観測点群において音圧を最大化するトポロジー最適化問題を解いたところ，目的関数を約2倍大きくすることができた。この際，LSS法とQECD法の寄与について考察し，併用の効果を示した。

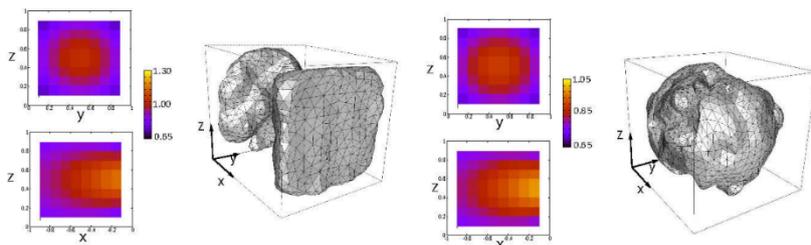


Fig. 5: Sound pressure u around the observation points and the optimal shape for the cubic (left) and spherical (right) design domains.

- 先行研究において，固定設計領域を単一もしくは複数の直方体とした際のトポロジー最適化システムを構築し，簡単な数値実験を行うことでシステムの有用性が確認されている。また，固

定設計領域を任意形状に拡張したトポロジー最適化システムを構築し、本研究が想定するようなマイクロチューブあるいはより一般の複雑な形状の固定設計領域を扱うことを可能にした。しかし、これまで、固定設計領域を構築する際、一点の音圧を上げるための明確な指標がないために、一点に正確に照射できておらず、また、ステップあたりの目的関数（音圧）の増加率が小さいといった問題点があり、これらは医療への応用上、致命的であった。そこで、既存のトポロジー最適化手法を基として、固定設計領域の構築手法の提案を行った。その構築手法を用いて、特定の点における音圧を最大化するトポロジー最適化問題を解き、目的関数を約 19 倍大きくできることを確認した。さらに、複数の目的点における音圧増加も可能であることを示した。

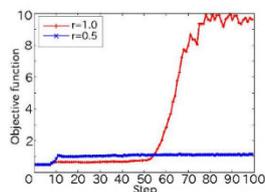


Fig. 6: History of objective function (Left) and Sound pressure distribution at optimal shape (Right).

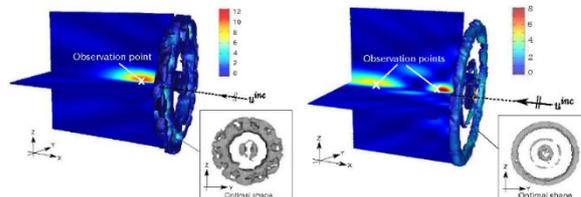
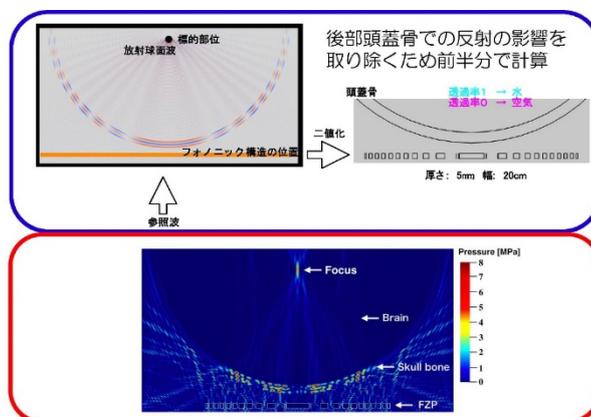


Fig. 7: Sound pressure distribution in the case of bifocal.

・頭蓋骨、脳組織もフォノンニック構造と考え、外部から超音波の平面波を入射させたときに、頭蓋内で焦点のみに大きな音場強度をもつ音響レンズ (FZP) を設計し、その性能を評価した。また、FZP を構成する物質や構造、構成方法についても検討した。外界、レンズ構成部材 (デバイス)、頭蓋骨、頭蓋内組織 (脳) を 1 次元の多層系とモデル化し、波動方程式および境界条件より各層の転送行列を求め、合成転送行列から超音波の透過スペクトルを求める。頭蓋骨の外部は水に近い特性を持つ物質 (水と表現する) で取り囲み、媒質を水-頭蓋骨-脳とした場合は透過率が明らかに大きく、最低でも 20% が透過し、共鳴幅も非常に広がるので共鳴部分の周波数を用いることが考えられる。このことから、空気のあるなしで超音波の透過を十分制御でき、FZP を構成する材料は空気とすることが適切であると確認した。また、音響ホログラフィー技術のアナロジーを用いて経頭蓋焦点レンズを設計した。焦点に集束する波の時間反転を考え、頭蓋内の焦点に点音源を置き、球面超音波を放射させ、頭蓋骨を通り抜けた超音波と遠方から伝播する超音波の平面波との FZP を置く位置での干渉パターンを 2 値化し、FZP を設計した。作成した FZP に向けて入射させ、頭蓋内部、周辺部の音場を解析し、脳の中心近傍では十分な集束特性を示すこと明らかにした。



・適時適所的に微細な気泡を発生させることにより、アダプティブな経頭蓋フォノンニックレンズを実現できることを示し、微小気泡を点状散乱体として、その配置を頭蓋内の焦点で音場が極大になり、それ以外の頭蓋内では音場が小さくなるように散乱体の最適配を決定できることを示した。

・点状散乱体を長方形領域に正方格子上に配列したフネル型波動レンズを提案し、設定した任意の焦点に対して最適な散乱体の配置を決定する方法を示した。ホログラフィーを用いて、焦点からの放射波と入射平面波との干渉の強度を 2 値化することにより初期配置を決定した。焦点以外の全ての点での波動強度を 0 とし、焦点では波動強度が凸になるという条件を目的関数とすることを提案した。目的関数の変化に対し、モンテカルロ法を用いて、選ばれた格子点上の散乱体の存在を反転させる過程を繰り返すことにより配置を最適化した。最適化により得られた散乱体の配置は入射平面波の集束特性を大きく改善した。提案手法は実用的な波長に対しても、現実的な計算時間で配置を最適化できた。

・これまで、レンズを構成する点状散乱体の配置最適化の初期状態をホログラフィーにより生成したもの (holo) を用いていたが、散乱体を配置しないもの (0)、散乱体をランダムに配置するもの (ran)、全ての格子点状に散乱体を配置したもの (vmax) の 4 種の初期配置に対して配置最

適化を行い、初期に散乱体を全く配置していない場合が最も早く目的関数が収束し、収束の状態が安定しており、どの初期状態であっても収束した散乱体の配置はほぼ同じ配置となっていることを確認した。散乱体を並べる格子の入射方向の層数を5, 10, 15と変化させて解析を行った。その結果、層数に対して収束までのループ数は層数にほとんど依存しないが、目的関数の収束値は層数にほぼ比例して減少する。焦点周辺での場の強度は層数には依存しないが、焦点でのピーク値は層数にほぼ比例することが分かった。

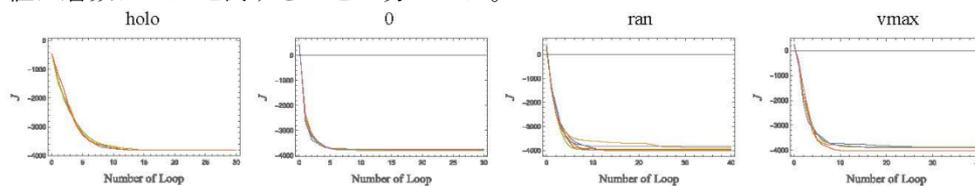


Figure 2 Variation in convergence of the objective function on the initial configuration of scatterers.

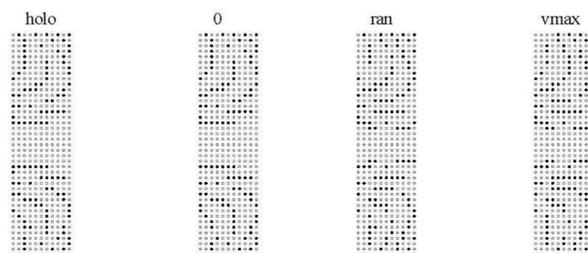
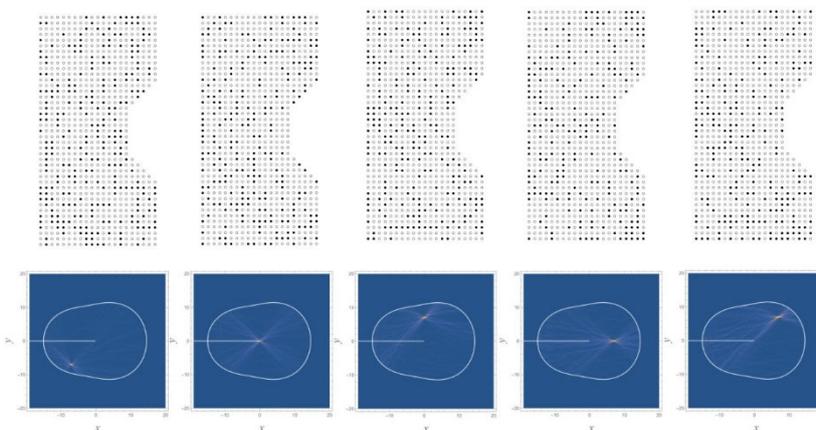


Figure 3 The final configurations for each initial condition

・これまで、頭蓋骨は考慮されていなかったが、頭蓋骨を円形、楕円形、CTデータをもとにした頭蓋骨の輪郭、それぞれに散乱体を配置したものとしてモデル化することにより、頭蓋内の様々な点で入射方向に垂直方向には回折限界まで集束することを確認した。

・超音波の入射方向に垂直方向には回折限界まで集束できていたが、入射方向にはビームスポットの半値幅がその5倍に達していた。それを改善するために、部分的に点状散乱体を配置する設計領域を頭部を部分的に覆うように設定し、散乱体を配置した。これにより、焦点が頭蓋内のどこにあっても入射方向のビームスポットの半値幅が横方向の2倍程度までに小さくできることを示した。



本研究では頭部を水様物質で覆い、その中に微小泡を適時的に適切な位置に配列させることで、脳内を移動する対象物を追尾しながら超音波を照射することを可能とする超音波レンズの実現性を示した。

我が国では高齢化が進むに伴い、アルツハイマー病を発症する患者は2025年には700万人に達すると推計されている。従来、アルツハイマー病は神経系の病ととらえられてきたが、脳の毛細血管におけるアミロイドβの沈着による動脈硬化によるもので、弱超音波により脳血管を刺激することによりアミロイドβを排出するとの知見が得られ、第3段階の治験に入ろうとしている。しかし、脳刺激には既存の装置が用いられており、刺激に用いる音場は最適化されていない。本研究の成果は脳内を一樣に刺激するという目的にも適用できるため、アルツハイマー病の有効な治療法への応用も期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ueta Tsuyoshi	4. 巻 132
2. 論文標題 Design concept verification for a transcranial acoustic lens with instantaneous adaptability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 144504 ~ 144504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0101875	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 植田 毅	4. 巻 35
2. 論文標題 部分的に頭部を覆った点状散乱体配列経頭蓋音響集束デバイスの特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第35回計算力学講演会 (CMD2022) 講演論文集	6. 最初と最後の頁 179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmecmd.2022.35.179	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 植田 毅	4. 巻 22-50
2. 論文標題 点状散乱体配置最適化経頭蓋音響レンズの収束および集束特性の 頭蓋骨形状依存性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 第14回最適化シンポジウム2022 (OPTIS2022) 講演論文集	6. 最初と最後の頁 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tsuyoshi Ueta	4. 巻 2022
2. 論文標題 Intracranial Acoustic Field Optimization of a Point-Like-Scatterers-Arrayed Transcranial Lens	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 WCCM-APCOM 2022 book of abstracts	6. 最初と最後の頁 1861
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 植田 毅	4. 巻 22
2. 論文標題 横波ベクトル場の点状散乱体による散乱問題の近似解法 - 定式化 -	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 31 - 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 植田 毅	4. 巻 34
2. 論文標題 点状散乱体レンズの配列最適化における初期状態依存性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 第34回計算力学講演会 (CMD2021) 講演論文集	6. 最初と最後の頁 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmecmd.2021.34.059	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 植田 毅	4. 巻 21
2. 論文標題 経頭蓋点状散乱体配列レンズの頭蓋内音場最適化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 63 - 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 植田毅	4. 巻 25
2. 論文標題 点状散乱体の配置の最適化によるフネルレンズ設計	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計算工学講演会論文集	6. 最初と最後の頁 c-10-04
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Itoga and T. Ueta	4. 巻 2020
2. 論文標題 Fundamental Design of Multi-Layer Fresnel Zone Plates as Ultrasonic Lens for Transcranial Treatment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 Fourteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)	6. 最初と最後の頁 030-032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/Metamaterials49557.2020.9285139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ITOGA Hibiki, UETA Tsuyoshi	4. 巻 2019.32
2. 論文標題 Fundamental Design of Acoustic Lens for Treatment of Cerebral Infarction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Proceedings of The Computational Mechanics Conference	6. 最初と最後の頁 219 ~ 219
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmecmd.2019.32.219	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 SAITO Yuri, TAKAHASHI Toru, UETA Tsuyoshi, ISAKARI Hiroshi, MATSUMOTO Toshiro	4. 巻 2019.32
2. 論文標題 Research on Ultrasonic Focusing System using Topology Optimization with reference to Fresnel Zone Plate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Proceedings of The Computational Mechanics Conference	6. 最初と最後の頁 228 ~ 228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jsmecmd.2019.32.228	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 齋藤優里, 安藤 真, 荒上祐一, 高橋 徹, 植田 毅, 飯盛浩司, 松本敏郎	4. 巻 31
2. 論文標題 超音波収束を用いた脳梗塞医療を援用するためのトポロジー最適化システムの開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計算力学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 223-226
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Tsuyoshi Ueta
2. 発表標題 Intracranial Acoustic Field Optimization of a Point-Like-Scatterers-Arrayed Transcranial Lens
3. 学会等名 WCCM-APCOM 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植田 毅
2. 発表標題 点状散乱体配置最適化経頭蓋音響レンズの収束および集束特性の 頭蓋骨形状依存性
3. 学会等名 日本機械学会第 14 回最適化シンポジウム 2022 (OPTIS2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植田 毅
2. 発表標題 部分的に頭部を覆った点状散乱体配列経頭蓋音響集束デバイスの特性
3. 学会等名 日本機械学会第 35 回計算力学講演会 (CMD2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植田 毅
2. 発表標題 横波ベクトル場の点状散乱体による散乱問題の近似解法 - 定式化 -
3. 学会等名 計算数理工学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 植田 毅
2. 発表標題 点状散乱体レンズの配列最適化における初期状態依存性
3. 学会等名 第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植田 毅
2. 発表標題 経頭蓋点状散乱体配列レンズの頭蓋内音場最適化
3. 学会等名 計算数理工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Itoga and T. Ueta
2. 発表標題 Fundamental Design of Multi-Layer Fresnel Zone Plates as Ultrasonic Lens for Transcranial Treatment
3. 学会等名 2020 Fourteenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hibiki ITOGA, Tsuyoshi UETA
2. 発表標題 The Fundamental Design of an Adaptive Ultrasonic Lens by Means of Phononic Meta-Structures -Application of Multi-Focus Fresnel Zone Plates Designed by Holographic Technique
3. 学会等名 ICMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuri SAITO, Makoto ANDO, Yuichi ARAKAMI, Toru TAKAHASHI, Tsuyoshi UETA, Hiroshi ISAKARI, Toshiro MATSUMOTO
2. 発表標題 Development of An Ultrasonic Focusing System to Assist Cerebral Infarction Treatment Using Topology Optimization
3. 学会等名 ICMAT 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 植田 毅, 糸賀 響, 齋藤優里, 安藤 真, 荒上祐一, 高橋 徹, 飯盛浩司, 松本敏郎, Kameoka Jun
2. 発表標題 経頭蓋脳血栓溶解に向けたアダプティブ超音波集束システムの基礎設計
3. 学会等名 第136回成医学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 糸賀響、植田毅
2. 発表標題 脳血栓の治療に向けた音響レンズの基礎的設計
3. 学会等名 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤優里、高橋徹、植田毅、飯盛浩司、松本敏郎
2. 発表標題 フレネルゾーンプレートを参照とするトポロジー最適化を用いた超音波集束に関する研究
3. 学会等名 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤優里, 安藤 真, 荒上祐一, 高橋 徹, 植田 毅, 飯盛浩司, 松本敏郎
2. 発表標題 超音波収束を用いた脳梗塞医療を援用するためのトポロジー最適化システムの開発
3. 学会等名 第 31 回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri SAITO, Makoto ANDO, Yuichi ARAKAMI, Toru TAKAHASHI, Tsuyoshi UETA, Hiroshi ISAKARI, Toshiro MATSUMOTO
2. 発表標題 Development of An Ultrasonic Focusing System to Assist Cerebral Infarction Treatment Using Topology Optimization
3. 学会等名 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hibiki ITOA, Tsuyoshi UETA
2. 発表標題 The Fundamental Design of an Adaptive Ultrasonic lens by Means of Phononic MetaStructures Application of MultiFocus Fresnel lenses Designed by Holographic Technique
3. 学会等名 10th International Conference on Materials for Advanced Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------