

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11848

研究課題名(和文)ダブル・ネガティブ型音響メタマテリアル複合材料に関する計算科学的研究

研究課題名(英文)Computer simulation of double-negative acoustic metamaterial composites

研究代表者

寺尾 貴道(Terao, Takamichi)

岐阜大学・工学部・教授

研究者番号：40271647

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：音響メタマテリアルは、質量密度と弾性率という2種類の物性値の片方、あるいは両方が負の値を示すような人工材料であり、その特異な物理的性質が注目されている。特に、両者が共に負の場合はダブル・ネガティブ・メタマテリアル(DN)と呼ばれる。音響メタマテリアルと通常の弾性体の組み合わせからなるメタマテリアル複合材料に関して、弾性波の伝搬特性を計算機シミュレーションの立場から明らかにした。具体的には、音響メタマテリアルを含む周期的多層膜、準周期多層膜における弾性波伝播特性について定量的に明らかにした。また、ランダム・メタマテリアル複合材料に適した計算機シミュレーション手法の開発も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題ではランダム・メタマテリアルという新たな観点から、メタマテリアル複合材料に関する物理的特性について明らかにした。具体的には、ダブル・ネガティブ型メタマテリアルを用いた複合材料に関して、特定の振動数領域近傍において透過率が高い値を示す、という現象を見出している。また、材料の特性において周波数分散が顕著であるというメタマテリアルの特徴的性質に適した、独自の大規模計算機シミュレーション手法の開発に成功している。一連の研究は、機械工学や音響学などの分野とも関連が深い内容であり、階層的かつ高度な性能を有するメタマテリアル複合材料の開発、また今後の工業的応用に発展する事が期待される。

研究成果の概要(英文)：The properties of acoustic metamaterial composites were investigated by computer simulations. The investigation of double-negative (DN) acoustic metamaterials for, among other things, achieving acoustic damping and the suppression of the localization of waves in acoustic systems constitutes an interesting field of study. Vibrational waves in random systems containing double-negative acoustic metamaterials were investigated. In the localization of waves in acoustic metamaterial multilayers with thickness disorder, it was observed that the participation number becomes very large inside the DN band near the characteristic frequency where the effective mass approaches zero. For acoustic metamaterial multilayers following the Fibonacci sequence, the frequency dependence of their transmittance was numerically investigated. In addition, an eigenmode analysis of random metamaterial composites was performed using the self-consistent finite-difference frequency-domain method.

研究分野：計算物理学

キーワード：メタマテリアル 大規模数値シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

メタマテリアルは、天然の物質には存在しない物理的特性が出現する、人工的に作製された材料の総称である。メタマテリアルにおいては、人工的にマイクロなスケールで作られた内部構造を反映して、特異な物理的性質を示す。具体的には、電磁メタマテリアルにおいては誘電率と透磁率、音響メタマテリアルにおいては弾性率と質量密度というマクロな物性パラメータが複雑な周波数依存性を有する。本研究課題では、新規な音響メタマテリアル複合材料の性能高度化に関して、計算科学の立場から研究を行った。弾性波の性質をより自由自在に制御する事により、新たな物理現象およびその応用の開拓を行う事を目的とした。

音響メタマテリアルにおいて、材料の弾性率と有効質量密度の中で、片方のみが負となるものは「シングル・ネガティブ(SN)系」、両方が同時に負となるものは「ダブル・ネガティブ(DN)系」と呼ばれる。従来の研究においては、主に前者のSN系に基づく複合材料の研究が行われてきた。SN系においては、特定の振動数近傍における弾性波の減衰が強く、「遮音・制震」という観点からは実用上有効である。ただし、弾性波の伝搬を利用したデバイス応用という点には向いておらず、この様な関連分野への展開は今のところ限定的である。それに対してDN系音響メタマテリアルにおいては、弾性波デバイスや通信技術への適用などより幅広い応用が期待される。本研究課題では上記の観点から、主にDN系メタマテリアル系に関する弾性波伝搬特性について明らかにした。また関連する話題として、メタマテリアル複合材料の研究に適した独自の数値シミュレーション手法の開発を行った。

2. 研究の目的

音響メタマテリアルにおける弾性波の特異な伝搬特性は、電磁メタマテリアルにおける電磁波の振舞いと類似性が指摘されており、興味深い研究対象である。音響メタマテリアルでは、有効質量密度と有効体積弾性率が重要な役割を果たす。これらの特性のいずれかが負の場合、音響メタマテリアルはSN系として働く。このような材料の音響特性は、理論モデルの解析などを通じて研究されてきた。SN系音響メタマテリアルは、共振周波数付近の振動励起を強く吸収する。このような材料は振動減衰に有用であるが、他の工業的用途は限定される可能性がある。上記の観点から、複合材料の研究においてDN系音響メタマテリアルの導入を行い、その物理的性質について明らかにする事は興味深い。この問題に関連して、音響メタマテリアルに基づく格子力学モデルにおいて、ある周波数領域内で有効質量密度と有効弾性率が同時に負になる事が示されている。

音響メタマテリアル複合材料における代表的な事例として、通常材料と音響メタマテリアルが交互に配置された多層膜系に関して、その動的応答の性質と工学的応用が注目されている。この分野における既存の研究では、周期的な構造を有する系についての報告がなされている。しかし実際のメタマテリアルでは、様々な原因によって引き起こされる系の乱れが、波動伝播特性に影響を与える事が考えられる。この問題に関して、ランダム・メタマテリアルのような非周期的な構造を持つ系については、系統的な研究が未だ十分に行われていなかった。過去の研究により、ランダム・メタマテリアルにおける波の局在現象は、通常材料におけるそれとは性質が異なることが示唆されている。しかし、音響メタマテリアル複合材料におけるランダム性と、それに起因する波動現象の特性については未だ研究されていなかった。

過去のメタマテリアル多層膜の研究においては、系に周期境界条件を課して無限に長い周期多層膜を理論的に扱い、例えばその分散関係やバンドギャップについて調べる、というアプローチが存在した。この様にして行われる数値計算は、理論的な知見を簡潔に得る上では有効な手段ではあるが、実験的に研究されている現実の系においては、多層膜を構成する層の個数は有限個である場合に限定される。上記の観点から、DN系音響メタマテリアルを含む有限多層膜系の解析を行った。

3. 研究の方法

(1) Self-consistent FDFD 法の開発

本研究課題では、メタマテリアル複合材料に適した計算手法の開発を行った。以下では、電磁メタマテリアルを例として説明を行う。メタマテリアルにおいては、系の誘電率や透磁率が共に周波数依存性を有する為、その電磁場を解析する上では分散性媒質(dispersive media)としての取り扱いが必須となる。このような系における物理量の時間依存性は、一般に畳み込み積分として表される。実際にこのような畳み込み積分を直接計算しようとすると、過去の時刻における電場の

情報を全て記憶しておく事が必要となるが、これは事実上不可能であるため、本問題の取り扱いに適した計算手法が要求される。この様な問題を FDTD 法で取り扱うための代表的な解法の一つとして、piecewise-linear recursive convolution(PLRC)法が挙げられる。また、その他の代表的な解法としては、補助微分方程式を導入した手法である auxiliary differential equation method が知られている (ADE-FDTD 法)。誘電率の周波数依存性に関する関数形が上記に列挙した以外の場合でも、Padé 近似の手法を導入する事によって、より一般的な周波数分散を有する系の問題を扱うという試みもなされている。実際のメタマテリアルにおいては、一般に分散性媒質の特性 (周波数依存性) が複雑な関数形に従う可能性がある。

本研究課題では、周波数領域解法から出発して任意の周波数分散を有する材料を扱う計算手法について開発を行った。本研究において開発した計算方法を、従来の FDFD 法と区別する為に Self-consistent FDFD 法と呼ぶ。Self-consistent FDFD 法における実際の計算においては、波の性質を調べたい周波数領域における複数の周波数 $\bar{f} = \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_m$ において、メタマテリアルにおける物性値の値を考慮した FDFD 法に基づく固有値解析を行った。得られた固有値から算出された周波数 f が $f = \bar{f}$ を満たす場合に、出発点である固有値方程式における解として求められる。

(2) Restart tempering 法の開発

本研究課題では、ランダム・メタマテリアル複合材料の最適化を行うために、Restart tempering 法 (RT 法) という最適化手法を提案した。従来の最適化手法では、複雑なエネルギー地形で局所最小値に捕らわれやすく、最適解を見つけるのが困難であった。本研究においてはこの問題を解決するために、RT 法という独自の手法を開発した。この手法では、システムの温度を 3 つの異なる値 (低温 T_l 、中間温度 T_m 、高温 T_h) として周期的に変化させる。具体的には、まず低温で局所最小値を探索する。次に、中間温度でエネルギー障壁を越えるための探索を行い、その後に高温でさらに遠い状態へ遷移して新たな解を探索する。このプロセスを繰り返すことで、複雑なエネルギー地形を効率的に探索し、コスト関数を最小化することが可能となる。実際の計算では、256個のブロックから構成される系を取り上げ、A ブロックと B ブロックをランダムに配置し、3 つの異なる方法 (シングルフリップ、マルチプルフリップ、クラスターフリップ) によって状態更新を行いながら最適化計算を実施した。計算結果は、提案手法が従来の手法に比べて局所極小値への捕捉される程度が少なく、効率的に逆問題としての良い近似解が得られる事を実証した。RT 法を用いる事により、他の最適化手法と比較して計算資源を効率良く活用可能となる事が期待される。

4. 研究成果

本研究課題を遂行して得られた主な研究成果は、下記における (1) ~ (5) の通りである。

(1) ダブル・ネガティブ音響メタマテリアル多層膜に関する研究

音響メタマテリアルにおいては、材料の性質を決定する上で有効質量密度と有効体積弾性率が重要な役割を果たす。SN 系音響メタマテリアルは、共振周波数付近の振動励起を強く吸収する特性がある。一方、材料の有効質量密度と有効体積弾性率の両方が負である場合、ダブル・ネガティブ (DN) 系音響メタマテリアルと呼ばれる。音響メタマテリアルに関する多くの研究は、周期的な構造を持つ系については報告されているが、ランダム・メタマテリアルのような非周期的な構造を持つ系については、未だ十分に研究されていなかった。通常材料に関しては、波動伝播特性における系のランダム性の影響は広く研究されてきた。ランダム・メタマテリアル系における波の局在においては、通常材料におけるそれとは異なる性質が出現する事が予想される。

電磁メタマテリアルの研究では、 ϵ -ニアゼロ材料 (ENZ) が大きな注目を集めている。この性質を利用することで、波の位相分布を操作することが可能となる。本研究では、DN 系音響メタマテリアルと通常材料で構成されたランダム多層膜系について研究を行った。一般に、音響メタマテリアルの有効質量密度と有効体積弾性率は周波数に依存し、有効質量密度がゼロに近い周波数領域の音響メタマテリアルは質量ニアゼロ材料 (MNZ) と呼ばれる。音響メタマテリアルにおける MNZ 系は、電磁メタマテリアルにおける ENZ 系と似た振る舞いを示す事が期待される。これらの問題に対応して、音響メタマテリアル多層膜における層厚乱れの影響に関する研究を行った。上記の観点から、DN 系音響メタマテリアルで構成された無秩序多層膜における、波の局在に関する性質について定量的に明らかにした。層厚に関する不規則性を有する音響メタマテリアル多層膜における波の局在を解析するために、Participation number (PN) という物理量を用いた。PN は、有効質量がゼロに近づく特徴的な周波数近くで非常に大きな値を示す事が確認された。

また、フィボナッチ系をはじめとした準周期系における、音響メタマテリアル多層系の透過率に関する、数値的に明らかにした。これらの準周期系においては、透過率の振動数依存性に多

数の特徴的なピークや多くの dip が現われており、上記のランダム・メタマテリアルの場合とは異なる結果が得られた。また、ランダム・メタマテリアルにおいて見出された「PN が、有効質量がゼロに近づく特徴的な周波数近くで非常に大きくなる」という現象について、準周期系メタマテリアル複合材料においても同様に成立しているか否か、という点について検証を行った。

(2) メタマテリアル複合材料に適した、大規模数値シミュレーション手法の開発

本研究では、任意の周波数分散を有するメタマテリアル複合材料の解析に適した、数値シミュレーション手法の開発を行った。その具体的な適用例として、無限長のメタマテリアル・ロッドを2次元的に配置し、Self-consistent FDFD 法を用いたモード解析を行った。これらのロッドは正方格子の格子点からずれた位置にランダムに置かれており、系全体で25本のロッドが配置されていると設定した。解析においてはスーパーセル法を用いて、周期境界条件を適用した。Self-consistent FDFD 法による固有モード解析を行い、得られた固有周波数をプロットした。計算においては空間を 1000×1000 に分割し、 $10^6 \times 10^6$ の行列を扱った。行列要素の大部分がゼロとなる疎行列に対して、implicitly restarted Arnoldi (IRA) 法を用いて固有値解析を実施した。IRA 法の基礎となる Arnoldi 法は、Krylov 部分空間に基づく方法であり、大規模疎行列の固有値計算に適している。この方法において、特に内部固有値を求める必要がある場合には、原点シフト(スペクトル変換)を行う事が不可欠となる。また、計算を効率化するためにリスタート法を併用している。一連の手法を適用する事により、FDFD 法による大規模疎行列の固有値解析を行う事に成功した。計算結果から、固有周波数に対応する固有モードの詳細について明らかにした。

(3) 分散性媒質における一般化平面波展開法の開発

平面波展開(PWE)法はフォトニック結晶の研究に広く用いられてきた。この計算方法は誘電率が周波数に依存しない事、また透磁率が真空の透磁率で一定である事を前提としている。その為、誘電率と透磁率が座標と周波数の関数となるメタマテリアルには適用が困難であり、新たな計算手法が必要となる。このような事情は、音響メタマテリアルとフォノン結晶の数値研究を行う際にも同様に問題となる。本研究課題ではこの問題に対処するために、独自の計算手法として一般化平面波展開法(G-PWE)を提案した。電磁メタマテリアルの場合、G-PWE 法では材料の物性定数(比誘電率と比透磁率)に関する空間フーリエ展開を行い、系の磁場に関しても平面波展開を行う。これにより、マックスウェル方程式から得られる関係式を一般化固有値問題として定式化する事が可能となる。しかし、この一般固有値問題の行列要素自体に周波数が含まれるため、単純な固有値問題に対する計算手法は適用できない。この問題を解決する為、上記の一般化固有値問題を標準固有値問題に変換する事により、元の一般固有値問題を解くための手法を提案した。この方法により、メタマテリアル・フォトニック結晶の電磁波の伝搬特性を解析することが容易となった。上記の G-PWE 法の有用性を示すために、メタマテリアル球体を面心立方格子に周期的に配置した場合の電磁波伝搬特性の解析を行った。その結果、用いる平面波の個数に関して結果が収束する事が確認され、G-PWE 法が信頼性の高い手法であることが示された。この手法により、従来の PWE 法では対応が困難であったメタマテリアルの周波数依存性を考慮した解析が可能となり、計算技術の観点から大きな進展をもたらすことが期待される。

(4) カイラル・メタマテリアル複合材料に関する研究

本研究代表者は今までに、メタマテリアルにおける数値的研究において有限差分・周波数領域解法(Finite-difference frequency-domain(FDFD)法)を用いた研究を行い、その手法が有効であることを示してきた。FDFD 法は、有限差分・時間領域解法(Finite-difference time-domain(FDTD)法)とは異なり大規模行列固有値解析を行う事が必須となるが、周波数解像度が高い、分散性媒質を扱う上で有利である、という長所が存在する。FDFD 法や FDTD 法で空間的な離散化を行う上では、Yee-cell を採用して計算を行うのが最もよく行われる手法である。しかし、カイラル・メタマテリアルの場合はその基礎方程式の性質上、従来の Yee-cell をそのまま採用して計算を行うのが困難であり、別の方法で空間的な離散化を行う必要がある。本研究では、カイラル・メタマテリアルに適した別の離散化手法を採用して、FDFD 法に基づく計算を行うソフトウェアの開発を行った。また、カイラル・メタマテリアル多層膜に関して本計算手法の適用を行い、その有効性について実証した。

(5) Seismic metamaterials が関与する問題における数値シミュレーション

弾性波の伝搬特性制御に関する応用事例の一つとして、Seismic metamaterials の問題が挙げられる。近年行われているメタマテリアル系の計算機シミュレーションに基づく研究においては、標準的な数値解析手法の一つとして COMSOL などの商用ソフトウェアを用いた有限要素法(FEM)解析が広く行われている。しかし、Seismic metamaterials に関する過去の実験研究に対応する理論研究を行う上では、弾性体に対する別のアプローチにより大規模シミュレーションを行

う必要性が考えられる。本研究ではこの観点から、地震学の世界で提唱されていた格子モデル（Sato モデル）を採用する事により、Seismic metamaterials が関与する系における弾性波の伝搬特性について、数値的に明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Terao Takamichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Anomaly detection for structural formation analysis by autoencoders: application to soft matters	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Philosophical Magazine	6. 最初と最後の頁 2013 ~ 2028
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/14786435.2023.2251408	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 Terao Takamichi	4. 巻 2023
2. 論文標題 Numerical method for the inverse design of three-component metamaterial multilayers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics	6. 最初と最後の頁 1569 ~ 1570
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 Komori Kouhei, Terao Takamichi	4. 巻 825
2. 論文標題 Cluster-size distribution of ions in concentrated aqueous NaCl solutions: Molecular dynamics simulations	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chemical Physics Letters	6. 最初と最後の頁 140627 ~ 140627
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cplett.2023.140627	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 Terao Takamichi	4. 巻 444
2. 論文標題 Eigenstates in gain-loss systems of metallic-mean quasiperiodic chains	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physica D: Nonlinear Phenomena	6. 最初と最後の頁 133612 ~ 133612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physd.2022.133612	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 Terao Takamichi	4. 巻 in press
2. 論文標題 Localization of waves in double-negative acoustic metamaterial multilayers with thickness disorder	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Waves in Random and Complex Media	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/17455030.2023.2173501	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 Terao Takamichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Numerical methods for design of metamaterial photonic crystals and random metamaterials	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 EPJ Applied Metamaterials	6. 最初と最後の頁 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjam/2021012	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 Terao Takamichi	4. 巻 103
2. 論文標題 Eigenvalue analysis of the three-dimensional tight-binding model with non-Hermitian disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 224201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/physrevb.103.224201	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 Terao Takamichi	4. 巻 32
2. 論文標題 Semi-supervised learning for the study of structural formation in colloidal systems via image recognition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 325901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648x/abfee4	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 T. Terao	4. 巻 2021
2. 論文標題 Numerical analysis of metamaterial photonic crystals with positional disorder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 15th international congress on artificial materials for novel wave phenomena	6. 最初と最後の頁 X-432
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 Terao T.	4. 巻 2020
2. 論文標題 Wave Propagation in Double-Negative Acoustic Metamaterial Multilayers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of 14th international congress on artificial materials for novel wave phenomena	6. 最初と最後の頁 418-420
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/Metamaterials49557.2020.9285090	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 Terao Takamichi	4. 巻 119
2. 論文標題 Anomalous microion distribution of concentrated electrolytes in the underscreening regime: Monte Carlo simulations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Molecular Physics	6. 最初と最後の頁 e1831634
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00268976.2020.1831634	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 Terao Takamichi	4. 巻 18
2. 論文標題 A machine learning approach to analyze the structural formation of soft matter via image recognition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soft Materials	6. 最初と最後の頁 215 ~ 227
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/1539445X.2020.1715433	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 寺尾貴道
2. 発表標題 制約された空間におけるコア - シェル粒子系の構造形成
3. 学会等名 第37回分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Komori and T. Terao
2. 発表標題 Molecular dynamics simulations of highly concentrated electrolytes
3. 学会等名 The 7th International Soft Matter Conference (ISMC2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Terao
2. 発表標題 Numerical method for the inverse design of three-component metamaterial Multilayers
3. 学会等名 13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics (META 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Terao
2. 発表標題 Machine learning for structure identification of colloidal systems
3. 学会等名 Nagoya workshop on molecular simulations of soft matters 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Terao
2. 発表標題 Monte Carlo simulation of charged colloids in concentrated electrolytes
3. 学会等名 17th Conference of the International Association of Colloid and Interface Scientists (IACIS 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川凌央、寺尾貴道
2. 発表標題 マイクロゲル粒子系における秩序形成
3. 学会等名 第73回コロナおよび界面化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川凌央、寺尾貴道
2. 発表標題 マイクロゲル粒子系に関する分子動力学シミュレーション
3. 学会等名 第36回分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Terao
2. 発表標題 Numerical Analysis of Metamaterial Photonic Crystals with Positional Disorder
3. 学会等名 15th international congress on artificial materials for novel wave phenomena (Metamaterials 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石黒敬悟, 小川凌央, 成瀬暉隼, 寺尾貴道
2. 発表標題 マイクロゲル粒子系における構造形成
3. 学会等名 第35回分子シミュレーション討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takamichi Terao
2. 発表標題 Wave propagation in double-negative acoustic metamaterial multilayers
3. 学会等名 14th international congress on artificial materials for novel wave phenomena (Metamaterials 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺尾 貴道
2. 発表標題 Patchy 粒子系における凝集シミュレーション
3. 学会等名 第71 回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 共著	4. 発行年 2022年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 508
3. 書名 メタマテリアルの設計、作製と新材料、デバイス開発への応用	

〔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
---------	---------