

Development and quantitative interpretation of acoustic and phoxonic metamaterial devices from kHz to GHz frequencies

kHz から GHz 周波数帯の音響メタマテリアルデバイスの開発と定量的解釈

課題番号：19H05619

Oliver B. Wright

北海道大学・大学院工学研究院・教授



研究の概要

音響メタマテリアル顕微鏡、水と空気間で音を透過させるメタサーフェス、軽くて単一素材からなる等帯域マルチモード防振メタピラーやメタプレート、ダブルネガティブ板波メタプレートなど、kHz 帯から GHz 帯における音響メタマテリアルと phoxonic メタマテリアルデバイスを開発し、その定量的な解釈を行うことで、メタマテリアルにおける新しい領域を開拓する。

研究分野：音響メタマテリアル

キーワード：音、メタマテリアル、フォノン、電磁波、プラズモン、メタサーフェス

1. 研究開始当初の背景

波の波長よりも小さな局所共鳴人工構造を持つ自然界には見られない媒質であるメタマテリアルは、物理学、材料科学および技術に新しい可能性をもたらす。例えば電磁メタマテリアルは、負の透磁率をもたらすスプリットリングや、負の誘電率をもたらす I 字型の電線からなる媒質によって作られる。音響メタマテリアルは、しばしば負の体積弾性率や負の密度を示す。

2. 研究の目的

本研究では、シングルネガティブ音響メタマテリアルで波が減衰する現象を、振動を閉じ込める応用に利用する。また、ダブルネガティブ音響メタマテリアルによって回折限界以下の小さな領域に音響波を収束させる。音響透過率の増幅を、波長以下のサイズの小さな開口を共鳴させる異常透過現象や、音響インピーダンスが大きく違う媒質間の間にインピーダンス整合のための小さなメタアトムを入れる方法によって達成する。kHz から GHz 帯の周波数の音響メタマテリアルや、phoxonic (同時に photonic 光学的かつ phononic 音響的な) メタマテリアルデバイスの開発とその定量的な解釈を行う。

3. 研究の方法

本研究では、空気中の音響メタマテリアルの異常透過現象 (Extraordinary Acoustic Transmission, EAT) に基づく走査型音響顕微鏡や、音響インピーダンスが合わない媒質間、特に空気と水の間に音波を効果的に透過

させるメタサーフェスを作製する。また、単一の素材に空洞や溝を掘って構成される単純で軽い、広い周波数帯ですべての振動モードを通さない音響メタマテリアルに基づく柱や梁、もしくはダブルネガティブの振る舞いをする板の曲げ振動音響メタマテリアルの開発をする (図 1)。さらに、我々はシリコンや金属誘電体からなる phoxonic メタマテリアルを作製し (図 2)、光学のおよび音響的な分光によってそれらの振る舞いの性質を測定する。

4. これまでの成果

メタマテリアルに基づく音響顕微鏡：音響波の波長よりもはるかに小さい分解能をもつ EAT 音響顕微鏡を開発中である。これはスピーカーを取り付けた筒の先端に直径 1 cm のポリエチレン膜を張った開口を試料に近づけて走査することで近接場音響像を得るものである。空気中の波長 $\lambda = 25$ cm の周波数において横方向の分解能が $\lambda/20$ 、深さ方向の分解能が $\lambda/300$ のイメージを得ている (学術論文準備中)。

さらに、固体内のバルク音響波の EAT を、シミュレーションによって示した [1]。2つのタングステンブロックをつなぐ波長よりも細いタングステンのナノワイヤが GHz 音響メタアトムのように振る舞うことにより、その共振周波数で透過率が増大する。図 1 に示すように、タングステンブロックの表面に同心円状に溝を付けることで、EAT の効率が世界記録の 500 を超えるまで劇的に増大することを示した。出力側にも同心円状に溝

を付けると出力音場が収束するので、イメージングやセンシングへの応用が期待される。

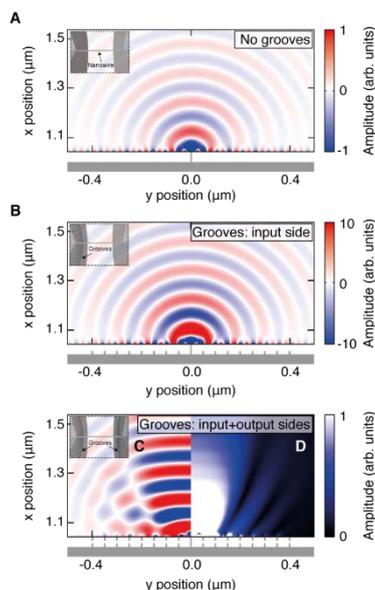


図1 異常音響透過(EAT)のシミュレーションにおいて、3つの構造についてナノワイヤを透過した音場の比較。(A)両側に溝がない場合より、(B)入射側に溝がある場合の方が透過音場が強くなる。さらに(C),(D)出力側にも溝を付けると、音響場が収束する。[1]

水-空気間の音響メタサーフェス：水と空気の間で特定周波数の音を効率的に伝えるメタサーフェスの開発のため、まずは重りとバネを使ってアクリルと空気の間で音を効率的に透過させる構造をテストし、構造がない場合の1000倍以上の透過エネルギー効率を実験で得ている（学術論文準備中）。

広帯域で複数モードの振動を抑制するメタピラーやメタプレート：単一材料からなり、圧縮波、曲げ波、ねじれ波の全てを同一周波数帯でブロックするメタプレート(図2) [3,5] やメタロッドを開発した。防振材としての産業応用を考えた研究を進めている。

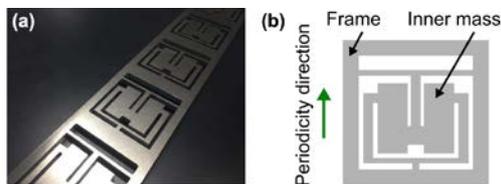


図2 完全バンドギャップをもつ音響メタマテリアル梁(metabeam)の写真(a)と、その単位構造(b)。[2]

GHz 板波メタプレート：厚さ数百 nm のシリコン薄板に、内部にらせん構造をもつ溝を掘った周期数 μm の単位格子を正方格子や三角格子のプリズム状に並べたメタプレートにおいて、シミュレーションで GHz 帯の対称板波 (symmetric Lamb waves) および面内

ずり波について界面で負の屈折やフォノンフォーカシングが起こることを示した（学術論文準備中）。試料も作製して時間分解イメージングの実験も行ったが、計測したい成分が板の面外曲げ振動成分に埋もれてしまい、現時点では計測に成功していない。

Phoxonic メタマテリアル：最初の段階として、シングルネガティブ音響メタマテリアルの性質と、プラズモニック/フォトニック結晶の性質を併せ持つ GHz 音響メタサーフェスの研究を進めている。これは、厚さ 100nm のシリコンナイトライド膜上にポリスチレンビーズを一層並べ、金膜で覆ったものであり、シミュレーションにより特定構造パラメータにおいて音響完全バンドギャップを持つことを確かめてあり、試料を作製中である。

5. 今後の計画

メタマテリアルに基づく走査型音響顕微鏡については、位相イメージも測定可能で、より音響波長が短くなる MHz 帯に発展させる。空気と水間の音響メタサーフェスについては、バネを使った固体と空気間の知見も取り入れより高性能・広帯域なものを開発する。防振のためのメタピラーやメタプレートについては、ゴムを利用してより産業的に重要な 10 Hz 以下の低周波数の防振や、広帯域化の研究を行う。さらに、GHz 音響波と近赤外光について同時に負の屈折率を併せ持つ phoxonic メタマテリアルを探求する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- [1] “Giant extraordinary transmission of acoustic waves through a nanowire,” T. Devaux, H. Tozawa, P. H. Otsuka, S. Mezil, M. Tomoda, O. Matsuda, E. Bok, S. H. Lee, and O. B. Wright, *Sci. Adv.* **6**, 8507 (2020).
- [2] “Basic principles of acoustic metamaterials” (in Japanese), O. B. Wright, O. Matsuda, and M. Tomoda, *Kogaku, Jpn. J. Opt.* **48**, 488 (2019).
- [3] “Perfect acoustic bandgap metabeam based on a quadruple-mode resonator array,” K. Fujita, M. Tomoda, O. B. Wright, and O. Matsuda, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 081905 (2019).
- [4] 応用物理学会 第 14 回 Poster Award (2019 年秋季)「ウェーブマシンによる波動伝搬制御の演示」友田基信、猪野真大、大宮哲、松田理、Wright Oliver
- [5] 電子情報通信学会 超音波研究会 学生研究奨励賞 (2019 年 7 月)「完全バンドギャップをもつ音響メタマテリアル梁の開発」藤田健太郎、友田基信、松田理、ライトオリバ

7. ホームページ等

<http://kino-ap.eng.hokudai.ac.jp/j-index.html>
olly@eng.hokudai.ac.jp