

平成 31 年 4 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05039

研究課題名(和文)メタサーフェスを用いた新機能音響デバイスの最適設計法の開発

研究課題名(英文)Optimum design of functional acoustic devices using the metasurface

研究代表者

山田 崇恭 (Yamada, Takayuki)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：30598222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、新しい機能を持つ革新的な音響デバイスの最適構造の創成設計法の構築を目的として、特異な機能を持ったスマート平面構造、いわゆる音響メタサーフェスのトポロジー最適化法を開発を行った。最初に、音響領域と弾性領域を同時に表現可能な二相材料モデルを開発した。次に、二相材料モデルに対するトポロジー導関数を導出し、その妥当性の検証を行った。

具体的な音響メタサーフェスとして、光と空気を透過しつつも、騒音を遮断する防音壁の設計を行った。また、得られた最適構造に基づいて試作器の製造及び検証実験を行った。その結果、有効な結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

メタサーフェスは、特異な性質を持つ人工表面構造である。所望の特異な特性を持つように、その形状設計を行う場合、勘や物理的考察に基づく試行錯誤を行ったとしても、所望の特性を得ることは極めて困難である。本研究では、所望の音響特性を持つ、メタサーフェスの統一的な設計手法の基盤技術を構築し、その有効性を確認した。すなわち、本研究で構築した手法を用いれば、今までにはなかったような特異な特性を持つ新音響デバイスの創成設計が可能となった。

研究成果の概要(英文)：We proposed topology optimization method for novel acoustic meta-surfaces that is permeable, visible and provides soundproofing characteristics. First, we developed two-phase material model that is a mixture of an elastic material and acoustic medium, to represent an elastic structure and an acoustic cavity by controlling a volume fraction parameter. Second, the topological derivatives for the two-phase material model was derived and the validity was confirmed by using the finite element analysis. Next, the acoustic meta-surfaces were designed by using the level set based topology optimization method. Finally, we demonstrated the utility of the proposed method by the experiments.

研究分野：設計工学，計算力学，デジタルエンジニアリング

キーワード：トポロジー最適化 音響メタマテリアル 音響・構造連成効果 高周波均質化法 高次均質化法 音響メタサーフェス 計算力学 漸近展開法

1. 研究開始当初の背景

異なる材料特性を持つ材料が周期的に配置された平面構造に音波もしくは弾性波が入射すると、特異な物理特性（例えば、負の屈折率など）の実現が可能であることが知られている。この人工的な平面構造は、音響メタサーフェス（図1）と呼ばれ、近年注目を集めつつある。この特異な特性を自由自在に設計できれば、音波を完全に吸収する防音壁の実現、さらには音エネルギーを弾性エネルギーに変換し、圧電素子より電気エネルギーを発生させる「発電型防音壁」の設計も可能となる。しかしながら、これらの現象は、音波や弾性波等の複数の物理現象が複雑に連成する、いわゆるマルチフィジクス問題であるため、所望の機能を持つような形状の設計は極めて困難である。

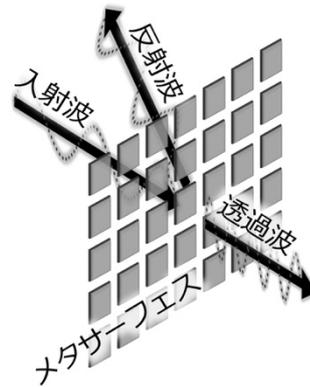


図1 メタサーフェスのイメージ

このような課題を解決する方法として、構造最適化の適用が考えられる。構造最適化は、力学的観点と、数学的観点に基づいて構造物の最適な形状を同定する方法である。中でもトポロジー最適化は、構造の形状だけではなく、孔の数などの形状形態をも変更可能とする最も設計自由度の高い構造最適化手法である。現在、3Dプリンターの普及により、工業製品の新しい設計基盤技術としても注目を集めている。学術界においては、熱、流体、電磁気など、構造力学分野を超えた新しい物理領域への展開や、材料設計法への展開が海外の主要な研究グループから報告されている。このような動向の中、今後のトポロジー最適化の展開が期待される分野は、複数の物理領域の連成を利用したマルチフィジクス問題、異なるスケールを考慮したマルチスケール問題であると考えられる。

一方でトポロジー最適化は、幾何学的に極めて複雑な構造や、外形形状を明示的に表現できないグレースケール（中間領域）を最適設計解として許容しているため、工業製品への展開には多くの問題を抱えている。この問題の解決を目的として、新しい方法論の開発に関する研究も近年、活発に行われている。これに対して研究代表者は、従来法の問題点を抜本的かつ本質的に解決し、最適形状の幾何学的複雑さを設定可能な方法論を世界に先駆けて開発することに成功し、国際的に高い評価を受けている。さらには、構造（図2、図3）、熱流体（図4）、電磁気などの多くの最適設計問題へ展開し、工業製品へ展開可能な方法として注目を集めている。

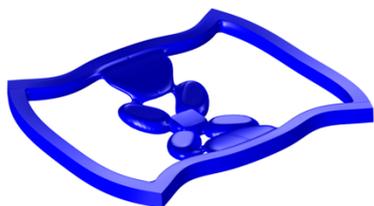


図2 機械式レゾネーターの最適設計解



図3 自動車部品の最適設計

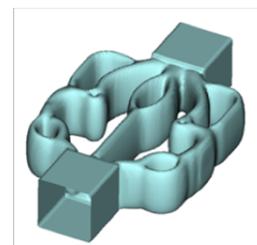


図4 ヒートシンクの最適設計解

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が独自に開発した最適設計理論に基づき、高機能な音響メタサーフェスの最適構造創成設計法の構築を目的とする。これにより、騒音を遮断し、空気と光を透過する新機能防音壁の設計法を開発する。

3. 研究の方法

最初に、音響領域と弾性領域を同時に取扱可能な2相材料モデルを構築した。提案する二相材料モデルの妥当性を検証するとともに、トポロジー最適化において必要となるトポロジー導関数の導出を行った。数値解析により、音響構造連成効果を考慮した場合と2相材料モデルを用いた場合の結果が十分な精度で一致することを確認した。次に、数値差分に基づく近似数値感度とトポロジー導関数が高い精度で一致することを確認した。これらの基盤技術により音響メタサーフェスのトポロジー最適化に必要な基本要素の開発が完了した。さらには、2次元の音響メタサーフェスのトポロジー最適化を試み、広帯域で性能を発揮可能な音響メタサーフェスの創成設計が可能かどうかを検討する。具体的には、複数の物理現象を利用し、周波数帯域毎に適当な現象を発生させ、所望の目的を達成可能な音響メタサーフェスが創成設計可能である

かどうかを調べる。数値計算の結果、所望の結果が得られれば、実験装置を試作し、提案手法及び得られた最適構造の妥当性と有効性を検証する。

4. 研究成果

音響メタサーフェスの試作器を図5に示す。左側の装置は、トポロジー最適化により得られた形状を亚克力材で製造し、等間隔に並べて配置している。右側は、最適化結果の比較用として、最適構造と投影面積が同じになるように平板を製造し、等間隔で並べて配置している。

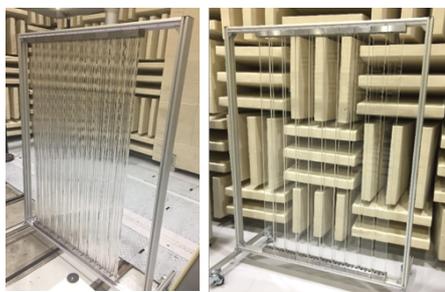


図5 試作器

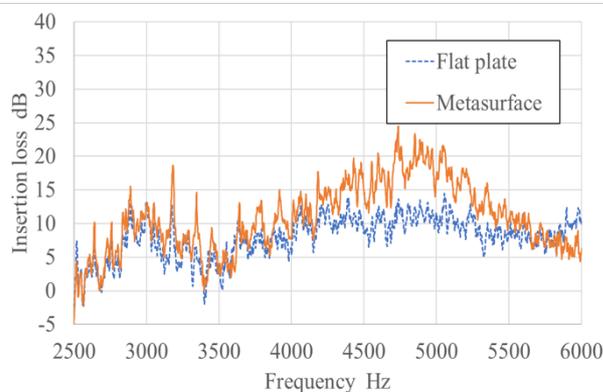


図6 計測結果

この二つの試作器に対して、平面波スピーカーより近似的な平面音波を入射し、透過波の音圧を計測し、挿入損失を調べた。図6に得られた結果を示す。音響メタサーフェスは、平板モデルと比較して、挿入損失が大きく、騒音の低減効果が確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- (1) Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Topology optimization for hyperbolic acoustic metamaterials using a high-frequency homogenization method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.335, No.15, (2018), pp.419-471. Doi: 10.1016/j.cma.2018.02.031
- (2) Miyata, K., Noguchi, Y., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Optimum design of a multi-functional acoustic metasurface using topology optimization based on Zwicker's loudness model, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.331, No.1, (2018), pp.116-137. Doi: 10.1016/j.cma.2017.11.017
- (3) Allaire, G., Yamada, T., Optimization of dispersive coefficients in the homogenization of the wave equation in periodic structures, *Numerische Mathematik*, Vol.140, No.2, (2018), pp.265-326. Doi: 10.1007/s00211-018-0972-4
- (4) Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., A formulation for optimal design problem of compliant displacement magnification mechanisms based on effective energy concept, *Mechanical Engineering Letters*, Vol.3 (2017), p.17-00453. Doi: 10.1299/mel.17-00453
- (5) Noguchi, Y., Yamada, T., Yamamoto, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Topological derivative for an acoustic-elastic coupled system based on two-phase material model, *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 2, (2016), p.16-00246. Doi: 10.1299/mel.16-00246

[学会発表] (計 10 件)

- (1) 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 音響構造連成系における3次元波動変換メタサーフェスの最適設計, 第21回計算工学講演会, 日本計算工学会, 2016年5月31日-6月2日, 新潟, C-10-5.
- (2) 宮田康平, 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, Zwickerのラウドネスモデルに基づ

- く音響構造連成メタサーフェスのトポロジー最適化, 第 29 回計算力学講演会, 日本機械学会, 2016 年 9 月 22 日-24 日, 名古屋, No.112.
- (3) 山田崇恭, Allaire, G., 高次均質化法に基づく非均質周期材料の波動分散特性に関する検討, 第 29 回計算力学講演会, 日本機械学会, 2016 年 9 月 22 日-24 日, 名古屋, No.048.
 - (4) 山田崇恭, Allaire, G., パレート解集合の非凸性及び多峰性を考慮した多目的最適化法による非均質材料の波動分散特性評価, 第 26 回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2016 年 10 月 8 日-10 日, 横浜, No.1301.
 - (5) 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 2 相材料モデルに基づく音響構造連成効果を考慮した音響メタサーフェスのトポロジー最適化, 第 26 回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2016 年 10 月 8 日-10 日, 横浜, No.2317.
 - (6) 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 音響構造連成系における負の質量密度を有する音響メタマテリアルの最適設計, 第 22 回計算工学講演会, 日本計算工学会, 2017 年 5 月 31 日-6 月 2 日, 埼玉, No.F-13-1.
 - (7) Noguchi, Y., Miyata, K., Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S., Level set-based topology optimization for a soundproofing acoustic metasurface using Zwicker's loudness model, 12th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimisation (WCSMO12), June 5-9, 2017, Braunschweig, Germany, No.218.
 - (8) 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 2 相材料モデルに基づく複数材料を用いた音響メタサーフェス設計問題に関する基礎検討, Dynamics and Design Conference 2017, 日本機械学会, 2017 年 8 月 29 日-9 月 1 日, 愛知, No. 413.
 - (9) Yamada, T., Allaire, G., Optimum design of microstructures considering wave dispersion using the high order homogenization method, The 13th World Congress on Computational Mechanics, July 22-27, 2018, New York City, United States of America, 2020984.
 - (10) 野口悠暉, 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 高周波均質化法に基づく異方性音響メタマテリアルのトポロジー最適化, 第 23 回計算工学講演会, 日本計算工学会, 2018 年 6 月 6 日-8 日, 愛知, No.A-01-03.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 石井 智

ローマ字氏名: SATOSHI Ishii

所属研究機関名: 国立研究開発法人物質・材料研究機構

部局名: 国際ナノアーキテクト研究拠点

職名: MANA 研究者

研究者番号 (8 桁): 80704725

研究分担者氏名: 飯盛 浩司

ローマ字氏名: HIROSHI Isakari

所属研究機関名: 名古屋大学

部局名: 工学研究科

職名: 助教

研究者番号 (8 桁): 50638773

研究分担者氏名: 藤井 雅留太

ローマ字氏名: GARUDA Fujii

所属研究機関名: 信州大学

部局名：学術研究院（工学系）

職名：助教

研究者番号（8桁）：90569344

研究分担者氏名：泉井 一浩

ローマ字氏名：KAZUHIRO Izui

所属研究機関名：京都大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：90314228

研究分担者氏名：西脇 眞二

ローマ字氏名：SHINJI Nishiwaki

所属研究機関名：京都大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：10346041

研究分担者氏名：松本 敏郎

ローマ字氏名：Toshiro Matsumoto

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：10209645

(2) 研究協力者

該当なし

※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、研究者個人に帰属されます。