

令和元年6月26日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06624

研究課題名(和文) フォノニック結晶構造を用いた小型軽量音響レンズとクローキング材料の開発

研究課題名(英文) Development of compact lightweight acoustic lens and cloaking material using phononic crystal structure

研究代表者

土屋 健伸 (TSUCHIYA, TAKENOBU)

神奈川大学・工学部・准教授

研究者番号：50291745

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、フォノニック結晶構造による小型音響レンズの更なる高性能化として、間隙媒質をシリコンラバーとした場合の平面音響レンズの基礎特性を数値解析によって確認した。利得および焦点距離、視野角の周波数特性を求めることでレンズの基礎特性を確認した。さらにフォノニック結晶構造を用いたクローキング材を開発するために従来の数値解析手法を高速化した。放物型方程式法と弾性波時間領域差分法を組み合わせた伝搬解析手法を提案した。作成したプログラムの精度を確認するため、基準解が存在する海洋中での伝搬シミュレーションを行うことでプログラムの妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の特色は実用化に向けた平面状音響レンズの設計手法の確立であり、海洋における使用を考慮して小型化に加え装着性を重視している点である。装置重量や大きさに関する最適形状設計は、フォノニック結晶構造を利用するデバイス研究の中でも珍しい発想である。そして平面状レンズ製作を可能とするフォノニック結晶構造が持つ負の屈折率に着目し、新しい概念として音波を集束させるフレキシブルな音響レンズ製作が可能となる事が本研究の独創的な点である。さらに設計時間短縮のため新しい従来法を組み合わせたハイブリッドなシミュレーション技術を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this study, as an improvement of the performance of the acoustic lens with phononic crystal structure, the basic characteristics of the planar acoustic lens when the gap medium is silicone rubber are confirmed by numerical analysis. The characteristics of the lens were confirmed by finding the frequency characteristics of gain and focal length. Furthermore, in order to develop a cloaking material using phononic crystal structure, the conventional numerical analysis method is speed up, and a propagation analysis method combining parabolic equation method and elastic wave time domain difference method is proposed. In order to confirm the accuracy of the created program, the validity of the program was confirmed by performing propagation simulation in the ocean where the standard solution exists.

研究分野：超音波応用計測

キーワード：フォノニック結晶構造 平面音響レンズ シリコンラバー 放物型方程式法 時間領域差分法

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、音響レンズに関する研究が国内外で盛んに行われており、国外で開発した小型の音響レンズを使用した二周波識別用超高分解能音響ビデオカメラ (DIDSON) は国内でも販売されている。一方、国内では周囲雑音を用いたイメージング装置の高効率化に音響レンズの利用が研究されて、さらに、土木工事や湾岸施工物の調査・管理のための濁水中の可視化装置として音響レンズを搭載した高分解能音響カメラも (独) 港湾空港技術研究所にて開発された。我々の研究室では (独) 港湾空港技術研究所と共同研究を行い、その音響カメラに搭載された音響レンズの開発・設計に携わった。

一般に、レンズは焦点位置、利得、許容収差等を設定すれば形状が決定するデバイスで、形状の自由度が極端に少ない。そして、凹型レンズとなる水中音響レンズ装置は大型化してしまうため、出来得る限り稼動時間を延長したい AUV への搭載は困難であった。つまり、小型の音響レンズが作成できれば小型で重量も軽減される優れた音響カメラ装置が開発できる。そこで、我々は、最近になってフォノンニック結晶構造による音響レンズを設計した。さらに縮尺変更した小型の試作レンズを作成して、その性能を確認した。一方、設計したレンズは間隙物質が水のため、外状が固定化されず取り扱いが困難であった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、フォノンニック結晶構造による小型音響レンズの更なる高性能化として間隙媒質を固体またはラバー状の媒質とすることで、外状が固定化された平面音響レンズにすることを考えた。本報告では、間隙媒質をシリコンラバーとした場合の平面音響レンズの基礎特性を数値解析によって確認した。弾性波時間領域差分法を用いて平面音響レンズを通過した音波を解析し、集束音場を求めた。利得および焦点距離、視野角の周波数特性を求めることでレンズの基礎特性を確認し、従来の間隙媒質が水の場合の平面レンズの特性と比較したため、比較的低損失な材質であるシリコンゴムを用いたレンズを設計した。そして、高分解能化のために中心周波数を 3.5MHz とし、その音響的な基礎特性を求めた。

(2) 加えて、フォノンニック結晶構造を用いたクローキング材 (無反射材料) を開発するために従来の数値解析手法を高速化した。水中を伝搬する音波は、一方向前進波動方程式に基づく放物型方程式法で伝搬シミュレーションを行い、フォノンニック結晶構造内は多重反射等を考慮できる弾性波時間領域差分法、フォノンニック結晶構造音響レンズを通過後は、再度、放物型方程式法で伝搬シミュレーションを行う。作成したプログラムの精度を確認するため、最初に基準解が存在する海洋中での伝搬シミュレーションを行うことでプログラムの妥当性を確認した。

3. 研究の方法

(1) フォノンニック結晶構造体によって構成された平面音響レンズの外形図を図 1 に示す。フォノンニック結晶構造体は、規則的に配置された円柱によって構成されている。図 1 においては、三角格子状にステンレス円柱棒 (SUS304 を想定) が配置されている。円柱棒は伝搬方向 z に 9 本、方位方向 x に 90 本配置して構成されており、円柱棒なので解析の際には高さ方向 y は一様として扱っている。三角格子状のフォノンニック結晶構造体の配置は、 $a=0.3\text{ mm}$ 、 $d=0.2\text{ mm}$ とした。(さらにその外側には周囲媒質として水が存在すると仮定した。表 1 に結晶構造体を構成するステンレスおよびシリコンラバー、さらに周囲媒質として水の音響パラメータを示す。限界基本周波数 f_b は、間隙媒質が水の場合 2.5 MHz、シリコンラバーの場合は約 1.7 MHz になる。

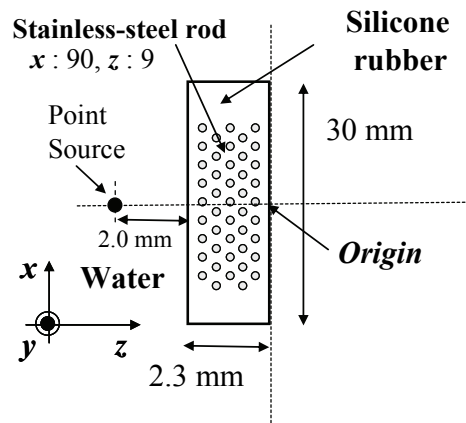


図 1 フォノンニック結晶構造体による平面音響レンズの外形

平面音響レンズの集束音場を解析するために精度が高くパルス波伝搬を容易に解析できる数値解析手法と

して 2 次元弾性波時間領域差分法 (弾性 FDTD 法) を用いて x - z 面の 2 次元解析を行った。各媒質の音響パラメータは表 1 の値を用いた。シリコンラバーの横波音速は非常に小さい横波のためにゼロとした。また各媒質の減衰係数は 0 dB/cm として解析を行った。数値解析上の空間グリッド幅は、縦波音速が最も遅いシリコンラバーでの波長の 1/20 以下である $10\ \mu\text{m}$ とした。点音源をレンズ前面の中央から距離 $z = 2\text{ mm}$ の位置に配置してガウス状の包絡線をもつ 10 波長分のパルス波を送信し、パルス波の中心周波数が 1 MHz から 5 MHz の範囲の集束音場を解析した。

表 1 フォノンニック結晶構造体を構成する素材の音響パラメータ

媒質	音速 [m/s]		密度 [kg/m ³]
	縦波	横波	
ステンレス	5780	3200	7930
シリコン	1000	—	1300
水	1500	—	1000

(2) フォノンニック結晶構造による音波伝搬制御とクローキング材の開発を効率的に行うために開発した音波伝搬解析手法の応用例として海洋内の音波伝搬解析を行って、その計算時間の短縮効果を調べた。新しく提案した手法は、放物型方程式法と時間領域差分法を組み合わせた手法である。時間領域差分法は波動論的な解析手法であり、波動方程式を直接差分化するために精度が高い。しかし、時間領域差分法は計算時間と計算メモリ要求量が多いので計算時間がかかる。そこで、遠距離では波動方程式の遠方境界近似である放物型方程式法で解析し、音源近傍は時間領域差分法で解析するハイブリッド法を構築し、その性能を評価した。提案手法である WE-FDTD 法と PE 法を組み合わせた解析手順について図 2 に示す浅海域伝搬解析モデルを用いて説明する。まず音源近傍での伝搬解析を WE-FDTD 法で行う。拡散損失により振幅が減少し、ある距離以降は各周波数成分を線形場として PE 法で解くことで長距離伝搬を高速かつ省メモリで解析することが可能となる。しかし、PE 法は連続波解析であるために時間領域解析である WE-FDTD 法と直接連結できない。そのため、両手法を連結する距離において深度方向の鉛直アレイ ($\lambda/2$ 間隔) で受波する。受波波形を FFT して、ある一定の周波数 (例えば基本周波数) の振幅と位相を受波アレイの受波点全て求め、深度方向の複素音圧分布を得る。それを PE 法の初期音源として代入することで両手法を連結する。

距離約 100 km、深度数 100 m の浅海での伝搬解析において、解析条件として海底底質をクレイ、シルト、サンドの 3 種類で解析を行った。点音源からは中心周波数 50Hz のガウス状の包絡線をもつ 10 波長分のパルス波を送信した。

4. 研究成果

(1) 間隙媒質をシリコンラバーとした場合の音響レンズの基本特性として集束音場を解析した。周波数を変化させた時のレンズ後方の集束音場を図 3 に示す。図 3 (a) の 2 MHz が入射した場合には、一部、音波が通過しているが、音波がほぼ遮断されて大きく減衰したため、遮断域と判断できる。一方、図 3 (c) の 3.5 MHz が入射した場合には、レンズ後方の音場は乱れており、明確な焦点を形成していないため、レンズとしての集束作用は現れなかった。図 5(b) の 2.8 MHz を入射した場合には、音波が原点から距離約 2.8 mm 地点に集束し、平面形状の音響レンズによって焦点が形成されていることが確認された。

次にフォノンニック結晶構造レンズ効果の確認と性能を把握するため 1 MHz から 5 MHz の周波数特性を解析した。各平面音響レンズの周波数に対する利得 G と焦点距離 f の変化を図 4 に示す。図 4 から間隙媒質がシリコンラバーである平面音響レンズの集束利得は周波数 2.3 MHz で最大値を取るが、この時、焦点距離がレンズ端面でゼロとなっている。また、2.3 MHz 付近の周波数での利得が大きいが、これは、レンズ内の第 1 焦点が、周波数変化によってレンズ第 2 面近傍まで達したために見かけ上、利得が大きくなっているからである。しかし、この時レンズ後方に焦点は形成されていなかったため、レンズ効果のある周波数範囲から外した。レンズ後方に焦点を形成するのは、周波数が 2.5 MHz の時からであり、この時に利得が最大値を取り 23.1dB となった。また、周波数 1.75 MHz

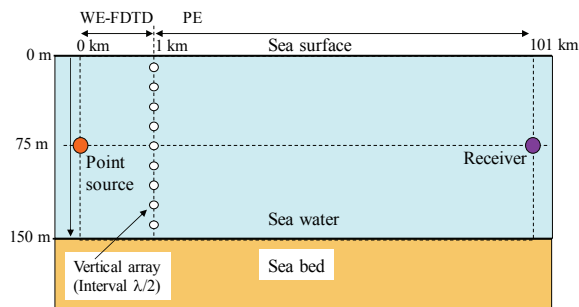


図 2 FDTD 法+PE 法による浅海音波伝搬解析

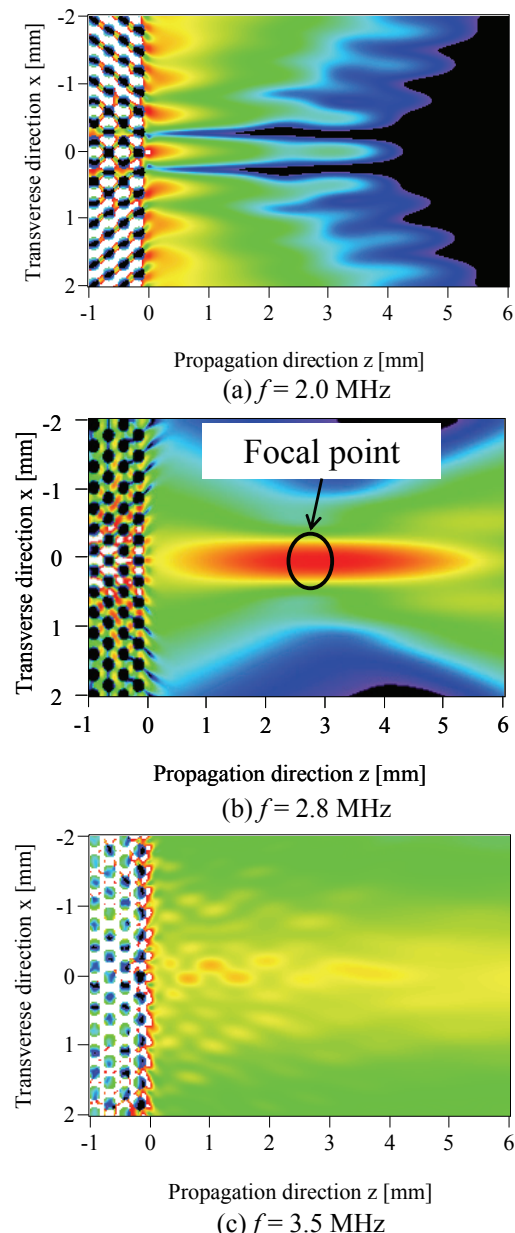


図 3 シリコンラバーとステンレス棒で構成され平面音響レンズによる集束音場の解析結果.

で極小値を取っており、1.5~2.0 MHz が遮断域であることが周波数特性からも分かった。焦点距離は、2.5 MHz で一番短く 0.74mm であり、周波数が高くなると焦点距離は伸びた。3.3 MHz においても焦点の形成は確認されたが、利得は負の値を取っていることからレンズ効果を有さないと言える。以上から、シリコンラバーを間隙媒質とした場合、レンズ効果を有する周波数範囲は 2.5~3.2 MHz 間であることが確認できた。

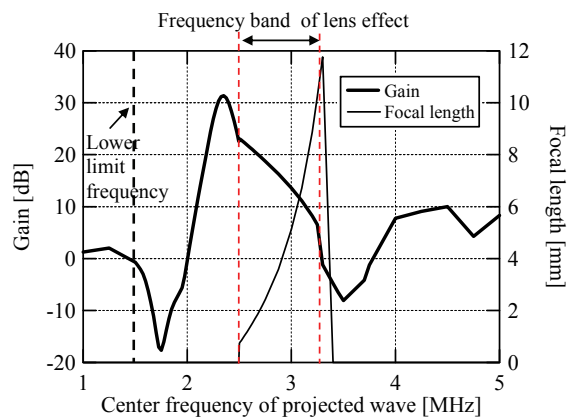


図4 平面音響レンズの周波数に対する利得 G と焦点距離 f_l の変化。

(2) 海底底質がクレイの場合の二次元音圧分布の計算結果を図5に示す。図5 (a)は提案手法による結果、(b)はPE法による結果である。図では1 kmを基点とし、101 kmまでの100 km間を示している。両者を比較すると、大きな差異は見られず、提案手法で正しく解析されたことが分かる。より詳細な比較を行うため、音源深度において距離方向の音圧分布を算出した。音源深度における距離方向の音圧分布を図6に示す。両手法の差異を求めため、距離方向の音圧分布について移動平均を取って差を算出した。提案手法とPE法の差は、平均して1.5 dB程度の差であった。そのため、両手法はほぼ一致したといえる。

海底底質がクレイ、シルト、サンドの3種類の場合について、深度15 m, 75 m, 135mにおける距離方向音圧分布をPE法の結果を基準として差を求めた。PE法と提案手法の音圧差を表2に示す。海底底質がどの場合でも約1.2 ~1.5dBの範囲に収まっていた。さらに深度による違いは少ない。以上のことから、提案手法でも十分精度よく遠距離伝搬した音波の音圧を求めることができた。計算時間は、提案手法が1周波数につき約5分、全領域をWE-FDTD法で計算すると約8時間であるため計算時間を大幅短縮できた。

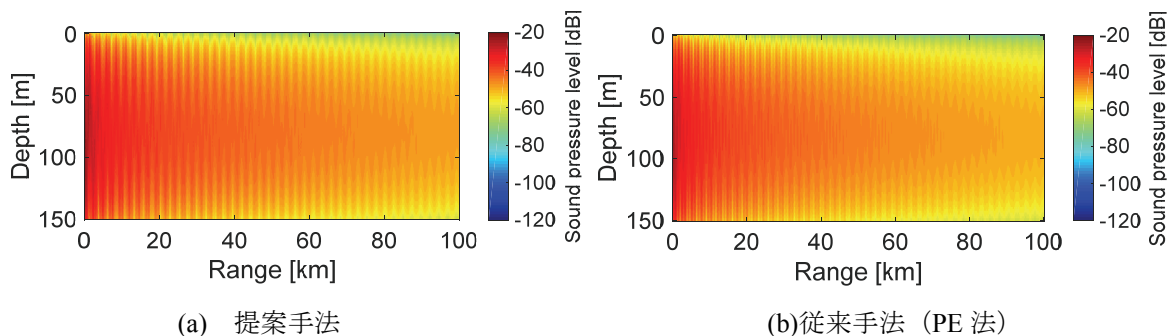


図5 提案手法と従来法 (PE法) の二次元音場分布の計算結果の比較。

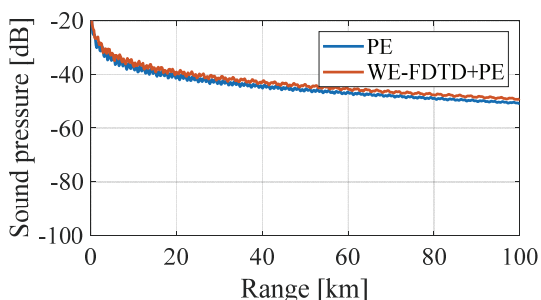


図6 音源深度での提案手法と従来法の音圧分布の比較。

表2 提案手法と従来法 (PE法) の比較。各深度での差

受波深度	海底底質		
	クレイ	シルト	サンド
15 m	1.17	1.39	1.50
75 m	1.19	1.39	1.50
135 m	1.18	1.40	1.51
平均	1.18	1.39	1.51

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- 1) Abukawa Kazuki, Matsumoto Sayuri, Sato Tomoo, Katakura Kageyoshi, Tsuchiya Takenobu, Endoh Nobuyuki, Verification of resolution on self-focusing effect of polarization-inverted transmitter by upchirp signal for subaperture array, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有,

Vol. 57, 2018, 07LG04 DOI: 10.7567/JJAP.57.07LG04

- 2) Kazuyoshi Mori, Hiroyuki Kawahara, Hanako Ogasawara and Takenobu Tsuchiya, Expression with red-green-blue additive color mixing for frequency-dependent targets in the third sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2016, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 57, 2018, 07LG05 DOI: 10.7567/JJAP.57.07LG05
- 3) Kazuyoshi Mori, Hanako Ogasawara, Takenobu Tsuchiya, Nobuyuki Endoh, Data analysis results of the second sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2014: Two-dimensional target images affected by direction of field of view and spatial noise distribution, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 55, 2016, 07KG07 DOI: 10.7567/JJAP.55.07KG07
- 4) 土屋健伸, 清水一磨, 深澤昂太, 遠藤信行, シリコンとステンレス棒で構成されたフォノンニック結晶構造による平面音響レンズの集束音場解析, 日本超音波医学会, 査読有, Vol. 43 2016, 91-101 DOI: 10.3179/jjmu. JJMU.A.48

〔学会発表〕(計 8 件)

- 1) 峰島湖隆, 藤井俊一, 干場功太郎, 土屋健伸, 遠藤信行, WE-FDTD 法と PE 法を組み合わせた長距離の海洋内音波伝搬解析手法の検討, 日本音響学会 2019 年春季研究発表会, 2019.
- 2) 峰島湖隆, 袴田拓実, 土屋健伸, 干場功太郎, 遠藤信行, 時間領域差分法と放物型方程式法を組み合わせた海洋内の長距離音波伝搬解析, 電子情報通信学会, 超音波研究会, 2019.
- 3) 峰島湖隆, 袴田拓実, 土屋健伸, 干場功太郎, 遠藤信行, 浅海における WE-FDTD 法と PE 法を組み合わせた音波伝搬解析手法, 海洋音響学会 2019 年研究発表会, 2019.
- 4) 土屋健伸, 遠藤信行, 松本さゆり, 森和義, 水中映像取得用音響レンズ開発のための数値解析およびモデル実験, 日本音響学会 2017 年度春季研究発表会 (招待講演), 2017.
- 5) 土屋健伸, 遠藤信行, 松本 さゆり, 森 和義, 各種音響レンズの特性, 海洋音響学会可視化技術部会報告会 (招待講演), 2017.
- 6) K. Mori, H. Ogasawara, T. Tsuchiya, N. Endoh, The 2nd sea trial for ambient noise imaging with acoustic lens, 36th USE2015 Symposium on Ultrasonic Electronics, 2015,
- 7) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Preliminary Data Analysis of the 2nd Sea Trial for Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens, 3rd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics 2015.
- 8) S. Matsumoto, T. Hirabayashi, M. Yoshie, T. Satoh, K. Katakura, T. Tsuchiya, N. Endoh, M. Nanri, Study on Underwater Acoustic Video Camera for ROV Work, 3rd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics 2015.

〔図書〕(計 2 件)

- 1) 日本音響学会編, 青木亜美, 土屋健伸, 他 218 名, コロナ社, 音響キーワードブック, 2016, pp. 98-99.
- 2) 豊田政弘編著, 坂本慎一, 横田考俊, 土屋健伸, 他 8 名, コロナ社, FDTD 法で見る音の世界, 2015, pp.174-199.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔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：遠藤 信行

ローマ字氏名：(ENDOH, Nobuyuki)

所属研究機関名：神奈川大学

部局名：公私立大学の部局等

職名：名誉教授

研究者番号（8桁）：20016801

(2)研究協力者

研究分担者氏名：穴田 哲夫

ローマ字氏名：(ANADA, Tetsuo)

所属研究機関名：神奈川大学

部局名：付置研究所等

職名：名誉教授

研究者番号（8桁）：20260987

※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。