

機関番号：32702

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2010～2011

課題番号：22760641

研究課題名 (和文) 水中音響映像装置小型化のためのフレキシブル音響レンズの開発

研究課題名 (英文) Development of the flexible acoustic lens for an underwater ultrasound imaging system

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

研究成果の概要 (和文)：

本研究の目的は水中の映像を取得する音響装置に使用される音響レンズを任意形状とする設計手法を確立することである。そのため、フォノンニック結晶構造を用いた平面状音響レンズを設計した。平面音響レンズの基礎特性を得るためにプロトタイプとしてスケールサイズを変えた平面音響レンズの実機を製作した。本研究ではプロトタイプレンズによって集束された水中音場を測定した。さらに数値解析手法である時間領域差分法を用いて集束音場を解析し、レンズとしての基礎特性である焦点位置とビーム幅を得た。実験結果と解析結果を比較したところ、良い一致が得られたことから平面状音響レンズの設計手法を確立できたと言える。

研究成果の概要 (英文)：

The final goal in this study, we develop the acoustic imaging system in Ocean using flexible acoustic lens constructed with phononic crystal structure. For the obtaining of basic properties of the planate acoustic lens, we produced the prototype of the planate lens constructed by stainless steel. In this study, we measured convergence field by planate acoustic lens in water tank. In addition, we simulated convergence field by planate acoustic lens using finite difference time domain (FDTD) method. As a result, we confirmed the lens effect of designed planate lens. Measurement result of focal distance and -3 dB beam width was almost good agreement with simulation result using FDTD method.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 2,000,000 | 600,000 | 2,600,000 |
| 2011 年度 | 1,100,000 | 330,000 | 1,430,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋探査・機器・音響レンズ

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いる。一般に、レンズは焦点位置、利得、許容収差等を決定すれば形状が

決定してしまうデバイスで、形状の自由度が少ない。そのため、装置サイズを肥大化させさらに別途マウンターを用意するなど装着性に難があった。一方で、装置の小型化、微

細化の要望は近年益々大きくなっている。特に水中で使用する装置は例え小型であったとしても、陸上での重量はかなりの重さとなり、固定式で汎用性に乏しい。

今回提案する音響レンズはフォノンニック結晶構造を有しているために減衰も少なく、更に最適設計を行うことで形状に依存しない新しいタイプのレンズを構築できることが特徴である。フォノンニック結晶構造とは周期的に屈折率が変換する構造を人工的に製作することで、特異な波動現象を引き起こすことができる構造体である。通常の物質では存在しない負の屈折率分布を有しているため、レンズに応用した場合、レンズ形状の制約を小さくすることができる。そのため、フォノンニック構造体を用いて平面音響レンズを構築することを考えた。本研究では形状の自由度を増した低減衰なレンズの設計と製作、有効性の検証のために、まず従来設計が困難であった平面状の音響レンズの設計方法を確立する。実際の微小レンズを試作し、実測実験ならびに数値解析によってその有効性を検討する。レンズ性能として焦点距離、焦点深度、ビーム幅等のデータからレンズの各収差について調べる。

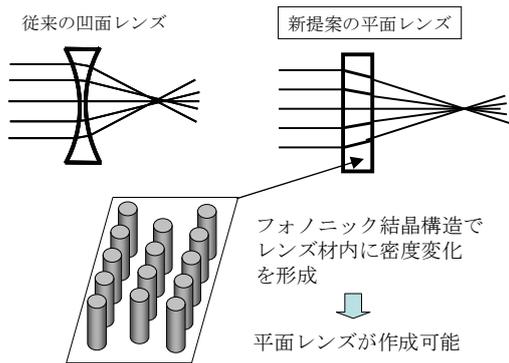


図1 フォノンニック結晶構造を有する平面状音響レンズの概念図

2. 研究の目的

本研究の目的は平面状音響レンズの設計方法の確立と音響レンズの性能に係わる集束音場特性の把握である。音響レンズの設計方法は未だ明確にはなっておらず、試行錯誤の末に決定されることが多いために長い時間と労力を費やす。設計手法の確立と自由な形状のレンズ開発を行うために、フォノンニック結晶構造と集束音場の関連を明らかにし、最適なレンズ形状を設計するアルゴリズムの開発を行う。

平面レンズの形状を決定するために、まず集束作用を生じさせるフォノンニック結晶構造のモデル化とシミュレーションを行うための数値解析手法の開発を行う。またシミュレーションの有効性を向上させるために試作レンズによる実測結果との比較・検討を行

う。従来、音響レンズの設計は光学レンズと同様に光線（音線）理論で行ってきたが、音波の波長に比べてレンズの開口径が十分大きくないため、光線理論での解析が十分現実を反映できないためである。特にフォノンニック結晶構造は音線理論では解析がほぼ不可能である。そのため、最近のコンピュータ性能の向上により解析が可能となった近似の無い波動論に基づく数値解析を行うことが必要となっている。我々も水中音響レンズの集束音場の測定と数値解析を行い、レンズの設計手法を研究・開発してきた。本研究においても、研究室で開発したFDTD法を用いた解析プログラムを用い、従来の研究成果を有効に活用しながら音響レンズの集束音場特性を調べ、最適な平面レンズの設計法を確立する。

3. 研究の方法

当研究室で構築したPCクラスタを使用する自作ソフトウェア“並列演算FDTD法プログラム”を用いて、水中映像取得装置に装着する平面レンズを設計し、収差の少ない集束音場が形成可能な最適なレンズ形状を決定する。そして、測定の困難な大型レンズの計測を行う前に縮尺変更した等価レンズを試作、計測を行う。次に測定結果と解析結果を比較して設計通りの効果が得られているか確認することによって効率的に音響レンズを開発し、実用化実験を行う。

まず、試作モデルとして設計したフォノンニック結晶構造を持つ平面型レンズを図2に示す。ここに示された構造は一般的に三角格子型周期構造と呼ばれ、正三角形の角に直径 $a=1.0\text{ mm}$ の円筒状の格子が配置されている。円筒形格子の中心間の距離は全て一定値 ($d=1.5\text{ mm}$) である。

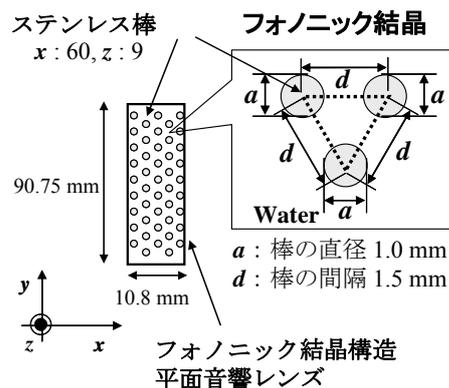


図2 フォノンニック結晶構造を有する平面状音響レンズの設計図

図2のモデルの実機を試作した。格子を構成する材質はステンレス棒 (SUS304) とし、周囲媒質は水とした。格子本数は横方向 (x

軸)に41本,奥行き方向(z軸)に9本とした.試作モデルの写真を図3に示す.

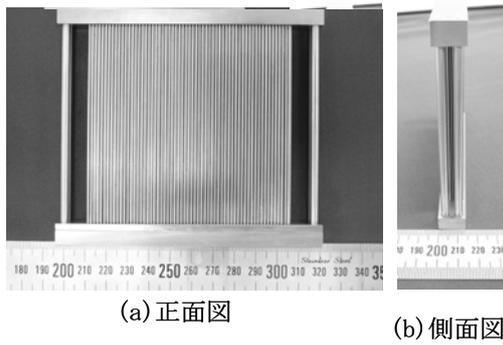


図3 フォノンニック結晶構造平面音響レンズの試作モデル

測定ブロック図を図4に示す.当研究室で保有する大型水槽(1.5 x 1.2 x 0.8 m)中に0.74 MHzの超音波を照射し,同じく水中に設置した音響レンズに超音波を入射させる.3軸精密移動装置(位置精度10 μm)に取り付けたハイドロフォンによってレンズ後方の集束音場を解析し,レンズの集束特性を測定する.この測定と同時に高分解能ハイドロフォンによる測定システムを構築し,縮尺変更した音響レンズの集束音場測定が可能となる.

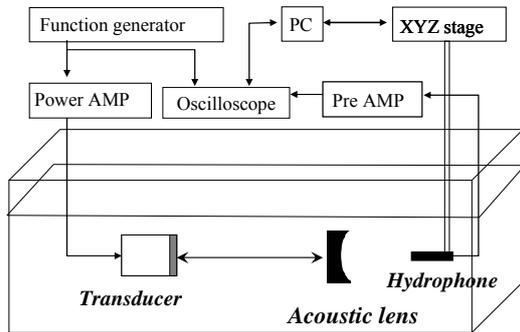


図4 音響レンズによる集束音場の空間分布測定システム

4. 研究成果

試作モデルによってレンズ作用を生じているか観測する.また,同時にシミュレーションでも確認を行う.実験条件と同様のパラメータでFDTD法により解析した結果を図5(a)に示す.試作した音響レンズの2次元音場分布としてx-z平面を測定した結果を図5(b)に示す.焦点位置,ビームの幅は定性的に一致しており,焦点以降の分布もよく似ている.シミュレーション結果の図5(a)には,距離20 mmの下部に干渉模様が見られるが,これはレンズの上下端からの反射波との干渉によるものと思われる.図5(c)にx-y平面音場の測定結果を示す.図5(c)において水平方向はレンズ作用によってビームが絞られてい

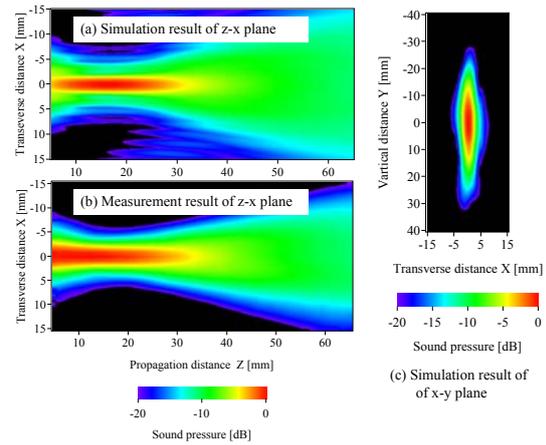


図5 音響レンズによる集束音場の解析・測定結果

るが,垂直方向は焦点が伸びた形状になっている.これはフォノンニック結晶を構成する円柱配列格子が方位方向のみに配置され,垂直方向は一様になっているからである.垂直方向が一様にないのは,スリット穴を通過して形成された音源が球面状で,強さが一様でないからと考えられる.今回は2次元モデルで解析を行ったが,垂直方向の結果に関しては3次元モデルで解析する必要があると言える.

図6にレンズ中心軸の伝搬方向z軸の音圧分布と焦点位置での方位方向x軸の音圧分布を示す.図6は焦点位置での音圧(最大値)

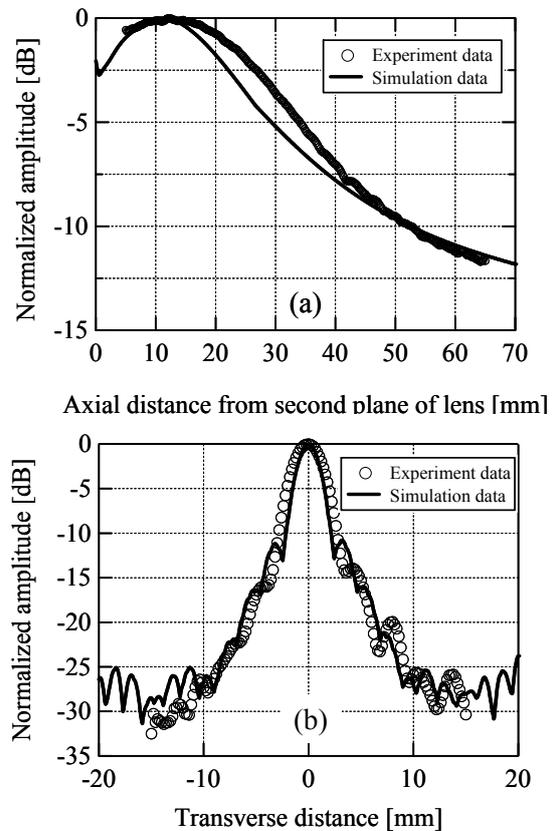


図6 平面状音響レンズによる集束音場—中心軸ならびに焦点方位方向分布—

表1 実験結果と解析結果の焦点距離ならびに
-3dBビーム幅の比較

| Model | Focal point [mm] | Beam width [mm] |
|------------|------------------|-----------------|
| Experiment | 12.5 | 3.1 |
| Simulation | 11.7 | 2.3 |

で規格化している。実験結果、解析結果共に約 12 mm が焦点距離であり、よく一致している。一方、焦点以降の音圧分布には差が表れている。-3dB のビーム幅は図 6 (b) から実験値では 3.1 mm であり、解析値の 2.3 mm とほぼ等しい。わずかにサイドローブが観測される。表 1 に焦点位置ならびにビーム幅の計算結果と実験結果を示す。計算結果と実験結果を比較すると、図 6 (a) の中心軸の音圧分布においては、表 1 に示された通り、よく一致していることが分かる。焦点以降の変化も傾向は一致している。今回提案したフォノンニック結晶構造を有する音響レンズがレンズ効果を正しく発揮していることが確認された。

本研究では、フォノンニック結晶構造を利用した音響レンズを設計し、試作した簡易モデルを用いて集束音場を測定した。その結果、試作モデルのレンズ効果を確認し、焦点位置とビーム幅の実測データが得られた。FDTD 法によるシミュレーション結果と比較したところ、音場分布、中心軸上の分布共に良い一致が見られた。今後は 3 次元解析を行って実験と解析結果のより良い一致を得ることを目標とする。そして、フォノンニック結晶構造を利用した音響レンズの設計を行い、形状や周波数特性など必要に応じた性能を引き出す設計方法の確立を目指す予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

① T. Tsuchiya, T. Anada, N. Nobuyuki, S. Matsumoto, K. Mori, “Basic Study of Properties of Planate Acoustic Lens Constructed with Phononic Crystal Structure”, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.51, No.7(B) (2012) to be published.

② 土屋健伸, 松本さゆり, 穴田哲夫, 遠藤信行, “数値解析を用いた南極海浅海内の音波伝搬シミュレーション —観測線 L の冬期伝搬特性—”, 査読有, 電子情報通信学会論文誌 A, J94-ANo.11, (2011), pp. 862-869

③ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, “Design and Convergence Performance Analysis of Aspherical Acoustic Lens Applied to Ambient Noise Imaging in

Actual Ocean Experiment”, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.50, No.7 (2011) 07HG09

④ 土屋 健伸, 遠藤 信行, 松本 さゆり, 森和義, “シングア라운드法を用いた音響レンズ材の音速の温度依存性の測定”, 査読有, 海洋音響学会誌 38 巻 4 号 (2011), pp.195-202

⑤ T. Tsuchiya, S. Matsumoto, T. Anada and N. Endoh, “Numerical Analysis of Pulse Wave Propagation in Lutzow-Holm Bay of the Antarctic Ocean Calculated by the Parabolic Equation Method”, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 48 No.7, (2010) 07HG14

⑥ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, “Numerical Simulation of Target Range Estimation Using Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens”, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 48 No.7, (2010) 07HG01

⑦ S. Matsumoto, N. Takeyama, T. Tsuchiya, and N. Endoh, “Imaging Performance Evaluation Method of Wide-View Underwater Acoustic Lens by Geometrical Skew Ray Analysis”, Jpn. J. Appl. Phys. 査読有, Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 48 No.7, (2010) 07HG02

[学会発表] (計 7 件)

① 土屋健伸, 穴田哲夫, 遠藤信行, 松本さゆり, 森和義, “フォノンニック結晶構造を用いた平面音響レンズの特性解析”, 日本音響学会 2012 年度春季研究発表会, 2012 年 3 月 14 日, 神奈川大学横浜キャンパス, 横浜

② 土屋健伸, 穴田哲夫, 遠藤信行, 松本さゆり, 森和義, “フォノンニック結晶構造による平面音響レンズの基礎特性に関する研究”, The 32nd Symposium on UltraSonic Electronics, 2011 年 11 月 9 日, 京都大学百周年時計台記念会館, 京都

③ T. TSUCHIYA, T. ANADA, N. ENDOH, “Basic Study of Property of Planate Acoustic Lens constructed with Phononic Crystal Structures”, IEEE Ultrasonics Symposium 2011, 2011 年 10 月 14 日, Caribe Royale All-Suite Hotel & Convention Center, オランダ, アメリカ

④ 土屋健伸, 遠藤信行, “水中音響における音波伝搬の時間領域解析—音響レンズ解析を中心に—”, 日本音響学会 2011 年度秋季研究発表会 (招待講演), 2011 年 9 月 14

日，島根大学，島根

⑤土屋健伸，穴田哲夫，遠藤信行，松本さゆり，森和義，“ソニック結晶構造を利用した試作平面音響レンズの収束音場の測定”，2011年度海洋音響学会研究発表会，2011年5月29日，東京工業大学大岡山キャンパス，東京

⑥土屋健伸，穴田哲夫，遠藤信行，松本さゆり，森和義，“ソニック結晶構造音響レンズの収束音場の測定”，日本超音波医学会第84回学術集会，2011年5月22日，グランドプリンスホテル新高輪，東京

⑦T. Tsuchiya, N. Endoh, “Numerical Analysis of Propagated Pulse Wave in Lützow-Holm Bay of the Antarctic Ocean Calculated by the Parabolic Equation Method”, 10th European Conference on UNDERWATER ACOUSTICS 2010年7月4日，Renaissance Polat Istanbul Hotel，イスタンブール，トルコ

6. 研究組織

(1)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

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：