

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560992

研究課題名(和文)フォノニック結晶構造を用いた平面音響レンズの実用化に向けた最適化設計に関する研究

研究課題名(英文)A study on the optimized design for practical use of planer acoustical lens constructed with 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) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：音を集束させる音響レンズの形状は、通常水中では凹面形状になる。しかし、フォノニック結晶構造を有する平板はレンズ効果を有する。フォノニック結晶構造は円柱棒を周期的に波長間隔で配置したものであり、ある周波数帯で負の屈折率を持つことが知られている。この特徴を活かせば、平面や、菱形の音響レンズが開発できる。音響レンズの形状が自由化すれば小型化も可能となり、小型で重量も軽減される音響レンズが作成できれば、優れた水中映像取得装置の開発が期待できる。本研究では、平面状音響レンズおよび菱形音響レンズの設計を行い、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基本性能について調べた。

研究成果の概要(英文)：Generally, the shape of a typical acoustic lens is a concave surface in water. However, acoustical lens constructed with a phononic crystal structure has a lens effect even plates. Phononic crystals are synthetic materials that are formed by periodic variation of the acoustic properties of the material. Manufacture of a plane acoustic lens is attained by using a negative refractive index. The acoustical lens of the plane and rhombic can be developed by phononic crystal. This study considers the utilization of a phononic crystal structure as a new device for acoustic lenses used as acoustical imaging system in underwater. The basic properties of the planar and rhombic acoustic lens constructed by phononic crystal structure was research. For obtain the basic property of the acoustic lenses, we simulated sound field converged by planar acoustic lenses in water to demonstrate the focal distance and -3 dB transverse beam width for comparison of measurement and calculation results.

研究分野：超音波応用計測

キーワード：水中映像取得 音響レンズ 形状自由化 フォノニック結晶構造 菱形レンズ

1. 研究開始当初の背景

(1) 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。また、周囲雑音を用いたイメージング装置の高性能化のために音響レンズの利用が研究されている。そして、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(現 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所)にて開発され、羽田空港の D 滑走路の鋼管海中部の計測に用いられた。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・設計に携わってきた。

(2) 近年、フォノンニック結晶構造による平面型音響レンズを設計し、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。水中ではレンズ素材と海水の音速比から凹型レンズになる。そのためにどうしてもレンズが大型化する。つまり、小型で重量も軽減される音響レンズが作成できれば、優れた水中映像取得装置の開発が期待できる。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、低減衰で軽量な音響レンズの実用化のため、平面状音響レンズの最適設計を行った。さらに、実海域で使用できるレンズを設計して数値解析によって有効性を検討した。そして、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基本性能について調べた。

(2) 本研究の特色は、フォノンニック結晶構造を利用するデバイス研究であるが、海洋における使用を考慮して小型化に加え軽量化を重視している点であり、実用化に向けた装置重量や大きさに関する検討である。そのため、フォノンニック結晶構造体の重量に相当する構造パラメータによる性能評価を行ってきた。

さらに、設計手法を確立すれば多少の制限はあっても形状を自由化し多様なデバイスに適用できるフレキシブルなレンズ装置の製作が可能となる。本来の目的である映像取得装置の要となる音響レンズの小型化だけでなく、他分野の音響レンズ使用装置の使用環境の可能性を広げる成果が期待できる。その最初のプロセスとして、フォノンニック結晶構造の負の屈折率の角度依存性を求めた。そして、その角度依存性の結果から、新しい形状であるフォノンニック結晶構造で構成された菱形音響レンズを設計し、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基本性能について調べた。

3. 研究の方法

(1) フォノンニック結晶構造の負の屈折率の角度依存性

図1にフォノンニック結晶構造体の概略図を示す。フォノンニック結晶構造体は、伝搬方向 x に 9 本、方位方向 y に 60 本のステンレス円柱棒 (SUS304) によって構成される。高さ方向 y は一様としている。結晶構造は三角格子状に配置している。この時、円柱間を d 、円柱の直径を a とする。本報告では $d=1.5\text{ mm}$ 、 $a=1.0\text{ mm}$ としたので、構造体の幅は 90.75 mm 、奥行きは 10.8 mm である。周囲媒質は水とした。ステンレス・水の音響パラメータはそれぞれ縦波音速が $5780, 1500\text{ m/s}$ 、密度が $7.93, 1.0\text{ g/cm}^3$ 、ステンレスの横波音速が 3200 m/s とした。この平板形状のフォノンニック結晶構造体は、周波数が 740 kHz 付近の点音源を入射させることで音響レンズとして作用する。

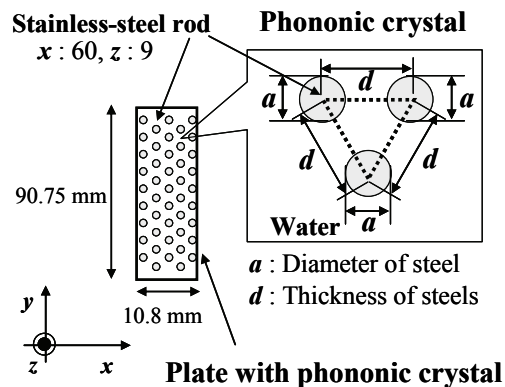


図1 フォノンニック結晶構造体の概略図

図2にフォノンニック結晶構造体の負の屈折率の入射角度依存性の測定法を示す。直径 25 mm の円形 PZT 振動子から距離 400 mm の位置に小型音響レンズを設置する。周波数 740 kHz の音波を照射し、レンズ後方の音場を平面波状にする。小型音響レンズから距離 270 mm 、平板構造体の中央を中心として、角度 ϕ で回転させる。周囲の水と構造体の境界面で角度 ϕ に屈折した音波は次の境界面で角度 ϕ に屈折する。角度は構造体の後方の音場を距離 $x=30\text{ mm}$ から 110 mm の範囲を 10 mm 間隔で y 軸方向 (水平方向) に 1 次元スキャンして最大値を求め、直線近似することで構造体との境界面での角度として求め、屈折率を算出した。

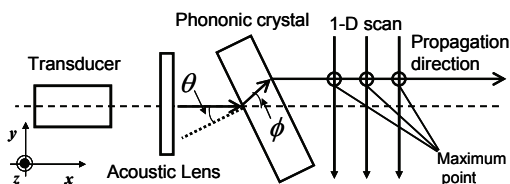


図2 フォノンニック結晶構造体の負の屈折率の入射角度依存性の測定法

(2) フォノンニック結晶構造で構成された菱形音響レンズの特性

菱形形状の音響レンズの概略図を図3に示す。ここでは伝搬距離を方向を z 、方位方向を x とした。両面の傾斜角は 30° とした。フォノンニック結晶構造体は伝搬方向 z に 13 本、方位方向 x に 60 本のステンレス円柱棒によって構成される。結晶構造の音響的パラメータは図1と同様である。音源は平面波入射とするため、点音源を並べて配置し、各音源で波長 20 発のガウス状パルス波を送信した。まず、音源の中心周波数を 700 kHz とし、円柱の直径 a を 0.5~1.3 mm に変化させた場合の解析を行う。次に周波数を 500 kHz~800 kHz の範囲で変化させて解析を行った。

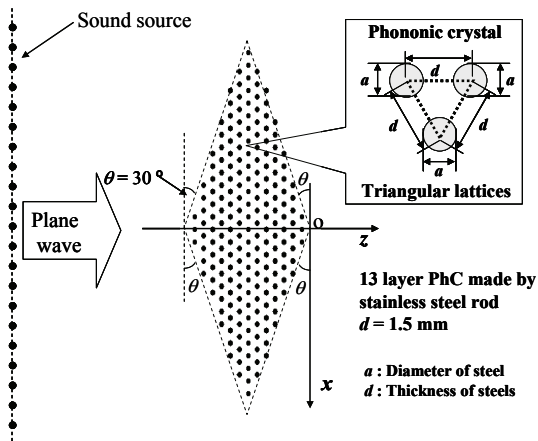


図3 フォノンニック結晶構造で構成された菱形音響レンズの概略図

4. 研究成果

(1) フォノンニック結晶構造の負の屈折率の角度依存性の結果

図4に各入射角度での音圧最大値と近似直線をプロットした図を示す。入射角度が大きくなるにつれて、最大値の近似直線が方位方向の負方向へ移動していくことが分かる。25度までは、ほぼ傾きのない直線だが30度では斜めに傾いている。屈折率を求めた結果を表1に示す。5度での結果は他に比べて傾きが大きく、その結果から屈折率を求める事ができなかった。他の角度においては、屈折率 n_{21} でおよそ-2.0前後の値を取っているが、15度においては-1.3とかなり小さい。現在、原因について調査中であるが、各入射角度における屈折率を求めることができた。

表1 フォノンニック結晶構造体の負の屈折率の角度依存性

	5°	10°	15°	20°	25°	30°
移動距離 [mm]	0.3	5.8	9.4	16.8	22.4	17.7
屈折率 n_{12}	判別不可	-0.47	-0.48	-0.45	-0.50	-0.66
屈折率 n_{21}	〃	-2.0	-1.3	-2.2	-2.1	-2.0

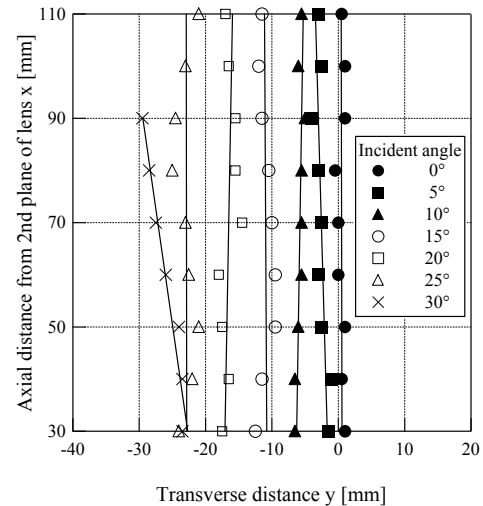
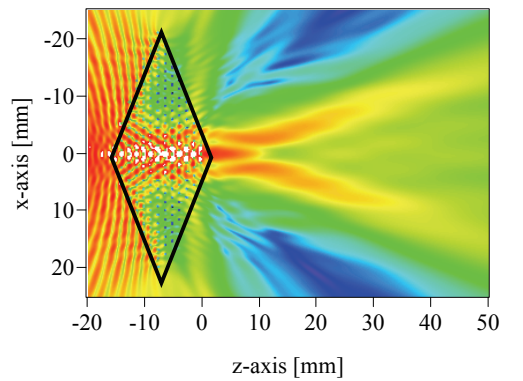


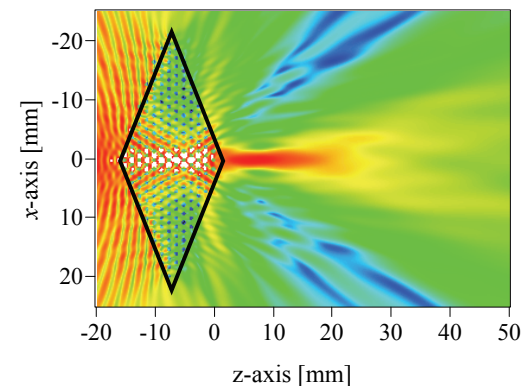
図4 各入射角度の音圧最大値と近似直線

(2) フォノンニック結晶構造で構成された菱形音響レンズの特性

音源の中心周波数を 700 kHz とし、円柱の直径 a を 0.5~1.3 mm に変化させた場合の解析を行った。図5に円柱の直径を変化させた場合の集束音場の解析結果を示す。直径 $a=0.5$ mm の結果である図5(a)を見ると、レンズ後方面直後では軸上で強い音場があるが、その後左右に音波が分かれて伝搬しており、焦点を形成していない。一方、直径 $a=0.7$ mm の図5(b)では焦点を形成しており、ビーム幅は少し広いがサイドローブが抑制されている。



(a) $a=0.5$ mm



(b) $a=0.7$ mm

図5 菱形音響レンズの集束音場特性 (円柱直径による変化)

表2に各円柱直径における焦点距離とビーム幅, 利得をまとめた結果を示す. ビーム幅は直径が大きくなるにつれて僅かに細くなっていく. 一方, 直径 $a=0.7$ mm の時が, サイドローレベルが他の結果に比べて-5 dB程度低くなっている. ビーム幅が他と大差ないことから, 直径 $a=0.7$ mm の場合が一番レンズ性能が優れていると考える. 直径 $a=0.7$ mm での利得は最大の $a=1.1$ mm に比べて約-0.6dB程度とほぼ変化が無い. そこで, 周波数特性を求める際には, 円柱の直径は $a=0.7$ mm とした.

表2 各円柱直径における焦点距離とビーム幅, 利得

Diameter of rod [mm]	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3
Focal length [mm]	0.3	7.2	7.05	5.45	5.25
-3 dB Beam width [mm]	12	1.85	1.8	1.75	1.6
Gain [dB]	-2	-0.56	-0.93	0	-0.12

送波中心周波数 f を 500 kHz~900 kHz の範囲で変化させて解析を行って利得を求め, 平面状レンズの利得と比較する. 図6に周波数を変化させた場合の音場の解析結果を示す. 図6(a)の $f=600$ kHz では, レンズ後方に焦点が形成されていない. 図6(b)の $f=700$ kHz では, レンズ後方で干渉して縞模様になっており, また上下に強い音場があることから焦点は形成されていない. 一方, 図6(b)の $f=700$ kHz では焦点が形成された.

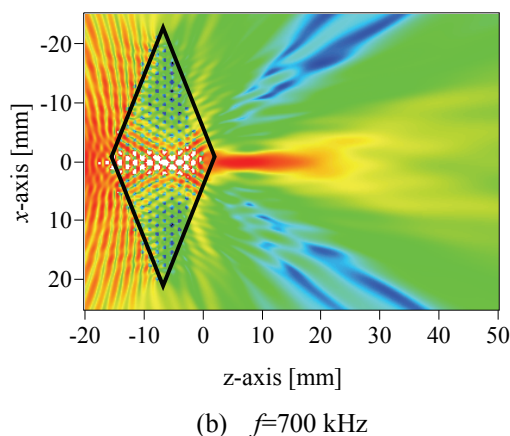
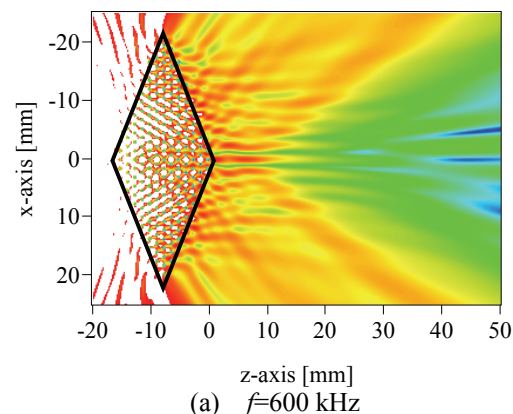


図6 菱形音響レンズの集束音場特性 (周波数による変化)

各周波数における焦点距離と焦点距離でのビーム幅をまとめた結果を表3に示す. 一般に同じ開口径ならば周波数が高くなればビーム幅は狭くなるが, 今回提案した菱形音響レンズは 700~900kHz の場合では低周波の 700kHz の方が焦点距離でのビーム幅が狭くなったことが確認された.

表3 各周波数での焦点距離とビーム幅

Frequency [kHz]	700	800	900
Focal length [mm]	7.2	14.7	34
Beam width [mm]	1.85	2.25	2.7

<引用文献>

- ① 佐久間優, 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で構成された平面板の入射角度特性”, 音響学会秋季研究発表会講演論文集, pp. 1455-1146 (2012年9月, 信州大学, 長野)
- 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菱形音響レンズの周波数特性,” 海洋音響学会 2014 年度研究発表会, pp. 53-56(2014年5月, 神奈川大学, 横浜)

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5件)

- 1) K. Shimizu, K. Fukasawa, T. Tsuchiya, N. Endoh, “Three dimensional analysis of temperature rise in soft tissue with bone near the focal area caused by focused ultrasonic radiation,” Acoust. Sci. & Tech. 36 (2) 2015, pp. 178-181, 査読有.
DOI:10.1250/ast.36.178]
- 2) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, “Relationship between Spatial Distribution of Noise Sources and Target Scatterings Observed in the 2010 Sea Trial of Ambient Noise Imaging”, Jpn. J. Appl. Phys. 52 (7B) 07HG02 (6 pages), 2013, 査読有.
DOI:10.7567/JJAP.52.07HG02]
- 3) S. Tanaka, K. Shimizu, S. Sakuma, T. Tsuchiya, N. Endoh, ” Experiment and Numerical Analysis of Temperature Rise in Phantom Caused by High-Intensity Focused Ultrasonic Irradiation”, Jpn. J. Apl. Phys. 52 (7B) 07HF09 (5pages), 2013, 査読有.
DOI:10.7567/JJAP.52.07HF09
- 4) T. Tsuchiya, T. Anada, N. Endoh, S. Matsumoto, and K. Mori, Basic Study of Properties of Planate Acoustic Lens Constructed with Phononic Crystal

Structure Jpn. J. Apl. Phys. 51 (7B), 07GG11 (5 pages) 2012 年, 査読有.

DOI:10.1143/JJAP.51.07GG11

- 5) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Extraction of Target Scatterings from Received Transients on Target Detection Trial of Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens, Jpn. J. Apl. Phys. 51 (7B), 07GG10 (7 pages), 2012 年, 査読有.
DOI:10.1143/JJAP.51.07GG10

[学会発表] (計 23 件)

- 1) 土屋健伸, 清水一磨, 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レンズの構造パラメータによる屈折率と集束音場変化の解析,” 信学技報, vol. 114, no. 190, pp. 19-24 (2014 年 8 月 25 日, 東工大, 東京)
- 2) T. Tsuchiya, T. Anada, N. Endoh, S. Matsumoto, K. Mori, “Basic Study of Rhomboidal Acoustic Lens Constructed with Phononic Crystal,” in Proc. 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, pp. 343-348 (2014.06.26, island of Rhodes, Greece)
- 3) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, “Numerical Analysis for Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens: Target Detection around the Barge Moored in Uchiura Bay”, in Proc. 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, pp. 33-38 (2014.06.26, island of Rhodes, Greece)
- 4) 土屋健伸, 清水一磨, 深澤昂太, 遠藤信行, “フォノンニック結晶で構成された菱形音響レンズの特性,” 日本超音波医学会第 87 回学術集会, S470 (2014 年 5 月 9 日, パシフィコ横浜, 横浜)
- 5) 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菱形音響レンズの周波数特性,” 海洋音響学会 2014 年度研究発表会, pp. 53-56 (2014 年 5 月 30 日, 神奈川大学, 横浜)
- 6) 森和義, 小笠原英子, 中村敏明, 土屋健伸, 遠藤信行, “音響レンズを用いた周囲雑音イメージングにおける内浦湾計測バージ周辺海域でのターゲット検出シミュレーション,” 海洋音響学会 2014 年度研究発表会, pp. 41-42 (2014 年 5 月 30 日, 神奈川大学, 横浜)
- 7) 松本さゆり, 白井一洋, 片倉景義, 土屋健伸, 遠藤信行, “反射板を用いた周波数走査型送波器の送波特性の向上の検討,” 海洋音響学会 2014 年度研究発表会, pp. 57-60 (2014 年 5 月 30 日, 神奈川大学, 横浜)
- 8) 土屋健伸, 遠藤信行, “フォノンニック結晶構造を用いた平面音響レンズの諸特性について,” 日本超音波医学会関東甲信越地方会第 25 回学術集会, p.51 (2013 年 10 月 19 日, TFT ホール, 東京)
- 9) T. Tsuchiya, T. Anada, N. Endoh, S. Matsumoto, K. Mori, “Development of rhomboidal acoustic lens constructed with phononic crystal,” Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, pp. 591-592 (2013.11.22, Doshisya University, Kyoto)
- 10) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya and N. Endoh, “A Basic Study for Target Range Estimation on the 2010 Sea Trial of Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens,” Proc. of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 34, pp. 361-362 (2013.11.22, Doshisya University, Kyoto)
- 11) 森和義, 小笠原英子, 中村敏明, 土屋健伸, 遠藤信行, “音響レンズを用いた周囲雑音イメージングにおける過去 5 年の研究の概要”, 電子情報通信学会技術報告 (2013 年 11 月 23 日, 同志社大学, 京都)
- 12) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, “Preliminary Analysis of Target Range Estimation on Sea Trial 2010 for Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens”, Proc. 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, in CD-ROM, 2013 年 6 月 23 日, (island of Corfu, Greece)
- 13) S. Matsumoto, K. Katakura, K. Shirai, T. Tsuchiya, and N. Endoh, “Development of 4-D underwater acoustic imaging system,” Proc. 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, in CD-ROM, 2013 年 6 月 23 日 (island of Corfu, Greece)
- 14) 土屋健伸, 深澤昂太, 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音響レンズの基礎特性の解析”, 海洋音響学会 2013 年度研究発表会, pp.63-64 (2013 年 5 月 28 日, 東京大学, 駒場)
- 15) 松本さゆり, 片倉景義, 白井一洋, 土屋健伸, 遠藤信行, “水中映像取得システムの小型・軽量化に関する検討 一周波数走査型送波器及び位相反転受波器アレイを用いた映像取得実験—”, 海洋音響学会 2013 年度研究発表会, pp.7-10 (2013 年 5 月 28 日, 東京大学, 駒場)
- 16) 松本さゆり, 片倉景義, 白井一洋, 土屋健伸, 遠藤信行, “水中映像取得システムの小型・軽量化に関する検討 一周波数走査型送波器の送波特性向上について—”, “海洋音響学会 2013 年度研究発表会”, pp.11-14 (2013 年 5 月 28 日, 東京大学, 駒場)
- 17) 土屋健伸, 深澤 昂太, 穴田 哲夫, 遠藤信行, 松本 さゆり, 森 和義, “フォノンニック構造を有する音響レンズの設計と解

析”, 日本音響学会 2013 年度春季研究発表会講演論文集, pp. 1345-1346 (2013 年 3 月 14 日, 東京工科大学, 東京)

- 18) T. Tsuchiya, T. Anada, N. Endoh, S. Matsumoto, and K. Mori, “Characteristics of incidence angle dependence of plate constructed with phononic crystal structures”, Proc. of 33rd Symposium on Ultrasonic Electronics, pp.121-122 (2012 年 11 月 15 日, 千葉大学, 千葉)
- 19) T. Tsuchiya, T. Anada, N. Endoh, S. Matsumoto, and K. Mori, Numerical Analysis of Frequency Characteristics of a Prototype Planate Acoustic Lens Constructed by Phononic Crystal Structures Proc. of IEEE International Ultrasonics Symposium 2012 in CD-ROM, (2012.10.09, Dresden, Germany).
- 20) S. Matsumoto, K. Katakura, M. Nanri, N. Takeyama, T. Tsuchiya, N. Endoh, T. Noguch, Development of Four-Dimensional Underwater Image-Capture Apparatus, 電子情報通信学会技術報告, pp. 53-58, US2012-44, 2012 年 8 月 27 日 (Busan, Korea)
- 21) K. MORI, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. TSUCHIYA, and N. ENDOH, PRELIMINARY ANALYSIS OF SPATIAL DISTRIBUTION OF NOISE SOURCES ON SEA TRIAL OF AMBIENT NOISE IMAGING WITH ACOUSTIC LENS, Proc. of 11th European Conference on UNDERWATER ACOUSTICS Vol.1, pp. 1484-1489, (2012.07.05, Edinburgh, UK).
- 22) T. TSUCHIYA, T. ANADA, N. ENDOH, S. MATSUMOTO, and, K. MORI, THE DESIGN OF PLANATE ACOUSTIC LENS MADE BY PHONONIC CRYSTAL STRUCTURES, Proc. of 11th European Conference on UNDERWATER ACOUSTICS Vol.1, pp. 1738-1743, (2012.07.05, Edinburgh, UK).
- 23) 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入射角度特性, 海洋音響学会講演論文集, pp. 75-78 (2012 年 5 月 28 日, 東京工業大学, 大岡山)

〔図書〕 (計 2 件)

- 1) 日本音響学会編, コロナ社, 音響学会サイエンスシリーズ「FDTD 法で見る音の世界」, 2015, 印刷中. (第 8 章担当. 29 ページ予定)
- 2) 日本音響学会編, コロナ社, 音響キーワードブック, 2016, 発刊予定. (2 ページ予定)

〔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: 5 0 2 9 1 7 4 5

(2) 研究分担者

遠藤 信行 (ENDOHI Nobuyuki)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号: 2 0 0 1 6 8 0 1

(3) 研究分担者

穴田 哲夫 (ANADA Tetsuo)

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号: 2 0 2 6 0 9 8 7