

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04597

研究課題名(和文)海中周囲雑音による海中物体画像化のための固体-液体複合凸型非球面音響レンズの研究

研究課題名(英文) A Study of Aspherical Convex Lens with Solid-Liquid Compound Structure for Underwater Object Imaging Using Ocean Ambient Noise

研究代表者

森 和義 (Mori, Kazuyoshi)

防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・応用科学群・教授

研究者番号：70259894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：海中物体映像化において周囲雑音を音源として積極的に活用する周囲雑音イメージングをより広い海域において適用するには、水中航走体艇首に音響レンズを実装することが望ましい。本研究では、固体を薄い外殻とし、内部に液体を用いた固体-液体複合凸型レンズを提案した。まず、候補レンズ材料の音速計測結果を基に屈折率を求め、無収差化を施した非球面凸レンズ形状を決定した後、集束音場解析を行ってレンズ性能を予測した。さらに水槽による縮尺実験を行ったところ、集束点と集束利得は解析結果と概ね一致した。本研究の成果は、周囲雑音イメージングを広い海域に適用する礎となると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

周囲雑音イメージングは、計測側から音波を放射する必要がなく、対象物体自身が音波を放射していない無音状態でも探知が可能である。この特徴は隠密裏に対象物体を探知するのに適している。本研究を発展させることで周囲雑音イメージングの水中航走体への搭載を実現し、広大な海域における水中セキュリティや音に敏感な海洋生物調査などの応用面での可能性を広げることが期待される。

研究成果の概要(英文)：A novel idea, which views ambient noise as a sound source, is often called ambient noise imaging (ANI). For surveying underwater objects in a vast expanse of ocean using ANI, it is necessary to mount an acoustic lens into a movable underwater vehicle. The convex lens is desirable to mount it on the bow of underwater vehicle. In this study, the convex lens with solid-liquid compound structure composed with solid lens faced to sea water, and inner liquids placed in the bow is proposed.

First, we measured the sound velocities of some materials for applying to the proposed lens. The lens aspherical surfaces were determined by the refractive indexes based on the measured values. We also analyzed the sound pressure field converged by the lens to predict its performances. As compare with the results of the small-scale trial in water tank, the predicted values of focal point and convergence gain were mostly agreed with those. These results could be a basis to applying ANI to a vast of ocean.

研究分野：海洋音響工学

キーワード：海洋科学 海洋工学 海洋探査 音響レンズ 海中周囲雑音 物体映像化 非球面レンズ 凸レンズ

1. 研究開始当初の背景

従来の海中音響映像化装置において周囲雑音は探知を乱す妨害音と見なされてきた。しかし、海中周囲雑音を音源として積極的に活用する革新的なアイデアが提唱されている。この手法はアクティブでもパッシブでもない第3の新しい方式であり、周囲雑音イメージングとも呼ばれている[1]。筆者らは、周囲雑音イメージングを実現する有力な手段として音響レンズに着目し、実海域での利用を想定したレンズ設計を行い、同レンズを用いた試作システムを開発した。2010年の内浦湾での実験では、ビームパターンを計測して試作システムが設計通りの方位解像度を有することを確認し、アルミ板から成る無音ターゲット物体を海中周囲雑音のみで探知することに成功した[2, 3, 4]。2012~2014年の間は、周囲雑音イメージングにおいて雑音源位置が探知画像に与える影響を調査し、ターゲットの背後に雑音源が無い場合にはターゲット方向の受波強度が増加し、逆にターゲットの背後に雑音源がある場合にはターゲット方向の受波強度が低下することが、実海域試験にて確認された[5]。さらに、2015~2017年の間は、周波数依存性を有するターゲットエコーを効果的に画像化する表現方法として、受信エコーの周波数帯域を3分割して、低周波数帯に赤(R)、中周波数帯に緑(G)、高周波数帯に青(B)を割り当てたRGB加法混合を検討した。実海域試験の結果、テップオウエビによる広帯域雑音場の下、ターゲット存在の有無やその形状だけでなく、ターゲットエコーの周波数構造の違いを画像化することに成功した[6]。

以上のように音響レンズを用いて周囲雑音イメージングが実現できることを実証してきたが、今後はより実用的な運用を検討していきたい。近年、広い海域を探索するために自律型無人潜水艇を活用する場面が増えてきた。より広い海域において本手法を適用するには自律型無人潜水艇などの水中航走体艇首に実装することが必要である。しかし、現在の試作システムに用いられている凹型レンズは水の抵抗が大きく、水中航走体艇首への搭載は困難であることが問題である。本研究では、音響レンズを用いた周囲雑音イメージングシステムを水中航走体艇首に搭載するため、水の抵抗の小さい凸型レンズを導入することを提案する。

2. 研究の目的

プラスチック材等の単一固体でレンズを構成すると内部減衰により十分に音波が集束しない。そこで、固体を薄い外殻とし、内殻に内部減衰の小さい液体を用いた固体-液体複合型のレンズ構成が有効である。図1は水中航走体艇首に搭載する凸型レンズの概念図である。固体レンズは2つの非球面を有し、海水に接する凸面 S_1 および艇首内に配置された内部液体に接する凹面 S_2 から成る。受波器アレイを配置する焦点面は内部液体内に設定する。

まず、固体レンズの非球面において収差を無くす最適化を行うためには、レンズ材として用いる固体と液体の音速を正確に把握する必要がある。ここでは、シングア라운드法を用いた超音波音速測定装置により、候補となるレンズ材の音速を精密測定する。次に、得られた測定値を利用した数値解析を行って集束特性を予測し、最適な材料の組み合わせおよびレンズ形状を検討する。このとき、音線解析では音線追跡を行って収差解析を行い、また、レンズ面を非球面として無収差化を施す最適化を行う。さらに、波動解析では時間領域差分法により集束音場を計算して集束音圧を予測する。最後に、水槽における縮尺実験を行い、受波器を3次元移動しながら試作レンズによる集束音場を計測し、予測した音波集束特性が実現できるかを確認する。

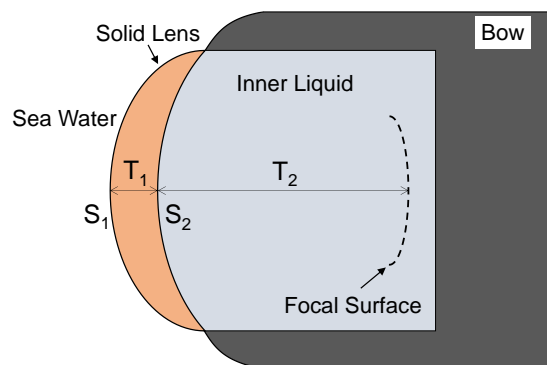


図1 固体-液体複合凸型音響レンズの概念図

3. 研究の方法

(1) レンズ材の音速測定、レンズ形状の決定

筆者らは、周囲雑音イメージングにおいて周波数帯域 40~200 kHz で中心周波数 120 kHz を使うことを想定している。まずは提案レンズが設計通りに動作するかを検証するため、水槽による 0.24 倍の縮尺実験を行う。この実験のスケールに中心周波数の波長を合わせるために、今回は 500 kHz を選択した。図2にシングア라운드法による音速測定の全体図を示す。この手法は受信した信号を再度送信側の励振用トリガに用いて信号を繰り返し周回させることで高精度の音速計測が可能となる。恒温槽には恒温循環器から伸びた銅製パイプが配置され、一定温度に設定された液体をパイプ内に循環させることにより恒温槽内の熱媒体の温度を制御する。この熱媒

体の温度が内部水槽に伝わり、結果として計測媒体と材料の温度が制御されることになる。内部水槽では、シングア라운드装置に接続された送受波器を配置し、候補レンズ材を透過するように音波伝搬させて得られた伝搬時間より音速を得る。

候補レンズ材として、固体レンズには海水に比べて低密度で高音速である3種のシタクチックフォーム(TG-26/3000, TG-28/4000, TG-39/11500), 内部液体は海水に比べて高密度で低音速であり、かつ焦点距離が長くないように屈折率の大きいフロリナート(FC-72)を選定した。これらの音速の温度依存性を計測して各材料の近似直線を得た後、将来の実験海域を想定した温度における透過率の組み合わせが最も良好な材料を最終的に採用した。採用材料の屈折率を利用して、音線解析によって無収差化を施した非球面レンズ形状を決定した。

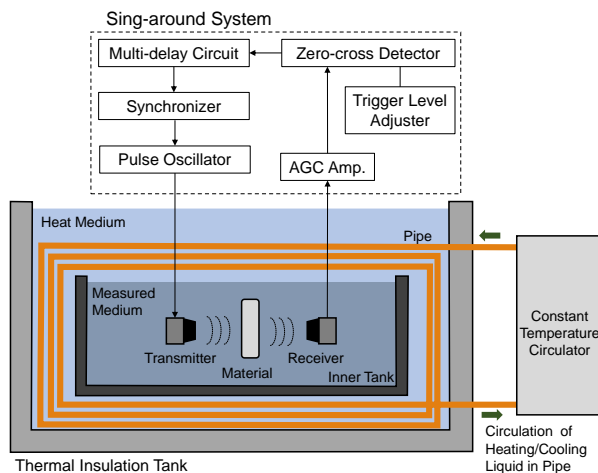


図2 シングア라운드法による音速計測

(2) 時間領域差分法による集束音場解析および水槽による縮尺実験

集束音場の解析には、3次元時間領域差分法(3D-FDTD法)を用いた。図3(a)-(c)に3D-FDTD法における媒質配置を示す。ここでは、海水内に配置した平面もしくは球面音源を配置し、放射された音波が固体レンズを透過して、内部液体内で集束音場を形成するのを想定している。解析領域の外周には吸収層を配置して、領域端面からの反射を抑制している。また、計算時間を短縮するため、 $y=0$ における $x-z$ 平面において対称境界条件を適用して、 $y<0$ の領域を省略して解析範囲を半分に削減した。さらに、解析結果を検証するため、水槽による縮尺実験を行った。実験配置図を図3(d)に示す。水槽内に内部液体を満たした内部水槽を配置し、音源に向けた面に試作した固体レンズを配置した。内部水槽内に3次元移動するハイドロフォンを配置して集束音場を計測した。ここで、音源から固体レンズまでの距離は7mである。

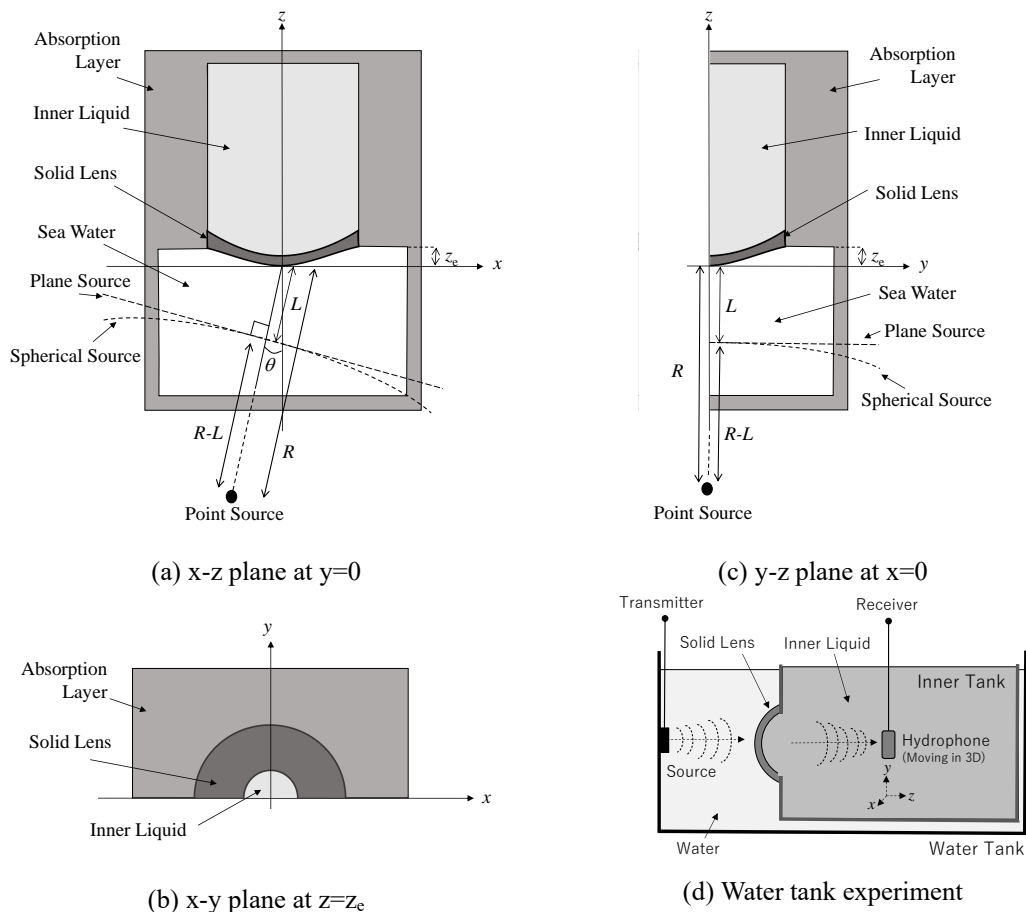


図3 3D-FDTD法における媒質配置および水槽試験

4. 研究成果

(1) レンズ材の音速測定, レンズ形状の決定

シンタクチックフォーム 3 種の音速計測結果を図 4, フロリナートの音速計測結果を図 5 に示す. 各点は温度を 10~30 °C の範囲でおおよそ 5 °C ずつ変化させた計測結果であり, 材料毎に近似した直線を描いている. 図に示す各点は, 材料毎の各設定温度における 10 回の音速計測値の中間値を示している. 全ての材料において, 水温の上昇に伴い音速が低下する傾向が見られる. 筆者らが過去に実海域試験を行ってきた沼津を含む駿河湾沿岸部 7 地点における 1 年間にわたる平年海水温度は, 11.5~26.0°C の範囲にあり, 全平均をとると 18.93°C となる. 将来的に同海域での試験を想定すると, この温度における各材料の音速を直線近似式で推定し, それを基にして固有音響インピーダンスを計算した. これより, 固体レンズを通じて海水から内部液体への透過率を求めたところ, 海水から固体レンズおよび固体レンズから内部液体の両方でバランスが良く, 総透過率が最も大きくなった材料の組み合わせは, 固体レンズ TG-28/4000 および内部液体 FC-72 となった. この組み合わせにおける音速, 固有音響インピーダンス, 屈折率, 減衰定数を表 1 にまとめる.

得られた屈折率を用いて, 音線解析を行ってレンズ形状を決定した. 図 6 にレンズ形状および音線ダイアグラムを示す. 開口直径 240 mm, 焦点距離 400 mm としたところ, 平行音線が入射した際の音線は無収差化され, 入射角度毎に異なる 1 点に集束しており, レンズ形状は非球面で最適化されていることがわかる.

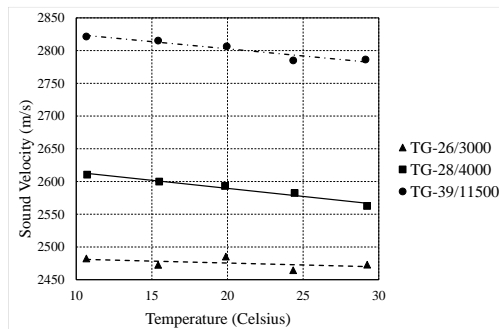


図 4 シンタクチックフォームの音速計測結果

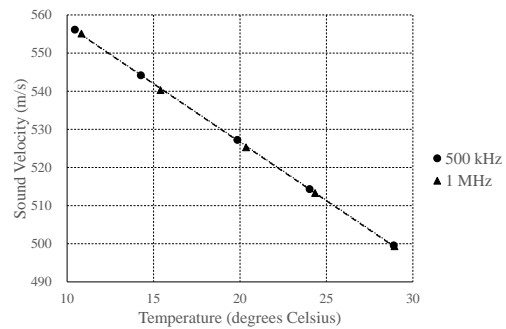


図 5 フロリナートの音速計測結果

表 1 音速・固有音響インピーダンス・屈折率・減衰定数 (500 kHz, 18.93°C)

Material		Sound Velocity (m/s)	Impedance (MPa·m/s)	Refractive Index	Attenuation (dB/λ)
Sea Water		1515.1	1.515	1.000	0.0
Solid Lens	TG-28/4000	2592.1	1.161	0.585	0.1
Inner Liquid	FC-72	530.0	0.890	2.859	0.0

(2) 3D-FDTD 法による集束音場解析および水槽による縮尺実験

3D-FDTD 法による集束音場解析の結果を図 7 および図 8 に示す. 図 7 は, $y=0$ における $x-z$ 平面の相対音圧分布であり, 音源距離 7 m を想定した球面波が角度 0 度で入射した結果を示している. $z=0$ の固体レンズで屈折した後, 内部液体内で集束音場を形成し, z が概ね 390 mm で最大値を迎え, その後は拡散しているのがわかる. 図 8 は, 同条件における軸上特性を示す. 軸上特性とは, レンズの中心軸 (z 軸) 上の相対音圧分布である. 最大音圧は z が約 390 mm で得られていることが, この図でも確認できる. 設計時の焦点距離は 400 mm であったので, 概ね一致している. 加えて, 水槽による縮尺実験の結果も図 8 に示している. 図 8 において, 実験で得られた相対音圧は解析結果と概ね一致した. このとき, レンズ入射点からピーク点での音圧差を集束利得として求めたところ, 解析および実験の結果はどちらも約 36 dB となり, 両者はよく一致した.

(3) 総括

本研究では, 周囲雑音イメージングシステムを水中航走体艇首に搭載するため, 固体を薄い外殻とし, 内部に減衰の小さい液体を用いた固体-液体複合凸型レンズを提案した. 候補レンズ材料の音速測定を行って得られた屈折率を用い, 音線解析によって無収差化を施して最適化した非球面凸レンズ形状を決定した. さらに, 3D-FDTD 法による集束音場解析の後に, 水槽において縮尺実験を行ったところ, 設計したレンズの集束点および集束利得の解析結果と実験結果は概ね一致した.

周囲雑音イメージングは, 計測側から音波を放射する必要がなく, 対象物体自身が無音状態でも探知が可能である. この特徴は隠密裏に対象物体を探知するのに適している. 本研究を発展させることで周囲雑音イメージングの水中航走体への搭載を実現し, 広大な海域における水中セキュリティや音に敏感な海洋生物調査などの応用面での可能性を広げることが期待される.

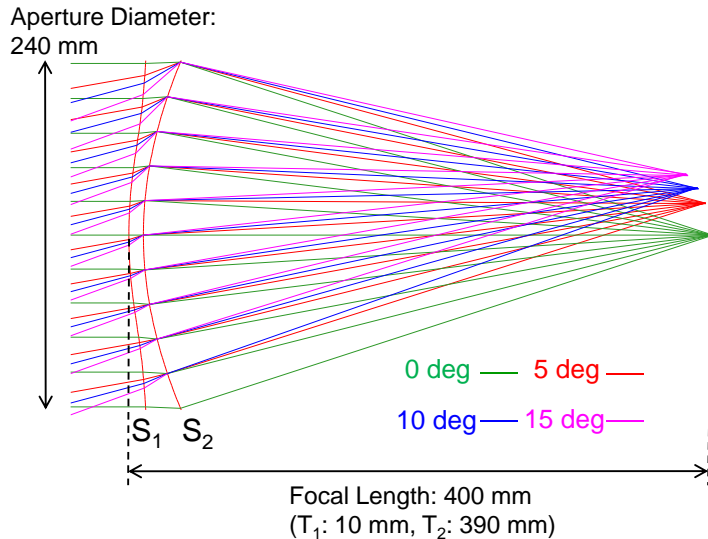


図6 レンズ形状および音線ダイアグラム

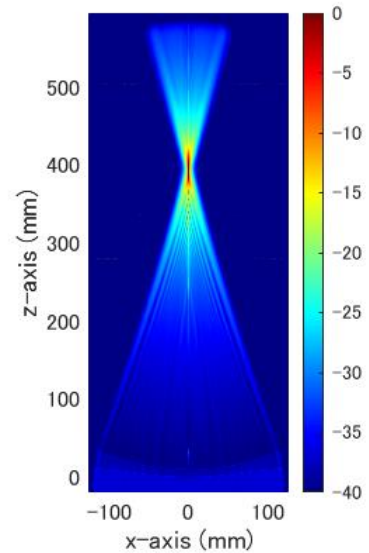


図7 3D-FDTD法による相対音圧分布($y=0$ における $x-z$ 平面, 入射角度0度)

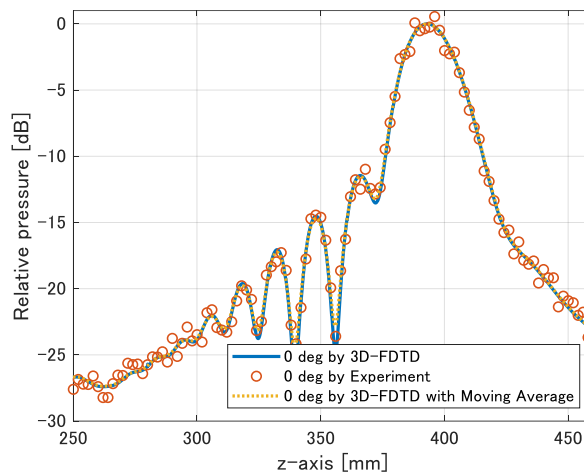


図8 軸上特性

<引用文献>

- [1] M. J. Buckingham, B. V. Verkhout and S. A. L. Glegg, “Imaging the Ocean with Ambient Noise”, Nature, vol. 356, pp. 327-329, March 1992.
- [2] K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, “Design and Convergence Performance Analysis of Aspherical Acoustic Lens Applied to Ambient Noise Imaging in Actual Ocean Experiment”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 50, no. 7, pp. 07HG09, July 2011.
- [3] 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. Appl. Phys., vol. 51, no. 7, pp. 07GG10, July 2012.
- [4] 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., vol. 52, no. 7, pp. 07HG02, July 2013.
- [5] K. Mori, H. Ogasawara, T. Tsuchiya, and N. 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”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 55, no. 7S1, pp. 07KG07, July 2016.
- [6] K. Mori, H. Kawahara, H. Ogasawara, and T. 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”, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 57, no. 7S1, pp.07LG05, July 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 K. Mori, H. Ogasawara	4. 巻 44
2. 論文標題 Preliminary results of numerical analysis of sound field converged by convex acoustic lens with solid-liquid compound structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of Meetings on Acoustics	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1121/2.0001464	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 森 和義, 小笠原 英子	4. 巻 47
2. 論文標題 潜水艇の艇首搭載凸型音響レンズに適用される材料の音速計測 シンタクチックフォームおよびフロリナートにおける温度依存性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 海洋音響学会誌	6. 最初と最後の頁 129~138
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3135/jmasj.47.129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 K. Mori, H. Kawahara, H. Ogasawara, T. Tsuchiya	4. 巻 57
2. 論文標題 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	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 07LG05-1~4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/JJAP.57.07LG05	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 1件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 森 和義, 黒山 喬允, 小笠原 英子
2. 発表標題 3次元FDTD法による固体液体複合凸型音響レンズの集束音場解析の予備的結果
3. 学会等名 海洋音響学会2022年度研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Mori, H. Ogasawara
2. 発表標題 Preliminary 3D FDTD Analysis of Sound Field Converged by Convex Acoustic Lens with Solid-Liquid Compound Structure
3. 学会等名 The 42nd Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 和義, 小笠原英子
2. 発表標題 FDTD 法による固体液体複合凸型音響レンズの集束音場解析の予備的結果
3. 学会等名 海洋音響学会2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 和義, 田中くるみ, 小笠原英子
2. 発表標題 周囲雑音イメージングに適用する凸型音響レンズの集束音場解析の予備的結果
3. 学会等名 日本音響学会2021年春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森 和義
2. 発表標題 海中周囲雑音を用いたイメージング～音響レンズによるシステム開発および実海域試験による評価～
3. 学会等名 日本海洋工学会第52回海洋工学パネル(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Mori, H. Ogasawara
2. 発表標題 Preliminary Analysis Results of Sound Field Converged by a Convex Acoustic Lens Applying to Ambient Noise Imaging
3. 学会等名 The 41st Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森 和義, 小笠原英子
2. 発表標題 周囲雑音イメージングに適用する凸型音響レンズにおける材料の予備的検討
3. 学会等名 海洋音響学会2020年度研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森 和義, 小笠原英子
2. 発表標題 周囲雑音イメージングに用いる凸型音響レンズ材の音速測定：水温依存性の予備的結果
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Mori, H. Ogasawara
2. 発表標題 Preliminary Results of Refractive Index Measurements for Some Materials of Convex Acoustic Lens Applying to Ambient Noise Imaging
3. 学会等名 The 40th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森 和義, 河原 宏幸, 小笠原 英子
2. 発表標題 シュリーレン法によるテッポウエビ発音の可視化
3. 学会等名 海洋音響学会2018年度研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Mori, H. Ogasawara
2. 発表標題 A Basic Study of Movie Shooting of Snapping Shrimp Sound Radiation by Schlieren Method
3. 学会等名 The 39th Symposium on Ultrasonic Electronics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関