

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 21 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360440

研究課題名（和文）海中周囲雑音を用いた物体映像化のための音響レンズに関する研究

研究課題名（英文）A Study of Acoustic Lens for Imaging Target Object Using Ocean Ambient Noise

研究代表者

森 和義 (MORI KAZUYOSHI)

防衛大学校・応用科学群・准教授

研究者番号：70259894

研究成果の概要（和文）：周囲雑音イメージングは自然海中周囲雑音を積極的に利用する革新的なアイデアである。筆者らは、周囲雑音イメージングのプロトタイプシステムの開発を目指し、開口径 1 m の非球面レンズを設計・製作した。本レンズは、中心周波数 120 kHz で方位解像度 1 度、視野角 ± 7 度を有することが実証された。2010 年 11 月に内浦湾において、海中周囲雑音のみで無音ターゲットを検出する実海域試験が実施された。多数の突発性雑音からターゲット散乱波を抽出する分類手法が提案された。ターゲット散乱波として分類された突発性雑音を解析したところ、60 kHz 以上の高周波数帯域において、ターゲット方位のパワースペクトル密度レベルは、ターゲット以外の方位のレベルに比べて大きくなることが実証された。この結果は、主にテッポウエビ音によって生成される自然海中周囲雑音によって、ターゲットが成功裏に検出されたことを示している。

研究成果の概要（英文）：Ambient noise imaging (ANI) is the novel idea to utilize natural ocean ambient noises positively. We designed and fabricated an aspherical lens with an aperture diameter of 1.0 m to develop a prototype system for ANI. It was also verified that this acoustic lens realizes a directional resolution, which is a beam width of 1 degree at the center frequency of 120 kHz over the field of view from -7 to +7 degrees. The sea trial of silent target detection using the prototype ANI system was conducted under only natural ocean ambient noise at Uchiura Bay, in November of 2010. We proposed a classification method to extract transients of only target scatterings from many transient noises. By analyzing transients extracted as target scatterings, it was verified that the power spectrum density levels of the on-target directions were greater than those of the off-target directions in the higher frequency band over 60 kHz. These results showed that the targets are successfully detected under natural ocean ambient noise, mainly generated by snapping shrimps.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,300,000	0	6,300,000
2010 年度	8,000,000	0	8,000,000
2011 年度	500,000	0	500,000
総計	14,800,000	0	14,800,000

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，沿岸域生物雑音

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

音響イメージング装置において周囲雑音はターゲット信号を乱し、物体映像化を妨げるものと考えられてきた。ところが、海中周囲雑音を積極的に利用しようとする画期的な考え方が提案された。この手法は周囲雑音イメージングと呼ばれ、アクティブ方式でもパッシブ方式でもない第3の新しい方式である。本手法は広帯域マルチビーム受信機で実現され、現在までに反射板や2次元アレイを用いた実験システムが実海域での物体映像化に成功している。

一方、音響レンズは複雑な信号処理装置などを必要としないで実時間ビームフォーミングが可能であり、音響イメージング装置の小型化や低コスト化に優れており、周囲雑音イメージングを実現する有力な手段である。これまで、筆者らは様々な形状の両凹面単一音響レンズを用いて周囲雑音イメージングを実現することを想定し、数値解析および縮尺実験によりレンズ性能を評価してきた。

2. 研究の目的

本研究では、周囲雑音イメージングを実現する上で中心周波数 120 kHz において方位解像度 1 度を有する音響レンズを設計・製作し、沿岸域生物雑音を用いて物体映像化が可能かどうかを評価することを目的とする。本研究では、下記の2点を重点的に実施する。

(1) 音響レンズの設計・製作

開口径 1.0 m, 焦点距離 1.0 m, 中心周波数 120 kHz で 1 度の方位解像度, 視野角 15 度を有する音響レンズを設計・製作する(2009 年度)。

(2) 音響レンズを用いた周囲雑音イメージングの実海域試験

主に沿岸域生物雑音から成る海中周囲雑音を用いてターゲット散乱波を検出し、物体映像化が可能かどうか試験する(2010 年度)。そして、実験データを解析する(2011 年度)。

3. 研究の方法

(1) 音響レンズの設計・製作

本レンズには 30 cm 程度の厚さを有するアクリル板材が必要とされ、アクリル薄板を重合接着して積層することにより実現される。まず、レンズ設計に必要な屈折率の温度依存性を求める。重合接着されたアクリル材の音速をシングアラウンド法によって測定して近似式を求め、さらに Greenspan の水中音速式を用いて、屈折率を求める。次に、試験海域の水温に対応する屈折率より、音線計算を行って音響レンズ表面および像点面を最適化して、音響レンズの形状を設計する。それ

を元にアクリル板材を切削加工して音響レンズを製作する。

(2) 音響レンズを用いた周囲雑音イメージングの実海域試験

図 1 に実海域試験の概観を示す。試験は沼津市三津町の約 250 m 沖(内浦湾)に係留された実験バージを利用した。この海域の海底深度は約 30 m である。周囲雑音イメージングのプロトタイプシステムはバージの端に固定され、レンズは固定用シャフトに取り付けられたサーボモータによって回転させることができる。プロトタイプシステム内には、水平視野角-7~+7 度の範囲で、1 度毎の入射角度に対応する像点に 15 素子の受波器アレイを設置した。このアレイはターゲット距離に応じてフォーカシングが行えるように、レンズに近づけたり遠ざけられる可動機構を有している。ターゲットは 4 mm 厚で横 3 m×縦 1 m のアルミ板を約 30 m の距離で方位 0 度に配置した(Target A)。また、1 mm 厚で横 1 m×縦 1.6 m のアルミ板に 10 mm 厚の発泡スチロール板を張り付けたターゲットを約 15 m の距離で方位-6 度に配置した(Target B)。各ターゲットには位置合わせ用ピンガが取り付けられている。ここでは、音響レンズの方位解像度を評価するためにピンガ音を用いてビームパターンを計測した。さらに、ピンガ音を止めて自然海中周囲雑音のみでターゲット物体を探知する実験を行った。

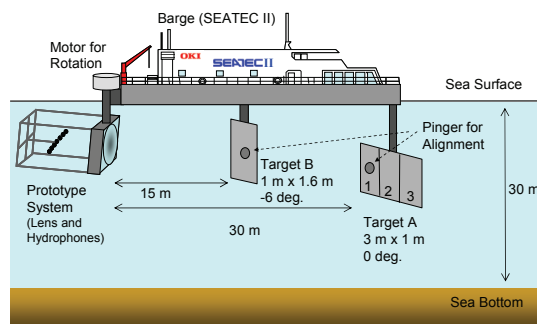


図 1 実海域試験の概観

4. 研究成果

(1) 音響レンズの設計・製作

まず、レンズ設計に必要な屈折率の温度依存性を求めたところ、図 2 の結果が得られた。重合接着した積層材(acrylic resin 1)でも単一材(acrylic resin 2)でも屈折率に大きな違いは見られなかった。ここでは、実験予定海域における実施予定時期 10~11 月の水温が摂氏 20 度程度であることから、屈折率を 0.54 とし、像点において無収差化してレンズ形状を最適化するための音線計算を行った。図 3 は、偶数次の回転対称多項式非球面として決定された音響レンズの形状と音線図を示して

いる。ここでは、物点距離を 50 m、像点距離を 1.2 m、中心厚さを 10 mm と想定した。このレンズ形状を用いて、アクリル板材を切削加工して音響レンズを製作した。

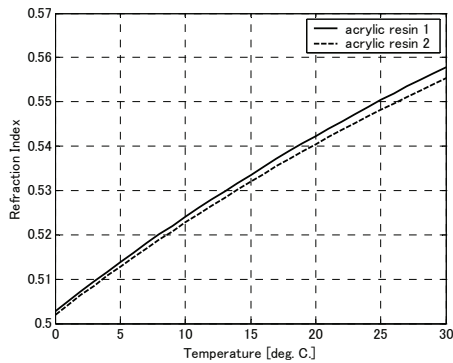


図 2 音響レンズ材と水の間の屈折率

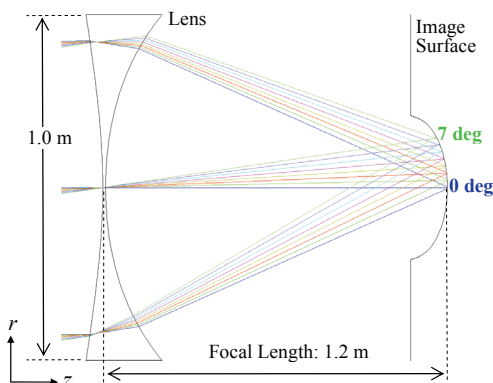


図 3 レンズ形状と音線図

(2) 音響レンズを用いた周囲雑音イメージングの実海域試験

まず、ビームパターンの計測には、Target A に取り付けた位置合わせ用ピンガから 120 kHz の連続波を送信し、サーボモータによって 0.2 度毎にプロトタイプシステムを回転させ、像点に取り付けられた各受波器出力の RMS 値を計測した。図 4 に 120 kHz におけるビームパターンを示す。各受波器に対応する方位にピークが現れており、隣り合うビームが交差するのは約 -5 dB 付近である。これより、本レンズは、-7~+7 度の視野角に渡って、中心周波数 120 kHz において方位解像度 1 度を有していることが実証された。

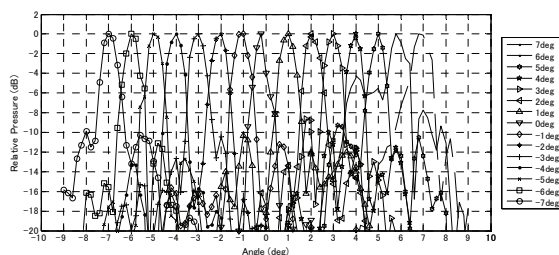
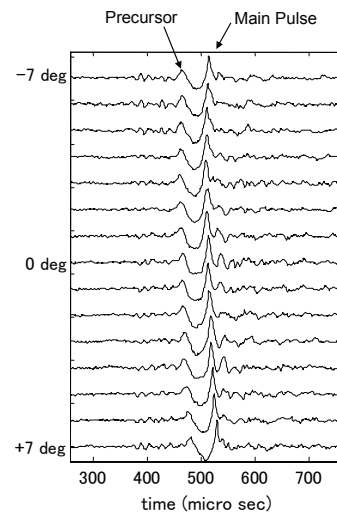
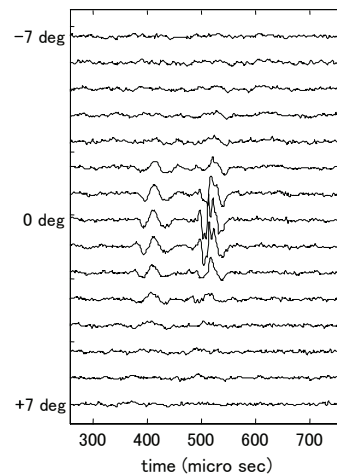


図 4 ビームパターンの計測結果



(a) 直接受信雑音



(b) ターゲット散乱波
図 5 受信した突発性雑音

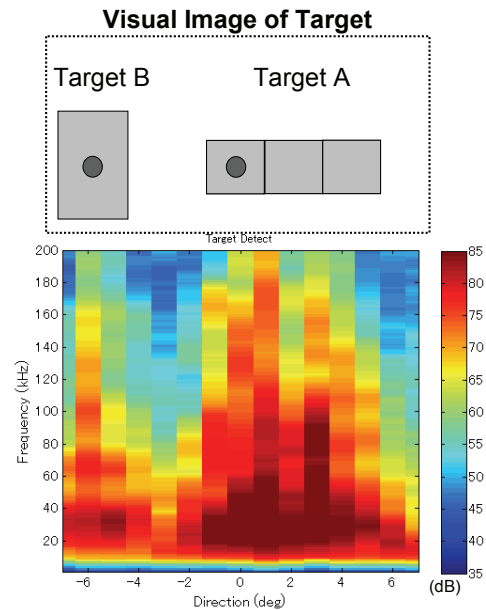
次に、ピンガを停止して、海中周囲雑音のみでターゲット検出を行った。今回の試験において得られた受波信号は、無音部と突発性雑音に大別された。さらに、突発性雑音は、レンズを通じて集束されたターゲット散乱波およびレンズを通さず受波器アレイに直接入射した生物雑音が混在していた。図 5 に受波信号の例を示す。この図は、ビーム方向に対応する像点に配置した 15 個の受波器の出力信号を示している。図 5(a)は、レンズを通さず受波器アレイに直接入射した生物雑音の例である。各突発性雑音の波形は、マウスカーソルとメインパルスの組み合わせから成る典型的なテッポウエビ音の波形と一致していた。どのビーム方向でもほぼ同じ振幅で時間差もほとんど無い。ターゲットの配置から考えても、視野角内の全方位でほぼ同じ波形がほぼ同じタイミングで受波されることは考えられず、この突発性雑音はレンズを通さずに、視野角外から受波器アレイに直接

到達したと推測される。一方、図 5(b)は、レンズを通じて受波されたターゲット散乱波の例を示している。ここでは、ビーム方向が 0 度の付近で振幅が最大になるパルス波形が得られており、Target A の左端付近からの散乱波が受波されていると考えられる。今回の実海域試験においては、このようにターゲットの一部からの散乱波が受波され、ターゲット方位の全体から散乱波が一度に得られることはなかった。つまり、視野角内の一部にしかターゲット散乱波は受波されないことになる。ここで、受波される突発性雑音の特徴からターゲット散乱波のみを抽出する方法を以下に提案した。

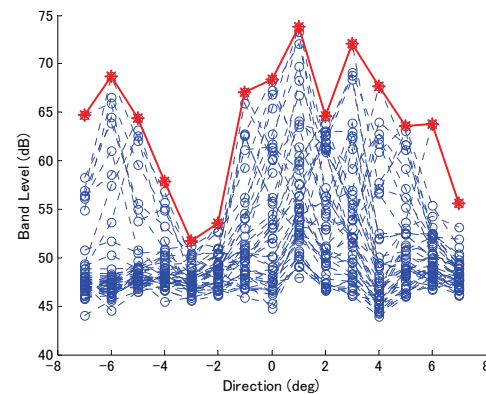
- i) 振幅が 136 dB re 1 μ Pa を超過(無音区間の振幅より十分大きい突発性雑音の検出)
- ii) 各受波器間のピーク振幅差が 10 dB を超過(ターゲット散乱波は視野角の一部のみから受波)
- iii) 隣り合う受波器間の時間差が 14 μ s を超過(直接受波した雑音は時間差がほとんどないこと、かつ受波器間隔が約 21 mm であること)

この抽出法によって得られたターゲット散乱波の検出結果を図 6 に示す。ここでは、Target A にフォーカシングした場合の受波信号から 48.6 秒間の計測データを用いた。条件 i) を満たす突発性雑音は 8507 個が検出され、その内、条件 ii) および iii) を満たすターゲット散乱波であると推定されたのは 327 個である。抽出されたターゲット散乱波は、1024 点のハミング窓かけ FFT によりパワースペクトルが計算された。ここで、比較的方位解像度が良好と考えられる 60 kHz から 200 kHz の帯域レベルを求め、327 個のターゲット散乱波から最も帯域レベルが大きい順に 45 個を選び、パワースペクトルを方位および周波数毎に最大値で結合したのが図 6(a) である。Target A は -1 度から 5 度まで広く分布しており、Target B は -6 度と -5 度で分布していることから、視野角内に配置した両ターゲットをよく表している。図 6(b) は、帯域レベルだけで比較した結果を示している。各ターゲット散乱波の帯域レベルが大きい順に 45 個を選び(点線と丸印)、方位毎に最大値で結合した結果(実線とアスタリスク印)を示している。図より、各ターゲット散乱波はターゲットの一部のみでピークが得られるが、これらを結合した結果は、Target A で -1 度から 5 度、Target B で -6 度と -5 度にそれぞれ強いレベルが現れており、帯域レベルだけでも視野角内に配置された両ターゲット成分をよく表していることがわかる。図 6(c) は、327 個のターゲット散乱波に対して帯域レベルのピーク数をビーム方向毎に示したものである。Target A の方位では、1 度にピークを持つターゲット散乱波が 78 個と最も多く検出されたのがわ

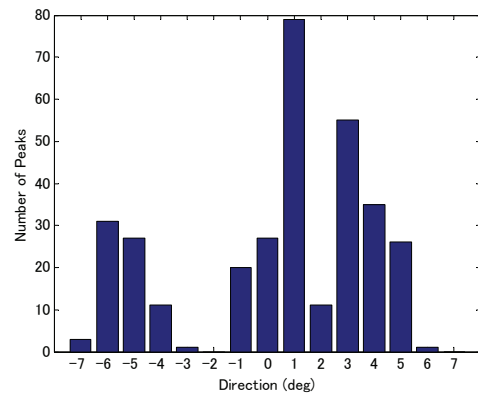
かる。Target B の方位では、-6 度にピークを持つターゲット散乱波が最も多く検出されたが、検出されたのは 31 個であり、Target A に比べればピークの現れる数は少なかった。



(a) ターゲット散乱波のパワースペクトル密度レベルの結合



(b) ターゲット散乱波の帯域レベル



(c) 検出されたターゲット散乱波のピーク数
図 6 海中周囲雑音によるターゲット検出

以上より、今回開発した音響レンズを用いた周囲雑音イメージングプロトタイプシステムおよび提案したターゲット散乱波の抽出手法によって、主にテッポウエビ音によって生成される自然海中周囲雑音を用いて物体映像が成功裏に得られていることが実証された。本研究は、高周波数帯域の沿岸域生物雑音を利用して開口径 1.0 m の音響レンズによって周囲雑音イメージング装置の小型化を実現する世界で初めての試みであった。これを発展させることで、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の可能性に今後期待できると考える。

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 8 件)

- ① 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, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 51, 2012, 掲載決定
- ② 土屋健伸, 遠藤伸行, 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, 海洋音響学会誌, 査読有, 第 38 巻, 2011, pp. 195~202
- ③ 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, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 50, 2011, pp. 07HG09-1~07HG09-8, DOI:10.1143/JJAP.50.07HG09
- ④ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Design of Acoustic Lens Beamformer for Ambient Noise Imaging and Preliminary Results of Target Detection in Actual Ocean Trial Using Prototype System, Proceedings of 4th Conference of Underwater Acoustic Measurement, 査読有, 2011, pp. 1179~1184
- ⑤ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, Numerical Simulation of Target Range Estimation Using Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 49, 2010, pp. 07HG01-1~07HG01-8, DOI:10.1143/JJAP.49.07HG01
- ⑥ K. Mori, H. Kada, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, Preliminary results of biological transient noise observation at Hashirimizu Port in Tokyo Bay, Proceedings of the 10th European Conference on Underwater Acoustics, 査読有, Vol. 2, 2010, pp. 655~660
- ⑦ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, Y. Sato, T. Tsuchiya, N. Endoh, Evaluating Directional Resolution of Aplanatic Acoustic Lens for Designing Ambient Noise Imaging System, Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 48, 2009, pp. 07GL05-1~07GL05-5, DOI:10.1143/JJAP.48.07GL05
- ⑧ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, Y. Sato, T. Tsuchiya, N. Endoh, REDUCED SCALE EXPERIMENT OF APLANATIC ACOUSTIC LENS FOR DESIGNING AMBIENT NOISE IMAGING SYSTEM, Proceedings of the 3rd International Conference & Exhibition on Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, 査読有, 2009, pp. 1379~1384

[学会発表] (計 14 件)

- ① 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システムの実海域試験 - 2010 年に内浦湾で実施した無音ターゲット探知の結果 -, 日本音響学会 2012 年春季研究発表会 (招待講演), 2012 年 3 月 15 日, 神奈川大学 (神奈川県)
- ② K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Preliminary Analysis for Transient Event of Target Scattering on Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens, The 32nd Symposium on Ultrasonic Electronics, 2011 年 11 月 10 日, 京都大学 (京都府)
- ③ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Preliminary Data Analysis of Sea Trial for Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens Beamformer, Pacific Rim Underwater Acoustic Conference 2011, 2011 年 10 月 6 日, Hyatt Regency Hotel (大韓民国チェジュ島)
- ④ 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ターゲット散乱波の分類手法に関する基礎的研究, 電子情報通信学会超音波研究会(日本音響学会超音波研究会, 海洋音響学会共催), 2011 年 8 月 30 日, 水産総合研究センター 水産工学研究所 (茨城県)
- ⑤ 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を想定した試作システムの開発および実海域試験, 海洋音響学会 2011 年度研究発表会, 2011 年 5 月 30 日, 東京工業大学 (東京都)

- ⑥ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, An Analysis of Convergence Performance of Acoustic Lens Applied to Ambient Noise Imaging in Actual Ocean Experiment, The 31st Symposium on Ultrasonic Electronics, 2010年12月08日, 明治大学 (東京都)
- ⑦ H. Kada, K. Awazi, Y. Niisato, S. Kamimura, K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, Source Localization of Biological Transient Noise Using a Pair of Tetrahedron Hydrophone Array, The 31st Symposium on Ultrasonic Electronics, 2010年12月07日, 明治大学 (東京都)
- ⑧ 加田春樹, 淡路圭祐, 新里幸宏, 上村清二, 森 和義, 小笠原英子, 中村敏明, 横須賀走水港におけるインパルス性生物雑音の音源測位, 電子情報通信学会超音波研究会 (日本音響学会超音波研究会, 海洋音響学会共催), 2010年08月30日, 海上保安庁海洋情報部 (東京都)
- ⑨ 森 和義, 小笠原英子, 中村敏明, 土屋健伸, 遠藤信行, 周囲雑音イメージングの実海域試験に向けた音響レンズの設計, 海洋音響学会2010年度研究発表会, 2010年05月27日, 東京工業大学 (東京都)
- ⑩ 加田春樹, 中村雅規, 森 和義, 小笠原英子, 中村敏明, 2009年10月の東京湾および11月の内浦湾における生物突発性雑音観測結果の一例, 海洋音響学会2010年度研究発表会, 2010年05月27日, 東京工業大学 (東京都)
- ⑪ K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, Numerical Analysis of Time Reversal Process for Target Range Estimation on Ambient Noise Imaging Using Acoustic Lens, The 30th Symposium on UltraSonic Electronics, 2009年11月18日, 同志社大学 (京都府)
- ⑫ H. Kada, K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, Preliminary Result of Biological Transient Noise Observation Using 2 Sets of 4-Element Hydrophone Array, The 30th Symposium on UltraSonic Electronics, 2009年11月18日, 同志社大学 (京都府)
- ⑬ 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タイムリバーサル処理の導入に関する基礎研究, 電子情報通信学会超音波研究会 (日本音響学会超音波研究会, 海洋音響学会共催), 2009年8月28日, 海洋研究開発機構東京事務所 (東京都)
- ⑭ 森 和義, 加田春樹, 小笠原英子, 中村敏明, 沿岸域生物雑音におけるパルス波形の特徴に関する基礎的研究, 海洋音響学会

2009年度研究発表会, 2009年5月19日, 東京工業大学 (東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 和義 (MORI KAZUYOSHI)
防衛大学校・応用科学群・准教授
研究者番号: 70259894

(2) 研究分担者

中村敏明 (NAKAMURA TOSHIAKI)
防衛大学校・応用科学群・教授
研究者番号: 50089885
小笠原英子 (OGASAWARA HANAKO)
防衛大学校・応用科学群・助教
研究者番号: 00531782