

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02362

研究課題名(和文) 堆積層内精密探査用ソナーシステムの高度化とその社会実装に向けた研究

研究課題名(英文) Study for the advancement of sonar systems for precise exploration and social implementation

研究代表者

水野 勝紀(Mizuno, Katsunori)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：70633494

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：海洋開発や気候変動に伴う環境変化が、海洋環境、特に海底下の堆積物中の生物や環境に与える影響については、堆積物中を効率的にモニタリングするための手法が確立されていないという事情もあり、未だ不明な点が多い。本研究では、堆積物中の底生生物相や環境動態を時空間的に計測・評価するための技術基盤の構築を目指し、それら海底下環境の可視化に向けた新しい音響計測システムの開発を進めてきた。具体的には、海底下浅層内の埋没物を高い分解能で検出することを目的として開発を進めている3次元音響コアリングシステム(設置型、中心周波数100 kHz)と音響モグラ(クローラー型、中心周波数500 kHz)を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した音響計測システムを用いることで、海底下に分布する二枚貝など埋在性の底生生物を可視化することができるようになり、これまで把握が困難であった、海底下における埋在性生物の分布を定量化できるようになる。また、本手法は非破壊・非接触での継続的な観測が可能であることから、時系列にその分布を把握することも可能となることが期待される。大型埋在性生物の調査とその空間分布の把握は、深海底生態系が地球規模の物質循環に果たす役割を理解する上で極めて重要な情報を与える。今後は、資源・エネルギー開発や気候変動が底生生物に与える影響の把握や地球化学的な物質循環の理解、水産資源の分布調査などに応用予定である。

研究成果の概要(英文)：The effects of environmental changes caused by marine development and climate change on the marine environment, especially on organisms and environments in sub-seafloor sediments, are still unknown due in part to the lack of an efficient monitoring method for monitoring in sediments. In this study, we have been developing a new acoustic measurement system for visualization of these sub-seafloor environments, aiming to establish a technological basis for spatio-temporal measurement and evaluation of benthic biota and environmental dynamics in sediments. Especially, we have developed a 3D acoustic coring system (installed type, center frequency 100 kHz) and an acoustic mole (crawler type, center frequency 500 kHz), which are being developed to detect buried objects in the shallow layer below the seafloor with high resolution.

研究分野：環境情報計測学

キーワード：ソナーシステム 堆積物 底生生物 海底ケーブル

1. 研究開始当初の背景

世界規模での人口増加や経済成長に伴う金属・エネルギー消費量は近年急激に高まっている[U.S. Department of Energy, 2011]。その様な将来の資源不足、枯渇への不安を背景とし、近年、再生可能エネルギー利用や資源供給の新しい候補地の一つとして、「海」が注目されている。我が国日本は世界第6位の排他的経済水域を有し、周辺海域において、波力や風力、潮力を利用する発電システムの開発に向けた取り組みも進められている。また海外においても同様の傾向が見られ、今後、海洋開発や設備建設は益々加速すると予想される。しかしながら、それら開発は以下に示す課題を抱えている。

- ・海洋環境・生物への影響が懸念される
- ・装置の設置・運用・保守にコストがかかる
- ・上記理由などにより、開発を進める上での合意形成に時間と労力を要する

特に、発電設備を海底に固定する「着床式」の場合には底生動物の生息場所を直接荒らしてしまう可能性もあり、事前のアセスメントと設置後のモニタリングが必須である。また発電した電力は海底ケーブルを介して陸上に送電されるが、港湾の利用・保全の観点から、ケーブルを海底下に埋設する必要があるが、また金属被覆して海底面に設置した場合も砂の堆積などにより位置が不明確になる場合も多く、必然的に設置・運用・保守のコストも高くなる。つまり、底生動物の調査や、ケーブル埋設場所の選定及び保守点検などを確実かつ効率的に実施する必要性が生じるが、これら対応策に関して、現在は適当な対応技術が無いため良案が望まれている。その対応策の一案として、研究代表者は「堆積層内精密探査用ソーナーシステム」の開発を進めており、その基礎技術を開発してきた。しかしながら、様々な環境条件が重なる実海域での海底下探査については、国内外問わず、文献情報・知見ともに極めて少なく、そのシステムの社会実装に向けた基盤技術の確立が必要不可欠である。

以上をふまえて、「実海域において海底下の微小埋没物をソーナーシステムによって確実に検知するためにはどのような技術課題が生じるか？またその課題を解決するためにはどのような策を講じることができるのか？」を課題解決の切り口とし、本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、先行研究で開発を進めてきた堆積層内精密探査用ソーナーシステムを実海域に展開し、得られるデータを社会において利活用するための課題を洗い出し、またそれら課題を解決するためにシステムを高度化・最適化することである。特に、微小な対象物(5 cm以下を想定)や観測環境(堆積層の土質性状など)に合わせた音波の送信方式、ソーナーシステムを搭載するプラットフォームの選定運用方法、データ解析手法については知見が乏しく、実際の観測現場に合わせた対応が必要になることが予見され、本研究において初めて明らかになる部分が殆どである。

3. 研究の方法

前述した課題を解決するために、以下に示す2つのツール、音響コアリングシステムと音響モグラを開発した。

3. 1. 三次元音響コアリングシステム(3D Acoustic coring system)

近年、水底・水底面下など、堆積層内の空間的な情報を、非侵襲(生物を傷つけない

ようにする)で詳細に把握したいという要望が増えており、浮泥の厚み、根菜の生息状況(後述)、底生生物の分布、深度方向の地質変化、海底ケーブル、水中遺跡などの埋没物の形状計測など、その要望は多岐に渡る。その要望に応えるために、堆積層内を詳細に把握するための高い分解能と、生態モニタリングに必要な高い再現性を備えた、現場型の堆積層内3次元音響可視化システム(3次元音響コアリングシステムと呼ぶ)を開発した(水野他, 特許第6337311号, Mizuno, et al., 2016)。3次元音響コアリングシステム(3D-axs)の外観と送受波器のレイアウトおよび指向性をそれぞれに示す。本システムは、防水の2軸ステージ駆動部(1.2×1.2×0.6 m³, custom-made, Arc Device, Koganei)と音響計測部から構成され、Labview (National Instruments, Texas)をプラットフォームとして開発したソフトウェアによって制御される。事前にプログラムした2次元平面の計測領域内で音響計測部を自動走査しながら音響データを取得し、計測後、専用に開発した3次元音響画像構築ソフトによって音響データを可視化する。標準では中心周波数100 kHzのパルス波を用いており、1 MHz/s, 16 bitでA/D変換し、データを収録する。水平面における計測刻みは1 cm (±0.1 mm)で90(X)×90(Y) cm²の範囲内を自動で計測することができる。3次元の音響画像の構築方法について、本稿でも簡単に述べておく。詳細については文献(Mizuno, et al., 2016)を参照されたい。まず、各水平位置(X-Y平面)において、8チャンネルの受波器で得られた信号について、ビームが送波器の中心軸に沿って集束されるように遅延和を取る。その後、遅延和を取った信号についてヒルベルト変換に基づく振幅抽出を行う。さらに、ある閾値を基に水底表面の位置(Z方向)を検出する。堆積物中は音波の減衰が大きいいため、検出した水底表面の位置を基に距離に伴う減衰補正を行う。減衰補正の値は、理論的に予め求めておいた吸収減衰と散乱減衰を基に決定する(Mizuno, et al., 2016, Suganuma, et al., 2018, Mizuno, et al., 2020)。その後、Z位置ごとにCモード画像(X-Y平面上に表される2次元画像)を構築し、最後にそれらのCモード画像を積層して3次元の音響画像を構築する。この際、画像処理の一種であるアルファブレンディング処理を施すことによって、視認性を調節できるようにしている。

また、3次元音響コアリングシステムの深海版としてA-core-2000: Acoustic coring systemを新たに開発した。本システムは、高周波の集束型超音波センサ(ジャパンプローブ株式会社)と専用の防水モーターを搭載した2軸フレーム(アークデバイス社)で構成されており、250 mm×250 mmの範囲を500 kHzの周波数の音を海底に連続的に照射しながら2 mm間隔でスキヤニングすることで、海底下を高い解像度で3次的に可視化することが可能になる。

本研究において、海洋研究開発機構が所有する有人潜水調査船「しんかい6500」にA-core-2000を搭載し、相模湾西部の深海(水深851-1237 m)に広がるシロウリガイコロニー周辺において、その実証試験を実施しました。

3. 2. 音響モグラ (Acoustic Mole-200: AM-200)

3次元音響コアリングシステムは高精度な計測が可能であるが、システムを設置し、2次的にスキヤニングする必要があるために、計測効率の面で課題があった。短い時間でより広い範囲を調査する必要がある場合(例えば調査コストの高い極地の調査)などには、より調査効率のよいシステムが必要である。その要望に応え、1度の音波照射で面的に計測が可能なアレイソナーと移動型プラットフォームを開発した。具体的に

は、図7に示すような 64ch アレイソナー搭載のクローラー型探査システム（音響モグラと命名した）を開発した。ケーブルやコネクタ部などの一部を除き、国産のカスタムメイド品となっている。現在搭載しているソナーは、アサリなどの底生生物を検出することを目的として設計しており、曲率 500 mm の凹面素子を 64 個有しており、印可する電気信号の中心周波数は 500 kHz である。進行方向に対しては、音波を機械的にフォーカス（凹面素子）させ、その直交方向にはアレイ処理によって電子的にフォーカス（ダイナミックフォーカシング）させることで、指向性のよい面的なビームアレイを形成している（大久保克真，修士論文，2021）。機械的にフォーカスした際の音場（計算値と実測値）を図8に示す。実測値で、集束点付近においてビーム幅約 11 mm（音軸上で図中の x 方向に最も音圧が高かった点から-3dB となる幅）、焦点深度約 480 mm（音軸上で図中の y 方向に最も音圧が高かった点から-3dB となる幅）となっており、海底表面からの深度 10 cm までに生息する 30-40 mm 程度の一般的な大きさのアサリなどの二枚貝の検出に適したビームが形成されていることを確認した。実験の都合上、電子フォーカスによる音場の比較は実施していないが、ビーム幅の理論値は、ステアリング角が 0° の場合（センサ直下に集束させる場合）で約 1.6° である。尚、センサ径を 98 mm、アレイ数を 64 として計算した。計算式については文献（海洋音響の基礎と応用，6.5 指向性とビームフォーミング）を参照されたい。）。またソナーを移動させながらデータを取得し、後処理によってその連続して得られたデータを再構成することで、3次元の音響画像を構築することが可能である。システムの仕様としては、水深 200 m までの計測が可能である。

4. 研究成果

4. 1. 3次元音響コアリングシステムを用いた実験，調査事例

本システムによって得られる3次元の音響画像例を図9に示す。自生するレンコンを可視化するための実験を行ったところ、本システムを用いることで堆積物内を3次元的に把握可能で、湖底表層から約 54 cm の深さに内在している直径 25 mm 程度のレンコンを検出することができた。この着底式の3次元音響コアリングシステムは、シングルビームを用いているため計測効率に課題があるものの、堆積層内の情報を精度よく取得することができるため、海底下環境の時空間的なモニタリングに適している。また、システム構成もシンプルであるためにコストも抑えられ、マシントラブルも少ない。例えば、宮城県伊豆沼において、渡り鳥の越冬前後における蓮根の分布状況を調査した際には、レンコンの空間的な分布の変化を把握することに加え、オオハクチョウがレンコンを捕食可能な最大深度を数値化することができた。伊豆沼において、レンコンは渡り鳥の越冬時の重要なエネルギー源である一方、夏のハス祭りにおける観光資源でもあり、また大きな葉が水中への光を遮蔽するため沼の水質にも大きな影響を与えていたため、その管理の難しさがあったが、現在は音響計測で取得した情報を基に水位を制御するなどして、伊豆沼において最も重要な環境指標のひとつであるハス（レンコン）を管理している（Mizuno, et al., 2018; 藤本他，2020）。

シロウリガイの幼体は、成体と違い、殻が完全に海底下に潜った状態で生息するため、これまで光学カメラなどでは確認することが困難であった。本実証試験において、幼体を含む約 17 個体のシロウリガイの空間分布とそのサイズを可視化・定量化することに成功しました（図10）。

4. 2. 音響モグラ(AM-200)を用いた埋没物探査試験

AM-200 の駆動試験を神奈川県海の公園 (2020 年 9 月 17 日), 静岡県筑波大学下田臨海実験センター (2021 年 6 月 3 日) で実施した。海の公園では, 初めて砂上と海中で AM-200 を走行・進水させ, 実際に海底下の音響データを取得した。海中走行は比較的スムーズであったが, 陸上走行時には, 信地旋回時に時折スタックするなど, モーターの出力不足が感じられ, モーターが著しく発熱し, それに伴うトラブルに見舞われた。下田臨海実験センターでは, モーターのギア比と出力を変更し, それらの課題をハード的に対策し, 試験前日に計測サンプル (鉛ウエイト, 木片, 電線, アサリ殻) を海底表面から深度 50 mm のところに埋没させ, その試験サンプルが検出可能か試行した。

先ず, 駆動性能に関しては海の公園での試験から改善され, 信地旋回など, 陸上・海中ともに期待した走行性能であった。また, 音響システムもトラブルなく動作し, 予定していた測線においてデータを取得した。本システムは自走しながら音波を送受信して計測する走行計測モードと本体は停止した状態で, 本体に搭載している自動レールを駆動させながらソナーを精密に動かしながら計測する停止精密計測モードがある。当試験では, 停止精密計測モードで計測を行った。このときの計測効率は, 約 1,300 cm²/min. であった。計測効率の観点からは走行計測モードにおいて計測することが望ましいが, 実試験において, クローラーの振動や波の影響を受けやすいことが確認されており, 今後の課題としている。

鉛ウエイトからの強い反射信号を, 表層からの深度 53 mm 付近に確認した。しかしながら, 木片や電線, アサリ殻からの反射信号を明確に確認するには至らなかった。この要因としては, ①試験当日は波が高く, AM-200 も波にあおられるシーンもあり, 側線が少しずれ, 試験サンプルの上を走行できていなかった, ②試験サンプルからの反射信号がノイズ (土粒子からの散乱) に埋もれていた, などが考えられる。②については, 実験室レベルでも確認できると考えられるので, 今後の確認項目としている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mizuno Katsunori, Nomaki Hidetaka, Chen Chong, Seike Koji	4. 巻 12
2. 論文標題 Deep-sea infauna with calcified exoskeletons imaged in situ using a new 3D acoustic coring system (A-core-2000)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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） 10.1038/s41598-022-16356-3	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 Tachiki Hajime, Hirasawa Haruki, Asakura Takumi, Mizuno Katsunori, Seike Koji	4. 巻 265
2. 論文標題 Basic study on the estimation method of burrows on the seafloor using ultrasound	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 5769 ~ 5775
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3397/IN_2022_0853	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Zhao Fan, Mizuno Katsunori, Tabeta Shigeru, Asayama Takato, Hayami Hiroki, Fujimoto Yasufumi, Shimada Tetsuo	4. 巻 -
2. 論文標題 New method of mussel survey by using high-resolution acoustic video camera-ARIS and deep learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of MTS/IEEE OCEANS ' 22	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/OCEANSSChennai45887.2022.9775335	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Mizuno, P. Cristini, D. Komatitsch, Y. Capdeville	4. 巻 45
2. 論文標題 Numerical and experimental study of wave propagation in water-saturated granular media using effective method theories and a full-wave numerical simulation.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE journal of Oceanic Engineering	6. 最初と最後の頁 772-785
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JOE.2020.2983865, 2020	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 該当する

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 S. Wang, K. Mizuno, S. Tabeta, K. Terayama
2. 発表標題 Semantic Segmentation of seafloor images in Philippines based on semi-supervised learning
3. 学会等名 International Symposium on Underwater Technology 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Mizuno
2. 発表標題 Increasing presence of marine acoustic technology in marine environmental impact assessment
3. 学会等名 24th International Congress on Acoustics (ICA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 H. Tachiki, H. Hirasawa, T. Asakura, K. Mizuno, K. Seike
2. 発表標題 Basic study on the estimation method of burrows on the seafloor using ultrasound
3. 学会等名 Inter-noise 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立木魁, 平澤昭樹, 藤丸暉基, 朝倉巧, 水野勝紀, 清家弘治
2. 発表標題 水中超音波を利用した巣穴形態計測手法の開発
3. 学会等名 騒音・振動研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平澤昭樹, 立木魁, 藤丸暉基, 朝倉巧, 水野勝紀, 清家弘治
2. 発表標題 超音波を用いた底生生物の巣穴形態計測
3. 学会等名 海洋調査技術学会 第34回研究成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤丸暉基, 平澤昭樹, 立木魁, 朝倉巧, 水野勝紀, 清家弘治
2. 発表標題 超音波を用いた巣穴形態計測法の基礎検討
3. 学会等名 日本騒音制御工学会 2022年春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野勝紀
2. 発表標題 高周波超音波を用いた海底堆積物中の可視化技術
3. 学会等名 海洋理工学会令和4年度秋季大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水野勝紀
2. 発表標題 深海底のそのまた下の生物相を掘らずに視る～最近の音響計測機器のはなし～
3. 学会等名 第8回海中海底工学フォーラム・ZERO (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立木魁、平澤昭樹、朝倉巧、水野勝紀、清家弘治
2. 発表標題 超音波を用いた巣穴形態計測法の基礎検討
3. 学会等名 海洋理工学会令和4年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 趙帆・水野勝紀・多部田茂・麻山賢人・速水裕樹・藤本泰文・嶋田哲郎
2. 発表標題 An efficient mussel distribution survey using high-resolution acoustic imaging sonar and deep-learning-based object detection
3. 学会等名 海洋理工学会令和4年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 立木魁・平澤昭樹・朝倉巧・水野勝紀・清家弘治
2. 発表標題 超音波を用いた巣穴形態計測法の基礎検討
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 F. Zhao, K. Mizuno, S. Tabeta, T. Asayama, H. Hayami, Y. Fujimoto, T. Tetsuo
2. 発表標題 New method of mussel survey by using high-resolution acoustic video camera-ARIS and deep learning
3. 学会等名 MTS/IEEE OCEANS ' 22 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 K. Mizuno
2. 発表標題 Ocean Research Equipment under Development
3. 学会等名 49th Joint Meeting UJNR Sea Bottom Surveys Panel (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 立木魁, 平澤昭樹, 朝倉巧, 水野勝紀, 清家弘治
2. 発表標題 超音波を用いた巣穴形態計測法の基礎検討
3. 学会等名 2022年日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 水野勝紀, 大久保克真, 多部田茂, 阪本真吾, 杉本裕介, 杉本憲一, 村井基彦, 和田茂樹
2. 発表標題 新しい海底下音響探査システム (Acoustic Mole-200: AM-200) の開発と海域試験状況
3. 学会等名 海洋調査技術学会第33回研究成果発表会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 水野勝紀
2. 発表標題 音響による海底下環境計測
3. 学会等名 超音波応用科学研究センター研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 水野勝紀・Paul Cristini・Dimitri Komatitsch・Yann Capdeville
2. 発表標題 飽和性多孔媒質内の音波伝搬シミュレータ開発に関する検討
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～2021年

1. 発表者名 大久保克真・水野勝紀・多部田茂・大平克己
2. 発表標題 高周波堆積層内探査ソナーシステムの開発に向けた研究-模擬堆積物を用いた基礎的検討-
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～2021年

1. 発表者名 趙帆・水野勝紀・多部田茂・麻山賢人・速水裕樹・藤本泰文・嶋田哲郎
2. 発表標題 Application of a high-resolution acoustic video camera to investigate the distribution of mussel <i>Cristaria Plicata</i> in Lake Izunuma
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～2021年

1. 発表者名 水野勝紀
2. 発表標題 国際的な環境研究紹介～超音波が広げる研究の輪～
3. 学会等名 超音波応用科学研究センター研究発表会（招待講演）
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 趙帆・水野勝紀・多部田茂・麻山賢人・速水裕樹・藤本泰文・嶋田哲郎
2. 発表標題 高解像度ソナー画像を用いたカラス貝の分布調査手法の開発
3. 学会等名 第41回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 大久保克真・水野勝紀・多部田茂
2. 発表標題 内生二枚貝探査ソナーシステムの開発に向けた基礎的検討
3. 学会等名 第41回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 水野勝紀
2. 発表標題 未知なる海底下環境の把握に向けた音響計測システム開発
3. 学会等名 第52回海洋工学パネル（招待講演）
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 水中画像生成方法及びプログラム	発明者 水野勝紀、杉本英樹、堤賢一郎、瀬戸雅也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-051522	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

東京大学大学院新領域創成科学研究科水野研究室
<https://webpark2264.sakura.ne.jp/mizu/>

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
研究分担者	巻 俊宏 (Maki Toshihiro) (50505451)	東京大学・生産技術研究所・准教授 (12601)	

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
---------	---------