

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K18835

研究課題名（和文）広帯域超音波を用いた新しい巣穴形態計測法の開発

研究課題名（英文）Development of prediction method for burrow shape on the sea floor by using ultrasonics

研究代表者

朝倉 巧（Asakura, Takumi）

東京理科大学・創域理工学部機械航空宇宙工学科・准教授

研究者番号：60778207

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：多数の巣穴の概形を効率的に測定できる手法として、超音波を巣穴開口部より内部へ放射し、その反射波より内部の形態を計測手法の構築を目指した。シミュレーションによる最適周波数探索により、100 kHz帯周波数成分を用いることによって最大振幅となることを確認した。実地計測では、100 kHz帯パルス波を使用した計測と、500 kHz帯の周波数変調パルスを用いた円錐状走査をそれぞれ実施し、巣穴長および巣穴進展方向の両者に関して高い精度で予測可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海中や海底表面の環境計測の試行や、再生エネルギーの利用に際して海洋生態系に与える影響の評価が行われている。一方、特に海底下の堆積物中の生物や環境への影響については依然として不明な点が多い。沿岸域の海底には底生生物が多数存在し、これらの生物の巣穴の存在によって、周囲の生態系及び非生物環境は大きな影響を受ける。しかしながら、底生生物はその多くが堆積物中に存在するため、詳細で定量的な観測を十分に行うことが難しい。さらに、直接サンプルを回収するような調査手法では底生生物についての知見構築を加速させることは困難である。このため、より短時間かつ低コストで調査可能なスクリーニング手法が併せて求められている。

研究成果の概要（英文）：To efficiently measure the general shape of many burrows, we aimed to construct a method to measure the internal morphology of burrows by emitting ultrasonic waves from the burrow openings and measuring the reflected waves. We confirmed that the maximum amplitude was obtained by using a 100 kHz frequency component in the search for the optimum frequency through simulation. Field measurements using 100 kHz pulsed waves and conical scanning using 500 kHz frequency modulated pulses were conducted, respectively, and showed that both burrow length and direction of burrow propagation can be predicted with high accuracy.

研究分野：応用音響工学

キーワード：海洋生態系 底生生物 超音波 スクリーニング手法 ヤマトオサガニ 水中音響

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

四方を海に囲まれた日本は世界第6位の排他的経済水域を有する海洋国家であり、近年、海洋資源開発や海洋エネルギーを利用した発電システムの導入への取り組みがなされている。また、国連が推進するSDGsによって海洋環境保全への関心もより一層高まっている。これは海外においても同様であり、海中や海底表面の環境計測の試行や、再生エネルギーの利用に際して海洋生態系に与える影響評価が行われている (Gasparatos et al. 2017)。これらの環境影響評価を目的とした調査から多くの知見が得られてきた。一方、海底下の堆積物中の生物や環境への影響については依然として不明な点が多い。

沿岸域の海底には底生生物が多数存在し、海洋生態系における食物連鎖の低次消費者を構成している。そして、その一部は掘穴性動物と呼ばれ巣穴を形成する。この巣穴は外敵から身を守るシェルター、あるいは餌場や食料の貯蔵庫として使用されることがある。また、掘穴性動物は海底下にて摂食する際堆積物を絶えず攪拌し、周囲の底質の形状や砂泥の粒度分布を大きく変化させる。さらに、巣穴を通して堆積物内に海水が供給されるため、内部の酸素濃度が上昇し、巣穴周辺のバクテリアの増加にも繋がる (Andreas, 1991; Dornhoffer et al. 2012)。このように、底生生物が形成する巣穴及びそれを形成する生物の存在により、周囲の生態系及び非生物環境に対し大きな影響を受ける。

しかしながら、底生生物はその多くが堆積物中に存在するため、詳細で定量的な観測を十分に行うことが難しい。堆積物中の底生生物を対象とした計測手法として、底生生物の巣穴に樹脂を流し込んで成形することで内部形状と巣穴内の生物を採取する技術 (Seike et al. 2012) や環境制御した堆積物をCTスキャン・解析する方法 (Hale et al. 2015)、海中の環境DNAまたはRNAを対象としたメタバーコーディング解析により、生物多様性の指標となるメイオフアウナの群集組成を迅速に把握できる手法 (Kitahashi et al. 2020) などが実施されている。これらの手法により堆積物中の底生生物についての有益な知見を得ることができるが、樹脂成型は樹脂の硬化に時間を要し、さらに巣穴を破壊してしまうことから、その経時的変化が捉えられない。CTスキャンも巣穴を含む堆積物をサンプリングするため、同様に現場にて経時的変化を見ることができない。また、メタバーコーディングは巣穴形状を把握できない上、DNAが生物の死後もしばらく残存することによる誤検出が問題となる。DNAより分解されやすいRNAを解析する場合も、その不安定さからサンプルの固定を迅速に行う必要があるが、深海底でのサンプル回収は長い時間を要するため不向きと言える。

以上のような海底における特有の事情から、直接サンプルを回収するような調査手法では底生生物についての知見構築を加速させることは難しい。このため、上記の既存手法に加えて、より短時間かつ低コストで調査可能なスクリーニング手法が併せて求められる。

### 2. 研究の目的

環境保全や修復などを目的として、物理的・化学的な手法を用いて水域の状態や変化を計測する水圏環境計測の手法にはそれぞれ異なる特性があり、計測環境や用途に応じて適当な手法を用いるか、あるいは複数種類の手法を組み合わせる。

本研究に検討する巣穴形態の計測法は、音響計測技術を用いた水圏環境計測手法といえる。音響計測は他の手法と比較して種の同定は不得意である。これは音響カメラやソナーといった音響計測における分解能の低さに起因する評価である。しかしながら、本研究は底生生物自体を計測対象とするのではなく、底生生物が形成する巣穴の形態をその音響的な特性から推定することを主眼においていることからこの短所を緩和できる。さらに、巣穴の規模や形状はそれを形成した底生生物によって多岐にわたることから、巣穴形態の同定は間接的に巣穴の主の同定に繋がる。

海底には多数の巣穴が存在しており、巣穴の内壁に水質浄化として重要な役割を果たすバクテリアが多く生息している。そのため、巣穴の長さ・内部容積は海洋の水質浄化において重要な指標となる。また、巣穴の進展方向を測定できれば、長さの情報と併せることでどの程度の深さまで巣穴の空間が存在しているかを同定することができる。これらの測定結果を統合して、海底領域における巣穴の三次元空間分布が把握できれば、将来の人工干潟の設置といった、環境保全

活動において有用な情報を得ることができる。現在、巣穴の形状計測手法の主たるものとして樹脂成型法による調査が報告されている (Ohtani et al. 2009)。この手法は巣穴の正確な形状の把握、巣穴内部の生物の採取が可能である一方、多くの巣穴を対象に実施する場合、樹脂の硬化までの時間や型を掘り起こす労力、また巣穴を破壊することから、理想的な手法とは言えない。そこで、本研究では多数存在する巣穴のスクリーニング調査に適した手法として、音波による巣穴形態測定方法の確立を最終的な目的とする。

本測定手法は、巣穴開口部へ超音波を入射してその時系列応答を取得、それを解析することで巣穴長やその進展方向、内部容積といった巣穴の形態を計測することを目標とする。はじめに、提案手法を用いた基礎的な実環境計測を行い、提案手法と従来手法である樹脂成型法により取得した巣穴型との寸法比較を行った。さらに、CT スキャンにより取得した巣穴型の二次元数値解析モデルを使用した音響伝搬シミュレーションと泥土を用いた模型実験を実施した。その結果、500 kHz 帯の短パルス波にて、ヤマトオサガニの形成する巣穴（長さ 10-50 cm, J 又は Y 字形状）を 180 mm 程度まで計測が可能であること、また模型実験にて、超音波トランスデューサの指向角を地面と平行な面を軸として扇状に走査し、取得した反射波群のピーク振幅変移より巣穴の進展方向を 8°程度の分解能で推定可能であることを確認した。その後、提案手法による単純形状巣穴の深部計測と測定方法の最適化を目的とする。まず、時間領域差分法を用いた 2 次元シミュレーションにより巣穴内伝搬に適した周波数帯を探索した。その後、上記の結果の検証と、既往の成果を拡張した手法による測定を実地調査にて実施する。実地調査において、提案手法により得た波形群と樹脂成型法により取得した巣穴型を比較することで、本測定手法の有効性を評価する。

### 3. 研究の方法

Fig. 1 に示す計測装置を構築し、これを用いた。具体的には、水浸超音波プローブ (Japan Probe, B0.5K10I, 中心周波数 500 kHz, 振動子径 10 mm) を同社製のパルサ・レシーバ (JPR-10CN) に接続して使用することで、超音波を放射した。なお、媒質中における音速は温度依存性を有するため、温湿度計 (Elitech, RC-4HC) を用いて測定時の水温を逐次記録した。また、測定時に超音波の送信方向を変化させるため、探触子を任意の角度に固定可能な保持器を作成し、測定時のプローブの把持へ使用した。

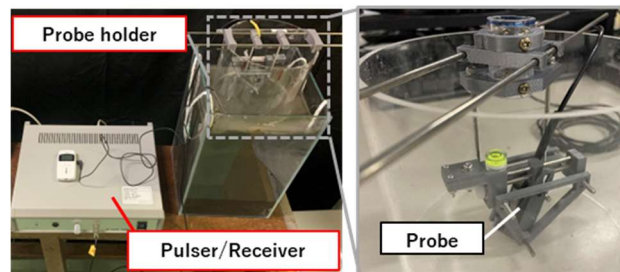


Fig. 1 Experimental setup.

### 4. 研究成果

#### (1) 巣穴長の推定結果

実地調査とシミュレーションで取得した波形を比較して Fig. 2 に、巣穴型の断面図を Fig. 3 にそれぞれ示す。図中の英字は現地調査とシミュレーションで得られた波形にて、同じ位置で観測されたピークと、そのピーク位置に相当する巣穴断面の位置との対応を示している。Fig. 4 は各英字部セクションにおいてピークが検知された際のシミュレーション上の波動伝搬を可視化した画像である。Fig. 3 より、実地調査により得られた波形上にて最遠の反射波は F で、これより推定される巣穴長さは 187 mm である。

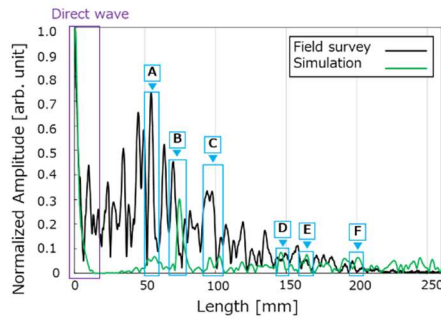


Fig. 2 Waveform obtained from simulation and field measurement, respectively.

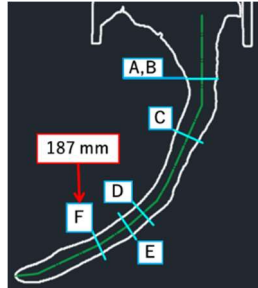


Fig. 3 Image of cross section of the acrylic burrow.

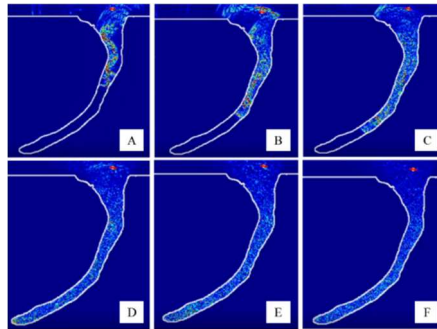


Fig. 4 Snapshots of sound pressure distribution when the first wavefront comes to each of the section.

### (2) 進展方向の推定結果

巣穴の伸展方向とプローブの角度が一致している場合は第 1 反射波のピーク振幅が極小となる。これを利用して進展方向を推定した事例を示す。全長 13.7 cm 程度の傾斜した巣穴を対象とした推計を行った結果を、プローブの角度 (0°が鉛直方向) とその角度にて受信した波形の第 1 反射波におけるピーク振幅の関係として Fig. 5 に示す。当図より、推定結果は 24°となり、実物の方向である 21.7°に対して 2.3°の誤差で推定可能であることが示された。

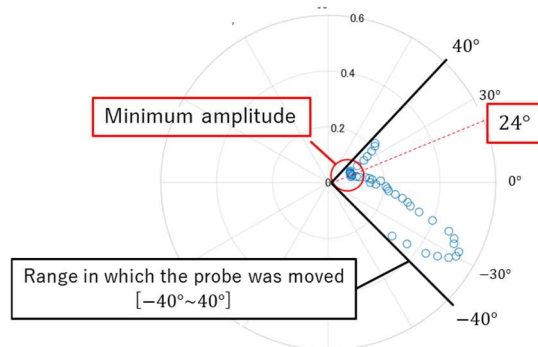


Fig. 5 Relationship between sound incidental direction and amplitude of the first wavefront.

### (3) 検証実験

千葉県市川市行徳近郊緑地にある泥質干潟において、従来の巣穴計測手法である樹脂成型法と本研究の超音波測定手法 (周波数変調パルス波を用いた走査測定) を用いて、計 5 個のヤマト

オサガニの巣穴 (Fig. 6) の巣穴形態を測定した. その結果、Table 2 に示す予測精度を確認した。



Fig. 6 Resin casts obtained from burrows of *Macrophthalmus japonicus*. (a) Burrow 1, (b) Burrow 2, (c) Burrow 3, (d) Burrow 4, (e) Burrow 5, respectively.

Table 2 A comparison of measurement results between previous proposed method using 500 kHz chirp (field study) and resin casting.

Burrow number	1	2	3	4	5	Mean	CV
Reference length /mm	119	170	440-630	290	435-855		
Estimated length /mm	129.3	100.4	85.29	136.3	103.2		
Relative error of length (%)	8.7	40.9	80.6-86.5	53	76.3-88.0	51.8-55.4	0.50-0.54
Reference $\theta$ angle /deg	0-14	21-30	5-20	21	21-26		
Estimated $\theta$ angle /deg	32.4	15.12	41.04	21.6	38.8		
Absolute error of $\theta$ angle /deg	18-32	6-15	21-36	1	13-18	11.8-20.4	0.62-0.63
Reference $\Phi$ angle /deg	345	242-247	180	197	90		
Estimated $\Phi$ angle /deg	324	0	135	324	207		
Absolute error of $\Phi$ angle /deg	21	113-118	45	127	117	84.6-85.6	0.51

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

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 日本音響学会 2022年度春季研究発表会
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 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 2022年度春季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hajime Tachiki, Haruki Hirasawa, Takumi Asakura, Katsunori Mizuno, Koji 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
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年秋季研究発表会
4. 発表年 2022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 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 2023年2月 騒音・振動研究会
4. 発表年 2022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
研究 分担者	清家 弘治  (Koji Seike)  (20645163)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員   (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	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	水野 勝紀  (Mizuno Katsunori)  (70633494)	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・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