

令和5年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

沿岸域における海中サウンドスケープ観測システムの開発に関する基礎研究

令和6年5月

一般社団法人全国水産技術協会

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による
委託研究業務として、代表研究機関名が実施した令和5年度
「沿岸域における海中サウンドスケープ観測システムの開発
に関する基礎研究」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

1.1 研究課題の最終目標

我が国は四方を海に囲まれた海洋国で、その沿岸は漁業・養殖業などの食料生産をはじめ、物流の手段としての海上交通の場として使われている。最近では海洋レジャーの高まりもあって、利用者が増加し、その利用方法も多様化している。

最近、海洋生物（哺乳類）と船舶との衝突事故が各所でみられるようになり、船舶の安全航行への障害、漁業生産の減少もみられ、海洋生物による海面利用者の刺傷事故なども散見され、海洋生態系の変化が懸念されている。

そこで、海洋生物の動きを事前に探知し、船舶運航者を含む海面の利用者に周知させることができれば、事故の回避につながるとの考えから、各種の音源を収集解析したのち配信できるシステムを開発するため、以下の目標を達成する。

(1) 特定の音源をリアルタイムで分類する技術の開発

海中音をまず生物音、環境音、人為音に大別する（レベル1）。次に、それぞれについて、哺乳類、波浪、船舶など大まかな音源分類をする（レベル2）。最後に、ジュゴン、イシモチ、波高2m以上や漁船というように詳細な音源分類をする（レベル3）。このとき、各レベルにおける分類処理時間の努力目標は1分以内とし、レベル3までの音源分類を終了することを目指す。それぞれのレベルにおける精度目標は次の通りである。

レベル1：80%以上

レベル2：70%以上

レベル3：60%以上

海洋生物の動きについては、これまで、地域的に、かつ、ある特定の時期・時間に、観測船の周囲だけ、単発的に観測することしかできなかった。そのため、広範囲にわたる海洋生物の網羅的な移動経路の把握、また、季節や時刻による移動経路の変化などについての知見は少なく、さらに、海洋生物の挙動をリアルタイムに把握することもできなかった。

なお、評価方法については、3.2（2）に記載する。

(2) 分類した音源情報をリアルタイムで長距離水中通信する技術の開発

ゴールドコード方式を用いた水中超音波通信により、SN比が3dB以上の海中における長距離水中通信を実現する。水中通信の距離、適合度、再現度の目標は次の通りである。

通信距離：約1 km以上

適合度：80%以上(受波機における検出結果のうち、正しく検出される割合。
誤り率の逆数)

再現度：80%以上(送信された信号のうち、正しく検出される割合)

(3) 上記(1)(2)の機能をもった音響機器（サウンドスケープ録音機）の開発

リアルタイム自動音源分類を内部処理で実施し、結果を水中通信する機能を有する音響機器を仮作する。

(4) 上記(3)の音響機器(サウンドスケープ録音機)を多点展開し、モデル海域を網羅する観測ネットワークの構築

対象海域において、音源ごとの時空間分布を可視化する(サウンドスケープの描画)するために、サウンドスケープ録音機および海上ブイ等を多点配置する。

石垣島周辺2ヶ所において、四季にわたりそれぞれ二潮(約4週間)サウンドスケープ録音機を設置して、ネットワークを構築し、サウンドスケープ情報を充実させるため、音源となる生物音、環境音、人為音を収録する。

海上安全の関係から、沿岸域での機器設置が困難な場合がある。そこで、設置型音響機器だけでなく、海洋生物を自立式移動体(プラットフォーム)として捉え、海洋生物(ウミガメ類)に音響機器を装着するバイオリギング手法で、音響機器の設置が困難な幅広い空間で観測を行うことを目指す。

(5) 海面利用者への音源ごとの時空間分布（サウンドスケープ）の配信

サウンドスケープ録音機から得られる音源分類結果は、クラウド上に構築したデータベースシステムに統合し、音源ごとの時空間分布を可視化(サウンドスケープの時空間分布を描画)する。モデル海域にサウンドスケープ録音機を多点展開する。1km間隔で配置した各定点観測から、各位置でのサウンドスケープデータを取得する。各音源の時空間分布については、1km間隔で描画する。

また海洋生物装着型ロガーについては、衛星通信(アルゴス)または携帯電話網にデータが送信された時にわかる簡易位置推定(5km以内の精度*)から位置を把握し、サウンドスケープが得られた時刻と、位置が把握できた時刻を照合することで、各位置のサウンドスケープデータを取得する。各サウンドスケープ録音機で取得されるサウンドスケープ情報は、データが送信されてから、30分間以内にクラウド上で処理を行い、予め登録された海面利用者へ、サウンドスケープ情報を配信することを目標とする。

*簡易位置推定の精度に関しては通信モジュールの仕様による。

1.2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

(1)-1 モデル海域の選定、現地観測体制の整備

最終目標達成のためには、音源としての生物音、環境音、人為音それぞれがバランスよく存在する音環境の海域を選定する必要がある。また、沿岸域には漁業権が存在するので、海域において観測業務を実施するためには、事前に県、漁業協同組合連合会等との調整が必要である。3.2の(1)-2で選定された複数の候補地から、調整の結果等を総合的に判断して観測を実施する海域を決定する。観測を実施する海域を決定した後は、そこを所管する海上保安部等への許可申請が必要である。このような手順を踏むことによって、現場における観測体制を整備する。

(1)-2 モデル海域における観測候補地の選定

海洋生物の生息環境は、水温、水深、海底の底質などの物理環境、栄養塩等の化学環境によって変化することが知られているので、これらすべての条件を調査し、海上交通の状況、観測機器設置の難易度等を勘案して、観測候補地を複数選定する。

(2) 短時間の音源分類手法の開発

最新の音源分類方法である非負値行列因子分解（Non-negative Matrix Factorization, NMF）および機械学習などを組み合わせた音響解析技術を開発する。これにより、海中音をまず生物音、環境音、人為音に大別する（レベル1）。次に、それぞれについて、哺乳類、波浪、船舶など大まかな音源分類を行う（レベル2）。最後に、ジュゴン、イシモチ、波高2m以上や漁船というように詳細な音源分類を行う（レベル3）。このとき、1分間以内にレベル3まで音源分類することを目標とする。

それぞれのレベルにおける分類の精度評価の方法については、音源が特定できている音を対象とし、その音を音源分類アルゴリズムが正しく分類する割合を評価する。このとき、音源が特定できている音の数は100例以上とする。

具体的には次の手順に従う。

(2)-1 音源分類アルゴリズムの構築のためのデータ収集

- (a) 録音される音と音源とを関連付けるための基礎データ収集を実施する。
- (b) 船上からの目視観察あるいは潜水による水中撮影などによって、音源が特定できている状況下で、それぞれの音種を録音する。
- (c) 船上から目視観察と水中音録音を同時に実施している状況下で、ハンドウイルカ等が目視で観察された時刻に、他に音を発する鯨類等が近傍にいない状況において、同時刻の録音データに記録されるホイッスル音を、目視したハンドウイルカ等とする。
- (d) 船種については、船上目視観察を実施し、録音機付近を通過した船舶の種類や

速度などを記録し、同時刻の録音データを該当の船種の音とする。

- (e) イセエビ等の船上目視観察ができない生物の発音については、夜間に潜水観察を実施し、イセエビの映像と音声を同時に記録する。
- (f) 自然環境下で音と音源を関連付ける作業が困難な場合には、対象種を飼育している水族館や研究所において録音する。
- (g) このように録音データと音源とを関連付けることができたデータを、各音種について100例以上収集し、これらの作業によって得られたデータを教師データとし、AIによる機械学習を行い自動分類アルゴリズムを構築する。

(2) -2 音源分類アルゴリズムの精度評価

- (a) 上記1で録音されたデータに対して自動音源分類アルゴリズムを実行する。
- (b) アルゴリズムの音源分類結果とそれぞれの音種について上記1で抽出された100例以上の該当音を照合し、分類の正解率を評価する。
- (c) 上記1の(b)から (f) で音源と関連付けたそれぞれの音について、該当音の発生時刻の前後30秒間を含む録音データが、音源分類アルゴリズムによって該当音であると判定された場合、正解に分類されることになる。
- (d) このような作業を繰り返し実施して、100例のホイッスル音のうち音源分類が正解した数を、該当音に関する音源分類アルゴリズムの正解率とする。
- (e) 同様にすべての観測対象音種について、正解率を求め評価する。

この要素課題で開発される音源分類手法は、本研究課題の最終目標の(1)を達成するためのソフトウェア群の中核を担うものである。

(3) 高速の信号処理基板の構築

上記(2)に係る処理を録音機内部で行うためには、サウンドスケープ録音機の基板上に特定用途向け集積回路(Application Specific Integrated Circuit、以下「ASIC」という。)やDigital Signal Processing(DSP)チップ等を組み込み、低電力な高速信号処理基板の開発が必要である。サウンドスケープ録音機の仕様に関する目標は次の通りである。

空中重量：20kg以下

水中重量：-2～0kg

大きさ：最長辺1m以下

システム感度：-160dB以上

連続動作時間：720時間(30日)以上

記録方式：24bitデジタルデータ記録

(4) 長距離の水中通信機器の開発

最終目標において多点観測を実施するにあたって、中継機となる海上ブイとサウンドスケープ録音機との水中通信技術が必要である。特に、スパイクノイズが多い浅海において、SN比が低い海況では長距離水中通信技術の開発は重要である。

(5) クラウドシステムによる情報統合

最終目標において多点観測によって得られた情報を統合し、サウンドスケープの時空間分布を可視化する技術を開発する。情報統合のためには、得られたサウンドスケープ情報に合わせた前処理やデータベースシステムを開発する。

(6) 多点観測によるネットワークモニタリングおよび情報配信

最終目標において多点観測を長期間実施し、得られる情報をいち早く利用者へ配信できる体制を整える。多点観測により情報量が増えた場合においても、データが送信されてから目標時間内(30分間)にデータを配信可能なクラウドシステムを設計する。また、多点観測する際に、海上安全の関係から、沿岸域での機器設置が困難な場合があるので、海洋生物(ウミガメ類)に装着してサウンドスケープ観測が可能なバイオリギング用データロガーを開発する。

(7) プロジェクトの総合的推進

複数機関が参画するプロジェクトを円滑に運営するためには、全体の連絡を密にしながら、研究者が研究に専念できる体制を整備することが必須であり、これを実現するためには責任をもって総合調整を担う機関を定め、プロジェクトの総合的な推進を行う。

1.3 要素課題に対する実施項目及び体制

(1)-1 モデル海域の選定、現地調整 (担当：一般社団法人全国水産技術協会)

モデル海域としては、生物の多様性および交通の利便性という観点から、八重山諸島の石垣島を選定し、なかでも以前から調査経験のある石西礁湖および米原周辺海域を第一候補とする。サウンドスケープ解析においては、分類対象が多いほど得られる情報量が増える。サンゴ礁生態系の生物種は海生哺乳類、発音性魚類、テッポウエビなどがあり、多様な生物の鳴音等が得られる。また、石垣島は気象条件から考えても亜熱帯海域にあるため、台風や大雨など様々な気象条件の情報を入手することができ、データの質的にはバリエーションがある。さらに、石西礁湖を利用する船舶も、漁法の異なる小型漁船やフェリーなど多様性が高い。音響機器をはじめ各種の観測機器を設置する候補地が選定された後、科学的、社会的条件等を総合的に勘案して、観測候補地の中から最適な観測地を決定する。

観測のための機器設置に先立って、現地の海面利用者との協議や設置許可等準備作業を実施する。

また、水中音源を可視化するための手段として、水中カメラを用いて、海域における生物等の映像を記録する。

(1)-2 モデル海域における観測候補地の選定(担当：いであ株式会社)

海洋生物は、水温、水深、海流、流速、海底の状況等の物理環境に加えて、水温、栄養塩等の化学環境によって、生息場所が変化するので、これまでの調査経験を生かして、モデル海域となる石垣島周辺海域において、観測候補地を選定し、現地研究体制の整備を行う。その際、生物音のほか台風・降雨等の環境音、船舶の航行状況等を加味して、安全にすべての音源が収録できる等の条件を総合的に判断して、複数の観測候補地を選定する。

(2) 短時間の音源分類手法の開発(担当：株式会社アクアサウンド)

従来の研究では、海中音の3要素（生物音、環境音、人為音）のそれぞれに特化した音源分離が実施されてきたが、それらの多くは非リアルタイムで実現されてきたものである。また、分類精度は上記レベル2にとどまっていた。本課題は従来の水中音モニタリングの同時観測対象数、実行時間および分類精度を大きく凌駕するものである。株式会社アクアサウンドが手法開発および実装を担当する。

(3) 高速の信号処理基板の構築(担当：株式会社アクアサウンド)

サウンドスケープ録音機の基板上に特定用途向け集積回路やチップ等を組み込み、集音した音響データに対して(2)で開発した音源分類アルゴリズムを高速省電力で内部処理する技術を実現開発する。これにより、サウンドスケープ録音機内部で自動的に音源を分類することが可能となる。

この要素で構築される処理基板は、最終目標の(1)における1分間以内の音源分類を実現するためのものである。また、要素課題の(4)と合わせて最終目標の(3)を実現する。

(4) 長距離の水中通信技術の開発(担当：株式会社アクアサウンド)

ゴールドコード信号による水中通信を利用して、海底に設置されたサウンドスケープ録音機内部における(3)の音源分類結果を海上ブイに送信する。サウンドスケープ録音機と海上ブイの目標通信距離は沿岸域において1 km以上とする。開発する機器は、サウンドスケープ録音機の水中通信モデムおよび海上ブイの受信モデムである。海上ブイは空中無線通信により、陸上局(要素課題(5))へ情報を送信することができる。

この要素課題で開発される技術は、最終目標の(2)における水中通信を実現するためのものである。また、要素課題の(3)と合わせて最終目標の(3)を実現する。

(5) クラウドシステムによる情報統合(担当：Biologging Solutions Inc.)

海上ブイ等の端末から無線通信によって送られる情報を統合し、サウンドスケープ描画のための基礎データ処理をする。Biologging Solutions Inc.が情報統合を目的としたクラウドシステムの仕様設計・実装を担当する。

この要素課題は、最終目標の(4)において多数の海上ブイ等の端末から送信される情報を統合するために必要なものである。

(6) 多点観測によるネットワークモニタリングおよび情報配信

(担当：Biologging Solutions Inc.)

複数のサウンドスケープ録音機により得られたデータをクラウドシステムに統合し、音源ごとの時空間分布を可視化する（サウンドスケープの描画）技術を開発する。株式会社アクアサウンドが多点観測用のブイの開発・製造を行う。また、観測海上安全の関係上、沿岸域での機器設置が困難な場合がある。そこで、設置型音響機器だけではなく、海洋生物を自律式移動体(プラットフォーム)として捉え、海洋生物(ウミガメ類等)に音響機器を装着するバイオリギング手法で、音響機器の設置が困難な幅広い空間で観測を行う技術を開発する。このためにサウンドスケープ録音機能を搭載し、衛星通信や近距離無線を通して、サウンドスケープ情報および水温や塩分等の環境情報を送信可能なバイオリギングの小型データロガーを開発する。また、現場におけるサウンドスケープ情報の真値を取得するために、スケジュール設定に従い、映像記録が可能なビデオロガーを開発する。最終的にクラウドに集められたサウンドスケープ情報は、クラウド上で処理することで、得られた音源ごとの時空間分布情報を海面利用者に配信する。Biologging Solutions Inc.が多点観測に向けたロガーの開発および多点観測から得られるデータの情報配信を目的としたクラウドシステムの仕様設計・実装を担当する。

(7) プロジェクトの総合的推進(担当：一般社団法人全国水産技術協会)

プロジェクト全体の連携を密にしつつ円滑に運営するため、実験データ管理システムを導入して、研究結果の相互利用を行うことによって、意思の疎通を活発化する。また、各担当機関とWEBを利用した会議のほか、定期的な会合を行うことによって、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理性を検討する。さらに、研究アドバイザーからの個々の問題を解決するための指導・助言を受けるほか、各分野の専門家による委員会を設置して、研究計画、研究結果等についても、総合的指導・助言を受け、プロジェクトの効率的な推進に努める。

2. 研究開始時に設定した目標の達成度

数値目標があるものについては％で、ないものについては○（達成）×（達成せず）で示す。

2-1 特定の音源をリアルタイムで分類する技術の開発

音源分類アルゴリズムが対象とする音種数

	目標値	達成値	達成度
音種数	100	52	52%
生物音	—	39	—
環境音	—	2	—
人為音	—	11	—

音源分類能力

		目標値	現地実験	達成度
生物音	レベル 1	80%以上	87.6% (613/700)	100%
	レベル 2	70%以上	87.0% (609/700)	100%
	レベル 3	60%以上	72.1% (505/700)	100%
環境音	レベル 1	80%以上	90.0% (36/40)	100%
	レベル 2	70%以上	90.0% (36/40)	100%
	レベル 3	60%以上	90.0% (36/40)	100%
人為音	レベル 1	80%以上	77.7% (167/215)	97%
	レベル 2	70%以上	74.9% (161/215)	100%
	レベル 3	60%以上	69.3% (149/215)	100%

2-2 分類した音源情報をリアルタイムで長距離水中通信する技術の開発

	目標値	実験値	達成度
通信距離	約 1000m 以上	1100m	100%
適合度	80%以上	100%	100%
再現度	80%以上	100%	100%

2-3 上記(2-1, 2-2)の機能を持った音響機器(サウンドスケープ録音機)の開発

項目	目標値	達成値	達成度
空中重量	20kg 以下	9.5kg	100%
水中重量	-2~0kg	-1.5kg	100%
大きさ	最長辺 1m 以下	79.6cm	100%
システム感度	-160dB 以上	-160dB	100%
連続動作時間	720 時間以上	35 日	100%
記録方式	24bit デジタルデータ記録	24bit	100%

2-4 上記(2-3)音響機器(サウンドスケープ録音機)を多点展開し、モデル海域を網羅する観測ネットワークの構築

	目標値	達成値	達成度
設置箇所	3	3	100%
設置期間	四季	夏~冬実施	×
	それぞれ二潮(約4週間)	約4か月	○
自律的移動体	産卵個体	19 個体	○
	亜成体	12 個体	○

2-5 海面利用者への音源ごとの時空間分布(サウンドスケープ)の配信

項目		目標値	達成値	達成度
(サウンドスケープ録音機)				
サウンドスケープ録音機の多点展開	設置場所・台数	1km 間隔	最大 3 地点×2 台	○
	期間	—		○
音源ごとの時空間分布の可視化		1km 間隔で描写	各地点の音種ごとの識別 数を地図上に描画	○
(海洋生物装着型ロガー)				
簡易位置推定	精度	5km 以内	50m 以内	100%
(クラウド上に構築したデータベースシステムへの統合)				
クラウド上での情報処理 海面利用者への情報配信		30 分以内	30 分以内	100%

「沿岸域における海中サウンドスケープ観測システムの開発に関する基礎研究」対比表

業務計画書(要素課題に対する実施項目及び体制)	成果報告書
(1)-1 モデル海域の選定、現地調整(担当：一般社団法人全国水産技術協会)	3-1-1 モデル海域の選定、現地調整に関する事項 3-2-1 長期実験におけるサウンドスケープ情報収集・配信システムの評価に関する研究
(1)-2 モデル海域における観測候補地の選定(担当：いであ株式会社)	3-1-2 観測機器のメンテナンスに関する事項 3-1-3 人為音収集のための操業状況調査 3-1-5 長時間音源・映像収録装置の開発に関する事項 3-2-2 生物音の収集に関する研究
(2) 短時間音源分類手法の開発(担当：株式会社アクアサウンド)	3-2-3 海底設置サウンドスケープ録音機の音源アルゴリズムに関する研究
(3) 高速の信号処理基板の構築(担当：株式会社アクアサウンド)	3-2-4 海底設置サウンドスケープ録音機的设计に関する研究
(4) 長距離の水中通信技術の開発(担当：株式会社アクアサウンド)	3-2-5 海底から陸上へ音源分類情報を届けるための水中通信技術に関する研究
(5) クラウドシステムによる情報統合(担当：Biologging Solutions Inc.)	3-2-6 クラウドシステムによる情報統合
(6) 多点観測ネットワークモニタリングおよび情報配信(担当：Biologging Solutions Inc.)	3-2-7 多点観測によるネットワークモニタリングおよび情報配信に関する研究
(7) プロジェクトの総合的推進(担当：一般社団法人全国水産技術協会)	3-1-4 プロジェクトの総合的推進に関する事項

注：成果報告書では、3-1 研究支援等に関する事項 3-2 基礎研究に関する事項にわけて記述した。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

3-1 研究支援等に関する事項

3-1-1 モデル海域の選定、現地調整に関する事項(担当：いであ株式会社)

1 目的

本研究を開始するに当たり、多くの魚介類から鳴音を収録する必要があるので、生物相の豊かな八重山諸島が候補地とした経緯がある。

石西礁湖が存在する八重山諸島はサンゴ礁生態系として多様な生物相で構成されている。なかでも魚類は 500 種以上、甲殻類も非常に多くの種が生息しているほか、海産哺乳類も多く来遊することが、これまでの調査等によって明らかにされている。

離島が多く、流通や交通としての船舶の航行は日常的であるほか、漁業や海洋レジャーが盛んであり、港湾整備等の工事も日常的であるため、工事と併せて人為音も収集しやすい。さらに、夏季は台風、冬季は北よりの季節風に伴う波浪や降雨も多く、自然音も収録しやすいと考えられる。

このように、生物音、環境音および人為音が収録できる地点を、石西礁湖とその周辺の海域で選定し、多くの音源が安全に収録できる地点を選定することを目的とする。

2 方法

2-1 モデル海域の選定

モデル海域の選定に当たり、既往文献の収集と関係機関や団体等への聞き取り調査によって、資料を入手して解析する。

聞き取り調査として訪問した関係機関は、国立研究開発法人水産研究・教育機構水産技術研究所八重山庁舎（以下、「水産技術研究所」という。）、沖縄県農林水産部水産課、沖縄県水産海洋技術センターおよび石垣支所、石垣市農林水産商工部水産課、竹富町農林水産課の公的機関 6 か所と沖縄県漁業協同組合連合会、八重山漁業協同組合、八重山ダイビング協会の団体 3 か所である。

2-2 現地調整

研究を始めるに当たり、海上にブイ等を設置する必要があることから、事前に研究計画を説明し、許可等を早期に入手する必要があるので、国の機関、沖縄県の機関、関係市町村、漁業協同組合等へ調査計画を説明して研究への協力と支援を求める。

3 結果

3-1 モデル海域の選定

資料収集は、環境省が継続的に実施している石西礁湖サンゴ群集モニタリング調査結果（2018）より、魚類種類数の多い地点を中心に選定した。また、聞き取り調査は、八重山漁業協同組合および漁業者やダイビング協会所属のダイバーを主な対象者とした

ほか、(一財) 沖縄美ら島財団沖縄美ら海水族館（以下、「沖縄美ら海水族館」という。）、水産技術研究所、沖縄県水産海洋技術センター等の専門研究機関からも情報を収集した。

これらの資料をもとに解析を進めたところ、生物音、特に魚類を主体とした鳴音収録に関する既往文献は非常に少なかったが、本研究のモデル海域として、表 3-1-1-1 に示す 38 地点が選定された。

3-2 現地調整

現地調査を行うに当たり、事前に本研究の主旨および計画説明等を実施した関係機関を表 3-1-1-2 に示した。

訪問した機関は、国関係 2 か所、国立研究開発法人 1 か所、沖縄県関係 5 か所、市町村関係 2 か所、漁連・漁協 2 か所、水族館 2 か所、その他 2 か所の合計 16 機関であった。その結果すべての機関から本研究を推進するに当たり、必要な支援を受けられることが決まった。

表3-1-1-1 選定された調査地点

番号	調査位置	緯度	経度
①	石垣港周辺	24° .19′ 22.8″	124° .08′ 00.7″
②	名蔵湾周辺①	24° .24′ 34.9″	124° .06′ 30.6″
③	竹富島北周辺	24° .20′ 48.8″	124° .04′ 18.2″
④	黒島東周辺	24° .17′ 12.0″	124° .04′ 47.5″
⑤	ヨナラ水路	24° .21′ 13.8″	123° .57′ 14.1″
⑥	新城島東周辺	24° .15′ 26.2″	123° .58′ 09.6″
⑦	南風見田周辺	24° .14′ 38.2″	123° .53′ 29.8″
⑧	舟浮湾口部周辺	24° .21′ 15.4″	123° .42′ 54.8″
⑨	小浜島南	24° .18′ 18.4″	123° .58′ 04.3″
⑩	鹿川湾	24° .17′ 16.8″	123° .43′ 53.8″
⑪	サザレ浜周辺	24° .16′ 53.5″	123° .44′ 48.0″
⑫	北礁	24° .20′ 58.6″	124° .04′ 40.8″
⑬	三ツ石	24° .21′ 55.3″	124° .02′ 21.2″
⑭	屋良部崎①	24° .25′ 33.2″	124° .04′ 12.0″
⑮	屋良部崎②	24° .25′ 18.7″	124° .04′ 31.9″
⑯	黒島西(仲本海岸沖)	24° .13′ 56.0″	123° .59′ 32.8″
⑰	黒島北西	24° .15′ 24.2″	123° .59′ 19.1″
⑱	小浜南浅場①	24° .19′ 22.9″	123° .58′ 55.0″
⑲	小浜南浅場②	24° .19′ 33.4″	123° .58′ 48.4″
⑳	サクラグチ	24° .19′ 21.6″	124° .10′ 25.2″
㉑	竹富島南西(皆治浜沖)	24° .18′ 45.3″	124° .04′ 16.9″
㉒	名蔵湾周辺②	24° .23′ 35.5″	124° .07′ 01.6″
㉓	名蔵湾周辺③	24° .24′ 24.4″	124° .06′ 50.4″
㉔	御神崎	24° .27′ 18.4″	124° .04′ 54.6″
㉕	崎枝湾	24° .28′ 18.1″	124° .06′ 41.8″
㉖	野原口	24° .23′ 08.6″	123° .55′ 56.5″
㉗	野原	24° .23′ 00.7″	123° .56′ 13.2″
㉘	黒島北東	24° .15′ 06.9″	124° .02′ 01.2″
㉙	竹富島東	24° .19′ 53.1″	124° .06′ 27.1″
㉚	ヨナラ水路水路南方	24° .17′ 42.2″	123° .56′ 50.4″
㉛	新城島上島北(423)	24° .14′ 47.0″	123° .56′ 56.5″
㉜	黒島港東側①	24° .15′ 22.8″	124° .00′ 15.7″
㉝	黒島港東側②	24° .15′ 20.0″	124° .00′ 20.9″
㉞	新城上地下地間	24° .13′ 27.0″	123° .55′ 57.0″
㉟	新城下地北西	24° .13′ 26.8″	123° .54′ 49.2″
㊱	伊良部島	24° .51′ 00.0″	125° .08′ 04.8″
㊲	波照間島	24° .03′ 53.7″	123° .45′ 42.7″
㊳	鳩間島	24° .27′ 66.5″	123° .49′ 59.8″

表 3-1-1-2 現地調査のための事前説明等

機 関 名	内 容
第十一管区海上保安本部 石垣海上保安部 交通課	観測機器の設置に関する許可申請
環境省沖縄奄美自然環境事務所 石垣自然保護官事務所	ウミガメ採捕に関する届け出
沖縄県農林水産部水産課	観測機器設置に伴う岩礁破壊許可申請 ウミガメ特別採捕許可申請
沖縄県水産海洋技術センター 同石垣支所	研究協力
沖縄県八重山農林水産振興センター 農林水産整備課 漁港水産班	現地観測に伴う許可申請
沖縄県土木建築部 八重山土木事務所 整備維持班	現地観測に伴う許可申請
国立研究開発法人 水産研究・教育機構 西海区水産研究所 亜熱帯研究センター	研究協力
石垣市役所 農林水産部 水産課	研究協力
竹富町役場 産業振興課農林水産・商工係	研究協力
沖縄県漁業協同組合連合会	現地調査協力
八重山漁業協同組合	調査船備船
有限会社 ぶしいぬしま (石垣ダイビング協会会長)	現地調査協力
有限会社 海游	現地調査協力
一般財団法人 沖縄美ら島財団水族館事業部 総合研究センター	研究協力 飼育魚介類の鳴音収録・画像撮影
オキナワマリンリサーチセンター(OMRC)	イルカ類の鳴音収録

3-1-2 観測機器のメンテナンスに関する事項(担当：いであ株式会社)

1 目的

本研究においては、鳴音収録機器を長期にわたり海底に設置することが必要であり、そのメンテナンスを的確に実施して、研究を円滑に推進することを目的とする。

2 方法

石垣島周辺海域の調査のために選定された地点において、長期実験を含む現地調査が行われるが、鳴音収録機器等の電池交換、機器の交換等メンテナンスを実施し、研究を支援する。

3 結果

鳴音収録機器のメンテナンスは表 3-1-2-1 に示すように実施した。

表 3-1-2-1 鳴音収録機器等のメンテナンス回数

年度	R1	R2	R3	R4	R5
長期実験	-	4/22- 5/14 5/28-7/7 8/6-9/14	8/24- 11/1 1/25-3/4	6/17-9/6 12/16- R5.8/29	8/20- R6.12/26
台風等による資機材の撤去	—	—	—	2	1
資機材の交換等	—	19	18	12	12
ブイ等流失に伴う搜索作業	—	—	—	3	2

研究期間中のメンテナンスは、現地における研究を開始した令和 2 年度から令和 5 年度終了するまでの間、現地調査 95 回、長期実験に伴う台風等による資機材の撤去 3 回、機器の交換等 61 回、ブイ等流失に伴う搜索作業等を合計 5 回実施した。

3-1-3 人為音収集のための操業状況調査(担当：いであ株式会社)

1 目的

離島が多く、流通や交通としての船舶の航行は日常的であるほか、漁業や海洋レジャーが盛んであり、港湾整備等の工事も日常的であるため、工事と併せて人為音も収集しやすい。このことから、人為音の収集は現地調査において、日中航行する船舶の記録と航行音を収録することで概ね把握する。しかしながら、夜間操業の漁船もあることから、八重山漁業協同組合の操業状況等から収集する人為音の分類等に寄与することを目的とする。

2 方法

八重山漁業協同組合に対して、聞き取り調査を実施し、組合所属の漁船の情報を入手する。また、八重山漁業協同組合所属の漁法別代表漁業者から石垣島周辺海域において操業している実態（漁法、操業場所、漁船の構造等）を聞き取る。

3 結果

農林水産統計年報から八重山漁業協同組合で営まれている漁業種類は表 3-1-3-1 のとおりであり、これをさらに細分化した漁業種類ごとの保有登録隻数は表 3-1-3-2 に示すとおりである。

漁業種別にみると、一本釣と潜水器漁業が 46 隻と最も多く、集魚灯一本釣が 21 隻とこれらに続いた。一本釣は主にマグロ類、アカマチ（ハマダイ類）、ソデイカ等対象種が限定されており、曳網や鮪延縄を含めて漁場は沖合遠方か深場である。一方、鳴音を発するとされる魚種の多くは、沖合でも比較的沿岸域で浅海に生息している。これらの魚種は主に潜水器漁業や釣りおよび小型定置網漁業によって漁獲されている。これらが八重山漁協における主幹漁業と考えられ、海上での操業あるいは移動航行中の収録を行うにあたり、5 トン未満が潜水器漁業、曳縄漁業であり、10 トン未満が鮪一本釣漁業、延縄漁業であることからこれらを主な対象とした(表 3-1-3-3)。また、現地調査で使用する船舶がモズク養殖操業船であることからモズク養殖船舶の代表とした。さらに、これら船舶の搭載動力は表 3-1-3-3 に示すとおりであり、5 トン未満はほとんどが 100 馬力未満であり、10 トン未満は 200～500 馬力であった。

また、八重山漁協に所属する主要な漁船のタイプを図 3-1-3-1 に、八重山漁協の競りにおける漁獲物を図 3-1-3-2 に示した。

なお、沖合漁場であるパヤオでの収録を検討したが、潮流の速さや波高からエンジン稼働しながら停船せず、さらにパヤオ固定用チェーン音もあり、収録の正確性と安全面から収録を控えた。

表3-1-3-1 八重山漁協における漁業種類別経営体数

No	漁業種類	経営体数	No	漁業種類	経営体数
1	小型定置網	6	6	その他の延縄	2
2	その他の刺網	9	7	沿岸いか釣	8
3	その他の網漁業	2	8	ひき縄釣	52
4	近海まぐろ延縄	4	9	その他の釣り	67
5	沿岸まぐろ延縄	11	10	潜水器漁業	57

表3-1-3-2 八重山漁協における漁業種類別保有隻数

番号	漁業種類	隻数	番号	漁業種類	隻数
1	一本釣	46	11	潜水器/一本釣	3
2	一本釣/曳縄	8	12	潜水器/曳縄	1
3	カゴ網	2	13	潜水器/モズク養殖	3
4	カツオ一本釣	1	14	曳縄	16
5	観賞魚	1	15	鮪延縄	12
6	集魚灯一本釣	21	16	モズク養殖	28
7	集魚灯一本釣/一本釣	2	17	養殖	1
8	集魚灯一本釣/曳縄	9	18	記載なし	238
9	集魚灯一本釣/鮪延縄	4		合計	442
10	潜水器	46			

表3-1-3-3 八重山漁業協同組合登録船舶のサイズおよび推進機関別集計結果

(サイズ：5トンごと)			(推進機関：100馬力ごと)		
以上	未満	隻数	以上	未満	隻数
0	5	398	0	100	289
5	10	36	100	200	78
10	15	7	200	300	35
15	20	1	300	400	17
合計		442	400	500	18
			500	600	5
			合計		442



図 3-1-3-1 主な漁船



アカマチ(ハマダ イ)



ハナフエダ イ, メイダ イ属, チカメシキ, スジ アラ



ブダ イ類



ハタ類, フエキダ イ類



クロマグロ

図3-1-3-2 八重山漁協の競りにおける漁獲物

3-1-4 プロジェクトの総合的推進(担当：一般社団法人全国水産技術協会)

1 目的

研究プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営するため、各研究分担機関と定期的な打合せを行うとともに、研究アドバイザーからの適切な助言を得て、プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理性を検討する。また、各分野の専門家による委員会を設置して、研究計画、研究結果等について、総合的な指導・助言を受け、プロジェクトの推進に努めることを目的とする。

2 方法

研究実施者間の意思の疎通を活発にするために、研究実施者による会議は実験データ管理システムを利用した WEB により開催するほか、研究実施者に加えて海中サウンドスケープ観測システムの開発研究委員を研究アドバイザーとして加えた研究担当者会議を開催する。

本研究における海中サウンドスケープ観測システムの開発研究委員名簿は表 3-1-4-1 に示す。

表 3-1-4-1 海中サウンドスケープ観測システムの開発研究委員会名簿

氏 名	所 属	役 職
赤松友成	公益財団法人笹川平和財団 海洋政策研究所 海洋政策研究部	部長
荒井修亮(委員長)	京都大学 国立研究開発法人 水産研究・教育機構	名誉教授 理事(水産大学校代表)
市川光太郎	京都大学フィールド科学教育研究センター 農学研究科応用生物科学専攻 海洋生物環境学分野	准教授
塩田正純	元工学院大学	教授

3 結果

海中サウンドスケープ観測システムの開発研究委員会、研究実施者会議および研究担当者会議の詳細については、表 3-1-4-2 に示した。

研究実施者会議は、主として連絡調整のために月 1 回、WEB で開催されるものである。

研究担当者会議は、委員会の委員の参加を得て、技術的な問題を中心に討議し、研究上の技術的助言を得ながら、効率的に研究を進めるためには非常に有効であったといえることができる。また、会議には時折経理担当者も参加し、経理上の問題についても議論した。

海中サウンドスケープ観測システムの開発研究委員会においては、研究計画の検討と研究結果の取りまとめに対する討議が行われ、研究の技術的側面からの指導・助言は非常に効果的であった。

表 3-1-4-2 各種会議・委員会等の討議内容と開催回数等

会議名 項目	研究実施者会議	研究担当者会議	海中サウンドスケープ観測システム開発 研究委員会
1. 参加者	研究担当機関の代表者	研究分担者 研究アドバイザー(委員)	委員(全水技協会長が委嘱) (研究代表者・研究分担者)
2. 開催方法	WEB 会議方式	会議方式	会議方式
3. 開催回数	月に 1 回	概ね 2 か月に 1 回	年に 2 回
3. 運営 1)招集 2)座長	研究代表者 研究代表者	研究代表者 研究代表者	全国水産技術協会会長 委員長(荒井修亮：京都大学名誉教授・国立研究開発法人水産研究教育機構理事)
4. 討議内容	1)研究分担者間への連絡 2)現地調査の日程調整 3)研究実施上の技術的問題点の摘出 4)研究進行管理	1)研究実施上の技術的問題点の討議 2)研究アドバイザー(委員)からの技術的助言 3)研究の進捗状況の確認 4)委員会議題の整理	1)研究計画の承認 2)研究結果の評価 3)技術的指導・助言
5. 年度別開催回数			
令和元年度	4	2	2
令和2年度	14	7	3
令和3年度	9	6	3
令和4年度	11	6	3
令和5年度	12	6	3

3-1-5 長時間音源・映像収録装置の開発に関する事項(担当：いであ株式会社)

1. 目的

本研究においては、水中音の分類を機械学習により行うため、教師データとなる発生源の明らかな水中音の音源データを長期間収録する必要性が生じた。研究フィールドである石西礁湖のサンゴ礁海域は生物多様性が高く、現場のデータ収集では発生源が不明な生物音が多く収録されており、それらの判定に寄与する既往知見は乏しいことから、生物音の発生源の判定と教師データの効率的な収集が課題となった。

この課題解決のため、長時間にわたり水中で音源・映像を連続的に同時収録出来る海底設置型ロガーの開発を目的とする。

2. 方法

2-1 要求性能

長時間音源・映像収録装置の要求性能は、動画ファイル形式は問わないが、音源ファイル形式は可聴域を WAV にて収録出来ることであり、収録時間は可能な限り長時間とすることである。日周による生物活動や出現種の変化を観察するために、連続 24 時間以上の稼働を目標とする。

装置を運用する際、収録時間の限界は電池容量・消費電力・メモリ容量により決定される。長時間稼働するためには大きなバッテリーが必要となる一方、ダイバーによる海底への機器設置を行うには小型であるほど作業性が良い。

今回の検討で要求する性能について、収録時間は短いダイバーが片手で運搬可能であり、海底設置が容易に行えるサイズに収まるもの（27-30 時間収録タイプ）、また、大きなバッテリーを収納するためサイズが大きくなるが、収録時間が長く長期設置が可能となるもの（48-80 時間収録タイプ）を条件として、独立電源タイプの収録装置を作製し研究を支援する。また、製作に用いた機材は信頼性が高く、入手しやすい市販品を用いる。

2-2 収録装置の概要

2-2-1 27-30時間収録タイプ

WAV 形式で音源が記録出来る小型のサウンドビデオレコーダ（Zoom 社 Q8/Q4N サウンドビデオレコーダ）の外部マイク入力端子にハイドロフォン（AQUARIAN AUDIO & SCIENTIFIC 社 H2a）を接続し、電源はリチウムイオン電池のモバイルバッテリーから USB 給電（5V/1A）とする。

防水ハウジングは、ダイバーが手持ちで運搬・活用できるサイズを考慮し、一眼レフカメラのハウジングを改造して作製する。

使用したレコーダのメモリは 128GB（SD）であり、動画 MOV を HD720p-30fps、音源 WAV を量子化ビット数：16bit、サンプリング周波数：44.1kHz に設定した場合

のメモリを制限とする連続稼働時間は約27 時間である。消費電力は2W 程度であり、計算上の27 時間の消費電力量は54Wh となるが、完全放電を避けるために容量に余裕を持たせ99.16Wh のモバイルバッテリー（12cm×7cm×4cm：ハウジングに収まる最大）を使用する。

収録装置(27時間収録タイプ)の概要は図3-1-5-1に示す。

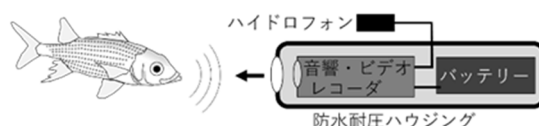


図 3-1-5-1 収録装置(27 時間収録タイプ)の概要

2-2-2 48-80時間収録タイプ

収録装置（80時間収録タイプ）の概要は図3-1-5-2に示す。

WAV形式で音源が記録出来るサウンドビデオレコーダ（Zoom社 Q8n-4K/Q2n-4Kサウンドビデオレコーダ）の外部マイク入力端子にハイドロフォン（AQUARIAN AUDIO & SCIENTIFIC社 H2dX）を接続し、電源はリチウムイオン電池のモバイルバッテリーからUSB給電（5V/1A）する。

防水ハウジングは、サウンドビデオレコーダと大容量モバイルバッテリーが収容できる容積と水没等の危険性が少なく信頼性を確保するため、かつて8mmビデオカメラ用に開発された業務用機材をリサイクルする。

なお、本収録装置には昼夜を通して音源の特定が可能となるよう照明を内蔵することとし、80時間収録タイプ（JFSTA1・2・4号機）においてはバッテリー容量を節約するために、夜間点灯・昼間消灯が制御可能なタイマーも併せて開発する。夜間撮影用の照明は、ドーナツ型基板に赤色LEDを15個配置し、レコーダのレンズを囲むように取り付け、消灯・点灯をマイコンボード（Arduino Pro Mini）によって制御するタイマーモジュールを制作してモバイルバッテリーから電源供給を受けられるように接続する。

使用したレコーダのメモリは256GBおよび512GBであり、動画MOVをHD720p-30fps、音源WAVを量子化ビット数：24bit、サンプリング周波数：48kHzに設定した場合、前者で48時間、後者で約80時間録画可能である。装置の駆動には48時間収録タイプで20,000mAh、80時間収録タイプで57,000mAhのモバイルバッテリーを使用する。

上記24-27時間収録タイプ、48-80時間収録タイプの性能についてまとめたものを表3-1-5-1に示す。

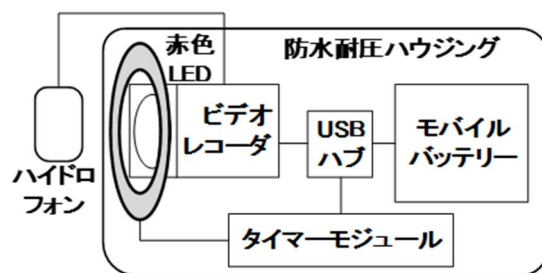


図 3-1-5-2 収録装置（80 時間収録タイプ）の概要

表3-1-5-1 長時間音源・映像収録装置の性能表

	いであ1号機	JAUS3・4・5機	JAUS6号機	JFSTA1・2・4号機
内蔵レコーダー	Zoom Q8	ZOOM Q4N	ZOOM Q2n-4K	Zoom 社 Q8n-4k
ハイドロフォン	Aquarian Audio H2a	Aquarian Audio H2a		Aquarian Audio H2dX
バッテリー	Li 26,500mAh	Li 15,000mAh	Li 20,000mAh	Li 57,000mAh
記録メディア	SD/SDHC/SDXC(128GB)	SD/SDHC/SDXC(128GB)	microSD/microSDHC/microSDXC(256GB)	SD/SDHC/SDXC(512GB)
音声フォーマット	非圧縮音源ファイル形式 16/24bit、44.1/48/96kHz	非圧縮音源ファイル形式 44.1kHz/16bit、48 96kHz/24bit		非圧縮音源ファイル形式 16/24bit、44.1/48/96kHz
動画フォーマット	MPEG-4 AVC / H.264(MOV)	MPEG-4 AVC/H.264(MOV)		MPEG-4 AVC/H.264 (MOV)
動画画角	広角 160°	広角 160°	広角 150°	広角 150°
動画解像度	3M HD (2304x1296) 30fps HD(1080p) 30fps HD(720) 60fps HD(720) 30fps WVGA 60fp WVGA 30fps	3M HD(2304x1296):30fps HD(1920x1080):30fps HD(1280x720):60、30fps WVGA(800x480):60、30fps	4K(3840x2160):30、25、24fps HD(1920x1080):60、50、30、25、24fps HD(1280x720):30、25fps	4K : 30, 25, 24 1080 : 60, 50, 30, 25, 24 720 : 60, 50, 30, 25, 24
入力ゲイン	-∞ ~ 55dB	-∞ ~ +26dB	-∞ ~ +39dB	-∞ ~ +43dB
ファンタム電源	+12V / +24V / +48V	—	—	+12V / +24V / +48V
連続収録時間	27 時間 (WAV 44.1kHz/16bit・HD720/30f/8Mbps)	15 時間 (WAV44.1kHz/16bit、HD1080/30fps) 30 時間 (WAV44.1kHz/16bit、HD720/30fps)"	48 時間 (WAV44.1kHz/16bit、HD720/30fps)	80 時間 (WAV44.1kHz/16bit、HD720/30fps)

3. 結果

各年毎に使用した収録装置、収録地点および収録時間の一覧を表 3-1-5-2～表 3-1-5-5 に示した。

表3-1-5-2 2020年に実施した収録装置、収録地点および収録時間

2020年	7/29-30 北礁	10/24-25 サクラグチ	10/26-27 北礁	合計
いであ1号機 (27時間)	27:52	19:11	16:26	63:31

表3-1-5-3 2021年に実施した収録装置、収録地点および収録時間

2021 年	4/16	4/17	4/19	4/20	5/17	5/19	5/20	6/21	6/22	6/23-24	6/24	6/25	合計
	小浜南	黒島北	屋良部・名蔵湾	名蔵湾	名蔵湾	北礁	ヨナラ水道	黒島北	小浜南	名蔵湾	竹富東	小浜南	
いであ1号機 (27 時間)	4:06	2:03	5:28	4:06	—	—	—	—	—	—	—	—	15:45
JAUS 3 号機 (30 時間)	—	—	—	—	1:47	19:33	4:14	5:30	4:16	3:49	4:48	4:20	48:21
JAUS 4 号機 (30 時間)	—	—	—	—	—	—	—	5:30	4:17	24:26	4:40	4:22	43:16

表3-1-5-4 2022年に実施した収録装置、収録地点および収録時間

2022 年	4/20-21	4/21-22	6/14	6/15-16	6/28-29	6/29-30	7/10	7/11-12	7/12-13	7/13-14	合計
	黒島	黒島	ヨナラ水道	黒島北	黒島北	黒島北	黒島北	黒島北	黒島北	黒島北	
JAUS 3 号機 (30 時間)	23:41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	23:41
JAUS 4 号機 (30 時間)	22:17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	22:17
JAUS 5 号機 (30 時間)	20:29	25:30	4:06	23:59	24:17	23:59	23:59	24:18	23:13	25:21	219:14
JAUS 6 号機 (48 時間)	21:47	23:32	2:51	23:16	24:09	26:00	24:04	24:17	23:13	26:00	219:12

表3-1-5-5 2023年に実施した収録装置、収録地点および収録時間

2023 年	3/20-21	4/24-25	5/16-18	6/7-9	7/10/-12	9/27-29	合計
	黒島	黒島	西表島	伊良部島	波照間島	石垣島	
JFSTA1 号機 (80 時間)	50:54	33:33	56:48	57:26	49:56	56:32	305:09
JFSTA2 号機 (80 時間)	51:30	33:22	56:48	57:38	49:58	56:21	305:37
JFSTA4 号機 (80 時間)	—	—	—	—	—	56:27	56:27

3-1 27-30時間収録タイプ

計 5 機の収録装置(図 3-1-5-3)を用いて、実際の海底設置・収録は約 3 年の間に計 25 回実施し、約 436 時間分のデータ収録に成功した。生物音として、スズメダイ類やウツボ類等の魚類鳴音の他、ブダイ類の摂餌音、カスミアジがスズメダイ類を捕食する際の遊泳音等が映像と同期して収録された(図 3-1-5-4)。海底設置型で無人収録することから、ダイバーからの発生音(主に排気したエアが浮上する時の音)のノイズの無い収録が可能であった。



図 3-1-5-3 海底設置状況（27-30 時間収録タイプ）

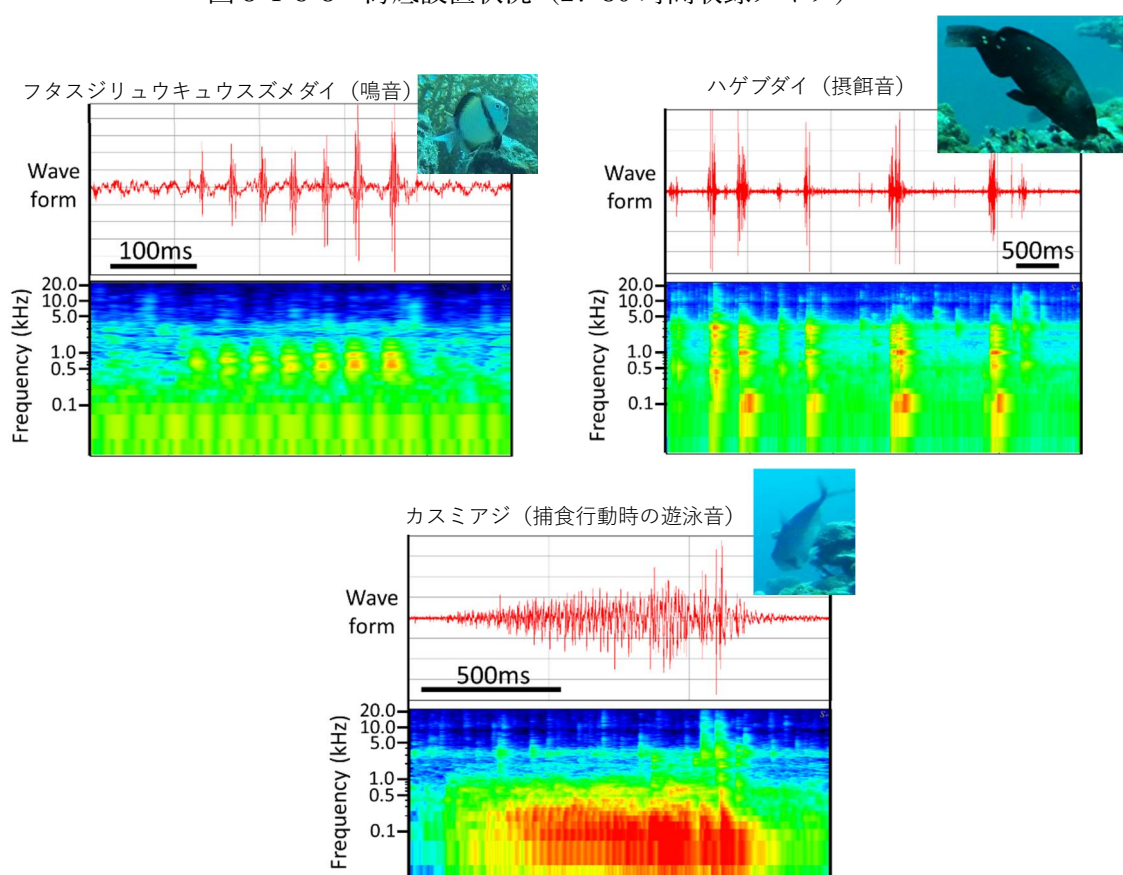


図3-1-5-4 生物音データ（鳴音・摂餌音・遊泳音）

3-2 80時間収録タイプ

計 4 機の収録装置（図 3-1-5-5）を用いて、実際の海底設置・収録は約半年の間に計 6 回実施し、約 886 時間分のデータ収録に成功した。長時間収録が可能となったことで収録装置の海底設置・回収の労力が削減され、24 時間以上の収録が可能となったことで、日周サイクルを含めた生物の貴重な生態情報の取得が可能となった。さらに、夜間は赤色 LED の効果で、同定可能な魚影（図 3-1-5-6）を含めた鳴音データの収録に成

功した。

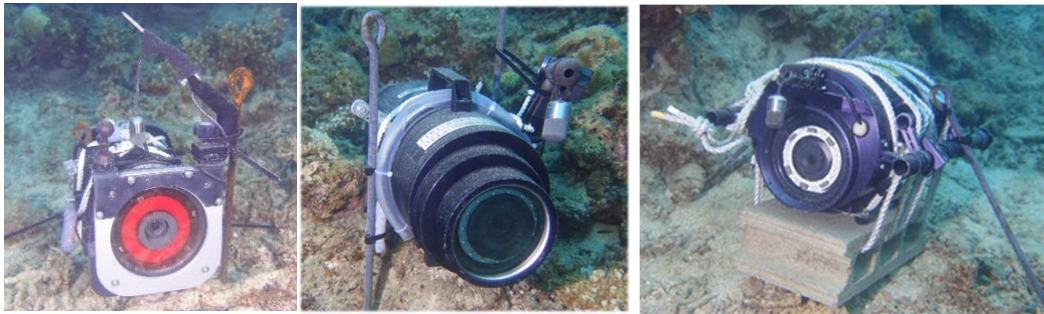


図3-1-5-5 海底設置状況（80時間収録タイプ）



図3-1-5-6 夜間収録に成功した魚類

3-2 基礎研究に関する事項

3-2-1 長期実験におけるサウンドスケープ情報収集・配信システム評価に関する研究 (担当：一般社団法人全国水産技術協会)

1. 目的

本研究では、サウンドスケープ録音機、海上通信ブイ、クラウドサーバーからなるサウンドスケープ情報配信システムを開発した。

サウンドスケープ録音機は、ハイドロフォンで水中音を収集し録音するとともに、録音機内で音源分類を行う。音源分類結果はゴールドコードを用いた水中音響通信により海上通信ブイに送信する。海上通信ブイは、サウンドスケープ録音機から送られた音源分類結果を受信し、LPWA 通信によりクラウドサーバーに転送する。クラウドサーバーは海上通信ブイから送られたデータを保存、整形し、PC やスマートフォンでの閲覧用に配信する。

サウンドスケープ配信システムの各要素については、個別に検証実験が行われており、良好な結果が得られている。しかし、それらは室内実験であるか、現場実験であっても管理された条件の下、質の良い音源データを用いて行われており、現場で運用した際には現場特有の問題が表れる可能性がある。

そこで本研究では、サウンドスケープ配信システムを本研究の対象海域である石垣島周辺海域で、長期間にわたって運用する実証実験（以下、「長期実験」という。）を行い、音源分類アルゴリズムの性能評価、通信の品質評価を行う。

また、本研究では、長期実験で得られた音源分類結果をもとに、本研究で開発したサウンドスケープ情報配信システムから得られる情報について考察する。

2. 方法

2-1 長期実験の概要

長期実験は、使用する機材、音源分類アルゴリズム、実施場所を変えて、令和3年度から令和5年度にかけて4回に分けて実施する。各実験の概要を表3-2-1-1に示す。

表 3-2-1-1 実施期間、使用した録音機、設置場所

設置場所		緯度	経度
令和3年度（2022/2/4～2022/3/4） R2型、R3型を使用			
名蔵湾		24° 24' 24.4 " N	124° 06' 50.4 " E
令和4年度 1（2022/6/17～2022/9/6） R3型(2)を使用			
名蔵湾		24° 24' 33.0 " N	124° 06' 39.6 " E
令和4年度 2（2022/12/16～2023/8/21） R4型を使用			
黒島北西		24° 15' 15.5 " N	123° 59' 16.0 " E
令和5年度（2023/8/21～2024/1/17） R5型を使用			
黒島西	録音機（北）	24° 13' 58.5 " N	123° 59' 29.2 " E
	録音機（南）	24° 13' 52.9 " N	123° 59' 34.8 " E
	通信ブイ	24° 13' 57.6 " N	123° 59' 31.3 " E
	通信ブイ(10/9～)	24° 13' 53.5 " N	123° 59' 31.4 " E
ヨナラ水路	録音機（北）	24° 21' 19.9 " N	123° 57' 14.0 " E
	録音機（南）	24° 21' 16.2 " N	123° 57' 13.9 " E
	通信ブイ	24° 21' 12.3 " N	123° 57' 12.6 " E
名蔵湾	録音機（北）	24° 23' 39.9 " N	124° 07' 07.3 " E
	録音機（南）	24° 23' 35.5 " N	124° 07' 01.6 " E
	通信ブイ	24° 23' 37.7 " N	124° 07' 04.6 " E

また、実施場所の地図を図 3-2-1-1 に、使用したサウンドスケープ録音機の概要を表 3-2-1-2 に、その対応音種リストを表 3-2-1-3 に示す。



図 3-2-1-1 実施場所

表 3-2-1-2 録音機概要

名称	音源分類 手法	対応音種数	識別結果 記録機能
R2 型	SVD	1(ドクウツボ)	なし
R3 型(1)	DL	24	なし
R3 型(2)	DL	51	なし
R4 型	DL	52	順次実装
R5 型	DL	52	あり

表 3-2-1-3 音種リスト

コード				音種	録音機				
C2	C3	Lv1	Lv2	Lv3	R2型	R3型	R3型(2)	R4型	R5型
2	1	生物音	魚類	ドクウツボA	○	○	○	○	○
2	2			アカネハナゴイA		○	○	○	○
2	3			ウケグチイットウダイA		○	○	○	○
2	4			ルリスズメダイA		○	○	○	○
2	5			クロオビマツカサA		○	○	○	○
2	6			クロオビマツカサB		○	○	○	○
2	7			ミスジリュウキュウスズメダイA		○	○	○	○
2	8			ミスジリュウキュウスズメダイB		○	○	○	○
2	9			ウケグチイットウダイB		○	○		
2	10			ルリスズメダイC			○	○	○
2	11			デバスズメダイB			○	○	○
2	12			デバスズメダイA			○	○	○
2	13			アカマツカサA			○	○	○
2	14			クロソラスズメダイB			○	○	○
2	15			イッテンチョウチョウウオA			○	○	○
2	16			ナメラヤッコA			○	○	○
2	17			エバンズアンティアスA			○	○	○
2	18			ロクセンスズメダイA			○	○	○
2	19			ロクセンスズメダイB			○	○	○
2	20			ミスジリュウキュウスズメダイC			○	○	○
2	21			ニセネッタイスズメダイC			○	○	○
2	22			クロソラスズメダイA			○	○	○
2	23			アミメフエダイA			○	○	○
2	24			ハマクマノミA			○	○	○
2	25			タテジマキンチャクダイA			○		
2	26			ニセネッタイスズメダイA			○		
2	27			ヒレナガハギA			○		
2	28			クロスズメダイA			○		
2	29			マジリアイゴA			○		
3	1			イトヒキテンジクダイA			○		
3	2			ニセカンランハギ			○		
3	3			ゴンズイB				○	○
3	4			キンメモドキA				○	○
3	5			ニセネッタイスズメダイD				○	○
3	6			マツカサウオA				○	○
3	7			フタスジリュウキュウスズメダイA				○	○
3	8			ニジェビスA				○	○
6	1		哺乳類	ザトウクジラB		○	○	○	○
6	2			ザトウクジラC		○	○	○	○
6	3			ジュゴンA		○	○	○	○
6	4			コビレゴンドウA		○	○	○	○
6	5			ミナミハンドウイルカB		○	○	○	○
6	6			オキゴンドウA		○	○		
6	7			タッパナガA			○	○	○
6	8			マゴンドウA			○	○	○
6	9			ハンドウイルカA			○		
6	10			シワハイルカA				○	○
6	11			シワハイルカB				○	○
6	12			ジュゴンB				○	○
8	1		甲殻類	シラヒゲエビ		○	○		
22	1	環境音	雨	雨-強		○	○	○	○
24	1		波	波-高		○	○	○	○
12	1	人為音	人	ダイバー呼吸音A		○	○	○	○
12	2			ダイバー呼吸音B			○		
14	1		船舶	大型貨物船		○	○	○	○
14	2			巡視船		○	○	○	○
14	3			定期船		○	○	○	○
14	4			ダイバー船		○	○	○	○
14	5			プレジャーボート			○		
14	6			フェリー				○	○
14	7			小型漁船				○	○
14	8			タンカー				○	○
14	9			タグボート				○	○
14	10			ドローン				○	○
16	1		工事	海中ハンマー		○	○	○	○
31	31	未分類	未分類	未分類		○	○	○	○

令和3年度の長期実験（以下、「R3 長期実験」という。）は2022年2月4日から2022年3月4日にかけて、令和2年度型および令和3年度型のサウンドスケープ録音機（以下、それぞれ「R2 型録音機、R3 型録音機(1)」という。）各1台を使用し、名蔵湾にて実施する。R2 型録音機は音源分類アルゴリズムに SVD を使用しており、対応する音種はドクウツボ 1 音種である。R3 型録音機(1)は音源分類アルゴリズムに深層学習を使用し、対応する音種は 24 音種である。サウンドスケープ録音機はバッテリー交換のため約1週間ごとに交互に使用する。

令和4年度から令和5年度に前半には2回の長期実験（以下、それぞれ「R4 長期実験(1)、R4 長期実験(2)」という。）を行う。

R4 長期実験(1)は音源分類アルゴリズムを改良し、対応音種を 51 音種とした令和3年度型サウンドスケープ録音機（以下、「R3 型録音機(2)」という。）2台を使用し、2022年6月17日から2022年9月6日まで、名蔵湾において実施する。同時に使用する録音機の台数は1台であり、バッテリー交換のため約10日ごとに交換する。

R4 長期実験(2)は令和4年度型サウンドスケープ録音機（以下、「R4 型録音機」という。）4台を使用し、2022年12月16日から2023年9月6日まで黒島北西において実施する。R4 型サウンドスケープ録音機は 52 音種に対応している。同時に使用する録音機の台数は1台であり、バッテリー交換のため約10日ごとに交換する。

R4 長期実験(1)の実施期間中の8月31日に海上通信ブイが流失したため、R4 長期実験(2)では代替の海上通信ブイを使用することとしたが、R4 長期実験(2)の実施直後の12月23日に再び流失したため、それ以降は海上通信ブイなしで実験を継続する。ただし、3月21日から3月30日まで、開発用海上通信ブイを日中のみ現場で係留し、通信の品質評価のためのデータを収集する。なお、R4 長期実験(2)実施期間の途中から、サウンドスケープ録音機には、音源分類結果を録音機内の SD カードに保存する機能が追加されている。

R5 年度後半には令和5年度型サウンドスケープ録音機および通信ブイを多点に設置した長期実験（以下、「R5 長期実験」という。）を実施する。実施期間は2023年8月21日から2024年1月17日である。実施場所は黒島西、ヨナラ水路、名蔵湾の3点であり、各地点に200m程度離して2台のサウンドスケープ録音機を同時に設置する（便宜上、それぞれ「黒島西(北)(南)」、「ヨナラ水路(北)(南)」、「名蔵湾(北)(南)」と名付けて区別する）。使用する R5 録音機は合計13台であり、バッテリー交換のため約2週間ごとに交換する。

長期実験に使用した R5 型録音機には実験開始時点の最新バージョンの音源分類アルゴリズムを搭載する。実験開始後も音源分類アルゴリズムの改良は続行するが、実験の一貫性を保つため音源分類アルゴリズムの更新は行わない。

R5 長期実験で使用した海上通信ブイ（以下、「R5 通信ブイ」という。）は、1台当たり2台の録音機からの信号を処理可能であり、2台の録音機の間海の海上に係留する。

使用する R5 録音機は合計 7 台であり、バッテリー交換のため、原則として R5 録音機交換 2 回に対し 1 回の頻度で交換する。

2-2 音源分類アルゴリズムの評価

あらかじめ音源に紐づけされた教師データと異なり、一般的には、現場でサウンドスケープ録音機が収集する水中音の音源を厳密に確定する方法がなく、正解は、人間が聴取するか、スペクトログラムを目視して判断するしかない。そのため、人間が対象となる音種の特徴をよく把握している必要がある。また、混同行列による評価を行うためには、対象となる時間の音をすべて人間が確認する必要があり、膨大な時間が必要である。

そこで本研究では、まず、音源分類アルゴリズム開発の初期段階から対象としており、スペクトログラムを含む音の特徴が分かりやすいドクウツボ A の適合度に限って評価を行う。適合度の定義は以下のとおりである。

$$\text{適合度} = \frac{\text{ドクウツボの識別が真であった回数}}{\text{ドクウツボの識別回数}}$$

ドクウツボが検出された 11 秒間(10 秒間+オーバーラップ 1 秒)の区間の音を切り出し、音の聴取とスペクトログラムの目視により識別の真偽を判別する。評価の対象とするサウンドスケープ録音機と対象期間を表 3-2-1-4 に示す。

表 3-2-1-4 ドクウツボ鳴音による評価対象とした録音機および実験期間

録音機	長期実験	場所	期間	備考
R3型録音機(1)	R3長期実験	名蔵湾	2022年2月4日～2月8日 2月18～2月27日 (15日間)	クラウドサーバー上の音源分類結果を使用
R4型録音機	R4長期実験(2)	黒島北西	2022年12月27日～2023年1月4日 (8日間)	録音機内に保存された音源分類結果を使用
R5型録音機	R5長期実験	黒島西(北)	2023年9月27日3時～4時(1時間)	録音機内に保存された音源分類結果を使用

なお、R3 録音機には音源分類結果を録音機内に保存する機能がないため、クラウドサーバー上に保存された音源分類結果を使用している。このため、識別結果は水中通信の品質の影響を受けていることに注意が必要である。

R5 録音機を用いた R5 長期実験においては、同じく音の聴取とスペクトログラムの目視により、ドクウツボ A、フタスジリュウキュウスズメダイ B、ザトウクジラ B を対象音種として音源分類結果の正誤の判定を行い、混同行列を求める。評価に使用した音種の代表的なスペクトログラムを図 3-2-1-2 に示す。

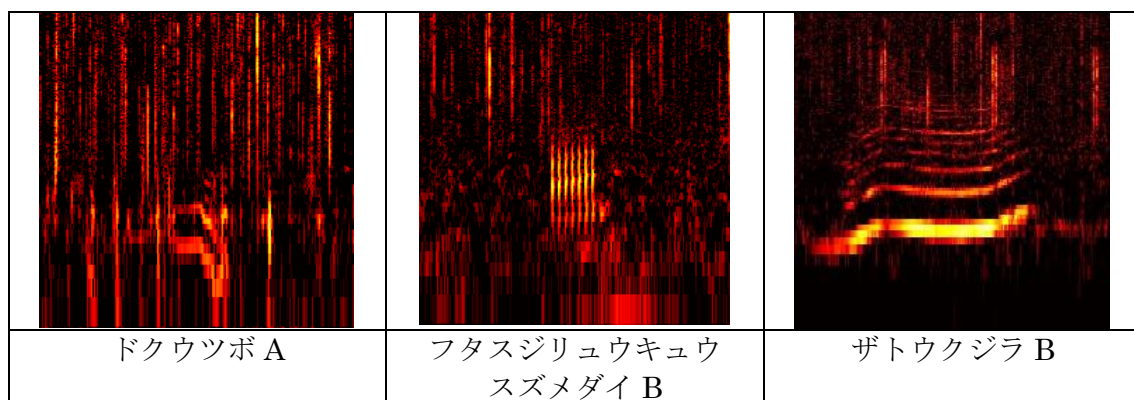


図 3-2-1-2 評価に使用した音種の代表的なスペクトログラム

対象期間は 2023 年 9 月 27 日 3 時～4 時の 1 時間である。

2-3 海中通信の品質評価

サウンドスケープ録音機から海上通信ブイの間の海中通信について、データの喪失や変質が起り得るため、その品質評価を行う。

データの流れと通信の品質の評価の概念を図 3-2-1-3 に示す。

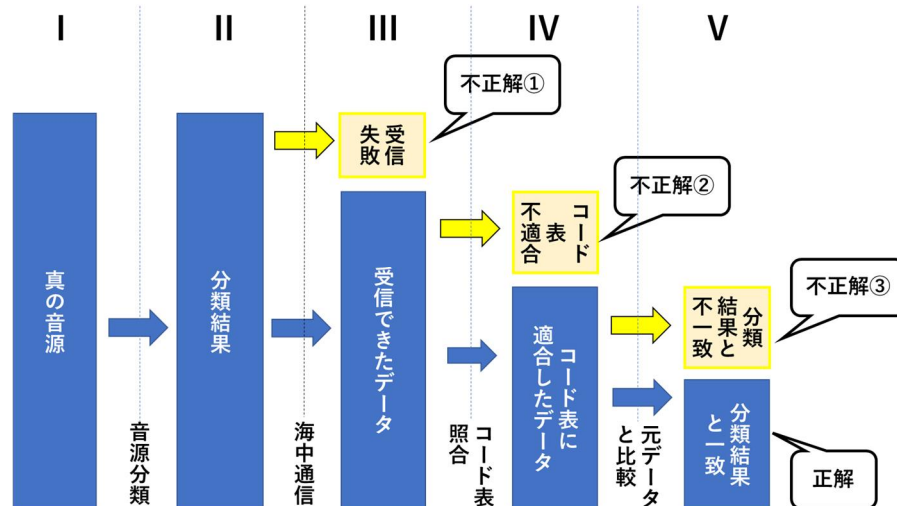


図 3-2-1-3 データの流れと通信の品質の評価

サウンドスケープ録音機内のデータ(以下、「送信データ」という。)とクラウドサーバー内のデータ(以下、「受信データ」という。)が一致した場合を正解、一致しなかった場合(通信ブイが受信しなかった場合を含む)を不正解とする。また、不正解には①受信に失敗した場合、②受信データが録音機 ID や音源のコード表に適合しない場合、③受信データが録音機 ID や音源のコード表に適合する場合の三つのケースがある。①②

は受信データのみを用いて、リアルタイムに通信の成否を判断できるのに対し、③は事後に送信データと照合することによって、初めて通信の成否を判断することができる。このことを考慮して、不正解①②③を別々に集計し、下記の二つの指標により通信の品質を評価する。

正解率 1 : (正解の数) / ((正解の数) + (不正解①②③の数))

正解率 2 : (正解の数) / ((正解の数) + (不正解③の数))

通信の品質評価の対象とするサウンドスケープ録音機と対象期間を表 3-2-1-5 に示す。

表 3-2-1-5 通信の品質評価対象とした録音機、実施場所、期間

録音機	長期実験	場所	対象期間	備考
R4型録音機	R4長期実験(2)	黒島北西	2023年3月21～25, 27, 29, 30日	日中のみ
R5型録音機	R5長期実験	黒島西(北)(南) ヨナラ水路(北)(南) 名蔵湾(北)(南)	2023年9月27日	

このほか、通信の品質低下をもたらす原因について考察するため、R5 長期実験 2023 年 9 月 10 日～19 日および 12 月 11 日～12 月 23 日について、正解、不正解①、不正解②を日ごとに集計し、同期間の気象、海象（潮位、風向、風速、有義波高、波向）と比較する。潮位は気象庁による石垣の毎時潮位を使用する。風向および風速は気象庁による石垣島の毎時データを使用する。有義波高および波向は国土交通省による石垣港のナウファス波浪データ（速報値）を使用する。

なお、気象、海象データの観測点は実験場所とは一致せず、また、それぞれ地形の影響を受けることに注意が必要である。

2-4 音源分類結果の解析

R4 長期実験(2)および R5 長期実験において録音機内に保存された音源分類結果（海中通信の品質の影響を受けない）を一日ごとに集計し、長期間のサウンドスケープの変動について考察する。また、2023 年 9 月 27 日の黒島西（北）については 1 時間ごとの集計も行い、1 日の中でのサウンドスケープの変化について考察する。

R5 長期実験については、設置、回収、メンテナンス日を除く全期間のデータを設置場所ごとに集計する。集計結果を各音種の識別頻度を要素とするベクトルとみなし、Ward 法を用いてクラスター化し、設置場所ごとの違いについて考察する。

3. 結果

3-1 長期実験の実施状況

R3 長期実験においては、R2 型録音機は機器に不具合が発生したためデータを取得できず、現場のデータを用いた検証を行うことができなかった。R3 型録音機については2023年2月4日～2月11日、2月18日～2月22日、2月23日～3月4日の3回に分けて現地に設置した。R3 型録音機はバッテリー消耗により設置後1週間で録音を停止した。海中通信はそれに先立ち設置後4日程度で停止しており、省電力化とバッテリーの強化の必要性が確認された。

R4 長期実験(1)においては、使用した2台の録音機のうち1台(No.2)について、コード表に適合しないデータが大量に記録されていた。この時は原因特定には至らなかったが、音源分類アルゴリズムの開発と並行して長期実験を行っていることにより、音源分類アルゴリズムと音源コード表の不一致を含む何らかの不具合が発生している可能性が考えられたため、以降、開発側と現場側の連携を密にし、ソフトウェアのバージョンについても厳密に管理することとした。

R4 長期実験(1)の期間中、2022年8月31日頃に海上通信ブイが流失したため、R4 長期実験(2)では代替機を使用することとしたが、2022年12月23日頃に再び海上通信ブイが流失した。それ以上の代替機は存在しなかったため、R4 長期実験(2)ではそれ以降通信ブイの長期間の設置は行わないものとし、通信の品質の実験に当たっては、開発用の通信ブイを3月21日～30日の日中のみ観測船に係留して、その都度回収した。通信ブイ流失の原因は不明であるが、漁船のプロペラに係留索が絡み、切断されたものと推測されている。R5 長期実験においても2回通信ブイの漂流が発生した。うち1回はブイが岩礁に漂着したため破損したが流失には至らず、もう1回は速やかに回収し再設置した。

R5 長期実験では使用する台数がそれまでの実験に比べ極度に多かったため、機器のトラブルが多発した。このため、機器動作確認手順を定め、機器の起動、投入直前、投入直後にクラウドサーバーでデータの受信を確認することとし、不具合が発見された場合は速やかに正常に動作する機器と交換し、基板交換などの処置を施した。不具合は時間の経過とともに減少した。

3-2 音源分類アルゴリズムの評価

R3 型、R4 型、R5 型録音機の、ドクウツボ鳴音（ドクウツボ A）に対する音源分類の適合度を表 3-2-1-6 に示した。

表 3-2-1-6 ドクウツボ鳴音に対する適合度

実験		R3実験	R4実験	R5実験
録音機型式		R3型	R4型	R5型
識別回数		257	12	18
判定	真	23	10	16
	偽	234	2	2
適合度		9%	83%	89%

ドクウツボ A に対する適合度は録音機（音源分類アルゴリズム）のバージョンアップによって向上していた。なお、R3 型録音機の対象とする音種数は 24 音種であるのに対し、R4 型、R5 型録音機の対象とする音種数はそれぞれ 51 音種、52 音種であり、対象とする音種が増加しても適合度は低下しなかった。

R5 長期実験において、ドクウツボ A、フタスジリュウキュウスズメダイ A、ザトウクジラ B の 3 音種に対する混同行列を表 3-2-1-7 に示した。

表 3-2-1-7 R5 録音機の 3 音種に対する混同行列

		予測されたクラス（録音機）							
		ドクウツボA	フタスジリュウキュウスズメダイA	ザトウクジラB	その他	再現度	適合度	正解率	57%
真のクラス	ドクウツボA	16	0	16	34	24%	89%	F値	38%
	ザトウクジラB	0	0	0	0	-	0%		-
	フタスジリュウキュウスズメダイA	0	0	0	0	-	0%		-
	その他	2	1	100	188	65%	85%		73%

ドクウツボ A の適合度は 89% と高かったが、ドクウツボ A 鳴音が音の聴取あるいはスペクトログラムの目視によって確認できる場合でも、ザトウクジラ B、あるいはその他に分類される場合が多く、再現度は 24 パーセントと低かった。ザトウクジラ B およびフタスジリュウキュウスズメダイ A は音の聴取およびスペクトログラムの目視では確認することができなかったため、再現度は求めることができず、適合度は 0% となった。

3-3 海中通信の品質評価

R4 長期実験(2)における通信の品質評価の結果を図 3-2-1-4 に示した。

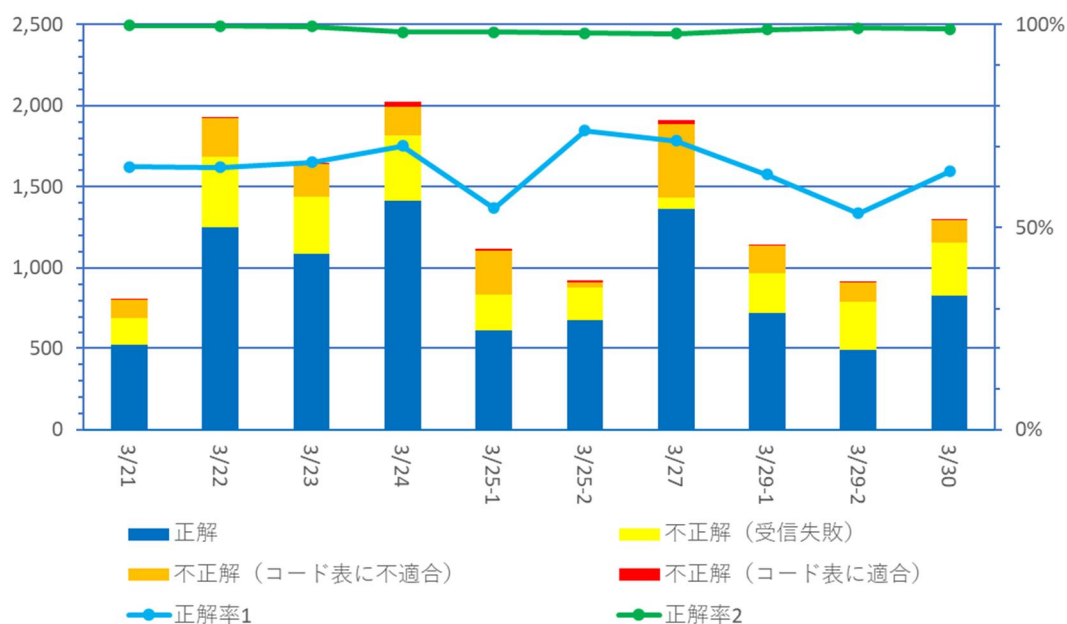


図 3-2-1-4 通信の品質の変動(R4 長期実験)

なお、3月25日および3月29日には実験の途中で係留索の長さを変えるなど、海上通信ブイの位置を変更しているため、その前後で別々に集計を行った。

不正解①（受信失敗）、不正解②（コード表に不適合）はほぼすべての実験日について無視できない頻度で発生していた。一方、不正解③（コード表に適合）は少なかった。このため、正解率1は50～70%程度と低かったが、正解率2はほぼ100%となった。

R5 長期実験における通信の品質評価の結果を図 3-2-1-5 に示した。

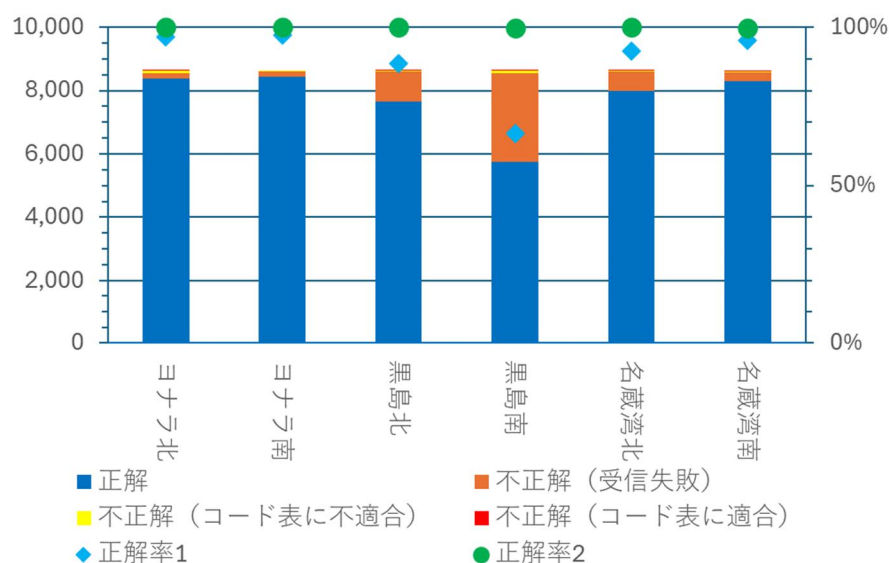


図 3-2-1-5 地点による通信品質の違い(R5 長期実験)

不正解①（受信失敗）の発生は場所によって大きく異なっていた。一方、不正解②（コード表に不適合）、不正解③（コード表に適合）は非常に少なかった。このため、正解率 1 は場所によって大きくばらつきが生じたが、正解率 2 はすべての点でほぼ 100% となった。

R5 長期実験 2023 年 9 月 10 日～9 月 19 日および 2023 年 12 月 11 日～23 日における受信状態の変動を図 3-2-1-6 および図 3-2-1-7 に、同期間の気象、海象を図 3-2-1-8 および図 3-2-1-9 に示した。

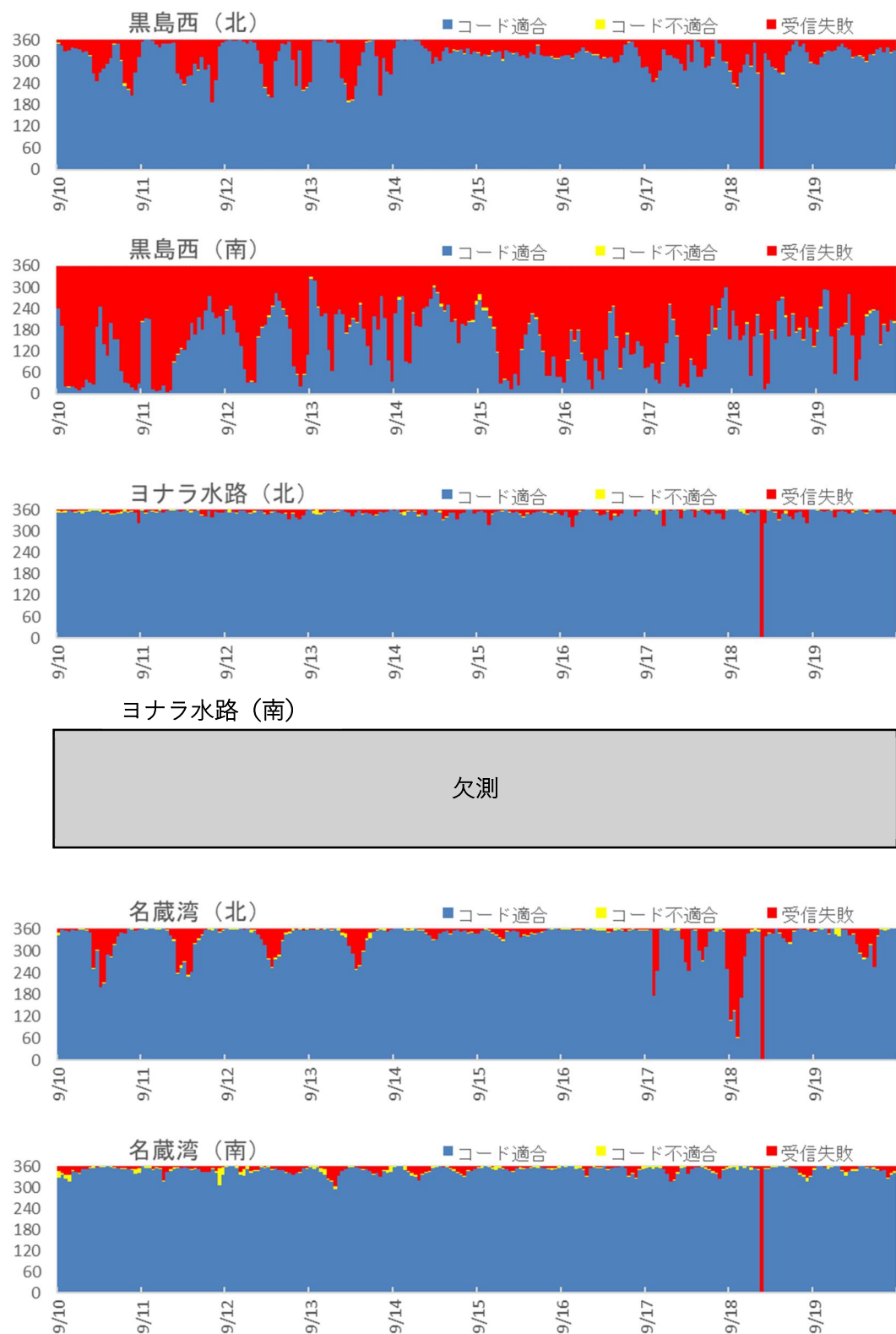


図 3-2-1-6 R5 長期実験 9 月 10 日～9 月 19 日における受信状態の変動

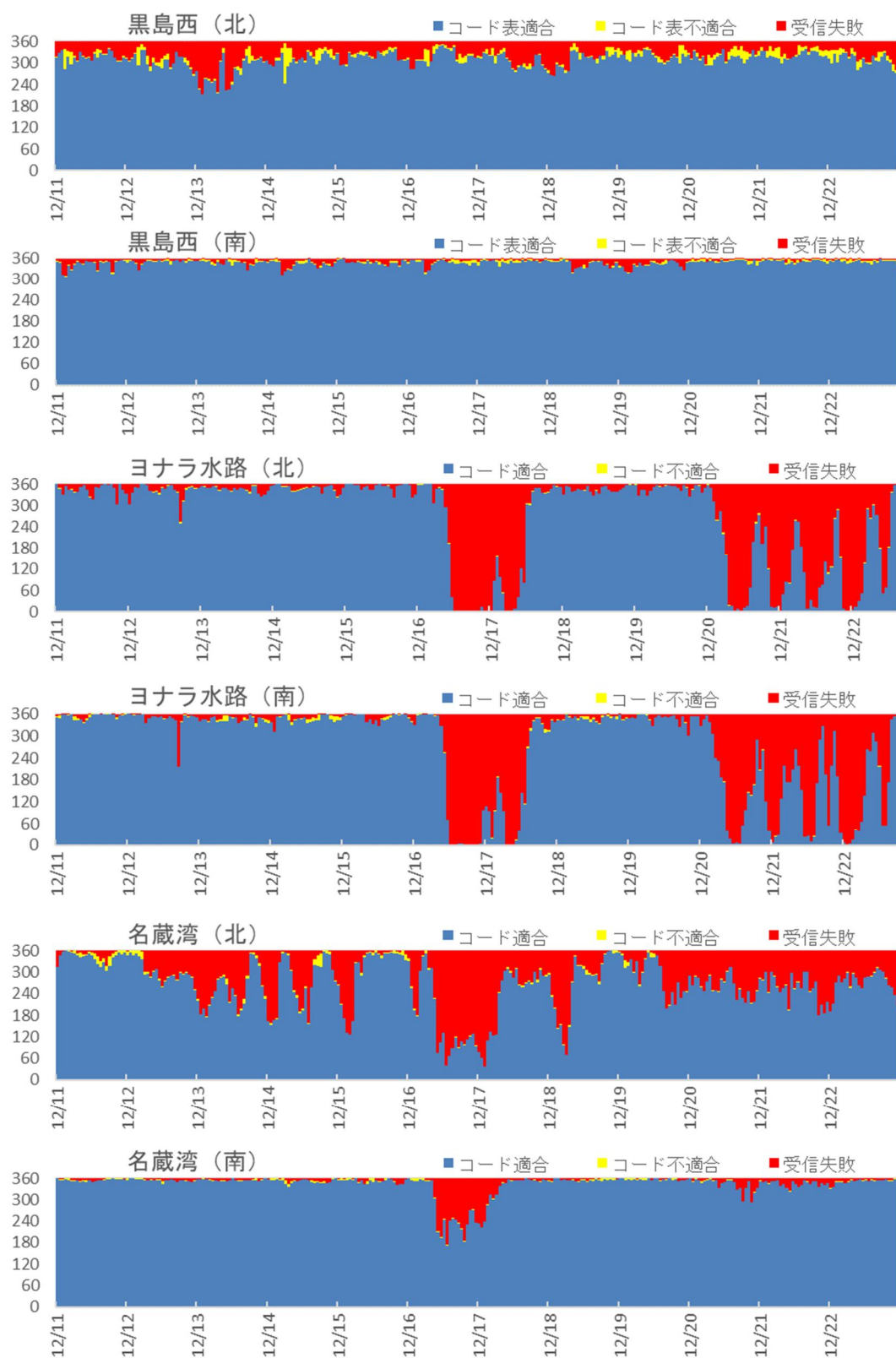


図 3-2-1-7 長期実験 12 月 11 日～12 月 23 日における受信状態の変動

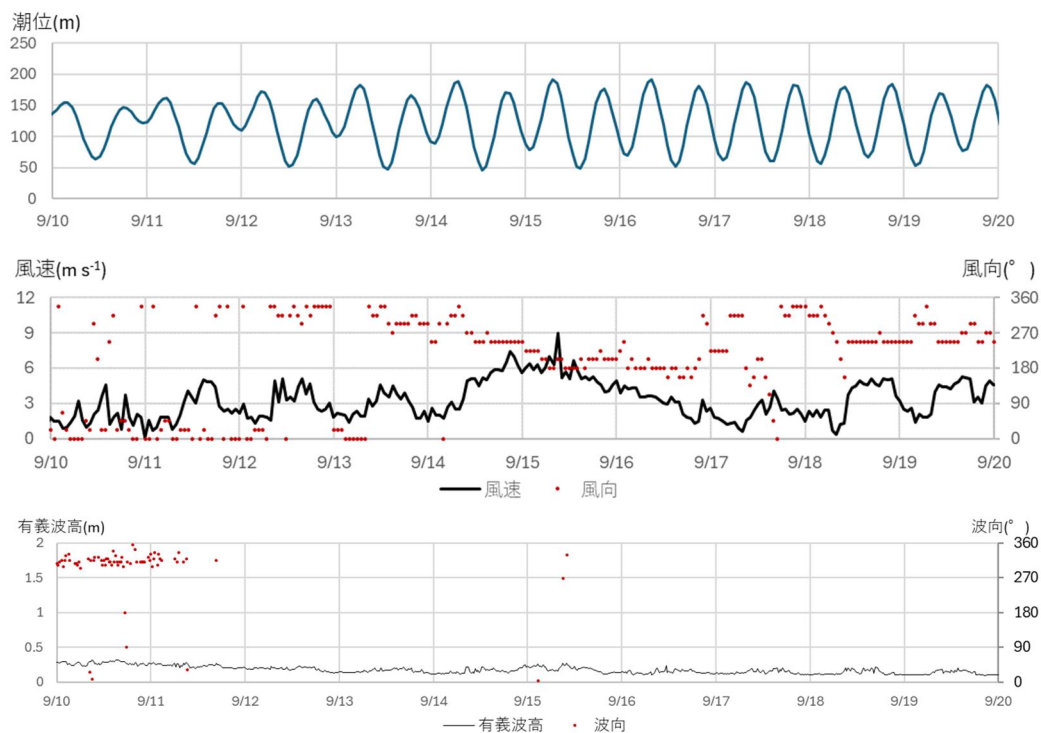


図 3-2-1-8 長期実験 9 月 10 日～9 月 19 日の気象、海象

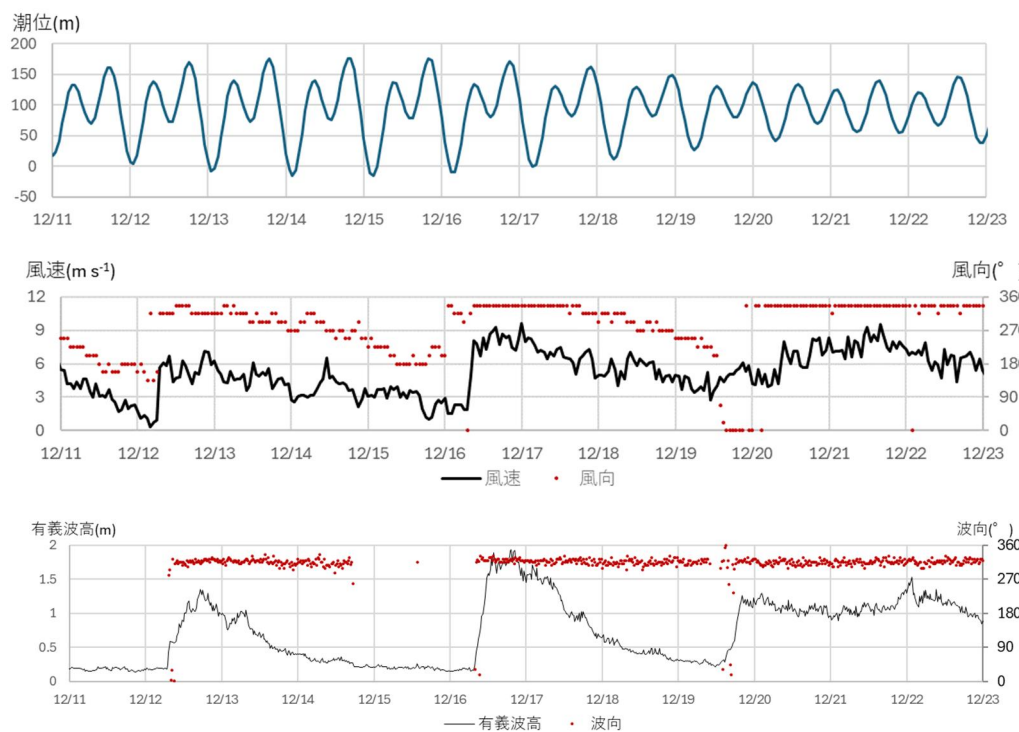


図 3-2-1-9 R5 長期実験 12 月 11 日～12 月 23 日の気象、海象

場所あるいは時期によって不正解①（受信失敗）の発生傾向は大きく異なっていた。特に、図 3-2-1-6 の黒島西(北)と黒島西(南)のように、設置場所がごく近い場合でも傾向が全く異なる場合もあった。一方、いずれの場合においても、不正解②（コード表に不適合）の頻度はごく少なかった。

不正解①の発生頻度には約 1 日周期の変動（9 月 10 日～15 日名蔵湾(北)）、半日周期の変動（9 月 12 日～15 日黒島西(北)、12 月 20 日～12 月 23 日ヨナラ水路(北)(南)、12 月 13 日～16 日名蔵湾(北)）が見られた。また、12 月 17 日 0 時を中心に約 1 日間、受信失敗が多発していた。このうち、半日周期の変動は潮位との対応が見られた。また、12 月 17 日 0 時頃は強い北風が吹き、有義波高も 2m 近くに達していた。

3-4 音源分類結果の解析

令和 5 年度長期実験における音源分類結果の 1 日ごとの集計結果を図 3-2-1-10～図 3-2-1-12 に示した。

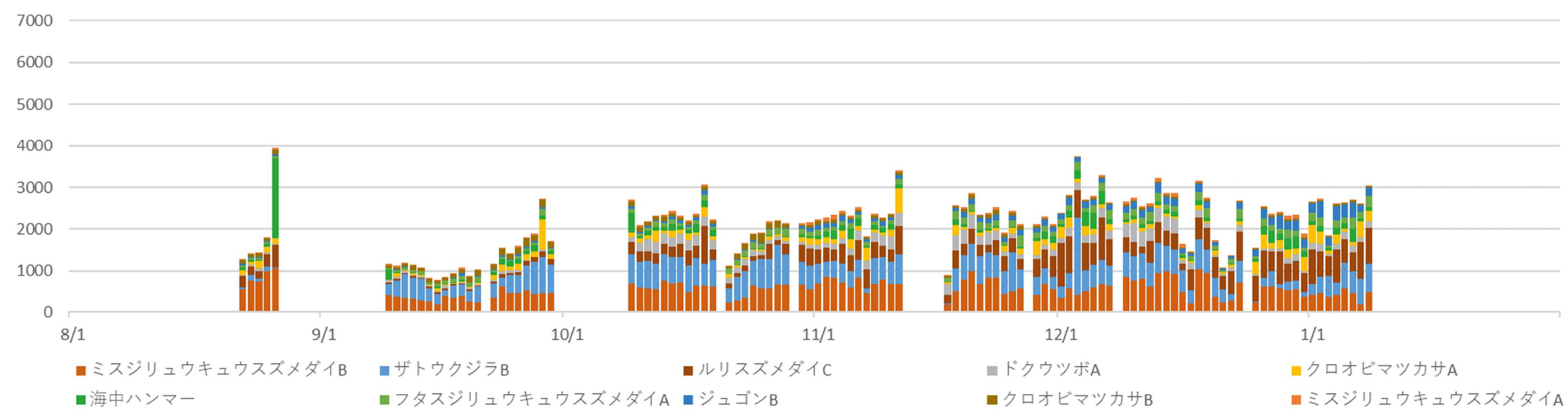
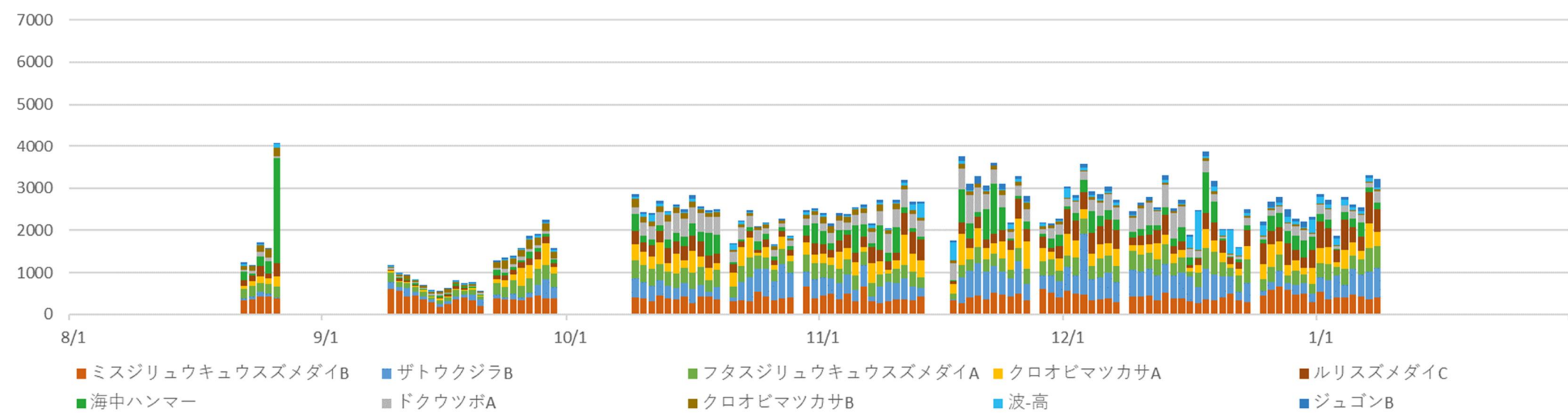
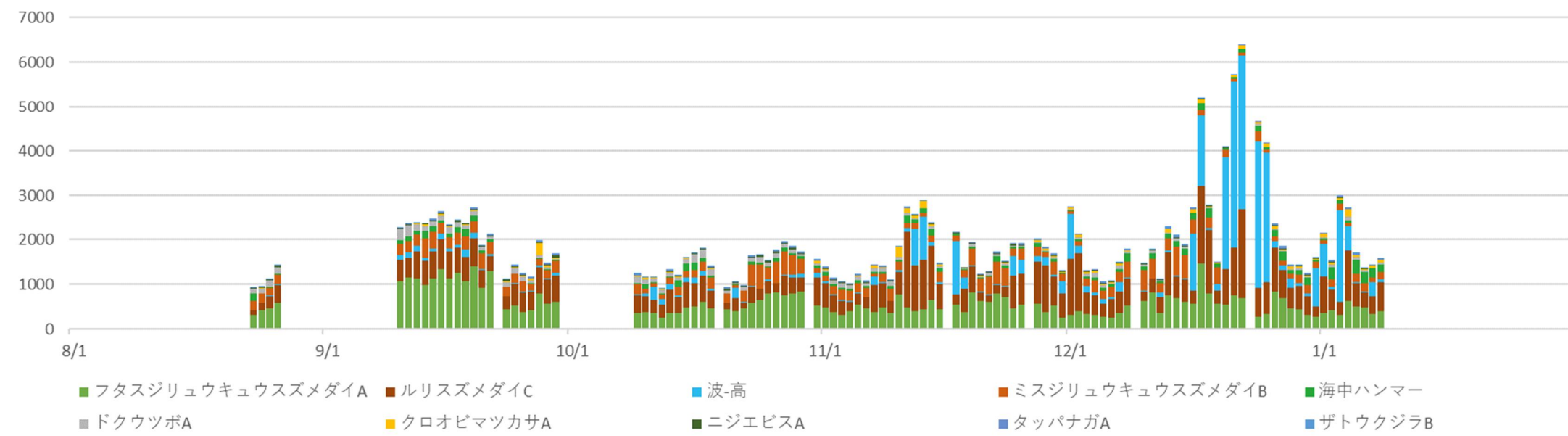
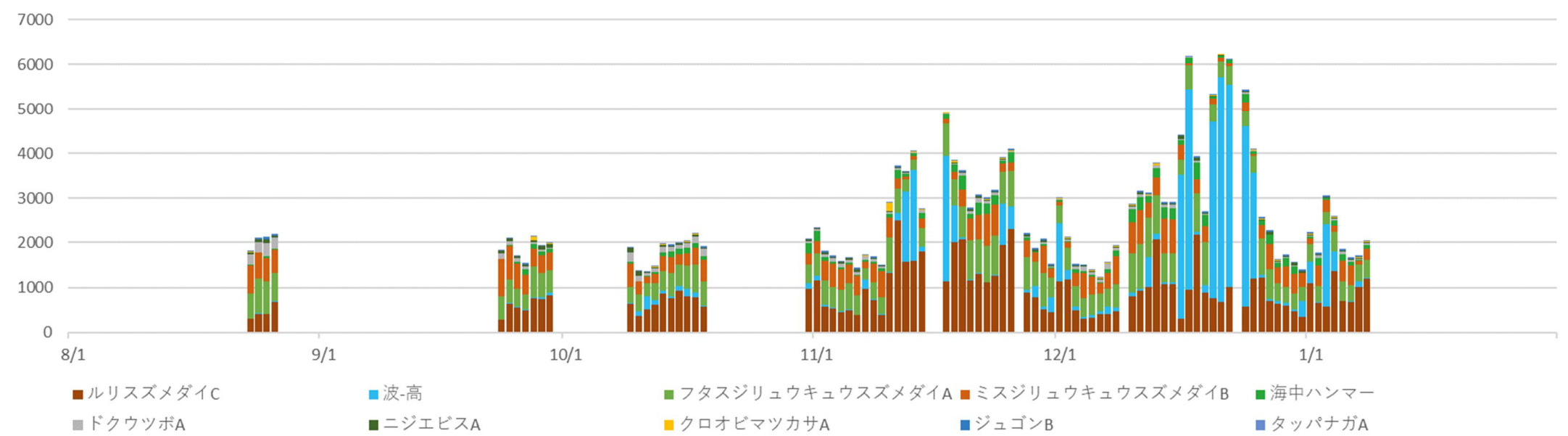


図 3-2-1-10 R5 長期実験における黒島西の音源分類結果



ヨナラ水路（北）



ヨナラ水路（南）

図 3-2-1-11 R5 長期実験におけるヨナラ水路の音源分類結果

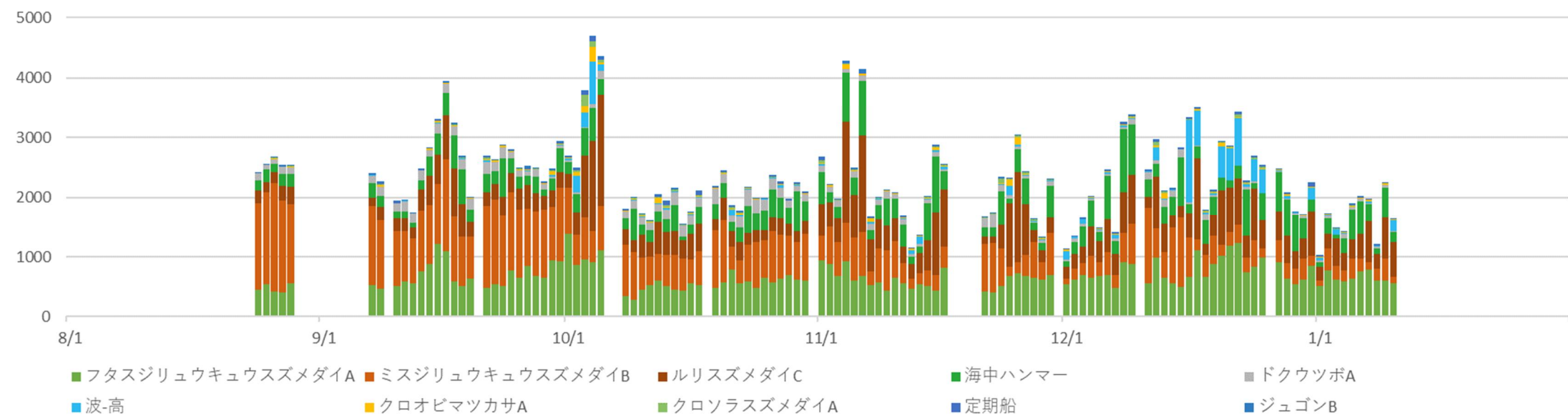
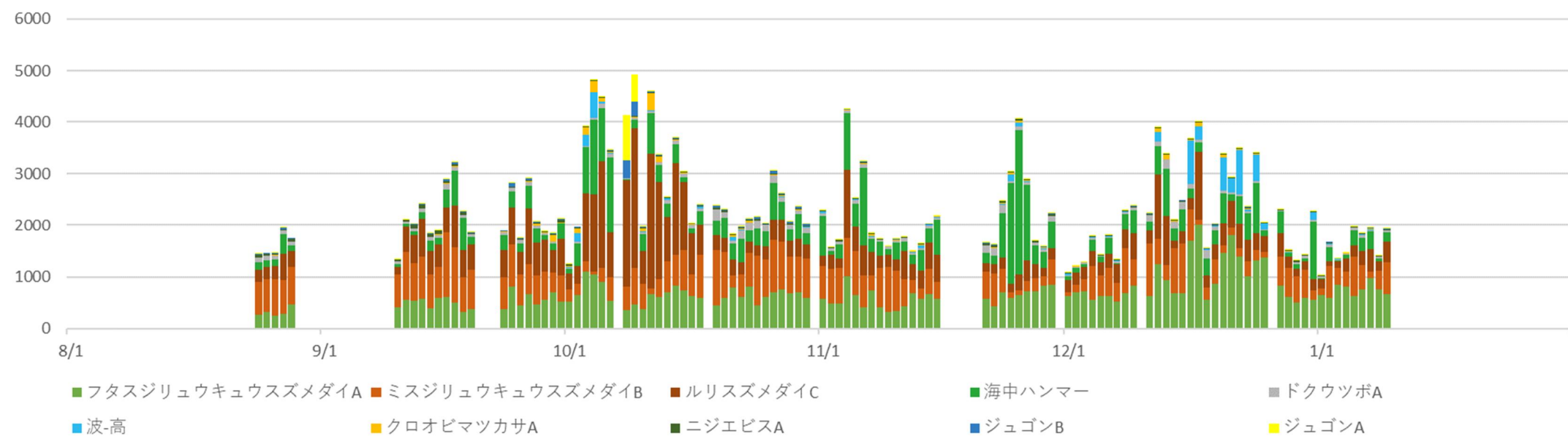


図 3-2-1-12 R5 長期実験における名蔵湾の音源分類結果

表示した音種は各地点の上位 10 位の音種である。場所によって出現する音種は異なり、特に、同一地点に属する 2 つの録音機の記録は共通する傾向にあった。このことは、全期間の音源分類の集計結果、およびそれを用いた Ward 法によるクラスター解析結果によく表れていた（図 3-2-1-13）。

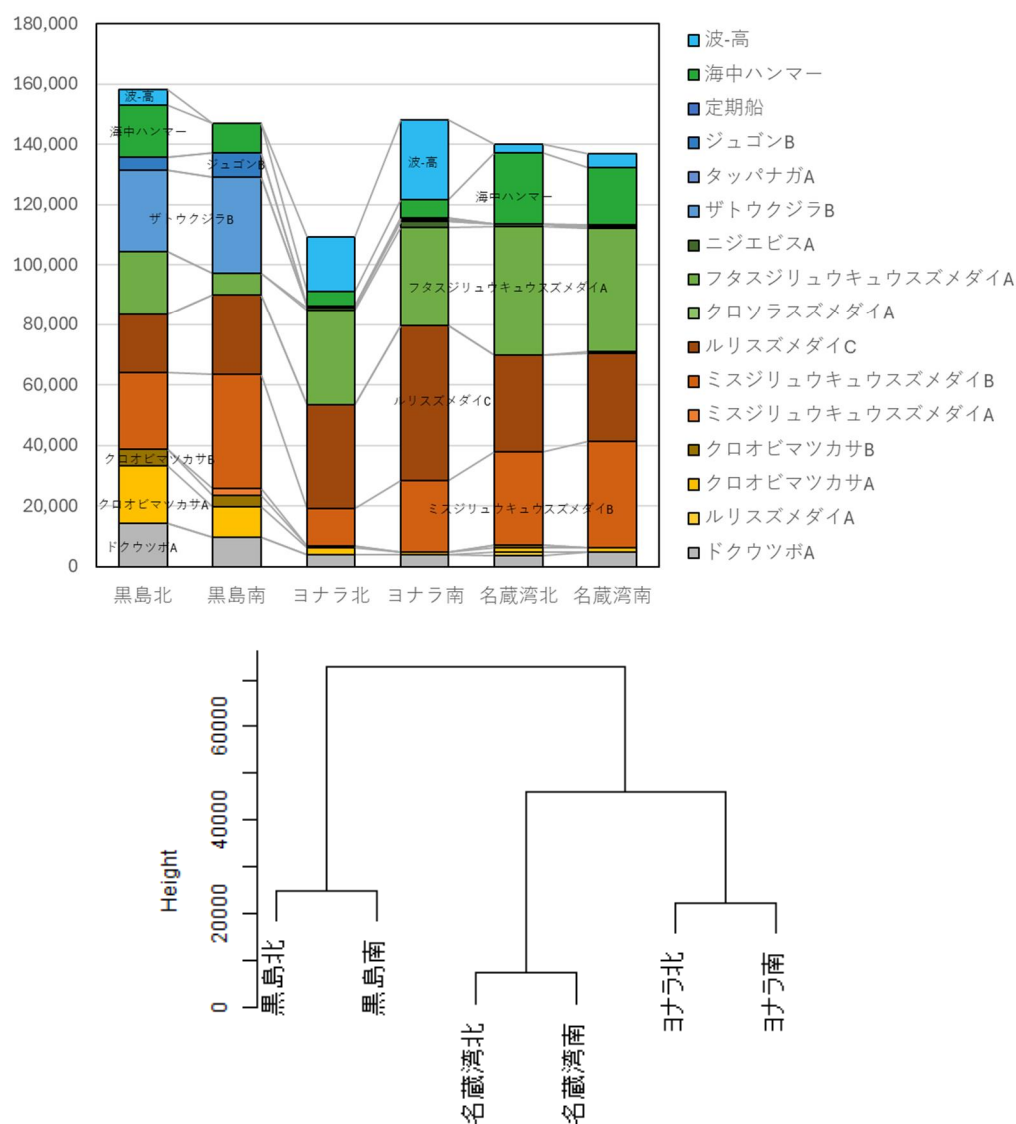


図 3-2-1-13 R5 長期実験における音源分類の集計結果と Ward 法による観測地点の類別結果

最も類似度が高いのは黒島西(北)(南)、ヨナラ水路(北)(南)、名蔵湾(北)(南)のそれ

ぞれのペアであり、その次に近いのはヨナラ水路と名蔵湾であった。

黒島西(北)における 9 月 27 日の 1 時間ごとの出現音種の集計結果(上位 10 音種)を図 3-2-1-14 に示した。

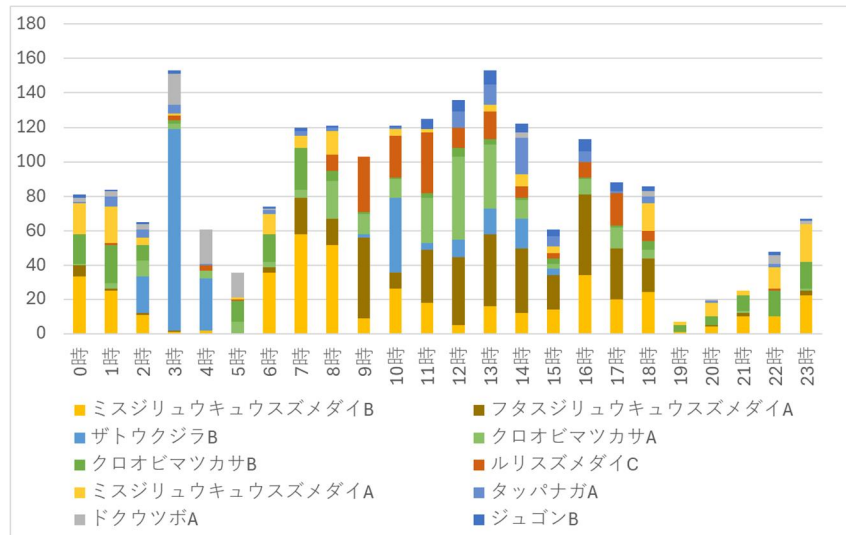


図 3-2-1-14 黒島北、9 月 27 日の音源分類結果
(録音機内データ、上位 10 音種、1 時間ごと集計)

鳴音の出現状況は 1 日の中でも変動していた。上位 10 音種の出現頻度は日中に高く、夜明け前と夕暮れ後に低かった(国立天文台「こよみの計算」によると、石垣島における 2023 年 9 月 27 日の日の出、日の入りはそれぞれ 6:33、18:35 である)。また、内訳も時刻によって異なり、例えばドクウツボ A は深夜から明け方にかけて多く出現し、それ以外の時間帯にはほとんど出現していなかった。このような日周変動は長期実験の他の期間についても見られた。

なお、3 時にザトウクジラ B が大量に出現しているが、これについては、その時刻に付近に停泊していたクルーズ船が発する 8000Hz 付近のノイズがザトウクジラと誤認された可能性が高い(3-2-3-3 参照)。

4. 考察

4-1 音源分類アルゴリズムの評価について

音源分類アルゴリズムの評価に当たり、大きな制約となったのは、真の音源が明確でなく、録音されたデータの聴取およびスペクトログラムの目視という、主観的要素の強い方法で評価を行わざるを得なかったことである。そもそも現場で観測を行うのは、そこで収集される音の音源が不明であるからであり、サウンドスケープ録音機自身が収集したデータだけを使用して、サウンドスケープ録音機の評価を行うことには限界があ

る。これを解決するためには例えば、録音機能付き水中ビデオカメラを同時に使用して、別途音源の特定を行う方法が考えられる。本研究では録音機能付き水中ビデオカメラを使用して水中音の収集を行っているが、複数チャンネルで録音した水中音とビデオ映像を併用して音源定位を行うことによって、音と音源の紐づけはより確実に行うことが可能になるであろう。二つの音源分類結果に対してクロスチェックを行うことで、より客観的な評価が可能になると考えられる。

4-2 海中通信の品質評価について

整備された条件下で実施される海中通信実験とは異なり、サウンドスケープ録音機と通信ブイを現場で運用する長期実験においては、無視できない量のデータが海中通信の際に失われることが分かった。しかし、受信したデータのうち、不正解②（コード表も不適合）を取り除いた残りについては、そのほとんどが正解であった。その理由として、長期実験で使用したコード表は、本来使用可能なすべてのコードのうちごく一部のコードしか使用しておらず、コードがランダムに変化した場合、その多くがコード表に不適合となる可能性が高いことが考えられる。R5 長期実験（R5 録音機を使用）ではコード表に不適合となったデータ自体が少なかったことから、受信に成功したデータは、少数の例外を除き信頼できるものと考えられる。

海中通信において受信に失敗する主要な原因は以下のようなものであると考えられる。

① 地形によるピンガー音の反響や遮蔽

R5長期実験では、潮位の変動に応じて受信成功・失敗の頻度が変化している様子が捉えられた。これは、潮流によって海上通信ブイが移動し、サウンドスケープ録音機との位置関係が変化することによるものと考えられる。実際に、黒島西においては、当初海上通信ブイを係留する予定であった位置では、黒島西（南）に設置した録音機からの海中通信が全く確立できないことが判明し、位置を変更して係留することとなった。また、それでもなお通信状態が不安定であったことから、10月9日にさらに位置を変更している。

地形によるピンガー音の反響や遮蔽によるデータの損失を防ぐためには、事前調査を入念に行い、実験の目的に応じ、できる限り音響信号の反響や吸収を防ぐ位置に機器を設置する必要がある。また、海上通信ブイの振れまわりによる位置関係の変化が起り難いような係留方法も検討する必要がある。

② 通信ブイの動揺による音響信号のドップラーシフトや泡噛み

R5長期実験では、強い風と波浪が観測された日に大量のデータの喪失が生じていた。これは、波浪によって海上通信ブイが動揺し、ドップラーシフトによって音響信号にゆがみが生じたか、音響信号が波浪によって生じる気泡に遮蔽されたためと考えられる。実際、R4長期実験(2)では、3月25日にブイの動揺を弱めるために係留索の長さを

変更し、その結果条件変更前後で正解率1が55%から75%に改善された。

通信ブイの動揺による音響信号のドップラーシフトや泡嚙みによるデータの損失を防ぐためには、海上通信ブイの大きさや形状を変更する必要がある。ブイの大型化は動揺を防ぐために有効な対策の一つと考えられる。また、ブイの形状をより縦長にし、トランスデューサーの取り付け位置を海面から離すことも有効であると考えられる。

4-3 音源分類の解析について

本研究では、サウンドスケープ録音機と海上通信ブイを石垣島周辺海域に設置し、長期間にわたる観測を行った。録音機の設置場所ごとの違いは音源分類結果に明瞭に表れており、ヨナラ水路と名蔵湾のサウンドスケープは比較的共通した特徴を持ち、外洋に面した黒島西とやや異なることが示された。また、音源分類結果からは、サウンドスケープの1日周期の変動の存在も示された。

本研究で行ったような多点での水中音観測はサウンドスケープの時空間変動の描写に有用であると考えられる。

3-2-2 生物音の収集に関する研究(担当：いであ株式会社)

1. 目的

魚類の鳴音を効率的に収集するためには、現地における調査は必須であるが、この調査では魚類の映像と鳴音を記録することはできるが、これを同期することはできない。

そこで、本研究において採用した各種の鳴音・映像の収録方法から、数多くの鳴音・映像を同期させる調査方法を提案する。

2. 方法

2-1 魚類調査

長期設置観測機器を設置した次の地点において、魚類相の調査を実施する。

ヨナラ水路：令和 5 年 9 月 29 日、11 月 10 日

黒島西 ：令和 5 年 9 月 28 日、11 月 11 日

名蔵湾 ：令和 5 年 9 月 27 日、12 月 13 日

各地点での観測において、上げ潮時、下げ潮時それぞれの 30～40 分間に 1～2 人で潜水を行い、目視により出現した魚種名と個体数（概数）を記録する。

2-2 水槽実験

2-2-1 石垣市水産課種苗供給施設における実験

供試魚は観賞魚等活魚を捕獲する地元の専門漁業者から購入し、石垣市水産課種苗供給施設（石垣市登野城）内に設置した水槽において、鳴音の収録を行う。

2-2-2 美ら海水族館における実験

（一財）沖縄美ら島財団水族館事業部（以下、「沖縄美ら海水族館」という。）においては、漁業者から購入困難な魚種や小型海産哺乳類（イルカ類）の鳴音収録を行う。

沖縄美ら海水族館における水槽実験は、令和4年5、6月および令和5年10月の3回実施し、魚類、甲殻類および海産哺乳類の鳴音を収録する。

2-2-3 水槽実験における鳴音の収集方法

鳴音の収集にはAUSOMS-mini、またはアンプ・レコーダーに接続したハイドロフォンを使用する。また、鳴音を発するときの行動を記録するため、ビデオカメラによる収録を行う。

収録の状況は図3-2-2-1示す。



図3-2-2-1 令和5年度の沖縄美ら海水族館における収録実験

3. 結果

3-1 魚類調査

当該調査はモデル海域の候補地としている①ヨナラ水路、②黒島西、③名蔵湾において、異なる時期に以下の日程で実施した。異なる時期として、水温の比較的高い9月と比較的低下した11～12月に実施した。

ヨナラ水路：令和5年9月29日、11月10日

黒島西：令和5年9月28日、11月11日

名蔵湾：令和5年9月27日、12月13日

令和5年9月、11月および12月に実施した魚類調査結果を表3-2-2-1に示した。

3-1-1 令和5年9月(ヨナラ水路)

北に設置した録音機周辺では、アマミスズメダイ、フタスジリュウキュウスズメダイが、南側録音機周辺では、デバスズメダイ、フタスジリュウキュウスズメダイ、ミズジリュウキュウスズメダイが潮時に関わらず多かった。しかし、北側の上げ潮時は下げ潮時に比べて非常に少なかった。一方で、南北とも下げ潮で多い種が目立ち、シコクスズメダイ、カブラヤスズメダイ、アサドスズメダイ、モンツキスズメダイ、ニセネッタイスズメダイ、クロヘリイトヒキベラであった。

3-1-2 令和5年9月(黒島西)

ヨナラ水路に比べてスズメダイ科の出現は少なく、潮時で比較的に異なっていた。特に、南側で上げ潮時に非常に少なく、下げ潮時に著しく増加していたのはヒレグロスズメダイ、マルスズメダイ、ナミスズメダイ、フィリピンズズメダイ、アサドスズメダイなどであった。上げ潮時に多かったのはオヤビッチャ、アマミスズメダイであった。下げ潮時では、ヨコシマタマガシラ、ノコギリダイ、ニセカンランハギが北で多かった。

3-1-3 令和5年9月(名蔵湾)

魚類の出現状況はヨナラ水路に類似しており、出現種は上げ潮時に比べて下げ潮時に多かった。北側ではアマミスズメダイ、フタスジリュウキュウスズメダイが上げ潮、下げ潮とも多く、南側では、デバスズメダイ、フタスジリュウキュウスズメダイが潮時に関わらず多かった。

3-1-4 令和5年11月、12月(ヨナラ水路)

出現種数は北側では下げ潮時に多く、南側では上げ潮時に多かった。しかしながら、

9月調査時に比べて、南北および潮時に関わらず多かった種が目立ち、アサドスズメダイ、モンツキスズメダイ、ニセネツタイスズメダイであった。また、上げ潮時に多かったのはアマミスズメダイ、フタスジリュウキュウスズメダイ、クラカオスズメダイ、ナミスズメダイ、ネツタイスズメダイなどであった。

3-1-5 令和5年11月、12月(黒島西)

ヨナラ水路に比べてスズメダイ科の出現が少ない傾向は9月と同様であった。南北とも下げ潮時に種数は多かった。上げ潮時に多かったのは、アマミスズメダイ、オヤビッチャであり、下げ潮時に多かったのはヒレグロスズメダイ、マルスズメダイ、アサドスズメダイであった。

3-1-6 令和5年11月、12月(名蔵湾)

出現種数は、北側では下げ潮時に多く、南側では上げ潮時に多かった。種別に見ると、北側ではアマミスズメダイ、タカサゴスズメダイが上げ潮時に、南側ではフタスジリュウキュウスズメダイ、クロリボンスズメダイが両潮時とも多かった。

表 3-2-2-1 魚類調查結果

[illegible]

注1) 主な出現種は20個体以上(±, c, cc)確認された種を示す。

2) 主な出現種の欄の-は20個体以上(+, c, cc)の種が確認されなかったことを示す。

3) R5 型録音機の音源分類対象となる魚種を黄色で示す。

3-2 水槽実験

3-2-1 石垣市水産課種苗供給施設における実験

陸上水槽において鳴音収録実験を実施した魚種とその実績は表3-2-2-2に示した。

実験した123種のうち鳴音として100サンプル以上が得られたのは12種であり、50～100サンプルは4種であった。昨年度と同様に、営巢し、なわばり意識が顕著なスズメダイ科が鳴音を多く発しており、食用等水産的価値の高い種はほとんど鳴音を発していなかった。

しかしながら、自然海域においてダイバーが明らかに鳴音を聴取しているにも関わらず、水槽実験において鳴音が収録されなかった。そのため、水槽内に自然海域での生息場所の環境（岩礁等棲息場所の起伏等）を可能な限りで再現したほか、水槽環境に馴化するまで時間をかけることや、同一種でも実験時期を変える等様々なパターンを試みて実験したが、十分な結果は得られなかった。

表3-2-2-2 石垣市水産課種苗供給施設での鳴音収録種

項目	No	種名	サンプル数
魚類	1	ゴンズイ	479
	2	ウケグチイトウダイ	93
	3	クロオビマツカサ	120
	4	アカマツカサ	213
	5	アミメフエダイ	49
	6	イッテンチョウチョウウオ	131
	7	タテジマキンチャクダイ	43
	8	ナメラヤッコ	133
	9	ハマクマノミ	57
	10	デバスズメダイ	554
	11	ミツボシクロスズメダイ	>100
	12	フタスジリュウキュウスズメダイ	54
	13	ミスジリュウキュウスズメダイ	294
	14	ロクセンスズメダイ	201
	15	ルリスズメダイ	2021
	16	ニセネッタイスズメダイ	226
	17	クロソラスズメダイ	196
	18	ヒレナガハギ	62
	19	クマドリ	★
	20	ムラサメモンガラ	★
	21	アミモンガラ	★
	全実験種		120
	サンプル数100以上		12
甲殻類	1	イソテッポウエビ	多数
	2	ゴシキエビ	★
	3	オトヒメエビ	>100

注： 網掛) オレンジ: サンプル数100以上
 イエロー: サンプル数40以上100以下
 グリーン: 集計中
 ★ 刺激を加えると発音

3-2-2 沖縄美ら海水族館等における実験

沖縄美ら海水族館における水槽実験を表3-2-2-3に示した。

表3-2-2-3 沖縄美ら海水族館における実験結果

No	標準和名	鳴音の有無	サンプル数			カゴ 収容供試魚数
			220510	220614	231026	
1	マツカサウオ	判断難	85	0	—	2 (15cmTL)
2	クロオビマツカサ	◎威嚇音	119	—	—	2 (20cmTL)
3	テリエビス	×	—	0	0	2 (8cmTL)
4	アヤメエビス	×	—	0	0	1 (8cmTL)
5	アカマツカサ	×	—	—	0	1 (25cmTL)
6	タツノオトシゴ	×	—	0	0	2 (18cmTL)
7	ハナゴイ	×	0	—	—	4 (7～10cmTL)
8	ゴマヒレキントキ	×	—	0	0	1 (8cmTL)
9	アマミイシモチ	×	0	—	—	6 (7～8cmTL)
10	ネンブツダイ	×	—	0	0	5 (8cmTL)
11	シマヒイラギ	×	—	0	0	1 (15cmTL)
12	ヒメフエダイ	×	—	—	0	4 (18～25cmTL)
13	ミナミクロダイ	×	—	0	0	1 (13cmTL)
14	ホウライヒメジ	×	—	0	0	1 (10cmTL)
15	オオスジヒメジ	×	—	0	0	1 (10cmTL)
16	リュウキュウヒメジ	×	—	0	0	1 (10cmTL)
17	キンメドモドキ	◎	138	—	—	7 (7～8cmTL)
18	ハタンボ属の一種	◎	39	—	—	5 (10cmTL)
19	ハタンボ科の一種	◎	—	—	0	30 (5～7cmTL)
20	サザナミヤッコ	×	0	—	—	1 (28cmTL)
21	ロクセンヤッコ	◎	—	—	★	1 (18cmTL)
22	クマノミ (ペア)	×	3	—	—	2 (8～10cmTL)
23	ハマクマノミ (ペア)	×	0	—	—	2 (8～10cmTL)
24	リボンスズメダイ	×	—	0	0	2 (10cmTL)
25	アマミスズメダイ	×	0	—	—	3 (12～15cmTL)
26	オニハタタテダイ	×	0	—	—	1 (25cmTL)
27	マジリアイゴ	×	—	—	—	1 (15cmTL)
28	キイロハギ	×	—	—	—	2 (15cmTL)
29	ナンヨウハギ	×	0	—	—	1 (20cmTL)
30	ミヤコテングハギ	×	0	—	—	1 (25cmTL)
31	アカモンガラ	×	—	—	—	3 (20cmTL)
32	クロモンガラ	×	—	—	—	3 (20cmTL)
種数		◎5	13	12	15	—
1	イセエビ類	◎夜間	—	—	★	5 (40cmTL)
2	トラフシャコ	×	—	—	—	1 (10cmTL)
種数		◎1	0	0	2	—
1	ミナミハンドウイルカ	◎	28	多数	多数	1頭：クリックス
			56	多数	多数	1頭：ホイッスル
2	バンドウイルカ (親子)	◎	32	多数	多数	
3	オキゴンドウ	◎	—	—	多数	
4	シワハイルカ	◎	—	—	多数	
5	シワハイルカ	◎	—	—	多数	
6	マダライルカ (親子)	◎	—	多数	—	
	マダライルカ (♂)	◎	—	多数	—	

注) 1.マダライルカはオキナワマリンリサーチセンターで収録した。

2.★は刺激を与えると発音。

3.収容供試魚数の()内は全長を示した。

魚類は32種、甲殻類は2種以上(イセエビ類は5種混合)であり、海産哺乳類は6種の鳴音を収録した。

このうち、海産哺乳類は全種とも鳴音は収録できた。また、イセエビ類は刺激をA与えたり、給餌することで触角の擦音が収録できたが、トラフシャコは生息孔に留まり、発音は確認できなかった。魚類はクロオビマツカサ、キンメモドキ、ハタンボ属の一種、ハタンボ科の一種、ロクセンヤッコから鳴音が得られた。キンメモドキは群れで収容すると明瞭に発音を確認された。

4. 考察

水槽実験では、鳴音を発すると期待される魚種について、必ずしも鳴音を記録できない場合があった。理由としては、次のようなことが考えられた。

- 水槽環境に馴化できていない。
- 群れを形成する種を単体もしくは不十分な数量で実験した。
- 鳴音の発音周期あるいは間隔が長い等、種によって試験時間を変える必要がある。
- 他種もしくは他個体との混泳により、威嚇音等鳴音を発する可能性がある。
- 様々な発育段階によって鳴音の有無やパターンが異なる。
- 時期により鳴音の有無やパターンが異なる。
- 実験に使用する水槽の大きさ、形状が鳴音収録に適していない。
- 周辺の雑音、振動の存在など、必ずしも理想的な環境で実験を行うことができなかった。

魚類調査においては、ヨナラ水路および名蔵湾ではサウンドスケープ録音機で対象とした魚種が出現していたが、黒島西では魚種の一致が見られなかった。魚類調査は日中の限られた時間帯に行っており、夜間に活動する魚種は必ずしも記録されない。また、岩陰に隠れて生息する魚種や、人為音に敏感に反応し姿を隠すような魚種は必ずしも記録できない可能性がある。しかし、魚類調査の結果の地点ごとの違いは各地点の生態系の違いを反映していると考えられるため、石垣島周辺海域のサウンドスケープの時空間分布を把握するためには、黒島西で記録された魚種についても鳴音の収集を進める必要があると考えられる。

本研究では、鳴音の収集を現地調査、水槽実験と異なる方法で行った。現地調査と水槽実験にはそれぞれ以下のような利点と欠点がある。

- 現地調査では、多彩な自然環境下での生物の自由な行動に伴う鳴音を収集することが可能である。一方、ビデオカメラの画角や画質の制約があり、音と音源の対応付けは必ずしも容易ではない。さらに、現地調査は複数のダイバーが現地に赴き潜水時間の制限下で作業を行う必要があるため、調査に要する人員、機材等の負担が無視できない。

- 水槽実験では、自然環境を完全に再現することはできず、生物の行動は制限されたものとなる。また、音響環境も現場とは異なり、理想的なものとは言えない。一方で、音源は水槽に収容された生物に限られるうえ、ビデオカメラによる監視についての制約が少ないため、音と音源の対応付けは容易である。

こうした利点、欠点を考慮し、音源の収集のためには両者を適切に組み合わせることが必要であると考えられる。

以上を踏まえ、本研究から生物音の映像と鳴音を効率よく収集する方法を次のように提案する。

- ① 本格的な調査に先立ち自然条件下における観察（魚類調査）を実施する。
- ② 潜水によって容量の大きく收音範囲の狭い収録器を用いて、鳴音と映像を同時に記録する。
- ③ 水槽実験を実施して、鳴音の記録から魚種を特定する。
- ④ 水槽実験の条件として、魚類の生態等を考慮し、砂、隠れ場の設置、供試魚数は1尾より数尾を収容し、実験前の環境馴致は必須である。
- ⑤ 収録条件として、ポンプ等からの雑音・振動を極力除去し、大きな水槽の中に実験魚を収容する網を設置して反射音を除去する。

本研究における水槽実験では比較的共通の水槽および実験条件で実施した結果であり、上述の考察から今後の知見の集積および展開は十分期待できると考えられる。また、自然海域では収録困難なサンプル数である100以上を得られたことから、水槽実験は有効であると考えられる。今後、実験方法の改良を行うほか、自然海域での収録技術の向上を図ることが重要である。

3-2-3 海底設置サウンドスケープ録音機の音源分類アルゴリズムに関する研究

(担当：株式会社アクアサウンド)

3-2-3-1 NMFからDLへの変更

1. 目的

本研究課題は、海中サウンドスケープ観測システムにおいて海中にてリアルタイムで海中音の音源分類を行うサウンドスケープ録音機に搭載する音源分類アルゴリズムの構築を目的とする。分類精度は、レベル1分類が80%以上、レベル2が70%以上、レベル3分類が60%以上、を目標とする。

2. 方法

令和2年度までに石垣島周辺海域で実施した現地調査によって得られた音源データに加え、研究実施機関が所持していた海棲哺乳類や工事音の音源を用いて、音源分類アルゴリズムの検討及び評価を行う。音種データとサンプル数は表3-2-3-1に示す。

表 3-2-3-1 令和1、2年度の音源分類アルゴリズム
開発に使用した音種データとサンプル数

レベル1 分類	レベル2 分類	レベル3 分類	令和2年度 サンプル数	データ取得元
生物音	魚類	アオブダイ	3	調査地
		ベラのなかま	12	調査地
		クマミ	11	調査地
		クロビマツカサ	33	調査地
		トクツボ	100	調査地
		ニジエビス	11	調査地
		スズメダイ	17	調査地
	哺乳類	ハンドウイルカ	10	既有データ
		コビレゴンドウ	10	既有データ
		マッコウクジラ	1	既有データ
		ミナミハンドウイルカ	10	既有データ
		オキゴンドウ	8	既有データ
		ザトウクジラ	100	既有データ
		シロイルカ	10	既有データ
		ジュゴン	3	既有データ
	甲殻類	テッポウエビ	44	調査地
環境音	雨	雨	16	調査地
人為音	人	ダイバー	5	調査地
	船舶	小型漁船	3	調査地
		定期連絡船	4	調査地
		ダイバー船	1	調査地
		巡視船	1	調査地
		フレジャーボート	2	調査地
		大型貨物	2	調査地
		フェリー	1	調査地
	工事	岩盤破碎機	5	既有データ
		海中ハンマー	3	調査地
		浚渫	1	既有データ
合計		28音種	427	

レベル 1、2 の分類には、周波数と持続時間を用いた閾値分類を行い、図 3-2-3-1 に示すように、先ず取得した水中音を 10 秒間ごとに切り出し、短時間フーリエ変換によりスペクトログラムを計算する。メディアンフィルタを用いて、スペクトログラム中の広帯域成分・狭帯域成分を分離した後、100 Hz 以下、100～4,000 Hz、1,000～20,000 Hz の周波数帯に分け、各帯域について時間窓ごとに周波数方向に音圧を加算し、その合計レベルが閾値を超えた持続時間を計算して、いずれの時間帯に属するかを調べる。このようにして得られた入力音の周波数・持続時間帯の情報について、音源の可視化を行った結果得られた表（表 3-2-3-2）と比較することで、レベル 1、2 の分類を行う。ここで、持続時間が 10 秒を超える船舶音や降雨音については、図 3-2-3-1 の処理による分類ができないため、周波数帯域ごとに音圧の中央値を計算した後一定期間保存し、より長い時間窓において、上述したように周波数と持続時間によって検出・分類を行う（図 3-2-3-2）。

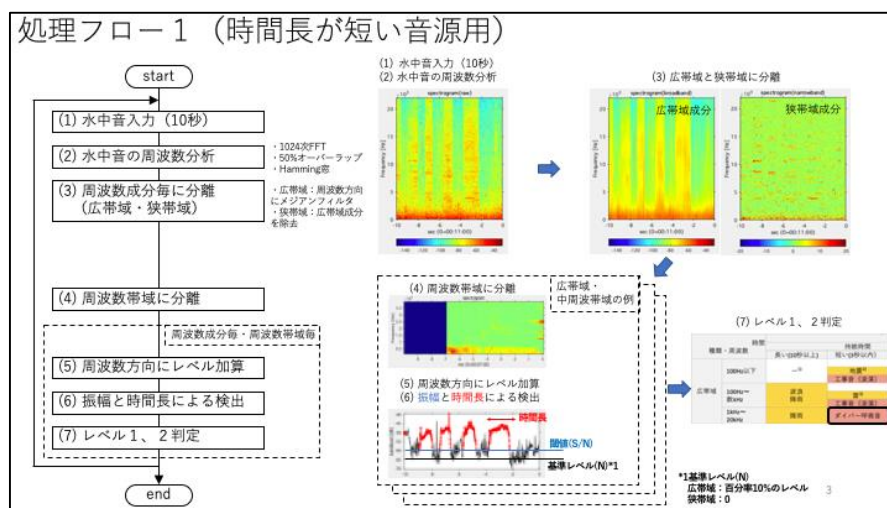


図3-2-3-1 レベル1および2分類のフローチャート

表3-2-3-2 レベル1および2の音源分類表

種類・周波数		時間領域			周期性	
		長い(10秒以上)	短い(3秒以内)	超短い(0.1秒以下)	あり	なし
広帯域	100Hz以下	— ¹⁾	地震 ²⁾ 工事音 (浚渫)	—	工事音 (打音)	—
	100Hz～数kHz	波浪 降雨	雷 ³⁾ 工事音 (浚渫)	魚類	魚類	—
	1kHz～20kHz	降雨	ダイバー呼吸音	ハンマー音	ハンマー音 ダイバー呼吸音	—
狭帯域	100Hz以下	洋上風力 船舶航走音	—	—	—	—
	100Hz～数kHz	船舶航走音	哺乳類・魚類	—	—	—
	1kHz～20kHz	—	哺乳類	—	—	—

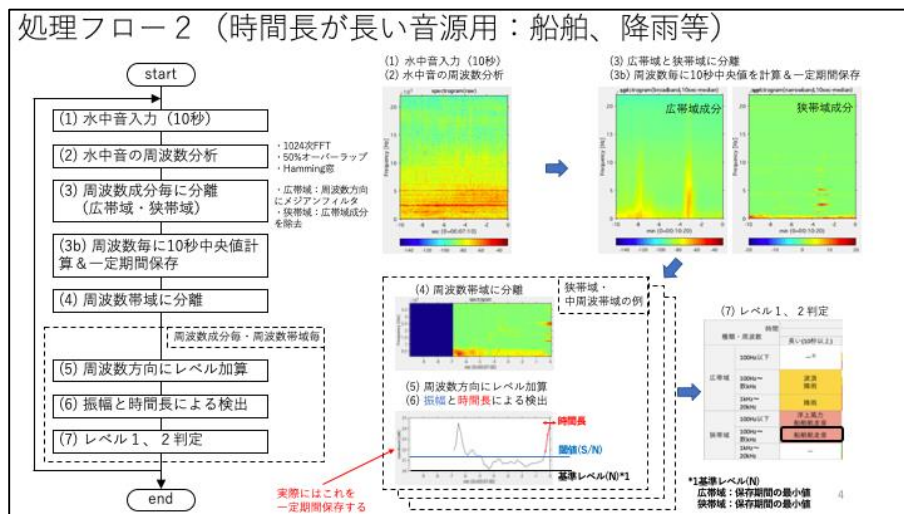


図 3-2-3-2 レベル 1 および 2 分類のフローチャート
(時間長が長い音源)

レベル 3 の分類には、特異値分解(Singular Value Decomposition, SVD)によるアルゴリズムの構築を試みる。後述するが、当初計画していた非負値行列因子分解 (NMF)¹⁾ではなく SVD を用いたのは、NMF の演算量が想定よりも大き過ぎることが、本年度の検討により示唆されたためである。先ず、取得された音源について、SVD を行うことによって、基底スペクトルを算出する。基底スペクトルの次元を計算負荷と分類精度を検討した結果、4 次元までを用いる。レベル 2 まで分類した入力音のスペクトログラムと、あらかじめ作成しておいた基底スペクトルの内積をとることによって、結合係数を計算する。その後、機械学習(K-means 法)による結合係数のクラスタリングを行い、該当するクラスの特徴(クラス番号、データ数)を調べる (図 3-2-3-3)。以下、多くのサンプル数が確保されたドクウツボの鳴音について例を示す。ドクウツボを示す結合係数の特徴として、2 秒以内に、クラス 2 (データ数 4 個以上)、クラス 4 (データ数 12 以上)、クラス 5 (データ数 1 以上) に分類されるものとする。

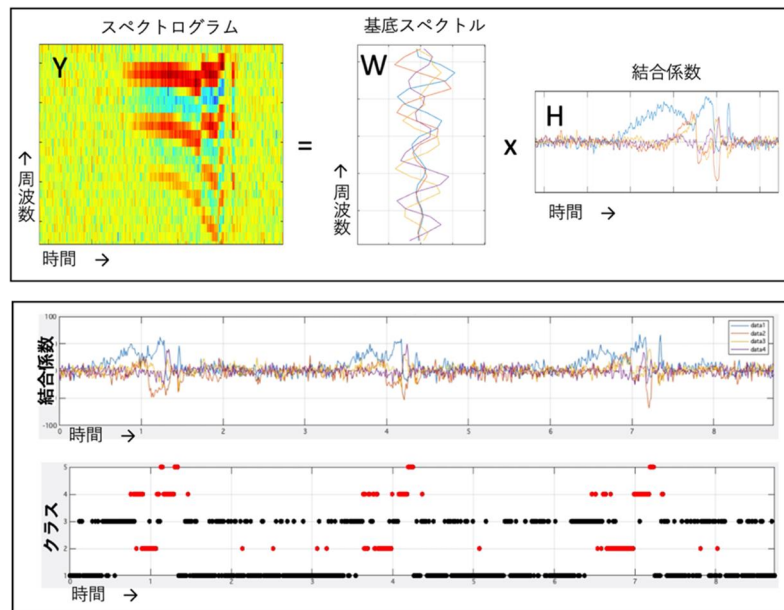


図3-2-3-3 上：SVD法によってスペクトログラムを基底スペクトルと結合係数に分離したイメージ図

下：K-means法による結合係数の分類

SVD 法による分類の比較対象とし、かつ、より優れた分類方法を模索するため、特微量フィルタリングと深層学習による音源分類についても検討する。特微量フィルタリングによる音源分類のうち、生物音分類では事前に音源の特徴を精査することによって、周波数と持続時間による複数のサブグループに分類する（表 3-2-3-3）。上述のレベル 1 および 2 の分類を行った後、分類されたサブグループに応じて分類に有効と考えられる特微量を抽出する。

表3-2-3-3 生物音レベル3分類のための音源と周波数・持続時間の対応表

			持続時間		
			10 s ~	~ 3 s	~ 0.1 s
周波数	広帯域	~ 100 Hz	-	-	-
		100 - 4000 Hz	-	(海産哺乳類 バーストパルス?)	(a)魚類 (パルス性鳴音)
		1000 - 20000 Hz	-	(海産哺乳類 バーストパルス?)	(b)マッコウクジラ デッポウエビ
	狭帯域	~ 100 Hz	-	-	-
		100 - 4000 Hz	-	(c)ドクウツボ ザトウクジラ ジュゴン	-
		1000 - 20000 Hz	-	(d)ハンドウイルカ その他海産哺乳類	-

主に、魚類のパルス性鳴音が含まれるサブグループ(a)について、時間波形の包絡線(エンベロープ)を用いたピークを検出することによって、鳴音と考えられるパルスを検出した後、パルス間隔からバウト(一連のパルス列)に分割する。各バウトについてパルス持続時間、バウト内の平均パルス数、バウト内の平均パルス間隔、卓越周波数、周波数帯域幅(卓越周波数の音圧マイナス 10dB まで)の 5 項目を特徴量として抽出する(図 3-2-3-4)。

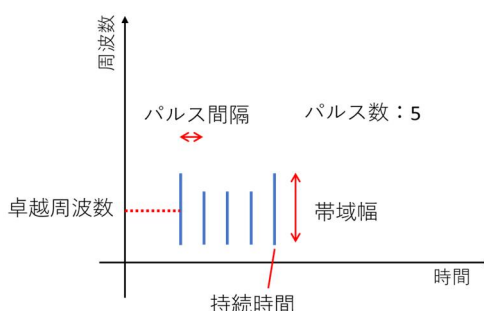


図3-2-3-4 魚類鳴音分類に用いた特徴量のイメージ図

主に、マッコウクジラ鳴音やテッポウエビ音が含まれるサブグループ(b)について、時間波形の包絡線を用いたピーク検出によってパルス音を検出した後、パルスの時間波形とスペクトルそれぞれから、期待値、標準偏差、歪度、尖度およびエントロピーを計算し、合計 10 個の特徴量として抽出する(図 3-2-3-5)²⁾。

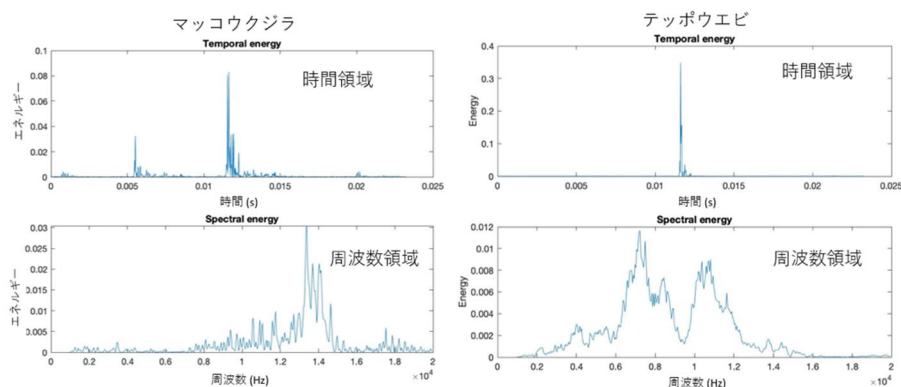


図3-2-3-5 マッコウクジラ鳴音(左列)とテッポウエビ音(右列)の時間領域波形(上)と周波数領域のスペクトル(下)の例

主に、ドクウツボやザトウクジラの鳴音が含まれるサブグループ(c)について、10 秒間のスペクトログラム上で複数のフィルタを組み合わせることによって、狭帯域鳴音領域のみを抽出する(図 3-2-3-6)。その後、抽出した鳴音のそれぞれについて、周波数変

化の平均、傾きおよび曲率を計算する。それらをセグメント内で蓄積した後、各パラメータの平均、標準偏差および歪度を計算し、計9個の指標を特徴量として抽出する。³⁾ セグメント内で蓄積する必要があることから、分類は鳴音単位ではなくセグメント単位で行うこととする。

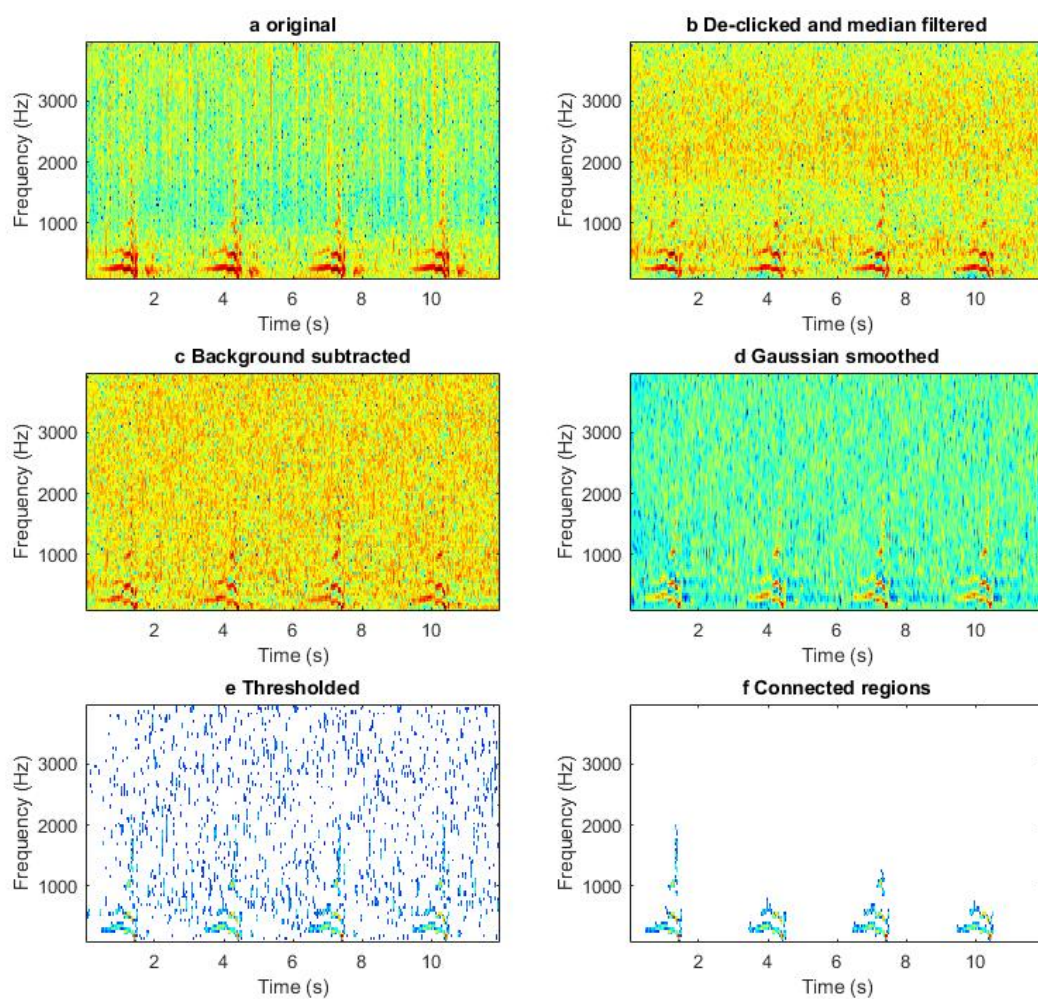


図3-2-3-6 ドクウツボ鳴音の検出例

主に、小型鯨類の狭帯域鳴音が含まれるサブグループ(d)についても、異なる周波数帯において、サブグループ(c)と同じ特徴量を抽出して分類を行う。

特徴量を用いた人為音のレベル3分類について、10秒間のセグメント内における平均スペクトルと、船舶音の持続時間を特徴量として抽出して分類を行う(図3-2-3-7)。

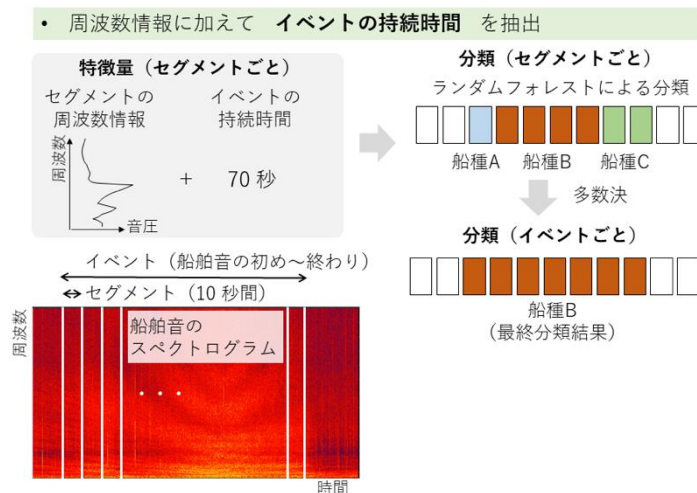


図3-2-3-7 船舶音の分類アルゴリズムイメージ図

上述した特徴量フィルタリングに加え、近年生物音響の分野でも優れた成果をあげている深層学習について検討する。⁴⁾ 深層学習の中でも、画像中に存在する物体の位置とクラスを検出する物体検出によって、特に、生物音のレベル 3 分類について検討する。スペクトログラムを画像として読み込み、MATLAB の Image Labeler を用いて、対象音の範囲とそのラベル付けを行う。物体検出アルゴリズムの一つである YOLO v2(You Only Look Once) を利用し、Mobilenet v2 を元ネットワークとする転移学習を行うことによって、分類モデルを学習する。なお、画像全体における対象物体の範囲が小さ過ぎると、分類精度が下がることが知られていることから、スペクトログラムは上記同様 100~4,000Hz と 1,000~20,000Hz の二つの周波数帯域において作成し、それぞれについて分類モデルを作成する。入力とするスペクトログラムはメディアンフィルタによって定常雑音を除去したものを用いた。

分類アルゴリズムの評価について、レベル 1、2 は基本的に閾値を用いた分類であるため、明確に学習データと評価データを分けることはしない。SVD によるレベル 3 分類については、複数のサンプルを水平に結合したスペクトログラムから基底スペクトルを計算し、ドクウツボ 127、魚類 568、哺乳類 322 サンプルを用いて評価を行う。特徴量フィルタリングによる生物音の分類について、分類器としては消費メモリが少ないが、分類精度が一般的に低い線形判別分析と、消費メモリが比較的多いが、分類精度が一般的に高いランダムフォレストを用い、それらの性能を比較する。学習データ：評価データの割合は 7:3 である。なお、アルゴリズムを評価するために使用した音種データのサンプル数は対象音が継続する時間を単位として計数している (表 3-2-3-1)。一方、サブグループごとのアルゴリズムによってバウトごとに分類するもの、1 音ごとに分類するもの、10 秒間の時間窓ごとに分類するものがあるため、表 3-2-3-1 に記載したサンプル数と図 3-2-3-8 から図 3-2-3-11 に示すサンプル数は必ずしも一致しない。

3. 結果

レベル1の分類結果は表3-2-3-4に示した。

生物音では82.0%、環境音では100%であったが、人為音では69.0%にとどまった。
また、生物音では現在のアルゴリズムでは分類できないものが7.8%であった。

表3-2-3-4 レベル1の分類結果

			分類結果 (%)				
大分類音	音種数	サンプル数		生物音	環境音	人為音	未分類
	16	349	生物音	82.0	0.4	9.8	7.8
	1	16	環境音	0.0	100.0	0.0	0
	11	28	人為音	24.4	6.5	69.0	0

レベル2の分類結果は表3-2-3-5に示した。

生物音のうち魚類では40.5%、哺乳類では44.9%であり、環境音のうち降雨では50.0%であり、人為音のうち船舶音では87.5%、工事音では28.7%、ダイバーの呼吸音では36.7%であった。なお、レベル1、2の分類精度は、「分類できたサンプル数／総サンプル数 x 100」で計算しているが、1つのサンプルが正解以外の音源にも分類された場合には、分類できたサンプル数を分類された数で除している。例えば、ダイバー音が魚類と哺乳類とダイバーの3つに分類された場合は、分類できたサンプル数を1/3とした。

表3-2-3-5 レベル2の分類結果

			分類結果 (%)							
中分類音	音種数	サンプル数		魚類	哺乳類	降雨	船舶	工事	ダイバー	未分類
	8	197	魚類	40.5	40.5	0.0	0.0	5.9	0.7	12.4
	8	152	哺乳類	41.5	44.9	0.0	0.0	4.0	7.0	2.6
	1	16	降雨	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	50
	7	14	船舶	1.8	1.8	1.8	87.5	1.8	1.8	3.5
	3	9	工事	25.9	20.4	0.0	0.0	28.7	12.0	13
	1	5	ダイバー	26.7	36.7	0.0	0.0	0.0	36.7	0

SVDを用いたレベル3分類は、現状ドクウツボのみについて実施した。分類精度は、検出率（正解率）= 96.1 %、誤検出率 = 2.4%であった。

特徴量フィルタリングについて、線形判別分析を用いた場合の生物音レベル 3 分類全体の正解率平均は 76.3%, ランダムフォレストを用いた場合は 81.4%であった。各サブグループの詳細な分類結果について、図 3-2-3-8 から図 3-2-3-11 に示した。

なお、分類結果を示す混同行列において、各行が真のクラス、各列が予測結果のクラスを表しており、各区画の上段が各分類結果に該当する百分率を、下段がサンプル数を表しており、区画の色が濃くなるほど百分率が高いことを表している。

サブグループ (a) 線形判別分析 正解率：38.79%

真のクラス	アオブダイ	5.7% 2	0.0% 0	0.0% 0	91.4% 32	2.9% 1	0.0% 0
	ベラ	0.0% 0	94.3% 33	0.0% 0	5.7% 2	0.0% 0	0.0% 0
	クマノミ	11.4% 4	2.9% 1	45.7% 16	40.0% 14	0.0% 0	0.0% 0
	クロオビ マツカサ	5.1% 2	5.1% 2	20.5% 8	53.8% 21	5.1% 2	10.3% 4
	ニジエビス	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	97.1% 34	2.9% 1	0.0% 0
	スズメダイ	0.0% 0	8.6% 3	25.7% 9	37.1% 13	0.0% 0	28.6% 10
		アオブダイ	ベラ	クマノミ	クロオビマツカサ	ニジエビス	スズメダイ

予測結果のクラス

線形判別分析による分類

サブグループ (a) ランダムフォレスト 正解率：49.74%

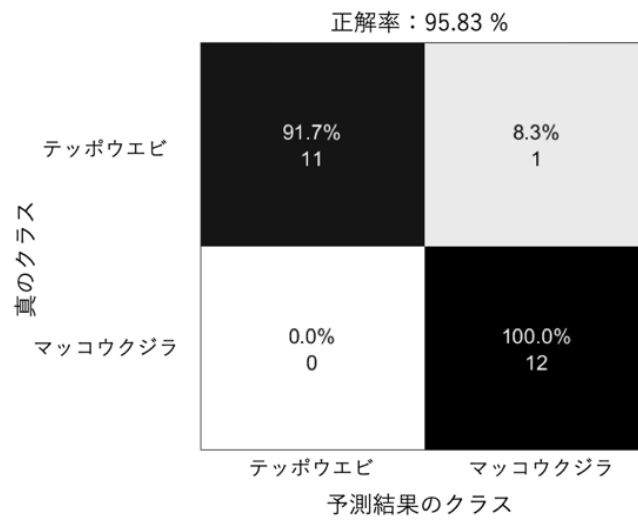
真のクラス	アオブダイ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	90.3% 28	3.2% 1	6.5% 2
	ベラ	0.0% 0	80.6% 25	0.0% 0	19.4% 6	0.0% 0	0.0% 0
	クマノミ	0.0% 0	0.0% 0	58.1% 18	38.7% 12	0.0% 0	3.2% 1
	クロオビ マツカサ	0.0% 0	0.0% 0	7.5% 3	80.0% 32	2.5% 1	10.0% 4
	ニジエビス	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	77.4% 24	22.6% 7	0.0% 0
	スズメダイ	0.0% 0	6.5% 2	12.9% 4	32.3% 10	0.0% 0	48.4% 15
		アオブダイ	ベラ	クマノミ	クロオビマツカサ	ニジエビス	スズメダイ

予測結果のクラス

ランダムフォレストによる分類

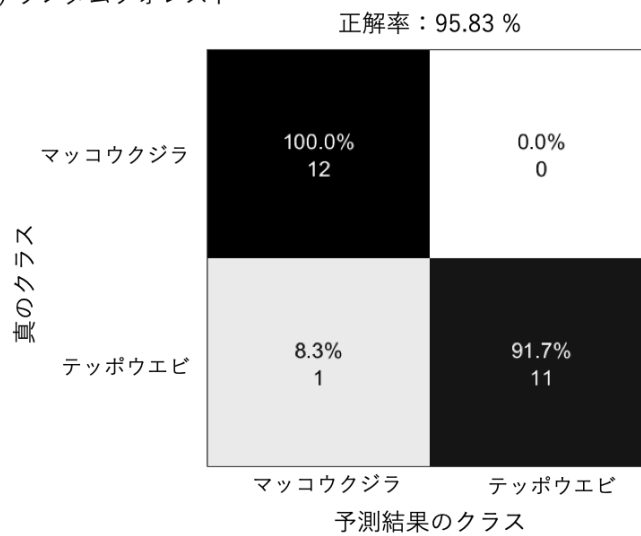
図3-2-3-8 サブグループ(a)特徴量フィルタリングによる分類精度

サブグループ (b) 線形判別分析



線形判別分析による分類

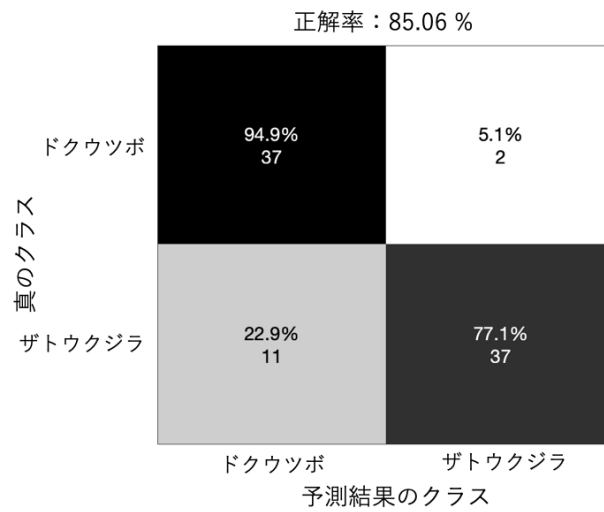
サブグループ (b) ランダムフォレスト



ランダムフォレストによる分類

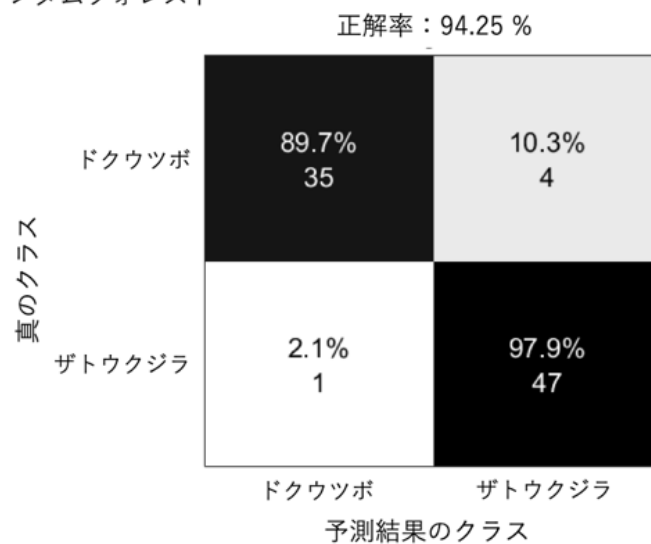
図3-2-3-9 サブグループ(b)特徴量フィルタリングによる分類精度

サブグループ(c) 線形判別分析



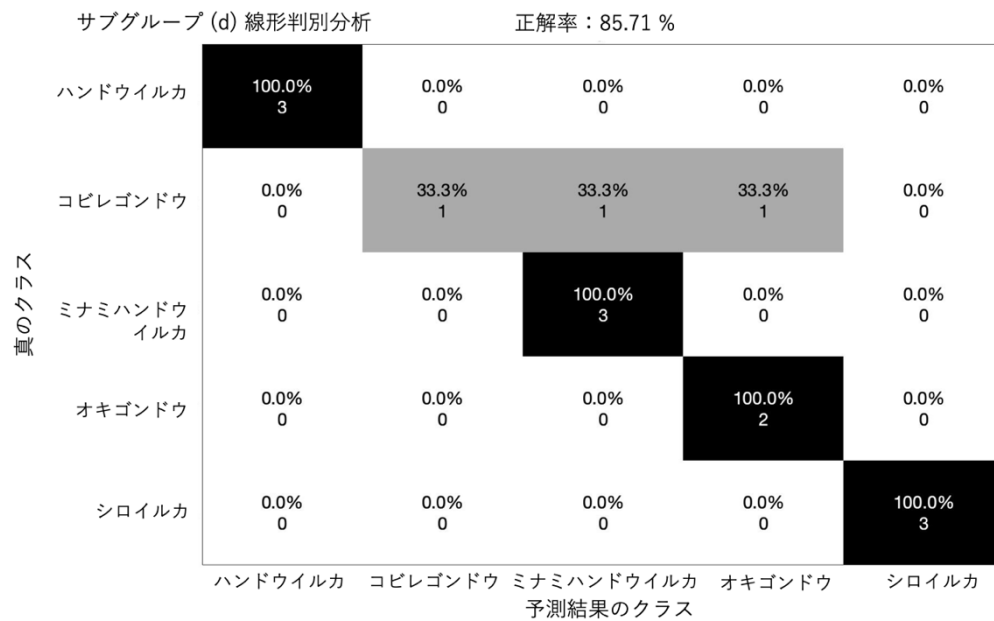
線形判別分析による分類

サブグループ(c) ランダムフォレスト

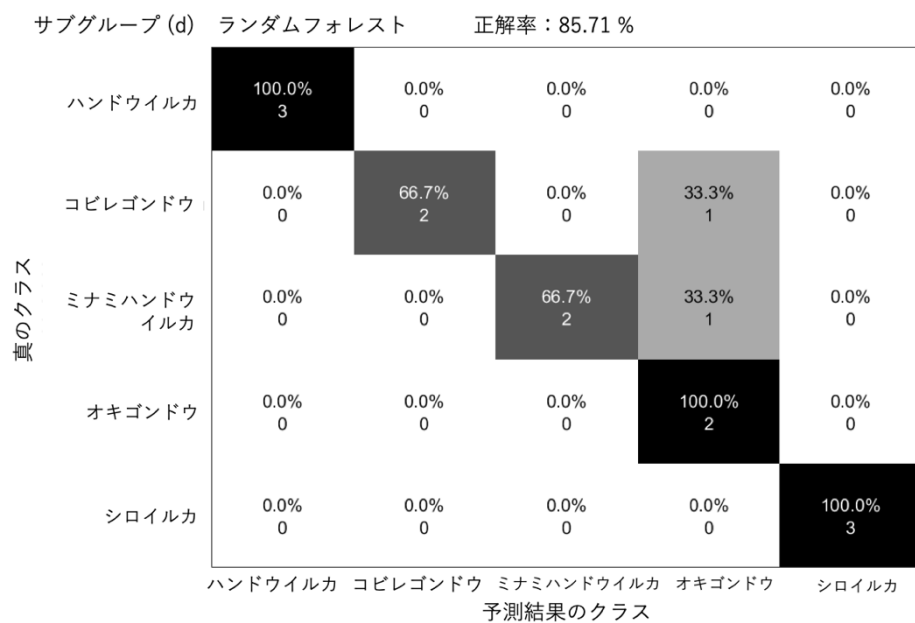


ランダムフォレストによる分類

図3-2-3-10 サブグループ(c)特徴量フィルタリングによる分類精度



線形判別分析



ランダムフォレストによる分類

図3-2-3-11 サブグループ(d)特徴量フィルタリングによる分類精度

人為音、特に船舶音のレベル 3 分類について、全体の正解率は 61.1%となった（図 3-2-3-12）。なお、船舶音はランダムフォレストのみを用いて分類・評価を行った。

正解率：61.11%

真のクラス	巡視船	66.7% 2	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0
	ダイバー船	0.0% 0	50.0% 1	0.0% 0	0.0% 0	33.3% 1	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0
	フェリー	33.3% 1	0.0% 0	100.0% 1	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0
	小型漁船	0.0% 0	50.0% 1	0.0% 0	100.0% 2	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0
	自船	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	33.3% 1	50.0% 1	25.0% 1	0.0% 0
	プレジャーボート	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	33.3% 1	50.0% 1	0.0% 0	0.0% 0
	大型貨物	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	50.0% 2	0.0% 0
	定期連絡船	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	25.0% 1	100.0% 1
		巡視船	ダイバー船	フェリー	小型漁船	自船	プレジャーボート	大型貨物	定期連絡船
		予測結果のクラス							

図3-2-3-12 船舶音レベル3分類の分類精度

深層学習について、特徴量フィルタリングと同様に学習：評価 = 7:3 として分類を行ったところ、ザトウクジラやドクウツボのように数百程度のサンプル数が確保できている音種に関しては、それぞれ 91.7%、100%の分類精度を得ることができた一方、それ以外の音種は検出が行われなかった（図 3-2-3-13）。

100-4000 Hz 分類精度

正解率：79.41 %

真のクラス	ザトウクジラ	91.7% 33	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	8.3% 3
	クロオビマツカサ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 7
	ドクウツボ	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 21	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0
	スズメダイ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 2
	ペラ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 2
	検出なし	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0
		ザトウクジラ	クロオビマツカサ	ドクウツボ	スズメダイ	ペラ	検出なし
予測結果のクラス							

1000-20000 Hz 分類精度

正解率：0 %

真のクラス	シロイルカ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 3
	テッポウエビ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 11
	ミナミハンドウイルカ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 2
	コビレゴンドウ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 2
	ハンドウイルカ	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	0.0% 0	100.0% 1
	検出なし	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0	NaN% 0
		検出なし	テッポウエビ	ミナミハンドウイルカ	コビレゴンドウ	ハンドウイルカ	検出なし
予測結果のクラス							

図3-2-3-13 深層学習による生物音レベル3の分類精度

4. 考察

令和1年度および2年度では、音源分類アルゴリズムを構築するための音種データやそのサンプル数が少なく、十分な実装や評価ができる環境ではなかったが、まずは、本研究起案時に検討していた非負値行列因子分解（Non-negative Matrix Factorization：NMF）を用いた音源分類アルゴリズムの検討を試みた。NMFは、入力したデータの中の有用な特徴量を抽出するための「教師なし学習」の手法であり、入力した水中音のスペクトログラム（行列）を、非負値（正の値）の基底スペクトル（ベクトル）と結合係

数（ベクトル）との積で表現するものである。本手法は一般的に多くの入力データが必要で、基底スペクトルと結合係数はその都度入力データから計算するため計算負荷が大きく、また、基底スペクトルも入力データによって変化することも想定され、リアルタイムで音源分類を行うには難しいことが判明した。これらの問題を解決するため、教師データを用いて基底スペクトルを作成することを検討した。また、リアルタイム処理における計算負荷を考慮し、古典的な手法であるが、基底スペクトルの作成に特異値分解(Singular Value Decomposition, SVD)の採用を検討した。さらに、k-means 法による結合係数のクラスタリングを行い音源との紐付けを行うことを検討した。この手法を 1 魚種（ドクウツボ）に適用し、シミュレーションやサウンドスケープ録音機の試作機による分類精度の評価を行ったところ、正解率 90%以上の結果が得られた。

また、限られた計算資源と消費電力の中で、できるだけ高い分類精度を得ることを考え、上記の手法にとらわれずに複数の分類手法についても検討を行った。各手法の予想されるメリットとデメリットは表 3-2-3-6 に示した。

特徴量フィルタの分類器については、現状評価に用いたデータセットでは、魚類鳴音が含まれるサブグループ(a)に関しては、正解率に 10%程度の差が見られたものの、それ以外では大きな差は見受けられなかった。ただし、一般的には分類精度が低く、音種によって処理が異なるなど、音源分類アルゴリズムが煩雑になることが懸念された。

深層学習については、ドクウツボやザトウクジラなど数百程度のサンプル数が得られている音種に関しては非常に高い分類精度が得られており、今回入力画像とするスペクトログラムのように、情報量が限られている場合には、転移学習を利用することで数百程度の学習データで優れた分類精度が得られることが示唆された。深層学習は、同一の処理で異なる音種を分類することができるので、音源分類アルゴリズムもシンプルになり、録音機への実装という点においてメリットが大きく、また、音種の追加も容易に対応できる。今後、計算負荷の問題がクリアされ、音種サンプルの収集も効果的に進んだ場合は、非常に有効な選択肢となることが示された。

表 3-2-3-6 アルゴリズム候補となる分類手法の比較

手法	長所	短所
教師なしNMF	学習が不要	一般的に多くのデータが必要 電力・メモリ消費が多い
SVD	時間の長い音の分類は得意	パルス音の分類は難しい
特徴量フィルタリング 判別分析	省電力・省メモリ	一般的に分類精度が低い 検出・分離が別ステップになる 音種によって処理が異なる
特徴量フィルタリング ランダムフォレスト	比較的省電力・省メモリ	検出・分類が別ステップなる 音種によって処理が異なる
深層学習	一般的に高精度 一般的に検出・分類が一度にできる 異なる音種でも同一に処理可能	一般的に多くの教師データが必要 一般的に電力・メモリ消費が多い (専用デバイスで可能か)

3-2-3-3 AI画像識別モデルの開発・評価

1. 目的

本研究課題は、海中サウンドスケープ観測システムにおいて海中にてリアルタイムで海中音の音源分類を行うサウンドスケープ録音機に搭載する音源分類アルゴリズムの構築を目的とする。本サブ課題では、令和2年までの検討結果を踏まえ、深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムの構築を行う。分類精度は、レベル1分類が80%以上、レベル2が70%以上、レベル3分類が60%以上、を目標とする。

2. 方法

画像識別用の深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムは、取得した水中音から短時間のスペクトログラム画像を作成する前処理と、画像に対して深層学習モデルを適用する分類処理の2段階で構成される（図3-2-3-14）。

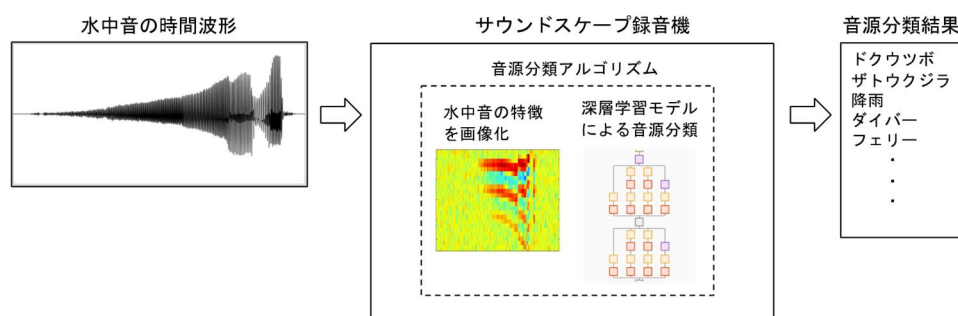


図 3-2-3-14 画像識別用の深層学習モデルを用いた音源分類の流れ

深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムの処理フローは図 3-2-3-15、処理内容は表 3-2-3-7 に示す。

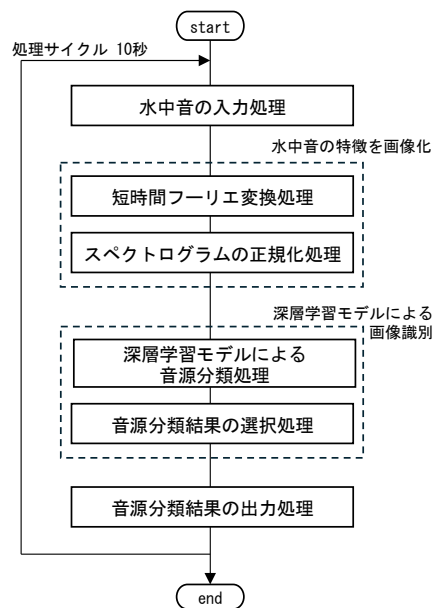


図 3-2-3-15 深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムの処理フロー

表 3-2-3-7 深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムの処理内容

処理項目	詳細
水中音の入力処理	10秒に1回、直近の11秒分の水中音の時間波形を入力する（前回処理した時間波形と1秒オーバーラップさせる）。
短時間フーリエ変換処理	短時間フーリエ変換（FFT次数：1024次、窓関数：ハミング窓、オーバーラップ率：62.5%）を行い、水中音のスペクトログラムを計算する。
スペクトログラムの正規化処理	メジアンフィルタ（時間幅11秒、周波数幅646Hz）を用いてスペクトログラムの背景ノイズを抽出する。元のスペクトログラムから背景ノイズを除去する。
深層学習モデルによる音源分類処理	時間長2秒の正規化スペクトログラムを50%オーバーラップさせながら切り出し、合計10枚の画像を作成する。10枚の画像に対して、画像識別用の深層学習モデル(SqueezeNet)による画像識別を行う。
音源分類結果の選択処理	10回の分類結果のうち分類スコアが0.75以上のものを選択し、その中で分類回数が最も多かった音種を分類結果の代表値とする。分類回数が同数の場合は、分類スコア値の合計値が大きい音種を代表値とする。
音源分類結果の出力処理	10秒に1回、選択された音源分類結果を出力する。

令和3年度以降の音源分類アルゴリズムの過年度の比較は表 3-2-3-8 に、音源分類アルゴリズムの開発に使用した音種データとサンプル数の比較は表 3-2-3-9 に示す。

令和3年度は、画像識別用の深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムの基本的な処理フローを構築する。また、音源分類の対象音として、現場海域や水族館などで収集され音源が特定されている音種データのうち、サンプル数が20個以上確保できた音種を対象に、段階的に、10音種、24音種、51音種を選択し、音源分類アルゴリズムの構築および評価を行う。

令和4年度以降は、サンプル数が40個以上確保できた52音種を音源分類の対象として音源分類アルゴリズムを構築した。52音種のスペクトログラムの例は図 3-2-3-16 に

示す。深層学習モデルの学習では、分類対象外の音源（分類結果の送信信号、誤分類された音源）の再学習を行い、誤分類の低減を図る。また、処理量の軽減や分類精度向上のための検討を行う。

令和5年度は、短時間フーリエ変換処理において、深層学習モデルの入力画像の時間分解能も考慮しオーバーラップ率を下げ、処理量の軽減を図る。スペクトログラムの正規化処理では、メディアンフィルタの周波数幅を広げ、船舶音の分類精度の向上を図る。深層学習モデルについては、当初採用していた GoogLeNet⁵⁾からより軽量の SqueezeNet⁶⁾へ切り替え、処理量の軽減を図る。

表 3-2-3-8 令和3、4、5年度の音源分類アルゴリズムの比較

年度	令和3年度			令和4年度	令和5年度
分類方式	深層学習モデルによる画像識別				
短時間フーリエ変換	FFT次数：1024 窓関数：hanning オーバーラップ：90%			FFT次数：1024 窓関数：hanning オーバーラップ：62.5%	
スペクトログラムの正規化	マジアンフィルタサイズ： 時間長11秒、周波数幅43Hz			マジアンフィルタサイズ： 時間幅11秒、周波数幅646Hz	
深層学習モデル	モデル名：GoogLeNet 画像サイズ：224-by-224 容量：27MB			モデル名：SqueezeNet 画像サイズ：227-by-227 容量：5.2MB	
深層学習モデルの学習	・事前学習済みの深層学習モデルを使用 ・音種毎にサンプルの70%を任意に選択し学習			・事前学習済みの深層学習モデルを使用 ・音種毎にサンプルの70%を任意に選択し学習 ・分類対象外の音源を学習（分類結果の送信信号、誤分類された音源）	
分類画像	水中音の正規化スペクトログラム 時間長：2秒 周波数範囲：60Hz～20kHz（対数スケール）				
分類判定	分類スコア値0.5以上			分類スコア値0.75以上	
レベル3分類対象	10音種	24音種	51音種	52音種	
生物音	7音種	16音種	41音種	39音種	
環境音	1音種	2音種	2音種	2音種	
人為音	2音種	6音種	8音種	11音種	

表 3-2-3-9 令和 3、4、5 年度の音源分類アルゴリズム開発に使用した
音種データとサンプル数

レベル1 分類	レベル2 分類	レベル3 分類	令和 3 年度				令和 4、5 年度		送信 コード
			サンプル数	10音種	24音種	51音種	サンプル数	52音種	
生物音	魚類	トクツホ A	229	○	○	○	229	○	C02 C01
		アカハナコ IA	41	○	○	○	41	○	C02 C02
		ウケグ チイトウグ IA	67	○	○	○	67	○	C02 C03
		ルリスズ メグ IA	225	○	○	○	225	○	C02 C04
		クロオビ マツカサ A	35		○	○	54	○	C02 C05
		クロオビ マツカサ B	65		○	○	66	○	C02 C06
		ミスジ リュウキュウス メグ IA	94		○	○	94	○	C02 C07
		ミスジ リュウキュウス メグ IB	125		○	○	162	○	C02 C08
		ウケグ チイトウグ IB	26		○	○			C02 C09
		ルリスズ メグ IC	1763			○	1763	○	C02 C10
		デハスズ メグ IB	321			○	321	○	C02 C11
		デハスズ メグ IA	233			○	233	○	C02 C12
		アカマツカサ A	208			○	208	○	C02 C13
		クロソラスズ メグ IB	138			○	138	○	C02 C14
		イッテンチョウウオ A	128			○	128	○	C02 C15
		ナメヤッコ A	120			○	133	○	C02 C16
		エハンス アンティラス A	118			○	118	○	C02 C17
		ロクセンズズ メグ IA	103			○	103	○	C02 C18
		ロクセンズズ メグ IB	98			○	98	○	C02 C19
		ミスジ リュウキュウス メグ IC	75			○	75	○	C02 C20
		ニセネッタイスズ メグ IC	62			○	62	○	C02 C21
		クロソラスズ メグ IA	58			○	58	○	C02 C22
		アミメエダ IA	49			○	49	○	C02 C23
		ハマクマノミ A	49			○	49	○	C02 C24
		タテシ マキンチャクグ IA	37			○			C02 C25
		ニセネッタイスズ メグ IA	31			○			C02 C26
		ヒレナガ ハギ B	29			○			C02 C27
		クロスズ メグ IA	28			○			C02 C28
		マジ リアイゴ A	25			○			C02 C29
		イトヒキシンクグ IA	23			○			C03 C01
		ニセカンランハギ A	23			○			C03 C02
		ゴンス IB					441	○	C03 C03
		キンメド キ A					138	○	C03 C04
		ニセネッタイスズ メグ ID					131	○	C03 C05
		マツカサウオ A					85	○	C03 C06
		フタスジ リュウキュウスズ メグ IA					54	○	C03 C07
		ニジ エビス A					54	○	C03 C08
	哺乳類	ザトウクシラ B	115	○	○	○	127	○	C06 C01
		ザトウクシラ C	60	○	○	○	60	○	C06 C02
		ジ ユン A	74	○	○	○	140	○	C06 C03
		コヒレゴントウ A	103		○	○	134	○	C06 C04
		ミナミハントウ ウイルカ B	30		○	○	56	○	C06 C05
		オキゴントウ A	38		○	○			C06 C06
		タッパナガ A	102			○	102	○	C06 C07
		マゴントウ A	45			○	45	○	C06 C08
		ハントウ ウイルカ A	32			○			C06 C09
		シロハイルカ A					103	○	C06 C10
		シロハイルカ B					105	○	C06 C11
		ジ ユン B					40	○	C06 C12
	甲殻類	シラヒゲエビ	26		○	○			C08 C01
環境音	雨	雨-強	172	○	○	○	172	○	C22 C01
	波	波-高	148		○	○	148	○	C24 C01
人為音	人	ダ イバ-呼吸音 A	140		○	○	140	○	C12 C01
		ダ イバ-呼吸音 B	33			○			C12 C02
	船舶	大型貨物船	70		○	○	50	○	C14 C01
		巡視船	108	○	○	○	140	○	C14 C02
		定期船	32		○	○	124	○	C14 C03
		ダ イバ-船	88		○	○	87	○	C14 C04
		ブ レジ ャーボ-ート	106			○			C14 C05
		フェリー					107	○	C14 C06
		小型漁船					101	○	C14 C07
		タンカー					100	○	C14 C08
		タグボ-ート					101	○	C14 C09
		ドローン					110	○	C14 C10
	工事	海中ハンマー	101	○	○	○	106	○	C16 C01
サンプル数の合計			6249				7775		

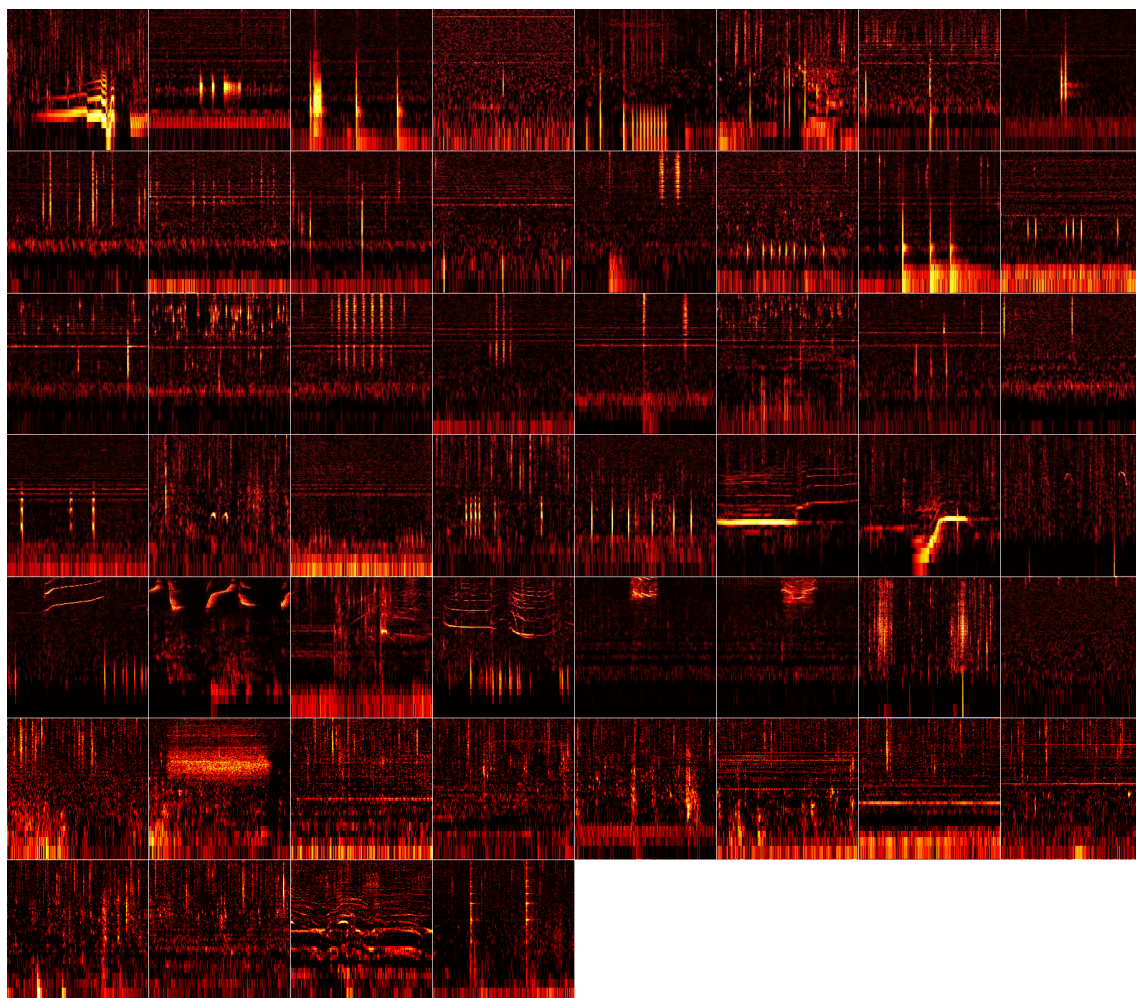


図 3-2-3-16 令和 4、5 年度の分類対象音種のスペクトログラムの例（52 音種）

音源分類アルゴリズムの精度評価は、表 3-2-3-9 に示す現場海域や水族館などで収集された音種データや既存データを用い、分類の正解率（音源分類に正解した数／音源分類に使用した数）を求め評価する。評価用のサンプルは、深層学習モデルの学習に使用していないサンプル（各音種のサンプルの 30%）から 1 音種につき最大 20 サンプルを無作為に選択する。既知の音を音源分類アルゴリズムに入力しその応答を確認することからこの方法をプレイバック実験と呼ぶ。音源分類アルゴリズムを基に作成したソフトウェアを用いて、計算機上でプレイバック実験のシミュレーションを行う。

3. 結果

プレイバック実験の PC シミュレーションで得られた令和 5 年度版の音源分類アルゴリズムの混同行列と分類精度は図 3-2-3-17 に示した。レベル 1、レベル 2 およびレベル 3 分類の正解率は、それぞれ 98.7%（再現度: 98.6%, 適合度: 90.2%, F 値 : 94.2%）、98.1%（再現度: 96.6%、適合度: 94.1%、F 値: 95.3%）、93.2%（再現度: 93.1%、適

合度: 94.7%、F 値: 93.9%) となった。行列において、各行が真のクラスを、各列が予測されたクラスを、各要素中に記載されている数字がそのクラスに分類された音種の数を表している。右は音源分類の正解率・再現度・適合度・F 値について、それぞれのクラスごとに示している。最下段は各値の平均値を示した。また、開発年度毎の分類精度は表 3-2-3-10 に示した。令和 3 年度の 10 音種、24 音種、51 音種、および令和 4 年度の 51 音種のレベル 3 分類の正解率は、それぞれ 94.8%、73.0%、53.7%、91.2%となった。

表3-2-3-10 シミュレーションによる令和3、4、5年度の
音源分類アルゴリズムの分類精度

年度	分類 音種	レベル1分類の 分類精度*1 [%]	レベル2分類の 分類精度*1 [%]	レベル3分類の 分類精度*1 [%]
令和3年度	10音種	94.9 (91.8, 91.0, 91.4)	94.9 (89.6, 90.5, 90.1)	94.8 (91.7, 90.0, 90.8)
	24音種	92.7 (95.3, 88.1, 91.6)	91.0 (95.5, 87.9, 91.5)	73.0 (71.2, 79.5, 75.1)
	51音種	88.6 (88.1, 77.7, 82.6)	87.1 (78.8, 88.6, 83.4)	53.7 (52.3, 71.3, 60.3)
令和4年度	52音種	95.8 (93.4, 88.6, 90.9)	95.1 (95.9, 92.9, 94.3)	91.2 (91.4, 94.7, 93.0)
令和5年度	52音種	98.7 (98.6, 90.2, 94.2)	98.1 (96.6, 94.1, 95.3)	93.2 (93.1, 94.7, 93.9)

*1 分類精度の数値は、上段が正解率(%)、下段の括弧内が再現度、適合度およびF値の平均値(%)を表す。

4. 考察

令和3年度以降は、上記の検討結果を踏まえ、深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムの開発と音種データの拡充を進めた。

令和3年度では、分類対象音種を、10音種、24音種、51音種と段階的に増やし、シミュレーションによる分類精度の評価を実施したが、音種の増加に伴い特にレベル3分類の精度が低下した。これは、分類対象音を増やすためサンプルの少ない（サンプル数が20以上の）音種を選択したことにより、十分な学習が行われなかったことが原因として考えられた。

令和4年度以降は、音種データの拡充を図り、サンプル数が40以上収集された52音種を分類対象とし、さらに、分類スコアの閾値の調整や、誤分類低減のための深層学習モデルの工夫（誤分類された対象外として学習）など、処理の見直しを図り、レベル3分類の精度を向上させることができた。

さらに、船舶航走音の分類精度向上のためのスペクトログラムの正規化処理の改善や、計算負荷の軽減のための検討（深層学習モデルの軽量化、前処理の軽減）を行い、令和5年度にて、軽量化版の音源分類アルゴリズムとして構築した。シミュレーションによる精度評価では、分類精度の目標値（レベル1分類が80%以上、レベル2が70%以上、レベル3分類が60%以上）を達成することができた。

3-2-3-3 試作機の評価

1. 目的

本研究課題は、海中サウンドスケープ観測システムにおいて、海中にてリアルタイムで海中音の音源分類を行うサウンドスケープ録音機に搭載する音源分類アルゴリズムの構築を目的とする。本サブ課題では、開発した深層学習モデルを用いた音源分類アルゴリズムをサウンドスケープ録音機の試作機に実装し、分類精度の評価を行う。分類精度は、レベル1分類が80%以上、レベル2が70%以上、レベル3分類が60%以上、を目標とする。

2. 方法

分類精度は、「2)AI画像識別モデルの開発・評価」と同様に、表3-2-3-9に示す現場海域や水族館などで収集された音種データや既存データを用い、分類の正解率（音源分類に正解した数／音源分類に使用した数）を求め評価する。試作機の評価では、以下の2通りの実験を行う。

2-1 direct-in 実験

サウンドスケープ録音機の試作機を用いた陸上でのプレイバック実験。

評価用サンプルを録音機のアンプへの直接入力し分類精度を検証。

2-2 現地実験

サウンドスケープ録音機の試作機を用いた海上でのプレイバック実験。

水中スピーカから放音した評価用サンプルを録音機の受波器で受信し分類精度を検証。

3. 結果

プレイバック実験の direct-in 実験で得られた令和5年度版の音源分類アルゴリズムの混同行列と分類精度は図3-2-3-18に示した。レベル1、レベル2およびレベル3分類の正解率は、それぞれ97.7%（再現度:93.7%, 適合度:87.4%, F値:90.4%）、96.6%（再現度:93.9%、適合度:90.9%、F値:92.4%）、88.8%（再現度:88.8%、適合度:92.6%、F値:90.6%）となった。また、開発年度毎の分類精度は表3-2-3-11に示した。令和3年度の24音種、51音種、および令和4年度の51音種のレベル3分類の正解率は、それぞれ68.7%、40.0%、90.9%となった。

プレイバック実験の現地実験で得られた令和5年度版の音源分類アルゴリズムの混同行列と分類精度は図3-2-3-19に示した。レベル1、レベル2およびレベル3分類の正解率は、それぞれ85.6%（再現度:79.1%, 適合度:70.9%, F値:74.8%）、84.6%（再現度:84.4%、適合度:77.7%、F値:80.9%）、72.6%（再現度:72.7%、適合度:83.0%、F値:77.5%）となった。また、開発年度毎の分類精度は表3-2-3-12に示した。令和3

年度の 10 音種、24 音種、51 音種、および令和 4 年度の 51 音種のレベル 3 分類の正解率は、それぞれ 82.6%、40.8%、27.8%、52.2%となった。

表 3-2-3-11 direct-in 実験による令和 3、4、5 年度の音源分類アルゴリズムの分類精度

年度	分類 音種	レベル1分類の 分類精度*1 [%]	レベル2分類の 分類精度*1 [%]	レベル3分類の 分類精度*1 [%]
令和 3 年度	10音種	- (-, -, -)	- (-, -, -)	- (-, -, -)
	24音種	88.6 (92.9, 80.3, 86.2)	86.7 (87.1, 83.4, 85.2)	68.7 (66.6, 78.2, 71.9)
	51音種	89.4 (83.0, 77.6, 80.2)	85.3 (68.2, 82.1, 74.5)	40.0 (39.4, 53.9, 45.5)
令和 4 年度	52音種	95.7 (93.7, 82.3, 87.6)	95.1 (95.8, 88.7, 92.1)	90.9 (90.6, 94.2, 92.4)
令和 5 年度	52音種	97.7 (93.7, 87.4, 90.4)	96.6 (93.9, 90.9, 92.4)	88.8 (88.8, 92.6, 90.6)

*1 分類精度の数値は、上段が正解率(%)、下段の括弧内が再現度、適合度およびF値の平均値(%)を表す。

表3-2-3-12 現地実験による令和 3、4、5 年度の音源分類アルゴリズムの分類精度

年度	分類 音種	レベル1分類の 分類精度*1 [%]	レベル2分類の 分類精度*1 [%]	レベル3分類の 分類精度*1 [%]
令和 3 年度	10音種	83.9 (77.7, 83.4, 80.5)	83.2 (80.2, 87.5, 83.7)	82.6 (82.6, 91.0, 86.6)
	24音種	58.3 (51.0, 57.2, 53.9)	49.5 (51.1, 54.5, 52.7)	40.8 (39.6, 49.4, 44.0)
	51音種	67.3 (64.8, 60.7, 62.7)	56.4 (48.5, 57.1, 52.4)	27.8 (26.5, 35.7, 30.4)
令和 4 年度	52音種	66.6 (76.8, 63.8, 69.7)	64.7 (79.2, 70.0, 74.4)	52.2 (52.3, 66.8, 58.7)
令和 5 年度	52音種	85.6 (79.1, 70.9, 74.8)	84.6 (84.4, 77.7, 80.9)	72.6 (72.7, 83.0, 77.5)

*1 分類精度の数値は、上段が正解率(%)、下段の括弧内が再現度、適合度およびF値の平均値(%)を表す。

4. 考察

サウンドスケープ録音機の試作機による direct-in 実験や現地実験においては、分類精度の目標値を達成することができた。ただし、サウンドスケープ録音機を用いた長期実験では、誤分類の多いことも確認され、改善の余地を残していることも分かった（研究課題 3-2-1）。

例えば、黒島北の長期実験では、2023 年 9 月 27 日午前 3 時台にザトウクジラ B が多く分類されたが、検証のため同時に録音された水中音を確認したところ、ザトウクジラの鳴音は発見されなかった。ザトウクジラの分類については、鳴音のバリエーションの多さもあり、深層学習の画像識別による分類精度の低下を防ぐため、鳴音の特徴毎に分類クラス（音種）を分けている。そして、本研究で入手された鳴音のバリエーションは図 3-2-3-20 に示すが、サンプル数の制約（1 音種につき 40 サンプル以上）により、

ザトウクジラB（赤丸）、ザトウクジラC（青丸）の2クラスのみを深層学習モデルの学習及び分類の対象とした。長期実験で誤分類の多かったザトウクジラBは、周波数の変化が少なく時間長の長いという特徴があり、スペクトログラム上には横線として現れ、音源の SN 比の影響等もありサンプル間でも周波数や横線の本数にバリエーションがある（図 3-2-3-21）。長期実験の録音データを詳細に解析したところ、誤分類の発生時間帯に、ザトウクジラBと似た特徴を持つ周波数の変化が少なく時間長の長い音の発生が確認された（図 3-2-3-22 の赤枠内）。この音は鳴音よりも時間長は長いが、スペクトログラム上では横線として現れ、ザトウクジラBのバリエーション内にも類似の画像があることから、深層学習モデルが学習した音種の中で最も類似性の高いザトウクジラBに分類したものと推測される。

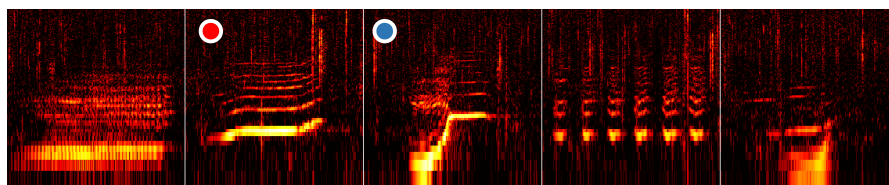


図3-2-3-20 ザトウクジラの鳴音のバリエーション
(赤丸：ザトウクジラB,青丸：ザトウクジラC)

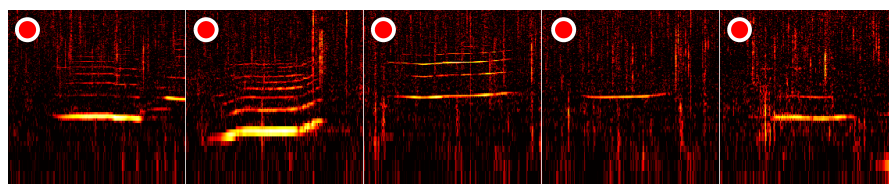


図3-2-3-21 ザトウクジラB（音種）のバリエーション

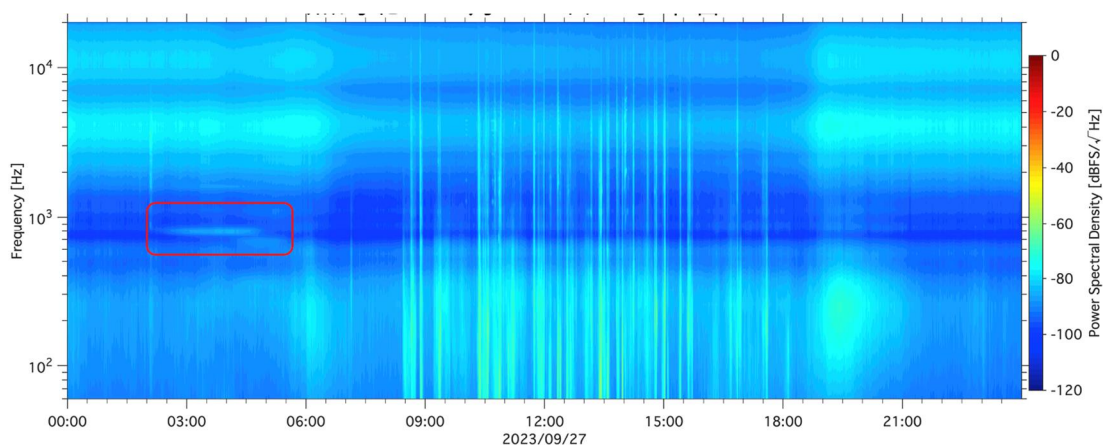


図3-2-3-22 長期実験で観測された2023年9月27日の黒島北の水中音の
スペクトログラム

一般的に、深層学習モデルの学習には、膨大の教師データを必要とする。しかし、本研究では、非常に限られた音種とサンプル数（52 音種、1 音種あたり 100 サンプル程度）で音源分類アルゴリズムの開発を実施した。教師データの数が少ない点については、転移学習を利用することで対策をとっているが、教師データに含まれない未知の情報（他の生物、環境、人為音）がある場合は、それらを補うことはできない。深層学習は万能なものではなく、学習していない情報を正確に判断することは難しい。長期実験で誤分類が発生しているのは、未知の音に対する音源分類アルゴリズムの応答の可能性があり、未知の音をどれだけ学習に取り込めるかが誤分類の低減の鍵と考えられる。本研究では、深層学習モデルの学習時に長期実験データで誤分類した音源を再学習させているが、これを繰り返し実施することで、未知の情報を取り込むことができ、さらなる誤分類の低減が期待される。

参考文献

- 1) Lin, T. H., Fang, S. H. and Tsao, Y (2017) “Improving biodiversity assessment via unsupervised separation of biological sounds from long-duration recordings”, *Scientific Reports*, 7, 4547, 1-10.
- 2) Zaugg, S., van der Schaar, M., Houégnigan, L., Gervaise, C. and André, M. (2010). “Real-time acoustic classification of sperm whale clicks and shipping impulses from deep-sea observatories”, *Applied Acoustics*, 71, 1011-1019.
- 3) Gillespie, D., Caillat, M., Gordon, J. and White, P. (2012). “Automatic detection and classification of odontocete whistles”, *The Journal of Acoustical Society of America*, 134, 3, 2427-2437.
- 4) Shiu, Y., Palmer, K. J., Roch, M. A., Fleishman, E., Liu, X., Nosal, E. M., Helble, T., Cholewiak, D., Gillespie, D. and Klinck, H. (2020). “Deep neural networks for automated detection of marine mammal species” *Scientific Reports*, 10, 607, 1
- 5) Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V. and Rabinovich, A. "Going deeper with convolutions." In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1-9. 2015.
- 6) Iandola, F. N., Han, S., Moskewicz, M. W., Ashraf, K., Dally, W. J. and Keutzer, K. "SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5 MB model size." *arXiv preprint arXiv*, 2016. <https://arxiv.org/abs/1602.07360>.

3-2-4 海底設置サウンドスケープ録音機の設計に関する研究

(担当：株式会社アクアサウンド)

3-2-4-1 サウンドスケープ録音機の構築

1. 目的

「海底設置サウンドスケープ録音機の音源分類アルゴリズムに関する基礎研究」で得られたアルゴリズムを実装するためのサウンドスケープ録音機を開発する。

2. 方法

最終的な装置の機能・性能は下記とする。

・音源分類方法	短時間で 100 音種が分類できるアルゴリズム
・音源分類数	100 音種
・短時間音源分類	1.5 分以内
・分類精度目標	レベル 1 80%以上 レベル 2 70%以上 レベル 3 60%以上
・分類データ伝送方式	ゴールドコード ¹⁾ 32 種類の組合せ通信方式
・寸法	φ 500mm×600mm 以下（突起物除く）
・空中重量	40kg 以下
・水中重量	4kg
・耐水圧	1MPa(水深 100m 相当)
・電池寿命(目標)	20 日以上
・録音時間	20 日 (サンプリング周波数 44.1kHz, 256GB の SD カード使用時)
・収録周波数帯域：	20Hz～20kHz
・データ伝送距離	1000m 以上
・伝送周波数	30kHz

令和 5 年度には、令和 5 年度製作のサウンドスケープ録音機に電池を接続し、電圧ロガーによって電池電圧の降下を測定し、電池寿命の試験を行う。

試験の状況を図 3-2-4-1 に示す。

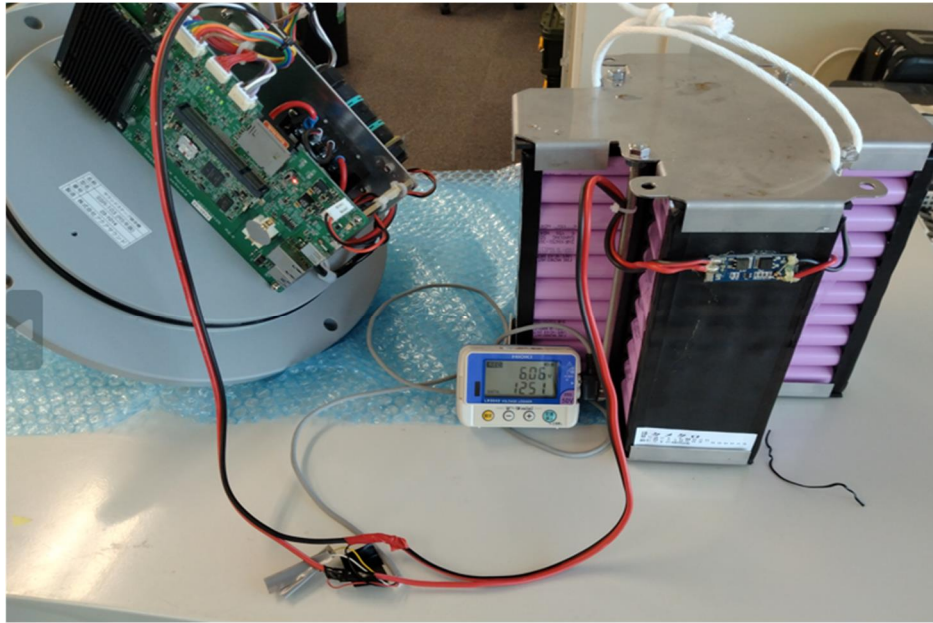


図 3-2-4-1 令和 5 年度の電池寿命試験

3. 結果

それぞれの年度毎に開発した装置は以下のとおりである。

令和元年度 実機は次年度以降製作することとし、非負値行列因子分解（Non-negative Matrix Factorization : NMF）法によるアルゴリズム検討のみを行った。

令和 2 年度 音源分類アルゴリズムを実装可能なハードウェアの開発とアルゴリズムをプログラミングするソフトウェアの開発を行なった。音源分類アルゴリズムの開発手法は、非負値行列因子分解法(略して NMF という)を用いた分類方法であり、この時点では 1 音種(ドクウツボ)のみのアルゴリズムであったので、ハードウェアの開発は NMF を実装し動作が確実に保証できる回路の設計を行った。

さらに、分類した結果を 1000m 離れた海上に浮かぶブイまで伝送する方法(詳細は長距離の水中通信技術で記述する)に用いるゴールドコード¹⁾の送信回路とその周辺回路の開発も必要になる。

これらの回路の設計と目標 20 日間の電池寿命を考慮し、海底設置型のサウンドスケープ録音機的设计を行なった。

図 3-2-4-2 に、サウンドスケープ録音機のブロック図を示した。

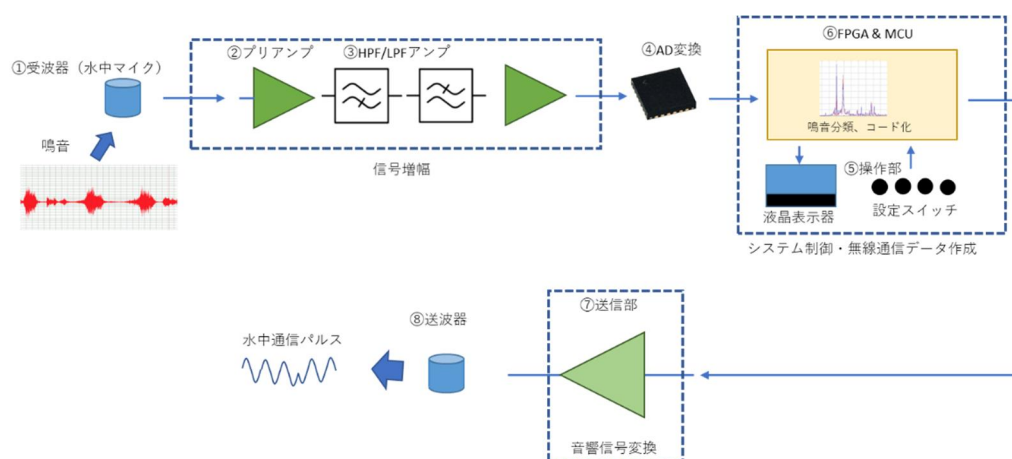


図 3-2-4-2 サウンドスケープ録音機のブロック図

ハイドロフォンで収集した音を増幅し、フィルターを通し不要なノイズを除去した後、AD 変換器に入力し、そのデジタル値を FPGA(Field Programable Gate Array の略)と MCU(Micro Controller Unit の略、CPU ともいう)で構成される信号処理部に入力した。この信号処理部では音源分類アルゴリズムを実行し、その結果(答え)を水中通信で海上に浮かぶブイまで伝送するためのゴールドコード列に変換し送信部を送る。送信部では、受け取ったコードを増幅し送波器に入力し水中通信パルスを水中に放出した。

令和 2 年度に試作したサウンドスケープ録音機を図 3-2-4-3 に、内部の基板配置図を図 3-2-4-4 に示した。各部材の説明は図中に示した。

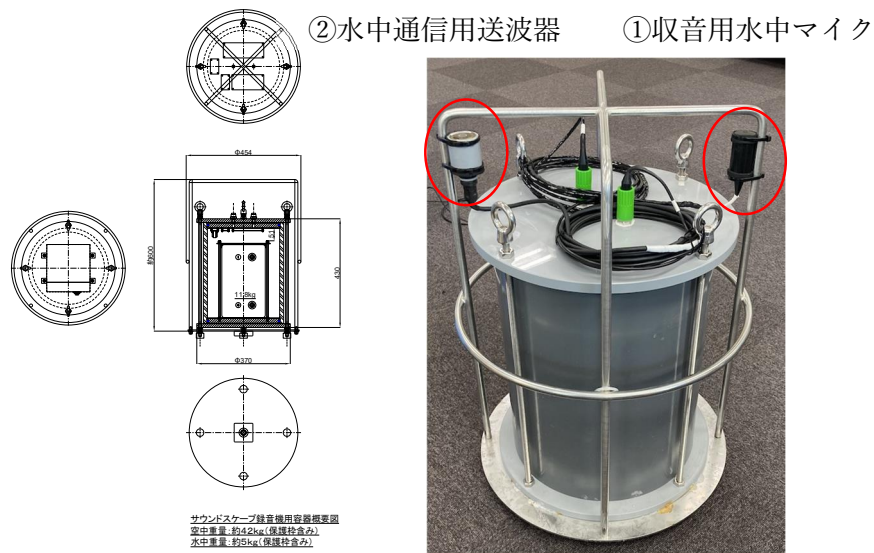


図 3-2-4-3 令和 2 年度に試作したサウンドスケープ録音機

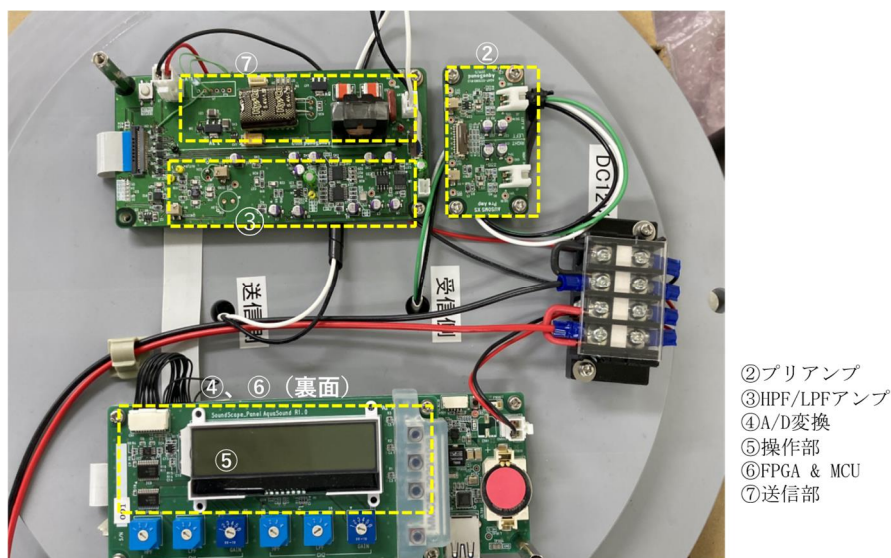


図 3-2-4-4 サウンドスケープ録音機内部

令和 3 年度 令和 3 年度は、音源分類アルゴリズムが当初の NMF 法から「AI 画像識別モデル」に変更されたため、そのアルゴリズムが実装できるハードウェアの開発を行なった。また、それに伴ってソフトウェアの開発も行なった。さらに、電池寿命を伸ばすべく電池も新たなものに変更した。これらの装置を収納するブイは小型化した。令和 2 年度のブイに比べ令和 3 年度のブイは体積比で 1/1.5 に小型化した。また、今年度

試作のサウンドスケープ録音機の電池寿命は目標の20日に対し実測16日（達成度80%）であった。今年度試作のサウンドスケープ録音機の寸法図を図3-2-4-5に、試作した録音機と通信ブイ2式を図3-2-4-6に、内部基板を図3-2-4-7に示した。

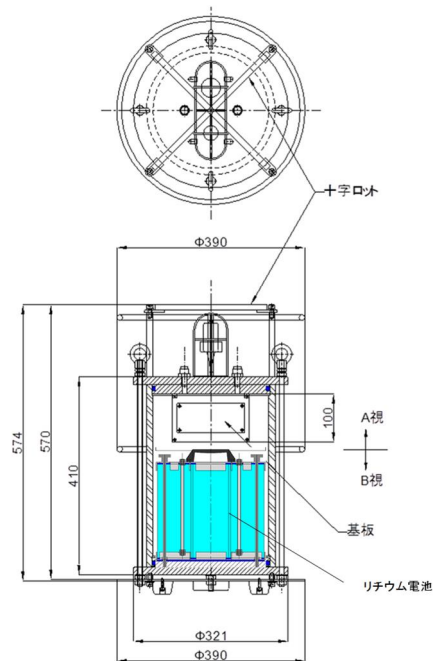


図3-2-4-5 令和3年度に試作したサウンドスケープ録音機



図3-2-4-6 2式のサウンドスケープ録音機と通信ブイ

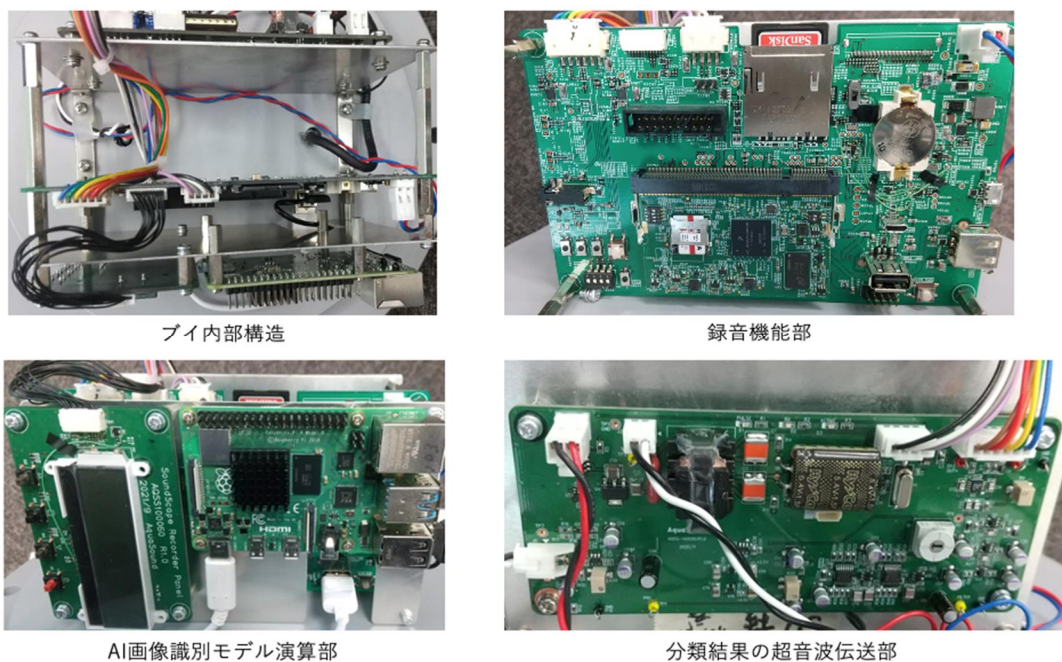


図 3-2-4-7 サウンドスケープ録音機の内部基板

令和 4 年度 昨年度に引き続き「AI 画像識別モデルによる音源分類手法」のアルゴリズムを搭載したサウンドスケープ録音機の分類精度向上を目指して試作機の改良を行った。実装する音源の数は 52 音種以上を目標とし、2 式 4 台のサウンドスケープ録音機を改良し、現地実験を行い分類精度向上の確認を行なった。改良内容は主にソフトウェアであるため図は省略する。

令和 5 年度 前年度までに開発したサウンドスケープ録音機を多点展開するために、7 式（サウンドスケープ録音機 14 台、通信ブイ 7 台）のシステムを製作した。ブイの外形寸法は昨年度までのものと同一サイズであるが、内部の基板回路は新たに設計した。サウンドスケープ録音機令和 4 年度版から令和 5 年度版への変更の最大の目的は、低電力化で、これまで使用している【Raspberry Pi4】の消費電流が大きいため、Raspberry Pi4 の機能を i.Mx7 ARM CPU が行い、令和 3 年度版で使用している i.Mz6 ARM CPU と合わせて、1 枚の電子回路基板にまとめて省電力化を図ったものとなっている。令和 4 年度版と令和 5 年度版の互換性は、ハード面もソフト面も互換性はないので、ソフトウェアの開発も同時に行なった。

令和 4 年度版と 5 年度版のブロック図を図 3-2-4-8 に、また、令和 5 年度版サウンドスケープ録音機を図 3-2-4-9 に示した。

サウンドスケープ録音機内部の基板を図 3-2-4-10 に示した。

システムを構成する基板はハイドロフォン、トランスデューサーなどが配置された上蓋の裏側に付いており、録音機の内部はほとんどを電池が占めている。

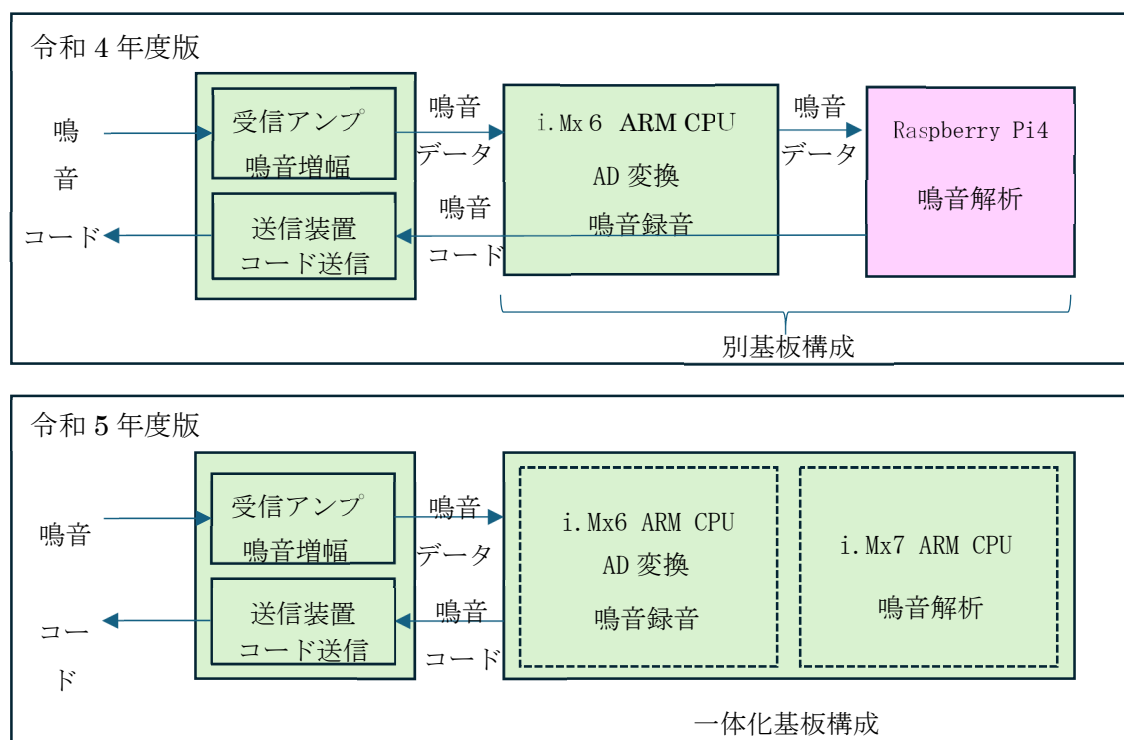


図 3-2-4-8 令和4年度版と令和5年度版のブロック図

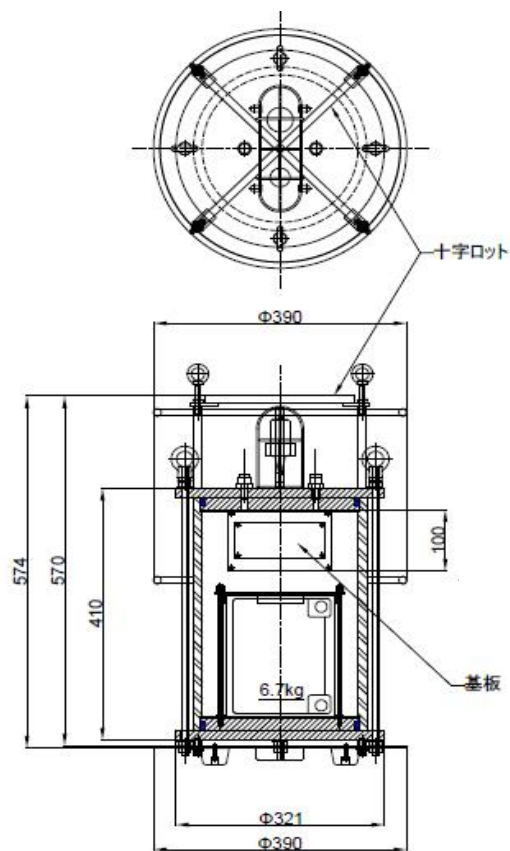


図 3-2-4-9 令和 5 年度版のサウンドスケープ録音機

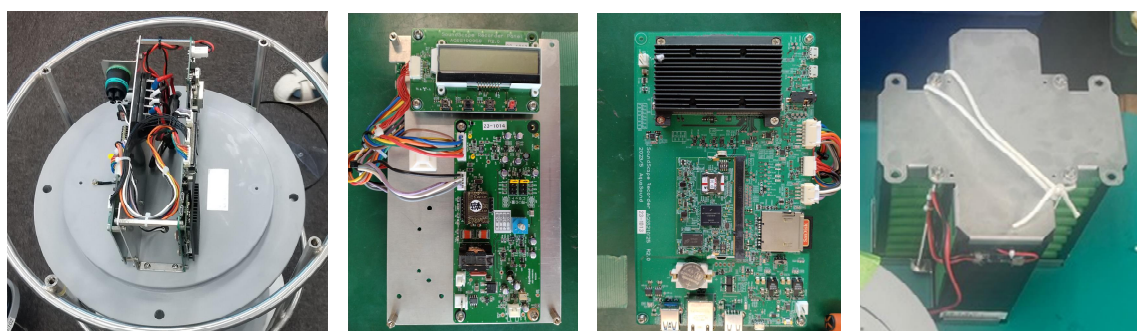


図 3-2-4-10 サウンドスケープ録音機内部の基板と電池

図 11 に令和 5 年度に製作したサウンドスケープ録音機の一部の写真を示した。



図 3-2-4-11 令和 5 年度に製作したサウンドスケープ録音機と通信ブイ

令和 5 年度版のサウンドスケープ録音機の電池寿命試験の結果を図 3-2-4-12 に示した。

電池寿命は目標の 20 日に対し、21.8 日間であることが確認できた。

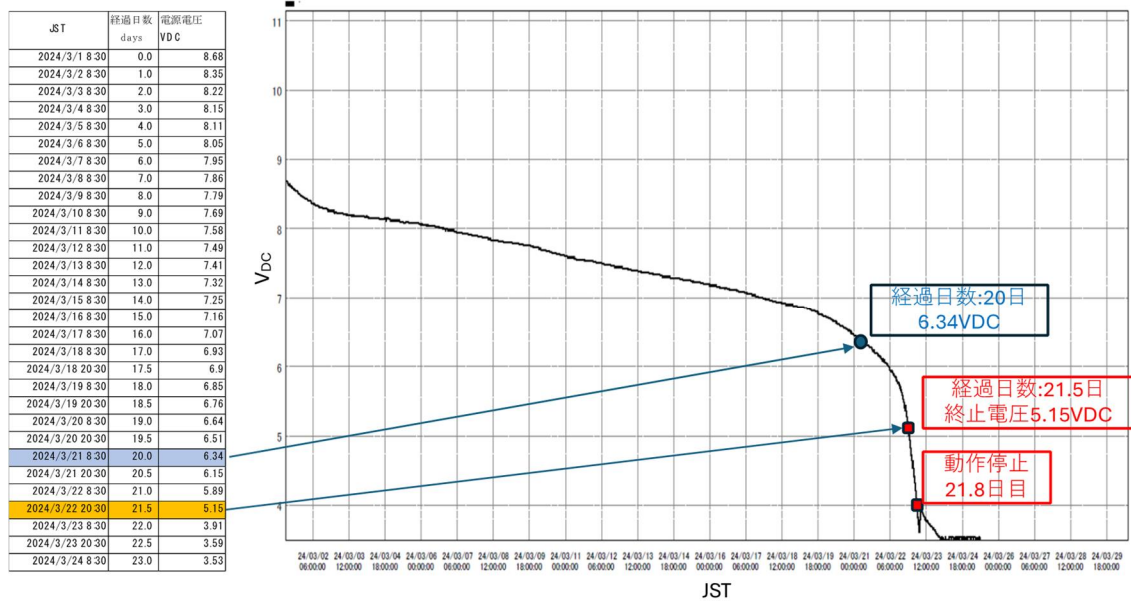


図 3-2-4-12 令和 5 年度の電池寿命試験結果

4. 考察

令和 2 年度のサウンドスケープ録音機は空中重量 42kg もあり作業性も悪かったので、令和 3 年度には内部の回路構成や電池を改良し軽量化(約 30kg)した。アルゴリズムも当初の NMF 法から AI 画像識別モデルへの変更により、汎用的な CPU を使用することができ、多様な音源に対して 1 つのアルゴリズムで音源分類を行うことができた。最終的には 100 音種には届かず 52 音種にとどまったが、今回のような方法で音源サンプルさえ集まれば 100 音源以上の音源分類も行うことができる目処がついた。

他の目標に対しても全て目標値をクリアすることができた。

- ・短時間音源分類 1.5 分以内に対し 20 秒で達成
- ・分類精度目標 レベル 3 60%以上に対し 72.6%で達成
- ・寸法 $\phi 500\text{mm} \times 600\text{mm}$ 以下に対し $\phi 390 \times 547\text{mm}$ で達成
- ・電池寿命(目標) 20 日以上に対し、21.8 日で達成

3-2-4-2 録音機の評価

1. 目的

改良したサウンドスケープ録音機の動作確認および分類精度の検証を、direct-in 実験（陸上実験）、現地実験（沖縄県石垣島名蔵湾での海上実験）によって実施する。

2. 方法

direct-in 実験では、海中での放音は行わず、陸上においてオーディオプレーヤで再生した分類精度評価用の音源を直接サウンドスケープ録音機のプリアンプに入力し、それ以外は現地実験と同様の手順で実施する。

分類精度評価用の音源については、3-2-3-2 におけるシミュレーションと同様に 1 音種につき最大 20 サンプルを無作為に抽出し、精度検証を行う。Direct-in では図 3-2-4-13 のⅡの段階の結果で評価する。

現地実験では、水中スピーカーから分類精度評価用の音源（生物音、環境音、人為音）を放音し、その音をサウンドスケープ録音機で受信して、音源の種類をサウンドスケープ録音機内の演算回路で解析し、その結果をゴールドコード¹⁾の組み合わせで通信ブイに超音波で伝送して、そのコードを LPWA 通信で陸上のサーバーに転送する。

現地実験では図 3-2-4-13 の最終段階Ⅴの段階の結果で評価する。

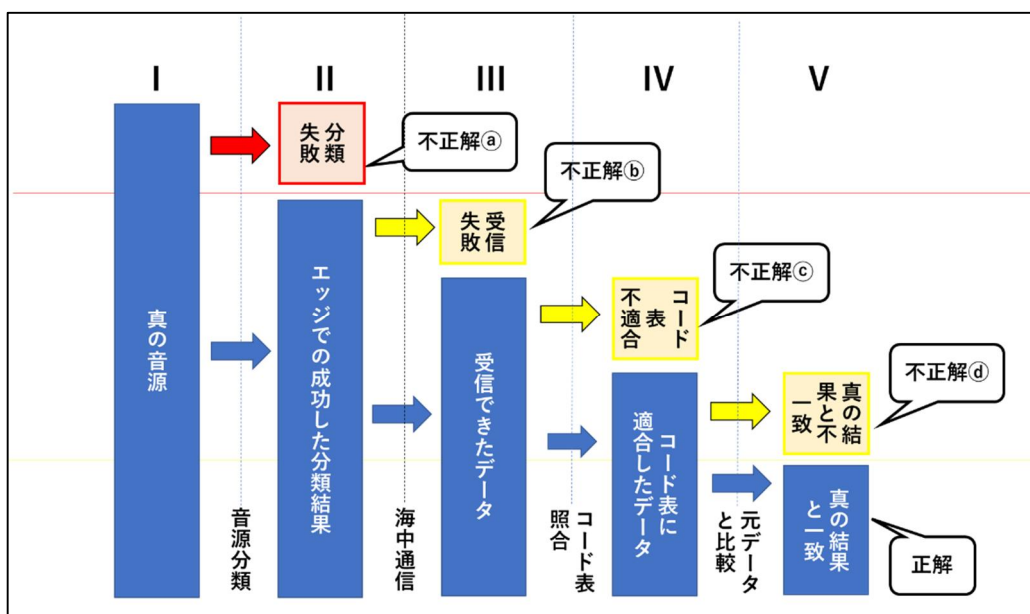


図 3-2-4-13 データの流れと各段階での正解・不正解の判別

令和2年度から5年度にかけて、サウンドスケープ録音機に実装された音源分類アルゴリズムを表 3-2-4-1 に、その実験時期と場所を表 3-2-4-2 に示す。

表 3-2-4-1 年度毎の音源分類アルゴリズムの対比表

項目 \ 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	令和 5 年度
アルゴリズム名	NMF検討	NMF法	AI画像識別モデル	AI画像識別モデル	AI画像識別モデル
音種数		1音種	24種→51音種	52音種	52音種(中身を入替)
分類方式	NMFの検討を行なった。	・周波数範囲と持続時間による分類(レベル1,2) ・特異値分類法と機械学習による分類(レベル3)	・深層学習モデル(GoogleNet)によるスペクトログラム画像の分類(レベル1,2,3)	・深層学習モデル(GoogleNet)によるスペクトログラム画像の分類(レベル1,2,3)	
前処理		・10秒分の水中音入力 ・短時間フーリエ変換(1024点, 50%オーバーラップ, Hanning窓) ・メジアンフィルタによる広帯域成分と狭帯域成分の分解	・10秒分の水中音入力 ・短時間フーリエ変換(1024点, 90%オーバーラップ, Hanning窓) ・メジアンフィルタによるスペクトログラムの正規化 ・2秒間のスペクトログラム画像を1秒毎に作成(60Hz~20kHzを対象に表示)	同左	
前年度からの改良点			・音源標本の更新 ・分類方式を深層学習に変更	・音源標本の更新 ・分類画像の作成方法の統一(学習用と分類用) ・分類対象外の音源の学習(分類結果の送信信号や誤検出サンプル音) ・分類スコア値の設定(0.75以上)	
備考		分類精度の評価データとして当時収集された28音種の全音源サンプルを使用した。ただし、レベル3分類についてはドクウツポのみについて評価した。	分類精度の評価データとして、分類モデルの学習に使用してない音源サンプルから1音種から最大20サンプルを無作為に抽出し評価用音源とした。		

表 3-2-4-2 実装した音源分類アルゴリズムの対象音種の内訳と実験時期

型式	音種数	内訳	実験時期	実験場所
R2 型	1 音種	生物音 1 音種、	令和 2 年 3 月	石垣島名蔵湾
R3 型(1)	10 音種	生物音 7 音種、環境音 1 音種、 人為音 2 音種	令和 3 年 10 月	
R3 型(2)	24 音種	生物音 16 音種、環境音 2 音種、 人為音 6 音種	令和 3 年 12 月～ 令和 3 年 2 月	
R3 型(3)	51 音種	生物音 41 音種、環境音 2 音種、 人為音 8 音種	令和 4 年 3 月	
R4 型	52 音種	生物音 39 音種、環境音 2 音種、 人為音 11 音種	令和 4 年 4 月～ 令和 5 年 2 月	
R5 型	52 音種	生物音 39 音種、環境音 2 音種、 人為音 11 音種	令和 5 年 4 月～ 令和 6 年 2 月	

3. 結果

年度毎の音種数、分類方式、正解率、再現度、適合度、F 値の推移を表 3-2-4-3 にま

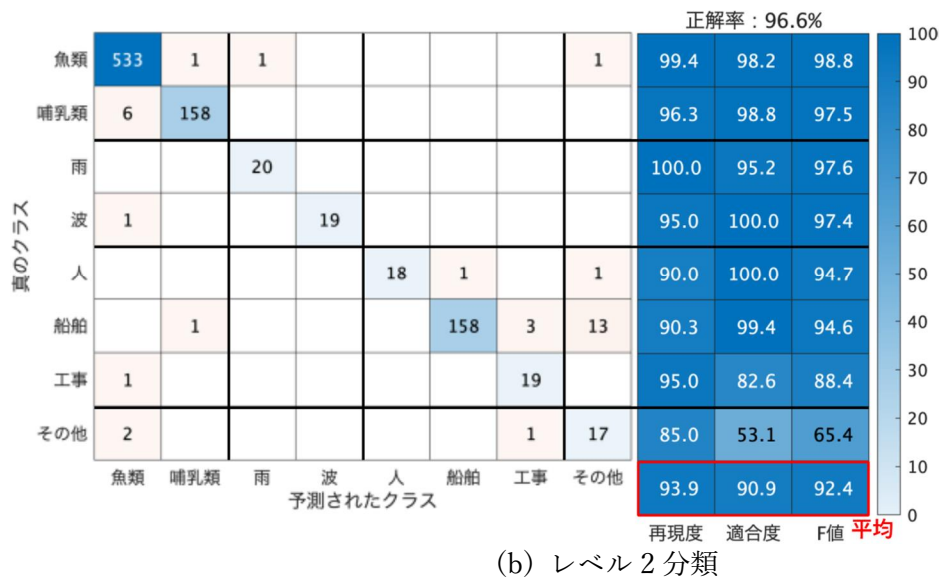
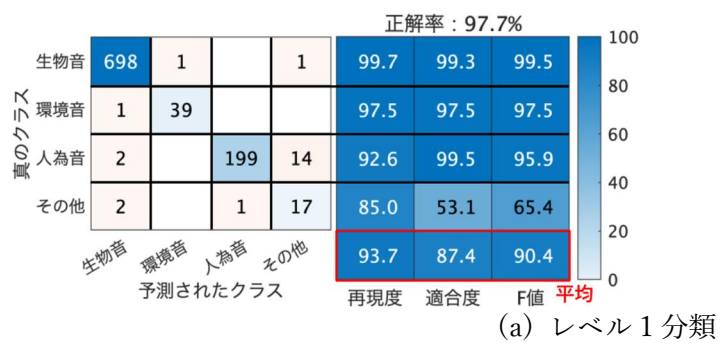
とめて示した。

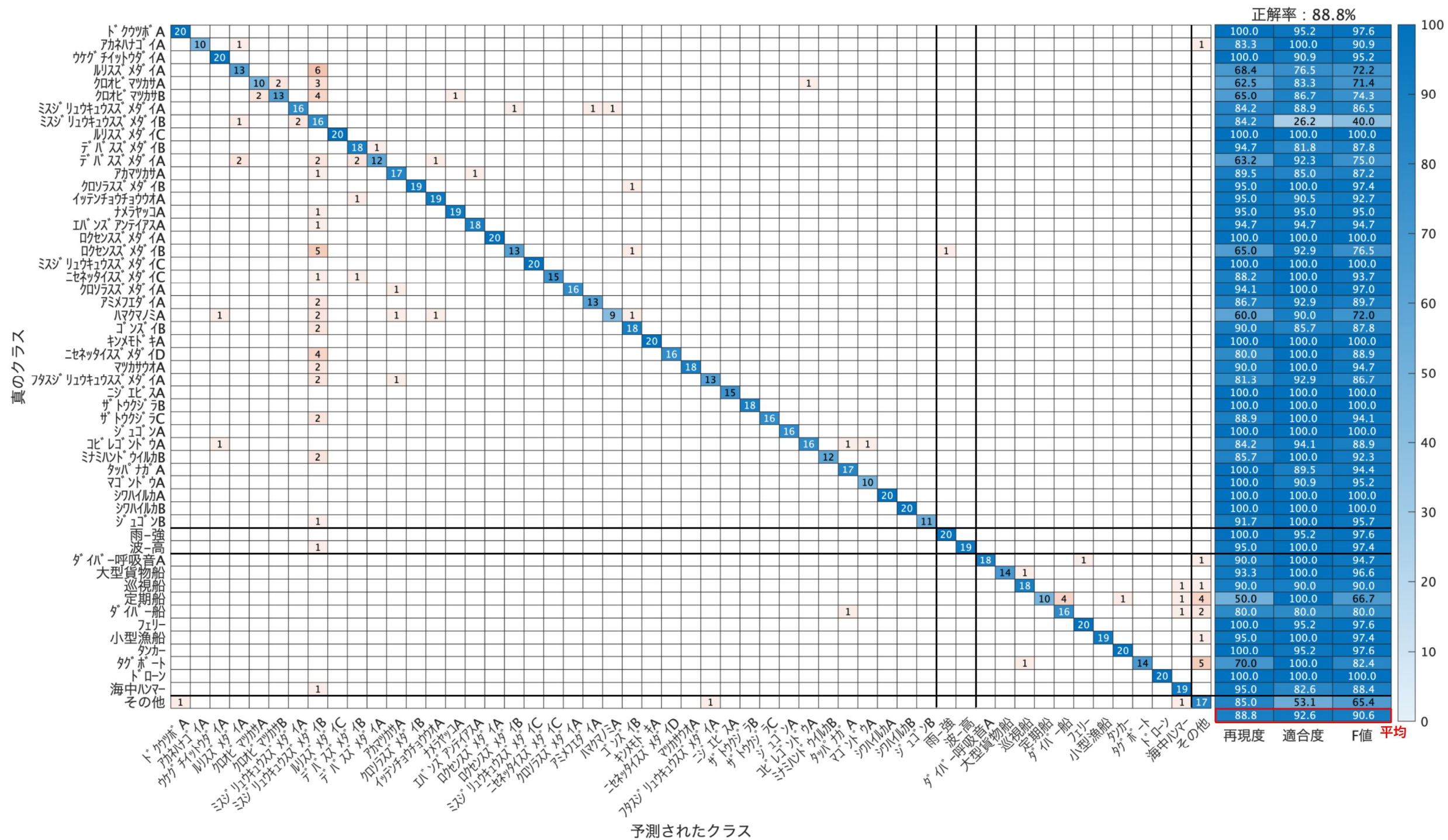
最終年度では、現地実験においても正解率が 72.6%となり、目標の 60%以上を達成することができた。

令和 5 年度の direct-in および現地実験の結果を図 3-2-4-14 および図 3-2-4-15 示した。

表 3-2-4-3 年度毎の音種数、分類方式、正解率、再現度、適合度、F 値の推移

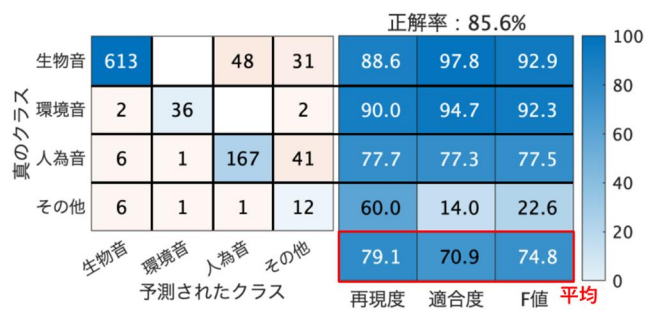
年度	令和 2 年度	令和 3 年度			令和 4 年度	令和 5 年度
録音機の型式	R2型	R3型 (1)	R3型 (2)	R3型 (3)	R4型	R5型
分類方式	SVD法	深層学習モデルによる画像識別				
レベル3分類対象	1音種	10音種	24音種	51音種	52音種	
生物音	1音種	7音種	16音種	41音種	39音種	
環境音	－	1音種	2音種	2音種	2音種	
人為音	－	2音種	6音種	8音種	11音種	
レベル1分類の正解率 [%]						
シミュレーション	81.8	94.9	92.7	88.6	95.8	98.7
direct-in	－	－	88.6	89.4	95.7	97.7
現地実験	－	83.9	58.3	67.3	66.6	85.6
レベル2分類の正解率 [%]						
シミュレーション	43.9	94.9	91.0	87.1	95.1	98.1
direct-in	－	－	86.7	85.3	95.1	96.6
現地実験	－	83.2	49.5	56.4	64.7	84.6
レベル3分類の正解率 [%]						
シミュレーション	96.1	94.8	73.0	53.7	91.2	93.2
direct-in		－	68.7	40.0	90.9	88.8
現地実験	93.0	82.6	40.8	27.8	52.2	72.6





(c) レベル 3 分類

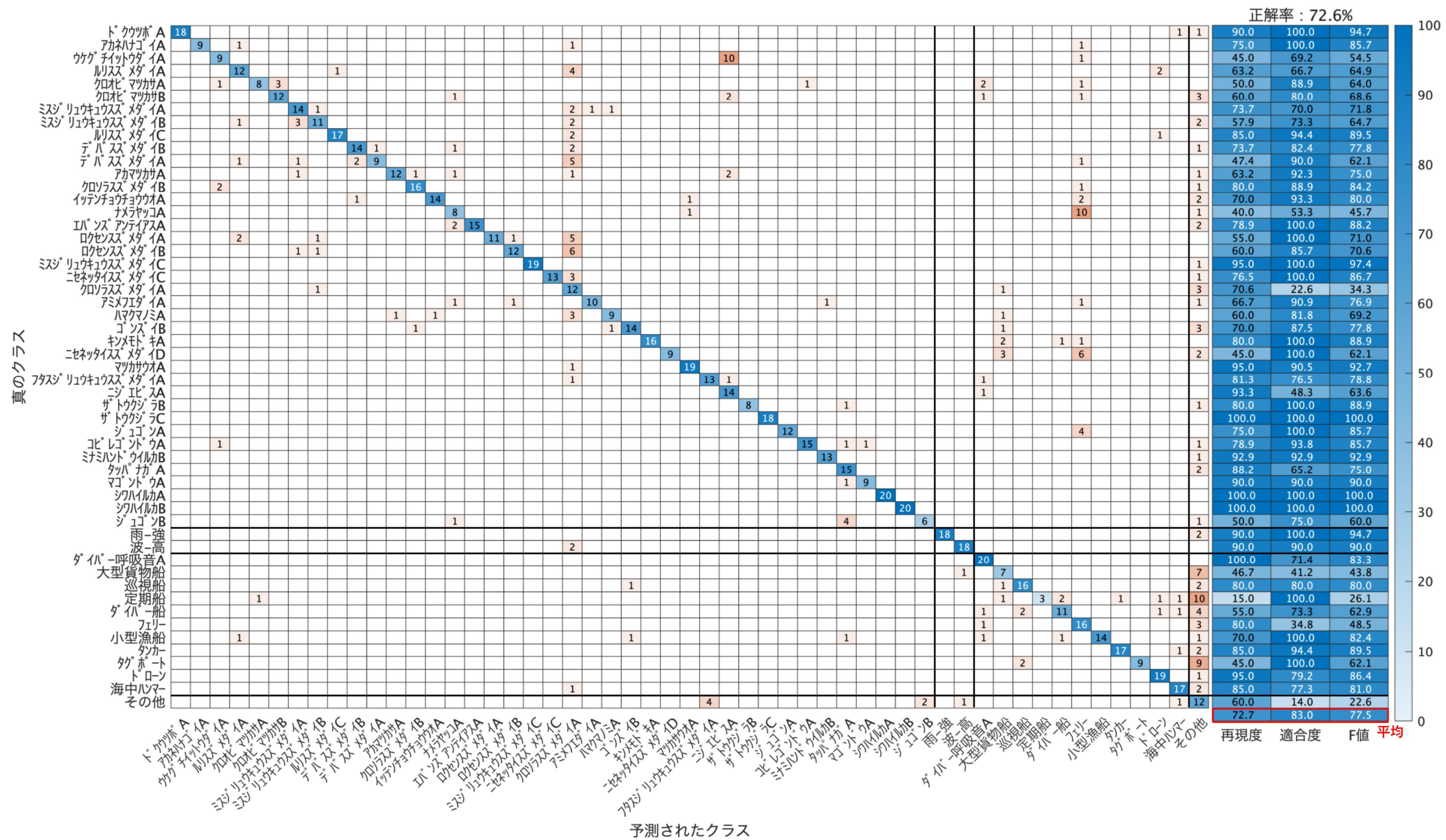
図 3-2-4-14 令和 5 年度の音源分類アルゴリズムを実装した試作機のレベル 1、2 および 3 分類の分類精度（direct-in 実験）



(a) レベル 1 分類



(b) レベル 2 分類



(c) レベル 3 分類

図 3-2-4-15 令和 5 年度の音源分類アルゴリズムを実装した試作機のレベル 1、2 および 3 分類の分類精度（現地実験）

4. 考察

前項で開発した音源分類アルゴリズムを実装したサウンドスケープ録音機の性能は、令和5年度に行った装置では direct-in での実証試験の正解率は 88.8%であり、計算機シミュレーション結果 93.2%より 4.4 ポイント低かった。また、現地プレイバック実験の正解率は 72.6%で目標値の 60%以上はクリアしたものの、direct-in に比べて 16.2 ポイント低かった。この原因は、図 3-2-4-13 でも示したとおり、direct-in での評価はサウンドスケープ録音機での分類結果を真値と比較したものを混同行列とした。それに対し現地実験では、サウンドスケープ録音機内部で分類した結果を水中通信によって海上のブイまで伝送し、次いで、空中通信で陸上まで伝送するすべての経路を経たものを最終結果としているので、水中通信による伝送誤差も含まれたものが混同行列となっている。

さらに、現地実験では周囲の背景雑音が存在するため direct-in に比べて低い結果の一因になったと考えている。海中音の特徴として、テッポウエビが発する音（俗にいうテンブラ音）に代表される背景雑音が極めて強いことがあげられる。本研究で対象とした生物音は、パルス音のように、持続時間の短い音、あるいはその繰り返しが多く、また、音圧も低いため、雑音に影響されることが多く、検出確率が下がった原因と考えられる。

現地実験においては、管理された条件下で、既知の音源を用いて評価を行った。しかし、実際の運用に当たっては、未知の音源や、多様な雑音、地形や波浪などによる通信品質の低下など、さらに厳しい条件にさらされることとなる。このため、サウンドスケープ録音機の性能評価のためには、長期実験の実施が必須である。

3-2-5 海底から陸上へ音源分類情報を届けるための水中通信に関する研究

(担当：株式会社アクアサウンド)

3-2-5-1 通信ブイの構築

1. 目的

サウンドスケープ録音機内部で 100 音種の音源識別を行い、その結果を水中通信で最大 1km 以上伝送する通信方式を検討して、最適な通信方式を開発することを目的とする。

水中通信で海底設置のサウンドスケープ録音機から上がってきたデータを、空中通信で陸上のクラウドまでアップロードする空中通信方式についても検討し開発する。

2. 方法

システムを開発するに当たり、使用実績のある水中通信技術¹⁾²⁾³⁾⁴⁾を導入することとする。2015 年頃から製品化されているピンガー⁵⁾と呼ばれる水中生物の行動をモニタリングする装置に実装されている技術を適用する。

ピンガーは図 3-2-5-1(a)に示す小さな超音波発信機である。発信する超音波はゴールドコード⁶⁾という特殊な信号で変調されており、雑音に強くかつ相互干渉にも強い信号であることが知られている。

本研究では、3つのゴールドコードパルスの組み合わせによって、録音機番号と音源分類結果の情報を表すこととし、本研究で使用するコード表を表 3-2-5-1 に示す。

第 1 パルスは、録音機の番号（1、2）を示す。これは、1 台の通信ブイで 2 台のサウンドスケープ録音機の情報を受信できるようにするためである。

第 2 パルスおよび第 3 パルスが音源分類結果を表す。

サウンドスケープ情報には、大分類、中分類、小分類があるが、大分類は生物音、環境音、人為音、および無分類の 4 種類からなる。中分類は、生物音、環境音、人為音それぞれについて最大 5 種類の情報を含むことができるようにしている。小分類については、生物音、環境音、人為音それぞれについて最大 50 種類の情報を含むことができるようにしている。

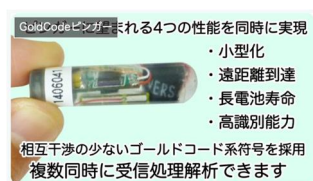
表 3-2-5-1 サウンドスケープ 分類データ伝送コード組合せ

分類	内 容	記 号	パルスコード			備 考
			第 1 パルス	第 2 パルス	第 3 パルス	
大分類	生物音	Bio	C31 or C32	C1	C1	大分類は 3 種類
	環境音	Env	C31 or C32	C2	C2	
	人為音	Art	C31 or C32	C3	C3	
	無分類	Nothing	C31 or C32	C32	C32	
中分類	生物音 Bio	A（哺乳類）	C31 or C32	C1	C11	中分類は 5 種類
		B（魚類）	C31 or C32	C1	C12	
		C	C31 or C32	C1	C13	
		D	C31 or C32	C1	C14	
		E	C31 or C32	C1	C15	
	環境音 Env	A（波浪）	C31 or C32	C2	C11	中分類は 5 種類
		B（雨風）	C31 or C32	C2	C12	
		C（台風）	C31 or C32	C2	C13	
		D	C31 or C32	C2	C14	
		E	C31 or C32	C2	C15	
	人為音 Art	A（工事音）	C31 or C32	C3	C11	中分類は 5 種類
		B（風車）	C31 or C32	C3	C12	
		C	C31 or C32	C3	C13	
		D	C31 or C32	C3	C14	
		E	C31 or C32	C3	C15	
小分類	生物音 Bio	Bio-A-1～Bio-A-10	C31 or C32	C11	C21～30	10 種類
		Bio-B-1～Bio-B-10	C31 or C32	C12	C21～30	10 種類
		Bio-C-1～Bio-C-10	C31 or C32	C13	C21～30	10 種類
		Bio-D-1～Bio-D-10	C31 or C32	C14	C21～30	10 種類
		Bio-E-1～Bio-E-10	C31 or C32	C15	C21～30	10 種類
	環境音 Env	Env-A-1～Env-A-10	C31 or C32	C11	C21～30	10 種類
		Env-B-1～Env-B-10	C31 or C32	C12	C21～30	10 種類
		Env-C-1～Env-C-10	C31 or C32	C13	C21～30	10 種類
		Env-D-1～Env-D-10	C31 or C32	C14	C21～30	10 種類
		Env-E-1～Env-E-10	C31 or C32	C15	C21～30	10 種類
	人為音 Art	Art-A-1～Art-A-10	C31 or C32	C11	C21～30	10 種類
		Art-B-1～Art-B-10	C31 or C32	C12	C21～30	10 種類
		Art-C-1～Art-C-10	C31 or C32	C13	C21～30	10 種類
		Art-D-1～Art-D-10	C31 or C32	C14	C21～30	10 種類
		Art-E-1～Art-E-10	C31 or C32	C15	C21～30	10 種類
			ヘッダー	分類総数= 169		

分類可能総数＝ 1024 通り

水中通信システムは様々な大きさや周波数のものがあり、最適なものを選ぶ必要がある。図 3-2-5-1 に市販の水中通信機の例を示す。

(a)は魚に装着し遊泳深度や水温のデータを通信する目的で作られている。φ10mmx40mm と小型であり、使用周波数は 60kHz、通達距離は 200～300m である。一方、(b)は漁網に装着し、その深度をリアルタイムで送信するものである。φ60mmx320mm と大型であり、使用周波数は 30kHz、通達距離は 1000m 以上である。一般的に、低周波を使用する通信ほど通達距離が長く、機器が大型化する。



(a) ピンガー



(b) 網深度計

図 3-2-5-1 市販されている水中通信機器の例

今回の水中伝搬距離の要求仕様は 1000m 以上であるので、網深度計で実績のある 30kHz を使用する。図 5-2 はソナー方程式から求めた 30kHz 音波の伝搬特性である。

水中を伝搬する超音波は距離と共に減衰する。また、水中には様々な海中騒音レベルのノイズが存在し、WENZ¹⁾は図 3-2-5-3 のように周波数に対する海中ノイズレベルを表している。今回我々の使用する 30kHz 付近でのノイズレベルは、風の影響が支配的であることが示されており、WIND FORCE レベル①～⑧で次第に増加することを表している。

軸の左側は、1Hz 当たりの音圧レベル(sound pressure spectrum level)を表しており、今回のシステムで使用する帯域幅(10kHz)補正をしたものが図 3-2-5-2 に示した 3 本の点線となる。すなわち、風力 1 の水中ノイズレベルは 60.0dB であり、風力 3 では 70.0dB、風力 8 では 85dB となる。1000m での伝搬信号は減衰して約 108dB 程度であり、水中ノイズレベルも風力 8 で 85dB なので、その差は約(108-85=)23dB となる。これは十

分な SN 比(信号 S とノイズ N の比)が確保されていることになり、受信確率の良い水中通信システムが実現できる。

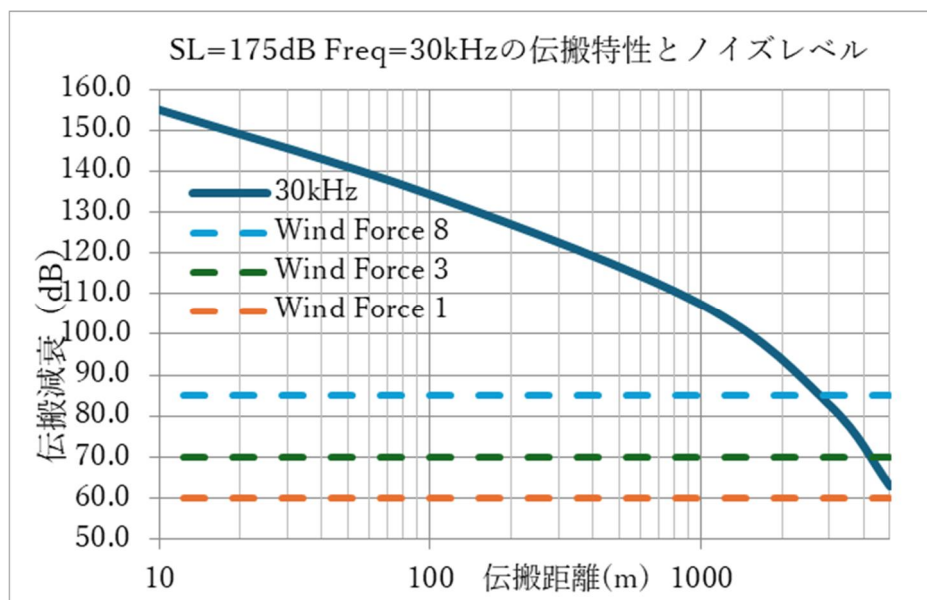


図 3-2-5-2 ソナー方程式による 30kHz の伝搬減衰と sea noise level

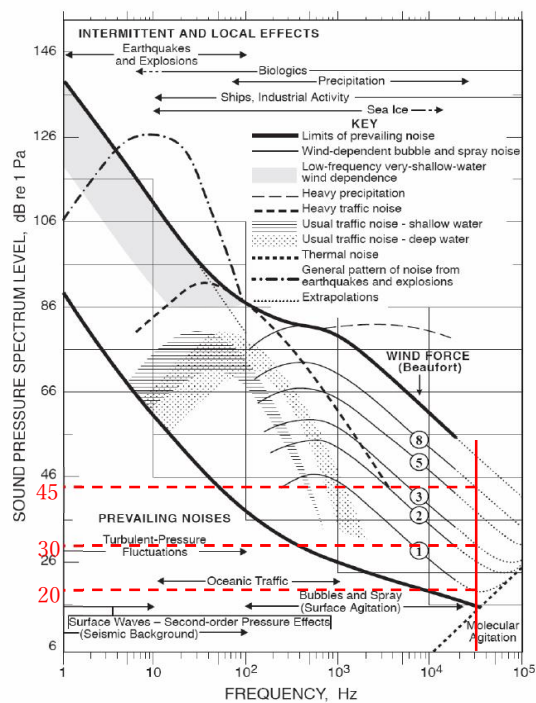


図 3-2-5-3 海のノイズレベル(WENZ model)

3. 結果

令和元年度は、図 3-2-5-4 に示す通信ブイのブロック図を設計した。

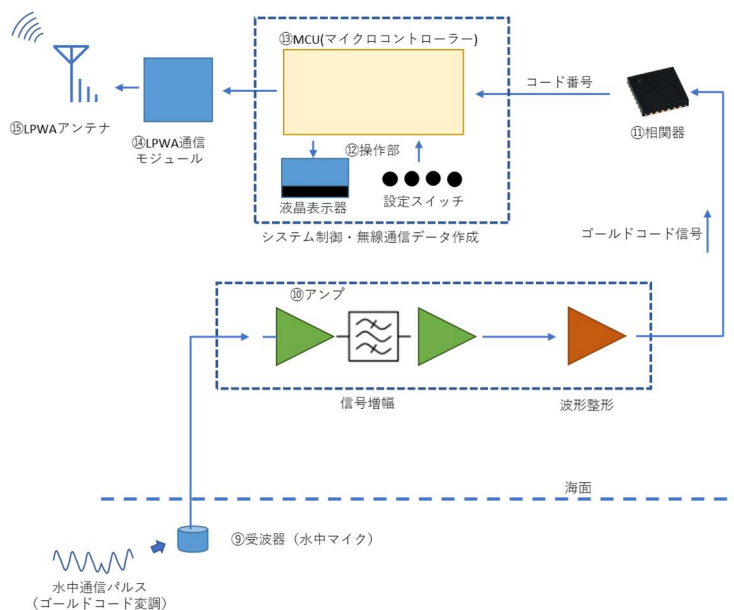


図 3-2-5-4 通信ブイ回路ブロック図

令和２年度は、令和元年度の構想に基づき通信ブイを製作した。試作した R2 型通信ブイを図 3-2-5-5 に示した。

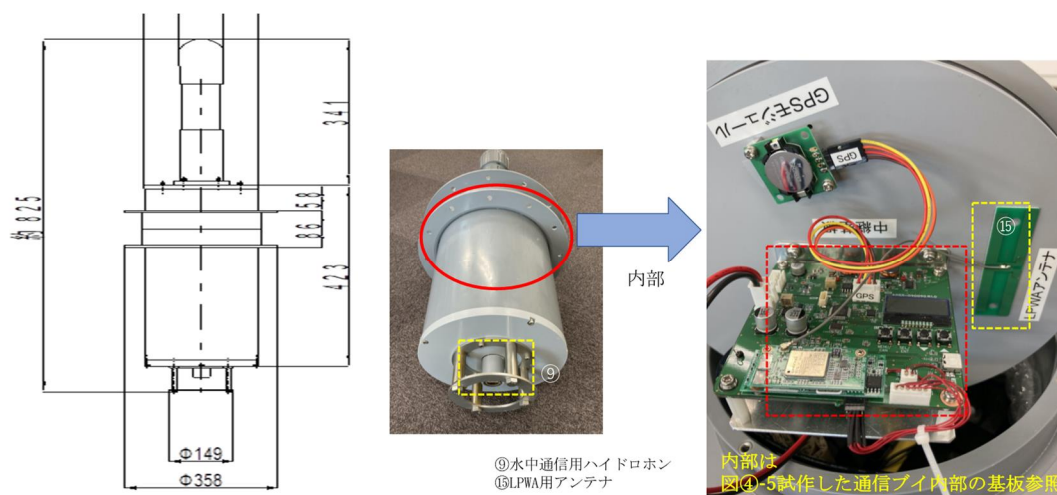


図 3-2-5-5 R2 型通信ブイ外観と内部基板

令和3年度は、ブイを小型化することに成功した。内部の基板を小型化し、省電力設

計を行い電池も小型化した。小型化された通信ブイを図 3-2-5-6 に示した。

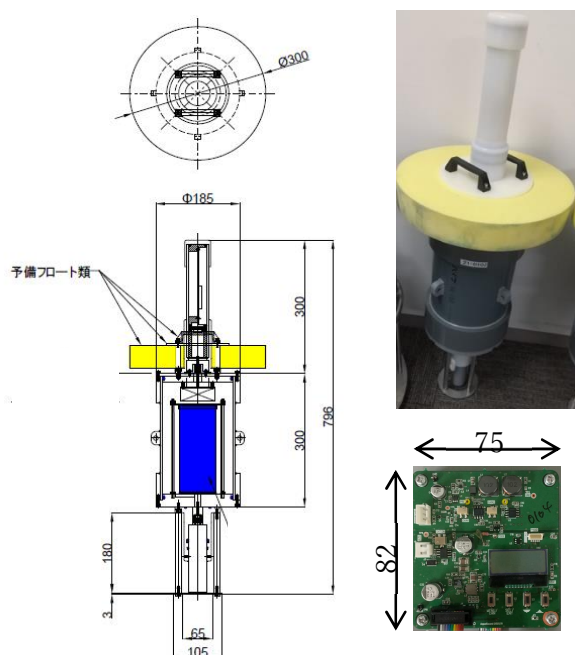


図 3-2-5-6 R3 型通信ブイ外観と基板サイズ

令和 4 年度は前年度のブイをそのまま使用した。内部のソフトウェアは一部改良を行い、不要データの削除や超音波受信データから LPWA 通信データへの変換のソフトウェアの改良を行なった。

令和 5 年度は、通信ブイを 7 台製作した。R5 型通信ブイの一部と内部基板を図 3-2-5-7 に示した。

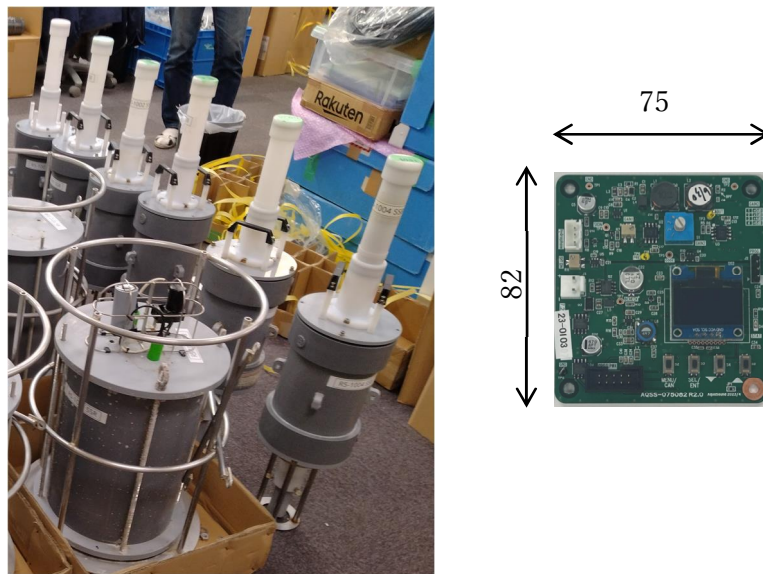


図 3-2-5-7 R5 型通信ブイの一部（6/7 台）と内部基板

4. 考察

通信ブイの構築では実績のある水中通信方法を導入したので、開発は比較的適切に行われた。令和 2 年度から令和 3 年度にかけて通信ブイの小型化を行い実証実験の結果、次節でも述べているが、受信性能が若干悪化したことが判明した。その原因は小型化したことによって受波器の位置が浅くなり、海面付近の気泡の影響を受けて受信確率が悪くなっていると思われた。そこで通信ブイの受波器の位置を 180mm 下げて、海面付近の気泡の影響を受け難くしたことによって、受信確率は向上し 1100m で 100%の受信確率となった。

3-2-5-2 通信試験による評価

1. 目的

開発した通信ブイを用い石西礁湖海域で実証試験を行い、1000m 以上の水中通信が行えるかの評価を行うとともに、空中通信でもサーバーまでデータがアップロードすることを確認する。

2. 方法

令和元年度は、既存のピンガーシステムでゴールドコード信号の通達距離試験を、令和2年2月24日に沖縄本島馬天港で行う。送受信機間の距離を約1000mとして、送信を256回行い、正しく受信した回数をカウントする。

令和2年度は、通信ブイを試作し実海域で、令和3年3月29日に神戸市須磨沖で行い、2隻の船を使用して距離を600mから1000mまで変化させて、受信確率を測定する。

令和3年度は、小型化した通信ブイを用いて、令和3年10月19日に石垣島名蔵湾で行い、通信距離を700mから1100mまで変化させ受信確率を計測する。

令和4年度は実海域(石垣市名蔵湾)で6月から11月にかけて5回行い、52音種のサンプル音を水中スピーカーから10秒毎に順次放音する。その1000回分の既知の音のうち、正しく通信されたと思われるデータの数とデータが欠落したりコード化け(分類設定したコード以外のコードが受信されたものをコード化けと称する)したものの数を抽出し、再現度および適合度を算出する。ただし、ここでいう再現度および適合度は、以下の式で定義されたものである。

$$\text{再現度} = \frac{\text{通信された全データ数} - \text{水中通信異常}}{\text{通信された全データ数}} \quad (1)$$

$$\text{適合度} = \frac{\text{通信された全データ数} - \text{水中通信異常} - \text{コード化けしたデータ数}}{\text{通信された全データ数} - \text{水中通信異常}} \quad (2)$$

3. 結果

令和元年度に行った既存のピンガーシステムでゴールドコード信号の通達距離試験の結果を表3-2-5-2に示した。

表 3-2-5-2 令和元年度通信方式の確認実験結果

場所	距離	受信確率
沖縄本島馬天港 沖	1090m	250/256 =98%

令和2年度は、試作した通信ブイを使用し、実海域で距離を変化させて受信確率を測定し、その結果を表3-2-5-3に示した。

表 3-2-5-3 令和2年度通信方式の確認実験

場所	距離	受信確率
神戸市須磨沖	600m～1000m	100%～40%

通信距離を600mから1000mまで変化させたときの検出率の変化を図3-2-5-8に示した。

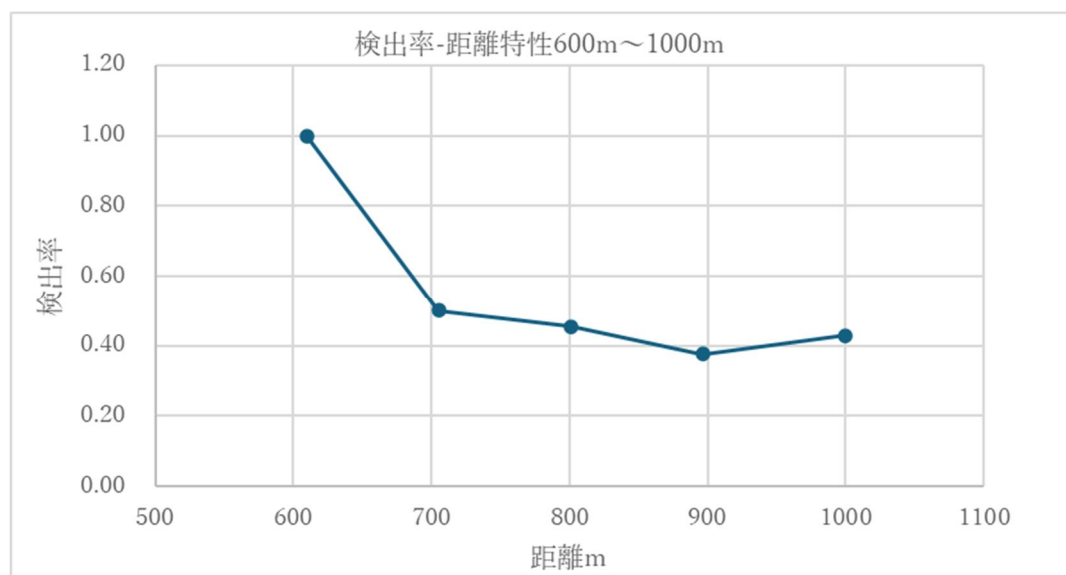


図 3-2-5-8 通信距離試験

令和3年度は、小型化した通信ブイを用いて石垣島名蔵湾で行なった結果を表3-2-5-4に示した。

表 3-2-5-4 令和 3 年度通信方式の確認実験結果

No.	通信距離	受信回数	送信回数	正解率
1	710 m	300	300	100 % (※1)
2	1100 m	300	300	100 % (※1)
(※1) 5音種をそれぞれ60回づつ10秒毎に送信し、それが正しく受信された回数を計測した。 5音種内訳:ドクウツボ、アカネハナゴイ、ルリスズメダイ、ザトウクジラ(B)、ジュゴン(A)				

令和 3 年度の確認実験においては、受信確率 100%を得たので、本項の目標である 1000m において 80%以上の検出率を達成することができた。

令和 4 年度の 52 音種のサンプル音を使用した通信実験の結果を表 3-2-5-5 に示した。

表 3-2-5-5 令和 4 年度の通信実験の結果

伝送コード例		31aabb	313131	000000	31xxxx	再現度	適合度
実験日	通信された全データ数	正しく識別分類した数	その他に分類された数	水中通信異常(データなし)	コード化けしたデータ数		
2022/6/22	1000	576	241	8	175	99.2%	82.4%
2022/8/25	1000	578	263	8	151	99.2%	84.8%
2022/9/27	1000	545	299	10	146	99.0%	85.3%
2022/10/26	1000	740	127	20	113	98.0%	88.5%
2022/11/23	1000	831	20	46	103	95.4%	89.2%
備考	10 秒に 1 回 毎で 1000 秒 (2 時間 46 分 40 秒)分 のデータ	ドクウツボ、 イルカなどに 分類されたもの	ピンガー音など その他に分類 されたもの	水中通信が 受信されず LPWA 通信 のみが行われ たもの	コード表に適 合しないもの	式(1)	式(2)

再現度および適合度は 5 回とも 80%以上を示しており、本研究の目標値 80%を上回ることができた。

4. 考察

令和 3 年度の通信距離試験において、通信距離の目標値 1000m 以上を達成し、令和 4 年度の実験では適合度、再現度ともに 80%以上の結果が得られた。

一方、本研究の申請時点では想定されていなかったコード表に適合しないコードも受信されていた。この原因としては、ブイの動揺によるドップラーシフトやトランスデ

ユーザーの泡嚙み、水中音波が通信の過程で生じる多重反射によって、ゴールドコードが混信することなどであると推定されるので、さらなる通信ブイの改善策の検討が必要かも知れない。

また、通信ブイの電池寿命は目標とする 20 日以上の電池寿命を達成することができた。

3-2-6 クラウドシステムによる情報統合に関する研究

(担当：Biologging Solutions Inc.)

3-2-6-1 クラウドサービスの選定

1. 目的

海上ブイ等の端末から無線通信によって送られる情報としては、音響データ、環境観測のセンサデータ（温度等）、生物の行動データ(深度等)があげられるが、これらの情報を描画するためには、クラウド上で基礎データ処理を行う必要がある。本項では、クラウド上に送られる情報を統合し、サウンドスケープ描画のための基礎データ処理をするクラウドシステムの選定を行うことを目的とする。

2. 方法

クラウドシステムを構築可能な商用サービスとしては、Amazon の AWS、Google の GCP、Microsoft の Azure があげられ、今回構築するシステムにおいては、どの会社のサービスを用いても同等の機能が利用できる¹⁾。利用されているユーザー数が多いほど、システム開発にかかる必要な情報の入手が良くなり、開発が加速すると考えられるため、本研究では、世界シェアを比較することとする。次に、実際に選定するクラウドサービス上で、基礎データを処理できるか検討する。

3. 結果

シェアの比較の結果（2019 年時点）、AWS は世界シェアが 33.4%と、GCP（シェア 14.5%）、Azure（シェア 4.9%）と比較し（表 3-2-6-1）、世界で最も利用されていることが分かった²⁾。また、AWS のサービスを使用して基礎データ処理をする機能を試作できるか検討した結果、図 3-2-6-1 のサービスの連携を構築した。実際に、構築したシステムにより、無線通信データの例として、LPWA 機能搭載型ロガーから送られたデータを受け入れ、データ処理ができることを確認した。また、LPWA 機能搭載型ロガーで開発した LPWA 通信用基板は、アクアサウンド社が構築している海上ブイの通信装置としても利用されている。海上ブイから送信されるデータについても、データ処理ができることを確認した（図 3-2-6-2）。

表 3-2-6-1 クラウドサービスの世界シェア

サービス名	シェア(%)
AWS	33.4
GCP	14.5
Azure	4.90

LPWA通信機能搭載ロガー

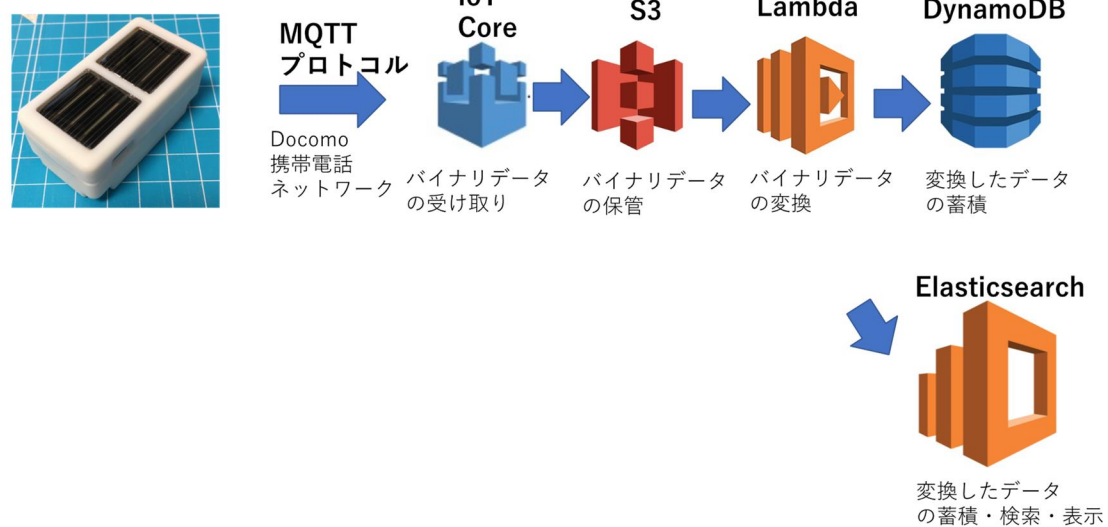


図 3-2-6-1 構築したシステムのフロー図

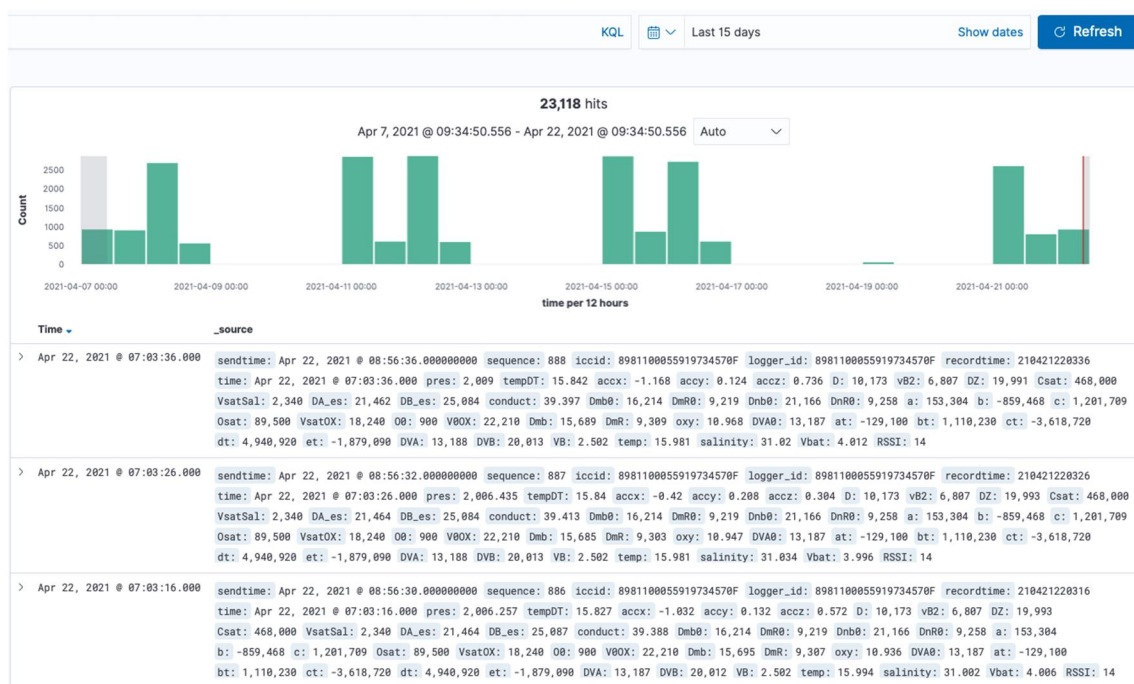


図 3-2-6-2 Elasticsearch Service の画面の例 変換したデータの検索・閲覧グラフ化が可能

4. 考察

今回、世界シェアは AWS が最も大きく、また、実際にクラウド上に送られる情報を統合し、サウンドスケープ描画のための基礎データ処理を構築できることから、AWS

を選定することとした。クラウドサービス上にてシステムを構築することによって、クラウドサービスのメンテナンスにかかる手間を削減することができ、計算量やデータサイズ、データの通信方式に応じて、最適なクラウド計算基盤に拡張することも可能となる。

参考文献

- 1) <https://aws.amazon.com/jp/products/>
- 2) <https://canalys.com/newsroom/canalys-worldwide-cloud-infrastructure-Q4-2019-and-full-year-2019>

3-2-6-2 設置型サウンドスケープ録音機を用いた多点観測（システムの評価）

1. 目的

前項で選定したクラウドサービスを用いて、情報配信システムを構築し、観測機器から送られてくるデータをクラウドで統合して、配信できることを実証する。

2. 方法

配信システムの内容を検討する。検討した内容をもとに、配信システムの仕様を決定する。実際に配信システムのアプリを構築し、サウンドスケープ観測から送信されたデータを閲覧できることを確認する。端末によらず閲覧可能な Web ブラウザ上のアプリを構築する。また、送信されたデータが目標値の 30 分以内に配信可能データとして処理可能か検証する。このために、サウンドスケープ処理データ(分類結果)がクラウドに上がってから、データ処理が完了するまでに要する時間が 30 分以内に収まることを確認するため、S3 に登録されてから、Lambda で処理を行い DynamoDB に登録されるまでの時間を計測する。

3. 結果

サウンドスケープデータの用途としては主に図 3-2-6-3 にある 4 つが考えられた。

用途の例	
漁獲対象種の種の資源量、 分布（漁業者への配信） ・ 漁業に直接役立つ情報を配信 ・ 石西礁湖では個人消費される漁獲対象魚種が多い	違法漁業の監視（漁協・行政への配信） ・ 保護区内の違法漁業や違法航行等の有無を配信 ・ 重要水産魚種等の産卵時の音を把握できれば禁漁区・期間の設定に利用可能
生物の分布や行動への人工音や自然音 の影響評価（研究者・市民への配信） ・ 台風の前夜や工事音などの人為音と観測音種の観点から情報を整理、配信	生物多様性（研究機関・ 環境コンサルタントへの配信） ・ 音源分類することで、実際の生物種を反映した直接的な指標となる可能性 ・ 環境教育にも利用可能

図3-2-6-3 サウンドスケープデータの配信用途の例

このようにサウンドスケープデータは、様々な用途に用いることが可能と考えられた。配信システムの用途は、利用者ごとに多様であり、それぞれの用途を満足させるためには、データの充実ばかりではなく、ユーザーの要求に合わせたユーザーインターフェースや情報の提示方法など、システムを最適化する必要がある。

そこで、本研究では多様なユーザーの要求に応えるため、特定の用途に絞らず、利用者自身が知りたいサウンドスケープデータに関する情報を抽出できるようなシステムを構築することとした。

サウンドスケープ配信システムの仕様としては、以下の要件を設定した。

- (1) ユーザーが設置型のサウンドスケープ録音機から送信されたデータか、アオウミガメから送信されたデータかを選択して、情報抽出できるようにすること
設置型のサウンドスケープ録音機から送信されたデータは、定点かつ連続的なデータである。一方、アオウミガメから送信されるデータは、移動体かつ不連続なデータである。このため性質の異なる情報は独立して、把握できることが望ましいと考えられる。そこで、ユーザーがデータの種類を選択して明示的に抽出することによって、情報を表示する。
- (2) 情報を抽出する期間と場所をユーザーが選択できること
データベース上には、各時間・各場所における分類結果の情報が、1分類試行ごとに1つのデータとして格納されている。これらの全データを一度に示すと、データをサーバーから取得するために時間がかかるだけでなく、データの把握も困難となる。このため、分類結果の情報を期間と場所で限定して抽出できる。
- (3) 分類した音種の結果を概観できること
データの概観を把握するためには、グラフで視覚的に表示させることが有効である。そこで、一定期間の音種の構成をヒストグラムで表示できる。

以上の仕様をもとに、実際に配信システムを開発した結果、ブラウザで閲覧可能なweb版のリアルタイム配信アプリ（やいまの魚）を構築した。やいまの魚では、設置型のサウンドスケープ録音機やアオウミガメから得られたデータを、そのデータが得られた場所と、集計した期間（サウンドスケープ録音機では1日ごと、ウミガメデータでは最大2週間の期間）に観測された構成音のうち、生物音のみ種類を写真で表示し、環境データも合わせて表示することができる（図 3-2-6-4）。構成音の写真をクリックすると、その生物音の解説を見ることができる。



図3-2-6-4 Webアプリによるサウンドスケープデータの可視化例

- a) アオウミガメの移動軌跡と追跡期間に得られたサウンドスケープ分類結果
- b) アオウミガメの移動軌跡と追跡期間に得られた環境データ
- c) サウンドスケープ分類結果で得られた生物種の解説

また、S3 に登録されてから、Lambda で処理を行い DynamoDB に登録されるまでの時間を計測したところ、サウンドスケープ録音機から送信されるデータに関しては 0.20 ± 0.06 秒(N=10)、生物搭載型ロガー(LPWA 版)から送信されるデータに関しては 0.21 ± 0.01 秒(N=10)で処理されていることが分かった(表 3-2-6-2)。

表3-2-6-2 クラウドサーバー上でのデータの処理にかかる時間

試行回数	処理時間 (秒)	
	サウンドスケープ録音機	生物搭載型ロガー
1	0.22	0.20
2	0.25	0.22
3	0.18	0.20
4	0.29	0.21
5	0.20	0.20
6	0.20	0.22
7	0.20	0.20
8	0.05	0.22
9	0.18	0.21
10	0.21	0.21
平均	0.20	0.21
標準偏差	0.06	0.01

4. 考察

観測機器(サウンドスケープ録音機や、生物搭載型ロガー)から送信されたデータを、Web アプリ上で表示するシステムを構築し、観測機器から送られたデータが表示されること、並びにサーバー上で 30 分以内に処理されることを確認することができ、当初の目標数値である 30 分以内を達成することができた。また、一般大衆向けに、広く興味を持ってもらえるよう、端末から送られるデータだけではなく、その音がどのような魚の音なのかなど、図鑑的な機能を持たせることもできた。

参考文献

- 1) <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/japan/#monthly-202201-202203>
- 2) 下瀬環. 2021. 沖縄さかな図鑑. 沖縄タイムス社

3-2-7 多点観測によるネットワークモニタリングおよび情報配信に関する研究

(担当: Biologging Solutions Inc.)

3-2-7-1 アオウミガメへのビデオロガー装着を用いた教師データの取得

1. 目的

バイオロギング手法で最終的にサウンドスケープ観測をするためには、分類モデルを作成するためのサウンドスケープ教師データを取得する必要がある。人間が録音機やカメラを海域に設置することを繰り返して、教師データを得ることもできるが、人間の水中での活動時間には限界ある。そこで、人間の代わりにアオウミガメを用いて、サウンドスケープ教師データを取得する技術を開発することを目的とした。

また、最終的に、アオウミガメにサウンドスケープ録音機を装着するバイオロギング手法の場合、アオウミガメの行動に起因する音（例えば、息継ぎや岩礁に衝突する音など）も発生し、誤検出になると考えられる。このため事前にアオウミガメ起因の音を学習させるために、アオウミガメの行動に起因する音を得ることを目的とした。

2. 方法

2-1 カメラロガーの開発

アオウミガメに装着し、水中音と同時に映像を得られるカメラロガーを開発する。仕様としては産卵成熟個体（120-150kg、N=6、平均131kg、奥山ら未発表データ）または亜成体（32—58kg、N=3、本研究）のアオウミガメに搭載可能なサイズ（体重の5%以下として、1.5kg以下を目標とする。また、生物に装着後は、しばらく正常な行動を観察できないため、装着後に撮影開始ができるように、スケジュール撮影機能を搭載する。

2-2 アオウミガメを用いた装着実験

開発したカメラロガーを2021年～2023年夏に石垣島で産卵上陸するアオウミガメに装着し、産卵間期(10-12日程度)の映像・音響データを取得する野外実験を行う。実験場所、装着手順は、LPWA通信機能一体型ロガーの内容と同様である。また、2024年2月に石西礁湖に生息するアオウミガメの亜成体にカメラロガーを装着する。この実験で用いたカメラロガーは、浮力体のケースに組み込まれ、自動でアオウミガメから切り離される機構と電波発信機が搭載されている。アオウミガメから切り離された後、カメラロガーと浮力体が海面まで上昇すると、電波の強弱や発信方向から浮上位置を特定できる仕組みとなっている¹⁾。カメラロガーがアオウミガメから切り離された後は、傭船した漁船に電波発信器用の受信アンテナを持ち込み、漁船を航行させながら、カメラロガーの探索を行う。解析は、得られた動画データから1時間を抽出し、映像と音声を確認し、魚類名音の数、並びに、アオウミガメ起因の音の数を集計する。また、ISO感度を調整することで、夜間の映像がどのように変わるか確認する。さら

に、センサトリガーを用いることで、撮影開始からバッテリーが切れて撮影が終了するまでの撮影期間がどれくらい延長されるか検証する。

3. 結果

3-1 カメラロガーの開発

アオウミガメに装着可能な小型カメラを開発した（図3-2-7-5）。

重量は空中中量1.2kgであり、目標値の1.5kg以下を達成した。30000mAhのバッテリーを用いることで、最大、連続100時間の撮影が可能である（赤色LED不使用時）。水中でより多くの情報を得られるよう、広角レンズを搭載し、水中画角は86°とした。また、夜間でも撮影できるよう撮影用の光源として、赤色LEDを搭載した（表3-2-7-3）。当初の仕様では、カメラのISO感度を変更できず、デフォルトの設定だと、赤色LEDを点灯した際、海底の砂地等の背景が白飛びしてしまい、生物が映っても特定が難しい状態であった。そのため、最終年度において、ISO感度の調整ができるようカメラロガーを改良した（表3-2-7-3）。

カメラロガーはバッテリーで駆動しているため、省電力化を目的としたセンサトリガー機能や静止画撮影機能を搭載した（表3-2-7-4）。カメラロガーには圧力センサが搭載されており、このセンサの値はロガー内部で常時モニタリングされる。圧力センサの値が、予め設定した深度の値を超えると、自動的にカメラの撮影を開始する仕組みである。今回の実地評価では、撮影を開始する深度を水深2mと設定した。また、トリガーによる撮影開始から撮影終了までの時間を1分間とし、撮影終了時点でアオウミガメが2m以深に滞在している場合は、撮影を更に1分間延長する設定とした。

さらに、カメラロガーには温度センサーも搭載されており、環境情報として水温データも取得可能となった。



寸法 80mm×135mm×150mm, 空中重量 1200g

図3-2-7-5 アオウミガメ用に試作したカメラロガー

表3-2-7-3 カメラロガーの仕様（ハードウェア）

項目	四次試作仕様
レンズモジュール	双峰エンタープライズ製 SE219FE160-01
イメージセンサ	IMX219 1/4" 8M
FOV (気中/水中)	空気中の対角：130°（水中対角 86°） (1920×1080 時)
F 値	2.0
ASIC	EV9X
LED	外付けの LED ライト基板をカメラモジュールからオンオフ可能 LED 基板の位置はカメラ・レンズの外周 2 か所に配置。 GH CSSRM4.24-V6V8× 2 灯（赤色） 明るさ制御は PWM 制御(Config か USB 通信にて変更可能) 暗所で 1m 先の被写体を撮影できること 動作状態表示用の赤 LED × 1 灯
解像度/フレームレート	1920×1080 30fps 1280×720 30fps、60fps 640×480 30fps、60fps、120fps
マイク	ハイドロホンのステレオ入力端子(アナログ)を搭載。
光学フィルタ	IRCF 無し
記録メディア	MicroSD 64GB～1TB
制御	『ビデオロガーBVL-01』の Config File のフォーマットに準ずる。 但し、記述間違い等には対応せず、エラー時は LED 点滅表示を行う。 録画時間設定は 1 分～24 時間。録画間隔は 1 分～30 日。 録画設定ごとに LED の ON,OFF 設定が可能。 記録メディア容量フルで記録停止をする。

電源	DTP103448 3.7V 1,800mAh 対象動物や調査内容によって弊社にてバッテリー容量を選定（BL社） ビデオロガーの USB から供給される 5V を分配 ビデオロガー電源 ON(ウェイクアップ信号受信可)でセンサ基板と通信可。 5~600ms 後から通信可
metadata	Exif
待機電力	待機電力：1mW 以下（電源 OFF 状態） 待機状態からの復帰はロガーから信号をもらう、またはタイマー設定時の対応可。 RTC の設定した時刻で起動する場合、1mW 以下 駆動電圧：3.7V LED 2 灯 消費電力：ロガーのみ：2,225mW LED 点灯時：上記に +1,800mW
RTC	RX8804CE（EPSON） RV-8803-C7 と同等性能品。 CLOCK 信号は渡さず、時刻情報だけをやり取りする。
撮影距離	固定焦点。0.3m～無限大
IF	USB Type-C
USB 充電	有（給電動作無し、充電のみ）
動作温度範囲	-10℃～40℃
耐圧	500m
重量	本体：14.7g ガラス：3.4g 温度センサ基板：0.1g 合計：18.2g
寸法	全長 46.95mm×基板間隔 3.5mm×基板幅×21.1mm LED 周り Φ33.3mm
映像ファイル	映像データ:.mov、音声データ:.wav（個別保存あり） ファイルに保存される撮影日情報は、保存完了時の「年月日時分秒」となる。（時間はカメラに設定されている時間を使用）

表 3-2-7-4 カメラログの仕様（ソフトウェア）

●1. 静止画撮影と静止画情報取得 解像度は 1920×1080、1280×720、640×480、160×120 の 4 パターン。 取得できるのは、静止画ファイル、静止画ファイルリスト、静止画ファイル名。
●2. カメラのステータスの取得 電池電圧、温度、SD カードサイズ、SD カード使用容量、 動画ファイル数、静止画ファイル数、動作モード (単独モードの場合)USB 抜去時にスケジュールが開始されるかどうか
●3. カメラのスケジュール動作でログと通信を行う。 カメラ単独モードと同様にカメラスケジュールによって撮影開始を行うが、ログ へ通知は行う。 目的としてはログに対して撮影開始や撮影フレーム数等をコマンドで通知を行 う
●4. 同期 VDO_XC_STATUS 信号を H にした時点の撮影フレーム数と時刻をログへ通 知。 ファイルに記録する 1 時間に 1 回程度、専用のコマンドを用意 上記とは別に、既存通知コマンドにフレーム数と時刻を付加
●5. 充電電流設定・取得 カメラに接続されているバッテリーへの充電電流を設定する。 設定値はバッテリーの種類別・任意の電流値から設定可能。 読出しコマンドでカメラに設定されているバッテリー種類・充電電流値を取得。
●6. LED 明るさ調整設定・取得 低照度・高照度での点灯時、それぞれの発光強度を 50 段階で設定。 撮影設定読み出しコマンドで取得。
●7. ISO 上限設定・取得 撮影時の ISO 上限設定。設定値は ISO100/200/400/800/1600/3200/6400/12800 撮影設定読み出しコマンドで取得。
●8. ファイル分割設定・取得 動画撮影時、設定した分単位で動画を分割保存する設定。 撮影設定読み出しコマンドで取得。
●9. ファームアップ失敗時の動作変更 ファームアップ失敗時は error.txt を作成し、再起動する。

2-3 アオウミガメを用いた装着実験

前項で開発したカメラロガーをアオウミガメに装着することで(図3-2-7-6、図3-2-7-7、図3-2-7-8)、生物にとって重要な海域や、人間ではアクセスできない場所でのサウンドスケープ教師データおよび、アオウミガメの行動に起因する音を収集することができた。

本プロジェクトにおいて、FullHD30fpsの設定で合計約300時間の動画データと魚類鳴音等の音響データを取得することができた。得られた動画データから1時間を抽出して解析したところ、魚類鳴音を69サンプル、アオウミガメ起因の音響を193サンプル収録することができた(表3-2-7-5)。音響処理基板に搭載する機械学習モデルに、アオウミガメ起因の音源を学習させることによって、アオウミガメから発せられた音源も分類できるようになった。夜間に撮影した動画については、ISO感度を調整することによって、背景の白飛びを抑制し、夜間の動画に映った生物の種判別が容易になった(図3-2-7-9)。

一定の深度になると撮影を開始させるトリガー撮影の試験を実施し、合計21.6時間の撮影期間を対象にセンサトリガー(2m以深)を設定した結果、トリガーによって撮影された録画時間は、合計2.6時間であった。センサトリガー機能が未搭載であれば、21.6時間の全期間が撮影されるが、センサトリガーによって撮影された合計時間が2.6時間になったことによって、撮影時間は約88%削減されることが実証された。



図 3-2-7-6 カメラロガーを装着したアオウミガメ(赤枠部分)



図 3-2-7-7 カメラロガー（浮力体有）を装着したアオウミガメ(赤枠部分)



図3-2-7-8 アオウミガメ用に試作したカメラロガー（浮力体有）

表 3-2-7-5 1時間のアオウミガメ動画から取得可能な音源ライブラリ

魚類鳴音	ウミガメ起因音				
	サンゴ等への衝突音	息継ぎ	表層滞在	羽ばたき音	鳴音
69	42	30	104	16	1

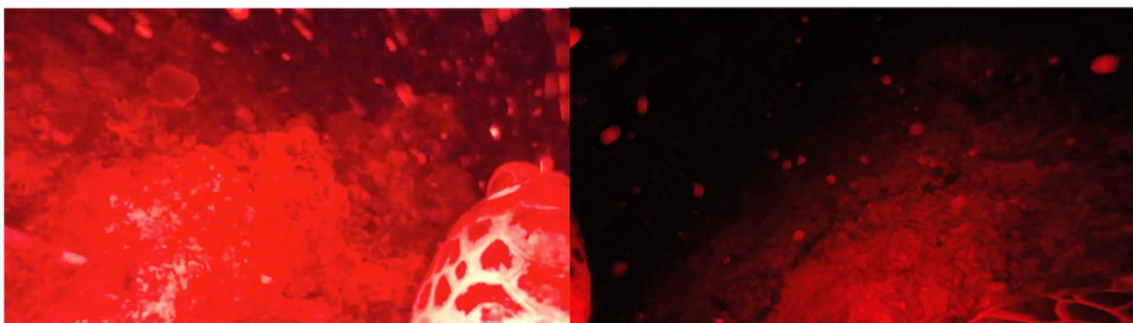


図 3-2-7-9 アオウミガメに装着したカメラロガーで収録した映像(夜間)の例
左：改良前(2023 年 7 月撮影) 右：改良後(2024 年 2 月撮影)

4. 考察

当初の目標の 1.5 kg 以下のカメラロガーを開発することができた。カメラロガーによって、実際に魚類鳴音やアオウミガメ起因の音を取得することができ、わずか 1 時間の観測から、合計 193 サンプルの音源ライブラリーデータを収集することができた。音源分類の機械学習には多くの音源サンプルが必要となるため、今後、アオウミガメをプラットフォームとした音響収録が音源ライブラリの有効な取得手法の一つとして活用することが期待される。

他の音響収録の方法としては、ダイバーによるインタビュー方式や、海底等への設置式があげられる。今回の手法では、アオウミガメを用いているため、人間が収録場所を決定できないという欠点がある。しかしながら、撮影の際にダイバーが介在しないため、生物が警戒していない状態で音響の収録が可能であること、アオウミガメを自律移動体として利用し、設置が困難な海域での収録や広範囲にわたってサウンドスケープ教師データを収集できるという利点がある。

また、運用期間の長期化を目指し、センサトリガー機能のファームウェア開発を実施し、機能検証を行った。アオウミガメへの装着実験の結果、2m 以深に潜水した場合に録画を開始する設定で、トリガーなしの場合と比較し、消費電力が約 88%削減され、目標としていた 20%の削減を大きく上回ることができた。生物に装着する機器はバッテリーによって運用期間の制限を受けるため、消費電力を 90%近く削減できたのは大きな成果である。

さらに、カメラロガーの ISO 感度調整を行い、夜間の背景の白飛びを大きく軽減することができた。この改良によって、夜間の映像に関して、海底のサンゴや海底の地形、生物等をより鮮明に撮影することが可能となった。ダイバーによる夜間のサウンドスケープ教師データの収集は安全上の問題があるため、頻繁に行うのは困難である。今後、このカメラを生物に搭載することで、サウンドスケープ教師データをより効率的に収集できると期待される。

参考文献

- 1) KATAOKA, K., OKUYAMA, J., KOBAYASHI, M., ABE, O., YUSED, K., & ARAI, N. (2006). Establishment of biologging approach to sea turtle in the neritic environment. In Proceedings of the 3rd International Symposium on SEASTAR2000 and Asian Bio-logging Science (The 7th SEASTAR2000 workshop) (pp. 31-33). Graduate school of Informatics, Kyoto University.

3-2-7-2 沿岸域用生物搭載型ロガーによるサウンドスケープ観測

1. 目的

バイオリギング手法で最終的にサウンドスケープ情報および環境情報を回収するために、LPWA 機能、マルチセンサ機能、音響処理機能一体型ロガーを開発し、アオウミガメ (*Chelonia mydas*) の産卵個体および亜成体等に装着し、多点観測の実証実験を行うことを目的とする。

2. 方法

2-1 LPWAロガーの開発

アオウミガメに装着し、LPWAによりデータを回収可能なサウンドスケープロガーを開発する。仕様としては産卵成熟個体 (120-150kg、N=6、平均131kg、奥山ら未発表データ) のアオウミガメに搭載可能なサイズ (体重の5%以下として、5kg以下) を目標とする。

2-2 音源分類モデルの精度検証

完全量子化したTensorFlowLiteの深層学習モデルを用いて、52音種を分類する精度をシミュレーションにて検証する。深層学習モデルは、全データのうち70%を訓練用、30%をテスト用として用いる。

精度評価として、レベル1-3の各分類段階における正解率、再現度、適合度、F値を算出する。また、Top1 (モデルが予測した最も確率が高い分類ラベルに正解が含まれる場合) とTop5 (モデルが予測した上位5つ確率が高い分類ラベルに正解が含まれる場合) の精度も算出する。

2-3 アオウミガメを用いた装着実験

開発したロガーの野外実証実験として、産卵上陸するアオウミガメに装着する。アオウミガメの取り扱いはずべて環境省および沖縄県による特別採捕許可 (環境省2207282、沖縄県4-2) のもとで行う。

調査は石垣島の伊原間浜にて2022年~2023年夏に行う。これまでも継続して調査を行っている場所において、これまでと同様の手法で調査する (Okuyama et al. 2021⁴⁾)。毎晩、浜を約1時間間隔で定期的に巡回し、営巣上陸するアオウミガメを搜索する。もし、アオウミガメが上陸していれば、浜から海に帰るタイミングで、複数人でロガー装着作業を行う。その際に、金属製またはプラスチック製のタグを肢に着けるとともに、甲羅のサイズとしてSCL (straight carapace length) およびSCW (straight carapace width) を計測する。ロガーは、LPWA通信によりアオウミガメが浮上時にデータが送信されるようにしているが、必ずしもすべてのデータを送信できないため、アオウミガメが再び産卵のために上陸した際に、可能な限り、ロガーの回収を行う。開発した

ロガーは比較的サイズが大きいですが、産卵上陸するアオウミガメ(空中重量150-300kg程度 Seminoff et al. 2003⁵⁾)の体重の3%以下である。

解析は、データが通信によって回収することができ、位置と合わせた音源分類結果が、1音種につき10点以上得られたものについては(例えばドクウツボ。詳細は結果を参照)、音種の分布(サウンドスケープのマップ)を描けることを示す例として、カーネル密度分布(データの分布を推定するために用いられる非パラメトリックな手法)を計算する。

3. 結果

3-1 LPWAロガーの開発

開発したロガーの概要を図3-2-7-10に示した。

開発したロガーは、サイズ横幅100mm×奥行き160mm×高さ85mm(コネクタ部除く)、空中重量2kgである。センサとして、3軸加速度センサ、3軸地磁気センサ、3軸加速度センサ、深度センサ、温度センサ、GPSを搭載する。今回、3軸地磁気センサ、3軸加速度センサ、深度センサおよび温度センサは60秒に1回記録する。

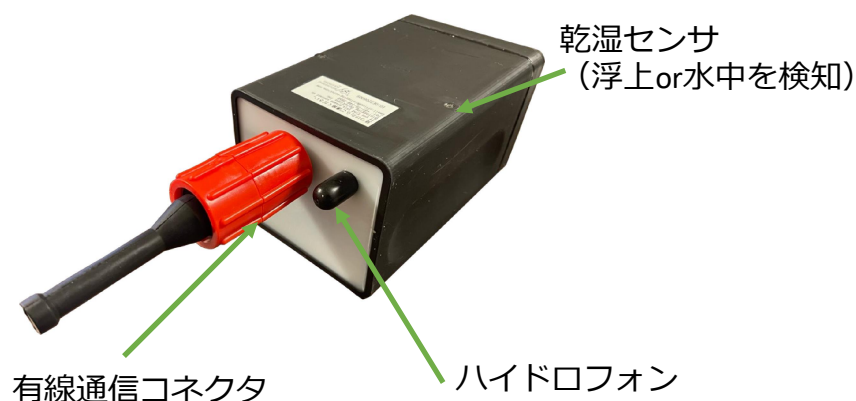


図 3-2-7-10 開発した LPWA 機能搭載型・一体型ロガー

GPSは、海洋動物のトラッキングで広く用いられてきたFastLoc GPS(Dujon et al. 2014¹⁾)と同様に、瞬間的な測位が可能なGPSを用いたため、アオウミガメが浮上時の短時間での測位が可能である。瞬間測位可能なGPSは、事前の屋外水槽における精度評価試験では、RMSE: 32.04 ± 26.8 mであった。ハイドロフォンとしては、AS-1(Aquarian Hydrophones)を用いた。このハイドロフォンは、1 Hz~100 kHzで-208(± 2)dB re: V/ μ Paのフラットな感度応答を持つ全方位ハイドロフォンである。音声データは、44.1kHz、16bitでサンプリングする。計測されたデータは、携帯電話網を用いたLTE-M通信により送信する。

音響処理は、基板内で音の分類を完結する必要があるが、深層学習を用いた。深層学習を実行する環境として、CPU、GPU、FPGA、専用AIチップを比較し、計算時間が長いというデメリットはあるが、消費電力が比較的小さく、モデルの更新が容易なCPUが用途に適していると考えられた。

次に、マイコン内で深層学習モデルが実行可能なほど十分な内部メモリおよびRAMを確保したマイコンで、かつ、比較的消費電力の小さいマイコン（STM32のH7シリーズ。最大2MBの内蔵Flashメモリおよび1MBのRAMを搭載）を選定した。本マイコンは、開発開始当時（2022年）に入手可能なマイコンのうち、内部メモリ、内部RAMが大きいマイコンの一つである。

マイコン等の組み込みで深層学習を実行するためのフレームワークとして、GoogleのTensorFlowLite¹⁾はTensorFlowのモデルを作成後、精度を可能な限り落とすことなく、モデルサイズを削減できるようにしたものである。TensorFlowLiteのモデルとしては、限られた計算リソースおよびバッテリー駆動する携帯端末などでも実装可能なほど軽量な画像分類モデルとして有効なMobilenet²⁾を選定した。Mobilenetは、デバイスや組み込みアプリケーションの限られたリソースを意識しながら、効率的に精度を最大化することに重点をおいて設計されたアルゴリズムである。Mobilenetには最初のv1からv2とv3の2種類が改良版として提唱されているが、v2とv3は選定したマイコンで消費するメモリおよびRAMの量が大きく、搭載できない。また、Mobilenetには入力画像のサイズと、各レイヤーのネットワークを一律に薄くするハイパーパラメータのWidth Multiplierが変数としてあげられる。入力画像のサイズを小さくすると、入力画像データの確保や処理に必要なメモリおよびRAM量を削減することができる。また、Width Multiplier（最大値1.0）から値を小さくすると、モデルの必要なメモリおよびRAM量を削減することができる。

マイコン内で深層学習を用いて画像分類するためには、スペクトログラムを算出する前処理から、実際に深層学習モデルで分類するまで含めて、この処理で使用されるメモリ量およびRAM量が、マイコン内のメモリおよびRAMサイズに収まる必要がある。そこで、画像の入力サイズおよびWidth Multiplierを変更した時にどの設定値であれば、マイコン内に搭載可能か検証した（図3-2-7-11）。その結果、STM32H7に搭載可能なMobilenetの画像サイズおよびWidth Multiplierが明らかになり、画像サイズ128、160、192では0.25および0.50のWidth Multiplier、画像サイズ224では0.25のWidth Multiplierが搭載可能なことが分かった。

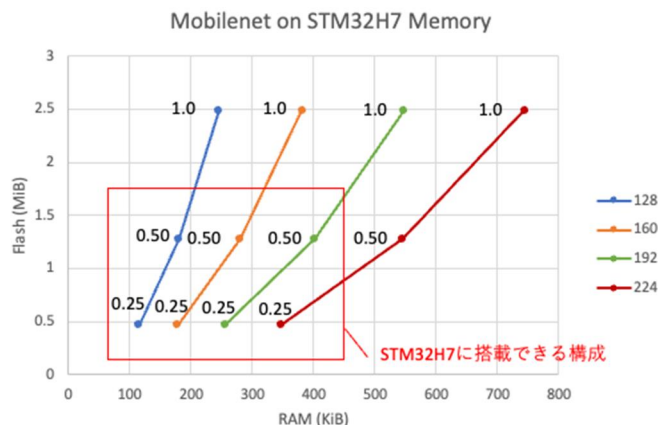


図 3-2-7-11 Mobilenet の入力画像サイズ（青：128、黄：160、緑：192、赤：224）と処理時に必要な RAM サイズ（X 軸）と Flash サイズ（Y 軸）
グラフ上の 0.25、0.50、1.0 は Width Multiplier の値

上記の検証により、マイコン内で実行可能なMobilenetの画像サイズおよびWidth Multiplierが分かったが、前処理も考慮に入れる必要がある。音響データの前処理としては、ブイ用の前処理では、10秒間の入力データに対し、オーバーラップ率0.9にてスペクトログラムを算出し、10秒間のスペクトログラムデータに対し、メディアンフィルタで背景ノイズを除去する。その後、2秒ごとの時間窓を1秒ごとにスライドし、9枚の2秒ごとの画像データを作成し、音源分類の入力データとしている。しかし、マイコンではメモリおよびRAMサイズの制限から同様の前処理は困難である。そこでこの時、入力音の時間長（窓）やFFTのオーバーラップ率をどのように変更すれば、マイコン内に搭載可能かどうか検証した。さらに、マイコン内で前処理を行う際に必要なメモリおよびRAM量をできるだけ減らすために、倍精度ではなく単精度で計算することとした。その結果、表3-2-7-6のようになり、白色の部分はマイコンで搭載可能であり、赤色の部分はマイコンで搭載不可であることが分かった。例えば、窓を5秒とした時、オーバーラップ率は最大0.5まで搭載可能である。

表 3-2-7-6 入力音の時間長（窓）と FFT のオーバーラップ率

表内の数字の単位は kByte

		窓								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
オーバーラップ率	0	88.4	132.6	176.7	220.9	265.1	309.3	353.5	397.7	441.9
	0.1	98.2	147.3	196.4	245.5	294.6	343.7	392.8	441.9	491
	0.2	110.5	165.7	220.9	276.2	331.4	386.6	441.9	497.1	552.3
	0.3	126.2	189.4	252.5	315.6	378.7	441.9	505	568.1	631.2
	0.4	147.3	220.9	294.6	368.2	441.9	515.5	589.1	662.8	736.4
	0.5	176.7	265.1	353.5	441.9	530.2	618.6	707	795.4	883.7
	0.6	220.9	331.4	441.9	552.3	662.8	773.3	883.7	994.2	1104.7
	0.7	294.6	441.9	589.1	736.4	883.7	1031	1178.3	1325.6	1472.9
	0.8	441.9	662.8	883.7	1104.7	1325.6	1546.5	1767.4	1988.4	2209.3
	0.9	883.7	1325.6	1767.4	2209.3	2651.2	3093	3534.9	3976.8	4418.6

上記の検討を踏まえ、前処理のアルゴリズム（窓5秒、オーバーラップ率0.5）で、52音種の音響データを処理し、スペクトログラム画像を作成した。その後、学習データを用いて、Mobilenet v1の転移学習により、サウンドスケープの画像データを分類するTensorFlowのモデルを作成する。さらに、その後、TensorFlowLiteモデルに変換し、すべての重みとアクティベーション出力を8ビット整数データにする完全量子化を行う。

最終的な音源分類アルゴリズムは、音響データをスペクトログラム化し、スペクトログラムを画像データ化して、画像分類用の深層学習モデル(MonbileNet ver1)を用いる方法となる（図3-2-7-12）。実際のロガー内での処理フローは以下の通りである。

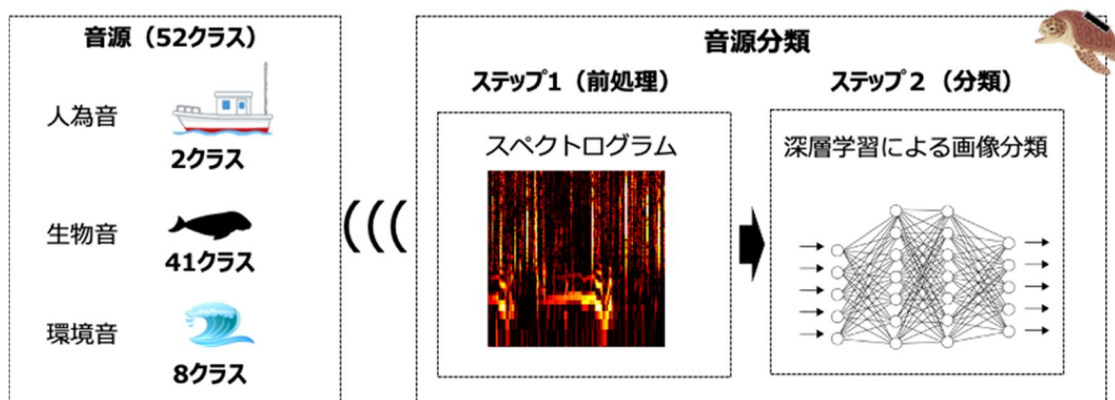


図 3-2-7-12 音響処理のフロー図

音声は30分間隔で5分間(300秒間)記録するDuty Cycleとする。5分間の音声データはロガー内部で以下の処理を行う。

- 1) 300秒のデータを5秒ごとのデータに区切る。
- 2) 5秒のデータからスペクトログラム(FFTオーバーラップ0.5)を計算し、メディアンフィルタをかける。
- 3) 上記の5秒間のスペクトログラムのデータから、2秒の時間窓で1秒ずつオーバーラップさせスライドし、2秒間の時間窓の画像を4枚算出する。
- 4) 1枚の画像ごとに構築したTensorFlow Lite化したMobileNet ver1のモデルで画像分類を行い、音声分類結果とする。

上記のフローにより、5分間のデータからは合計240枚の画像データが得られ、240個の分類が得られることになる。深層学習モデル(MobileNet)は、各クラスでの確度を算出する。通信が常に可能な状態が継続しているならば、すべての分類結果を送信することは可能ではあるが、アオウミガメに装着した場合、呼吸で浮上し、甲羅に取り付けたロガーが空中に露出したタイミングでのみ通信が可能である。したがって、すべての分類結果を送信することは現実的ではないので、集計した結果を送信する。集計方法としては、様々な方法が考えられるが、ここでは単純に240個の分類結果の各クラスの確度を240個で平均化し、上位3音種(Top3)の確度のクラスを5分間で最も優占した音種とみなす。

開発した装置の送信機能の概要は、ロガーはSalt-water スイッチを備え、アオウミガメが水面に浮上したことを検知すると、GPS計測およびLTE-Mによるデータ通信を行う。GPSはアオウミガメが浮上する度に計測するようにした。1セットの分類データは、1回の分類結果に、5分間の音響計測期間の最初のタイミングの深度、温度、合成加速度、合成地磁気データを合わせたものとした。センサデータまたは位置データは1回分を1つのまとまりとした時、1バケット(1回分の送信データのまとまり)には最大13回分のデータが格納できる。

ロガーは送信可能になるごとに、過去の未送信データから順次送信を試みる。3回送信に失敗すると、そのデータは破棄され、次の新しいデータを送信する。Salt-water スイッチによって送信可能な状態になったとしても、LTE-M送信機能の起動および通信確立ができるようになるまで、少なくとも6~10秒かかるため、アオウミガメや波の状態によって、送信に失敗することもあると考えられる。例えば、アオウミガメは、1回呼吸するために、10秒前後水面に滞在することから(Okuyama et al. 2014³⁾のPost dive surfacing durationを参照)、起動時間が比較的長くかかったとしても、通信できる可能性があると考えられる。

ロガーをアオウミガメに装着した際の送信回数は、アオウミガメの浮上回数に依存するため、事前に見積ることは難しいが、ロガーは、上記の設定で、仮に送信がないと仮定した時は、消費電力として連続40日、運用できるように設計する。音源分類と

GPS測位のタイミングは同じではないため、音源分類を行った前後1時間以内の最新のGPS測位点をその音源分類を行った位置とする。ロガーを直接回収できれば、集約化する前の分類結果、およびすべてのGPS測位データ、3軸加速度センサ、3軸地磁気センサ、深度センサ、および温度センサをダウンロードすることが可能である。

3-2 音源分類モデルの精度検証

完全量子化モデルによるシミュレーションによる精度検証の結果、正解率はTop1モデルにて、レベル1：91.3%、レベル2：86.7%、レベル3：62.3%であった。また、Top5モデルにて、レベル1：97.1%、レベル2：96.3%、レベル3：86.3%であった。

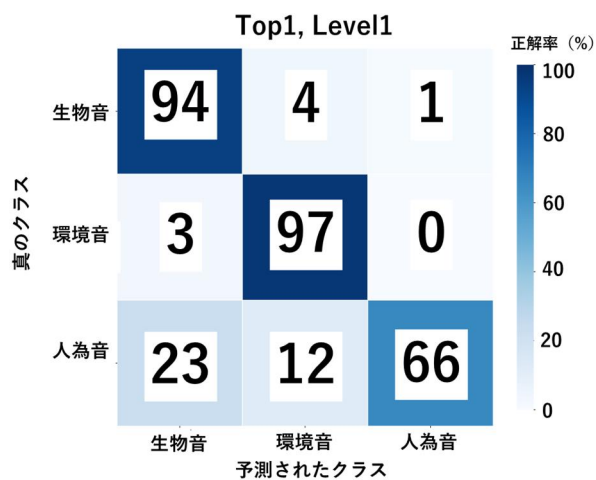
再現度、適合度、F値を表3-2-7-7に、混同行列を図3-2-7-13 ～図3-2-7-18に示した。

表 3-2-7-7 完全量子化モデルによるレベル 1、レベル 2、レベル 3 の分類精度
(再現度、適合度、F 値)

Top1：モデルが予測した最も確率が高い分類ラベルに正解が含まれる場合

Top5：モデルが予測した上位 5 つ確率が高い分類ラベルに正解が含まれる場合

Top1		再現度	適合度	F 値
	レベル 1	85.8	82.1	82.2
	レベル 2	73.1	75.0	65.1
	レベル 3	43.7	52.7	41.8
Top5		再現度	適合度	F 値
	レベル 1	95.4	92.5	93.7
	レベル 2	95.0	89.6	91.4
	レベル 3	74.5	85.4	85.4



表内の数字は正解率（％）を示す
 正解率は真のクラス（横方向）に対し正規化を行っている
 （表内の数字を横方向に足し合わせると合計 100 になる）

図 3-2-7-13 完全量子化した TensorFlow Lite モデル（Top1）
 によるレベル 1 分類精度の混同行列



表内の数字は正解率（％）を示す。
 正解率は真のクラス（横方向）に対し正規化を行っている
 （表内の数字を横方向に足し合わせると合計 100 になる）

図 3-2-7-14 完全量子化した TensorFlow Lite モデル（Top5）
 によるレベル 1 分類精度の混同行列

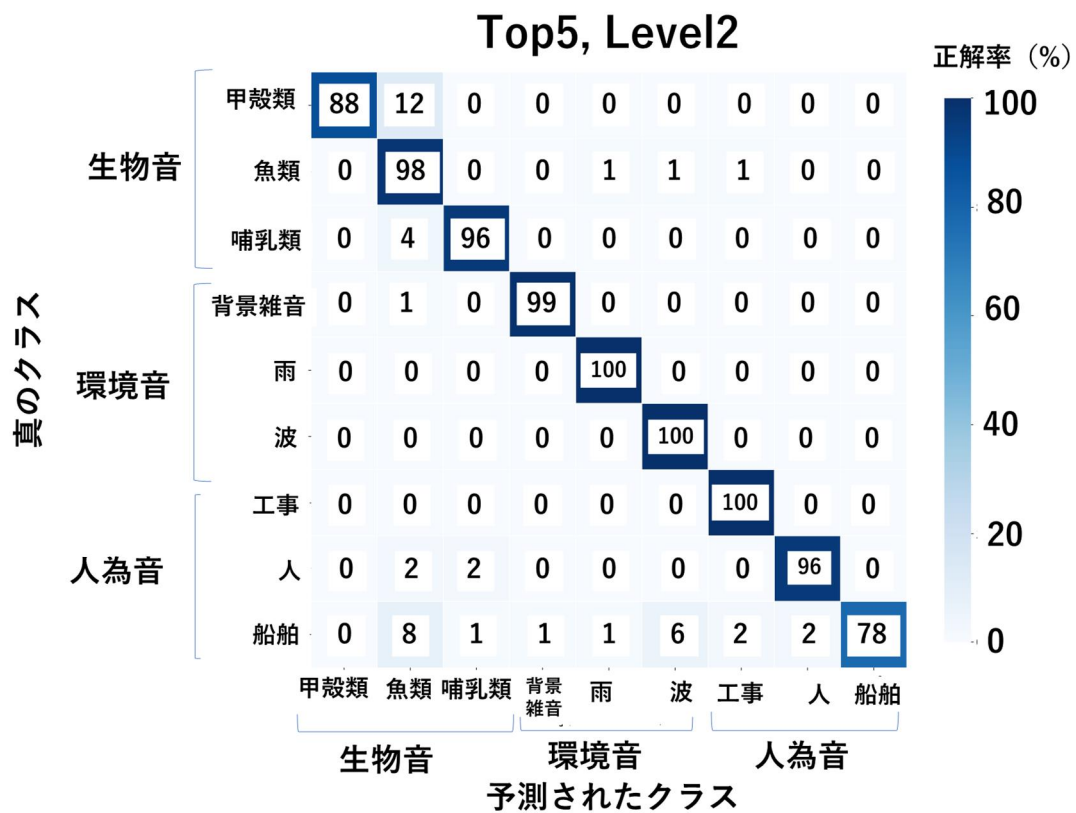


表内の数字は正解率（%）を示す

正解率は真のクラス（横方向）に対し正規化を行っている

（表内の数字を横方向に足し合わせると合計 100 になる）

図 3-2-7-15 完全量子化した TensorFlow Lite モデル（Top1）
によるレベル 2 分類精度の混同行列

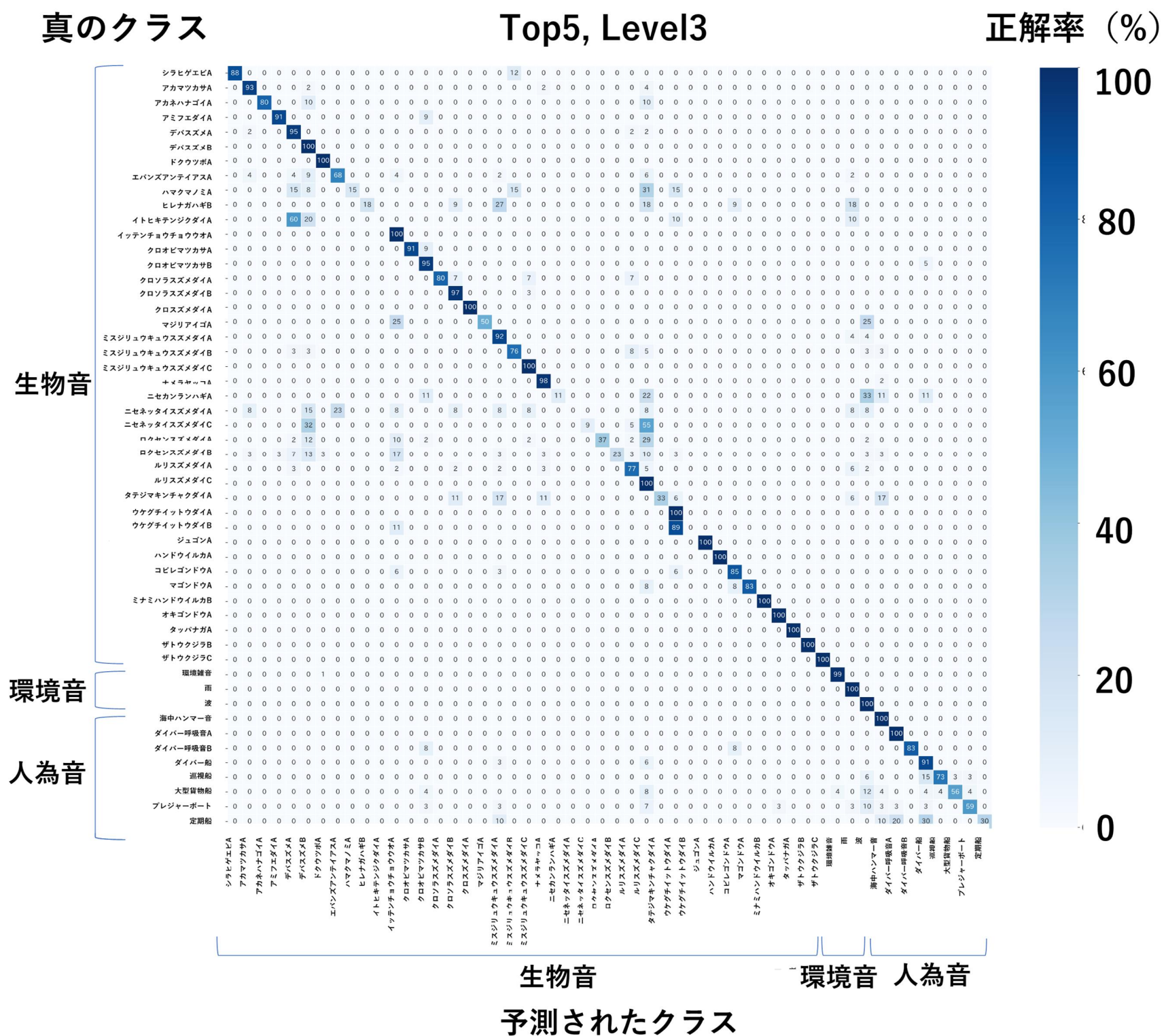


表内の数字は正解率 (%) を示す

正解率は真のクラス (横方向) に対し正規化を行っている

(表内の数字を横方向に足し合わせると合計 100 になる)

図 3-2-7-16 完全量子化した TensorFlow Lite モデル (Top5)
によるレベル 2 分類精度の混同行列



表内の数字は正解率 (%) を示す

正解率は真のクラス (横方向) に対し正規化を行っている

(表内の数字を横方向に足し合わせると合計 100 になる)

図 3-2-7-18 完全量子化した TensorFlow Lite モデル (Top5) によるレベル 3 分類精度の混同行列

3-3 アオウミガメを用いた装着実験

開発したLPWAロガーをアオウミガメに装着した（図3-2-7-19）。アオウミガメを用いた実証実験の結果、5個体のアオウミガメからLPWAを介して、153点の音源分類結果と778点の計測データを回収することに成功した（表3-2-7-8）。電力的に想定した連続運用は達成できてはいないものの、実際に、野外でバイオリギングにより、音源分類結果と位置・センサデータを回収することに成功した。また、これらの5個体は、再捕獲によりロガー内のデータの回収にも成功している。LTE-M通信経由で回収されたのは、全位置データの95.3%、全音源分類結果の91.6%であった。

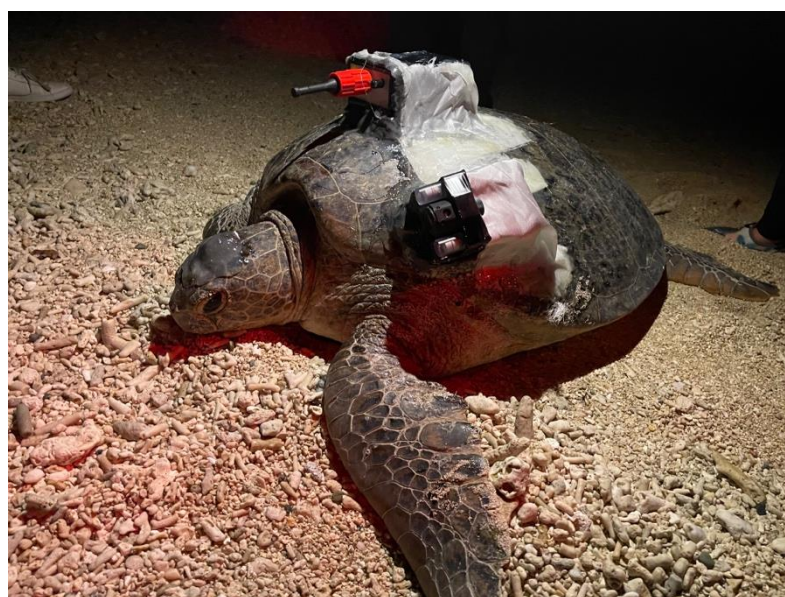


図 3-2-7-19 アオウミガメに装着した LPWA 機能一体型ロガー

表3-2-7-8 LPWA機能搭載型・一体型ロガーを装着したアオウミガメと回収したデータ数

ウミガメ ID	SCL (cm)	SCW (cm)	記録期間 (h)	クラウド経由		直接ダウンロード	
				位置数	音響分類数	位置数	音響分類数
2	97.2	69.9	24.33	270	48	270	54
4	97.2	69.9	3.73	26	8	27	8
9	98.8	76.4	22.82	239	40	269	46
10	101.0	81.2	7.50	35	13	42	15
12	97.2	77.4	22.12	208	44	208	44
合計			80.5	778	153	816	167
平均	98.3	75.0	16.1	155.6	30.6	163.2	33.4
標準偏差	1.7	5.0	9.7	116.3	18.6	120.3	20.5

SCL:直甲長

SCW：直甲幅

得られたサウンドスケープデータからは、ドクウツボがすべてのロガーで検出されるなど、判別した音種に共通点が見られた(図3-2-7-20)。位置データと音源分類結果をあわせることによって、図3-2-7-21のような、サウンドスケープの位置マップを描くことができること、ドクウツボについては、観測点数が多いことから、カーネル密度分布を描くことができることが分かった。

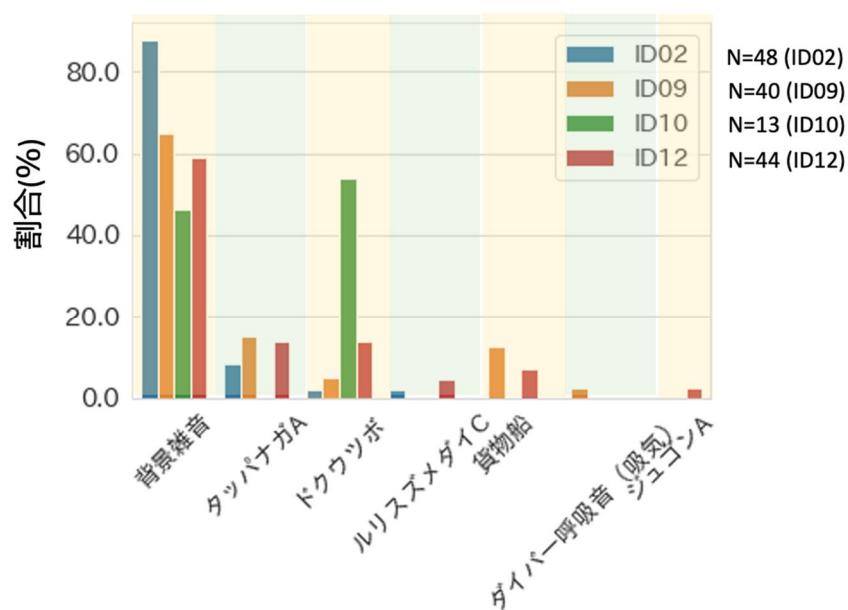
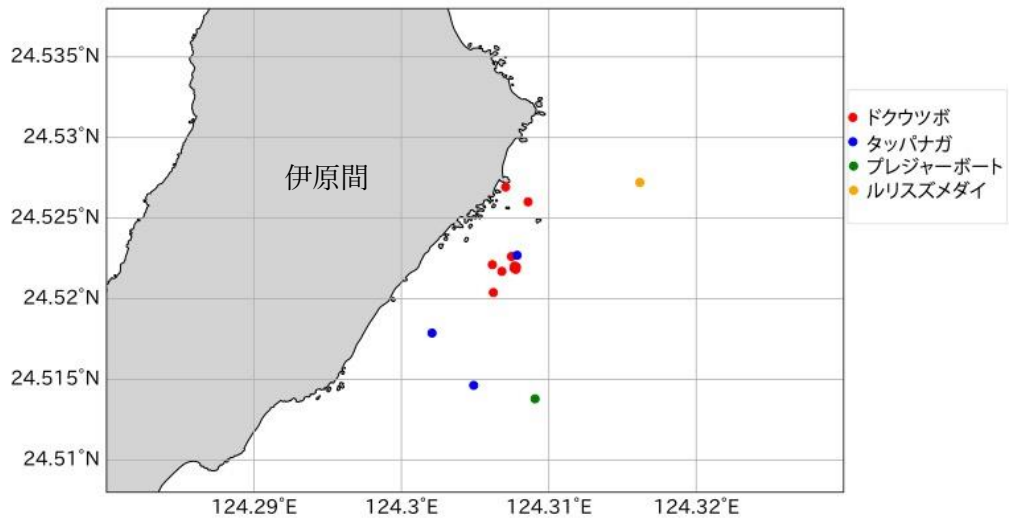
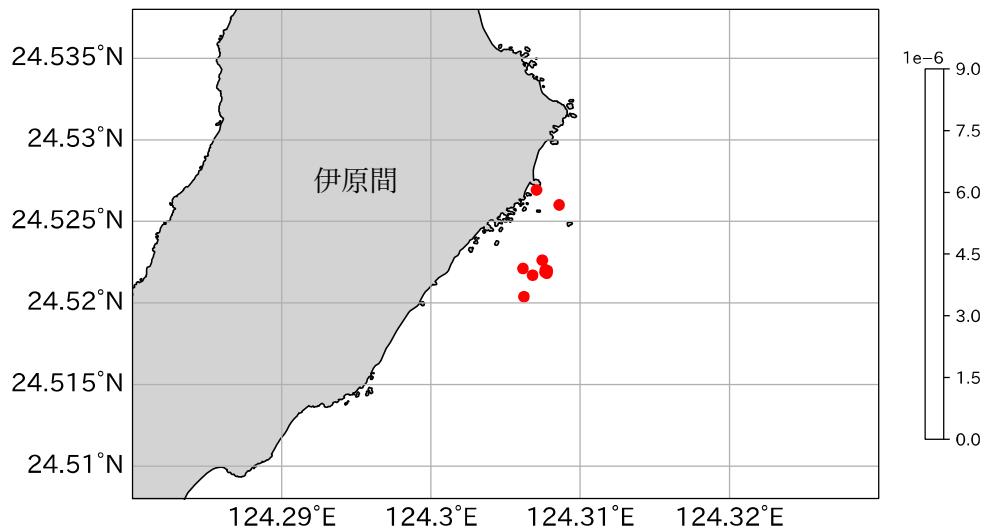


図 3-2-7-20 回収した音源分類結果のロガーごとの構成



a) 得られた分類音と観測位置



b) ドクウツボについて観測位置から算出したカーネル密度分布

図3-2-7-21 位置データと音源分類結果

4. 考察

当初の目標である 5 kg 以下のサウンドスケープ観測用 LPWA ロガーを開発することができた。音響処理機能として、音響処理を行うハードウェアとして CPU (マイコン) を選定している。マイコンではブイと同じ前処理、深層学習のモデルは実装困難であるが、前処理の時間窓や FFT オーバラップ率を小さくし、深層学習のモデルを Mobilenet v1 とし、完全量子化した TensorFlowLite モデルを作成することによって、マイコン内で実行できることが分かった。前処理は、例えば、窓を 5 秒とした時、オーバーラップ率は最大 0.5 まで搭載可能である。入力音の時間長 (窓) は長いほど、メディアアンフィ

ルタにより分類対象音と背景ノイズを分離しやすくなると考えられる。一方で、オーバーラップ率を上げると、スペクトログラムの時間的解像度が上がるため、画像分類にとってより細かい特徴を把握できる可能性がある。今回開発したロガーでは、窓をある程度長く、かつオーバーラップ率をある程度高くできる値として、窓 5 秒、オーバーラップ率 0.5 を選定することとした。単純な精度検証の結果、Top1 は Top1 の正解率は 62.3%、Top5 の正解率は 86.3%であり、Top1 の精度は高くはないが、Top5 の精度まで考慮することで、比較的高い精度が出せる可能性が考えられた。

動物を海洋観測のプラットフォームとしても用いる概念は、珍しい試みではない。2000 年代初頭から水温、塩分、溶存酸素等をウミガメやアザラシに観測させることは有効な方法として報告され、2020 年代には全球海洋観測システム (GOOS)のネットワークとして正式に認められている (MacMahon et al. 2021⁶⁾)。しかし、本研究で開発したロガーは、深層学習を用いて、音響を分類し、生物が浮上時にデータ通信を行うバイオロギング装置としては、世界初のシステムと考えられる。

サウンドスケープ情報を、音源を特定した情報まで含めて、リアルタイムに観測できるシステムとして運用することができれば、多様な音が発生していることへの理解を促進することや、1つの生物と人間活動との軋轢の問題を考える時に、より具体的なアクションを行うことができるようになると考えられる。

サウンドスケープ録音機のような固定型の観測機器の設置が困難な場所での観測手法として、バイオロギングシステムは有効であろう。同様のアプローチとしてグライダーで観測することが行われたが (Baumgartner et al. 2013⁷⁾, Kowarski et al. 2020⁸⁾)、グライダーも浅い沿岸域での運用は困難な場合が多く、また、これまでの例ではクジラ、イルカなどの海棲哺乳類の鳴音検出を目的とし、生物音、人為音、環境音といった様々な音種の特定制まで行うシステムではなかった。今回のようにサウンドスケープの音源を特定するためには、事前に分類のための教師データが必要である。音響データは大容量であるため、通常それらのデータを送信によって回収することは実用的ではないが、ロガー内で音源分類するエッジ処理により、事前学習した深層学習モデルを実行することによって、分類結果のみを回収する新しいシステムを開発することができた。

LPWA 通信によって回収されたデータは 90%以上であり、石垣島の伊原間の産卵個体においては少なくとも LPWA 機能搭載型ロガーが利用できると考えられた。実際に位置データと音源分類結果を合わせることで、ウミガメ類を移動体観測機として用いてサウンドスケープを描画できることが示された。今回野外で LPWA 通信によって回収された分類結果によると、背景雑音を除き、ドクウツボやスズメダイなど現地でもよく観測される種が見られた。一方で、今回の分類結果では、タッパナガやジュゴンなど現地で観測される可能性はゼロではないものの低いものもみられたので、間違って分類されている可能性も考えられた。

参考文献

- 1) <https://www.tensorflow.org/lite?hl=ja> (参照 2022 年 4 月 18 日)
- 2) Howard, Andrew G., et al. "Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications." arXiv preprint arXiv:1704.04861 (2017).
- 3) Okuyama, J., Tabata, R., Nakajima, K., Arai, N., Kobayashi, M., & Kagawa, S. (2014). Surfacers change their dive tactics depending on the aim of the dive: evidence from simultaneous measurements of breaths and energy expenditure. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1795), 20140040.
- 4) Okuyama, J., Ishii, H., Tanizaki, S., Suzuki, T., Abe, O., Nishizawa, H., ... & Yanagida, H. (2020). Quarter-century (1993–2018) nesting trends in the peripheral populations of three sea turtle species at Ishigakijima Island, Japan. *Chelonian Conservation and Biology*, 19(1), 101-110.
- 5) Seminoff, J. A., Jones, T. T., Resendiz, A., Nichols, W. J., & Chaloupka, M. Y. (2003). Monitoring green turtles (*Chelonia mydas*) at a coastal foraging area in Baja California, Mexico: multiple indices to describe population status. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 83(6), 1355-1362.
- 6) McMahon, C. R., Roquet, F., Baudel, S., Belbeoch, M., Bestley, S., Blight, C., ... & Woodward, B. E. (2021). Animal Borne Ocean Sensors—AniBOS—an essential component of the Global Ocean Observing System (GOOS). *Frontiers in Marine Science*, 1625.
- 7) Bohnenstiehl, D. R., Lyon, R. P., Caretti, O. N., Ricci, S. W., & Eggleston, D. B. (2018). Investigating the utility of ecoacoustic metrics in marine soundscapes. *Journal of Ecoacoustics*, 2(2), 1.
- 8) Kowarski, K. A., Gaudet, B. J., Cole, A. J., Maxner, E. E., Turner, S. P., Martin, S. B., ... & Moloney, J. E. (2020). Near real-time marine mammal monitoring from gliders: Practical challenges, system development, and management implications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 148(3), 1215-1230.

3-2-7-3 沖合域用生物搭載型ロガーによるサウンドスケープ観測

1. 目的

バイオリギング手法で最終的にサウンドスケープ情報および環境情報を回収するために、衛星通信機能、マルチセンサ機能、音響処理機能一体型ロガー(以下、衛星通信ロガー)を開発し、アオウミガメの産卵個体および亜成体等に装着し、多点観測の実証実験を行うことを目的とする。

2. 方法

2-1 衛星通信ロガーの開発

アオウミガメに装着し、水中音と同時に映像を得られるカメラロガーを開発する。仕様としては産卵成熟個体(120-150kg、N=6、平均131kg、奥山ら未発表データ)または亜成体(32-58kg、N=3,本研究)のアオウミガメに搭載可能なサイズ(体重の5%以下として、1.5kg以下を目標とする)。

2-2 音源分類モデルの改良

2)のLPWAロガーでは、52音種を対象としており、衛星通信ロガーには、構成する音種リストをサンプル数の観点から見直し、さらに、1)のカメラロガーにより収集したアオウミガメの行動に起因する音(呼吸、ヒレ運動、衝突)の3種を含めた合計57音種の分類を対象とする。

アオウミガメの行動に起因する音は、3-7-1のビデオロガー装着実験で得られた映像・音声データから取得する。全データのうち70%を学習データとし、30%をテストデータとする。その後、データ増強を行った学習データを用い、Mobilenet v1の転移学習により、サウンドスケープの画像データを分類するTensorFlowのモデルを作成する。さらに、その後、TensorFlowLiteモデルに変換し、すべての重みとアクティベーション出力を8ビット整数データにする完全量子化を行う。

また、構築した完全量子化モデルの精度を検証するため、反射のない開放域とみなせる海で、スピーカーから予め音種がわかっているテスト音源を放音し、ロガーで音源分類し、分類精度を検証するための野外試験を行う。このために、図3-2-7-19のようにロガーを水中スピーカーから1.2m離し、金属架台に固定し、石垣の名蔵湾(緯度24.389551°、経度124.114997°)で深度2mに船上から吊るし、放音試験を行う。

精度評価として、57音種の分類において、完全量子化したTensorFlowLiteの深層学習モデルを用いて、シミュレーションと実海域での試験から、レベル1-3における正解率、再現度、適合度、F値を算出する。シミュレーションにおいては、全データのうち、7割を訓練データ、3割をテストデータとした。実海域のデータとしては、放音データは、各音種で24サンプルとし、分類対象のすべての音種(57音種)を検証する。

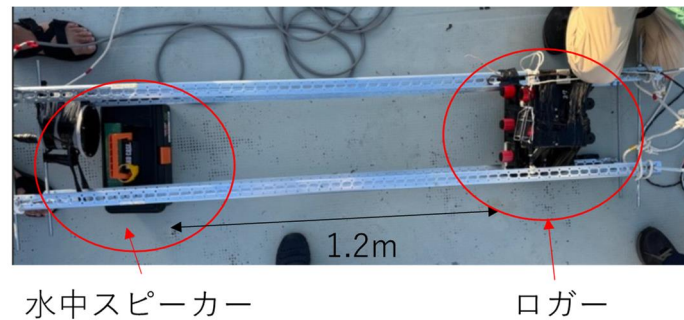


図 3-2-7-19 分類精度を検証するための野外試験の機器配置

2-3 アオウミガメを用いた装着実験

開発したロガーの野外での実証実験として、アオウミガメの亜成体に装着する。アオウミガメの取り扱いは沖縄県による特別採捕許可(沖縄県4-35)のもとで行う。調査は黒島周辺において2023年3月と2024年2月に行う。石垣島で採捕許可を受けた漁師にアオウミガメの捕獲を依頼する。捕獲したアオウミガメは、水産研究・教育機構の八重山庁舎の水槽で1週間程度飼育する。

ロガー装着・放流の当日に、2-3個体ずつ、アオウミガメを八重山漁協まで運搬し、甲羅のサイズとしてSCLおよびSCWを計測し、ロガーを装着する(図3-2-7-20)。ロガー装着についてはLPWAロガーと同様に、エポキシパテと樹脂を用いて甲羅にロガーを固定する。その後、漁師の船で放流現場まで運搬し、2022年度は合計5個体、黒島付近(緯度24.26482°、経度123.99307°)、2023年度は新城島の西(緯度24.249704°、経度123.926030°)合計5個体で放流する。2022年度放流のうち1個体については(殺し間放流個体と合わせて合計6個体となる)、八重山庁舎付近の浜から放流する(緯度24.455735°、経度124.214388°)。開発したロガーは比較的サイズが大きい、実験に用いたアオウミガメ亜成体の体重の5%以下である。

2022年度は、エラー訂正ありとエラー訂正なしの送信タイプのどちらを採用したらよいか検証するために、合計6個体のうち3個体をエラー訂正あり、3個体をエラー訂正なしの送信タイプを設定する。2023年度は、2022年度の結果をうけて(詳細は後述)、放流した6個体すべてエラー訂正ありの送信タイプとする。

2022年度の実験において、想定した運用期間より早くにロガーの送信が停止しており、この原因として、藻類などの付着生物により、Salt-water スイッチが正しく動作していない可能性が考えられる。そこで、2023年度の実験においては、海外での事例を参考に、船底塗料でロガーおよびエポキシパテ・樹脂を塗装することで、付着生物を防除することを行う。音声は2022年度は60分間隔で4分間(240秒間)、2023年度は30分間隔で4分間(240秒間)、記録するDuty Cycleとする。

解析は、2022年度の放流個体、2023年度放流個体どちらも、得られたデータ数(ロ

グ数)、そのうち送信データと整合性があると考えられる(CRCが一致)したデータ数(有効データ数)、また放流後、最初に回収されたデータの記録日時から、最後に回収されたデータの記録日時までの期間(追跡日数)を算出する。また、2022年度の放流個体からはエラー訂正ありとなしの送信タイプで、得られたログ数と有効データ数を比較する。さらに、2023年度放流個体については、得られた分類クラスのうち、Top1で観測された分類クラスを24時間の日時と観測回数を算出する。

3. 結果

3-1 衛星通信ロガーの開発

開発した衛星通信ロガーは(図3-2-7-20)、サイズ横幅100mm×奥行き160mm×高さ48mm(コネクタ部除く)、空中重量1kgとなった。LPWA通信機能一体型ロガーの約半分の重さである。LPWA通信機能一体型ロガーと同じく、センサとして、3軸加速度センサ、3軸地磁気センサ、3軸加速度センサ、深度センサ、温度センサ、およびGPSを搭載する。今回、3軸地磁気センサ、3軸加速度センサ、深度センサ、温度センサは60秒に1回記録する。GPSおよびハイドロフォンについてもLPWA通信機能一体型ロガーと同様の部品を用いる。計測されたデータは、アルゴス衛星通信により送信する。



図 3-2-7-20 開発した衛星通信機能一体型ロガー

音響処理機能としては、LPWAロガーと同様ではあるが、処理する音響データの時間窓を変更した。音声は30分または60分間隔で4分間(240秒間)記録するDuty Cycleとする。LPWA機能搭載型ロガーでは、5分間の音声データの取得を行い、5秒間のスライディングウィンドウにより、240枚の画像を作成したが、その際に、5秒間の時間窓と次の5秒間の時間窓の間をオーバーラップしていなかったため、音声処理ができていない期間が存在している。このため衛星通信機能搭載型ロガーでは、その期間もオーバーラップにより処理するとともに、トータルでの画像数240枚が変わらないように音声データ取得期間を4分間とした。

4分間の音声データはロガー内部で以下の処理を行う。

- 1) 240秒のデータを5秒ごとのデータに区切る
- 2) 5秒のデータからスペクトログラム(FFTオーバーラップ0.5)を計算し、メディアンフィルタをかける
- 3) 上記の5秒間のスペクトログラムのデータから、2秒の時間窓で1秒ずつオーバーラップさせスライドし、2秒間の時間窓の画像を4枚算出する
- 4) 1枚の画像ごとに構築したTensorFlow Lite化したMobileNet ver1のモデルで画像分類を行い、音声分類結果とする
- 5) 5秒間の時間窓のうち1秒オーバーラップし、次のスペクトログラムを計算する(2に戻る)

上記のフローにより、4分間のデータから合計240枚の画像データが得られ、240個の分類が得られることになる。深層学習モデル(MobileNet)は、各クラスでの確度を算出する。LPWA機能搭載型と同じく、240個の分類結果の各クラスの確度を240個で平均化し、上位3音種(Top3)の確度のクラスを4分間で最も優占した音種とみなす。

送信機能の概要については、ロガーは、さらにSalt-water スイッチを備え、アオウミガメの水面浮上を検知すると、GPS計測およびアルゴス衛星によるデータ送信を行う。GPSはアオウミガメが浮上する度に計測する。1セットの分類データは、1回の分類結果に、4分間の音響計測期間の最初のタイミングの深度、温度、合成加速度、合成地磁気データを合わせたものとする。

衛星通信としてはアルゴス衛星通信を用いる。アルゴス衛星通信では、1回の送信で31byteのみ送信可能である。送信可能なデータ量がLPWA通信よりさらに限られているため、1回の送信で複数回分のデータではなく、1回分のデータのみ送信する。また、石垣島周辺では1回のアルゴス衛星通過期間は約10分程度であり、その間にアオウミガメが浮上し、Salt-water スイッチにより、送信可能な状態と判断すれば、アルゴス衛星通信機能をOnにし、1秒程度で送信を行う。その後、送信可能状態が続けば、アルゴス衛星通信のプロトコルで決められた15秒間隔（海の中に1分以上いて浮上した

場合のみの例外。通常は45秒間隔)を開け、次の送信を行う。

データは、過去の未送信データからではなく、常に最新のデータから送信可能となる度ごとに送信する。また、ウミガメ類に搭載可能な小型・省電力な機器では、アルゴス衛星通信において、双方向通信は困難であり、ロガーからの送信のみとなり、ロガーは送信が成功したかは判断できない。このため、生物から切り離して水面に浮上後、安定して通信が可能なポップアップ型では一般的に同じメッセージを複数回送信することも行われることがあるが、生物に装着したまま送信する今回のロガーでは、1回送信のみで常に最新のデータが優先的に回収できるようにする。

送信データの構成として、次の2タイプ考えられる。

(1)エラー訂正なしタイプ

1つの送信データに1回の位置データと分類結果のデータ、センサ計測データをすべて格納するタイプである。このタイプは、1回の送信データの回収に成功すれば、1セットのデータを得ることができるが、送信データ量の限度から、送信データのエラー訂正のコードを入れ込むことは困難であり、送信データの回収に成功しても、正しいデータが得られない場合が多くなる。

(2)エラー訂正ありタイプ

1つの送信データに1回の位置データのみ、または分類結果のデータ・センサ計測データのみと、2パケットにデータを分ける場合である。この場合、エラー訂正コードを入れ込むことが可能であり、データを回収した場合において、正しいデータを復元できる可能性が高くなる。

ロガーをアオウミガメに装着した際の送信回数は、アオウミガメの浮上回数に依存するため事前に見積ることは難しいが、ロガーは、上記の設定で、仮に送信がないと仮定した時は、消費電力として、連続14日間、運用できるように設計する。エラー訂正ありの送信タイプは、音源分類とGPS測位のタイミングは同じではないため、音源分類を行った前後1時間以内の最新のGPS測位点を、その音源分類を行った位置とする。

3-2 音源分類モデルの改良

完全量子化モデルによるシミュレーションによる精度検証の結果、精度はTop1モデルにて、レベル3分類にて、正解率0.95であった。再現度、適合度、F値の詳細を表1に示した。

完全量子化モデルのデータサイズは以前と変わらず363kByteであり、ロガーに搭載可能であった。

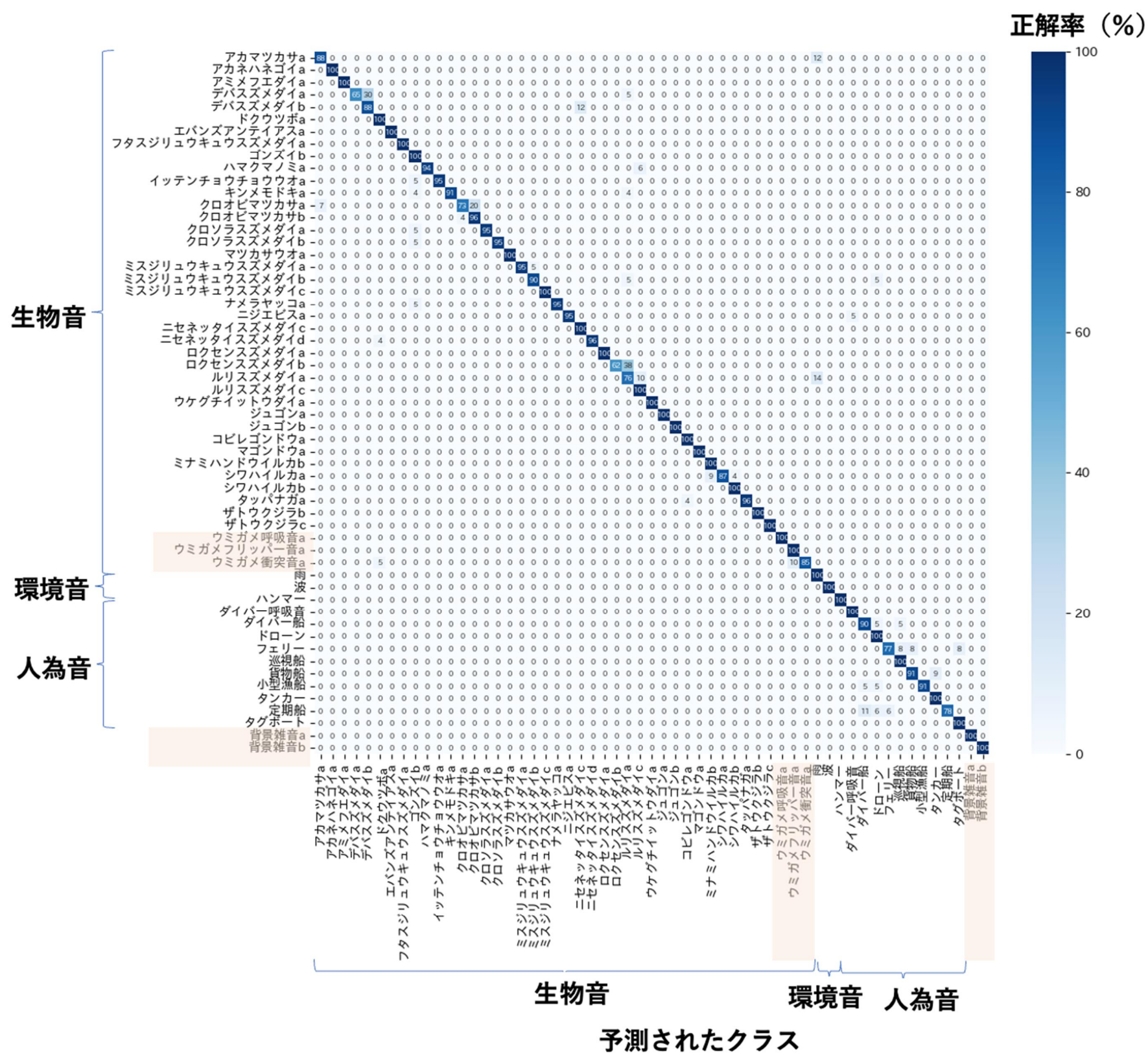
レベル3の混同行列を図3-2-7-21に示した。

ローガーを用いて野外で精度検証結果、レベル3分類にて、魚類音で誤検出が多い傾向があるものの、正解率0.71であった（図 3）。

再現度、適合度、F値の詳細を表 1に、混同行列を図6-3-3に示した。

表 3-2-7-10 PC 上でのシミュレーションと野外試験における
完全量子化モデルによるレベル 1、レベル 2、レベル 3 の分類精度
(再現度、適合度、F 値)

		再現度	適合度	F 値
シミュレーション	レベル1	0.97	0.97	0.97
	レベル2	0.98	0.97	0.97
	レベル3	0.95	0.96	0.95
野外試験	レベル1	0.90	0.88	0.87
	レベル2	0.88	0.95	0.89
	レベル3	0.53	0.55	0.67



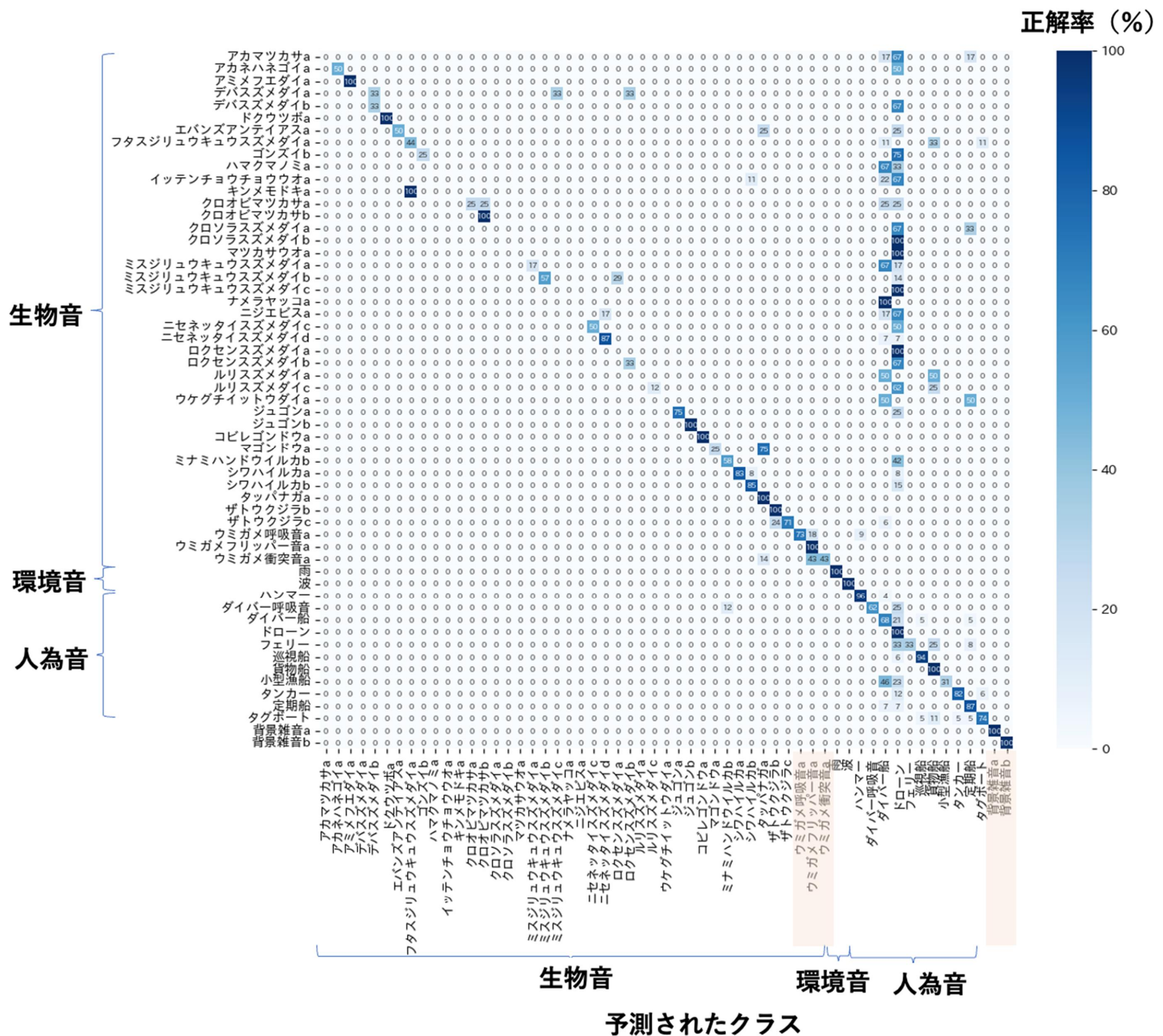


図 3-2-7-22：完全量子化した TensorFlow Lite モデル (Top1)
 によるレベル 3 分類精度の混同行列 (野外試験)
 オレンジのクラスを除くとサウンドスケープ録音機
 (52 音種：アクアサウンド社) と同一の音種構成となる。

3-3 アオウミガメを用いた装着実験

開発したLPWAロガーをアオウミガメに装着した（図3-2-7-23）。

2022年度は、6個体のアオウミガメからアルゴス衛星通信を介して、合計319点、データを回収することができた(表3-2-7-11)。そのうち、正しいデータが回収できたのは229点であり、アルゴス衛星通信の成功率は、71.8%であった。ロガー装着したアオウミガメを放流した後、追跡日数の平均は6.5日であり、合計の追跡日数は38.7日間であった。

エラー訂正ありタイプは適用した3個体で合計87点の有効データ数、エラー訂正なしタイプは、3個体で合計142点の有効データ数であった。アルゴス衛星通信の成功率は、エラー訂正ありタイプは、センサデータは94.1%、位置データは90.7%であり、エラー訂正なしタイプは、センサデータ・位置データともに63.1%であった(表3-2-7-12)。



図 3-2-7-23 衛星通信ロガーを装着したアオウミガメ

表 3-2-7-11 衛星通信ロガーを装着したアオウミガメと
回収したデータ数および追跡日数

個体ID	SCL	SCW	放流場所	ログ数	有効データ数	追跡日数
ID15	57.9	61.1	石垣・水研	67	42	8.2
ID16	64.1	52.0	黒島北西	40	37	5.8
ID17	67.0	56.9	黒島北西	43	24	7.5
ID18	76.5	61.1	黒島北西	47	45	8.8
ID19	71.7	57.4	黒島北西	115	76	8.4
ID20	70.0	55.5	黒島北西	7	5	0.1
合計				319	229	38.7
平均	67.9	57.3		53.2	38.2	6.5
標準偏差	6.5	3.5		35.9	23.6	3.3

表3-2-7-12 衛星通信ロガーの送信タイプごとのデータ数の比較

タイプ	エラー訂正ありタイプ				エラー訂正なしタイプ	
個体ID	センサデータ		位置データ		センサ+位置データ	
	ログ数	有効データ数	ログ数	有効データ数	ログ数	有効データ数
ID15					67	42
ID16	22	20	18	17		
ID17					43	24
ID18	26	25	21	20		
ID19					115	76
ID20	3	3	4	2		
合計	51	48	43	39	225	142
平均	17.0	16.0	14.3	13.0	75.0	47.3
標準偏差	12.3	11.5	9.1	9.6	36.7	26.4
Argosの通信成功率		94.1%		90.7%		63.1%

2023年度は、5個体のアオウミガメからアルゴス衛星通信を介して、合計1010点、データを回収することができた(表3-2-7-13)。そのうち、正しいデータが回収できたのは810点であり、アルゴス衛星通信の成功率は、80.2%であった。

ロガー装着したアオウミガメを放流した後、追跡日数の平均は15.4日であり、合計の追跡日数は77.2日間であった。

表 3-2-7-13 衛星通信ロガーを装着したアオウミガメと
回収したデータ数および追跡日数

個体ID	SCL	SCW	放流場所	ログ数	有効データ数	追跡日数
ID03	69.6	57.3	新城島西	264	222	14.0
ID04	60.8	51.4	新城島西	178	135	15.5
ID05	72	61.3	新城島西	226	189	15.9
ID06	76.5	64.7	新城島西	169	126	15.8
ID08	76.4	62.6	新城島西	173	138	16.0
合計				1010	810	77.2
平均	71.1	59.5		202	162	15.4
標準偏差	6.4	5.3		41.6	41.6	0.9

5個体から合計538回の音源分類データが得られた。Top1で観測された分類クラスのうち、ドクウツボとフタスジリュウキュウスズメダイがそれぞれ34.8%、14.7%と合計で50%近くの観測を占めていることがわかった。ドクウツボの観測は夜間に多く、フタスジリュウキュウスズメダイは日中に多い傾向があった（図 3-2-7-24）。

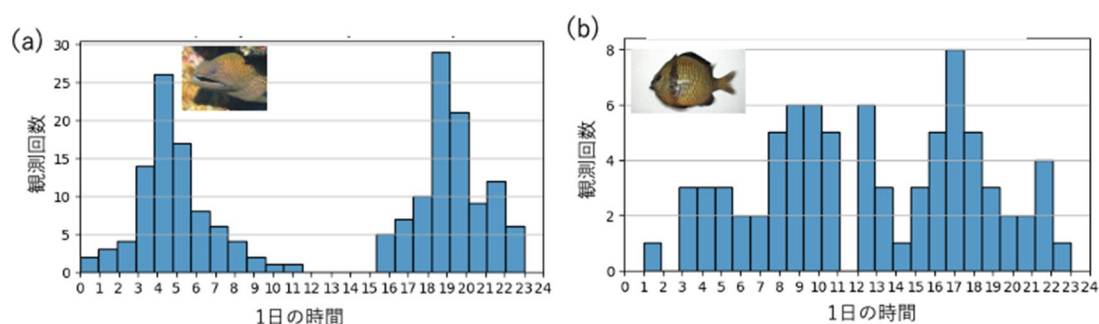


図3-2-7-24 衛星通信ロガーから回収したTop1観測の多い2種類の1日の時間と観測回数 (a) ドクウツボ、(b) フタスジリュウキュウスズメダイ

4. 考察

当初の目標である 5 kg以下のサウンドスケープ観測用衛星通信ロガーを開発することができた。音源分類の対象の音種を 57 に増やし、アオウミガメの行動に起因するデータを学習させることで、分類モデルの改良を行った。改良した分類モデルを用いて、野外の実際のノイズがある環境下において精度評価を行った。分類モデルは、魚類音で誤検出が多い傾向があるものの、レベル 3 の正解率として 70%以上あった。当初の予定のレベル 3 分類で正解率 70%以上を目標としており、それを達成できたと考えられる。

LPWA 通信だけではなく、アルゴス衛星通信においてもデータ回収に成功した。2022 年度の実験において、アルゴス衛星通信の成功率は、エラー訂正ありタイプとエラー訂正なしタイプでは、エラー訂正なしタイプが 60%であるのに対し、エラー訂正ありタイプが 90%以上と高いことから、エラー訂正ありで送信することが、限られた送信回数で確実にデータ回収する点においてメリットがあることがわかった。このため、2023 年度の実験においては、すべてエラー訂正ありで送信することとした。

2022 年度の実験では、どちらのタイプのロガーも予定の運用期間より短く（平均 6.5 日間）、通信が止まっていることが考えられた。その理由の 1 つとしては、時間が経過するにつれて、Salt-Water スイッチの電極に藻が繁茂することによって覆われ、空中にロガーが露出したことを正しく認識できなくなった可能性が考えられた。

2023 年度の実験では、船底塗料を塗布し付着生物を防除することを行い、運用期間は平均 15.4 日と、バッテリー消費として、設計通りの観測期間を達成することができた。このため、実際に船底塗料を塗布し付着生物を防除する効果があったと考えられる。

アオウミガメから得られた音源分類の結果、ドクウツボの観測は夜間に多く、フタスジリュウキュウスズメダイは日中に多い傾向があり、これはドクウツボの夜行性であること²⁾、フタスジリュウキュウスズメダイが昼行性であること³⁾に一致する結果であると考えられた。この点は、アオウミガメを用いた観測を通して、サウンドスケープを観測できた重要な結果とみなすことができる。

LPWA 通信は、携帯電話網を利用しているが、携帯電話の基地局は海上にはなく、海上では陸上に設置した電波塔へ通信することとなる。海上エリアの通信域は、NTT ドコモでは、沿岸 10~20km 程度である⁴⁾。一方、アルゴス衛星については、外洋域をカバーしている⁵⁾。LPWA 通信とアルゴス衛星通信のどちらのロガーを用いるかは、沿岸域のみでの利用か、沿岸域だけではなく外洋域を含めた利用かによって変えることが有効であるということが出来る。

参考文献

- 1) <https://static.wildlifecomputers.com/Micron-Antifouling-Protocol.pdf>
- 2) Bshary, R., Hohner, A., Ait-el-Djoudi, K., & Fricke, H. (2006). Interspecific communicative and coordinated hunting between groupers and giant moray eels in the Red Sea. *PLoS biology*, 4(12), e431.
- 3) Chase, T. J., Pratchett, M. S., & Hoogenboom, M. O. (2020). Behavioral trade-offs and habitat associations of coral-dwelling damselfishes (family Pomacentridae). *Marine Ecology Progress Series*, 633, 141-156.
- 4) NTT ドコモの石垣島周辺の通信エリア
<https://www.docomo.ne.jp/area/servicearea/?rgcd=09&cmcd=5G&scale=250000&lat=26.208482&lot=127.682789>

5) アルゴス衛星の通信エリア

<https://www.webpages.uidaho.edu/wlf314/labs/Argos%20System%20Description.pdf>

4. 委託業務全体の成果

4.1 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)や、目標を超える成果

- 1) 現地調査等において、魚種ごとにその映像と鳴音を、「めいおん図鑑」としてホームページで公開した。この研究で鳴音を収集するために、実験に供した魚類 272 種のうち 57 種 (82 音種) から鳴音を収集することができた。

その内容は現場で撮影した写真を用いて、鳴音の有無、魚種名(分類上の位置、学名)、生態情報(体長、分布、生息場、利用)、鳴音がある場合には波形、スペクトログラムを 1 ページにまとめ、公開した。

これほど多くの種類を網羅した海洋生物の音声情報アーカイブを作成する試みは我が国では初めてである。サンプリング海域がサンゴ礁域に偏っているが、これを温帯域から亜寒帯域まで広げることができれば、生物多様性や水産資源の遠隔監視に資するデータベースとなり得る。英語で表記し、論文を国際誌に掲載すれば、各国の水中生物音響の研究者が参照し、より大きく使い勝手の良いデータベースに発展すると期待される、との専門家の評価を得ている。

- 2) 本研究で開発した生物装着型ロガーは、深層学習を用いて音響を分類し、生物が海上に浮上時にデータ通信を行うバイオリギング装置としては、世界初のシステムと考えられる。音響情報のような複雑なデータをエッジ処理して伝送する手法は、陸上で普及している小型低消費電力のセンサーネットワークを海洋にも広げる嚆矢となるであろう。
- 3) 自由遊泳するアオウミガメをプラットフォームとしたことによって、音響機器の設置が困難な空間において観測が可能となり、定点に設置した観測機器と組み合わせることによって、沿岸域を広く網羅する音響観測網を構築して、魚類の鳴音や人為音のマップ化ができた。
- 4) 鳴音・映像の同時収録用機材の製作や水槽実験のノウハウの蓄積は、研究実施に不可欠であった。一見簡単そうに見える水中録音も、深層学習による教師データとして使用できる質を担保するための工夫が必要であり、試行錯誤によって得られた預期せぬ成果とみなすことができる。
- 5) カメラを装着したデータロガーを開発するに当たり、当初はアオウミガメへの装着のみを計画していたが、最終的には音源ライブラリ収集を目的とした海底への固定式カメラとしても活用された。こうした応用は、2024 年 3 月に東京で開催された国際バイオリギングシンポジウムでも注目を集め、海外からの問い合わせや協力要請を多数受けた。

また、生物搭載型ロガーに搭載する音響処理機能に関しては、計画では ASIC 分類アルゴリズムを組み込んで、音源分類することを想定していたが、ASIC を採用すると教師データの増加に伴うモデルの改良を行うことが難しいことから、最終的には、AI モデルを搭載可能なマイコンによって音源分類を実現した。

その結果、ASIC と比較して、モデルの改良を容易に行うことができるようになった。また、ASIC とは異なりマイコンは安価な価格で市場流通しており、本研究の成果を第三者が容易に活用できる結果となった。

4.2 研究課題の発展性(間接的成果を含む)

- 1) 本研究の成果の一部(潜水による現地調査)について、日本水中科学協会のシンポジウムにおいて発表したところ、魚介類が鳴音を発することを知らない愛好者が多くおり、今後、スキューバダイビングの楽しみ方が広がるのではないかとの評価を得ている。また、支援技術として開発された長時間音源・映像収録装置は、スキューバダイビング愛好者にとって、新たな興味の対象の広がりにつながる、水中音源・映像収録機器として注目された。
- 2) めいおん図鑑は種ごとの音声の記載である。これを発展させ、種や個体内でのバリエーションを含む複数のデータを蓄積し共用すれば、対象生物判別のための教師データとして有用である。データの拡充方法として、新たに温帯域や亜寒帯域での発音生物モニタリングプロジェクトを立ち上げるほか、2)に記載したマルチモーダルな録音機を配布し、市民の協力を得て、プロジェクトではカバーしきれない地域の水生生物鳴音と映像を同時に収録することにより、我が国周辺の発音水生生物のカバー範囲が一気に広がることが期待される。
- 3) 生物装着型ロガーについて、海外の研究者から問い合わせきている。国際誌への論文掲載をすすめ、科学者の信頼を向上させることで、いずれは製品化される可能性がある。
- 4) 本研究で開発したバイオリギング用サウンドスケープ観測機は小型であることから、動物だけではなく、研究者が手に持って観測したり、AUV 等にも装着できる可能性がある。今後、幅広いプラットフォームを用いた観測により、生物多様性の評価、人間活動による生態系への影響評価など、様々な用途へ活用できると期待される。

4.3 研究成果の発表・発信に関する活動

- 1) めいおん図鑑を Web サイト上で公開した。 (<https://www.meion-zukan.com>)
- 2) やいまの魚^{いよ}は石垣島の方言を採用して命名し、長期実験における情報発信において、名蔵湾、ヨナラ水路、黒島西で前日に記録された鳴音のうち、上位 10 種の魚類の鳴音をホームページ上に公開した。魚種名をクリックすると、めいおん図鑑にアクセスすることができ、鳴音を聞くことができよう工夫したものである。事前に石垣市および竹富町の教育委員会に協力を得るべく説明していたが、公開の時期が遅れたこと、ブイの流出事故が発生したこと等の理由から、アンケートによる学童等の利用状況調査を実施することができなかった。

- 3) 本研究における現地調査、水槽実験、機器開発等研究成果の一部を分かり易く取りまとめ、学童等に対して海の生物を観察する楽しさを伝えることを目的とした15分もののDVDを作成した。今後、これを沖縄県教育委員会とも協議しつつ、県下の小中学校へ配布して、海を知り、海の生物に興味を持ってもらうための教材としての活用を考えている。

5. プロジェクトの総合的推進

5.1 研究実施体制とマネジメント

- 1) 研究実施者の所属する機関が異なること、しかも地理的に遠隔地を含むことから、進捗状況を確認すること、意思疎通を図る意味で、WEB 会議方式による研究実施者会議を開催した。
- 2) 研究代表者が研究実施者の所属する機関を訪ね、最低年 1 回は全員で話し合う場を設け、研究経過の確認と意思の疎通を図った。また、研究実施者と研究アドバイザーを含めた現地視察を行うことで、データ収集の困難さや可能性についての認識を共有し、対応策の立案につなげた。

5.2 経費の効率的執行

- 1) 研究担当者会議と委員会を同時に開催するようにした。
新型コロナウイルス感染症の流行が始まってから、会議の開催が難しい状況が続いたので、参加者が同じ会議は同時開催し、また、WEB 会議を採用することによって、経費の効率的執行に努めた。
- 2) 現地調査においては、必要最小限の人数にとどめ、経費の効率的執行を図った。

6. まとめ、今後の方向

海中サウンドスケープ観測システムの開発研究委員会における各委員からの指摘場は次のとおりである。

- 1) 音源分類アルゴリズムの信頼性の向上が今後の課題である。そのためには、音源種のラベルが付けられた教師データの充実と、適切な類別手法の選択が重要である。
- 2) データの特徴によって識別の難易度は異なる。

ドクウツボ鳴音など、スペクトログラムが特徴的でかつバリエーションが少ないものは識別が容易であるが、哺乳類の鳴音はバリエーションが多いので難しい。また、近縁種は似た音声を発するものも多く、その類別も難しい。現状は、2000 年代初頭の人間の音声認識技術に近い。大規模言語モデルにより自然言語認識が急速に精度向上したように、海洋生物の音声においても大規模なラベル付けデータの整備により類別精度が向上すると見込まれる。

- 3) 令和 5 年度長期実験ではジュゴン鳴音が大量に識別されていたが、今後検討するために専門家へ検証のためデータを提供して、検証を進めることとし、精度の向上を図る必要がある。特に、存在しない種を検出したとする割合である誤警報率を減らす必要がある。一方でこれを減らすと正しい検出率も減少する。希少生物を対象とする場合には、正しい検出率を下げて誤警報率を 0 に近く設定する必要がある。一方で、多数生息する地域の代表種や漁獲対象種であれば、正しい検出率を上げ、見逃しを減らして生物量推定に用いる方が有効である。目的とする類別対象に応じて、精度を適切にコントロールできるようになるには、今後もデータの蓄積が必要である。
- 4) 本研究で取得した資料は、研究者にとっては非常に重要なものであることを認識し、研究終了後の保管体制を検討する必要がある。大規模データモデルを構築するためには、もはや単独のプロジェクトでは不十分である。現在進行しているあるいは今後立ち上がるプロジェクトと横のデータ連携を進め、類別能力を高めていくことが重要である。データ連携に当たっては、全てを公開するのではなく、秘密保持契約を結んだ上で類別エンジンを開発するとよい。一方でその類別結果は広く共有してもかまわない。ChatGPT に代表される生成可能な事前学習済み変換器を駆動するデータやアルゴリズムは公開されていないが、その恩恵は誰もが受けられる。水中音響類別技術の将来像もこのような形になるのではないか。

以上のような専門家の意見を踏まえ、一般社団法人全国水産技術協会を研究代表機関とする令和 6 年度安全保障技術研究推進制度による研究課題として、「海中広域監視に向けた低周波音響計測システム開発の基礎研究」を提案した。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表の状況

種別	件数
学術論文	1 件
学会発表	14 件
展示・講演	3 件
雑誌・図書	1 件
プレス	1 件
その他	なし

(2) 知的財産権等の状況

発明の名称	発明者	出願登録区分	出願番号 (出願日)	出願区分	出願国	登録番号 (登録日)
計測装置	野田 琢 嗣・小泉 拓也 (Biologging Solutions Inc.)	出願	特 願 2021- 153238 (令和 3 年 9 月 21 日)	国内	日本	

(3) その他特記事項

海中サウンドスケープ観測システムの開発研究委員会の開催状況は次のとおりである。

年月日	開催の名称	実施場所
令和2年1月28日	令和元年度第1回委員会	東京
令和2年3月23日	令和元年度第2回委員会	京都
令和2年10月9日	令和2年度第1回委員会	東京
令和2年12月16日	令和2年度第2回委員会	京都
令和3年3月26日	令和2年度第3回委員会	紙上開催
令和3年7月6日	令和3年度第1回委員会	東京
令和3年11月12日	令和3年度第2回委員会	東京
令和4年3月8日	令和3年度第3回委員会	東京
令和4年7月13日	令和4年度第1回委員会	石垣
令和4年12月6日	令和4年度第2回委員会	京都
令和5年2月9日	令和4年度第3回委員会	東京
令和5年8月25日	令和5年度第1回委員会	神戸
令和6年2月14日	令和5年度第2回委員会	Web
令和6年3月12日	令和5年度第3回委員会	東京