論文

ニベ科魚類鳴音の自動抽出法の検討

宮島(多賀)悠子(水産研究・教育機構水産工学研究所 / 旧 水産総合研究センター水産工学研究所)*^{1,†},
赤松友成(水産研究・教育機構中央水産研究所 / 旧 水産総合研究センター中央水産研究所)*²,
松尾行雄(東北学院大学)*³, 高橋 牧, 松崎広和, 新島啓司((株)イーアンドイーソリューションズ)*⁴
(2015年11月21日原稿受付)

Abstract:

This study tried to determine robust detection criteria for the croaker's pulse-structure sound, using field recordings in WAV, WMA, and MP3 formats. Acoustic analysis results identified four temporal parameters and one frequency parameter as sound features. These feature quantities depended on the season of the year, not the file format. We created an automatic filter for croaker-sound detection using fixed-width ranges of these five parameters, and automatically detected sounds from identical fish-sound files, or the same files with noise. We also examined the correct detection (CD) and false alarm (FA) rates of the automatic detection. Without any noise mixing, it showed fair performance, e.g., 0% FA. Once noise was mixed, however, the CD reduced in accordance with the signal-to-noise ratio. However, the FA level remained constant (no more than 4.5%).

Classification: 水産音響・バイオアコースティクス

Keywords: 魚類鳴音, 受動的音響観測

1. はじめに

受動的音響観測(PAM; Passive Acoustic Monitoring)は, 声を発する生物の調査手法であり, とくに水中で一生を過ごす鯨類の観察に広く用いられている¹⁾. 近年では, 水中で発せられた鯨類の鳴音を録音することにより, 存在確認だけでなく, 種判別²⁾や行動計測³⁾を行うことが可能となった. さらに小型鯨類では, PAMを利用し

た分布推定法や, 密度⁴⁾や資源量の推定モデル⁵⁾が開発されている.

発声行動を行う水生生物は, トラフグ *Takifugu rubripes*, カワハギ *Stephanolepis cirrifer*, ホウボウ *Chelidonichthys spinosus*, スケトウダラ *Theragra chalcogramma*⁶⁾ やイセエビ *Panulirus japonicus*⁷⁾ といった魚類や甲殻類などの漁獲対象種でも多数確認されている. これらの水産生物は,

The Study of Automatic Detection of Croaker Sounds

* 1 Yuko MIYAJIMA-TAGA (National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency)

* 2 Tomonari AKAMATSU (National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research Agency)

* 3 Ikuro MATSUO (Tohoku Gakuin University)

* 4 Maki TAKAHASHI, Hirokazu MATSUZAKI, Keiji NIIJIMA (E&E Solutions Inc.)

† taga0620@affrc.go.jp

中層に生息するスケトウダラを除き、底生生活を送るものがそのほとんどを占める。底生の水産生物の場合、計量魚群探知機や計量ソナーといった能動的音響装置を用いての資源量の把握は困難である。また岩礁域に生息する種も多いが、これらにおいては漁網を用いた資源量調査も難しい。このため、発声行動を行う底生水産生物においては、これまで資源量が十分に把握されてこなかった種が多いと考えられる。

これらの理由から、PAMを用いた水産生物の存在確認や資源量推定法の開発が期待される。しかしながら、魚類や甲殻類の海洋における資源観測にPAMはほとんど利用されておらず、これまで魚類においては、スケトウダラにおける鳴音特性や発音機構の研究、および繁殖行動における発音パターンの観察といった一部の先駆的研究を除き^{8,9)}、定性的な報告があるに過ぎない。魚類の鳴音で資源調査を行うためには、季節や成長段階ごとの個体の発声頻度の把握などに加えて、膨大な録音データの中から、魚類鳴音を自動で抽出する方法を確立することが求められる。魚類鳴音は可聴域にある^{10,11)}ために環境雑音の影響を受けやすいと考えられるが、存在しない資源を存在すると検出する危険を排除するため、誤警報率(環境雑音などの非鳴音を鳴音として誤抽出する確率)を十分に小さく抑えることが、鳴音の自動抽出において極めて重要となる。そこで本研究では、資源量推定の前段階として、魚類鳴音のみを確実に抽出する手法を示すことを目的とした。

我々はニベ科魚類をモデル生物とし、特に観測時期や録音形式、雑音混入状況に着目して、鳴音の音響的特徴を利用した自動抽出フィルターの設計を目指した。ニベ科魚類は、発声行動を示す代表的な底生魚であり、繁殖期にパルス構造のグウと聞こえる太鼓状音を盛んに発することが知られる¹⁰⁾。松尾ら¹¹⁾はニベ科魚類の鳴音を自動抽出する手法として、鳴音の振幅と持続時間の情報を用い、それらの最適抽出幅を定める方法を提案した。彼ら¹¹⁾は、バンドパスフィルタにより、鳴音に依存

した周波数成分のみを抽出することで、野外観測において避けることのできない環境雑音の影響を最小限に抑えた。また抽出した鳴音に対して、ローパスフィルタによる平滑化を行うことで、鳴音の持続時間を計算した。しかしながら、環境雑音は鳴音と同様の周波数帯にも広く存在しており、これらが鳴音の抽出効率に与える影響については具体的に示されていない。これに加えて野外長期観測においては、録音機器のメモリサイズ制限があるために圧縮形式での録音が不可欠であるが、WMA形式やMP3形式といった圧縮形式は非可逆圧縮であり、圧縮したデータを解凍しても、元のデータを完全には復元することはできない。一方で、魚類鳴音の周波数帯のある可聴域においては、鳴音の音響特性の値(特徴量)が変化するような違いが圧縮によって生じる可能性は低いと思われるものの、圧縮形式が鳴音の特徴量に与える影響については実際に検証されていない¹¹⁾。また、長期におよぶ野外観測においては、鳴音の音響的特徴に季節変化が生じる可能性があり、これが鳴音の振幅や持続時間、ひいては自動抽出効率に影響を与えることも考えられるが、この点についても考察されていない。そこで本研究では、ニベ科魚類の鳴音の音響解析を行い、その音響的特徴を明らかにするとともに、圧縮形式や観測時期がこれらに与える影響を評価した。そして松尾ら¹¹⁾の自動抽出法を基礎とした、ニベ科魚類鳴音の音響的特徴を利用した新たな自動抽出フィルターを設計し、フィルターの抽出効率の評価を行うとともに、環境雑音が抽出効率に与える影響についても検討した。

2. 野外観測

2.1 観測地点と観測期間

茨城県鹿島沿岸に6つの観測点(St. 1–6, Fig. 1)を設定し、2013年9月から2014年9月にかけての6期間(Table 1)において、各定点の海底面上約2mに独立型水中音自動録音装置AUSOMS-mini(株式会社アクアサウンド、京都)を設置することで水中音を観測した。各観測点の水深は、そ

Table 1 Sample date, recording time and number of visually extracting fish sound of each recording type.

Term	Sample date		Recording time			Number of visually extracted fish sounds		
	Start date	End date	WAV	WMA	MP3	WAV	WMA	MP3
2013-Sep	9/20	9/29	0:00–1:59	2:00–23:59	—	50	70	—
2013-Nov	11/15	12/6	0:00–3:59	4:00–23:59	—	—	—	—
2014-Jan	1/17	2/7	0:00–1:59	2:00–23:59	—	—	—	—
2014-Apr	4/9	4/23	0:00–1:59	—	2:00–23:59	—	—	—
2014-Jun	6/10	6/22	0:00–2:59	—	3:00–23:59	30	—	40
2014-Aug	8/19	9/1	17:30–20:29	—	20:30–6:29	80	—	80

Fig. 1 Sound-recording points in Kashima, Ibaraki, Japan. The latitude and longitude of each point were: Site 1 (N 35.8995°, E 140.7369°), St. 2 (N 35.9045°, E 140.7472°), St. 3 (N 35.8732°, E 140.7489°), St. 4 (N 35.8757°, E 140.7544°), St. 5 (N 35.8754°, E 140.7594°), and St. 6 (N 35.8804°, E 140.7647°).

れぞれ 10 m (St. 1), 20 m (St. 2), 5 m (St. 3), 10 m (St. 4), 15 m (St. 5), 20 m (St. 6) であった。観測期間は、録音装置の電池電力により制限された。

2.2 録音形式

AUSOMS-mini の水中マイクの測定周波数範囲は、40–21000 Hz (−210 dB re 1 μPa/V 以上) であり、録音システムの測定可能音圧レベルは約 70–160 dB re 1 μPa である。録音機の記録媒体は 32 GB の microSD と 4 GB の内蔵フラッシュメモリからなるが、メモリサイズが限られるため、無圧縮形式のみでの長期間の野外連続録音を行うこと

はできない。そこで、無圧縮の WAV 形式と、圧縮形式の一つである WMA 形式または MP3 形式とを組み合わせ、連続的に録音した (Table 1)。無圧縮形式 (WAV) のサンプリング周波数は、44.1 kHz, 16 bits とした。圧縮形式のサンプリング周波数はすべて 44.1 kHz とし、ビットレートはそれぞれ、32 kbps (WMA) と 64 kbps (MP3) とした。圧縮形式の録音データについては、WAV 形式 (サンプリング周波数: 44.1 kHz, 16 bits) に変換してから、以降の解析に用いた。以下、WAV 形式に変換した WMA 形式、MP3 形式のデータも、本論文では便宜上 WMA 形式、MP3 形式と呼ぶこととする。

2.3 野外録音データ

各観測期間において、10–22 日間の野外録音データが得られた (Table 1) が、AUSOMS-mini の流失や漏水などによって一部の観測点のデータが欠損した。得られた野外録音データを Adobe Audition CS6 (Adobe Systems, Mountain view, CA, USA) 上で表示した結果、2013-Sep, 2014-Jun, 2014-Aug の夕方から夜間にかけて、松尾ら¹¹⁾で報告されたニベ科魚類鳴音と類似したパルス音が観察された (Fig. 2)。

3. 鳴音データの作成

3.1 視覚抽出鳴音

自動抽出フィルターを作成するには、まず鳴音の音響的な特徴を明らかにする必要がある。このため、Adobe Audition CS6 上で野外録音データの波形およびソナグラフを確認しながら、観測期間ごと (2013-Sep, 2014-Jun, 2014-Aug), 圧縮形

Fig. 2 Waveform and spectrogram of a typical croaker sound recorded in WAV format, after band-pass filtering from 400 to 2400 Hz (Blackmann–Harris window and 512-point FFT size). The 1st peak frequency (PKF) and average inter-pulse interval (IPI) of this sound were 681 Hz and 0.016 sec, respectively.

式ごと(WAV, WMA, MP3)に、鳴音を視覚的に切り出した(以下、視覚抽出鳴音、Table 1)。鳴音の音響的特徴が観測時期によって変化する可能性を考慮し、2013-Sep, 2014-Jun, 2014-Augの、それぞれの録音開始日(start date)および録音終了日(end date)直近の野外録音データから、各観測点でそれぞれ最大10鳴音を、手動で切り出した。解析に供する鳴音は、鳴音が相互に重ならず、かつ雑音ができる限り混ざらない、明瞭に録音されたものを選択した。ただし、明瞭に録音された鳴音が1観測点で10個に満たない場合は、明瞭に録音された鳴音のみを抽出した。

3.2 評価用データ

自動抽出フィルターを野外長期録音データに適用する場合、どの時期の鳴音においても、まねばなく抽出できることが求められる。本研究では、ニベ科魚類の繁殖期(6, 7–9月)^{12,13)}の開始期(2014-Jun)、終了期(2013-Sep)、および繁殖中期(2014-Aug)のすべての期間で野外録音を行ったのは、WAV形式においてのみであった。そこで、自動抽出フィルターの抽出効率の把握のため、WAV形式の視覚抽出鳴音(160鳴音)をすべて含む、評価用データを作成した。データ作成の際に、鳴音と鳴音とが連続しないよう、鳴音間には適切な背景音区間を挿入し、3分間の長さとなるように調整した。挿入した背景音は静穏な室内で録音した環境音とし、その雑音レベルは、106.3 dB re 1 μ Paであった。

3.3 環境音混雑データ

野外録音データには、魚類鳴音以外にも録音機への係留索などの衝突音や、船舶音が多数録音されていた。これらの環境音が鳴音の自動抽出効率に与える影響を評価するため、評価用データに、WAV形式の野外録音データから抽出した衝突音または船舶音(各7分間、Fig. 3)を混雑させた環境音混雑データを作成した。混雑させた環境音の平均絶対音圧レベルは、衝突音で135.4 dB re 1 μ Pa、船舶音で143.4 dB re 1 μ Paであった。ただし、環境音は、魚類鳴音の入っていないものを選んだ。環境音の混雑レベルは、元ファイルの振幅の25%, 50%, 75%, 100%および200%とし、Adobe Audition CS6のミックススペース機能を用いて、振幅の単純な加算演算により、上記の環境音を混雑させた。これら環境音混雑データに対して、前節で作成した評価用データは環境音混雑0%と定義した。

4. 鳴音の音響解析

4.1 方法

4.1.1 持続時間

すべての視覚抽出鳴音を対象に、音響的特徴を構成する可能性のあるいくつかの音響特性の値を計算した。事前聴取の結果、鳴音の周波数帯域は3 kHz以下が主であった。一方で野外録音データには、400 Hz以下の周波数帯に環境音が強く混入していた。このことから松尾ら¹¹⁾と同様に、環境雑音を排除するために、400 Hzから2400 Hz

Fig. 3 Waveform and spectrogram of mooring noise (upper) or ship noise (lower) after band-pass filtering from 200 to 2400 Hz (Blackmann–Harris window and 2048-point FFT size).

のバンドパスフィルタを鳴音データに適用した (Fig. 4(a)). 続いて松尾ら¹¹⁾の方法に従い、ヒルベルト変換を行い、バンドパスフィルタ出力パターンから包絡パターンを計算した (Fig. 4(b)). 鳴音は複数のパルスから構成されており、これらを一つの鳴音として切り出すために、8 Hz をカットオフ周波数とするローパスフィルタを用いて、包絡パターンに対して平滑化を行った (Fig. 4(c)). この平滑化されたパターンに対して、音圧閾値以上の時間範囲を1つの鳴音として抽出し、その時間長を鳴音の持続時間 (Duration, 以下 DUR) として計算した. DUR の計算のための音圧閾値は、手動で切り出した鳴音の持続範囲での平滑化されたパターンの平均値とし、個々の鳴音ごとに定めた¹¹⁾.

4.1.2 パルスの時系列構造

Fig. 4(b) に示すように、鳴音は周期性のパルス列となっていることから、各鳴音の包絡パターンに対して自己相関解析を行った. 相関結果のピーク時間から平均パルス間隔 (Average inter-pulse intervals, 以下 IPI) を計算し、ピークの相関値からパルスの周期性 (Periodicity, 以下 PER) を評価した. この周期時間に基づいて、包絡パターンに含まれるパルス数を構成パルス数 (Number

Fig. 4 Feature-point analysis of fish sounds. (a) Fish-sound output pattern after band-pass filtering (400–2400 Hz). (b) Envelope pattern using a Hilbert transformation. (c) Smoothed the envelope pattern using a low-pass filter (cut-off frequency: 8 Hz). The broken horizontal line indicates the threshold sound-pressure level for calculating the duration (DUR), which was the average level of the smoothed pattern while visually extracted fish sounds.

of pulses, 以下 NPK) として計算した.

4.1.3 周波数情報

スペクトル構造を評価するために, 各鳴音データに対して, 高速フーリエ変換を行い, 振幅スペクトルを計算した. 得られた振幅スペクトルから, ケプストラム解析を用いてスペクトル包絡を計算した. ケプストラム解析とは, 振幅スペクトルを逆フーリエ変換することによってケプストラム・パターンを計算し, 低時間成分(10ms 以下)のみを用いてフーリエ変換し, スペクトル包絡を計算する手続きである. このスペクトル包絡の第一ピーク周波数(1st peak frequency, 以下 PKF)を計算した.

4.1.4 音圧情報

音響解析に用いた鳴音の音圧情報として, 鳴音のピークピーク値(Peak-to-peak amplitude, 以下 PPA)を求めた. ここで, PPA は, 既知の校正信号と録音機の感度校正表を用いて, 絶対音圧レベルに換算した.

4.2 結果

4.2.1 鳴音の音響的特徴

音響解析の結果, 観測期間ごと, 圧縮形式ごとの各特徴量の中央値においては, ニベ科魚類の鳴音は 0.015–0.019 秒の間隔(IPI) からなる 7–11 個のパルス(NPK)によって構成され, DUR は 0.28–0.38 秒であり, PER は 0.49–0.61 を示した (Table 2). また, PKF は 608–805 Hz であり, PPA は 141.3–163.4 dB re 1 μ Pa を示した. これら音響解析の結果から, 鳴音の特徴となる音響特性(以下, 特徴パラメーター)を把握した. 解析に

よって得られた, 各鳴音の 5 つの音響特性(DUR, IPI, PER, NPK, PKF)の値について, 観測期間ごと, 圧縮形式ごとに, 中央値と上側(75%点), 下側四分位数(25%点)を求めた. 中央値と上側四分位数との差, および中央値と下側四分位数との差が, どちらも中央値の 1/2 以下のときを分散が小さいと定義し, これを満たす音響特性を鳴音の特徴パラメーターとした. 音圧に関わる音響特性である PPA は, 録音機器と発声個体との距離に強く依存するため, 分散が小さい場合にも鳴音の特徴パラメーターとはしなかった. その結果, すべての観測期間, 圧縮形式において, 5 つの音響特性のすべてで鳴音間の分散が小さく, 鳴音間でその値が保存されていた. すなわち, これら 5 つの音響特性(DUR, IPI, PER, NPK, PKF)は, 鳴音の特徴パラメーターとみなすことができた. ただし, パルスが同じ大きさで一定の時間間隔で繰り返している場合, $DUR = IPI \times NPK - 1$ として理論上 DUR が求められる. このため, これら 3 つの音響特性は独立ではない. しかしながら実際には, NPK は最大値を基準としたある一定値以上のパルスの数をカウントしたため, 小さいパルスはカウントされず, この関係式は必ずしも成り立たなかった. このため, これら 3 つの音響特性(DUR, IPI, NPK)すべてを特徴パラメーターとして採用した.

4.2.2 特徴量の安定性

4.2.2.1 圧縮形式が与える影響

本研究では無圧縮形式と 2 種の圧縮形式を併用したが, 周波数情報をはじめとした鳴音の特徴量

Table 2 Acoustic features of fish sounds (25% quartile range–median–75% quartile range).

Term	Recording type	Duration (DUR, sec)	Average inter-pulse intervals (IPI, sec)	Periodicity (PER)	Number of pulses (NPK)	1st peak frequency (PKF, Hz)	Peak-to-peak amplitude (PPA, dB re 1 μ Pa)
2013-Sep	WAV $n=50$	0.27–0.31–0.36	0.014–0.015–0.016	0.38–0.50–0.57	5–7–10	662–744–871	139.5–141.3–143.9
	WMA $n=70$	0.28–0.32–0.35	0.015–0.015–0.016	0.53–0.61–0.66	7–9–11	686–756–806	151.6–155.9–161.6
2014-Jun	WAV $n=30$	0.34–0.36–0.41	0.014–0.019–0.021	0.41–0.49–0.57	9–11–12	536–628–676	145.8–146.7–152.5
	MP3 $n=40$	0.34–0.38–0.43	0.017–0.019–0.020	0.51–0.57–0.67	8–9–10	540–608–662	147.0–151.5–153.9
2014-Aug	WAV $n=80$	0.27–0.29–0.32	0.015–0.015–0.015	0.48–0.53–0.57	9–10–12	615–657–738	158.8–163.4–168.4
	MP3 $n=80$	0.25–0.28–0.32	0.015–0.016–0.016	0.46–0.53–0.60	9–11–12	714–805–882	158.0–163.3–168.7

に、圧縮形式が影響を与える可能性は排除できない。そこで圧縮形式が鳴音の特徴量に与える影響を検証するため、全視覚抽出鳴音の各特徴量を、圧縮形式、観測期間の順に各階層に分割し、Nested Analysis of Variance (ANOVA)の後、Tukey's honestly significant difference (HSD) testで事後検定を行い、圧縮形式間の特徴量の差を検定した。本研究ではWAV, WMA, MP3の3形式での野外録音を同時に行っていないため、検定に用いた鳴音の観測時刻は圧縮形式によって最大で10時間ほど異なったが、同時期の鳴音においては、観測時刻によって鳴音の特徴量に変化しないものと仮定した。以降の検定においては、すべての有意水準は $\alpha=0.05$ とし、JMP ver 11.2 for Windows (SAS Institute; www.sas.com, USA)を用いて統計処理を行った。その結果、すべての特徴パラメーターにおいて、圧縮形式間に有意な差は認められなかった($p>0.05$)。観測時刻と鳴音の特徴量との関係については検証の余地が残るものの、本研究で得られた結果を見るに、圧縮形式は鳴音の特徴量に影響を与えないと思われた。

4.2.2.2 録音時期が与える影響

ニベ科をはじめとする多く魚類は、鰾の側面に接する発音筋を用いて、鰾を振動させることで発声する¹⁴⁾。タラ科魚類では、成熟の度合いや季節によって、発音筋の発達度合いが異なることが指摘されており¹⁵⁾、これにより鳴音の特徴量も変化する可能性が高い。ニベ科魚類は繁殖に伴って発声行動を行うことが示唆されているが¹⁶⁾、茨城県沖に生息するニベ *Nibea mitsukurii* においては、繁殖個体のサイズ頻度分布は時期によって大きく異なることが明らかになっており¹²⁾、繁殖開始期には大型個体のみが成熟し、繁殖期が進むにつれて小型個体が繁殖に加入する。このため、発声個

体のサイズ頻度分布は時期によって異なる可能性が高く、観測時期によってニベ科魚類の鳴音の特徴量が異なることが考えられるため、観測時期が鳴音の特徴量に与える影響についても検証した。

全視覚抽出鳴音の各特徴量について、観測期間、圧縮形式の順に各階層に分割し、Nested ANOVAの後、Tukey's HSD testで事後検定を行い、特徴量の観測期間による差を検定した。その結果、2014-Junにおいては2014-Augおよび2013-Sepに対して、DURは有意に長く、PKFは有意に低いことがわかった($p>0.05$)。そのほかの特徴パラメーターにおいては、観測期間の影響は見られなかった($p>0.05$)。これらの結果から、繁殖開始期である6月においては、他の時期と比べて鳴音は長く、かつ低くなることが明らかとなり、発声個体サイズとの関係が疑われた。録音時期が特徴量に与える影響は、圧縮形式が与える影響と比べて顕著であり、鳴音の特徴を利用した自動抽出フィルターを通年録音データに適用する際には、各季節を包含するような広いパラメーター許容範囲が必要であると言える。

5. 自動抽出フィルターの設計と抽出効率の把握

5.1 自動抽出フィルターの設計

4.2.2.1において、圧縮形式は鳴音の特徴量に影響を与えない可能性が高いことが示された。一方で4.2.2.2において、録音時期が特徴量に与える影響は、圧縮形式が与える影響と比べて顕著であることが示唆された。そこで本研究では、視覚抽出鳴音の観測期間がニベ科魚類の繁殖期間の大部分を包含していたWAV形式の音響解析結果に基づいて、ニベ科魚類鳴音の5つの特徴パラメーター(DUR, IPI, PER, NPK, PKF)の最適抽出幅をそれぞれ定めた自動抽出フィルターを設計し

Table 3 Proposed parameter set for the automatic-detection filter.

Duration (DUR, sec)	Average inter-pulse intervals (IPI, sec)	Periodicity (PER)	Number of pulses (NPK)	1st peak frequency (PKF, Hz)
0.20–0.45	0.013–0.020	0.19–0.72	1–19	441–1080

Table 4 Correct detection (CD, %) and false alarms (FA, %) of the evaluation data or noise-mixed data, using the automatic-detection filter, and the threshold sound-pressure level for sound detection (TH, times larger than the average level of the data-smoothed pattern).

Mixed noise level	Mooring noise mixed			Ship noise mixed		
	CD (%)	FA (%)	TH (times)	CD (%)	FA (%)	TH (times)
0%	47.8–49.1	0.0	1.05–3.00			
25%	45.9	0.0	1.05	45.3	0.0	1.05
50%	43.4	0.6	1.05	37.1	0.6	1.05
75%	39.0	1.9	1.05	31.0	0.0	1.05
100%	34.6	3.1	1.05	24.8	0.0	1.05
200%	27.1	4.5	1.05	9.3	1.4	1.05

(Table 3), その抽出効率の把握を行った。

DUR と PKF は観測期間の間に有意差が認められことから、すべての観測期間の鳴音をまんべんなく抽出するためには、これらのパラメーターの季節変動幅を考慮する必要がある。そこで、各特徴パラメーターの抽出範囲の上下限は、4章で得られた WAV 形式における全鳴音の特徴量の最小値から最大値までとした。ただし、外れ値は最大値と最小値の決定から除外した。ここでの外れ値は、上側四分位点+1.5×四分位範囲より大きいデータ、または下側四分位点-1.5×四分位範囲より小さいデータとし、四分位範囲は75%点-25%点とした。

5.2 環境音が混雑しない状況における抽出効率

設計した自動抽出フィルターを、評価用データに適用し、環境音混雑がない状況での抽出効率を調べた。自動抽出フィルターを適用するにあたり、抽出する鳴音の音圧閾値(TH)を定めた。THは、評価用データ全体(3分間)の平滑化されたパターンの平均値を基準とし、その1.05倍から3.00倍まで変化させた。得られた自動抽出結果は、評価用データ作成時に既知である真の鳴音を比較することで、正答率(鳴音を鳴音として抽出した確率)と誤警報率を計算した。

その結果、THをどの値に設定した場合においても誤警報率は0%であった(Table 4)。すなわち、信号の平均値レベルの1.05倍の抽出音圧閾値であっても、自動抽出された鳴音はほぼすべて、聴取者が判断した真の鳴音と一致した。一方で正答率(47.8–49.1%)は、THの上昇に伴って低下した。

Fig. 5 Relationship between the correct detection (CD) and the signal-to-noise ratio; (a) mooring noise or (b) ship noise, mixed with fish sounds in WAV-type recording data. (a) $y = 49.4 / \{1 + e^{-0.15(x-14.4)}\}$, $R^2 = 0.99$, (b) $y = 48.5 / \{1 + e^{-0.23(x-13.0)}\}$, $R^2 = 1.00$.

5.3 環境音が混雑した状況における抽出効率

衝突音や船舶音といった環境音が、鳴音の自動抽出効率に与える影響を明らかにするため、自動抽出フィルターを環境音混雑データに適用し、5.2と同様の方法で自動抽出を試みた。ただしTHは、前項で最大の正答率を示した値(1.05倍)を用いた。その結果、混雑した雑音の種類や絶対音圧レベルによらず、誤警報率はごく小さい値(0.0–4.5%)を維持した(Table 4)。これらの結果から、設計した自動抽出フィルターは、環境音の

混雑下でも誤抽出が少なく、環境音が多数含まれる野外録音データにおいても、正確な自動抽出が可能であることが示された。

一方、混雑した環境音の種類によらず、正答率と信号対雑音比(dB)とは、ロジスティック曲線によく近似され、 R^2 値は0.99–1.00を示した(Fig. 5(a), Fig. 5(b))。これらの近似曲線は、信号対雑音比が13.0–14.5dBの間に変曲点を持ち、信号対雑音比が大きくなった場合においては、正答率はおよそ50%で飽和することが示唆された。ただし、ここでの信号対雑音比は、WAV形式の視覚抽出鳴音におけるPPAの中央値を求め、この値から混雑した環境音の絶対音圧レベル(dB)を引いた値とした。

6. まとめ

本研究では、DUR, IPI, PER, NPK, PKFの5つの音響特性の範囲を指定することで、ニベ科魚類の鳴音の自動抽出を高効率に行うことができることを明らかにした。本研究で注目した特徴パラメーターは、鳴音のDURやパルスの時系列構造によるものが多く、利用した周波数情報はPKFだけであった。さらに、鳴音の音響解析の結果から、圧縮形式がPKFの値に影響を与えた様子は観察されず、本研究で扱ったニベ科魚類の鳴音は、圧縮形式に関係なく特徴を捉えることができる可能性が高いことが示された。本研究ではニベ科魚類に着目したが、多くの魚類はニベ科魚類と同様に、発音筋によって鰾を振動させるという、ごく単純なメカニズムによる発声を行うため¹⁴⁾、鳴音も紋切り型なパターンを持つものが多い。このため、周波数構造に依存しない時間–振幅情報だけでも、十分に魚類鳴音の自動抽出ができる可能性が高いと考えられる。

本研究の結果、DURとPKFは、観測期間によって有意に異なった。このことから、自動抽出フィルターの抽出幅を狭くした場合には季節による抽出力の相違が生じると予想される。発音筋の発達には、季節や成熟状況のほか、発声頻度や性別によっても異なることが報告されている^{8,14,15)}。このた

め、自動抽出フィルターを設計する際には、各季節のさまざまな鳴音データをもとに、特徴パラメーターの最適抽出幅を検討して設定する必要がある。

本研究で提案した自動抽出法では、環境音の混雑割合が大きな場合でも、自動抽出における誤警報率は5%以下であり、存在していない種が存在すると報告してしまう可能性が極めて小さいことが明らかとなった。このことから、本手法は、発音魚の存在確認において優れた特性をもっていると言える。一方で、正答率と信号対雑音比との間に強い相関があることが示唆されたことから、信号対雑音比がわかれば鳴音の抽出率がわかるため、実際に存在した鳴音数を推定することができる。この点においても、誤警報率が極めて低いことが役立つ。

漁獲調査などの他の資源評価手法に比べて、本研究で用いた定置型のPAMは、設置期間における情報が継続的に提供されることから、繁殖行動のような比較的短期間かつ特定の時刻に生じる現象のモニタリングに優れていると考えられる。また、定置型PAMを複数設置することで、資源の分布推定にも応用できる可能性を秘めている。一方で本研究では、鳴音が重畳していない場合における鳴音抽出法を示したが、ニベ科魚類のニベやシログチ *Pennahia argentata* の繁殖期である6、7–9月^{12,13)}の日没時から夜間にかけては、個々の分離が困難なほど鳴音が集中し重畳する¹⁶⁾。重畳状況における鳴音分離についてはアレイによる方位分離¹⁷⁾などさまざまな音響認識手法の適用が考えられる。海洋生物の鳴音による観測は緒に就いたばかりであり、今後の音響工学的な応用が期待される。

謝辞

本研究は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業CRESTの研究助成によって実施した。この場を借りて深い謝意を表する。

参考文献

- 1) D. K. Mellinger, K. M. Stafford, S. E. Moore, R. P. Dziak and H. Matsumoto, "An overview of fixed passive acoustic observation methods for cetaceans," *Oceanography*, **20** (4), 36-45 (2007).
- 2) S. Kameyama, T. Akamatsu, A. Dede, A. Ozturk and N. Arai, "Acoustic discrimination between harbor porpoises and delphinids by using a simple two-band comparison," *J. Acoust. Soc. Am.*, **136**, 922-929 (2014).
- 3) H. Matsumoto, C. Jones, H. Klinck, D. K. Mellinger, R. P. Dziak and C. Meinig, "Tracking beaked whales with a passive acoustic profiler float," *J. Acoust. Soc. Am.*, **133**(2), 731-740 (2013).
- 4) T. A. Marques, L. T. J. Ward, N. D. Peter and L. Tyack, "Estimating cetacean population density using fixed passive acoustic sensors: An example with Blainville's beaked whales," *J. Acoust. Soc. Am.*, **125**(4), 1982-1994 (2009).
- 5) C. S. Krahforst, J. P. Walsh, M. W. Sprague, D. O. Eulie, D. R. Corbbet and J. J. Luczkovich, "Influence of turbidity on the occurrence of sound production in atlantic croaker (*Micropogonias undulates*) in Pamlico sound, North Carolina", in *The Effect of Noise on Aquatic Life*, A. N. Popper and A. Hawkins Eds. (Springer, NewYork, 2012), pp. 169-172.
- 6) 朴 容石, 飯田浩二, 桜井泰憲, 梨本勝昭, 徐斗玉, "Behavioural characteristics of walleye pollack *Theragra chalcogramma* by acoustic sound conditioning," *韓国漁業技術学会誌*, **32**(4), 331-339 (1996).
- 7) M. Kikuchi, T. Akamatsu and T. Takase, "Passive acoustic monitoring of Japanese spiny lobster stridulating sounds," *Fisheries Science*, **81**, 229-234 (2015).
- 8) 朴 容石, 桜井泰憲, 飯田浩二, 高橋豊美, 佐野満廣, "スケトウダラの性別と成熟状況および季節による発音筋重量の変化," *北海道大学水産学部研究彙報*, **45**(4), 113-119 (1994).
- 9) 桜井泰憲, "スケトウダラの繁殖特性と戦略," *北海道立水産試験場研究報告*, **42**, 51-68 (1993).
- 10) J. P. Ueng, B. Q. Huang and H. K. Mok, "Sexual differences in the spawning sounds of the Japanese croaker, *Argyrosomus japonicus* (Sciaenidae)," *Zoological Studies*, **46**(1), 103-110 (2007).
- 11) 松尾行雄, 今泉智人, 赤松友成, "小型水中録音装置を用いた魚類鳴音の自動抽出," *日本音響学会聴覚研究会資料*, **44**, 229-232 (2014).
- 12) 石川弘毅, "茨城県沿岸におけるニベの生態-I 成熟・産卵," *茨城県水試研報*, **21**, 43-51 (1977).
- 13) 林 知夫, "紀伊水道域のシログチ *Nibea argentata* (Houttuyn) について第一報," *内海区水産研究所業績*, **26**, 75-91 (1953).
- 14) V. M. Brawn, "Sound production by the cod (*Gadus callarias* L.)," *Behaviour*, **18**, 239-255 (1961).
- 15) W. Templeman and V. M. Hodder, "Variation with fish length, sex, stage of sexual maturity, and season in the appearance and volume of the drumming muscles of the swim-bladder in the haddock, *Melanogrammus aeglefinus* (L.)," *J. Fish. Res. Bd. Canada*, **15**, 355-390 (1958).
- 16) 竹村 陽, "水族の発声音と行動," *騒音制御*, **9**(2), 33-37 (1985).
- 17) J. V. Locascio and D. A. Mann, "Localization and source level estimates of black drum (*Pogonias croms*) calls," *J. Acoust. Soc. Am.*, **130**, 1868-1879 (2011).