

# テッポウエビ類が発するパルス性雑音の分布状況の調査と定点観測

|       |                                                                                                                                                                                                                   |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者:<br>公開日: 2023-04-05<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En): Underwater Acoustic, Ambient Noise, Marine Environmental Value, Number of Pulses, Snapping Shrimp<br>作成者: 倉本, 和興, 田中, 隆博<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://doi.org/10.15053/0000000090">https://doi.org/10.15053/0000000090</a>                                                                                                                             |

## 【論文】

## テッポウエビ類が発するパルス性雑音の分布状況の調査と定点観測

倉本 和興<sup>1</sup> 田中 隆博<sup>2</sup>**Investigation of the distribution and fixed-point observation of the ambient noise derived from snapping shrimps**Kazuoki Kuramoto<sup>1</sup> and Takahiro Tanaka<sup>2</sup>**Abstract**

When we measure underwater sound in a coastal zone such as the Inland Sea area in summer, pulse-shaped ambient noise is frequently observed together with ship noises less than 1 kHz as if we were frying “tempura”. We call this “underwater tempura noise”. It is said that the burst-wave undulation occurs through an outbreak of air bubbles caused by the rapid closing of one-side of the greatly developed claw of the snapping shrimp. Although the shrimp’s claw noise has been consistently treated as a nuisance noise, studies of ambient noise imaging (acoustic daylight imaging) were recently performed, where the noise was positively used as a sound source. However, details of the distribution situation or outbreak frequency of the ambient noise itself are still unclear and an evaluation method for counting the number of pulses has also not been established yet. When considering ambient noise imaging, the position relations between the sound source, target and receiver are extremely important, that is, it becomes necessary to grasp how much ambient noise is emitted in the actual sea area, rather than when or where.

In this study, we added new improvements to measurement and analysis method for counting the number of pulses that had been suggested before, we investigated the distribution of the ambient noise at the sea areas around the Japan Coast Guard Academy and performed 5-days of consecutive observation at a fixed-point in summer, winter, and spring.

**Keywords:** Underwater Acoustic, Ambient Noise, Marine Environmental Value, Number of Pulses, Snapping Shrimp

**1 はじめに**

瀬戸内海などの沿岸部において、特に夏季において海中音を計測してみると、1 [kHz] 以下の船舶雑音などと共に一見テンプラを揚げているような独特のパルス性雑音が多く観測される。通称、我々はこれを“水中テンプラノイズ”と呼んでいるが、その起源はテッポウエビ類の大きく発達した片方のはさみを急激に閉じるときにキャビテーションバブルが生じてその破裂音が衝撃波となり、これがバースト波状のパルス音（継続時間は約 0.5 [msec]）となって海中に伝搬するためである<sup>1,2,3</sup>。何故パルス音を出すのかについては諸説あるが、この衝撃波によって獲物を気絶させ摂食行動をするためとも、或いはエビ同士がお互いの縄張り争いのためにパルス音を出して威嚇しあっているとも言われている<sup>4</sup>。海中にはテッポウエビ類の他にも多くの発音生物がいる。グチ、

ハゼ、フグと言った浮袋で共鳴増幅させるものや、胸びれを振動させて発音し、遊泳音や捕食音を出す魚などがその一例である。又、よく知られたイルカ、クジラなどは可聴域でコミュニケーションを行い、超音波で採餌行動を行っている。その中でもテッポウエビ類は、大きなはさみの摩擦により高周波領域までの成分を有する独特のパルスを生じさせ、海洋生物の中で他に相当するものはない。本研究では、大学校および吉浦湾周辺海域で計測されたパルス性雑音のピーク周波数やパルス長の特徴がこれまでに計測されているテッポウエビ類の出す音のピーク周波数やパルス長と類似しており、この独特のパルス性雑音がテッポウエビに由来するものであると結論付けた。

ところで、これまでこのパルス性雑音はあくまでノイズとして邪魔者扱いされてきたが、近年これを音源とし

Received November 11, 2022

<sup>1</sup> 海上保安大学校 kuramoto-c3u6@jcga.ac.jp<sup>2</sup> 海上保安大学校 tanaka@jcga.ac.jp

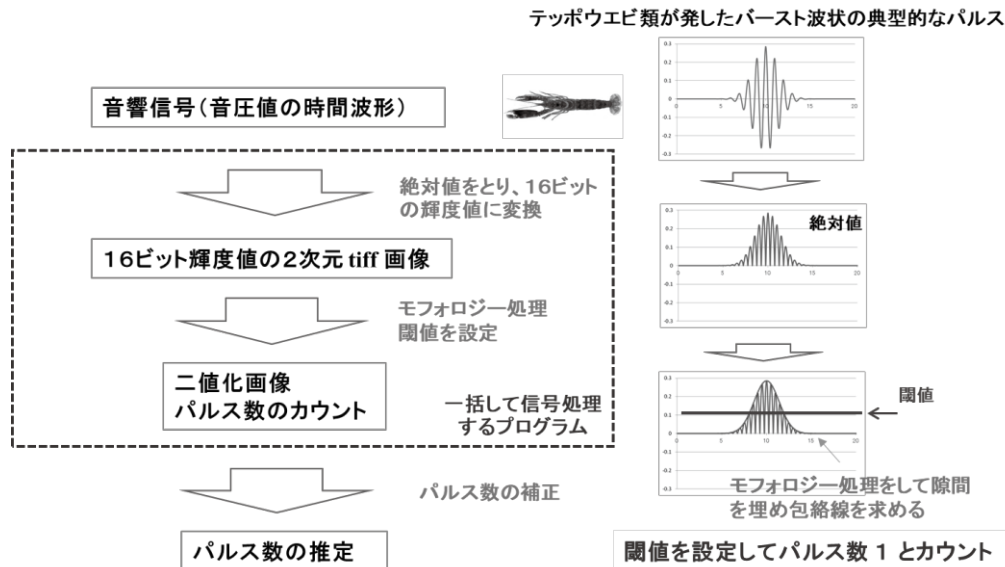


図1 画像処理によるパルス性雑音のパルス数計測手順のフローチャート

て積極的に利用し、海中物体を探索しようとする周囲雑音イメージング(Acoustic Daylight Imaging)の新たな手法がM. J. Backinghamらによって提唱された<sup>9)</sup>。また彼ら<sup>6,7)</sup> およびM.Chitreらのグループ<sup>8)</sup> によってこれまで幾つかの実験システムが開発され、実海域における物体映像化の成功も報告されている。我が国では、森らが音響レンズを用いた周囲雑音イメージングシステムの構築を試みており、実海域での無音ターゲットの探知に成功している<sup>9,13)</sup>。一方で、このパルス性雑音を海洋環境モニタリングの指標として利用しようとする研究があり、渡部らはテッポウエビパルスカウンターを製作して日本の沿岸域でのパルス性雑音の分布を調べ、海水温、DO値などの海洋環境値との関係を議論している<sup>14,15,16)</sup>。しかしながら、パルス性雑音そのものの分布状況や発生頻度は、それが海洋生物であるテッポウエビ類に由来することもあって不確かな点が多く、またその評価手段となる単位時間当たりのパルス数をカウントする方法についても定まったものが無いのが現状である。周囲雑音イメージングは、相手に察知されることなく無音のターゲットを探知できるという点が大きな特徴であるが(従って、パッシブでもないアクティブでもない第3のソーナと呼ばれる)、有効な水中イメージングを行うためには音源、ターゲットそして受波器との位置関係は重要な要素であり、音源となるパルス性雑音がいつ、どこで、どの程度発音するのかを把握しておくこと、そしてそれが海洋環境とどの程度関連しているかを解明しておくことが重要となる。

我々はこれまで、テッポウエビ類が発するパルス性雑音の1分間当たりのパルス数(以下、パルス数とする)を推定する一手法として、取得した水中音圧値を1枚のtiff

画像に変換し、その後画像処理を用いてパルス数を推定する方法を提案してきた<sup>17,18,19)</sup>。本研究では、これまでの測定方法並びに解析方法に新たな改良を加えることで、より多くの実験データを採取し、効率的にパルス数の推定が可能になったのでその概要を報告する。加えて、海上保安大学校および吉浦湾周辺海域のいくつかの観測点において海洋環境値と共にパルス性雑音の分布状況を調査し、また本校の練習船こじま栈橋において、冬季、春季、夏季の各季節において連続5日間の定点観測を行ったのでその結果についても併せて報告する。

## 2 画像処理によるパルス性雑音のパルス数計測法について

パルス数の計測方法として、例えば計測された音圧波形を時系列にひとつずつカウントしていけば良いが、これには膨大な時間と労力を要し、現実的な方法とはいえない。また、パルスの継続時間が約0.5 [msec]でその間に十数波程度の交流波が存在するパルス群(バースト波)となっているために、単純に閾値を設定するだけではテッポウエビ類が発した正確なパルス数を計測することは出来ない。そこで、水中音圧計で採取した交流の音圧値の絶対値を求め、一旦2次元画像に変換後、汎用の画像解析ソフトで画像処理を施すことでパルス数を計測する新たな手法を提案している<sup>17,18)</sup>。本論文では、最終的にはプログラムで一括して時間軸1次元の信号処理をしてゆくことになり、音響信号を画像に変換することの意味はなくなるのであるが、パルス数を推定するにおいてパルス性雑音の全体の分布状況や適正な閾値の判断をするためにも画像上で全体を俯瞰することの意味はあると考え、引き続き画像による説明を行うことにする。

画像処理によるパルス数の計測手順のフローチャートを図1に示す。この手法は、音圧値 0 [dB re 1 $\mu$ Pa]を電圧値 1 [V]としてAD変換した時間軸1次元の電圧信号の絶対値をとった後、 $2^{16}$ を掛けてそれをテレビの走査線の如く順に列状に並べてまずは16ビット輝度値の2次元tiff画像を作成する。次に、このtiff画像から汎用の画像処理ソフト (Image-Pro PLUS) を用いることでパルス性雑音のパルス数をカウントするものである。具体的な処理方法、パルス数の推定方法については、既に論文報告<sup>18)</sup>されているのでここでは詳細は省略するが、一例として、夏季に実際にサンプリング周波数 50 [kHz]で海中から採取された音圧値の時間波形の一部 (長さ約 1.31 [sec]) から2次元tiff画像(256 $\times$ 256)を作成し、パルス数がカウントされてゆく様子を図2に示す。音圧値の絶対値が2次元tiff画像に変換されているため、例えば典型的なパルスが存在する77行目および78行目のラインプロファイルでは幾つかの鋭いピークの集合体となっており、一方で画像上では1行内で破線となっているのがわかる。更にこの画像にモフォロジー処理 (1次元の多値closing処理) を施してピーク間の隙間を埋め、包絡線に近いものを求める。そして後述する閾値を設定することで二値化を行い、二値化画像 (256 $\times$ 256) 上では1行内で短い幾つかの直線が得られ、その直線の数をカウントすることでパルス数が求められることになる。上で例として挙げた典型的な

バースト波状のパルスは、最終的に閾値以上が10ピクセル程度 (約 0.2 [msec]) に相当) の連続した1本の線となっている。

閾値については、パルス数推定において検出範囲と直接結びつく重要な物理量となるため (付録を参照)、以下の手順で慎重に決定した。まず図2に示すように典型的な単独パルスに着目し、それが1つのパルスとしてカウントされ、且つ閾値以上のピクセル数が10ピクセル程度 (時間としてはパルス継続時間の半分程度の 0.2 [msec]) になるような値を閾値として設定した。本研究では、次章で述べるように分布状況の調査と定点観測の2通りの観測を行っているが、音響信号の保存方法 (録音装置のゲイン) がそれぞれ異なっている。そこで、それぞれの保存方法に最適な閾値を決定し、それらの閾値を同一観測のすべてのデータに共通して適用した。

ところで、図2の二値化画像に示すように、このままではスパイクノイズのような継続時間が極めて短いものも、また継続時間の長いパルスもすべて一個のパルスとしてカウントされてしまうことになる。そこで、一定の検出範囲内で実際にテッポウエビ類が発したと思われる正確なパルス数をカウントするため、以下のような補正を行った。まず、二値化した際に閾値以上としてカウントされる継続時間が極めて短いパルス (ピクセル数3以下のもの) は遠方から到来してきた距離減衰した

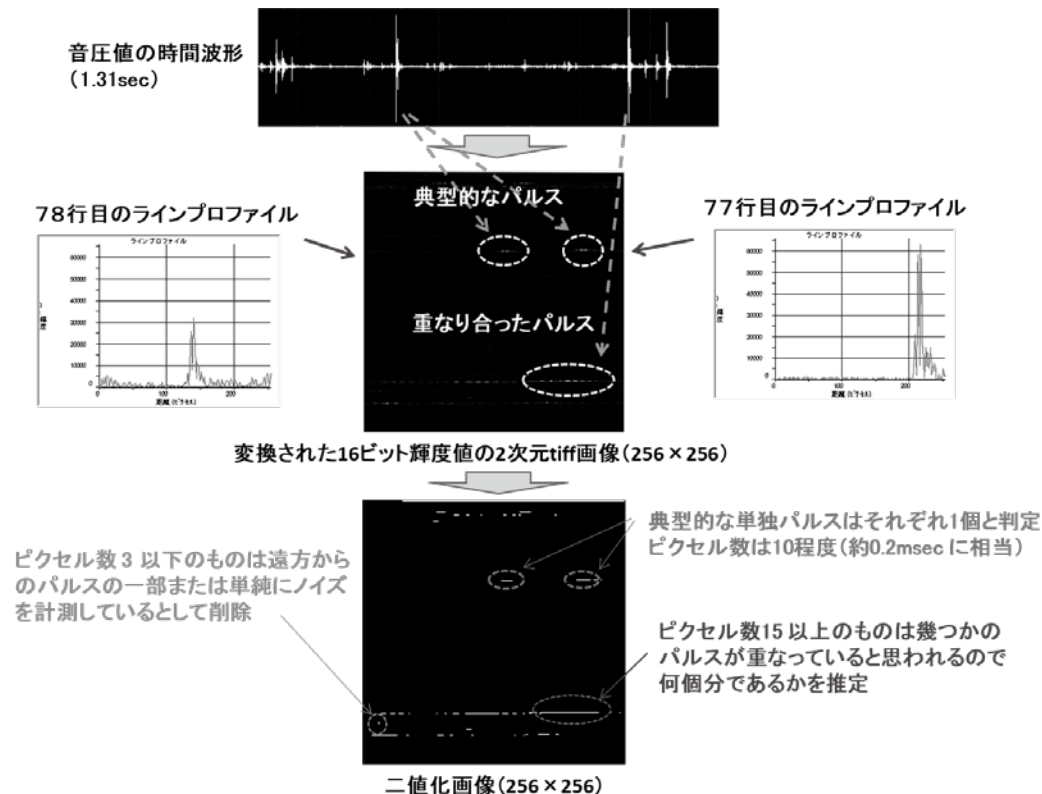


図2 水中音圧値の時間波形 (約 1.31sec) が 16 ビット輝度値の 2 次元 tiff 画像(256 $\times$ 256)に変換され、モフォロジー処理 (1 次元の多値 closing 処理)、閾値を設定することでパルス数がカウントされる

パルスの一部、又は単なるノイズとして判断し、検出範囲内でテッポウエビ類が発したパルスとしてカウントしないこととした。また、二値化画像上に現れた継続時間の長いパルス（ピクセル数が15以上のもの）は、いくつかのパルス波が重なった結果であるとみなし、典型的なパルスの継続時間から複数個のパルスが何個分あるかを推定した。

図1のパルス性雑音のパルス数計測手順において、これまで一連の信号処理にエクセル等の汎用ソフトを使用していたため、その最大行数（2<sup>20</sup>）の制約上サンプリング周波数が 50 [kHz] の場合では音響データを解析できる時間の最長が約21秒間になること、また画像処理の手順において各種ソフトウェアを使い分けるため煩雑となって多くの時間を要すること等、幾つかの課題点が残っていた。そこで今回、上で述べた画像処理によるパルス数を計測する基本的な考え方は変わらないものの、図1中の点線四角で囲った部分については任意の解析時間に対応でき、一括して信号処理が行えるようc++言語によるプログラムを新たに作成した。これにより、より長い時間のデータ処理が解析可能となり、効率的にパルス数の推定が行えるようになった。

### 3 水中音圧値と海洋環境値の同時観測

水中の音環境は、海域の水深のみならず、季節、時間帯などによって異なってくることが知られている。また、テッポウエビ類という生物個体に発生起源をもつパルス性雑音は、海洋環境値に依存してくることが予想され

る。一般にテッポウエビ類の生息数は夏季になって海水温が上昇すると急激に増大し、一方で海域の溶存酸素濃度（DO値）が低下するとその生息数が低下し、さらにこれが続くと死滅することなどが知られている<sup>14,15,16</sup>。従って、特定海域のパルス性雑音を正確に評価するためには、その海域の水深の他、海水温、pH値、DO値等の海洋環境値を水中音圧値と共に同時計測し、パルス性雑音の分布状況、発生頻度との関連を把握しておく必要がある。そこで本研究では、いずれも 30 [m] のケーブルを有する水中音圧計(OKI SW1020)のハイドロフォン（受波感度 -178 [dB re 1V/μPa], 100 [kHz]まで平坦な周波数特性を有する）およびポータブル多項目水質計(TO-A-DKK WQC-25)のセンサモジュールを海中の同じ位置に設置し、水中音圧値と海洋環境値の同時観測を行うこととした。

水中音圧値と海洋環境値の同時観測は、①観測日を一定時期に定め、特定湾内の分布状況を調査する分布観測、並びに ②測定地点を定めた上で、継続して時系列変化を調べる定点観測の2通りの方法で実施した。

#### 3.1 大学校および吉浦湾周辺海域でのパルス性雑音の分布状況の調査

パルス性雑音の分布状況の調査は、パルス性雑音が頻繁に発音している夏季の特定日（2018年8月30日）において、本校の小型船舶を使用して図3に示すような大学校及び吉浦湾周辺海域の17地点において計測を行った。



図3 海洋実験を行った海上保安大学校および吉浦湾周辺海域（海上保安庁海図 W1109 より抜粋、図中の番号はパルス性雑音の分布状況の調査を行った 17 の計測地点、並びに矢印は定点観測を行った大学校練習船こじま桟橋）

その時の実験装置を図4に示す。水中音圧計のハイドロフォンの保護用枠と水質計センサモジュールとを軽くビニールテープで固定する。重量約 5 [kg] のアンカーを括り付けたロープを準備し、センサモジュールの上部のフックをロープの途中（アンカーから上へ約 50 [cm] 離れた位置）に固定する。アンカーおよびハイドロフォン、水質計センサモジュールを海中に入れ、ロープと共に2本のケーブルを同時に艇の舷からそと手で支えながら垂らしてゆき、各海域において各センサが海底から約 1 [m] の地点になるように固定する。そして自船のエンジンを停止した後、水中音圧値と海洋環境値の同時計測を行った。水中音圧値の計測は、ヘッドフォンで水

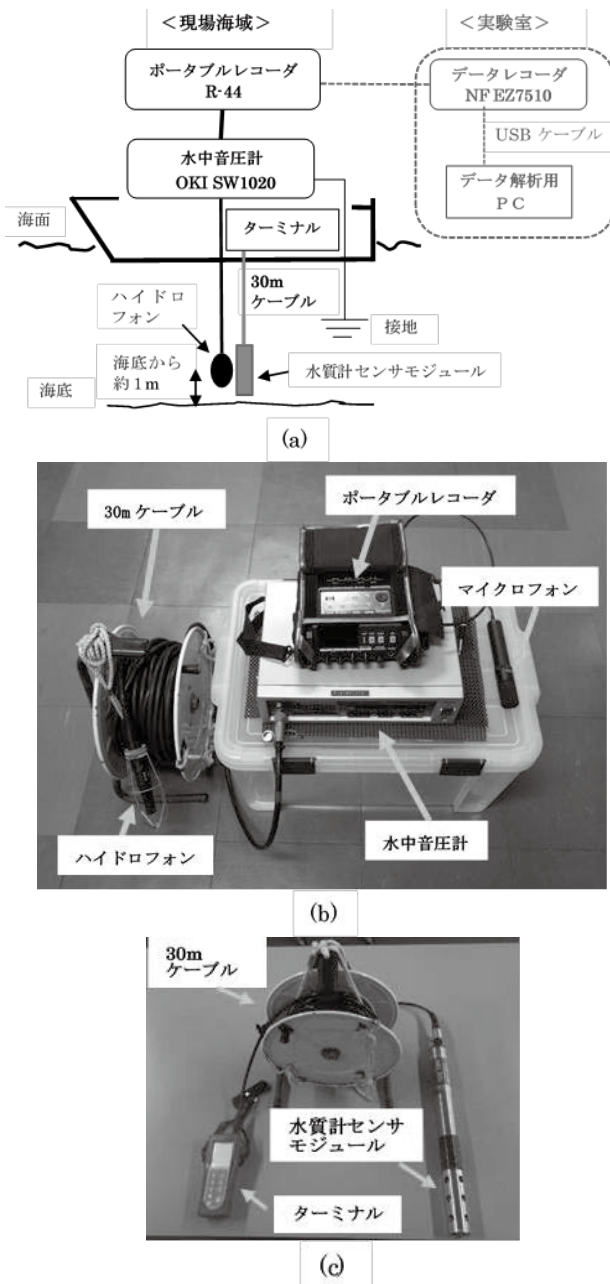


図4 小型船舶でパルス性雑音の分布状況の調査を行った時の実験装置 (a)ブロック図 (b)コンテナに収納した水中音圧計測装置 (c)多項目水質計

中音を聴きながら周りに他の船舶等の雑音源がないことを確認した上で、1 [kHz] ～10 [kHz] のバンドパスフィルターを設定した水中音圧計で計測し、ポータブルレコーダ (Roland R-44) のch1にサンプリング周波数 192 [kHz] で5分間程度録音した。その際、波浪の有無や航行船舶等の周囲の状況を、マイクロフォンを通して音声でch2に同時録音した。これは以後の水中音響データの整理、選別において、船舶雑音等を取り除き、パルス性雑音のみを解析する際の重要な情報源となる。また、潮流により艇が流されてハイドロフォンおよび水質計センサが着底する場合があったが、その際には途中で計測を中断し、改めて艇を移動して計測し直すこととした。各装置の電源はいずれも電池を使用し、収録した水中音の録音データはポータブルレコーダ内のSDカードにwavファイルとして保存した。後日、実験室においてポータブルレコーダのwavファイルを再生し、line outからの信号をデータレコーダ (NF回路EZ7510) によりサンプリング周波数 50 [kHz] で収録時間分のサンプリングを行った。得られたデータファイルから、第2章で述べたパ

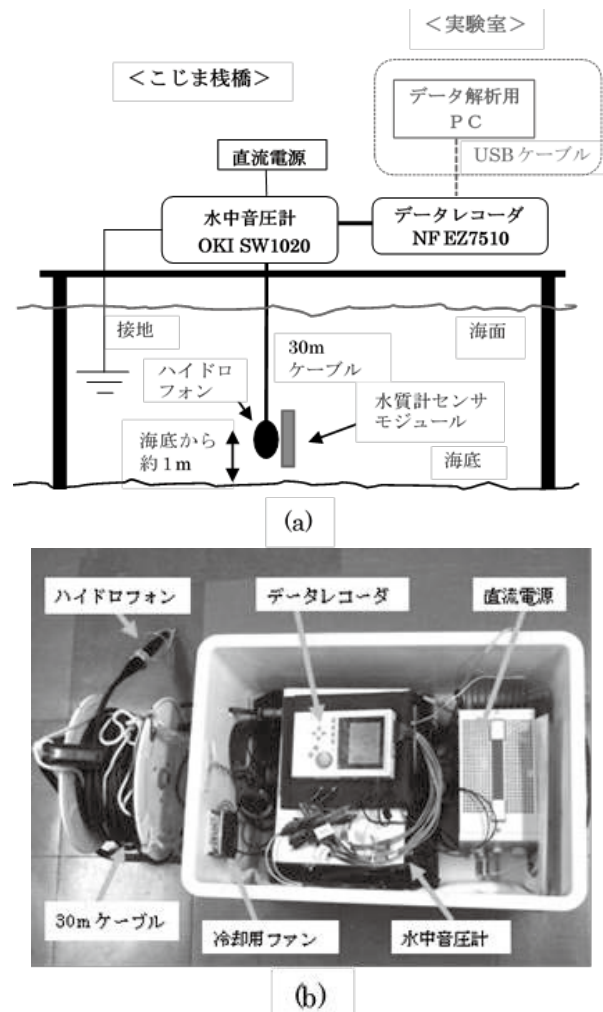


図5 こじま桟橋で定点観測した時の実験装置 (a)ブロック図 (b)コンテナに収納された自動水中音圧計測装置

ルス数計測法によりパルス数の推定を行った。一方、海洋環境値については、水中音圧計で音響データを録音する開始と終了の計2回、ケーブルで繋がれたターミナルにより手動で計測を行った。測定項目としては、水深、海水温、pH値、DO値、海水塩分、電気伝導度、濁度である。

### 3.2 こじま桟橋でのパルス性雑音の定点観測

パルス性雑音の定点観測には、図5に示すような水中音圧計測装置一式をコンテナの中に収納し、数日間連続して自動計測が行えるような実験装置を構築した。図3示した海上保安大学の練習船こじまの専用桟橋（水深約 15 [m]）において、練習船の停泊していない時期を選んでハイドロフォンおよび水質計のセンサモジュールを桟橋からアンカーを括り付けたロープに取り付けて共に海中に垂らし、海底から約 1 [m] の位置で各データの取得を行った。観測日時は、2019年の冬季：2月7日～2月12日、春季：5月9日～5月14日、夏季：8月10日～8月14日の各季節で、連続5日間の計測を行った。電源は桟橋の配電盤から供給し、水中音圧計には専用の直流電源を準備した。水中音圧値は、1 [kHz]～10 [kHz] のバンドパスフィルターを設定した水中音圧計で常時計測し、直接データレコーダ（NF回路EZ7510）によりサンプリング周波数 50 [kHz]で、1,000秒間隔で60秒間の自動計測を行ってその都度データレコーダのハードディスクに保存した。後日、実験室においてデータレコーダ内に保存されたファイルを転送し、第2章で述べたパルス数計測法によりパルス数の推定を行った。海洋環境値

表 1 17 の計測地点で測定された海洋環境値と推定されたパルス数

| 計測地点 | 水深<br>[m] | 海水温<br>[°C] | pH値  | DO値<br>[mg/L] | 海水塩分 | 電気伝導度<br>[mS/m] | パルス数<br>[回/分] |
|------|-----------|-------------|------|---------------|------|-----------------|---------------|
| ①    | 2.8       | 27.3        | 8.6  | 6.68          | 30.7 | 4.65            | 310.6         |
| ②    | 2.7       | 27.5        | 8.62 | 6.5           | 30.7 | 4.65            | 78.4          |
| ③    | 14.1      | 24.1        | 8.18 | 3.47          | 31.1 | 4.74            | 53.6          |
| ④    | 19.2      | 23.7        | 8.12 | 2.48          | 31   | 4.75            | 18.5          |
| ⑤    | 4.1       | 27.1        | 8.36 | 6.93          | 30.8 | 4.67            | 304.7         |
| ⑥    | 12        | 24.3        | 8.33 | 4.3           | 30.8 | 4.71            | 63            |
| ⑦    | 13.1      | 24.5        | 8.34 | 3.9           | 31.1 | 4.74            | 59.5          |
| ⑧    | 23.6      | 23.1        | 8.14 | 2.36          | 31.1 | 4.76            | 0.7           |
| ⑨    | 6.1       | 26.5        | 8.54 | 6.41          | 30.9 | 4.69            | 127.3         |
| ⑩    | 13.5      | 24.3        | 8.34 | 4.54          | 31.1 | 4.75            | 66.3          |
| ⑪    | 11.2      | 25.3        | 8.36 | 5.37          | 30.8 | 4.71            | 26.4          |
| ⑫    | 2         | 27.9        | 8.43 | 6.77          | 30   | 4.67            | 38.3          |
| ⑬    | 7.6       | 27          | 8.33 | 6.59          | 30.9 | 4.68            | 298.3         |
| ⑭    | 3.8       | 27.9        | 8.4  | 6.63          | 30.9 | 4.67            | 119.7         |
| ⑮    | 9.8       | 25.5        | 8.19 | 4.76          | 30.8 | 4.71            | 138.8         |
| ⑯    | 18.6      | 23.3        | 8.15 | 1.96          | 31   | 4.75            | 7.7           |
| ⑰    | 5.1       | 26          | 8.31 | 5.88          | 30.9 | 4.71            | 57.1          |

は、3.1と同様、水深、海水温、pH値、DO値、海水塩分、電気伝導度、濁度で、すべての測定項目について30分間隔で5日間連続して自動計測するよう予め設定しておき、測定値は水質計の内部メモリに保存した。

## 4 実験結果と考察

### 4.1 大学および吉浦湾周辺海域でのパルス数の分布状況

水中音圧値は、なるべく船舶等の航行しない時を選んで録音を行ったが、収録した約5分間の音響データの中には、遠くを航行している船舶音やパルス性雑音以外の様々な水中音が含まれている。得られた水中音圧値の時間波形を表示することで、又はwavファイルを再生して

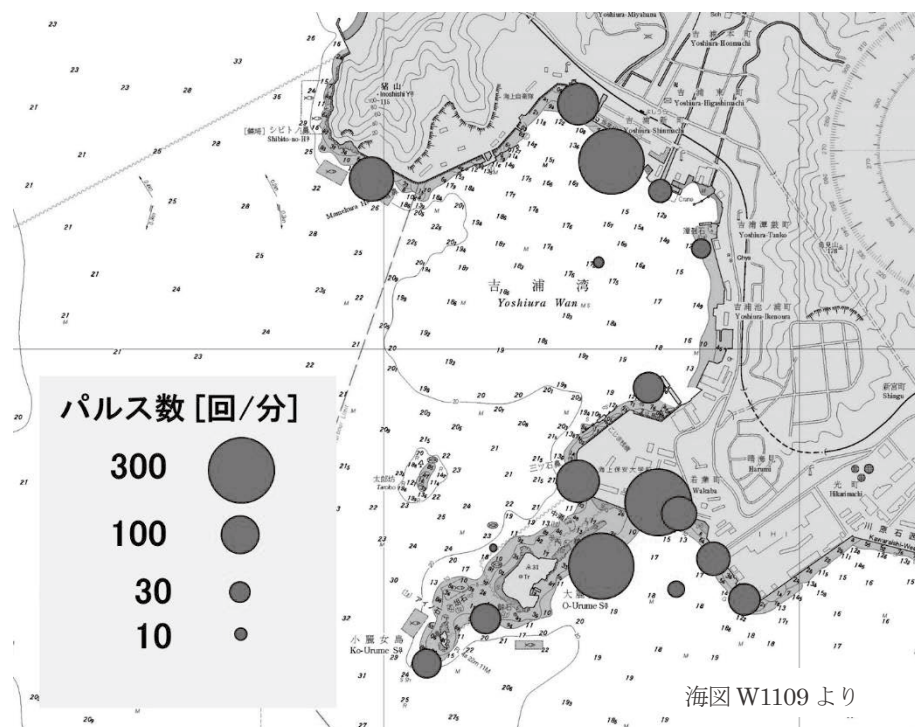


図 6 海図上に描かれた各計測地点での推定されたパルス数（円の面積の大きさがパルス数に相当）

録音した水中音と共にマイクロフォンで音声収録した時の状況を聴くことで、船舶音等の人工ノイズが存在する場合にはそれらの箇所を取り除き、以後の解析には使用しないこととした。場合によっては、ノイズの部分を切り取ることで長大な1つのファイルを数個に分離してパルス数の計測を行った。

17の各計測地点における推定された1分間当たりのパルス数を各海域の海洋環境値と共に表1に示す。ここで、海洋環境値は水中音圧を録音する前後の2回を平均したものであり、濁度についてはいずれの地点でもほぼ0であったのでここでは表示していない。また、各計測地点でのパルス数を改めて海図上に表示したものを図6に示す。ここで、円の面積の大きさがパルス数に相当するように描いている。同図を見ると、沿岸域の岸壁等の近傍でパルス数は大きくなっている一方で、湾の中央当りでは殆どパルスは発音していないのがわかる。また、観測地点⑪および⑫は河口に近い海域で、表1を見ると海水塩分も僅かであるが低下しており、DO値は高いもののパルス数は小さくなる傾向がある。このことからテッポウエビ類はどちらかと言うと水深が浅い沿岸域の岸壁周辺を好んで生息しており<sup>20,21,22</sup>、泥やヘドロが海底に溜まった湾の中央部や淡水が流れ込む海水塩分の低い海域にはあまり生息していないと考えられる。表1に示したパルス数と海水温およびDO値との相関関係を図7に図示する。同図から、全体として海水温およびDO値が高い海域ほどパルス数は大きくなる傾向（図中の指数関数で与えられるような相関関係）があるのがわかる。これはこれまでの指摘と同様<sup>14</sup>、海洋環境値の中でも特に海水温およびDO値がテッポウエビ類の生息数に直接関連していることを示すものであるが、河口域のような海水塩分の低い海域ではDO値は高くてもパルス数は低くなっており、海水塩分がパルス数に影響していることが今回の実験結果から明らかとなった。また本実験海域において、底質が砂地で、コンクリート岸壁や橋脚等の人工構造物のある場所においてパルス数は増大する傾向があり、テッポウエビ類はこのような場所を好んで生息していることが改めて確められた。

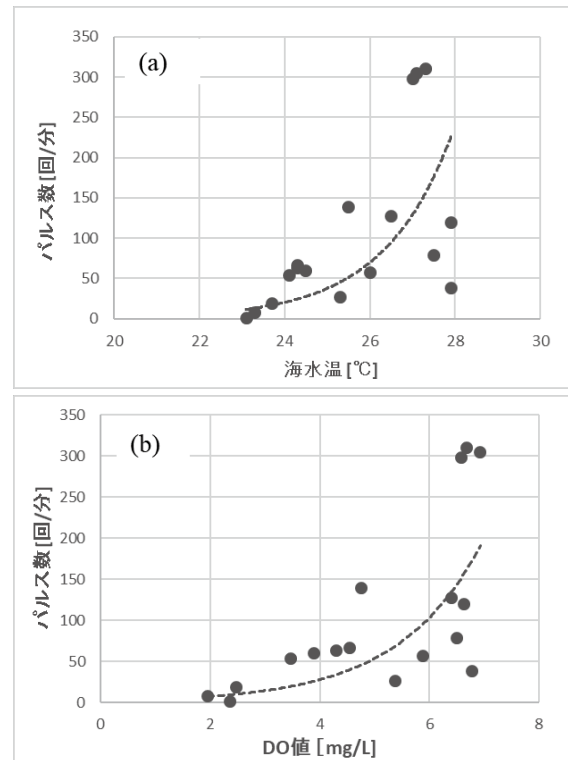


図7 パルス数と(a)海水温および(b)DO 値との相関関係（図中の破線は指数関数を仮定した近似曲線）

#### 4.2 こじま栈橋でのパルス数の時系列変化

5日間連続して計測された水中音圧値のデータには、4.1と同様、パルス性雑音以外の信号成分が数多く含まれている。特に、昼間はこじま栈橋近くを頻繁に船舶が航行し、またすぐ近くの造船所からの人工ノイズが強烈に入ってくる。そこで、まず各季節において採取した400以上（1000秒間隔で5日分のデータ数）の水中音圧値の1分間の時間波形を一つずつ表示し、又は録音された水中音を実際に聴く等して、近くを航行した船舶からのノイズや造船所からの人工ノイズがあるものはパルス数のカウントに影響を与えるものとして解析から取り除くこととした。ほぼパルス性雑音以外の信号が計測されていないと思われる各季節日曜日の午前3時頃の時間波形を図8に示す。テッポウエビ類によるパルス性雑音は冬季においてはあまり発音していないが、春季、夏季にな

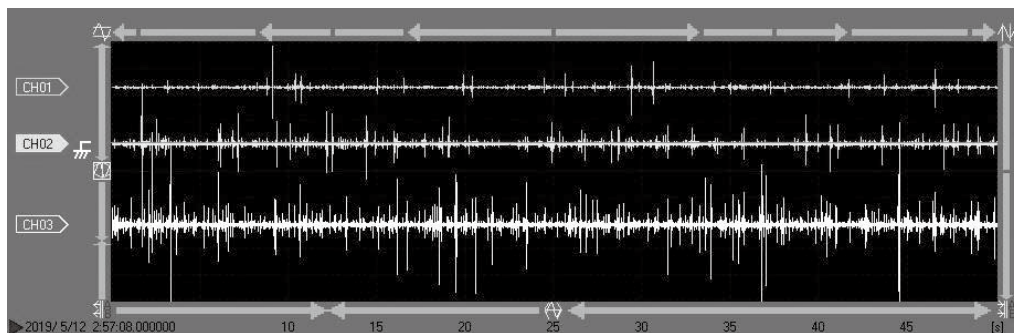


図8 こじま栈橋で測定された各季節日曜日の午前3時頃の音圧値の時間波形（上から順に冬季、春季、夏季、縦軸：1V/DIV、横軸：0～50sec）

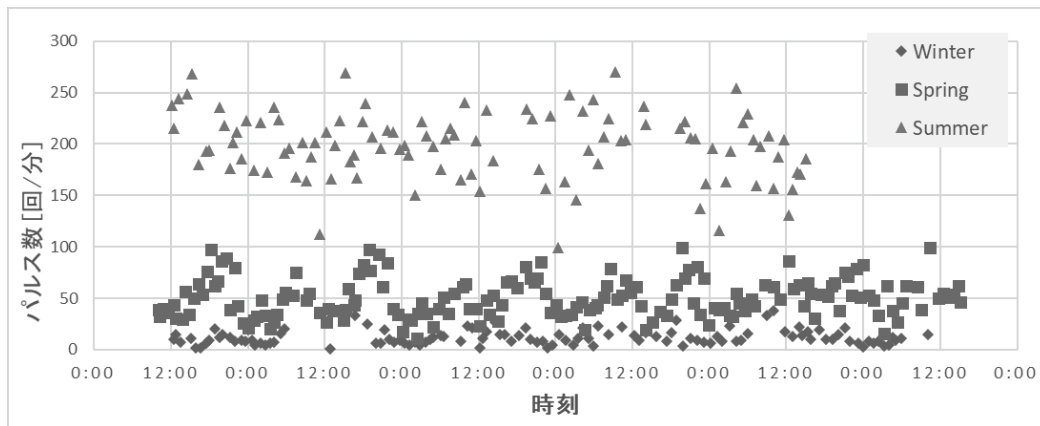


図9 各季節において推定されたこじま栈橋でのパルス数の5日間の変化（定点観測、上から順に夏季、春季、冬季）

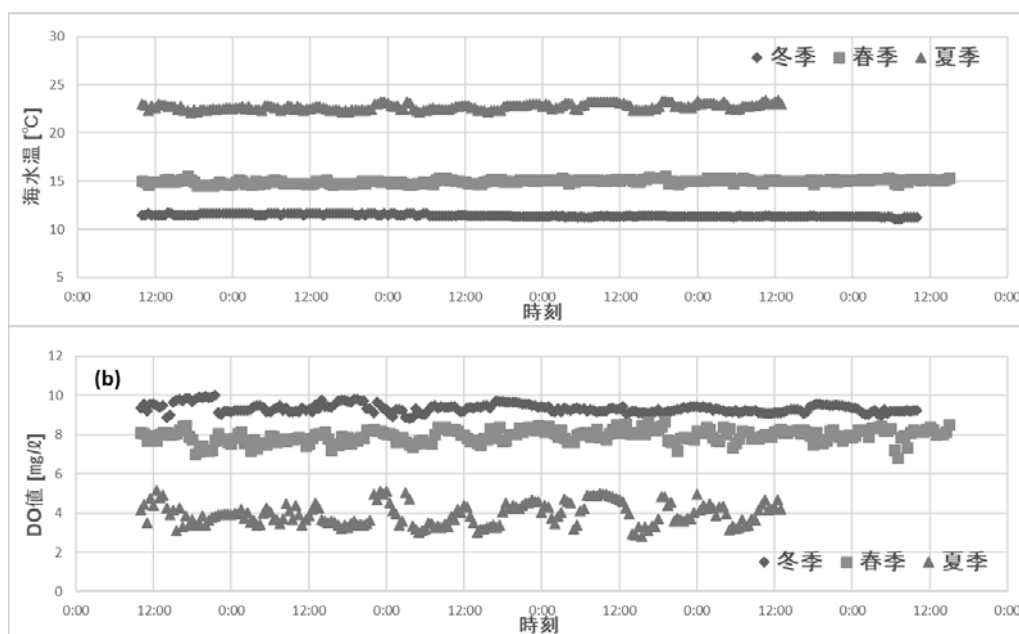


図10 各季節におけるこじま栈橋での (a)海水温と (b)DO 値の5日間の変化（定点観測）

るにつれてパルスは次第に頻繁に生じているのが時間波形から読み取れる。

各季節でのパルス数を推定し、その結果を1つのグラフにまとめて表したものを図9に示す。縦軸はパルス数、横軸は時刻で、5日間のパルス数の時系列変化を表している。但し、夏季については計測最終日に台風10号が通過したため2019/8/14の15:00に計測を断念した。推定されたパルス数は、図8の時間波形で示された傾向と同様、冬季から春季、夏季になるにつれて次第に増大し、テッポウエビ類の生息数あるいは活性度が夏季にかけて増大しているのがわかる。一方、各季節における海洋環境値について、海水温と溶存酸素濃度(DO値)の5日間の変化を纏めたものを図10に示す。5日間の時間軸に対しては顕著な変化は見られないが、季節の違いに対して大きな値の変化を示している。特に、テッポウエビ類の生息状況に関連すると思われる海水温については、冬季が

12°Cと最も低く、春から夏にかけて23°Cまで上昇している。またDO値については、夏季は海洋循環が少なく海底生物の呼吸が頻繁に行われるため 4[mg/L] 前後と低くなっており、冬季になると表層と下層の海水温の逆転から海洋循環が頻繁に起こり9[mg/L] 程度の高い値を示している。4.1の分布状況の調査から、パルス数と海水温、DO値との間には相関があることが示されたが、季節の違いで見た場合においても、海水温が上昇する春季から夏季にかけてテッポウエビ類の生息数が増大あるいは活動が活発になってパルス数が増大していると考えられる。一方で、テッポウエビ類はDO値が1[mg/L] 以下になると死滅することが知られており<sup>14,15,16</sup>、これは生息限界と言われている。大学校のこじま栈橋付近の海域は、DO値が最も低い夏季においても4[mg/L] 前後であるためテッポウエビ類にとって生息環境は良好であるといえる。従って、パルス数の季節間の大きな変化は主に

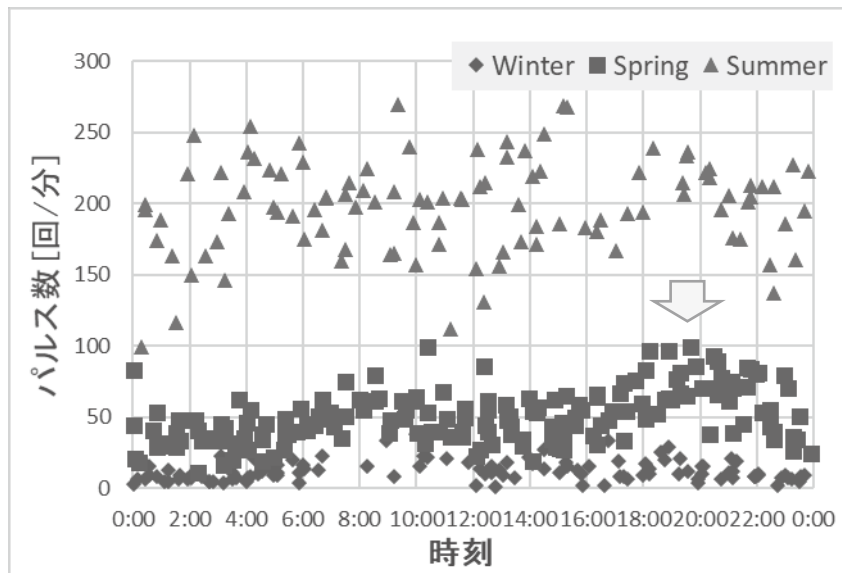


図 11 各季節のパルス数の時系列変化 (図 9) を、曜日に関係なく横軸を 1 日の午前 0 時から 24 時までの時刻に対して約 5 日分を重ねて改めて 1 日の変化にトレースし直したもの (図中の矢印は、1800 以降に現れたパルス数のピーク)

海水温の違いによるものと考えられ、DO 値の季節間の違い、5 日間の時系列変化に対しては今のところパルス数との直接的な相関はないと思われる。

次に、図 9 の春季の場合に着目すると、ほぼ毎日周期的に夕方 18:00 以降にパルス数が増大しているように見える。そこで、各季節の時系列変化を曜日に関係なく横軸を一日の午前 0 時から 24 時までの時刻にして、図 9 の約 5 日分を重ねてトレースして改めて描いてみたものが図 11 である。夕方 20:00 頃にパルス数のピーク (図 11 の矢印) らしきものが現れている。これは夜行性と言われているテッポウエビ類の生息数が春先に増大し始め、夕方 18:00 以降に活発に活動しているものと推測される。夏季、冬季にあまりこの傾向が見られないのは、夏季は生息数が多くなり朝、昼、夜を問わず、テッポウエビ類は時を構わずテリトリー保持のためやたらとパルス性雑音を発生し<sup>4)</sup>、冬季は元々生息数が少なく時刻に対し特徴的な傾向を示すまでには至らなかったと考えられる。

## 5 まとめ

テッポウエビ類が発するパルス性雑音を周囲雑音イメージング (Acoustic Daylight Imaging) の音源として利用する場合、音源であるパルス性雑音がいつ、どこで、どの程度発音するかを見極め、そして海洋環境値との関連を明確にしておく必要がある。本研究では、水中音圧値と共に海洋環境値を常に同時観測し、パルス性雑音の特定海域における分布状況と定点観測における時系列変化の調査を行った。本研究での成果を具体的にまとめると以下の通りである。

① 水中音圧値の計測方法において、パルス性雑音の

分布状況を調査するための小型艇搭載可能なコンパクトな測定装置と、定点観測のための自動で連続測定できる測定装置の構築を行った。

② パルス数計測法において、これまでに提案してきた手法に改良を加え、長時間かつ大量の水中音圧値を一括して信号処理ができる解析プログラムを新たに作成した。

③ 海上保安大学校および吉浦湾周辺海域の 17 の観測地点で、夏季の特定日におけるパルス性雑音のパルス数の分布状況を海洋環境値と共に同時観測した。

④ その結果、海水温および DO 値が高い海域になるほどパルス数は増大し、水深が浅い沿岸域のコンクリート岸壁や橋脚等の人工構造物のある場所をテッポウエビ類はより好んで生息し、泥やヘドロが海底に溜まった湾の中央部や淡水が流れ込む海水塩分の低い海域にはあまり生息していないことがわかった。

⑤ 大学校こじま栈橋において、冬季、春季、夏季の 5 日間にわたるパルス数の時系列変化を海洋環境値と共に定点観測した。

⑥ その結果、海水温が上昇し始める春季から夏季にかけてパルス数は増大し、テッポウエビ類の生息数が増大し始めることがわかった。又、春季の夕方 18:00 以降にテッポウエビ類は活発に活動しパルス数が増大していることが確認できた。

パルス性雑音は、海洋生物の一つであるテッポウエビ類に由来するものであり、それ故に周囲雑音イメージングの音源として直接これを利用しようとする場合には、制御しづらい点も多々生じてくると考えられる。テッポウエビ類に依存することなく人工の疑似音

源を使うことも一方法であるが、本研究で得られた実海域でのパルス性雑音の発生状況の観測結果が周囲雑音イメージングを構築してゆく上で一つの知見になれば幸いである。

## 謝辞

本研究の実施に当たり多大な援助を頂いた大学校訓練部の方々、および海上計測において協力頂いた基礎教育講座の川村紀子准教授、並びに飯田大生、高木将悟、設楽英史の各学生諸君に感謝の意を表する。

## 付録：閾値とパルス検出範囲との関係

今回、計測に用いた水中音圧計の受波感度および利得を合わせた設定値は $-140$  [dB re 1V/ $\mu$  Pa]であるので、音源の音圧レベルを  $SL$  [dB re 1V/ $\mu$  Pa]、音源からハイドロフォンまでの距離を  $r$  [m]、水中音圧計の電圧値を  $V$  [V] とすると、これらは以下の関係式で結ばれる。

$$SL = 140 + 20 \log V + 20 \log r \quad (\text{A-1})$$

ここで、 $20 \log V$  は検出レベル、 $20 \log r$  は距離減衰による伝搬損失を表している。また、吸収損失は選択した音波の周波数帯域  $1$  [kHz]~ $10$  [kHz] においては、 $10^{-4}$  [dB/m]~ $10^{-3}$  [dB/m]と微小であるためここでは考えないこととした。つまり、(A-1)式から設定する閾値はパルスをカウントする検出範囲と直接関連することになる。今回、直接水中音圧計で計測した定点観測の  $16$  ビット輝度値としての閾値  $5,000$  を代入すると、電圧値は  $5,000/65,536=0.0763$  [V] となり、仮にテッポウエビ類が音源として音圧レベル  $140$  [dB re 1V/ $\mu$  Pa] の音を出しているとする<sup>14,15)</sup>、(A-1)式から半径約  $13$  [m] の範囲内のテッポウエビ類のパルスを検出していることに相当する。

## 参考文献

- 1) 林 健一, 日本産エビ類の分類と生態 (92), 海洋と生物 108, 19(1) (1997), 46-49.
- 2) R. E. Knowlton and J. M. Moulton, Sound production in the snapping shrimps ALPHEUS and SYALPHEUS, Biol. Bull., 125 (1963), 311-331.
- 3) W. W. L. Au, The acoustics of the snapping shrimp Synalpheus parneomeris in Kaneohe Bay, J. Acoust. Soc. Am., 103(1) (1998), 41-48.
- 4) H. Schein, The role of snapping in ALPHEUS HETEROCHAEILIS say, 1818, the big-clawed snapping shrimp, E. J. Brill, Leiden, Crustaceana, 33(2) (1977), 182-188.
- 5) M. J. Buckingham, B. V. Verkhout and S. A. L. Glegg, Imaging the ocean with ambient noise, Nature, 356 (1992), 327-329.

- 6) M. J. Buckingham, J. R. Potter and C. L. Epifanio, Seeing underwater with background noise, Sci. Am., 274 (1996), 86-90.
- 7) C. L. Epifanio, J. R. Potter, G. B. Deane, M. L. Readhead, and M. J. Buckingham, Imaging in the ocean with ambient noise: the ORB experiments, J. Acoust. Soc. Am., 106 (1999), 3211-3225.
- 8) M. Chitre, S. Kuselan and P. Venugopalan, Ambient noise imaging in warm shallow waters; robust statistical algorithms and range estimation, J. Acoust. Soc. Am., 132 (2012), 838-847.
- 9) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Design and Convergence Performance Analysis of Aspherical Acoustic Lens Applied to Ambient Noise Imaging in Actual Ocean Experiment, Jpn. J. Appl. Phys., 50(7) (2011), 07HG09-07HG09.
- 10) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Extraction of Target Scatterings from Received Transients on Target Detection Trial of Ambient Noise Imaging with Acoustic Lens, Jpn. J. Appl. Phys., 51(7) (2012), 07GG10-07GG10.
- 11) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, and N. Endoh, Relationship between Spatial Distribution of Noise Sources and Target Scatterings Observed in the 2010 Sea Trial of Ambient Noise Imaging, Jpn. J. Appl. Phys., 52(7) (2013), 07HG02-07HG02.
- 12) K. Mori, H. Ogasawara, T. Nakamura, T. Tsuchiya, N. Endoh, Data analysis results of the second sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2014: Two-dimensional target images affected by direction of field of view and spatial noise distribution, Jpn. J. Appl. Phys., 55(7S1) (2016), 07KG07-07KG07.
- 13) K. Mori, H. Kawahara, H. Ogasawara, T. Tsuchiya, Expression with red-green-blue additive color mixing for frequency-dependent targets in the third sea trial of ambient noise imaging with acoustic lens in 2016, Jpn. J. Appl. Phys., 57(7S1) (2018), 07LG05-07LG05.
- 14) 渡部守義, 関根雅彦, 濱田悦之, 浮田正夫, テッポウエビを用いた海域環境モニタリング, 土木学会論文集, 643/VII-14 (2000), 49-60.
- 15) 渡部守義, 関根雅彦, 古澤昌彦, 浮田正夫, 今井剛, 樋口隆哉, 浅海域環境評価を目的とした水中音響によるテッポウエビ類生息密度推定, 土木学会論文集, 713/VII-24 (2002), 69-79.
- 16) 渡部守義, 沿岸域環境モニタリングのためのテッポウエビ類の発音数分布観測調査および水域類型との相関関係, 海洋音響学会誌, 34(4) (2007), 32-39.

- 17) 倉本和興, 田中隆博, 画像処理を用いた水中テンブラノイズのパルス数評価法, 海音講論集, 13-20 (2013), 53-56.
- 18) 倉本和興, 田中隆博, 画像処理を用いた水中テンブラノイズのパルス数計測法について, 海上保安大学校研究報告, 56 (2013), 1-10.
- 19) 倉本和興, 田中隆博, 水中テンブラノイズの自動計測装置の構築と連続測定結果, 海上保安大学校研究報告, 58 (2014), 1-8.
- 20) A. Takemura, The Distribution of Biological Underwater Noise at the Coastal Waters of Japan, Bull. Jpn. Soc. Sci. Fish., 38(3) (1972), 201-210.
- 21) 安長榮, 濱田悦之, 斎藤清隆, テッポウエビ音の音源測位と音源強度について, 東京水産大学研究報告, 80(1) (1993), 75-81.
- 22) G. Ferguson, and J. L. Cleary, In situ source level and source position estimates of biological transient signals produced by snapping shrimp in an underwater environment, J. Acoust. Soc. Am., 109(6) (2001), 3031-3037.