

水中テンプラノイズの自動計測装置の構築と連続測定結果

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-05-22 キーワード (Ja): キーワード (En): Underwater Acoustic, TEMPURA Noise, Marine Environment, image processing, Snapping Shrimp 作成者: 倉本, 和興, 田中, 隆博 メールアドレス: 所属:
URL	https://jcga.repo.nii.ac.jp/records/157

【論文】

水中テンプラノイズの自動計測装置の構築と連続測定結果

倉本 和興¹ 田中 隆博²

Construction of the automatic measurement device of underwater TEMPURA noise and results of the consecutive measurement

Kazuoki Kuramoto¹ and Takahiro Tanaka²

Abstract

In the previous report, we proposed a new measuring technique that the number of pulses per unit time was counted by using the general-purpose image processing software after acquiring 16-bit grayscale square image from the temporal acoustic data, as an evaluation method of the number of peculiar cracking noise, which is called “TEMPURA noise”. In addition, we measured the underwater acoustic data with the marine environment at KOJIMA pier of Japan Coast Guard Academy in the every hour for 25 hours in one day of each season and discussed the relationship between the number of pulses and the marine environment value. In this study, the automatic measurement device of the underwater acoustic data and marine environment value was constructed in order to carry out the continuous measurement throughout for a few days. The consecutive measurements for 4 days (for 77 hours) of each season in winter, spring, summer, autumn were carried out in the fixed point at KOJIMA pier, and the relationship between the changes of pulse generation of snapping shrimp and marine environment values is reconsidered.

Keywords: underwater acoustics, TEMPURA noise, marine environment, image processing, snapping shrimp

1 はじめに

日本の沿岸域において特に夏季に観測される独特のパルス性雑音、いわゆる水中テンプラノイズは、テッポウエビ類の片方のはさみを急激に閉じる時のパルス音（継続時間は約 0.4~1 msec）に起因することは一般によく知られているが、水中音響の分野ではこれはあくまでノイズとして扱われてきた。近年、積極的に周囲雑音イメージングソーナーの音源として利用しようとする研究^{1,2)}や、またそのテッポウエビの発音数（単位時間当たりのパルス数）の変化を海洋環境の指標として利用しようとする研究^{3,4)}があり、特に注目されるようになってきた。しかしながら、水中テンプラノイズそのものの発生頻度、分布状況については未解明な部分が多く、その評価方法につい

ても定まったものはない。

前回の報告⁵⁾では、水中テンプラノイズの発音数（単位時間当たりのパルス数）の評価方法として、取得した音響データを 16 ビットの画像データに変換し、その後に汎用の画像処理ソフトでパルス数を計測する新たな手法を提案した。加えて、本校のこじま棧橋において各季節の毎時に水中音響と海洋環境を同時計測し、提案した手法によりパルス数を推定してその有効性を確認するとともに、パルス数の変化と海洋環境値との関係について考察を行った。しかしながら、パルス数が計測された期間は一昼夜 25 時間の毎時のデータのみであり、テッポウエビによるパルス数の正確な発生状況を確認するためには、水中音響データの計測を出来るだけ長時間に渡って定点観測す

Received May 30, 2014

¹ 海上保安大学校 海事工学講座 kuramoto-c3u6@jcga.ac.jp

² 海上保安大学校 海事工学講座 tanaka@jcga.ac.jp

る必要がある。また、この時の水中音響を計測したハイドロフォンのカットオフ周波数は 20 kHz で、加えて 2 kHz~9 kHz のバンドパスフィルターを通し、サンプリング周波数を 51.2 kHz としたために、テッポウエビの鋭いバースト波状のパルス波形を精度良く観測するまでには至らなかった。テッポウエビのピークツウピークの音源音圧レベルを推定するためには、少なくとも 100 kHz までの周波数特性が保証されるハイドロフォンを使用し、出来るだけ高い周波数でサンプリングする必要がある。

本研究では、前回の報告で課題となっていた上記の 2 点を解決するため、まず 100 kHz までの平坦な周波数特性を持つ水中音圧計を使用し、サンプリング周波数は 50 kHz (連続測定時) と 1 MHz (パルス波形測定時) の 2 通りを用いて水中音圧計からデータレコーダに直接記録することとした。次に、数日間にわたる連続した水中音響と海洋環境値の計測を行うため、無人で長時間の測定が可能となる自動計測装置の構築を行った。本装置により、冬、春、夏、秋の各季節における足掛け 4 日間 (約 77 時間) 連続の水中音響と海洋環境の定点同時測定をこじま栈橋において行い、数日間のテッポウエビのパルス発生頻度について海洋環境値との関係とともに再考察を行った。

2 自動計測装置の構築

数日間に渡る長時間の水中テンプラノイズを計測するため、以下のような水中音響自動測定装置の構築を行った。図 1 に自動測定装置のブロック図と実際にこじま栈橋で計測した時のコンテナに収納した装置類の写真を示す。水中音響は 100 kHz までの平坦な周波数特性を持つ水中音圧計 (沖電気工業 SW1020) で常時計測し、データレコーダ (NF 回路 EZ7510) により水中音圧の交流信号を一定間隔で自動サンプリングした。その際、近くを航行する船舶や造船所等の人工構造物からの低周波ノイズを除去するために水中音圧計に内蔵のハイパスフィルターを 1 kHz に設定した。データレコーダのサンプリング周波数は、連続測定を行う際にはデータ量を抑えるために 50 kHz を使用し、パルス波形を求める際には出来るだけ高い周波数でサンプリングする必要から最高値の 1 MHz を設定し、ローパスフィルターはスルーとした。また、連続測定においてはデータレコーダに内蔵している発振器の周波数を 0.001Hz に設定し、これをトリガー信号として利用した。記録開始条件をトリガーのリピート、記

録終了条件をタイマーの 60 秒とした。これにより、1000 秒 (16.6 分) 毎に水中音響データを 50 kHz で 60 秒間ほどサンプリングを行い、その都度 40GB の内蔵ハードディスクに記録した。電源はこじま栈橋の配電盤の 100 V 電源から取り、水中音圧計には水中音響への 60 Hz のハムノイズの影響を避けるために直流電源を専用電源として使用した。また、コンテナに冷却ファンを自作で設置し、夏場の炎天下で装置類が高温になるのを避けた。水中音響のデータ解析は、データレコーダを実験室に持ち帰り、USB ケーブルを介して保存したデータを解析用 PC に読み込むことで行った。

水温、塩分濃度、pH 値、溶存酸素濃度 (DO 値)、電気伝導度、濁度などの海洋環境値の計測については、多目的水質計 (TOA-DKK WQC-25) を使用し、そのプログラミング機能により 30 分間隔で各種項目の自動計測を行った。測定の間隔、水質計の内部メモリに保存し、後日実験室において解析用 PC に取り込んだ。

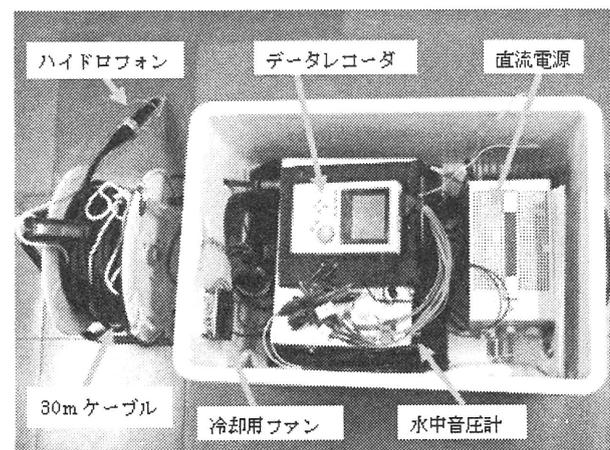
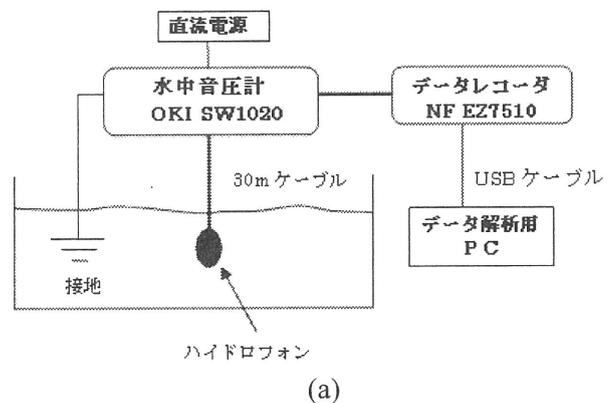


図 1 水中音響自動計測装置 (a) ブロック図および (b) コンテナに収納した装置類の写真

3 測定場所および日時

水中テンプラノイズの連続測定は、呉市吉浦湾の南東側に位置する本校のこじま栈橋(水深約15 m)において、巡視船等の船舶が停泊していない時期を選んで行った。こじま栈橋から水中音圧計のハイドロフォン(受波感度 -178 [dB re 1V/ μ Pa]、100 kHz まで平坦な周波数特性) および水質計の両方を軽くビニールテープで固定して栈橋からロープで海中に垂らし、海底から約1 m の位置に固定して各データの測定を行った。測定日時は、冬季(2013年2月8日~11日)、春季(2013年5月10日~13日)、夏季(2013年8月2日~5日) および秋季(2013年11月8日~11日)で、いずれも金曜日の午前11時から翌週の月曜日午後4時までの連続4日間約77時間である。水中音響については約16分置きにサンプリング周波数50 kHzで60秒間のデータを、海洋環境値については30分置きに各種項目の測定を行った。また、各季節のテッポウエビの音源音圧レベルを推定するための測定として、連続測定とは別に改めてサンプリング周波数1 MHzを設定し、約60秒間の水中音響データの取得を行った。

4 測定結果

各季節それぞれの約77時間に渡って約16分おきに60秒間測定された連続測定結果のうち、日曜日の午前3時頃にこじま栈橋の海底から約1 m の同じ場所で観測された50秒間のパルス性雑音の発生状況を一例として図2に示す。上から冬季、春季、夏季の結果で、同じスケールで縦軸をずらして描いてある。テッポウエビによるパルスは冬季においてあまり発音していないが、春季、夏季となるにつれてパルスは次第に頻繁に生じているのが分かる。単位時間当たりのパルス数の定量的な季節別の時系列変化については、5. 考察において画像処理によるデータ解析と共に詳細に述べることとする。また、テッポウエビの鋭いバースト波状のパルス波形を精度良く観測するため、連続測定とは別に改めてサンプリング周波数を1 MHz に設定して測定を行った。図3に夏季において計測された典型的なパルス波形の一例を示す。20 msec の時間内に2つの典型的なテッポウエビによるバースト波状の鋭いパルス波形が観測されているのが分かる。パルス幅としてはいずれも約0.5 msec で、ピークツウピーク電圧

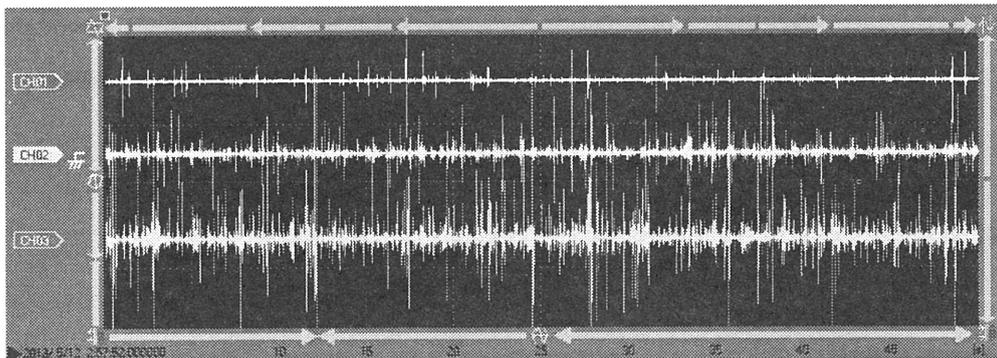


図2 各季節日曜日の午前3時頃に、こじま栈橋の海底から約1 m 付近の同じ場所で観測された50秒間のパルス性雑音の発生状況(サンプリング周波数: 50 kHz、縦軸スケール: 1 V/DIV、横軸: 0~50 sec、上から冬季、春季、夏季)

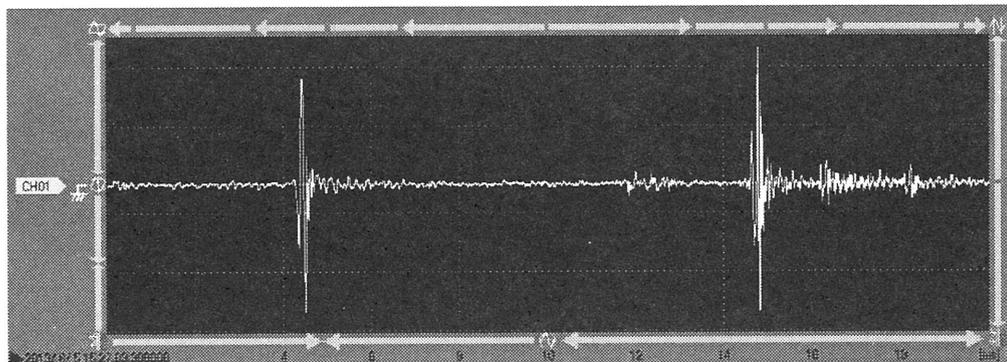


図3 計測された夏季の典型的なテッポウエビによるバースト波状のパルス波形(サンプリング周波数: 1MHz、縦軸スケール: 500 mV/DIV、横軸: 0~20 msec)

V_{p-p} は約 4V と見積れる。

次に、音響測定と同時に計測した海洋環境値のうち、パルス数と関係すると思われる海底付近の水温および溶存酸素濃度(DO 値)について、季節別の時系列変化として描いたものを図 4 に示す。海水温については、季節によってその値に差があるが、4 日間約 77 時間で大きな変動はほとんど見られず安定している。一方、DO 値については、季節別の値に違いが見られる他、周期的な時間変動も観測されている。冬季においては海表面の冷却により海水の上下の循環が起こり、海中の DO 値は一般に高くなり水深によらずほぼ一様となる。また、夏季になると日射による海表面の温度上昇により海水は成層構造を形成し、海底付近では活発化する海底生物の呼吸等によって酸素濃度が低下して一般に低い DO 値を示す⁶⁾。周期的な時間変動は海水の干満の影響で水深が変わり、その影響が DO 値に表れたものと思われる。

5 考察

5.1 本測定系における新たな閾値の決定

水中テンプラノイズの発音数の評価方法として、テッポウエビの発する単位間当たりのパルス数を調べることに変わりはない。前報告⁵⁾に従い、時系列の音響データを 16 ビットグレースケールの TIFF 画像に変換し、その後汎用の画像解析ソフトを用いてパルス数を計測した。パルス数の計測法の詳細についてはここでは省略する。

閾値はパルス数を決めるに当たり重要なものとなる。前回の報告の場合と比べて、水中音圧計およびデータレコーダなど測定系を一新しているため、新たな閾値の決定を行う必要がある。ここでは、前報告と同様、パルス継続時間から手動で決定する方法を採用した。まず、①音圧の時間波形からテッポウエビの典型的な単独パルスに着目し、②1つのパルスが1個分のパルスとカウントされ、且つその閾値以上のパルスの継続時間

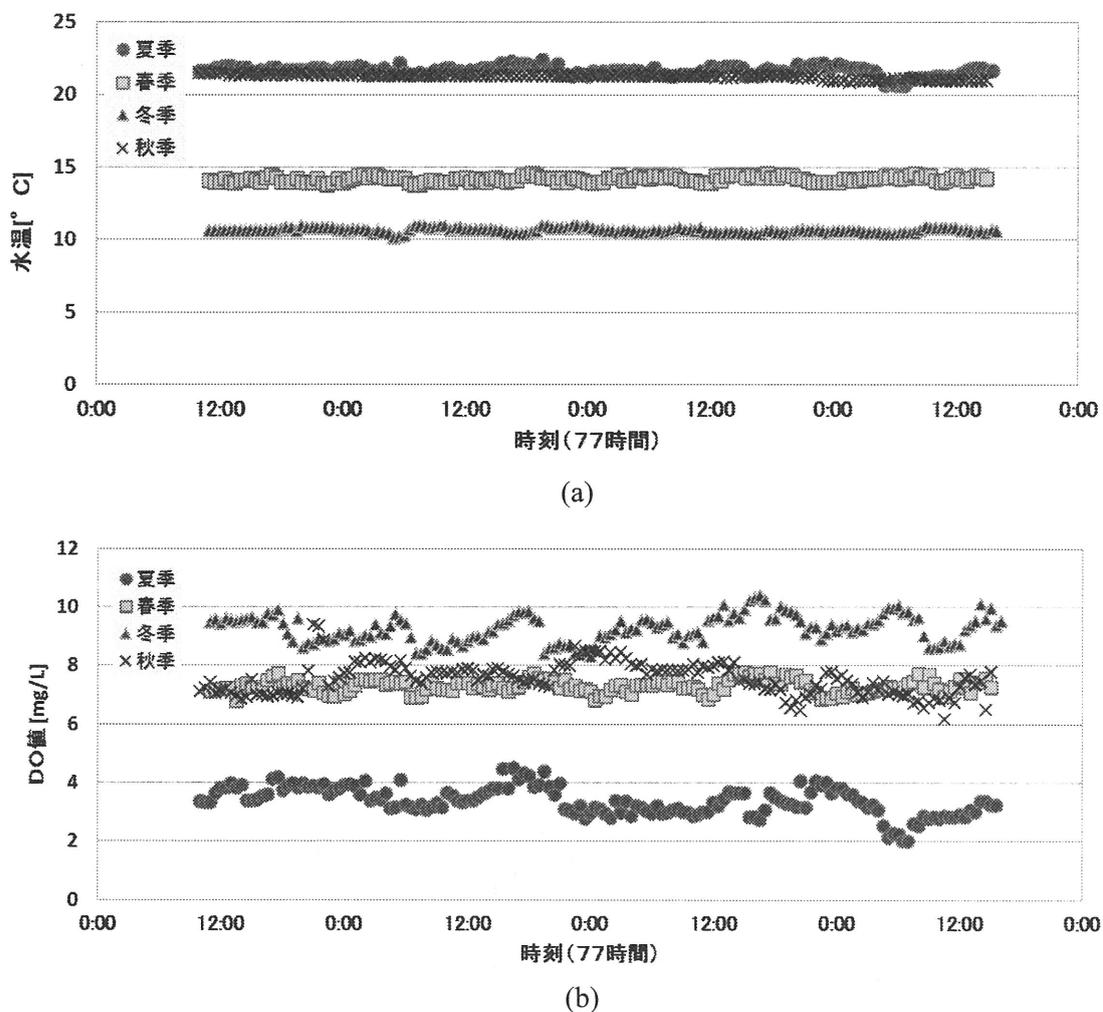


図 4 各季節（冬、春、夏、秋）における 4 日間（連続約 77 時間）の (a) 海水温および (b) 溶存酸素濃度(DO 値) の時系列変化

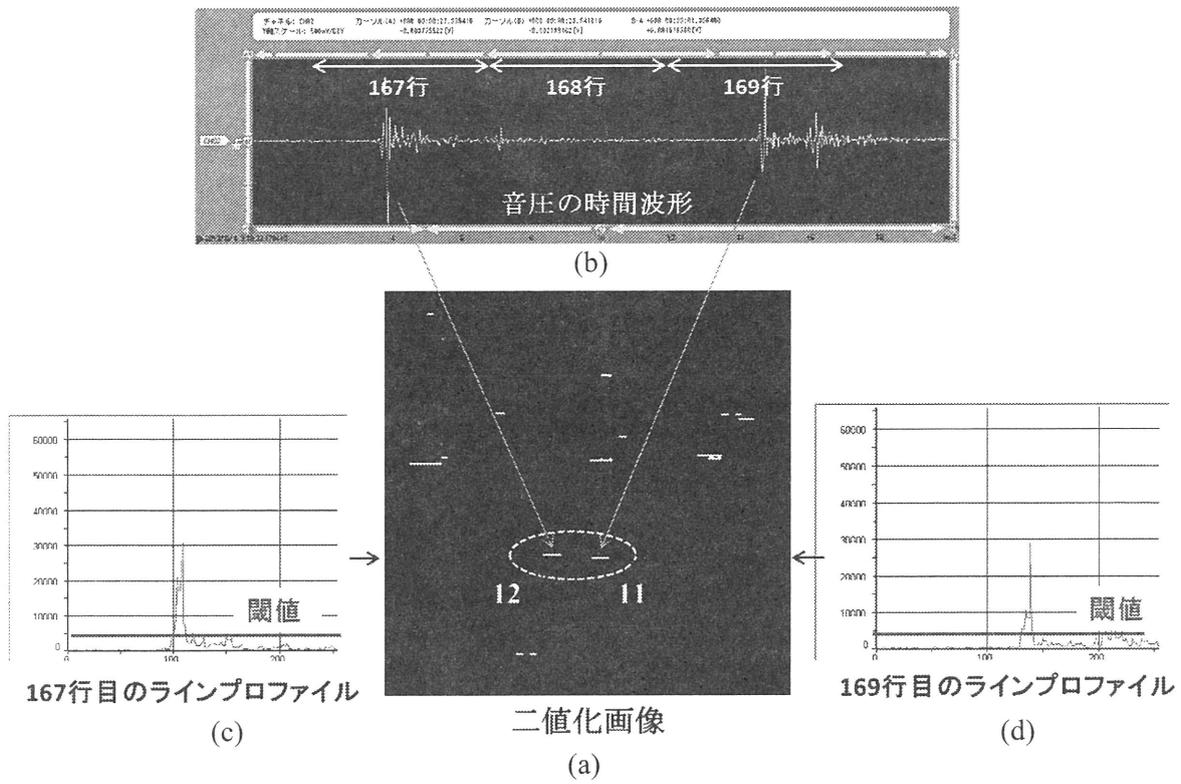


図5 今回の測定系で得られた音響データを画像(256×256)に変換し、典型的なパルス(画像中の丸で囲ったもの)から最適な閾値として4626(16ビット値)とした時の様子 (a) 二値化画像(図中の数値はそれぞれの典型的パルスの閾値以上の継続時間に相当するピクセル数) (b) 二値化画像の167行~169行に相当する音圧の時間波形 (c),(d) 二値化する前の元画像の167行目および169行目におけるラインプロファイル

として約0.2 msec(サンプリング周波数50 kHzの場合、10ピクセル程度の長さ)になるような16ビットの画像輝度値を設定した。図5に、今回の測定系で得られた音響データを256×256の画像に変換し、典型的なパルスから最適な閾値を決定した時の様子を示す。256×256の二値化画像の167行目と169行目に典型的なパルスが生じており、それらの閾値以上のピクセル数が10程度(二値化画像中の典型的な2つのパルスではそれぞれピクセル数は12と11を示している)になるような閾値として4626(16ビット値)と決定した。以下の各季節におけるパルス数の時系列変化を求めるに当たり、画像処理によるデータ解析を通じて閾値は固定値とした。

5.2 パルス数の時系列変化

各季節それぞれの約77時間に渡って約16分お

きに60秒間の音響データの採取を行っており、すべての音響データから16ビットグレースケール画像に置き換えを行うと膨大な量となる。そこで、予め保存された音響データの音圧の時間波形または水中音を再生して実際に聞くことで特に明らかな周辺ノイズ(近くを航行する船舶雑音や造船所などから発する人工構造物ノイズなど)がないと確認された音響データを選択し、60秒間の各音響データの中から適当と思われる21秒間³を抽出した。次に、抽出された21秒間の音響データを16ビットのテキストデータに変換を行い、さらに1024×1024の16ビットのTIFF画像に変換した。5.1で決定した閾値を設定し、得られた総ての画像から水中テンプラノイズのパルス数を求めた。この際、前報告と同様、以下のようなパルス数の補正を行っている。つまり、遠方からのパルスの一部またはスパイクノイズを計測し

³ Excelで扱える最大行数は $2^{20} = 1048576$ で、時間に換算するとサンプリング間隔1/50000[s]を乗じた

20.97[s]が上限となるため、今回は21秒間とした。

ていると思われるピクセル 3 以下のものはパルスのカウントから除いた。また、明らかにいくつかのパルスが重なっていると判断されるものについてはパルス 1 個分のピクセル数 10 で除して何個分に相当するかを推定した。一例として、夏季と冬季の日曜日の午前 3 時頃に観測された音響データから作成された二値化画像と推定されたパルス数を図 6 に示す(図 2 に示した夏季と冬季の適当な 21 秒間分から二値化画像を求めたもの)。夏季においてはテッポウエビによるパルスが 21 秒間ほぼ絶え間なく頻繁に発音しているの

に対し、冬季においては一部発音しているだけでその頻度は極端に減少しているのがわかる。21 秒間で推定されたパルス数は、夏季および冬季でそれぞれ 127 と 4 である。

4 通りの季節ごとに足掛け 4 日間連続計測(正確には計測時間は金曜日午前中から翌週の月曜日午後までの計 77 時間)した音響データから、上記のように TIFF 画像に変換し、その後画像処理によって求められた季節別パルス数の 77 時間分の時系列変化を図 7 に纏めて示す。パルス数は夏季が最も多く、秋季、春季と減少して冬季がも

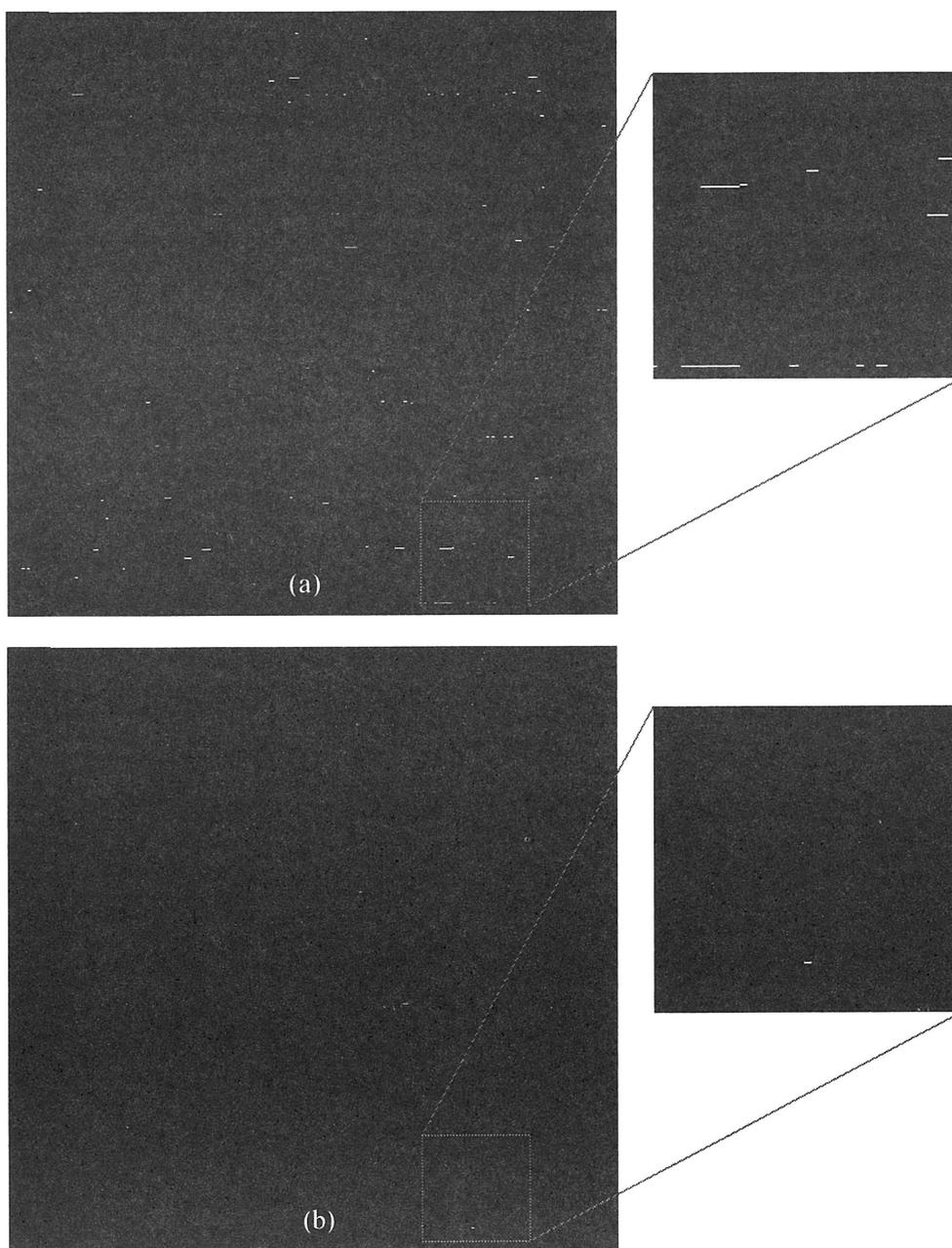


図 6 こじま栈橋での午前 3 時頃に計測された音響データから作成された二値化画像(サイズ 1024×1024 の画像で、時間では約 21 秒間に相当) (a) 夏季(推定されたパルス数は 127) および (b) 冬季(推定されたパルス数は 4) で、それぞれ右上に四角で囲んだ部分を拡大して示す

っとも少なくなっている。一見、時系列的にはテッポウエビによるパルス発生はランダムに生じているようにも見受けられる。そこで、図7で示した約77時間分のパルス数の時系列変化を、曜日に関係なく1日の午前0時から24時までの時刻に対して約3日分を重ねてトレースして描き直したものを図8に示す。季節によって異なるようであるが、例えば夏季においては、日の出前と日没前後で頻繁に発音しているようにも見受けられる。一部では、日没と共にパルス数が増大するという報告があるが、今回の結果(図8)からは日没時での明らかな変化は見られていない。

5.3 海洋環境値との関連について

一般にテッポウエビ類は、夏季において水温の上昇と共に個体数も増えて活性化し、お互いの縄張り争いに乗じて威嚇のために頻繁に発音するが、冬季においては水温低下のため個体数は激減し

発音数は減少する。図4と図7で示した4日間約77時間の結果を比較すると、テッポウエビの発音するパルス数は海水温度と相関のあることが改めて確認される。また、溶存酸素濃度(DO値)との関係では、夏季においては成層化と共に海底付近のDO値は2~4 [mg/L]の範囲で低い値を示すが、エビの生存率に影響する値ではなく前回の報告と同様パルス数との直接の相関はないことが再確認された。また、冬季においては海水循環によりDO値そのものは高い値を示して生物であるテッポウエビにとっては好条件となるが、個体数そのものが少ないためほとんど発音せず、パルス数との直接の関係は特に見当たらない。DO値とパルス数との関連については、特に夏季においてテンプラノイズを海洋環境の指標に利用する根拠になっているところもあり、DO値が最も低下する夏季の海底付近の貧酸素水塊が発生していると思われる海域を含めた様々な海域を計測して

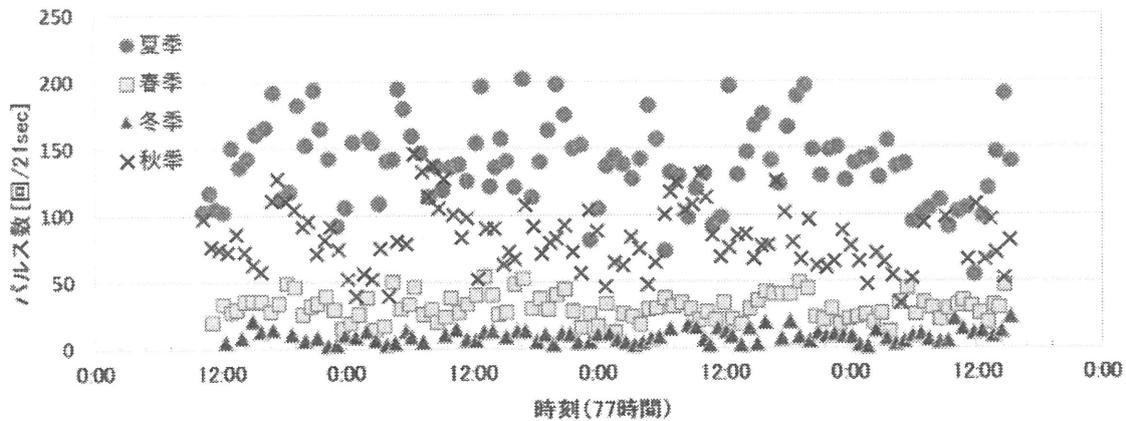


図7 画像処理を用いて求められた各季節(冬、春、夏、秋)における4日間(連続約77時間)のパルス数の時系列変化

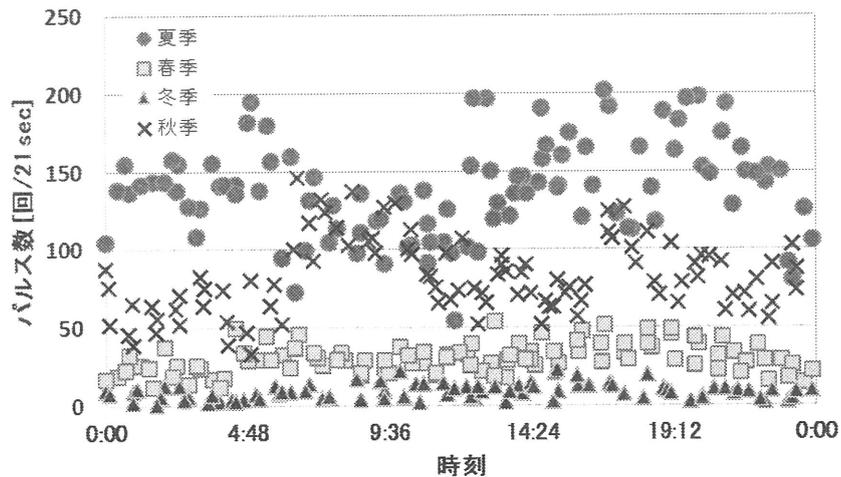


図8 図7で示した約77時間のパルス数の時系列変化を曜日に関係なく1日の午前0時から24時までの時刻に対して約3日分を重ねてトレースして描き直したもの

両者の関連を改めて調査する必要がある。

5.4 テッポウエビの音源音圧レベルについて

前報告でも考察したところではあるが⁹⁾、テッポウエビの音源音圧レベル値は報告者によって大きく異なっている。その原因は主にパルスを計測する時のハイドロフォンの帯域、フィルタ等の帯域制限の有無、A/D変換するサンプリング周波数に因ると考えられる。今回、100 kHzまでの周波数特性が保証された水中音圧計を新たに使用し、サンプリング周波数を1 MHzに設定することでバースト波状のパルス波形をより精度良く計測し、テッポウエビの音源音圧レベルを推定することを試みた。

今回使用した水中音圧計のAC出力電圧の実効値 V_{rms} または瞬時値 V と、音圧レベル SPL との間の関係は以下の式で与えられる。

$$SPL = SL_{sw} + 20 \log V_{rms} = SL_{sw} + 20 \log(V/\sqrt{2}) \quad (1)$$

ここで、(1)式中の SL_{sw} は、測定時の水中音圧計の切り替えスイッチの音圧レベルで、今回の計測においては常時 140 [dB re 1V/ μ Pa] を使用した。つまり、水中音圧計の音圧指示メータが 0 dB の時、水中音圧レベルは 140 dB を示し、その時の AC 出力電圧の実効値 V_{rms} は 1 V を表わしている。パルス波形の測定結果の図 3 より、ピークツウピークの電圧 V_{p-p} は約 4 V であることから、(1)式よりテッポウエビの観測されたピークツウピークの音圧レベル値は 149 [dB re 1V/ μ Pa] と求められる。本研究においては、単一ハイドロフォンで計測しているため、発音したテッポウエビの音源位置を推定することが出来ないが、仮に距離 10 m とすると距離減衰分 20 dB を加算して 169 dB となる。これは、森らが報告している 160~190 [dB] の値と同程度である^{7,8)}。

6 おわりに

本報告では、前報告で課題となっていた長時間にわたる連続した水中音響と海洋環境値の計測を行うため、自動計測装置の構築を行った。本装置により、冬、春、夏、秋の各季節における 4 日間 (約 77 時間) 連続の水中音響と海洋環境の定点同時測定をこじま栈橋において行い、テッポウエビのパルス発生頻度について海洋環境値との関係とともに再考察を行った。その結果、テッポウエビのパルス発生状況が海水温との関係、時刻との関係からある程度分かってきた。このことは、

テンプラノイズを積極的に利用して周囲雑音イメージングを行う際には、実用的な観点から重要な事実となる。また、100 kHz まで周波数特性が保証された水中音圧計を使用し、サンプリング周波数を 1 MHz に設定することでバースト波状のパルス波形を精度良く計測した。その結果、推定されたテッポウエビのピークツウピーク音源音圧レベルは他の文献値と同程度であることが確認され、本実験で採用した測定装置、解析方法の正当性が裏付けられた。

今後は、季節、時間の違いだけでなく、海域の違いによるテンプラノイズの発音分布を把握するため、これまでと同様の水中音響と海洋環境値の同時測定を幾つかの海域で行ってより多くの基礎データを蓄積してゆくことが重要である。

謝辞

本研究の一部は、本校の平成 24 年度教官特別事業および日本財団による平成 25 年度海上保安分野の諸問題に関する研究助成事業により行われたものである。関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) Epifanio et al., Imaging in the ocean with ambient noise: the ORB experiments, J. Acoust. Soc. Am., 106(6) (1999), 3211-3225.
- 2) Venugopalan et al., Ambient Noise Imaging - First Deployments of ROMANIS and Preliminary Data Analysis, Proc. IEEE Oceans 2003, No.882 (Sept.22-26, San Diego, 2003).
- 3) 渡部守義他, テッポウエビを用いた海域環境のモニタリング, 土木学会論文集, 643/VII-14 (2000), 49-60.
- 4) 渡部守義他, 浅海域環境評価を目的とした水中音響観測によるテッポウエビ類生息密度測定, 土木学会論文集, 713/VII-24 (2002), 69-79.
- 5) 倉本和興, 田中隆博, 画像処理を用いた水中テンプ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 第 56 巻第 1・2 号 第 2 部(2013), 1 - 10.
- 6) 倉本和興, 呉湾周辺海域の海洋環境と水中音環境の計測 - 夏季と冬季の深度依存性の違い -, 海上保安大学校研究報告 第 55 巻第 1・2 号 第 2 部(2012), 25 - 34.
- 7) 森和義他, 沿岸域生物雑音におけるパルス波形の特徴に関する基礎的研究, 海洋音響学会 2009 年度研究発表会講演論文集, 09-24.
- 8) 加田春樹他, 2009 年 10 月の東京湾および 11 月の内浦湾における生物突発性雑音観測結果の一例, 海洋音響学会 2010 年度研究発表会講演論文集, 10-06.