

画像処理を用いた水中テンプラノイズの発音数評価*

倉本 和興、田中 隆博 (海上保安大・海事工学講座)

1. はじめに

日本の沿岸域の至る処で生息するテッポウエビ類は、「パチパチ」というあたたかもテンプラを揚げている時のような独特のパルス性雑音を頻繁に発する。これはいわゆるテンプラノイズと呼ばれているもので、テッポウエビ類の片方の大きく発達したはさみを急激に閉じるときに水の噴出を伴い、パルス音（継続時間は約 0.5 [ms]）を起こすことで生じると言われている。これまで水中テンプラノイズは、あくまでノイズとして邪魔者扱いとされてきたが、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^{1,2,3)}や、テッポウエビの発音数（パルス数）の変化を海洋環境の指標、底質評価等に利用しようとする動きがある^{4,5)}。しかしながら、これまでのところ水中テンプラノイズそのものの発生頻度や分布状況の詳細は未解明な部分が多く、発音数の評価方法についても確定されたものは見当たらない。

本研究では、水中テンプラノイズの発生頻度の詳細な特性を調べるため、本校のこじま栈橋において1年間を通した水中音響と海洋環境値(水温、pH、塩分、溶存酸素濃度(DO 値)など)の定点観測を行い、その発音数(単位時間当たりのパルス数)の評価を行った。水中テンプラノイズの発音数を評価する一手法として、取得した音響データを画像データに変換し、その後汎用の画像解析ソフトでパルス数を計測する新たな手法を考案したのでその概略を述べると共に、今回提案した手法によりパルス数を算出し、水中テンプラノイズの発音数の変化と海洋環境値との関連について考察する。

2. 水中音響データおよび海洋環境値の取得

水中テンプラノイズの計測および海洋環境値の取得は、海上保安大学校のこじま栈橋(水深約 15 [m])において行った。栈橋から水中ハイドロフォン(受波感度 -178 [dB re 1V/ μ Pa]、20 [kHz]まで平坦な周波数特性を有する)および水質センサを海中に垂らし、海底から約 1 [m]の位置で各計測値の取得を行った。観測日時は、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)、秋季(2013年11月8日~11日)で、各季節における金曜日午前10時頃から次週の月曜日午後3時頃までの連続した77時間である。水中音響データは、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約16分間隔で1分間の自動サンプリングを77時間連続して行った。海洋環境データは、多目的水質計(TOA-DKK WQC-24)を使用し、水温、塩分濃度、pH、溶存酸素濃度(DO 値)、電気伝導度、濁度などを30分間隔でプログラミンによる自動計測を行った。

3. 画像処理を用いたパルス数評価法

水中テンプラノイズの評価方法としては、例えばテッポウエビの発する1分間当たりの発音数(パルス数)を調べるのが1つの方法である⁴⁾。本研究では、時間軸1次元の音響データを画像データに変換し、汎用の画像解析ソフトを用いることでテンプラノイズのパルス数を計測する新たな手法を考案した⁶⁾。画像処理を用いたパルス数の計測手順のフローチャートを Fig.1 に示す。以下、

このフローチャートに従って信号処理法について述べる。本手法の意義とメリットは以下の通りである。

- ① 音響データを画像データに変換して処理・評価する手法はこれまでに全く見当たらず、新たな手法である。
- ② テンプレノイズは複数個体のテッポウエビのランダムな発音に由来するためパルスの重なりなども多く、厳密にパルス数をカウントするよりむしろ大まかに分布として評価する方が良い。
- ③ 膨大なテキストデータをバイナリーの画像データとして一度に扱えるので処理が容易となる。
- ④ 長大な時間軸一次元で表された音響データを画像として見ることが出来、処理の過程や評価の状況が一目瞭然となる。
- ⑤ 新たなプログラムコードの開発を行うことなく汎用のソフトで手軽に処理が可能となる。

3.1. 音響データから16ビットグレースケール画像への変換

水中音響データは、水中音圧計（沖電気工業 SW1020）で常時計測し、その水中音圧の交流信号を約 16 分間隔で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 分間程 A/D 変換して取得した。ここで、船舶雑音などの低周波ノイズを取り除くため、水中音圧計の 1 [kHz] のハイパスフィルターを通した。一例として、2013 年 8 月 4 日の 03:11 頃の 1.31 秒間の音圧の時間波形を Fig.2(a) に示す。以下、この 1.31 秒間の音響データを用いてサンプル画像を作成し、パルス数の評価方法を述べることとする。このときの 1.31 秒間の音圧データは、縦軸 ± 5 [V] の電圧信号で、サンプリング間隔 2×10^{-5} [s] ($1/50000$ [s]) の 16 ビットのデータ数を持つ時系列 1 次元に配列された長大な CSV ファイルである。Fig.2(a) より、この 1.31 秒間の短い間においてもテッポウエビによると思われる明らかなパルスが幾つか発音

しているのが分かる。次に、この CSV ファイルを画像の輝度値とするため各数値の絶対値を取り、16 ビット値に変換（65536 を乗ずる）後、自作ソフトにより時間軸 1 次元のテキストデータから 2 次元のマトリックステキストデータに変換した。さらにそれをフリーソフト ImageJ により 16 ビットグレースケールの 2 次元 TIFF 画像に変換した (Fig.2(b))。つまり、Fig.2(a) に示すような時間軸 1.31 秒間分の音響データ（全データ数 16 ビット）が、Fig.2(b) のような横幅 256 列 (0.00512 秒間に相当)、縦幅 256 行の 2 次元 TIFF 画像に変換されたことになる。ここで、画像における 16 ビットの輝度値がその時刻における音圧値の絶対値に相当している。パルスが多く存在するところでは画像にも高い輝度値を持つ破線状の白線が多数表れており、Fig.2(a) の時間軸の音圧波形と Fig.2 (b) の画像はよく対応しているのが分かる。

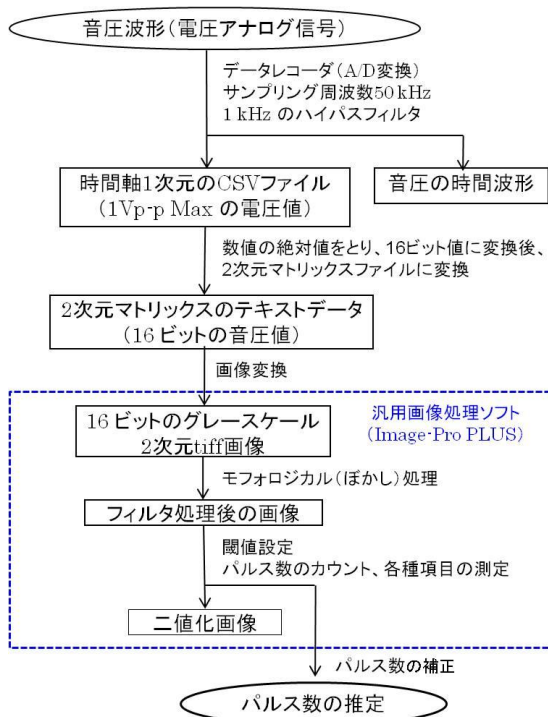


Fig.1 The flowchart of pulse measurement procedure using the image processing.

3.2. 汎用画像解析ソフト (Image-Pro PLUS)によるパルス数のカウント

今、作成した2次元 TIFF 画像の 167 行から 169 行までの 3 行分のデータ、つまり時間軸では 0.01536 秒間のデータに着目する。この 3 行分の音圧の時間波形の拡大を Fig.2 (c)に、167 行および 169 行の画像から得られたラインプロファイル (画像の 1 行分の輝度値 (16 ビット値) を縦軸に表したものを Fig.2 (d)および(e)にそれぞれ示す。167 行および 169 行にはテッポウエビの典型的なパルスがそれぞれ発生しており、絶対値を輝度値としているため画像上には破線のように表れ、画像から得られたラインプロファイルには時間波形のマイナス部分をプラス側に折り返した形の鋭

いスパイク状の波形が表れている。

Fig.2 (c)の様なバースト波状のパルスをパルス数 1 とカウントするためには、その包絡線を求め、一定の閾値以上の輝度を持つパルスを 1 つとして測定するのが効果的である。そこで画像解析ソフト(Image-Pro PLUS)のフィルタ処理機能の一つであるモフォロジカル (ぼかし) 処理を利用する。このフィルタ処理は、画像 (ここでは、横方向の 1 行内) において、輝度値の極端に異なる部分がある場合に隙間を埋め、接近した画像 (ピクセル) を接続してぼかせる機能を持つ。フィルタ処理を施した結果の画像を Fig.3(a)に、167 行および 169 行の画像から得られたラインプロファイルを Fig.3(b)および(c)にそれぞれ示

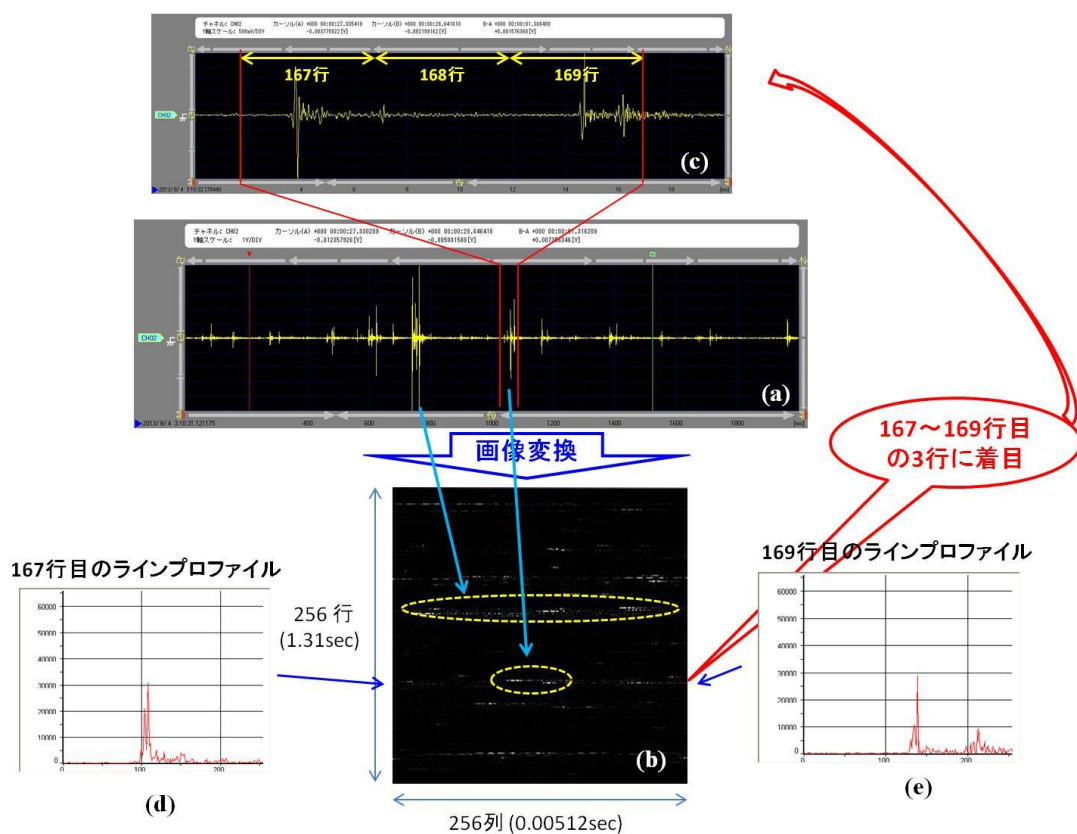


Fig.2 Time waveform of the sound pressure (a) is converted into the 16 bit gray-scale TIFF image (b). Here, (c) is the expanded time waveform of sound pressure which corresponds to 3 lines (0.01536 [s]) on the image, (d) and (e) are the line profiles on the image at line 167 and 169, respectively.

す。鋭いスパイク状の波形間の隙間が埋まり、バースト波状パルスのほぼ包絡線が得られているのが分かる。

次に、閾値を設定して、画像解析ソフトの演算処理機能（閾値以上のオブジェクト数のカウント、オブジェクトの各種項目の測定）を利用する。ここでは、手動で閾値を 4626 に設定し（閾値はパルスカウント数に敏感に効いてくる重要なパラメータであるため、設定方法、妥当性については発表会で報告する）二値化を行うと共に、閾値以上の輝度を持つオブジェクトの数（パルス数に相当）とオブジェクトの各種項目を計測する。Fig.3(d)に二値化された画像を示す。167 行および 169 行のバースト波状のパルスはそれぞれ 1 つのオブジェクトとして判断され、1 つのパルスとしてカウントされているのが分かる。Table 1

に、画像解析ソフトにより測定を行った分析結果の一部を示す。測定項目としては、各オブジェクトのピクセル数（Area）、2次元画像上の座標（center-x、center-y）、全画像に対する面積比（PerArea）を選んでいる。Table 1 における Obj.#33 および 35 が 167 行および 169 行のバースト波状のパルスであり、閾値以上の幅としてはピクセル数にして 10 程度（時間に換算して約 0.2 ms に相当）で、典型的なテッポウエビのパルス幅（継続時間は約 0.5 [ms]）の 1/2 と矛盾しない。一方、Obj.#3 および 4 のようにピクセル数として 3 にも満たないものも 1 つのオブジェクトとしてカウントされており、さらに Obj.#19 のようにピクセル数が 28 と明らかにパルスが重なっていると思われるものもオブジェクト数 1 としてカウントされている。

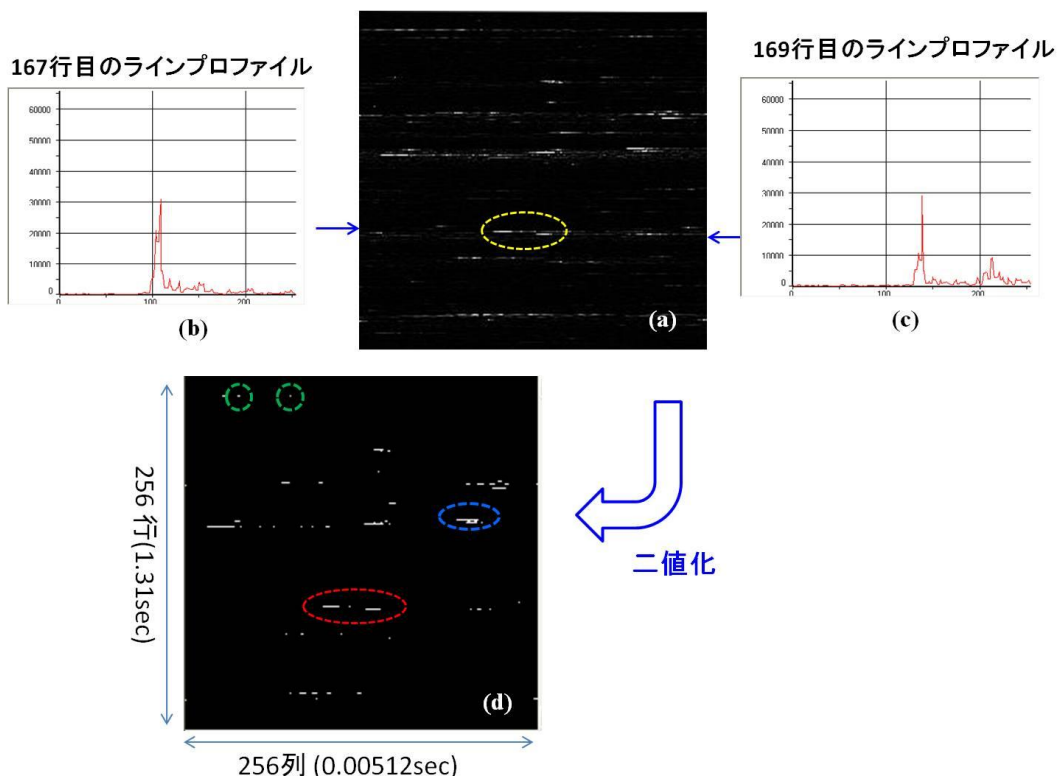


Fig.3 Image after morphological processing (a) and binarization image made by setting a threshold value (d). Here, (b) and (c) are the line profiles on the image at line 167 and 169, respectively.

Fig.3(d)に Obj.#3 および 4、そして Obj.#19 の二値化画像での画像上での位置を丸印で示す。

3.3. パルス数の補正

画像上に存在する正確なパルス数を推定するため、以下のような補正を行った。まず、ピクセル数3以下のものは遠方からの減衰したパルスの一部またはスパイクノイズがたまたま計測されたとして全パルス数からその数だけ除外した。次に、典型的なテッポウエビのパルスの継続時間が約 0.5 [ms]であることから、単独パルスの包絡線の閾値以上の幅としてピクセル数は10(時間にして0.2 [ms])程度と見なせる。そこで、明らかにピクセル数10以上のものは幾つかのパルスが重なって1つのオブジェクトとしてカウントされていると見なし、ピクセル数10で除して何個分のパルスに相当しているのかを推定した。以上の補正を行った結果、今回解析の一例として用いた 256 × 256 のサンプル画像 (1.31秒間の音圧の時間波形に相当) に存在するパルス数は19 (ピクセル数の合計としては142) と推定される (Table 1 の下欄に記載)。

4. 各季節における水中テンプラノイズのパルス数と海洋環境値

各季節の77時間において、約16分間隔で1分間計測された膨大な音響データ

Table 1 Result of analysis in the object measurement.

Obj.#	Area	Center-X	Center-Y	PerArea
1				
2	4	28.5	14	0.0000607
3	2	38.5	14	0.0000303
4	1	76	14	0.0000151
.
.
16	1	0	79	0.0000151
17	10	227.5	81	0.0001519
18	5	150	92	0.0000759
19	28	206	105	0.0004255
.
.
32	1	242	164	0.0000151
33	12	105.5	167	0.0001823
34	1	119	167	0.0000151
35	11	136	169	0.0001671
36	1	207	169	0.0000151
37	3	213	169	0.0000455
.
.
19	142			

のうち、一例として冬季、春季、夏季における日曜日の3:00頃の50秒間のパルスの発生状況を同じスケールで同時に示したものを Fig.4 に示す。明らかに夏季においては、テッポウエビ類は頻繁にパルスを発生しており、春季、冬季になるにつれてパルス数の発生頻度は次第に減少しているのがわかる。以上の傾向を定量的に示すため、3.で示した画像処理を利用したパルス数の評価法により、取得した1分間の各音響データから約21秒間をそれぞれTIFF画像に変換し、水中テンプラノイズの発音

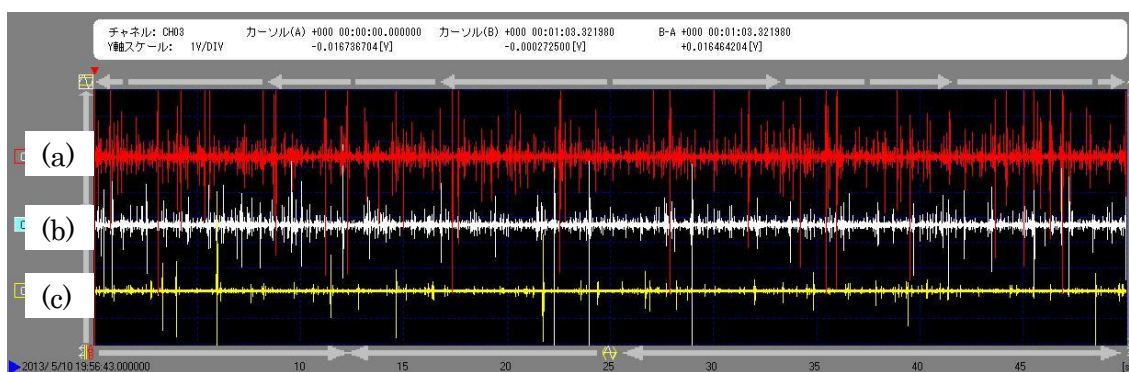


Fig.4 The generation status of the pulses for 50 seconds around 3:00 in Sunday at KOJIMA pier of Japan Coast Guard Academy in each season of (a) summer, (b) spring and (c) winter.

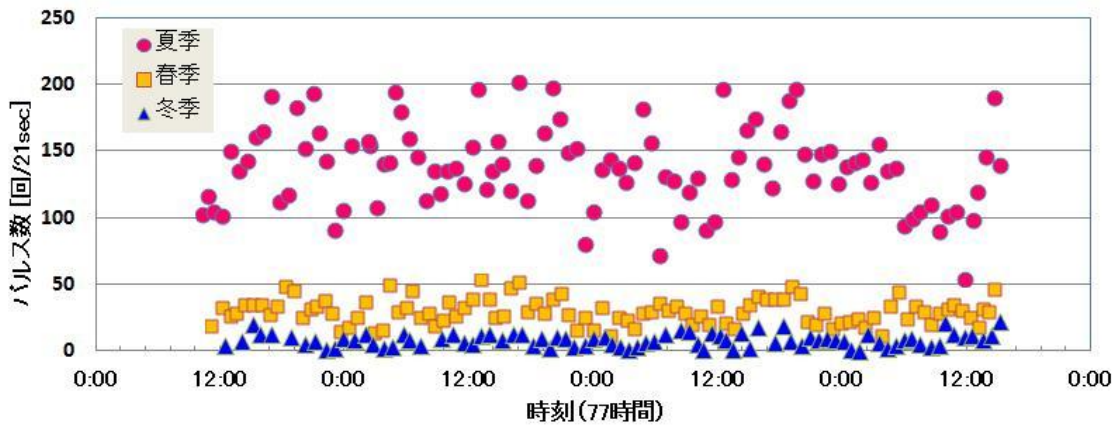


Fig.5 The number of pulses of time series for 77 hours in each season in summer, spring and winter finally obtained by using the present image analysis.

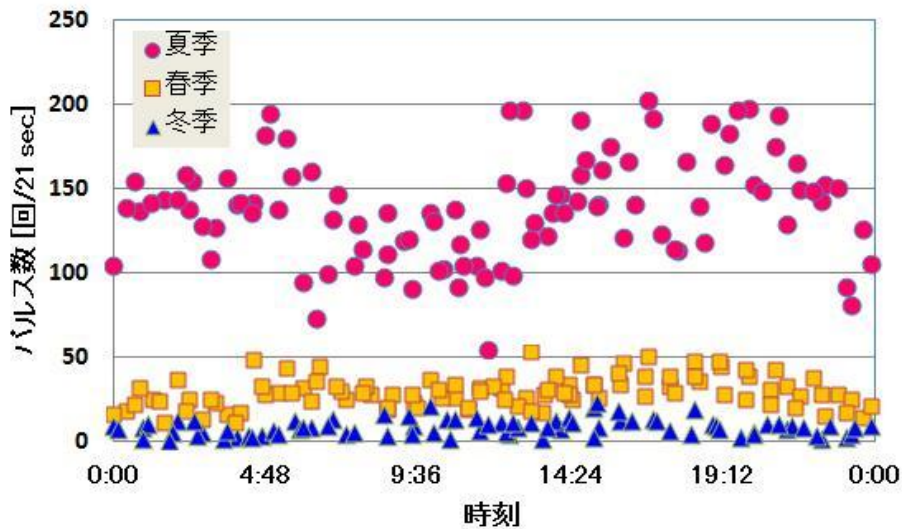


Fig.6 The number of pulses of time series as one day by re-describing the data for 77 hours shown in Fig.5.

数の推定を行った。ここで、サンプリングされた水中音響は予め再生して聴取し、航行船舶等の明らかな雑音源がある場合は本解析から除外している。又、Excel で扱える最大行数は $2^{20} = 1,048,576$ 行なので、解析を行う時間としてはサンプリング間隔 2×10^{-5} [s] ($1/50000$ [s]) を乗じた 20.97 秒とした。従って、変換される画像は、サイズ 1024×1024 の 16 ビットグレースケール TIFF 画像である。画像処理を用いて最

終的に求められた冬季、春季、夏季における 77 時間の時系列のパルス数の変化を Fig.5 に示す。夏季においては発生するパルス数は 21 秒間当たり 100 回以上に達し、冬季に比べて平均値、ばらつきとも 1 桁以上大きくなっているのが分かる。Fig.6 は、Fig.5 の 77 時間の時系列のパルス数の変化を 1 日の時刻に対して描き直したものである。冬季においては元々パルス数が少ないので特徴的な傾向は見られないが、夏季、春

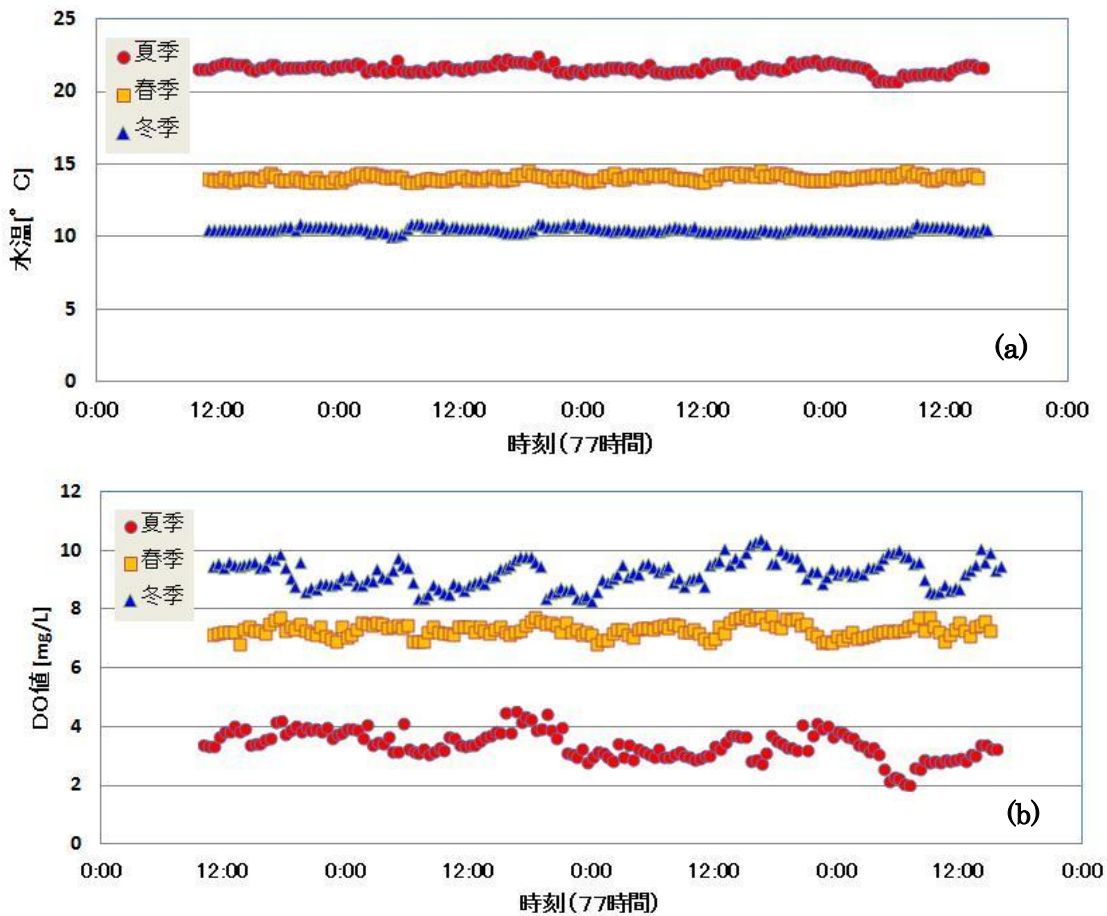


Fig.7 The change of (a) water temperature and (b) dissolved oxygen concentration (the DO value) near the sea bed for 77 hours in each season in summer, spring and winter.

季のいずれも1日のうちで正午前に一時パルス数が減少し、18:00 前後の日没後にパルス数が増大する傾向が見取れる。これは、日没と共にパルス数が増大するという一部報告³⁾と一致している。

今回音響データと共に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77時間の時系列変化として描いたものをFig.7に示す。DO値において周期的に変動しているのは、潮汐の変化により観測地点の水深が時間と共に変動し、その影響で変化したものと思われる。一般に、テッポウエビは夏季において

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と言われている。一方、冬季においては水温が低下と共に個体数は減少又は死滅し、ほとんどパルス性雑音を発しない。Fig.5とFig.7(a)を比較すると、テッポウエビの発するパルス数と水温は直接関係しているのが分かる。また、貧酸素水塊が発生している海域、つまり溶存酸素濃度(DO 値)がおおよそ2.0 [mg/L] 以下になるとテッポウエビの生存率が低下し、さらにこれが続くと死滅してパルス性雑音は発音しなくなると言われている^{4,5)}。Fig.7(b)によると、夏季の海底付近のDO値でも3~4 [mg/L] 程度でありエ

ビの生存率に影響する程の値ではなく、今回はパルス数との直接の相関はないと思われる。DO 値とパルス数との関連については、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であるが、DO 値が最も低下する夏季の海底付近における様々な海域を計測し、両者の関連を改めて調査する必要がある。

5. おわりに

本報告では、水中テンプラノイズの発音数の変化（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画像データに変換し、その後汎用の画像解析ソフトでパルス数を計測する新たな手法の概略を述べた。加えて、本校のこじま栈橋において1年間を通した水中音響と海洋環境値（水温、pH、塩分、溶存酸素濃度(DO 値)など）の定点観測を行い、新たな手法によりパルス数を算出してその発音数の変化と海洋環境値との相関について考察した。今後、今回提案した画像処理を用いたパルス数評価法の有効性を確認すると共に、テンプラノイズの発生条件、頻度、分布状況を把握するために、海

洋環境値と水中音響データの同時測定を幾つかの海域で継続的に行って多くのデータを蓄積してゆく予定である。

参考文献

- 1) Epifanio et al., “Imaging in the ocean with ambient noise: the ORB experiments”, J. Acoust. Soc. Am, 106(6), 3211-3225 (1999).
- 2) 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, (2009.5).
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 倉本和興他, “画像処理を用いた水中テンプラノイズのパルス数評価法”, 海洋音響学会 2013 年度研究発表会講演論文集, 13-20.