

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推定

渡部守義¹・関根雅彦²・古澤昌彦³・浮田正夫⁴・今井 剛²・樋口隆哉⁵

¹学生会員 工修 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

²正会員 工博 山口大学助教授 社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³農博 東京水産大学教授 海洋生産学科(〒108-8477 東京都港区南 4-5-7)

⁴正会員 工博 山口大学教授 社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵正会員 工博 山口大学助手 社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

筆者らは、これまで海中発音生物として知られるテッポウエビ類の発音数観測による浅海域底層環境モニタリングの有用性を示してきた。しかし、生物への影響を評価する上で生息密度の議論は避けられないことから、本論文ではパルス数と生息密度の関係の定量化について検討した。ハイドロフォンを正方形に配置するシステムにより音源位置と音源音圧レベルの測定をおこなった。さらに巣穴を計数し生息密度と発音頻度を推定した。これらの結果を用いて単一ハイドロフォンで観測されたパルス数と生息密度の定量化シミュレーションをおこなった。以上により、調査地点においてパルス数と水温を調査するだけで、テッポウエビ類の生息密度を推定することが可能となった。

Key Words: *underwater acoustics, environmental indices, snapping shrimps, pulse, population*

1. はじめに

土木工事の影響を評価する場合には、損失された質的、量的な環境価値の把握、および評価手法が不可欠とされている。生態系の環境要因の変化と動植物の生息環境を評価するためには、一般的に生物の現存量に注目した生物モニタリングによる評価法が有効であるが、水中生物量の推定は容易ではない。漁獲量は漁具や漁業努力量に大きく左右されるし、採取を基本とした既存の底生生物の調査法では底泥採集からソーティングまで含めると多大な時間と労力、専門知識が必要である。このため、従来の環境調査では、汚濁物質濃度や溶存酸素など物理化学指標が測定されることが多く、生物量や生物活性そのものが測定されることはきわめて少なかった。

テッポウエビ属(*Genus Alpheus*)は世界中で 220 種以上、日本においても約 60 種が確認されている¹⁾。分類については、これまでもかなりの情報が蓄積されているが、完全に整理されているとは言えず、今日でも新種が発見されているのが現状である。テッポウエビ属は、第一脚に片方が大きい非対称のハサミを持っていることが特徴である。急激にハサミを閉じることで、水の噴出を伴う大きな音(以降パルス音と記す)を起こす。このため *snapping shrimp*, *pistol shrimp* とも呼ばれている。発音の目的は敵対者に対する威嚇や防御、あ

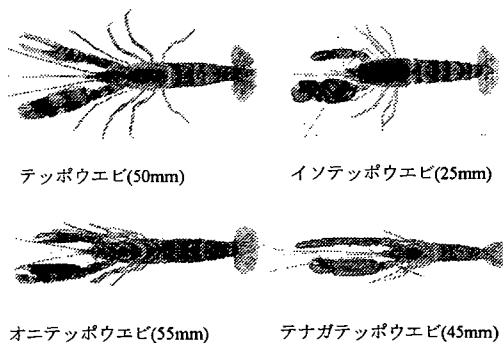
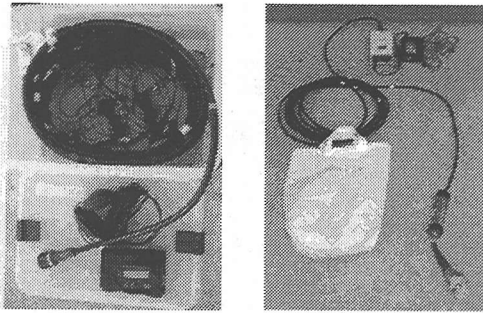


図-1.1 日本沿岸域のテッポウエビ類
() 内は体長(眼窩後縁から尾節末端)

るいは捕食を行うために相手を脅かすためであるとされている²⁾。この発音は高周波で、この個体群が発する高いレベルの音は自然界の中で他に相当するものではなく、また季節的变化がほとんどなくほぼ一定のレベルを維持しているとされている^{3,4)}。日周変化もほとんどないが、日の出前と日没後にわずかな騒音レベルのピークがある。これはおそらく種の活動が増すことが原因である⁴⁾とされている。このほか巣穴を仲介として、ハゼ科魚類との間に共生関係を持つことでも知られている。



(a)ハイドロフォン (b)ホエールフォン

図-2.1 水中音響録音装置

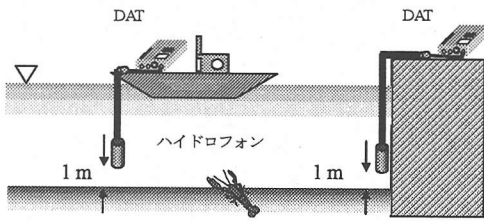


図-2.2 水中音響録音の方法

左：船舶を用いた調査、右：陸からの調査

日本沿岸域に見られる主な生息種は、テッポウエビ (*A. brevicristatus*), オニテッポウエビ (*A. distinguendus*), イソテッポウエビ (*A. lobidens*), テナガテッポウエビ (*A. japonicus*) の4種である。本研究では、上記の4種をテッポウエビ類と称して対象生物とした。

海中発音生物を指標種とする場合、観測場所と時期にほとんど制限がないとされているテッポウエビ類は最適である^{3),5)}。海域において、なんらかの環境変化によりその生息数が変化した場合、水中録音により発音数の変化を調査するだけでその影響を知る事ができると予想される。本研究は水域の生物生息環境を簡易にモニタリングするためのテッポウエビ類を用いた手法の確立を目指すものである。筆者ら⁶⁾はこれまで、定点調査において水質汚濁の発生していない時期の水温と発音数を把握しておくことにより、貧酸素水塊などの水質汚濁に起因するパルス数の変化を検出することが可能であることを示した。しかし、生物への影響を評価する上で生息密度の議論は避けられない、過去の研究においてもテッポウエビ類の生息密度を測定したものはほとんどない。テッポウエビ類の個々のパルスが海底のどの位置から発せられるかを特定することができれば、これによりテッポウエビ類の分布と単一ハイドロフォンにより観測されるパルス数の関係を現場で定量化することが可能となる。

本論文では、生物環境指標としてのテッポウエビ類

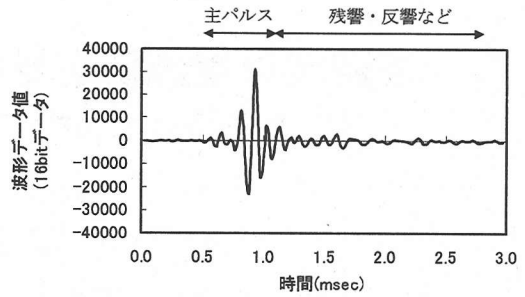


図-2.3 テッポウエビ類のパルス音の1波形

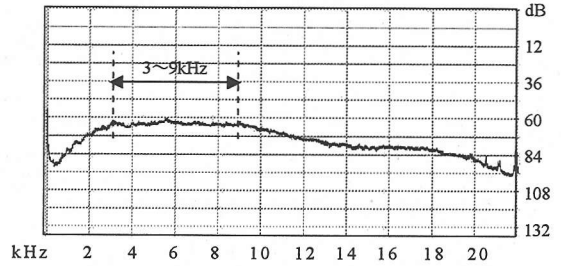


図-2.4 パルス音のスペクトル分析

1998年山口県宇部市床波漁港防波堤において録音した100個のパルス音の平均

のパルス数観測の利用を視野に入れ、パルス数と生息密度の関係の定量化について検討をおこした。

2. パルス数の測定方法

(1) 水中音響の録音方法

水中音響の録音には、水中録音用のマイクロフォン(以降ハイドロフォン)と DAT(Digital Audio Tape Recorder)を用いた。図-2.1 に本研究で用いた DAT と2種類のハイドロフォンを示す。図-2.1 (a)は東京水産大学海洋生産学科の濱田悦之教授がテッポウエビ音観測用に特注したもの(沖電気製)である。(b)はクジラ観測用に市販されている水中マイクとアンプから構成されている製品(沖電気製)である。DAT は録音データを圧縮しないことから採用した。

水中音響録音調査は図-2.2 に示すように、調査地点にてハイドロフォンの受信部を水底から1m 上部位置に保ち約2分間水中録音を行うだけである。録音時には周辺海域を航行する船舶がいないことに留意し、船舶を用いる場合には、エンジン、発電用補機を停止するなどの騒音、振動を避ける必要がある。

(2) テッポウエビ類のパルス音の特性

テッポウエビ類のパルス音は強く、頻度が高いので、

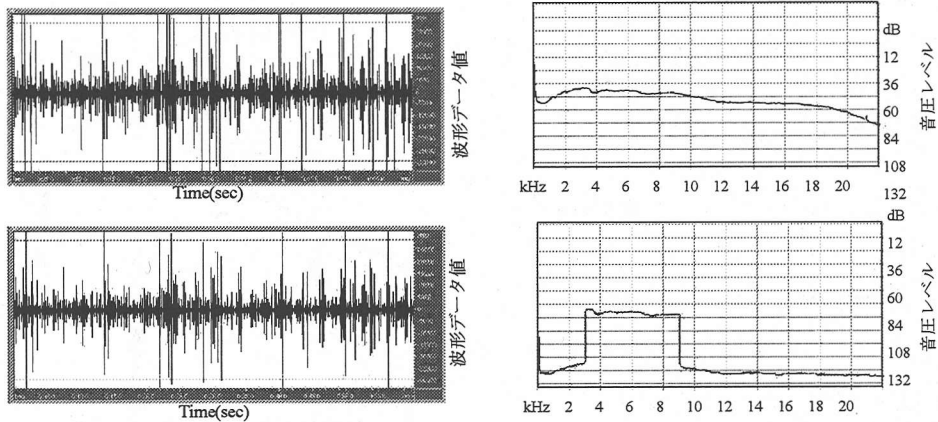


図-2.5 騒音除去フィルター処理の効果

1998年10月の宇部市床波漁港で録音した1分間の録音データの波形
 上段左：フィルター処理前の波形、上段右：フィルター処理前のスペクトル
 下段左：フィルター処理後の波形、下段右：フィルター処理後のスペクトル

比較的浅い海域での海中環境騒音の主な原因となっている。また、その音は広範囲の周波数成分をもっている。

Au⁷⁾は、室内実験よりパルス音のスペクトルは数kHzから200kHz以上にまで広がり、そのピークは2~5kHzにあること、パルスの幅はおよそ0.29msecであることを示した。安⁵⁾は、実海域の観測よりパルス音のスペクトルのピークは2~9kHzにあること、パルスの幅はおよそ1msecであることを示している。

本研究において実海域で観測したパルス音を解析した結果、パルス音の音圧の強い部分の幅はおよそ1msecであった(図-2.3参照)。その後も弱い残響が2msec程度続き、海面や海底などの多重反射による影響もわずかに見られる。周波数成分は図-2.4に示すように3~9kHzの範囲で一定の高いレベルを保っていることを確認した。

(3)パルス数の計数

筆者らは1分間あたりのテッポウエビ類の発音回数をパルス数と定義し生物環境指標として用いるものとした。パルス数の計測には2分間の録音データ中のおよそ1分間の録音データを用いた。録音したデータはAD変換器(Creative Technology製SB16A-CT2230)と波形解析ソフト(Syntrillium製Cool Edit ver.1.51)を用いて、サンプリング周波数44.1kHz、モノラルチャンネル、16bitのデータとしてパソコンに取り込み、WAVファイル形式とした。パルス数はC++言語により計数プログラムを作成し計数をおこなった。

パルス数の計数の前処理として、船舶や波などの雑音除去をおこなった。波形解析ソフトCoolEditのフ

ィルター機能を用いて、テッポウエビ類のパルス音のピーク周波数成分である3~9kHz以外の周波数成分を50dB低下させる。図-2.5に示すようにフィルター処理前後ではパルス波形に大きな違いは見られないが、パルスの周波数スペクトルを比較すると、その効果は明らかである。この作業により周波数の異なる騒音の大部分を除去することが可能である。

パルスの判定には、音圧に関する閾値 P_t (以下パルス判定パラメータ P_t と記す)、無音部の継続時間intervalの2つのパラメータを用いた。パルス音の音圧が P_t を超えるとパルス開始と見なし、その後、音圧が P_t を下回る時間がinterval以上続けばパルス終了とし1個のパルスとして計数する。前出の図2.3を参照されたい。

3. 生息密度とパルス数の関係

単一ハイドロフォンで観測されるパルス数と生息密度の関係を定量化することができれば、パルス数はテッポウエビ類の存在量の簡易で有用なモニタリング手法となる。筆者ら⁹⁾は過去に、生息数が確定している水槽実験での測定を試みている。この時水槽内では個体が殆ど発音することがなかった。そこで実海域においてテッポウエビ類のパルス数と生息数の関係を調べた。

(1)ハイドロフォン正方形配置による音源位置測定

a)音源位置測定の原理

濱田ら^{8),9)}は、かねてより超音波ピンガーなどを用いて魚の行動を観測する機器を開発しており、1992年に

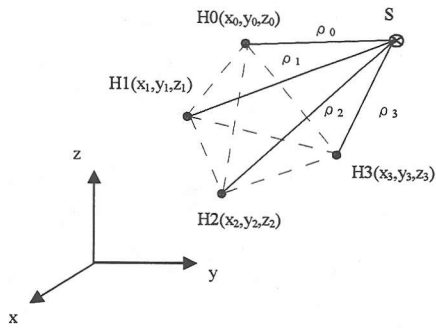


図-3.1 3次元座標システムにおける音源位置と4個のハイドロフォン

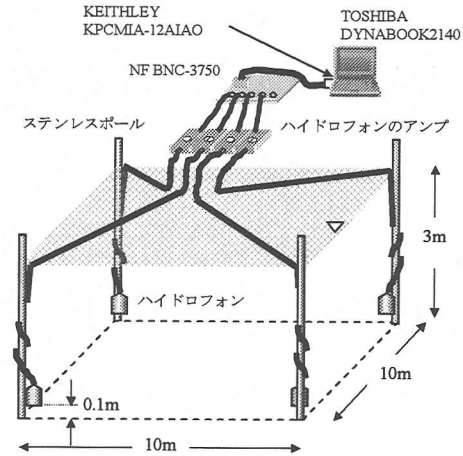


図-3.2 音源位置測定実験装置図

は、一辺 3m の正四面体の頂点に配置した 4 個の受波器を用いて水中の生物などの位置をリアルタイムに 3 次元的に把握するシステムを開発した。このシステムの原理をテッポウエビ類に適用し、音源位置測定をおこなった。

4 個のハイドロフォンを使用し、海中発音生物の立体位置を測定するには、双曲線位置決定法、疑似距離法、最小二乗法などがよく利用される⁵⁾。ハイドロフォン(H_0, H_1, H_2, H_3)を任意に配置し(図-3.1)、ある音源 S から伝搬されてくる音波を受信し、ハイドロフォン間 ij の受信時間差 Δ_{ij} ($=H_i$ のパルス受信時刻 - H_j のパルス受信時刻)を求める。音の伝搬速度 C を一定として、この受信時間差に音速を掛けることにより、音源からハイドロフォン ij までの距離の差 D_{ij} が得られる。

$$D_{ij} = C \cdot \Delta_{ij} \quad (i, j = 0, 1, 2, 3) \quad (3.1)$$

今、任意の位置に仮想音源 S' を導入すれば、 S' からハイドロフォン i までの計算距離 ρ_{si} は式(3.2)により求められる。

$$\rho_{si} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (3.2)$$

ここに (x, y, z) は S' の座標である。 S' からハイドロフォン ij までの計算距離差 D'_{ij} は式(3.3)により求められる。

$$D'_{ij} = \rho_{si} - \rho_{sj} \quad (3.3)$$

ここで、

$$E = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^3 (D_{ij} - D'_{ij})^2 \quad (3.4)$$

を最小にするような仮想音源 S' の座標 (x, y, z) は、音源 S の座標を近似していると考えられる。

ただし本研究では、ハイドロフォンから遠い位置のパルスは減衰や雑音等の影響で受信時刻の精度が低下するため、最もパルス受信時刻の早いハイドロフォン j を基準局として、

$$E_j = \sum_{i=0}^3 (D_{ij} - D'_{ij})^2 \quad (j = 0, 1, 2, 3) \quad (3.4)'$$

を最小とする S' の座標を準ニュートン法を用いて求め、音源位置とした。

b) 実験概要

山口県吉敷郡秋穂町の秋穂湾の干潟にて音源位置測定実験をおこなった。大潮の満潮時の水深は約 3m、干潮時は海底が露出する地点である。この干潟に生息するのはテッポウエビであった。

4 個のハイドロフォンは、図-3.2 のように干潮時に海底の露出した干潟において、適当な数のテッポウエビの巣穴が確認できる場所を中心とした一辺 10m の正方形の各頂点に長さ 4m のステンレスポールを 1m 差込み、海底から 0.1m 上部位置でステンレスポールに固定した。また正方形の中央部にも目印としてステンレスポールを設置した。

翌日の満潮時に正方形の中央にあるステンレスポールにボートを固定し、船上で水中音響の録音をおこなった。4 個のハイドロフォンは BNC 入力ボックス(NF BNC-3750)でまとめられ、AD カード(KEITHLEY KPCMCIA-12A1AO)を通じてノートパソコンに収録した。なおパソコンへの収録はプログラムにより録音時間は 2 分間、サンプリング周波数は 1 チャンネルあた

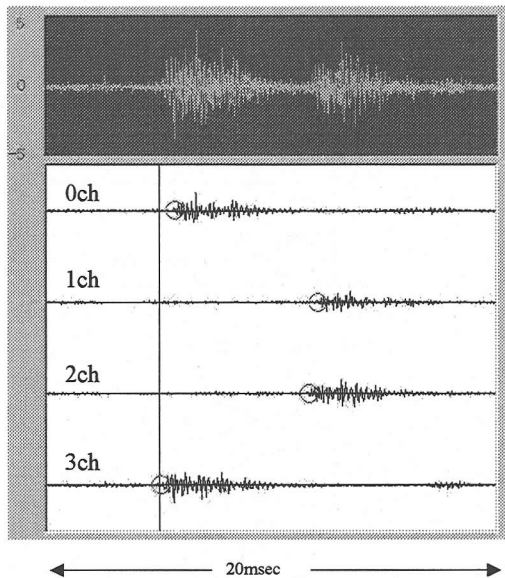


図-3.3 パルスの受信時間差の算出

り 25kHz, 出力形式はバイナリーとする制御をおこなった。また、これと同時に中央部において単一ハイドロフォンによる通常の方法で録音をおこなった。

録音調査終了後の干潮時にテッポウエビの巣穴の平板測量(1/50)をおこなった。測量と同時に巣穴を掘り起こしテッポウエビの採取をおこない、調査区間のテッポウエビの生息数を調べた。

c) 音源位置測定

各ハイドロフォン間のパルス音の受信時間差 Δ は、プログラムによって算出した。受信時間差は最初にパルスを受信したチャンネルを基準チャンネルとし、これと他チャンネルのパルス音の受信時間との差を求めるものである。まず、パソコンに収録されているバイナリーデータをプログラム上で電圧データに変換する。続いて電圧データを 5msec 間隔でスライドさせてゆき、4 個のチャンネルのいずれかの電圧データが閾値 0.152V(113dB re 1 μ Pa)を超えると、パルスであるか否かを判定するサブルーチンが実行される。パルスの判定サブルーチンでは、各チャンネルの電圧データのピーク to ピーク値の累積値が急激に変化する時間を検出する。図-3.3 にプログラムの実行画面を示す。

時間差を求める方法として、ウェーブレットによる方法も検討した。最初に受信したパルス波形をマザーウェーブレットとし、他のチャンネルの波形でマザーウェーブレットと合致度の高い部分をパルスとして判定するものである。

これらの 2 つの手法を比較すると、前述した電圧データのピーク to ピーク値の累積値による方法のほうが優れていたため、これを採用した。

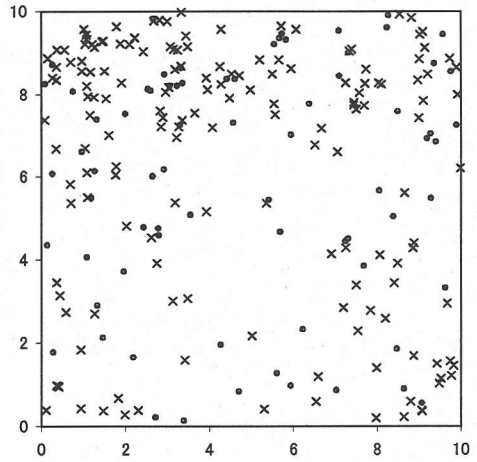


図-3.4 2000年10月14日8時32~34分のパルス数の分布と巣穴の分布

●: テッポウエビの巣穴、×: 音源位置測定結果

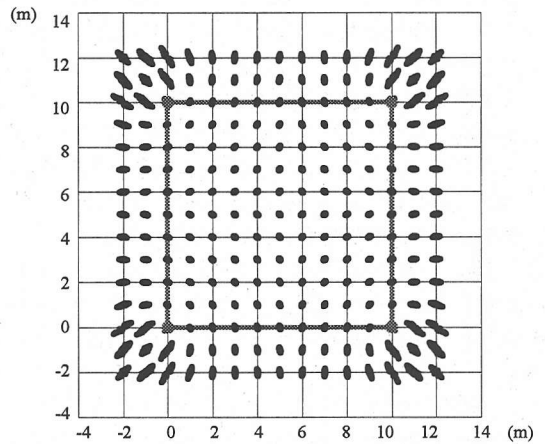


図-3.5 受信時間差に誤差が 0.04msec 存在した場合の音源位置測定の測位精度

なお本実験では調査地点の海底がほぼ水平だったため鉛直方向の分布は考えず水平方向についてのみ検討した。テッポウエビ類の巣穴の位置測定結果を図-3.4 に示す。

d) 測位精度の確認

音源位置測定は、さまざまな誤差を含んでいる。例えばパルス音の波形が完全な形で取得できず、時間差が正しく読みとれないために生じる誤差がある。図-3.5 は一辺 10m の正方形を 1m メッシュの交点上において、1 サンプル分 0.04msec(1 チャンネルのサンプリング周波数 25kHz)の受信誤差が各チャンネルに存在した場合に生じる音源位置測定の測位精度を示している。その結果、正方形内では比較的高い精度であるが、外

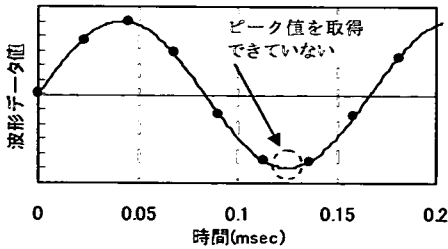


図-3.6 波形データのピーク値の取得
サンプリング周波数 25kHz で 6kHz の正弦波を録音する場合のサンプリング箇所を●で示す。

側では若干精度が悪くなることがわかった。

(2) テッポウエビ類の音源音圧レベルの測定

テッポウエビ類のパルス音の音源音圧レベルを測定するには、いろいろな方法が考えられる。しかし、その生物に刺激を与えることなく、音源音圧を求めることが最も望ましい。発音生物の音源強度の測定においては、その生物を水槽などに入れて物理的に刺激を与えて発音させて測定⁷⁾した例はあるが、自然状態のもとで測定⁵⁾した例はごくわずかである。

前節によりテッポウエビ類のパルス音の音源位置測定が可能になったことから、その位置と受信音圧レベルから音源音圧レベルを逆算し解析をおこなった。

a) モンテカルロ法を用いたピーク値の補正

音源音圧レベルを測定するためには、パルス波形の受信音圧のピーク値が完全に取得されていなければならない。現在の録音のサンプリング周波数は、単一ハイドロフォンの調査、音源位置測定の調査でそれぞれ 44.1kHz, 25kHz である。テッポウエビ類のパルス音のピークの周波数が 3~9kHz であるので、サンプリング周波数 25kHz でも十分であると考えられるが、図-3.6 に示すように、ピーク値を取得できないこともある。

そこでパルスのピークの期待値をモンテカルロ法により求めた。y=sin(2πF_pt)なるパルスに対してサンプリング周波数 F_s でサンプリングした場合に得られるピークの期待値をもとめた。その結果を表-3.1 に示す。例えばサンプリング周波数 25kHz, パルス周波数 5kHz の場合、ピークの真の値に対して、調査で得られるピークの期待値は 0.94 であることを示している。従って、音源位置測定で収録した電圧データをピーク値の期待値で除してやれば真の電圧データのピーク値が得られる。本研究ではピーク値の期待値の平均を用いて電圧データのピーク値の補正をおこなった。

b) テッポウエビ音の音源音圧レベル

前節の音源位置測定結果を用いて受信音圧レベルが 113(dB re 1 μPa)以上のものをパルスとして解析した。

表-3.1 波形データのピーク値の期待値

| サンプリング周波数 F _s (kHz) | パルス周波数 F _p (kHz) | ピーク値の期待値 |
|-----------------------------------|--------------------------------|----------|
| 25 | 3 | 0.98 |
| | 4 | 0.96 |
| | 5 | 0.94 |
| | 6 | 0.91 |
| | 7 | 0.88 |
| | 8 | 0.84 |
| | 9 | 0.80 |

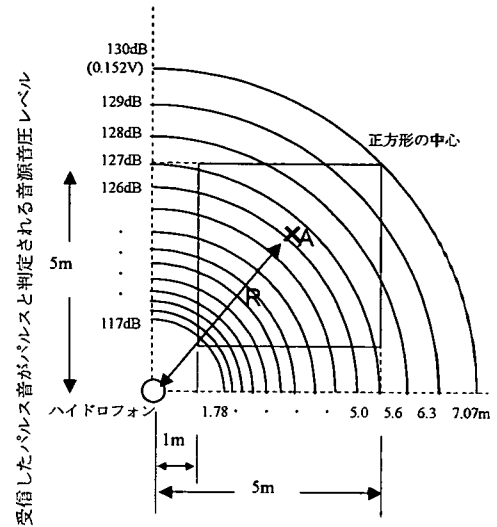


図-3.7 パルス判定に関わる音源位置と音源音圧レベルとの関係

なお、ハイドロフォン近傍で発音されたパルスを受信する場合、受信音圧レベルが飽和していることが考えられるので、ハイドロフォンに近い外側の 1m 幅の部分を省き一辺 8m の正方形内の音源について検討をおこなった。

受信音圧レベルは、水中音響の拡散減衰則に従いハイドロフォンから音源までの距離と音源音圧レベルにより変化する。図-3.7 は一辺 10m の正方形の 1/4 に注目し、これらの関係を示したものである。横軸はハイドロフォンからの距離を示し、縦軸は受信したパルスがパルス判定パラメータ P_t=113dB re 1 μPa を上回る時の音源音圧レベルを示している。仮に正方形内においてテッポウエビ類が 130dB re 1 μPa 以上で発音すれば受信部でパルスとして判定される。A 地点において 125dB re 1 μPa で発音した場合、受信音圧レベルは 112dB re 1 μPa となりパルスと判定されないが、126dB re 1 μPa で発音した場合、受信音圧レベルは 113.2dB re 1 μPa となりパルスとして判定される。つまり、遠くで弱く発音した音源を無視してパルスを計数してしま

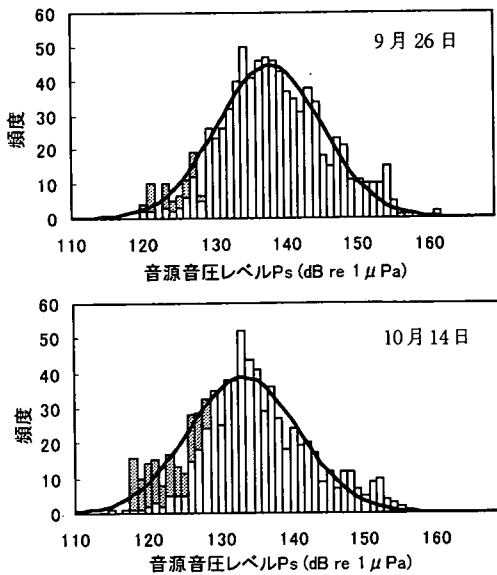


図-3.8 テツポウエビ類のパルス音の音源音圧レベルの分布

うことになる。このため、音源音圧レベル 130dB re 1 μ Pa 以下のパルスに対し、フィールド内に個体が均一に分布すると仮定し、音源音圧差 1dB 毎に面積比により補正をおこなった。図-3.8 に9月26日と10月14日の音源音圧レベルのヒストグラムを示す。塗りつぶし部分は補正をおこなった区間である。これらの結果、音源音圧レベルは、9月において平均 137.6dB re 1 μ Pa、標準偏差 7.4、10月は 134.6dB re 1 μ Pa、標準偏差 7.4 の正規分布に従っていることがわかった。

このほか、9月と10月の結果から音源音圧のピークが 4dB re 1 μ Pa 異なっていることがわかった。これは個体のサイズと生物の活性状態が影響していると考えられる。Howard²⁾は、音源音圧レベルと個体サイズ(ハサミの大きさ)には相関関係があることを示している。また、山下¹⁰⁾は1980年1月から12月にわたり、宮島水族館沖の干潟でテツポウエビを採取し、形態、生態について調べた。その中で平均甲長と最大、最小甲長の推移について、「平均甲長は雄雌とも2月から7月までは 13mm 前後で大きな変化はないが、8月から次第に低下して、9~10月には 10mm の最小値を示す。11月からは再び上昇し、2月にはほぼ 13mm の水準にもどる。」と報告している。秋穂湾は宮島と同じ瀬戸内海であり、対象とした種も同じであることから、10月に優占する個体のサイズが小さかったため、音源音圧レベルのピークにずれが生じたものと考えられる。その他、テツポウエビ類のパルスの音源音圧レベルは、夜間は昼間より 2~5dB レベルが高いという Johnson ら⁴⁾の報告もあり、音源音圧レベルのピークは年間あ

表-3.2 秋穂湾におけるテツポウエビ類の分布 (巣穴の平板測量、個体採集結果と録音調査結果)

| 項目\調査日 | | 9月26日 | 10月14日 | |
|--------|-----------------------------|-------|--------|------|
| 測量採集 | 巣穴の数(個) | 104 | 88 | |
| | 個体を採取した巣穴の数(個) | 35 | 44 | |
| | 生息密度 (個体/m ²) | 最小 | 0.35 | 0.44 |
| | | 最大 | 1.04 | 0.88 |
| 平均 | | 0.67 | 0.66 | |
| 音源位置測定 | 水温 t(°C) | 24.7 | 20.8 | |
| | 録音時間 T(分) | 10 | 12 | |
| | 対象面積 A(m ²) | 64 | 64 | |
| | 音源の数 n(回) | 819 | 736 | |
| | 発音数(回/分/64m ²) | 82 | 61 | |
| | 単一ハイドロフォンで観測されたパルス数 Pn(回/分) | 1686 | 559 | |
| | 発音頻度 F (回/分/個体) | 最小 | 0.22 | 0.23 |
| | | 最大 | 0.64 | 0.50 |
| 平均 | | 0.43 | 0.37 | |

は昼夜を通じてある程度の幅を持っているようである。

(3) テツポウエビ類の生息密度推定

a) 秋穂湾におけるテツポウエビ類の分布

表-3.2 に巣穴の測量、個体採集と録音調査により測定したテツポウエビ類の分布状況を示す。平板測量の結果9月、10月にそれぞれ巣穴を 104 個、88 個確認し、それぞれ 35 個体、44 個体の個体を採集した。また、音源位置測定の結果、9月、10月において一辺 10m の枠内でそれぞれ 819 回/8 分、736 回/10 分のパルス音を観測した。なお、テツポウエビ類の巣穴は深さ 60cm にもおよび、全ての個体は採取できなかったと思われる。通常テツポウエビ類は雌雄ペアで巣穴に生息し、平均 2~3 個の出入り口を有していると言われていることから、9 月の場合、生息数の最大数を観測した巣穴の数である 104 個体とし、最小値を採取した個体である 35 個体と推定した。以下、生息数の推定値を用いて発音頻度を求めた。

b) テツポウエビ類の発音頻度

図-3.8 に示す頻度の合計は正方形内の音源の数であり、テツポウエビ類の発音頻度と等しいと言える。このことから音源音圧レベル Ps の分布に、音源の数 ns を乗じることで発音頻度分布式(3.5)を求めることができる。本研究では発音頻度の推定の際に用いる音源の数に音源音圧レベル 139dB re 1 μ Pa 以上のものを用いた。これは単一ハイドロフォンでパルスを観測する場合、受信半径 13m の位置においてパルスと判定される音源音圧レベルの最小値である。なお、テツポウエビ類の音源音圧レベルは平均 $\mu=136.7$ dB re 1 μ Pa、標準

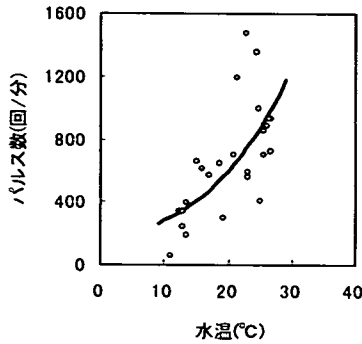


図-3.9 水温とパルス数の関係
○:1998年度宇部市床波漁港にて観測したパルス数
曲線:水温の関数と仮定した場合のパルス数

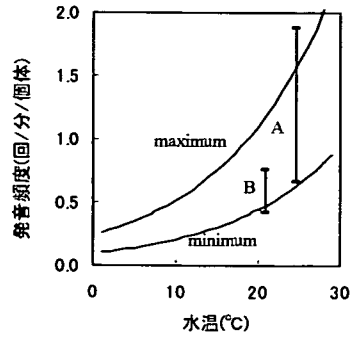


図-3.10 水温と発音頻度の関係
A:2000年9月26日の秋穂干潟調査結果から予測される発音頻度の範囲、B:2000年10月14日秋穂干潟調査結果から予測される発音頻度の範囲、曲線:水温の関数と仮定した場合に予測される発音頻度の範囲

偏差 $\sigma=7.4$ を用いた。

$$D(Ps) = ns \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(Ps - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.5)$$

発音頻度の正規分布の累積値を、録音時間 T (分)と枠内のテッポウエビ類の生息数 n (個体)で除してやれば、式(3.6)により、調査時の水温 t (°C)における発音頻度 $F(t)$ (回/分/個体)を求めることができる。

$$F(t) = \int \frac{D(Ps)dPs}{T \cdot n} \quad (3.6)$$

秋穂湾の9月、10月のテッポウエビ類の発音頻度はそれぞれ0.43回/分/個体、0.37回/分/個体であった。発音頻度はテッポウエビ類の活性状態に依存すると考えられるため、水温 t (°C)との関係に注意しなければならない。筆者らは過去に水温とパルス数、酸素消費速度などの相関関係を実験により確かめている。特に水温とパルス数の関係は、図-3.9に示すように、水温の上昇にともないパルス数は指数関数的に増加することが確かめられており、その関係は式(3.7)で表される。

$$Pn = \beta \cdot \exp(\alpha \cdot t) \quad (3.7) \\ = 130 \cdot \exp(0.08 \cdot t)$$

ここで Pn はパルス数(回/分)、 t は水温(°C)、 α はテッポウエビ類の生理に関わる係数、 β は調査地点の固有値である。発音頻度 $F(t)$ は式(3.7)と同様に、水温の上昇に伴い指数関数的に増加する関係にあると考えられ、係数 α を用いると式(3.8)で示される。

$$F(t) = \lambda \cdot \exp(\alpha \cdot t) \quad (3.8) \\ = (0.096 \sim 0.168) \cdot \exp(0.08 \cdot t)$$

ここで、 λ は1個体の発音回数に関係する係数である。

係数 λ は発音頻度の実測値を基に最小二乗法により求めた。なお、前述したように個体の生息数は推定値であるため、係数 λ は最大値と最小値を持つことになる。図-3.10中の縦棒A、Bは秋穂湾で測定した発音頻度の推定範囲である。

c) パルス数計数シミュレーション

テッポウエビ類の生息密度 N (個体/ m^2)と単一マイクロフォンにより観測されるパルス数 Pn (回/分)の関係の間には以下の関係があると考えられる。

$$N = f(t, Pt) \times Pn \quad (3.9)$$

ここで係数 $f(t, Pt)$ は水温とパルス判定パラメータ Pt (dB re 1 μ Pa)の関数であり、単一マイクロフォンにより観測されるパルス数を生息密度に換算するための係数である。

十分に広いフィールド A (m^2)において、生息密度 N (個体/ m^2)と発音頻度 $F(t)$ が正規分布に従ってパルスが発生させた T 分間の録音をおこなった場合、このフィールドで発生する音源の数は $n(=N \times F(t) \times A \times T)$ である。発生した音源 n 個の中で、マイクロフォンに受信され、あるパルス判定パラメータ $Pt(Pt \leq Pm = Ps - 20\log(r))$ の条件で判定される音源をカウントする。

シミュレーションの実行画面を図-3.11に示す。小さな点はパルスが発生させた位置で、大きな点は受信部でパルスと判定された音源を示している。パルスと判定された音源の数を録音時間 T で除せば、このフィールド内で発生したパルス音源のうちマイクロフォンで受信されパルスと判定されたパルス数 Pn を求めることができる。今、生息密度 $N=1$ 個体/ m^2 、フィールド面積 $A=70686m^2$ (半径150m)、録音時間 $T=2$ 分に固定し、式(3.8)から算出した発音頻度 F (回/分/個体)とパルス判定パラメータ Pt (dB re 1 μ Pa)を任意に変化させ $f(t, Pt)$ を

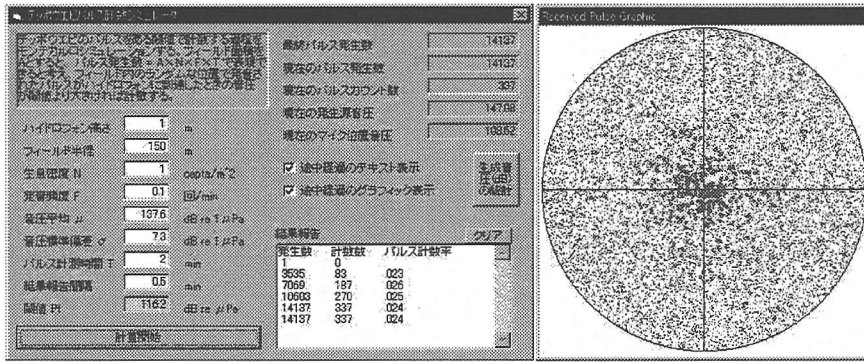


図-3.11 パルス計数シミュレータの実行画面

求めた。

$$N = (3.97 \sim 9.25) \times 10^{-14} \cdot \exp(0.215Pt - 0.08t) \times Pn \quad (3.10)$$

式(3.10)により単一ハイドロフォンで観測されるパルス数と調査時の水温、パルス判定パラメータ Pt を代入すれば、テッポウエビ類の生息密度を推定することができる。図-3.12 は水温を 24.7°C、パルス判定パラメータ Pt を 116.2dB re 1 μ Pa(受信範囲 13m に相当)とした場合のパルス数と生息密度の関係を表したものである。

d) 生息密度推定式の検証

秋徳湾におけるテッポウエビ類の生息密度の推定の結果、9月の生息密度は平均 0.67 個体/m² (最小 0.35 個体/m², 最大 1.04 個体/m²) であった。単一ハイドロフォンで観測されたパルス数 Pn は 1686 回/分、水温は 24.7°C、パルス判定パラメータ Pt は 116.2dB re 1 μ Pa である。これらを式(3.10)に代入すると生息密度は平均 0.92 個体/m² (最小 0.69 個体/m², 最大 1.69 個体/m²) とほぼ実測値に沿う結果が得られた。同様に 10月の推定値もほぼ実測値に合致する結果であり、生息密度推定式の妥当性を確認することができた。

(4) 実海域におけるテッポウエビ類の分布

パルス数の生物環境指標としての普遍性を確かめるには、海域のより広い範囲での実態を観測する必要がある。筆者ら^{11),12),13),14)}はこれまで博多湾、山口県沿岸部、東京湾、塩釜湾、姫路市沿岸、三河湾、中海、トルコ共和国などさまざまな場所でパルス数の観測をおこない報告してきた。実海域のテッポウエビ類の分布の一例として、山口県沿岸部について考察した。

山口県沿岸部 24 地点において 1998 年 6 月から 2000 年 11 月の間に不定期に 5 回調査をおこなった。図-3.13

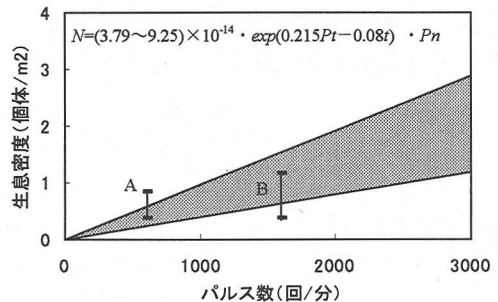


図-3.12 パルス数と生息密度の関係
塗つぶし：単一ハイドロフォンで観測されるパルス数から推定した生息密度、A,B:秋徳干潟において 2000 年 9 月、10 月の巣穴測量結果から推定した生息密度の範囲

には、比較のため漁港付近の砂泥底である代表的な地点のパルス数と推定した生息数を示す。各地点とも冬期の 3 月にパルス数の減少が見られるものの、生息密度に大きな変化はなく、平常時において砂泥底では生息密度が 0.5 個体/m² 前後であると予測できる。ただし、テッポウエビ類は漁獲の対象とされており、漁獲量や調査データがないため、生息密度の検証はできていない。また図-3.14 に示す St15 宇部市床波漁港においては、詳細な調査をおこなっているが、1998 年度に比べパルス数および生息密度とも 2000 年度のレベルが低い。これは 1999 年度に調査地点付近で防波堤の改修工事がおこなわれたことが主な原因であると考えられる。なお 2000 年 11 月の St11 下関市下関港は、調査地点が埋立てられていたため、調査地点を移動したことでパルス数の違いが現れた。このように陸から調査する場合、地理的な制限や潮汐が問題となる。

距離を隔てた地点間の比較は、環境が異なること、テッポウエビ類の種類が異なることなどが問題となり容易ではない。筆者らは調査地点を砂泥底に限定すること、調査を同時期におこなうこと、あるいは船舶で調査することにより異なる地点間での環境を評価する

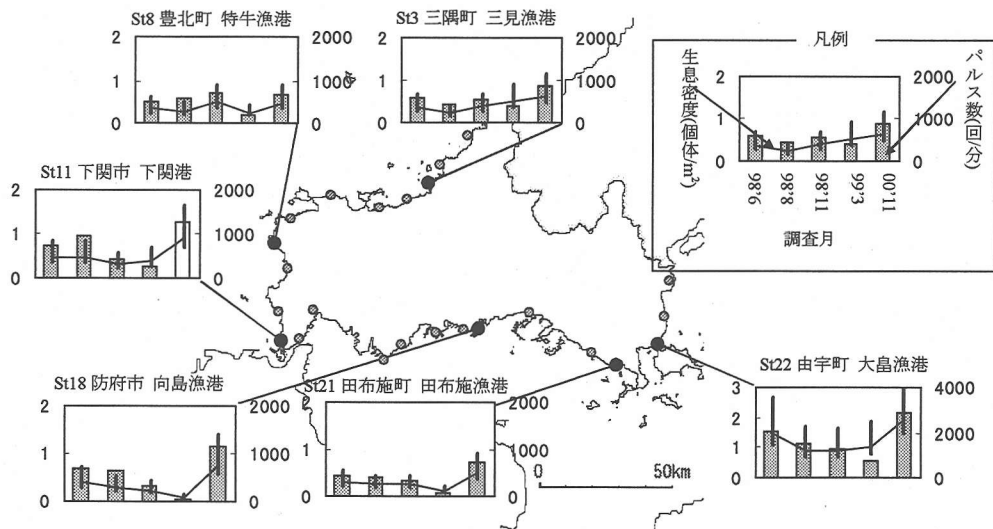


図-3.13 山口県沿岸部におけるテッポウエビ類の生息密度の推移

ことが可能であると考えているが、今後のさらなるデータの蓄積が必要である。

4. おわりに

本研究は浅海域の生物生息環境を簡易にモニタリングするためのテッポウエビ類を用いた手法の確立を目指すものである。筆者ら⁹⁾はこれまで、定点調査において水質汚濁の発生していない時期の水温と発音数を把握しておくことにより、貧酸素水塊などの水質汚濁に起因するパルス数の変化を検出することが可能であることを示した。しかし、生物への影響を評価する上で生息密度の議論は避けられないことから、パルス数と生息密度の関係の定量化をおこなった。

まず、テッポウエビ類のパルス音の解析をおこない、その特性を明確にした。その結果、パルス音の音圧の強い部分の幅はおよそ1msec 続き、周波数成分のピークは3~9kHz と測定され、過去の研究者の測定に合致する結果が得られた。

続いて、ハイドロフォンを正方形に配置するシステムを用いて、テッポウエビ類の発音位置の測定をおこなった。測定された音源位置と受信音圧レベルから逆算をおこないパルス音の音源音圧レベルを求めた。その結果、テッポウエビ類の音源音圧レベルは正規分布に従うこと、ピークはある程度の幅を持つことが明らかとなった。この分布を用いて発音頻度の推定をおこなった。これらの結果を用いてモンテカルロシミュレーションをおこない、単一ハイドロフォンで観測されたパルス数と生息密度の定量化をおこなった。

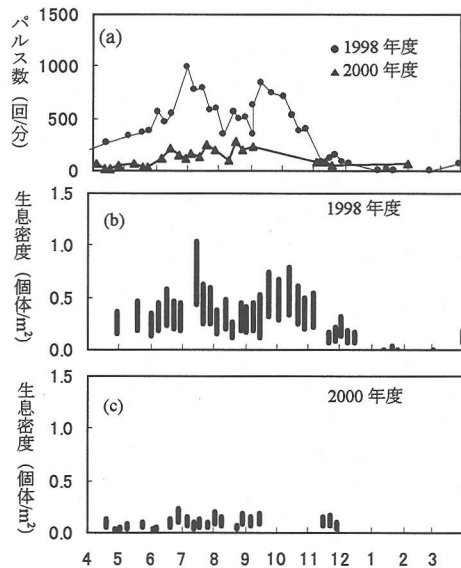


図-3.14 St.15 宇部市床波漁港の
パルス数と生息密度の変化

(a)パルス数の変化, (b)1998年度の生息密度の変化,
(c)2000年度の生息密度の変化

上記により、現地調査でパルス数と水温を調査するだけで、テッポウエビ類の生息密度を推定することが可能となった。

今後、海域のより広い範囲でパルス数の実態を把握し普遍性を確かめるとともに、テッポウエビ類の水質汚濁に対する特性を明らかにすることにより、生物環境指標としてより実用的になると考えられる。

謝辞：本研究をおこなうにあたり，元東京水産大学濱田悦之教授，下関水産大学校浜野龍夫助教授，山口県水産研究センターの金井大成氏より，貴重なご指導とご助言を頂いた。また，本研究は日本学術振興会科学研究費(基盤研究B)の補助ならびに山口大学 VBL から支援を頂いた。記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 林憲一：日本産エビ類の分類と生態，生物と海洋 108, vol.19, no.1, pp.46-49, 1997.
- 2) Howard Schein: The role of snapping in ALPHEUS HETEROCHAELEIS say, 1818, The big-clawed snapping shrimp, E. J. Brill, Leiden, Crustaceana33(2), pp.182-188, 1977.
- 3) Robert E. Knowlton and Jams M. Moulton: Sound production in the snapping shrimps ALPHEUS and SYALPHEUS, Biol. Bull., 125, pp. 311-331, 1963.
- 4) Martin W. Johnson, F. Alton Everest, and Robert W. Young: The role of snapping shrimp (CRANGON AND SYNALPHEUS) in the production of underwater noise in the sea. Boil.Bull., 93, pp.122-138, 1947.
- 5) 安 長榮：海中発音生物の位置測定に関する研究—テッポウエビ音の音源強度と分布—，東京水産大学博士論文，1992.
- 6) 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のモニタリング，土木学会論文集，No.643/VII-14, pp.49-60, 2000.4.
- 7) Au, W. W. L.:The acoustics of the snapping shrimp Synalpheus parneomeris in Kaneohe Bay, Journal of Acoustical Society of America, 103 (1), pp.41-48, 1998.
- 8) 韓軍，宮本佳則，濱田悦之，中村喜彦：魚の行動解析のための同期法超音波ピンガー追跡システム，日本水産学会誌，61(3), pp.369-374, 1995.
- 9) 韓軍，濱田悦之，中村喜彦，斉藤清隆：同期法超音波ピンガーを用いた ROV の測位，水産工学，31, pp.1-6, 1994.
- 10) 山下欣二：宮島産テッポウエビの形態および生態，動水誌 25-3, pp.60-65, 1983.
- 11) 上田陽彦，渡部守義，関根雅彦，浮田正夫，濱田悦之：テッポウエビを用いた海域環境モニタリング—生息環境とパルス数の関係—。第 51 回土木学会中国支部研究発表会講演概要集，VII-10, pp.669-670, 5 June 1999.
- 12) 渡部守義，関根雅彦，浮田正夫，濱田悦之：テッポウエビの発音数観測による浅海域環境モニタリングに関する研究。土木学会年次学術講演会講演概要集，CS-117, pp.234-235, September. 1999.
- 13) 渡部守義，関根雅彦，上田陽彦，濱田悦之：テッポウエビを用いた沿岸環境評価，第 34 回日本水環境学会年会講演集，p.451, 2000.2.
- 14) Watanabe,M., Sekine,M., Hamada,E., Ukita,M. and Imai,T.: Monitoring of shallow sea environment by using snapping shrimps, Asian Waterqual 2001, pp.133-138, 2001.

(2001. 8. 6 受付)

THE ESTIMATION OF SNAPPING SHRIMP'S POPULATION FOR THE EVALUATION OF SHALLOW SEA ENVIRONMENT BY RECORDING UNDERWATER SOUND

Moriyoshi WATANABE, Masahiko SEKINE, Masahiko FURUSAWA, Masao UKITA,
Tuyoshi IMAI and Takaya HIGUCHI

We examine the validity of pulse count of snapping shrimps for sea environmental monitoring. Snapping shrimps, which make peculiar pulse sound, are found everywhere in the world. Pulse count can be achieved merely by recording their sounds for a few minutes by using a hydrophone without special biological knowledge. This method can be a useful index of the effect of water pollution on benthic animals in fixed-pint observation. If pulse counts become environment indices, we have to do discussion of population. In this paper, we quantified between the pulse counts and the population. We measured snapping shrimp's sound source and the sound source pressure level by the measurement system of sound source with four hydrophones, and we estimated the pronunciation frequency from field survey. By these results being followed relation with water temperature, we could estimate the population using the pulse counts and water temperature from field survey.