

# 海域環境モニタリングに用いるテッポウエビ類パルス数のばらつきに関する研究

嘉村 優輝\* 渡部 守義\*\*

## Study on the Variability of Pulse Count of Snapping Shrimp for Sea Environment Monitoring

Yuki KAMURA, Moriyoshi WATANABE.

### ABSTRACT

The biological monitoring is an effective method, but high cost, time consuming and effort are required. Snapping shrimp that makes peculiar pulse sounds are able to be found along coastal areas. This research examines the validity of using the pulse counts (pulse counts/minute) of snapping shrimp as a biological index. The pulse counts can be simply collected by recording snapping sounds for a few minutes using a hydrophone. But actually, the pulse counts include variation. The purpose of this study is to examine the condition of the pulse counts measurement required by monitoring. The investigation measured the pulse counts in the field for 60 minutes and had checked the variation. In addition, we had performed a probabilistic evaluation using Monte Carlo simulation. As a result, the simulation can express dispersion for the pulse counts in the sea and the coefficient of variation (%) decreases with the increase in pulse counts. The coefficient of variation becomes around 4 % if we make a condition to measure the pulse counts more than 400 counts/minute.

**KEY WORDS:** snapping shrimp, pulse count, coastal environment, variability

### 1. はじめに

#### 1・1 既往研究

陸域からの汚濁物質が行きつく沿岸域での生物生息場環境評価は、人間に対する潜在的な危険性を評価するという観点から要求されている。従来の環境調査では、汚濁物質濃度や溶存酸素などの物理化学指標が測定されているが、その水質の測定値は採水試料に基づき決定されることが多いため、水環境中の特定の場所・時間における水質の評価しかできないという欠点がある。一方、水域のより長期的な水質履歴を反映する指標として、生

態学的水質指標が挙げられる。しかし、生物のサンプリングから定量的な分析に至るまでには、多くの時間と費用、労力を要する。また漁獲量や漁獲高は社会情勢に左右されやすい。そのため、一般的に海中生物量の測定は容易でない。そのような中、イルカやクジラといった発音生物の発する音を観測することで、比較的広範囲にわたる海中生物の生態や分布状況を調査する手法がある。このような沿岸域における生物生息場環境評価をめぐる問題に対し、渡部らは発音生物の中でもテッポウエビ類(図 1-1)に着目し、その発音を用いた沿岸環境モニタリング手法の研究を行ってきた<sup>1)2)3)4)</sup>。

\*建築・都市システム工学専攻 \*\*都市システム工学科

テッポウエビ類は 50 m 以浅の世界中の海域に普遍的に分布しているとされており、天ぷらノイズと呼ばれる独特のパルス音を終始発している。特殊な環境でない限り、テッポウエビ類の発音頻度は生息密度に比例するとされている。また海域の水質履歴に影響され、貧酸素水塊の発生や汚染による死滅も、一時的であれば次第に回復する。しかし環境悪化が長期にわたると、移動性に乏しく営巣性であるテッポウエビ類は回復の機会を失う恐れがあり、回復する場合も長時間を要する<sup>1)</sup>。

このように、海域の環境変化によりテッポウエビ類の生息数が変化した場合、水中録音にてその発音数の変化を調査するだけで、その影響を知ることができると考えられる。そこで渡部らは、テッポウエビ類の発する音を1分間あたりの発音数(パルス数)で表現する新しい環境指標を提案し、測定困難である水中生物量や活性度を水中マイク一本で概測する手法を開発した。

テッポウエビ類のパルス数の測定には、水中マイク(静岡沖電気製 WHALE PHONE II)と本研究室で平成20年に開発されたテッポウエビパルスカウンター(図



図 1-1 日本沿岸域に生息するテッポウエビ類



図 1-2 テッポウエビパルスカウンター

1-2) を用いる。調査地点にて図 1-3 のように水中マイクの受信部を水底から 1 m の位置に保ち計測を開始すると、テッポウエビパルスカウンターに1分間当たりのパルス数が表示される。

図 1-4 はテッポウエビ類のパルス数を用いた定点モニタリングの概念を示している。既往研究<sup>1),2),3)</sup>では、平常時のパルス数と水温の関係を把握しておくことにより、水質汚濁や環境変化に起因するパルス数の変動を検出することができる<sup>4)</sup>と報告している。一方で、テッポウエビ類は地点ごとに物理環境や水質、本来の生息数が異なっているため、パルス数にも違いを生じる。そのため、パルス数による地点間の比較はできないとしている<sup>4)</sup>。

1・2 研究目的

本研究では、これまで大きな水温変化がなければ、1日や短期間でのパルス数に大きな変動はなく、1回の測定でその期間のパルス数の代表値を得られると考えていた。しかし、図 1-5 のように過去の1分間隔で60分間測定したパルス数連続調査結果を見直してみると、パルス数の平均は1150(回/分)、最大値は1397(回/分)、

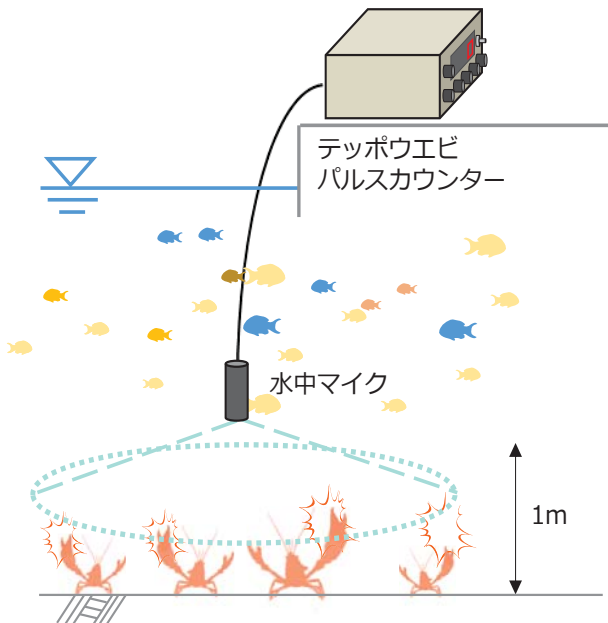


図 1-3 テッポウエビ類のパルス音の測定

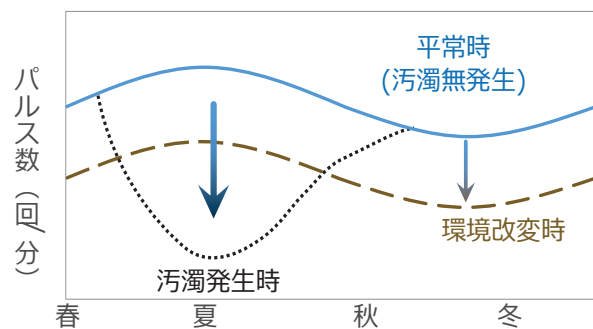


図 1-4 定点モニタリングの概念図

最小値が 847 (回/分) と、実に測定値の最大値と最小値に 550 (回/分) の差があることがわかる。このように 1 回の測定では、パルス数の代表性が得られない可能性がある。また測定されるパルス数が数十 (回/分) と少ない地点では、パルス数が変化した場合にその時間的变化がパルス数のばらつきによるものなのか、水質変化によるものなのかの判断ができない。

そこで本研究では、モニタリングの際に要求されるパルス数のばらつきを考慮したパルス数を測定できるようなパルス数計数の条件を明らかにすることを目的とする。表 1-1 と図 1-6 は 1 分間隔で 60 分間測定したパルス数平均と変動係数 CV の関係について過去のデータを整理したものである。測定されるパルス数の値が小さいと変動係数が大きく、逆にパルス数の値が大きいと変動係数が小さくなっていることがわかる。本研究では、図 1-6 のデータの無いパルス数およそ 100 (回/分) からおよそ 700 (回/分) の区間を補う実海域における測定を行う。また、これと同時にモンテカルロシミュレーションにより確率的にパルス数とそのばらつきについて考察を行う。なお変動係数 CV とは、相対的なばらつきを表す数である。

## 2. 方法

### 2・1 海域におけるパルス数連続調査

海域におけるパルス数連続調査では、図 1-6 に示すパルス数平均値の変動係数の関係が明らかとなっていないおよそ 20 (回/分)、200 (回/分)、400 (回/分) といったレベルでパルス数の測定を行う。測定値のパルス数レベルの調整は、テッポウエビパルスカウンターの音圧に関する閾値  $P_t$  を任意に変化させることで行った。調査日は、2016 年 7 月 5 日と 2016 年 9 月 14 日の午前に加古川海洋文化センター (図 2-1) で行った。調査地点の水深は両日とも 3m で、測定時間中の水温は 7 月調査時に開始時 24.3 °C で 2 時間後の調査終了時は 24.7 °C とほとんど変化はなかった。9 月は天候が曇りであったためか調査開始時と終了時の水温 27.8 °C 変化はなかった。溶存酸素濃度は 3 mg/l 以上あり調査時テッポウエビ類の活性を大きく変化させるような変化は見られなかった。また、パルス数の測定以外に、水中音響の収録を水中マイク (アクアサウンズ製 AQH-020)、増幅器 (アクアサウンズ製 Aquafeeler MONO)、録音機器 (SONY 製 PCM-D50) を用いて行った。

### 2・2 モンテカルロシミュレーション

パルス数の平均値と変動係数の関係を、モンテカルロシミュレーションを用いて次の方法で解析する。

フィールドにおいて、フィールド中央のハイドロフォ

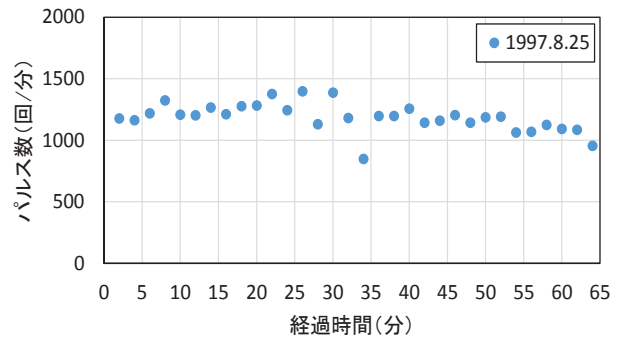


図 1-5 パルス数連続調査 (1997 年) <sup>1)</sup>

表 1-1 過去に測定した 1 分間隔で 60 分間測定したパルス数平均、標準偏差および変動係数 <sup>1)</sup>

調査日	パルス数平均 (回/分)	標準偏差 (回/分)	変動係数 (%)
1997.8.25	1150	113	10
1997.10.7	779	54	7
1997.10.7	867	110	13
1997.10.7	971	40	4
1997.10.8	768	41	5
1998.1.28	36	15	41
1998.2.10	30	8	26

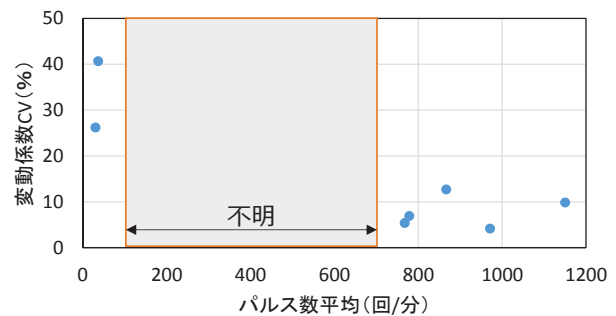


図 1-6 過去に測定した 1 分間隔で 60 分間測定したパルス数平均と変動係数との関係 <sup>1)</sup>



図 2-1 調査地点

ンで測定されるパルス数を確率的に求めるパルス計数シミュレータを Visual Basic 6.0 により作成した。シミュレーションのフローチャートを図 2-2 に示す。

十分に広い平らな砂泥底フィールド A (m<sup>2</sup>) に生息密度 N (個体/m<sup>2</sup>) でテッポウエビ類が生息していると仮定し、水温 t (°C) と録音時間 T (分間) を与えると発生する音源の数は n (個) ( $n=N \times F(t) \times A \times T$ ) なる。n 個の音源の座標をランダムに発生させ、音源音圧レベルを正規分布 D (P<sub>s</sub>) に従いランダムに発生させる。この発生した音源 n 個の中でフィールド中央部のハイドロフォンに受信され、あるパルス判定パラメータ P<sub>t</sub> (dB re 1 μPa) とすると、パルスカウントは  $P_t \leq P_m = P_s - 20 \log(r)$  の条件で判定される。

パルス計数シミュレータの実行画面を図 2-3 に示す。図中の黒点はパルスを発生させた位置で、赤点は発生させた音源のうちハイドロフォン位置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のうちハイドロフォンで受信されパルスと判定されたパルス数 P<sub>n</sub> を求めることができる。

表 2-1 にシミュレーションの条件を示す。なお、発音頻度、音圧平均、音圧標準偏差は渡部らの研究結果<sup>2)</sup>を参照した。

本研究では、任意のパルス数が得られるようにパルス判定パラメータを設定し、1 分間隔で 60 分間の測定をシミュレーションし、パルス数を出力させた。そしてパルス数平均がおおよそ 20 (回/分) から 1300 (回/分) の間で、20 パターンのパルス数についてシミュレーションをおこなった。

### 3. 結果

#### 3・1 実海域の測定結果

パルス数の連続調査の結果を図 3-1 に示す。パルス数が少ない 20 (回/分) を目標にしたケースの平均は 24.4 (回/分)、標準偏差は 5.2 (回/分)、パルス数おおよそ 200 (回/分) を目標にしたケースの平均は 196.6 (回/分)、標準偏差は 21.0 (回/分)、パルス数おおよそ 400 (回/分) を目標としたケースの時、平均は 375.4 (回/分)、標準偏差は 18.2 (回/分) であった。標準偏差とは、分散の正の平方根と定義されており、データや確率変数のばらつき具合を表す数値のひとつである。しかし、単位の異なるデータのばらつきや、平均値に対するデータとばらつきを相対的に評価することができないため、本研究では標準偏差を平均値で割った変動係数 CV によって、各パルス数とばらつきとの関係について考察する。変動係数の式は、 $CV = \sigma / \bar{x}$  で、CV : 変動係

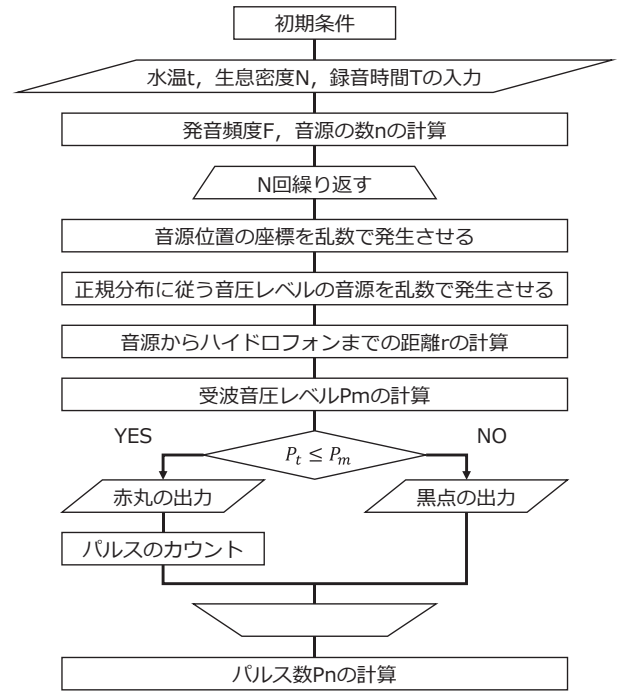


図 2-2 パルス計数シミュレーションのフロー図

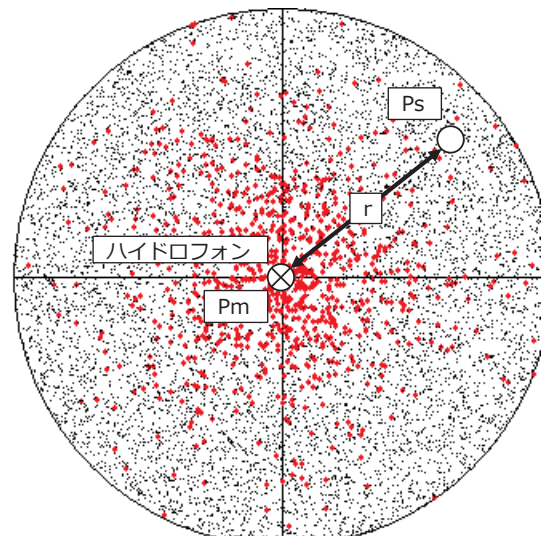


図 2-3 パルス計数シミュレータの実行画面

表 2-1 シミュレーションの条件

項目	数値	単位
ハイドロフォン高さ	1	m
フィールド半径	200	m
生息密度 N	1	capta/m <sup>2</sup>
発音頻度 F	0.3	回/min
音圧平均 μ	136.7	dB re 1μPa
音圧標準偏差 σ	7.3	dB re 1μPa
パルス計測時間 T	1	min
閾値 Pt	変化させる	dB re μPa



数 (%)、 $\sigma$ : 標準偏差、 $\bar{x}$ : 算術平均である。パルス数が 24.4 (回/分) の時、変動係数は 21.2 (%)、パルス数が 196.6 (回/分) の時、変動係数は 10.7 (%)、パルス数が 375.4 (回/分) の時、変動係数は 4.9 (%) であった。過去のデータも含め、1 分間隔で 60 分間測定したパルス数平均と変動係数の関係を図 3-2 に示す。図 3-2 を見ると、測定されるパルス数の平均が大きいほど変動係数が小さくなる傾向が見られた。またパルス数平均がおおよそ 400 (回/分) を超えると変動係数はあまり変化していないことがわかる。測定されるパルス数の値が大きくなると、一定の変動係数に漸近することが予想される。

### 3・2 シミュレーションを加えた結果

モンテカルロシミュレーションの結果を表 3-1 に示す。表より、実際の海域での測定結果と同様にパルス数平均が大きくなるほど、変動係数が小さくなる傾向が見られる。図 3-3 は図 3-2 にシミュレーション結果を重ね合わせたものである。実際の海域から求められた変動係数とシミュレーションから求められた変動係数は比較的一致していることから、モンテカルロシミュレーションは実海域におけるテッポウエビ類の発音行動とパルス数を再現できているといえる。図より、パルス数が 400 (回/分) を超えると変動係数はほとんど変化せず 4 (%) 付近に漸近している。このことからパルス数のばらつき

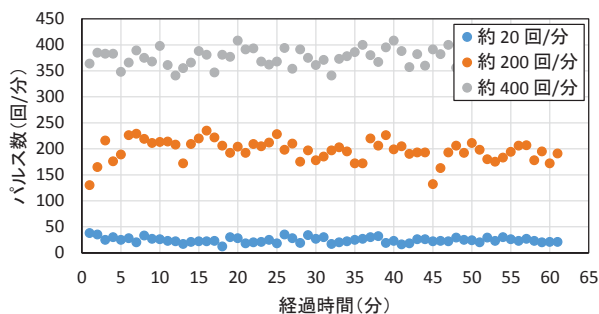


図 3-1 パルス数の連続調査の結果

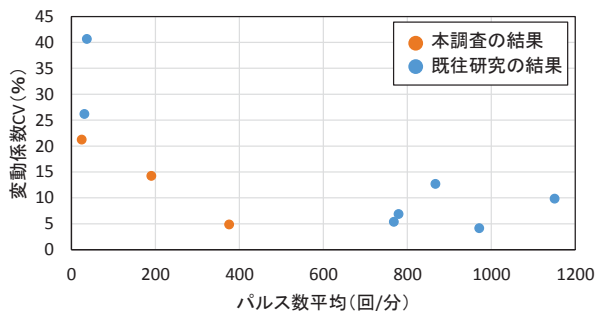


図 3-2 過去のデータに本調査結果を加えたパルス数平均と変動係数との関係

を小さくするためには、パルス数の測定値が 400 (回/分) 以上になるように、テッポウエビパルスカウンターのパルス計数の条件を設定することが有効であるといえる。

### 4. おわりに

本研究では、モニタリングの際に要求されるパルス数のばらつきを考慮したパルス数を測定できるようなパルス数計数の条件を明らかにすることを目的とし、実際の海域における 1 分間隔で 60 分間測定したパルス数平均と変動係数 CV の関係を調べるとともに、モンテカルロシミュレーションにより確率的にパルス数とそのばらつきについて考察をおこなった。本研究による成果を以下のようにまとめる。

表 3-1 シミュレーション結果

パルス数平均 (回/分)	標準偏差 (回/分)	変動係数 (%)
1300	39	3
1045	27	3
842	32	4
671	22	3
535	20	4
427	19	4
343	17	5
273	17	6
216	15	7
171	12	7
136	13	10
108	9	8
86	9	10
69	9	13
53	7	13
44	6	13
35	6	18
28	5	18
21	4	20
17	4	25

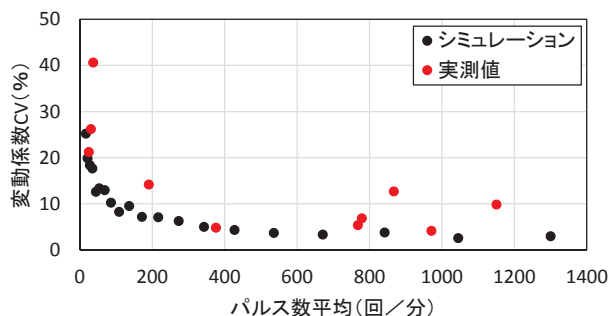


図 3-3 実測値にシミュレーションの結果を加えたパルス数平均と変動係数との関係

- 1) 過去のデータおよび実際の海域におけるパルス数の連続調査により、パルス数にはばらつきがあり、そのばらつきはパルス数のレベルによって異なっている。
- 2) パルス数のばらつきを変動係数として表現した。パルス数の値が大きいほど、変動係数が小さくなる。パルス数の値が400 (回/分) を超えると変動係数は約4 %となる。
- 3) 変動係数を参考にパルス数計数の条件を設定することで、モニタリングに要求される精度を満たすことができる。

定点で行う連続モニタリングにおいて、環境の変化を検出するには調査頻度が重要となってくる。常時連続的に測定すれば問題はないが、高い調査頻度が確保できない場合、1回の測定における測定値の信頼性が重要となってくる。本研究では、水温変化のない短時間におけるパルス数のばらつきを明らかにした。今後は、より長い時間スケールにおける測定値の信頼性を解明し、どの頻度で測定を行えばよいのか、また季節変化に伴う水温の変化も考慮した測定方法を提案していきたいと考えている。

謝辞：本研究はJSPS 科研費 24510041 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- 1) 渡部守義、関根雅彦、浜田悦之、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(643)、46-60 頁(2000).
- 2) 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観測によるテッポウエビ類生息密度推定”、土木学会論文集 (713)、69-79 頁(2002).
- 3) 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互関係”、海洋音響学会誌、34(No4)、252-259 頁 (2007).
- 4) 曾谷亜美、渡部守義：“ 沿岸域における生物生息場環境評価のためのテッポウエビ類の分布調査”、土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会 CD-ROM、(2014).