

藻場造成に伴うホッカイエビ生息条件の解明

Habitable Wave Condition for *Panadalus Kesseri*

瀬戸雅文*・櫻井泉*・松岡学**・山下俊彦***

Masabumi Seto, Izumi Sakurai, Gaku Matsuoka and Toshihiko Yamashita

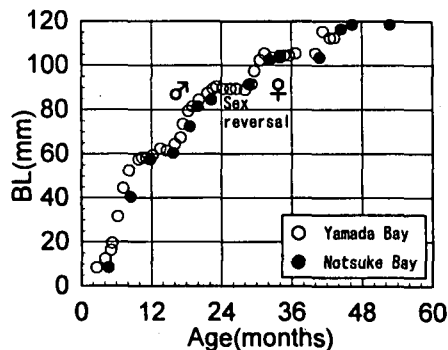
The wave condition to develop the habitat for *Panadalus Kesseri* is determined by this experimental study. In this study its thrust force and fluid force in oscillatory flow are measured, and the habitable condition is estimated from the balance of them. Consequently, the maximum wave height H_{max} is approximately $3.47 \times 10^{-2} BL^{0.8} d^{0.5}$ on small amplitude wave theory. Where BL is body length of *P. kesseri*, d is water depth. Therefore, the wave height need to be restrained below H_{max} , to develop an habitat of *P. kesseri* by using an algae zone.

Keywords : thrust force, fluid force, habitat

1. はじめに

ホッカイエビは東北地方以北のアマモ場やスガモ場内に広く生息する藻場性生物で、特に北海道東部の野付湾、サロマ湖、能取湖沿岸では地元の風物詩として水産・観光価値の極めて高いエビである。ホッカイエビの生活史や成長については柏木¹⁾、水島²⁾の研究などによって知見が収集され、本種が雌雄同体種で雌性先熟の性転換を行うこと、毎年9月上旬～11月（生息地により限定される）に産卵後約6～9ヶ月間腹部に抱卵し、翌春水温が10℃前後となる4～6月下旬に幼生がほぼ100%ふ出することなどが解っており、これら一連の生活史は体長（BL）により図-1のように整理されている。また、個体群の変動や構造などについては水島³⁾の研究があり、藻場が害敵からの隠れ場、餌場として機能し、特に当歳群の主な減耗要因が魚類による食害であること、アマモ密度と幼稚子の生息密度に正の相関が認められることなどが解っている。従って、ホッカイエビ生息場造成のための条件としては、幼稚子が藻場内で能動的に行動し害敵よりの隠れ場としての機能を積極的に利用できるための諸条件を満たさせることが考えられる。

本研究は、藻場海域における環境造成技術の一環として、行動実験的手法及び水理実験的手法を用いてホッカイエビの生息条件を波浪・流動環境下におけるエビの流れ耐性面及びエビに作用する流体力より工学的に評価することによってホッカイエビ生息場造成を規定する流動・波浪条件を明らかにすることを目的とする。

図-1 ホッカイエビの体長による成長過程¹⁾²⁾

2. 解析理論

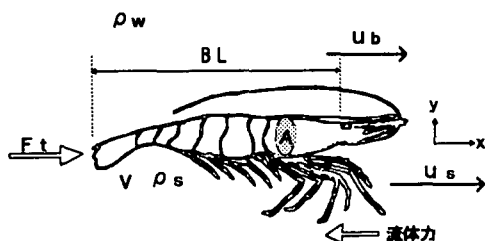


図-2 エビ周辺の力の釣り合い

図-2に示すように水平流速 u_b に対して流れ方向に速度 u_s で遊泳するホッカイエビに関する運動方程式は(1)式のように表現できる。ここに、 BL はエビの体長、 ρ_s 、 ρ_w はエビ及び流体の比重、 V はエビの排除水質量、 A はエビの流れ方向の射影面積、 F_t はエビの推力、更に C_D 及び C_M は抗力係数及び質量力係数で遊泳中であることから底面摩擦の影響は無視する。なお、ホッカイエビの遊泳運動の様式は腹肢の規則的な運動による正の走流（推進）行動と害敵等より逃避する場合に行われる尾扇の断続的

* 正会員 北海道立中央水産試験場 水産工学室 (046 北海道余市郡余市町浜中町238)

** 学生会員 北海道大学大学院

*** 正会員 北海道大学工学部土木工学科

$$\rho_s V \frac{d u_s}{d t} = \rho_w V \frac{d u_b}{d t} - C_M \rho_w V \frac{d}{d t} (u_s - u_b) - \frac{1}{2} C_D \rho_w A |u_s - u_b| (u_s - u_b) + F_t \quad (1)$$

な跳飛び行動に分類されるが、本研究ではエビが能動的に遊泳方向を選択可能な正の走流行動について考察する。

図-3は実験に使用したホッカイエビの射影面積A（本実験では簡便のためにエビの第4歩脚より体軸と垂直な基部断面積と定義する）及び排除水質量Vの体長BLによる変化を両対数で示したものである。図中の実線は両対数で傾き2及び3の直線であるが、これより射影面積及び排除水質量は体長の2乗及び3乗にほぼ比例して変化しており、それぞれ次式で近似できることがわかる。

$$A = 1.78 \times 10^{-2} BL^2 \text{ (cm}^2\text{)} \quad (2)$$

$$V = 1.29 \times 10^{-2} BL^3 \text{ (cm}^3\text{)} \quad (3)$$

また、今回実験に使用したエビの比重は、体長によらずほぼ一定で

$$\rho_s = 1.080 \quad (4)$$

であった。なお、(1)式は、 $u_s = 0$ 、 $d u_b / d t = 0$ の場合には

$$F_t = -\frac{1}{2} C_D \rho_w A |u_b| u_b \quad (5)$$

となり、定常流速値とエビの遊泳速度が釣り合う場合の u_b 値と C_D 値より推力 F_t を計算できる。

3. 実験方法

3-1. 流動耐性実験

ホッカイエビの流動耐性実験には、1995年10月16日北海道東部の網走市能取湖内でソリネットによって採取された当歳エビ(BL=41~43mm)、1歳エビ(BL=65~72mm)及び2歳エビ(BL=85~91mm)を各3匹使用し、図-4に示す実験概要で実施した。

ホッカイエビは保護色（アマモなどの藻類における緑褐色）に類似し、かつ低照度の環境をより好む傾向が飼育中認められたため、実験ではこの性質を利用した。すなわち水路（水路幅30cm、水深35cm）内の上流側より60cmの区間（側壁及び底面）を黒色に塗装し、上部をカーテン等で遮光した上で残りの90cmの区間を水槽上部より300Wのハロゲンライトで照明することにより水路内に照度の勾配を形成することによってエビの遊泳方向（正の走流性）を制御した。実験に先立ち、予め水路内を13℃（エビを採取した能取湖浅海域の10月の水温に相当）に調温した上で実験に使用するエビを入れ、十分行動が安定した後に主流流速値を2.5cm/sずつ段階的に上昇させ、電磁流速計で流速値を確認しながら水路内のエビの遊泳行動をビデオテープに収録し画像解析することによって成長段階別のエビの最大遊泳速度を解析した。

本実験に使用した水槽全体図を図-5に示す。本水槽は海水対応（主要材料SUS316製）で水温調節機能、濾過機能を備えた垂直循環式の小型回流・振動流水槽（水路ガラス

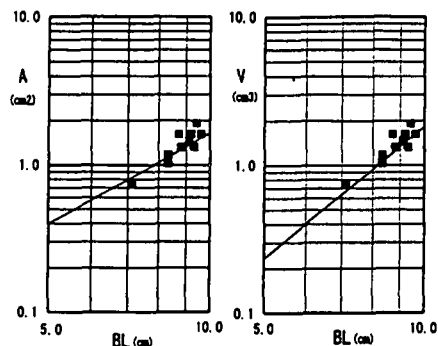


図-3 エビの射影面積及び排除水質量

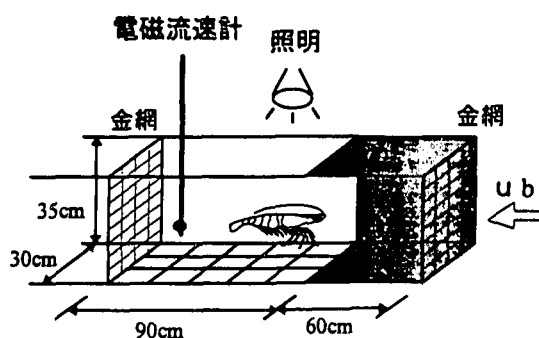


図-4 流動耐性実験図

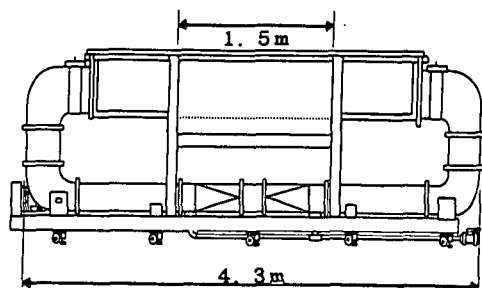


図-5 実験水槽

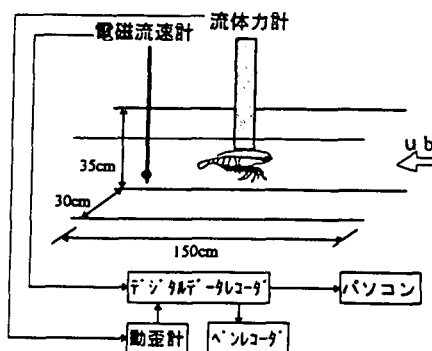


図-6 流体力測定概念図

部全長3.5m、観測部水路長1.5m、水路幅30cm、水深35cm、標準水容量700L、ジャパンアテック社製）で、循環管路下側の中心に配置されたインペラの回転をパソコンで制御することによって流速約100cm/s～100cm/sの範囲で任意の非定常流（定常流、振動流含）を発生させることができる。

3-2. 流体力測定実験

ホッケイエビに作用する流体力測定実験の概要図を図－6に示す。実験では5%濃度のホルマリンで遊泳形状に固定したホッケイエビを微小流体力測定用に試作した小型二分力計（1g単位で検定）に設置し、小型回流・振動流水槽を用いて定常流（0～105cm/s）及び振動流（周期4～8秒）場における作用流体力を動歪み計を通して計測し、電磁流速計による主流流速値と共に何れも50HzでA/D変換後デジタレコーダに記録した。記録データを基にパソコンなどを用いて抗力係数、質量力係数などの諸特性を解析した。

4. 実験結果と考察

4-1. 流れ耐性

図－7は定常流速値を段階的に上昇させた場合のエビの最大遊泳速度の成長サイズによる変化を遊泳パターンとともに示したものである。実験開始時、底面に定位していたエビは主流流速値の上昇で下流方向へ流され始めるとともに徐々に遊泳を開始し、エビの遊泳限界速度に近づくと頭部を底面近傍に押しつけるようにして流水からの抵抗を極力避けるような遊泳形状をとるようになり、限界値を越えると次第に下流方向に流されはじめるようになる。流下が始まる直前の流速値をエビの最大遊泳速度（ u_{smax} ）として評価した上で、図－7に示すように、従来より魚類の遊泳能力の評価基準として用いられている体長比（BL/sec）で整理すると、ホッケイエビの最大遊泳速度の体長比は、体長の増大とともに若干減少する傾向が認められるが概して体長の3倍程度の値に相当することがわかる。一般にエビの害敵となる多くの魚類のそれが体長の約10倍であることと比較すれば本種が隠れ場である藻場内から一度流出してしまえば害敵の格好の餌となりうることを示唆している。

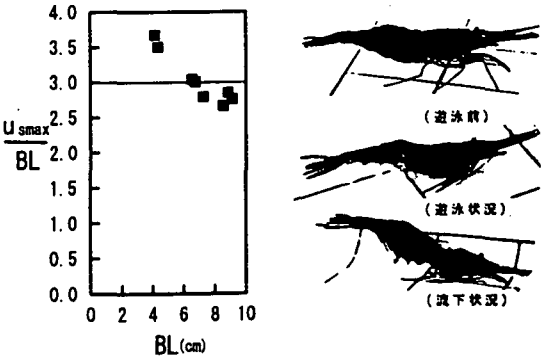
4-2. 流体力係数

図－8はホッケイエビの正の走流遊泳に対する抗力係数（ C_D ）の、体長BLを代表長として計算されるレイノルズ数（ $Re=BL \cdot u_b / \nu$ ： ν は流体の動粘性係数）による変化を示したものである。図－7に示したエビの最大遊泳速度に対応するレイノルズ数が最大でも20,000程度（最大体長時）以下であることを考慮すれば、遊泳時のエビに作用する抗力の評価としての抗力係数はレイノルズ数によって遷移状態で推移し、定常流場、振動流場共に、

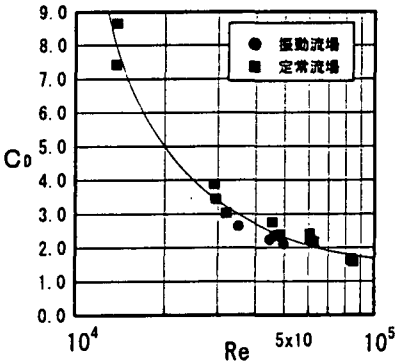
$$C_D=2.16 \times 10^{-4} Re^{-0.84} \tag{6}$$

で同一曲線状に近似できる。

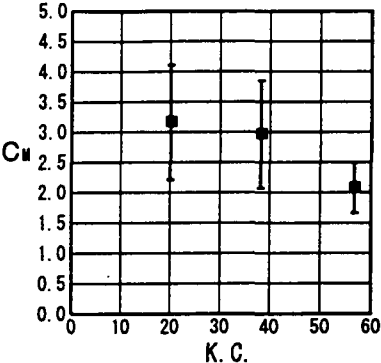
図－9は質量力係数（ C_M ）のK.C.数（ $K.C.=T \cdot u_b / BL$ ：Tは振動流の周期）による変化を示したものである。



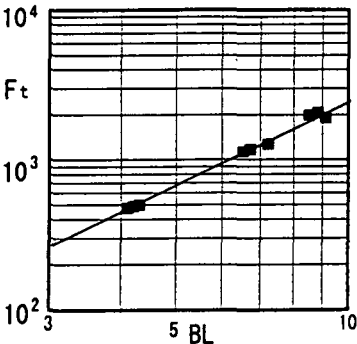
図－7 最大遊泳速度及び遊泳パターン



図－8 抗力係数のレイノルズ数による変化



図－9 質量力係数のK.C.数による変化



図－10 最大推力の体長による変化

エビに作用する流体力に占める質量力成分は抗力成分と比較して小さいため、実験的に得られる C_M 値は計測装置の精度上の限界よりかなりのばらつきが認められるが大局的には2~3の間の値をとりながら、 K_C 数の増加とともに減少してゆく傾向が認められる。

4-3. 最大推力及び推進力

図-7及び図-8の結果を基に(5)式よりホッケイエビが最大遊泳速度で前進時の推力(F_t)及び推進力(P)を成長段階別に整理すると図-10、図-11となる。図に示すように推力、推進力は何れも体長の累乗に比例し、各次式で近似できる。

$$F_t = 32.2BL^{1.8} \text{ (dyn)} \quad (7)$$

$$P = 1.96 \times 10^{-5} BL^{2.5} \text{ (W)} \quad (8)$$

4-4. ホッケイエビ生息場造成条件

一度、藻場外へ流出したホッケイエビが再び藻場内まで遊泳・到達し藻場内で能動的に生息することが可能な流動波浪条件を生息場造成のための必要条件と考えれば、(2)、(3)、(5)、(6)、(7)式を(1)式に代入し、エビ自身の慣性力は微小として無視すると、エビの最大推力がエビに作用する流体力を上回る条件として成長段階毎の生息場の許容流動・波浪条件が導かれる。

図-12は波浪場におけるエビ生息場として満足すべき許容最大波高値(H_m)の波周期による変化を体長 $BL=7\text{cm}$ の場合について生息域水深(d)別に示したものである。ここに、(1)式における流速値は微小振幅波理論をもとにエビが遊泳する水底面近傍における流速値として計算している。これより、許容最大波高値は周期の増大により水深毎にほぼ一定値に収束(抗力成分が卓越)することがわかる。この値を新たに許容波高値(H_{max})として再評価した上で、その水深による変化を体長別に計算したものが図-13で、 H_{max} は近似的に次式で表現できる。

$$H_{max} = 3.47 \times 10^{-2} BL^{0.6} \cdot d^{0.5} \quad (9)$$

従って、ホッケイエビ生息場(造成場)の水深帯及び増殖・資源管理対象となるエビの成長サイズが決定されれば(9)式よりホッケイエビの生息場として満足しなければならない波浪の静穏条件が導かれる。

5. おわりに

ホッケイエビの生息を規定する環境要因には、流動の他に餌生物や水温、塩分濃度など様々な複合要因が考えられるが、本研究では、藻場造成などにより人為的に制御し易い環境要因として流動・波浪要因について検討し一連の成果を得た。本成果を実際の現場に適用するためには、アマモ場などの波浪減衰特性を評価する手法を開発した上で、ホッケイエビ生息場として満足すべき藻場の繁茂密度や藻場の造成幅等を藻場による波浪減衰特性より決定する必要がある。

参考文献

- 1) 柏木正章：山田湾ホッケイエビの生態学的研究Ⅱ—エビの成長に伴う性の発達ならびにその転換について、日本水産学会誌、Vol. 40, No. 10, 1974, pp986~992.
- 2) 水島敏博：野付湾ホッケイエビの成長に伴う分布と密度の変化、北海道立水産試験場報告、Vol. 29, 1987, pp25~35.
- 3) 水島敏博：ホッケイエビの個体群構造の季節変化、北海道立水産試験場研究報告、Vol. 39, 1992, pp53~63.

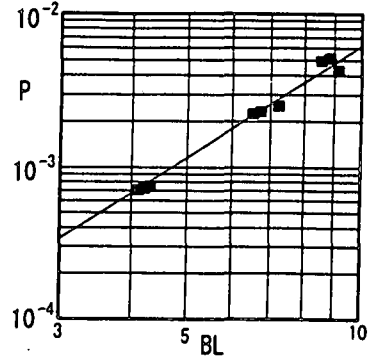


図-11 最大推進力の体長による変化

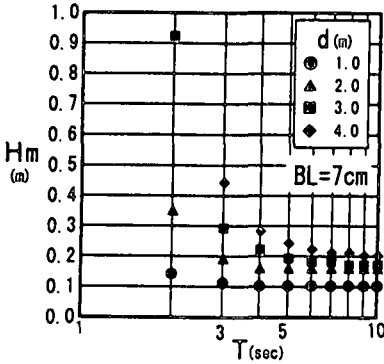


図-12 許容波高値の周期による変化例

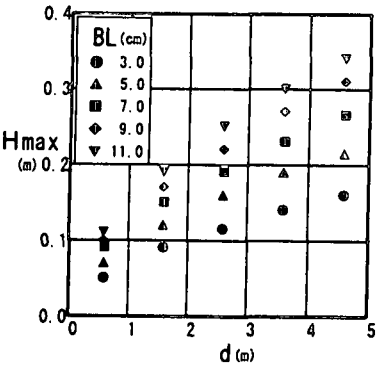


図-13 許容最大波高値の水深による変化