

ホッカイエビ生息藻場形成条件

Habitable seaweed bed conditions for *Pandalus kessleri*

瀬戸雅文*・江幡恵吾**・櫻井泉***・松岡学****・山下俊彦****

Masabumi Seto, Keigo Ebata, Izumi Sakurai, Gaku Mathuoka and Toshihiko Yamashita

The dynamic swimming ability of *Pandalus kessleri* living in an eel grass bed was examined using a circulative flow tank and was evaluated by an equation of motion. The wave conditions that formed the habitat were also determined by small amplitude wave theory. The thrust force F (dyn) can be expressed as a function of the body length L (cm) and the water temperature t ($^{\circ}$ C) in the following formula:

$$F = 5.32t^{1.16} \ln^{1.18}(24.2t^{-0.8})BL^{1.59}$$

In addition, the ability of a seaweed bed to subdue waves was estimated by momentum conservation law, and the adequacy of the theory was verified by an experiment using a wave tank. Consequently, the width, density, etc. of an eel grass bed that form the habitat can be determined.

Keywords: *Pandalus kessleri*, eel grass bed, habitat, development of a seaweed bed

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。従って、当該域周辺の環境造成計画等を検討する際には、ホッカイエビの生息場に十分配慮した造成基準の策定が必要となる。著者らは前年度、ホッカイエビの行動特性を波浪・流動環境下におけるエビの流れ耐性より工学的に定量化し、生息場造成のための波浪静穏条件を導出した。本研究は、前回のモデルに新たにホッカイエビの水温変動に伴う行動特性を反映するとともに、生息場成立のための藻場の形成条件（アマモ場の移植密度や造成幅など）について保存則レベルの波浪減衰モデルをもとに検証した。

2. ホッカイエビの流動耐性

2-1. 解析方法

図1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前報と同様に(1)式で表現する。

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

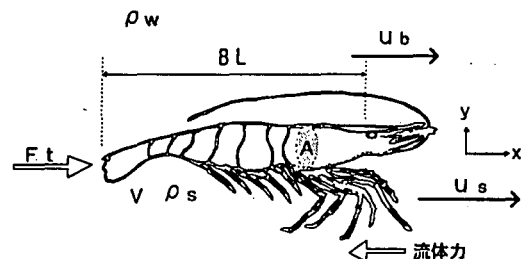


図-1 エビ周辺の力の釣り合い

ここに、 BL はエビの体長、 ρ_w は海水の比重、 ρ_s はエビの比重(=1.080)、 V はエビの排除水質量、 A はエビの流れ方向の射影面積、 C_D は抗力係数で前回の報告より、各(2)~(4)式で表現できる。

$$V = 1.29 \times 10^{-2} BL^3 \text{ (cm}^3\text{)} \cdots (2), \quad A = 1.78 \times 10^{-2} BL^2 \text{ (cm}^2\text{)} \cdots (3), \quad C_D = 2.16 \times 10^4 Re^{-0.84} \cdots (4)$$

また、エビの質量力係数 C_m は2~3の範囲の値をとりK.C.数の増加とともに減少傾向を呈する。前回の報告では、一定水温下(13 $^{\circ}$ C)における最大遊泳流速をもとに(1)式におけるエビの推力 F_t を定式化した。が、遊泳能力が水温に大きく依存することから、今回の研究では水温を4段階に変化させて実験を実施することにより、水温変化に

* 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)
 ** 北海道大学水産学部 海洋生産システム学科
 *** 北海道立中央水産試験場 水産工学室
 **** 正会員 北海道大学工学部 土木工学科

も配慮してエビの推力を定式化し、微小振幅波理論をもとに生息場造成のための波浪静穏条件を決定した。

2-2. 最大遊泳速度及び推力

最大遊泳速度の測定実験には、1996年11月5日野付湾内でソリネットによって採集されたホッカイエビ (BL=44~106mm)を使用した。供試個体は採取後5、10、15、20℃の4段階に調温された小型水槽内で約4ヶ月間水温馴致の後、ホッカイエビの背光走性を利用し、前回と同様の実験概要で実施した。即ち、小型回流水槽（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を制御した。実験に先立ち、予め水槽水路内を馴致水槽と同じ海水温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2.0cm/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水温別、成長段階別のエビの最大遊泳速度を計測した。

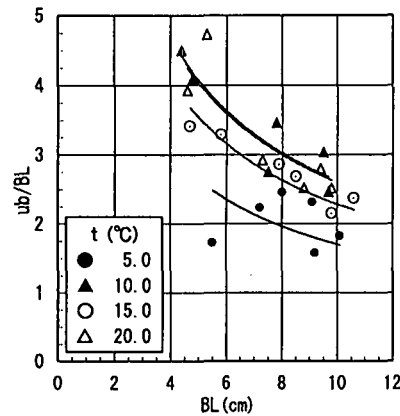


図-2 供試エビの最大遊泳速度

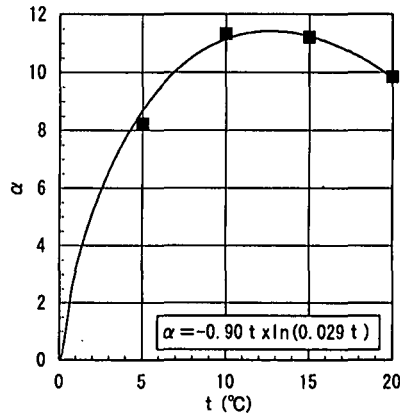


図-3 αの水温による変化

図-2は各水温条件下において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体勢をとるようになり、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_s) として評価した上で、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 (u_b/BL) で整理すると、ホッカイエビの最大遊泳速度の体長比は、本実験条件においては1.8~4.6の範囲で、概して体長の増大とともに減少する傾向が認められること、水温5℃においては体長によらず平均値で2.0程度と小さい値に留まることがわかる。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特に水温の低下する冬季~春季にかけて害敵の格好の餌となりうることを示唆している。図-3は、エビの最大遊泳速度を体長の関数として累乗曲線で評価し、べきを最小2乗法をもとに0.37と算定した場合の比例定数 (α) の水温による変化を示したものである。これより、ホッカイエビの遊泳能力は水温10~15℃の間にピークを持つことがわかる。ホッカイエビの最大遊泳速度は以下の式で近似され、図中の曲線は同式による近似曲線を示している。

$$u_s = -0.90 t \cdot \ln(0.029 T) \cdot BL^{0.37} (\text{cm/s}) \quad \dots (5)$$

2-3. 波浪静穏条件

(1)式において、u_s = 0、du_b/dt = 0として(4)式、(5)式を代入すればホッカイエビの最大遊泳速度前進時における推力 (F_t) を導出できて

$$F_t = 5.32 t^{1.16} \ln^{1.16} (24.2 t^{-0.9}) \cdot BL^{1.59} (\text{dyn}) \quad \dots (6)$$

となる。一度、藻場外へ流出したホッカ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形成のための必要条件と考えれば、(2)~(6)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水温・成長段階毎の生

息場の波浪静穏条件が導かれる。

図-4は波浪場において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=7cmの場合について生息水温、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(周期がほぼ7秒以上において)水温及び水深毎に一定値に収束(抗力成分が卓越)することがわかる。各条件毎の収束値を新たに許容波高値H_{max}(cm)として再評価した上で、水温t(°C)及び水深d(cm)による変化を体長BL(cm)別に計算すると図-5となり、H_{max}は近似的に次式で表現できる。

$$H_{max} = -0.056t \ln(0.029t) \cdot BL^{0.23} \cdot d^{0.56} \text{ (cm)} \quad \cdots (7)$$

従って、ホッカイエビ生息場を形成する水深帯及び増殖・資源管理対象となるエビの成長サイズ及び生息水温が決定されれば(7)式よりホッカ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。

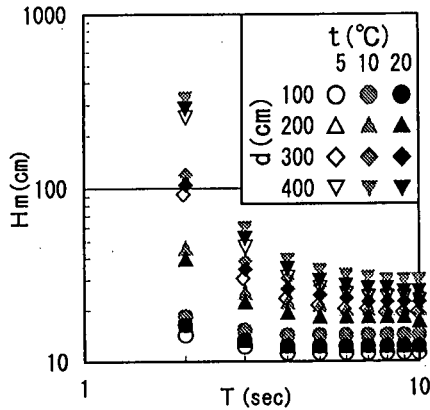


図-4 H_mの波周期による変化

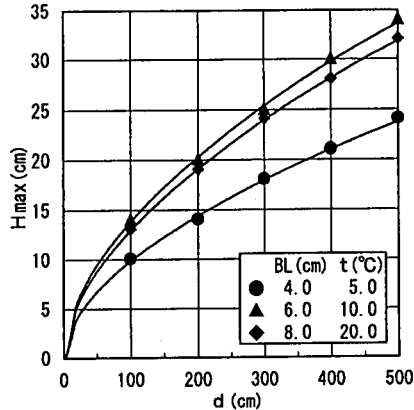


図-5 H_{max}の水深による変化

3. アマモ場の波浪静穏能力

3-1. モデルの構築

図-6に示すように一様水深hの二次元水域内の静水面上で波の進行方向にx軸、水面から鉛直方向にz軸をとり、草丈Lのアマモ場が波方向に幅Sに亘って群生してしている場合を考える。アマモ場は均等密度(単位面積当りn株)で群生し、1株当りm枚の葉(葉幅d)で形成されているものとする。また、藻場内の波高減衰は透過性構造物と同様に²⁾指数関数的に減衰するものと仮定すれば、藻場内の任意のxにおける水位ηは

$$\eta = \eta_0 \exp(-\lambda x) \quad 0 \leq x \leq S \quad \cdots (8)$$

ここに、η₀はアマモ場前面における水位、λは減衰係数、また、図中の各記号添字i,r,tは各入射波、反射波、及び透過波におけるものを意味している。アマモ場前後に検査面I、IIをとり、単位幅当りの運動量収支は波周期平均量によれば

$$R_i - (-R_r) - R_t = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 \quad \cdots (9)$$

ここに、Rは単位幅当りの各波成分における余剰運動量流束(ラグrange of motion)の波向き成分でR_iについて示せば

$$R_i = E_i \left(2n - \frac{1}{2} \right), \quad E_i = \frac{\rho g H_i^2}{8}, \quad n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad \cdots (10)$$

ここに、E_iは入射波の単位水面積当りの平均エネルギー、ρは流体密度、gは重力加速度、H_iは入射波高、kは波数である。また、アマモ場に作用する波周期平均流体力はアマモ前・後面の水位差より生ずる圧力f₁及び波がアマモ場を通過するときの流体抵抗力f₂の波周期平均値の和として各次式で与えられる。

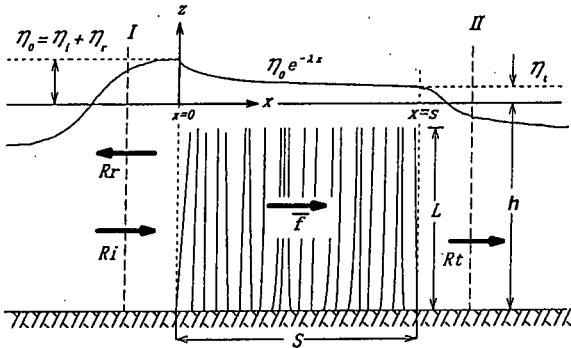


図-6 アマモ場周辺の運動量流束

$$f_1 = \frac{\rho g m n d H_1^2}{16 \lambda \sinh 2kh} (1+kr)^2 (1-e^{-2\lambda S}) \sinh \lambda d \{2kL - \sinh 2kL\} \dots (11)$$

$$f_2 = \frac{\alpha \rho \sigma^2 k H_1^4 (1+kr)^4}{2048 S \sinh^4 \lambda kh} (1-e^{-4\lambda S}) \{4kL + \sinh 4kL\} \dots (12), \quad \alpha = \frac{1}{2} C_D S m n d \gamma^2 \dots (13)$$

ここに、 σ は角周波数、 kr はアマモの反射率、 C_D はアマモの抗力係数、 γ は波運動に伴うアマモと水粒子の相対速度を規定する係数である。(9)式とエネルギー流束の保存式を連立すれば反射率 kr と波高減衰係数 λ を決定できるが、アマモ場による波の反射率は極めて小さいためこれを無視すれば(8)式より λ を決定できる。なお、波透過率 kt は係数 λ をもとに $(H_t/H_1)\exp(-\lambda S)$ より計算できる。

上記解析モデルを適用するためには予め波に伴う水粒子とアマモの相対速度に関する係数 γ を決定しておく必要がある。今回はモデルの簡素化を図るためにアマモ葉を直線的に近似し、剛性による復元力や慣性力を無視すれば、アマモの運動は葉鞘部を原点とする力 F （水粒子との相対速度よりアマモ葉表面に作用する抗力）のモーメントの釣合としてアマモの最大揺動角 θ が次式のように表現できる。

$$F = (1 - az/au) u_{\max} = \left(1 - \frac{2z \tan \theta \sinh kh}{\sigma H \cosh k(z+h)}\right) \frac{\sigma 2H^2 \cosh 2k(z+h)}{4 \sinh 2kh} \dots (14)$$

$$\therefore \theta = \tan^{-1} \left(\frac{H}{2 \sinh kh} \frac{2kL \sinh 2kL - \cosh 2kL + 2k^2 L^2}{k^2 L^2 \sinh kL - 2kL \cosh kL - 2 \sinh kL + 2} \right) \dots (15)$$

ここに、 au は任意水深 z における水粒子の移動振幅、 az はこれに対応する水深におけるアマモ葉の移動振幅、 $u_{\max}$ は水粒子の最大速度である。これより γ は $\gamma = (au - az) / au \dots (16)$ により定義される。

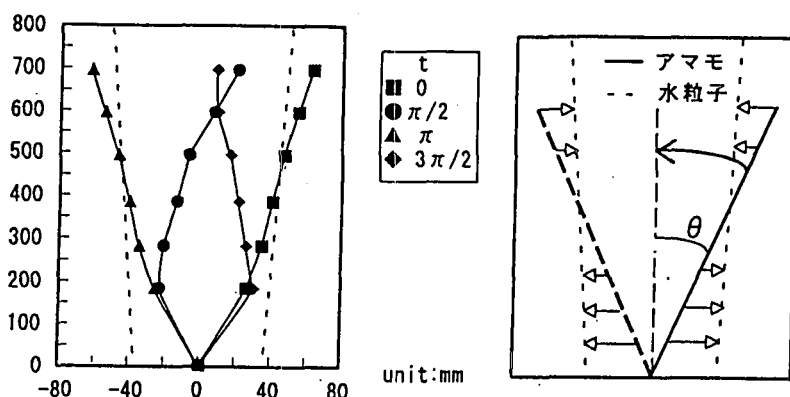


図-7 アマモの揺動のモデル化

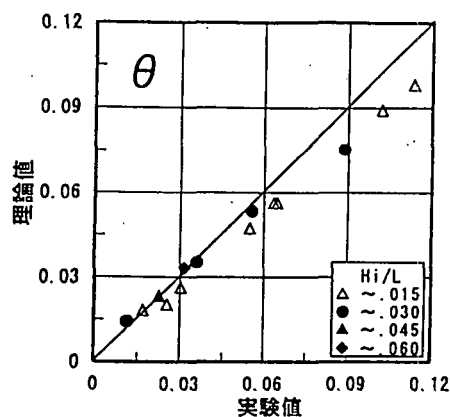


図-8 θ の理論値と実験値の比較

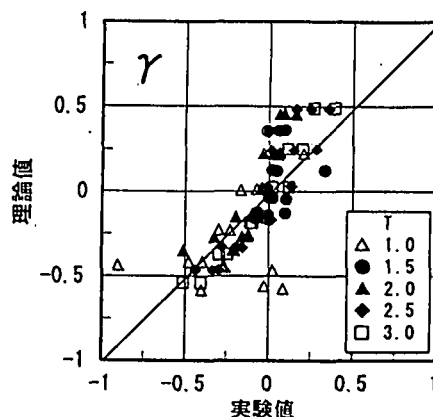


図-9 γ の理論値と実験値の比較

3-2. 水理実験による検証

γ の妥当性を検証するために波浪水槽を使用しアマモの揺動実験を行った。実験は1995年9月、能取湖内で採取したアマモ（平均草丈74.1cm）を使用し葉表面に10cm刻みの白い目印を付けた上で水槽中央より波方向に30cm間

隔で4株移植した。続いて水深を80cmに固定し、周期 $T=1.0\sim 3.0$ 秒の規則波を発生させアマモの揺動をビデオテープに記録した上で目印の挙動を画像解析装置で追跡することによってアマモの運動特性を解析した。図-7は周期 $T=2$ 秒、入射波高 $H_i=6.9$ cmの規則波がアマモを通過する際の最大揺動時のアマモ葉の運動軌跡を水粒子の移動軌跡とともに示したものである。これよりアマモ葉上部の移動振幅は対応する水粒子の移動振幅より大きく揺動していることがわかる。図-8、図-9は実験より求まる最大揺動角 θ 及び γ をモーメントの釣り合いによる計算値と比較したものである。図中 γ が負の領域はアマモの先端部に相当するが、これよりモデルによる近似が大局的にはほぼ妥当なことがわかる。

今回導出したアマモ場波高減衰モデルの妥当性を検証するために、図-10に示すように全長27m、幅1.5mの波浪水槽全面を水路幅51cmに背割し、水槽中央部の5mの区間に中央粒径0.32cmの珪砂を深さ10cm引き詰めた上で、予めステンレス製の金網（目合い5cm）の交点部に紐で地下基部を固定したアマモ（平均草丈約80cm、 $n=3$ ）を400株/ m^2 の密度で造成した。実験では水深60、80、100cmの各ケースについて波周期を1秒～3秒まで0.5秒刻みに変化させ最大波形勾配0.06程度までの波高を発生させて容量式波高計4台でアマモ場前後の反射率、透過率を合田の入反射分離手法を用いて算出した。図-11は実験より得られた反射率及び透過率の波周期による変化を波形勾配で整理して示したものである。これより実験条件におけるアマモ場の反射率は0.2以下と概して小さいこと、透過率は周期1.5秒で最小値約0.7をとり顕著な減衰が認められることがわかる。図-12はアマモ場による波浪減衰を推算するために必要となる波透過率（ K_t ）の実験結果と、(9)式に基づく理論式より計算される理論値との比較を示したものである。これより、若干のバラツキは認められるものの理論値は実験値とほぼ一致し、今回導いた理論の妥当性が検証された。

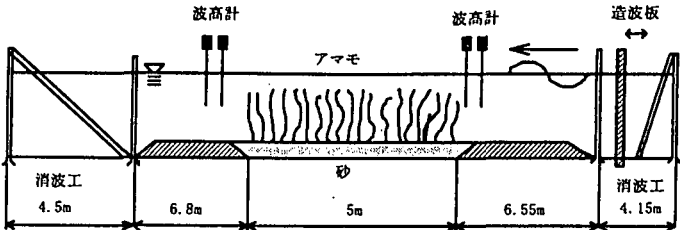


図-10 アマモ場波浪減衰実験概要図

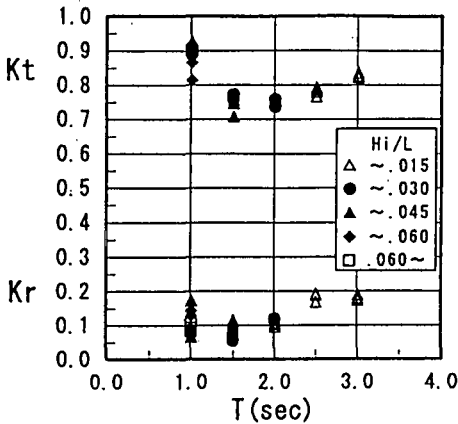


図-11 反射率及び透過率（実験値）

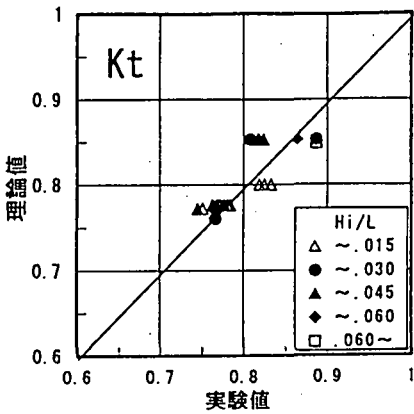


図-12 透過率の理論値と実験値の比較

4. 生息藻場形成条件

ホッカイエビの流動耐性とアマモ場の波浪静穏能力を複合化し、ホッカイエビ生息藻場形成条件を「アマモ場内を伝播する波浪に伴う振動流によりエビに作用する流体力がエビの推力を下回る条件」と考えれば、ホッカイエビ生息藻場形成のためのアマモ場の造成条件が決定できる。即ち、本調査で開発したアマモ場の波浪減衰モデルとホッカイエビの運動モデルを連立した上で当該域の波浪条件に当てはめることによって、波浪（流動）静穏条件面より湖内生育水域別のホッカイエビ資源維持及び増大のためのアマモ場保全・造成計画（保全指針）に資することが可能となる。図-13

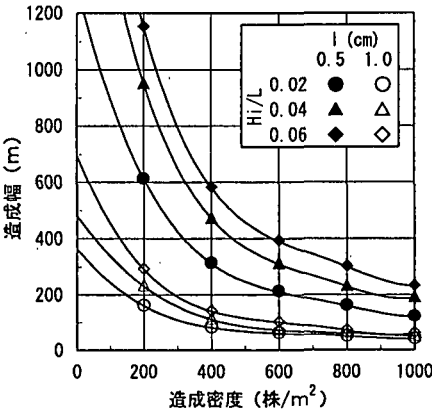


図-13 生息場形成条件の一例

は、波周期6秒、水深3mの海域にホッカイエビの生息場を造成する場合のアマモ場(一株当たりの平均葉数4枚、平均葉幅4mm、水温15℃と仮定)の移植密度と必要造成幅の関係をアマモの平均草丈(1)と波形勾配で整理して示したものである。アマモ場の生育状況及び波浪条件が解れば同図と同様にして比較的容易に実海域における藻場造成計画が作成できる。

謝辞

本研究は、北海道開発局「環境保全型沿岸域利用調査」の一環として実施されたことを付記し、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1)瀬戸雅文・櫻井泉・松岡学・山下俊彦：藻場造成に伴うホッカイエビ生息条件の解明,海洋開発論文集,12, 463-466,1996.
- 2)瀬戸雅文・系洌長敬・中村充・邵仙玉・橋本剛：ラセン織状ポーラス材の消波・流体力特性,海洋開発論文集, 9,403-408,1993.