

砕波帯を考慮した生物生息適地モデルの開発

A HSI-MODEL FOR SANDY SHORES INVOLVING SURF ZONE FACTOR

渡辺国広¹・諏訪義雄²・岡田昭八³・西村和一郎³・

武山直史³・吉川勝志³・立石賢吾³

Tunihiko WATANABE, Yoshio Suwa, Shohachi Okada, Waichiro NISHIMURA,
Naofumi TAKEYAMA, Katsushi YOSHIKAWA, and Kengo TATEISHI

¹正会員 農博 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所海岸研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³株式会社建設環境研究所 (〒170-0013 東京都豊島区東池袋2-23-2)

The distributions of marine fauna and physical environment were observed on Sendaiwan-Nanbu coast. Eight of the ten species showed clear difference between surf zone and offshore. This pattern was considered as specific for high energy sandy beach, because such pattern was not observed on Toban coast where wave energy was quite low. Two easy methods for extracting surf zone by numerical analysis were proposed, and its applicability was discussed. The breaking point estimated by breaking condition equation was slight onshore than real position. This surf zone was parameterized, and involved in a HSI-model for sandy shores. The applicability of this model was tested by field data obtained by observation on Sendaiwan-Nanbu coast. The result of evaluation was well fitted with real data when bottom friction velocity was substituted by surf zone factor. Consideration for surf zone should be paid when evaluating the effect of coastal works on fauna inhabiting in high energy sandy beach.

Key Words : *HSI-model, surf zone, environmental impact assessment, coastal ecosystem, habitat environment*

1. 背景と目的

近年の海岸保全事業では、実施にあたって極力環境に対する悪影響を避けるよう配慮することが不可欠である。しかし、事業が対象海岸の自然環境に与える影響や対策を実施しなかった場合に砂浜空間消失によって生じる環境的な損失を計画段階で具体的に明示することができないことが多い。そのため、地元住民や漁業者との合意形成に多大な労力を要するのが現状である。事業等による物理環境の変化が生物生息に与える影響の評価手法として、閉鎖性水域や内湾性の海岸においては生物生息適地評価モデルとしてHEP (Habitat Evaluation Procedures) がアサリ¹⁾やアマモ²⁾などで既に利用されており、外洋に面した開放性砂浜においても活用が期待される。しかし、開放性砂浜は内湾性の海岸に比べて波浪の作用が強力で浅海域に砕波帯が存在するという特徴があり、評価モデルの作成にあたってはこの点を新たに考慮せねばならない可能性がある。そこで本研究では開放性砂浜において利用可能な生物生息適地モデル (HSIモデル) を開発することを目的とし、まず、開放性砂浜において生息生物の現地調査を実施し、生物分布に対する砕波帯の影響を明らかにす

る。次に、砕波帯の存在をHEPに組み込むことができるようにするため、数値計算に基づく砕波帯の抽出方法を提案し、その妥当性を検証する。最後に開放性砂浜を対象とした生物生息適地モデルを構築し、砕波帯を環境因子として組み込むことがモデルの再現性に対して与える影響を検証する。

2. 開放性砂浜における生物分布の特徴

(1) 現地調査手法

開放性砂浜における生物分布の特徴を明らかにするため、2009年1月から2月にかけて仙台湾南部海岸において18測線68測点を設けて生物採取調査を実施した (図-1)。生物の採取方法は、全測点でハンドマッキンタイアによる底生生物の採取、水深0.5 mと1 mで地曳網 (袋網目合2 mm) の沿岸方向曳き、水深2 m以深で丸稚ネット、小型ビームトロール (袋網目合2 mm) およびドレッジャー (小型マンガ) とした。物理環境を把握するために、あわせて底質、水温、塩分濃度、流速の観測も実施した。

また、本現地調査の生物採取結果について比較考察するために2007年12月に兵庫県東播海岸で実施さ

れた、ハンドマッキンタイアによる生物採取調査の結果³⁾を分析した。

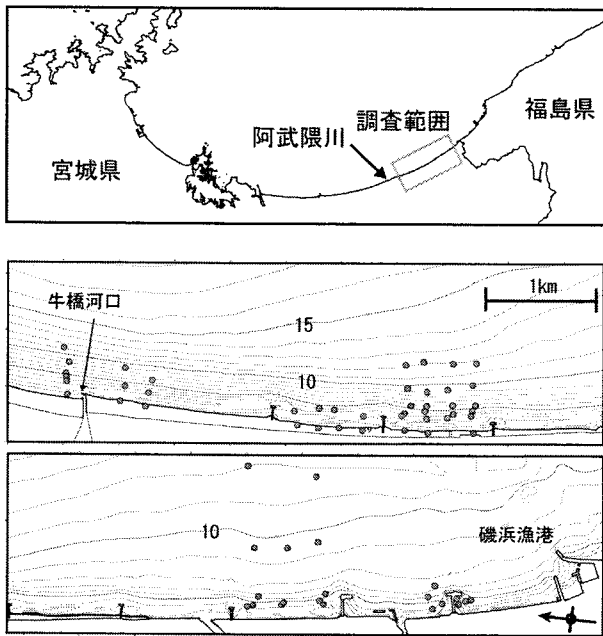


図-1 仙台湾南部海岸における現地調査測点

(2) 水深別の生物出現状況

仙台湾南部海岸で採取された生物のうち、採取個体数の多かった10種について、水深別の採取結果を出現率として整理した(図-2)。ここで出現率とは、各水深における測点のうち対象種が採取された測点の割合を示す。集計に用いた測点数は、0.5-1mが28測点、2mが13測点、4mが13測点、6mが10測点、9mが9測点、12mが7測点であった。

ウバガイ、バカガイ、キュウシュウナミノコ、ミツクリハマアミ、ヒラツメガニ、カタクチイワシ(仔魚)の6種は砕波帯である水深0.5-1mの地点ではほとんど出現せず、水深2m以深より出現した。一方で、コクボフクロアミ、ヒメスナホリムシの2種は水深0.5-1mにおいて高い確率で出現するものの、2m以深ではほとんど出現しなかった。アユ(仔魚)は水深4-6mで出現率が高くなる傾向が見られたが、イシカワシラウオでは水深による分布の違いが見られなかった。

東播海岸について5種(アサリ、ムギガイ、ミツバネスピオ、ミズヒキゴカイ、サクラガイ)を対象に同様の集計をしたところ、ミズヒキゴカイを除く4種について水深による出現率の違いが見られた(図-3)。しかし、複数種に共通した特定の水深を境に出現状況が顕著に変わるといふ、仙台湾南部海岸のような傾向は見られなかった。

(3) 生物分布に対する砕波帯の影響

仙台湾南部海岸では複数種で共通して水深0.5-1mと水深2m以深で顕著に分布境界が変わることが確認されたが、東播海岸ではそのような特定の水深帯が存在しなかった。これは、仙台湾南部海岸では水

深0.5-1mに砕波帯が存在するのに対して、東播海岸は内湾性のために静穏時にはほとんど砕波帯が形成されないことが原因と考えられる。イシカワシラウオは浮遊性の魚類であるため、砕波による海中の攪乱の影響を比較的受けにくい、底生生物や遊泳力の低いプランクトンは砕波の影響を避けることはできず、砕波帯の内か外かの違いが他の環境要因以上に強く分布に影響したものと考えられた。

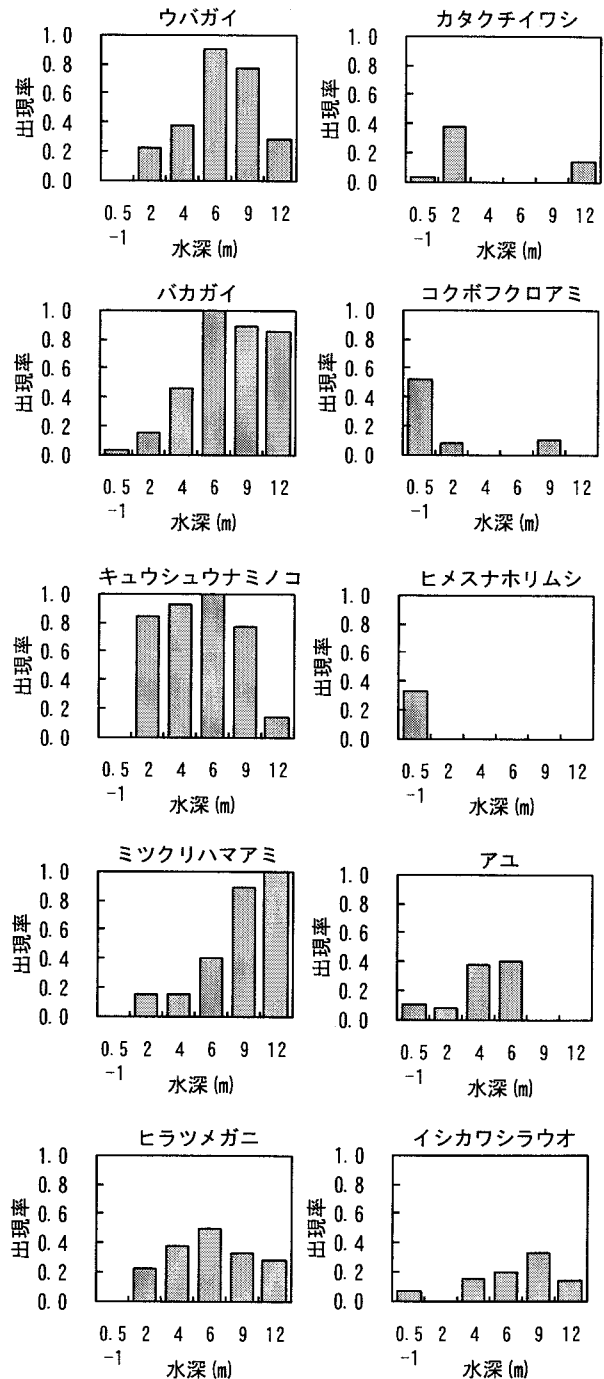


図-2 仙台湾南部海岸における水深別の出現率

開放性砂浜における海岸保全事業では、沖合に離岸堤や人工リーフを設置して作用波浪を低減させることが多く、その場合には砕波帯の形成状況が事業

の影響で変化することが予想される。地先海岸の漂砂フラックス，施設の離岸距離によっては，施設設置による顕著な水深変化は生じずに作用波浪のみが低減する場合も十分に想定される。そのため，これまで内湾や干潟で主に利用されてきたHEPを開放性砂浜においても使用するには，砕波帯の影響を組み込んだモデルも開発する必要があると考えられた。

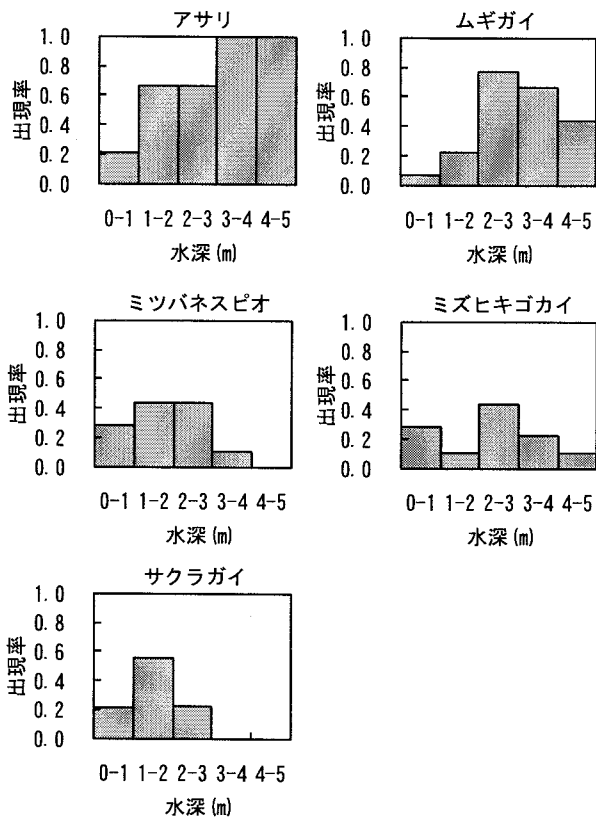


図-3 東播海岸における水深別の生物出現率

3. 砕波帯の抽出手法の検討

砕波帯を評価モデルに組み込むためには，砕波帯の位置を把握する必要があるが，潮位や地形，来襲波浪の条件によって刻々と変化することから，現地調査による定量的なエリア抽出は困難である。そこで本研究では，数値計算によって波の定常状態における砕波帯の空間分布を得ることとした。ここで扱う砕波モデルは波浪場の計算の際には必ず組み込まれているものであるが，海岸事業では海浜変形に着目するため，地盤高変動や海浜流といった項目が必ず結果として示されるのに対して，砕波帯の情報は示されることはない。そこで本研究では，計算結果から砕波帯を目に見える形で抽出する方法として砕波条件式によるものとエネルギー減衰比によるものの2手法を提案し，その妥当性について検証した。

(1) 砕波条件式による抽出方法

波浪場の計算で利用されるエネルギー平衡方程式

の基礎式 (1) には砕波により失われるエネルギーを考慮するために波高減衰項が設けられている。

$$\frac{\partial}{\partial x}(SC_g \cos \theta) + \frac{\partial}{\partial y}(SC_g \sin \theta) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[S \left(\frac{C_g}{C} \right) \left\{ \sin \theta \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) - \cos \theta \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) \right\} \right] = -\varepsilon_b S \quad (1)$$

ここに， S は波の方向スペクトル， n は成分波の周波数， θ は成分波の方向角， C_g は波の群速度， C は波速， ε_b は砕波により失われるエネルギーの散逸率である。まず，この式 (1) の右辺を0とすることで，砕波に伴うエネルギー散逸を考慮しない波浪場（非砕波）の波高 $H_{1/3}$ を算出した。次に，合田の砕波条件式 (2) で水深 h ，沖波波長 L_0 ，海底勾配 $\tan \theta$ から砕波限界波高 H_b を算定し，砕波波高比 $H_{1/3}/H_b > 1$ となる区域を砕波帯域とみなして抽出した。

$$\frac{H_b}{L_0} = 0.17 \left[1 - \exp \left\{ -1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^{4/3} \theta) \right\} \right] \quad (2)$$

(2) エネルギー減衰比による抽出方法

エネルギー平衡方程式の基礎式による砕波を考慮した波高 $H_{1/3b}$ と上述の $H_{1/3}$ を用いてエネルギー減衰比 $(H_{1/3b}^2/H_{1/3}^2)$ を求め，その分布をもとに砕波帯を抽出した。

(3) 砕波帯抽出方法の妥当性検証

上記の2手法の妥当性を検証するために，空中写真による砕波帯分布と数値計算結果を比較した (表-1)。空中写真は海上保安庁によって1994年に撮影されたヘッドランド設置以前のものであったので，数値計算では構造物築造以前の自然海浜を再現した。

表-1 砕波帯比較ケースの波浪・潮位・風諸元 (相馬港)

比較ケース	波高 (m)	周期 (s)	波向	潮位 (m)
空中写真	1.04	6.4	E	T.P. +0.01
数値計算	1.18	8.5	E	T.P. +0.04

空中写真より確認できた砕波帯は水深2~4mより岸側であったのに対して，砕波条件式によって抽出された砕波帯は，空中写真に比べて汀線際の水深1~2mに位置していた (図-4中の暗色部分)。この地点は空中写真によれば二次砕波の位置に相当した。

エネルギー減衰比による抽出では，砕波帯を示す閾値を設定する必要があるが，砕波条件式による結果と比較すると，エネルギー減衰比0.7~0.8 (図-5中の白線が0.8) を閾値とすることが妥当であることがわかった (図-5)。

本検討の結果，数値計算より求めた砕波帯の位置は二次砕波の位置に相当し，実際のものよりも過小評価となっていた。これは現地ではサンドバーの地

点で一次砕波が起こっているのに対して、本計算で使用した地形にはそのような微地形が組み込まれていないことが原因と考えられた。そのため、海底地形条件の精度を高めることができれば、高波浪時や将来時における砕波帯の抽出は可能と考えられた。

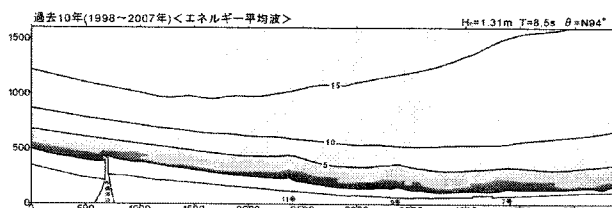


図-4 砕波条件式による砕波帯の抽出結果

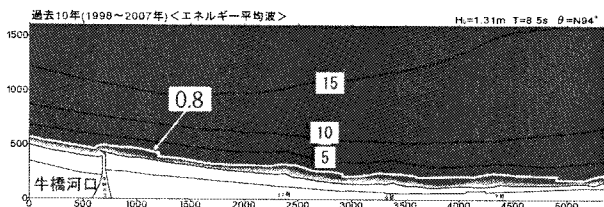


図-5 エネルギー減衰比による砕波帯の抽出結果

4. 砕波帯を考慮した生物生息適地モデル

砕波帯の情報が生物生息適地モデルの精度向上に寄与するかどうかを検証するため、現地調査で得られた生物採取結果をもとに環境因子に対する生息適地指数SIを開放性砂浜に特徴的な生物について作成し、現地調査時の再現をおこなった。

(1) 評価対象生物

現地調査で採取された生物のうち、バカガイとキュウシュウナミノコガイを対象に評価モデルを作成することとした。この2種は海底の表層に潜っているため水深0.5mから水深12mまでハンドマッキングタイアで採取することができ、本研究の調査結果において漁法によるバイアスが少ないと考えられるため選定した。

(2) 環境因子の選定

対象とする2種の分布に影響すると考えられる因子について以下の通り検討し、底質粒径、動物プランクトン量、底面摩擦速度、砕波波高比を因子として選定した。評価モデルは、HSIモデルに確率的的手法を導入した安藝らの確率的HSIモデル⁴⁾を採用し、現地調査で得られた結果をもとに、各環境因子について生息確率との関係を示すPSI曲線を作成した。すなわち、環境因子の値を階級分けし、現地調査で最も対象生物の出現率が高かった階級の生息適地指数(PSI)を1.0として、各階級の相対的な出現率から各階級に対するPSIを決定した。

a) 水深・地盤高

アマモやアサリの評価モデルでは低潮時における干出時間が制約要因となることから環境因子として組み込まれることがあるが、バカガイもキュウシュウナミノコも潮位変化に応じて移動できる能力を有することから、干出が制約要因とは考えにくい。現地調査結果で確認された水深に応じた出現率の変化は、水深にともなう底質粒径の変化などによる間接的な影響を受けた結果と思われるため、環境因子として採用しないこととした。

b) 水温・塩分

海洋生物の生息に影響する重要な環境因子であるが、現地調査時の底層の値は水温が8.0~9.4℃、塩分濃度が32.5~33.8‰と測点による差異が小さいことから、本検討では扱わないこととした。

c) 底質粒径

アサリやバカガイなどの貝類にとっては、波浪や流れによる攪乱を避けるうえで重要な潜砂行動の速度が底質粒度に依存することが知られている⁵⁾。本研究の現地調査では、両種とも中央粒径約0.2mmの細砂の測点で100%の出現率が得られ、この粒径を最適とすることは既往知見⁶⁾に照らしても妥当と考えられたことから採用した(図-6)。最適な底質粒径よりも粒径が粗くても細かくても潜砂行動にとっては不利益となることがわかっていることから⁵⁾、最適範囲以外では次第にPSIが低くなるように設定した。

d) 動物プランクトン量

生息地点の餌環境をあらわす因子として、動物プランクトンの量を採用した。動物プランクトンの採取には北原式定量プランクトンネットNXX13を使用し、水深4m以深では海底上1mから表面までの鉛直曳きによって、水深2m以浅では海水100Lを露水することで採取した。鉛直曳きについては露水計をネット口にとりつけて露水量を測定することで、2手法間の定量性を確保した。プランクトン量は得られたサンプルを静置した後の沈殿量で評価した。

本研究の現地調査結果によれば、バカガイ、キュウシュウナミノコともにプランクトン量4mL/m³以上の地点では出現率が低かった(図-6)。これは動物プランクトンが多くなると、両種が餌とする懸濁体有機物や植物プランクトンなどが動物プランクトンによって消費されてしまうことが原因と考えられた。そのため、プランクトン沈殿量が高くなるとPHSIが低くなるように設定した。

e) 底面摩擦速度

アサリ¹⁾、ミドリイシ⁴⁾の評価モデルで採用されており、アマモ²⁾でも類似の因子としてシールズ数が採用されているように、海洋生物においては欠かせない重要な因子であるので採用することとした。バカガイ、キュウシュウナミノコともに底面摩擦速度が4.5cm/sを越えると出現率が低下する傾向がみられ(図-6)、他の生物同様に底面の流れが強くなりすぎると定位に悪影響を及ぼすことが原因と考えられた。

f) 砕波帯

本研究では数値計算による抽出法を2種類提案したが、エネルギー減衰比による方法は閾値を設定する必要があるため、評価モデルには砕波条件式によって求められた砕波波高比 > 1 の範囲を砕波帯内とした。ただし、前述の検討でこの手法によって抽出される砕波帯は過小評価となることがわかっているため、ここでは冬季の月1回クラスの波浪（波高 2.98m, 周期 11.2m, 波向 ENE）の条件で計算した結果を用いた。バカガイもキュウシュウナミノコも砕波帯では出現率が大幅に低下することは既に述べたとおりだが、バカガイでは砕波波高比が約 0.7 の測点でも出現率が低下していた。これは、砕波点近傍の沖側も水深が浅くなるに従い、波浪による攪乱が底面に伝わるためと考えられた。そのため、砕波点を境にPHSIを急激に変化させるのではなく、砕波波高比に対して傾斜をもった設定とした。

g) 水質

内湾ではCOD, DO, T-N, T-Pなどの水質項目が環境因子として採用されることがあるが⁷⁾、開放性砂浜においては、海水の流動が激しく即座に拡散されるため、本研究の調査範囲においてはこれら水質項目の差異はほとんどないものと考えられたため、採用しなかった。

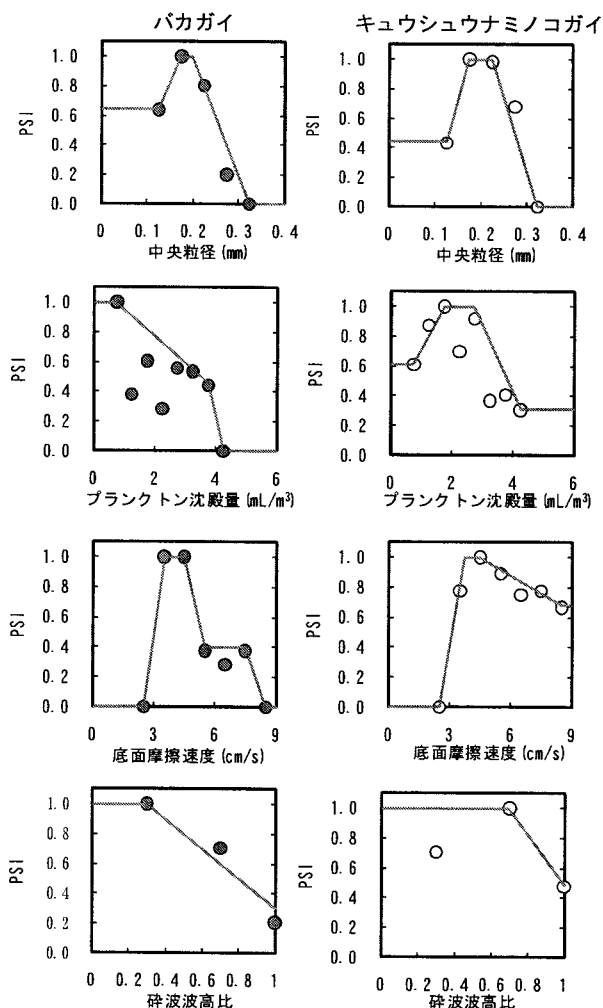
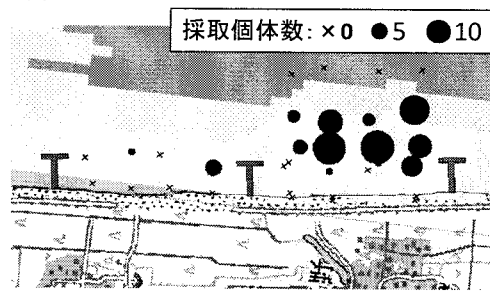


図-6 環境因子とPSIの関係

(a)底質による評価



(b)砕波帯による評価

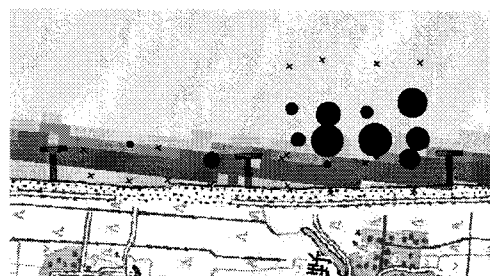


図-7 バカガイの採取個体数と生息適地の対応関係（濃色部で適性が低い）

(3) 砕波帯考慮による効果の検証

a) 効果の検証方法

バカガイ、キュウシュウナミノコにとっての総合的な生息適地指数を示すPHSIは、各環境因子について作成した各PSI曲線に乗じることで求めた。本研究は、砕波帯を考慮することによる評価の変化を検証することを目的としているので、次の3式でPHSIを求め、結果を比較することとした。

$$\text{Case1} : \text{PHSI} = \text{PSI}_s \times \text{PSI}_p \times \text{PSI}_f \quad (1)$$

$$\text{Case2} : \text{PHSI} = \text{PSI}_s \times \text{PSI}_p \times \text{PSI}_f \times \text{PSI}_b \quad (2)$$

$$\text{Case3} : \text{PHSI} = \text{PSI}_s \times \text{PSI}_p \times \text{PSI}_b \quad (3)$$

ここで、 PSI_s は底質粒径のPSI、 PSI_p は動物プランクトン量のPSI、 PSI_f は底面摩擦速度のPSI、 PSI_b は砕波波高比のPSIである。Case1が砕波帯以外の3因子による評価、Case2がCase1に砕波帯のPSIを加えたもの、Case3が底面摩擦速度の代わりに砕波帯を因子としたものである。これらを現地調査した計68測点について求め、実際の採取結果と比較することで再現性を比較した。

算出されたPHSIを5階級に区分し、各階級に属した測点に対して現地調査における対象種の出現率を求めたものが図-7、図-8である。この図示方法では、PHSIと実際の出現率が正比例の関係に近いほど評価モデルとしての精度は高いことを意味する。

b) 検証結果

バカガイでは、砕波帯を考慮しないCase1ではPHSIが低いか高いときには精度が高いものの、PHSIが0.5付近では出現率が約0.9と高く、モデルによる評価が過小となった（図-7）。これに砕波帯を考慮したCase2では、PHSIが0.3や0.7のときに出現率が大幅に高くなり、PHSIによる評価がさらに過小傾向

となった。ところが、底面摩擦速度を因子として使用せず、砕波帯を代わりに組み込んだCase3ではPHSIが0.5のときに出現率も0.5に近い値となり、PHSIの値全体にわたって実際の出現率と良い相関を見せるようになった。

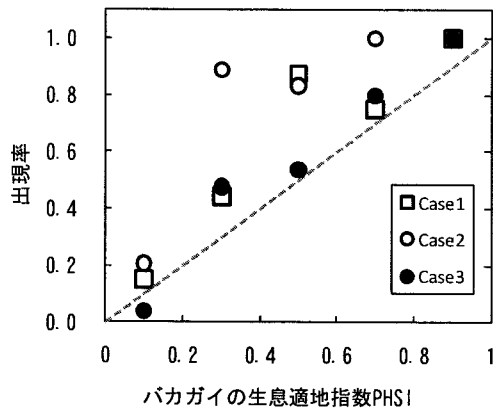


図-8 バカガイのPHSIと出現率の関係

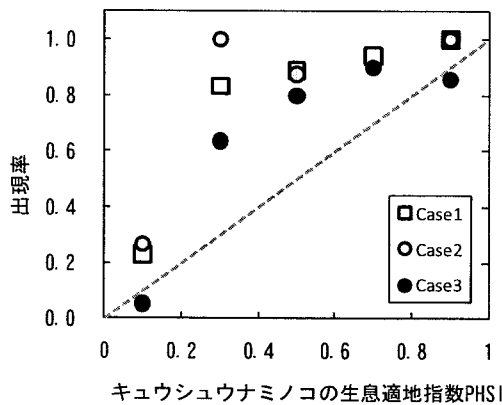


図-9 キュウシュウナミノコガイのPHSIと出現率の関係

キュウシュウナミノコについても、底面摩擦速度と砕波帯を双方考慮したものは最も再現性が低く、底面摩擦速度を考慮せずに砕波帯を考慮したものが最も再現性が高くなった(図-8)。

このように、バカガイでもキュウシュウナミノコでもCase2で扱う因子が増えたにも関わらず精度が落ちた点が共通していたのは、一般に砕波帯では底面摩擦速度が高い傾向にあり、独立でない因子を2つ組みこんだことで、PHSIの値を減少させる効果が2重に反映されてしまったことが原因と考えられた。底面摩擦速度は水深0.5~1mのような計算領域の陸側境界に近い地点ではメッシュの設定によってはうまく計算できない場合がある。また、現場で実測することが難しいために計算結果が現地状況を正しく再現できているか検証が難しい。本検証結果とこれら数値計算における不正確さを考えると、開放性砂浜においては底面摩擦速度よりも砕波帯のほうが環境因子として有効となる場合もあると考えられた。

5. 結論

本研究によって得られた主要な結果は以下の通りである。

- ①仙台湾南部海岸では、水深2mを境界に生息生物の出現状況が顕著に異なっており、砕波帯の存在が生物分布の制約要因となっているものと考えられた。
- ②開放性砂浜では底面摩擦速度よりも砕波帯を環境因子として組み込んだほうが、生物生息適地モデルの再現性は高くなることが明らかとなった。

6. おわりに

本研究は、開放性砂浜における砕波帯の存在が生物の分布状況に与える影響を把握し、砕波帯を組み込んだ生物生息適地モデルを提案する事を主目的とした。そのため、環境因子についての既往知見の整理、因子間の相互作用やPHSIを算出するときの重み付け方法など検討が十分でない部分も多い、また、作成したモデルについての正答率の検証も十分でないが、これらは今後の課題としたい。

謝辞：本研究で現地調査を実施するにあたっては、国土交通省東北地方整備局仙台海川国道事務所の高橋一氏、関浩明氏および山元漁協、亙理漁協、三洋テクノマリン株式会社から多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 新保裕美, 田中昌宏, 池谷毅, 越川義功: アサリを対象とした生物生息地適性評価モデル, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 1111-1115, 2000.
- 2) 高山百合子, 上野成三, 勝井秀博, 林文慶, 山木克則, 田中昌宏: 江奈湾の藻場分布データに基づいたアマモのHSIモデル, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1136-1140, 2003.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 海岸保全施設による環境影響の調査・管理手法に関する検討業務報告書, 2008.
- 4) 安藝浩資, 中野晋, 内田紘臣, 岩瀬文人, 御前洋: 沿岸域の自然再生計画における順応的管理へのHSIモデルの適用性, 海洋開発論文集, 第23巻, pp. 501-506, 2007.
- 5) 櫻井泉, 瀬戸雅文, 中尾繁: ウバガイ, バカガイ, アサリの潜砂行動に及ぼす水温, 塩分および底質粒径の影響, 日本水産学会誌, 62(6), pp. 878-885, 1996.
- 6) 櫻井泉, 林浩之, 桑原久実: 北海道島牧村沿岸のバカガイ漁場における底質環境とマクロベントス群集, 日本水産学会誌, 67(4), pp. 687-695, 2001.
- 7) 五十嵐学, 古川恵太: 沿岸域における生物多様性を指標とした海辺環境評価の試み, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 1161-1165, 2007.