

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

THE APPLICABILITY OF HSI-MODEL FOR THE ADAPTIVE MANAGEMENT OF RESTORING NATURE PLANNING IN COASTAL ZONE

安藝浩資¹・中野晋²・内田紘臣³・岩瀬文人⁴・御前洋⁵

Susumu NAKANO, Hiroshi AKI, Hiroomi UCHIDA,
Fumihito IWASE, Hiroshi MISAKI

¹正会員 工修 ニタコンサルタント株式会社 環境部次長 (〒771-0122 徳島県徳島市川内町鈴江西 38-2)

²正会員 博(工) 徳島大学環境防災研究センター (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

³理博 株式会社串本海中公園センター名誉館長 (〒649-3514 和歌山県西牟婁郡串本町有田 1157)

⁴黒潮生物研究財団 黒潮生物研究所所長 (〒788-0333 高知県幡多郡大月町西泊 560 番イ)

⁵株式会社串本海中公園センター館長 (〒649-3514 和歌山県西牟婁郡串本町有田 1157)

The aim of this study is the development of a method to evaluate a suitable habitat condition of a colony of *Acropora tumida* which is a kind of stony coral. We improved the HSI model which was often used in a quantitative ecological assessment and suggested the PHSI model which was introduced a probabilistic way of thinking. We can evaluate the optimum habitat condition of coral more precisely than the conventional HSI model by applying the PHSI model to an ecological assessment. We estimated the distribution of a colony of *Acropora tumida* in 1975 by using the PHSI model in which three physics factors was involved and the estimated distribution well coincided with the observed one. In addition, it was found that the average PHSI value of the object sea area has decreased gradually since 1985. And, the present value was approximately 60% in comparison with that in 1970.

KEY Words: restoring nature, coral, HSI-model, adaptive management, environmental estimation

1. はじめに

自然再生事業は順応的管理手法を用い、事業効果をモニタリングし、事業の妥当性を評価することから、計画の修正、中止をふまえて徐々に行っていくこととされている。自然再生計画において人為的に変えることができるのは主に物理的環境である。自然再生の指標となる生物種を特定し、その分布特性をもとに、物理環境条件に対する改善計画の効果を生物学的観点から予測しておく必要がある。しかし、物理環境の改善が、指標とする生物にどの程度の影響をもたらすかを定量的に予測することは容易ではない。その理由として、流れ、波浪、濁度や光量などの物理要因についての最適条件がほとんど分かっていないことや、自然再生の対象となる場所で計画策定時に現地調査から得られる生息環境等の情報は最適な状態のものではないことなどが挙げられる。

本研究では、イシサンゴ類の一種であるエダミド

リイシ (*Acropora tumida*) を指標動物として取り上げ、HSI モデルの適用性について検討する。また、最適生息条件を評価する手法として、HSI モデルに確率的な考え方を導入した手法を提案するとともに、本手法の自然再生計画における順応的管理への適用性について考察する。

2. 自然再生事業の概要

徳島県海部郡海陽町の竹ヶ島海中公園¹⁾はエダミドリイシの大群落、点在する形の良いシコロサンゴ (*Pavona decussata*) が生育する海域としてその固有性、貴重性の観点から 1972 年に国定公園・阿波竹ヶ島海中公園の指定を受けている。ところが過去 3 ヶ年に渉る調査により、近年、海中公園指定時に大群落をなしていたエダミドリイシが減少し、代わって比較的濁りに強いカワラサンゴ (*Lithophyllon undulatum*) が増加するなど、サン

ゴの種組成に顕著な変化が生じている。著者ら^リは、この変化の主な要因として図-1に示す1984年以降に建設された防波堤①②により、海域の海水交換や擾乱度が低下したためであることを明らかにしている。こうした知見に基づき、当海域の代表的なサンゴ種であるエダミドリイシを指標動物とし、平成18年度より順応的管理を前提とした自然再生事業に着手している。

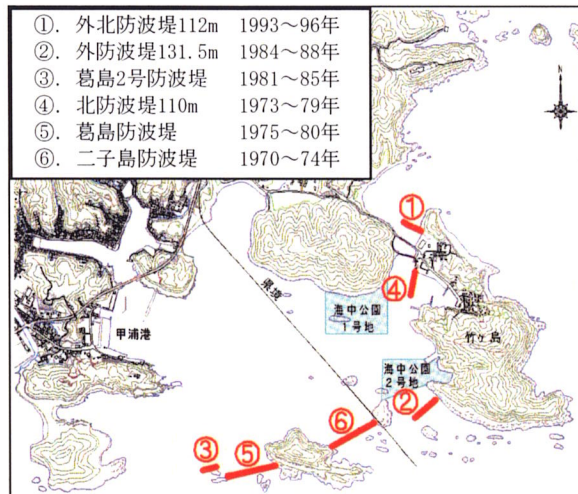


図-1 海中公園周辺の沿岸構造物位置図

3. 生息環境評価における物理因子の選定

(1) 物理因子の相互関係

海生生物の生息環境には底質、水深、潮流、波浪、光量、サンゴ上への砂泥堆積等、様々な物理要因が複雑に関連している。定量的な環境評価において、従属関係にある評価因子を選択した場合、その因子の影響を過大に評価することになる。従属関係の少ない因子のみを、選択するためには、因子間の相互

関連を十分に整理する必要がある。そのため、当海域でのエダミドリイシの生息環境条件を次のように定義し、それぞれの条件に関係する物理因子を図-2に整理した。

エダミドリイシの生息環境条件

＝生存条件×生育条件×着生条件

ここで、「生存条件」「生育条件」「着生条件」は、それぞれ以下のように考える。

生存条件：それがないと生きていくことができない条件であり、人間に例えると「水」「空気」に相当するものである。

生育条件：エダミドリイシにとってよりよい生活条件のことであり、人間に例えると「快適性」「利便性」に相当するものである。

着生条件：新世代の供給に対する条件である。人間に例えると「出生率」「乳児死亡率」に相当するものである。

(2) 生存条件

本種の生存条件として、岩及び転石を着生基質とすることから「底質」を、また、水中でのみ生存することから「水深」を挙げた。

a) 水深

本種は干出状態では生息できない。一方、水深が深いという理由だけで生息できなくなるのではない。底質が不適当であることや、光量不足等が生息環境を損なわせると考えられる。そのため、水深が1.0m以上あることを必要条件とした。

b) 底質

サンゴが着生するのは波浪等により動かない岩や転石である。そのため、岩・転石率1%以上を対象とした。

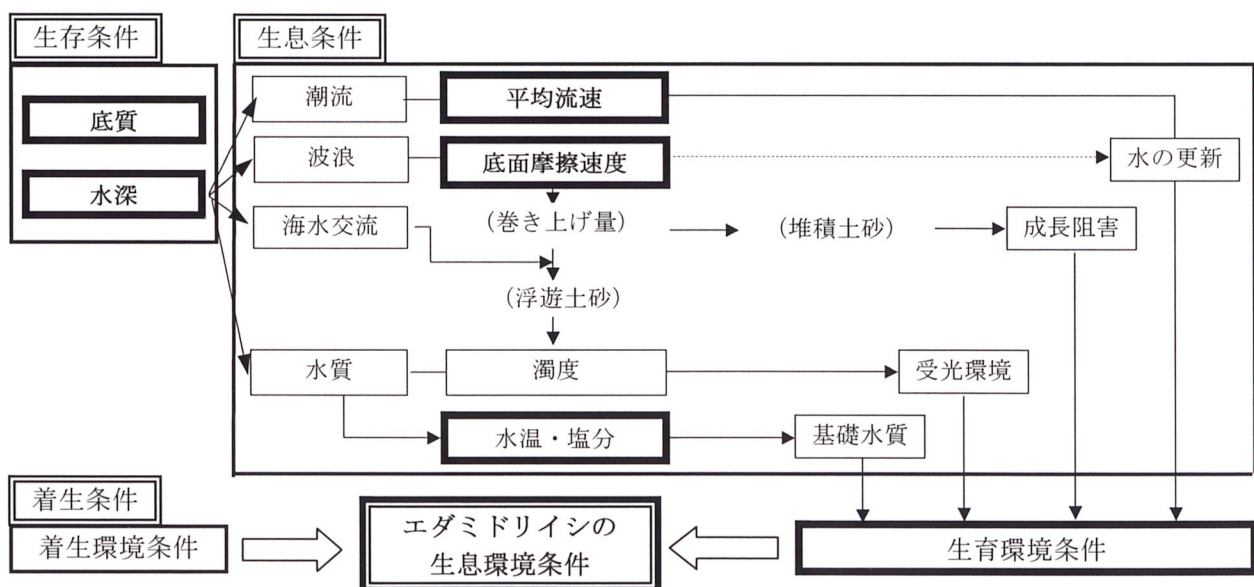


図-2 エダミドリイシの生息環境条件に及ぼす物理因子の相互関連

(3) 生息条件

生息条件は、新しい水の供給があること(水更新)、十分な光量があること(受光環境)、および適切な水温・塩分であること(基礎水質)、サンゴ上への堆積土砂が少ないこと(成長阻害)の4項目とした。

a) 基礎水質(水温・塩分)

水温・塩分はサンゴの生息環境に大きく影響し、生存条件に近いものと捉えることができる基礎的な水質である。その生息可能域は、水温 16~36°、塩分 27~40 ともいわれている²⁾。しかし、これらの地点間での差異を明確にすることができない。水温や塩分の変化は、黒潮の離接岸や冷水塊の発生に強く影響される。しかし、そうしたマクロ的な環境変化は、サンゴがこの海域に生息して以来、繰り返して行われてきた現象であると考えられる。しかし、現在においても生息していることから、本論文においては、そうした環境変化を対象としないこととした。

b) 水更新(波浪・潮流)

浮泥堆積の防止、新鮮な海水の供給等の面から、常に適度な「水更新」があることは、サンゴだけでなく、多くの海洋生物の生息環境に必要な要因である。水更新には、主として潮汐と波浪によるものがあるが、潮汐に比べて波浪は水平移動成分が少なく、新たな水の供給という点に関しては潮汐の方が重要である。そのため、ここでは、最盛時(M₂潮+S₂潮)の潮流流速を指標として用いる。

c) 受光環境(濁度)

サンゴは、動物プランクトン等を捕食する他、共生している褐中藻が光合成によって生産した物質を得て成長している³⁾。褐中藻が光合成を行うためには光が必要であることから、サンゴの生息条件として受光環境は重要である。受光環境を左右する要因として濁度に着目する。濁度は、波浪等の擾乱作用による巻き上げや、洪水時の流域河川からの流入土砂が考えられる。そうした土砂の微細粒子が海域内に浮遊し、長期間滞留することにより、増加し受光環境を悪化させる要因となる。当海域においては、直接の流入河川がなく、巻き上げによる濁りの影響が大きいと考えられること、加えて、巻き上げ微細土砂の粒子径との関連が高いことから波浪による底面摩擦速度を指標とした。また、微細粒子が滞留する時間を左右する指標として残差流量を用いた。

d) 成長阻害(堆積土砂)

砂泥粒子がサンゴ上に堆積すると、サンゴは繊毛と粘液を用いてそれを除去しようとし、相当なエネルギーを消費する。また、堆積砂泥量によっては、サンゴが埋没し、急速に衰退することが考えられる。ここでは、巻き上げによる堆積土砂量を表す指標として、底面摩擦速度を用いる。

(4) 着生条件

着生条件は生存条件、生息条件が整った環境下に

おける、新世代の供給度合いのことであり、産卵の有無や海域への加入状況などが評価項目となる。ここでは、生存条件、生息条件に続く3次的な条件と考えて、取り扱わないこととした。

4. HSI モデルの適用

(1) 評価対象海域

対象海域を図-3に示す。モデル構築に際して、対象海域をメッシュ分割(1区画:25m×25m, 全1742区画)した。これらの内、岩・転石率が1%未満の区画と、水深1.0m以浅の区画を除去した670区画を評価対象とした。なお、岩・転石率とは、1区画に占める岩・転石の面積割合である。

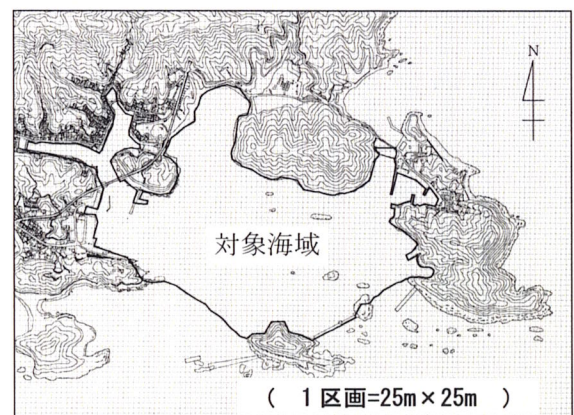


図-3 対象海域・メッシュ分割図

(2) 指標生物の被度分布

現在得られる情報の中で、最も良好な状態であったと考えられる1975年頃のエダミドリイシ分布を対象とした(図-4)。

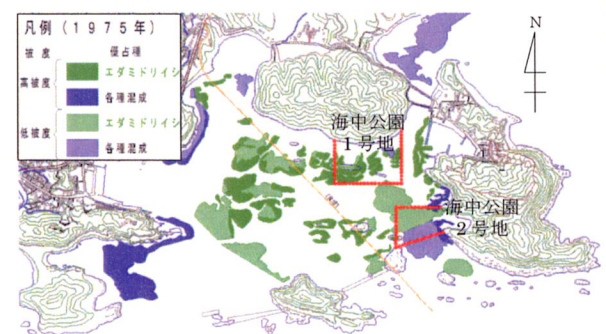


図-4 1975年頃のエダミドリイシの分布

(3) 物理因子

1975年頃のエダミドリイシの良好な分布を形成したと推測される1970年頃の物理環境を評価因子とした。

流速: 平面2次元潮流解析により求めた最盛時(M₂潮+S₂潮)の潮流流速を指標とした。

残差流量: 潮流解析から得られた10潮汐の残差流

速に各区画の水深を乗じた値を指標とした。

底面摩擦速度：沖波波高 0.65m と周期 9.69 s を代表波として、間瀬らの平面波浪変形モデル⁴⁾により求めた波高・周期分布を用いて算定した底面摩擦速度を指標とした。この沖波波高は対象海域近縁で累積波高出現確率約 70%に相当する。なお、摩擦速度の算定には Jonsson 式⁵⁾に基づく摩擦係数を用いた。

(4) HSI モデルの適用

各区画のエダミドリイシ生息環境を式(1)で評価した。ここで、底質、水深に関しては対象海域から予め除いていることから、評価項目に含めない。また、塩分濃度、水温に関しても当海域内での差異はないため 1.0 とした。したがって、生息環境を評価する項目としては流速、底面摩擦速度、残差流量の 3 因子である。

$$HSI = SI_S \times SI_T \times SI_v \times SI_F \times SI_q \quad (1)$$

ここに、

SI_S : 塩分の SI 値 (=1.0)

SI_T : 水温の SI 値 (=1.0)

SI_v : 流速の SI 値

SI_F : 底面摩擦速度の SI 値

SI_q : 残差流量の SI 値

図-5～図-7 は、対象海域 670 区画のエダミドリイシの被度と物理量の関係を示したものである。ここで、被度は、1 区画に占めるエダミドリイシの面積割合を表す。図中の破線は、それらの分布の包絡線である。これらの包絡線は、それぞれの物理因子の生息環境における好適性を相対的に示すものであり、最適範囲を 1.0 とする。図-5 より、流速については、流速 0.4～2.5cm/s で SI 値=1.0、流速 0.0cm/s および 3.0cm/s 以上で SI=0、となる。図-6 に底面摩擦速度の SI 曲線を示した。0.5～4.5cm/s で SI 値=1.0 であることがわかる。また、図-7 は残差流量に対するものである。図より概ね 60cm³/s までエダミドリイシの最適範囲であることがわかる。

図-8 は HSI 値を幾ら以上に設定すれば、どの程度の正答率と誤答率が得られるかを把握するために 1975 年当時、エダミドリイシが 50%以上の被度で生息していた 234 区画に対する回答率・正答率・誤答率の変化を表したものである。生息条件を HSI 値 ≥ 0.1 とするなど小さい値に設定した場合には、評価対象の 670 区画のほとんど全ての箇所が生息可能と回答される。そのため、回答率 284%(=664/234)、正答率 100%(=234/234)、誤答率 184%(=430/234) となり、正答率の約 2 倍の誤答率となる。また、これらは HSI の設定値を大きくしてもほとんど変化しない。これは、SI 曲線で表される最適範囲が広いことから、ほとんどの区画で SI 値=1.0 となるためである。その理由として、生息分布データの重みが考慮されていないことがあげられる。このことから、海域など正確な情報が得られにくい場合や、環境再生など最適

な生息環境情報を過去のデータに頼る場合などには HSI モデルの適用性は高いとは言えない。特に信頼度の低いデータ群を用いて、有意な分析を行うためには、データの重みを考慮するために HSI モデルに確率的手法を導入する必要がある。

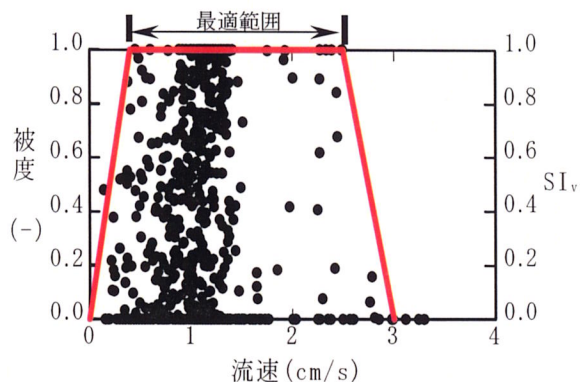


図-5 流速の SI 曲線

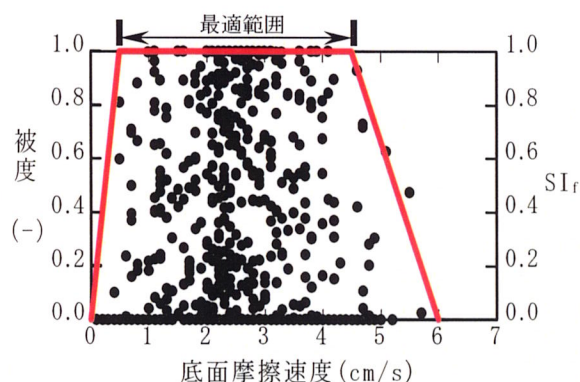


図-6 底面摩擦速度の SI 曲線

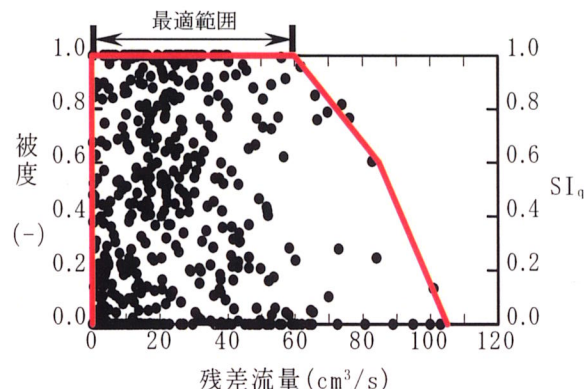


図-7 残差流量の SI 曲線

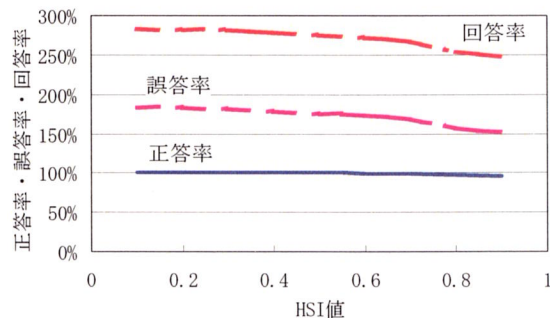


図-8 HSI 値と正答率・誤答率・回答率の関係

5. 確率的 HSI モデルの適用

(1) 確率的 HSI モデル

確率的 HSI モデルとは、従来の HSI モデルに条件付き確率を導入したものである。

条件付き確率とは、ある事象 B が起こるという条件下での別の事象 A の確率であり、式 (2) で表される。

$$P(A|B) = P(A \cap B) / P(B) \quad (2)$$

これは、例えば、ある区画の流速 V が $V_1 < V \leq V_2$ という条件下でのエダミドリイシの生息している確率を表す。生息確率が最も高い階級が、その物理量に対する最適範囲を表していると考えられることができる。さらに、その最適範囲を 1.0 とする各階級間の相対比率を求めることにより、HSI 的な評価が可能となる。ここでは、条件付き確率を用いた確率的 HSI モデル (PHSI モデル) を提案し、従来の HSI と区別するために、SI 曲線や HSI 値を、それぞれ PSI 曲線、PHSI 値と表記する。

(2) PSI 曲線

図-3 に示す対象海域 (670 区画) から、流速、底面摩擦速度、および残差流量の各階級に属する区画数に対して、被度 50% 以上でエダミドリイシが生息する区画数の割合、すなわち、その階級での生息確率を求め、図-9～図-11 に示した。ここで、被度 50% 以上としたのは、自然再生計画の最終的目標をエダミドリイシの被度 50% 以上としているためである。また、1 階級に属する区画数が全体の 5% 未満にならないように階級区分を調整した。これらの図より、各物理量において最も高い生息確率を示す最適範囲

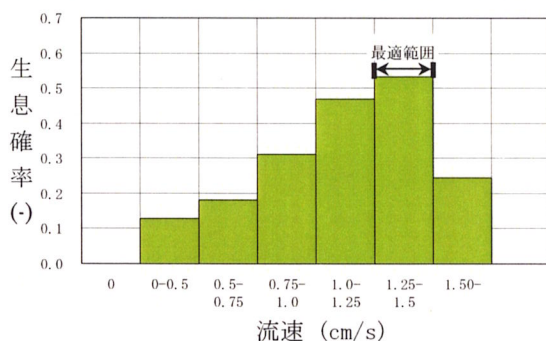


図-9 流速に対する生息確率分布

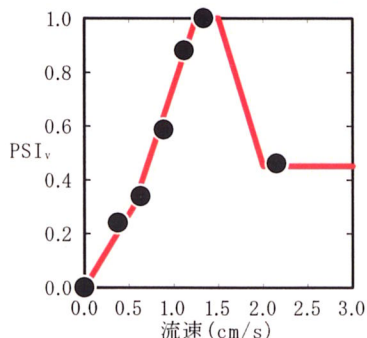


図-12 流速の PSI 曲線

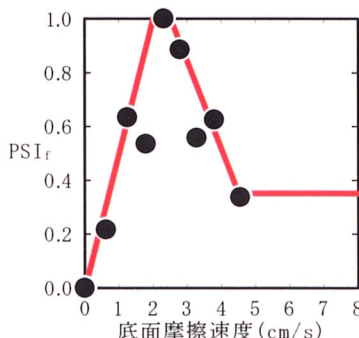


図-13 底面摩擦速度の PSI 曲線

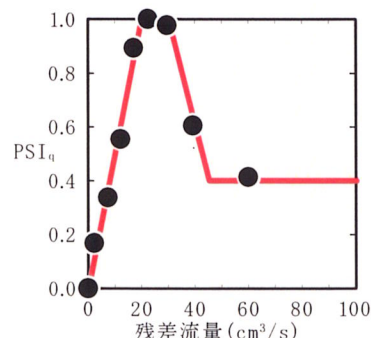


図-14 残差流量の PSI 曲線

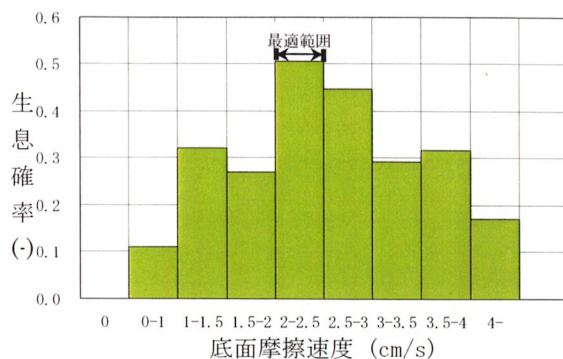


図-10 底面摩擦速度に対する生息確率分布

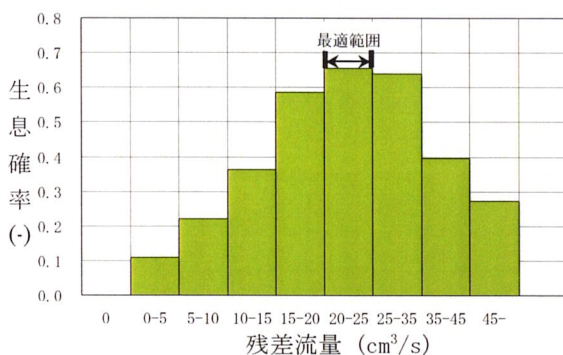


図-11 残差流量に対する生息確率分布

を明瞭に把握できる。また、HSI 的な評価を行うために、各物理量の最適範囲の平均値を 1.0 とする引延ばしを行うことから、相対的な好適度を表す PSI 曲線を作成し、図-12～図-14 に示した。

(3) モデルの検証

図-12～図-14 に示した PSI 曲線から次式を用いて各区画の PHSI 値を求めた。

$$PHSI_i = PSI_{vi} \times PSI_{fi} \times PSI_{qi} \quad (3)$$

ここに、

i : 区画番号

PSI_v : 流速に対する PSI 曲線

PSI_f : 底面摩擦速度に対する PSI 曲線

PSI_q : 残差流量に対する PSI 曲線

PSI 曲線の作成に用いた 1970 年の物理量を用いて各区画の PHSI 値を求め、当時の分布状況に照らし合わせることで、評価精度を検証した。

図-15 は PHSI 値を幾ら以上に設定すれば、どの程度の正答率と誤答率が得られるかを把握するためのもので、図-8 に対応する。PHSI 値 ≥ 0.1 の場合には、回答率が 207%(=485/234)と高いため、正答率は 92%(=215/234)と高くなるが、誤答率も 115%(=270/234)と高くなる。PHSI 値を大きくすると、回答率が小さくなるため、誤答率は下がるが、同時に正答率も低下する。そのため適切な PHSI 値を設定する必要がある。ここでは、図-15 より、回答率が概ね 100%であり、正答率 67%(誤答率 37%)を示す PHSI ≥ 0.35 を採用した。実在と PHSI ≥ 0.35 とした生息可能区画の位置を対比し図-16 に示した。図より、両者は概ね一致していることがわかる。

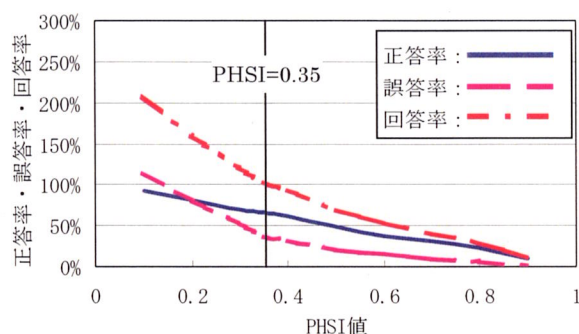


図-15 PHSI 値と正答率・誤答率・回答率の関係図

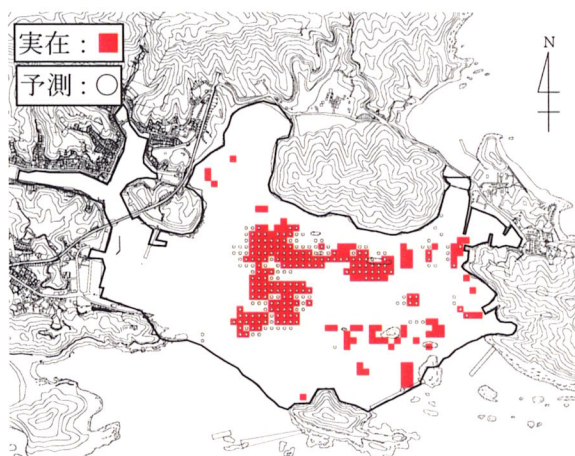


図-16 実在と予測による生息可能区画の対比

(4) 生息環境の定量的評価

図-15 は対象海域全体と海中公園 1 号地に対して、

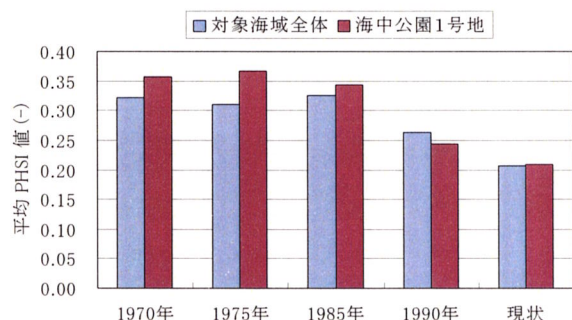


図-17 平均 PHSI 値の推移

各年代の物理量から算定した平均 PHSI 値の推移を示したものである。なお、平均 PHSI 値の算定に必要な各年代の物理量は、防波堤の有無(図-1 参照)のみを考慮した潮流解析と波浪解析から求めた。図より、平均 PHSI 値は、1985 年以降、徐々に低下し、現状では 1970 年当時の約 60%となっており、エダミドリイシの生息環境が劣化していることがわかる。

6. おわりに

本論文では、イシサンゴ類の一種であるエダミドリイシ群集の最適生息条件を評価する手法として、HSI モデルに確率的手法を導入した PHSI モデルを提案した。従来の HSI モデルと比較することから、PHSI モデルの自然再生計画における順応的管理への適用性について検討し、以下の主要な知見を得た。

1) 環境再生など最適な生息環境情報を過去のデータに頼るなど、信頼度の低いデータ群を用いて有意な分析を行う場合に、PHSI モデルはより明瞭な最適範囲が得られる点で、HSI モデルに比べて有効である。2) 潮流流速、底面摩擦速度、および残差流量の 3 つの物理因子を対象とした PHSI モデルを用いて 1975 年当時に対象海域に被度 50%以上の状態で生息していたエダミドリイシ区画数を予測した結果、PHSI ≥ 0.35 で最も高い正答率(67%)が得られた。3) 位置的な再現性を見るために被度 50%以上の生息区画と、PHSI ≥ 0.35 の区画の位置を対比した結果、両者は概ね一致した。4) 平均 PHSI 値は、1985 年以降、徐々に低下し、現状では 1970 年当時の約 60%であった。このことは、エダミドリイシの生息環境が劣化したことを示すものである。

こうした生息環境の定量的評価は、自然再生の計画アセスメント、および順応的管理を行う場合に有用な情報を与える。しかし、現状では、生息環境条件に影響すると考えられる受光環境などの項目を考慮できていない。今後、こうした項目を評価に組み入れるとともに、着生条件に関する知見を取り入れる必要がある。

参考文献

- 1) 中野晋, 安芸浩資, 内田紘臣, 御前洋, 川口始, 小笠義照: 四国東部のサンゴ生息海域における環境改善方針についての検討, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp. 293-298, 2004.
- 2) 海の自然再生ワーキンググループ: 海の自然再生ハンドブック, 第 4 巻サンゴ礁編, 2003.
- 3) 山里 清: サンゴの生物学, 東京大学出版会, 1991.
- 4) 間瀬肇・高山知司・国富将嗣・三島豊秋: 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集, 第 628 号/II-48, pp. 177-187, 1999.
- 5) 榎木 亨: 波と漂砂と構造物, 150p., 技報堂出版, 1991.