機会損失リスクを考慮した自然再生計画の評価手法

Evaluation Method of Restoring Nature Plan Considering an Opportunity Loss Risk

安藝浩資¹・中野 晋²

Hiroshi AKI and Susumu NAKANO

In this study, we discuss about an evaluation method of restoring nature planning involving a reformation of breakwater. To promote a exchange of seawater and to improve a habitat environment for coral community, reforming breakwater is examined. As an increase of permeability of a breakwater decreases an efficiency of absorbing waves, the relationships between the improvement work to promote a exchange of seawater and the disaster prevention work such as a breakwater make trade-off problem. In this paper, we examined multiple plans of reforming breakwater by considering the risk of loss about that problem. The optimum plan to remove a part of breakwater was proposed.

1. はじめに

著者らは、四国東南部の竹ヶ島海中公園においてイシサンゴ類の一種であるエダミドリイシ (*Acropora tumida*, 以下 A_t) を再生指標とした自然再生事業に取り組んでいる。当海中公園は、 A_t の群生地として1972年に指定された。ところが近年 A_t が減少し、代わって比較的濁りに強いカワラサンゴ (*Lithophyllon undulatum*, 以下 Lu) が増加するなど、優占サンゴ種に顕著な変化が生じている (中野ら, 2006)。

これまでの調査から生息環境の改善には海域の海水交換促進が不可欠であること、そのためには防波堤の改良が有効であることを示した。また、防波堤の改良による環境面からの評価手法としてPHSI (Probabilistic Habitat Suitability Index) モデルを提案し、防波堤の改良計画を A_t や Lu の生息環境の視点から評価・選定するツールとして活用できることを報告している (安藝ら, 2007, 2008)。

防波堤改良にあたっての基本的な考え方は、自然環境の側面だけでなく、漁業・観光等の利用面や防災面もふまえ、総合的な見地からの改善を図ることである。したがって、当海域の海水交換促進が、現在の海面利用に与える影響を極小にする必要がある。しかし、防波堤が背後の静穏化を目的とする構造物であるため、環境改善度と静穏度が相反関係になり、環境面に最適な計画が、必ずしも地域にとって最適な再生計画にはならない。この関係に合意点を見いだすことは、地域に根ざした自然再生に向けての最重要課題であり、環境改善に伴う利用面への影響の定量的評価は不可欠である。

波浪の侵入を防ぐと同時に海水交換の促進を図ることを目的とした防波堤形式の研究事例は1980年代、1990年

代を中心に多く見られ、浮防波堤や二重半円筒ケーソン防波堤など多くの形式が提案されている。しかし、海水交換の促進などの環境改善度と静穏度の相反関係に関する問題を取り扱ったものは見受けられない。

本研究では、海水交換促進を目的とした防波堤改良による海域の自然再生計画について、 A_t の生息環境を指標とした環境改善度と、静穏度の低下による海面利用度の低下という相反関係を、再生計画による機会損失リスクを考慮することから評価する。

2. 防波堤周辺海域の特性

対象とする防波堤は、3.2t型の消波ブロックを水平2層積みにした延長112mのものである。図-1に示すように激浪方向に対し、竹ヶ島の背後に位置していることから、主に竹ヶ島を迂回した回折波が対象となる。

周辺の波浪状況を把握するため、水圧検知式波高計 (ALEC社: COMPACT-WH) を用いて、波浪観測 (偶数正時毎, サンプルング0.5s, 10分観測) を行った。波浪観測地点は図-2に示す防波堤の背面 (Tk) および防波堤の前面 (WA) と竹ヶ島の南側海域 (W4) の3点である。入射方向に対してW4の前面には波浪を遮るものは存在しない。観測期間は、2006年7月1日～2006年8月12日

図-1 激浪方向と対象防波堤の位置関係

1 正会員 博(工) ニタコンサルタント株式会社 環境部次長
2 正会員 博(工) 徳島大学教授 環境防災研究センター

図-2 対象防波堤と波浪観測地点

である。

図-3はWAに対するTkの有義波高比(24時間移動平均), およびW4に対するWAのそれを示したものである。

図中の4桁の数字は2006年度の台風番号を意味する。図よりWAではW4の25%~60%程度の波高であること, また, 堤背面のTkではWAの10%~30%程度であることがわかる。これは, 上記した回折効果に加えて, 堤前面部ではDL±0.0m以浅の地形が大半を占めており, 天然のリーフ状地形を呈していることや, 沖合に突堤状地形を呈するDL-1.0m以浅の磯が存在しており, これらの位置・地形特性により, 竹ヶ島により回折された波浪が, 堤前面の突堤状地形およびリーフ状地形により碎波され, 堤直近部では大きく減衰するためである。

3. 改良計画と生息環境面からの評価

図-4は, 表-1に示す6ケースの改良計画を例に挙げ, これらを行った場合に生じる環境改善効果を, At の生息可能区画数を指標として式(1)で表したものである。図中には改良対象の防波堤を完全に撤去した場合に相当する1990年のものと, 現在の状態である2003年時のものも参考として併記した。

$$\text{環境改善度}(\%) = \frac{At(\text{計画}) - At(2003)}{At(1990) - At(2003)} \times 100 \quad \cdots(1)$$

ここに, 式中の At は At の生息可能区画数であり, PHSI値0.365以上の区画である。括弧内の数字は, 基準年である1990年時と2003年時を意味する。評価対象は3335区画である。

図-3 有義波高比(2006年7月1日~2006年8月12日)

表-1 改良計画の検討ケース

計 画	概 要
TM60	先端部60 mを撤去
CM60	中央部60 mを撤去
BM60	根元部60 mを撤去
TM80	先端部80 mを撤去
CM80	中央部80 mを撤去
BM80	根元部80 mを撤去

図-4 各改良計画による環境改善度

改良による環境改善度の違いを見るため, 先端部, 中央部, および根元部の60m撤去案(TM60, CM60, BM60), 80m撤去案(TM80, CM80, BM80)を比較すると, いずれも根元部の改良案の効果が高いことがわかる。また, 改良規模としては60mに比べて80mでは格段に改良効果が増加していることがわかる。

4. 改良計画の利用面からの評価

(1) リスクシナリオの設定

自然再生では, 自然環境の再生に主眼をおいた事業や活動を, その周辺地域に潜在する各種リスクへの影響を考慮しつつ推進する必要がある。しかし, すべてのリスクを同時に対象とすることは困難である。そのため, 対処しなければならないリスクと, そのリスク増減を明確にする必要がある。防波堤の改良時には, 周辺海域での静穏度の変化が予想される漁船の航行日数の低下などが予想される。ここでは, 自然災害リスクのうち, 漁業や観光等の利用面から航行可能日数の低下を機会損失リスクとして特定し, 次の3つのリスクシナリオを設定した。

図-5 評価対象領域

それぞれに対して、防波堤改良による環境改善効果と図-5に示す評価海域での機会損失リスクを評価することにより、適切な改良形式について検討した。

〔リスクシナリオ1〕：防波堤の背面海域は、漁船の航路として利用されている。そのため、防波堤を改良することにより、漁船船舶の航行に支障が生じる (Area1)。

〔リスクシナリオ2〕：防波堤の根元部分の背面付近は、カヤック発着場、陸揚げ場として利用されている。カヤックの運行基準についての関係者からの聞き取りでは、現時点で、運行するか否かは、風や潮時（上げ潮か下げ潮か）などを勘案し、指導員が判断している。しかし、防波堤の改良により堤背面の静穏度が低下することで、波浪により陸揚げ準備ができなくなる等、波浪が支配要因になり海面利用に支障が出る可能性がある (Area2)。

〔リスクシナリオ3〕：竹ヶ島漁港口の静穏度低下に伴い、漁港内での陸揚げ準備作業に支障が出るなど利便性が低下する (Area3)。

(2) 機会損失リスクの評価概念

概念図を図-6に示す。機会損失リスクを、波高限界値の年間超過日数の変化割合で評価した。このとき波高限界値には、漁港の水域施設の計画時に用いられる施設の使用可能な波高限界を示す標準値を用いた。対象海域の水深は概ね3.0m未満であることから、シナリオ1に対して航路としての使用限界とされる0.9mを、シナリオ2, 3に対しては、0.3mを適用した。

図-6 機会損失リスクの概念図

(3) 累積波高出現頻度の算定

機会損失リスクを評価するにあたっては、通年での静穏度の変化が重要である。そのため、佐喜浜観測所（高知県室戸市佐喜浜町）で観測された波高出現確率分布（1977-2000）を用いて、改良形式毎の防波堤周辺及び背後での平均波高の出現頻度を算定した。検討対象波向はSSE-15°である。波高階級0m～7mの波高出現頻度を図-7に示す。

図-7 波高出現頻度 (佐喜浜観測所 1977-2000)

(4) 防波堤改良による機会損失日数の変化

表-1に示した改良ケースに対して、エネルギー平衡方程式による平面波浪変形解析により、対象海域の静穏度変化の求めた。解析は表-2に示す8段階である。防波堤改良の影響が生じるArea1とArea2について累積波高出現頻度を算定し、最小二乗近似を行うことから波高限界値を超える波高が出現する日数（年間出現波高超過日数）

表-2 解析ケース

	入射波高 (m)	周期 (s)	出現確率 (%)	累積出現確率 (%)
1	0.25	9.3	18.2	18.2
2	0.75	8.5	49.2	67.4
3	1.25	9.2	19.2	86.6
4	1.75	10.1	7.7	94.3
5	2.25	10.6	3.3	97.5
6	2.75	11.0	1.3	98.8
7	3.25	11.6	0.6	99.4
8	4.25	12.1	0.2	99.6

図-8 累積波高出現頻度曲線 (Area1)

図-9 累積波高出現頻度曲線 (Area2)

を求めた。累積波高出現頻度曲線を図-8と図-9に示した。

a) 機会損失日数 [Area1]

図-10はシナリオ1に対応する波高限界値0.9mの場合の超過日数を比較したものである。1990年には波高0.9mを超過する日数は年間25日であったのが、防波堤ができることにより2003年には3日に激減しており、当防波堤の波浪抑制効果が見える。改良形式毎の影響を見ると先端部を撤去するTM60, TM80では1990年とほぼ同じとなる。一方、BM60では現状からほとんど変化はなく、改良の影響は極めて少ない。

図-10 各ケースの年間出現波高超過日数 (Area1)

b) 機会損失日数 [Area2]

図-11はシナリオ2に対応する波高限界値0.3mの場合の超過日数を比較したものである。1990年には波高0.3mを超過する日数は年間98日であったが、防波堤ができることにより2003年には2日に激減しており、当Areaの静穏度向上にも防波堤の効果が伺える。また、図より中央部を撤去した場合 (CM60, CM80) の影響が最も大きく、比較的影響が軽微と考えられた先端部撤去 (TM60, TM80) の場合でも、大幅に超過日数が増加していることがわかる。根元部を撤去した場合が最も影響が小さいが、その場合でも超過日数は、BM60の場合で現状の2日から63日に、BM80の場合で2日から82日と大幅に増加する。なお、Area1で0.9m以下であるにもかかわらず、Area2で0.9m以上となり航路として使用できない場合が生じる可能性についても別途検討しているが、0.9mを

超過する日数をArea1とArea2で比較するといずれの計画においても、Area1の超過日数が多いため、Area2の波高は航路としての使用条件を支配しないことを確認している。

c) 機会損失日数 [Area3]

Area3については、表-2に基づき算定した波高が全て0.05m以下であった。そのため当Areaまで影響が及ばないと判断した。

図-11 各ケースの年間出現波高超過日数 (Area2)

(4) 防波堤改良による機会損失日数の変化

各改良形式による海面利用度と環境改善度の変化を図-12に示した。図-12はシナリオ1に、図-13はシナリオ2に対応する。海面利用度は、防波堤設置前の1990年と現在 (2003年) の日数変化分に対する計画実施時の相対的な変化度であり、2003年が100%となる。同様に環境改善度はPHSIモデルで評価された A_t 生息可能区画数の、現在と計画時の割合であり、図-4に対応する。図中の破線は、環境改善度に伴い、海面利用度が低下する比率を示している。なお、海面利用度は次式 (2) より算定した。

$$\text{海面利用度}(\%) = \frac{\text{超過日数}(1990) - \text{超過日数}(\text{計画})}{\text{超過日数}(1990) - \text{超過日数}(2003)} \times 100 \quad \cdots (2)$$

図-12より、最大の環境改善度が期待できる計画はBM80である。また、改善度の増加というベネフィットに対して、利用度低下というデメリットが増加する割合が少ないのはBM60とBM80である。それら以外は全てメリットに比べてデメリットの増加割合が大きいことがわかる。

図-13に示すシナリオ2に対しては、BM60に比べ、BM80ではメリットに対するデメリットの増加割合が少ない。したがって、環境改善度と海面利用度の両面を考慮するとBM80が優位となる。しかし、BM80では海面利用度が83%程度低下し、BM60より20ポイントほど低下割合が多い。

本自然再生計画では極力現状の海面利用度を低下させないことを目標としている。そのため、利用度低下の少ないBM60を当面の第1案とし、順応的な考えの下、モ

図-12 海面利用度と環境改善度

図-13 海面利用度と環境改善度

モニタリングを行いつつ、より高い環境改善効果が得られるBM80の実施可能性について地元関係者との合意形成を図ることを最適案とした。

5. おわりに

本論文では、海水交換促進を目的とした防波堤の改良において、改良コストが概ね同等な6ケースを例に挙げ機会損失リスクを考慮することから、相反関係となる環境改善度の向上と海面利用度の低下の両面から評価した事例を報告した。

以下に本研究で得られた主要な知見を記す。

- ① 6つの改良計画それぞれについて、PHSIモデルにより環境改善度を評価した。その結果、当初考えられていた先端部や中央部の撤去と比較して、根元部の改善効果が高いことがわかった。
- ② 現地波浪観測から、防波堤前面のWAでは外海域のW4の25%～60%の波高であること、また、堤背面のTkではWAの10%～30%程度であることがわかった。
- ③ 航行可能日数の低下を機会損失リスクとして特定し、3つのリスクシナリオに対する海面利用度の変化から6案の再生計画を評価した。さらに、環境改善度を勘案することから、BM60とBM80の優位性を示すとともに、本自然再生計画の目標を踏まえ、より利用度低下の少ないBM60を第1案とした。ただし、最終的にはここでの評価結果を踏まえて、地元関係者と十分な協議を行って決定するとともに、実施後もモニタリングを行いつつ、順応的に対応する必要がある。

自然再生では住民合意の形成や、参画住民との目標意識の共有を図ることが大切である。そのためには、環境面だけでなく防災面や利用面も含めた総合的な視点に立つことが重要である。自然再生計画を評価する上では、計画によって現状から変化する様々なリスクについて対処する必要がある。しかし、全てのリスクを現状に保つことが難しく、対処策として保有、移転、軽減、回避のいずれを取るかなど、今後、再生計画へのリスクマネジメントの手法の導入は不可欠である。

謝辞：本論文は、竹ヶ島海中公園自然再生事業の一環として行った検討結果をとりまとめたものである。それらに関わった、協議会・専門委員会や事務局の方々に謝意を表する。

参考文献

- 安藝浩資・中野 晋・盛 治夫 (2008) : PHSIモデルによるサンゴの生息環境評価と自然再生計画の策定, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 1116-1120.
- 安藝浩資・中野 晋・内田絃臣・岩瀬文人・御前 洋 (2007) : 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.
- 運輸省港湾局 (1994) : 新形式防波堤技術マニュアル, 240p.
- (社) 全国漁港漁場協会 (2003) : 漁港・漁場の施設の設計の手引き, p. 529.
- 中野 晋・安藝浩資・内田絃臣・岩瀬文人・川口 始・吉崎仁美 (2006) : サンゴを対象とした自然再生事業における普及啓発活動とその効果, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 63-68.