特集2・閉鎖性海域の環境管理のあり方—大阪湾を例として—

環境修復の目標と対策技術

大塚耕司*・中西 敬**・重松孝昌***・上嶋英機****・中辻啓二*****

1. 沿岸域の環境悪化のしくみ

1956年の海岸法制定以来、津波や高潮などで多くの人命や財産を失った我が国では、防波堤、防潮堤の築造など「防護」に重点を置いた海岸整備がなされてきた。2000年4月に施行された改正海岸法では、従来の「防護」一辺倒の海岸管理から、「環境」「利用」を視野に入れた海岸管理の必要性が示されている。しかし、これらの観点をバランスよく考慮した海岸管理とはどのようなものなのか、その答えを導き出すことは容易ではない。いずれを検討するにしても、歴史的背景や背後の土地利用形態など地域特性を十分に考慮しなければいけないところに一般論として論じることの難しさがあると思われる。また、沿岸域の開発・利用は江戸時代から始まっていること、多くの人々が生活している空間を災害から防護するために防災施設が築造されてきたことを考えれば、「利用」形態や「防護」の変遷とともに「環境」の変化を把握し、今後の沿岸環境の修復施策を考える必要があろう。

「環境」そのものがいろいろな要因によって形成されているため、環境修復を考えるときには、絡み合ったこれらの要因を一つずつ解きほぐした後に、対策を立てる必要がある。図-1は、背後に大都市を抱える閉鎖性の強い海域を想定し、当該海域の環境がどのように悪化したのか、その連関（フロー）を示したものである。日本では人口が沿岸域に集中し、また船舶による物資の輸送が盛んであったこともあって産業も集中した。このような陸域の人間活動の活発化に伴って、沿岸域には栄養塩や有機物の流入負荷量が増大した。これらは沿岸域の富（過）栄養化を招き、さらには、赤潮の発生や、有機懸濁

物の増加、透明度の低下など、沿岸域の水質環境を悪化させることになった。

経済性とその効率を最優先した戦後の日本産業は、物資の輸送効率を向上させるために港湾機能の向上を優先させた沿岸域の開発を行ってきた。埋め立て地の造成や防波堤の築造によって閉鎖性の強い海域が創出され、このことが沿岸域の物質輸送機構に影響を及ぼすこととなり、前述の水質環境の悪化に拍車をかけることになった。また、このような物質輸送機構の変化や水質環境が相俟って、有機堆積物量の増加や溶存酸素量の減少を引き起こし、底質環境の悪化を招くことになった。

人間の生活活動によって排出されるゴミを処分するためにも沿岸域は利用されてきた。このような埋立は、一般に沿岸浅海域で行われることが多く、その結果として沿岸域の浅場、干潟、砂浜、藻場などの浅海域が消失することになった。浅海域が沿岸域の環境に果たす役割を定量的に評価する試みは、近年、ようやく途に着いたばかりである。沿岸浅海域の重要性に対する配慮が欠けていたために、我々は広大な浅場を失ってしまった。

この間にも、人命や財産を、幾度となく繰り返される災害から防護するための防災構造物の築造は続けられ、このことが単純で画一的な水際線を創出し、生物生息空間の多様性を奪うことになった。

一方で、下水道の整備や治水・利水目的で建設されたダム、沿岸域に築造された前述の構造物などの影響を受けて、水系としての水・砂循環機構は大きく変化した。このことが、沿岸浅海域の消失に拍車を掛けることとなった。これらが複合的に絡み合っ

て今日の沿岸域環境を形成しているのである。

以上のように、人間の諸活動が沿岸域の環境に及

*大阪府立大学 Koji OTSUKA, **総合科学(株) Takashi NAKANISHI, ***大阪市立大学 Takamasa SHIGEMATSU

****独立行政法人産業技術総合研究所 Hideki UESHIMA, *****大阪大学 Keiji NAKATSUJI

図-1 沿岸域における環境悪化の連関模式図

ばす影響は複雑多岐にわたっている。それぞれの環境悪化の連関を回復の連関に変える環境修復技術を適切に適用し、総合的な見地からよりよい沿岸環境へと環境を修復することが望まれる。

2. 環境修復技術とその適用事例

環境修復技術を適用するためには、どのような環境改善目的を掲げるかを決定した後、その目的を達成するためにはどのような技術を適用すればよいのかを選択しなければならない。図-1の環境悪化の連関模式図を参考に、環境改善目的とそれを達成するために有効であろうと思われる技術を表1にまとめた。表1に示したものが環境修復技術であるとは限らないし、表中に示したものであっても、環境修復にどの程度寄与するか定量的に示すことができるものは数少ないように思われる。環境修復技術に関する知見を早急に整理する必要がある。一方で、どのような要因によってどのような影響が沿岸域に

生じたのか、その因果関係を明らかにする環境データの不足は深刻な問題である。これから環境を修復しようとする海域において、図-1のような環境影響の連関図が描けないからである。このような構図が描けなければ、適切な環境修復技術を選択することは難しい。

さて、現在に至るまでに、どのような環境修復の試みがなされてきたのであろうか。適用事例を表2にまとめた。表2の作成にあたっては、既往文献や調査検討報告書を基に165件の事業を対象としたが、人工干潟、砂浜、藻場の造成、透過性構造物に関わる事例件数が多く、続いて浚渫、覆砂の事例件数が多かった。事例として紹介された文献から読み取ることができる問題点として次の事項が挙げられる。

- ① 事業費用に関する報告が少ない。
- ② 位置・規模などの決定過程を示した報告が少ない。
- ③ モニタリング調査の有無、および調査結果の報

告が少ない。

- ④ 効果、問題点、課題などの事業評価の報告が少ない。
 ⑤ 情報の発信元、発信者が明確でない。

我々は、失敗例からも多くのことを学ぶことがで

きる。積極的な情報の開示が望まれる。

3. 環境修復技術の最適選定手法

3.1 最適選定の必要性および手順

沿岸海域環境の保全や修復に関しては、前述のように様々な技術が開発・提案されており、それぞれの技術の特徴や期待される効果についてもある程度整理されている。しかし、波浪や潮流の制御など物理的な環境修復技術の評価を除けば、その効果の評価の多くは経験的、定性的なものでしかなく、特に生態系工学的観点からの定量的な評価はほとんど行われていないのが現状である。それ故、どのような海域にどのような環境修復技術を適用すれば所期の「生態系を考慮した沿岸環境の保全・修復」が達成されるかが十分に理解されていないように思われる。実際、現状の「環境保全・修復事業」の事例をみれば、環境修復技術を対象海域に適用する場合に、論理的手順を踏んで選定しているとは到底思えないようなケースが多く見られる。

本来、環境修復事業は、修復したい海域と環境改善目標（生態学的環境も含む）が提示されて初めて計画し実行することができる（この環境改善目標の設定方法にも多くの課題が残されているが、ここでは一応適当な目標が設定されたとする）。これに対して、最小の投資で改善目標を達成できる環境修復技術を選定しなければならないが、その際には、対象海域の環境特性や後背地の地理的・社会的特性、さらに対象海域の周辺海域にどのような影響を

表1 環境改善目的と環境修復技術

環境改善目的	環境修復技術
流入負荷（栄養塩）削減，栄養塩量（濃度）の削減，植物プランクトンの増殖制御	下水の高度処理，下水処理水の沖合放流，抽水植物・海藻による栄養塩固定
有機懸濁物量の削減，透明度の改善	礫間接触浄化，人工潟湖，緩傾斜石積護岸，凝集剤
海中光量の増加	光ファイバー
閉鎖性の改善	埋立地形・防波堤形状の改変，突堤による流況制御，導流堤，作渚など
有機堆積物量の削減	浚渫，現場固化，耕耘，ベントスなどの利用，底質改良材（剤）投入など
溶存酸素の供給	エアレーション，湧昇流発生構造物，鉛直混合促進構造物など
浅場などの造成	人工潟湖，湿地，砂浜，磯浜，人工リーフ，潜堤，海中林，藻場，人工干潟，人工漁礁など
水際線，波当りの改変	防波堤・護岸の改造，離岸堤，潜堤など
健全な砂循環確保	ダム湖からの土砂排砂，河川浚渫など
健全な水循環確保	河川の多自然化，植樹，保水機能の向上など

表2 主な環境修復技術とその適用事例

技術の分類	代表的な事例
人工干潟	葛西海浜公園（東京都），三河湾干潟・浅場造成事業（愛知県），五日市干潟（広島県）
ヨシ原造成	宇部港（山口県）
アマモ場造成	日生町（岡山県），三豊町（香川県），樋合漁港（熊本県）
藻場造成	東京湾アクアライン（東京都他），関西国際空港（大阪府），伊方原子力発電所（愛媛県）
人工潟湖	りんくう公園（大阪府）
人工リーフ	奥尻港エコ・コースト（北海道），様似漁港（北海道），新潟西海岸（新潟県）
傾斜護岸	様似漁港（北海道），関西国際空港（大阪府），りんくう公園（大阪府）
人工砂浜	稲毛海岸（千葉県），金沢地区（神奈川県），須磨海岸（兵庫県）
礫間接触浄化	高松港（香川県），ハウステンボス（長崎県）
透過性構造物	七尾港（石川県），紀伊長島港（三重県），水島港（岡山県），三田尻港（山口県）
鉛直混合促進	苫小牧港沖（北海道），宇和海湧昇流発生構造物（愛媛県），五島東地区（長崎県）
作渚	松島湾（宮城県），浜名湖海水交換（静岡県），豊川河口（愛知県）
導流堤	葛西海浜公園（東京都），蒲生干潟（宮城県）
エアレーション	久見浜湾（福井県），堺出島漁港（大阪府）
浚渫	松島港（宮城県），高松港（香川県），洞海湾（福岡県），水俣港（熊本県）
覆砂	三河湾（愛知県），津田港（香川県），厳島港（広島県），遊子魚泊（愛媛県）
底質改良材（剤）	飯屋湾（佐賀県）

図-2 環境修復技術の最適選定手法

及ぼすのか、またその影響が経年的にどのようにに変化するのかということを十分考慮する必要がある。

そこで、図-2に示すような、最適な環境修復技術を選定する手順を考えた。

まず、沿岸域の環境保全・修復を目的とした技術についてレビュー、機能分析するとともに、保全・修復の対象となる海域の環境特性および後背地である陸域の地理的・社会的特性について調査し、ゾーニングを行う。環境データの統合、管理、分類、視覚情報提供に際しては、GIS (Geographical Information System) が有用なツールとして利用できる。

次に、海域・陸域のゾーニングに基づいて、(それぞれの) 環境修復技術を投入するのに適な対象ゾーンと修復目標を設定し、これに技術の機能分析の結果を加味することによって適用可能な技術をいくつか抽出する (スクリーニング)。対象ゾーンについては複数考えられるので、1つの対象ゾーンについてケーススタディーまで終了した後、次の対象ゾーンと修復目標を設定するという手順を繰り返すことになる。

さらに、スクリーニングによって選択された候補

表3 環境修復技術の分類

方法	目的	環境技術
生物利用	生物生産 生物多様性	人工干潟・浅場 ヨシ原造成
		アマモ場造成
		藻場造成
		人工潟湖
		人工リーフ
		傾斜護岸
	水質改善	人工砂浜
	底質改善	礫間接触酸化堤
		ベントス利用 微生物利用
生物非利用	水質改善	透過堤
		曝気型護岸
		鉛直混合促進
	底質改善	作滞 導流堤
		エアレーション
		浚渫 覆砂 底質改良材 (剤) 投入

技術について、その機能、効果、広域的影響、経年的影響などを生態系工学的に評価・予測する手法を検討し、サイトや予算などの条件も含めて適用可能技術を絞り込んだ上で、ケーススタディーとして基盤実験、実地調査・実験、モデル開発などを行う。

いくつかの対象ゾーンについてスクリーニングからケーススタディーに至る過程を繰り返した後、それらを総括することによって、対象海域全体について環境修復技術の最適選定が完了することになる。

3.2 スクリーニングの一例

環境修復技術を抽出するためには、まず、どのような技術がどのような環境に適用できるかという判断が必要である。

表3は、環境修復目的に応じてどのような技術が選択肢として挙げられるかを、クラスター解析を行って整理したものである。表3を用いれば、積極的に生物を利用して環境修復目標を達成しようとする技術と、生物を直接利用することなく目的を達成しようとする技術とに大別され、さらに、修復目的に応じて環境修復技術の選別が行える。

表4は、表3中の生物を利用した環境修復技術のうちから幾つかを取り上げ、実績に基づいてそれらの環境修復技術の適用可能環境条件を要約したものである。この表中の数値も経験的なものを多く含んでおり、ここに挙げた環境修復技術の適用条件が十

表4 環境修復技術の適用可能環境条件シート

技術名		干潟	ヨシ原	アマモ場	藻場	人工潟湖
適用可能条件	水深 [m]	0～5	0～5	0～5	0～15	0～5
	平均流速 [m/s]	0～0.5	0～0.5	0～0.5	●	—
	平均波高 [m]	0～0.5	0～0.5	0～0.5	●	—
	最低水温 [℃]	●	—	●	●	～20
	塩分	●	0～25	17～	25～	●
	溶存酸素 [mg/ℓ]	5～	—	5～	5～	●
	全窒素 [mg/ℓ]	●	—	●	—	—
	全リン [mg/ℓ]	●	—	●	—	—
	透明度 [m]	●	—	3～	3～	0～3
	潮位差 [m]	0.5～2.0	0～0.5	—	—	0.5～
	底質性状	砂	砂・泥・シルト	砂	岩・礫	●
	底質全硫化物 [mg/g]	—	—	●	—	●
	その他	勾配 1/100～1/300		光量 2E/m ² /da	光量 2E/m ² /da	内湾

●：抽出不可能 —：考慮する必要なし

(注) アンケート結果から抽出された条件であり，目安として捉える方がよい。

図-3 環境修復技術の抽出フローの一例

分な精度を有しているとは言い難い。しかし、このような適用環境条件の目安となる数値を提示することができる技術は、現状では数少ない。より広範な環境技術群に対して、より精度の高い表2のような適用可能条件シートが作成できれば、例えば、図-3のような環境因子によって系統的に環境修復技術を選択することができる手順を示すことも可能になるだろう。

また、環境修復技術を選定するときには、適用海域の空間特性を把握した上で技術を選定しなければならない。たとえば、流量の豊かな河川の河口部にある程度の塩分が必要なアマモ場を造成しようとしても無理がある。すなわち、環境修復技術を適用しようとする海域の環境に応じた環境修復技術を選定しなければならない。当該海域の環境が環境修復技

図-4 GISとアンケート調査結果に基づく人工干潟の適用可能海域

術の適用可能な環境であるかどうかを判断する有用な手段として、沿岸域環境情報を総合的に管理することができるGISシステムの活用が挙げられる。図-4は、GISシステムを用いて、海域の環境特性と表2に示した人工干潟の適用可能条件から大阪湾における人工干潟の適用可能海域を抽出した結果を示したものである。このように、環境修復技術の適用条件や海域環境が正確に把握できていれば、環境修復を行おうとする海域に適用しようとしている技術の選択に誤りがないかチェックすることもできよう。

3.3 ケーススタディーの一例

スクリーニングによって選択された候補技術について、その機能、効果、広域的影響、経年的影響などを生態系工学的に評価・予測するためには、いわゆる生態系モデルと呼ばれる数値モデルによって、想定された海域に適用されるであろう技術についてケーススタディーを行うことが必要となる。ここでは、ケーススタディーの一例としてOtsukaら¹⁾が行った、大阪府泉佐野市にあるりんくう公園内海を対象とした数値計算例を示す。Otsukaら¹⁾は詳細な現地調査を基に生態系モデルを構築し、モニタリング・データと比較することによってモデルの妥当性を示すとともに、内海における栄養塩固定量の将来予測を行っている(図-5参照)。彼らの試算によれば、内海の栄養塩固定量(りんくう内海へ流入した栄養塩量と外海に流出した栄養塩量の差)は年々減少し、何らかの対策を施さなければ、水質の浄化を目的として造成された環境修復技術が、将来的には浄化能力を失って役割を果たさなくなるだけでなく、新たな環境負荷源にすらなり得ると指摘している。このことは、環境修復技術の適用後もモニタリングを継続的に行うことの必要性和重要性を指摘するもので、常に海域環境に注意を払う姿勢が要求されていると言える。また、モニタリングによる実測データの集積が、モデルの精度を向上させることに繋がることを、是非、強調しておきたい。

3.4 最適選定に関わる問題点

ここで紹介した環境修復技術の最適選定手法は、環境修復事業を行うにあたって考えなければならない一つの理想的な方法論を示しているものといえる。しかし、実際に本手法により環境修復技術の最適選定を行うためには、いくつかの問題点を解決しなければならない。ここで、それらの問題点をもう一度整理してみよう。

図-5 りんくう公園内海における1年あたりの栄養塩固定量の経年変化 (Otsukaら¹⁾より抜粋)

第1の問題点は環境データの不足である。特に海域においては陸上に比べてはるかに観測・計測が困難であるということから、絶対的なデータ数が不足しているのが実状であり、このこと自体が問題であるが、観測・計測の方法そのものにも、データの同時性の問題(各地点で計測される時刻がまちまちである)や、計測点および計測密度の設定の問題(環境勾配を把握できるような計測密度となっていない)など多くの問題が存在する。海域のゾーニングを正確なものにするためには環境データの充実是不可欠であり、広域的な環境修復計画を立てる上で最も基礎的な作業となる。

第2の問題点は環境修復技術に関する知見不足である。環境修復技術に関する実績や学術研究は特定の技術に集中する傾向があり、多くの技術に関してはまだまだ現場の経験から得られる知見や学術的な裏づけが不足している。このことは、初期計画段階において、修復対象海域に適用可能な技術をスクリーニングするための情報が不足しているということの意味している。また、環境修復技術が生態系を含めた海域環境に及ぼす効果あるいは影響を予測するモデル(生態系モデル)に関しても研究例は非常に少ない。ごく一部の技術で機能評価・効果評価等が行われつつあるものの、ほとんどの技術については、手付かず、あるいは研究に着手したところというのが実情である。環境修復技術の機能や効果評価、広域的/長期的予測を行う際に、数値モデルによるシミュレーションは非常に有用であることは徐々に認知されつつあるものの、実用的なツールとして利用するためには飛躍的な研究の発展が必要であろう。

第3の問題点は修復目標の設定に関する論理の確立と合意の形成が得られていないことである。この点に関しては、本稿でも十分に議論はできていない。

その理由の一つは、生態系モデル等を用いた修復効果の広域的／長期的予測手法が十分に確立されていないことにある。図-1に示すように、修復目標を設定するためには、各技術がどのような修復効果を持っているかということを定量的に把握する必要があるが、それを評価するツールがまだ整備されていないということである。もう一つの理由は、修復目標の設定には経済面も含む国家戦略、政策が重要な役割を担っており、その点の議論はここでは避けてきたことによる。環境修復に対して国家や自治体がどれだけの費用と労力をつぎ込んでもよいとするか、住民がそれに対してどれだけの理解を示すかという、意思決定の段階での論理の構築を環境先進国に倣って進めていく必要があると思われる。

ここで示したような環境修復技術の最適選定手法

が実用化され、経済的にもエネルギー的にも効率の良い環境修復事業が展開されるようになるためには、

- ① 海域バーニングのための環境データベースの充実
- ② 環境修復技術の適用環境条件データベースの充実
- ③ 環境修復技術のモデリング研究の進展
- ④ 修復目標の設定に関する論理的方法論の検討等の課題に対して早急に取り組む必要があると考える。

参考文献

- 1) Otsuka, K. and Nakatani, N. : Estimation of Carbon and Nutrient Fixation Effects of an Artificial Lagoon in Osaka Bay, Proc. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, OMAE-2001, (印刷中)

●私の環境教育●

加藤みゆき

滋賀県立朽木いきものふれあいの里

自然観察指導員

〒520-1415 滋賀県高島郡朽木村柏341-3

TEL 0740-38-3110/FAX 0740-38-3212

E-mail : k-fureai@mx.biwa.ne.jp

子供に必要なこと

「環境教育」などという言葉は、昔はなかった。自然と親しむ機会が少なくなった現代を反映するかのようになされた言葉だろう。昔は、自然と親しむというより自然が生活と密着していたから、「山や水を大切にすること」は当たり前だったのだ。

当センターでは動植物を学ぶ観察会以外に、稲作体験教室も行っている。この教室を通して自然の恵みをありがたく思ってもらえれば、と願っている。1年間の農作業から子供が自然な形で自然と親し

み、同時に食のありがたさ、共同作業の大切さも学んでほしい、とはじめた教室も今年で3年目を迎える。毎年参加の家族に加え、他の参加者も増え、農作業の苦勞なども理解してもらえつつある。

また、ふれあいの里の森に住んでいる「ぐりちゃん」という架空のキャラクターを作り、「ぐりちゃんに会おう」というテーマの冊子を作成した。これは、小さな子供が森へ出かけるきっかけをつかめるように考えたものである。

私は、子供に人間は自然の力を借りなければ生きていけないということを実際に体験させることが必要であると考えている。ふれあいの里では、そういった体験の機会作りをしていきたい。