特集1

水環境における自然再生プロジェクト

閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化
ー環境修復技術のベストミックスによる物質循環構造の修復ー

上 嶋 英 機*・中 西 敬**

キーワード：都市型閉鎖性海域，環境再生，環境修復技術，ベストミックス

1. はじめに

閉鎖的な瀬戸内海の中でも人口や産業の集積が著しい大都市に面する大阪湾では、過大な流入負荷や埋立による浅場の消失によって水質・底質の悪化が進み、夏季には貧酸素化により海底では生物が生息できない状態が生じている。このような内湾（以下都市型閉鎖性海域という）の環境を修復するための技術として藻場や干潟の造成が行われているが、その機能や効果については未検証なものも多く、また、単一技術が適用される場合がほとんどである。

都市型閉鎖性水域では、複合的な要因によって環境が悪化しており、そこでの環境を修復・再生するためには、単一技術だけでなく、異なる技術の組合せが必要となる。そのためには最適な技術の組合せを実海域に適用し、効果を実証することが重要な課題となっている。

本研究では、典型的な都市型閉鎖性海域である兵庫県尼崎港を実証実験の場とし、以下の目的で環境修復技術の開発、実用化を進めた。

- ①個別技術の機能を明らかにし物質循環構造の修復効果を実証するとともに、環境修復技術の最適な組合せ（ベストミックス）による相乗効果を明らかにする。
- ②他の都市型閉鎖性海域において、ここでの成果が活用されるよう、環境修復のための方法論ならびに各技術の機能を「最適環境修復技術のパッケージ」として取りまとめる。
- ③尼崎港内における環境修復事業を提案する。

なお、本研究は産学官が連携した研究体によって進められ（表1）、研究組織のあり方自体についてもユニークなものであるといえる。

2. 研究の枠組み

本研究においては、環境修復技術のベストミックス検討の手順を図-1のとおりとした。この方法論を実証・確立し、その結果を尼崎港内での環境修復事業に生かすべく研究を進めた。

まず、既存のデータに基づき、港内環境の変遷ならびに現況を評価した。不足する情報について補足調査を実施した。これらの結果から港内における物質循環構造をまとめ、環境悪化の原因を明らかにするとともに、修復目標（表2）、目標達成のための基本方針（表3）を設定した。

表1 研究組織の構成（平成15年度時点）

氏 名	所 属
上嶋英機	(独)産業技術総合研究所
石川潤一郎	(財)国際エメックスセンター
井田 徹	(株)神戸製鋼所
大塚耕司	大阪府立大学大学院工学研究科
川井浩史	神戸大学内海域環境教育センター
上月康則	徳島大学大学院工学研究科
木幡邦男	(独)国立環境研究所
谷本高敏	兵庫県立健康環境科学研究所
辻 博和	(株)大林組
中西 敬	総合科学(株)
中村由行	(独)港湾空港技術研究所
山崎宗広	(独)産業技術総合研究所

Project Aimed at optimal environmental restoration technologies

*広島工業大学環境学部環境デザイン学科 Hideki UESHIMA

**総合科学(株)海域環境部 Takashi NAKANISHI

図-1 研究の進め方

表2 定量的修復目標

項目	目標	現況
水質		
透明度年平均	5 m以上	2.5m
DO 夏季底層	3.0mg/ℓ以上	0 mg/ℓ

表3 目標達成のための基本方針

- ①下水処理水の負荷削減については本研究の対象措置に含まない
- ②修復技術が港内外で新たな環境影響を及ぼさないこと
- ③自然のエネルギーを利用する（化石燃料を消費しない）こと
- ④維持管理が不要であること
- ⑤自然の材料を使用すること
- ⑥港湾機能に支障を及ぼさないこと

3. 実証実験施設と研究内容

物質循環構造を修復し生態系を望ましい状態にするためには、環境悪化の各種要因に対する修復措置をより効果的に組合せ総合的に実施しなければならない。ここでは、①浮体式藻場、②エコシステム護岸、③人工干潟、④石積堤を用いた閉鎖性干潟、⑤流況制御の各技術を組合せて実海域に適用し（図-2）、各技術の機能と組合せによる相乗効果を検証した。また、関連する技術として、

海藻バイオマスの利用に関し、堆肥化およびガス化実験を行った。各実証実験の成果を以下に示す。

3.1 浮体式藻場

藻場は、栄養塩を吸収・固定するとともに、多様な生物の生息空間を創出する。また、貧酸素水塊発生時の避難場所として期待される。尼崎港内では透明度が非常に低いため、常に最適な光環境を確保するための藻場造成手法として、浮体式を採用した。浮体式は、水深が深い場所で海藻の生育が可能な水深帯の基盤を造成するためのコストを軽減できる。浮体に用いた筏は、長さ1 m、幅3 mで、それを3基設置した。筏に10種類の海藻種苗を植えつけたロープを垂下し、生長を観察した。また、単位面積あたりの収量を最大にするための方法としてロープ式での育成を試みた。主な成果は以下のとおりである。

- ①10種の海藻の生育実験を試み、藻場構成最適種がワカメであることを明らかにした。
- ②海藻収量を最大にする方法として浮き流しロープによる増殖方法を採用し、海面100㎡あたり30～100kg（湿重）のワカメを収穫した。これは窒素量で0.6～2 kgに相当する。
- ③収穫したワカメの循環型利用方法として、堆肥化、超臨界水およびメタン醗酵によるガス化を実証した。その結果、海藻中の炭素の7.8%、メタン発酵により34%のメタンを回収した。

3.2 エコシステム護岸

エコシステム護岸は、直立護岸における生態系の回復と海底への堆積物負荷量の削減を目的として、既存の垂直護岸に敷設する形式を取った。形状はL字型で、1つの棚は護岸に沿って3.0m、海側に幅1.5mの大きさを持つ。この棚をDL-0.5 m、DL-1.0m、DL-1.5mに設置し、水深別に生物相・生物量の推移を調査した。また、壁面には普通コンクリート材、ポーラスコンクリート材、ガラス焼成材を設置し、棚の底面には礫とポーラスコンクリートを敷き詰めた。主な成果は以下のとおりである。

- ①既設の垂直護岸に比べ、棚部では10倍以上の堆積物食生物が確認されるなど、多種・多量の生物が生息可能であることが明らかになった
- ②イガイなど壁面の付着動物に由来する有機物を棚部で受け止め、堆積物食生物が利用すること

図-2 室内水理模型と実証実験施設

によって、海底への負荷量を従来の垂直護岸に比べ64%削減することができた。

- ③海底への有機物負荷を削減することによって、貧酸素を招く海底での酸素消費量を11%削減でき、港内の底層 DO の改善に寄与することが明らかになった。

3.3 人工干潟

人工干潟は、基礎地盤、外的要因（波浪、潮汐潮流等）、利用する砂の材質を考慮し、場所・深さ・勾配を設計した。港内の地盤が軟弱であることから、実験干潟は比較的地盤が良好な既設の護岸に沿って勾配を持つ長さ32m、幅12m、勾配は約1/50の干潟とした。また、干潟面積の2/3を潮間を潮間帯に、1/3を潮下帯とした。造成した干潟の物理的環境ならびに生物相の変化をモニタリングするとともに、アサリを加入し、成長・生残について調査した。主な成果は以下のとおりであ

る。

- ①安定した形状の干潟を造成・維持することができた。
- ②3月～7月の間のアサリの成長によって、干潟1㎡あたり窒素18.8g、リン1.86gが吸収・固定されることが確認された。これは自然干潟でのアサリの成長量に匹敵する。
- ③静穏性が高い箇所ではイガイ等の二枚貝がマットを形成し、アサリ等の生育を妨げることが判明した。この対策として底質に人為的な攪乱を与えることの効果を実証した。
- ④貧酸素化によりアサリの生残が激減した後、早期の回復を図るための方法として、成貝・稚貝の避難場として浮体式藻場が有効であることが明らかになった。

3.4 石積堤を用いた閉鎖性干潟

海中の懸濁物を除去し水質を浄化する技術とし

て石積堤を用いた浅場造成がある。石積堤は堤体の空隙に付着した微生物によって、水質を浄化する機能を有している（赤井ら（1984））。施設は全体の堤体延長が41m、堤体幅が沖側前面で4m、側面で1.5～2mである。石積堤で囲まれた閉鎖性干潟は、幅5m×奥行5mの矩形形状となっている。石積堤による懸濁物質の除去効果ならびに静穏域での干潟の効果を確認するため、水質・植物プランクトン・藻類・底質の調査を実施した。主な成果は以下のとおりである。

- ①石積堤による礫間接触酸化効果により、最大75%の懸濁物質除去率が得られ、堤内部の透明度を高めることができた。
- ②静穏性ならびに透明度が高いため、内部では付着藻類の活性が高まり、光合成による酸素供給が可能であることが確認された。

3.5 流 況 制 御

停滞性の強い海域の水質改善や貧酸素水塊の解消、透明度の改善には、港内の海水流動と港内外の海水交換が重要な役割を果たす。尼崎港を再現した水理模型を用い、潮流を利用し尼崎港の海水交換を促進するための流況制御技術の適用方法について、水理実験を行った。尼崎港水理模型は、(独)産業技術総合研究所中国センターの平面水槽内に作られた縦18m、横10m、水平縮尺1/500、鉛直縮尺1/63のもので、現地の潮汐潮流を再現させることができる。主な成果は以下のとおりである。

- ①港内の海水交換を高める方法として、埋立地の一部開削、埋立地内の遊水池造成が有効であることを実証した。
- ②港内の栄養塩の滞留を改善するためには、下水処理施設からの放流位置を変えることが有効かつ現実的であることを実証した。

4. 環境修復技術のベストミックスとパッケージ化

尼崎港内の実証実験施設のモニタリングと水理模型での実験結果に基づき、個別技術の機能を明らかにするとともに、環境修復技術のベストミックスについて検討した。なお、技術の組合せによる相乗効果を定量的に評価するため、生態系モデルを用いたシミュレーションを行った。さらに、これらの技術の組合せを他の海域に適用すべく、「技術の組合せとその機能」ならびに「ベストミックスの検討手順」を『閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ』として取りまとめた。

4.1 環境修復技術のベストミックス

モニタリングの結果から、各技術が有する機能を表4のように示すことができた。また、それぞれの実証実験施設の機能が補完関係を有し相乗効果を示すことが明らかになった。さらに、生態系モデルを用いて各技術による水質改善効果を定量的に算出した結果、これらの技術を組合せて導入することによって、透明度・DOの改善において相乗効果が得られることが明らかになった（表5）。

尼崎港内に、①浮体式藻場：35ha、②エコシステム護岸：4,600m、③人工干潟：42ha、④礫：14haを設置し、⑤下水処理水放流位置を変更することによって、港内の夏季の透明度が約4m（現状年平均2.5m）、底層溶存酸素が約3mg/ℓ（現状0mg/ℓ）に改善されると予測され、目標としたレベル近くまで、港内の環境を改善できることが明らかになった。

4.2 最適環境修復技術のパッケージ

ここで組合せた技術の環境修復機能は以下のよう整理できる（窒素を指標に表現）。

流況制御は負荷を削減し、浮体式藻場は溶存態

表4 各技術が有する機能

技 術	機 能		
	機 能	単 位	値
浮体式藻場	溶存態の栄養塩を海藻が吸収固定	窒素kg/100m ² 年	0.6～2.0
エコシステム護岸	棚部に生息する生物による有機懸濁物の除去	%（対垂直護岸比）	64
人工干潟	二枚貝が有機懸濁物・堆積物を捕食し除去	窒素kg/100m ² ・5ヶ月	約2.0
閉鎖性干潟	礫間接触酸化等による懸濁物の除去	%（懸濁物除去率）	最大75

表5 各施設の組合せによる効果の比較（主な予測評価結果）

検討 Case 番号	適用技術					効果（9月の水質）	
	浮体式 藻場	エコシス テム護岸	人工 干潟	閉鎖性 干潟	流況 制御	透明度（m）	底層 DO（mg/ℓ）
1						1.16～1.35	0.03～0.32
5			○			1.53～3.18	0.88～2.02
8-A	○	○	○	○		2.21～3.50	1.12～2.24
8-B	○	○	○	○	○	2.47～3.78	1.56～2.85

注）ここでの流況制御は下水処理水の排水口の移設を意味する

の窒素を効率的に吸収・固定する。また、干潟および閉鎖性干潟ならびにエコシステム護岸は懸濁態の粒状窒素を取り込み固定もしくは無機化する。ここで組合せた技術は、都市型閉鎖性海域に共通する物質循環の歪みを修復することができる。すなわち、他の海域での環境修復事業の計画・基本設計の段階では、これらの技術の組合せとその機能の原単位を用いて検討を進めることができる。ただし、事業の実施設計段階では、地域の環境特性、海面や護岸の利用状況に応じた検討を加え、規模や配置を決定することになる。

4.3 尼崎港内における環境修復事業の提案

環境技術の実用化が本研究の命題である。そこで、尼崎港内における技術の配置・規模の設定、さらには施工方法に関するケーススタディーを行った。その結果を踏まえ、干潟：22ha、浮体式藻場：8 ha、エコシステム護岸：1,100mの実施による港内の環境修復事業を港湾管理者である兵庫県に提案した。これらが実施されることによって、港内の透明度が2.2m、底層のDOが約1 mg/ℓに改善され、修復目標には達しないものの、海底の無酸素状態は解消される。兵庫県では尼崎市臨海部における都市再生事業として「尼崎21世紀の森づくり」が進められつつあり、水際部の環境修復が課題となっていることから、現在、港内の環境修復に向けた検討が進められようとしている。

5. おわりに

典型的な都市型閉鎖性海域である尼崎港において、各種の環境修復技術の実証実験を並行して実施した。この実験から各技術の個別機能を検証するとともに、組合せによる相乗効果を明らかにし、環境修復技術のパッケージ化を図ることができた。3年間の研究のうち、ほぼ最初の1年は実証実験施設の建設に要したため、実質的なモニタリングが2年間となった。海の生物の遷移を把握し評価するには尚早であるが、都市の沿岸部では環境修復・再生のための事業がまさに進められようとしており、時代の要請に対して一つの答えを返すことができたと判断している。なお、事業コストと効果の評価方法が課題として残される。

本研究の実施期間中に大阪湾再生のための行動計画が策定されたが、そこでの環境修復・再生事業に本研究成果が活用されるものと考えて、今後、環境再生の事業対象海域において、まずは技術効果の現場検証を実施し最適な技術の組合せを検討されることを望みたい。

参考文献

- 1) 平成15年度環境技術開発推進事業〔実用化研究開発課題〕、閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化研究開発成果報告書、(財)国際エメックスセンター