

## 16.閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化

### (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)

研究開発代表者 上嶋 英機 (財団法人 国際エメックスセンター科学政策委員・独立行政法人 産業技術総合研究所産学官連携部門研究コーディネータ)

分野 環境改善修復 (水環境)

研究期間 平成 13 年度～平成 15 年度

研究予算総額 179,061 千円

#### 研究の背景と目的

人口や産業の集積が著しい大都市に面する内湾では、過大な流入負荷や埋立による浅場の消失によって水質・底質環境の悪化が進み、夏季には貧酸素水塊により海底の生物が生息できない状態にまで至っている。このような内湾における環境を修復するため、藻場や干潟の造成が行なわれているが、その機能については未検証なものも多く、また、単一の技術が適用される場合がほとんどである。加えて海面や岸壁が高度に利用され、水深が深いことなど修復技術を適用する上で多くの制約がある。

本研究では、典型的な富栄養化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。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、

他の富栄養化した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並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。それらの結果に基づき、尼崎港内における環境修復事業を提案する。

#### 研究の成果

##### (1) 環境修復技術のベストミックス検討手順

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、この方法論を実証・確立すべく、以下のように研究を進めた。

研究の対象とした尼崎港内における環境の変遷及び現状を把握・評価し、環境悪化の原因とその相互関係 (環境悪化の連関) を明らかにした。次に、修復目標を設定し、目標達成のための技術を選定した。目標の尺度として水質を取上げ、透明度 5m 以上 (年平均)、溶存酸素 (以下 DO と記す) 3.0mg/L (夏季底層) 以上を目標とした。技術の選定に当たっては、港内の水質・底質などの自然環境条件、物理的条件を勘案し、環境改善の連関 (環境悪化の連関の逆過程) に基づき、浮体式藻場、エコシステム護岸、人工干潟、磯及び石積堤を用いた閉鎖性干潟 (以下閉鎖性干潟と記す) 並びにこれらの機能を向上させるための流況制御を選定した。～ については尼崎港内に実験施設を新たに建設し、～ については既存の室内模型を用いて、モニタリング並びに実験を行った。～ の施設の概要は図 2 に示すとおりである。

モニタリング及び実験の結果に基づき、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なった。これらの技術の組合せを他の海域に適用すべく、各技術の機能、ベストミックスの検討手順・方法論を「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。

##### (2) 個別技術のモニタリングと機能の評価

～ については現地でのモニタリング調査に基づきそれぞれの機能を検証・評価した。～ につい

ては模型実験によって流況の制御とその効果を評価した。個別の技術に関する研究成果を以下に示す。

浮体式藻場
<p>(a) 10 種の海藻の生育実験を試み、港内での藻場構成最適種がワカメであることを明らかにした。</p> <p>(b) 単位面積当りの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 100m<sup>2</sup> 当り 30 ~ 100kg(湿重)のワカメの収穫を可能にした。これは窒素量で 0.6 ~ 2kg に相当。</p> <p>(c) 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、ワカメを用いた堆肥は植物育成促進効果を有することが明らかになり、超臨界水を用いた場合、海藻中の炭素の 7.8%、メタン醗酵の場合、34%がメタンとして回収できることが明らかになった。</p>
エコシステム護岸
<p>(a) 既設の垂直護岸に比べ、底部では 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。</p> <p>(b) イガイなど壁面の付着動物に由来する有機物を底部で受け止め、堆積物食生物が利用することで、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。</p> <p>(c) 海底への有機物負荷を削減することによって、貧酸素の原因となる海底での酸素消費量を 11%削減でき、このことが港内の底層 DO の改善に寄与することが明らかになった。</p>
人工干潟
<p>(a) ここで選択した設計手法により、安定した形状の干潟を造成・維持することができた。</p> <p>(b) アサリが 3 月 ~ 7 月の成長期に、干潟 1m<sup>2</sup> 当り窒素 18.8g、リン 1.86g を固定することが明らかになった。これは自然の干潟での生産量に匹敵する。</p> <p>(c) 静穏性が高い箇所ではイガイ等の二枚貝が干潟表面にマットを形成し、他の生物、特にアサリの分布、生育を妨げることが明らかになった。この対策として一定期間毎に底質に人為的な攪乱を与えることによって、イガイ等のマット形成を防ぐことが可能であることが実証できた。</p> <p>(d) 貧酸素化によってアサリの生残が激減した後、早期の回復を図るためには、種・幼生の保存の場を海藻の増殖浮体に設けることが有効であることを明らかにした。</p>
閉鎖性干潟
<p>(a) 閉鎖性干潟の石積堤による礫間接触酸化効果により、最大 75%の懸濁物質の除去率が得られ、干潟内部の透明度を高めることができた。ただし、礫間を透過する海水の DO 低下が生じる。</p> <p>(b) 静穏性並びに透明度が高いため、内部では付着藻類の活性が高くなり、光合成による酸素供給が可能であることが明らかになった。</p>
流況制御
<p>(a) 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。</p> <p>(b) 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。</p>

### (3) 環境修復技術のベストミックス

モニタリング調査の結果から、それぞれの技術が図 3 に示すような機能の補完関係を有することが明らかになった。また、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、これらの技術を組み合わせて導入することによって、表 1 に示すように、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。尼崎港内のほぼ全域にこれらの環境修復技術を適用し、浮体式藻場：35ha、エコシステム護岸：4,600m、人工干潟：42ha、礫：14ha、下水処理

水放流位置の変更（港内への流入負荷の削減）を行なうことによって、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) 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図 4 に示すように表現できる（ただし窒素を指標に表現した）。流況制御は負荷を削減し、浮体式藻場は溶存態の窒素を効率的に吸収・固定する。また、干潟及び閉鎖性干潟並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。さらに、それぞれの技術が有する機能は表 2 に示した値となった。

都市型の富栄養化閉鎖性海域では共通する問題として物質循環の歪みが生じており、ここで組合せた技術は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・基本設計の段階においては、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、事業の実設計段階においては、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。ここでは「技術の組合せとその機能」並びに「ベストミックスの検討手順」を『最適環境修復技術のパッケージ』としてまとめた。

#### (5) 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、本研究の成果を踏まえ、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い、干潟（砂留潜堤を磯として利用）：22ha、浮体式藻場：8ha、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 1mg/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、尼崎市臨海部において、都市再生事業として低未利用地を活用した「21 世紀の森づくり」が進められ、水際部の環境修復が課題となっており、現在、環境修復に向けた検討が進められようとしている。

### 研究のまとめ

典型的な都市型の富栄養化した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同海域で並行して実施した。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とも考えられるが、都市の沿岸部では環境修復・再生のための事業が進められようとしており、時代の要請に対して一定の答えを返すことができたと判断している。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、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する。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。

ここで実証した機能の組合せは他の海域に適用可能であるとともに、加えて、一連の技術検討・施設建設・効果実証の進め方が環境修復の方法論として活用されるものと判断する。研究成果は瀬戸内海沿岸などの自治体や行政機関、並びに研究機関に配布予定であることから活用が期待される。なお、尼崎港内に建設した実証実験施設には国及び地方自治体、学会、研究機関、住民団体等計 20 団体の視察があり、先進的事例として参考にされている。さらに、実証実験施設を利用した環境学習が開催され、延べ 1,035 人（平成 16 年 9 月現在）の小中学生、一般市民が環境修復について学んだことも副次的な効果として挙げられる。

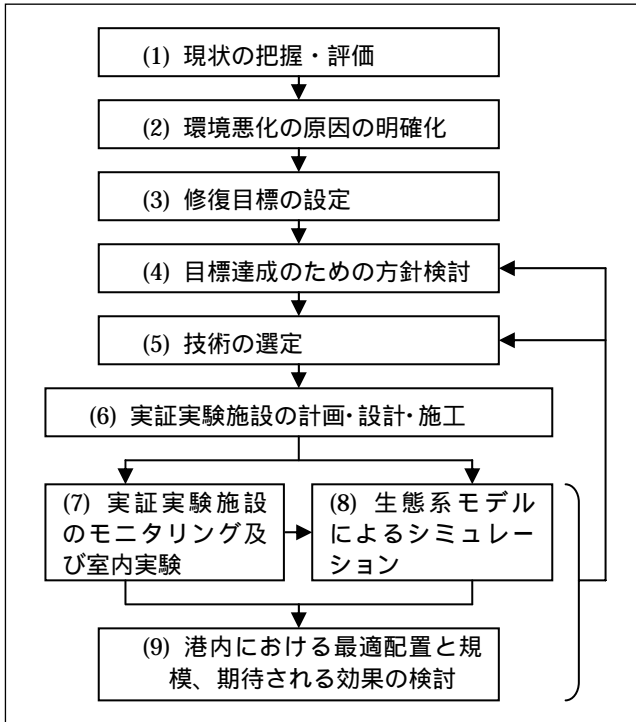
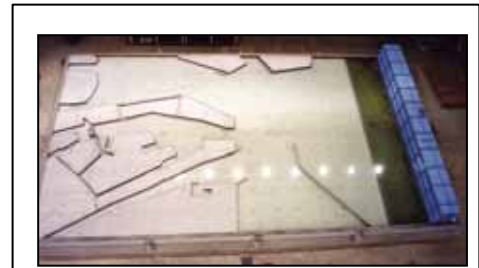


図1. 環境修復技術のベストミックス検討手順



流況制御（水理模型実験）  
18m×10m（水平縮尺 1/500、垂直縮尺 1/63）

人工干潟  
32m  
12m

石積堤を用いた閉鎖性干潟  
9m  
5m

浮体式藻場  
9m  
3m  
×3基

大阪湾  
エコシステム護岸  
9m  
1.5m

尼崎港全景

現地実証実験施設

図2. 実験施設の概要

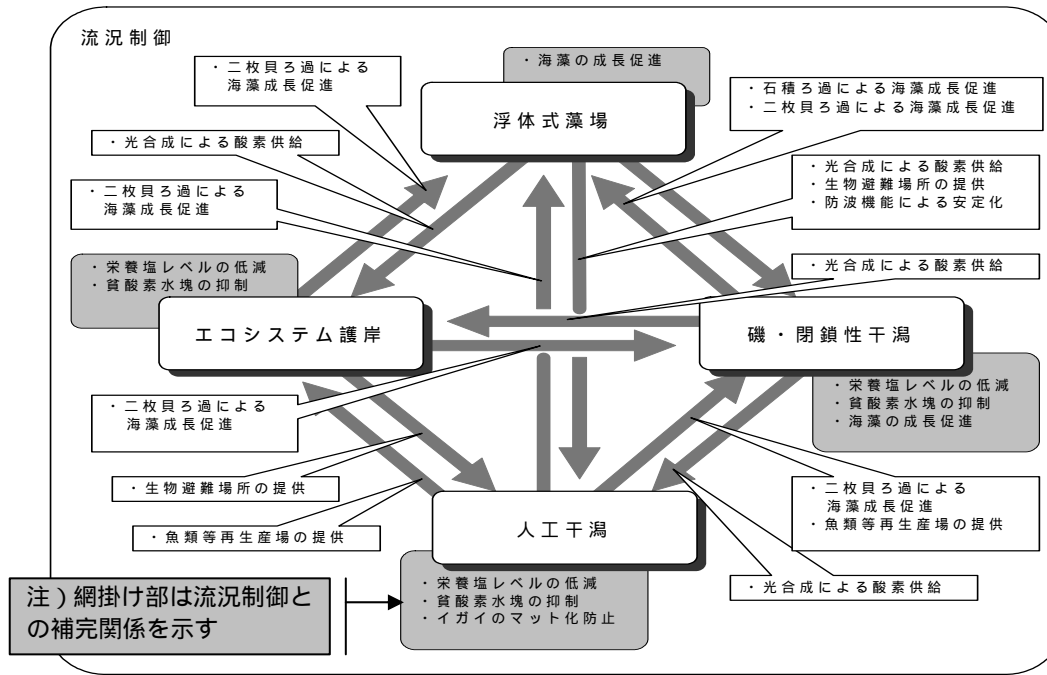


図3. 各施設の機能の補完関係

表1. 各施設の組合せによる効果の比較 (主な予測評価結果)

case	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)浮体式藻場 浮体式藻場、エコシステム護岸 エコシステム護岸、閉鎖性干潟 閉鎖性干潟と略記。また、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。

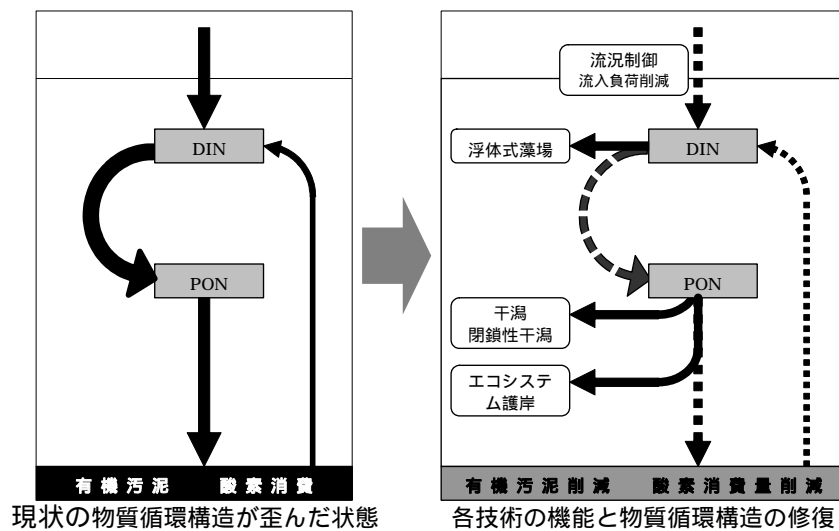


図4. 環境修復技術の組合せによる物質循環構造の修復 (窒素を指標とした概念図)

表2. 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 <sup>2</sup> 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	2枚貝が有機懸濁物・堆積物を捕食し除去	窒素 kg/100m <sup>2</sup> ・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

## 研究発表（主要なもののみ）

発表題名	掲載方法 / 学会	発表年月	発表者
（口頭発表） ・水理模型実験による尼崎港の海水交換促進工法に関する研究 ・The Best Mix of Environmental Restoration Technologies: Amagasaki Harbor Project ・水環境修復技術のパッケージ化への取り組み ・富栄養化海域において造成した干潟における二枚貝養成の試み ・Development of an Inhabitable Quaywall for Improvement of Material Cycle ・閉鎖性海域における干潟と人工干潟の問題点 ・富栄養化した閉鎖性海域に造成された人工干潟における二枚貝による水質浄化の試み ・石積浄化堤を用いた干潟造成の効果と課題 ・ON-SITE EXPERIMENTS OF OPEN- AND CLOSED-TYPE ARTIFICIAL TIDAL FLATS AT INNER PART OF OSAKA BAY ・CULTIVATION OF CLAMS IN THE TIDAL FLAT CONSTRUCTED IN THE EUTROPHIC ENCLOSED COASTAL SEA AREA ・ATTEMPTED REMOVAL OF EUTROPHICATING NUTRIENTS IN THE PORT OF AMAGASAKI, OSAKA BAY BY CULTIVATING SEAWEEDS ・大阪湾奥の閉鎖性水域に造成した捨石堤で囲われた干潟の効果と課題 ・Project aimed at packaging optimal environmental restoration technologies - An overview ・人工干潟の環境と二枚貝の生残率について （誌上発表） ・閉鎖性海域における環境修復技術の効果検証と最適技術のパッケージ化 ・閉鎖性海域における最適環境修復技術のパッケージ化	土木学会中国支部第54回研究発表会	14.6	山崎、村上、上嶋
	Techno-Ocean 2002 International Symposium	14.11	大塚
	日本沿岸域学会海洋環境産業シンポジウム	14.11	石川
	第37回日本水環境学会年会	15.3	宮崎、山崎、谷本、樋渡、木幡
	13th (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference	15.5	三好、上月、倉田、北野、村上、水口
	日本水環境学会シンポジウム	15.9	木幡、樋渡、萩原、宮崎、山崎、木村
	日本水環境学会関西支部研究発表会	15.9	宮崎、山崎、谷本、樋渡、木幡
	土木学会第58回年次学術講演会	15.9	石垣、大塚、辻、上月、上嶋
	第6回世界閉鎖性海域環境保全会議	15.11	大塚、石垣、桑江、中村、上月、上嶋
	第6回世界閉鎖性海域環境保全会議 （ポスターセッション）	15.11	宮崎、山崎、谷本、樋渡、木幡
	第6回世界閉鎖性海域環境保全会議 （ポスターセッション）	15.11	川井、宮川、牛原
	海岸工学論文集 第50巻 / 第50回海岸工学講演会	15.11	石垣、大塚、桑江、中村、上月、上嶋
	第12回環日本海環境協力会議	15.11	北村
第38回日本水環境学会年会	16.3	宮崎、山崎、谷本、樋渡、木幡	
土木学会論文集 No.741/Vii-28,95-100	15.8	上嶋	
沿岸域（日本沿岸域学会誌）第16巻第2号	16.3	石原	

## 新聞発表

- ・13.8.30 神戸新聞 ・13.9.26 産経新聞 ・13.12.22 産経新聞・朝日新聞
- ・14.10.29 神戸新聞 ・15.2.19 毎日新聞 ・15.3.2 神戸新聞
- ・15.5.7 読売新聞 ・15.5.9 読売新聞 ・15.10.27 中国新聞 ・16.3.19 朝日・産経新聞

## 工業所有権

特許等の名称	願書年月日	公告番号	公告期日	登録番号
なし				