

生物膜と自然エネルギーを利用した海域浄化

丹羽 千明
(技術研究所)

吉田 洋二郎
(土木本部)

萩原 運弘
(技術研究所)

大野 文良
(土木本部)

毛利 光男
(技術研究所)

§ 1. はじめに

昨今、頓に焦眉の問題として地球環境問題が世界的に論及されるようになり、とりわけ地球表面の7割を占める海洋の環境に関する諸課題がクローズアップされてきた。その膨大さ故に、従来えてして忘れがちであった海の環境容量が有限であることを思い知らされる事態が世界の諸海域で起こってきている。

一方、我が国においては経済的にも、文化的にも成熟の度合いが増し、人々の生活水準の向上、自由時間の増大に伴い、『豊さ』『潤い』を求める傾向は一層増大してきている。特に自然に親しみ、自然を享受する中に真の『安らぎ』『潤い』を希求するようになり、親水空間あるいはレジャーの対象としての海辺、海域の重要性がクローズアップしてきた。

我が国の周辺海域における水質汚濁の進行は、一時に比べ大変緩和され、人の健康に係わる公害あるいは水質項目に関しては著しい改善が見られた。しかし、生活環境項目、例えば化学的酸素要求量(COD)について見れば、環境基準達成率は東京湾、伊勢湾では全国平均に比べて低く、ここ数年ほぼ横ばい状態である。この原因は、こうした海域が地形的に閉鎖性内湾に位置し、海水の交換が悪いうえ、人口が過密で活発な経済行動が行なわれている大都市域を背後に有する所が多く、汚濁負荷量が高いことに起因している。一方、豊かな海域環境の創造、アメニティーの高い空間の整備が最も求められているのもそうした海域である。

こうした背景下で、運輸省港湾局と当社を含む民間23社とは学識経験者の協力を得てシーブルーテクノロジー研究委員会を設定し、1987年8月から1989年3月まで海域浄化、環境創造技術に関する調査研究を実施した。

この調査研究の特徴は、海域環境創造に当たっての5つのコンセプトを設定し、要望、ニーズの把握、目標設定から対策の策定、評価までの検討フローを提示し、かつ具体的なケーススタディーを行なっている点である。

さらに、こうした一連の活動から絞り込まれた海域浄化技術、なかんずく生物膜を利用した海域浄化技術について、基礎技術に関する研究ならびに設計仕様の確立を目的として、1990年度より民間17社でシーブルー工法研究会を組織して運輸省港湾技術研究所と共同研究に着手し、現在鋭意実施中である。

一方、建設省を中心として、都市周辺河川を対象として礫間接触浄化法の実工事ベースでの実績が積み重ねられつつある。しかし、その設計手法は必ずしも一元的なものではなく、データの採取、蓄積と得られた結果の最適設計手法確立へのフィードバックはこれからの課題である。

海水の生物膜を利用した浄化に関する研究は、開始されてまだ3～4年と日は浅いが確実に報文の数が増し、遠からずその成果が実用に供されるものと期待されている。

本報では、以下の内容についてその概要を述べる。

- (1) 海域浄化に関するニーズと背景
- (2) 海域浄化に当たってのコンセプトとポイント
- (3) 港湾構造物の浄化に関連する水理特性に関する研究の現状
- (4) 港湾構造物と浄化機能の複合化

この一部は、著者等が携わったシーブルーテクノロジー研究委員会の業務の成果に関連しているが、その箇所については右肩に文献が付されている。

ここで対象とする海域は、日本の比較的汚濁の進んでいる閉鎖性海域であり、かつ前述の観点から親水空間としての高度利用、環境創造へのマッチングを第一義的に考えて考察する。

§ 2. 海域浄化に関するニーズと背景

水質汚濁に係わる環境基準のうち、人の健康の保護に関する環境基準不適合率は年々減少し平成2年度で0.1

%に達しているが、生活環境の保全に関する環境基準、いわゆる生活環境項目は代表的な水質指標であるCODについて、図-1で分かるように海域全体では80%以上の達成率を示しているのに対し、東京湾、伊勢湾については全体に比べてまだ低く横ばい状態で、大阪湾等とともに閉鎖性海域の水質環境の改善が芳しくない¹⁾。また、生活、産業両排水中に含まれるN、Pなどの栄養塩類などの流入により富栄養化現象が生じ、赤潮や青潮の発生

などにより海水浴の利用障害、悪臭の発生、海浜の汚濁、さらには漁業被害が生じている。

総理府が行なった『国民生活に関する世論調査』²⁾によると、“物質の豊さ”よりも“心の豊さ”を求める要請が年々増加している。また、生活の力点に関しては図-2に示すように“レジャー・余暇生活”が特に増加している。

海洋レクリエーションについては、現在の活動者数に比べて将来の希望者は非常に多く、散策、鑑賞、休養、日光浴といった静的なもの、海水浴、潮干狩、釣りといった昔ながらのレクリエーションに対する要請が強くなり、さらに将来指向としてサーフィン、水上スキー、ボートイングといった動的なものへの要請が増加する傾向にある。

都市部の地価の上昇、先の価値観の変化が原動力となり、近年ウォーターフロントの開発、特に臨海部の再開発、湾奥部における廃棄物等の埋め立て地の開発が目目されてきている。

例え臨海部を高度利用する場合でも、臨海部に水辺の持つ魅力を活かしつつ、水辺に親しむことの出来る空間を創造していこうという考え方が基軸となってきている。そうした国内外における実績あるいは計画におけるキーワードは、以下のように考えられる。

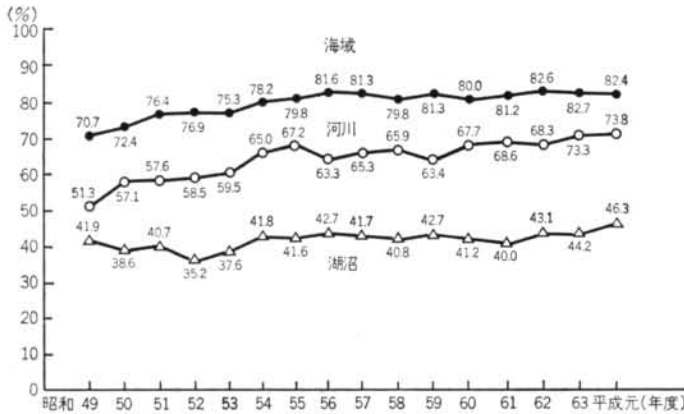
- ①親水性、アメニティー
- ②総合利用、高度化、複合化
- ③情報化
- ④開発のテクニックとしての第三セクター、民間活力の利用

いずれの観点からも、親しめる美しい海の確保は不可欠な条件といえることができる。

§ 3. 海域の浄化と利用に当たってのコンセプトとポイント

3.1 海域の浄化と利用に当たってのコンセプト

シーブルー研究委員会の一連の活動の中で、『快適な海を創造するために、海域環境の改善と海域の利用とを一体的に検討する調査、計画（シーブルー計画）』に当たって、我々は以下の5つのコンセプトを決



(注)1.環境庁調べ

- 2.達成率は、 $\frac{\text{環境基準達成水域数}}{\text{環境基準当てはめ水域数}} \times 100 (\%)$
- 3.生活環境項目に係わる環境基準は、利用目的に応じ河川については6類型、湖沼については4類型、海域については3類型設けられている

図-1 生活環境項目に係わる水質環境基準の達成率の推移¹⁾

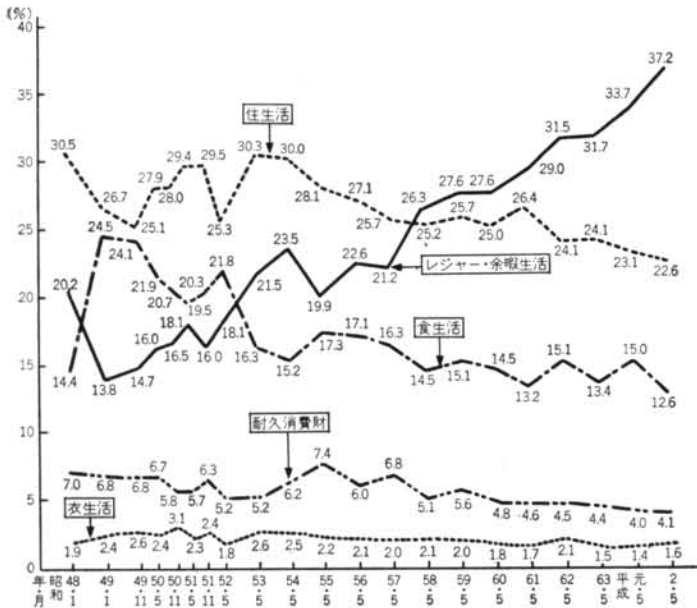


図-2 生活の力点の推移²⁾

定した³⁾。

1) 積極的な環境創造

従来、海の経済的価値が偏重されがちだったが、海の環境資源としての価値を見直し、最大限に発揮させていくことにより快適な環境創造が可能となる。すなわち、従来の環境保全の考え方は異なり、開発と調和をとりながら、バランスよく計画的に環境を管理することにより積極的にプラスを生み出し、環境の魅力を発揮させるものである。したがって、アプローチのプロセスも課題解決型から目標設定型へ転換していく必要がある。

2) 海と陸との密接な関連

従来、波浪や高潮、飛砂等、沿岸域の厳しい自然環境から国土を守ろうとする防災機能重視型、すなわち陸と海とが寸断された海浜公園が我が国には少なくない。防災面と調和させながら陸から海、海から陸へのアクセスを容易にし、海域の環境のすばらしさを人が享受出来るように、海と陸とが一体となった密接な関連を持たせる配慮をする必要がある。

3) 利用を考慮した環境改善

利用の仕方を想定して、そのような利用をするために感覚を重視した環境指標により、必要かつ十分な状態へ環境を改善する。環境改善の費用については、利用者＝受益者が明確な場合の受益者負担や、公共的費用の投入に対する社会的容認が一層進むことが予想される。環境の改善と利用の促進は鶏と卵の関係にあり、一体的に進める必要がある。

4) 海の資質を活かすこと

海の資質、すなわち“海の家らしさ”を最大限活かすことを目標とする。海らしさとは、“大量の水の存在”“面積が広い”“比熱が大きい”“塩分の存在”“海流、潮汐、波”“豊富な海洋生物”などを指し、これらの海の特性を最大限活かすことを第4のコンセプトとする。

5) 手段の組み合わせ、ハイブリッド化

海水の浄化は、海の水が一般に濃度が薄く大量に存在するため、経済的に大変難しい。そこで、自然エネルギー（潮汐、波）の利用技術や生物処理技術などの組み合わせ、自浄作用の促進、港湾構造物と浄化施設（機能）の組み合わせなど、ソフト、ハードの両面から複合化、ハイブリッド化していくことが有利となる。

3.2 海域の浄化目標

海の快適性は人間の五感によって人が感ずるものであり、それを複合的、総合的に捉えた感覚、印象である。例えば、視覚に関連する快適性には水のきれいさ、周りの景観、自然生物の観察などがあり、臭覚に関連する快

適性には潮の香、大気の清浄さなどがある。海域環境の改善、海域の浄化を具体的に進めるため、感覚的、快適性という比較的抽象的な概念を海域環境の具体的要素、さらには各要素の代表的固有の指標に結び付けていく必要がある。

各環境要素の指標の達成レベルの目標は絶対的なものではなく、利用形態に対応して目標値を定める必要がある。

利用形態（快適性のレベル）としては、①見る、②触れる、③泳ぐ、④飲むで、後者ほどハイレベルの水質が求められる。

環境要素の一つとして水質を例にとると、水質には透明度、COD 値、濁度、溶存酸素濃度、T-N 濃度、T-P 濃度等種々の指標がある。しかし、これらの指標をすべて用いることは煩雑である。そこで、先の5つのコンセプトに最も沿い、最も分かり易い指標を各環境要素毎に選定し、その快適性のレベルに適合した目標値とともに一覧表にして表-1に示した。

なお、環境要素は水質、底質、臭い、流れのごとく相互に関連したものもあるが、五感あるいは対策との関連で表-1のような6項目に分類した。これらの値は、シーブルー研究委員会での成果、建設省での湖沼における設定値、東京都の陸水における設定値等を参考にして設定したものである。遠からず、運輸省からも何らかの形で利用形態別の水質目標値が示されると予想される。

3.3 海域浄化のポイント

3.3.1 重視すべき水質項目

親水空間創出のための環境創造を前提として海域浄化

環境要素	指 標	目 標 値	
		快適性のレベル	目 標 値
水 質	透明度 (COD)	触れる	2m以上(4以下)
		見 る	1m以上(7以下)
底 質	粒度組成	触れる	0.074~2mm (砂の場合)
		見 る	
地 形	勾 配	触れる	1/20以下
		見 る	特になし
流 れ	流 速	触れる	20cm/sec以下
		見 る	特になし
波	波 高	触れる	50cm以下
		見 る	特になし
		聞 く	
生 物	生物の多様性	触れる	DO 6 mg/ℓ以上
		見 る	

表-1 目標値の設定

を考えるに当たって、水質的には以下の諸理由により、代表的な水質項目として透明度が最も重要な項目であると考える。

(1)前述のニーズ、社会動向から親水域造成の基盤となるきれいな水域の確保が必要である。

(2)快適性はかなり感覚的なもので、海域浄化に関しては視覚的なもの、臭覚的なものが直結しており、分かり易く、感覚的にアピール力のある代表的な水質指標として透明度が有力である。

(3)見る、触れるのレベルでは、透明度で充分用が足りる。泳ぐレベルに至っても、特別な有害物質や大腸菌等公衆衛生項目に問題がない限り、透明度が快適性と最も関連が深い。

(4)有機性溶存物質、栄養塩類など、内部生産等の2次汚濁に関連する水質項目も、2次汚濁として明らかになった状態では透明度で計れるし、自然海域のCODと透明度はかなりの相関がある。

透明度に最も関係する汚濁物は懸濁物質である。海洋における懸濁物質は、比重2.5程度と比較的重い粘土粒子($\phi 1 \mu\text{m}$ 程度の粒子およびその凝集粒子)や、コロイド状の無機懸濁物質、排水起因物質、デトリタスやプランクトン、流れ藻などの有機性物質等、陸・河川起源の物質、海洋起源の物質の両方が含まれる。

なお、透明度は海域、湖沼等自然水域において用いられている水質指標であるが、著者等が一、二の海域で透明度と透視度との相関をとったところ、図-3にみられるように、予想どおりかなりの関連があることが分かった。透視度は手軽であり現地測定が必要がないこと、濁度は機械による連続測定が可能なることから、透明度の代替指標として透視度あるいは濁度の使用が、研究上、プロセス管理上あるいは環境管理上有利となる。

3.3.2 自浄作用の促進

河川においては、底部表面は細菌、藻類、原生動物等の微生物、貧毛類、輪虫類等、微小後生動物で構成される生物膜で覆われ、これらが河川の自浄作用に大きな力があることは広く知られている。

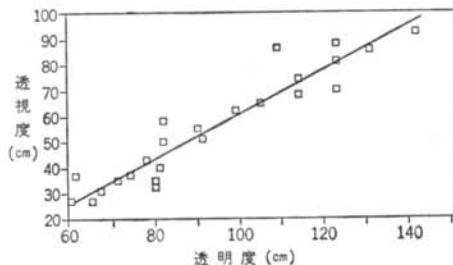


図-3 透明度と透視度の相関

一方、海洋においても河川同様の自浄作用があるが、環境条件の異なる広大な環境があり、湾ひとつをとっても海水の交換日数が長い(滞留時間が長い)ことから、さらに大きな自然エネルギーと生物生態系による浄化が併行して進行している。

浄化対象とする水量が一般の排水処理や河川に比べても膨大であるため、こうした自然の浄化体系を模倣し、ある程度コントロール出来るコンパクトな系の中に効率よく封じ込めた手法の開発が最も経済的であると考えられる。

3.3.3 自然エネルギーの利用

浄化する対象が膨大なことと、浄化による受益者が明確にならない場合が多いこと、健康被害に直結するような場合でない限り、浄化に対する対価の負担が慣習化していないこと等々から、高価な電気エネルギーを海域の浄化に投下することに対して大きな抵抗があるのが現状である。

海洋の自然エネルギーとしては、位置エネルギーである潮汐、位置および運動エネルギーである波浪、熱エネルギーである温度差、広くは風力などがある。これらのエネルギーを電気エネルギーに変換する多くの研究がなされており、電気へ変換する際の経済性の比較の研究、さらにその際生じる環境変化をコストに換算してそれを算入した経済性の比較等も試みられている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。電気エネルギーへ変換する場合は、海域の条件に左右されるところが大きいことはいまでもないが、日本沿岸ではなかなか割りに合う所は少ないのが現状である。

海域の浄化において必要なエネルギーとしては、浄化作用の促進、海水交換等を中心に考えて、

- ①海水を流すための位置あるいは運動エネルギー
- ②酸素を海水に溶解させるための位置あるいは運動エネルギー、さらにはより直接的な曝気エネルギー
- ③排泥のための曝気ないし運動エネルギー

等が挙げられる。これらは電気エネルギーによっても得られることは当然であるが、海洋特有の自然エネルギーである潮汐、波浪エネルギーなどを電気エネルギーにいったん変換することなく、直接あるいはわずかに加工して利用出来れば圧倒的に有利なものとなる。

3.3.4 浄化の観点から捉えた海水の特性

我々が今環境改善の一環として浄化の対象と考えているのは、前記のごとく沿岸海域、とりわけ湾奥部、運河部など、①人との係わりが最も強く、②陸域の人間活動に起因する汚濁負荷や河川からの自然汚濁負荷の影響を最も受け易い海域である。それらの海域の水の特性は、一般の海水の特性を含めて陸水や下水等一般の排水と異

なり、次の特性がある。

①汚濁度が有機物、栄養塩類とも河川水や下水等より一般に低い。

②東京湾や大阪湾等、大都市域の内湾では下水道の普及率が高いので、下水の終末処理場における分解残の物質や天然汚濁に起因するフミン質等、一般の排水処理に比べ生物にとって難分解性の物質の割合が高い。

③塩化ナトリウムをはじめ多くの塩類を溶解している。かつ、湾奥部では河川の流入などによりその濃度が一定していない。

④対象水量が膨大である。

⑤波や流れが常にある。

⑥潮汐の作用で水位が変化する。

⑦水温が周期的に季節変動するが日間変動は少ない。

⑧浅海では基礎生産能力が大きい、内部生産による汚濁負荷が高水温期に特に顕著である。

⑨生物種が環境に応じ極めて豊富である。

⑩河口域では、河川が淡水のため海水の表面を走り、塩水楔が遡上する。

これらの諸特性のうち、浄化の観点からは①②③④⑧⑨等が留意せねばならぬ点である。経済的観点では①④がとりわけ問題を難しくしており、⑤の故にいったん浄化した水が工夫をしないと1カ所に止まりにくく、直接的な目に見えた効果を生みにくい。その他、⑥は自然エネルギーとして浄化への利用を図る、⑧は高水温期に沿岸域、湾部において莫大な内部生産量を生み2次汚濁に結びつく、⑨は生態系を利用した浄化システムの構築、などの点で着目ないしは注意を払う必要がある。

我々が問題にしている河川等汚濁物が混入している淡水の流入を伴う湾奥部においては、湾奥部固有の物理化学的反応および生態系が複合化した反応がある。河川の流入する湾奥部では、河川水によって運ばれた粘土鉱物、有機物—粘土鉱物複合体や腐食物質よりなるコロイド粒子は、塩分量の急激な変化によって粒子表面の電気二重層が薄くなるため、粒子同士がファンデルワース力でくっつき合い、凝集沈殿し易くなる。金属イオンとキレート化合物を作っている有機物もフロックにとり込まれたり、吸着したりして同様の挙動をとり易い。一方、無機態窒素やりん酸塩、珪酸塩等も植物プランクトンの増殖に使われ、食物連鎖に組み込まれる。したがって、1次生産速度に比例して内湾で堆積して行くこととなる。このように、極めて小さい懸濁粒子 $0.45\sim 40\mu\text{m}$ あるいはコロイド粒子は、より大きな粒子へと形を変える反応が第一次反応として進むので、その点からも湾奥部の海水の浄化においては、懸濁固形物の除去が極めて重要な役

割りを果たすことになる。

§ 4. 港湾構造物の浄化に関連する水理特性に関する研究の現状

防波堤に要求される機能は、本来港内水域を静穏に保ち、港湾の諸施設を保護し、船舶の入出港、荷揚げ作業の効率化を図ることであったが、水域の多目的利用や環境保全への配慮などにより種々の新しい機能が要求されるようになってきている。本章では、港湾構造物と浄化機能のハイブリッド化、あるいは港湾構造物そのものの浄化能力、環境保全の能力を考えるうえで不可欠となる港湾構造物、主として防波堤の導水能と曝気能に着目して過去の文献をレビューした。

4.1 導水能

昨今、防波堤により海城を遮断しても、流れによる港内外の海水交換を阻害しないような配慮がなされるようになってきた。しかしながら、波による透過堤の海水交換・交換に着目した研究は多くはない。

松本ら⁷⁾は、通水量として「波による水の粒子運動および堤体の影響(乱れ等)により、堤体後壁を境として堤体前面から背後へ水が移動する量」と定義し、1室式透過防波堤および2室式透過防波堤の海水交換特性を実験的に調べた。そして、水深 15m の地点に建設された遊水室幅 $l=8\text{m}$ の1室式透過防波堤に、波高 $H=3\text{m}$ 、周期 $T=7\text{s}$ の波が入射した場合、反射波高 $H_R=0.6\text{m}$ 、伝達波高 $H_r=0.5\text{m}$ 、通水流量 $q=0.6\text{m}^3/\text{sec}\cdot\text{m}$ 程度になることを示した。また、岡本ら⁸⁾は有孔堤の一端に整流弁を取り付けて、堤内外の海水を波浪や潮汐のエネルギーを利用して一方向に流動させる弁式有孔堤の海水交換特性を調べた。その結果、交換水量は管の数に比例すること、短周期の波浪に対する交換効率が長周期の場合に比較して劣るが、弁の支点距離が短いと短周期の波浪であっても交換効率は向上すること、弁を堤内外どちらに取り付けても交換効率は殆ど変わらないこと、管径を変化させた場合、同一断面積当たりの交換効率は管径が小さいほど大きくなること、管の設置は水面に近いほど交換効率が良くなること等を明らかにした。

一方、国栖ら⁹⁾は3種類の防波堤構造、すなわち港外側に設けた斜面越流部を越えた波をいったん越流部背後の貯水槽に溜め水頭差により港内に導水するタイプ1、港外側から作用する波力によって遊水部に水面変動を発生させ、港内側との間に生じる水頭差によって港内に導

水するタイプ2, 平均的, 断面的に収斂させた導水部により通水管上の水位を上昇させ, その水頭差により港内に導水するタイプ3を対象として, 次式で定義される各タイプの流入効率 (Q/Q_0) を調べた.

$$Q/Q_0 = V'TA/(HLB/2\pi) \quad \dots\dots(1)$$

ここに, Q : 入射波1波当たりの流入水量, Q_0 : 入射波1波の水量 ($HLB/2\pi$), V' : 入射波1周期間の通水管出口の平均流速, A : 通水管断面積, H : 波高, T : 周期, L : 波長, B : 法線方向の有効堤体幅である.

越波を利用するタイプ1では, 入射波の多くの水量を越流部で遮るため, 港内への流入効率は0~0.18と小さかった. また, 遊水部の水面振動を利用するタイプ2では, 遊水部水面が入射波と共振するときには流入効率は0.45~0.96と高かったが, 短周期波の場合には流入効率は殆ど零となり, 波の周期による特性変化が著しい. また, 波の収斂作用を利用するタイプ3では, 流入効率は0.05~0.34であったが, 広範囲の波浪条件に対して安定した流入水量が期待できること等を示した.

さらに, 道下ら¹⁰⁾は図-4に示すタイプ3の流入効率が最大となる構造部材の最適諸元は, 導水斜面角度 $\theta_1 = 20^\circ$, 導水部収斂角度 $\theta_2 = 15^\circ$, 導水部入口クリアランス $h_{c1} = H$, 導水部入口深さ $h_a = 2H$, 導水管入口深さ $h_p = 1.5H$ であることを明らかにし, 通水管断面積は流入効率に対して顕著な効果を示さないこと, 潮位上昇による水理特性の変化は, 導水斜面頂部深さ $h_s/H = 0.2 \sim 2.2$ の範囲で短周期波に対して流入効率が0.1~0.2低下すること, また波の入射角度による流入効率の変化は顕著ではなく, $0 \sim 60^\circ$ の波向きに対してほぼ一定であることを示している.

また, Murakamiら¹¹⁾は開口部形状が異なる縦スリッ

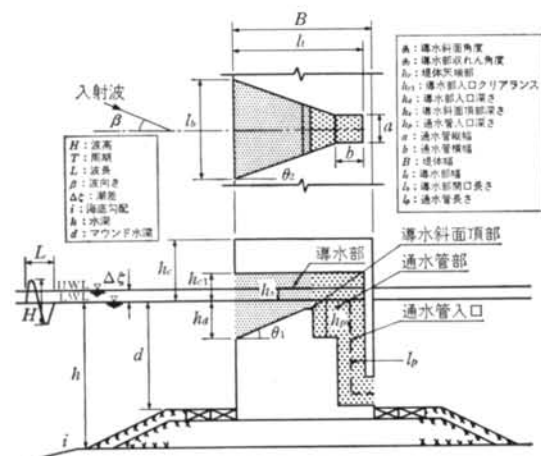


図-4 対象構造物の基本断面図

ト式透過堤に対して, 海水交流・交換に関する研究を行なうとともに, 防波堤の物質拡散能力を調べた.

4.2 曝気能

水域へ放流された有機性汚濁物質は, 好気性微生物の作用により酸化分解されて安定化するが, そのとき酸素が利用されるため水中の溶存酸素濃度は低下する. 溶存酸素濃度の低下が進むと, 魚類等の生息が困難になるばかりでなく, ついには嫌気状態となり水質の悪化を招くことになる. そのため, 気液界面を通して気相から液相への酸素移動機構の解明は, 水質の保全上から重要な課題の一つである.

完全混合場とした場合の曝気点での酸素の溶解は, 次式で表わされる.

$$\partial C/\partial t = k_2(C_s - C) \quad \dots\dots(2)$$

ここに, C は溶存酸素濃度 (mg/l), C_s は飽和溶存酸素濃度 (mg/l), t は時間 (h), k_2 は再曝気係数と呼ばれ溶解による濃度上昇を規定し, この値が大きいかほど急速に濃度が回復する. したがって, 再曝気係数は水表面付近での乱れのエネルギーと深く結び付けられる.

C_0 を初期濃度とし, C^* を無次元溶存酸素濃度として次式で与えると,

$$C^* = (C - C_0)/(C_s - C_0) \quad \dots\dots(3)$$

式(2)は次のように解ける.

$$-\ln(1 - C^*) = k_2 t \quad \dots\dots(4)$$

したがって, $-\ln(1 - C^*)$ の値を時間 t に対してプロットすれば, その傾きが k_2 となる. しかし, 水路などで沖方向への溶存酸素濃度分布があると厳密には式(2)は成立せず, 沖方向への溶存酸素の拡散を考慮して次式を考えることになる.

$$\partial C/\partial t = k_2(C_s - C) - D_x \partial^2 C/\partial x^2 \quad \dots\dots(5)$$

ここに, D_x は沖方向への拡散係数, x は沖方向への曝気点からの距離である.

さらに, 水路を流れのない半無限次元拡散場とし, 波による往復流の効果をも含めた拡散係数 D を水路内で一定として, 溶存酸素濃度 $C(x, t)$ の分布を考えると, 次の解析解が得られる.

$$C_*(x, t) = -\exp(Kx/2D + K^2 t/4D) \cdot \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt} + \sqrt{K^2 t/4D}) + \operatorname{erfc}(x/2\sqrt{Dt}) \quad \dots\dots(6)$$

$$\therefore \operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x), \quad K = k_2 h_b \quad \dots\dots(7)$$

h_b : 碎波水深

堀江ら¹²⁾は, 護岸の曝気効果についての実験方法の確立と解析方法の策定を試み, 1/30勾配の自然海浜, 異形ブロックを2段積みした消波護岸, 遊水部を有する縦ス

リット式の直立消波護岸および直立壁護岸について曝気能の相互比較を行なった。1/30斜面では、進行してきた波が砕波限界水深で空気を巻き込みながら砕波し、この砕波と砕波点以浅の水表面の乱れによって酸素の溶解が引き起こされる。ブロック積み護岸では異形ブロックに波が当たり、空隙を乱れながら水が進入して往復すること、スリット式護岸ではスリット間隔を強い流れが往復することなどにより乱れが発生し、酸素の溶解が引き起こされると思われる。また、直立壁護岸では前面に形成される重複波の腹の部分で水粒子の一部が水表面から跳ね上がり、落下することにより、水表面から酸素の溶解が引き起こされる。実験の結果から、スリット式護岸、ブロック護岸の曝気係数 K は直立壁護岸と斜面との中間の値となり、直立壁護岸の3~6倍、斜面の1/70~1/20倍程度であること、また同一波高に対しては反射率の小さい方が、反射率が類似のものは波高の大きい場合が、それぞれ高い K の値を示し、消波機構の似ている護岸相互での K は、一周期間の逸散エネルギー E_d の1~1/2乗に比例して増加すること等を明らかにした。

また、堀江ら¹³⁾は1/30勾配の自然海浜、曲面スリットケーソン堤および消波ブロック積み護岸について曝気能に関する比較実験を行ない、各構造物の再曝気係数 k_2 は同一周期の波については波高が高くなるほど大きくなること、同一波高の波に対しては周期の違いによる差異は顕著でないことを示し、また傾斜面の k_2 は他の消波構造物の k_2 に比べて1オーダー高いこと、曲面スリットケーソン堤の k_2 が消波ブロック積み護岸の k_2 よりやや大きいことを明らかにした。さらに、式(2)および式(5)から算定される k_2 の値を比較し、式(2)からの k_2 は式(5)からのものより1~2オーダー小さく評価するが、曝気点での溶存酸素濃度の上昇速度を測定することで容易に k_2 の値が算定できる点を考慮すると、近似的な予測方法としては妥当であるとしている。

海域の水質改善効果を維持するための溶存酸素濃度を左右する因子としては、曝気能に関係する構造物の消波による波のエネルギー逸散、曝気点で生じた溶入酸素量を岸沖方向および水深方向へ運搬する能力が挙げられる。

角野ら¹⁴⁾は、縦スリット壁式直立消波工に対して、また小田¹⁵⁾は狭窄部を有するパイプを、その中心軸が波の進行方向に平行になるように組み込んだ透過堤に対して曝

気係数 k_2 の代わりに1波当たりの再曝気係数 k_2T (無次元)を用いてエアレーション機能を評価している。縦スリット壁式直立消波工の場合、1波当たりの逸散エネルギー量 E_d の増加に対して k_2T も増加しており、両者には一定の関係が認められるが、 E_d を1波当たりの入射波のエネルギー E で除して得られる逸散エネルギー率 E_d/E と k_2T の間には明確な関係は認められず、縦スリット壁式直立消波工のエアレーション機能は、逸散エネルギー量よりもスリットを通過する水塊の総量と強い相関があることを示した。また、パイプ式透過堤の場合には水面付近から流出する噴流によって岸側、沖側水域とも溶存酸素濃度を増大させ、特に岸側水域の下部層の溶存酸素を増大させる効果が高いことを明らかにした。

細井ら¹⁶⁾は、各消波構造物に対する実験における再曝気係数 k_2 の値の分布を図-5のようにまとめた。さらに、消波による逸散エネルギーを考慮した再曝気係数の予測式を、次のように導いた。

$$k_2 = 1.35 \times 10^{-2} (DgH_0)^{1/2} (\varepsilon TB/\nu V_a)^{1/4} \cdot 1/h \quad \dots(8)$$

ここに、 D : 拡散係数、 g : 重力加速度、 H_0 : 沖波波高、 T : 波周期、 ε : 消波により逸散するエネルギーの割合、 B : 波進行方向に直角な幅、 ν : 動粘性係数、 V_a : エネルギー逸散に係わる水の体積、 h : 曝気域の水深である。そして、図-6に示すように、異なったスケールで行なわれた種々の構造物の再曝気係数の実験値と予測値を比較検討することにより、上式の妥当性を確認した。

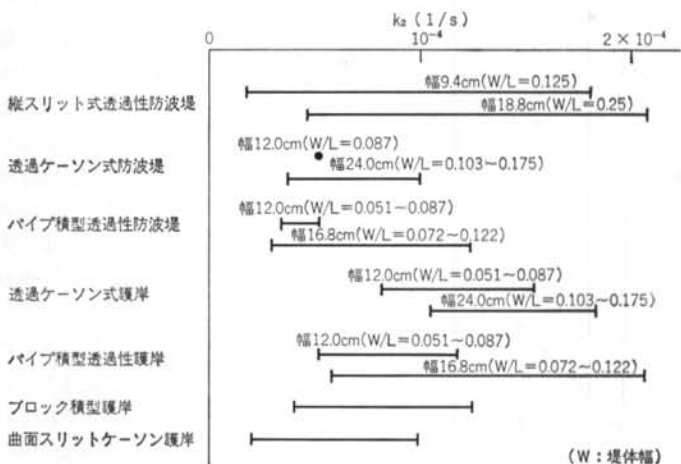


図-5 各種構造物の再曝気係数値

§ 5. 港湾構造物と浄化機能の複合化

本章では、前述した諸々の理由により生物膜浄化法を港湾構造物あるいは人工海浜、人工干潟等、疑似自然海域に組み込んだハイブリッド構造物を提示し、それを提示するに至った理由についても述べる。

5.1 生物膜浄化法

生物膜を用いた水の浄化法は、もともとは河川等淡水の自浄作用を模倣しようとした試みに端を発する。歴史の比較的古い散水濾床法や、次いで開発された回転円板法、接触曝気法、最近開発された流動床法も生物膜法の一つである。これらはいずれも好気性処理であるが、近年嫌気性処理にも生物膜法が使われるようになってきた。また、近年各種の微生物固定化法が研究開発されるようになり、生物膜法も微生物固定化法の一つとして捉えられるようになってきた。

生物膜法の特徴、利点は以下のようであり、これらの諸特性は淡水、海水のどちらを対象としても殆ど共通である（ただし、海水を対象とした知見は極めて少ない）。

(1)水中の有機物、窒素、りん等が生物膜中に棲息する微生物により摂取され、微生物が増殖し生物膜が成長する。酸素の拡散速度と消費速度の大小の関係から、一般に膜が厚くなると表層部（150~200 μm ）は好気状態に

保たれるが、深部は嫌気性代謝により有機酸や H_2S が生成する。嫌気性層では微生物の一部が嫌氣的に分解し、生物膜の接触材からの脱落が起こる。

(2)浄化に関与する微生物が多様であり、比増殖速度の小さい生物でも生息することができる。硝化菌や脱窒菌など比増殖速度の遅い菌体も安定して増殖できる。すなわち、硝化、脱窒能力が高い（魚類にとって毒性の強い $\text{NH}_4\text{-N}$ の含有量を低減できる利点がある）。

(3)浄化の程度により、それぞれの場所（系）での優占種が異なる。生物膜では、一般の浮遊汚泥法に比べ原生動物、特に後生動物の占める割合が著しく大きい。細菌を捕食する生物よりもさらに高次の栄養レベルの、エネルギー消費率の高い生物である輪虫類、吸管虫類、肉食性纖毛虫類、貧毛類、線虫類等が棲息し、食物連鎖が長くなる。

(4)食物連鎖が長く、そのため発生汚泥量が少ない。

海水の浄化は、生態系の一環としてマクロの捉え方が中心で、生物膜単独に取り上げられるようになったのはここ3~4年である。

堀江¹⁷⁾は砂浜、干潟などの自然海岸および直立護岸、石積み護岸、異形ブロックによる海岸構造物の浄化効果の比較を東京湾の4カ所で行ない、消波>干潟>石積み護岸>砂浜>直立護岸の順で前者ほど能力が大きいく、しかも生物消費に起因する割合が大きいくことを示した。

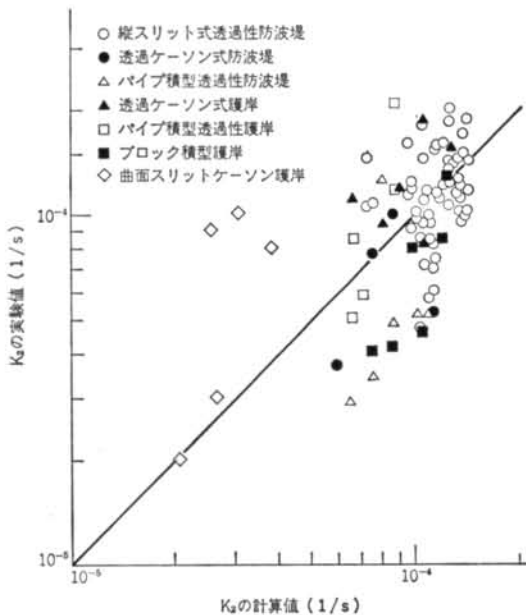
砂浜での浄化能は、潮間圏が大きくとれるほど絶対有機物除去量が増すことになる。また、温度が高いほど高く、COD値で夏期70~80%、冬期に20~25%の値が得られたとの報告もある。

砂浜と礫浜の比較においては海水の流出量は礫浜の方が大きいが、比表面積が砂浜の方が大きいため、①高い有機物分解能をもつこと、また②高い硝化能力をもつことが示されている。

研究者により砂浜、干潟等の浄化能力の値に差が出るのは、基質の差、有機物のSS起因割合の差、交換水量の差、温度の差など色々な要因がある。しかし、海岸線1kmを考えた場合、交換水量は1潮汐で300t（小潮）~3000t（大潮）位であり、1潮汐で1km当たり30,000tと約10倍の水量を浄化したい本目的に比べ1~2桁小さい。

河川水を対象として、礫間接触浄化法の形で生物膜法はかなりの実績を積んできており、定量的研究も2~3報告されている¹⁸⁾¹⁹⁾。これらについては、同時に発表する論文の中で詳しくレビューしている。

海水の生物膜浄化法は、砕石、人工骨材、ブロック等を用いた接触浄化法に関する研究がここ2~3年行なわ



図—6 再曝気係数の計算値と実験値との比較

れ出しているが²⁰⁷⁻²⁵⁷、実績は殆どない、運輸省と当社を含む民間17社よりなるシーブルー工法研究会との「汚濁海域の浄化に関する共同研究」もその一つであり、幅1m、長さ33mの水路6本、小水路3本を用いて運河水を対象として、①水理特性に関する検討、②浄化能に関する検討、③設計手法に関する検討、④施工法に関する検討等、実験的研究をベースとして実用化までの一連のスタディーを実施中である。

河川水と海水の生物膜法による浄化能の同一条件での比較研究²⁵⁸は殆どないが、大略以下のことがいえそうであり、詳細は前述の研究成果や当社での成果²⁶⁰、さらには鋭意同時進行中の種々の検討成果が待たれるところである。

(1) SS 分の除去と透視度の向上に卓抜した能力を発揮する。SS 分の除去率は海水と河川水で大差はないが、河川水の方が少し優る。

(2)有機物の除去は海水、河川水とも SS 分ほどには期待できない。本項についても河川水の方が優っている。これは、河川水と海水では海水の方が難分解性のものが多いことに起因している。

(3)水路内での CO 消費はどちらもかなり大きい値であるが、生物膜の接触材への粘結性は河川水の場合の方が大である。

(4)比表面積の大きいほど接触材浄化能力(SS除去、有機物除去とも)は大きい。しかし、その場合接触材の目詰まり対策が不可欠となる。

(5)T-N の除去は、生物膜が増殖できる環境下では細胞合成成分として若干の除去が可能である。しかし、生物脱窒は余り期待できない。

5.2 港湾構造物と浄化機能の組み合わせ (ハイブリッド化) の必要性

海水、海域の浄化は、前述のごとく技術的にも経済的にも大変難しい課題である。このような難題の解決に当たり、例えばソフト的には生物処理技術(広くは、バイオテクノロジー)、自然エネルギー利用技術、流況制御技術等の組み合わせ、ハード的には港湾構造物と浄化施設(機能)との組み合わせ、ハイブリッド化は以下の点で必然的帰結であると考えられる。

(1)海水の種々の特性(例えば、大量で薄い)および環境改善による受益者が不明確等の理由で、なるべく維持管理費が安価で、かつ建設費の安い方策が必要である。港湾構造物と浄化施設を組み合わせることにより、「もともと港湾に必要な施設に少し建設費を足して浄化機能が付加できる」というメリットがある。

(2)投資の点から特定できる半永久構造物が望ましい。

(3)ランニングコストを下げるためには、自然エネルギーの利用は不可欠である。

(4)原理的には、生態系にマイナスのインパクトを与えることがない点からも、自浄作用を促進するようなものが望ましい。

以上の一連の考察より、生物膜法および微小生物を生物膜と共働させたような浄化手法と港湾構造物とを組み合わせた施設を構築し、自然エネルギーを利用して溶存酸素を付加した水を動かすことにより浄化する手法が自然とクローズアップしてくる。ここでいう港湾構造物には、広く人工海浜、人工干潟等を含んでいる。

5.3 ハイブリッド化の考察事例とフィージビリティスタディー

5.3.1 ハイブリッド化構造物の適用概要

1) 対象区域

社会的ニーズ等は前述のとおりであるが、ここでは地形的な考察をする。一つの湾を中心とした海域の大まかな分類を図-7に示す。ここで、(A)の外洋等、水の交換が良く DO の補給が盛んな場所は浄化の対象外とする。徐々に水の交換が悪くなり、水が滞り易い湾口(B)から湾奥(D)や運河(E)、また汚濁負荷が流入してくる河口(F)では浄化対策が必要となり、この海域が今回考察する浄化の対象となる。

2) 対象構造物

湾奥関係の構造物および港湾周辺において、浄化機能を組み込める可能性のあるものとしては、以下のものが考えられる。

- ・防波堤
- ・護岸
- ・人工海浜、なぎさ、干潟

防波堤の種類は、以下のとおりである。

- ・傾斜堤
 - 捨石式
 - 捨ブロック式

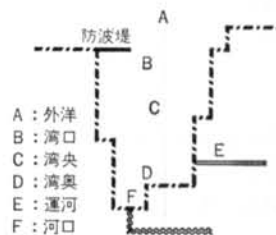


図-7 対象区域

- ・直立堤
 - ケーソン式
 - ブロック式
 - セルラーブロック式
 - コンクリート単塊式
- ・消波ブロック被覆堤
- ・特殊防波堤（鋼管、浮き、透過式、曲面スリットマルチセルラー式、潜堤）

護岸の種類は、以下のとおりである。

- ・傾斜型：石張り式、コンクリート被覆式、捨石式、捨てブロック式、階段式
- ・直立型：石積み式、重力式、ケーソン式、矢板式、コンクリートブロック積み式、石砕式
- ・混成式：上記の組み合わせ

3) 適用構造の選定

前項1)の対象区域における2)の構造物の適用の可能性は、以下のとおりである。

- 湾口部 (B)：防波堤、ラグーン
- 湾央部 (C)：干潟（水深により）
- 湾奥部 (D)：護岸、人工海浜、干潟
- 運河部 (E)：護岸
- 河口部 (F)：護岸

また、これらと生物膜との組み合わせを考えると、防波堤や護岸では接触材に礫を用いる礫間接触浄化法を用いることにより、それ自体が礫材の容器となり得るケーソン式が最も有力と考えられる。

人工海浜、人工干潟ではどのような構造をとり、どのような仕様（例えば、粒径）の接触材（例えば、礫、砂利）をどのように配置するかがポイントとなる。いずれの場合も自然エネルギー、特に潮汐を利用して、①水を取り込んだり、②生物膜と接触させたり、③溶存酸素を付加したりする必要があり、かつ目詰まり対策、排泥との係わりもあるので、使用目的、全体的配置およびその構造にはかなりの工夫が必要となる。

5.3.2 フィージビリティースタディー

1) 流下方式による検討

ケーソンを利用した護岸や防波堤では、潮の干満、潮流の方向を考慮してケーソン内部に配置した接触材（例えば、礫）に水をどう流すかの検討が必要となる。表-2に考えられる流下方式とその特徴をまとめる。なお、透過式消波堤やスリット式ケーソン防波堤では、表-2の直交流下型あるいは分流式流下型（特に、水路方向の流れが弱まった形）が適用でき、表-3の人工海浜、人工干潟の流下特性も表-2のどれかに分類できるので、表-2は原則として殆どすべての流下形式を包含している。

2) ハイブリッド化構造物の例

表-3に、浄化機能を組み込んだ港湾構造物（ハイブリッド化構造物）の例を示す。適用箇所、港湾構造物としての用途等から大別すると、以下のとおりである。

- ① 浄化護岸（湾奥部）
- ② 浄化親水護岸（湾奥部、運河部）
- ③ 浄化水路（運河部、湾中、奥部、導水）
- ④ 締切り浄化堤、透過型捨て石堤（湾奥部）
- ⑤ 人工浄化海浜、浄化干潟（人工海浜、干潟）
- ⑥ 潮汐エネルギーの変換利用（湾奥部、運河部）

表-3のどの構造をとるか、どのような目的で、どの程度の浄化能を持たせるかによって異なるが、目安として港湾構造物本来の建設費に20%程度上乗せをすることによりハイブリッド化構造物の造成ができ、1km当たり30,000t/日程度の浄化が可能となる。

5.4 ハイブリッド化構造物の技術的課題

5.3で提示した浄化機能を付加したハイブリッド化構造物に共通の技術的課題として著者等が行なった基礎的検討および調査等から、以下のことが挙げられる。

- (1) SS 負荷条件、滞留時間、接触材の選択等と目詰まりとの関係を明確にし、目詰まり対策あるいは目詰まりを生じない設計手法を開発する。
- (2) 固形物捕捉の機構を明らかにしモデル化を行なう。
- (3) DOの効果を明確にしDO付加の方法を開発する。
- (4) 栄養塩類に対する対策を明確にする。
- (5) 合理的な排泥方法を確立する。

§ 6. おわりに

本論文では、海域浄化に関するニーズ、背景、コンセプト、海域浄化を考える上でのポイントを述べ、その中

形式	概念図	特徴
一定方向流下型		・礫材の配置がシンプル ・入口部の目詰まりが問題
合流式		・短時間に大量の水を取り込める ・均等に浄化が行なえるような礫材配置が必要
交互流下型		・転流時に取水量が落ちる ・取水部の目詰まりが解消できる可能性がある
分流式流下型		・短時間に大量の水を放水できる ・均等に浄化が行なえるような礫材配置が必要
交互流下型		・短時間に大量の水を取放水できる ・水路が水の流れを遮る形での設置となる可能性がある

表-2 流下方式

名称	縦斜浄化デッキ	縮切浄化堤	浄化防波堤	捨石堤等で囲まれた静水域	浄化導水路	人工海浜・干潟
主旨	<ul style="list-style-type: none"> 既存の直立護岸に親水性を高め浄化機能を組み込んだ縦斜護岸を構築 適用場所：直立護岸（海、川、運河等） 市場性：既存の構造物に付加するものなので市場性大 	<ul style="list-style-type: none"> 適用場所：船舶航行がなく、浄化堤の延長がそれほどこ長くなると、かつ流入する川がない場合 市場性：上記の条件があるもので、ある程度限られる 	<ul style="list-style-type: none"> 砕波エネルギーによりDOを増加させ、内部で浄化を図った防波堤 適用場所：内湾で、比較的波があり、かつDOの要求される水域 市場性：波がある所は比較的ながいので、市場性は限られる 	<ul style="list-style-type: none"> 捨石堤等で囲まれた静水域（親水） 適用場所：船舶航行がなく、周囲の汚染の汚染がそれほど進んでいない所 市場性：リゾートへの需要が特に大きい場合有望 	<ul style="list-style-type: none"> 都市内部の運河や閉鎖性の水域に外海と比較的きれいな水を引く浄化水路 適用場所：都市内部の運河や閉鎖性の水域 市場性：コストと運営条件から適用が限られる 	<ul style="list-style-type: none"> 特殊構造の海浜、干潟により浄化作用の促進を図る 適用場所：都市近郊の海岸線 市場性：需要は多い（例：細毛、豊張）
適用場所と市場性						
制限条件	<ul style="list-style-type: none"> 防風性に制限がある場合難しい 船舶の航行に支障を与える場合には難しい 	<ul style="list-style-type: none"> 船舶航行がないこと 流入出水量のバランスに注意 堤の手前の水だけの循環とならないような配慮が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 波が有効に使われる所 耐摩耗性の申請材を使用する必要がある 	<ul style="list-style-type: none"> 干渉差がある程度ある 用途：船遊び（ボート）、水遊び、水泳 	<ul style="list-style-type: none"> 導水後、水が系外へ排出できる流れを持つような配慮が必要 	<ul style="list-style-type: none"> 養浜用の良質な砂が得られること 目詰まりを起さぬような充填構造
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 既存の直立護岸に親水性を付加することにより浄化水路部に曝気効果を与えられる デッキ構造にすることにより構造物が節約可能 	<ul style="list-style-type: none"> 半閉鎖性水域での浄化が図れる 浄化堤上部を遊歩道等に利用できる 堤の陸側に静穏水域が得られる 	<ul style="list-style-type: none"> 砕波エネルギーによりDOを増加させることが可能 波のある場所に静穏海域を造成 	<ul style="list-style-type: none"> 半閉鎖性水域での浄化が図れる 粒径が異なる岩石、砂利等を浄化の程度に合わせて使用し、岩場、ラグーン、砂利浜、砂浜等種々の遊び場を造成し易い 	<ul style="list-style-type: none"> 停滞している運河等に外海と比較的きれいな水を、浄化水路を通すことで一層きれいな水にして導水する（潮位差を利用） 	<ul style="list-style-type: none"> 潮汐を利用して人工海浜または人工干潟内の海水交換を促進し造成材料との接触により海水を浄化
構造						

表—3 浄化機能を組み込んだ構造物の例

から自然エネルギーを利用し、原理的には自浄作用の促進、そのための港湾構造物と浄化施設の複合化、ハイブリッド化を図ったシステム構築の必然性を述べた。さらに、港湾構造物の浄化に関連する水理特性に関する研究の現状をレビューし、ハイブリッド化の基本構想とモデルを示すと同時に、フィービリティスタディー（フェーズⅠ）を行なった。

海域汚染防止の効果的手法として、①海域への流入負荷の削減、②海底の堆積汚泥からの溶出制御、③湾内水

の循環、拡散、外海水との混合、外海水の導水、④天然または人工の曝気作用の利用等他にも多くの手法があるが、これらは従来からも報告されているので本報では触れていない。

この海という環境資源が有効利用され、アメニティー空間としての環境創造が進むなかで足元から一歩ずつ、“一本の運河”が、“湾奥の一部”が、そして徐々に徐々にきれいな海域が広がっていくことを願って止まない。

<参考文献>

- 1) 環境庁編：“環境白書”大蔵省印刷局（1991年）
- 2) 総理府広報室編：“月間世論調査「国民生活」”（1990年）
- 3) シーブルーテクノロジー研究委員会：“シーブルー計画”（1989年）
- 4) 近藤俊郎・渡部富治：“環境保全効果を考慮した海洋エネルギー利用の経済性評価”土木学会第46回学術講演会講演概要集（1991年）
- 5) 近藤俊郎・渡部富治：第3回波浪エネルギー利用シンポジウム論文集（1991年）
- 6) W. Fulkerson, R.R. Judkins & M.K. Sanghvi: Scientific American (Sept. 1991)
- 7) 松本輝寿・永井康平・越智雅敏：“直立消波透過型防波堤の波浪および通水特性に関する実験的研究”第23回海岸工学講演会論文集（1976年）
- 8) 岡本博・森下俊夫：“海水交換機能を持つ弁式有孔堤について”第32回海岸工学講演会論文集（1985年）
- 9) 国栖広志・道下勲：“海水交換構造物の研究”五洋建設技術研究所年報 Vol. 16（1978年）
- 10) 道下勲・葛原徹：“鉛直管の水面固有振動を利用した海水交換構造物の水理特性”五洋建設技術研究所年報 Vol. 17（1988年）
- 11) H. Murakami, & V. Hosoi: “Characteristics of Diffusion and Aeration due to Wave Action near Permeable Breakwaters” Proceedings of 21st Coastal Engineering Conference, ASCE (1988)
- 12) 堀江毅・細川恭史・三好英一：“護岸の曝気能比較に関する実験”第27回海岸工学講演会論文集（1980年）
- 13) 堀江毅・細川恭史・三好英一：“構造物によるエアレーション効果比較模型実験”第34回海岸工学講演会論文集（1987年）
- 14) 角野昇八・小田一紀：“縦スリット壁式直立消波工のエアレーション機能”海岸工学論文集 第36巻（1989年）
- 15) 小田一紀：“パイプ式透過堤の水理特性および曝気特性に関する研究”海岸工学論文集 第37巻（1990年）
- 16) 細井由彦・村上仁士・三井宏：“各種海岸構造物の曝気効果と再曝気係数の予測式”第35回海岸工学論文集（1988年）
- 17) 堀江毅：“海域の物質循環過程のモデル化と浄化対策効果の予測手法について”港湾技術研究所報告 第26巻（1987年）
- 18) 中村栄一・酒井憲司：“礫間浄化法による汚濁水の浄化”土木技術資料 第25巻（1987年）
- 19) 木下英俊：“河川の浄化—多摩川における水質浄化対策—”水質汚濁研究 第12巻（1989年）
- 20) 細川恭史・大槻忠・丹羽千明：“生物膜法による低濃度汚濁海水の高度処理”第25回水質汚濁学会講演集（1991年）
- 21) 毛利光男・細川恭史・窪田博公他：“礫間接触水路の縦分散係数について”土木学会第46回年次学術講演会講演概要集（1991年）
- 22) 田沢竜三・佐藤弘・櫻内孝信：“閉鎖性海域における低汚濁海水の直接浄化に関する研究”土木学会第46回年次学術講演会講演概要集（1991年）
- 23) 大屋博史・小田一紀・貫上佳則：“海水と河川水に対する礫間接触膜の浄化効果の比較実験”土木学会第46回年次学術講演会講演概要集（1991年）
- 24) 上原功・細川恭史・門倉伸行：“礫間接触水路における初期損失水頭について”土木学会第46回年次学術講演会講演概要集（1991年）
- 25) Y. Hosokawa, T. Ootuki, & C. Niwa: “Channel Experiment on Coastal Water Purification by Porous Bed using Crushed Stones” IAWPRC 16th Biennial International Conference, Washington, DC, 1992 (投稿中)
- 26) 丹羽千明：清水建設技術研究所内部資料（1991年）