

ウォーターフロントの環境問題

村 上 仁 士

1. まえがき

ウォーターフロントは陸と海との接点として、昔から人間の生活空間として利用され、また生産活動・物流活動の場として発展してきた。高度成長期とその後の安定成長期を経たいま、生活水準は飛躍的に向上するに至り、生活の力点も量的な充実から質的な充実へと移行し、人の心は物質的な豊かさよりも心の豊かさを求める傾向が強くなっている。こうしたハード面よりソフト面が重視されるようになって、ウォーターフロントもこれまでの漁業や産業活動の場から、地域住民や一般に開放された空間へと移行しつつある。すなわち、釣り、サーフィン、ヨット等のレジャーやレクリエーション用として、また水辺景観を創造し、水とのふれあいを強調したアメニティを向上させること等がウォーターフロントに重視されるようになってきた。

わが国の各省庁においても沿岸海域利用構想を独自にうち出しており¹⁾、いずれも外海に面した厳しい波浪条件に耐える波浪制御構造物を建設し、背後に造成された静穏な水域を多角的かつ高質・有効に活用しようとする傾向にある。したがって、外海に面して建設される防波堤に課せられる機能は、本来の防波や反射波の低減機能に加え、海水交流・海水交換の促進や水産養殖の場として利用できる等の多目的な機能を有するものとなる。しかし、新しく造成される水域の水質の悪化は防止しなければならず、その方法や技術的課題に対しては、まだまだ基礎研究を要するものも多い。ウォーターフロントの利用度が高まるにつれて、今後益々水域の環境問題が重要になることは必至である。

表-1 各浄化工法の比較²⁾

浄化工法	方 法	技 術 的 課 題	効 果 (注)			経 費 等 (注)	
			影響範囲	直接的効果	持続性	工 費	維持費
負 荷 削 減	二次処理、三次処理の徹底	効率的処理技術の開発	広 い	大 き い	高 い	処理場等の建設費が必要	ランニングコストが必要(△)
			(○)	(○)	(○)		
溶 出 量 削 減	ヘドロ液状化、砂、レンガ工法	薄層液状化技術の開発 二次汚濁防止技術の開発 液状土砂処理技術の開発	閉鎖性の海域においては効果が大きい	溶出を直接制御するため効果は大きい。負荷削減に比べると効果は小さい	新たな堆積物により効果は減衰する	液状化や砂の規模が大きくなると工費は大きくなる	ランニングコスト的なものは不要
			(○)	(○)	(○)	(△)	(○)
海水循環・海水交換の促進	湾口部拡張、防波堤形状、配置、航路掘削、透過性構造物、さくれい	流れの制御技術の開発 湾口部断面と海水交換との関係	増速域では効果的	大 き い	高 い	港湾、海岸工事と一体的に行えば経済的	増設または洗掘のための維持、補修が必要
			(○)	(○)	(○)	(○)	(○)
導 (ナーキョーレーション)	外海水のバイパス導入、貯水池からの放流、レシートカット	水質の確保 送水方法	流れの増速領域では効果的	海水交換が促進される場合は効果的	高 い	送水施設、レシートカットなどの工費が必要	送水方式によってはランニングコストが必要
			(○)	(○)	(○)	(△)	(△)
エアレーション	人工ばっ気法	安価なエネルギー源の確保	散気管近傍の狭領域に限られる	ばっ気効果、鉛直混合効果	連続して散気しないとも効果は小さい	散気装置が必要	散気のためのエネルギー(電力)を多量に必要とする
			(△)	(△)	(△)	(△)	(△)
構造物の利用	構造物利用	海域利用目的に促した構造物の型式および配置	海岸線のベルト領域	消波効果の大きい構造物はばっ気効果も大きい	高 い	構造物の本来機能に対する付加機能として考えることができる	不 要
			(○)	(○)	(○)	(○)	(○)
構造物の活用 (利用型式)	付着生物、底生生物の通過作用	本来機能に対する新たな機能の付加	海岸線のベルト領域	生物通過による効果が大きい	高 い	構造物の本来機能に対する付加機能として考えることができる	不 要
			(○)	(○)	(○)	(○)	(○)

(注) ○：安価、良好、または大した問題なし △：中位 高価、または問題あり

堀江²⁾は、汚染海域の浄化法として表-1に示すような工法を抽出し、それらの方法、技術的課題、効果、経費などについて各浄化工法を比較している。これらはまだ未解明の問題が多く今後の研究課題も多いけれども、それだけに研究意欲をそそるものが多い。

本論では、ウオーターフロントの環境問題を考えるにあたり、種々の浄化工法の解説を行うものではなく、浄化工法を考えるうえでの基礎的知見をうることを目的としている。。まず、遮へいされた静穏域の水質を左右する海水交流・交換について述べ、ついで、自然海浜や防波堤・護岸における砕波やそれに伴う乱れによる酸素の取り込みの機構と、そのようなエアレーションによる水質浄化機能について述べる。さらに、汀線付近では微生物の増殖が活発であり、それらによる自浄作用が期待できるが、汀線付近の水質に及ぼす生物化学的酸化機能について述べる。

2. 海水交流・交換による沿岸水域の浄化

2. 1 閉鎖性水域における海水交流・交換

閉鎖的な水域の水塊は、湾口や開口部を通じて清浄な外海水との交流・交換が行われ、水質の回復が期待できる。海水交換の概念は、対象水域を満たしている水が、その水域外へ出ることによって、水全体の総量は変わらないが含まれる物質量が減少することであると定義される。海水交換の概念やその応用的研究例については武岡^{3), 4)}が、総括的にまとめている。

湾内全体の物質の交換ではなく、湾口や開口部での物質の交換能力を評価しようとするには、1潮汐周期での海水の交換量と潮汐周期の海水交流量の比を海水交換率と定義し、この交換率を求める方法がよく行われている。Parker⁵⁾、柏井⁶⁾らの研究がそれで、上げ潮、下げ潮のそれぞれの平均濃度、湾内外の代表的な濃度を用いてそれぞれ定義の異なる交換率を求める方法を提案している。この方法は比較的簡単に、開口部での物質の交換を記述できるが、何と何との交換であるか定義を明確にして用いる必要がある⁷⁾。しかし、この交換率 α や、潮流の平均流速 $\bar{u}$ 、潮流の最大流動距離 l を用いて、拡散係数 D を

$$D = \frac{1}{2} \alpha \bar{u} l \quad (1)$$

のように表し、局所的な物質輸送能力を定量的に評価するという利点もある。

一方、水域全体の持つ交換能力の評価には、残余関数 $r(t)$ を用いると便利である。残余関数とは、対象とする水や物質の量の初期値を R_0 とし、時刻 t におけるその物質の残量を $R(t)$ とすると、 $r(t) = R(t) / R_0$ で定義される。いま、 $r(t)$ の積分値

$$\tau_r = \int_0^{\infty} r(t) dt \quad (2)$$

は対象とする物質の一つ一つが対象水域外へ出るまでに要する時間の平均値（平均滞留時間）であり、水域全体の輸送能力を定量的に表現できる量である。図-1のような湾に、ある量の物質が瞬間投入されたとする。この物質は湾内で拡散しつつ湾外へ出てゆき、湾内の物質量は減少する。この存在量を初期の投入量で無次元化した関数が輸送にかかわる全ての過程の結果を表した残余関数 $r(t)$ である。この積分 τ_r は投入された物質が湾外へ出て行くまでの時間の期待値であり、これが平均滞留時間である。したがって海域の全部の水 V_T を一つの水の集合とみなし、この V_T についての残余関数 r_T 、平均滞留時間 τ_T を考えれば、 τ_T は海域全体の汚れ易さの尺度を表すことになる。

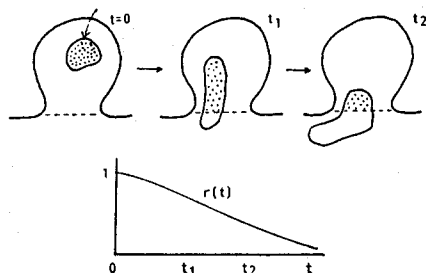


図-1 沿岸域への入力と残余関数⁴⁾

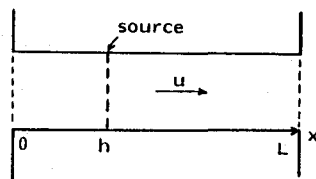


図-2 水路の1次元モデル⁴⁾

武岡⁴⁾は1次元の水路モデル(図-2)を例にとり、移流拡散方程式を、水路から出た物質は水路へ戻らないとして、境界条件として水路両端で濃度0を与えて、この水路の $x = h$ に物質を瞬間投入した場合の解から、この物質の残余関数、平均滞留時間(図-3)を求めた。

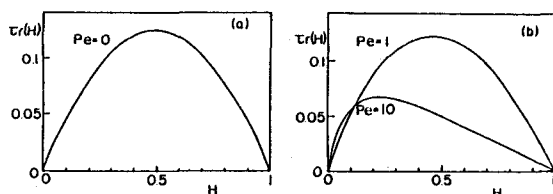


図-3 $X = H$ に投入された物質の水路における平均滞留時間⁴⁾

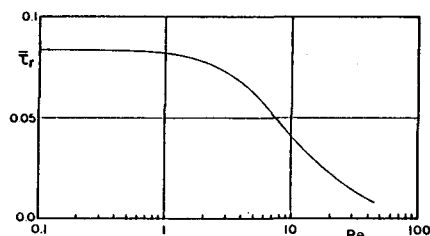


図-4 水路全体の水の平均滞留時間と P_e の関係⁴⁾

図の H は水路の長さ L で規格化した投入点の座標($= h/L$)であり、縦軸は H に投入された物質の平均滞留時間 $\tau_r(H)$ である。この $\tau_r(H)$ は、拡散時間(L^2/D)(D は拡散係数)で規格化してある。また P_e はPeclet数 $\{ (L^2/D) / (L/U) = LU/D \}$ である。この P_e は大きいほど水路の水の交換に相対的に移流の効果が強く、小さいほど拡散の効果が強いことを意味している。水路内の水全体の平均滞留時間 $\bar{\tau}_r$ は水路全体に均一に物質を瞬間投入した場合の解から得られ、図-4のようになる。

この効果から、 $P_e < 1$ では $\bar{\tau}_r$ の値はほとんど P_e 数に依存せず、 $P_e = 0$ の場合の値にほぼ等しい。したがってこのような範囲では海水交換はほとんど拡散によって行われることがわかる。このように平均滞留時間より水路内の総合的な輸送力を評価することができる。武岡⁴⁾は湾に対しても同様の考え方ができることを例示している。

2.2 透過堤における海水交流・交換

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。とりわけ防波堤により海域を遮蔽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。松山港外港地区防波堤や七尾港、室蘭港などではこうした機能をもつ透過性防波堤が採用されている。表-2は複数の機能を有する防波堤の例を示したものである⁸⁾。

表-2 防波堤に要求される機能の調査結果⁸⁾

施設名	港 名	所在地	施設名称	構造タイプ	竣工 年次	備 考											
						防 波 岸	反射波の 低減	海水交換	砂浜欠損 の防止	航路埋没 の防止	景観	漁場の 保護・開発	漁釣り	レクリエー ション	その他		
防波堤	横 濱 港	北海道	中防波堤	多孔式ケーソン		○		○									
○	宮 崎 港	○	船渠防波堤	多孔式ケーソン	S. 51	○		○	○								
○	秋 田 港	秋田県	波 除 堤	縦型スリット式ケーソン	S. 55	○		○									
○	七 尾 港	石川県	府中防波堤	2重開口式ケーソン+既	S. 52	○		○	○								
○	飯 沼 港	大分県	防 波 堤	縦型スリット式ケーソン		○		○									
○	大 瀬 港	○	防波堤(大和川側)	縦型スリット式ケーソン	S. 52	○		○									
○	神 戸 港	兵庫県	第六南防波堤	縦型スリット式ケーソン		○		○									
○	鹿 島 港	○	防波堤(内)	多孔式ケーソン		○		○									
○	香 取 港	○	防波堤(東)	多孔式ケーソン		○		○									
○	松 山 港	愛媛県	外港地区防波堤	高床ケーソン式ケーソン 縦型スリット式ブロック	S. 52	○		○	○								
○	高 松 港	香川県	外 防 波 堤	縦型スリット式ケーソン	S. 51	○		○									
○	今 治 港	愛媛県	防 波 堤	縦型スリット式ケーソン		○		○									
○	北九州港	福岡県	太刀浦東防波堤	縦型スリット式ケーソン	S. 55	○		○									
○	堺 子 港	佐賀県	防 波 堤	多孔式ケーソン		○		○									
○	舞 岡 港	愛媛県		通水型ブロック		○		○	○								
○	行 野 港	三重県	東 防 波 堤	通水型ブロック		○		○	○								
○	片 倉 港	千葉県	南・北防波堤	橋 鋼 橋	S. 48	○					○						
○	香 住 港	兵庫県	西 防 波 堤	ケーソン式通波堤		○						○	○				○
○	清 水 港	静岡県	三浦防波堤	ケーソン式通波堤	S. 48	○				○				○			
○	広 野 火 力	福島県	放水口導流堤	橋 鋼 橋	S. 57	○											
○	那 覇 港	愛媛県		岸消波堤	S. 54	○			○					○			
○	延 岡 港	宮崎県		岸消波堤	S. 58	○			○					○			
○	浦 島 港	兵庫県		岸消波堤	S. 48	○			○					○			
○	熊本県鼠口区	熊本県		岸消波堤	S. 56	○			○					○			
○	—	—		空気防波堤		○		○	○			○	○				○

凡例 ○：主目的としている機能
○：付随する機能

波による透過堤の海水交流・交換に着目した研究は多くない。その原因は堤内外の物質の交換は流れに支配されると考えられるからである。しかしながら潮流が支配的でない場では波による効果にたよらなければならない。高ら⁹⁾は須磨港の狭間のある防波堤に対し、その透過波による拡散係数を求めている。それによれば実スケールで3~40 cm²/sの値を得ている。

著者ら^{10)~14)}は開口部形状が異なる縦型スリット式透過堤に対し海水交流・交換に関する研究を行うとともに、防波堤の物質拡散能力を次のような方法で評価しようとした。1次元水槽に透過堤を設置して、図-5のようにx=x₀にエタノールで比重調整した4000mg/lの食塩水をトレーサーとして投入し(堤より沖側および岸側に投入するための座標軸のとり方に注意)、トレーサーの拡散は1次元拡散方程式にしたがうとして、

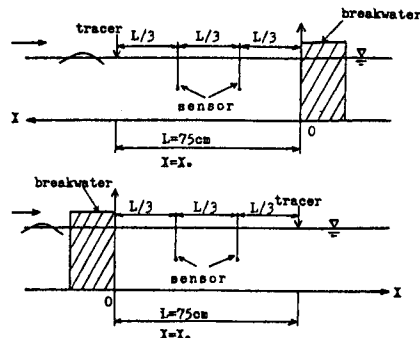


図-5 座標系

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (3)$$

を境界条件

$$\left. \begin{aligned} C(0,0) &= \infty \\ C(x,\infty) &= 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} C(x,t) dx &= M \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

のもとに解いて次式の解を得た。

$$\left. \begin{aligned} C(x,t) &= \frac{M}{2\sqrt{\pi K_x t}} \left[\exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{4K_x t}\right\} + r \exp\left\{-\frac{(x+x_0)^2}{4K_x t}\right\} \right] & x > 0 \\ C(x,t) &= \frac{M}{2\sqrt{\pi K_x t}} (1-r) \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2}{4K_x t}\right\} & x < 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 $C(x, t)$ はトレーサーの濃度、 K_x は1次元拡散係数、 M はトレーサーの投入総量である。また、式(5)の r は、透過堤での物質の反射の割合を示すもので、堤がなければ $r=0$ 、不透過堤の場合は $r=1$ になる。したがって、堤の物質交換能力を示す指標といえる。実験値は、 $x_0=L$ (75 cm)の位置にトレーサーを投入し、 $x=L/3$ および $2/3 L$ (L =波長)の位置の濃度の時間変化よりシンプレックス法により実験結果に最適な K_x および r の値を求めた。

図-6は防波堤の沖側における拡散係数とエネルギー逸散率 ε ($=1-r^2_R-r^2_T$, r_R :波の反射率, r_T :透過率)との関係を示したものである。図中のSP、GC等の記号¹⁴⁾は縦型スリットの開口形状を表したものであるが、開口形状による明確な違いはなく、エネルギー逸散率が大きくなるほど拡散係数も大きくなるようである。本実験で得られた拡散係数の値は防波堤の沖側、岸側とも $2\sim 70 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の値であり、静水中の拡散係数が $0.04\sim 0.06 \text{ cm}^2/\text{s}$ に対し $10^2\sim 10^3$ 倍、進行波中の拡散係数 $1\sim 9 \text{ cm}^2/\text{s}$ の $2\sim 8$ 倍の値となった。本実験で用いられた槽型は原型の $1/100$ 程度のモデルであり、現地スケールの拡散係数に換算すると、 K_x は $10^3\sim 7\times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ 程度の値となる。

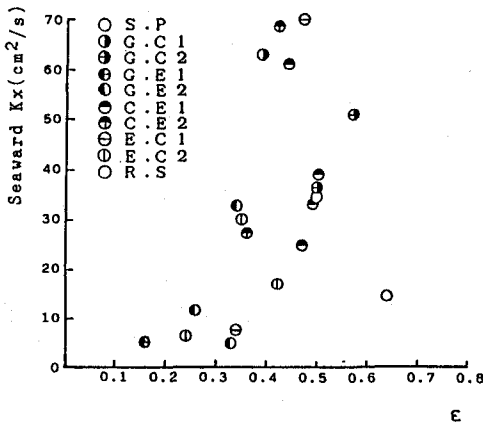


図-6 拡散係数(沖側)とエネルギー逸散率との関係

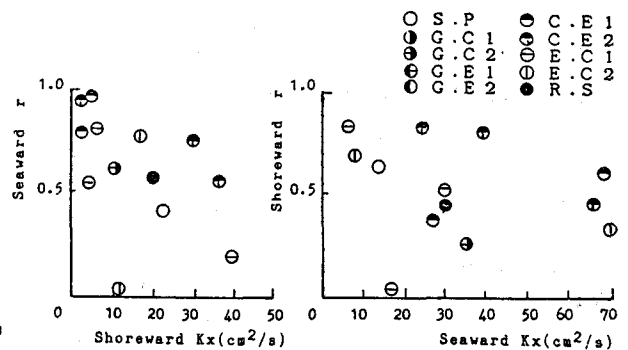


図-7 r と K_x との関係

一方、 r の値はスリットの開口幅が大きくなるほど大きな値を示し、堤近傍の物質はかえって堤を通過せずによく反射し、したがって、沖側（岸側）の r の値は岸側（沖側）の拡散係数と負の相関があるという結果も得られている（図-7）。

3. 波によるエアレーションによる沿岸水域の浄化

3.1 斜面における砕波によるエアレーション

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に、水中の溶存酸素濃度（以下DO濃度という）は低下する。DO濃度の低下が進むと、魚類等の生息が困難となるばかりか、ついには嫌気状態となり水質の悪化を招くことになる。とくに沿岸部は海水浴や観光等のレクリエーションの場として人間とのつながりが強く、その水環境の保全には十分な注意が払われる必要がある。

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り、また、自然の水域における効果的な曝気法に関する研究は興味深いテーマである。

(a) 砕波形態の違いによる再曝気係数の評価

気液界面における物質移動モデルは、Whitman-Lewis¹⁵⁾による二重膜理論に始まり、Higbie¹⁶⁾の浸透モデル、Danckwerts¹⁷⁾の界面更新モデルへと発展してきた。これらのモデルは、水表面に存在する液相エレメントは気相側より酸素が次のような分子拡散によって輸送されつつ、酸素を吸収した液相側の水表面エレメントは乱流運動によりつぎつぎと液相本体のフレッシュなエレメントと更新されるとする浸透モデルである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} C &= C_L: t=0, y>0 \\ C &= C_L: t>0, y \rightarrow \infty \\ C &= C_S: t>0, y=0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ここで y は水表面を原点に鉛直下向きを正とし、 D は分子拡散係数、 t は対象とするエレメントが水面にやってきた時を0とする時間である。 C_L は液相本体の濃度、 C_S は飽和濃度である。式(6)を式(7)の条件のもとに解けば次式が得られる。

$$C = C_L + (C_S - C_L) \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (8)$$

これより界面における酸素吸収速度は

$$j = \left[-D \frac{\partial C}{\partial y} \right]_{y=0} = \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (C_S - C_L) \quad (9)$$

となる。Higbie¹⁶⁾モデルでは気液接触時間を τ とし、平均のフラックス $\bar{j}$ 、および物質移動係数 K_L はそれぞれ次のようになる。

$$\bar{j} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau j dt = 2\sqrt{\frac{D}{\pi \tau}} (C_S - C_L) \quad (10)$$

$$K_L = \bar{j} / (C_s - C) = 2 \sqrt{\frac{D}{\pi \tau}} \quad (11)$$

Danckwerts¹⁷⁾ モデルでは界面の液相側エレメントは乱れの作用により単位時間、単位水面面積あたり、 r の割合でランダムに更新されると考え、水面に存在する液相エレメントの年齢分布関数 $\phi(t)$ を $\phi(\tau) = r e^{-r\tau}$ で与えた。そのとき $\bar{j}$ および K_L は次式のようになる。

$$\bar{j} = \int_0^\infty \sqrt{\frac{D}{\pi \tau}} (C_s - C_L) r e^{-r\tau} d\tau = \sqrt{D} (C_s - C_L) \quad (12)$$

$$K_L = \sqrt{D} r \quad (13)$$

r は表面更新率とよばれ、液相側の運動特性を用いて種々の表示が試みられている¹⁸⁾。 r を対象場の乱流指標を用いて表示すれば K_L に関する理論式を求めることができる。ここでは、最も簡単に乱流強度 u と乱れのスケール l を用いて r を次のように仮定してみる¹⁹⁾。

$$r \sim u / l \quad (14)$$

砕波後の乱流場について考える。沖波は途中で減衰することなく、全て砕波帯に入射すると考えると、単位時間あたりの入射エネルギー E は単位面積あたりの入射波のエネルギー $(1/8) \rho g H_0^2$ (ρ : 水の密度、 H_0 : 沖波波高) と群速度 $C_g = g T / 4 \pi$ との積より次のようになる。

$$E = \frac{\rho g^2 H_0^2 T}{32 \pi} \quad (15)$$

このエネルギーが全て砕波帯内で逸散するものとすれば、砕波帯内の単位質量あたりの平均的なエネルギー逸散率 ε は、 E を砕波帯内に存在する水の質量 $\rho h_b^2 / (2 i)$ (h_b : 砕波水深、 i : 斜面勾配) で割って次式となる。

$$\varepsilon = i g^2 H_0^2 T / (16 \pi h_b^2) \quad (16)$$

一方、等方性乱流理論によれば、 ε は次のように表される。

$$\varepsilon \sim \nu \bar{u}^3 / l^2 \quad (17)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 $\bar{u}^2$ は乱流速度の二乗平均を表している。砕波帯の乱流場にも、式 (17) を仮定することができるとすると、式 (14)、(17) より次式を得る。

$$r \sim (\varepsilon / \nu)^{1/2} \quad (18)$$

式 (16) を式 (18) に代入し、その結果を式 (13) に代入すれば、次のようになる。

$$K_L \sim (D \ g H_0 / h_b)^{1/2} (i T / \nu)^{1/4} \quad (19)$$

ところで、一般に曝気によるDOの収支は次式で表される。

$$dC/dt = K_L A (C_s - C) / V \quad (20)$$

ここに、Aは気液接触界面面積、Vは曝気される水量である。河川ではAは水面と考えられるのでA/Vは水深の逆数とおくことができるが、波動場のようにAが明確でない場合には、再曝気係数 k_2 を用いて式(20)を次式のように表すことが多い。

$$dC/dt = k_2 (C_s - C) \quad (21)$$

したがって、 K_L と k_2 との間に次の関係がある。

$$K_L A / V = k_2 \quad (22)$$

さて、砕波帯において、気液界面面積が静水時と変化がないと仮定すれば、 $A = h_b / i$ 、 $V = h_b^2 / 2i$ とおける。実際のAの静水時に対する増加を係数 C_a をかけて表示しておくくと K_L と k_2 との関係は次のようになる。

$$k_2 = 2 C_a K_L / h_b \quad (23)$$

式(19)、(23)より、 k_2 は次のように表される。

$$k_2 \sim C_a (D \ g H_0 / h_b^3)^{1/2} (i T / \nu)^{1/4} = C_a D^{-1/2} g^{3/8} i^{1/4} L_0^{1/8} H_0^{1/2} / (\nu^{1/4} h_b^{3/2}) \quad (24)$$

崩れ波(spilling breaker)の場合、気泡は水面付近に分布するのみで、その存在時間も短い²⁰⁾。そこで気液界面面積は静水時にほぼ等しいと考え、 $C_a = 1$ とおき、崩れ波の実験結果より式(24)の係数値(比例定数)を求めると次のようになる²¹⁾。

$$k_2 = 0.144 D^{-1/2} g^{3/8} i^{1/4} L_0^{1/8} H_0^{1/2} / (\nu^{1/4} h_b^{3/2}) \quad (25)$$

巻き波(plunging breaker)の場合、気液界面面積の増加を具体的に表示しえないが、巻き波の実験結果より式(24)の係数を求めると次式のようなになる²¹⁾。ただし、単位はsec, cmである。

$$k_2 = 0.184 D^{-1/2} g^{3/8} i^{1/4} L_0^{1/8} H_0^{1/2} / (\nu^{1/4} h_b^{3/2}) \quad (26)$$

図-8および図-9は式(25)、(26)による計算値と実験値とを比較したものである。

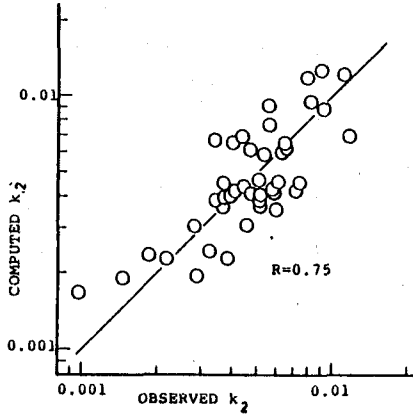


図-8 k_2 に関する計算値と実験値との比較
(崩れ波の場合)

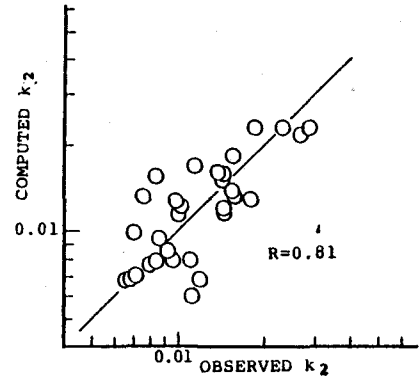


図-9 k_2 に関する計算値と実験値との比較
(巻き波の場合)

両者とも、理論式は実験値をよく表現できている。両者の係数値を比較すると、巻き波では気泡とそれに伴う乱れが水塊全体に分布するために、みかけの気液界面面積が崩れ波の約1.3倍に増加するものと考えられる。

(b) 沿岸部のDO分布特性

1次元モデルを用いて、入射波、斜面勾配の違いによる岸沖方向のDO分布を求めてみる。砕波帯を一つのブロックとし、沖方向にブロックに分割し、各ブロックについてDO収支式を次のように立てる。

$$\text{砕波帯} \quad dC_1 V_1 / dt = k_2 (C_s - C_1) V_1 + q_1 (C_2 - C_1) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{砕波帯外} \quad dC_i V_i / dt &= q_{i-1} (C_{i-1} - C_i) - q_i (C_i - C_{i+1}) \\ &i=2, 3, 4 \dots \end{aligned} \quad (28)$$

すなわち、酸素の吸収は砕波帯で行われ、それが沖方向に輸送されていくものとする。 q_i は i ブロックと $i+1$ ブロックの境界における流量であり、次式を与えた²²⁾。

$$q_i = \frac{\alpha}{2} \omega \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{[1 - (H/2h)] \coth kh}{1 - (H^2 k / 8h) \coth kh} \quad (29)$$

ここで、 H は入射波高、 h は水深、 $\alpha = 0.4^{19)}$ 、 $k = 2\pi/L$ 、 L は波長である。 ω は次式を満足する。

$$(\omega + k U_0) = g k \tanh kh \quad (30)$$

$$U_0 = a^2 k \omega \frac{\coth kh}{2 kh - (ak)^2 \coth kh} \quad (31)$$

ただし、 $a = H/2$ である。

式(27)、(28)を差分化し、前項(a)で求めた k_2 を用いて計算を行い、実験値と比較したものが図-10である。時間ステップは $10T$ とし、砕波帯外のブロック分布割幅は $L_0/4$ (沖波波長)としている。計算結果はほぼ実験結果を再現している。ただし、 $H_0/L_0=0.02$ 、 $T=0.8\text{ sec}$ 、勾配 $i=1/10$ 、 $1/20$ 、 $1/30$ の海浜に波が入射したときのDOの変化を示したものが図-11である。初期DOは 5 mg/l 、水温は 20°C としている。 k_2 は斜面勾配 $1/30$ 、 $1/20$ 、 $1/10$ の順に大きくなり、砕波帯の長さは斜面勾配が $1/10$ 、 $1/20$ 、 $1/30$ の順に長くなっている。斜面勾配が大きいくほど曝気効果は大きい、曝気される領域が小さく、その水量も少ないために、総酸素吸収量は少なくなっており、沖への影響も小さいことがわかる。逆に斜面勾配が小さいほど再曝気係数 k_2 は小さいものの、砕波点が沖になるため、DOは沖の方まで輸送されることがわかる。

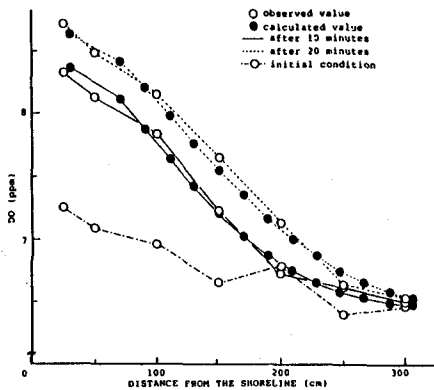


図-10 DOの計算値と実験値との比較

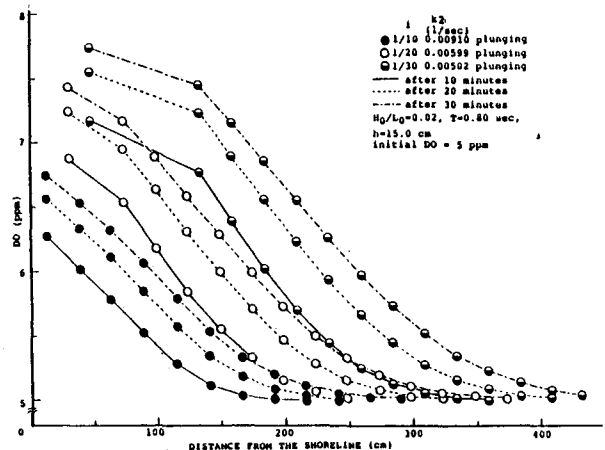


図-11 DO濃度分布に及ぼす斜面勾配の影響

3. 2 防波堤や護岸における波によるエアレーション

スリット式防波堤や各種の穴あき防波堤あるいは前面で砕波や大きな乱れを生じさせる海岸護岸等の海岸構造物では、エアレーションによりDO濃度を上げる効果が期待できる。護岸の曝気能に関する研究は、高ら²³⁾、運輸省港湾技術研究所^{24)、25)}で行われているほか、住友ら²⁶⁾は湖岸のなぎさの自浄能を促進させるための方策として曝気能に関する研究を行っている。ここでは著者ら²⁷⁾が、行った方法を紹介する。

著者ら¹⁴⁾の実験に加え、従来行われている資料も収集して、構造物モデル、実験条件等を表-3のよう示した。

表-3 使用したデータと実験条件

構造物モデル	実験水槽		入射波	
	水深 (cm)	幅 (cm)	H/L	H_0/L_0
縦スリット式透過性 防波堤(28種)	15.0	20.0	0.01 ~ 0.03	0.011 ~ 0.033
透過ケーソン式防波堤 (堤体幅2種)	30.0	50.0	0.010 ~ 0.047	0.007 ~ 0.045
透過ケーソン式護岸 (堤体幅2種)	30.0	50.0	0.012 ~ 0.065	0.008 ~ 0.063
パイプ積型透過性防 波堤(堤体幅2種)	30.0	50.0	0.013 ~ 0.048	0.009 ~ 0.046
パイプ積型護岸 (堤体幅2種)	30.0	50.0	0.013 ~ 0.056	0.009 ~ 0.054
ブロック積型護岸 (1種)	30.0	50.0	0.011 ~ 0.056	0.008 ~ 0.054
曲面スリットケーソン 護岸(1種)25)	60.0	100.0	0.011 ~ 0.041	0.010 ~ 0.034

まず、再曝気係数 k_2 の算定方法を検討する。防波堤周辺で取り込まれた酸素が周辺の乱れによって拡散すると考えると、水槽内のDO濃度の変化は次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + k_2(C_s - C) \quad (32)$$

ここに、 C 、 C_s はそれぞれDO濃度およびその飽和値、 K_x は拡散係数で、 x は水槽内岸沖方向にとっている。図-12は縦型スリット式透過堤のDO濃度実験の一例を示したもので、図の横座標0の位置に（一印が沖側）防波堤モデルが設置されている。この図は実験開始より15分間隔で60分までの濃度変化を示しており、堤付近でピークをもち、岸、沖方向になだらかに減少することがわかる¹⁴⁾。

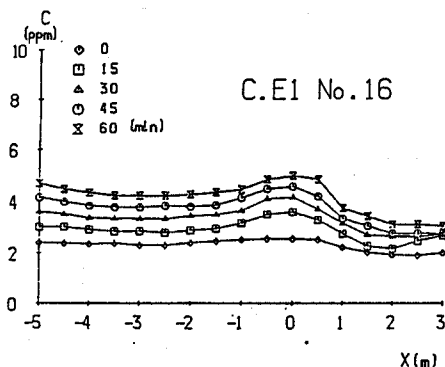


図-12 DO濃度の空間分布

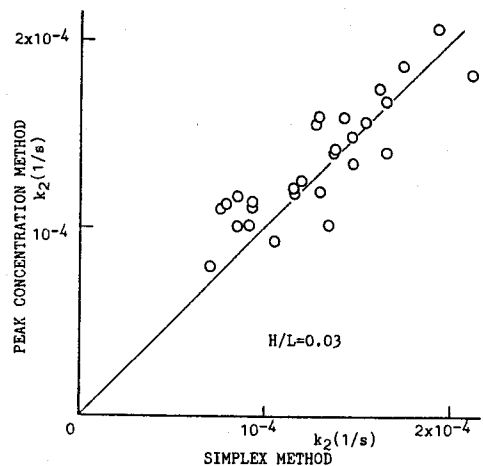


図-13 再曝気係数の計算法の比較

式(32)を差分化し、堤体付近5点の実験値を初期条件として、堤体より沖側、岸側それぞれ1mの2地点の実測値を境界条件として与え解を求めた。15分ごとに1時間にわたる堤付近の濃度分布の実測値を計算値との差の自乗和を最小とするような k_2 と K_x の値をシンプレックス法により求めた。一方、式(32)の右辺第一項(拡散項)を無視した式より、濃度分布のピーク値を示す防波堤部における濃度の時間変化を用いて k_2 を求めることも行った。上記の両法により求めた k_2 の値を比較したものが図-13である。

これより、拡散項を無視しても、 k_2 の値を十分正しく見積ることができると考えられる。そこで、以下の縦型スリット式透過堤の k_2 の計算は、拡散項を無視したピーク濃度変化より求めた値を用いた。図-14は縦型スリット式透過堤について、再曝気係数 k_2 と入射波の波形勾配 H/L との関係を示したものである。入射波の波長はすべて同じにしているので、入射波高が大きくなると、再曝気係数も大きくなる傾向がみられ、開口形状の違いによる曝気能への影響はあまり認められないが、同一形状の場合、堤体幅が大きい方が再曝気係数はやや大きくなるようである。図-15は、再曝気係数と堤体部で逸散するエネルギーとの関係を示したものである。横軸の逸散エネルギーは、 $H/L=0.02$ のときの入射波($H=1.5\text{ cm}$)のエネルギーで除した値を示している。これより、再曝気係数は、開口形状や入射波高に関係なく、逸散エネルギーが大きくなるに伴い、その値は大きくなるといえる。

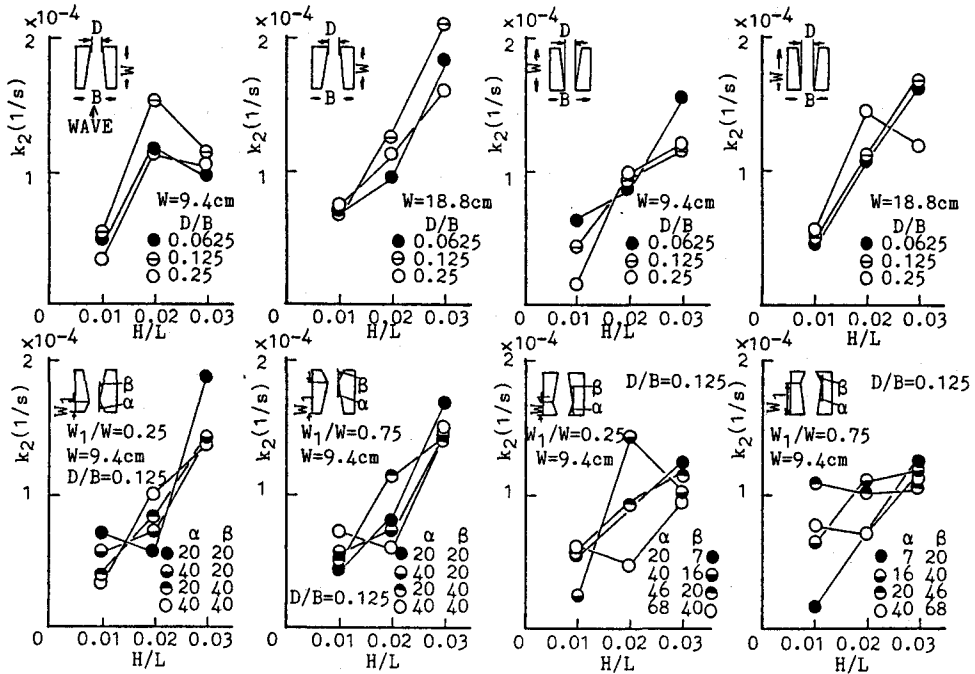


図-14 縦型スリット式透過堤の再曝気係数

図-16は、表-3の各構造物に対する実験における再曝気係数の値の分布を示したものである。それぞれの実験諸元が異なっているので厳密な比較は行えないが、縦型スリット式透過堤や透過ケーソン護岸、パイプ積型護岸においてやや再曝気係数が大きくなる傾向にある。いずれの型式も、堤体幅が大きい方が、再曝気係数は大きな値を示すことがわかる。これは堤体幅が大きい方が消波域は広くなり、エネルギー逸散量が多くなるためであると考えられる。

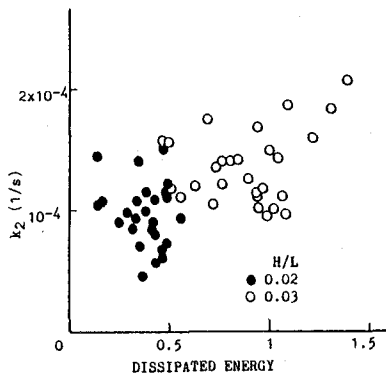


図-15 逸散エネルギーと再曝気係数との関係

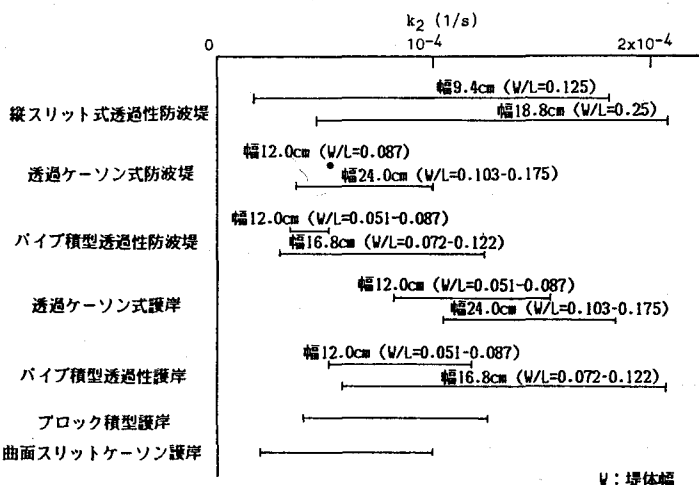


図-16 各種構造物の再曝気係数値

以上の結果から、消波による逸散エネルギーによって再曝気係数を表現することが可能であると考え、エネルギー逸散を考慮した再曝気係数の予測式を導く。

3. で示したように、水表面に存在する液相側エレメントは気相側より分子拡散により輸送されると考え、それは式(6)で表された。式(7)の条件のもとに解が式(8)で得られ、酸素吸収速度は式(9)で求められた。Dankwertsのモデルには、水面に存在するエレメントは液相本体の乱れ的作用により単位時間に単位水面面積当たり r の割合でランダムに更新されるとして、年令分布関数 $\phi(\tau) = r e^{-r\tau}$ を与え、式(10)より、任意時間における水面からの酸素吸収速度を式(12)で示した。

再曝気係数 k_2 は液本体濃度を C_L とした次式

$$-\frac{dC_L}{dt} = k_2(C_S - C_L) \quad (33)$$

で示されるように、曝気域の水量当りの吸収速度である。したがって、式(12)と式(33)を比較すると、 k_2 は次式で与えられる。

$$k_2 = \frac{\sqrt{Dr}}{h} \quad (34)$$

ここに、 h は曝気域の水深である。表面更新率 r が再曝気係数に及ぼす乱れ的作用を示しており、乱れが強くと、 r が大きくなるほど k_2 も大きくなる。そこで時間の逆数の次元をもつ r を消波にともなって逸散するエネルギーによって次式で与える。

$$r \sim (E_d/\nu)^{1/2} \quad (35)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 E_d は消波により失われる単位質量、単位時間当りのエネルギー量 ($[L^2/T^3]$) である。単位時間当りの入射波のエネルギーを E_i 、消波により逸散するエネルギーの割合を ε 、エネルギー逸散にかかわる水の体積を V_d とすると、 E_d は次式で表される。

$$E_d = \frac{\varepsilon E_i}{\rho V_d} \quad (36)$$

ここで、 ρ は水の密度である。式(34)、(35)、(36)より、 k_2 の予測式として次式を得る。

$$k_2 \sim D^{1/2} \left(\frac{\varepsilon E_i}{\rho \nu V_d} \right)^{1/4} \frac{1}{h} \quad (37)$$

沖波のエネルギーは失われることなく、直角に構造物のところまでやってくるとすると、単位時間当りの入射エネルギー E_i は

$$E_i = \frac{1}{8} B \rho g H_0^2 \times \frac{1}{2} \left(\frac{gT}{2\pi} \right) = \frac{\rho g^2 H_0^2 T B}{32\pi} \quad (38)$$

で与えられるので、 k_2 は次式となる。

$$k_2 \sim (DgH_0)^{1/2} \left(\frac{\varepsilon T B}{\nu V_d} \right)^{1/4} \frac{1}{h} \quad (39)$$

ここで、 B は波の進行方向に直角な幅、 T は周期、 H_0 は沖波波高である。上式は、入射波高が大きいほど、また消波による波のエネルギー逸散率が大きいほど再曝気係数は大きくなることを示しており、先の実験結果と一致する。

式(39)の係数値を求めるためには曝気に関わる水の体積 V_d を知る必要がある。これは消波による乱れの存在する部分の水の体積であるが、厳密には開口部形状により大きく異なり、正確な V_d を求めることは困難である。堤内遊水部の存在を無視して図-17の斜線部のように V_d を決めるようにした。表-3でとりあげた全実験結果より、式(39)の両辺の関係を回帰的に求めたところ係数値は0.0135を得た。すなわち、再曝気係数 k_2 は次式で与えられる。

$$k_2 = 1.35 \times 10^{-2} (DgH_0)^{1/2} \left(\frac{\varepsilon T B}{\nu V_d} \right)^{1/4} \frac{1}{h} \quad (40)$$

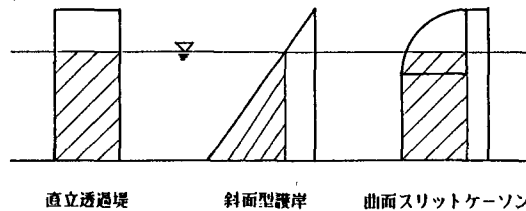


図-17 各種構造物における V_d のとり方

上式より求めた再曝気係数の計算値と実験値との比較を図-18に示す。本図によれば、各種の海岸構造物による再曝気係数が提案された式によりよく表現されていることがわかる。エアレーションに関して実験結果を現地に適用する場合の相似則をどのように扱うかについてはエアレーション効果を現地で測定することは不可能に近く、困難な問題である。ここで求めた式は理論的な考察から導かれたものであり、実験データは表-3からわかるように、水深15cm、幅20cmから水深60cm、幅1mの水槽で行

われた実験を含んでいる。したがって、ここで示された式はある程度のスケールアップにたえるものと考えられる。式(40)で $\varepsilon=1$ （全ての入射エネルギーが逸散）とおくと、斜面上で碎波する場合の再曝気係数の予測式(25)および(26)と係数の値以外は一致する。すなわち、巻き波に対する係数は0.184、崩れ波に対しては0.144であり、ここで求めたものより1オーダー大きい値となっている。堀江²⁵⁾らの実験でも、斜面勾配1/30の再曝気係数は、他の消波構造物のものより1オーダー高い値が得られている。

したがって、エアレーションのみを考えると、傾斜面型護岸が最も有効であるといえる。その理由として、傾斜面型護岸では碎波により気泡が多数発生すること、水深が浅くなり乱れが底部まで達し、全水深にわたる混合が行われることなどが考えられる。

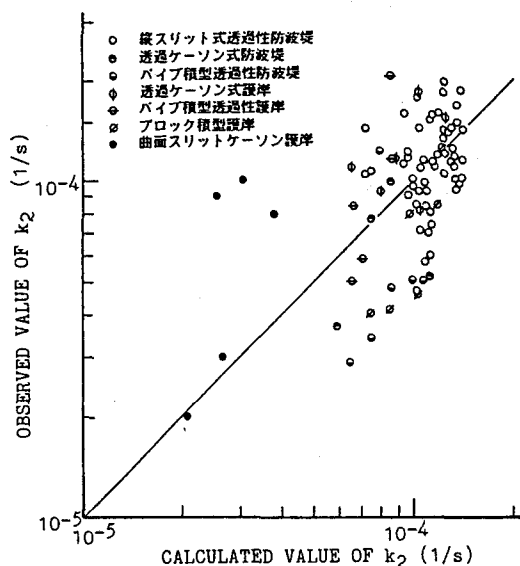


図-18 再曝気係数の計算値と実験値との比較

4. 生物化学的作用による沿岸水域の浄化

4.1 生物膜による水質浄化の実験

沿岸部には斜面や消波構造物が存在する。このようなところでは碎波にともなう酸素の溶解が著しく、かつ生物膜が付着することが可能であり、水質の浄化に有利な条件がととのっている。近年、親水性を考慮して、水際を斜面状や階段状にした海水浴場や水際公園が各地で建設されるようになってきたが、これらの構造物に対する曝気効果や浄化能力の評価については明らかにされていない。ここでは、著者ら²⁸⁾、²⁹⁾の行った一様斜面部を有する海岸モデルをとりあげ、生物膜による水質の浄化能力について考察する。

実験は1次元水槽の一端に1/20不透水性の斜面を設け、別途培養した活性汚泥を水槽中に入れ、スキムミルクを基質として波の存在下（水深15cm、周期0.7sec）で約20日間斜面部に付着生物を形成させた。有機汚濁物に対する実験ではスキムミルクを溶かした廃水を瞬間放流および連続放流する場合について実験を行った。

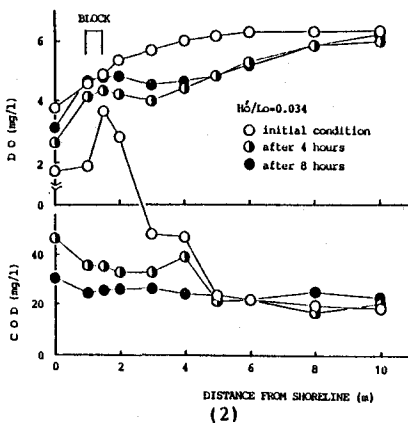
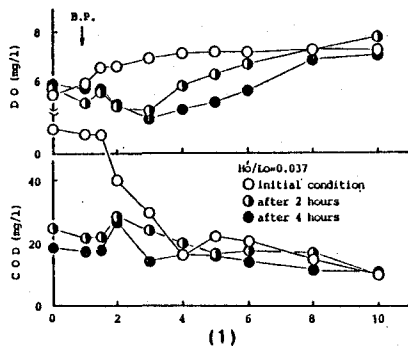


図-19 COD、DOの分布（瞬間放流）

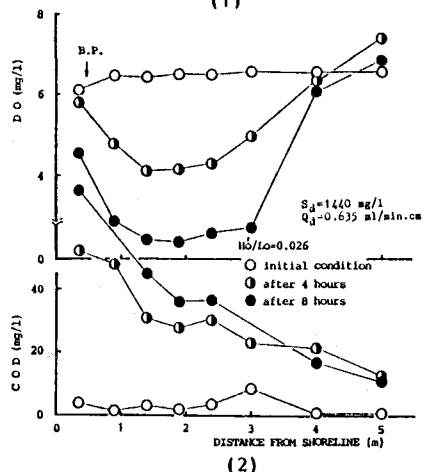
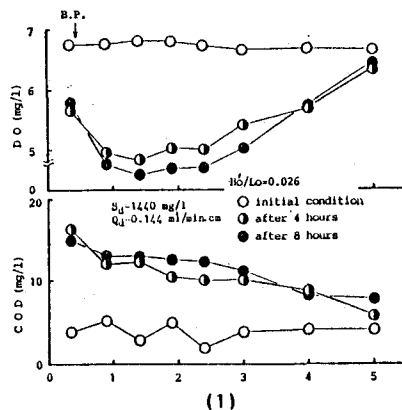


図-20 COD、DOの分布（連続放流）

図-19は有機性廃水を瞬間放流した場合のCODおよびDOの時間変化を示したものである。図中のB.P.は砕波点の位置を示している。図の(1)をみると、付着生物の存在する斜面部付近(横軸3m)で時間とともにCODが低下している。それにともなうDOも低下するが、砕波帯では酸素の供給も活発なため、DOの低下が最も著しい点はCODの低下の大きいところよりやや沖側にずれている。図の(2)は汀線から沖へ向かい1~1.4mの間に消波ブロック堤を置いた場合の結果である。CODの減少の様子は図の(1)と傾向は似ている。ブロック堤の部分では砕波のためDOの低下は少ないが、ブロックより岸側では図(1)と比べかなりのDOの低下がみられる。これは、防波堤でさえぎられた流動の少ない水域では有機物の放流によりかなりDOが低下するおそれがあることを意味し、こうしたことが生ずることに注意を要する。

図-20は、連続放流した場合の結果である。 S_0 は汚濁物質濃度、 Q_0 は放流汚濁水量である。図の(1)では、放流後4時間後と8時間後との間に、CODおよびDO濃度の差はわずかで、放流と分解および再曝気の間にはほぼバランスがとれている。したがって自乗能力の範囲内にある適切な放流が行われている状態といえよう。一方、図の(2)では、8時間後において4時間後よりもさらにCODの増加とDOの減少が続いており、放流負荷が過大である状態を示している。これ以上放流が続けば嫌気性状態に移行する可能性もでてくることがわかる。

4.2 水質浄化モデル

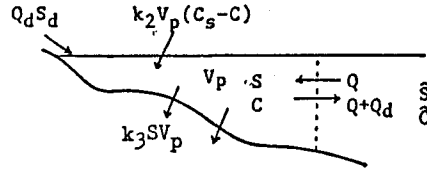


図-21 浄化領域モデル

図-21に示すように沿岸部の浄化領域を一つのボックスとして扱くと水質について次式を得る。

$$\frac{dS}{dt} = -k_3 S + \frac{1}{V_p} \{Q_d S_d + Q \hat{S} - (Q + Q_d) S\} \quad (41)$$

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 S + k_2 (C_s - C) + \frac{1}{V_p} \{Q_d C_d + Q \hat{C} - (Q + Q_d) C\} \quad (42)$$

式(41)の S は汚濁物質濃度でCOD等を指す。右辺第1項は生物膜等による減少を示しており、 k_3 はその除去速度定数である。 Q は浄化領域と沖側領域との交換流量を示す。添字 d は放流廃水に関するものを示し、 $\hat{}$ は領域外の量であることを示す。式(42)はDOに関する式で、右辺第1項は有機物の分解にともなう消費を表し、 k_1 は脱酸素速度定数とよばれる。 C_s は飽和DO濃度、 k_2 は再曝気係数である。

上式を飽和DO濃度 C_s 、代表汚濁濃度 S_r 、波の周期 T で無次元化すると次式が得られる。

$$\frac{dS^*}{dt^*} = -k_3 T S^* + \frac{T Q_d}{V_p} S_d^* + \frac{T Q}{V_p} \hat{S}^* - \frac{T(Q + Q_d)}{V_p} S^* \quad (43)$$

$$\frac{dC^*}{dt^*} = -k_1 T \frac{S_r}{C_s} S^* + k_2 T (1 - C^*) + \frac{T Q_d}{V_p} C_d^* + \frac{T Q}{V_p} \hat{C}^* - \frac{T(Q + Q_d)}{V_p} C^* \quad (44)$$

ここに、 $C^* = C/C_s$ 、 $S^* = S/S_r$ 、 $t^* = t/T$ である。

式(43)、(44)の定常解をそれぞれ S^* および C^* とすると次のようになる。

$$S_\infty^* = F/\alpha' \quad (45)$$

$$C_\infty^* = \frac{1}{\beta'} \left(F' + k_2 T - k_1 T \frac{S_r}{C_s} \frac{F}{\alpha'} \right) \quad (46)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \alpha &= k_3 T + \frac{T}{V_p} Q & \alpha' &= \alpha + \frac{T}{V_p} Q_d \\ \beta &= k_2 T + \frac{T}{V_p} Q & \beta' &= \beta + \frac{T}{V_p} Q_d \\ F &= \frac{T}{V_p} (Q_d S_d^* + Q \hat{S}^*) & F' &= \frac{T}{V_p} (Q_d C_d^* + Q \hat{C}^*) \end{aligned} \quad (47)$$

式(43)、(44)に対し、連続放流を行っている場合、初期条件を $t^* = 0$ で $S^* = S_0^*$ 、 $C^* = C_0^*$ とおくと、次のような非定常解がえられる。

$$S^* = S_{\infty}^* + (S_0^* - S_{\infty}^*) \exp(-\alpha' t^*) \quad (48)$$

$$C^* = C_{\infty}^* - \gamma \exp(-\alpha' t^*) + (C_0^* - C_{\infty}^* + \gamma) \exp(-\beta' t^*) \quad (49)$$

ここに

$$\gamma = \frac{k_1}{k_2 - k_3} \frac{S_r}{C_s} (S_0^* - S_{\infty}^*) \quad (50)$$

瞬間放流の場合の解は、さらに $Q_d = 0$ の条件が加わるので、上式でそれぞれ α' は α 、 β' は β に置きかわった形となる。

一般に、放流汚濁質量はバックグラウンドよりはるかに高いと考えられるので、 $Q_d S_d \gg QS$ と考えることができる。一方、放流量は外部領域との交換流量より小さく $Q \gg Q_d$ と考えてよいであろう。この場合、式(45)は次のように表現できる。

$$\frac{S_{\infty}}{S_d} = \frac{Q_d}{k_3 V_p + Q} \quad (51)$$

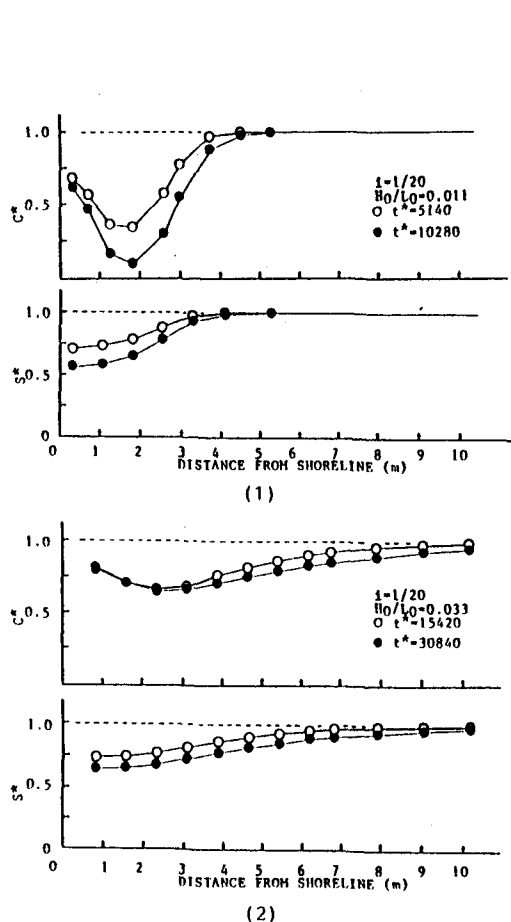


図-22 COD、DOの計算結果(瞬間放流)

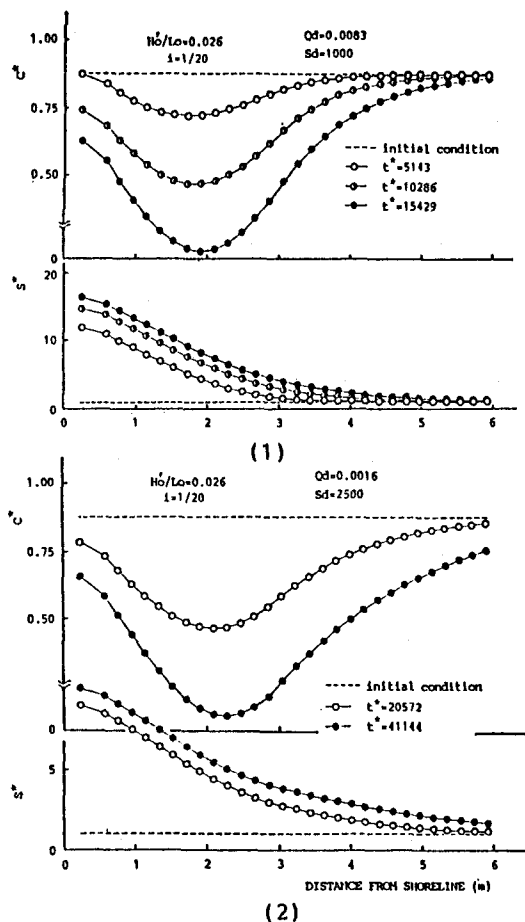


図-23 COD、DOの計算結果(連続放流)

DOについては、外部領域の汚染は少なく、DOはほぼ飽和状態とみなせるとすると、 $C=C_s$ とおくことができる。この仮定と式(51)を用いると、式(46)より次の関係を得る。

$$\frac{C_\infty}{C_s} = 1 - \frac{k_1 V_p}{k_2 V_p + Q} \frac{S_\infty}{C_s} \quad (52)$$

汀線より沖側に向かって入射波の1/4波長づつに区切ったボックス内において、式(43)、(44)と類似の式²⁸⁾より、種々の放流係数のもとで数値計算を行った。図-22は、初期の水質はCOD=30mg/l、DO=7mg/lとし、代表有機物濃度 $S_r=30\text{mg/l}$ 、飽和DO濃度 $C_s=7\text{mg/l}$ と仮定した瞬間放流に対する計算結果の一例である。入射波の波形勾配 H_0'/L_0 が小さいほどCODの低減が遅れ、しかも濃度の減少域も短くなる。ここには示していないが、同じ沖波条件の場合、斜面勾配が穏やかな方が生物膜の存在域が長くなり、CODの低減が広範囲にわたることがわかっている²⁸⁾。一方、DOは碎波帯の外側で減少が著しく、入射波高が小さい場合には嫌気的狀態へ移行していく。

図-23は連続放流に対する計算結果の一例である²⁹⁾。汚濁物質量の多い方がDOの低下が早くDOの最小となる点が汀線側に近づくことがわかる。

5. あとがき

ウオーターフロントの利用がますます高度化・多様化するこん日、利用対象水域の流動特性を把握し、水域の形状や地形を変えることにより水質が悪化することがないように、科学的な根拠に基づく水質保全対策が必要であろう。自然界には自浄能力があり、波動やその他の乱れにより構造物や汀線付近では水中への酸素の取り込みが行われている。これらは有機物による汚染に対して、生物化学的に酸化する有力な力となりうるため今後積極的に利用すべきと考えられる。しかしながら自然界の自浄能力を評価する手法はまだ確立されているわけではなく、これらを数量化する努力が望まれる。ここでは、主として沿岸水域の浄化、とくに外力として波を対象にして述べたが、ウオーターフロントの環境問題を論ずるには底質汚染の問題もみのがせないことはいうまでもない。

本論では共同研究者の細井由彦助教授を中心とする沿岸海域の水質汚染に関する研究の一部を示したが、著者らは感潮河川の水質、底質の汚染問題についても、徳島市の新町川を対象として、徳島大学工学部の中野晋講師を中心とする研究グループと共同研究を行っている。また、こうした研究課題の全般にわたり三井宏教授より変わらぬ激励をいただいている。本論はこうした共同研究の成果の一部を示したものであり、上記の各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 国土計画協会：人口と国土，1985。
- 2) 堀江毅：環境制御技術，土木学会誌，pp.47-52，1988.8。
- 3) 武岡英隆：沿岸海域の海水交換，沿岸海洋研究ノート，21(2)，pp.169-182，1984。
- 4) 武岡英隆：海水交換の調査法と問題点，沿岸海洋研究ノート，24(2)，pp.145-155，1987。
- 5) Parker, D.S., D.P. Norris and A.W. Nelson：Tidal exchange at Golden Gate, Proc. ASCE, 98, SA2, pp.305-323, 1972。
- 6) 柏井誠：潮汐による海水交換について，その1，海水交換の概念と海水交換率，日本海洋学会冬季大会講演要旨集，pp.96-97，1977。
- 7) 堀江毅・村上和男・亀山豊・入尾野幸雄：東京湾の海水交流に関する水理模型実験，運輸省港湾

技術研究所報告, 16(3), pp.69-99, 1977.

- 8) 電力中央研究所 : 防波堤・護岸の構造型式調査, 電力中央研究所報告, 調査報告U88012, 1988.
- 9) 高隆二・田川昌宏 : Crenellated breakwater の拡散性, 第20回海岸工学講演会論文集(以下、海講と称略), pp.233-238, 1973.
- 10) 村上仁士・細井由彦・合田吉孝 : 漸縮および漸拡縦型スリット式防波堤の消波および海水交流特性, 第31回海講, pp.497-501, 1984.
- 11) 村上仁士・細井由彦・合田吉孝 : 漸変縦型スリット式防波堤の消波および海水交流特性, 第32回海講, pp.535-539, 1985.
- 12) 村上仁士・細井由彦・合田吉孝 : 複合漸変縦型スリット式防波堤の消波および海水交流特性, 第33回海講, pp.412-416, 1986.
- 13) Murakami, H., Y. Hosoi and Y. Goda : Analysis of permeable breakwaters, 20th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.2104-2118, 1986.
- 14) Murakami, H. and Y. Hosoi : Characteristics of diffusion and aeration due to wave action near permeable breakwaters, 21st Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.166-180, 1988.
- 15) Whitman, W. G. and W. K. Lewis : Principles of gas absorption, Ind. and Eng. Chemistry, 15(12) 1924.
- 16) Higbie, R. : The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short periods of exposure, Trans. A. I. Ch. E., 31, 1935.
- 17) Danckwerts, P. V. : Significance of liquid-film coefficient in gas absorption, Ind. and Eng. Chemistry, 43(6), 1951.
- 18) 細井由彦 : 水域の境界面における水質指標物質の移動に関する基礎的研究, 京都大学学位論文, 108p., 1980.
- 19) Hosoi, Y., H. Murakami and M. Oto : Reaeration by spilling breaker, Coastal Eng. in Japan, 27, pp.97-108, 1984.
- 20) 細井由彦・村上仁士 : 碎波帯における溶存酸素濃度の挙動に関する実験的研究, 第28回海講, pp.451-455, 1981.
- 21) 細井由彦・村上仁士 : 沿岸部におけるDOの挙動に関する基礎的研究, 水質汚濁研究, 7(5), pp.301-309, 1984.
- 22) Hosoi, Y., H. Murakami : Effect of breaking waves on dissolved oxygen and organic matter 20th Coastal Eng. Conf, ASCE, pp.2498-2512, 1986.
- 23) 高隆二・木村弘・田川昌宏 : 曝気護岸への考察, 第21回海講, pp.273-279, 1974.
- 24) 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回海講, pp.527-531, 1980.
- 25) 堀江毅・細川恭史・三好英一・関根好幸 : 構造物によるエアレーション効果比較模型実験, 第34回海講, pp.651-655, 1987.
- 26) 住友恒・松岡譲・安井孝行・脇本春樹・山下正純 : 護岸構造と水質浄化の相関に関する実験, 京都大学防災研究所水資源研究センター研究報告7, pp.13-25, 1987.
- 27) 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回海講, pp.812-816, 1988.
- 28) 細井由彦・村上仁士・岩崎哲史 : 碎波帯付近の自浄作用に関する実験的研究, 第33回海講, pp.586-590, 1986.
- 29) 細井由彦・村上仁士・岩崎哲史・松本匠 : 碎波帯付近の水質浄化作用に関する研究, 第35回海講, pp.822-826, 1988.