

碎波帯付近の自浄作用に関する実験的研究

細井由彦*・村上仁士**・岩崎哲史***

1. 緒 言

沿岸部は産業、生活、レクリエーションの場として広く利用されており、その水質の保全に対しては大きな関心がはらわれている。河川や海域の水質は、汚染水の排出が適切なレベル以下であれば、その自浄作用によって良好な状態に保たれる。これら自浄作用の主要因は、好気性微生物による有機性汚濁物質の分解作用である。最近とくに都市河川において、自然の有しているこのような浄化力を積極的に利用する方策の検討が活発に行われている^{1),2)}。

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³⁾、かつ生物膜が付着生育することが可能であり、水質の浄化には有利な条件がととのっていると考えられる。また近年、親水性を考慮して、水ぎわを斜面状や階段状にした水ぎわ公園等の構想も各地で進められるようになってきた。この場合にも水ぎわは単に水に親しむだけではなく、自浄能力を有した場になりうるものと考えられる。

本研究は以上のような観点から、水ぎわにおける水質の浄化能力の評価や、その機構の解明を行い、水質保全の立場から見て有効な消波構造物や水ぎわ形状の設計を行う上での、基礎資料を得ることを目的としている。ここではその第一歩として、一様斜面部を有する海岸をとりあげ、室内水槽実験により、生物膜の形成とそれによる有機物の酸化に関する検討を行った。

2. 実 験

(1) 実験装置

長さ 14.4 m、幅 20 cm、深さ 30 cm の片面ガラス張りの一次元造波水槽を使用した。端に勾配 1/20 の一様斜面を合板により作成、設置した。

水深は 15.0 cm、波の周期は 0.70 秒でつねに一定とした。

(2) 実験方法

別途培養した活性汚泥とスキムミルクを加えて波をおこし、斜面部に付着生物を形成させた。付着生物の形成期間は約 20 日間とし、その間毎日スキムミルクの添加を行った。

生物膜の形成後、いったん波を停止して水を抜き、斜面部以外に付着した生物を除去し、再び注水してつぎのような方法で実験を行った。

水槽内にスキムミルクを添加して波をおこした。容量式波高計で沖波波高を計測するとともに、目視観測で碎波点を決定した。

サイフォンにより汀線付近および汀線から 1 m、1.5 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m、8 m、10 m の 10 点における水深中央部より採水し、水質を測定した。DO の測定はベックマン 0260 形 DO メータによって行った。有機物の濃度は、分析にやや時間がかかるが精度を重視し、重クロム酸カリウムによる COD で測定した。

1 ケースの実験は 6～8 時間で終了し、沖波波高を数ケース変化させて、1 シリーズの実験を行った。付着生物の状態が各実験ケースで大差を生じないように、1 シリーズの実験期間は約 3 日間とした。

3. 実験結果および考察

(1) COD および DO の分布

図—1, 2, 3 に COD および DO の分布の時間変化の例を示す。

図—1 は斜面部の初期有機物濃度が高い場合の例である。実験開始から 2 時間後には斜面部付近の水中の有機物の酸化が進んでおり、COD の岸沖方向はかなり平滑化されている。沖側の COD がほとんど時間的に変化していないことから考えても、COD の減少は沖側への輸送によるものではなく、生物膜による酸化によることが明らかである。

DO の低下は汀線より 3 m 付近の位置で最も著しい。DO の消費は有機物の酸化にともなうものであり、供給は曝気によるものであるが、曝気の効果は碎波帯内が圧倒的に大きい³⁾。したがって碎波帯の外側にある斜面部では、有機物の酸化にともなう DO の消費の割合が、

* 正 会 員 工博 徳島大学工業短期大学部助教授 土木工学科

** 正 会 員 工博 徳島大学工業短期大学部教授 土木工学科

*** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科 建設工学専攻

砕波帯より輸送されてくる割合よりも大きいために、DO の低下が大きくなっているものと考えられる。

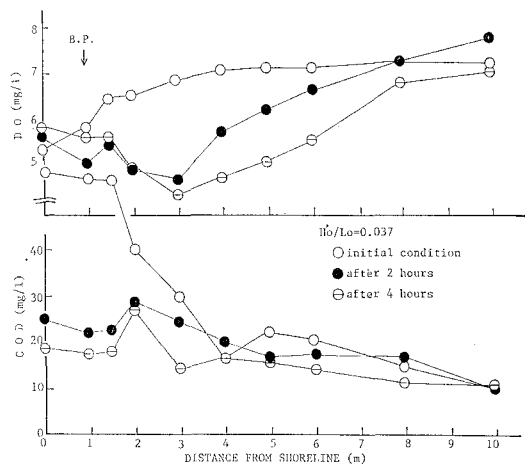


図-1 COD および DO の分布

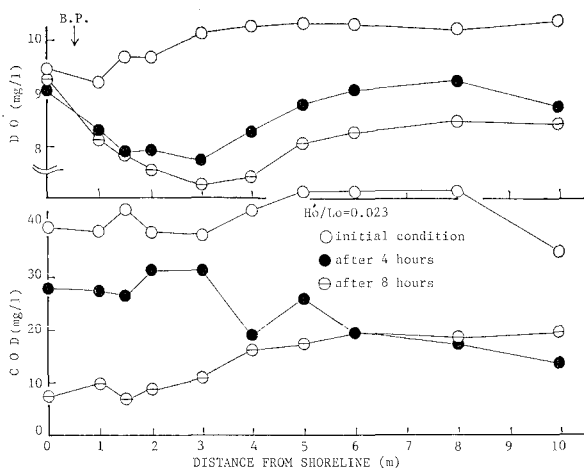


図-2 COD および DO の分布

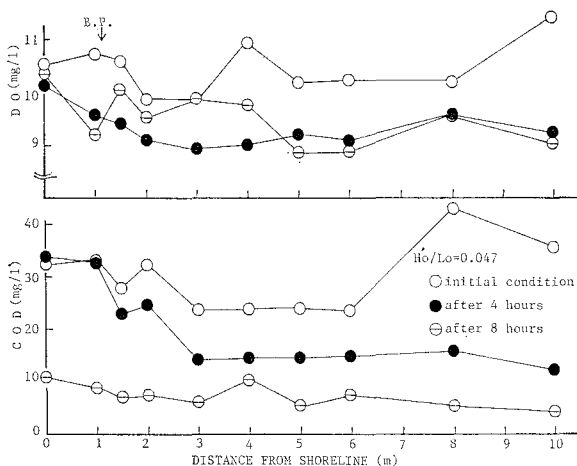


図-3 COD および DO の分布

図-2, 3 は最初の COD を岸沖方向で一様にして行った実験の例である。

図-2 においては、COD はほぼ全体的に一樣に低下しているが、DO は汀線から 3m 付近で最もよく低下している。図-3 においても、COD は全体的に一樣に低下している。DO は図-1, 2 の場合と異なり、岸沖方向にほぼ一樣な分布形状を示している。初期の濃度設定が必ずしも一樣にできていないので比較は行いがいが、図-2 の例では、入射波高が小さく砕波帯が短かったために DO の吸収量が少なく、砕波帯外でその濃度が低下したものと考えられる。一方図-3 の場合には、入射波高が大きく、砕波帯が長いので、DO の吸収が多くかつ岸沖方向の物質輸送も活発に行われたものと考えられる。

(2) 付着物特性

図-4 は単位面積当りの付着生物量を示している。付着生物培養時、および実験中に砕波点となった付近（汀線から 0.5~1.0m）において付着物が少なくなっている。砕波にともなう強い乱れが生物膜の付着を妨げるためであると考えられる。

採取した付着物をビーカー中に浮遊させて行った実験より得た脱酸素定数を図-5 に示す。酸化力は汀線に近い部分で付着増殖したものの方がやや大きい傾向にある。

(3) 浄化特性

図-1~3 をみると COD の減少量は濃度に依存しているようである。そこで一般に行われているように COD の減少を濃度の 1 次反応で表わすと、つぎのように書ける。

$$\frac{d}{dt} \int S dV = -kAS_s \dots\dots\dots (1)$$

S , S_s はそれぞれ有機物濃度および斜面部における有機物濃度である。 A は生物膜付着部の面積であり、一式の左辺第 1 項は全有機物の時間的変化量を示している。ここで $K = kA$ とおくと、 K は波打ち際の総括的な浄化能力を示す指標となり、実験結果から次式で計算される。

$$K = -\frac{1}{S_s} \frac{d}{dt} \int S dV \dots\dots\dots (2)$$

無次元化した K と入射波との関係を図-6 に示す。ここで T は波の周期、 V_0 は生物膜が存在する部分に存在する水の体積である。あまり明確ではないが、 H_0/L_0 が増加すると KT/V_0 も増加する傾向にあるようである。これは砕波帯付近の底面付近の流速の増加により、生物膜表面付近の水の更新を進め、DO および基質の膜に対する供給が促進されるためであると考えられる。

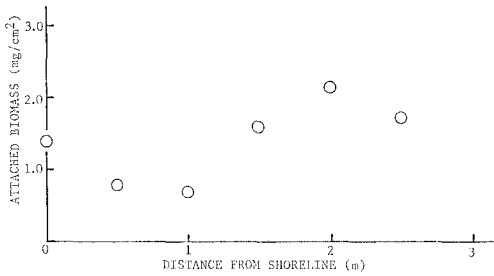


図-4 付着物の分布

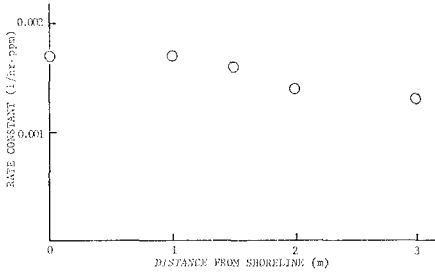


図-5 付着物の酸化能力

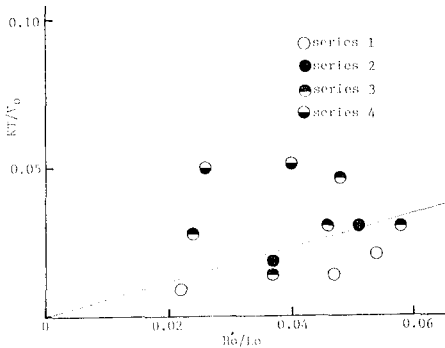


図-6 浄化速度係数と波形勾配の関係

4. 入射波が自浄作用におよぼす影響

(1) DO, COD に関するモデル

図-7 に示すように岸沖方向の一次元ボックスモデルを考える。汀線より順に番号をつけると、 i 番目のボックスについて、DO および COD の質量保存式として次式を得る。

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = -K_i S_i + k_2 V_i (C_s - C_i) + q_{i-1} (C_{i-1} - C_i) - q_i (C_i - C_{i+1}) \quad (3)$$

$$V_i \frac{dS_i}{dt} = -K_i S_i + q_{i-1} (S_{i-1} - S_i) - q_i (S_i - S_{i+1}) \quad (4)$$

ここで C_i , S_i , V_i , K_i はそれぞれ i 番目のボックスの DO, COD, 水量, 浄化速度係数であり, C_s は飽和 DO 濃度, k_2 は再曝気係数, q_i は i 番目と $i+1$ 番目のボックスとの間における, 単位時間当りの交換流量であ

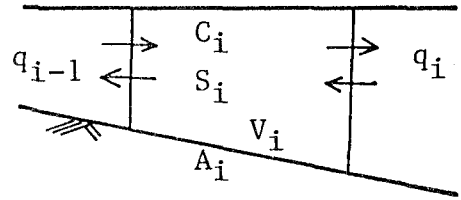


図-7 ボックスモデル

る。式 (3), (4) の右辺第 1 項は生物膜が存在するボックスにのみ現われ, 式 (3) の右辺第 2 項は砕波帯内 (第 1 ボックス) においてのみ現われる。

式 (3), (4) を飽和 DO 濃度 C_s , 初期 COD 濃度 S_0 , 波の周期 T を用いて無次元化するとそれぞれ次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{dC_i^*}{dt^*} = & -\frac{K_i T S_0}{V_i C_s} S_i^* + k_2 T (1 - C_i^*) \\ & + \frac{q_{i-1} T}{V_i} (C_{i-1}^* - C_i^*) - \frac{q_i T}{V_i} (C_i^* - C_{i+1}^*) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_i^*}{dt^*} = & -\frac{K_i T}{V_i} S_i^* + \frac{q_{i-1} T}{V_i} (S_{i-1}^* - S_i^*) \\ & - \frac{q_i T}{V_i} (S_i^* - S_{i+1}^*) \end{aligned} \quad (6)$$

筆者らは崩れ波による再曝気係数を求めているが⁴⁾, それを整理して $k_2 T$ を求めると次式となる。

$$k_2 T = \frac{0.144}{(2\pi)^{1/8}} \frac{D^{1/2} g^{1/2} i^{1/4} H_0^{1/2} T^{5/4}}{\nu^{1/4} h_b^{3/2}} \quad (7)$$

ここで D , ν はそれぞれ分子拡散係数, 動粘性係数, i , h_b は斜面勾配および砕波水深である。

$K_i T / V_i$ はやや強引ではあるが, 図-6 中で引いた直線より, H_0 / L_0 の関数として求めた。また q_i は灘岡らが微小振幅波理論より導き, 実験結果と比較した報告を利用して求めた⁵⁾。この方法により, 有機物が存在しない場合の DO のみの分布については, ほぼ実験結果を再現しうることを確認している⁴⁾。

(2) 計算結果および考察

図-8 に実験開始時の濃度を初期値として与えて行った数値計算結果と実験結果との比較を示す。全体的な傾向はほぼ再現できているものと考え, 本モデルを用いて入射波の自浄作用におよぼす影響を考察してみる。

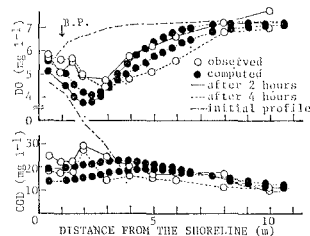
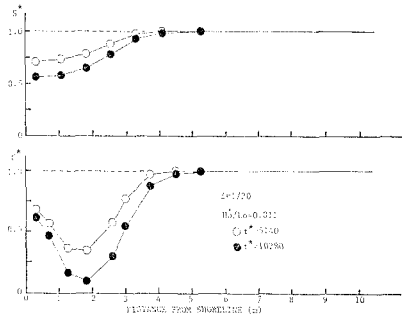


図-8 計算値と実験値の比較

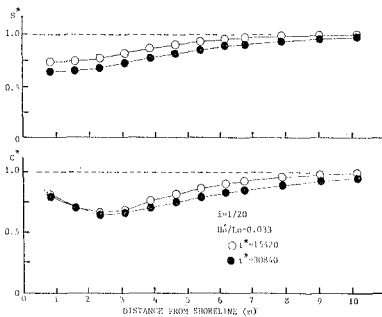
図—9 に代表的な計算例を示す。 H_0'/L_0 が小さいほど COD の低減が遅れ、しかも濃度の減少域も短くなっている。また同じ沖波条件の場合、斜面勾配が緩やかな方

が生物膜の存在域が長くなり（ここでは斜面部全域に生物膜が存在するものと考えた）、COD の低減が広範囲にわたっている。

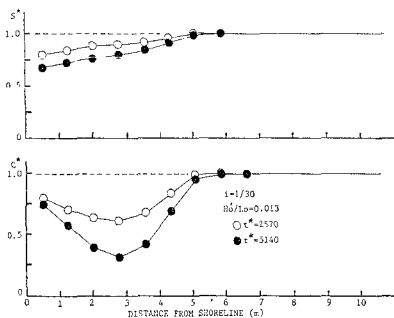
DO は碎波帯の外側で減少が著しい。とくに入射波高が小さい場合には、減少傾向が止まらず、嫌氣的状態へと移行していく。DO の低下が最大となる点における、DO の時間的な変化を示したのが図—10 である。ここで設定したような生物膜が存在する場合、 $H_0'/L_0=0.011$, 0.013 の場合、完全に DO が枯渇しており、 $H_0'/L_0=0.022$, 0.026 の場合でも水質環境はかなり悪化するとされる。また局所的な DO の低下は斜面勾配が緩やかな方が著しい。これは斜面が緩やかな方が碎波帯は長くなるが再曝気係数は小さくなるためであると考えられる。



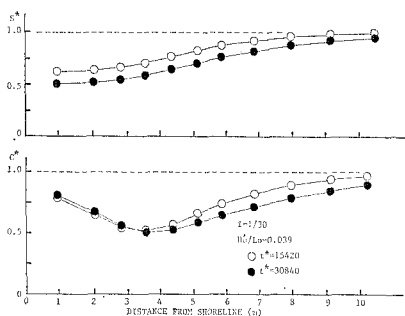
(1)



(2)

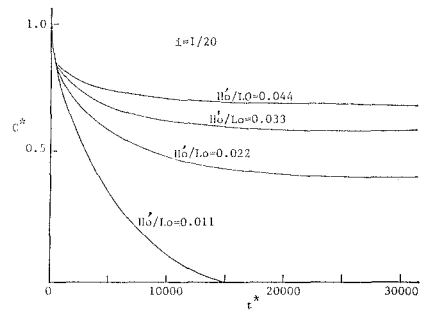


(3)

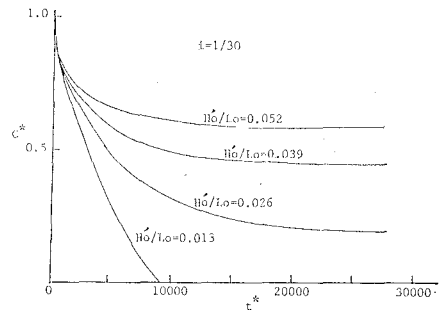


(4)

図—9 COD および DO の計算結果



(1)



(2)

図—10 DO の時間変化

5. 結 言

本論文では波打ち際に水質の自浄作用が存在すると考え、室内水槽実験を行って実験的に確かめた。式 (5), (6) に示されているように、波打ち際の自浄作用に関係する量は、みかけの脱酸素定数 K_d/V_i と再曝気係数である。これらが水質変化におよぼす影響については別途検討を進めているが、本論文では K_d と波の関係について考察を行った。定量的には実験を行った範囲内の議論にとどまったが、定性的な傾向は得ることができた。波以外の影響要因についても検討を行い、現実場へ

の適用を考えていきたい。

参 考 文 献

- 1) 矢野洋一郎: 自浄作用を応用した河川の浄化, 用水と廃水, 21 巻, pp. 13~24, 1982.
 - 2) 森田弘昭・山田幸男・安中徳二: 流路内浄化工による河川水質の改善, 衛生工学研究論文集, 22 巻, pp. 137~149, 1986.
 - 3) 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 回海岸工学講演会論文集, pp. 451~455, 1981.
 - 4) Hosoi, Y., H. Murakami and M. Oto: Reaeration by spilling breaker, Coastal Engineering in Japan, Vol. 27, pp. 97~108, 1984.
 - 5) 灘岡和夫・近藤隆道・田中則男: レーザードップラー流速計による碎波帯内の流速場の構造の解明, 港湾技術研究所報告, 21 巻, 2 号, 1982.
 - 6) 細井由彦・村上仁士・岩崎哲史: 波打ち際における水質浄化能力に関する考察, 京都大学環境衛生工学研究会 第 8 回シンポジウム論文集.
-