

砕波帯付近の水質浄化作用に関する研究

細井由彦*・村上仁士**・岩崎哲史***・松本 匠****

1. 緒 言

ウォーターフロントの開発、利用計画が進められる中で、沿岸部の水質保全は、ますます重要な課題になりつつある。そこで筆者らは海岸構造物に積極的に水質浄化の役割も担わせることを考え、構造物による曝気作用に関する検討を行っている¹⁾。曝気により溶存酸素の供給が行われ、微生物による有機物の分解が進む。本研究では曝気作用の行われる沿岸部において、汚濁物質自身がどのような挙動をとるのかを調べてみた。すでに一部発表を行っているが²⁾ 本論文では、実験の追加とともに、理論的検討も行った。

言うまでもなく、水域には自浄作用とよばれる能力がそなわっており、汚濁廃水の放流が適切なレベル以下であれば、水質は良好な状態に保たれる。近年ではとくに、このような自然の有している自浄能力を、積極的に利用しようとする試みも行われるようになってきた³⁾。

本研究では、勾配 1/20 の一様傾斜面を有する海岸をとりあげた。このような傾斜面では、砕波により酸素の供給が活発に行われるとともに、斜面上にバクテリアが付着生育するので、自浄作用には好都合であると考えられる。

2. 一様傾斜面海岸における浄化作用に関する実験

長さ 14.4 m、幅 0.2 m の片面ガラス張り造波水槽を用い、一端に勾配 1/20 の一様傾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 秒とした。

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、波の存在下で約 20 日間、斜面部に付着生物を形成させた。

生物膜の形成後、いったん波を停止して水を抜き、斜面部以外の水槽面等に付着した生物を除去し、再び水を入れて実験を行った。

有機汚濁物に関する実験においては、スキムミルクを

溶かした水を有機性廃水として、波の存在下で、一時に加える瞬間放流と、岸から一定の割合で加えてゆく連続放流の、2つの方法で放流を行った。

所定の時間間隔で汀線から沖側へ 50 cm 間隔で水質の測定を行った。DO の測定には溶存酸素計を用い、有機物の測定は、採水して COD を測定した。COD は一部、重クロム酸法を用いたが、過マンガン酸カリウム法でも十分精度が得られることがわかったので、大半は比較的分析の簡単な過マンガン酸カリウム法によって測定した。

スキムミルクの他に、保存性物質を代表するものとして、塩分およびベントナイトを含んだ水も連続放流した。塩分濃度は電気伝導度で測定し、ベントナイト濃度は採水して光透過法により測定した。

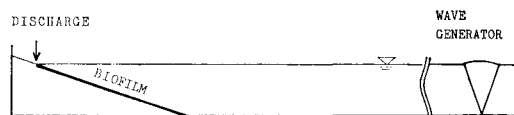


図-1 実験装置

3. 実験結果

(1) 濃度分布

図-2 (a) は瞬間放流した場合の COD および DO の時間変化である。付着生物の存在する斜面部付近で、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、砕波帯付近では酸素の供給も活発なので、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-2 (b) は汀線から沖へ向かって、1 m から 1.4 m の間に消波ブロックを積みあげた防波堤を設置して行った、瞬間放流による実験の結果である。COD の減少の様子は、図-2 (a) の場合とよく似ている。ブロックの部分では、砕波するために、DO の低下は少ないが、ブロックより岸側では、図-2 (a) に比べてかなり DO の低下がみられる。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り、注意を要する。

* 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

*** 正会員 工修 高知県庁

**** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科 建設工学専攻

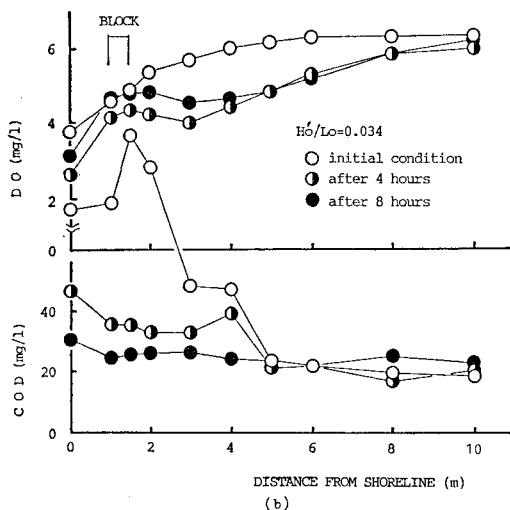
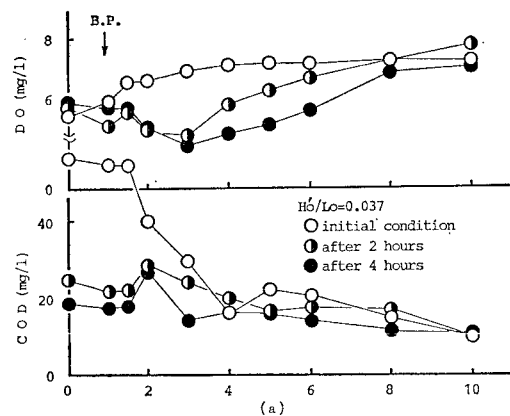


図-2 COD, DO の分布 (瞬間放流)

図-3 (a), (b) は連続放流の場合の COD および DO の時間変化の例である。

図-3 (a) では、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あり、放流と分解および再曝気の際に、ほぼバランスがとれていると言える。したがって、自浄能力の範囲内にある、適切な放流が行われている状態であると言える。

図-3 (b) では、8 時間後においては、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。さらに放流が続いた場合、嫌気性状態に移行する可能性もある。

図-4 (a), (b) は放流物質の違いによる濃度分布形状の差を見たものである。放流条件の差をなくすために、濃度は、放流汚濁水量 Qa と汚濁物濃度 Sa 、周期 T により無次元化されている。

図-4 (a) における、ベントナイトと塩分を比較した場合、ベントナイトにおいて、沈降による濃度の低下が若干見られるようである。(b) における塩分と COD の分布を比べると、明らかに COD は斜面部付近で低下し

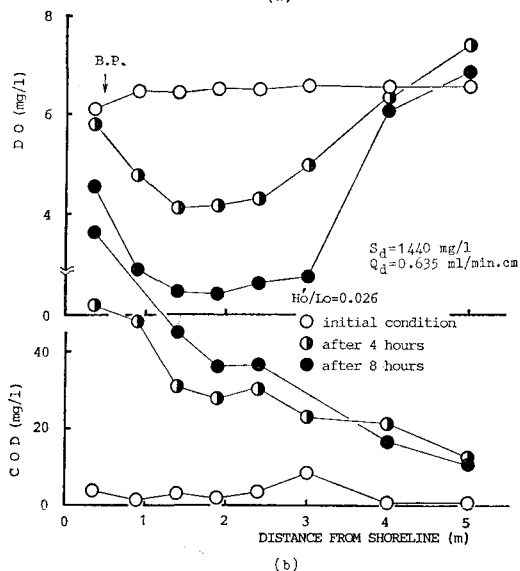
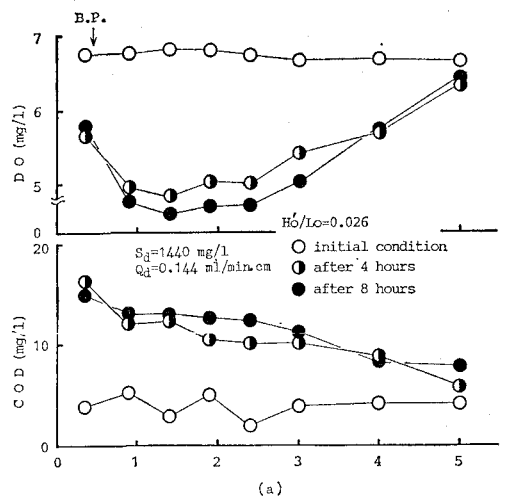


図-3 COD, DO の分布 (連続放流)

ていることがわかる。

(2) 付着生物

斜面上に付着生育した生物膜の乾燥重量の分布の一例を図-5 に示す。さらに電磁流速計により計測した、斜面付近の岸沖方向流速の振幅の大きさを、図-6 に示す。流速の振幅は沖から碎波点に近づくにつれて大きくなっている。付着生物量も碎波点 (汀線より 0.5~1 m のところに分布) に近づくにつれ多くなり、碎波点付近で減少している。生物膜の生育と水理条件との関係と考えた場合、膜付近の水の動きが大きい方が、膜への基質や DO の輸送が促進されて、膜の生育に有利であるが、一方でシアーにより生物膜をはく離させると考えられる⁴⁾。図-5 もこの傾向を示している、碎波帯付近では強い乱れにより、生物膜の形成が阻害されているが、その他の部分では流動により、膜形成が促進されている。

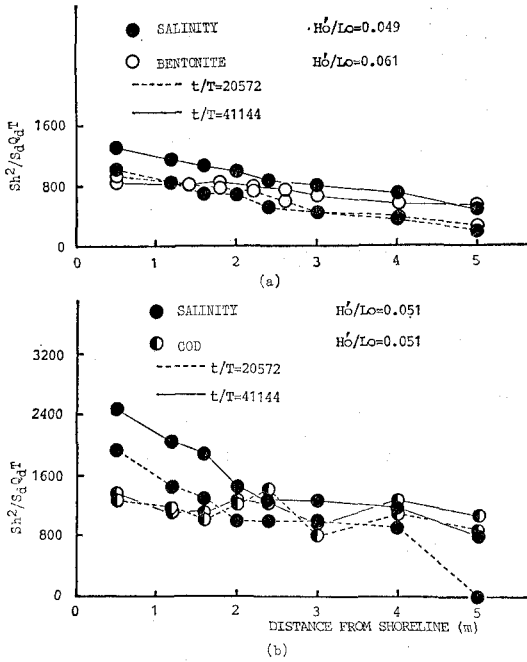


図-4 放流物質の違いによる濃度分布の比較

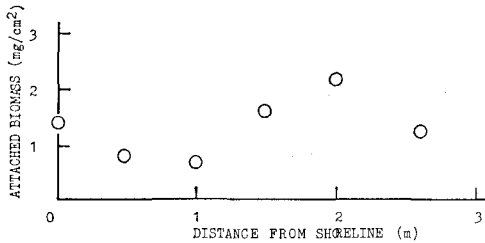


図-5 付着物の分布

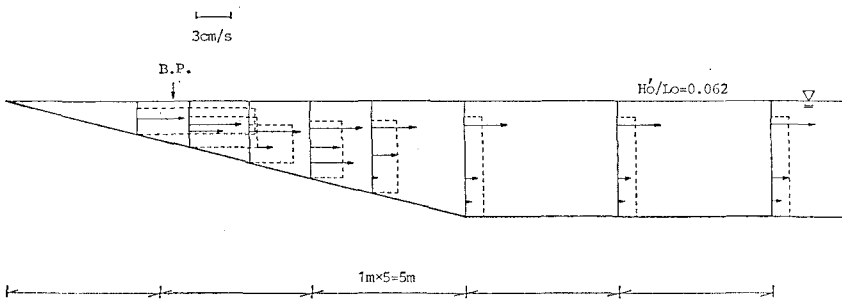


図-6 斜面付近の流速の振幅

4. 数学モデルの検討

(1) 基礎式

図-7 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うと水質について次式を得る。

$$\frac{dS}{dt} = -k_3 S + \frac{1}{V_p} \{Q_a S_a + Q \hat{S} - (Q + Q_a) S\} \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = -k_1 S + k_2 (C_s - C) + \frac{1}{V_p} \{Q_a C_a + Q \hat{C} - (Q + Q_a) C\} \quad (2)$$

式 (1) において、 S は汚濁物質濃度で COD 等を指す。右辺第一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 は浄化領域と外部との交換流量を示す。添字 d は放流廃水に関するものであることを示し、 $\hat{}$ は領域外の量であることを示す。式 (2) は DO に関する式で、右辺第一項は有機物の分解にともなう消費を表わし、 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 、代表汚濁物質濃度 S_r 、波の周期 T で無次元化すると次式となる。

$$\frac{dS^*}{dt^*} = -k_3 T S^* + \frac{T Q_a}{V_p} S_d^* + \frac{T Q}{V_p} \hat{S}^* - \frac{T(Q + Q_a)}{V_p} S^* \quad (3)$$

$$\frac{dC^*}{dt^*} = -k_1 T \frac{S_r}{C_s} S^* + k_2 T (1 - C^*) + \frac{T Q_a}{V_p} C_d^* + \frac{T Q}{V_p} \hat{C}^* - \frac{T(Q + Q_a)}{V_p} C^* \quad (4)$$

ここで $C^* = C/C_s$ 、 $S^* = S/S_r$ 、 $t^* = t/T$

(2) 定常解

式 (3)、(4) の定常状態における解をそれぞれ S^* 、 C^* とするとつぎのようになる。

$$S^* = F/\alpha' \quad (5)$$

$$C^* = \frac{1}{\beta'} \left(F' + k_2 T - k_1 T \frac{S_r}{C_s} \frac{F}{\alpha'} \right) \quad (6)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= k_3 T + \frac{T}{V_p} Q, \quad \alpha' = \alpha + \frac{T}{V_p} Q_a \\ \beta &= k_2 T + \frac{T}{V_p} Q \\ \beta' &= \beta + \frac{T}{V_p} Q_a \\ F &= \frac{T}{V_p} (Q_a S_d^* + Q \hat{S}^*) \\ F' &= \frac{T}{V_p} (Q_a C_d^* + Q \hat{C}^*) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(3) 非定常解

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、式 (3)、(4) よりつぎの解を得る。

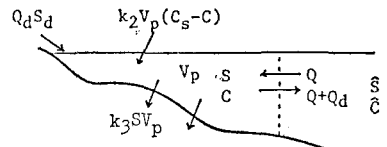


図-7 浄化領域モデル

$$S^* = S_{\infty}^* + (S_0^* - S_{\infty}^*) \exp(-\alpha' t^*) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$C^* = C_{\infty}^* - \gamma \exp(-\alpha' t^*) + (C_0^* - C_{\infty}^* + \gamma) \exp(-\beta' t^*) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{ここで } \gamma = \frac{k_1}{k_2 - k_3} \frac{S_r}{C_S} (S_0^* - S_{\infty}^*) \quad \dots\dots\dots (10)$$

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

(4) 考 察

以上よりわかるように、沿岸部の浄化領域の水質に重要な影響をおよぼすのは、式 (7) で示される各パラメータである。 α および α' は、生物化学的作用の他に、現実的には沈殿等も含めた広義の浄化作用と、浄化領域の外部との水量交換にともなう浄化作用を含んだ、総合的な浄化パラメータと考えることができる。 β 、 β' は、曝気および水量交換による DO の供給を示すパラメータである。さらに F は汚濁負荷を示している。

有機物が放流された場合に、自浄能力の範囲内であれば、DO 濃度がいったん低下した後再び回復する。この様子は図-8 で示される。ここに示される DO 垂下曲線は式 (9) であるが、その最小値は次式で与えられる。

$$C_{\min}^* = C_{\infty}^* - \gamma \left\{ \frac{\beta' (C_0^* - C_{\infty}^* + \gamma)}{\alpha' \gamma} \right\}^{\frac{\alpha'}{\alpha' - \beta'}} + (C_0^* - C_{\infty}^* + \gamma) \left\{ \frac{\beta' (C_0^* - C_{\infty}^* + \gamma)}{\alpha' \gamma} \right\}^{\frac{\beta'}{\alpha' - \beta'}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$t_1^* = \frac{1}{\beta' - \alpha'} \ln \frac{\beta' (\gamma - C_{\infty}^* + C_0^*)}{\alpha' \gamma} \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上の各式は多くのパラメータを含んだ複雑な形をしている。各パラメータの予測精度や、モデルが理想化された場を扱っていることを考えると、現実の場への適用を考えるためには、単純化の方が適切であると考えられる。そこで単純化したパラメータを導いてみる。

一般に放流汚濁負荷はバックグラウンドよりはるかに高いと考えられるから、 $Q_a S_a \gg Q \hat{S}$ 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、 $Q \gg Q_a$ と考えてよいであろう。このような場合には、式 (5) よりつぎのような関係を得る。

$$\frac{S_{\infty}}{S_a} = \frac{Q_a}{k_3 V_p + Q} \quad \dots\dots\dots (13)$$

DO については、外部領域の汚染は少なく、DO はほ

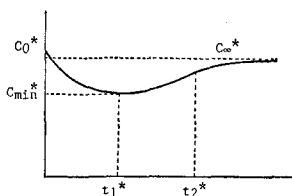


図-8 DO の変化

ぼ飽和状態にあるとみなせるとすると、 $\hat{C} = C_S$ とおくことができる。この仮定と式 (13) を利用すると、式 (6) より、つぎの関係を得る。

$$\frac{C_{\infty}}{C_S} = 1 - \frac{k_1 V_p}{k_2 V_p + Q} \frac{S_{\infty}}{C_S} \quad \dots\dots\dots (14)$$

5. 実験結果による検討

瞬間放流の実験では、投入有機物量が正確にわかっているの、 k_3 を計算するのに適している。そこで瞬間放流の実験結果より、次式で k_3 を求めた。

$$k_3 V_p S_p = - \frac{d}{dt} \int S dv$$

上式の右辺は水槽中の全有機物の時間的変化率を示しており、これが左辺に示される浄化領域での生物による単位時間当たり分解量に等しいとおいている。

求められた各実験における k_3 を、その実験の沖波波形勾配で整理したものが図-9 である。沖波波形勾配の増加にともない k_3 が増加する傾向が若干見られるが、これは 3 の (2) で述べたように、膜表面付近の流動が大きくなると、膜への基質の輸送が促進されるためであると考えられる。

$T=0.7$ 秒であるから、図-9 より k_3 を 10^{-4} /秒と仮定し、斜面部全域 (汀線から 3m 沖まで) を浄化領域と考えて、有機物を連続放流した全ての実験について式 (13) を計算した。交換流量 Q はロンゲット・ヒギンズの与えた質量輸送速度の絶対値を、水深方向に積分したものの 1/2 の値で与えた。

こうして求めた S_{∞} の値と、各実験において最後に測定した COD 値 (ほとんどは放流開始 8 時間後、一部は 6 時間後の測定値) を、浄化領域内で平均した値と比較したものが図-10 である。

実験値が必ずしも定常値に達していない事を考慮に入れても、計算値との間にはかなりの隔たりがある。しかし両者の間には直線的な関係が認められ、適当な補正係数を導入することにより、式 (13) で放流開始後の状態

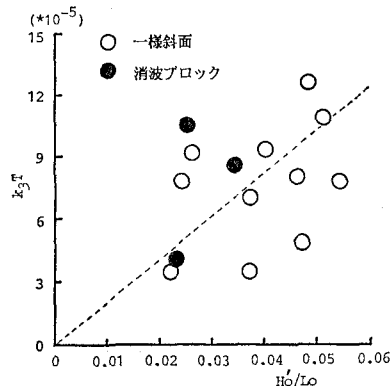
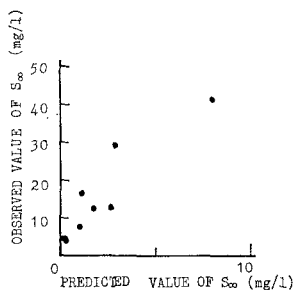
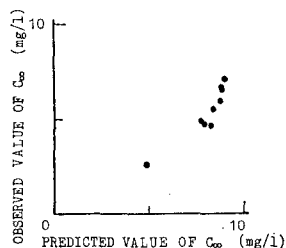


図-9 k_3 と沖波波形勾配との関係

図-10 S_{∞} の予測値と実験値との関係図-11 C_{∞} の予測値と実験値との関係

をある程度予測しうると考えられる。

$k_1=k_3$ とし、ここで求めた S_{∞} と、 k_2 には筆者らが提案した浄化領域における、碎波による再曝気係数の予測式⁹⁾より求めた値を用いて、式(14)より C_{∞} を計算した。上述の最終測定時における DO の浄化領域内平均値と、計算値を比較したものが 図-11 である。計算値の方が実値よりもやや小さくなっているが、ほぼ DO の変化を予測し得ている。

式(13)、(14)より、汚濁物からみれば $Q_a S_a / (k_3 V_p + Q)$ が、DO からみれば $k_1 V_p S_{\infty} / (k_2 V_p + Q) = k_1 V_p Q_a S_a / (k_2 V_p + Q)(k_3 V_p + Q)$ が重要な量であることがわかる。

水質の状態が良好に保たれると考えられる 図-3 (a) の場合には

$$Q_a S_a / (k_3 V_p + Q) = 1.8, \quad k_1 V_p S_{\infty} / (k_2 V_p + Q) = 1.3$$

であり、水質が悪化すると考えられる 図-3 (b) の場合には

$$Q_a S_a / (k_3 V_p + Q) = 8.0, \quad k_1 V_p S_{\infty} / (k_2 V_p + Q) = 4.4$$

という値を示していた。

逆に許容汚濁負荷量 $Q_a S_a$ は $k_3 V_p + Q$ あるいは $k_1 V_p / (k_2 V_p + Q)(k_3 V_p + Q)$ を使って評価しうると考えられる。

6. 数値計算による検討

汀線より沖側に向かって、入射波の 1/4 波長ずつに区切ったボックス内において、式(1)、(2)と類似の式をたて、種々の放流条件のもとで数値計算を行った。詳しい方法については文献 5) にゆずり、結果を 図-12 に

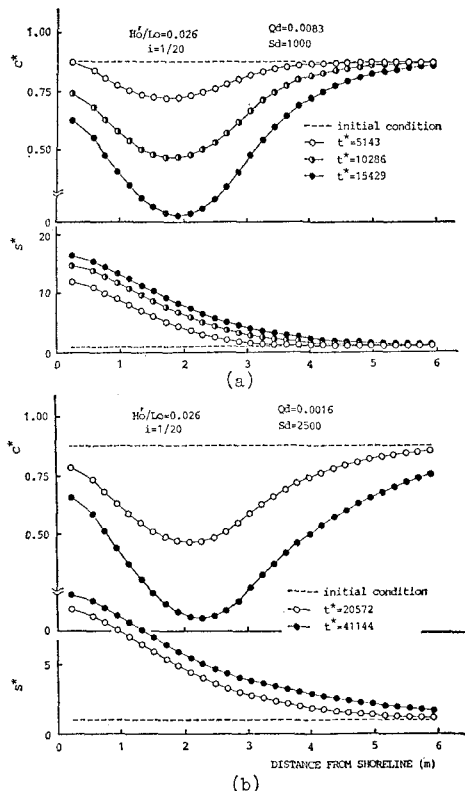


図-12

示す。

図-12 は同一の波の条件で排出汚濁負荷量が異なった場合の例を示している。汚濁負荷量の多い方が DO の低下が早く、DO の最小となる点が汀線側に近づいている。

7. 結 言

本研究はあくまで実験水槽内における検討であり、今後現実の場合への適用に関する検討が必要になるであろう。

参 考 文 献

- 1) 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 回海岸工学講演会論文集, pp. 812~816, 1988.
- 2) 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 回海岸工学講演会論文集, pp. 586~590, 1986.
- 3) 用水と廃水, 24 巻, 1 号, 特集「自然の浄化力を利用した水質改善」, 1982.
- 4) Hosoi, Y. and H. Murakami: Effect of the fluid velocity on the biofilm development, Proc. of Water Forum '86, ASCE, pp. 1718~1725, 1986.
- 5) Hosoi, Y. and H. Murakami: Effect of breaking waves on dissolved oxygen and organic matter, Proc. of 20th ICCE, pp. 2498~2512, 1986.