

石積み浄化堤による海水浄化工法の開発（その4）

—— 水質浄化性能に及ぼす水量負荷の影響 ——

宮岡 修二
辻 博和

石垣 衛
小林 真

(本社 土木技術本部設計第四部)

概要

本システムでは、富栄養化した沿岸海域の一部を石積み堤によって囲むことで、清澄な内水面を創出する。汚濁海水は潮の干満によって石積みの礫間を通過する。このとき、礫に付着した種々の生物の活動によって、海水は浄化される。このシステムの浄化性能を定量的に実証するため、1993年7月に実海域内にパイロットスケールの実験堤を築造した。実験堤が水質浄化性能を有することは、前報までに報告した通りである。しかし、この石積み堤の水質浄化性能は、潮位差、内水域の奥行き（面積）、堤体の幅や延長などによって規定される堤体通過水量、およびこの水量負荷と周辺海域の汚濁物質濃度との積分値である汚濁負荷によって、変化すると予想される。そこで、水中ポンプを用いて内水面の水を強制的に外海に排出して、堤体が受ける水量負荷を調節するとともに、夏場2～3カ月にわたって継続的に調査を実施し、種々の汚濁物質濃度および水量負荷における水質浄化能を現地で調査した。

懸濁物質の浄化性能については、現地の懸濁物質の主成分が植物プランクトンであることから、その指標であるクロロフィル濃度を用いて解析した。海水の堤体内への滞留時間が1時間のとき、海水中のクロロフィルaは約75%が除去された。

1. はじめに

海辺は我々の心にやすらぎや潤いを与えてくれる貴重な空間である。また、多様な生物の生息場でもある。しかし、沿岸海域の水質は富栄養化が進行しており、その水環境は良好なものとはいえない。したがって、豊か

で快適な海域環境を創造していくためには、水域の浄化をはかる必要がある。水域を浄化しようとする場合、下水道整備や有機底質の浚渫など、汚濁発生源に対して策を講じるのが着実である。しかし、これらは工事規模、費用などの点から長期的な事業として取り組まざるを得ないため、短期的には改善効果が認識されにくい。もう

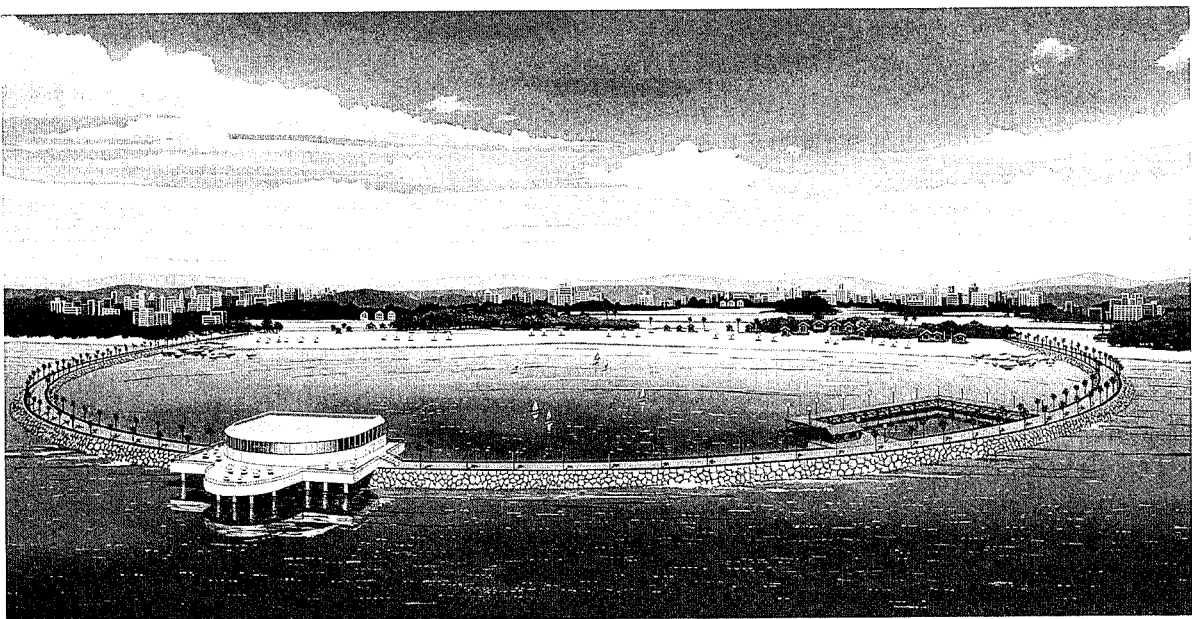


Fig.1 石積み浄化堤による海水浄化工法の適用イメージ
An Example of Ecological Sea Water Purification System with a Rubble Mound

一つのアプローチとして、近年注目されているのが、水域を直接浄化するという対策である。この場合には、比較的汚濁レベルの低い大容量の水を対象とするため、水域に元来備わっている自然の浄化機能を活用することが有効と考えられている^{1)~4)}。

標記の海水浄化システムでは、汚濁した沿岸海域の一部を石積みで囲み、清澄な水域を創出する。潮の干満や波浪などによって海水が堤体部を通過する現象と、石積みにも生じる自然の浄化機能を活用して、海水を浄化する。Fig. 1には、石積み浄化堤を実海域に適用したときのイメージ図を示す。静穏で清澄な内水域は、親水空間として、また、水際生態系を創出する場としての活用が考えられる。具体的には、人工海浜、人工干潟、人工環礁、魚介類の育成場、魚釣り場、清浄な海水の取水場等があげられる。

このシステムの浄化性能を実証するため、1993年7月に三河湾にパイロットスケールの実験施設を築造した。実験堤が明瞭な水質浄化効果を有することは、前報までに報告している^{5)~7)}。

さて、石積み浄化堤を設置する場合、水域の潮位差や水深、内水域の奥行き、堤体の幅や延長などによって、堤体への水量負荷は大きく異なってくる。この水量負荷と海域の汚濁物質濃度との積分値である汚濁負荷は、石積み浄化堤の水質浄化性能に影響を及ぼすと予想される。そこで、浄化堤の適切な設置諸元をみいだすため、実験堤に水中ポンプを設置し強制的に水量負荷を増加させ、そのときの水質浄化性能に及ぼす影響を現地で調査した。

2. 実験概要

2.1 現地実験施設

実験堤は、水深がおよそ2~4mの三河湾奥沿岸域に1993年7月に築造した。実験堤の全景は、Photo 1に示す。堤の芯材には直径が20~30cmの砕石を用い、堤頂幅、堤高はそれぞれ5mとした。堤の片側には鋼矢板を打設し、海水が礫間を介してのみ外海と交換される間口6m、奥行き約10mの内水域を設けた。そして、Fig. 2に示すように、内水域最奥部に揚水能力0.7m³/minの水中ポンプ4基を設置した。水中ポンプにはフレキシブルホースを接続し、これを鋼矢板の背面に導き、内水域の海水を外水域に排出できるようにした。なお、内水域の海水を上下層とも均等に排出するため、2基はフロートに固定し、常に表層から-0.5m水深の海水を排出させた。残りの2基は水底面から+1.0mの位置に固定し、下層の海水を排出させた。懸濁物質の浄化性能を調査するときは、さらに、内水域底部に設置した散気管を用いて緩やかに曝気して、海水を攪拌した。ただし、溶存酸素(DO)の消費特性を調査するときは、曝気はしていない。

2.2 現地調査概要

実験は1994年8~11月、1995年6~10月、1996年8~9月

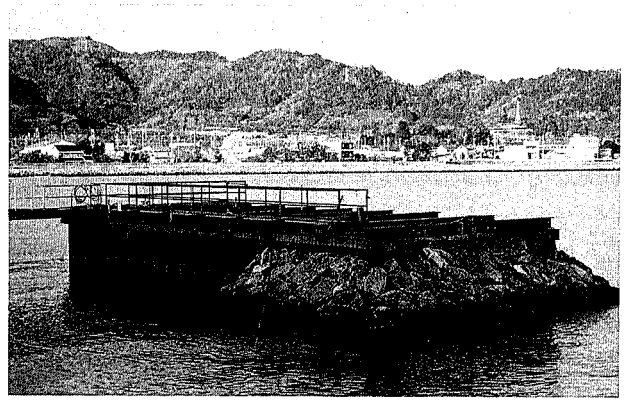


Photo 1 実海域に設置した実験堤
On-Site Experimental Facility

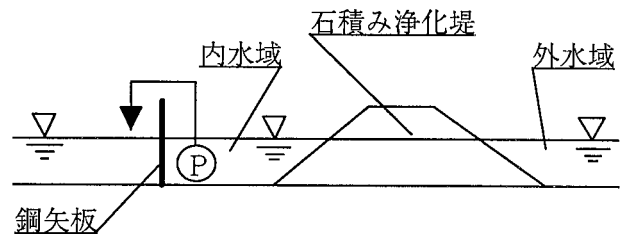


Fig. 2 実験堤断面図
Vertical Section of On-Site
Experimental Facility

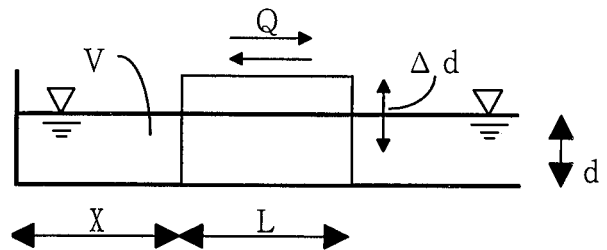


Fig. 3 水量負荷算定に用いた実験堤の矩形モデル
Vertical Section of On-Site
Experimental Facility

Table 1 実験堤における揚水時の水量負荷条件
Numbers of Running Water Pumps and
Water Loads on the Facility

ポンプ 運転台数 (台)	石積み礫層		内水域
	線速度* (m/hr)	滞留時間* (hr)	滞留時間 (hr)
1	3.4~5.7	2.8~4.5	2.5~4.3
2	7.7~11	1.4~1.9	1.3~2.0
4	16~21	0.7~0.9	0.7~1.0

* 礫層間隙率 0.47 を考慮した値

に実施した。水中ポンプは調査の前日ないし前々日に所定の台数での運転を開始させた。こうすることで、礫層間隙および内水域の海水が、ある程度定常的に交換される状態にした。各調査日には、9~15時の間に2回ないし4回の計測と採水を実施した。内水域および外水域の定点で上層水(0~-0.5m), 下層水(底面+0.5~+1m)を採取し、濁度とクロロフィルa濃度(chl.a:クロロフィルaとフェオ色素の含量)を分析した。溶存酸素濃度に関しては、投込み式測定器(HORIBA U-10)を用いて現地で計測した。

3. 水量負荷条件

実験堤は台形断面形状をしているが、ここでは、Fig.3にあるように、矩形とみなして水量負荷条件を算出した。調査日ごとに、9時から15時までの間の平均水深をd(m)とした。これと間口6mとの積に、さらに、別に測定した礫層間隙率0.47を掛けて、礫層間隙を考慮した海水の通過断面積A(m²)とした。堤体を流入する水量Q(m³/hr)は各調査日のポンプアップ水量と9時から15時の間の潮位変動による流入あるいは流出水量との合量とした。海水の通過断面を移動する海水の流速(以下では、断面流速)LV(m/hr)は流入水量Q(m³/hr)を礫層間隙を考慮した通過断面積A(m²)で除して求めた。礫層間隙を考慮した海水の礫層内への滞留時間Tm(hr)は、平均水深d(m)より下部の堤体平均幅L(m)を断面流速LV(m/hr)で除して求めた。内水域への滞留時間Ti(hr)は、平均水深d(m)から求めた内水域平均水量V(m³)を流入水量Q(m³/hr)で除した求めた。これらの値を、Table 1に示す。

ちなみに、実験堤は、平均水深dが約3m、平均堤体幅Lが約15mである。背後に奥行きXが100mの内水域を配置させた場合、潮位変動Δdが1mとすると、石積み堤を通過する海水の断面流速LVは約11.8m/hr、石積み堤内への滞留時間Tmは1.3hrとなる。

4. 現地調査結果

4.1 実海域の水質特性

Fig.4は、それぞれ、実験海域における1994年の実験堤周辺の表層海水の懸濁物質濃度、クロロフィルa濃度、化学的酸素要求量(COD_{mn}:t-COD_{mn}は全量、d-COD_{mn}は溶存態成分)、窒素濃度(TNは全量、d-TNは溶存態成分)、リン濃度(TPは全量、d-TPは溶存態成分)を示したものである。懸濁物質濃度とCOD_{mn}に関しては、それぞれ、週5日ないし3日頻度で1日に2回の調査を行った結果の月平均値をプロットしている。その他は、月に1~4回実施した分析結果をそのままあるいは平均した値を図示した。これらの図より、夏場にかけて、いずれも値が大きくなっており、特に8月の汚濁が著しいことがわかる。

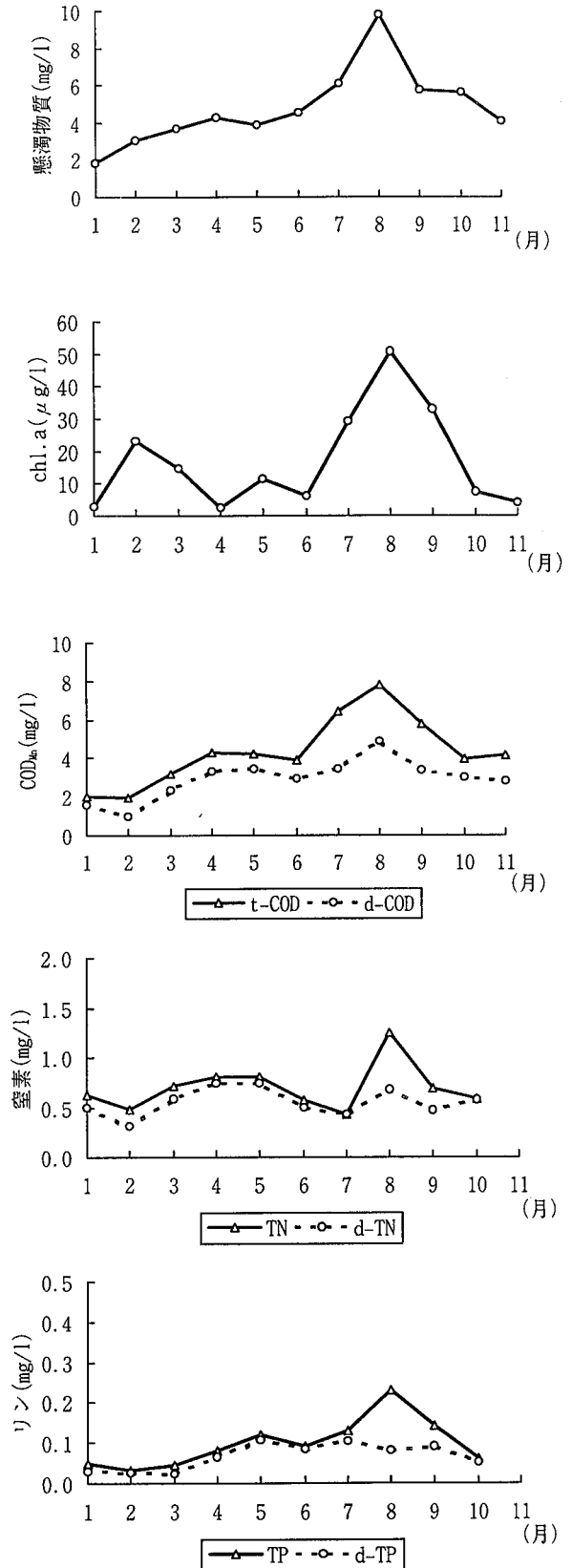


Fig.4 実験海域の水質の季節変動
Seasonal Changes of SS, Chlorophyll a, COD_{mn},
Nitrogen and Phosphorus in Sea Water
Around the Experimental Facility

4.2 クロロフィルa濃度の調査結果

現地海水は、特に夏場にSS濃度やCOD_{Mn}値が大きくなり、水質が悪化する。これは、植物性プランクトンの増殖による有機性懸濁物質の増大に由来するところが多い⁷⁾。一般にいても、富栄養化した海域における水質汚濁の主たる問題点は、夏場の植物性プランクトンの増殖である⁸⁾。こうした観点から、植物性プランクトン量の指標であるクロロフィルaの浄化性能を調査した。

Fig. 5は、ポンプアップ実験の結果の一例を示したものである。1996年9月5日の午後にポンプアップを開始し、約18時間後からクロロフィルa濃度の調査を実施している。図に示すように、外水域あるいは内水域のクロロ

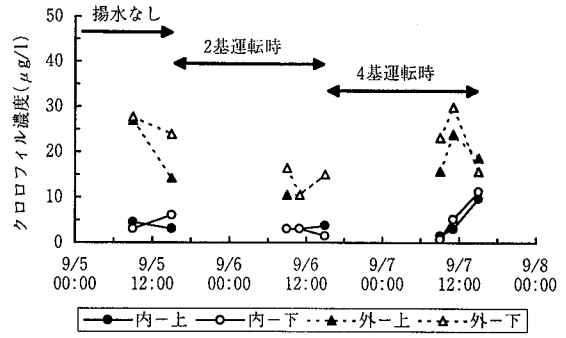


Fig.5 ポンプアップ実験の結果の一例
Variations of Chlorophyll in the Internal and External Sea Water of the Facility

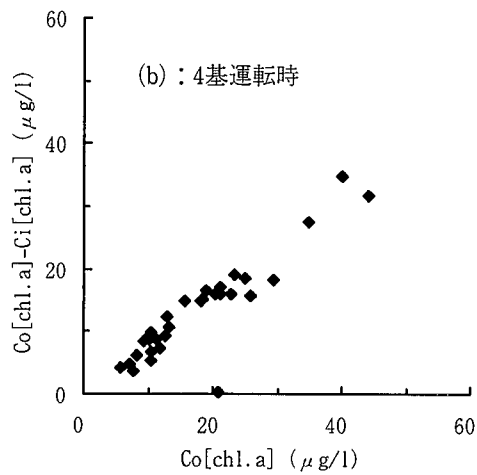
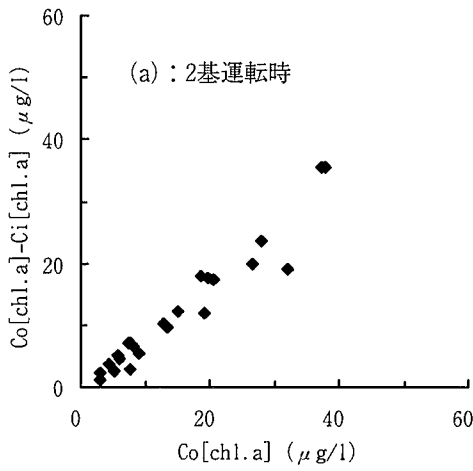


Fig.6 揚水ポンプ運転時のクロロフィルの浄化特性. (a) : 2基運転時, (b) : 4基運転時
Purification Effects of Chlorophyll a on the Conditions of
(a) : 2 Water Pumps' Running and (b) : 4 Water Pumps' Running

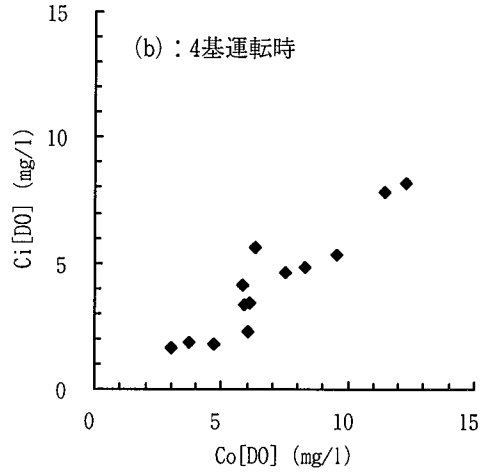
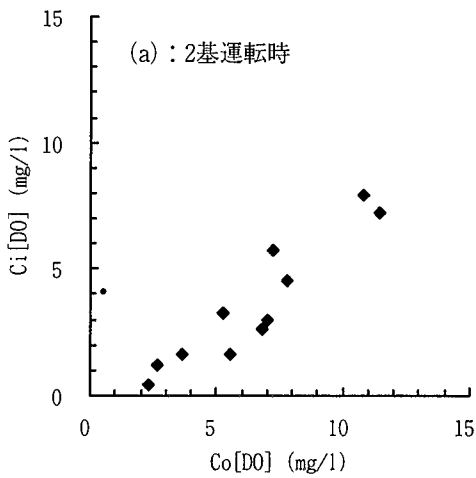


Fig.7 揚水ポンプ運転時の溶存酸素の減少特性. (a) : 2基運転時, (b) : 4基運転時
Degradation Effects of Dissolved Oxygen on the Conditions of
(a) : 2 Water Pumps' Running and (b) : 4 Water Pumps' Running

フィル a 濃度は測定時刻や採取水深によってばらつきがみられる。そこで、内水域、外水域それぞれの上下2層で測定したクロロフィル a 濃度の日平均値を用いて、浄化性能の検討を行った。

Fig.6は、水中ポンプを2基および4基運転させた時の外水域クロロフィル a 濃度(Co[chl.a])に対する外水域クロロフィル a 濃度と内水域クロロフィル a 濃度(Ci[chl.a])の差、すなわち、クロロフィル a 除去量をプロットしたものである。外水域クロロフィル a 濃度とクロロフィル a 除去量との間には相関がみられ、外水域クロロフィル a 濃度が高くなるほど、クロロフィル a 除去量も高くなっていることが分かる。

4.3 溶存酸素濃度の調査結果

礫層にはバクテリア等の生物が付着しており、海水はここを通過する際に溶存酸素を消費される。海水の溶存酸素濃度の低下は、生物生息上不都合であり、極度の溶存酸素濃度の低下は避けられなければならない。こうした観点より、浄化堤の溶存酸素濃度の減少特性を調査した。

Fig.7は、水中ポンプを2基および4基運転させた時の外水域DO濃度(Co[DO])に対して内水域DO濃度(Ci[DO])をプロットしたものである。各点は、クロロフィル a の場合と同様、内水域、外水域それぞれの上下2層で測定したDO濃度の日平均値である。図において、外水域DO濃度が高くなるほど、内水域DO濃度も高くなる傾向が認められた。

5. 実験堤の水質浄化性能

5.1 クロロフィル a 除去性能

Fig.6について、一次回帰を行ったところ、相関係数が0.9以上のほぼ原点を通る式がえられた。そこで、この回帰直線の傾きをクロロフィル a 除去率とした。これを海水の石積み堤内滞留時間 T_m に対してプロットした図が、Fig.8である。なお、石積み堤内滞留時間 T_m は、水中ポンプ運転台数ごとの平均値とした。石積み堤内滞留時間 T_m が0.8時間でクロロフィル a 除去率は74%であり、 T_m が約2時間までは時間とともに除去率が増加した。 T_m が2時間以上では除去率は90%前後となっている。 T_m が2時間以上で、除去性能に変化がみられないのは、内水域海水での植物プランクトンの増殖が影響しているものと考えられる。1996年8月23日と24日の午後、内水域の海水について明瓶を用いてクロロフィル a の増殖速度を測定したところ、それぞれ、3時間で6.4 $\mu\text{g/l}$ が13 $\mu\text{g/l}$ 、1.1 $\mu\text{g/l}$ が1.6 $\mu\text{g/l}$ に増加した。

滞留時間が2時間までの結果に関しては、石積み堤内におけるクロロフィル a 濃度の減少速度が堤に流入する海水のクロロフィル a 濃度(C)の1次式で表されるとして、以下のように解析した。

クロロフィル a 濃度減少速度は、次式で表した。

$$dC/dt = -k \cdot C \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、kは減少速度定数(hr^{-1})とする。海水の石積み堤内滞留時間を $T_m = t$ 、堤流入時の海水のクロロフィル a 濃度(初期濃度)を $C = C_0$ 、堤通過後の海水のクロロフィル a 濃度を $C = C_i$ とすると、(1)式より、次式が得られる。

$$\ln(C_i/C_0) = -k \cdot t \quad \dots\dots\dots(2)$$

Fig.9は、(2)式に基づいてFig.8の結果をプロットしなおしたものである。なお、図中には、 T_m が無限に0hrに近づくと $C_i = C_0$ であるとして、実測値ではないが点(0,0)もプロットしている。 T_m が1.7hrまでのデータに、点(0,0)を含めて一次回帰を行い、以下の結果を得た。

$$C_i = C_0 \cdot \exp[-1.33 \cdot t] \quad (k=1.33) \quad \dots\dots\dots(3)$$

この(3)式を用いると、クロロフィル a の除去性能は、Fig.8中に示す曲線として回帰された。

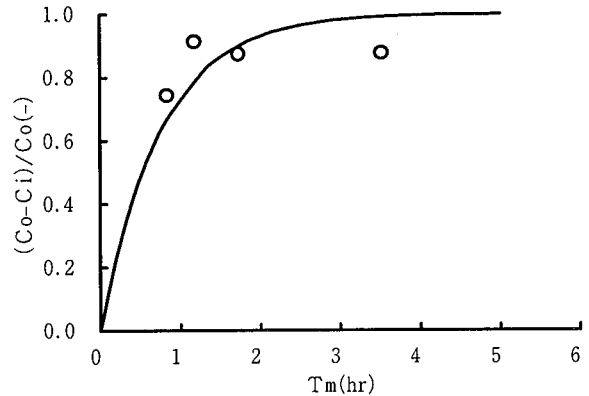


Fig.8 クロロフィル a 除去率と礫層内滞留時間との関係
Relationship of of Ratio of Degradation of Chlorophyll and Residential Time in the Rubble Mound

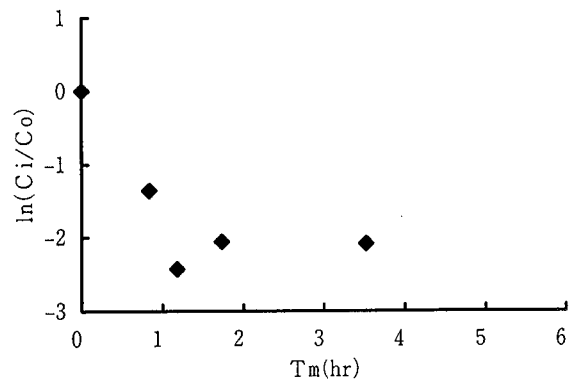


Fig.9 クロロフィル除去性能の解析
 $\ln(C_i/C_0)$ vs. the Residential Time in the Rubble Mound

5.2 溶存酸素消費特性

DO濃度については、クロロフィルa濃度とは異なる減少特性がみられた。外水域DO濃度と、外水域DO濃度から内水域DO濃度をひいた値との間には、クロロフィルaの場合のような高い相関関係は認められなかった。Fig. 7をみると、内水域DO濃度は、外水域DO濃度に対して一定値分が低下している傾向がある。K. Takadaら⁹⁾によれば、底泥による酸素消費のうち、バクテリア等の生物の呼吸による酸素消費は、溶存酸素飽和度が20~100%の範囲で一定であったと報告している。今回の実験結果は、その報告と似た結果を得ており、礫層を海水が通過する際に、付着生物等によって酸素が消費されていることが推察される。そこで、外水域DO濃度が4~10mg/l、DO飽和度としてはおよそ50~140%の調査日のデータについて、DO濃度減少量の平均値を算出した。Fig. 10は、この値を海水の石積み堤内への滞留時間 T_m に対してプロットしたものである。図中のエラーバーは標準偏差を示している。 T_m の増加に伴ってDO濃度減少量は増加することが予想されたが、その傾向は明確ではなかった。これは、内水域における内部生産や水面における再曝気によってDOの減少が見かけ上押さえられたためではないかと考える。

6. まとめ

実海域に築造した石積み浄化堤実証施設を用い、種々の水量負荷条件における石積み堤の水質浄化性能の現地実験を行った。以下に、ここでえられた知見を記す。

1) 海水の石積み堤内滞留時間が1時間程度で、流入するクロロフィルaの70~80%が除去された。

2) 海水の石積み堤内滞留時間の増加に伴ってDO濃度減少量は増加することが予想されたが、その傾向は明確ではなかった。

今後は、現在解析中である現地実験堤解体調査の結果もふまえて、礫堤内における浄化特性、生物付着特性の定量化を進める予定にしている。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、「海洋のうつろによる海水浄化研究会」会長赤井一昭氏には、多大なご指導を賜りました。また、蒲郡海洋開発株式会社の皆様には、現地実験施設の設置、運営に関してご尽力を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

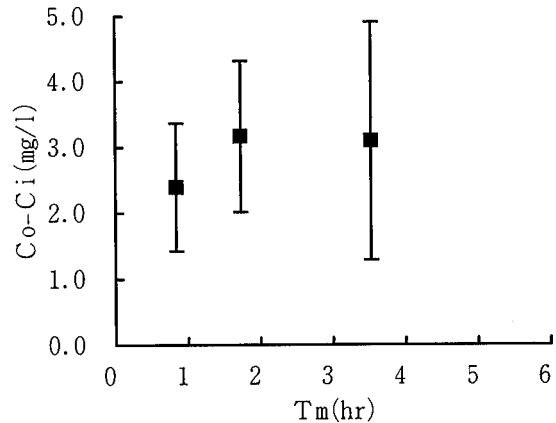


Fig.10 溶存酸素濃度減少量と礫層滞留時間との関係
Relationship of the Amount of Degradation of DO and the Residential Time in the Rubble Mound

参考文献

- 1) 細川恭史：生物膜を利用した汚濁海水の浄化法，ヘドロ，No.56，p.4~9，(1993)
- 2) Kazuaki Akai, et. al.: Water purification system with permeable rubble-mound breakwater, TECHNO-OCEAN, Vol. 2, p. 453~456, (1988)
- 3) 赤井一昭，他：汚濁水域の浄化システム，環境システム研究，Vol. 17, p. 100~106, (1989)
- 4) 赤井一昭，他：付着生物による海水浄化の研究，海洋開発論文集，Vol. 8, p. 409~413, (1992)
- 5) 辻 博和，他：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発(その1)，大林組技術研究所報，No. 49, p. 121~24, (1994)
- 6) 藤井慎吾，他：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発(その2)，大林組技術研究所報，No. 50, p. 107~112, (1995)
- 7) 宮岡修二，他：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発(その3)，大林組技術研究所報，No. 51, p. 99~104, (1995)
- 8) 宮岡修二，他：閉鎖性水域における透明度と懸濁物質の実態，大林組技術研究所報，No. 50, p. 101~106, (1995)
- 9) Kaori Takada and Kenji Kato: Benthic Oxygen Consumption in Lake Suwa, Verh. Internat. Verein. Limnol., Vol. 24, p. 1091~1094, (1991)