

石積み浄化堤による海水浄化工法の開発 (その3)

——実海域の実証施設における浄化性能——

宮岡 修 二 辻 博 和 石 垣 衛
喜 田 大 三 藤 井 慎 吾 小 林 真
(本社 エンジニアリング (本社、土木技術本部
本部) 設計第四部)

Development of Ecological Sea Water Purification System by Rubble Mound (Part 3)

——Sea Water Purification Efficiency of On-Site Experimental Facility——

Shuji Miyaoka Hirokazu Tsuji Mamoru Ishigaki
Daizo Kita Shingo Fujii Makoto Kobayashi

Abstract

In recent years, water pollution and eutrophication in enclosed seas have become serious problems. We have designed a sea water purification system that apply the natural purification capability. The outline of this system is as follows: Part of a polluted sea area is separated with a rubble mound. Due to the ebb and flow of the tide, waves and so on, the polluted sea water passes through the mound. The water is then purified by way of physicochemical and biological processes. In order to verify the water purification efficiency of a rubble mound, we constructed an on-site model facility and investigated its effects.

Approximately 40 days after construction of the rubble mound (July 7, 1993), the water purification effects gradually became evident. The transparency of the water enclosed by the mound became higher than that of the water outside the enclosed area. The monthly mean concentrations of suspended solids (SS) of the water enclosed by the mound were 1~4 mg/l, while those of the water outside were 2~9 mg/l. In addition, the purification effects of chemical oxygen demand, chlorophyll, nitrogen, and phosphorus were clarified.

概 要

富栄養化した海域の直接浄化システムである「石積み浄化堤による海水浄化工法(エコルム工法)」は、汚濁した沿岸海域に石積みで囲まれた水域を創出し、石積みにもまれる自然の浄化機能を活用して海水を浄化するというものである。現在、実海域に施設を築造し、本工法の水質浄化性能に関する実証実験を行っている。

実験施設の築造を完了してから約40日を経過した1993年8月中旬頃より、浄化堤によって囲まれた水域(内水域)の透明度が周辺海域(外水域)に比べ明らかに良好となった。これ以降、約1年半の間、内水域の透明度はおおむね2m以上を維持した。透明度と逆の相関関係を持つ懸濁物質濃度の月別平均値をみると、外水域が2~9 mg/lであったのに対し内水域は1~4 mg/lと低く維持された。また、懸濁物質の主体である植物プランクトンおよび化学的酸素要求量(COD_{Mn})に関しても浄化性能を実証した。

1. はじめに

近年、水際地域の開発においては、アメニティーに富んだ親水空間の創出が求められるようになってきた。また、自然環境に対する関心が高まり、自然との共生をはかった水環境の創造が望まれている。そのため、広域水域を効果的に浄化し保全する技術の開発が急務となっている。

水域の浄化には、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効果的ではある。しかし、これらは工事規模、費用面での制約から長期的な事業として取り組まざるを得ない。すなわち、短期間に水質の浄化効果を期待することは難しい。したがって、水際線の一部地域の開発においては、親水空間を創出す

るため、特定の水域を直接浄化する技術を導入する必要がある。

水域の直接浄化においては、下水等に比べ汚濁の程度が低く大容量の水が浄化の対象となる。その浄化にかかるコストの低減や省エネルギーを図る目的で、自然のもつ浄化機能を積極的に活用することが有効な手法として注目されている。

こうした自然の浄化機能を活用した直接浄化技術の1つに、水路を用いた礫間接触酸化法がある。これは、礫表面に微生物を付着させ、付着微生物と汚濁水とを接触させることで浄化をはかる方法である。これまで、この技術は主に河川水の浄化に対して研究が進められ、野川などでは実際に施設が稼働している¹⁾。また、海水への適用に関しては、当社も参画して民間17社と運輸省港湾技

術研究所からなるシーブルーテクノロジー工法研究会が、平成3～4年度に大型水路を用いた実験を行い、浄化特性と性能に関する種々の知見を得ている^{2),3)}。

ただし、水路型礫間接触酸化施設においては、汚濁水を水路に流下させる必要がある。河川においては、水の流れを利用して流下させることが可能であるが、一定の流れのない海域では、水をポンプアップする必要がある。

一方、赤井らは、海水の移動に潮の干満を利用する海水浄化システム「海洋の空（うつろ）」を提案している^{4),5)}。

そこで、赤井らの浄化システムを発展させ、当社では沿岸海域に透水性の石積みによって囲まれた水域を創出し、石積みには生じる自然の浄化機能によって海水を浄化する工法、すなわち、「石積み浄化堤による海水浄化工法（エコルム工法）」の技術開発を進めてきた。

ここでは、既報^{6),7)}に続き、実験施設を築造した1993年7月から1994年11月までの1年5ヵ月にわたって行った水質調査結果について報告する。

2. 石積み浄化堤による海水浄化システムの概要

図-1には、石積み浄化堤を実海域に適用したときの概念図を示した。本工法では、汚濁した沿岸海域に石積みによって囲まれた水域を創出する。潮汐や波浪などによって海水が堤体内を通過する際、石積みには生じる自然の浄化機能によって海水は直接浄化される。静穏で清澄な内水域は、親水空間として、また、水際生態系の創出の場としての利用が考えられる。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などが挙げられる。

図-2には、海水の浄化に関する因子として考えられる内容を示した。

物理・化学的浄化作用としては、礫間そして静穏な内水域への懸濁物質の沈降堆積、汚濁物質の礫表面への付着（吸着）などが挙げられる。これらのうち、後者については、以下に述べる生物的作用と相互に関連した浄化作用といえる。

一般に、沿岸域などの礫の表面には、細菌類、藻類などの微生物群が付着する。これは生物膜と呼ばれ、この生物膜へ海水中の懸濁物質が付着することによって、海水が浄化される。さらに、付着微生物は溶存態有機物質の酸化分解やアンモニア態窒素の硝化、脱窒も行う。

また、フジツボ、ムラサキガイなどの大型の付着生物群は、植物プランクトンなどの懸濁物質を直接吸水ろ過し、海水を浄化する。

さらに、生物膜に付着した有機物残さは、礫間に生息するゴカイなどの多毛類、タマキビなどの巻き貝、エビ・カニ類によって生物膜とともに食べられ掃除される。これらの種々の作用により、海水が浄化されるとともに、付着物の減容化も進行すると考えられる。

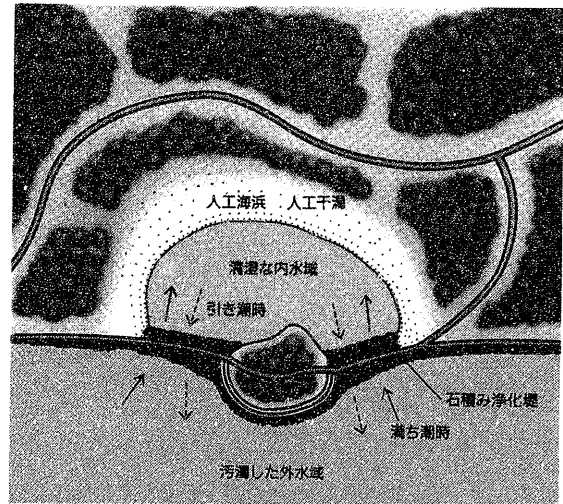


図-1 実海域へ適用した石積み浄化堤の概念図

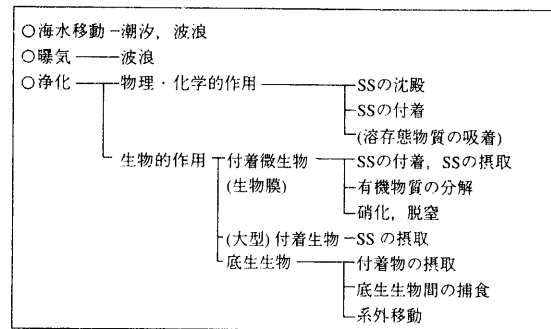


図-2 海水の浄化に関する因子

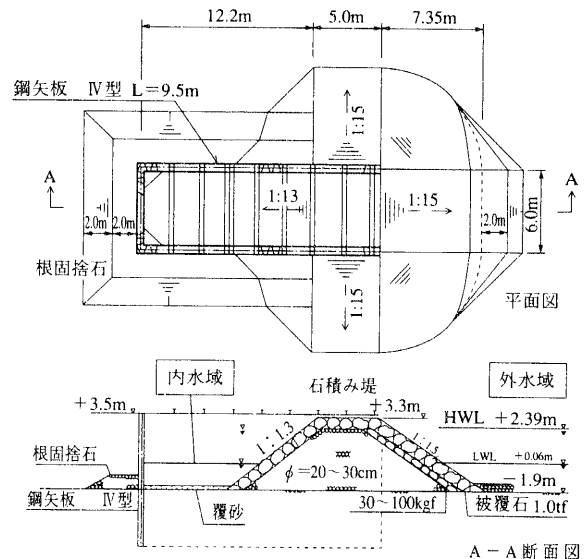


図-3 現地実証実験施設の概要

3. 現地実験の概要

3.1 実験施設

実験施設の概要は図-3に示す。

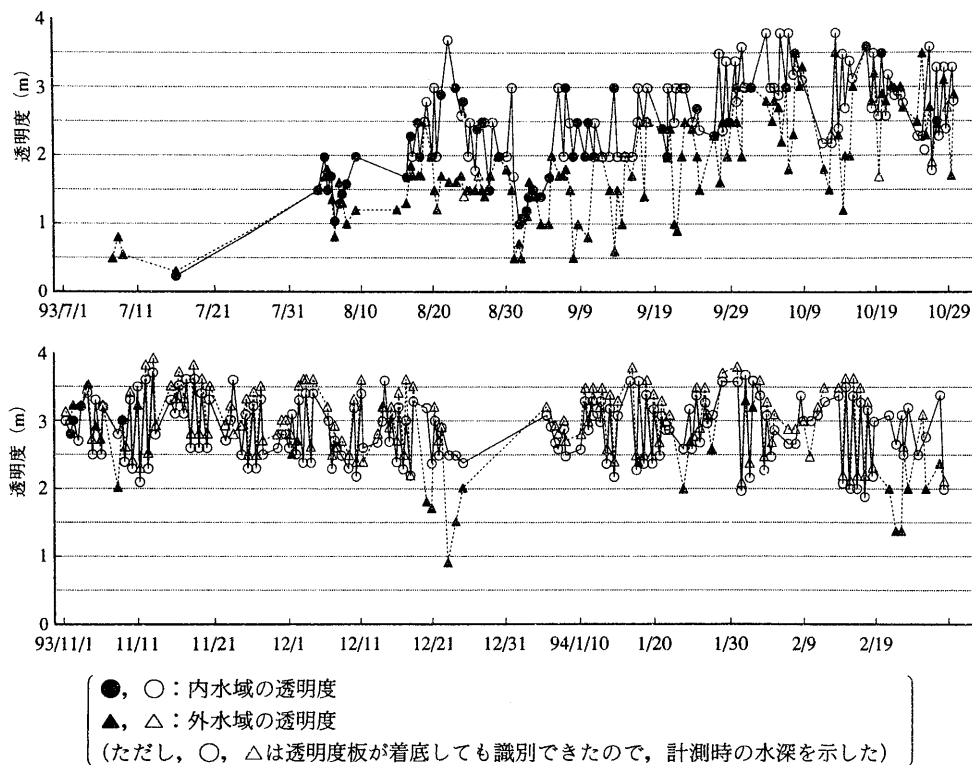


図-4 内水域および外水域の透明度の経日変化

はじめ、海域内3面に鋼矢板を打設し、次いで、1993年7月6～7日に堤の芯材として径が20～30cmの礫を投入した。これにより、沖合いに向かって前面を浄化堤、残りの3面を鋼矢板によって囲まれた水域（間口6m、奥行き約10m）を創出した。その後、波浪防御のため約1tfの石による被覆工を行った。実験海域一帯の海底にはヘドロが堆積しており、内水面については8月3～4日に約20cm厚の浚渫、30～40cm厚の覆砂を行った。

3.2 調査要領

本システムの海水浄化の第1の目的は、親水空間を創出することにある。この親水性の評価指標として、水質に関しては透明度がしばしば用いられる⁹⁾。そこで、透明度、およびこれに影響を与える懸濁物質(SS)濃度を中心に、表-1に記した項目について、現地調査を実施した。

浄化堤と鋼矢板によって囲まれた水域(以後、内水域)および実験施設の近傍の海域(以後、外水域)に定点を決め、現地では透明度、水温、溶存酸度濃度等の計測を行った。同時に、表層水(水深0～50cm)を採取し各種水質分析を行った。特に、現地調査およびSS濃度の分析は、1日に2回の調査を毎週5日の高頻度で実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 経過の概要

図-4に内水域および外水域の透明度の経時変化を示す。築堤から約1カ月を経過した1993年8月上旬までは、内水域と外水域はともに茶褐色を呈することが多く、明

表-1 水質分析項目と調査頻度

項目	頻度	測定方法
水温, pH, 溶存酸素濃度	2回/日×5日/週	海洋観測指針
透明度	2回/日×5日/週	海洋観測指針4.1
濁度	2回/日×5日/週	水質調査法(丸善)
懸濁物質濃度(SS)	2回/日×5日/週	環境庁告示 第59号付表6
化学的酸素要求量(COD _{Mn}) (全量, 溶存態成分)	1回/日 ×3～5日/週	JIS K0102 17
クロロフィルa フェオフィチン	1～2回/月	海洋観測指針9.6
窒素(全量, 溶存態, 無機態)	1回/月	海洋観測指針8.8
リン(全量, 溶存態, 無機態)	1回/月	海洋観測指針8.8

確な透明度の違いは認められなかった。それが、1993年8月中旬、すなわち、石積み浄化堤を築造して約40日を経過した頃より、内水域の透明度が外水域に比べて明らかに良好となった。同時期、被覆石の間から採取した潮下帯にあった芯材の礫の表面は茶色を呈し、微生物などの付着が観察された。このことから、生物膜が海水浄化に大きく関与していることが推察される。

それ以後、9月下旬までは外水域の透明度が0.5～2.0mの間を変動したのに対し、内水域の透明度はおおむね2m以上を維持した。1993年10月以降の秋期から冬期にかけては、外水域の清澄度も高くなった。そのため、内、外水域ともに透明度の計測に用いる白色円板が着底しても識別できることが多くあった。このような時期におい

でも、透明度板の像の鮮明度を比較すると、内水域の方が清澄度の高いことが確認された。

翌1994年は、3月下旬より外水域の透明度が2m以下となる日が数日間連続してみられるようになった。しかし、内水域の透明度は、6月まではほぼ2m以上を維持した。7月から9月にかけては赤潮、青潮(貧酸素状態)、台風による底質の巻き上がりによる汚濁が頻繁にみられ、外水域の透明度はおおよそ0.5~2.0mとなった。この時期、内水域の透明度もやや低下したが、ほぼ2m以上を維持した。ただし、青潮、台風の影響を受けた時期には、内、外水域での透明度の差異が小さくなることがあった。

4.2 懸濁物質の浄化性能

4.2.1 透明度と懸濁物質濃度の関係 水域の親水性の指標としては、しばしば透明度が用いられる。透明度は現地ですぐに計測ができ、また、目で判断するので透明性の程度を感覚的に認識しやすい。しかし、現地で測定するため、測定時の気象条件などの影響を受けやすい。また、海水が清澄な場合、計測用の円板が着底しても識別できることがあり、定量的に評価できないといった問題がある。そこで、図-5に示すように透明度との間に逆の相関関係がみられる懸濁物質(SS)濃度によって浄化性能を検討した。

4.2.2 浄化堤内外の懸濁物質濃度の比較 図-6は、同時に採取した内、外水域の海水のSS濃度をそれぞれ縦軸、横軸にとり、図示したものである。ここでは、時期別に、1994年1~2月、5~6月、8月の結果を例示した。

海域全体の透明度が高かった1994年1~2月は、外水域のSS濃度がおおよそ1~5mg/lであったのに対し、内水域のそれはおおよそ3mg/l以下に維持された。その後、春先から初夏にかけては、外水域のSS濃度が一時的に10mg/lを越えて高くなることもあったが、内水域はおおむね3mg/l以下を維持した。

夏場になると、周辺海域は赤茶色を呈し透明度が1m前後に低下する、いわゆる赤潮や溶存酸素濃度が1mg/l未満の貧酸素状態となる青潮が頻繁に発生した。また、台風の接近により海域のうねりが大きく、堆積した底質が巻き上がって、一面が黒色を呈することもあった。このように、外水域の様相は時々刻々に変化がみられた。これらのうち、比較的静穏な波浪状況においては、海水が赤褐色を呈した時期でも、内水域のSS濃度はおおよそ5mg/l以下に維持されていた。一方、台風時や青潮の発生した時期には、内水域のSS濃度が高くなり、外水域と同程度となることがあった。

図-7, 8, 9には、こうした日々の計測結果を基に、水温、SS濃度、濁度の月平均値を求め示した。

透明度について明らかな浄化効果が認められたのは1993年8月中旬であった。そこで、ここでは、1993年9月以降の調査結果をもとに懸濁物質の浄化性能を述べる。

時期別にみると、月平均気温が25°C以上となった1993年9月および1994年7, 8, 9月は、外水域の月平均SS

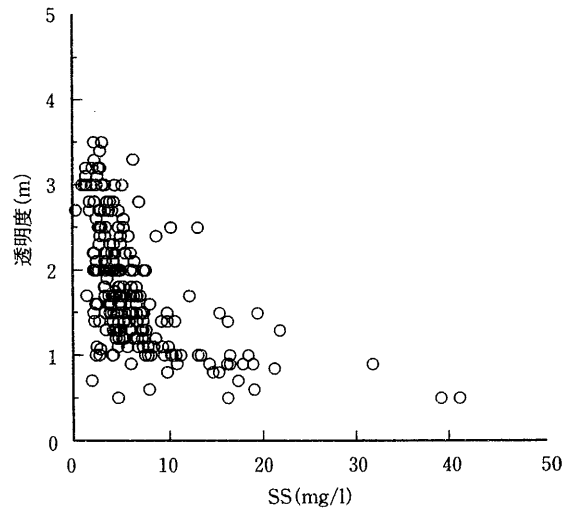


図-5 透明度と懸濁物質(SS)濃度の関係

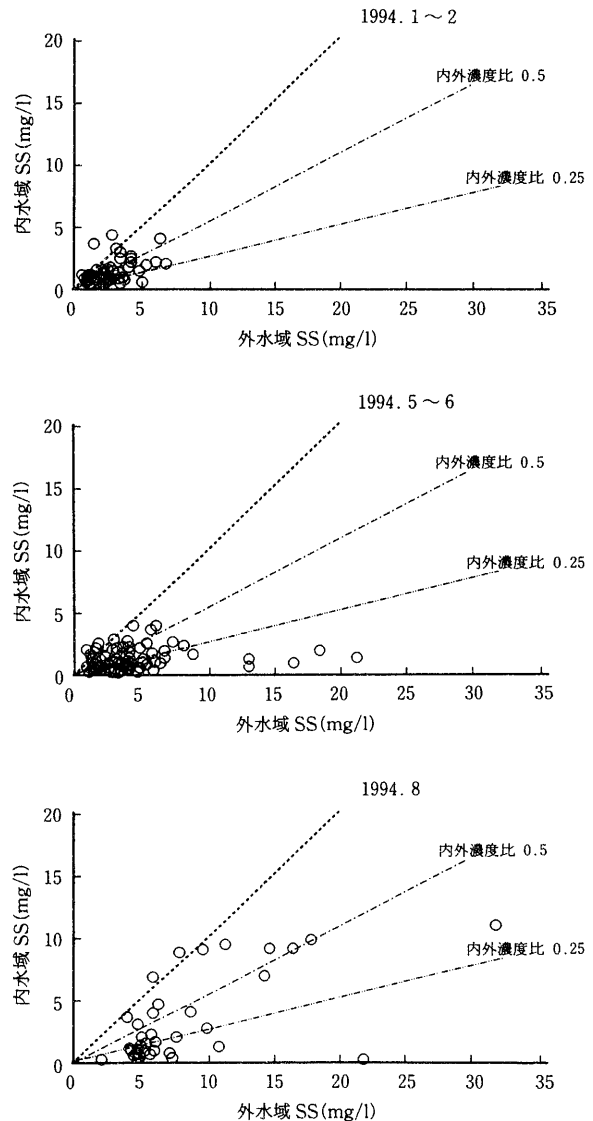


図-6 内水域と外水域の懸濁物質濃度の比較

濃度が特に高く6~9 mg/l となったのに対し、内水域は1~4 mg/l であった。一方、月平均気温が10°Cを下回った1993年12月および1994年1~3月には、外水域の月平均SS濃度も下がり2~4 mg/l となったが、内水域はさらに低く1~2 mg/l であった。これらSS濃度の月平均値の比をとると、1993年9月および1994年7~9月は内水域が外水域の0.2~0.4、1993年12月~1994年3月は0.5となった。

なお、濁度についても併記したが、SS濃度とほぼ同様の結果が得られた。

4.2.3 浄化堤内外のSSの組成 SSの主たる構成種としては、植物プランクトンやその遺骸であるデトリタス、あるいは、土粒子などがあげられる。これらのうち、植物プランクトンが含有するクロロフィル濃度とSS濃度との関係を図-10に示す。なお、縦軸には、クロロフィルaとその一次分解物質であるフェオフィチンの含量をとり、これをクロロフィル濃度とした。クロロフィルのSSに占める重量百分率はおよそ0.05~1.4%の範囲にあり、文献値の0.2~1.4%⁹⁾とは異なった。このことより、実験海域のSSの主構成種は、環境条件によ

ては、植物プランクトンでない場合もあると考えられる。ただし、台風の時を除き、クロロフィル濃度が約10 μg/l以上のサンプルの多くはクロロフィルの重量百分率が0.5~1.0%にあった。したがって、台風等の特殊な条件の時を除けば、汚濁した周辺海域のSSの主成分は植物プランクトンと考えられる。

この植物プランクトンに対する浄化性能は、クロロフィル濃度を指標に図-11に示した。図中の原点を通る直線の傾きは外水域の濃度に対する内水域の濃度の比を示すが、大部分が0.5以下にあることがわかる。

4.3 COD_{Mn}の浄化性能

COD_{Mn}は有機汚濁の代表的な指標であり、公共用水域の生活環境に係わる基準項目に定められている。内湾等の閉鎖性水域においては、このCOD_{Mn}の環境基準の達成率は依然として低い。そこで、COD_{Mn}に関しても、1週間に3日の頻度で調査を行い、その浄化効果を検討した。

内水域と外水域のCOD_{Mn}の経時変化は特に図示しないが、SS濃度と同様、透明度の違いが明確になった1993年8月中旬から、内水域の濃度が外水域の濃度に比べて低い状況が確認された。

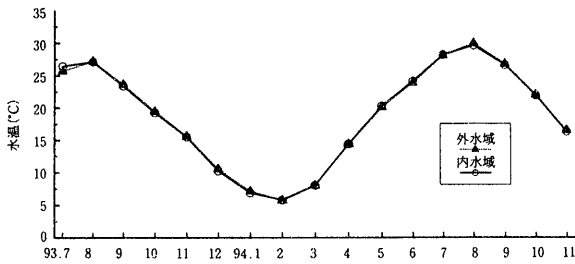


図-7 内水域と外水域の水温の月平均値

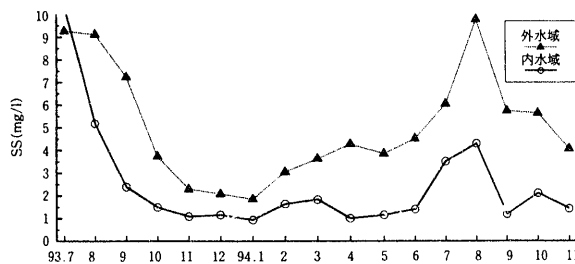


図-8 内水域と外水域のSS濃度の月平均値

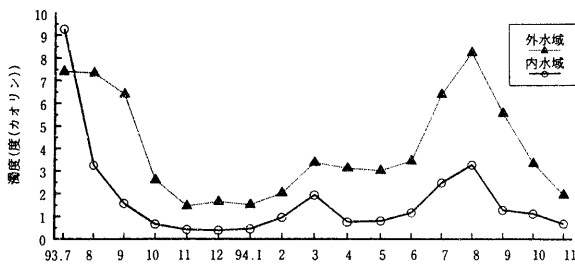


図-9 内水域と外水域の濁度の月平均値

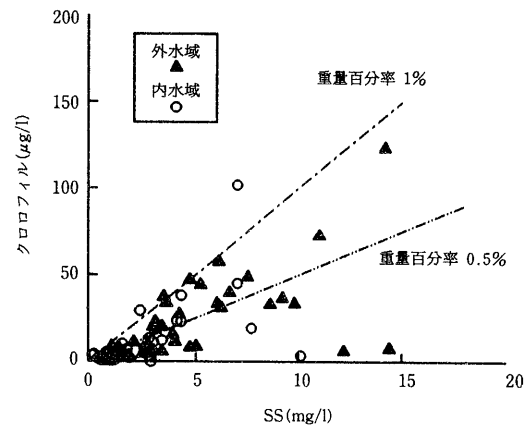


図-10 内、外水域のSS濃度とクロロフィル濃度の関係

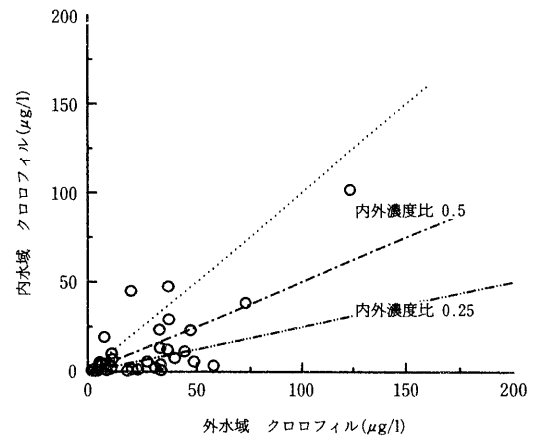


図-11 内水域と外水域のクロロフィル濃度の比較

図-12, 13, 14には、全(t-)COD_{Mn}, 懸濁態(p-)COD_{Mn}, 溶存態(d-)COD_{Mn}の月平均値をそれぞれ示した。なお、ろ過海水のCOD_{Mn}を溶存態COD_{Mn}とし、懸濁態COD_{Mn}は全COD_{Mn}から溶存態COD_{Mn}を差し引いて求めた。

図-12において、1993年9月以降の全COD_{Mn}の月平均値は、外水域が2~8 mg/l, 内水域が1~5 mg/lであり、内水域の方が低濃度に維持されていた。内水域と外水域の月平均値の比は0.5~0.8となり、前節で示したSS, クロロフィルのそれに比べると高いことがわかる。すなわち、SSやクロロフィルに比べて、全COD_{Mn}の浄化効果は低いといえる。

COD_{Mn}のうち懸濁態成分についてみると(図-13), 外水域が0.4~3 mg/l, 内水域は0.1~1.1 mg/lであった。内外濃度比はおよそ0.3~0.5となり、SSと同程度の浄化効果が認められた。

一方、溶存態成分については、図-14に示すように、外水域の月平均値が1~5 mg/l, 内水域が1~4 mg/lであり、その内外濃度比は0.7~0.9であった。

これらの結果より、懸濁態成分に関しては浄化効果の高いことが明らかとなった。また、溶存態COD_{Mn}についても浄化効果がわずかながら認められた。このことより、礫に付着した生物膜によって、有機物質の分解が進んでいることが示唆される。

4.4 リン、窒素の浄化性能

内水域と外水域のリン、窒素それぞれの全量濃度を比較してみると、大部分の調査時において、内水域の方が外水域よりも低濃度にあった。形態別に分けてみると、懸濁態成分に関しては4.2で述べたSSと同様、明瞭な浄化効果が確認された。一方、溶存態成分に関しては、内外水域の濃度がほぼ等しい、ないしは、逆転することもあり、現状では明確な浄化効果は確認されていない。

5. まとめ

石積み浄化堤の実証実験施設を三河湾沿岸域に築造し、約1年半にわたって水質浄化性能を調査した結果、以下の知見を得た。

① 内水域の透明度は、築堤から約40日を経過した頃より、外水域に比べて明らかに良好となった。その後の内水域は、透明度がおおむね2 m以上、懸濁物質濃度が5 mg/l以下を維持した。

② 懸濁物質濃度の月平均値は、外水域が2~9 mg/lであったのに対し、内水域は1~4 mg/lと低く維持された。

③ COD_{Mn}についても浄化効果が認められた。形態別にみると、懸濁態成分、溶存態成分で浄化効果は異なっていた。

④ これらの水質浄化性能は、外水域の溶存酸素濃度が減少したとき低下する傾向がみられた。

参考文献

1) 中村栄一, 他: 礫間浄化法による汚濁水の浄化, 土木技

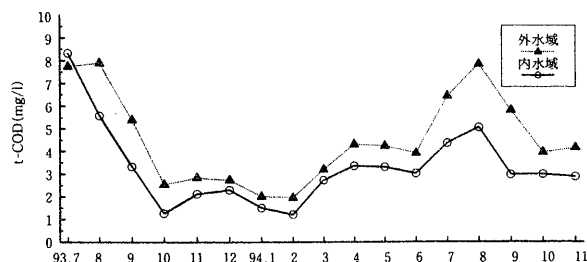


図-12 内水域と外水域の全CODの月平均値

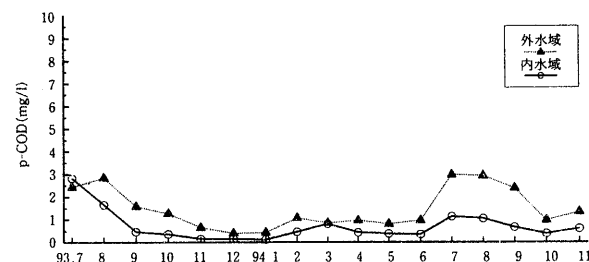


図-13 内水域と外水域の懸濁態CODの月平均値

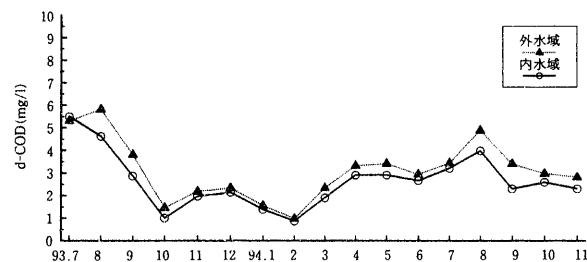


図-14 内水域と外水域の溶存態CODの月平均値

術資料, Vol. 29, No. 10, p. 534~539, (1987)

- 2) 細川恭史, 他: 沿岸運河水浄化のための水路型礫間接触酸化施設の設計条件, 海岸工学論文集, Vol. 41, p. 1,101~1,105, (1994)
- 3) 毛利光男, 他: 汚濁海水浄化における礫間接触水路内の抑留物の分布と閉塞について, 水環境学会誌, Vol. 16, No. 7, p. 516~525, (1993)
- 4) 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)
- 5) 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)
- 6) 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. 121~124, (1994)
- 7) 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)
- 8) シーブルーテクノロジー研究委員会: 快適環境の創造に向けて -シーブルー計画-, p. 37~38, (1989)
- 9) T. R. Parsons, et al.: On the chemical composition of eleven species of marine phytoplankters, Journal of Fisheries Research Board of Canada, Vol. 18, No. 6, p. 1001~1016, (1961)