

石積み浄化堤による海水浄化工法の開発（その2）

——実海域の浄化堤実証施設における生物相と水質浄化能——

藤井 慎吾 喜田 大三
辻 博和 宮岡 修二

Development of Ecological Sea Water Purification System by Rubble Mound (Part 2)

——Results of On-site Experiments at Early Stage by Model Facility of Rubble Mound in Mikawa Bay——

Shingo Fujii Daizo Kita
Hirokazu Tsuji Shuji Miyaoka

Abstract

The outline of the sea water purification system with rubble mound is as follows. A part of a polluted sea area is enclosed by rubble mound. Due to the natural purification capability of the rubble mound, water passing through with the tides is gradually purified.

The previous report gave the results of on-site experiments at an early stage by a model facility of rubble mound in Mikawa Bay. This report introduces the forming process of the ecosystem mainly composed of attached organisms after construction of the rubble mound and the relation between the biotic community and the natural purification capability.

The exhibition of the sea water purification capability corresponds to a considerable degree to the increase of attached organisms, and sea water purification (removal of suspended solids, SS) is closely to such organism activity as attachment, filtration, decomposition, and feeding of the SS by the fixed attached organisms. It is clear that the water purification capability is affected by the existence of various biotic communities.

The habitat of organisms should be given more consideration in future waterfront development.

概 要

石積み浄化堤とは、汚濁海域中に石積みによって囲まれた水域を創出し、潮の干満さらには波動による海水の移動に伴って、石積みに生まれる自然生態系の水質浄化機能によって、清浄な水質の水域を創造する海岸構造物である。前報では、実証施設の概要と水域浄化の初期特性を報告した。本報告では、石積み浄化堤造成後の付着生物を主体とした生態系の形成過程及び水質浄化性能とこれら生物群との関係について報告する。

水質浄化能の発現は、付着生物群の増加とよく対応しており、水質浄化（SSの除去）は、定着した付着生物群による懸濁物の付着、ろ過、分解、摂餌等の生物活動と密接な関係がある。

石積み浄化堤の水質浄化機能は、多様な生物群の存在によっていることは明らかである。今後のウォーターフロントの開発には、生物生息の場に配慮した工法による開発がより必要である。

1. はじめに

近年、治水、利水のためだけでなく、親水性にあふれたウォーターフロントの開発が、重要視されている。このためには、良好な水環境が不可欠である。

現在、広域水域の浄化には、浚渫、覆砂、底質改良剤の散布等、各種の浄化技術が実施されている。最近ではこれらの技術に加え、生物による浄化する自然の浄化機能を活用する浄化法が、安価で持続性もあり、広域水域の浄化に効果的であるばかりでなく、生物の自然の生態系を回復し、ひいては生物生産の増大を促すことなどから、注目されている。

当社は、シーブルーテクノロジー工法研究会で開発した礫間接触酸化による海水浄化工法を発展させ、さらに

土木学会関西支部の「海洋のウツロによるヘドロ浄化」の共同研究グループ（代表者：赤井一昭氏）の貴重な成果を参考にして、現在「石積み浄化堤による海水浄化」の技術開発を進めており、平成5年7月から、三河湾の実海域に石積み浄化堤の実証施設を築造し、その実証実験を行っている。

石積み浄化堤とは、海域中に石積みによって囲まれた水域を作り出し、多様な生物が多数定着できるような場を造成するものである。造成後、石積み堤を基盤として、俗に生物膜と呼ばれる細菌・付着珪藻・原生動物などで構成される微細付着生物群、さらには大型の付着生物群・海藻類さらには底生生物、魚類などによって、ひとつの生態系が形成される。そして、潮の干満などによる海水の移動と石積み堤の定着したこれらの生物の食物連

鎖を通して、海水の浄化が行われるものである。

前報では、実海域に造成した実証施設の概要を紹介し造成後120日までの水質浄化の初期特性を、石積み浄化堤の内外水域の水質の推移を比較しながら報告した。

ここでは、造成後に石積み浄化堤に形成される付着生物を主体とした生態系の形成過程、さらには、造成後10カ月までの水質浄化特性とこれらの生物との関係について報告する。

2. 現地実験の概要

2.1 実験施設

実験施設の詳細は前報で報告したので、ここでは、その平面図と断面図を図-1に示す。

実証施設は、前面に延長6m・堤長幅5mの石積み浄化堤を配し、両側部及び後部の三面を鋼矢板で囲まれた施設である。

石積み浄化堤の芯材は20~30cmの径の礫であり、表面を30~100kgfさらに1tfの石で被覆している。従って、石積み浄化堤は透過性の構造であり、通常1日に2回の干満によって、海水が外水域から内水域へ、内水域から外水域へと出入りする。

2.2 調査方法

2.2.1 水質調査 浄化堤の外水域と内水域について、表層水（水面から50cm）と中層水（底面から1m）を、原位置で測定あるいは採水し、水温・EC・DO・濁度・透視度・透明度・SS・CODなどについては1~2回/日の頻度で、クロロフィルa・フェオフィチン・T-N・T-Pなどについては1回/月の頻度で、測定・分析した。

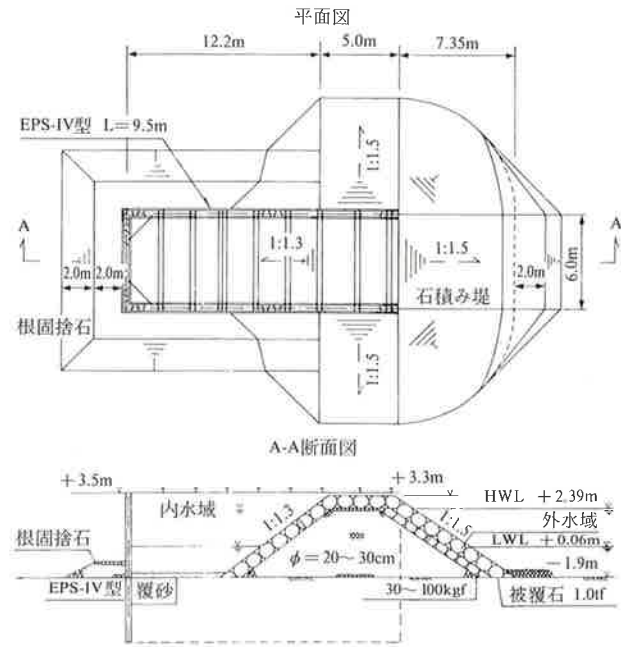
2.2.2 水理特性調査 浄化堤の外部・堤体部・内水域などの水位、さらには堤体内部の流速分布等を適宜調査した。

2.2.3 生物調査 生物調査は、水域の動植物プランクトン、石積み浄化堤の石材への付着微細生物・付着大型生物、水域の底生生物を対象として、2カ月に1回の頻度で行った。

(1) 動植物プランクトン 浄化堤の内水域と外水域において、植物プランクトンはバンドーン採水器によって表層水を5l採水する採水法によって、動物プランクトンについては、海底面上1mから海面まで定量ネットの鉛直曳きにて採集した。サンプルは、いずれも3~5%ホルマリン固定後、種類別個体数、湿重量などを計測した。

(2) 付着微細生物(生物膜) 浄化堤の内水域1箇所と外水域2箇所の3地点において、それぞれ潮間帯と潮下帯から、被覆石の間から中積み石を採取し、5×5cmのコドラートを用い、ブラシで付着微生物をはぎ取った。サンプルは5~10%ホルマリン固定後、付着物の乾燥重量・有機物量、さらには付着藻類についての種類別個体数などを計測した。

(3) 付着大型生物 付着微細生物と同様に、3地点において、それぞれ潮間帯と潮下帯にある被覆石を対象



石積み浄化堤の仕様

水深	約2m
前面堤体：延長	6m
堤頂幅	5m
芯材	20~30cm径の礫
被覆石	30~100kgf, 1tf石
内水面：幅	6m
奥行	約10m

図-1 石積み浄化堤の現地実験施設の概要



写真-1 石積み浄化堤の現地実験施設の全景

に、25×25cmのコドラートを用い、スクレッパーで大型生物をはぎ取った。サンプルは5~10%ホルマリン固定後、付着物の湿重量、種類別個体数などを計測した。

(4) 底生生物(ベントス) 浄化堤の内水域1箇所と外水域2箇所の3地点において、エクマンバジ採泥器により採泥し、1mmメッシュでふるった後、5~10%ホルマリンで固定後、底生生物の湿重量、種類別個体数などを計測した。

底生生物調査と並行して、底質について、酸化還元電位・含水比・COD・強熱減量・硫化物量なども測定した。

なお、本報告では、上記のうち2.2.3の石積み浄化堤の生物調査の結果を中心に述べる。



写真-2 石積み浄化堤の内水域（左側）と外水域（右側）の透明度の違い

3. 石積み浄化堤における水質浄化特性の概要

3.1 懸濁物質の挙動

石積み浄化堤における水質浄化の約4か月間の初期特性については、前報で報告したので、ここでは、その概略を紹介する。

平成5年7月7日に浄化堤を築造、約1か月後、内水域が外水域に比べてやや透明になり始め、約40日経過した8月17日以降には内水域の透明度が外水域に比べて明確に大きくなった。その後は、青潮が発生した6日間を除いて、写真-2に示すように、内水域の濁度は5度以下、SSは5ppm以下を維持し、外水域のSSが10ppm以上の場合には浄化堤のSS除去率は50%以上を維持していた。

つぎに、実験開始から平成6年5月までの10か月間における内外水域における濁度の経時変化を、図-2に、各月ごとに、約50点の測定結果の平均値をもって示す。

実験時期が冬季に入り、海水の水温が低下し、海域のプランクトンの生産（生物活動）が、低下した時期においても、石積み浄化堤の浄化機能は継続しており、浄化堤の内水域は常に良好な水質を維持した。

月別の平均値から見れば、9月から10月には浄化堤における濁度の除去率は60%を越え、10月以降は3月を除いて50%以上を維持していた。

3.2 プランクトンの挙動

植物プランクトンの出現分布には、内外水域で著しい相違がみられた。

9月から5月にかけての植物プランクトンの出現数（細胞数/ml）は、外水域で $10^2 \sim 10^4$ のオーダーであるのに対し、浄化堤透過後の内水域では、 $10^1 \sim 10^2$ のオーダーと少なかった。また、その総沈殿量は、外水域で $20 \sim 240 \text{ ml/m}^3$ （平均 102 ml/m^3 ）であるのに対して、内水域では $10 \sim 30 \text{ ml/m}^3$ と少なかった。なお、外水域の総沈殿量の平均値の値は三河湾の年平均の 19 ml/m^3 に比べてかなり大きな値であった。

浄化堤の内外水域における植物プランクトンの出現数から、浄化堤におけるプランクトンの除去率を見ると、ほぼ90%以上を示している。

濁度(度(カオリン))

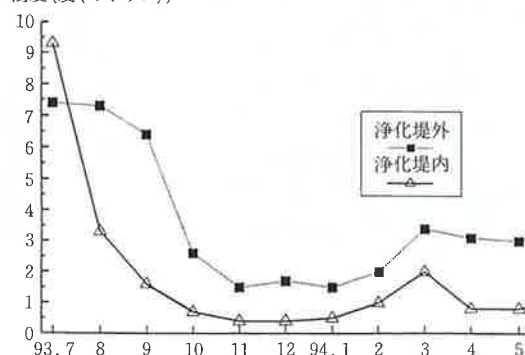


図-2 石積み浄化堤の内外水域における濁度の月別平均値の経時変化



Skeletonema costatum Prorocentrum micans

写真-3 石積み浄化堤の外水域での植物プランクトンの優占種の例

さて、9月から5月にかけての出現種類では、外水域で23~35種類が、内水域では11~18種類が出現し、浄化堤の内水域では、少ない。9~11月の外水域における優占種は珪藻類の Skeletonema costatum・渦鞭毛藻の Gymnodinium spp・クリプト藻であり、1~3月では、クリプト藻、ハプト藻、渦鞭毛藻の Scrippsiella trochoidea 等であった。

動物プランクトンの出現個体数（個体/l）は外水域で16~90、内水域で3~42で、量的には少ないが、植物プランクトンの消長に対応している。5月には外水域で575、内水域で134と増した。出現種類数では、外水域で14~16種、内水域で11~14種で内水域が幾分少なく、その優占種はカイアシ類の Oithona, Acartia 等であった。



写真-4 中詰め石の生物膜とその構成種

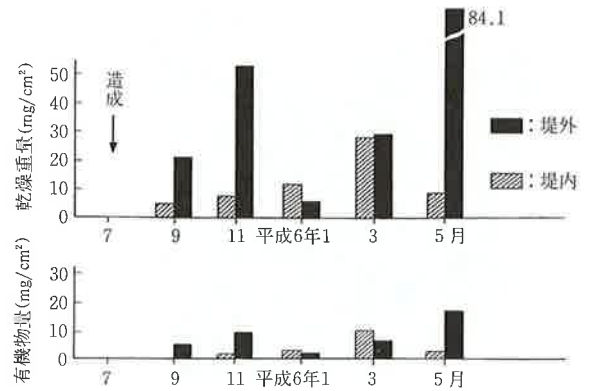


図-3 微生物群 (生物膜) の付着量の経時変化



写真-5 造成後2カ月における内水域側被覆石の表面 (生物膜)



写真-6 造成後2カ月における外水域側被覆石の表面 (大型生物)



写真-7 造成後10カ月における外水域側被覆石の表面 (大型生物)

4. 石積み浄化堤における各種生物の挙動

4.1 付着微生物 (生物膜)

石積み浄化堤の岩石を基盤として、新たに定着する付着生物群のうち、ぬるぬるして俗に生物膜 (Bio film) とよばれている微細付着生物は、細菌群の他、付着珪藻類、藍藻類及び線虫類などが主な構成種である。

1カ月後には1tf石、中詰め石の表面を覆い始め、40日後には、写真-4に示すように、ほぼ全面に微細付着生物が覆いつくした。このように微細付着生物が覆いつくした時期は、先の3章でも述べたように石積み浄化堤により内水域の水質の浄化が、外水域に比べて明確になった時期とほぼ一致している。

微細付着生物 (生物膜) の乾燥重量は、図-3に示すように外水域側の方が内水域に比べて多い傾向にある。

外水域側の重量は、2カ月後で、4.2~22.5、4カ月後で7.6~52.3、6カ月後で5.4~9.5、8カ月後で28.3~29.7 mg/cm²であった。シーブルーテクノロジー工法研究会で行った水路型実験では、2~8カ月後で1~19 mg/cm²であり、今回の石積み浄化堤では、これらに比べて、かなり付着量が大きかった。

また、生物膜の強熱減量を測定したところ約20~40%であった。強熱減量が低かった原因は、無機物が付着しているとともに付着珪藻のSi量も無視できないであろう。

そこで、強熱減量分を有機物量として、付着有機物量

の変化を図-3に示した。この値は、前述のシーブルーの結果よりも高い値を示し、当該海域で活発に微細生物群が付着し懸濁物を捕捉していたと考えられる。

微細付着生物の中で付着藻類をみると、出現種類数は2カ月後で20種前後になるが、その後の種類数には、ほとんど変化は、みられなかった。その優占種は、外水域側でAmphora, Melosira, Naviculaなどの珪藻類であり、内水域では、Melosira numuloides, Naviculaなどの珪藻類、藍藻類のOscillatoriaなどであった。なお、その付着個体数 (細胞数) は、6~150万/cm²の範囲で変動していた。

4.2 付着大型生物

フジツボなど大型付着生物は、微細生物群 (生物膜) よりやや遅れて外水域の1tf石を覆い、中詰め石の方に分布を広げていった。出現種類数は、2カ月後にはタテジマフジツボ、ホトトギスガイ、など10数種の付着がみられ、その後も増加を続け、平成6年5月には、カンザシゴカイ、ホヤ、ムラサキイガイ、など27種の定着が確認された。

付着個体数は、図-4に示すように外水域が内水域に比べて非常に多い。外水域側では、2カ月後には19,320個/m²、4カ月後には最大 (初期) の21,200個/m²に達した。その後、冬季には減少したが、春季 (5月) には、新たにムラサキイガイが大量に付着し、付着数は27,856個/m²に増加した。

図-5は、石積み浄化堤への大型付着生物の種類別の

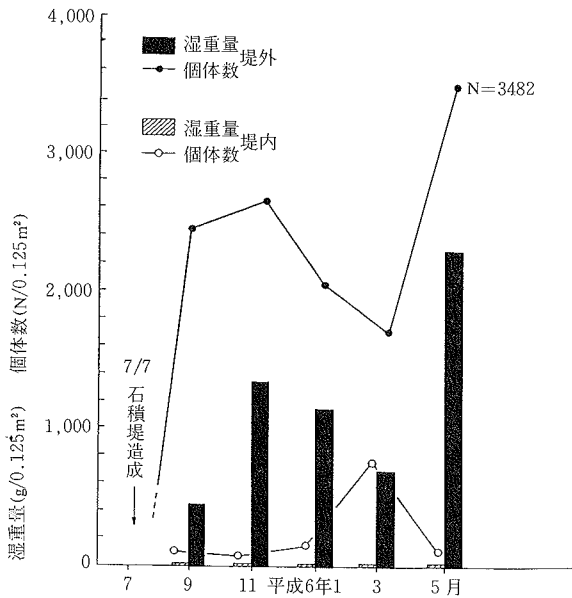


図-4 付着大型生物の付着量の経時変化

付着状況を示したものである。これによれば、タテジマフジツボは潮間帯付近で優占している。ホトトギスガイ、カンザシゴカイ、アシナガゴカイは、潮下帯で優占している。

付着状況から、堤体付着生物は、外水域側では大型付着生物、静穏な内水域側では、微細付着生物が優占していることが明らかとなった。

4.3 底生生物

底生生物の個体数の経時変化を図-6に示す。

外水域における出現個体数は50個/0.125 m²以下であり、極めて少ない。外水域の海底表層には黒色の有機ヘドロが堆積しており、当然の結果である。

これに対して、内水域では、実験開始時に、ヘドロの浚渫・砂の覆砂を行っている。内水域における底生生物の出現個体数は当初外水域と同じだったが、徐々に増加し、6カ月後には、外水域の4～6倍になり、さらに8カ月後には、嫌気状態では余り出現しないとされている甲殻類のドロクダムシの爆発的発生が見られた。

また、図-6に併記したように、覆砂後、内水域表層の酸化還元電位は常時+20～120 mVと酸化状態を示し、特に図示しないがその強熱減量・COD・硫化物などもまったく増加していない。

以上のことから、内水域の海底の覆砂の状態は、良好な底質の状態を維持しており、しかも、望ましい底生生物の出現が進行しつつあることがわかる。

5. 石積み浄化堤の水質浄化機構

先に報告した第1報さらに今回の第2報の内容から、石積み浄化堤による海水浄化では、自然の持つ力だけによって、汚濁海水を浄化できるものであることが明らかになりつつある。現在の段階で、海水浄化を担っていると考えられる自然の力を整理して、図-7・図-8に示し、以下に考察する。

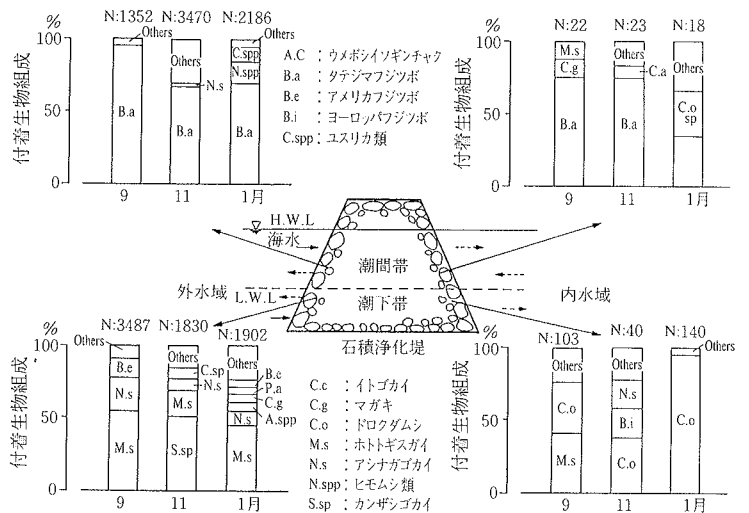


図-5 石積み浄化堤部位別付着大型生物の組成（個体数%）

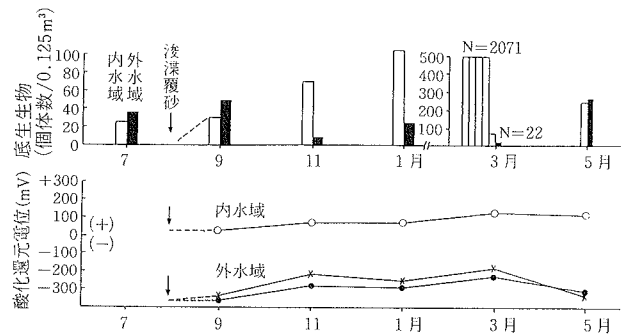


図-6 石積み浄化堤内の浚渫覆砂後の底生生物、底質の推移

5.1 海水の流れ

海水移動の原動力の一つは潮の干満である。今回の実験で使用した径20～40 cmの礫を芯材とする堤体で、浄化堤の内水域と外水域の水位の差は1 cm以下であったことから、潮の干満に対応して、海水が十分移動していることが確認できた。

なお、続報で詳細に報告する予定であるが、浄化堤における海水の移動は潮の干満だけでなく、海水の波動に伴って礫間の海水は、寄せては返さず動きをしながら流れている。このことは海水中の汚濁物質が堤体の礫に接触する回数を何倍にもしており、次に述べる海水の浄化に大きく貢献しているものと思われる。

5.2 汚濁物質の捕捉除去

3・4章で述べたように、浄化堤の内水域が外水域と比較して明確に清澄浄化された時期と、浄化堤の被覆石さらには被覆石の間から採取できる中積石の表面が微細生物群の生物膜で覆い尽くされた時期が、両者とも浄化堤築堤後約40日経過後と一致した。

さらに、前報で報告したように、8～9月の間で、当該水域で、青潮、すなわち貧酸素水塊が発生したが、その際には、一時的ではあるが浄化堤の内水域の水質が外水域のそれとほとんど同じになった。このことは、海水が貧酸素の状態となり、浄化堤の表面に生育していた微

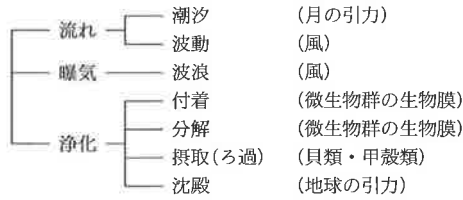


図-7 石積み浄化堤で水質浄化に貢献する自然の力

細生物群の生物膜の活性が一時的に低下したことによると考えられる。

以上のことから、ごく初期の石積み浄化堤における海水浄化機能の多くは礫材の表面に生育している微細生物群の生物膜に担われていると判断できる。

浄化堤の外水域側の被覆石の表面にはフジツボ・ムラサキガイ等の大型の附着生物が多数生育している。これらの生物はろ過食性であり、浮遊中のSS(プランクトンを含む懸濁物)を水管によって直接、吸水ろ過し、体内に取り込んでいる。細川によれば、ホトトギスガイのろ過速度は100~290 ml/ind/hであり、1日の平均水没時間を12時間と低く見積もった場合でも、1日あたり1個体で1.2~3.5 lの海水をろ過しているとしている。これらのことから、大型の附着生物も、浄化堤の水質浄化の機能を担っていると考えられる。

また、タマキビ、ゴカイ、ヨコエビ、フナムシなどの小動物は礫材の表面を生育場として、附着藻類等の生物膜、あるいは沈殿・附着した有機物残滓などを摂餌している。このことは、先に述べたような石積み浄化堤の微細附着生物群によって附着捕捉された汚濁物質の清掃除去を担っていることを示している。

6. まとめ

実海域に築造した石積み浄化堤の実証実験施設において、築堤後10ヵ月後までの生物調査等から次のことが明らかとなった。

① 石積み浄化堤造成後、約40日後には、中詰石の礫表面は、微細附着生物群(生物膜)によって覆われ、2ヵ月後に、外水域の被覆石の表面にはタテジマフジツボ類などの大型附着生物が多数附着した。いずれも、内水域側に比べて外水域側の方が単位面積当たりの附着量が大きかった。

② 外水域側における微細附着生物群(生物膜)の附着量は乾燥重量で20~80 mg/cm²、有機物量で5~20 mg/cm²と大きかった。その優占種は細菌類や珪藻類のMelosiraなどである。また、外水域側の大型附着生物の附着量は個体数で2,000~3,500個/0.125 cm²であった。その優占種は、タテジマフジツボ、ムラサキガイなどであった。

③ 中詰石へ微細附着生物群(生物膜)が附着し、ほとんど覆い尽くした時期と、石積み浄化堤の内水域の水質が明確に浄化された時期が、造成後、約40日以降でほぼ一致していた。



図-8 石積み浄化堤で水質浄化に活躍する生き物

このことから、造成初期における浄化堤による水質浄化は、潮の干満などに伴って海水が礫間を流下する際に、堤体材の礫の表面に定着した主として微細生物群(生物膜)に、海水中の汚濁物質が附着し除去されたものと判断される。

④ 被覆石などの表面に生育するフジツボなどの大型附着生物も、海水を吸引ろ過することによって、海水中の汚濁物質を摂餌(除去)し、石積み浄化堤による水質浄化に貢献していると推定される。

⑤ 実験期間中、8月から9月に5回当該水域に青潮、すなわち貧酸素水塊が発生した。その際には、一時的に、石積み浄化堤の内水域の水質が外水域のそれに近くなり、浄化堤の水質浄化能が低下した。このことは、③・④で述べたように、石積み浄化堤の水質浄化能が堤体材の礫表面に生育する各種の附着生物群によることを証左していた。

以上のことから、石積み浄化堤の水質浄化機能は、多様な生物の存在によって担われていること、また石積み浄化堤造成後、10ヵ月で多様な生物の定着とこれら生物の活動、及び食物連鎖を通して総合的な水質浄化システムが形成されつつあることが、明らかとなってきた。

参考文献

- 1) 細川；生物作用を活用した浅海域の浄化手法，ヘドロ，No. 470, p. 148~154, (1990)
- 2) 佐藤ら；礫間接触酸化法を利用した海水浄化施設，土木学会誌，Vol. 78, No. 12, p. 14~17, (1993)
- 3) 赤井ら；汚染水域の浄化システム，環境システム研究，Vol. 17, No. 8, p. 100~106, (1989)
- 4) 辻ら；石積み浄化堤による海水浄化(第1報)，第28回日本水環境学会年会講演集，p. 428~429, (1994)
- 5) 辻，宮岡，藤井，石垣ら；石積み浄化堤による海水浄化工法の開発(その1~その4)，土木学会第49回年次学術講演会講演集 第2部，p. 1272~1281, (1994)
- 6) 辻，喜田，藤井，石垣，宮岡，小林；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)