

## 石積み浄化堤による海水浄化工法の開発 (その6)

——礫付着物および礫間堆積物の実態——

宮岡修二 辻博和

### Development of Ecological Sea Water Purification System by Rubble Mound (Part 6)

——Characteristics of Attached Matter and Sediment at the Inner Region of Rubble Mound——

Shuji Miyaoka Hirokazu Tsuji

#### Abstract

This system is one method of directly purifying water by utilizing a natural purification function, and can be used to create a water ecosystem such as a beach. In essence, part of a sea area is enclosed with a rubble mound. As the tide ebbs and flows, water passes through the mound and pollutants in the water are degraded by physicochemical and biological processes. The pollutants that attach to the surface of the gravel are thought to be consumed by the food chain of organisms living in the mound.

To clarify the process, the matter trapped inside the mound was investigated at a model facility that was constructed 3 years ago in Mikawa Bay. Large sessile organisms were mainly attached at the outer site of 2m. At the inner region, only a bio-film had adhered. There was no site where the gap had been closed with pollutants and so on.

#### 概要

石積み浄化堤による海水浄化工法とは、海水透過型の石積み堤に生じる自然浄化機能を活用して沿岸海域を直接浄化し、人工海浜などを創出する工法である。この浄化システムの性能を実証するため、実海域にパイロットスケールの石積み浄化堤を設置し、3年間にわたって現地実験を行ってきた。この間、礫間に捕捉された海水中の汚濁物質は、そこに生息する生物の食物連鎖網を介して、自然に分解、減容化がなされると考えてきた。しかし、その実状はよくわかっていなかった。

そこで、この実験堤を解体し堤体内部の礫に付着する生物や礫間堆積物の実態を調査した。その結果、堤体内部への汚泥状物質の堆積はほとんど認められなかった。大型付着生物は堤体の被覆石およびその近傍に集中していたが、これも礫間を閉塞する状態にはないことが確認された。

#### 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、後背に都市部をもつ沿岸海域では、富栄養化が進行しており、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。その対策として、近年注目されているのが、水域の直接浄化技術である<sup>1)</sup>。

石積み浄化堤による海水浄化システムは、赤井<sup>2)~4)</sup>によって提唱されてきたものであり、石積みによって生じる自然浄化機能を活用する直接浄化技術である。特徴は概略以下の通りである。まず、汚濁した沿岸海域の一部を石積みで囲み、潮の干満や波浪エネルギーを利

用して、堤体間隙に海水の往復流を発生させる。海水中の汚濁物質は礫に付着したり沈積して浄化される。こうして得られる静穏で清澄な内水域は、親水空間として、また、水際生態系を創出する場として活用することが可能である。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、三河湾内にパイロットスケールの実験施設を築造し、3年間にわたって現地実証実験を行ってきた。実験堤がSS、COD、クロロフィル等について、明瞭な浄化効果を有することは、前報までに報告している通りである<sup>5)~8)</sup>。

さて、石積み浄化堤では、礫上あるいは礫間に汚濁物質が捕捉されることになるが、これらは堤体に生息する生物の食物連鎖網を介して分解され、あるいは大

型動物によって摂食されるなどして系外移動し、自然に礫間の維持管理がなされると考えている。しかし、その実態はよく分かっていない。そこで、設置から3年が経過した実験堤の被覆石および内部の礫への生物等の付着状況と礫間隙への汚泥状物質の堆積状況を実態調査し、石積み浄化堤の海水浄化機構と堤体に捕捉された汚濁物質の維持管理法について考察した。

## 2. 調査要領

### 2.1 現地実証実験施設

実証実験堤の概観を Photo 1 に示す。実験堤は水深が2~4mの三河湾湾奥沿岸域に1993年7月に築造した。堤頂幅、堤高はそれぞれ5mとし、堤の芯材には海水浄化のため直径が20~30cmの碎石を用いた。堤の水際線側には鋼矢板を3面に打設し、内水面を造成した。内水面は奥行きが約10m、海水が往復する流路の間口は6mである。

### 2.2 現地調査の概要

2.2.1 調査日 1996年9月11日から9月13日の3日間で調査を実施した。この期間は大潮期にあたり、引き潮にあわせて試料採取を行った。

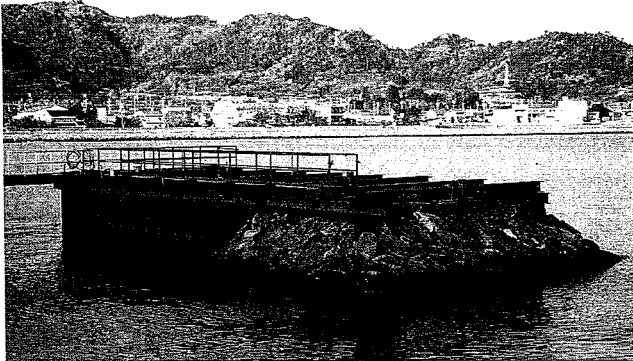


Photo 1 実海域に設置した石積み浄化堤実験施設  
On-site Experimental Facility

Table 1 各調査地点における調査内容  
Contents of Investigation

調査地点概要			調査内容			
			付着物		堆積物	
			化学	生物	化学	生物
潮間帯上層	被覆石(内)	H-1		○		
	芯材	H-2	○	○		
		H-3	○	○		
		H-4	○	○		
	被覆石(外)	H-5		○		
潮間帯下層	被覆石(内)	M-1		○		
	芯材	M-2	○	○		
		M-3	○	○		
		M-4	○	○		
		M-5	○	○		
		M-6	○	○		
	被覆石(外)	M-7		○		
潮下帯	被覆石(内)	L-1		○		
	芯材	L-2	○	○	○	
		L-3	○	○		
		L-4	○	○	○	
		L-5	○	○		
		L-6	○	○	○	
	被覆石(外)	L-7		○		
底質	内水域				○	○
	外水域				○	○

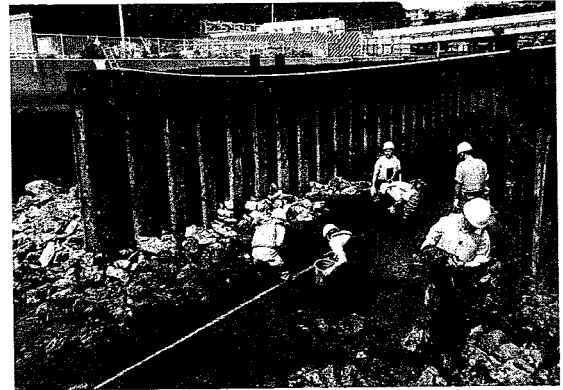


Photo 2 解体調査の実施状況  
Investigation of the Experimental Facility

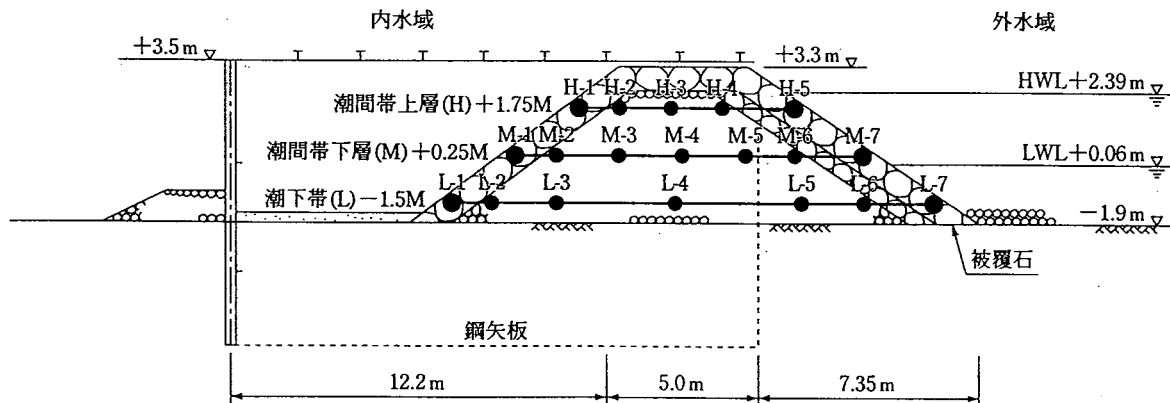


Fig. 1 調査地点  
Location of Sampling Stations

2.2.2 調査地点および調査内容 付着物の調査地点は、Fig. 1に示す通りで、潮間帯上部(H, +1.75m)、潮間帯下部(M, +0.25m)、潮下帯(L, -1.5m)の3深度において、それぞれ5点ないし7点を設定した。これらの他に、礫間堆積物と底質の調査も実施した。礫間堆積物は堤体内部を観察して適宜試料を採取した。また、内水域中央と外水域堤体法先から約5m沖の底面において、底質試料を採取した。各地点における調査内容は、Table 1に示す通りである。

2.2.3 試料の採取方法 実験堤の石材を上層から、バケットによって徐々に除去していき、所定の深度に到達させた。Photo 2に示すように、潮間帯では現場を踏査、観察して、平均的な付着状況にある礫を芯材試料として採取した。潮下帯部分の芯材は、干潮時も水没しているので、バケットで作業台船上に引き上げ、付着状態を観察して適当な試料を採取した。被覆石は、バケットで作業台船上に引き上げ、付着物に損傷がなかった部位の中から、平均的な付着状況にあると判断された箇所を選び、試料を採取した。礫間堆積物は、礫に付着堆積していた汚泥状物質をかき集めて採取した。底質は、円筒を底面に貫入して不攪乱試料を採取し、その表層を試料とした。

2.3 分析項目及び方法

2.3.1 大型付着生物の分析方法 大型付着生物は、25cm×25cmのコドラートを礫にあて、スクレイパーで注意深くかき落として採取した。同じ調査地点でも付着状況に偏りがみられるため各点2カ所でサンプリングを行ない分析試料とした。かき落としした試料は最終濃度が10%になるように中性ホルマリンで固定し、1mmメッシュふるい残留物について、種の同定、個体数の計数、湿重量の測定を行った。

2.3.2 微細付着生物の分析方法 微細な付着物の生物相を調査するため、5cm×5cmのコドラートを礫にあて、ブラシで枠内をこすり、現地ろ過海水で洗い流して付着物を採取した。この懸濁溶液に、最終濃度が5%になるように中性ホルマリンを加えて生物固定をし、1mmメッシュふるい通過物の沈殿量、乾燥重量の測定、種の同定、計数を行った。

2.3.3 微細付着物の化学性状の分析方法 各調査

地点で代表的な付着状況にある礫を2~3個づつ採取し、微細付着物の全量をブラシでこすりつつろ過海水で洗い流し、懸濁試料を得た。これをガラス繊維ろ紙でろ過し、ろ紙捕集物の乾燥重量、強熱減量、有機炭素、クロロフィル a、フェオ色素を分析した。なお、分析方法は海洋観測指針(気象庁編)、沿岸環境調査マニュアル(日本海洋学会編)に従った。また、礫の表面積は、アルミ箔を用いて礫を被覆し、そのアルミ箔の重量を計測して求めた。

2.3.4 礫間堆積物及び底質の化学性状の分析方法 沿岸環境調査マニュアルに従った。

3. 現地調査結果

3.1 大型付着生物に関する調査結果

3.1.1 大型付着生物の付着状況 Fig. 2に大型付着生物の湿重量を示す。大型の付着生物は主として被覆石部分およびその近傍の芯材に集中して分布していた。芯材への生物付着は堤体の内部に向かうにつれて少なくなり、外水域側では約2m、内水域側では約1mほど堤体の内部に入ると、ほとんど大型生物の付着はみられなかった。外水域側の被覆石には、局所的に付着の多い箇所もみられたが、礫間間隙が塞がれてしまった箇所はなかった。また、芯材の礫間間隙が目詰まりしている状況もみられなかった。

3.1.2 大型付着生物の生物相 外水域側の被覆石とその近傍の芯材には、腔腸動物門のイソギンチャク類、環形動物門のスピオ科 *Polydora sp.* およびエゾカサネカンザシゴカイ *Hydroides ezoensis*、軟体動物門のマガキ *Crassostrea gigas* が比較的多く出現した。堤体の中心付近から内水域側にかけての礫には、エゾカサネカンザシゴカイおよび節足動物門のフジツボ類がわずかに付着するだけであった。そして、内水域側の被覆石には、マガキ、フジツボ類がある程度付着しているのが確認された。すなわち、内水域側は外水域側に比べて腔腸動物門、環形動物門に属する付着動物種が少なく、かつ総量も少ない傾向がみられた。大型海藻に関しては、外水域側の被覆石にアナアオサ *Ulva pertusa*、アオノリ *Enteromorpha sp.* の生息が確認された。一方、内水域側の被覆石には、アナアオ

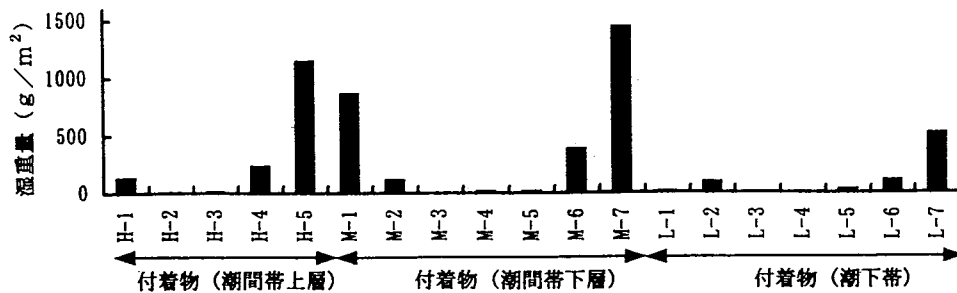


Fig. 2 大型付着生物の分布  
Distribution of Large Sessile Organisms

サ、シオグサ *Cladophora sp.* が確認された。

### 3.2 微細な礫付着物に関する調査結果

3.2.1 微細付着物の付着状況 礫の表面には、生物膜と呼ばれているヌルヌルとした触感の物質が薄く付着していた。その色調は、潮間帯では、おおむね茶褐色を帯びていた。一方、潮下帯では、茶褐色の部位に混じって、一部に黒色の付着物が観察された。このことから、潮間帯部分は堤体内が好気的な状態を維持していたことが示唆され、潮下帯には、一部に嫌気化している部位のあったことがわかった。

3.2.2 微細付着物の量と性状 Fig. 3 は、微細付着物の乾燥重量と強熱減量を示したものである。まず、各調査深度毎に水平方向の分布をみる。潮間帯上層及び下層では、付着物の乾燥重量は外水域側で最も高く、堤の中心へ向うに連れて減少し値は最低となった。そして、さらに内水域側へ近づくと、若干ではあるが再び増加した。この傾向は、強熱減量でも同様であった。潮下帯については、L-6 で値が小さいことを除けば、おおむね潮間帯の結果と類似した傾向が認められた。鉛直方向の分布をみると、潮間帯上層と下層については、ほぼ同程度であるが、潮下帯の付着量は潮間帯の値に比べて小さくなっていった。

シーブルー・テクノロジー工法研究会では、海水 SS 濃度がおおよそ 2~10mg/l で変動する東京湾湾奥域において、幅 1m、水深約 1m、延長 30m の礫充填水路を用いて海水浄化実験を 1 年間にわたって行い、付着生物

膜について 2ヶ月に 1度の頻度で調査を実施している。流入海水の礫層内滞留時間が 4~5 時間のとき、流下距離 4m, 19m 地点の礫付着物の乾燥重量はそれぞれ 20~80g/m<sup>2</sup>, 10~30g/m<sup>2</sup> であり、礫層内滞留時間が 1~1.4 時間のときは、それぞれ 25~180g/m<sup>2</sup>, 20~50g/m<sup>2</sup> で推移したと報告している<sup>9)</sup>。この報告と我々が調査した石積み浄化堤の実験条件は原水水質、水量負荷条件が同じでないで詳細な比較検討はできないが、付着物量はほぼ同程度であった。

Fig. 4 は、微細付着物の有機物含有量を示したものである。これは、Fig. 3 の強熱減量を乾燥重量で除したものである。各調査深度別に水平方向の分布をみると、H-3, M-3, L-3, すなわち、堤体の中心よりやや内水面よりの調査地点で有機物含有量が最低となっていた。鉛直方向の分布をみると、有機物含有量は潮間帯上層と下層ではあまり差はなく 15~25% 程度であったが、潮下帯では低く 5~15% であった。

3.2.3 微細付着物の生物相 顕微鏡観察で同定できた付着生物は試料全体の極く一部分であった。試料の多くは、付着藻類等の遺骸や、その分解に係わるバクテリアなどの集塊であった。同定できた生物のうち比較的多く出現した種は、珪藻綱の *Skeletonema costatum*, *Melosira nummuloides*, *Navicula spp.*, *Cocconeis spp.*, *Nitzschia spp.*, *Ampora spp.*, 線虫綱の *Nematoda* であった。種類数、出現数の分布は図示しないが、外水域側被覆石でやや多いことを除くと、調査地点による差は大きなものではなかった。

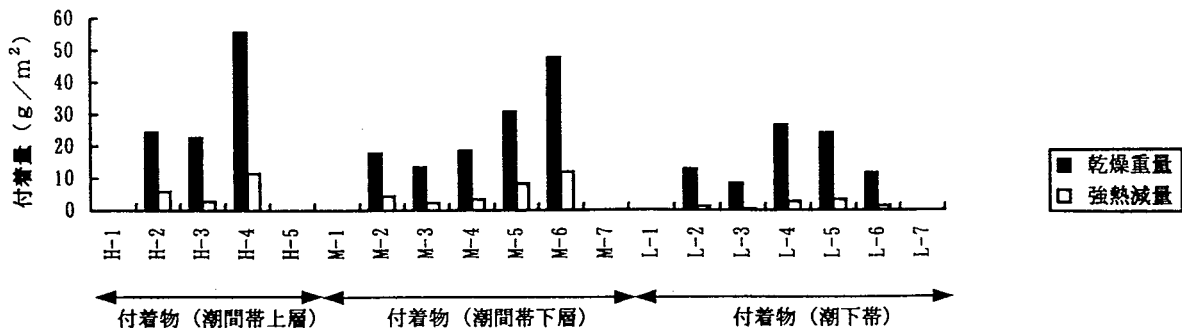


Fig. 3 微細付着物の乾燥重量および強熱減量  
Dry Weight and Ignition Loss of Attached Matter

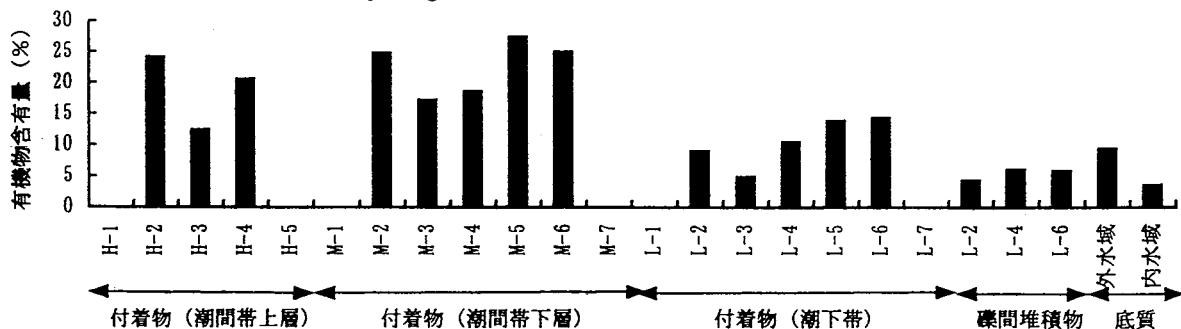


Fig. 4 微細付着物、礫間堆積物、底質の有機物含有量  
Organic Substance Content of Attached Matter and Sediments

### 3.3 礫間堆積物に関する調査結果

3.3.1 礫間堆積物に関する現地観察結果 実験堤の最下部(底盤~底盤+約50cm)に、黒色を呈した汚泥状の堆積物が観察された。しかし、この堆積物の外観は、堤体下の地盤の泥土と変わらなかった。採取深度を考慮すると、この堆積物は礫堤建設時に地盤の泥土を巻き込んだものではないかと考えられる。事実関係は不明であるが、いづれにしても、堤体内の間隙が堆積物によって閉塞している状況は認められなかった。

3.3.2 礫間堆積物の化学性状 Fig. 4 に示した有機物含有量(強熱減量)をはじめとして、礫間堆積物の化学性状分析値は、周辺底質とほぼ同程度であった。

## 4. 石積み浄化堤の海水浄化機構に関する考察

### 4.1 浄化堤への汚濁負荷量及び除去量の試算

浄化堤への汚濁負荷量と除去量を試算し、堤体礫間へ捕捉された汚濁物質の物質収支について考察する。

まず、石積み浄化堤実験施設に、築造以来、どれだけの水量負荷が与えられたかを試算する。実験堤は実際には台形上の形状をしているが、ここでは矩形とみなし、海水透過断面は「間口6m×水深3m」、透過距離は10mとし、礫は直径250mmの球体、間隙率は別に求めた0.47とした。堤体の容積は180m<sup>3</sup>、間隙容積は85m<sup>3</sup>、礫表面積は2300m<sup>2</sup>となる。また、内水域は水面積を「幅6m×奥行き10m」とした。実験堤は、平成5年7月に築造され、平成8年9月の解体までの約3年間、現地に設置された。この間、平成5年8月から平成6年11月までは陸上実験のために、また、平成6年8月から11月、平成7年6月から10月、平成8年8月から9月にかけては浄化堤の海水浄化性能と水量負荷の関係を調査するため、水中ポンプによる内水面海水の揚水を実施した<sup>8)</sup>。そこで、水量負荷としては、自然潮汐によるものとポンプアップによるものの合計を考える。潮汐による海水流入については、平均的な潮位差として1mをあたえ、これに内水域水面積をかけて1潮汐あたり60m<sup>3</sup>とした。これに、揚水ポンプによる揚水量67万m<sup>3</sup>を加えて、水量負荷積算量を算出した。約3年間で総計80万m<sup>3</sup>となった。

次に汚濁負荷であるが、ここでは懸濁物質(SS)について試算した。海水中のSSの年間平均濃度は4.5g/m<sup>3</sup>であり<sup>8)</sup>、これに水量負荷80万m<sup>3</sup>を掛け、汚濁負荷量は3年間で3.6t(乾燥重)と試算した。そのうち、浄化堤で捕捉、除去されるのが流入水SSの約70%<sup>8)</sup>、また、除去SSは浄化堤の礫表面に均一に付着すると仮定して、汚濁負荷除去量および礫単位表面積あたりの付着物量を試算した。それぞれ、2.5t(乾燥重)、約1kg/m<sup>2</sup>となった。

一方、現地調査結果によれば、付着物の現存量は10~50g(乾燥重)/m<sup>2</sup>であった。礫付着物の調査は定期的に行ったものではないが、3.2.2で紹介した報告<sup>9)</sup>を

参考にすると、おおむねこの程度の付着物量で推移したものと推察する。

すなわち、微細付着物現存量は、先の試算値1kg/m<sup>2</sup>の数%に過ぎない。また、微細付着物現存量に大型付着物の湿重量を足し合わせても、試算値の方が大きい。このことから、礫間に捕捉された汚濁物質の大部分は、何らかの作用を受けて、礫表面から消失したものと考えられる。

### 4.2 礫付着物、礫間堆積物の生物化学的特徴

礫間に捕捉された汚濁物質の行方としては、まず堤体底部への沈降、堆積が考えられる。そこで、採取した礫付着物、堤体下部への堆積泥、周辺底質の生物化学的特徴を整理し、礫間に捕捉された汚濁物質の分解および移動過程について考察する。

Fig. 5 は、有機態炭素含有量(以下、C)と、クロロフィルaとフェオフィチンの含量(以下、chl. a)の関係を図示したものである。礫付着物のC/chl. aは1000~2600であるのに対して、堤体下部への堆積泥、周辺底質のC/chl. aはそれぞれ、320~430、160~310であり、礫付着物に比べて小さい。門谷らは、富栄養化した浅海域において、赤潮が発生した後などに発生する長さ数cmにも及ぶ通称NUTAと呼ばれる巨大粒子と、懸濁粒子や沈降粒子等の化学組成の比較を行っている。大阪湾ではNUTAのC/chl. aは520~2400(1986年6月)、120~200(1987年5月)であり、懸濁粒子のC/chl. aは40~200(1986年6月)、55(1987年5月)と報告している<sup>10)</sup>。また、東京湾内湾の底質堆積物のC/chl. aは500~1000と報告している<sup>11)</sup>。NUTAのC/chl. aにはかなりばらつきがあるが、我々が調査した礫付着物のC/chl. aはNUTAの性状に近いと考えられる。すなわち、植物プランクトン等の浮遊懸濁粒子が礫に捕捉された後、礫に生息するバクテリア等の作用を受けて、NUTAとよく似た有機物の分解過程が進行していたのではないかと考える。

堤体内への泥状物質の堆積は、実験堤の最下部(底盤~底盤+約50cm)で観察された。しかし、この堆積

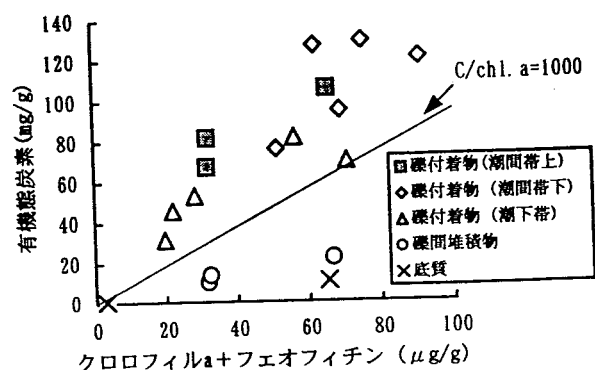


Fig. 5 有機態炭素とクロロフィルaの相関  
Organic Carbon vs. Chlorophyll a

物は、採取深度、堤体の施工状況を考慮すると、原地盤の泥を巻き込んだ可能性が高い。加えて、本節で示したように、礫付着物と堤体底部の堆積物の C/chl. a には大きな違いがあった。これらのことを踏まえると、堤体に捕捉された後の汚濁物質の行方としては、堤体底部への堆積以外の経路も重要であろうと考えられる。

#### 4.3 堤体に捕捉された水中懸濁物質の行方

前節までの考察に基づき、水中懸濁粒子が石積み浄化堤に捕捉された後、礫層下部への堆積以外にどのような分解、移動過程をたどるのかを推論する。

まず考えられるのは、捕捉物の分解による減容化である。堤体内の礫は潮下帯の一部に嫌気的な部分が見られたが、潮間帯にかけてはおおむね好気的な状態であった。特に、潮間帯部分は潮の干満により乾湿を繰り返す、水処理技術の1つである散水ろ床に似た浄化システムとなっている。そのため、付着物の好気的な分解が効率的に行われていると考えられる。

次いで、大型付着動物による付着物の摂食があげられる。大型付着生物の堤体内部における生息数は、水際部に比べて少ないものの確認されており、礫堤全域でこの作用がみられたものと考えられる。

さらには、前節で考察したように、礫に捕捉された汚濁物質が礫上で NUTA に似た物質に分解されるとすれば、その凝集体が潮の干満や波浪の力を得て、再び水中を浮遊し、系外に流出することも考えられる。特に、台風などの波浪が強まるときには、その影響が大きいと考える。

#### 4.4 石積み浄化堤の維持管理手法について

前節 4.3 の内容は礫間堆積物の浄化機構に関する仮説である。しかし、石積み浄化堤をより効率的に機能させ維持管理を容易にするためには、こうした現象が生じやすいように石積み浄化堤を築造するべきである。そのためには、礫層内を嫌気化させないように、堤体幅を必要最小限にするとともに、溶存酸素供給に効果があるといわれている波浪曝気<sup>2)~4)</sup>の効果が礫堤内部にまで及ぶような礫径を選択することが留意点としてあげられる。以上の点を考慮すれば、礫間の目詰まりについては、メンテナンスフリーでの運用が可能であろうと考える。なお、内水面を様々な用途で空間利用する際には、定期的にゴミや繁茂する海ソウの除去、清掃を行う必要もあろう。また、長期的には、内水面堆積物の浚渫等も必要となろう。

### 5. まとめ

実海域に設置したパイロットスケールの石積み浄化堤実験施設において、設置から3年後に、堤体内の付着物、堆積物の実態を調査した。その結果、大型付着生物は被覆石近傍に集中しており、また、汚泥状物

質の礫間への堆積はほとんどみられず、礫間が閉塞している状況は確認されなかった。また、礫付着物等の化学性状を比較した結果、礫に捕捉された汚濁物質の多くは、その後、好気分解、大型生物による摂食、海水の流れに連行された系外流出などの分解、移動過程を経るものと推察された。以上より、適切な堤体構造、設置規模をとれば、礫間の目詰まりについては、メンテナンスフリーでの運用が可能であろうと考えられた。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、「海洋のうつろ研究会」代表赤井一昭氏には多大なご指導を賜りました。また、の蒲郡海洋開発株式会社の皆様には、現地実験施設設置、運営に関して御尽力を頂きました。ここに記して、謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 細川：生物膜を利用した汚濁海水の浄化法，ヘド口，No. 56，p. 4~9，(1993)
- 2) 赤井：水域の浄化システム，第11回建設技術発表会論文集，p. 76~79，(1984)
- 3) Kazuaki AKAI, et. al. : Water purification system with permeable rubble-mound breakwater, TECHNO-OCEAN 88, Vol. 2, p. 453~456, (1988)
- 4) 赤井，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，他：石積み浄化堤による海水浄化工法の開発(その1)実海域の浄化堤実証施設における水質浄化の初期特性，大林組技術研究所報，No. 49，p. 121~125，(1994)
- 6) 藤井，他：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，大林組技術研究所報，No. 50，p. 107~112，(1995)
- 7) 宮岡，他：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，大林組技術研究所報，No. 51，p. 99~104，(1995)
- 8) 宮岡，他：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，大林組技術研究所報，No. 55，p. 79~84，(1997)
- 9) 毛利，他：汚濁海水浄化における礫間接触水路内の拘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)
- 10) 門谷，他：沿岸海域における各種粒状有機物の動態，Researches in Organic Geochemistry, Vol. 6, p. 9-13, (1988)
- 11) 門谷，他：粒子の生物化学的キャラクタリゼーションから見た物質輸送過程，月刊海洋，Vol. 25, No. 1, p. 40-46, (1993)