

(24) 閉鎖性内湾における懸濁物の物質循環を活性化させる実験構造物の評価

Assessment for the function of a test structure activating material cycle
of suspended solid in enclosed bay

倉田健悟^{*}・上月康則^{*}・山本秀一^{**}・岩村俊平^{***}・西村達也^{*}・村上仁士^{*}・水口裕之^{****}・笹山博^{****}

Kurata, K. ^{*}, Kozuki, Y. ^{*}, Yamamoto, H. ^{**}, Iwamura, S. ^{***}, Nishimura, T. ^{*}, Murakami, H. ^{*},

Mizuguchi, H. ^{****}, Sasayama, H. ^{****}

ABSTRACT; The function of a test structure for the environmental restoration in enclosed sea area was assessed by several field investigations. The objective of the structure is to activate material cycle through the food web of marine organisms feeding on suspended solid. Dissolved oxygen concentration in the bottom of structure was lower than 3 mg/l in summer, because a number of mussels on the porous concrete had consumed oxygen. The mussels also had an effect on decreasing suspended solid, and concentration of suspended solid in the structure was relatively lower than the outside due to their feeding activities. Amount of deposited seston varied with seasons. The deposited seston contained faeces and pseudofaeces of mussels, indicating that suspended solid was transferred by mussel filtration onto the bottom of structure. However, since few numbers of deposit feeder inhabited the bottom of structure, deposited seston have accumulated and caused deterioration of sediment quality. Some ideas for improvement of the structure were proposed in the discussion.

Keywords; food web, shore structure, sediment, deposit feeder, dissolved oxygen

1 はじめに

港湾や河口においては、護岸、岸壁、防波堤の内側等の直立構造物で海岸が形成されることが多い。従来の自然海岸は緩やかな傾斜の基盤上に多種多様な生物が生息し、豊かな生態系を形成しているのに対して、岸壁や護岸等の直立構造物が設置された水域ではそのような自然の姿は見られない。また、大都市周辺の閉鎖性内湾においては、赤潮の発生や底層の貧酸素化など、様々な問題が生じている。陸域からの過度の有機物および栄養塩の流入が主な原因であるが、本来、生態系内で生物によって利用されていた物質の経路が途中で閉ざされてしまったことも一因である^{1),2)}。典型的な直立構造物に囲まれた内湾におけるこれらの問題点を整理すると次のようになる。

^{*}徳島大学大学院 工学研究科 エコシステム工学専攻 (Graduate School of Engineering, The University of Tokushima)

^{**}株式会社エコー 環境・計画部 (Environment and Planning Department, Ecoh Corporation, Tokyo)

^{***}徳島大学 工学部 建設工学科 (Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The University of Tokushima)

^{****}国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 (Port and Airport Technical Investigation Office, The Shikoku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure and Transport)

- (a) 多様な生物の生息場となる潮間帯に相当する範囲が狭く基質も単調である。
- (b) 懸濁物をろ過摂食するイガイ類などが優占するがやがて底部に脱落してしまう。
- (c) 懸濁物や底部に堆積した生物遺骸は分解過程で底層付近の酸素を消費する。
- (d) 堆積物食者によって摂食される堆積物量が小さく底質の嫌気化が進行する。

懸濁物は主に植物プランクトンやデトリタスから構成され、内湾生態系の物質循環の起点と考えられる。そこで本研究では、懸濁物から始まる物質循環を活性化させることにより、閉鎖性内湾の赤潮や貧酸素化の原因を少しでも取り除くことを目的に、原因の一つである直立構造物の形状を工夫することを試みた。前述した問題点に対応し、なおかつ船舶の係留機能を維持する条件のもと、1999年12月に実験構造物を徳島市小松島港内に設置した(図1)。この構造物の特徴を次に挙げる。

- (1) 潮間帯部分の面積を広くして多孔質コンクリートで基質表面を複雑にした。
- (2) イガイ類の脱落個体や糞塊を構造物底部に沈降させるため前部に透過壁を作った。
- (3) 底層部に溶存酸素を供給するため後部の礫層から海水が浸入する構造にした。
- (4) 比較的浅い水深にマナマコなどの堆積物食者の生息場としての底面を設けた。

本研究の目的は、実験構造物の特徴である上記の4点について調査を行い評価することである。本論文では、実験構造物の設置から約1年間の調査で得られた結果を報告し、構造物の一部を改造した前後の比較も合わせて検討し、課題と今後の方針について述べる。

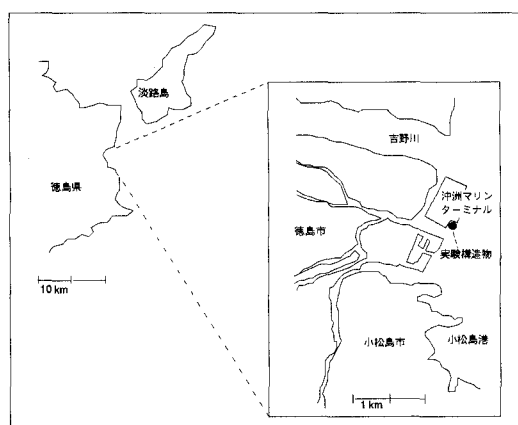


図1 実験構造物を設置した小松島港沖洲地区

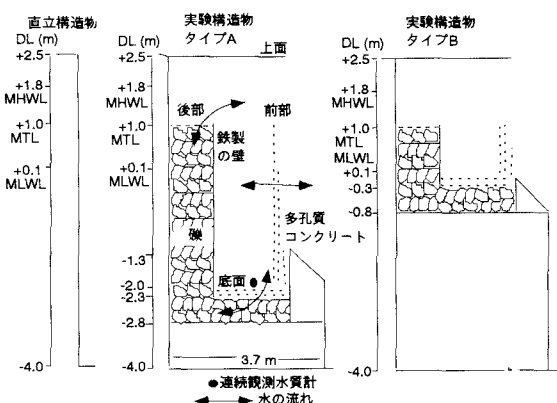


図2 直立構造物と実験構造物の概要

2 方法

2.1 調査地

実験構造物を設置した小松島港沖洲地区は、徳島市内を流れる新町川河口に位置し、非常に懸濁物が多く透明度も低い海域である。防波堤内は大型フェリーによる航跡を除いて比較的静穏であり、大潮時には約2mの潮位差がある。水深は干潮時において約4mあり、底質はシルト分の多い堆積物となっている。

2.2 実験構造物の概要

実験構造物は鉄製で防波堤の内側に設置されており、港内に面した西側を前部、防波堤に接した東側を後部と呼ぶこととする。小松島港の海底面よりそれぞれ2m、4m浅い水深に底面を持つ2タイプ (A、B) が隣り合って設置されており、上方から見た場合いずれも1.65mの幅を持ち両側面に不透過な鉄製の壁を

有している。タイプAは干潮時においても水深が2m以上ある浅い潮下帯の場を、タイプBは干潮時に水深が0.5m以下になる潮溜まりのような場をそれぞれ想定している。2種類の異なる場を設けることで、構造物の底面として適当な高さを検討できるようにした。いずれも底面の水深が異なることを除いて構造は類似しているため、ここではタイプAを中心に説明する（図2）。前部には鉄製の格子で固定された円柱形の多孔質コンクリートが3列の透過壁を成しており、上端が平均潮位付近に位置する。底面にも同じ多孔質コンクリートが2層敷き詰められ、これらの層の下は礫が充填されている。後部に不透過な鉄製の壁で仕切られた空間に礫が平均潮位付近まで入っており、満潮時には海水が礫の上方から底部の多孔質コンクリートおよび底面上の空間へ浸入することができる構造となっている。また、構造物の上面は調査のための入り口がある他は閉じられているので、前部の斜め上方からしか光が入射しない。

設置からおおよそ1年を経過した2000年12月に構造物の一部を改造した。前部の3列の多孔質コンクリートの外側2列を潜水作業によって取り除き、1列を残した。本論文ではこの改造の前後をそれぞれ改造前、改造後と呼ぶこととする。

2.3 水質の連続観測

実験構造物内の底層付近と構造物の外側の水質を調べるため、自動的に観測・記録が可能な水質計（アレック電子ADO8M-6）を設置し（図2）、1時間おきに水温、塩分、濁度、溶存酸素濃度（DO）を測定した。2000年1月17日から6月29日まではタイプAの底層のみ、6月29日から10月25日まではタイプAの底層と構造物外側の港内の底層、そして10月25日から2001年5月11日まではタイプAの底層と構造物外側の同水深において測定を行った。

2.4 懸濁物量およびクロロフィル濃度の測定

2000年5月から2001年4月まで大潮または小潮の日を選んで数回、水質の日周変化の調査を行った。本稿では特に懸濁物（SS）とクロロフィル（Chl. *a*）の構造物内外の差異について検討する。

重りをつけた採水瓶を沈めて栓を抜いてその水深の海水を採取した。海水サンプルを実験室に持ち帰った後、ガラス繊維ろ紙（Advantec GS-25、保留粒子径 0.6 μm ）を用いて吸引ろ過し、ろ紙上に残ったものの乾燥重量（SS mg/l ）を測定した。また別の海水サンプルをガラス繊維ろ紙（Whatman GF/C、保留粒子径 1.2 μm ）で吸引ろ過してアセトン抽出法に従って吸光度からクロロフィル濃度（Chl. *a* $\mu\text{g/l}$ ）を算出した。

2.5 沈降物量の測定

構造物内外の沈降物を調べるため、セジメントトラップを24時間設置して回収し、吸引ろ過によって沈降物を集めて乾燥重量を測定した。別に採取した沈降物を乾燥させて乳鉢ですりつぶした後、1Nの塩酸で炭酸塩を取り除き、CNコーダを使用して沈降物に含まれる全有機炭素（TOC）、全窒素（TN）を測定した。また、沈降物の一部を実体顕微鏡を用いて観察し、内容物を観察した。

2.6 生物相調査

2000年2月から2001年2月まで各季節ごとに実験構造物と港内防波堤に生息する生物の調査を行った。実験構造物においては前部と底部の多孔質コンクリートを採取して実験室で破碎した後、生物を選別して同定を行った。対照区として、実験構造物近傍の防波堤壁面において水深1m間隔でコドラート（1m $\times$ 1m）内の付着動植物をスクレイパーでかきとって選別・同定した。その他に潜水作業中に目視で観察された移動性の大型生物を記録した。

3 結果

3.1 溶存酸素濃度の季節変化

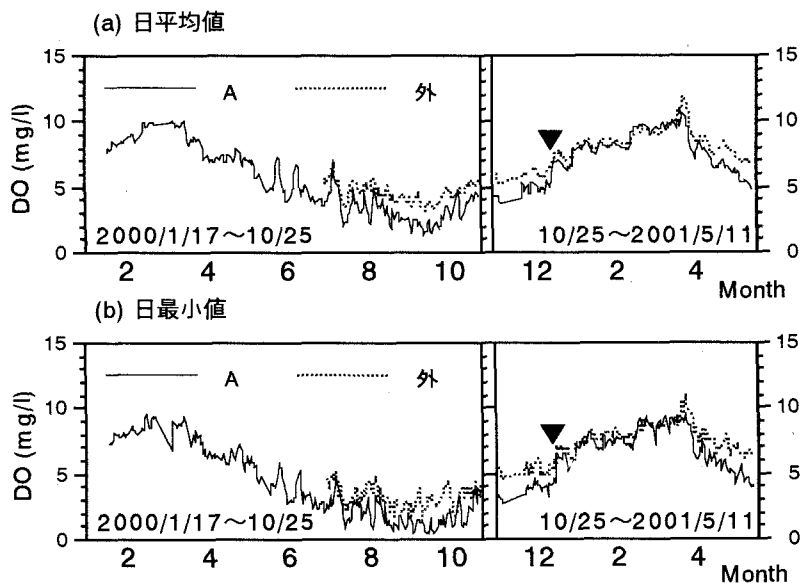


図3 溶存酸素濃度の季節変化 (a) 日平均値 (b) 日最小値
10月25日以降は同水深の比較、▼は構造物前部のコンクリートを減らした日を示す。

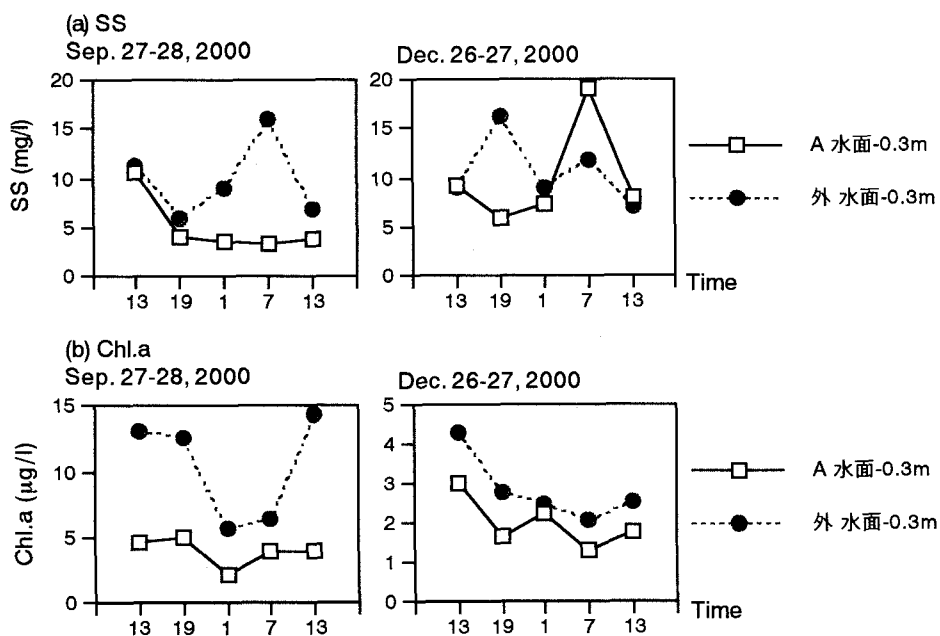


図4 懸濁物とクロロフィルの日周変化 (a) SS (b) Chl.a

構造物タイプAの底層のDO（溶存酸素濃度）の日平均値は2000年2月に10mg/lに達し、3月から低下し始めた（図3）。構造物の外側の底層の観測を始めた6月末には、タイプAの底層のDOは5mg/lを下回り、また構造物外側よりも低い傾向であった。8月から9月にかけて構造物内外の差は大きくなり、日最小値で見ると1mg/lを下回る日が8月と9月で20日以上あった。10月に入ると構造物内外ともDOの値は上昇し始め、10月末には依然として構造物内の方が低いものの、5mg/l前後に回復した。10月25日に構造物外側の底層に設置していた水質計を、タイプAの底層と同じ水深（DL -2m）に引き上げ、観測を継続した。12月まで構造物内のDOが低い傾向が続いたが、12月11日に構造物前部の多孔質コンクリートを減らした後、構造物内外のDOの差はほとんどなくなった。しかし、2001年3月頃から再び構造物内の底層のDOが構造物の外側よりも低くなり始め、5月に入ると日最小値が5mg/lを下回った。

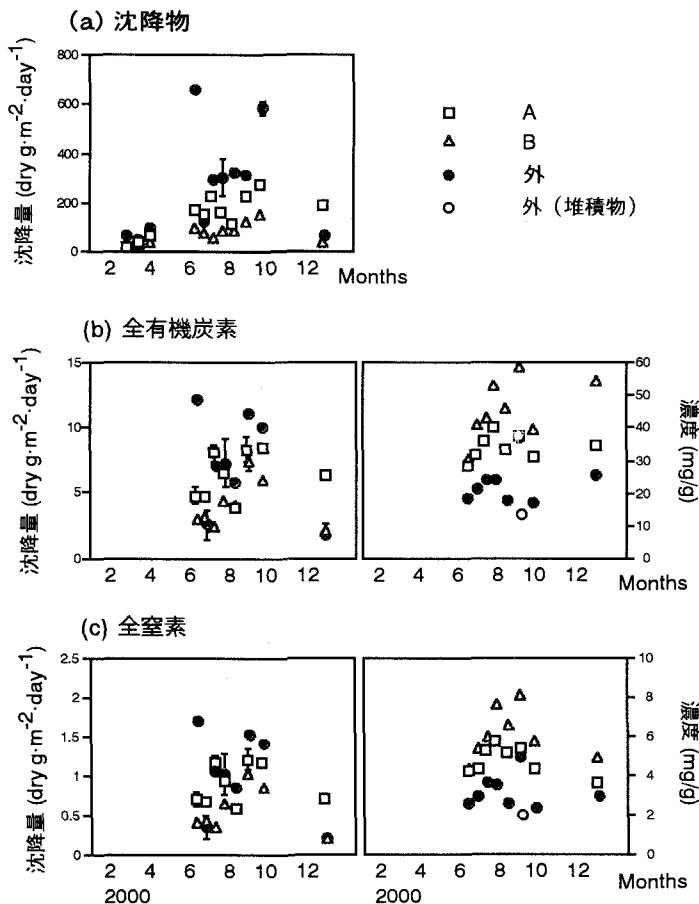


図5 沈降物量と沈降物中の全有機炭素および全窒素濃度

3.2 懸濁物とクロロフィルの日周変化

2000年9月と12月の懸濁物（SS）とクロロフィル（Chl.a）の日周変化を示す（図4）。水面から30cmのSSの濃度は、9月に構造物内で外側より低い傾向があった。同様に、Chl.aの濃度は構造物内より外側が大きく、また日中高く夜間に低くなる日周変動が見られた。

3.3 沈降物量の季節変化

構造物内外の底面に沈降する懸濁物の量は、春から夏にかけて大きくなり、冬には小さくなる季節変化を示した (図5)。1日あたり単位面積あたりに換算したところ、構造物の外側で構造物内 (タイプA、B) より多いことが分かった。しかしながら、セジメントトラップで採取した沈降物の全有機炭素と全窒素の濃度は、タイプBの底面において最も高く、次にタイプAが高くなり構造物外側では低かった。8月に構造物外側の堆積物を採泥器で採取して濃度を測定したところ、全有機炭素と全窒素のいずれも沈降物における値より低かった。沈降物量と濃度から、全有機炭素と全窒素の1日あたり単位面積あたりの沈降量を求めたところ、構造物の外側が構造物内より大きい日とタイプAが最も大きい日があった。

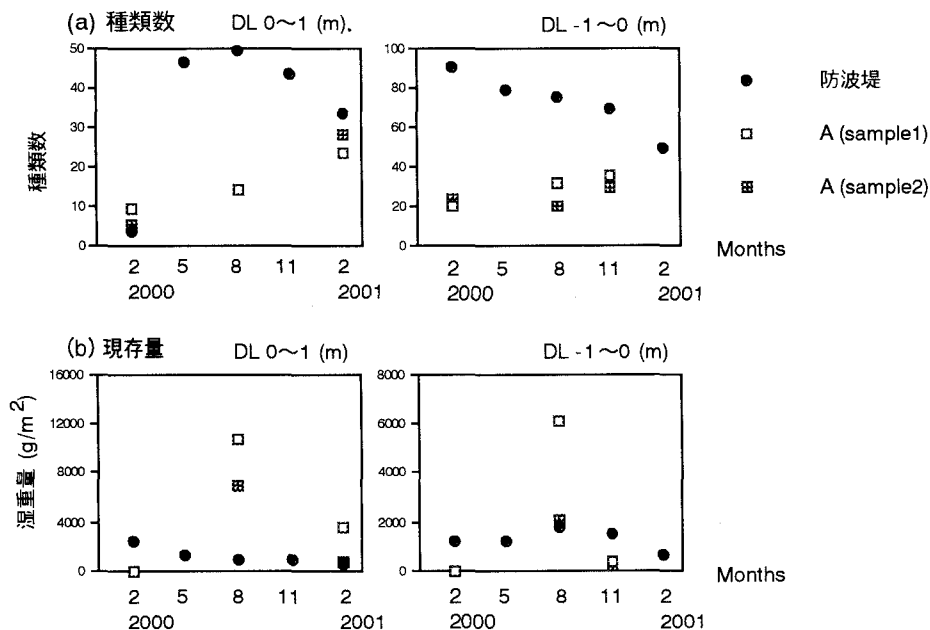


図6 底生動物の種類数と現存量の季節変化

3.4 生物相の季節変化

構造物タイプAの前部に位置する多孔質コンクリートと、防波堤の壁面に生息していた底生動物の種類数と現存量を示す (図6)。潮間帯に位置する防波堤の種類数は夏季に増加して冬季に減少する季節変化を示したが、潮下帯では2000年から2001年にかけて低下する傾向があった。構造物における種類数は設置から増加が続き、2001年2月で防波堤の値とあまり変わらなくなった。一方、現存量については、防波堤に比べて構造物の多孔質コンクリートに生息する動物は著しい変動を示した。2000年8月には懸濁物食性の二枚貝ムラサキイガイが大量に付着しているのが観察され、現存量の大部分を占めたが、11月の時点ではそれらが脱落してなくなったため、現存量は8月の10分の1以下になった。

2000年11月における底生動物を食性の推定できる主要な種について、食性別に分類した結果を示す (表1)。防波堤の壁面には肉食性の動物が認められたが、構造物タイプAの前部には少なかった。また、構造物内外とも、堆積物食性の底生動物の現存量は非常に低く、懸濁物食者が優占していることが分かった。しかしながら、目視観察では構造物内外とも堆積物食性のマナマコや肉食性のマヒトデが出現しており、これらの底生動物の現存量が反映されていないため、今後は密度を推定する必要がある。

表1 食性別に分類した動物の現存量の比較（2000年11月、湿重量 g/m²）

調査地点 位置 サンプル DL (m)	A 前部 1 -1～0	A 前部 2 -1～0	A 底部 -2	B 底部 0	防波堤 直立壁 0～1	防波堤 直立壁 -1～0	防波堤 直立壁 -2～-1	防波堤 底部 -4
食性								
肉食性	4.4	-	-	-	80.7	84.8	11.1	0.1
雑食性	-	-	-	-	-	-	-	-
草食性	-	-	-	-	-	-	-	-
堆積物食性	-	-	-	-	-	-	-	-
懸濁物食性	274.9	82.9	2.0	2584.7	697.4	1322.6	1404.0	-
懸濁堆積物食性	2.7	5.6	-	0.9	-	-	-	-
主要な種	282.0	88.4	2.0	2585.6	778.1	1407.4	1415.1	0.1
その他の種	55.1	46.0	6.2	26.2	82.6	120.6	241.3	0.2
合計	337.1	134.4	8.2	2611.8	860.7	1527.9	1656.4	0.3

4 考察

4.1 底層における溶存酸素濃度の低下

実験構造物の設置から約1年を経過したが、夏季に構造物内の底層付近の溶存酸素濃度が底生生物の生息が困難なレベルまで低下したため、2000年12月に前部の3列の透過壁のうち2列を取り除いた。これは潮流や波浪による海水交換を促進することと、多孔質コンクリートを基質とする生物の現存量を減らし、酸素消費量を下げること考えたためである。構造物から採取した多孔質コンクリートを用いた室内実験では、付着したムラサキガイの個体数と酸素消費速度との間に正の相関があることが確認されており、構造物内の底層における夏季のDOの低下は付着した生物の呼吸などの活性によるもの大きいことが示唆される。2列の透過壁を取り除いた後、底層のDOは同水深の値に近づき、構造物の改造を行った効果が見られた。しかしながら、改造を行った12月は生物の現存量も夏季より小さくなく、通常でもDOの値が高い時期であるため、DOの上昇は一時的なものであった可能性がある。その後のDOの経時変化をみると、3月から4月にかけて再び構造物内の底層のDOが低下し、構造物の外側との差が大きくなった。目視観察でも4月頃から多孔質コンクリートに高い密度でムラサキガイの稚貝の定着が認められ、水温の上昇とともに生物の現存量が増加するものと思われる。したがって、今後もモニタリングを継続してDOが低下しないような対策を施す必要があると考えられる。

4.2 構造物内外の懸濁物とクロロフィル

構造物内の懸濁物とクロロフィルの濃度は、外側より小さくなっており、これは構造物前部の多孔質コンクリートに生息しているろ過食性の動物の摂食行動によるもの大きいと考えられる。また、実験構造物は上部と前部が光を遮る構造になっているので、構造物内は暗く、植物プランクトン等の一次生産が小さいためクロロフィルの濃度も低かったことが挙げられる。前節の結果と合わせると、構造物の前部を海水が流入することで植物プランクトンを含む懸濁物が生物によってろ過され、同時に生物の呼吸によって酸素が消費されていることが示唆される。

4.3 沈降物量の構造物内外による差異

底面に設置したセジメントトラップで採取された沈降物を検鏡したところ、デトリタスや糞塊が多く

認められた。ムラサキイガイなどの懸濁物食者は海水中の懸濁物をろ過摂食する際、消化管内に取り込まない部分を偽糞と呼ばれる糞に似た凝集物を排出することが知られている。沈降物は糞や偽糞の他にフジツボ類やイガイ類の殻、腐肉食性の巻貝類、維管束植物の遺骸等から構成されていた。定性的ではあるが、構造物の底面や前面透過壁の上端には糞や偽糞が多い傾向が見られ、またフジツボが死んで脱落したと思われる殻片が多く入っていた。これらのことから、構造物内には主に前部の基質に付着した生物を由来とした死骸や糞塊が沈降していることが示唆される。

沈降物の全有機炭素濃度と全窒素濃度はいずれも構造物内で高かった。構造物内外の水深の差によって沈降中の分解過程が異なっていたのかもしれない。また、ムラサキイガイなどのろ過摂食によって構造物内には懸濁物に由来する糞塊が沈降し、沈降物中の全有機炭素および全窒素濃度が構造物内で高くなっていた可能性がある。

さらに、仮に構造物内という空間がない場合を考えると、イガイ類によってろ過された後の物質はそのまま底面に沈降することになるので、少なくとも直立構造物の直下に堆積していたであろう物質のある部分は、構造物の設置により構造物内に堆積するようになったと考えられる。

4.4 懸濁物食者と堆積物食者の現存量

構造物と防波堤における生物相調査の結果、種数と現存量に違いが見られた。構造物の設置からおよそ1年しか経過していないので、海洋生物の定着過程と群集の遷移の観点からは比較を行うには時期が早いと考えられる。しかしながら、構造物に生息する生物の特徴として、夏季にムラサキイガイ等の懸濁物食者が非常に高密度であったのに対し、構造物内の底部には堆積物食者がほとんど採取されなかったことが挙げられる。構造物の底面を移動する底生生物を定量的に採集できなかったことも一因ではあるが、構造物内底部の生物の現存量が低かった理由として、夏季の底層付近の溶存酸素濃度の低下が考えられる。一般に底生動物の生息密度や種数は、飽和度で約50%を下回ると著しく減少するとされる³⁾。構造物内は堆積物食者の餌である沈降物は供給されるものの、DOが十分でなかったために底部に生息する動物の現存量が小さかったと考えられる。

また、構造物の底部は前部と同じ多孔質コンクリートを敷き詰めたが、沈降物の堆積が進行し、今後はコンクリートの基質が隠れてしまうことが予想される。底生生物の生息に基質の与える影響は重要であるため、水理学的な条件を制御して底面における基質の状態を一定に保つ必要があるかもしれない。すなわち、堆積物の再懸濁を促進させて多孔質コンクリートの基質を露出させた場合は底面においても懸濁物食者の定着と生存が可能になり、反対に沈降物の堆積が比較的優勢な環境では堆積物食者の生息が促進されるものと考えられる。設置から1年を経過した段階では、底層のDOが低下し、堆積物の嫌気化が確認されたため、沈降物の堆積の程度が生物によって消費・分解される速度より大きいと言える。したがって、沈降物の堆積速度を減らすために構造物の底部を再懸濁が起こるような形状にするか、堆積物食者の定着と滞在を促す基質を構造物の底部に設置することが考えられる。

4.5 他の構造物との比較

これまでの直立構造物の問題点を解消し、周辺の海洋生態系の保全と修復を試みた例はいくつか報告されている。関西国際空港の人工島では周囲に緩傾斜護岸を採用し、完成後の生物相モニタリングからは海藻類を中心とした生態系が徐々に形成されていることが分かってきた。従来の直立構造物におけるより見た目にも実質的にも豊かな生態系が期待できるという点で、緩傾斜護岸は一定の成果を得てきたと言える。しかし、船舶の係留が必要な護岸においては、緩傾斜にすることは港としての機能を損なうため、直立の断面を持ったまま工夫を行うことになる。本研究に先行して、大阪府は高上げた緩傾斜石積みと棧橋とを組み合わせた海岸構造物を提案した^{4) 5)}。この構造物の設置から2年後には対照の防波堤よりも生息する生物の種数が多くなり、魚類や無脊椎動物の生息場としての機能を持つことが示された。構造物は大阪湾南部の比較的波あたりのよい離岸防波堤に設置されており、懸濁物が多く底層が貧

酸素化しやすい閉鎖性海域ではないため、生物の生息基質を整えるという点で効を奏したと言える。しかし、本研究で対象としている港湾などの閉鎖的な内湾では、生物の生息基質を提供することに加えて、内湾生態系に特徴的な懸濁物に始まる物質循環の経路を制御する構造物が必要である。

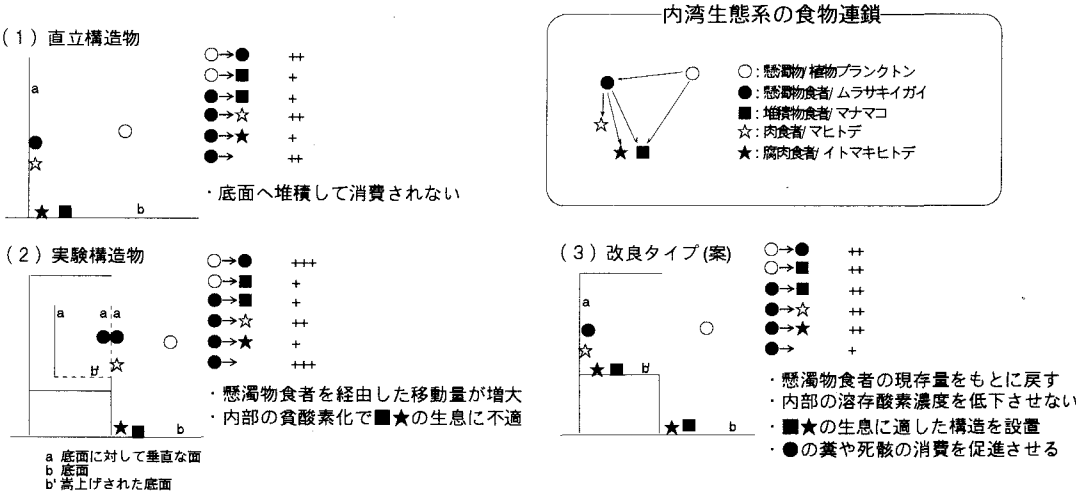


図7 従来の直立構造物と本研究の実験構造物の周辺における物質循環の模式図

5 結論

- 実験構造物の特徴である4点の評価項目に対して、本研究で得られた主な結果は次の通りである。
- (1) 構造物の前部に使用した多孔質コンクリートに生息した生物の現存量は、夏季には防波堤の壁面より大きく、生物の現存量を増加させる効果はあった。しかし、現存量は秋から冬にかけて減少したため、継続的な生息基質として有効であるか今後の生物相の遷移を見守る必要がある。
 - (2) 前部を流出入する海水中の懸濁物やクロロフィルは構造物内で減少し、またイガイ類の糞や脱落個体が底面に沈降していた。これは構造物前部に透過壁を設けた目的を達していると考えられる。
 - (3) 構造物内底層の溶存酸素濃度は夏季に著しく低下し、後部の礫層から供給される海水に含まれる溶存酸素が底層付近のDOを増加させることは見られなかった。また、構造物前部に生物の生息基質として設けた多孔質コンクリートは結果的に構造物内のDOを低下させる要因になった。
 - (4) 構造物内に堆積物食者を生息させるための浅い底面を設けたが、夏季の溶存酸素濃度の低下によって大型底生動物の生息が構造物の外側より適しているとは言えず、これらの生物の生息場としての機能を持たせるための改善が必要であることが分かった。

従来の直立構造物の周辺における典型的な物質循環の経路と、構造物を設置した海域におけるそれとの比較を行った (図7)。設置から1年後の状態は、構造物を設置することによって懸濁物食者の現存量が増加し、海水中的の懸濁物がろ過されて糞塊の形で構造物内に沈降していることが示唆された。一方、嵩上げをして底層の溶存酸素濃度を高く維持するための構造は失敗し、堆積した沈降物を摂食する動物が少ないことが分かった。懸濁物から始まる物質循環の経路を活性化させるための前半部はある程度の成果が得られたものの、後半部が不十分であったと言える。そこで、底層のDOを低下させないための構造物の改造を行ったが、今後は底層付近のDOを夏季においても維持できることに加え、沈降物の堆積速度を制御できるような構造を模索することが課題である。例えば、改良タイプ (案) のように前部の多孔質ポーラスコンクリートを取り外した場合、海水の流入が良好になり嵩上げされた底面上の溶存酸素濃度

は上昇して堆積物食者の生息が促進され、また垂直面に付着するムラサキイガイ等の懸濁物食者の現存量は小さくなると予想される (図7)。したがって、本研究の実験構造物の懸濁物食者に偏った物質循環の経路が修正され、改良タイプ (案) では懸濁物から堆積物食者への物質移動がより円滑に行われると期待することができる。

本研究の一部は、科学研究費補助金 (基盤B2 10558094) および住友財団環境研究助成 (2000年度) の援助を受けて行われた。

参考文献

- 1) 矢持 進・有山 啓之 1996 緩傾斜護岸と垂直護岸における優占種ムラサキイガイの生産と死亡・脱落
大阪府立水産試験場事業報告. 1994: 160-164
- 2) Kurihara Y. 2000 Ecology for environmental conservation of coastal area and harbors. Civil Engineering, JSCE
38: 42-46
- 3) 今林 博道 1998 貧酸素下のベントスの生残戦略. 月刊海洋 30: 125-132
- 4) 横山 隆司・大井 初博・小國 嘉之・中川 憲一・中原 紘之 1999 環境創造型岸壁 (エコ岸壁) の実証実験.
土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 (共通) 248-249
- 5) 横山 隆司・大井 初博・小國 嘉之・中川 憲一・中原 紘之 2000 環境創造型岸壁 (エコ岸壁) の実証実験
その2. 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集 CS-5