

港湾における生態系の修復技術 ～徳島県小松島港で行われた実証実験を例に～

倉田 健悟¹・上月 康則²・村上 仁士³・水谷 雅裕⁴・
森 正次⁵・北野 倫生⁶・岩村 俊平⁷

¹正会員 博(理) 徳島大学大学院 工学研究科 エコシステム工学専攻
(現 島根大学 汽水域研究センター 〒690-8504 島根県松江市西川津町1060)
E-mail:kengo@soc.shimane-u.ac.jp

²正会員 博(工) 徳島大学大学院 工学研究科 エコシステム工学専攻

³フェロー会員 工博 徳島大学大学院 工学研究科 エコシステム工学専攻

⁴正会員 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

⁵学生会員 徳島大学大学院 工学研究科 エコシステム工学専攻

⁶学生会員 修(工) 徳島大学大学院 工学研究科 エコシステム工学専攻

⁷正会員 修(工) 株式会社エコー 沿岸デザイン本部

港湾の人工構造物を含む生態系の問題点を解消するため、垂直面の多い既存の構造物の形状を変えた実験用の構造物を徳島県小松島港沖洲地区に設置した。潮間帯や浅い水深の潮下帯に生息する生物群集の働きによって海底へ堆積する有機物の負荷が減少するという仮説を設け、検証するための実証実験を行った。その結果、実証構造物の港湾側の海底への沈降物の有機物濃度は低くなっていることが示された。しかしながら、沈降物を一時的に蓄積する役割の平坦面の水深が異なる Type A と Type B では有機物の蓄積の程度に差異があり、平坦な面を設計する際には DL-2 m より浅い水深にする必要があると考えられた。

Key Words: environmental restoration, material cycle, port and harbor, organic matter, benthos

1. はじめに

海岸は有史以来、様々な形で人間に利用されてきた場である。中でも河口や内湾に面した土地には人が集まり都市を作って生活してきた。一方、陸と海の接点である海岸は、物質の移動や生物の生産性という点から見ると、極めて複雑で多様な系が存在する場であると言える。しかし同時に、生活する人の手によって改変を余儀なくされ、地史的な過去から続いている地形や水理状況は、大きく変わった。特に河口や内湾は、船舶が停泊して人や荷物を移動させるための港として地形が造り変えられた場所が各地にある。

港湾に代表される閉鎖性海域は、埋め立てによる影響¹⁾や貧酸素水塊が底生動物に及ぼす影響^{2),3)}などの問題を抱えている。河川や陸域からの流入負荷を削減することが最優先の課題であるが、一方で閉鎖性海域を形成している地形にも問題点がある。港湾は海底まで垂直な面を持った岸壁や護岸、防波堤によって囲まれており、生物相の豊かな潮間帯や潮下帯の比較的浅い場所に相当する領域の面積が極めて小さい。

陸と海の緩衝地帯としての役目を持つ海岸が面か

ら線になっている。細川ら⁴⁾は、港湾域内は静穏な海域であるため、港湾構造物の垂直壁面の生物相の構造や機能は必ずしも岩礁生態系に類似するとは限らないと述べている。すなわち、緩い傾斜を持った海岸では、そこに生息する生物群集の食物連鎖の働きによって物質が保持されつつ消費され、長い年月をかけて均衡を維持した生態系ができあがっているのに対して、港湾の垂直面で囲まれた海域では潮間帯や潮下帯の比較的浅い場所に相当する緩衝地帯が小さいため、流入負荷に起因する有機物は海底へ堆積する。一部は海水交換により外海へ出ていくものの、内湾の潮下帯が有機物負荷の多くを担うと考えられている⁵⁾。港湾の直立構造物は付着生物の基盤となるが、波浪が静穏で水深が深いために付着動物が排泄する糞や擬糞がそのまま沈降して海底に堆積する⁶⁾。

国土交通省(旧運輸省)は1994年のエコポート施策により、全国の港湾の中で指定された場所において「生き物と共生する港づくり」を進めてきた。その一環として1999年に徳島県小松島港沖洲地区にて「港湾の生態系の修復技術」の実証実験が徳島大学と徳島県との共同研究として始められた⁷⁾。これは港湾の人工構造物が有する上記のような問題点を解

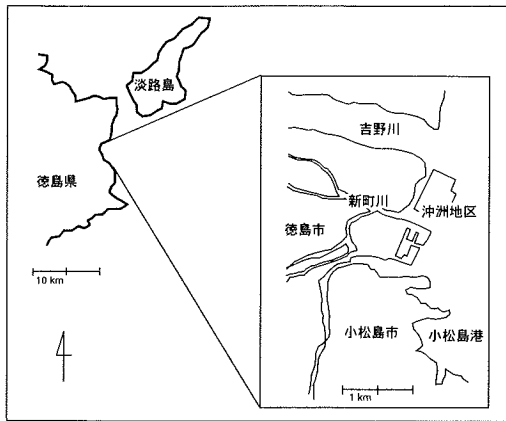


図-1 実証構造物を設置した小松島港沖洲地区

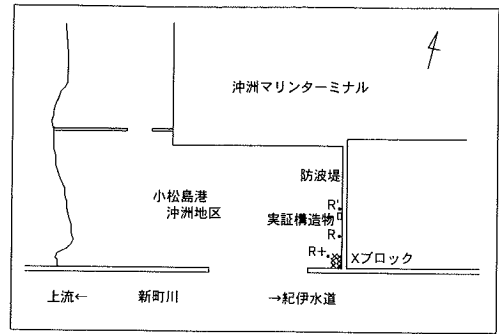


図-2 小松島港沖洲地区の平面図
海底の調査地点 (R, R', R+) を示す

消するため、仮説を設けて検証する実証実験として位置づけられ、技術の効果を見極める目的を持っている。

実証構造物は、垂直面から成る既存の構造物（直立構造物）の形状を変え、潮間帯や浅い水深の潮下帯に生息する生物群集の働きにより海底へ堆積する有機物の負荷を減少させることを目的に設計されており、その目的を検証するため約3年間の現地調査を行った。

本論文では、徳島県小松島港沖洲地区で行われた「港湾における生態系の修復技術」の実証実験の例を紹介し、これを踏まえて今後、環境修復事業を実施する際の考え方について述べた。

2. 材料と方法

(1) 実証構造物

徳島県小松島港沖洲地区（図-1）の防波堤の内側に実証実験を行うための構造物を1999年12月に設置した（図-2）。この実証構造物は、次のような三つの過程を見込んだ設計となっている（図-3）。

- (i) 潮間帯と潮下帯の基質に懸濁物食者が生息する。
 - (ii) 浅い水深の平坦面に有機物が一時的に堆積する。
 - (iii) 平坦面に堆積した有機物の分解が促進される。
- これらの過程を経て物質が移動し、従来の港湾の直立構造物のもとでは海底へ移動する有機物負荷が減少することを期待している。

平坦面の水深が港湾の海底から2m高いタイプ（Type A）と4m高いタイプ（Type B）の二種類を設置した。実証構造物の港湾側（Af, Bf）と防波堤側（Ar, Br）に断面方向のラインを定義すると、前述の「浅

い水深の平坦面」は Type A ではライン Ar の水深 DL -2 m の多孔質コンクリートで構成されている地点、Type B ではライン Br の水深 DL 0 m をそれぞれ指す。この多孔質コンクリートは直径15cm長さ30cmの円柱形で金属製のフレームに収めるようになっており、1個ずつ取り除いて交換することができる。

懸濁物食の動物は懸濁している細かい粒子と小さい浮遊性の生物をろ過し、糞や擬糞としてこれらの有機物を排泄する^{8),9)}。ライン Ar, Br の基質に加えて、潮間帯および潮下帯のライン Af, Bf に基質を設置して懸濁物食者の生息を促し、糞や擬糞を浅い水深の平坦面に沈降させることにより、懸濁物の移動経路や堆積物の性状が変化することを想定した。実証構造物の設置によって、それまではライン R の海底（図-2、図-3）に堆積していた有機物が一時的に浅い水深の平坦面（Ar, Br）に移動し、結果的に実証構造物の港湾側のラインの海底（Af, Bf）に沈降する有機物の濃度が低くなることが期待される。

(2) 懸濁物およびクロロフィル色素

懸濁物食者が生息する潮間帯および潮下帯に相当する実証構造物の部分（Af, Bf）には、多孔質コンクリートが使用されている。多孔質コンクリートの港湾側の懸濁物はろ過摂食により懸濁物食者に取り込まれ、Af および Bf の多孔質コンクリートの防波堤側では海水中の濃度が低下することが予想される。懸濁物食者の生息を想定する過程（i）を検討するために、多孔質コンクリートの港湾側と防波堤側において懸濁物およびクロロフィル色素濃度を測定した。

重りをつけた採水瓶を沈めて栓を抜き、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

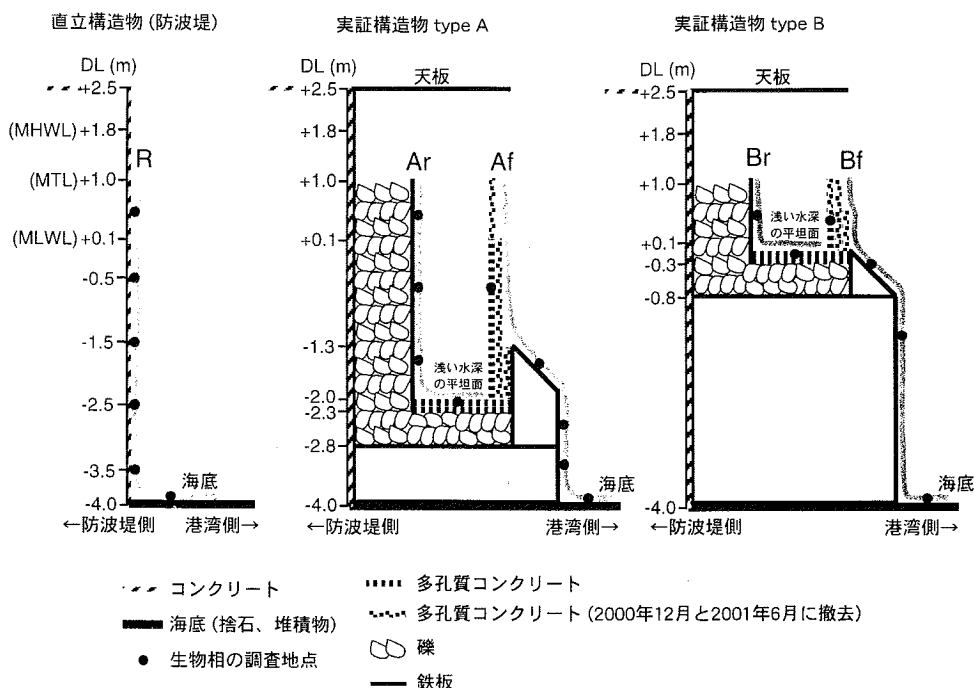


図-3 従来型の直立構造物(防波堤)と実証構造物の断面図

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 *a* 濃度 (Chl. *a* $\mu\text{g/l}$) を算出した。

(3) 沈降物

懸濁物食者に取り込まれた懸濁物は、糞や擬糞に形を変えて海底に沈降する。また、懸濁物や生物の死骸なども海底に沈降する有機物である¹⁰⁾。沈降する有機物の濃度を調べることでより過程 (ii) について検討した。直径約6cm高さ約7cmのプラスチック瓶で作成したセジメントトラップを海底および浅い水深の平坦面に24時間設置して回収し、遠心分離によって沈降物を集めた。沈降物の光合成色素濃度 (Chl. *a* $\mu\text{g/dry g}$, Pheo. $\mu\text{g/dry g}$) をヘキサン抽出法¹¹⁾に従って測定した。同様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濃度 (TOC mg/dry g), 全窒素濃度 (TN mg/dry g) を測定した。なお、後述する生物相の調査地点 (R) より実証構造物に近い地点 (R') にセジメ

ントラップを設置した (図-2)。

(4) 堆積物

実証構造物の浅い水深の平坦面に一時的に有機物が堆積する過程 (ii) と引き続いてそれらが生物により消費される過程 (iii) の結果として、堆積物の物質濃度が決まるものと考えられる。実証構造物の浅い水深の平坦面 (Ar, Br) と従来型の直立構造物 (防波堤) の直下の海底 (R') の堆積物をダイバーに依頼して採取した (図-2)。堆積物の還元的な程度を示す指標として、酸揮発性硫化物濃度 (AVS mg/dry g) を検知管を用いて測定した。乾燥させた堆積物の試料を1Nの塩酸に浸して炭酸塩を取り除き、全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g), 全窒素濃度 (TN mg/dry g) を測定した。

(5) 溶存酸素

港湾の海底から2m高い平坦面において、大型底生生物の生息に必要な溶存酸素濃度が確保されているか確認するため、連続自動観測水質計 (アレック電子 ADO8M-6) を用いて実証構造物 Type A の平坦面 (DL-2m) の直上における溶存酸素濃度 (DO mg/l) を1時間おきに測定した。なお、約2週間ごとに水質

計を引き上げて内蔵メモリからデータの回収を行うとともに、十分にエアレーションをした飽和水道水にセンサーを浸して校正を行った。

(6) 生物群集

実証構造物の多孔質コンクリートには懸濁物食者、浅い水深の平坦面には堆積物食者や腐肉食者の生息を期待した過程 (i) および (iii) を検証するため、実証構造物と対照区とした防波堤 (R) の生物相の調査を2000年8月から2002年8月まで行った。図-2および図-3に生物相の調査地点を示す。

実証構造物の潮間帯および潮下帯に位置する多孔質コンクリート (Af, Bf), 実証構造物の浅い水深の平坦面を構成する多孔質コンクリート (Ar, Br) 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。また、実証構造物の壁面 (Ar, Br), 防波堤の壁面 (R) においては約1m間隔でコドラート (1m*1m) 内の付着動物をスクレイパーでかきとった。

その他に、実証構造物の前方側のラインの海底 (Af, Bf), 防波堤の直下の海底 (R), および近傍の傾斜Xブロックの下方の海底 (R+) でコドラート内の付着動物をスクレイパーを用いて採取した (図-2, 図-3)。スクレイパーでかきとったサンプルは多孔質コンクリートのサンプルと同様に生物を選別して同定した。

3. 結果

(1) 懸濁物およびクロロフィル色素

2000年9月と12月における懸濁物濃度 (SS mg/l) とクロロフィル色素濃度 (Chl.a $\mu\text{g/l}$) の日周変化を示す (図-4)。実証構造物 Type A の Ar と Af の間の表層付近の懸濁物濃度は同じ水深の構造物近傍と比較して低い傾向であった。同様に、実証構造物 Type A の表層付近のクロロフィル色素濃度は同じ水深の構造物近傍と比較して低かった。

(2) 沈降物

2001年から2002年における実証構造物の浅い水深の平坦面 (Ar, Br) および直立構造物 (防波堤) の直下の海底 (R') で採取した沈降物の測定結果を示す (図-5)。光合成色素濃度 (Chl.a $\mu\text{g/dry g}$ と Pheo. $\mu\text{g/dry g}$ の和) と全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) は、実証構造物 Type A と Type B において正の相関があったが、直立構造物 (防波堤) では相関が低かった。光合成色素濃度と全窒素濃度 (TN mg/dry g) は、いずれの地点においても高い正の相関があった。光合成

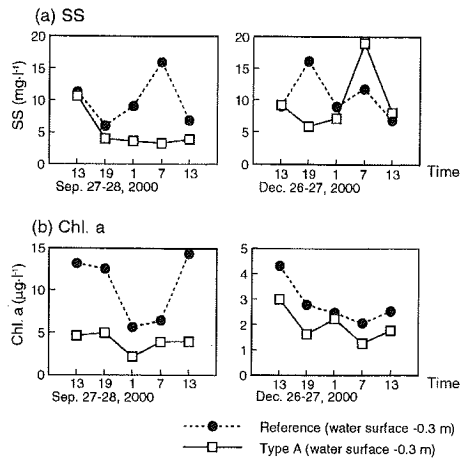


図-4 懸濁物濃度とChl.a濃度の日周変化

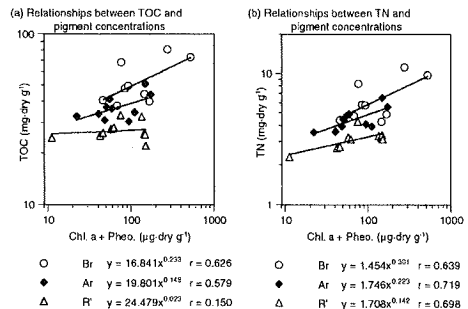


図-5 沈降物中の光合成色素濃度と有機物濃度の関係

色素濃度に対する全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) または全窒素濃度 (TN mg/dry g) の比は、実証構造物 Type B で最も高く、防波堤で最も低かった。

過程 (ii) により平坦な面に高い濃度の有機物が一時的に堆積した場合、実証構造物の前方側のライン (Af, Bf) の海底に沈降する有機物の濃度は、結果的に低くなるのが予想される。この場所の沈降物の濃度と直立構造物 (防波堤) の直下の海底 (R') への沈降物の濃度を比較した (図-6)。2001年から2002年における沈降物の全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) は、直立構造物 (防波堤) の直下の海底 (R') において高く、実証構造物 Type A および Type B の港湾側のラインの海底 (Af, Bf) において低い傾向が見られた。全窒素濃度 (TN mg/dry g) も同様に、直立構造物 (防波堤) の直下の海底で高く、実証構造物 Type A および Type B の港湾側のラインの海底で低い傾向が見られた。

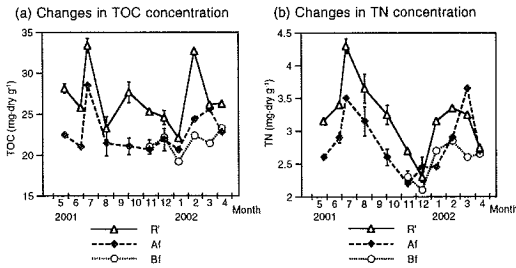


図-6 沈降物中の有機物濃度の経時変化 (mean ± SE)
各プロットのデータ数はいずれもn=2

(3) 堆積物

2001年および2002年における実証構造物の浅い水深の平坦面 (Ar, Br) と直立構造物 (防波堤) の直下の海底 (R') の堆積物の濃度を示す (表-1)。酸揮発性硫化物濃度 (AVS mg/dry g) は実証構造物 Type A において高い値を示し、実証構造物 Type B では非常に低い値かもしくは堆積物が採取されなかった。全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) と全窒素濃度 (TN mg/dry g) は、2001年5月において実証構造物 Type B で最も高く直立構造物 (防波堤) で最も低かった。実証構造物 Type A の堆積物の全窒素濃度 (TN mg/dry g) はいずれの月においても直立構造物 (防波堤) の直下の海底より高かった。実証構造物 Type B では堆積物がほとんど見られず採取が困難であったため濃度を測定できない月が多かった。

表-1 堆積物中のAVS濃度, TOC濃度, TN濃度
データ数はいずれもn=2

(a) AVS (mg/dry g, mean ± SE)			
年月	防波堤 (R)	Type A (Ar)	Type B (Br)
2001年5月	0.389 ± 0.003	1.229 ± 0.011	-
2001年11月	0.932 ± 0.079	2.654 ± 0.168	NA
2002年2月	0.840 ± 0.049	0.844 ± 0.038	NA
2002年5月	0.558 ± 0.078	1.547 ± 0.072	NA
2002年8月	2.663 ± 0.086	2.954 ± 0.178	0.127 ± 0.035
2002年11月	1.488 ± 0.012	2.244 ± 0.154	-

NA: サンプル採取されず, -: 検出されず

(b) TOC (mg/dry g, mean ± SE)			
年月	防波堤 (R)	Type A (Ar)	Type B (Br)
2001年5月	22.60 ± 0.60	31.00 ± 0.40	56.20 ± 0.40
2001年11月	54.30 ± 5.10	39.25 ± 0.05	NA
2002年2月	28.65 ± 0.15	35.30 ± 0.70	NA

NA: サンプル採取されず

(c) TN (mg/dry g, mean ± SE)			
年月	防波堤 (R)	Type A (Ar)	Type B (Br)
2001年5月	3.00 ± 0.10	4.10 ± 0.10	7.10 ± 0.10
2001年11月	4.20 ± 0.10	5.15 ± 0.05	NA
2002年2月	3.95 ± 0.05	4.40 ± 0.00	NA

NA: サンプル採取されず

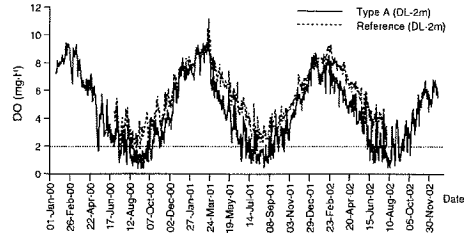


図-7 溶存酸素濃度の日最小値の変化

(4) 溶存酸素

2000年から2002年の約3年間の溶存酸素濃度 (DO mg/l) の日最小値の変化を示す (図-7)。実証構造物 Type A の水深 DL-2m 付近の溶存酸素濃度は直立構造物の近傍の同じ水深と比較して低い傾向が見られ、日最小値はたびたび 2 mg/l を下回った。

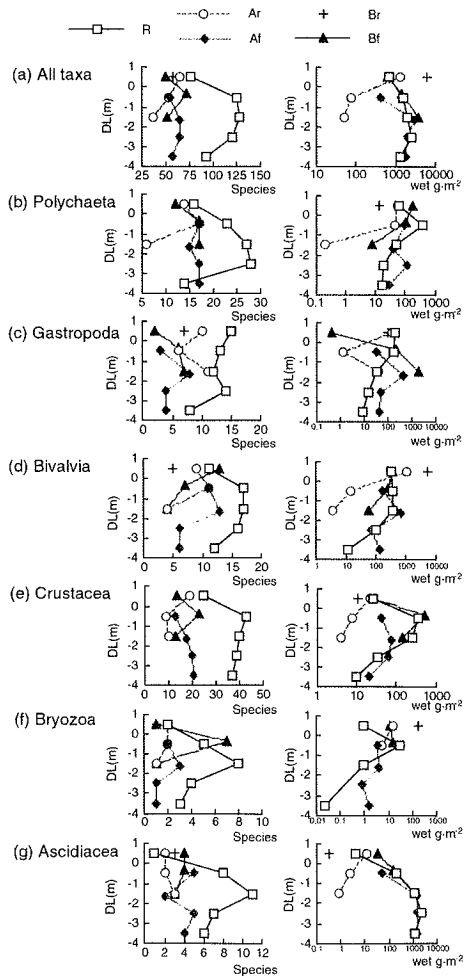


図-8 鉛直壁面の生物群集の種類数と現存量の分布

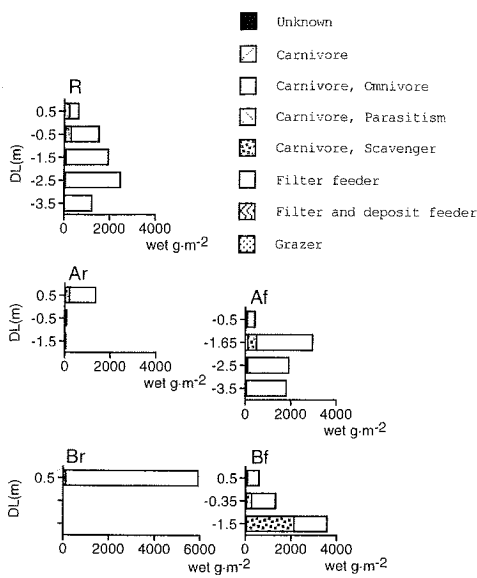


図-9 鉛直壁面における主要な分類群の食性別の現存量

(5) 生物群集

2002年8月の実証構造物と直立構造物(防波堤)の壁面における主な分類群(多毛類, 腹足類, 二枚貝類, 甲殻類, コケムシ類, ホヤ類)の鉛直分布(図-8)と食性ごとに分けた現存量の分布(図-9)を示す。

直立構造物の潮間帯から潮下帯においては, 二枚貝類やホヤ類の懸濁物食者が現存量で卓越していた。実証構造物 Type A の防波堤側のライン Ar では潮間帯の水深に懸濁物食者の高い現存量が認められたが, 潮下帯の水深では生物の現存量は低かった。港湾側のライン Af では水深 DL -1.65 m の斜面の地点で 2 kg/m² を超える懸濁物食者が生息した。実証構造物 Type B の防波堤側のライン Br の潮間帯にはマガキ(*Crassostrea gigas*) が優占した。港湾側のライン Bf の潮間帯の多孔質コンクリートには直立構造物のコンクリート壁面と同程度の懸濁物食者の現存量があった。水深 DL -1.5 m の地点では肉食もしくは腐肉食者のレイシガイ(*Reishia bronni*)の現存量が大きかった。

2000年8月から2002年8月までの実証構造物の浅い水深の平坦面と直立構造物(防波堤)の直下の海底における生物群集を比較した(図-10)。2001年8月には実証構造物 Type A と Type B の多毛類の種類数と現存量が2000年8月と比較して相対的に大きくなった。Type B では二枚貝類の現存量が最も高く, また多孔質コンクリートには2001年8月においてメリタヨコエビ科(*Melita* sp.)やドロクダムシ科(*Corophium* sp.)の端脚類の現存量が高かった。2002年8月も同

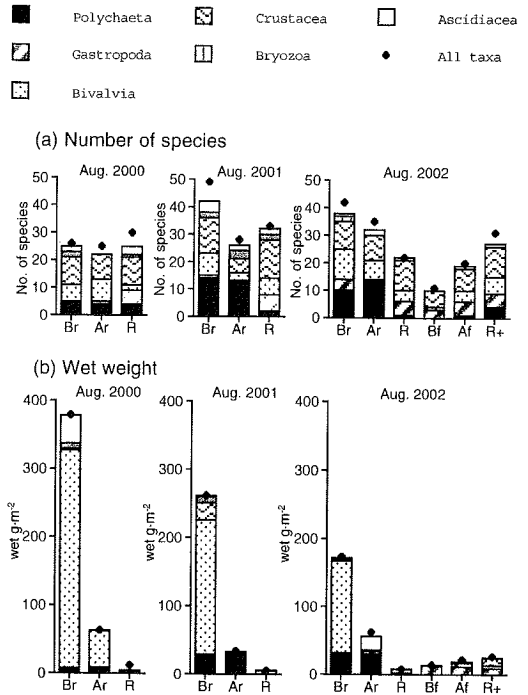


図-10 平坦な面および海底における生物群集の種類数と現存量

様に多孔質コンクリートの多毛類の種類数と現存量は直立構造物(防波堤)の直下の海底や傾斜Xブロック下方の海底(R+)より大きかった。主に肉食や腐肉食者である腹足類は, 実証構造物の港湾側のライン(Af, Bf)の海底や傾斜Xブロックの下方の海底で卓越していたが, Type A の多孔質コンクリートにはほとんど生息していなかった。

4. 考察

(1) 潮間帯と潮下帯の基質に懸濁物食者が生息する

実証構造物は断面図(図-3)からも明らかのように直立構造物と比較して潮間帯および潮下帯の領域の面積がおよそ3倍に増加している。食性別の現存量を見ると, Type A と Type B の DL -0.5 から 0.5 m の水深に直立構造物のコンクリート壁面と同程度かそれ以上の懸濁物食者が生息し, 実証構造物の潮間帯および潮下帯において過摂食を行う生物が活動していることが示された。カタユレイボヤ(*Ciona intestinalis*)は底層付近のクロロフィル色素濃度の減少に重要な役割を担い^{12), 13)}, ヨーロッパムラサキガイ(*Mytilus edulis*)の過摂食により植物プランクトンの現存量が制限されて閉鎖的な港湾の透明度が

改善する¹⁴⁾など、ろ過摂食者の懸濁物やクロロフィル色素濃度に及ぼす影響は大きいことが知られている。懸濁物およびクロロフィル色素濃度が近傍の海水より低かったことは、実証構造物に生息している懸濁物食者がろ過摂食を行った結果が一因であると推測される。構造物の潮間帯および潮下帯に属する複数の箇所に基質を分けて設置することにより、懸濁物食者の現存量を制御できる可能性が示唆された。

一方、ムラサキイガイ (*Mytilus galloprovincialis*) は緩傾斜護岸より垂直護岸で現存量が大きく、夏季の大量へい死後の分解により水質および底質環境の悪化を招く可能性がある¹⁰⁾と報告されている。海中の懸濁物をろ過する水質浄化作用よりはむしろ夏季の死亡や脱落により直立構造物近傍の水質や底質に負の影響を与える動物と考えるべきである¹⁵⁾という指摘からも、懸濁物食者の現存量を大きくすることには慎重になる必要がある。懸濁物食者の二枚貝類は河口沿岸域で植物プランクトンの生産をトップダウンで制限している反面、糞や擬糞からの早い栄養塩の回帰によって植物プランクトンの現存量を減らしているとは言えないとも報告されている¹⁶⁾。

(2) 有機物が一時的に堆積する

実証構造物の浅い水深の平坦面に沈降する有機物の濃度 (TOC mg/dry g, TN mg/dry g) は、直立構造物 (防波堤) の直下の海底へ沈降する有機物の濃度より高く、また植物プランクトン由来の物質の目安となる光合成色素濃度に対する相対的な有機物の濃度としても、実証構造物の浅い水深の平坦面の方が高かった (図-5)。

閉鎖性水域における沈降物は、植物プランクトンに由来した有機物と水中の無機粒子などとの集合体であり¹⁷⁾、懸濁物食者にろ過摂食されて糞や擬糞などに形を変えながら海底に堆積する⁹⁾。顕微鏡による観察では、実証構造物の浅い水深の平坦面への沈降物と直立構造物 (防波堤) の直下の海底への沈降物には糞や擬糞が多く含まれていた。懸濁物食者の中には粒子を選択的にろ過摂食する種があることから、懸濁物が糞や擬糞などに形を変える過程で全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) と全窒素濃度 (TN mg/dry g) が懸濁物より濃縮されるのかもしれない。糞や擬糞の沈降物は時間の経過とともに栄養分が増加してデトリタス食者の餌となると考えられている¹⁸⁾。

これらのことから、実証構造物の潮間帯や潮下帯に生息する懸濁物食者のろ過摂食によって沈降物の全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) と全窒素濃度 (TN mg/dry g) が高くなった可能性を挙げることができる。実証構造物の浅い水深帯の平坦な面には高い濃

度の有機物が沈降し、堆積物食者に利用可能な餌が供給されていることが分かった。

(3) 堆積した有機物の分解が促進される

実証構造物の浅い水深の平坦面における堆積物の全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) と全窒素濃度 (TN mg/dry g) が直立構造物 (防波堤) の直下の海底の堆積物より高いことは、堆積物の源である沈降物の濃度の結果と合致している。すなわち、高い有機物濃度が沈降する実証構造物 Type B と Type A において堆積物の濃度も高かった。一方で酸揮発性硫化物濃度 (AVS mg/dry g) は Type A において高い値を示したが Type B では検出されないか堆積物が採取されなかった。このことは、実証構造物 Type A の浅い水深の平坦面では有機物が嫌氣的に分解されているが、Type B の浅い水深の平坦面では有機物が好氣的に分解されているか堆積する前に波浪により流出していることを示す。水中カメラと目視による観察でも Type A の浅い水深の平坦面には厚さ10cm以上の堆積物が堆積しているのに対して、Type B の浅い水深の平坦面にはほとんど堆積物が見られなかった。Type A は水深が Type B より深いことと、断面図から分かるようにより窪んだ形状であることが堆積物の量と質を違えている要因であると考えられる。

Type A の溶存酸素濃度 (DO mg/l) は直立構造物の近傍の値に比べて低く、底生生物の死亡が起こると言われる 2 mg/l^{19), 20)}を下回ることが多かった。生態学的なリスクを評価して底生生物を保護する限界値を推定するためには、低いDO が生物相に及ぼす有害な影響を知らなくてはならないであろう²¹⁾。沿岸海域における底層水の溶存酸素量は主として底泥中の硫化物量に依存し、硫化物の蓄積は易分解性有機物の供給とともにその水域の海水交流の程度に関係すると報告されている²²⁾。

Type A は海水が留まりやすい形状で硫化物濃度が高かった。それにも関わらず、浅い水深の平坦面を構成している多孔質コンクリートに生息する生物の種類数と現存量は、2000年から2002年まで直立構造物 (防波堤) の直下の海底を上回った。直立構造物 (防波堤) の直下の海底には多孔質コンクリートのような細かい空隙を持った基質はないのに対して、実証構造物の浅い水深の平坦面では小型の多毛類や端脚類などが生息可能になったと考えられる。平坦面の多孔質コンクリートに生息する肉食や腐肉食者の腹足類は少なかった。今林²³⁾は貧酸素状態においてはスピオ科などの小型多毛類や二枚貝のシズクガイ (*Theora lubrica*) を中心とした群集が形成されると述べている。Gray et al.²⁰⁾は貧酸素が沿岸の海洋生物

に及ぼす影響をレビューし、魚類が一般に甲殻類や棘皮動物より貧酸素に敏感で、環形動物が次に続き、軟体動物がもっとも感受性が低いとした。基質と溶存酸素濃度は海底の生物群集の組成を決める重要な要因であると考えられる。

実証構造物 Type B の堆積物の量が少なく嫌氣的な状態でないこと、Type B の浅い水深の平坦面の生物の現存量が Type A より大きいことを考え合わせると、沈降した有機物の分解と生物による消費が相対的に促進されるのは Type B の平坦面の水深と Type B のような断面形状であると示唆される。

過程 (i) により懸濁物食者に取り込まれた海水中の懸濁物の一部は糞や擬糞となって過程 (ii) により Type A と Type B の浅い水深の平坦面に沈降していると推測された。しかしながら Type A の水深においては、平坦な面に堆積した有機物は分解と生物による消費を上回る速度で増加していると考えられ、一方で Type B の水深においてはほとんど堆積しないことが分かった。従来型の直立構造物の形状では有機物は深い水深の海底に堆積する。実証構造物では有機物は浅い水深の平坦面に一時的に移動した後、Type A と Type B の水深の違いによって過程 (iii) の作用の大きさが異なることが示唆された。

そこで実証構造物の港湾側のラインの海底 (Af, Bf) に沈降する有機物の濃度と直立構造物 (防波堤) の直下の海底に沈降する有機物の濃度の違いを検討した。その結果、沈降物の全有機炭素濃度 (TOC mg/dry g) と全窒素濃度 (TN mg/dry g) は、実証構造物 Type A および Type B の港湾側のラインの海底の値が直立構造物 (防波堤) の直下の海底より低い傾向が見られた (図-6)。このことから、Type A と Type B の形状の違いに関わらず、港湾側のラインの海底の有機物の濃度は直立構造物 (防波堤) の直下の海底より低くなることが示された。

これは、過程 (i) と過程 (ii) により潮間帯や潮下帯に生息する懸濁物食者の糞や擬糞の一部が港湾側の海底へ沈降せずに、実証構造物の平坦な面に沈降しているためであると考えられる。実証構造物の平坦な面に堆積した有機物が過程 (iii) によって分解や生物による消費の作用を受けて濃度が低下した場合、この堆積物が再懸濁しても実証構造物の港湾側の海底への沈降物の有機物濃度は低くなると期待される。Type A では堆積物の再懸濁が起こりにくい形状、Type B は堆積物が再懸濁しやすいものの好氣的な状態であるため、いずれの場合も港湾側のラインの海底へ沈降する有機物の濃度は、直立構造物 (防波堤) の直下の海底と比較して低かったと推測される。

沈降物を一時的に蓄積する役割を持つ平坦面の水深が Type A と Type B では異なるものの、前方の海底への沈降物の有機物濃度が減少する結果につながったと推測されることは、この実証構造物の設置の際に挙げた仮説を満たすことを意味しており、港湾における生態系の修復技術としての有効性が見出された。しかしながら、過程 (iii) で想定した浅い水深の平坦面における有機物の分解と生物による消費の作用は、Type A では滞っていたと思われる、今後、平坦な面を設計する際にはより浅い水深にする必要があると考えられる。

5. おわりに

環境を修復することを目標に各地で行われている事業は様々な事例があり、それらを簡単には分類できないかもしれない。楠田²⁴⁾が述べている整理に従えば、小松島港沖洲地区で行われた事業は新しい環境を創り出す (= 創出) ための技術を開発する実証実験であったと言える。ムラサキガイを利用した富栄養化の抑止策^{25), 26)} やイトゴカイを利用した漁場底泥の浄化²⁷⁾ などの先行事例と同様に、小松島港沖洲地区でも具体的な目標を設定することによって、技術が目指しているものが明確になった。懸濁物食者を生息させて糞や擬糞などの沈降する有機物を浅い水深の平坦面に堆積させることには成功したが、堆積した有機物を十分な溶存酸素濃度のもとで消費させることはうまくいかなかった。この結果から、次に設計される構造物では懸濁物食者の生息する基質を減らして沈降する有機物量を制御し、浅い水深の平坦面における溶存酸素濃度を低下させないために開放的な構造にすべきであることが分かった。

構造物をそのまま放置することを念頭において、持続的に生物群集の働きが維持される材料や構造でなくてはならない。生物群集を構成する種によっては10年程度の期間を経ないと遷移が収束しないことも考えられるため、実証実験の結果をフィードバックする過程も10年程度の期間が必要である場合もある。物質循環の点から考えると、生物群集によって利用される物質 (栄養塩、有機物) が生態系において移動を繰り返す状態が続くことが重要である。港湾の底質が還元的な状態であるのは、海底に有機物が過剰に堆積した結果であるから、実証構造物の浅い水深の平坦面に堆積した有機物が過剰であったことはいずれ港湾の海底と同じ状況になることを示唆している。浅い水深の平坦面で堆積物食者の活性を上げるためには、溶存酸素濃度を低下させないことに

加えて、生息可能な堆積物食者の現存量に多すぎない有機物を沈降させる構造にすることが必要である。餌の供給と消費のバランスが保たれることで全体の生物群集の働きが持続的になると考えられる。

河口や内湾に直立構造物を建設することによって港湾という人為的な生態系が創出され、港湾のような富栄養化した閉鎖性海域に適応して優占種となっている生物種が数多く挙げられる(ムラサキイガイ、マガキ、クロマメイタボヤなど)。新しい生態系を創出することを計画する際に重要なのは、具体的な目標を定めることであろう。小松島港沖洲地区の場合は、潮間帯や浅い水深の潮下帯に生息する生物群集の働きによって海底へ堆積する有機物の負荷を低減する、というものであった。目標(=仮説)を達成するための実験とその結果のフィードバックが重要で、例えば人工干潟や浅場を造成する際は、底生動物を復活させる確立された技術がないため、実験海域における結果をフィードバックさせ、十分な時間をかけて取り組む必要があると述べられている²⁸⁾。

新しい二次的自然を創造する際には、どのような形が望まれているか十分に議論されて合意を得た上、創出の具体的な目標を設定することが重要で、この過程を経なければ、創出された二次的自然が一体、何のためであったのか分からなくなってしまう。沿岸域の環境施策には十分な時間をかけた議論を行って体系的に整備し²⁹⁾、その後の実験とフィードバックの試行錯誤を繰り返し行う必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、徳島大学工学部建設工学科 水口裕之 教授、株式会社テトラ徳島営業所 小林俊二 所長、国土交通省四国地方整備局小松島港湾空港工事事務所、徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻村上研究室の皆様から多大なご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 石川 公敏：埋め立てによる海域環境の変化，月刊海洋，Vol. 33, pp. 857-865, 2001.
- 2) 石川 公敏，風呂田 利夫，小山 利郎，山崎 孝史：東京湾の内湾域におけるマクロベントスの季節変化，月刊海洋，Vol. 31, pp. 495-503, 1999.
- 3) 風呂田 利夫：東京湾における人為的影響による底生動物の変化，月刊海洋，Vol. 33, pp. 437-444, 2001.
- 4) 細川 恭史，三好 英一，桑江 朝比呂，古川 恵太：浦賀湾防波堤の付着生物調査，港湾技研資料，Vol. 962, pp. 1-17, 2000.
- 5) 大森 浩二：ベントス - その沿岸域生態系における位置

づけ - ，沿岸海洋研究，Vol. 35, pp. 115-122, 1997.

- 6) Kurihara, Y.: Ecology for environmental conservation of coastal area and harbors, *Civil Engineering, JSCE*, Vol. 38, pp. 42-46, 2000.
- 7) 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：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，環境工学研究論文集，Vol. 38, pp. 239-248, 2001.
- 8) Tsuchiya, M.: Biodeposit production by the mussel *Mytilus edulis* L. on rocky shores, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 47, pp. 203-222, 1980.
- 9) 土屋 誠：基質-水界面における底生動物による Biodeposition と栄養循環，ベントス研連誌，Vol. 19/20, pp. 1-19, 1980.
- 10) 矢持 進，有山 啓之：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，Vol. 1994, pp. 160-164, 1996.
- 11) Whitney, D. E. and Darley, W. M.: A method for the determination of chlorophyll a in samples containing degradation products, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 24, pp. 183-186, 1979.
- 12) Riisgård, H. U., Jørgensen, C. and Clausen, T.: Filter-feeding ascidians (*Ciona intestinalis*) in a shallow cove: implications of hydrodynamics for grazing impact, *J. Sea Res.*, Vol. 35, pp. 293-300, 1996.
- 13) Riisgård, H. U., Jensen, A. S. and Jørgensen, C.: Hydrography, near-bottom currents, and grazing impact of the filter-feeding ascidian *Ciona intestinalis* in a Danish fjord, *Ophelia*, Vol. 49, pp. 1-16, 1998.
- 14) Allen, J. R. and Hawkins, S. J.: Can biological filtration be used to improve water quality? Studies in the Albert Dock Complex, Liverpool, In *Urban waterside regeneration: problems and prospects*, eds. White, K. N., Bellinger, E. G., Saul, A. J., Symes, M. and Hendry, K. pp. 377-385, New York: Ellis Horwood, 1993.
- 15) 矢持 進，有山 啓之，日下部 敬之，佐野 雅基，鍋島 靖信，陸谷 一馬，唐沢 恒夫：人工護岸構造物の優占生物が大阪湾沿岸域の富栄養化に及ぼす影響 1. 垂直護岸でのムラサキイガイの成長と脱落，海の研究，Vol. 4, pp. 9-18, 1995.
- 16) Newell, R. I. E., Cornwell, J. C. and Owens, M. S.: Influence of simulated bivalve biodeposition and microphytobenthos on sediment nitrogen dynamics: A laboratory study, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 47, pp. 1367-1379, 2002.
- 17) 宮岡 修二，山本 緑，辻 博和：閉鎖性水域における新生堆積物の挙動に関する実態調査，大林組技術研究所報，Vol. 63, pp. 91-96, 2001.

- 18) Tsuchiya, M. : Catching of organic matter by the mussel *Mytilus edulis* L. on rocky shores, *Bull. Mar. Biol. Stn. Asamushi, Tohoku Univ.*, Vol. 17, pp. 99-107, 1982.
- 19) 古谷 純一 : 東京湾奥部において底生生物が受ける貧酸素の影響, *月刊海洋*, Vol. 31, pp. 504-514, 1999.
- 20) Gray, J. S., Wu, R. S. and Or, Y. Y. : Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 238, pp. 249-279, 2002.
- 21) Miller, D. C., Poucher, S. L. and Coiro, L. : Determination of lethal dissolved oxygen levels for selected marine and estuarine fishes, crustaceans, and a bivalve, *Mar. Biol.*, Vol. 140, pp. 287-296, 2002.
- 22) 来田 秀雄, 河合 章 : 覆砂を行った大阪南港水域の底質について, *近畿大農紀要*, Vol. 18, pp. 31-38, 1985.
- 23) 今林 博道 : 貧酸素下のペントスの生残戦略, *月刊海洋*, Vol. 30, pp. 125-132, 1998.
- 24) 楠田 哲也 : 水域環境のためのエコロジーの評価と研究の視点, *土木学会誌*, Vol. 83, pp. 180-182, 1998.
- 25) 富士 恵一, 久保 雅義, 日色 和夫 : ムラサキガイの有効利用による港湾の富栄養化防止に関する研究, *環境技術*, Vol. 25, pp. 48-51, 1996.
- 26) 門谷 茂, 小濱 剛, 徳永 保範, 山田 真知子 : 富栄養化した水域の生態学的環境修復 - 北九州市洞海湾を例として - 濾過食性二枚貝の生態特性を利用した海洋環境修復技術の開発, *環境科学会誌*, Vol. 11, pp. 407-420, 1998.
- 27) 門谷 茂, 堤 裕昭 : ペントスによる漁場底泥の環境修復, 石田祐三郎, 日野明徳 編 *生物機能による環境修復 - 水産におけるBioremediationは可能か*, pp. 65-78, 1996.
- 28) 矢持 進, 有山 啓之, 佐野 雅基 : 大阪湾湾奥沿岸域の環境修復 - 堺北港干潟造成予定地周辺の水質・底質ならびに底生動物相とマコガレイの貧酸素に対する応答 -, *海の研究*, Vol. 7, pp. 293-303, 1998.
- 29) 沢田 裕美子 : 高密度利用沿岸域空間における環境政策のあり方に関する基礎的研究 - 沿岸域における国土計画と環境政策の変遷と課題 -, *日本沿岸域学会論文集*, Vol. 12, pp. 1-17, 2000.

(2003.8.5 受付)

RESTORATION TECHNIQUE FOR ECOSYSTEM OF PORT AND HARBOR: A PROOF EXPERIMENT AT KOMATSUSHIMA PORT IN TOKUSHIMA PREFECTURE

Kengo KURATA, Yasunori KOZUKI, Hitoshi MURAKAMI, Masahiro MIZUTANI,
Masashi MORI, Michio KITANO and Shunpei IWAMURA

An experimental structure was established at Komatsushima port in Tokushima Prefecture to study the environmental problems of vertical structure in port and harbor. Organisms inhabiting intertidal and subtidal zones of the structure are expected to play a role to reduce the amount of organic matter accumulated onto the sea bottom. The results suggested that concentration of organic matter in the deposited seston decreased at the bottom in front of the experimental structure. Accumulation of organic matter on the bottom, however, differed between the types A and B with different depths of flat bottom substrate, indicating that a flat bottom substrate shallower than DL -2 m should be designed.