

内湾性水域におけるマナマコを利用した底質改善手法

倉田 健 悟* ・上月 康 則** ・村上 仁 士***
仁 木 秀 典****・豊 田 裕 作*****・北 野 倫 生*****

1. は じ め に

陸と海の接点である沿岸域は、陸上における人間の様々な経済活動の影響を受けている。特に、河口域近くの内湾や港湾などの閉鎖的な海域では、流入河川から有機物や栄養塩の負荷を直接的に受け、水質や底質といった物理化学的な側面において環境の悪化が進行してきた。閉鎖性海域の水質や底質の悪化は、生息する生物とその機能に少なからず負の影響を及ぼし、底層水の貧酸素化や赤潮の発生等、生態系のバランスが崩れたことによる環境悪化の現象が起こっている。

閉鎖的な水域における環境修復手法としては、負荷源である窒素やリンの排出量を削減させるための排水設備や、海水中有機物量を減らすための隙間接触酸化法のように、水質の浄化を目的にしたものが主流であった。しかしながら、排出量の削減という抜本的な解決方法は今後とも続けられるべきであるものの、隙間接触酸化法のように沿岸域の一部における水質浄化手法の効果には空間的スケールに限界があり、また隙間に海水中の懸濁物が半永久的に堆積する一方でそれが取り除かれる可能性がほとんどないという点が指摘されている。

閉鎖性海域では一般に懸濁物の堆積が著しく、海底の堆積物は栄養塩の溶出や上層水の貧酸素化といった現象を引き起こす。すなわち、底質が水質に及ぼす影響を十分に考慮した環境修復手法を実施する必要がある。さらに、持続的な効果が得られるべく、自然の浄化機能を回復させる方向でなければ、短期的で一時的な修復に終わってしまう。例えば、堆積物の物質循環においては、表在性や埋込性の底生動物の果たす役割が非常に重要であるため、懸濁物の堆積が著しい海域における底質の改善にはこれらの動物の機能を積極的に利用することが考えられる。

近年、このような生物の堆積物や懸濁物の摂食行動を

応用した底質改善手法の開発が進められている。栗原(1980)は多毛類のゴカイ (*Neanthes japonica*) を人工干潟に生息させて下水の処理の一部として利用する方法を提案した。門谷ら(1998)は同じく多毛類のイトゴカイ (*Capitella* sp.) を用いて有機汚泥の摂食による底質浄化効果を実験によって明らかにしている。村上ら(1998)はゴカイと隙間接触酸化法を組み合わせた浄化手法に関する実験を行い、ゴカイの個体数が捕食などによって保たれない、といった問題点を報告した。しかし、生物を利用した底質改善手法の開発は未だ緒についたばかりであり、効果の定量的な把握や手法の現場での適用範囲などの課題を検討していく必要がある。

本研究では、日本各地の沿岸域に普通に見られるマナマコ (*Stichopus japonicus*) が閉鎖的な水域においても堆積物表層や海藻などを摂食することに着目し、マナマコの摂食行動を利用した閉鎖性海域における底質改善手法の可能性を検討した。マナマコは沿岸域の砂礫底から砂泥底まで幅広く分布し、また漁業資源としても重要な種である。マナマコなどの表層堆積物食者は、堆積物の表層を摂食して呼吸や成長に同化エネルギーを使い、糞を排泄するが、この過程による堆積物の性状変化のみならず、堆積物上を移動したり表層を攪乱することで堆積物の諸性状に影響を及ぼしていると考えられる。本研究では、このようなマナマコの摂食生態に着目し、堆積物の餌をマナマコに与える室内実験で同化率を測定し、さらに野外実験によって海底堆積物の物理化学的特性に及ぼすマナマコの影響を明らかにすることを目的とした。

2. 材 料 と 方 法

2.1 同化率測定実験

マナマコの餌として使用するため、徳島県沖洲マリンターミナルに面した内湾にてエクスマンバージ型採泥器を用いて海底の深さ 15 cm までの堆積物を採取した(図-1)。1 mm 目の篩で篩って大型底生動物を取り除いた後、適当な量に分けてポリエチレン袋に入れ、堆積物中の生物の活性を抑えるため-21℃の冷凍庫に保存した。沖洲の実験施設に市販のプラスチック製洗面器を改造した円形水槽を 4 個用意し、ポンプで汲み上げた海

* 正 会 員 博(理) 徳島大学大学院工学研究科
** 正 会 員 博(工) 徳島大学大学院工学研究科
*** フェロー 工 博 徳島大学大学院工学研究科
**** 正 会 員 運輸省第三港湾建設局 神戸調査設計事務所
***** 正 会 員 (株)テトラ
***** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科

水を連続的にかけ流しできる装置（流量約 6.5 l/h）を作製した。4 個の円形水槽にそれぞれ湿重量で 200.0 g（乾燥重量で約 111.3 g）の冷凍させた堆積物を静かに入れた。沖洲で採集したマナモコを約 72 時間絶食させ、湿重量を測定した後に 1 個体ずつ円形水槽に入れた。

ナマコの投入直後に葉さじで堆積物の表層を採取したものを実験の初期値のサンプルとし、その後 24 時間毎に餌の性状を測定するためのサンプルを採取した。また、12 時間毎にナマコが排泄した糞を流出しないように葉さじで採取し、24 時間以内に排泄した糞を 1 つのサンプルとして管ビンに入れ、冷蔵庫に保存した。ナマコを円形水槽に投入してから 7 日目に、摂食を終了させるため全ての個体を空の円形水槽に移し、引き続き 8 日目に排泄した糞の採取を行った。堆積物を入れた水槽は水を抜きながら残ったもの全てを回収して冷蔵庫に保存した。堆積物と糞のサンプルについては、含水率、AVS（酸揮発性硫化物）、TOC（全有機炭素）、TN（全窒素）の濃度を測定した。

2.2 野外実験

徳島県小松島港において野外実験を行った。小松島港の防波堤の内側に設置されている「海水浄化プラント」は海水の出入りが制限されているため内部は閉鎖的な水環境である。河口干潟で採取した堆積物を 1 mm の篩で篩って大型底生動物を取り除いた後、 -21°C で冷凍したものをプラスチック製コンテナ（ $50 \times 35 \times 30 \text{ cm}$ ）に約 8 kg 入れた（図-2）。徳島県鳴門海岸で採集したマナモコを加えたコンテナ 3 個と堆積物のみのコンテナ 3 個を用意し、海水浄化プラントの底層部に沈めた。1 週間に 1 回の頻度でコンテナから堆積物の表層を採取し、ナマコの湿重量の測定を行った。実験開始から 84 日目に小松島港のコンテナを全て引き上げ、シリンジで深さ 3.5 cm までの堆積物を柱状に採取した。採取した堆積物のサンプルは、深さごとの ORP（酸化還元電位）を測定した後

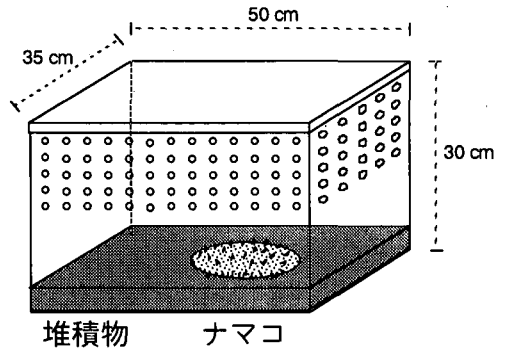


図-2 野外実験に使用したコンテナ

に実験室に持ち帰り、深さごとの AVS、TOC、TN の濃度を測定した。

3. 結 果

3.1 同化率測定実験

実験開始からいずれの水槽においてもナマコの摂食行動が観察され、糞の排泄が見られた。累積の糞乾燥重量について図-3 に示す。湿重量の大きいナマコほどより多くの糞を排泄する傾向が見られ、7 日間の摂食期間中の 1 日あたりの糞の排泄量は、堆積物を餌とした場合は 1.3~4.7 dry g/day 程度であった。

7 日間の摂食量を次の式（1）によって推定した。本実験では海水の流入口にフィルターをつけて懸濁物のほとんどを除去したが、若干の SS の進入が見られたので SS 量を考慮した。

7 日間の摂食量

$$= (\text{初期の堆積物量} + 7 \text{ 日間の流入 SS 量}) \\ - (\text{分析用に採取したサンプル量} \\ + 7 \text{ 日目に回収した堆積物量}) \dots\dots\dots (1)$$

推定されたナマコの摂食量を図-4 に示す。堆積物を入れた水槽ではサイズの最も大きい個体が糞の排泄量と同じく摂食量も最も多かった。7 日間の摂食期間中の 1 日あたりの摂食量は、堆積物を餌とした場合は 2.7~6.7 dry g/day 程度であった。

推定摂食量から累積糞乾燥重量を引いたマナモコの 7 日間の堆積物同化量は、ナマコの湿重量の小さい順に 10.4 g、8.7 g、3.2 g、14.0 g であった。これらの結果から、同化率 $= 100 \times (\text{同化量} / \text{摂食量})$ を計算すると、堆積物を餌とした場合は約 30% となった。

マナモコが餌を摂食してから糞を出すまでの時間を約 24 時間とし（荒川 1990）、餌の堆積物および排泄された糞に含まれる各物質（AVS、TOC、TN）の濃度の変化を計算し、表-1 に示す。AVS ではいずれの個体も糞の値が餌の堆積物より低く、ナマコが堆積物を摂食してから腸内を通過して排泄される間に AVS 濃度が減少した。

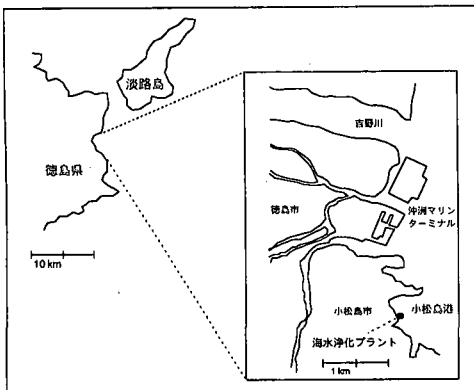


図-1 調査地域

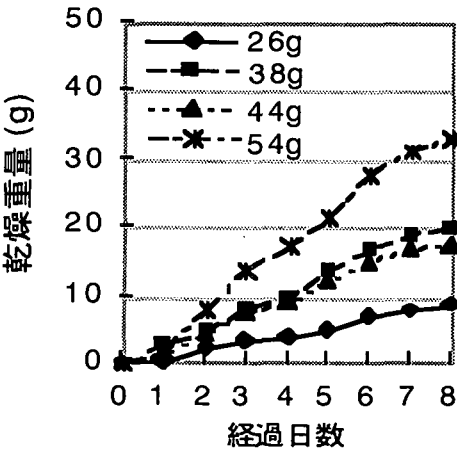


図-3 マナマコの累積糞乾燥重量

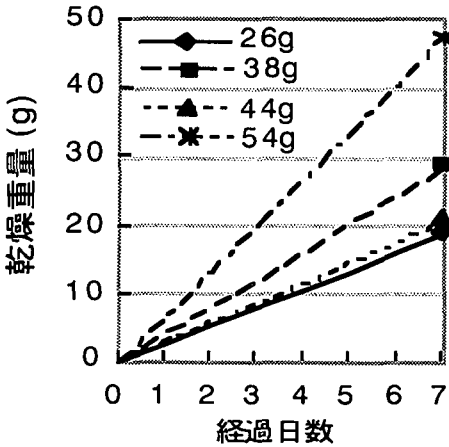


図-4 マナマコの推定摂食量

表-1 各物質の濃度の変化 (糞-堆積物)

ナマコ湿度	AVS(mg/g)	TOC(mg/g)	TN(mg/g)
26 g	-0.056	1.5	0.170
38 g	-0.037	0.5	0.014
44 g	-0.016	0.9	0.086
54 g	-0.026	0.4	0.071

表-2 マナマコの各物質に対する同化率

1 個体 1 日あたり	摂食量(mg)	同化量(mg)	同化率(%)
堆積物	3490	1130	32.4
AVS	0.48	0.18	37.3
TN	4.5	1.53	33.8
TON	38.7	12.6	32.6

3.2 野外実験

小松島港のコンテナに入れた堆積物の初期値は、AVS 濃度 0.09 mg/dry g、TOC 濃度 4.0 mg/dry g、TN 濃度 0.47 mg/dry g であった。

コンテナを設置してから 84 日目に採取した堆積物について、深さごとに測定を行ったところ、次のような結果が得られた。(a)ORP は 1 cm より深い場所では -100 mV 以下の還元的な状態であったが、表層および深さ 0.5 cm ではナマコを入れたコンテナの方がナマコを入らなかったコンテナより有意に高く、堆積物の表層付近が酸化的な状態になっていた(図-5)。(b) ナマコを入れたコンテナとナマコを入らなかったコンテナの両方において、AVS 濃度は堆積物の深さが深くなるにしたがって上昇する傾向が見られた。ナマコを入れたコンテナでは深さ 0~2 cm の AVS 濃度は 0.03~0.07 mg/dry g となり、ナマコを入らなかったコンテナの AVS 濃度(0.13 mg/dry g) に比べて著しく低く、ナマコの摂食活動によって AVS 濃度の増加が抑制されたと考えられる(図-6)。(c) TOC 濃度と TN 濃度は深さによって異なる傾向は見られなかったが、ナマコを入れたコンテナで

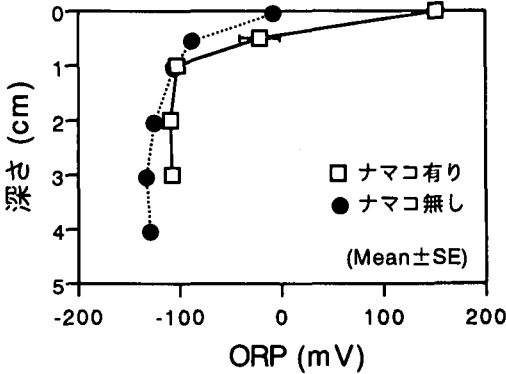


図-5 深さごとの酸化還元電位

反対に TOC と TN の濃度については餌の堆積物より糞で高くなった。

餌と糞の各物質の濃度変化と 1 日あたりの平均摂食量から、次の式(2)によって各物質の同化量を算出した。

$$\begin{aligned} \text{物質同化量} = & (\text{1 日あたりの平均摂食量} \\ & \times \text{前日における餌の物質濃度}) \\ & - (\text{糞乾燥重量} \times \text{糞の物質濃度}) \end{aligned} \quad \text{.....(2)}$$

堆積物を餌とした時の 1 日あたりのマナマコの AVS 同化量は約 0.18 mg となり、摂食した AVS 量に対して平均 37.3% の同化率を示した(表-2)。また、濃度では糞の方が高かったものの、TOC と TN では同化量として計算するとそれぞれ約 12.6 mg と約 1.5 mg となり、それぞれの物質の摂食量に対する同化率は平均 32.6% と平均 33.8% となった(表-2)。つまり、堆積物を餌としたマナマコは摂食量の約 1/3 の有機炭素と窒素を同化したことが示された。

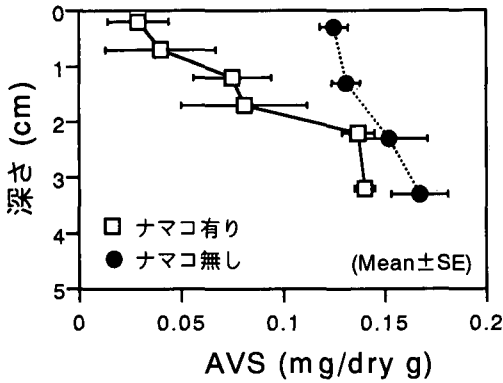


図-6 深さごとの酸揮発性硫化物濃度

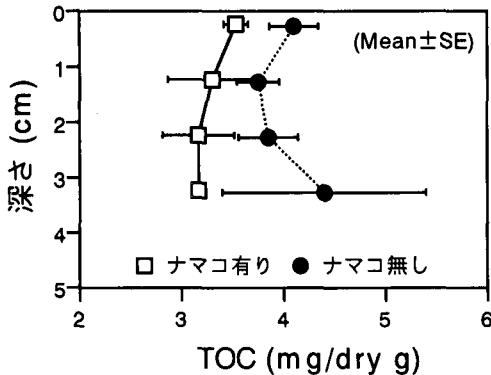


図-7 深さごとの全有機炭素濃度

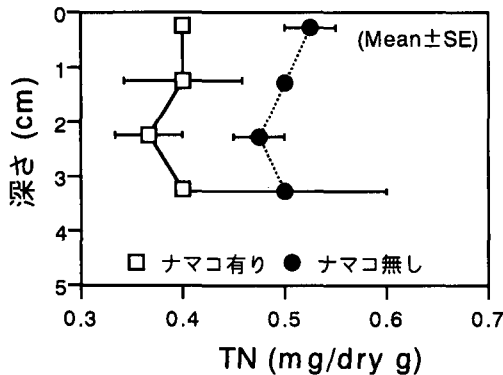


図-8 深さごとの全窒素濃度

はナマコを入らなかったコンテナより低い値を示した(図-7, 図-8)。

4. 考 察

室内で行った同化率測定実験の結果、堆積物を餌とした場合は乾燥重量で約30%の同化率であった。また、TOCやTNなどの物質については、マナマコは堆積物

の摂食量の約1/3を体内に同化した。堆積物の餌に含まれる有機物はナマコによって同化され、呼吸や成長などに使われたと考えられる。堆積物に含まれる物質がナマコによって同化されることが確認され、底質の改善効果の可能性が示唆された。

堆積物に含まれるAVSはナマコの腸内を通過して減少したが、実際に腸内から体内に取り込まれたかは定かでない。硫黄化合物を栄養として利用する生物は細菌で知られているものの、マナマコが腸壁から吸収したかどうかは今後調べる必要がある。硫化物は空気に触れると直ぐに酸化してしまうため、一連の摂食行動によって堆積物中のAVSは酸化されてしまったのかもしれない。

野外実験の結果、ナマコの有無によって堆積物の性状が異なった。ORPやAVS濃度の深さ方向の分布パターンは類似していたものの、堆積物の表層から2 cmくらいまでの深さでナマコの有無によって有意な違いが見られた。実験に用いたコンテナには蓋をしていたが、海水交換用の側面の穴から懸濁物質が進入し、コンテナ内の堆積物の上に沈降して堆積していた。マナマコは沈降懸濁物や堆積物の表層を摂食し、糞を排泄することで堆積物の性状を改変したと考えられる。特に、ORPやAVS濃度は閉鎖性海域における底質の状態を端的に表す指標であり、昨年度の室内実験の結果と同様にナマコの生息によってこれらの値に改善もしくは悪化の抑制が見られたことから、本研究のマナマコを利用した底質改善手法は閉鎖性海域において有効であると考えられる。

TOC濃度についてナマコ有りの方がナマコ無しよりも若干低い値を示していたことから、有機炭素成分はナマコや堆積物中の微生物によって消費され、堆積物よりもTOC濃度の高い沈降物の堆積が著しい海域においてはナマコの摂食活動によって堆積が抑制されるかもしれない。今回の実験では実験系内への沈降物の進入をできるだけ抑えたため、今後の課題としてナマコの摂食行動による新生堆積物の除去または堆積抑制効果を明らかにするデザインで、現場海域と室内で実験を行い、閉鎖性海域におけるナマコの生態を利用した底質改善手法の有効性をさらに確かめる必要がある。

本研究では、ナマコによる底質改善効果の有効性は示されたが、ナマコのサイズや水温などの環境要因の影響は分かっていない。また、マナマコを生息させるための場の構造や環境条件について検討し、実用可能な海域のスクリーニング等をを行う必要がある。今後は、ナマコの摂食活動の制限因子を明らかにし、また定量的に示すことを課題として水域環境に実用可能な底質改善手法を検討していく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたっては、生態系工学研究

会 (代表: 辻田時美 北海道大学名誉教授) に研究方針についてご助言を頂き, またマナマコの飼育や基本的な生態について田崎真珠 (株) 田崎海洋生物研究所 明楽秀作 所長にご指導頂いた。マナマコの採集に際しては湯村清氏とニタコンサルタント (株) 三橋公夫氏に, また固形試料の CHN 分析では岡山恵美子氏のご協力を頂いた。各氏に対し, ここに記して謝意を表する。最後に, 本研究の一部は文部省科学研究費補助金: 複数の生物種の機能を活用した海水浄化手法の開発 (代表: 村上仁士, 課題番号: 10558094) の補助, およびエコポート研究会 (運輸省) の支援を受けて行われたことを記す。

参 考 文 献

- 荒川好満 (1990): ナマコ説本, 録雪房, 118 p.
- 栗原 康 (1980): 人工干潟の研究 (3), 下水道協会誌, Vol. 17, No. 192, pp. 39-49.
- 村上仁士, 上月康則, 鎌倉浩仁, 北岡茂樹, 孫 慶植, 豊田裕作 (1998): 堆積物捕食生物を活用した礫間接触酸化構造物内の底泥浄化手法について, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 996-1000.
- 門谷 茂, 堤 裕昭 (1998): 魚類養殖場ヘドロのイトゴカイによる浄化法, 沿岸の環境圈, 平野敏行監修, フジテクノシステム, pp. 1097-1105.