

国立環境研究所特別研究報告

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan

SR-32-2000

海域保全のための浅海域における物質循環と
水質浄化に関する研究
(特別研究)

Studies on biogeochemical cycles and self-purification in shallow
coastal areas for preservation of marine environment

平成8～10年度
FY 1996～1998

NIES



NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立環境研究所

Report of Special Research from the National Institute for Environmental Studies, Japan

国立環境研究所特別研究報告

SR-32-2000

海域保全のための浅海域における物質循環と
水質浄化に関する研究
(特別研究)

Studies on biogeochemical cycles and self-purification in shallow
coastal areas for preservation of marine environment

平成8～10年度

FY 1996～1998

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

環境庁 国立環境研究所

特別研究「海域保全のための浅海域における物質循環と水質浄化に関する研究」

(期間 平成8～10年度)

特別研究責任者：森田昌敏

特別研究幹事：木幡邦男

報告書編集担当：木幡邦男

序

本報告書は平成8年度から10年度にかけて実施した特別研究「海域保全のための浅海域における物質循環と水質浄化に関する研究」をとりまとめたものである。

今日まで、浅海域は、埋め立てられ、干拓され、開発されてこそ価値が生まれると認識されてきたが、そこでは、同時に自然環境が損なわれているという見識が不足していた。また、高潮・高波に備える防災を目的とした様々な施設・構造物が建設されてきた。もちろん、これらのことは人間が生活していくために必要なことであったが、さらに、自然との調和を求め、持続的な発展を考慮するならば、もっと自然環境に配慮すべきであったと考えざるを得ない。今後、海洋国家を自認する我が国にとって、世界に誇れる海洋・沿岸環境を維持していくことが、国際社会のなかで強く要求されている。領海的环境に責任を持つことが盛り込まれた国連海洋法条約しかり、水鳥保護を目的としたラムサール条約しかり。近年、干潟・浅海域の開発に対し、国民の環境保全を求める声が高いのも、また、環境影響評価法が施行される運びとなったことも時代の趨勢であろう。

このような背景のもとに、研究は(1)浅海・干潟域における物質循環の実証的研究(2)海域における物質循環モデリングと浅海域機能の評価に関する研究の2研究課題をとりあげて進められた。その結果、浅海域では、生物種・生物量とも多く、生態系の維持にとって貴重な場であると同時に、そこの水質浄化能力が大きいことが確認された。本研究では、東京湾に残る数少ない浅海域の一つである三番瀬を主な調査場所に設定した。三番瀬は、新たな開発と環境保全をめぐって議論され、社会的関心の高い場でもある。総量規制などの水質管理政策にもかかわらず、依然として有機汚濁の環境基準達成率の低い東京湾では、夏季に湾中央部の底層が貧酸素化し、底生生物量が激減した。しかし、三番瀬では年間を通し底生生物の種・量とも豊富であった。底生生物の主役である二枚貝に着目し、その水質浄化能を定量的に評価した。海洋生態系の研究で最近の関心事である微小食物連鎖では、生態系を構成する様々な生物・微生物たちの食物連鎖による物質循環を明らかにした。また、環境影響評価法では公開により住民意見を求めることと関連し、住民の「海」に対する関心を調査・整理した。

本研究の成果を、干潟や浅海域の機能評価と水質浄化能評価に応用し、今後の内湾における水質管理や、沿岸域環境管理に役立てていきたいと考えている。

研究を推進する上で、研究所内外の多くの方々にご協力とご助言を頂いた。ここに深く感謝の意を表したい。

平成12年3月

国立環境研究所

所長 大井 玄

目 次

1 研究の目的と経緯	1
1.1 研究の目的	1
1.2 研究の構成	1
2 研究の成果	3
2.1 東京湾奥部における浅海域の特徴	3
2.1.1 東京湾奥部の水質	3
2.1.2 東京湾奥部の底質と生物量の関係	6
2.1.3 底泥中の光合成色素分布	9
2.1.4 東京湾奥部の底泥における酸素消費と底泥からの栄養塩の溶出	12
2.2 プランクトン生態系を通じての物質循環の実証的研究	16
2.2.1 従属栄養性渦ベン毛藻類による植物プランクトンの捕食	16
2.2.2 カイアシ類による従属栄養性渦ベン毛藻と繊毛虫の摂食	19
2.2.3 尾虫類と微生物食物連鎖	20
2.2.4 水中の生態系と底生生態系の関係の解析	21
2.3 東京湾奥部における底生生物による水質浄化	23
2.3.1 三番瀬における底生生物の現存量	23
2.3.2 二枚貝の海水浄化能力	26
2.3.3 現場浄化能評価	29
2.4 海域での大規模開発に対する住民意識について	30
2.4.1 海域での道路建設に対する住民意識調査	30
2.4.2 調査の概要	31
2.4.3 調査票の質問内容	31
2.4.4 4段階評価の集計結果を通した瀬戸大橋の評価	31
2.4.5 回答者の利便性の意識	32
2.4.6 自由記述回答を通した回答者の関心事	34
2.4.7 瀬戸大橋開通前の意識	36
2.4.8 調査実施時と開通前の意識の比較	37
2.4.9 調査地域下津井の利便性意識	38
2.5 まとめ	38

資 料

I 研究の組織と研究課題の構成	43
1 研究の組織	43
2 研究課題と担当者	43
II 研究成果発表一覧	45
1 誌上発表	45
2 口頭発表	47

1 研究の目的と経緯

1.1 研究の目的

我が国は、四方を海洋に囲まれ、我々は、その豊富な天然資源や景観等、自然の与える恵みを長く享受してきた。戦後の高度成長期を迎える前までの我が国の海岸の多くは、自然に近い状態が保たれ、内湾域では、砂浜とそれに続く遠浅の海が多くみられた。

干潟や藻場を含む浅海域は、魚類の産卵の場であったり、幼魚の生育の場であったりし、水産資源にとって重要なばかりでなく、例えば、渡り鳥の摂餌場等となるなど、自然と人間との共生の確保という観点から自然環境保全上その役割の重要性が認識されつつある。さらに、浅海域では、水中・底泥中での生物活動が非常に盛んであり、高い有機物分解速度などから、水質浄化能力が高いと言われ、水質保全の観点からも重要視されている。

このような背景から、平成6年12月に定められた環境基本計画でも「海域においては、自然海岸、干潟、藻場、浅海域の適正な保全を推進するとともに、自然浄化能力の回復に資するよう必要に応じ、人工干潟・海浜などを適切に整備する」と記されており、特に内湾の環境については、富栄養化を防止するよう定められている。さらに、沿岸海域を干潟・藻場・珊瑚礁等多様な生態系や豊かな水産資源を持つものとし、優れた自然の保全、干潟・藻場などの保全に努め、社会資本整備等の事業の実施時には十分配慮するよう定められている。

しかし、近年の国土開発のため、浅海域・干潟は、特に内湾部において埋立てなどにより多くが消失してきた(図1)。過去に行われた開発は、環境への配慮が必ずしも十分であったとは言えず、顕在化した環境問題が議論されることが少なくない。それにもかかわらず、現在でも開発の圧力は非常に高く、東京湾、大阪湾、伊勢湾、諫早湾を始め、多くの浅海域で開発計画が進みつつある。

今日、水質浄化能の評価をとってみても、科学的な知見に基づく浅海域の機能評価が十分にできる状態とは言えず、開発による環境影響を評価するのにも定まった手法がない。我々にとって、様々な意味で価値の高い内湾域や、その浅海域において、それらを持続的に活用し続け、環境の保全を図るためには、保全のための変更や代替案を考慮に入れるなど適正な開発の指針を示す必要がある、そのために科学的根拠による調査法・評価法がさ

らに進歩する必要がある。

干潟・浅海域における水質浄化能は大きい。一方、貧酸素化した海域の底泥からは、窒素・リン等の栄養塩が水中に回帰し、新たな汚濁負荷源となるという指摘がある。内湾の富栄養化では、陸域からの負荷と同時に浅海域での栄養塩の挙動も考慮されるべきであるが、この点に関する現在の科学的知見は、まだ不十分といえる。

このような背景から、内湾における浅海域の環境を保全するため、浅海域の特徴をとらえ、その機能を明らかにすることを本研究の目的とした。また、水環境を適切に保全し、流域全体を管理するための指針を与えるために、浅海域での微小生物群の食物連鎖や、炭素・窒素・リン等の物質循環を明らかにすることを目的とした。

1.2 研究の構成

本研究では、上記目的を達成するために、以下の2つのサブテーマで調査・研究を実施した。

(1) 浅海・干潟域における物質循環の実証的研究

浅海域では、栄養塩の供給や光合成に必要な光が十分であり、さらに、水の混合が良く行われるため、通常、一次生産が非常に高く、さらに、これらを捕食する底生動物が豊富に存在することから、生物による物質環境が活発に行われる。また、浅海域の水質は、浅いために底泥の影響、特に底生生物の影響を強く受ける。

本研究では、内湾における浅海域の例として東京湾奥部の三番瀬を採り、三番瀬とそれに続く湾中央部の比較から、浅海域の水質、生物量や、栄養塩の循環などにみられる特徴を底生生態系を中心に調査・研究した。最近、藻類等の一次生産によらない食物連鎖として、微生物食物連鎖が海洋生態系で重要視されてきている。一次生産を起点とした採植食物連鎖と、この微生物食物連鎖の両面から、海洋生態系での物質循環を調査・研究し、特に上位捕食者への炭素の流れを明らかにした。

(2) 海域における物質循環モデリングと浅海域機能の評価に関する研究

内湾の指定水域に対する総量規制や、窒素・リンの環境基準により流域の水質を管理するために、数理モデルを用いた検討が行われる。しかし、現状のモデルを用い

た流域管理で未解決な大きな問題に、有機汚濁については内部生産が、また、窒素・リンについては底泥からの回帰の過程や底生生態系での循環が十分に明らかにされていない点がある。特に、浅海域では底層が水質に与える影響が大きいにもかかわらず、その主役となる底生生物の働きについて、定量的な知見が少ない。

本研究では、浅海域の機能評価のため、浅海域で重要な底生生態系による水質浄化能や物質循環を、浅海域現場調査・室内実験を基に調査・研究し、モデル化の基礎となるよう定量的な検討を行った。また、現場や室内で、

これら底生生態系の機能を測定する装置を開発した。

浅海域の環境を保全するためには、上記研究で目的としたような、浅海域の機能を科学的に評価できる環境影響評価技術が進歩する必要がある、また一方、海域での開発に対する住民の関心事を調査し、住民の期待する環境保全について分析・整理する必要がある。本研究では、東京湾近くの住民や、瀬戸大橋の接岸近くの地域で住民意識調査を行い、地域ごとの住民意識の特徴について明らかにした。

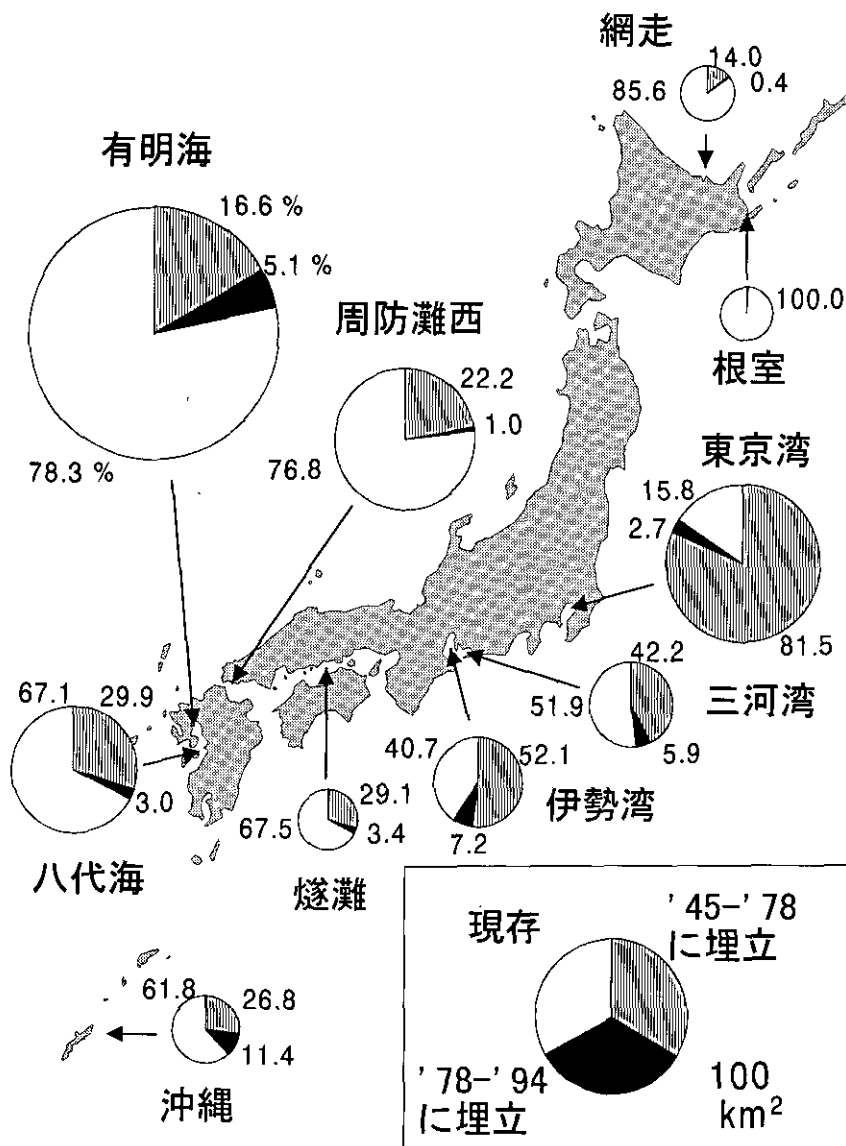


図1 干潟分布状況 第4回自然環境保全基礎調査(環境庁, 1994)より, 作図

2 研究の成果

2.1 東京湾奥部における浅海域の特徴

近年、我が国の沿岸域では、埋立てなどにより、干潟が減少してきた。東京湾では、古くは江戸時代から、干潟等の浅海域が開発され消失しており、1945年以降でも、他の海域に比べ多くの海岸が開発され、残された自然海岸の割合が極めて低い(図1)。富津と観音崎を結ぶ線より内側の狭義の東京湾内では、現在残された干潟・浅海域として、盤州、三番瀬、三枚州等が知られているにすぎない。

これらの一つ、三番瀬では、近年新たな開発が計画され、その環境保全をめぐって、社会的にも大きな関心を集めている。三番瀬は、干出する面積こそ小さいが、約14.5 km²の水域全体が水深2 m以下(図2)であり、毎年、水鳥などの飛来が多く観測されて、貴重な浅海域となっている。

本章に記述する研究では、三番瀬とそれに隣接する海域で水質・生物量などの調査を行い、両者で得られた情報を比較することで、浅海域の特徴を明らかにすること

を目的とした。本章の2.1.1節では水温・塩分などの水質について、また、2.1.2節では底生生物量について得られた結果をまとめ、2.1.3節では、底泥中の光合成色素から有機物の分解について得られた情報を記す。最後に2.1.4節では、浅海域における栄養塩の循環を明らかにするため、底泥からの栄養塩(窒素・リン)の溶出や底泥の酸素消費速度について調査した結果を記し、浅海域が浅いがゆえに持っている特徴について考察した。

2.1.1 東京湾奥部の水質

三番瀬及び隣接する海域にて、1996年9月から1998年9月にかけて、季節ごとに3~4回/年の頻度で水質や底生生物量などを調査した。調査地点1~3は三番瀬内の水深2 m以浅の浅海域に、調査地点5, 6は沖合の水深12~18 mの水域(以後、湾央部)に、また、調査地点4はそれらの接点と考えられる水深4~7 mの水域に設定した(図2, 表1)。これらの水域における表層の水温・塩分・pH・溶存酸素など水質の値を比較した(図3)。表

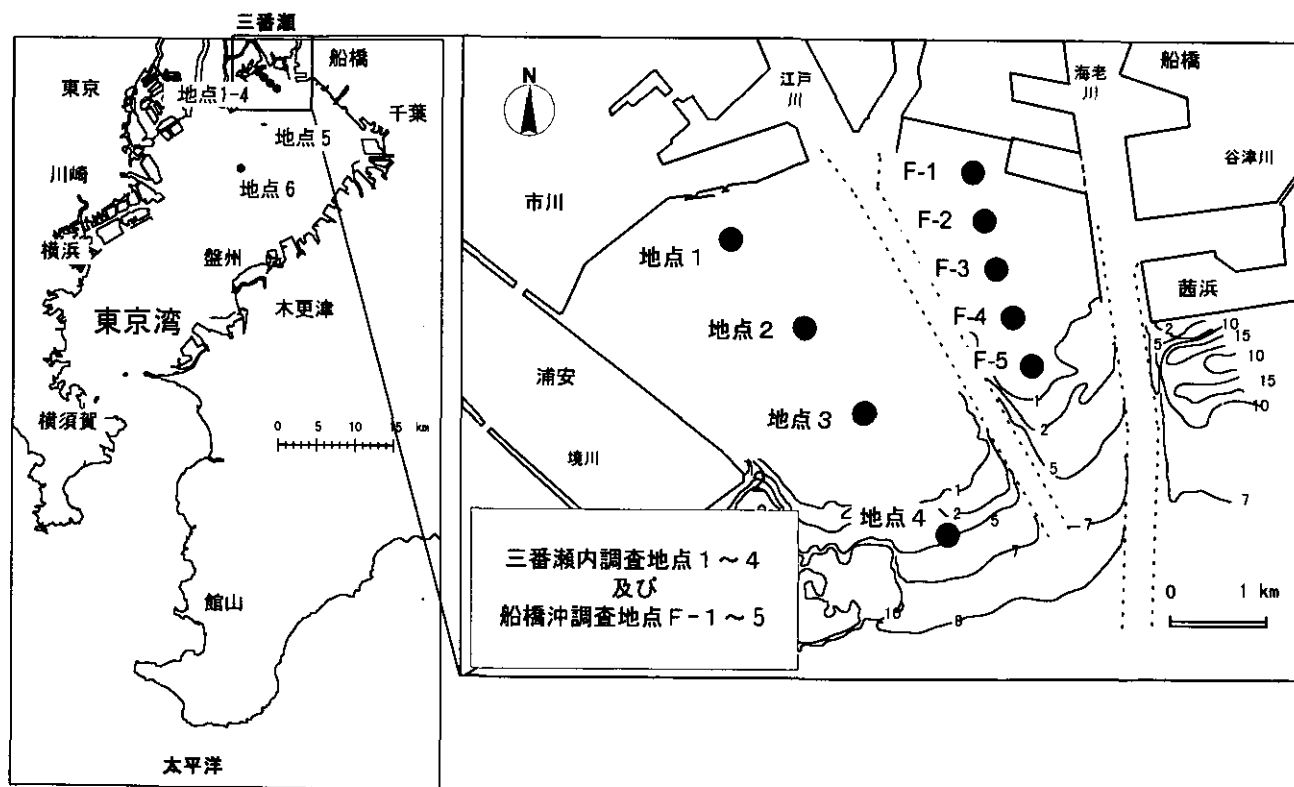


図2 東京湾奥部調査地点

層の水温・塩分には、浅海域と湾奥部海域に大きな違いがなく、両海域で表層では海水の交換が良いことが推察された。春季及び夏季では、pH や溶存酸素の値が、浅海域に比べ、調査点 5, 6 で高い傾向が見られた。光合成による生産で、溶存酸素が増加し、同時に二酸化炭素が吸収されることで pH が増加する。このことを考慮すると、沖合の水域に比べて浅海域のほうが一次生産に対する消費の割合が高いといえ、浅海域では高次捕食者による有機物の消費や、底泥のバクテリアによる有機物の分解が

重要な過程となっているものと思われる。

図 3 に示された 1998 年 9 月の水質の値は、他と比較して異常である。これは、調査直前に降雨量が極めて多く、通常閉じられている江戸川放水路の水門が開けられたために、大量の河川水が一時期に三番瀬に流入したことによる(図 2 参照)。この影響は図 3 中の塩分に良く現れており、三番瀬内の表層では塩分が 10 psu 以下と極めて低い値であった。塩分が一時的にせよ非常に低下したことが底生生物に与えた影響は大きく、2.1.2 節でデータを示すが、特に二枚貝の現存量が大きく減少した。このことは、浅海域生態系のぜい弱性を示す一つの例であろう。

他の時期に比べ 1997 年 9 月には、浅海域において高い塩分と低い溶存酸素が観測された。これは、前面海域で直前におきた青潮の影響を受けたためであり、調査時にも浅海域表層の一部で青潮が観測された。

東京湾奥部の海域では、初秋の時期に青潮がしばしば観測される。一般に、夏季に、強い太陽光を受けて海表面が暖められると、温度・塩分成層が発達し(図 4)、海

表 1 調査地点の緯度・経度

調査点 番号	北緯	東経	水深 (m)
1	35° 39' 33"	139° 56' 28"	2 m以浅
2	35° 39' 10"	139° 56' 52"	2 m以浅
3	35° 38' 38"	139° 57' 18"	2 m以浅
4	35° 37' 58"	139° 58' 0"	4~7
5	35° 35' 31"	139° 56' 21"	約 1.2
6	35° 33' 7"	139° 54' 36"	約 1.8

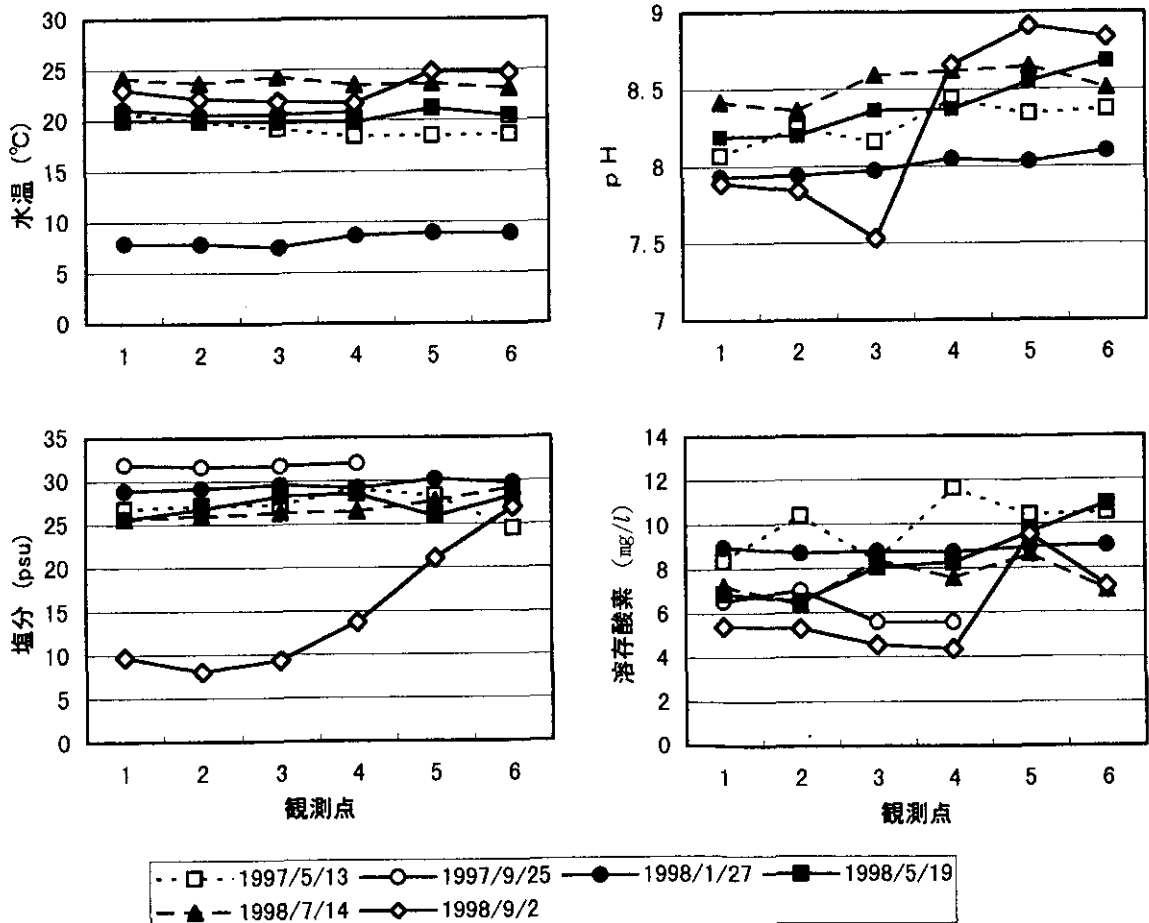


図 3 東京湾奥部調査地点 1~6 表層における水質の季節変化

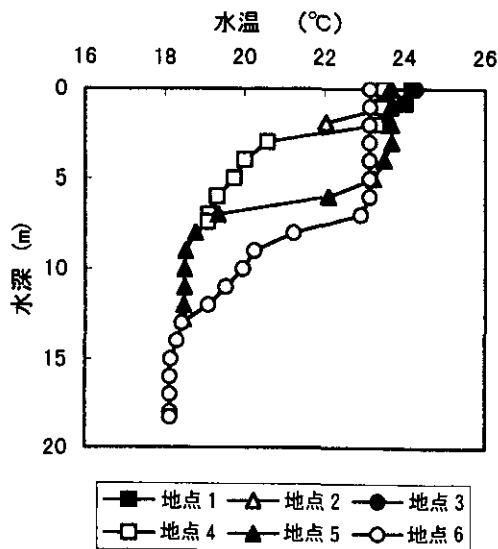


図4 東京湾奥部調査地点1～6における水温の鉛直分布 (1998年7月14日)

水の鉛直混合がおきにくくなる。その結果、表層から底層への酸素輸送が制限され、底層付近では、堆積有機物の分解により底層水の溶存酸素が消費されるので、次第に貧酸素化が進み、無酸素状態にまでなる(図5)。例年9月中旬から下旬にかけ、気温の低下により成層構造が弱まるため鉛直混合がおきやすくなる。また、この時期には離岸風(北風)が卓越することから、表層では沖合に向かう吹送流が発生する。一方底層では向岸流となることから、岸付近で湧昇流となって、底層で生じた低温・高塩分の無酸素水塊が表層に現れる。これらのことが青潮発生 of 大きな要因となることを前特別研究の成果として報告した。

貧酸素水塊は、底生生物の生息に大きな影響を与えるものと考えられる。貧酸素水塊の挙動を浅海域と湾中部で比較するため、溶存酸素の鉛直分布を季節ごとに図5

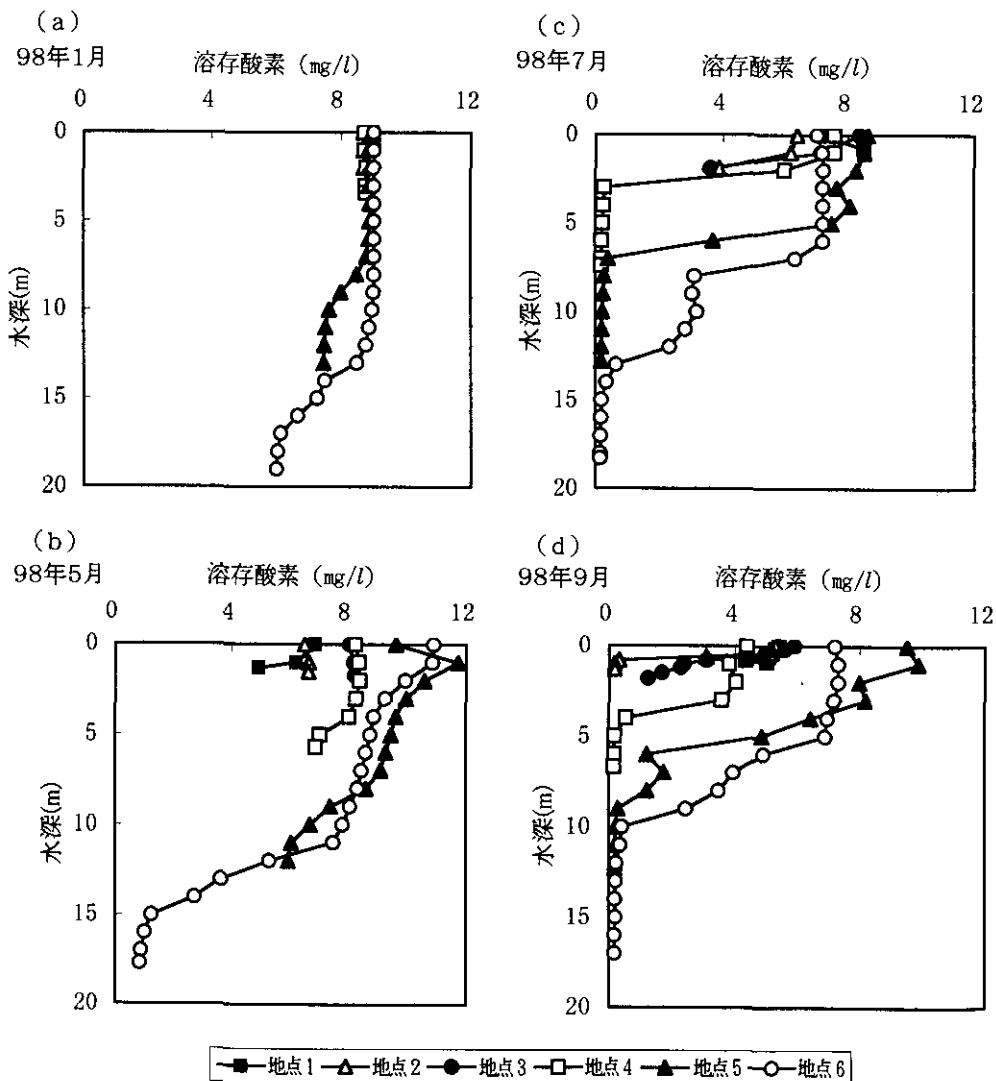


図5 東京湾奥部調査地点1～6における溶存酸素の鉛直分布

に示した。冬季には鉛直混合が大きいいため、浅海域及び湾中央部で、溶存酸素は表層から底層までほとんど飽和しており、湾中央部の底泥直上で、わずかに低い値となっている(図5 a)。春季には湾中央部の底層で貧酸素化が進行しているが、浅海域では表層から底層まで、生物の生息にとって必要とされる3 mg/l以上の溶存酸素が存在した(図5 b)。温度・塩分成分層が発達する夏季には、湾中央部底層の溶存酸素はほとんど枯渇し無酸素状態となったが、浅海域では、底層でも十分な溶存酸素が存在した(図5 c)。しかし、浅海域周辺で青潮が見られる時期には、浅海域の底層でも低い溶存酸素が観測され、測定地点によっては無酸素状態と言える地点も存在した(図5 d)。

後節(2.1.4節)で述べるように、底生生物が豊富に存在する三番瀬では、底生生物の呼吸による酸素消費速度が高い。したがって、周辺海域の溶存酸素を多く含んだ表層海水が水平移流により三番瀬に酸素を供給する過程が、三番瀬の生態系を維持するうえで重要な因子となっているものと考えられる。この過程は、春・夏季に三番瀬表層のほうが、湾中央部表層よりも溶存酸素が低いことから推察される(図5)。

2.1.2 東京湾奥部の底質と生物量の関係

干潟や藻場などを含む浅海域の主要な機能として、

- ①生態系の物質循環を通じての水質浄化作用
- ②水産生物の幼稚仔の生育場として、あるいは生産収穫の場としての価値
- ③浅海域の生物群集自身の特性、希少種などの存在価値
- ④干潟を採食場所とする水禽類—特に渡り鳥の中継地、あるいは越冬地としての重要性

などが挙げられる。近年、これら機能保全の必要性が広く認識されるようになってきた。ここに挙げた機能のすべては、浅海域に生息する底生生物に依存する。そこで、本節にまとめた研究では浅海域における底生生物の分布を調査し、その生息場である底質環境との関連を調べることを目的とした。

(1) 調査地点及び調査方法

浅海域及び湾中央部における底生生物の分布と底質に関する調査を、東京湾奥の三番瀬に4地点、湾中央部に2地点の計6地点を設置し(2.1.1節;図2)、1996年9月~1998年9月にかけて、水質の調査と同時に実施した。採泥はエクマンバージ採泥器(20×20 cm)と内径4.0 cm

のコアを用いた。エクマンバージ採泥器では各地点につき4回採泥し、3回分はマクロベントス用に、1回は泥温を測定後、泥分率測定用試料とした。コアは各地点6本採泥した。1本は酸化還元電位(ORP)を測定し、2本は含水率、強熱減量、酸揮発性硫化物の分析に用い、3本はメイオベントス用試料とした。ORPは船上で表層0~5 cmまでを1 cmごとの各層に切り分けてORP電極を用いて測定した。その他の分析項目では試料を実験室に持ち帰り、表層から0~2 cmと2~5 cmの上下2層に分けて分析試料とした。泥分率は粒径63 μm以下の粒子の重量百分率として求めた。含水率は105°Cで2時間乾燥して測定した。強熱減量は、底泥試料を600°Cで1時間燃焼して測定した。

マクロベントス用の試料は、採泥後1 mmメッシュのフルイでふるい、残ったものを中性ホルマリンで10%になるように固定した。その後、固定した動物の種類、個体数、湿重量を測定した。メイオベントス用の試料は実験室に持ち帰った後、深さ0~2 cmと2~5 cmの上下2層に分けて中性ホルマリンで10%にして固定後、ローズベンガルで染色した。この試料のうち、1 mmメッシュを通過し38 μmメッシュに残るベントスをメイオベントスとした。その後、固定した動物を分類群別に分けて計数した。

三番瀬における底生生物の調査の結果、底生生物の生物量として、二枚貝が非常に大きいことが明らかになった。二枚貝は、三番瀬を代表する生物であり、そのろ過食性から海水中の懸濁物を除去し浄化することからも重要であると考えられた。そこで、上記の調査に加え、船橋沖エリアの5調査地点(図2中、F-1~5)では、1998年3月から1年間、1回/月の頻度で、二枚貝のうち、特にシオフキガイに着目し、その分布や個体群動態を調査した。広い範囲で二枚貝を採取し、計数の精度を上げるために、船橋漁業協同組合の協力を得て、大巻き漁法(2.3.1節)を用いて二枚貝を採取した。採取したシオフキガイについては各個体の殻長をノギスを用いて0.1 mmの精度で測定した。

(2) 底質の特徴

底質の分析結果では、三番瀬(調査地点1~3)と湾中央部海域(調査地点5, 6)とに大きな差がみられた(表2)。三番瀬内の底質は、砂質であり、泥分率が極めて低く、また、強熱減量が小さいことから有機物含量が小さいと

表2 東京湾奥部調査地点1～6の底質分析結果

調査地点	泥分率 (%)		含水率 (%)		強熱減量 (%)	
	0-5 cm	0-2 cm	0-2 cm	2-5 cm	0-2 cm	2-5 cm
1	2.9	29.8	33.7	2.0	1.6	
2	0.9	29.5	34.8	1.7	1.6	
3	0.1	28.8	26.1	1.8	2.2	
4	27.3	36.8	40.6	3.3	3.4	
5	91.8	85.2	75.5	14.6	11.5	
6	95.4	79.5	77.9	14.0	13.2	

考えられる。ところが、湾中央部では、底泥表層に浮泥が多く堆積しており、また、含水率・泥分率が高い。これは、湾中央部の水深が大きく堆積物がたまりやすいことにくわえ、夏季に底泥が貧酸素化することで、分解が進まない有機物が堆積している(2.1.3節)ためと思われる。

三番瀬内の調査地点では、地点1の泥分率が他の2地点に比べ高かった。岸に最も近い地点1では、堆積物が貯まりやすいと考えられ、このことは、底泥の酸化還元状態の差にも現れていた。

酸化還元電位(ORP)では、底泥表層の値は三番瀬では酸化状態を、湾奥中央では還元状態を明瞭に表していた(図6)。各調査地点で、泥深が深くなると還元状態へ移行したが、三番瀬内の地点2～3では、泥深5cmまで酸化還元電位は正の値であった。しかし、地点1の深さ1.5cm以深では還元状態を呈しており、ここが堆積物が貯まりやすい場所であることを示していた。

(3) 底生生物

測定期間中、マクロベントスとしては9動物門、38種類の出現が確認できた。このうち、出現した種類数、個体数ともに多かったのは、軟体動物、多毛類、甲殻類であった。そのほかに、イソギンチャク類、ウズムシ類、ヒモムシ類、星口類、棘皮動物のそれぞれに1種類、1～14個体が確認できたが、これらの生物量は少なかった。

三番瀬内の調査地点1～3では、軟体動物のほとんどが二枚貝であり、また、湿重量で見ると、イソギンチャクが1個体存在した1997年5月の地点2を除いて、軟体動物、多毛類、甲殻類の和が全体の98%以上であった。そこで、図7～9に、各地点でのマクロベントスの種類数、個体数と湿重量を、軟体動物、多毛類、甲殻類、その他に分けて示した。湾中央部の地点5、6では、9月に種類数、個体数、湿重量のいずれも極めて低い値になり、底層が貧酸素化することで底生生物にとって生息が難しい環境

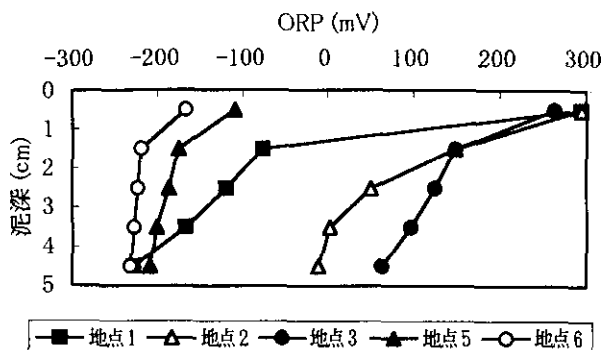


図6 東京湾奥部調査地点1～6底泥における酸化還元電位の鉛直分布(1996年9月)

であることが示された(図7～9)。一方、三番瀬内の地点1～3では、四季を通して種類数、個体数とも多く、底生生物相が豊かであった。これらの地点で、分類群別種類数では多毛類と軟体動物がともに10種類程度が出現した。

軟体動物では、個体数と湿重量で二枚貝が優占し、アサリ、シオフキガイが多くみられ、また、地点1を中心にホトトギスガイが分布していた。多毛類では、アシナガゴカイ、ミズヒキゴカイ、ヒゲスピオなどが多くみられた。個体数は各地点ともに軟体動物や多毛類の種類が多くを占めるが、重量では1個体が重いアサリ、シオフキガイやホトトギスガイなどの軟体動物が大部分を占めた(図9)。これらのことから、砂質の三番瀬を特徴づける底生生物は二枚貝であると言える。

メイオベントスでは線虫類、多毛類、カイアシ類、貝虫類、軟体動物、有孔虫、ヒモ虫類の7動物分類群の出現が確認されたが、どの地点でも線虫類が圧倒的に多数を占めた。マクロベントスでは出現が見られなかった9月の地点5と6にも個体数は多くはないが線虫類が見いだされ、一部の線虫類には貧酸素に対し耐性があることが推察された(図10)。

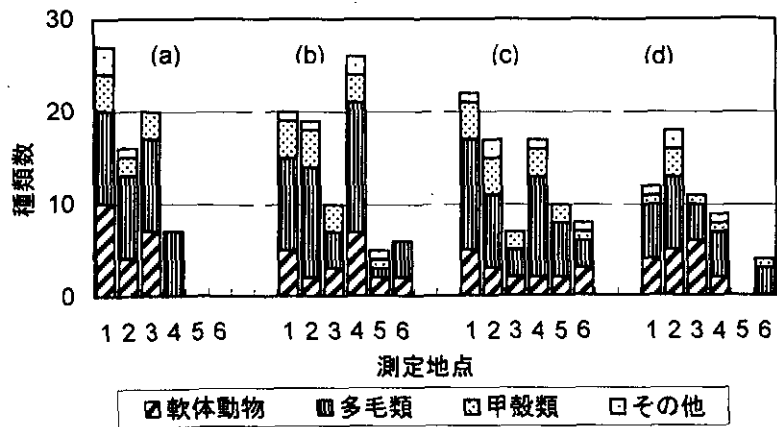


図7 東京湾奥部調査地点1～6における底生生物種類数の季節変化
(a) 1996年9月, (b) 1997年2月, (c) 1997年5月, (d) 1997年9月

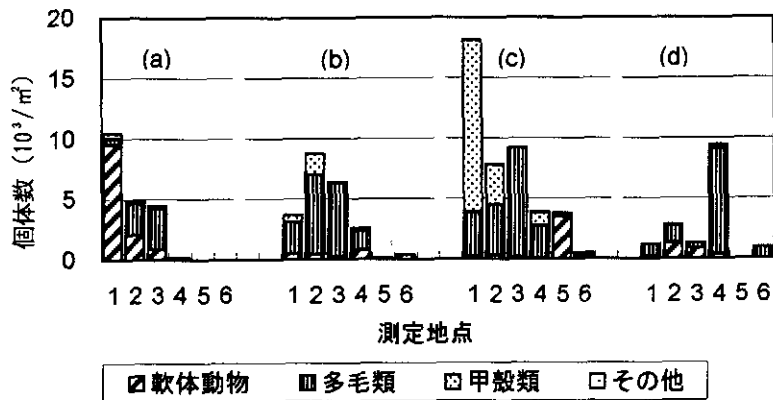


図8 東京湾奥部調査地点1～6における底生生物個体数の季節変化
(a) 1996年9月, (b) 1997年2月, (c) 1997年5月, (d) 1997年9月

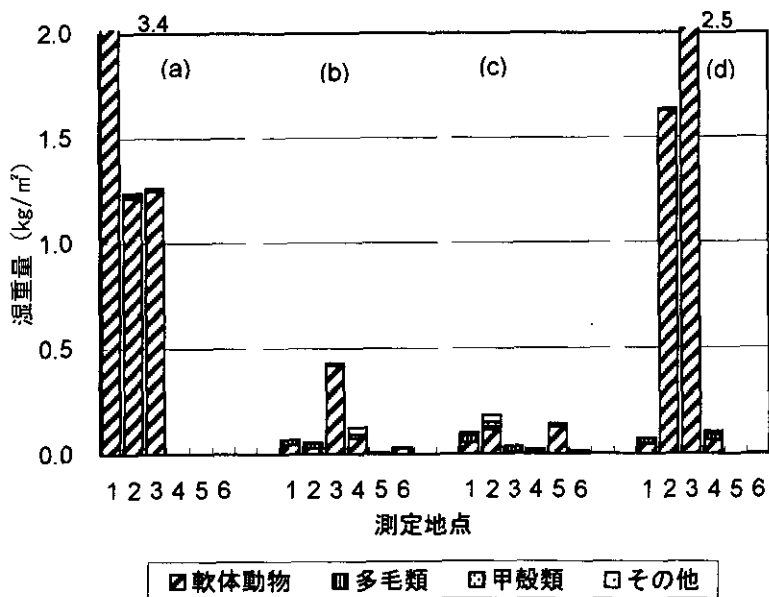


図9 東京湾奥部調査地点1～6における底生生物湿重量の季節変化
(a) 1996年9月, (b) 1997年2月, (c) 1997年5月, (d) 1997年9月

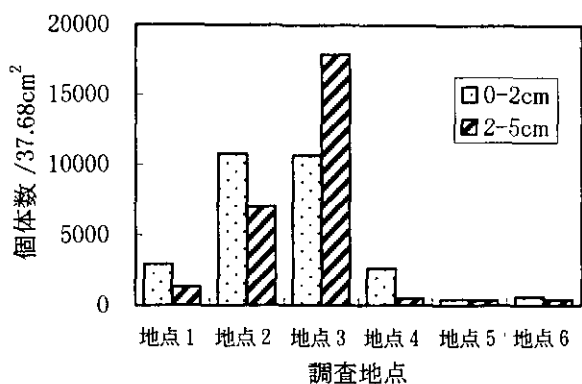


図10 東京湾奥部調査地点1～6におけるメイオベントスの存在量 (1996年9月)

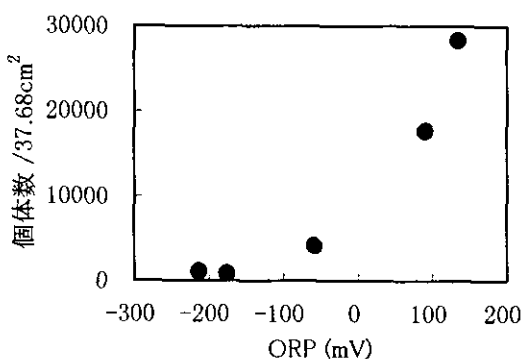


図11 東京湾奥部調査地点1～6におけるメイオベントス存在量と底泥の酸化還元電位との関係

溶存酸素とマクロベントスの種類数、個体数、湿重量との間には、図7～9に示されたように高い相関関係があった。このような関係はメイオベントスでもみられ、メイオベントス個体数と底泥中の酸化還元電位との間に高い相関関係があった(図11)。

図11には、1996年9月に観測された例を示す。图中、メイオベントス個体数は、0～2cmと2～5cmのサンプルで得られた数の和を、また、酸化還元電位は0～5cmで1cmごとに測定された値の平均値を示した。

(4) 季節変化

船橋エリア内の5調査地点(F-1～5; 図2)にて、シオフキガイの分布に見られる季節変化を測定した。ここでは、1998年3月、4月、5月、6月、7月、9月、10月の各月について得られたシオフキガイの殻長組成を図12に示す。3月から7月にかけては、各地点で殻長30mm以上の大型個体が出現していた。この大型個体に関して地点間で比較すると、3月から7月にかけて、大型個体の

個体数は、地点F-1から4で多く、5で少ない傾向にあった。大型個体の殻長組成は、この期間を通して、地点F-1では30mmから40mm、地点F-2から4では35mmから45mmのゆるやかな山を形成していた。したがって、地点F-1では常にやや殻長が小さく、また全測点の大型個体で、3月から7月の間ほとんど成長が見られなかった。

6月になると、殻長10mm未満の小型個体が地点F-1から3までに出現し、その数は特に地点F-1と2で多かった。この小型個体は調査期間中に新規加入した個体と推察される。7月には、これら小型個体の個体数は増加し、同時に成長して、地点F-2では20mmに達する個体も出現した。また7月には、地点F-4と5でも、少数ではあるが、小型個体が出現した。

調査地点F-1から5まで、水深には大きな差がないが、シオフキガイの殻長組成には明らかな違いが見られた。6月に地点F-1, 2で小型個体が増加したことから船橋エリア内では、シオフキガイは6月にふ化した浮遊期の幼生が、岸に近い場所(測点1, 2)で着底し、その後成長に伴い、沖合の場所に移動することが推察された。

1998年9月には、調査の直前に大雨が降り、江戸川放水路の水門が開いて淡水が三番瀬に大量に流入した影響(2.1.1節)で、多数のシオフキガイが死亡した。特に、以前に個体密度の高かった地点F-1から4では、シオフキガイは死滅した。最も沖側の調査地点F-5でのみ、わずかにシオフキガイは生き残った。10月も同様の傾向を示した。

このように、三番瀬内で個体数が激減したシオフキガイであるが、1999年7月の調査では小さな個体が多く見いだされ、また、同年9月の調査では殻長10mm以上の個体が多く観察されて、生物の生産が回復されていることが確認された。

2.1.3 底泥中の光合成色素分布

干潟・浅海域では物質循環が盛んで、水質浄化能が高いと言われる。浅海域における循環の担い手である底生生物の研究には様々な手法があるが、その中に、光合成色素及びその分解物の組成・分布を調査する手法がある。

光合成を行う生物のほとんどに含まれ、光合成の主役となる色素のクロロフィルa (chlorophyll a) は、藻類など一次生産者の良い指標となる。クロロフィルaは、植物プランクトン中では脂質に包まれて存在するが、植

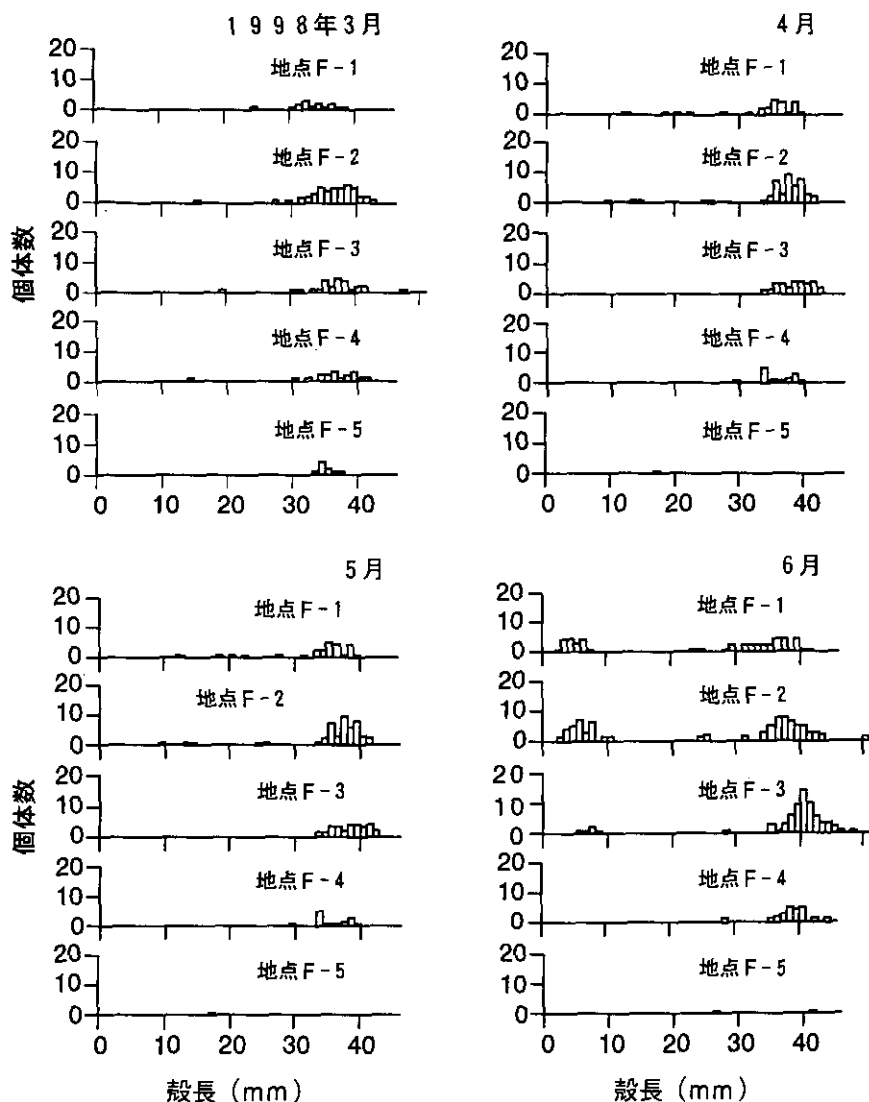


図 12(1) 1998 年 3 月から 6 月のシオフキガイの調査地点ごとの殻長組成
 個体数は「まき」3 回の採集 (約 2.1 m²) による値

物プランクトンが摂食を受けたり死滅するなどして、直接海水と接すると加水分解を受け、pheophytin *a* に変化するものと考えられる。さらに加水分解を受け、アルコール (phytol) が離れると pheophorbide *a* に変化するが、この過程は通常、化学的な作用だけでは進行せず酵素の作用で起こるとされる (図 13)。したがって、クロロフィル *a* 及びその分解生成物であるフェオ色素 (pheophorbide *a*, pheophytin *a*) 等は、底泥での消費者現存量や、その組成などの摂食過程を知る手がかりを与えると考えられる。

本節では、東京湾浅海域の一つである三番瀬の底泥におけるクロロフィル *a* 及びその分解物であるフェオ色素の分布について調査し、生産・摂食過程について得られた知見を記す。

(1) 実験方法

底泥の試料は、1997 年 9 月～1998 年 9 月まで、計 5 回、東京湾三番瀬内部の 4 定点 (調査地点 1～4；図 2) と、湾中央部の 2 定点 (地点 5：水深約 12 m，地点 6：水深約 18 m；図 2) にて、不攪乱採泥器及び直径 40 mm のコア採泥器を使って採取した。表層～泥深 10 cm までの試料を、0～1，1～2，2～3，3～4，4～5，5～7，7～10 cm の間隔で切って、凍結乾燥した。乾燥された各々の試料をアセトンで 3 回抽出した後、高速液体クロマトグラフィー (HPLC) を使用して、クロロフィル *a* 及びその分解物量を測定した。同様に、凍結乾燥された試料について、元素分析計を使って炭素・窒素量を測定した。

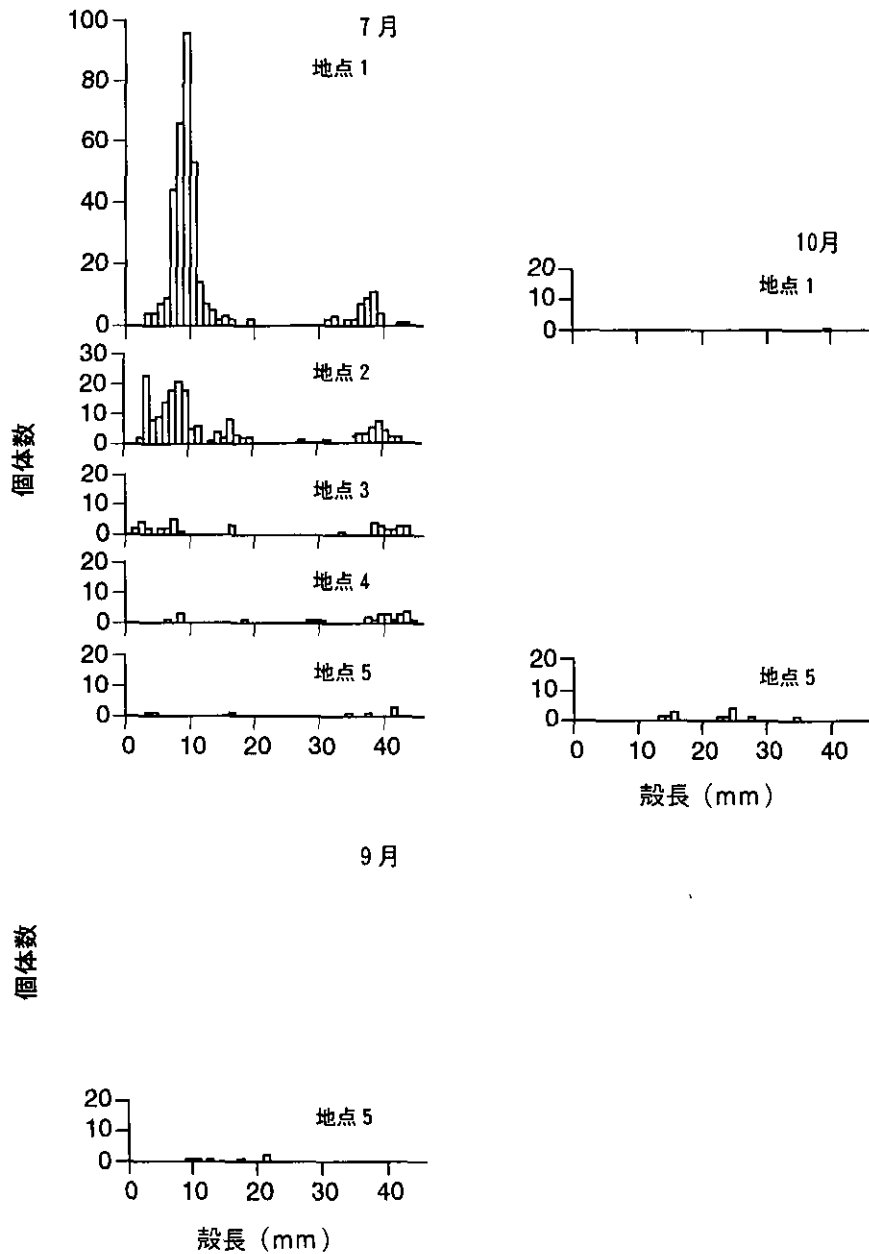


図 12(2) 1998年7月, 9月, 10月のシオフキガイの調査地点ごとの殻長組成
個体数は「まき」3回の採集(約2.1m²)による値

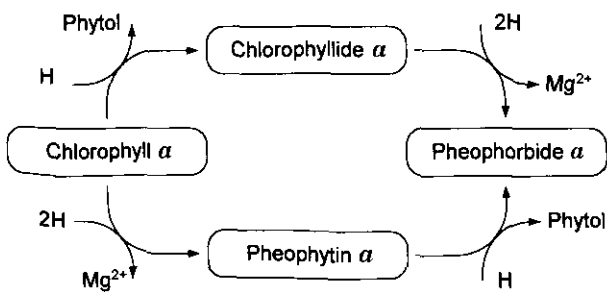


図 13 クロロフィル a 及びその分解生成物
分解過程の模式図

(2) 結果と考察

得られた値を調査期間中について平均したものを図 14 に示す。底泥で、クロロフィル a 及びフェオ色素の分布は、三番瀬内の水深が浅く泥分率が低い地点(図 14 上)より、湾中部で水深が深く泥分率が高い地点(図 14 下)のほうが数十倍高かった。

分布の特徴の一つとして、三番瀬内ではクロロフィル a が5 $\mu\text{g/g}$ 乾泥以下と低い値であるのに対し、湾中部では泥深の深いところまで約 200 $\mu\text{g/g}$ 乾泥と極めて高い値であったことが挙げられる。本調査の湾中部は 12~18

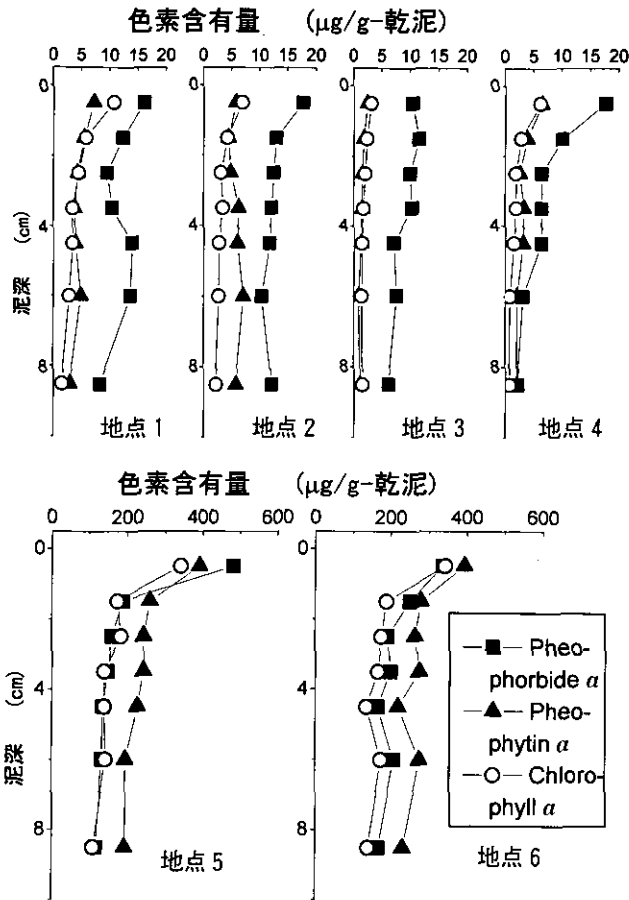


図14 東京湾奥調査地点1～6の底泥試料中の光合成色素及び分解生成物の鉛直分布
1997年9月～1998年9月までの5回の調査で得られた値の平均値

m の水深であり、東京湾の透明度からみて底泥まで光が届いているとは考えられない。したがって、湾中央部底泥に多量にあるクロロフィル a は、そのほとんどが生きている植物プランクトンに由来するものではなく、沈降し堆積した植物プランクトンが摂食や分解を受けずにそのままの形で存在しているものと考えられる。これは、湾中央部底泥で、夏季や秋季に、貧酸素のため底生生物の存在量が少ないことが原因であろう (2.1.2 節)。

湾中央部ではフェオ色素のうち、pheophytin のほうが pheophorbide に比べ多く存在したが、三番瀬内では逆に pheophorbide が多かった。ここで pheophorbide は、生物の酵素による分解で生成され、一方、pheophytin は生物による分解のほか、化学過程でも分解生成されることを考慮すると、上記クロロフィルの分布と同様、湾中央部で pheophytin が多かったのは湾中央部底泥での生物による分解が活発には行われなかったことが原因であろう。

各地点で、底泥における色素量は、表層で最大であり、

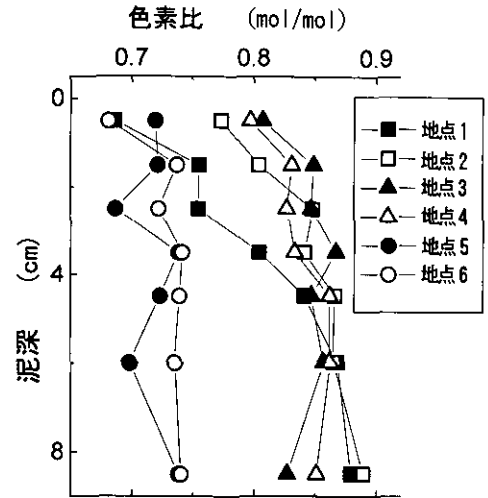


図15 東京湾奥調査地点1～6の底泥試料中の色素比 (mol/mol) の鉛直分布
色素比 = Pheopigments / (Chlorophyll a + Pheopigments)

泥深が大きくなるにしたがい減少した。一方、次式で定義される色素比は底泥層が深いほど高かった (図15)。

$$\text{色素比} = \text{pheopigments} / (\text{Chlorophyll} + \text{pheopigments})$$

この比の鉛直分布も湾中央部よりも浅海域底泥で摂食過程が活発に行われていたことを示している。

重量比でみた炭素とクロロフィル a の比は、三番瀬内では 1200 (表層) - 4000 (底層)、湾中央部では 250 (表層) - 490 (底層) であり、フェオ色素の鉛直分布と同様に、湾中央部のほうが底生生物による摂食が少ないことを示した。これらは、2.1.2 節に述べた底生生物の現存量の結果と良く対応した。

2.1.4 東京湾奥部の底泥における酸素消費と底泥からの栄養塩の溶出

東京湾奥部では、夏季に底層に貧酸素水塊が形成され、この貧酸素水塊が、水産業に被害を与えたり、また表層に湧昇して青潮を発生させたりし、社会問題となっている。底層が貧酸素化することで底泥からの栄養塩の溶出が増大し、これが富栄養化の進んだ東京湾で大きな栄養塩供給源の一つとなる。したがって、湾内の栄養塩の循環を考えるうえで、溶出量やその季節変動を知ることが重要となる。一方、浅海域では、底層が貧酸素状態になることはまれである。このことから、浅海域では底生生物が豊富に存在し、底生生物の呼吸による酸素消費やそ

の排泄による栄養塩の水中への回帰が重要な過程になる。

このような背景から、本研究では、東京湾奥部の定点にて、底泥からの栄養塩溶出量を季節ごとに測定し、特にそのN/P比について水質のN/P比の季節変動との関連を調べ、また、浅海域では、呼吸量と栄養塩溶出量の関係をみた。底泥における酸素消費や栄養塩の溶出などは、通常、現場で底泥のコアサンプルを採り、それを持ち帰って実験系で測定される。しかし、実験系で得られる値が、実際の現場と異なるのではないかという指摘がある。そこで、本研究では、コアサンプルによる測定を行ったが、さらに、現場で直接に測定するための装置を開発した。

(1) 底泥コアサンプルによる栄養塩溶出測定

栄養塩溶出実験に用いた試料は、東京湾奥の定点（前出の地点2, 4, 6（図2）と、茜浜地先の淺渚窪地、水深約25mの地点D）にて、離合社製不攪乱採泥器（コアは、アクリル製、直径11cm、長さ50cm）で採取した。地点6, Dについては、1996年4～12月に、また、地点2, 4, 6については、1997年2月～1998年9月に調査・実験を行った。採取した底泥試料は保冷容器で研究所まで運搬した後、採取当日から、図16の装置を使用して溶出実験を開始した。

不攪乱採泥器で採取したコアに、溶存酸素電極、採水

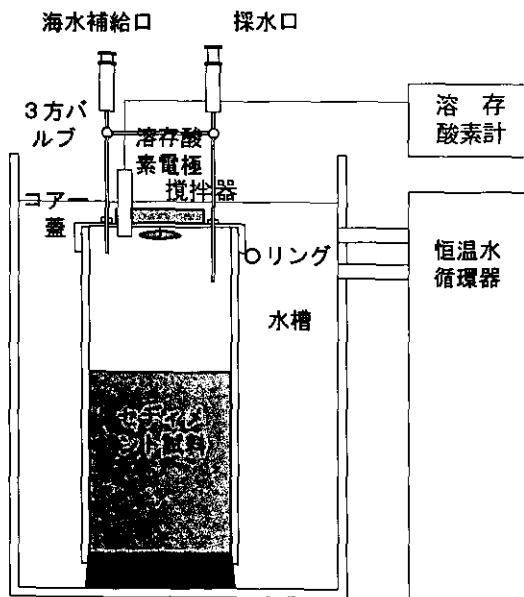


図16 栄養塩溶出・酸素消費測定装置の概略図
実験は、現場水温に設定された恒温水槽内で行った。

口や攪はん子を取り付けたコア蓋を被せて実験を行うことで、底泥試料の表面を乱すことを避けた。また、底泥表面の目視で確認できるマクロベントスを取り除いたが、底泥表面についてそれ以外の操作はしなかった。底泥上の海水には、現場で採水した底泥直上水（底泥表層上約1m）を0.22 μmのフィルターでろ過したものを使用した。

実験は、嫌気・好気の2条件で行ったが、嫌気には窒素ガスで置換した直上水を用い、好気では実験中空気ばっ気した。実験開始後、10日間にわたり、1～3日間隔で、約100 mlをシリンジで吸引し、同時に等量のろ過海水を注入して試料を採取した。試料中の栄養塩は自動分析計を用いた通常の方法で分析した。

窪地の地点D底層では、夏季に無酸素状態が続く。ここで得られた底泥試料からの栄養塩溶出速度は極めて高く、夏季の嫌気状態では、アンモニア態窒素濃度で421 mg/m²/d、リン酸態リン濃度で45 mg/m²/dに達した。沖合の地点6の試料についても夏季の溶出速度が高く、嫌気状態では、アンモニア態窒素濃度で78 mg/m²/d、リン酸態リン濃度で35 mg/m²/dという最大値を得た。地点6については、測定された栄養塩溶出速度からN/P比を計算し、その季節変化を求めた（図17）。東京湾奥部では、海水中のN/P比に季節変化があり、夏季に低く冬季に高いが、溶出した栄養塩のN/P比も同様の季節変化を示し、栄養塩の循環に占める溶出の寄与が大きいことが推察された。

栄養塩の溶出と底泥の酸素消費の関係を図18に示す。三番瀬内の地点2では、特に春～夏にかけて酸素消費が非常に高い値であった。底泥試料の表層に存在した目視

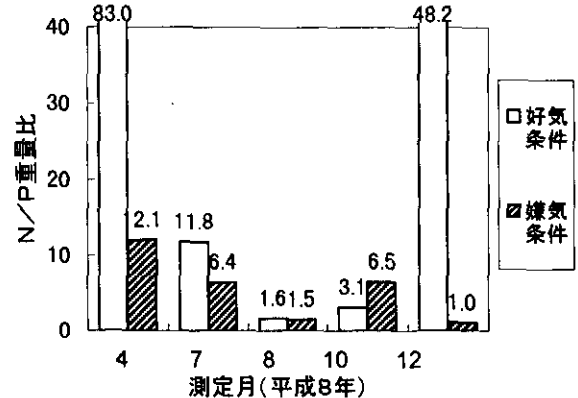


図17 東京湾央調査地点6で得られた底泥コアからの栄養塩溶出速度にみられたN/P比の季節変化

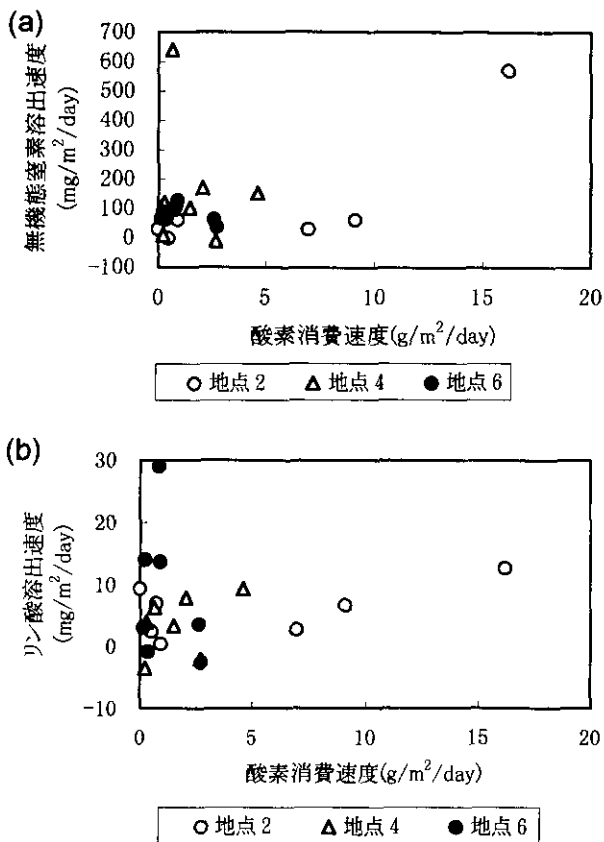


図18 東京湾奥部調査地点2, 4, 6で得られた底泥コアの酸素消費速度と栄養塩溶出量の関係
(a)無機態窒素溶出量, (b)リン酸溶出量

で確認できる大きさのマクロベントスは除去したが、底泥表面を乱すのを避けるため、フルイにかけるなどの操作をしなかったことから、底泥試料中にはマクロ・メイオベントスが存在していたと思われる。特に、三番瀬内では底生生物が豊富であった(2.1.3節)ことから、地点2で観測された酸素消費速度の大きな値は、バクテリアによる有機物分解で消費されたものより、底生生物の呼吸で消費された部分が多いものと考えられる。仮に水温25°C、塩分32 psuの海水を考えると、その飽和酸素濃度は7 g/m³である。したがって、図18に示されるような5 mg/m²/d以上の酸素消費速度は、水深2 m程度の三番瀬では、水柱の酸素を数日のうちに消費し尽くすことに対応する。このことから、浅海域の豊富な底生生物による生態系を維持するためには、大気からの溶け込み、海水の水平移流、光合成による生成などの酸素供給が重要な因子であると推察される。

図19には、無機態窒素とリン酸態リンの溶出速度の関係を、好気条件と嫌気条件のそれぞれについて表した。好気条件では、無機態窒素溶出速度は、特別に大きな値

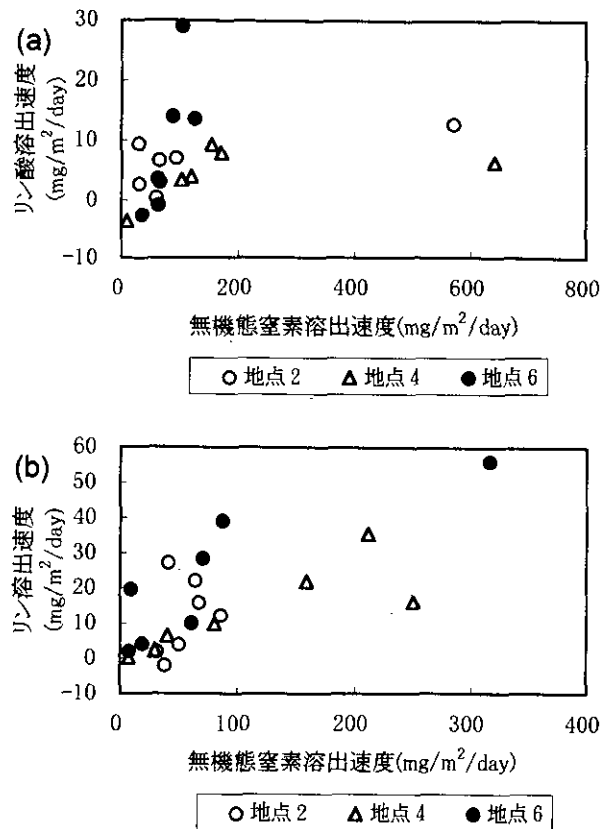


図19 東京湾奥部調査地点2, 4, 6で得られた底泥コアの無機態窒素とリン酸態リン溶出速度の関係
(a)好気条件, (b)嫌気条件

(約600 mg/m²/d; 図19)を除いて、200 mg/m²/d以下であった。地点4で得られた大きな値の原因は不明であるが、地点2で得られた大きな値は、上で述べた酸素消費速度と同様、底生生物による排泄が原因であろう。これら2点を除けば、好気、嫌気条件とも、無機態窒素溶出速度に測定地点の特徴は見られなかった。

リン酸態リンの溶出速度では、好気、嫌気条件とも地点6で大きな値が得られた。地点6では、夏季、底層が貧酸素化しており(2.1.1節)、海域底泥の直上水が長期間貧酸素状態であることが、その後のリンの溶出に大きく関与しているものと思われる。

(2) 現場設置型装置による底泥からの栄養塩の溶出量測定

本装置は、チューブで連結された測定槽、対照槽、ろ過槽の3つの部分からなる(図20)。測定槽は、通常のベルジャーと同じように底部が開いたアクリル製筒状容器で、内径29.6 cm、厚さ1.2 cm、高さ約20 cm、内容積は約14リットルである。この容器を海底泥の上に被せ、

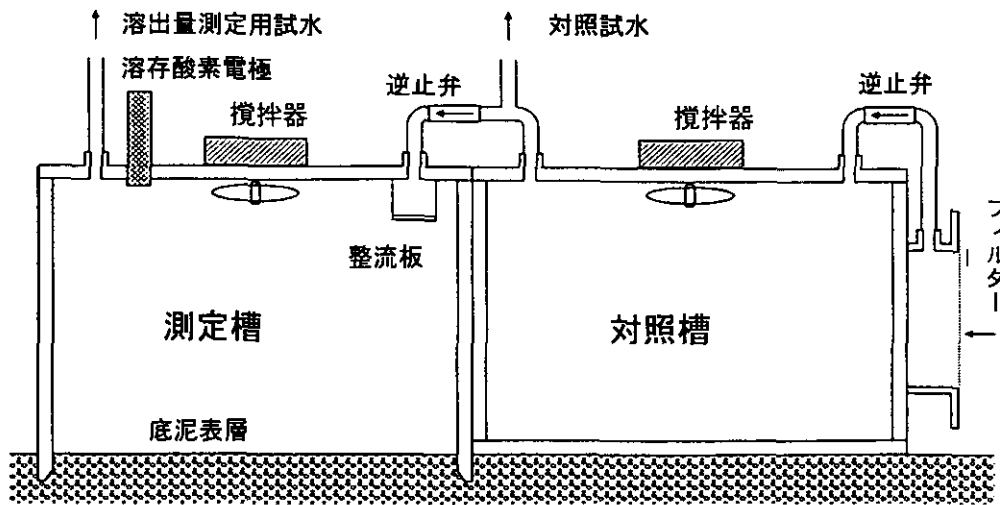


図20 現場設置型栄養塩溶出両測定装置の概略図

底泥からの溶出を測定する。対照槽は、測定槽と同様の容器であるが、底部は蓋で閉じられていて、底泥の影響を受けない。対照槽は、測定槽と直接に、チューブで連結されている。

従来のベルジャー法では、海底に設置する際に、現場環境条件を攪乱することなく、直上水を捕集するのが技術的に困難であり、今までに様々な改良がなされてきたが、まだ、完全なものはない。本装置では、設置後、数分たつて底泥環境が安定した後に、測定槽に取り付けた採水口から吸引することで、外界の直上水を、ろ過槽、対照槽を経由して、測定槽に導入する。この、外界と同じと考えられる、乱れのない直上水を測定槽に導入し、このときを、測定実験の初期状態とする。その後、数時間ごと、あるいは1日ごとに測定槽、対照槽の採水口から吸引して試料を得、その水質の変化から、底泥からの栄養塩、有機物などの溶出速度を測定する。

対照槽は、底部が閉じられているため、底泥の影響を全く受けない。したがって、対照槽内の水質変化を測定すると、底泥の影響のない、水の部分だけの変化速度が測定される。ここで得られる結果を用いれば、測定槽の水質変化を、水の部分の変化と底泥の影響による変化とに分離して測定できる。

溶出実験を、時刻 t_0 に系を閉鎖して開始し、時刻 t_0 に採水を行うまで続ける。このとき、実験期間 t (s) における溶出速度 f (g/m²/s) は、もし、時刻 t_0 における測定槽の栄養塩濃度 C_s (g/m³) 及び測定槽の濃度 C_R (g/m³) が直接測定されれば、次式のように求まる。

$$f = \frac{V_s \{ (C_s(t_b) - C_s(t_0)) - (C_R(t_b) - C_R(t_0)) \}}{A_s t} \quad \dots(1)$$

$$t = t_b - t_0 \quad \dots(2)$$

ここで、 V_s (m³)、 A_s (m²) は、それぞれ、測定槽の体積、底面積を表し、また、添字 S は測定槽を、R は対照槽を表す。しかし、本装置では、試料を吸引すると同時に、測定槽内に対照槽からも水が流入することを考慮しなければならない。この希釈の効果と、試料吸引中も溶出があることを考えれば、溶出速度 f は、測定される測定槽の濃度 C_m と、吸引速度 Q (m³/s) を用いて、次のように書き改められる。

$$f = \frac{V_s \{ F_s^{dil} (\bar{C}_m - C_R(t_b)) - (C_s(t_0) - C_R(t_0)) \}}{A_s \{ t + V_s (F_s^{dil} - 1) / Q \}} \quad \dots(3)$$

上式中、 F_s^{dil} は、試料採取量 V_m と測定槽体積 V_s とから、次式によって定義される無次元の値で、ここでは、希釈率と呼ぶことにする。

$$F_s^{dil} \equiv \frac{V_m / V_s}{1 - \exp(-V_m / V_s)} \quad \dots(4)$$

今、仮に式(3)で、 V_m を零にした極限を考えると、 $F_s^{dil} = 1$ となり、このとき、溶出速度を求める式(3)は、次のように書き表せ、式(1)と同等になる。

$$\lim_{V_m \rightarrow 0} f = \frac{V_s \{ (\bar{C}_m - C_s(t_0)) - (\bar{C}_1 - C_R(t_0)) \}}{A_s t} \quad \dots(5)$$

表3 現場設置型栄養塩溶出装置にて測定された三番瀬での栄養塩回帰速度

		装置1	装置2
栄養塩回帰速度 (mg/m ² /d)	NH ₄ ⁺	92	220
	PO ₄ ³⁻	17.7	44.3
底生生物量(g/m ²)		137	350
規格化した回帰速度 (mg/g/d)	NH ₄ ⁺	0.67	0.63
	PO ₄ ³⁻	0.13	0.13

我々の実験では、およそ、 $V_m/V_s=0.2$ であり、 $F_s^{dil}=1.1$ となる。このとき、式(1)と式(3)で求めた溶出速度の差は、最大で、約10%以下と計算され、希釈による影響は大きな誤差の原因とはならない。しかし、測定槽と同量程度の採水を必要とする場合には、式(4)で定義される希釈率が1に比べ大きな値となるので、式(3)で示した補正が重要になる。

平成9年(1997年)7月に本装置2台を三番瀬に3日間設置し、現場での栄養塩回帰速度などを測定した。設置には、干潮時にも干出ししない場所を選んだ。設置の状況は潜水により目視で確認した。実験期間中、溶存酸素計と試料採水用のチューブの一端を杭に固定して水面上に保った。現場には毎日船で行き、船上で採水した。採水した試水をその日のうちにろ過し、凍結保存した後に、試水中の栄養塩濃度を分析した。

三番瀬のような底層が貧酸素化せず底生生物の豊富な浅海域では、バクテリアが有機物を分解することによる栄養塩の溶出よりも、底生生物の排泄による栄養塩の水中への回帰が大きいのと考えられる。そこで、撤収の際に、装置で覆われていた部分の底生生物を採取し、その組成や乾重量を測定した。

測定された栄養塩濃度を式(3)に代入し、底泥からの栄養塩の回帰速度をアンモニア態窒素とリン酸態リンについて求めた(表3)。測定装置2台について得られた栄養塩回帰速度はそれぞれ異なっていたが、底生生物量で規格化した値は同程度であった。このことから、三番瀬における底泥からの栄養塩回帰の大部分は、底生生物由来であると推察された。

2.2 プランクトン生態系を通じての物質循環の実証的研究

海洋プランクトン生態系において、巨大な二本の柱と

して君臨しているのが「採植食物連鎖」と「微生物食物連鎖」である(図21)。概略的に言うなら、前者は「普通の」植物プランクトン(10~50 μm;珪藻や渦鞭毛藻)を基点とし、1mm程度のカイアシ類(特にカラノイダ目)、小型魚類、大型魚類へとつながる食物連鎖である。一方、微生物食物連鎖は約1 μmの大きさのバクテリアやピコ植物プランクトンを基点にする食物連鎖である。そして、彼らを数 μmの従属栄養性ペン毛虫類(heterotrophic nanoflagellates; HNF)が食べ、HNFを繊毛虫類が食べ、さらには繊毛虫類をカイアシ類が食べることで、採植食物連鎖と合流するという構造である。

プランクトンを通じての物質循環を知るということは、プランクトン群集構成要素間での食う一食われるを通じて、時間当たり、どれだけの量の有機物が各要素間(例えば植物プランクトン-カイアシ類)で移行しているかを評価することである。そして、上述した二本の食物連鎖上の生物群を通じての有機物の移行を定量的に明らかにすることが、対象海域での物質循環を知るうえで重要な知見になることは論を待たない。

しかし、それだけで、海の物質循環がわかったことになるのだろうか?むしろ、二本の食物連鎖上に名を連ねていないがために、これまで海洋生態学者によって無視・軽視されてきた生物群や捕食-被食関係が実はかなり大きな役割を果たしているのではないか?—これが本研究の出発点である。

そこで、1)「従属栄養性渦鞭毛藻類」の植物プランクトン捕食者としての重要性、2)カイアシ類による従属栄養性渦鞭毛藻など微小動物プランクトンの捕食、3)尾虫類のバクテリア・ピコ植物プランクトン捕食者としての重要性を研究し、これらの従来余り注目されなかった生物群集や捕食-被食関係がプランクトン生態系の中で重要な役割を果たしていることを示した。研究の対象海域は瀬戸内海・播磨灘(家島諸島)であり、得られた結論は、当地での夏季、約1カ月間の環境調査と現場実験に基づいている。

2.2.1 従属栄養性渦鞭毛藻類による植物プランクトンの捕食

〈背景〉

従属栄養性渦鞭毛藻類(heterotrophic dinoflagellates)は光合成色素を持たず、細胞外部から(主として固形の)有機物を取り込むことで従属栄養的に生活を維

内湾域の物質循環を考えるには、→ (採植食物連鎖) や、⇒ (微生物食物連鎖) で示される伝統的な連鎖経路だけでは不十分。⇨ で示した「従来軽視されてきた生物」が重要な働きをしている。

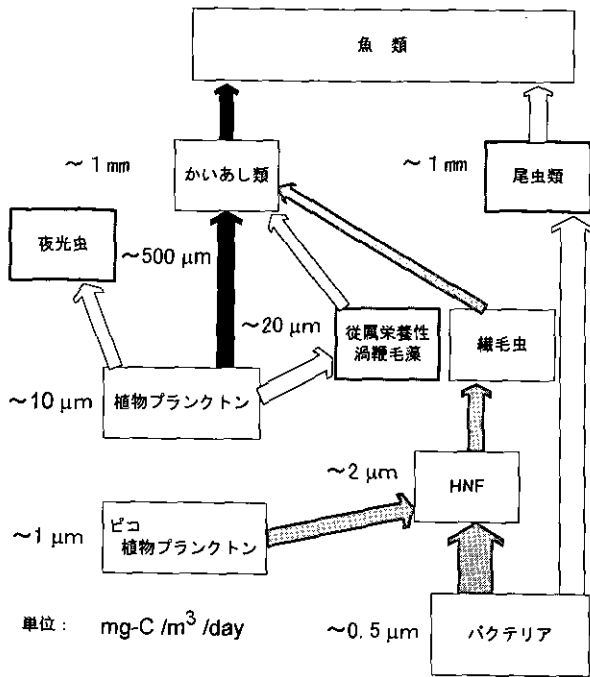


図21 プランクトン生態系の模式図

持っている渦ベン毛「藻」類である。彼らの存在は今世紀初頭から知られていたが、その研究は分類学を指向したものであり、生態的な側面はほとんど省みられることがなかった。

1970年代になると彼らが世界の海に広く分布していること、また、現存量的にも、纖毛虫類と肩を並べることが明らかとなったが、その生態的な役割についてはほとんど研究がなされなかった。1990年代に入ると、従属栄養性渦ベン毛藻類の摂餌・増殖に関する研究が、当研究所も含め、世界各地で行われ始めた。

そうした中で明らかになった点は、彼らは自分と同程度の大きさの餌を好んで食べるという特徴である。彼らの細胞長は大体10~100 μmであるから、餌としては「普通の」植物プランクトンが主体となる(図21)。したがって、従属栄養性渦ベン毛藻類は、体長では(従来代表的な植物プランクトン捕食者とされてきた)カイアシ類より一桁小さいものの、普通の植物プランクトンを主な餌とするするという点において、カイアシ類と競合関係にあると考えられる。

本研究では、夏の瀬戸内海において、従属栄養性渦ベ

ン毛藻類およびカイアシ類が植物プランクトンを捕食する量を推定し、従属栄養性渦ベン毛藻類の物質循環に果たす役割を検討した。なお、この研究は前特別研究期間に開始したものであるが、結果の見通しをよくするため、前特研で得られた結果の概略もあわせて本稿に掲載した。

<前特別研究の成果概略>

1993年夏、瀬戸内海から代表的な従属栄養性渦ベン毛藻である *Cyrodinium dominans* (細胞長40 μm) を単離してクローン培養を確立し、その増殖と摂餌に関する実験を行った。*G. dominans* は、*Gymnodinium mikimotoi* や *Heterocapsa triquetra* などの独立栄養性渦ベン毛藻類(いずれも細胞長約30 μm)や、珪藻類の *Thalassiosira* sp. (細胞長5 μm; 群体を形成する) を餌として速やかに増殖し、最大増殖速度は1.4 個体/d (一日2分裂) に達した。また、*H. triquetra* を餌とした際の、増殖速度の餌濃度依存性を調べ、増殖の閾値は30 cells/ml程度であり、100 cells/mlで増殖速度が0.5 個体/dに達することを示した。バクテリアや溶解有機物は餌として利用できなかった。摂餌速度の餌濃度依存性は、*H. triquetra* を餌として検討した。このとき、摂餌速度はMichaelis-Mentenタイプの式で近似でき、半飽和定数が180 cells/ml、最大摂餌速度が14 prey/predator/dなる値が得られた。こうした一連の摂餌・増殖実験の結果をもとに試算を行うと、*G. dominans* は、2000 cells/ml規模の *G. mikimotoi* 赤潮を、大体一週間くらいのタイムスケールで消滅させると予想された。

一方、1994年夏の瀬戸内海・播磨灘での海洋環境調査では、*G. mikimotoi* の赤潮に遭遇した。そして、赤潮の発生とともに、従属栄養性渦ベン毛藻類の *G. dominans* や *Cyrodinium spirale* の個体数が増加した。さらに、赤潮発生期間中、疑似現場法で調べたこれら従属栄養性渦ベン毛藻類の現場増殖速度は1.0 個体/dに達し(赤潮が発生していない場合は<0.5 個体/d)、体内には *G. mikimotoi* 由来の食胞がしばしば観察された。つまり、彼らは、赤潮生物を捕食することで個体群を拡大したことが明らかとなった。さらに、赤潮衰退時の個体数減少速度は、摂餌実験結果から予想される値と同程度であった。このように、従属栄養性渦ベン毛藻類は赤潮を消滅させるという重要な役割を果たしていることがわかった。

〈従属栄養性渦ベン毛藻による植物プランクトンの捕食；カイアシ類との比較〉

赤潮は年中発生しているわけでない。普通の海の状態では、従属栄養性渦ベン毛藻類は海の水質循環にどの程度の寄与をしているのであろうか？

1994年以降も毎夏、家島諸島周辺で、従属栄養性渦ベン毛藻類（夜光虫を除く；後述）の現存量の変化を追跡している。赤潮が発生していない状態での彼らの平均的な現存量（約 $7.5 \mu\text{g-C/l}$ ）を *G. dominans* 個体数に換算すると約 10 cells/ml となる。また、従属栄養性渦ベン毛藻類の増殖にとって好適な餌が、クロロフィル濃度として $0.5 \mu\text{g/l}$ （＝現場のクロロフィル量の約20%）程度存在していると仮定すると、この量は *H. triquetra*（球形換算直径として $15 \mu\text{m}$ ）に換算して 50 cells/ml に相当する。このとき、*G. dominans* の増殖速度は 0.3 個体/d 、摂餌速度は $3 \text{ prey/predator/d}$ という値が前特別研究の結果から予想される。これらの値を基に、従属栄養性渦ベン毛藻類の生産力及び植物プランクトンに対する摂餌速度を炭素ベースで試算すると $2.3 \mu\text{g-C/l/d}$ 及び $7.1 \mu\text{g-C/l/d}$ なる値を得る。

一方、植物プランクトンの主たる捕食者と長い間信じられてきたカラノイダ目カイアシ類はどの程度の働きを行っているのであろうか？1997年夏の播磨灘での調査では、カラノイダ目カイアシ類は期間平均で $4.4 \mu\text{g-C/l}$ 存在しており、ほとんどは、*Paracalanus parvus*によって占められていた。*P. parvus* の増殖速度は 20°C 以上で餌が十分にあるとき、 0.5 個体/d であることが報告されているから、平均生産量は $2.2 \mu\text{g-C/l/d}$ となる。また、摂餌速度は総成長効率に 0.33 を仮定して、 $6.9 \mu\text{g-C/l/d}$ となる。これらの値は従属栄養性渦ベン毛藻類について得られた値とほぼ同程度である。

すなわち、赤潮が発生していないときでも、植物プランクトンと従属栄養性渦ベン毛藻類を結ぶ食物連鎖経路は、これまで本流と考えられてきた植物プランクtonーカラノイダ目カイアシ類と同程度のフラックスを持つ経路として機能している。さらに、赤潮発生時には、当然のことながら前者は後者を圧倒する。こうして、植物プランクトンの運命は（少なくとも夏の播磨灘では）従属栄養性渦ベン毛藻類の存在を抜きにしては語れず、彼らが海の水質循環に重要な仕事をしていることが明らかとなった。

〈夜光虫；特殊な従属栄養性渦ベン毛藻〉

春から夏の海で鮮紅色の赤潮を形成し（漁業被害はほとんどない）、また、夜の海で妖しく煌めく夜光虫は実は従属栄養性渦ベン毛藻に分類される。ただし、細胞の大きさ（約 $500 \mu\text{m}$ ）が単細胞生物としては巨大で、細胞の形態も、そのほとんどを水胞が占めるなど、通常の従属栄養性渦ベン毛藻とその形状が大きく異なっているため、本研究では夜光虫が播磨灘での物質循環に果たす役割を、他の従属栄養性渦ベン毛藻とは別個に、1997年夏の播磨灘調査と現場実験から検討した。

夜光虫の細胞濃度は水柱平均で $1\sim 320 \text{ cells/l}$ の間で推移した（図22）。珪藻が赤潮を形成した時点で細胞濃度はピークに達し、その直後の珪藻の減少に同調して激減した。さらに、珪藻群集の復活にあわせ、ある程度回復した。バイオマスは水柱平均で $0.1\sim 50 \mu\text{g-C/l}$ の範囲にあり期間中の平均は $14 \mu\text{g-C/l}$ であった。これは同じ期間中のカラノイダ（*Paracalanus parvus* がほとんど）や「普通の」従属栄養性渦ベン毛藻のバイオマス平均値

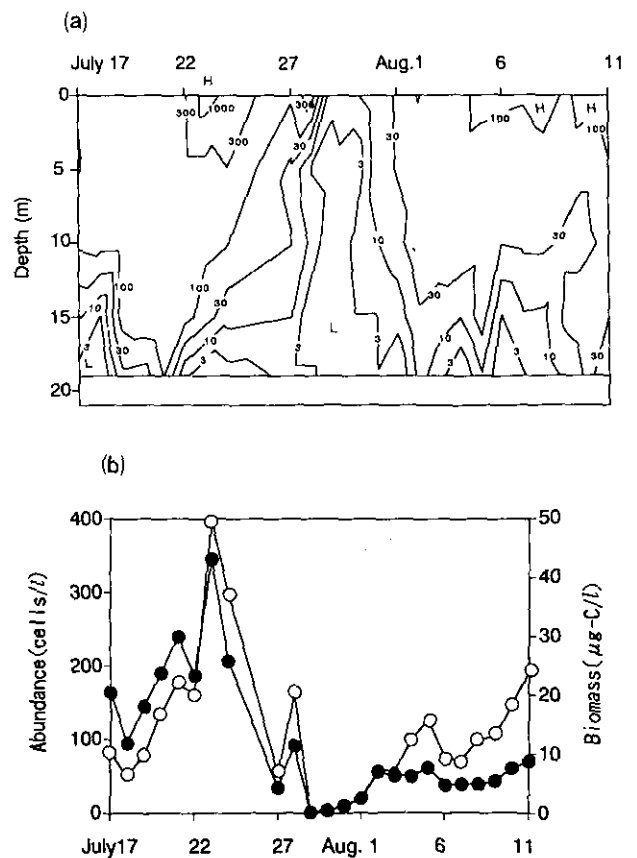


図22 夜光虫の消長
(a)夜光虫個体数 (cells/l) の深度・経日変化 (b)水柱で平均した個体数 (cells/l；●) 及び現存量 ($\mu\text{g-C/l}$ ；○) の経日変化

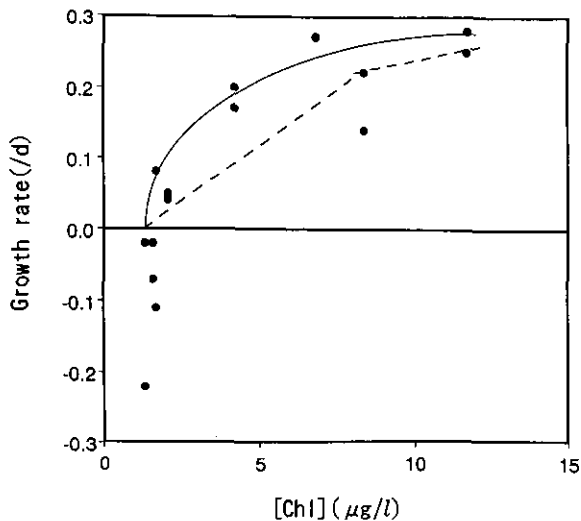


図 23 現場海水の中での夜光虫の増殖，増殖速度 (growth rate) のクロロフィル濃度 ([Chl]) 依存性
 実線は(1)式で計算した値。波線は室内培養した植物プランクトン (*Chattonella antiqua*) を単独で餌として与えた場合。

(4.2 及び 7.5 $\mu\text{g-C/l}$) を大きく上回っている。

夜光虫の現場海水の中での増殖実験は期間中 9 回行った。増殖速度 (μ) は 1.8 $\mu\text{g/l}$ に閾値を持ちクロロフィル濃度 ([Chl a]) とともに増加し，

$$\mu = 0.33 \sim 0.6 / [\text{Chl } a] \quad (/d) \quad (1)$$

で近似できた (図 23)。この関係と現場クロロフィル濃度を用いて各深度での夜光虫の増殖速度を推定し，さらにバイオマスと掛け合わせることで現場生産量 (P) を求めた。P は水柱平均で 0.1~5.2 $\mu\text{g-C/l/d}$ の範囲にあり，期間中の平均は 1.4 $\mu\text{g-C/l/d}$ であった。この値は同じ時期でのカイアシ類や「普通の」従属栄養性渦ベン毛藻での値 (上述) のほぼ 2/3 に相当する。したがって，夜光虫も瀬戸内海での物質循環 (特に植物プランクトンの行方) を議論する際には無視できない成分であることが判明した。

さらに，現場海水を用いた夜光虫の摂餌速度の測定を期間中 7 回行い，得られた値から，植物プランクトン群集に対する夜光虫の捕食圧を見積もった。しかし，夜光虫個体群が一日に植物プランクトン群集を捕食する量は植物プランクトン現存量の高々 10% に過ぎなかった。つまり，「普通の」従属栄養性渦ベン毛藻が赤潮植物プランクトンを数日のうちに消滅させるのに比べ，夜光虫の植物捕食能力はたかが知れていることも明らかになっ

た。

2.2.2 カイアシ類による従属栄養性渦ベン毛藻と繊毛虫の摂食

2.2.1 節で示したように，瀬戸内海では従属栄養性渦ベン毛藻は植物プランクトン捕食者として重要な役割を果たしている。また，繊毛虫は，微生物食物連鎖の中で，HNF 捕食者として機能している。したがって，これらの微小動物プランクトンが，さらに高次の捕食者によってどの程度食べられているのかを評価することは内湾域での物質循環を明らかにするうえで重要である。このような観点から，カイアシ類による繊毛虫の捕食が，主として海外の研究者によって調べられてきた。しかし，従属栄養性渦ベン毛藻に対する捕食はこれまでほとんど検討されなかった。そこで，1997 年夏，播磨灘にて現場実験を行い，カイアシ類による，従属栄養性渦ベン毛藻を主体とした微小動物プランクトンの捕食速度を求めた (図 21 参照)。

1997 年に限らず，夏の瀬戸内海では，*Paracalanus parvus* がカイアシ類の中では圧倒的に卓越する。したがって，*P. parvus* の成体雌を用いて，微小動物プランクトンの捕食実験を行った。その結果，*P. parvus* は従属栄養性渦ベン毛藻を活発に捕食し，捕食する効率 (ろ水速度) は独立栄養性渦ベン毛藻に対する値と同程度であった。一方，繊毛虫も活発に捕食されたが，ろ水速度はベン毛藻に対する値のほぼ 1/2 であった。こうしたデータと微小動物プランクトンの現存量から，*P. parvus* は生存に最低必要な炭素源を微小動物プランクトンのみから，ほぼまかなえることがわかった。また，*P. parvus* は珪藻類 (植物プランクトン) を捕食するが，現場実験では実験上の制約 (実験容器内の海水が十分混じらないため，遊泳力のない珪藻は容器の底に沈んでしまう) によりその捕食速度を見積もることができなかった。したがって，*P. parvus* が植物プランクトンと微小動物プランクトンをどの程度の割合で捕食しているのかが推定できず，今後の課題として残った。

一方，*P. parvus* 個体群の現存量と現場実験の結果から，このカイアシ類は，一日当たり，従属栄養性渦ベン毛藻及び繊毛虫現存量のそれぞれ 15，8% を期間平均で捕食すると見積もられた。さらにカイアシ類現存量がピークに達した時点では，これらの値は 36，18% に達した。したがって，カイアシ類は特に従属栄養性渦ベン毛

藻に対してかなり大きな捕食圧を示し、植物プランクトン→従属栄養性渦ベン毛藻→カイアシ類とつながる経路の重要性が示された。

2.2.3 尾虫類と微生物食物連鎖

〈背景〉

尾虫類は脊索動物門に属する生物で体長数 mm のオタマジャクシ様の動物プランクトンである。彼らは世界各地の海に生息し、特異な生活様式で有名である。すなわち、彼らはゼラチン質のハウスと呼ばれる紙風船状の袋を作り、この中に生活している。そして尻尾を振動させると、フィルターをついたハウスの入り口から、フィルターの目合いより小さな粒子が海水とともに内部に流れ込む。この際、尾虫類は投網状の摂餌フィルターをハウス内に展開し、流れ込んできた粒子を捕そくし、これを餌として利用する。この摂餌フィルターはバクテリアサイズの粒子までとらえることができるので尾虫類はピコ・ナノプランクトン捕食者として生活している。

バクテリア及びピコ植物プランクトンによる有機物生産は、微生物食物連鎖を通じてその多くが無機化されてしまい、高次栄養段階にはほとんどつながらないというのが現在の海洋生態学界の趨勢である。ところが、尾虫類はピコプランクトンを直接捕食できるので、これら2つの生物群をつなぐ経路は微生物食物連鎖のバイパスとして機能しうる(図21参照)。そして、1995年夏の播磨灘調査では、この経路の重要性を具体的に示す結果が得られた。

〈瀬戸内海での尾虫類〉

1995年には前年に引き続き *G. mikimotoi* による赤潮が発生した。赤潮の発生とともに、前年と同様、従属栄養性渦ベン毛藻類の個体数が増加を開始したが、発生後3日目からは有鐘織毛虫類の *Favella ehrenbergii* が激増し、赤潮生物を食べ尽くすとともに、従属栄養性渦ベン毛藻類まで食べ切ってしまった(図24 a)。さらに、有鐘織毛虫類は HNF も食べ尽くしてしまい、その結果として、天敵がいなくなったバクテリアとピコ植物プランクトンの個体数が激増した。このピコプランクトンのブルームは、捕食者不在のためしばらく続くと予想されたが、ある日、彼らの個体数は激減した。そして、この激減とともに尾虫類の一種、*Oikopleura dioica* の個体数とバイオマスが激増した(図24 b)。

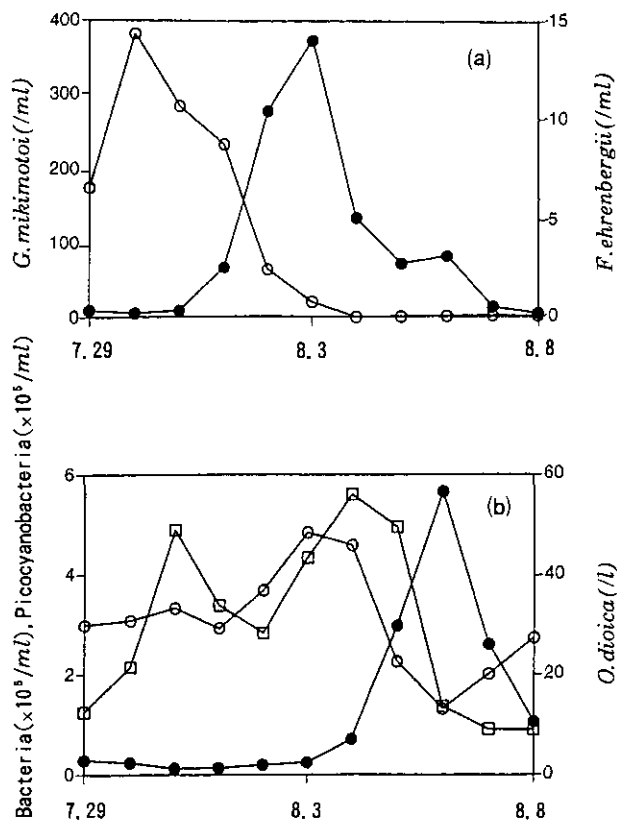


図24 (a)赤潮プランクトン (*Gymnodinium mikimotoi*; ○) とこれを食べる有鐘織毛虫 (*Favella ehrenbergii*; ●) の個体数変化 (b)バクテリア(○), ピコ植物プランクトン(ピコサイズのラン藻; □), および尾虫類(*Oikopleura dioica*; ●) の経日変化
いずれも0 mと10 mでの値の平均値。

この変化は、*O. dioica* がピコプランクトンを活発に捕食し増殖に利用したと考えることで、定性的には説明できるが、このとき同時に行った実験により、より具体的にこの考えが確かめられた：ピコプランクトンが卓越している8月4日に、表層海水を100 μ mのフルイでろ過し、これらの瓶を現場海水中に24時間吊した。このとき、ろ過海水には卵からふ化したばかりの小形の *O. dioica* が大量に混入していた。したがって、この実験は *O. dioica* の現場培養実験になった。その結果、実験開始時に躯幹(trunk; オタマジャクシ型のからだの「頭」に相当する)長100 μ mの *O. dioica* が、24時間後には躯幹の長さで2倍、個体当たりの炭素量では5倍に増大した(図25)。これは増殖速度に換算すると1.66個体/dという多細胞生物としては驚くべき高い速度である。しかも、海水中にはナノプランクトンがほとんどいないのであるから、この増殖はピコプランクトンを捕食することで達成されたと考えられる。

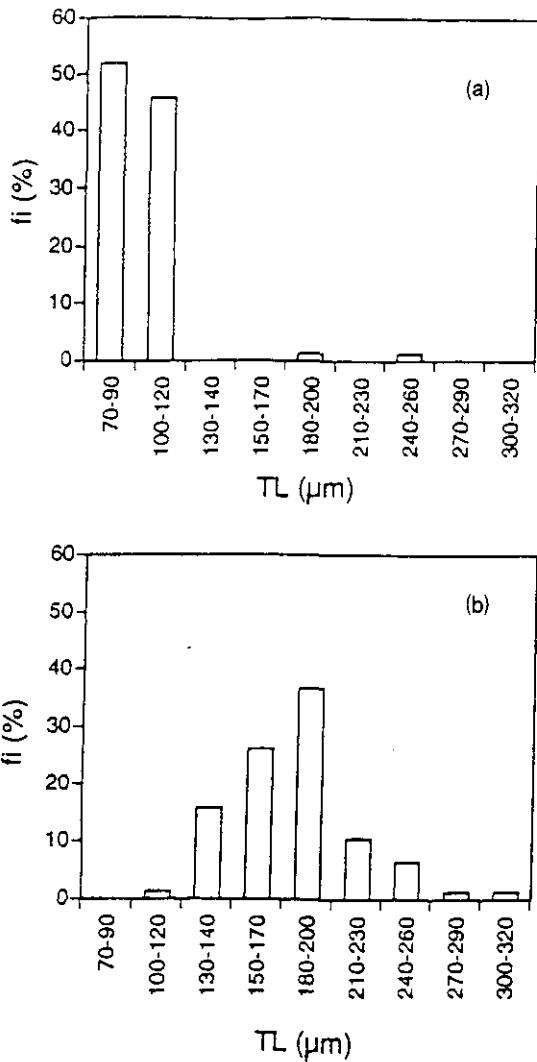


図 25 尾虫類 *Oikopleura dioica* の躯幹長 (TL) の時間変化 (a) 実験開始時: TL はほぼ 100 μm 程度である。(b) 24 時間後: TL の大きさが 200 μm 前後にまで増加している。

さらに、総成長効率として 33% を仮定することで、*O. dioica* によるピコプランクトン摂餌速度が計算できる。その結果、8 月 4 日から 6 日にかけてのピコプランクトンの急速な減少に *O. dioica* による捕食が重要な役割を果たしていることが推察された。また、*O. dioica* が急速に卓越した時点での彼らの生産量は約 20 $\mu\text{g-C/l/d}$ となり、カイアシ類による生産 (4.2 $\mu\text{g-C/l/d}$) を圧倒していた。このように、赤潮直後の非常に特殊な環境下ではあるが、尾虫類がピコプランクトン捕食者として重要な仕事をなすことが明らかとなった。

しかし、この一例だけでは尾虫類が夏の瀬戸内海で恒常的に重要な仕事をしているかどうかはわからない。もしかすると、1995 年に見られたような *O. dioica* の大発

生はそうそう起こらず、その生産力も、ある程度の期間で平均すればカイアシ類を大きく下回るのかもしれない。そこで、1997 年夏には、尾虫類 (*O. dioica*, *O. longicauda*) の現存量の経日変化を、採水深度を細かくとることでより詳細に追跡した。その結果、尾虫類の現存量はピコ・ナノプランクトン現存量のピーク直後に最大値 (8.0 $\mu\text{g-C/l}$) を示し、期間平均値は 3.1 $\mu\text{g-C/l}$ となった。これは同じ時期、場所でのカラノイダ目カイアシ類の現存量の約 70% であった。また、増殖速度として 1.66 個体/d という 1995 年に得られた値を用いて尾虫類の生産力を計算すると、期間平均値 (5.1 $\mu\text{g-C/l/d}$) はカラノイダ目カイアシ類 (2.2 $\mu\text{g-C/l/d}$) を圧倒した。一方、尾虫類が摂餌するピコ・ナノプランクトンの量は、総成長効率 = 33% の仮定のもとで 15 $\mu\text{g-C/l/d}$ となる。こうして、尾虫類は 1995 年だけの一発屋ではなく、夏の播磨灘での物質循環に大きな役割を果たしていることが予想された。

2.2.4 水中の生態系と底生生態系の関係の解析

水中で植物プランクトンによって生産される有機物のうち、かなりの部分は底泥に供給される。したがって、底泥に供給される有機物の運命を評価することはプランクトンを通じての物質循環の研究同様に重要であると考えられる。しかしながらこうした立場からの研究は、我が国では、干潟や水深数メートル以下の極めて浅い海域について集中的に行われ (2.1 参照)、播磨灘のような、水深が 20 メートル前後の海域ではほとんど調べられていない。

こうした研究の空白を将来解消するための手始めとして、1998 年夏、播磨灘 (家島諸島定点 B (水深 21 m) 及びその周辺) において大型 (> 1 mm) 底生動物 (マクロベントス) の現存量を測定した。調査地点の底質は、播磨灘でよく見られるような、泥分率 90%、強熱減量 (有機物量の目安) 7% の粘土・シルト質である。また、1985 年以來の観測結果に基づけば、調査定点で低層の溶存酸素が 3 mg/l (貧酸素水の目安) を下回することは極めてまれである。

従来、播磨灘の底生生物では二枚貝のシズクガイやゴカイの仲間のヨツバネスピオが優占すると言われてきた。ところが、1998 年の調査では、殻長 3~4 cm の泥ウニ、オカメブク (*Echinocardium cordatum*) が卓越し、個体密度が 28 個体/ m^2 に達し、湿重量的には他の大

型底生生物を圧倒していた。また、複数の底引き漁師からの聞き取り調査によると、オカメブクは播磨灘の底泥に広範囲に分布しており、彼らの卓越は家島周辺だけの特異現象ではないと考えられた。

オカメブクをはじめとするウニ類はしっかりとした殻をもつために湿重量は他のベントスに比べて大きい。しかし、殻の中は「すかすか」で、体物質が占める割合は小さい。そこで、オカメブク個体群のバイオマスを評価するために、かれらの有機物量の殻の重さ依存性を求めた(図26)。その結果、生殖巣を除いた部分の有機物量は殻の乾燥重量のほぼ10%となり(図26 a)、生殖巣の有機物量は殻の重量に対し、下に凸の増加を示した(図26 b)。これらの関係と、現場でのオカメブクの殻重量の頻度分布を併せることでオカメブク群集のバイオマスを計算した。

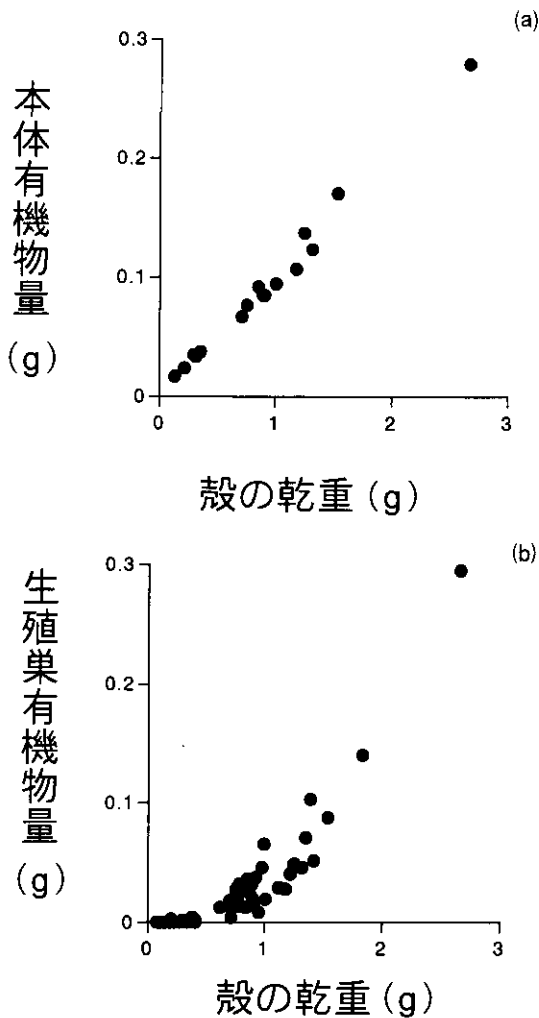


図26 オカメブクの有機物量の殻重量依存性
(a)生殖巣を除いた体内有機物量の殻乾燥重量依存性
(b)生殖巣の殻乾燥重量依存性

さらに、オカメブク以外のマクロベントス群集についてもバイオマスを測定した(450°Cでの強熱減量を測定)。その結果、オカメブクは、全マクロベントスのバイオマスの60%に達しており(図27)、かれらは体積が大きいだけでなく、バイオマスの的にも家島周辺で重要なマクロベントスであることが明らかとなった。

オカメブクが底泥をめぐる物質循環に果たす役割を評価するためには、かれらの現場における増殖速度を知ることが必要である。そのために、1998年夏の調査で採取されたすべてのオカメブクの殻重量の頻度分布を求めた(図28)。すると、頻度曲線は明瞭な3つの山に分解できた。さらに、それぞれの山に対応する個体の年齢を殻の年輪から推定したところ、殻重量の軽いものからそれぞれ0才、1才、そして(多分)2才と帰属できた。そして、それぞれの山の殻の重さから、各年齢群の有機

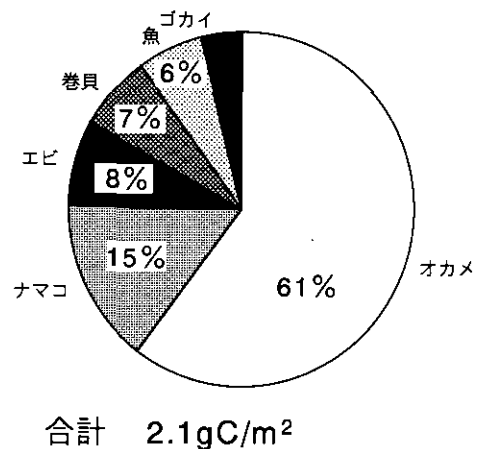


図27 家島諸島周辺(定点B)でのマクロベントスバイオマス全バイオマスは2.1g-C/m²であり、瀬戸内海の中でも、突出した値ではない。

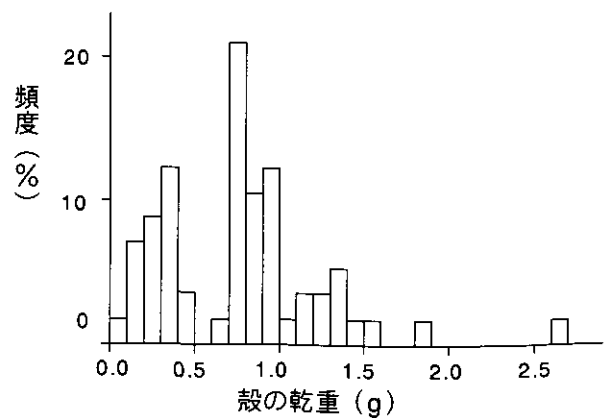


図28 オカメブク、殻乾燥重量の頻度分布

物量を求める(図 26 参照)と、増殖速度として 0.7/y(一年で有機物量が 2 倍)という値が得られた。この値にオカメブンプクのバイオマスを乗じて、彼らの年間有機物生産量を計算すると約 1 g-C/m²/y 程度となった。一方、瀬戸内海全域での全マクロベントス群集による有機物生産は、3 g-C/m²/y 程度であると言われている。したがって、オカメブンプクによる有機物生産はマクロベントス全体の生産の中でかなりの部分を占めると予想される。

今後は、これまでベントス研究者によってほとんど無視されてきたこの生物の、底泥での物質循環に果たす役割(例えば、どのくらいの速度で底泥を彼らが飲み込み、どの程度の有機物量を処理しているか?など)を評価することが肝要であると思われる。

現在、こうした立場からのオカメブンプクの生態研究を続行中である。また、水柱から底泥への有機物供給フラックスの測定と、フラックスの変動に伴う底泥での酸素消費速度やバクテリア活性の変化、さらに、マクロベントスよりも小さなメイオベントス(特に線虫類)の物質循環に果たす役割などについても研究を展開中であり、今後、一連の pelagic-benthic coupling 研究の成果を公表してゆきたい。

2.3 東京湾奥部における底生生物による水質浄化

東京湾奥の主に砂質の浅海域では、底生生物として二枚貝が優占していた(2.1.2 節)。浅海域での物質循環における懸濁物食性の二枚貝の役割は、摂取・排泄に伴う循環と、体組織として同化されてからの循環とに大きく分かれるが、摂食と排泄に伴う循環は一次生産者である植物プランクトンと直接かかわることから、水域での物質循環を考えるうえで極めて重要である。

本節の研究では、浅海域の例として三番瀬を採り上げ、現場調査により三番瀬内の二枚貝の水平分布を明らかにし、ろ過速度、排泄速度など実験系で測定した値と併用することで、そこでの二枚貝による水質浄化や窒素循環を検討することを目的とした。

2.3.1 三番瀬における底生生物の現存量

東京湾浅海域に優占する潜砂性の懸濁物食性二枚貝は、アサリ、バカガイやシオフキガイが知られており、特に水産重要種である前二種ではその生理、生態的研究は比較的進んでいる。しかし、シオフキガイについては生産的に重要でないためかその生理、生態はもとより物

質循環に果たす役割についても見解が乏しいのが現状である。そこで本研究では、シオフキガイにも重点を置き、三番瀬に出現する底生生物量、特に二枚貝の水平分布を調査した。

(1) 底生生物調査方法

三番瀬における二枚貝等による水質浄化を推定するために、三番瀬内全域にわたる生物量が必要であった。そこで、二枚貝など底生生物の水平分布調査を 1998 年 6 月 13 日に実施した。三番瀬は東京湾奥に位置し、水深 5 m 以浅の面積は 15.7 km² であり、市川航路を挟んで東側が船橋エリア、西側を市川エリアと呼ばれている(図 2)。船橋エリアの 5 定点(調査地点 F-1~5; 図 2)にて各地点 3 回を、また市川エリアに 12 定点にて各定点 1 回の採集を実施した(図 30)。船橋エリアの 5 地点は、1998 年 3 月から 1 年間、1 回/月の頻度でシオフキガイの分布を調査し(2.1.2 節)、その季節変化を調べた調査地点と同一である。

通常の採泥器(例えばスミス・マッキンタイアやエクマン・バージ型など)を用いる方法では、底質が砂地の場所では深く採取ができないので、本研究では、船橋漁業協同組合の協力を得て、アサリなどの漁獲に用いる水産漁法である大巻漁法を、二枚貝の採取時に併用した。

大巻漁法とは、4~5 m の棒(ふり棒)の先端にステンレス製カゴが取り付けられ、そのカゴ口の下部に爪が取り付けられている漁具を用い、海底を搔くように操作し貝類を採取する方法である(図 29)。カゴの間口は 78 cm、高さ 60 cm であり、17 本付いている爪の長さは 20 cm である。通常は成貝のみを漁獲するためカゴの目が大きいですが、ここでは幼貝も調査対象とするためカゴの内側に 2 mm の網を張ったものを使用した。また、カゴの曳く距離を 1 m とした。大巻漁法の定量化をチェックするために、カゴの曳く距離と爪の搔く深さをダイバーにより測定した。

マクロベントス試料は採取後、1 mm メッシュでふるい、そこに残ったものを中性ホルマリンで 10% になるように固定した。その後、固定した動物の種類、個体数、湿重量を測定した。

水平分布調査では、実験室に持ち帰った試料につき、シオフキガイの殻と軟体部を分け、それぞれの乾燥重量(80°C, 24 時間)も測定した。また、優占的に出現したアサリとバカガイ二種の乾燥重量も測定した(80°C, 72



図29 本調査で使用した大巻漁法
船橋漁業協同組合の協力による。

時間)。なお、船橋エリアの各定点のシオフキガイ個体数と重量のデータは各定点3回の平均値として示した。また、当日の表面海水中の懸濁物質の炭素、窒素含有量を測定した。

(2) 底生生物の水平分布

大巻漁法を用いた生物採取の定量性について、6回の測定から、曳くカゴの平均距離は106 cm (S.D. 14 cm)、底質を掻く深さの平均は12 cm (S.D. 5.7 cm) が求められた。また、大巻で掻いた跡の深さ15 cm 以深の底質中からは二枚貝はほとんど出現しなかったため、大巻による採集でその場の二枚貝類はすべて採集できたと見なした。

水平分布調査を行った1998年6月13日の三番瀬の表面水温は19.1°Cで、塩分は32.8 psuであった。また、三

番瀬表層海水は赤潮状態で、懸濁態窒素濃度は0.429 mg-N/Lであった。

三番瀬に出現したマクロベントスの出現種は44種で、個体数での優占種は多毛類の *Pseudopolydora* sp. (スピオ科) と甲殻類の *Corophium acherusicum* (アリアケドロクダムシ) であり、生物量では *Mactra chinensis* (バカガイ)、*Ruditapes philippinarum* (アサリ)、*Mactra quadrangularis* (シオフキガイ) の3種で全体の約83%を占めた。シオフキガイ単独では全体の約26%であった。

三番瀬における二枚貝の水平分布(現場で測定した殻付き湿重量)を図30に、また、各定点でのシオフキガイの生物量を表4に示した。三番瀬内の殻付き湿重量で表した平均的な生物量は、シオフキガイ、アサリ、バカガイで、それぞれ、86.6 g/m²、72.2 g/m²、67.3 g/m²であった。図30にみられるように、シオフキガイは、個体数、生物量とも市川エリアよりも船橋エリアのほうが多かった。船橋エリアでは中央部に多く、市川エリアでは沖合にのみ出現した。三番瀬内全調査地点についての平均生物量は、殻部の乾重で34.9 g/m²であり、軟体部乾重で2.35 g/m²であった。アサリは広く分布していたが、バカガイは水深の大きな測点に多く分布しており、それぞれの二枚貝で分布に特徴がみられたが、その原因については現在のところ不明である。

出現したシオフキガイの殻長頻度分布をみると、殻長10 mm以下と40 mm付近に2つの山が見られたが、後者の山の個体数が多いことから、1998年6月の調査時には、三番瀬では40 mm前後のグループが優占していた。

シオフキガイの殻長と軟体部乾燥重量との関係では次の式が得られた(図31)。

$$Y=0.0132X^{2.62}$$

$$r^2=0.904$$

ここで、Yは軟体部乾燥重量(g)、Xは殻長(cm)を表す。

また、シオフキガイの殻付湿重量と軟体部乾燥重量の関係を図32に示す。次節で、二枚貝の、実験系で測定された代謝に関する速度と、現場における生物量を用いて、現場での二枚貝による水質浄化能力を推算する。実験系では生物量として、代謝の基本となり、また炭素量への換算が可能な軟体部乾燥重量を用いる。一方、現場ではすべての個体について軟体部乾燥重量を求めるのは困難

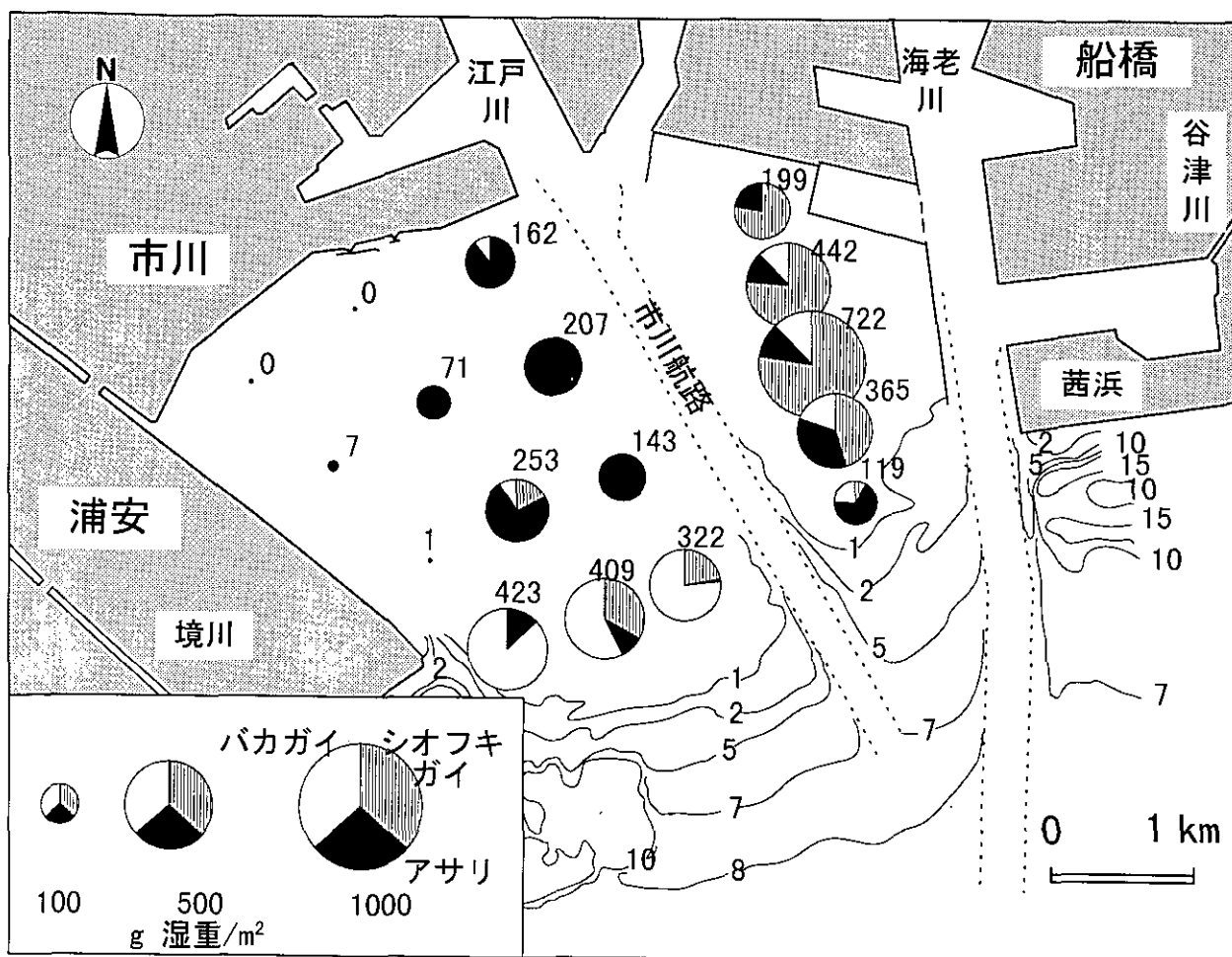


図 30 三番瀬における二枚貝の水平分布 (1998 年 6 月)

表 4 東京湾三番瀬におけるシオフキガイの生物量 (1998 年 6 月)

地点名	湿重量 (g/m ²)			乾重量 (g/m ²)			
	殻部	軟体部	合計	殻部	軟体部	合計	
船橋エリア	F-1	55.7	30.4	86.1	54.4	4.6	59.0
	F-2	126.4	62.1	188.5	123.3	9.8	133.1
	F-3	227.0	100.0	327.0	217.1	14.7	231.8
	F-4	69.7	30.6	100.3	65.3	4.4	69.7
	F-5	4.1	1.8	5.9	3.8	0.2	4.0
市川エリア	I-8	17.1	7.3	24.4	16.6	1.0	17.6
	I-11	76.0	23.2	99.2	74.5	3.5	78.0
	I-12	39.1	7.2	46.3	38.4	1.7	40.1
平均 ^{a)}	36.2	15.4	51.6	34.9	2.35	37.3	

a) 全調査地点17地点についての平均

であるため殻付湿重量や殻長を測定する。したがって、水質浄化能力を推算するためには、殻付湿重量や殻長から軟体部乾燥重量を求めるための換算係数が必要となる。

ここで求めた関係からこの換算係数を得ることができる。図 32 中、現場とは、調査時に採取し固定後そのまま計量した湿重であり、計測が一番容易であるが、殻内に水分を含むため再現性のあるデータが期待し難い。また、

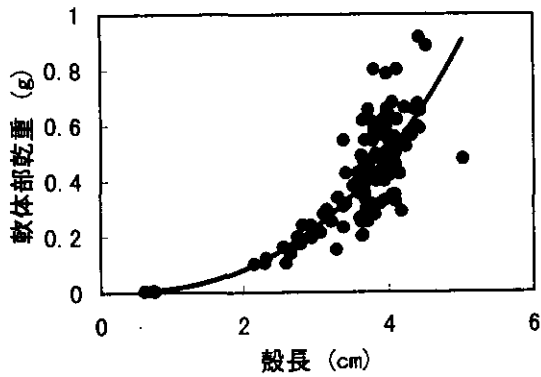


図 31 シオフキガイの殻長と軟体部乾重量の関係

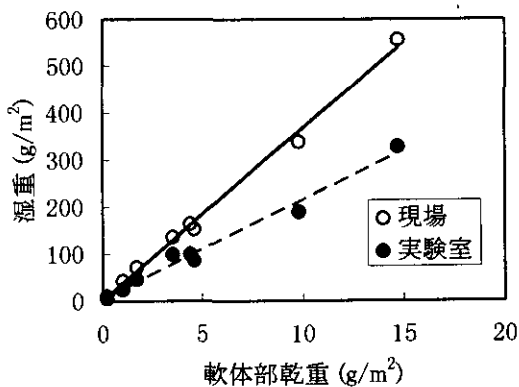


図 32 シオフキガイの殻付湿重量と軟体部乾重量の関係
現場と実験室については、本文参照

同図中、実験室とあるのは、採取した試料を実験室を持ち帰り、殻と軟体部とに分けてから湿重量を測定したもので、手間が掛かるため、すべての試料についてこの操作を行うのは困難な場合がある。

本研究で、これら殻付き湿重 (g/m^2) と軟体部乾重 (g/m^2) とを比較した結果、以下のような良い相関が得られた (図 32)。

$$\begin{aligned} \text{湿重}_{\text{現場}} &= 36.6 \times \text{軟体部乾重} + 1.5 \\ r^2 &= 0.995 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{湿重}_{\text{実験室}} &= 21.0 \times \text{軟体部乾重} + 5.0 \\ r^2 &= 0.982 \end{aligned}$$

これら良い相関が得られたことから、すべての試料につき軟体部乾燥重量を測定しなくとも、現場で測定が可能な二枚貝の殻長や殻付き湿重を基にして、良い精度でその現存量を推定できることが期待される。

2.3.2 二枚貝の海水浄化能力

(1) 実験方法

浅海域における底生生物の浄化能を評価するために、その基礎となる底生生物の呼吸速度、ろ過速度、排泄速度を実験系で測定した。本節の研究では、底生生物として他の研究との関連から (2.1.2 及び 2.3.1 節) シオフキガイを選んだ。

呼吸速度、ろ過速度、排泄速度実験に用いたシオフキガイと海水は、1998年6月から1999年1月の期間、ほぼ2カ月に1回の頻度で、三番瀬の船橋エリアで採取した。しかし、1998年9月には、三番瀬に大量の淡水が流入した影響 (2.1.2 節) で二枚貝が激減し、実験に必要な量のシオフキガイが採取できなかった。二枚貝は、現場海水 20 l の入ったクーラーボックスにいれ、エアレーションを施し、水温上昇を防ぐ処理 (保冷剤の投入) をし、実験室まで運搬した。

つぎに実験室内で厚さ 5 cm の底砂を敷いた水槽に現場海水 60 l と採取貝をいれ、現場水温とほぼ同じ水温に調温し、実験開始まで馴馴させた。実験に用いた貝はすべてこの馴馴期間中に潜砂した活性の高いものを使った。貝の採取から実験開始までは5時間以内とした。

いずれの実験も内径 11 cm、高さ 20 cm のアクリル製容器を用い、これに貝が潜砂できるように厚さ 5 cm まで砂を入れた (図 33)。この砂のサイズは 250~500 μm であり、蒸留水で良く洗浄し、乾燥させたものを用いた。実験は容器 1 個につき貝 1 個体をいれ、63 μm メッシュを通過させた現場海水を容器に満たし、蓋で密閉した。容器を各測定月の現場水温に設定した恒温水槽に入れ実験を行った。実験データは、すべてアクリル製容器内で実験初期に潜砂した個体のものを解析に用いた。実験終了後、貝のサイズと殻、軟体部の湿重量と乾燥重量を測定した。

ろ過速度測定実験はバッチ式とし、海水中の植物プランクトンのクロロフィル a の減少により、ろ過速度を算出した。試験時間は 1~2 時間とし、クロロフィル a 量は実験開始から 15~30 分間隔で 50 ml を採水し、直径 25 mm の GF/F フィルターでろ過したものを常法によって処理し、蛍光分析法により測定した。測定されたクロロフィル a 量の減少から、次式を用いて二枚貝のろ過速度を求めた。

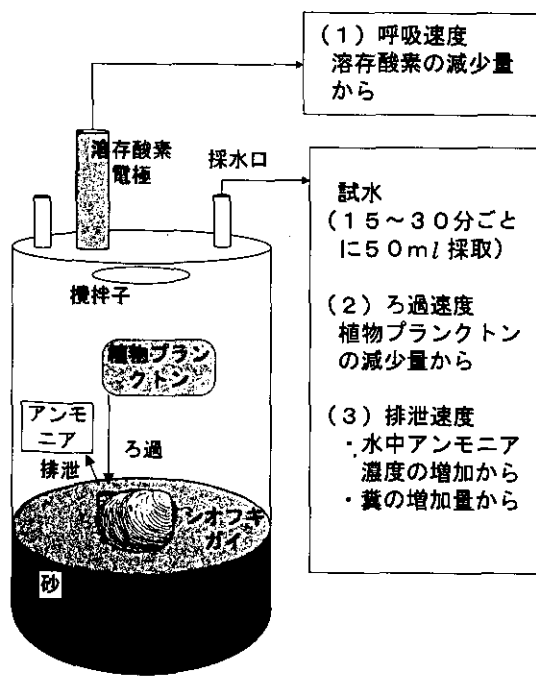


図 33 実験装置概略図

$$F = \left(\frac{V}{t} \right) \left[\ln \left(\frac{C(0)}{C(t)} \right) - \ln \left(\frac{C_b(0)}{C_b(t)} \right) \right]$$

ここで、 F はろ過速度、 V は試水量、 $C(t)$ は貝をいれた実験での時間 t でのクロロフィル a 量、また、 $C_b(t)$ は貝を入れないコントロール実験での時間 t でのクロロフィル a 量を表す。

呼吸速度は、アクリル製容器内の溶存酸素の減少から、同様の式を用いて算出した。溶存酸素の測定には、Strathkelvin Instruments 社製の 6 チャンネル溶存酸素計 Model 928 を使用し、溶存酸素計の校正には空気と窒素ガスのそれぞれを通気した容器を用いた。

溶存態無機窒素の排泄速度を測定するために、上記ろ過速度試験でクロロフィル a 分析用に採取した試水のろ液を用い、アンモニア、硝酸、亜硝酸のそれぞれの濃度を測定した。分析は自動分析計によった。実験時間は、ろ過速度実験と同様にした。

糞窒素の排泄量は次の 2 つの方法で求めた。1 つは、ろ過速度試験で、1 時間後の終了時に貝から排泄された糞をピペットにより採取し、それをあらかじめ 450°C で 4 時間焼いた GF/F フィルター上でろ過後、サンプルを 80°C で乾燥し、CHN コーダで分析した。2 つめは、現場海水 20 l を入れたコンテナに、シオフキガイを 10 個体入れ、1 時間後に排出された糞をピペットで採取し、上記

と同様な方法で測定した。実験後、貝のサイズと殻及び軟体部の湿重量、乾燥重量を測定した。また、窒素循環を解析するために、1998 年 6 月採取の試料につき、採集したシオフキガイの軟体部を乾燥させた後、元素分析計で窒素量を計測し、殻に含まれる有機物中の窒素はケルダール法で分析を行った。

(2) シオフキガイの呼吸速度、ろ過速度と排泄速度

シオフキガイの個体当たりで測定された呼吸速度とろ過速度を、シオフキガイの軟体部乾燥重量で割り規格化した。シオフキガイの個体差が大きいため、測定値のばらつきが大きかったため、ここでは、シオフキガイを便宜的に小 (300 mg 未満)、中 (300 以上 600 mg 未満)、大 (600 mg 以上) の 3 グループに分けて、グループごとの値を算出した。

実験水温の範囲では、水温が高いほど、軟体部乾重 1 g 当たりのシオフキガイの呼吸速度は高く (図 34)、同様に、水温が高いほどろ過速度が高かった (図 35)。図 35 で興味深いことは、1 月に行った実験で 7°C の水温においても、ろ過速度がかなりの値であることである。ここではデータを示さないが、過去に我々が予備的に行った実験で、夏に採取した二枚貝について様々な水温で実験した場合、低水温ではほとんどろ過を行わなかった。これは、環境水温の急激な変動が二枚貝に大きなストレスを与えたものと思われ、本研究で行ったように、採取した現場の水温と同等の水温で実験する必要があることを示すものであろう。

各水温における実験で、シオフキガイの小さい個体のほうが呼吸速度が高く (図 34)、また、ろ過速度も高かった (図 35)。これは、生物の表面積 (この場合は鰓の面積) と重さの比が、重さが小さい個体ほど大きいことと関連しているであろう。この関係は、例えば重さを W (g)、ろ過速度を F (l/g/h) とするとき、 $W = aF^b$ (a, b は定数、 $b \approx 2/3$) の式で表現されるが、本研究では測定例が少なく、この式のパラメータを求めるまでには至らなかった。

ここでは、後節で三番瀬における二枚貝のろ過速度を推算するために、シオフキガイのろ過速度について夏季の代表値を求めた。代表値として 6~11 月に実験を行ったすべての個体についての値を単純に平均し、3.0 l/g 軟体部乾重/h が得られた。この値は、本種について過去に報告された値より一桁近く大きな値であった。一方、既

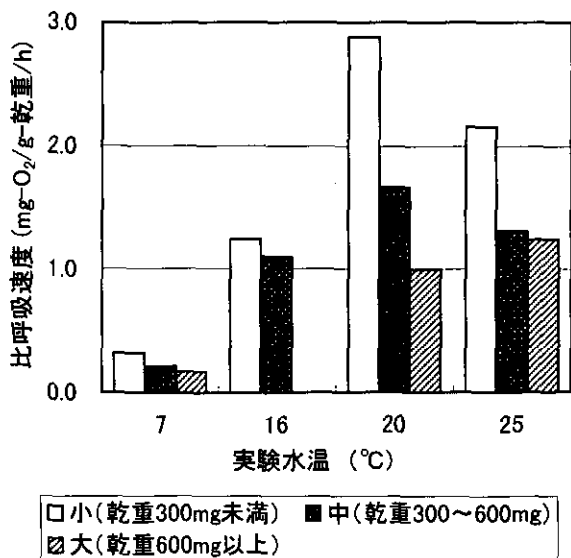


図34 シオフキガイの重さ別の水温と呼吸速度の関係

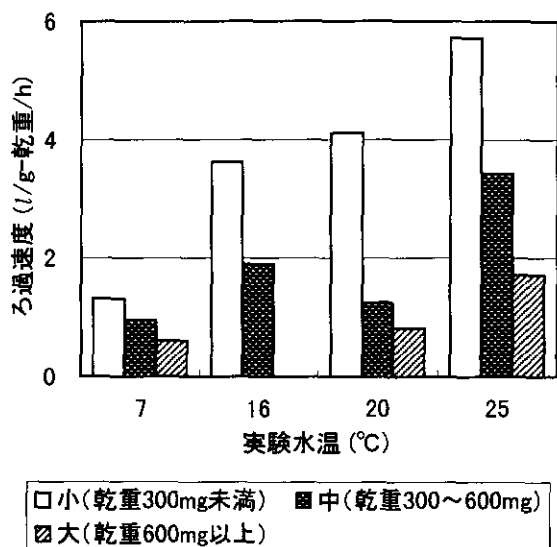


図35 シオフキガイの重さ別の水温とろ過速度の関係

往文献では、潜砂性二枚貝のろ過速度として1.4~7.2l/g 軟体部乾重/hの値が得られており、これらは本実験の値と同程度と考えられる。呼吸速度やろ過速度などの値は、生物の活性等により大きく変動するものと考えられるため、実験に当たり注意深い生物の取扱いが必要なのはもちろんであるが、さらに、実験系だけでなく、同様の測定を現場の環境でも行い、得られる値を検証する必要がある(2.1.4節(2))。

シオフキガイの呼吸速度とろ過速度との関係を図36に示した。同一月の測定では、両者に良い相関が見られた。月別のデータの組について計算された回帰直線を図

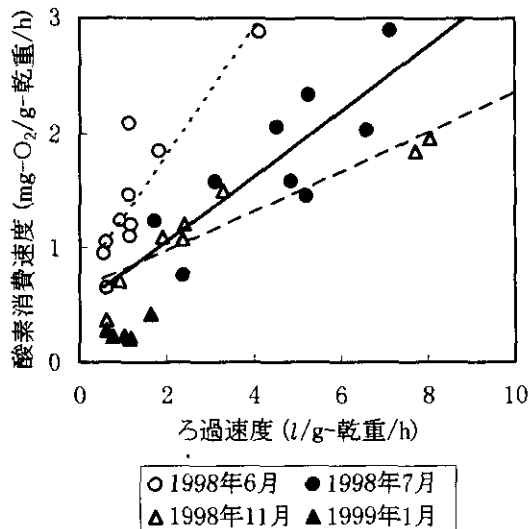


図36 シオフキガイの呼吸速度とろ過速度との関係

36に書き加えたが、この直線の傾斜から求めた、シオフキガイがろ過した海水当たりの酸素消費量は、6, 7, 11月のそれぞれにつき、0.55, 0.28, 0.17 mg-O₂/lとなり、これらの値は各水温での海水の飽和酸素濃度に対し、7.1, 4.2, 2.1%となった。

図36で、7月の値が11月に比べ高いのは、水温が高くシオフキガイの呼吸活性が高かったためであろう。6月にはろ過速度に対し呼吸速度が、7月に比べさらに倍ほど高かったが、この時期に呼吸速度が高かったのは図34の20°C(6月)の速度が25°Cよりも高いことにも現れている。6月には、実験に使用したシオフキガイの1/3程度が実験容器内で放精し、実験中止に追い込まれたが、このように呼吸速度に影響を与える因子として、水温以外にも、生物の成熟過程などを考慮する必要があるのかも知れない。

(3) シオフキガイの窒素収支

シオフキガイの乾燥重量のうち、殻の割合は93.3% (n=94, SD=1.7)、軟体部は6.65% (n=94, SD=1.7)であった。また、殻の窒素含有量は0.093% (n=3, SD=0.012)であり、軟体部は9.67% (n=25, SD=0.59)であった。

アンモニア排泄速度において、小個体ではその排泄は確認できなかったが、20°Cでは、乾重グループの中、大ともにほぼ同じ値、30 μg-N/g-乾重/hを示した。硝酸と亜硝酸の排泄は確認できなかった。

シオフキガイの20°Cにおける糞の排泄速度は、ろ過速

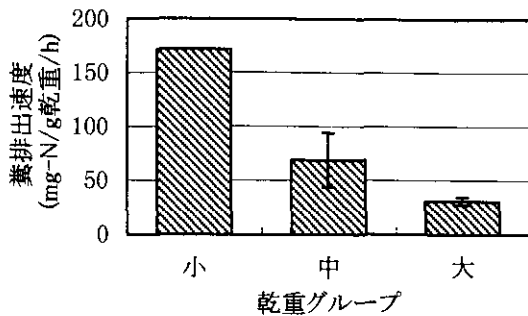


図 37 シオフキガイの糞排出速度 (20°C)
乾重グループは、小 (300 mg未満), 中 (300 以上 600 mg 未満), 大 (600 mg以上)。

度同様、小型ほどその速度が大きい傾向を示した (図 37)。なお、10 個まとめた実験では、貝の平均乾燥重量は 705 mg であり、1 g 当たりの糞排泄速度は $33.2 \mu\text{g-N/g-乾重/h}$ となり、この値を図の大グループ貝の排泄速度の 1 つとして使用した。

1998 年 6 月の三番瀬における調査及び実験を基に、シオフキガイの軟体部乾燥重量 1 g 当たり、1 時間当たりの窒素収支を算出した。収支は、植物プランクトンをろ過することによる摂食と、糞、偽糞及びアンモニアの排出量から算出した。

初めに、ろ過速度から植物プランクトン中の窒素の摂食速度を算出する。三番瀬で出現した大部分のシオフキガイの 1 個体の軟体部乾燥重量は、室内実験でろ過速度を測定した中グループに属したことから、本グループのろ過速度、 1.25 l/g 乾重/h を適用すると、別に測定した植物プランクトン由来の窒素量 (懸濁態有機窒素量) の値、 0.429 mg-N/l から、摂食速度は

$$1.25 \times 0.429 = 0.536 \text{ mg-N/g-乾重/h}$$

となった。

シオフキガイの中グループの糞排泄速度は $70 \mu\text{g-N/g-乾重/h}$ (図 37) を使用する。偽糞量について、1997 年夏季の糞、偽糞排泄量の基礎試験で偽糞の排泄速度が糞と変わらない値を得ていることから、ここでは偽糞量を糞量と同じ $70 \mu\text{g-N/g-乾重/h}$ とした。

さらに、シオフキガイ中グループのアンモニア排泄速度である $30 \mu\text{g-N/g-乾重/h}$ を使用して、以下の式から、シオフキガイの同化率を窒素ベースで算出した。

$$\text{同化率 (\%)} = \{ \text{摂食量} - (\text{糞} + \text{偽糞}) \text{排泄量} \} / \text{摂食量} \times 100$$

これらの結果から、本種の摂食量に対する同化率として 74% が得られた。また、排泄量にアンモニア排泄を含めた計算では 68% が得られた。

糞や偽糞を全量捕集するのは、実験的に困難な点があり、また、シオフキガイ体内で摂食から排糞までの過程で時間的なずれがあるものと思われる。本研究では、1~2 時間の短い時間で摂食・排出速度を測定しているために、得られた結果には、実験開始前にシオフキガイが十分に餌を摂取していたか否かというような履歴に依存する部分があるだろう。今後、底生生物による浄化過程をモデル化していくためには、長期間、底生生物を飼育し、同化率などを検討する必要があると思われる。

2.3.3 現場浄化能評価

(1) 三番瀬における二枚貝の水質浄化

海水の浄化にはいろいろな定義があるが、ここでは、二枚貝のような底生生物が、そのろ過食性により海水の懸濁物質を除去し、体内に蓄積する過程も浄化の一形態と考える。東京湾奥部の浅海域である三番瀬では、底生生物として二枚貝が卓越しており (2.1.2 節)、そのろ過食性により海水を浄化していることから、実際の三番瀬で、この二枚貝による水質浄化がどの程度であるか推算した。野外調査で観測された現場の底生生物量を $B (\text{g/m}^2)$ 、また、実験系で測定された底生生物のろ過速度を $F (\text{l/g/d})$ とすれば、現場で底生生物がろ過する水量 $W (\text{l/m}^2/\text{d})$ は、次式で計算される。

$$W = B \times F$$

ここで、シオフキガイのろ過速度として 3.0 l/g 軟体部乾重/h (2.3.2 節) を、また、三番瀬でのシオフキガイの生物量として 1998 年 6 月に観測された 2.35 g 軟体部乾重/m^2 (三番瀬内 17 地点における平均値: 表 4) を使用すれば、上式からシオフキガイのろ過水量が $169 \text{ l/m}^2/\text{d}$ と計算される。殻付き湿重量で表した生物量は、シオフキガイ、アサリ、バカガイで、それぞれ、 86.6 g/m^2 、 72.2 g/m^2 、 67.3 g/m^2 (2.3.1 節, 図 30) であったから、アサリやバカガイで、シオフキガイと同様のろ過速度を仮定すれば、これら 3 種の二枚貝 (合計 226.1 g/m^2) によるろ過水量は、 $442 \text{ l/m}^2/\text{d} (=0.442 \text{ m/d})$ と計算される。これは、二枚貝が一日当たり 0.44 m の高さの水柱をろ過することに相当する。三番瀬の水深が $1 \sim 2 \text{ m}$ 程度であることを考慮すれば、三番瀬の海水は二枚貝によって数

日のうちにろ過されるといえる。

現場における二枚貝のろ過水量の推算値は、生物量の多寡にそのまま依存する。ここで例として取り上げた生物量は特に大きい値ではなく、例えば1996年9月に三番瀬内調査地点1にて3.4 kg 湿重/m² (2.1.2節；図9) という値が観測されており、この場合に同様に計算すると、二枚貝がろ過する水柱の高さとして、6.6 m/d という値が得られる。

底生生物の水平的な分布が不均一であり、また、ろ過速度は水温や貝の大きさ等により変化する(2.3.2節)など複雑であるため、現場での浄化能を正確に算定するのは現状では困難である。今後、本研究で得られた知見を基に、数理モデルによる検討が必要であろう。

(2) 三番瀬における二枚貝の窒素循環

前節(2.3.2節)で記述したシオフキガイの軟体部乾重1g当たりの、植物プランクトンろ過量、糞、偽糞及びアンモニアの排泄量の値(図38(a))から、三番瀬における単位面積当たりのそれぞれの値を計算した(図38(b))。

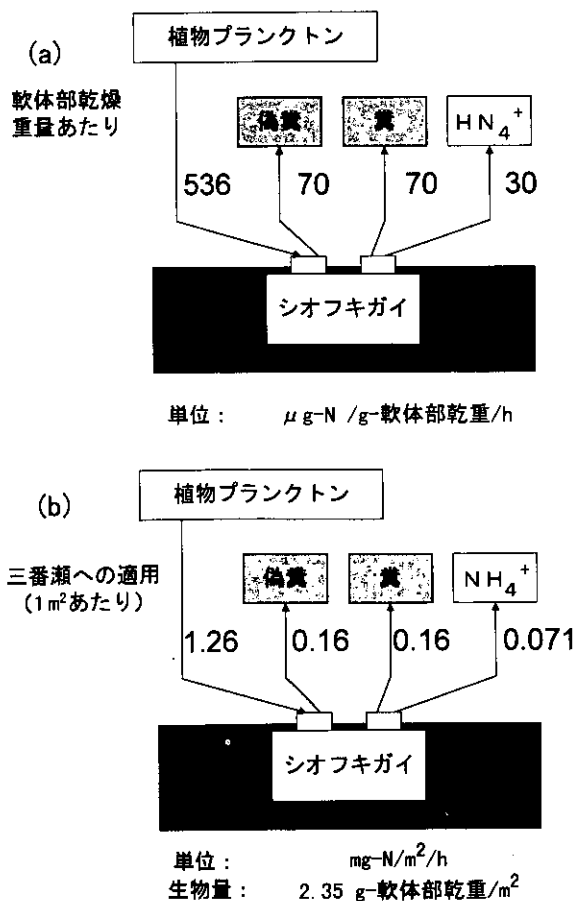


図38 三番瀬内、シオフキガイの窒素収支

ここでは、ろ過水量と同様、1998年6月に観測された生物量を用いた。

これらの値に、シオフキガイが生息する三番瀬の水深2m以浅の面積として14.5 km²を乗ずることにより、三番瀬全体でのシオフキガイによる窒素循環を推算した。

三番瀬全体でのシオフキガイ生物量は、軟対部乾燥重量として33.96 tが得られ、同様の方法で殻の乾燥重量は504.3 tが得られた。なお、窒素量は、軟体部として上記乾燥重量に窒素含有率の10%を乗じることにより3.4 t-Nが得られ、殻として上記乾燥重量に窒素含有率の0.1%を乗じることにより0.5 t-Nが得られた。

三番瀬全体における値として、植物プランクトン摂食速度、糞・偽糞排泄速度、アンモニア排泄速度は、それぞれ、436 kg-N/d, 57 kg-N/d, 24 kg-N/dが得られた。これらの値は、例えば東京湾全体でみた窒素流入負荷量と比較すれば小さな値である。前項に記した、ろ過水量の推定の場合と同様、ここで計算した摂食速度や排泄速度は用いた現場の生物量にそのまま依存する。1996年9月の地点1では、ここで用いた生物量より約15倍ほど大きな値が観測されており、この値を用いた計算では、三番瀬内で二枚貝が取り込む窒素量は、三番瀬に流入する真間川の窒素流入負荷量に匹敵することになる。

ろ過水量の推算と同様、現場における窒素循環の推定には、まだ不確定な要素が多いが、今後、数理モデル化を目指した研究がさらに必要であろう。

2.4 海域での大規模開発に対する住民意識について

2.4.1 海域での道路建設に対する住民意識調査

海域の社会的価値を考える基準としては、水産資源、リクリエーション、景観などが一般的である。一方、海域周辺の地域住民にとっては身近な海としての評価基準が重要であろう。例えば、憩いの場、生活の場としての基準が考えられる。また、海域での大規模開発を想定した場合には、水質汚染や海流の変化などの海域の自然環境の変化とともに、開発の結果として引き起こされる地域の変化が海域周辺の地域住民の主要な関心事となるはずである。

本特別研究では、大規模開発に対する海域周辺の地域住民の意識について調べた。そのために、1988年(昭和63年)に瀬戸内海において完成した瀬戸大橋(岡山県倉敷市児島地区と香川県坂出市を結ぶルート)を調査の対象とし、接岸地近隣の住民に対して意識調査を行った。

2.4.2 調査の概要

この調査では、選択肢式と自由記述式の質問を併用した。また、年齢や性別などの属性も尋ねた。調査対象地域は瀬戸大橋の本州側と四国側の接岸点の近くに位置する以下の3地域である。図39に調査地域周辺の概略を示し、調査地域は斜線で示した。

- ①香川県坂出市内（瀬戸中央道以東でJR予讃線とさぬき浜街道で囲まれた地域）。
- ②岡山県倉敷市児島地区南部（鷺羽山スカイライン以南で下津井港以東）
- ③同児島地区内児島駅周辺部（JR児島駅以南でJR瀬戸大橋線以西）

以後①、②、③を、それぞれ坂出、下津井、児島と呼ぶことにする。

坂出と児島を設定する際には、JR駅周辺であることと瀬戸中央道のインターチェンジ付近であることも考慮した。これら2地域は主に繁華街と住宅地からなっている。下津井は瀬戸大橋を構成する最も本州側の橋である「下津井瀬戸大橋」の接岸点である。他の2地域と比べると都市化されていないこと、漁業を主要産業の1つとしている点が下津井の特徴である。同じ児島地区内であっても鷺羽山を隔てて地域の性格が異なっていると考えられ

たので、児島地区は2つの調査地域に分けた。

調査票の発送と回収は郵送で行った。発送数は坂出が500、下津井と児島が350である。有効回収数は平均で53%であった。なお、調査票発送から2週間後に回答の再依頼状を送付した。

2.4.3 調査票の質問内容

調査票の質問内容の概略を表5に示す。Iは調査実施時（1996年9月）における瀬戸大橋についての印象を4段階評価で尋ねる質問である。IIでは、瀬戸大橋の便利さを選択肢と自由記述で尋ねた。IIIは瀬戸大橋に対する感想や意見を自由記述で問う質問である。IVでは、開通前の瀬戸大橋の印象を選択肢と自由記述で尋ねた。Vは「瀬戸内海」から連想することを自由記述で答えてもらう質問である。本報告では、IからIVまでの回答結果について述べる。

2.4.4 4段階評価の集計結果を通した瀬戸大橋の評価

表5で示した質問Iの集計結果を表6に示す。集計の仕方は表の下に注意として説明したが、例えば、Iの1)に対して、身近に感じるという回答は肯定、どちらかといえば身近に感じるという回答は、どちらかといえば肯

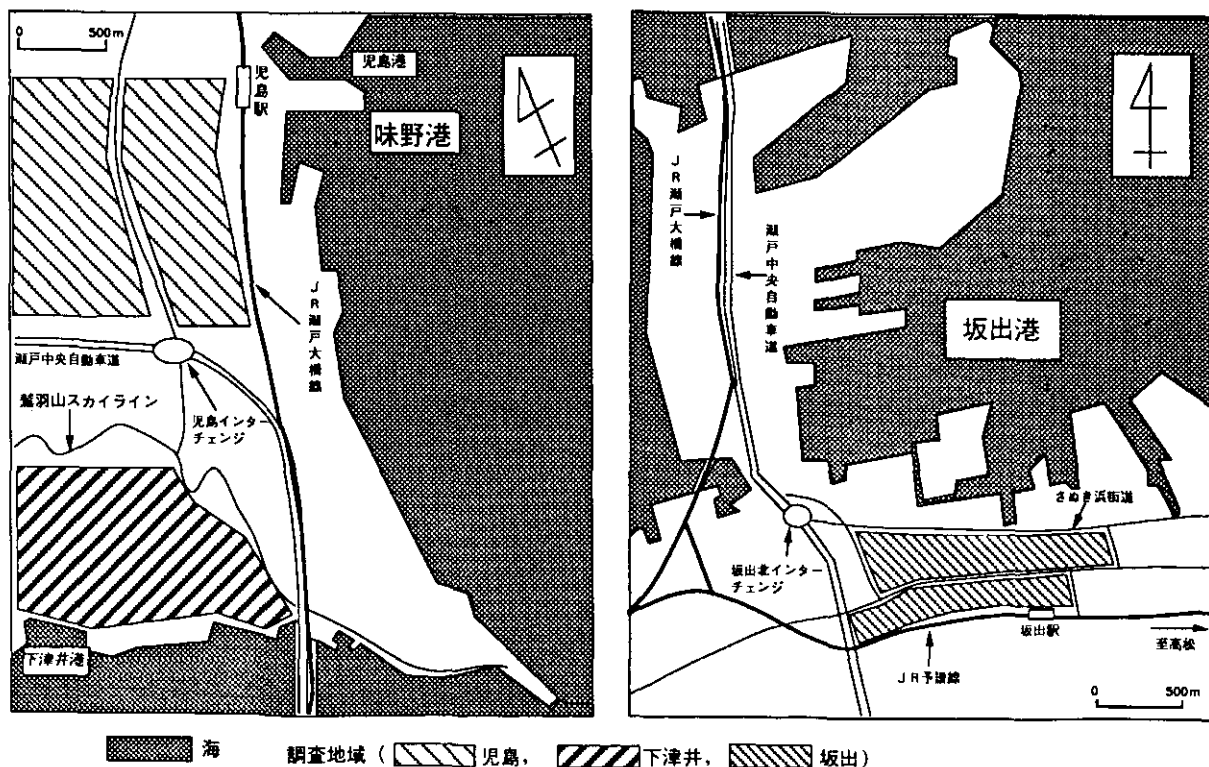


図39 調査地域周辺の概略図 調査地域は斜線で示した。

表6 質問Iの集計結果

設問 番号	調査 地域	評価点				平均評価点	設問 番号	調査 地域	評価点				平均評価点
		4	3	2	1				4	3	2	1	
1)	坂出	32.1	41.1	16.0	10.1	2.96	6)	坂出	8.0	24.4	43.6	22.0	2.19
	下津井	33.1	33.7	19.8	12.8	2.87		下津井	9.9	25.0	43.6	19.2	2.25
	児島	34.0	34.4	18.4	11.8	2.92		児島	9.0	25.9	44.3	19.8	2.25
2)	坂出	33.1	38.7	17.1	10.5	2.95	7)	坂出	6.3	20.9	42.5	30.0	2.03
	下津井	28.5	36.6	20.9	12.8	2.83		下津井	10.4	26.2	35.5	27.3	2.20
	児島	31.6	45.2	14.6	7.1	3.03		児島	7.5	28.3	34.9	27.4	2.16
3)	坂出	81.5	15.0	2.4	1.0	3.77	8)	坂出	7.7	12.2	39.0	39.7	1.88
	下津井	69.8	23.3	3.5	2.9	3.61		下津井	8.1	12.2	36.0	40.7	1.87
	児島	77.4	17.5	3.3	1.9	3.70		児島	5.2	12.3	36.3	45.3	1.77
4)	坂出	20.9	51.9	16.7	8.4	2.87	9)	坂出	69.3	25.8	3.8	0.1	3.64
	下津井	20.3	49.4	20.9	8.1	2.83		下津井	58.7	26.2	7.6	7.0	3.38
	児島	21.2	45.2	20.8	12.3	2.76		児島	65.6	30.2	2.8	0.1	3.61
5)	坂出	71.4	26.5	0.7	0.0	3.72	10)	坂出	55.7	38.0	4.5	1.7	3.48
	下津井	75.6	20.9	0.6	0.6	3.76		下津井	48.8	33.1	12.8	5.2	3.26
	児島	75.0	23.1	1.4	0.0	3.74		児島	51.9	36.3	8.5	2.8	3.38

注意：○評価点の与え方は以下の通り。

各質問に肯定を選択：4点，どちらかと言えば肯定：3点，

どちらかと言えば否定：2点，否定：1点

○ここでは，各評価点を選択した回答者の割合の%値と平均評価点を示した。

表7 質問II-11)に対する集計結果

(数値は，この質問の回答者数に対する%値)

	設問II-11)の選択肢番号			
	1	2	3	4
坂出	82.9	13.9	0.0	0.7
下津井	64.5	28.5	4.0	0.6
児島	77.8	17.5	0.9	0.5

るが，下津井では選択肢2，すなわち自分にとっては特に便利と思わない回答者の割合が他の2地域よりもかなり高いことが特徴である。また，下津井では他の多くの人にとって便利と思わない（選択肢3を選んだ）回答者の割合も他の地域よりも高い。選択肢回答の結果から見る限り，下津井の回答者の利便性意識は他の地域と比して異なっていると言える。

つぎに自由記述式による質問II-12)の結果を示す。自由記述回答を分析するためには文章などの回答から，単語や記述内容（以後，まとめて単語と呼ぶ）を抽出してデータを作成する。こうして得られた単語データを，各地域ごとに記述した回答者が多い順に整理して表8に示した。また，坂出では7人以上，児島と下津井では5人以上によって記述されたものを示した。例えば坂出では，瀬戸大橋の便利さについて時間短縮（以後，単語データには下線を付して示す）という単語を記述した回答者，またはそのような内容を書いた回答者を合わせると136人

になる。

表8から，回答者がどのような面で瀬戸大橋を便利と思っているかがわかる。例えば坂出では時間短縮のほかには，本州，岡山，船を記述した回答者が多くなっている。したがって，坂出の回答者全体では，瀬戸大橋の便利さにおいて特にこれら4つが示している事柄に関心が高いことがわかる。それでは表8の結果を具体的に見てゆこう。

まず，時間短縮，速い，近いの3語に着目しよう。回答者は瀬戸内海を經由して各地に移動する際の所要時間が非常に高速化されたことに便利さを感じていることがわかる。しかも，これらを記述した回答者数は各地域で上位10位以内であるから，各地域で高速化に対する関心が非常に高いことがわかる。

表8には，本州，四国，岡山などのような地域や都市の名前を示す単語が多く現れている。瀬戸大橋の開通によって，それらの語が示す場所への連絡が便利になったということで記述されたのであろう。地域や都市の名前を記述した回答者数の順位を地域別に比べることによって，本州側の調査地域である下津井及び児島と四国側の坂出との間で回答者の関心事の違いがわかる。まず，注目すべき結果は本州と四国の順位が本州側と四国側の地域で対照的なことである。つまり，四国側の坂出では本州の順位は時間短縮に次いで2位であり，四国のそれは

表8 質問II-12)の回答に現れる単語や記述内容と記述した回答者数

坂 出		下津井		児 島	
単 語	回 答 者 数	単 語	回 答 者 数	単 語	回 答 者 数
時間短縮	136	四国	85	四国	103
本州	73	時間短縮	58	時簡短縮	63
岡山	49	いつでも	22	速い	25
天候なし	30	岡山	21	J R	25
J R	28	J R	20	近い	24
近い	27	フェリー	19	車	24
船	27	船	17	時間	23
速い	25	近い	15	フェリー	20
いつでも	25	天候なし	14	岡山	17
四国	22	速い	14	通勤通学	16
大阪	21	車	13	船	16
日帰り	20	緊急時利用	12	何時でも	15
乗り換えなし	20	通勤通学	10	利用	14
連絡船	18	高松	9	待ち時間なし	13
京阪神	17	本州	8	天候なし	12
車	16	鉄道	8	香川	11
坂出	14	島	7	レジャー	11
東京	12	児島駅	6	本州	10
料金高い	12	陸続き	6	料金高い	10
高松	12	交通	6	高速道路	9
通勤通学	12	観光	6	容易	7
行動範囲	10	バス	6	児島駅	7
物流	10	時間	6	仕事	6
陸続き	9	レジャー	6	気軽に	5
交通	9	鉄道	6	児島	5
緊急時利用	9	身近	5	物流	5
旅行	8	香川	5	J R 安い	5
容易	8	仕事	5	旅行	5
安全	7	待ち時間なし	5	悪天候	5
マリンライナー	7			運送	5
フェリー	7			行動範囲拡大	5
				出張	5
				インター	5
				目的地	5

10位である。一方本州側の2つの地域では、四国の順位は時間短縮を押さえて圧倒的に1位であり、本州のそれは15位程度である。お互いに対岸地域への便利さに大きな関心があるわけである。ただし、岡山の順位については、3つの地域を通してそれほど大きな違いはない。坂出の結果の特徴は、大阪、京阪神、東京など種々の本州の地域名が現れていることである。本州各地へのアクセスの良さを実感していることを示す結果である。

JR、車、通勤通学は瀬戸大橋を利用する際の利用手段と利用目的に関連した代表的な単語である。ほかにも坂出と下津井では緊急時利用、児島と下津井ではレジャー、仕事、児島では出張、旅行などがある。

開通前の連絡船やフェリーでの渡航に比べて利用しやすくなったことを示す単語も多く見ることができる。例えば、坂出のデータでは乗り換えなし、下津井と児島では待ち時間なしなどが代表的である。また、いつでも、天候なしの2語も瀬戸大橋の利用のしやすさを示したものと言える。天候なしは天気によって左右されずに利用できるという内容を表したものである。このほかにも坂出と児島では容易、児島では気軽になどを掲げることができる。

2.4.6 自由記述回答を通した回答者の関心事

質問IIIの自由記述回答に現れる単語データを、表8と同じようにまとめて表9に示した。これらの単語を見な

がら、回答者の瀬戸大橋に対する関心事を考えよう。

表9では料金の高さに関連した単語が3つの地域で上位に位置している。実際、料金高いは各地域で最も多くの回答者が記述している。その他に、料金安ければ、料金値下げなどが存在し、料金の値下げを指摘している回答者も多いことがわかる。坂出ではこれら3つがすべて10位以内である。前に述べた4段階評価の質問においてもほとんどの回答者が橋の車の通行料金が高いと回答していた。当然、上記3語は主として道路通行料金の高さのことを言っていると考えられる。

地域の現状や問題点に関連した単語もいくつか現れている。まず、通過点が各地域で10位以内に入っているこ

とが大きな特徴である。「素通りされてしまう」、「橋の下町の町になってしまった」などの内容をこの単語に統一して表している。瀬戸大橋が開通したことによって、それぞれの調査地域が通過点になってしまったと思っている回答者が多いことがわかる。また坂出において、通過点の順位が非常に高いことも特徴である。

変化なしも坂出と児島のデータに現れるが、坂出の順位は通過点と同じく10位以内である。これら2語が示すことがらに対する関心は特に坂出の回答者の間で高いことがわかる。児島では、発展なしという記述が見られる。瀬戸大橋は開通したけれども地域の変化や発展はそれほどでもないと思っている回答者が少なくないことがわか

表9 質問III-13)の回答に現れる単語や記述内容と記述した回答者数

坂 出		下津井		児 島	
単 語	回 答 者 数	単 語	回 答 者 数	単 語	回 答 者 数
料金高い	66	料金高い	36	料金高い	59
便利	52	便利	32	便利	51
通過点	48	騒音	32	四国	40
坂出	34	四国	27	J R	32
変化なし	27	観光	17	児島	28
料金安ければ	27	観光客	15	通過点	27
料金値下げ	23	料金値下げ	14	騒音	26
利用できない	23	地元	14	観光	22
観光	21	通過点	13	岡山	21
発展	20	下津井	13	利用できない	19
岡山	19	減少	13	地元	17
物流	19	利用できない	11	料金値下げ	17
閉鎖	18	魚	11	車	17
交通	17	料金安ければ	10	インター	16
本州	17	J R	10	通勤通学	15
悪天候	17	児島	9	利用少ない	15
景観	15	岡山	8	交通	14
商店街	14	発展	8	料金安ければ	13
時間短縮	14	車	8	交通量増加	13
J R	14	観光客増加	8	悪天候	13
車	14	景観	8	近い	11
利用増加	13	夜間点灯	7	利用増加	11
騒音	12	近い	7	観光客	11
利用	11	レジャー	7	児島駅	10
寂れる	11	速い	7	発展なし	10
三橋時代	10	鷺羽山	7	時間短縮	10
一時的	10	海	7	産業	9
通勤通学	10	交通量増加	7	景観	9
人の流れ	9	渋滞	6	道路整備	9
近い	9	利用増加	6	閉鎖	9
道路整備	9	不便	6	道路	9
地元	9	道路整備	6	変化なし	9
経済	9				
利用少ない	9				

る。

その他に坂出の結果に出てきている商店街と寂れるも地域の問題点と関連した内容を示す単語である。

利用にかかわる単語も表9の中に多く見ることができ。3地域で順位の高いものとして、利用できないがある。利用増加も3地域の結果に現れる。さらに、坂出と児島では利用少ない、坂出では利用などの単語データも存在する。瀬戸大橋の利用に関心がある回答者の中で、利用できないとか利用少ないと書いている人たちがかなり多いことがわかる。

観光に関連した単語もいくつか出てきている。観光は各地域で10位以内であり、回答者が観光用の道路や鉄道としての瀬戸大橋に関心を示していることがわかる。児島と下津井のデータには観光客も現れるが、下津井での順位が高くなっている。さらに下津井では観光客増加という単語も見られ、この地域の調査地域内にある観光地の鷺羽山も単語データとして現れている。このように下津井の回答者は他の2地域よりも観光に対する記述内容が豊富であり、観光に関連する事柄に関心が高いことがわかる。

最後に、交通問題に関連する単語を考えよう。各地域で最も順位が高いのは騒音である。特に下津井での順位が高くなっている。下津井の地域内に瀬戸大橋の一部が通っていて、開通後実際に騒音問題が発生したことなども、このような結果に影響していると考えられる。そのほかに児島と下津井では交通量増加、下津井では渋滞などが存在する。坂出と、児島に閉鎖が出てきている。これは、強風などの悪天候による鉄道や道路の閉鎖を示している。以前の船と比べて瀬戸内海の横断は圧倒的に便利にはなっただけれども、天候などの事情で閉鎖されてしまうと、前の状況と変わらないと言うような意識から書かれているのであろう。

2.4.7 瀬戸大橋開通前の意識

これまで、調査実施時点の瀬戸大橋に対する回答者の考え方や関心事を考えた。ここでは、質問Ⅲの1)と2)の回答結果から、回答者が開通以前にいただいていた瀬戸大橋に対する意識について調べる。

表10に質問Ⅳ-1)に対する集計結果を示す。瀬戸大橋開通前の関心事として選択肢1(便利さ)と選択肢2(地元の発展への期待)を選んだ回答者の割合が各地域で非常に高い。また、選択肢3(地元の変化に対する不安)と

表10 質問Ⅳ-1)に対する集計結果
(数値は、この質問の回答者数に対する%)

	設問Ⅳ-1)の選択肢番号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
坂出	77.0	75.3	13.9	28.2	5.9	26.1	10.5	12.2
下津井	66.0	52.3	15.1	15.1	5.2	44.1	18.0	50.6
児島	82.5	66.0	12.3	24.5	4.2	38.2	9.9	18.9

4(生活の変化に対する不安)を選んだ回答者の割合は各地域でほぼ同じである。瀬戸大橋開通に伴う不安よりも利便性への関心や地元の発展への期待を持っていた回答者のほうがかなり多かったことがわかる。

つぎに調査地域ごとの特徴を考えてみよう。まず、選択肢1と2の選択率を地域ごとに比較すると、下津井の選択率が他の2地域よりも低くなっていることは興味深い。先に見たように、回答者が選んだ8つの選択肢の割合で、各地域の上位2つは共通しているが、3番目に高かったものは、坂出では選択肢4(生活の変化への期待)、児島では選択肢6(道路・鉄道の公害問題)、下津井では選択肢8(漁業への影響)であり各地域で異なる。これから、坂出の回答者の間では瀬戸大橋への期待が非常に高かったことがわかる。一方、本州側の2地域ではやはり期待は高かったものの、公害問題や漁業問題への関心が坂出の回答者より高かったことがわかる。特に下津井で選択肢8を選んだ回答者の割合が他の地域よりもかなり高かったことは大きな特徴である。これは漁業を主産業としているこの地域の特徴を反映した結果であろう。また、下津井では、選択肢6の選択率も高く、さらには選択肢7(瀬戸内海の水質問題)を選んだ回答者の割合も他の地域より高くなっている。

表11には、自由記述回答の質問Ⅳ-2)の回答に現れる単語データを示す。この表からすぐにわかることは、期待、発展、便利がどの地域でも上位4位以内に入っていることである。質問Ⅳ-1)の結果と同じく、開通前の瀬戸大橋に対する便利さへの関心や期待の高さを表している。坂出と下津井の結果に見られる活性化もそうした意識を示していると考えられる。

表11の中には、これまでに見てきた自由記述回答の結果には現れなかった単語も多く見ることができ。例えば、夢、大きい、期待はずれ、心配などである。夢が記述されている回答を実際に調べてみると、夢の架け橋と書かれたものほとんどであった。大きいは橋の雄大さや、大規模な工事を述べた内容に多く見られた。

表 11 質問IV-2)の回答に現れる単語や記述内容と記述した回答者数

坂 出		下津井		児 島	
単 語	回答者数	単 語	回答者数	単 語	回答者数
期待	47	四国	37	四国	48
発展	47	便利	28	便利	40
便利	36	期待	22	発展	35
本州	35	発展	16	期待	21
坂出	28	夢	12	地元	20
夢	28	心配	10	児島	14
地元	21	地元	10	心配	11
四国	19	魚	9	観光客増加	10
心配	17	大きい	9	J R	10
観光	15	観光客増加	9	観光	10
開通	12	観光客	8	交通	10
岡山	12	近い	8	経済	8
車	11	下津井	8	近い	8
近い	11	減少	8	通過点	8
時間短縮	11	本州	7	夢	7
進出	10	車	7	期待はずれ	7
期待はずれ	10	景観	6	岡山	7
天候なし	10	騒音	6	交流	7
交流	10	景観破壊	6	産業	7
工事	9	期待はずれ	6	気軽に	7
活性化	9	児島	5	景観	6
陸続き	9	漁業	5	車	6
大きい	9	瀬戸内海	5	本州	6
船	9	海	5	料金安い	5
観光客増加	9	見守る	5	時間短縮	5
通過点	9	島	5	利用	5
交通	8	活性化	5	瀬戸内海	5
景観	8			道路	5
				大きい	5

期待はずれは文字通りの意味である。これはある意味では調査実施時点での心境を語ったものだが、開通前のことを尋ねた質問の答えとして、この内容が出てきたということは興味深い。開通前には期待したが、実際には期待はずれであったという意見が自由記述回答の中で得られたわけである。

心配は3つの地域で10位以内である。しかし質問IV-1)では、不安を含んだ選択項目の3が5を選んだ回答者の割合は各地域でそれほど高くなかった。自由記述回答の単語の回答者数で見ると、開通前の回答者の不安という意識も見落とすことができないこととして認識する必要がある。

地名や都市名に関連した単語が多く見られるのは、これまでの自由記述回答の結果と同じである。坂出では本州が4位、児島と下津井では四国が1位である。瀬戸大

橋で結ばれることになる対岸地域を示す名前が上位にきていることは3地域で共通しており、これは、表8の便利に関する自由記述回答の結果と共通している。

2.4.8 調査実施時と開通前の意識の比較

ここでは、表9と表11を比較して開通前と開通後の調査実施時における意識の違いを比較してみよう。もちろん、調査実施時点で開通前の事柄を尋ねている点は注意しなければならない。まず、2つの表の各地域の結果で便利が2位または3位であることから、瀬戸大橋開通による利便性は回答者にとっては開通前の期待通りの結果になっていると見てよいであろう。また、観光に関する単語も2つの表で上位に位置しており、観光の橋としての瀬戸大橋に対する関心は開通前後で変わらないと見てよい。

表9で各地域で1位であった料金高いは表11には現れていない。児島の結果に出てくる料金安いは、「料金がもっと安いと思った」という回答を示すものである。通行料金の問題が開通後に非常に大きな関心事となってしまうわけである。分担者らが別の調査で行った建設時の東京湾横断道路に関する自由記述（自由連想）調査では、今回と同じような単語の順位付けを行うと、4つの調査地域のうち3地域で料金という単語が10位以内であった。つまり、東京湾横断道路に対しては開通前から料金への関心が高いという結果が得られている。この、2つの横断道路に対する意識の違いは、橋に対する回答者の思い入れの違いが大きな要因であろう。あるいは、調査実施時点の問題はあるものの、大規模道路建設に対する人々の意識の時間的な変化の一端を表す結果とも言えなくもないであろう。

今度は調査地域ごとに特徴的な結果を考えよう。まず、表9で坂出で上位であった通過点は表11においても現れているが、表11における順位は表9と比べると、かなり低くなっている。坂出の回答者にとって、開通後の通過点化の問題は開通前の回答者の予想を超えていたということであろう。

下津井では2つの表において魚が現れている。また表11では漁業を見ることができる。瀬戸大橋が魚に及ぼす影響については開通前後を問わずこの地域の回答者の関心事の一つと考えられる。

表11では児島の結果においてのみJRが現れ、しかもその順位は10位以内と上位である。開通前にJR（旧国鉄）線が存在していなかったこの地域の新しい鉄道に対する関心の高さを示す結果である。表9においてもJRの順位は児島で最も高く、開通前からの関心が開通後も維持されているということであろう。この結果が同じ児島地区の下津井の結果と必ずしも一致していないことは興味深い。

2.4.9 調査地域下津井の利便性意識

以上、瀬戸大橋の意識調査結果について述べてきたが、3つの調査地域の結果をとおして考えると、下津井という地域の結果が他の2地域の結果と興味深い違いを示す場合がいくつかあった。まず、瀬戸大橋の利便さの意識が代表例である。質問II-11の結果では、自分にとって便利と思わない回答者の割合が他の地域よりもかなり高かったこと、質問IV-1)においても開通前に利便さに関

心のあった回答者の割合が他の地域よりも低かったことは特徴的である。前節で触れた東京湾横断道路の調査結果でも、下津井と条件が共通している木更津西という調査地域の結果では、東京湾横断道路からの連想において、便利という単語を記述した回答者の割合が他の地域よりもかなり低いという結果を得ている。これらの結果は、海に面し、漁業を主産業とする地域の人々のもっている海域での大規模道路建設に対する利便性意識には共通する部分が多いことを示唆しているといえよう。

開通前の関心事を問うた質問IV-1) についても下津井の結果は他の2地域と異なっていた。すなわち、前にも述べたように選択肢1と2の選択率は高いものの、他の地域と比べると低く、さらには、選択肢4（生活の変化への期待）を選んだ回答者の割合も他の地域よりも10%以上低かった。下津井では、瀬戸大橋に対する期待感を持っていた回答者の割合が他の地域よりも低いことがわかる。逆に選択肢8（漁業への影響）を選んだ割合は他の地域より30%以上高く、選択肢6（道路・鉄道の公害の問題）の選択率も3地域で最も高かった。したがって、下津井では瀬戸大橋の及ぼすマイナス面の影響に関心を持っていた回答者が他の地域よりかなり多かったわけである。東京湾横断道路の調査結果においても先に述べた木更津西の結果では自由記述回答において、海、潮の流れ、心配、変化などの単語の出現する割合が他の地域よりも高かった。このあたりからも、漁業を主産業とする調査地域の共通の意識が見いだされているのではないだろうか。

2.5 まとめ

干潟・藻場などを含む浅海域は、水産資源にとって重要なばかりでなく、自然環境保全上その役割の重要性が認識されつつある。さらに、浅海域では、有機物分解速度などが高く、水質浄化能力が高いと言われている。一方、現在まで、浅海域の機能評価が十分にできなかったこと、開発による環境影響を評価するのにも定まった手法がなかったことなどから、過去に行われた開発は、環境への配慮が必ずしも十分でなかった。富栄養化は陸域からの負荷と同時に、底泥からの溶出のような浅海域での栄養塩の挙動も考慮されるべきであるが、この点に関する現在の科学的知見も不十分であった。

したがって、浅海域環境の保全を図るためには、科学的な調査法・評価法がさらに進歩する必要があった。本

表9で各地域で1位であった料金高いは表11には現れていない。児島の結果に出てくる料金安いは、「料金がもっと安いと思った」という回答を示すものである。通行料金の問題が開通後に非常に大きな関心事となってしまうわけである。分担者らが別の調査で行った建設時の東京湾横断道路に関する自由記述（自由連想）調査では、今回と同じような単語の順位付けを行うと、4つの調査地域のうち3地域で料金という単語が10位以内であった。つまり、東京湾横断道路に対しては開通前から料金への関心が高いという結果が得られている。この、2つの横断道路に対する意識の違いは、橋に対する回答者の思い入れの違いが大きな要因であろう。あるいは、調査実施時点の問題はあるものの、大規模道路建設に対する人々の意識の時間的な変化の一端を表す結果とも言えなくもないであろう。

今度は調査地域ごとに特徴的な結果を考えよう。まず、表9で坂出で上位であった通過点は表11においても現れているが、表11における順位は表9と比べると、かなり低くなっている。坂出の回答者にとって、開通後の通過点化の問題は開通前の回答者の予想を超えていたということであろう。

下津井では2つの表において魚が現れている。また表11では漁業を見ることができる。瀬戸大橋が魚に及ぼす影響については開通前後を問わずこの地域の回答者の関心事の一つと考えられる。

表11では児島の結果においてのみJRが現れ、しかもその順位は10位以内と上位である。開通前にJR（旧国鉄）線が存在していなかったこの地域の新しい鉄道に対する関心の高さを示す結果である。表9においてもJRの順位は児島で最も高く、開通前からの関心が開通後も維持されているということであろう。この結果が同じ児島地区の下津井の結果と必ずしも一致していないことは興味深い。

2.4.9 調査地域下津井の利便性意識

以上、瀬戸大橋の意識調査結果について述べてきたが、3つの調査地域の結果をとおして考えると、下津井という地域の結果が他の2地域の結果と興味深い違いを示す場合がいくつかあった。まず、瀬戸大橋の利便さの意識が代表例である。質問II-11の結果では、自分にとって便利と思わない回答者の割合が他の地域よりもかなり高かったこと、質問IV-1)においても開通前に利便さに関

心のあった回答者の割合が他の地域よりも低かったことは特徴的である。前節で触れた東京湾横断道路の調査結果でも、下津井と条件が共通している木更津西という調査地域の結果では、東京湾横断道路からの連想において、便利という単語を記述した回答者の割合が他の地域よりもかなり低いという結果を得ている。これらの結果は、海に面し、漁業を主産業とする地域の人々のもっている海域での大規模道路建設に対する利便性意識には共通する部分が多いことを示唆しているといえよう。

開通前の関心事を問うた質問IV-1)に関しても下津井の結果は他の2地域と異なっていた。すなわち、前にも述べたように選択肢1と2の選択率は高いものの、他の地域と比べると低く、さらには、選択肢4（生活の変化への期待）を選んだ回答者の割合も他の地域よりも10%以上低かった。下津井では、瀬戸大橋に対する期待感を持っていた回答者の割合が他の地域よりも低いことがわかる。逆に選択肢8（漁業への影響）を選んだ割合は他の地域より30%以上高く、選択肢6（道路・鉄道の公害の問題）の選択率も3地域で最も高かった。したがって、下津井では瀬戸大橋の及ぼすマイナス面の影響に関心を持っていた回答者が他の地域よりかなり多かったわけである。東京湾横断道路の調査結果においても先に述べた木更津西の結果では自由記述回答において、海、潮の流れ、心配、変化などの単語の出現する割合が他の地域よりも高かった。このあたりからも、漁業を主産業とする調査地域の共通の意識が見いだされているのではないだろうか。

2.5 まとめ

干潟・藻場などを含む浅海域は、水産資源にとって重要なばかりでなく、自然環境保全上その役割の重要性が認識されつつある。さらに、浅海域では、有機物分解速度などが高く、水質浄化能力が高いと言われている。一方、現在まで、浅海域の機能評価が十分にできなかったこと、開発による環境影響を評価するのにも定まった手法がなかったことなどから、過去に行われた開発は、環境への配慮が必ずしも十分でなかった。富栄養化は陸域からの負荷と同時に、底泥からの溶出のような浅海域での栄養塩の挙動も考慮されるべきであるが、この点に関する現在の科学的知見も不十分であった。

したがって、浅海域環境の保全を図るためには、科学的な調査法・評価法がさらに進歩する必要があった。本

研究では、浅海・干潟域において、現場調査・室内実験等を基に、水界・底泥生態系での、一次生産・摂食・分解等による、炭素・窒素などの物質循環を明らかにし、浅海域の機能を定量的に表すことを目的とした。

本研究の主要な部分では、浅海域の一つの例として、東京湾奥にある三番瀬を調査対象とした。三番瀬は水産的にも重要な浅海域であり、冬にはノリを通年アサリやバカガイの漁獲がある。三番瀬と、その沖合の湾中央部における水質・底質・生物量などを調査し、比較した。その結果、浅海域環境の特徴として次の点が示された(2.1)。

(1) 湾中央部では、夏季に底層が貧酸素状態になったが、三番瀬における溶存酸素は、3~6 mg/lの幅であり生物の生息に十分であった。

(2) 溶存酸素、pHで見ると、三番瀬では、生産を消費が上回っていた。

(3) 三番瀬内の底泥では、全体として細砂で構成されており、有機物が多く堆積した湾中央部の底泥と大きく異なり、泥分率、含水率や強熱減量が小さい値であった。

(4) 三番瀬内では、湾中央部に比べ底生生物種数・生物量とも多く、湿重量比では、軟体動物、多毛類、甲殻類の割合が98%以上を占めた。中でも、二枚貝の生物量が多く、浅海域での二枚貝の重要性が示された。

(5) 湾中央部では、夏季に、底層が貧酸素化していたため、生存個体は極めて少なかった。

(6) シオフキガイの殻長別分布では、三番瀬内でも地点による差があり、岸よりの地点で小さい個体が多くみられた。

(7) 底泥のクロロフィル *a* やその分解物の分布から、浅海域のほうに有機物分解が活発であることがわかった。

(8) 東京湾奥で、底泥から溶出する栄養塩の N/P 比には、夏季に低く冬季に高いという海水中の N/P 比と同様の季節変化が存在することから、栄養塩の循環に占める底泥からの溶出の寄与が大きいことが推察された。

(9) 現場にて、底泥の酸素消費速度や底泥からの栄養塩・有機物の溶出を測定する装置を新たに開発した。三番瀬にて、測定装置2台について得られた栄養塩回帰速度はそれぞれ異なっていたが、底生生物量で規格化した値は同程度であった。

食物連鎖に関連した物質循環を定量的に明らかにすることが本研究の目標の一つである。瀬戸内海家島での現

場調査・現場実験で「微小動物プランクトン」から「カイアシ類」とつながる食物連鎖経路や、「尾虫類」「夜光虫」の生態的役割について、さらに、水中で生産された有機物がどの程度底泥に沈降し底生生物に利用されるかについて、次の点が明らかになった。(2.2)。

(1) 内湾域における一次生産はカイアシ類のような大型の動物プランクトンに直接取り込まれると考えられてきたが、一次生産のかなりの部分が従属栄養性渦ベン毛虫や繊毛虫といった小形の原生動物プランクトン (microprotozooplankton; MPZ) に取り込まれる。

(2) カイアシ類 *Oithona similis* は MPZ を主要な餌として利用して成長し、さらに、暖期においては MPZ 群集を捕食を通じてコントロールする。

(3) 夜光虫は珪藻赤潮とともに個体群を拡大し、その生産量は、これまで植物プランクトンの主たる捕食者と考えられてきたカラノイダ目カイアシ類の生産量に匹敵する。

(4) 瀬戸内海における調査期間中に、原索動物であるウミタル (*Doliolletta gegenbauri*) によるブルームが突如発生し、珪藻赤潮を数日のうちに消滅させた。

(5) 夏の播磨灘における物質循環では、これまで注目されなかった原生動物(従属栄養性渦ベン毛虫、夜光虫、繊毛虫等)・原索動物(オタマボヤ)や、これらを介した食物連鎖経路が重要である。

(6) 植物プランクトンによる一次生産はプランクトン群集によって捕食されるだけではなく、そのかなりの部分は沈降して底泥に供給される。夏の一月を平均して、底泥に供給される有機物量は $0.7 \text{ gC/m}^2/\text{d}$ 程度であった。これは、動物プランクトン群集が植物プランクトンを捕食する量と同程度である。

(7) 播磨灘の家島諸島周辺では、泥食性のウニであるオカメブクや小型ナマコの一種のイカリナマコといった棘皮動物が広い範囲で卓越し、中でも前者はマクロベントス群集のバイオマスの50%以上(約 1 gC/m^2)を占めた。

浅海域における水質浄化能は、現地測定を基に把握するのが最良であろう。しかし、上記のような装置による現場での測定には、様々な困難が伴う。設置場所を確保するのも大変である。そこで、浅海域生態系で最も重要である二枚貝に着目し、その三番瀬における水平分布を調査するとともに、室内実験により酸素消費速度やろ過速度を測定し、また、糞・擬糞の排泄速度を測定して三

番瀬における水質浄化能を推定した。ここで得たパラメータは、浅海域生態系や、内湾生態系をモデル化し、環境要因の変動に対する反応を解析するためにも利用される。二枚貝の分布及びその浄化能に関して以下の結果を得た(2.3)。

(1) 三番瀬内に17調査地点を設定し、底生生物の水平分布を調査した結果、個体数では多毛類と甲殻類が優占し、生物量(湿重量)ではアサリ、バカガイ、シオフキガイの二枚貝が、3種で全体の約83%を占めた。

(2) シオフキガイは船橋側では全点で出現し、軟体部乾燥重量(乾重)で表した生物量は、三番瀬全体の平均値で、 2.35 g/m^2 であった。

(3) シオフキガイの殻長と軟体部乾重、殻付湿重と軟体部乾重には、良い相関が見られ、現場調査で容易に測定可能な値から軟体部乾重への換算が可能であることが示された。

(4) ろ過速度と呼吸速度はともに水温の高いときに高かった。軟体部乾重当たりのろ過速度と呼吸速度は、重量の小さな個体ほど大きかった。

(5) シオフキガイの軟体部乾重当たりの海水ろ過速度は、平均値で 3.0 l/g 軟体部乾重/h であった。

(6) シオフキガイの軟体部乾重が $0.3\sim 0.9 \text{ g}$ の個体について、摂食速度、糞排泄速度、偽糞排泄速度、アンモニア排泄速度は、それぞれ $536, 70, 70, 30 \mu\text{g-N/g-軟体部乾重/h}$ の値が得られ、これらから摂食量の約74%の窒素が同化(浄化)されるものと推定された。

(7) 三番瀬における二枚貝のろ過速度は、シオフキガイにより $169 \text{ l/m}^2/\text{d}$ 、上記3種の二枚貝で $442 \text{ l/m}^2/\text{d}$ と計算された。これは、二枚貝が一日当たり 0.44 m の高

さの水柱をろ過することに相当する。

海域での開発に対する住民の関心事を調べるために、瀬戸大橋に関する住民意識調査を行った。瀬戸大橋と海とのかかわりについて、汚染、景観、自然との調和の3項目について選択肢式で尋ねた結果、すべての調査地域で80%以上の回答者が汚染への影響はないと評価していた。他の2項目についても肯定的な評価の方がかなり上回ったが、漁業を主な産業とする調査地域では否定的な評価の割合が高かった。自由記述形式で瀬戸大橋の現状を尋ねた結果、「通過点」という記述が多く見られた。この言葉の意識の関連性を自由記述回答中の単語集合をクラスター分析することによって調べた。その結果、四国側では、種々の地域産業の停滞などの関連性が高く、岡山県側では観光との関連性が高かった(2.4)。

浅海域の生態系を評価するためには、従来の環境影響評価で行われたような生物の現存量の調査だけでなく、将来は、本研究で行われたように、水質浄化能や物質環境と言った浅海域の機能について評価されることが、ますます重要となるであろう。「環境影響評価法」が平成9年6月には公布され、平成11年6月に施行される運びとなった。今後、新規に行われる開発に対する本法の下での環境影響評価では、こうした浅海域の機能に関する評価が含まれる。また、本法では、住民参加が基本的事項として求められている。本研究では、浅海域の機能評価、あるいは住民意識を考慮した環境評価手法などについて基本的な取り組みを行った。本研究で不十分であった点を改良し、今後、それらを組み込んだ総合的な評価手法の開発に向けて研究を進展させていきたい。

[資 料]

I 研究の組織と研究課題の構成

1 研究の組織

[A 研究担当者]

地域環境研究グループ

統括研究官	森田昌敏
海域保全研究チーム	木幡邦男・中村泰男
湖沼保全研究チーム	今井章雄

地球環境研究グループ

海洋研究チーム	原田茂樹* ¹
---------	--------------------

水圏環境部

部長	渡辺正孝
主席研究官	竹下俊二* ²

水環境工学研究室	井上隆信・西村 修* ³
----------	-------------------------

社会環境システム部

上席研究官	大井 紘
情報解析研究室	須賀伸介

化学環境部

動態化学研究室	柴田康行
計測管理研究室	堀口敏宏

特別流動研究員	樋渡武彦
---------	------

科学技術特別研究員	飯島明子
-----------	------

現在の所属

*¹京都大学大学院工学研究科, *²新日本環境調査株式会社, *³東北大学大学院工学研究科

[B 客員研究員]

小森 悟	(九州大学)	(平成 8～10 年度)
滝井 進	(東京都立大学)	(平成 8～9 年度)
廣海 十朗	(日本大学)	(平成 8～10 年度)
相崎 守弘	(島根大学)	(平成 8～10 年度)
風呂田利夫	(東邦大学)	(平成 8～10 年度)
三村 信男	(茨城大学)	(平成 8～10 年度)
金 淑陽	(韓国国立水産振興院)	(平成 9～10 年度)

2 研究課題と担当者 (*客員研究員)

(1) 浅海・干潟域における物質循環の実証的研究

木幡邦男・中村泰男・竹下俊二・今井章雄・柴田康行・堀口敏宏・樋渡武彦・飯島明子・滝井 進*・廣海十朗*・相崎守弘*・風呂田利夫*・金 淑陽*

(2) 海域における物質循環モデリングと浅海域機能の評価に関する研究

木幡邦男・中村泰男・渡辺正孝・竹下俊二・大井 紘・須賀伸介・井上隆信・西村 修・原田茂樹・樋渡武彦・
小森 悟*・相崎守弘*・三村信男*

II 研究成果発表一覧

1 誌上発表

発表者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊行
S. Harada, M. Watanabe, K. Kohata, T. Ioriya, M. Kunugi, T. Kimura, S. Fujimori, H. Koshikawa, K. Sata	Analyses of planktonic ecosystem structure in coastal seas using a large-scale stratified mesocosm: a new approach to understanding the effects of physical, biochemical and ecological factors on phytoplankton species succession	Water Sci. Tech.	34(7-8)	219-226	1996
Y. Nakamura, S. Suzuki J. Hiromi	Development and collapse of a <i>Gymnodinium mikimotoi</i> red tide in the Seto Inland Sea	Aquat. Microb. Ecol.	10	131-137	1996
竹下俊二	内湾の貧酸素化と青潮発生メカニズム	かんきょう	21(4)	36-37	1996
竹下俊二	エアレーション手法を用いた水質浄化に関する研究と技術開発の動向	化学工学	61	77	1997
Y. Nakamura, J.T. Turner	Predation and respiration by the small cyclopoid copepod <i>Oithona similis</i> : How important is feeding on ciliates and heterotrophic flagellates?	J. Plankton Res.	19(9)	1275-1288	1997
Y. Nakamura, K. Suzuki, S. Suzuki, J. Hiromi	Production of <i>Oikopleura dioica</i> (appendicularia) following a picoplankton bloom in a eutrophic coastal area	J. Plankton Res.	19(1)	113-124	1997
K. Kohata, M. Watanabe, K. Yamanaka, T. Ioriya, T. Kimura	A red-tide bloom of <i>Chattonella antiqua</i> (Raphidophyceae) in the Seto Inland Sea, Japan in 1987 analyzed as changes in photosynthetic pigments determined by high-performance liquid chromatography	Water Res.	31(9)	2269-2277	1997
須賀伸介, 大井 紘	自由記述調査法による東京湾のイメージの解析	海の研究	6(4)	209-218	1997
須賀伸介, 大井 紘	人々の海域の印象について	現代のエスプリ	364	171-188	1997
須賀伸介, 大井 紘	自由連想調査法を用いた東京湾横断道路に関する住民意識の解析	日本沿岸域学会論文集	(10)	89-101	1998

発表者	題 目	掲 載 誌	巻(号)	ページ	刊行
S. Suga, K. Oi, S. Miyamoto	Cluster analysis of associated words obtained from a free response test on Tokyo Bay	Data Sci., Classif. & Relat. Methods		736-745	1998
木幡邦男	海域の油汚染に対するバイオレメディエーション技術	かんきょう	8	36-37	1998
渡辺正孝, 天野邦彦, 石川裕二, 木幡邦男	秋期の東京湾奥部における風による成層破壊と成層の無酸素水塊の湧昇過程	土木学会論文集	608/ VIII-9	13-29	1998
A. Iijima	Distribution of molluscs on bed-rock and boulder areas in an intertidal rocky shore on the Pacific coast of the Boso Peninsula.	Venus (Jpn. J. Malac.)	57	95-104	1998
Y. Nakamura	Growth and grazing of a large heterotrophic dinoflagellate, <i>Noctiluca</i>	J. Plankton Res.	20(9)	1711-1720	1998
Y. Nakamura	Biomass, feeding and production of <i>Noctiluca scintillans</i> in the Seto Inland Sea, Japan	J. Plankton Res.	20(11)	2213-2222	1998
Y. Nakamura	Blooms of tunicates <i>Oikopleura</i> spp. and <i>Doliolitta gegenbaui</i> in the Seto Inland Sea, Japan, during summer	Hydrobiol.	385	183-192	1998
中村泰男	従属栄養性渦鞭毛類藻類, <i>Oithona</i> 属カイアシ類, 尾虫類: これまで余り注目されなかった捕食-被食関係が物質循環に果たす役割	日本プランクトン学会報	46(1)	70-77	1999
須賀伸介, 大井 紘	東京湾横断道路に関する自由記述データの解析	土木学会論文集	(615/ VII-10)4	75-88	1999
金 主鉉, 西村 修, 竹下俊二, 柳 在根, 須藤隆一	韓国における畜産ふん尿の処理現況と処理技術	用水と廃水	41(2)	37-47	1999
K. Kohata	Water Purification by Bivalves in Shallow Water Areas	Farming Japan	33-4	35-41	1999
渡辺正孝, 木村敏彦, 天野邦彦, 木幡邦男, 志々目友博	栄養塩成層下における藻類種遷移と <i>Chattonella</i> 赤潮発生過程のモデル化	海岸工学論文集土木学会	46	1206-1210	1999
飯島明子, 風呂田利夫	東京湾の底生動物	千葉県動物誌	1203- 1224	1999	

2 口頭発表

発表者	題目	学会等名称	開催都市名	年月
功刀正行, 木幡邦男, 仁木拓志, 大槻 晃	海水中のDMSOの存在とその消費	1996年度日本海洋学会春季大会	東京	8.4
竹下俊二, 木幡邦男	湧昇流の発生に及ぼす熱塩対流の影響	化学工学会第29回秋季大会	京都	8.9
馬場紀彰, 里田昭治, 小森 悟, 竹下俊二	3次元直接数値計算を用いた風波気液界面近傍の乱流構造の解明	化学工学会第29回秋季大会	京都	8.9
中村泰男, 鈴木健太郎, 廣海十朗	オタマボヤのピコプランクトン捕食者としての重要性	1996年日本海洋学会秋季大会	松江	8.10
須賀伸介, 大井 紘	自由連想法によるアンケート調査が示す人々の海域の印象について	印象の工学ワークショップ	川崎	8.10
竹下俊二, 木幡邦男	東京湾における青潮発生メカニズム—移動現象論的観点に立って—	第7回東京湾検討会	箱根町	9.2
小倉久子, 飯村 晃, 木幡邦男, 田中秀之	現場蛍光法による東京湾のクロロフィル量の測定	第31回日本水環境学会年会	札幌	9.3
木幡邦男, 福島路生, 高村典子, 松重一夫, 今井章雄, 竹下俊二, 田中秀之, 中川 恵	霞ヶ浦隔離水界実験における底泥からの栄養塩溶出測定	第31回日本水環境学会年会	札幌	9.3
相崎守弘, 森岡美津子 木幡邦男, 田中秀之	ヤマトシジミの浄化能に関する研究	第31回日本水環境学会年会	札幌	9.3
木幡邦男, 竹下俊二, 中村俊二, 田中秀之	東京湾奥における光合成色素の変動	第31回日本水環境学会年会	札幌	9.3
竹下俊二, 木幡邦男, 田中秀之	青潮発生に及ぼす海面の熱的影響	第31回日本水環境学会	札幌	9.3
木幡邦男, 熊本雄一郎	冬季日本海における植物プランクトン色素分布	1997年度日本海洋学会春季大会	つくば	9.4
H. Miyazaki, A. Yoshimura, I. Kamimura, M. Furuki, K. Kohata, M. Watanabe	The long-term changes of the water quality and the management of pollution load in Osaka Bay	3rd. Int. Conf. Environ. Manage. Enclosed Coastal Seas	Stockholm	9.8
S. Takeshita, K. Kohata, H. Tanaka	Mechanism analysis to predict "Aoshio" upwelling of anoxic bottom water by the 4-m channel experiment and two-dimensional hydrodynamic-model calculation	3rd. Int. Conf. Environ. Manage. Enclosed Coastal Seas	Stockholm	9.8

発表者	題 目	学会等名称	開催都市名	年月
須賀伸介, 大井 紘	瀬戸大橋に関する住民意識調査結果の分析	土木学会第52回年次学術講演会	八王子	9.9
中村泰男	変わりもののプランクトンが実は重要なこと—オタマボヤと夜光虫を例に—	1997年海洋生物研究集会	船 橋	9.9
中村泰男, J.T. Turner	<i>Oithona similis</i> の摂餌：特に繊毛虫と鞭毛虫に着目して	1997年日本海洋学会秋季大会	鹿児島	9.10
S. Takeshita, K. Kohata	Relationship between degradation of thermo-halocline and "aoshio" occurrence in Tokyo Bay	Found. World Assoc. Isl. Stud. & World Isl. Conf.	Chejudo	9.11
須賀伸介, 大井 紘	自由記述データを用いた瀬戸大橋に対する住民意識の解析	第20回土木計画学研究発表会	長 岡	9.11
飯島明子	黒潮によるイシダミガイの幼生の長距離移送の可能性	1997年日本ベントス学会大会	熊 本	9.11
S. Takeshita, K. Kohata	Relationship between degradation of thermo-halocline and "Aoshio" occurrence in Tokyo Bay	1st. World Isl. Conf.	Cheju	9.11
中村泰男	これまで余り注目されなかった餌—捕食者関係	1998年日本海洋学会春季大会プランクトンシンポジウム	東 京	10.4
中村泰男	夜光虫の生態	1998年日本海洋学会春季大会	横 浜	10.4
樋渡武彦, 木幡邦男, 中村泰男, 田中秀之	浅海域の窒素循環におけるシオフキガイ(懸濁物食内在生二枚貝)の役割	1998年度日本海洋学会春季大会	横 浜	10.10
飯島明子	小笠原父島の転石潮間帯における腹足類の分布	1998年日本ベントス学会大会	東 京	10.11
金 淑陽, 木幡邦男, 樋渡武彦, 田中秀之	東京湾三番瀬における底泥の色素分布	第33回日本水環境学会年会	仙 台	11.3
木幡邦男, 渡辺正孝, 古城方和, 山崎富夫, 宮崎 一, 吉村 陽, 中越章博, 中野貴彦	兵庫県南部地震以後の大阪湾の水質	第33回日本水環境学会年会	仙 台	11.3
木村敏彦, 渡辺正孝, 木幡邦男, 須藤隆一	栄養塩成層条件下での赤潮藻類 <i>Chattonella antiqua</i> の日周鉛直移動とリン蓄積・代謝過程	第33回日本水環境学会年会	仙 台	11.3
中越章博, 山崎富夫, 中野貴彦, 上村育代, 古城方和, 渡辺正孝, 木幡邦男	フローサイトメータによる大阪湾及び播磨灘の海水の評価	第33回日本水環境学会年会	仙 台	11.3

発表者	題 目	学会等名称	開催都市名	年月
山崎富夫, 中野貴彦, 中越章博, 上村育代, 古城方和, 渡辺正孝, 木幡邦男	大阪湾・播磨灘における底泥から窒素・ 燐の溶出	第33回日本水環境学会年 会	仙 台	11. 3
中村泰男	オタマからオカメへ	1999年日本ベントス学会 東日本支部会	小 湊	11. 6
樋渡武彦, 木幡邦男	三番瀬におけるシオフキガイの分布と窒 素収支	第8回日本ベントス学会関 東地区大会	千 葉	11. 6
中村泰男	オカメブンプクの播磨灘での卓越	1999年度日本海洋学会秋 季大会	函 館	11. 9
樋渡武彦, 牧 秀明, 木幡邦男, 伊澤俊二	油汚染の毒性試験生物としての海産ヨコ エビ類の評価	1999年度日本海洋学会秋 季大会	函 館	11. 9
木幡邦男, 樋渡武彦	東京湾三番瀬における二枚貝の分布と水 質浄化	第二回日本水環境学会シン ポジウム	東 京	11. 9
K. Kohata, T. Hiwatari, H. Tanaka	Water Purification by Bivalves in Shallow Areas of Tokyo Bay	第4回EMECS/第4回 MED-COAST ジョイント 会議	Antalya	11.11

REPORT OF SPECIAL RESEARCH FROM
THE NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES, JAPAN

国立環境研究所特別研究報告

SR-32-2000

平成12年3月31日

編集 国立環境研究所 編集委員会

発行 環境庁 国立環境研究所
〒305-0053 茨城県つくば市小野川16番2
電話 0298-50-2343 (ダイヤルイン)

印刷 前田印刷株式会社筑波支店
〒305-0033 茨城県つくば市東新井14-3

Published by the National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-0053 Japan
March 2000

本報告書は再生紙を使用しています。