

内湾域における養殖漁業の自家汚染と生態系保全に関する研究

Benthic ecology in a cove organically polluted by fish farming

代表研究者 熊本女子大学生活科学部助教授 堤 裕 昭
Assoc. Prof., Faculty of Living Sciences, Kumamoto Women's Univ.
Hiroaki Tsursumi

In the past two decades, fish farming using pens has developed in the coastal waters throughout Japan. Such fish farming has allowed the production of large amounts of valuable fish and their supply to the markets in major cities on a regular basis. However, fish farming is often followed by serious organic pollution of the water and bottom sediment in the vicinity of the pen since approximately 90% of the food for the fishes results in organic discharge to the environment around the fish farm. Organic pollution of soft bottom sediment is apt to be accompanied by the development of reducing conditions in the sediment and deoxidization of the bottom water, as a results of the decomposition of abundant organic matter. The benthic communities in such organically polluted areas are subject to catastrophic environmental disturbances. I have studied the benthic conditions in a specific cove in which fish farming has been carried out since 1973. The results of the present study clearly showed the occurrence of the series of phenomena during summer which were associated with organic pollution of bottom water and sediment in the cove: (1) oxygen depletion of bottom water; (2) high levels of total sulfide in the sediment; (3) temporary defaunation. The benthic communities in the cove were dramatically changed in faunal composition and in abundance of members as organic pollution by the fish farming progressed. Bivalves and gastropods predominated in the natural benthic communities before the initiation of fish farming. The majority of the present benthic communities were replaced by polychaetes. In particular, *Capitella capitata* predominated in the most polluted areas where were in the vicinity of the fish farms. The total biomass of the benthic communities decreased by more than 90% in the past 22 years. The fish farming itself imposes rather serious damages on the benthic ecosystem in the cove through the large organic discharge that it generates.

研究目的

沿岸域は地球上で生物による一次生産が最も高く、生物の非常に豊富な場所場所の一つに挙げられる (Mann, 1972)。一方、人類にとっても沿岸域は生活に便利で極めて利用価値の高い場所の一つであり、多様な活動が営まれてきた。そのため、そこに棲息する豊富な生物群集はしばしば人間の活動の直接的な影響下にあり、元来の生態系の成り立ちが損なわれやすい。これは単に沿岸生態系の破壊に留まらず、最終的にそこを利用している人間の側にとって、その生活や活動にマイナスの影響として還元されることは明白である。本研究においては、近年、日本各地の沿岸域において盛

んに行われるようになってきた魚類養殖漁業に焦点をあて、その養殖漁業のもたらす有機物汚染が周辺海域の海底生態系に及ぼす影響について報告する。同様な有機物汚染は大都市周辺における生活排水や工場排水によってももたらされており、本研究は有機物汚染による沿岸域の海底生態系の変化について、一般的なモデルを提示するものでもある。また、本研究結果をもとに、海底の有機物汚染に対する対策について検討を加え、沿岸生態系の保全のための手段を模索する。

研究経過

本研究の対象としている地域は、九州、熊本県の天草下島の北西端に位置する富岡湾の内湾、巴

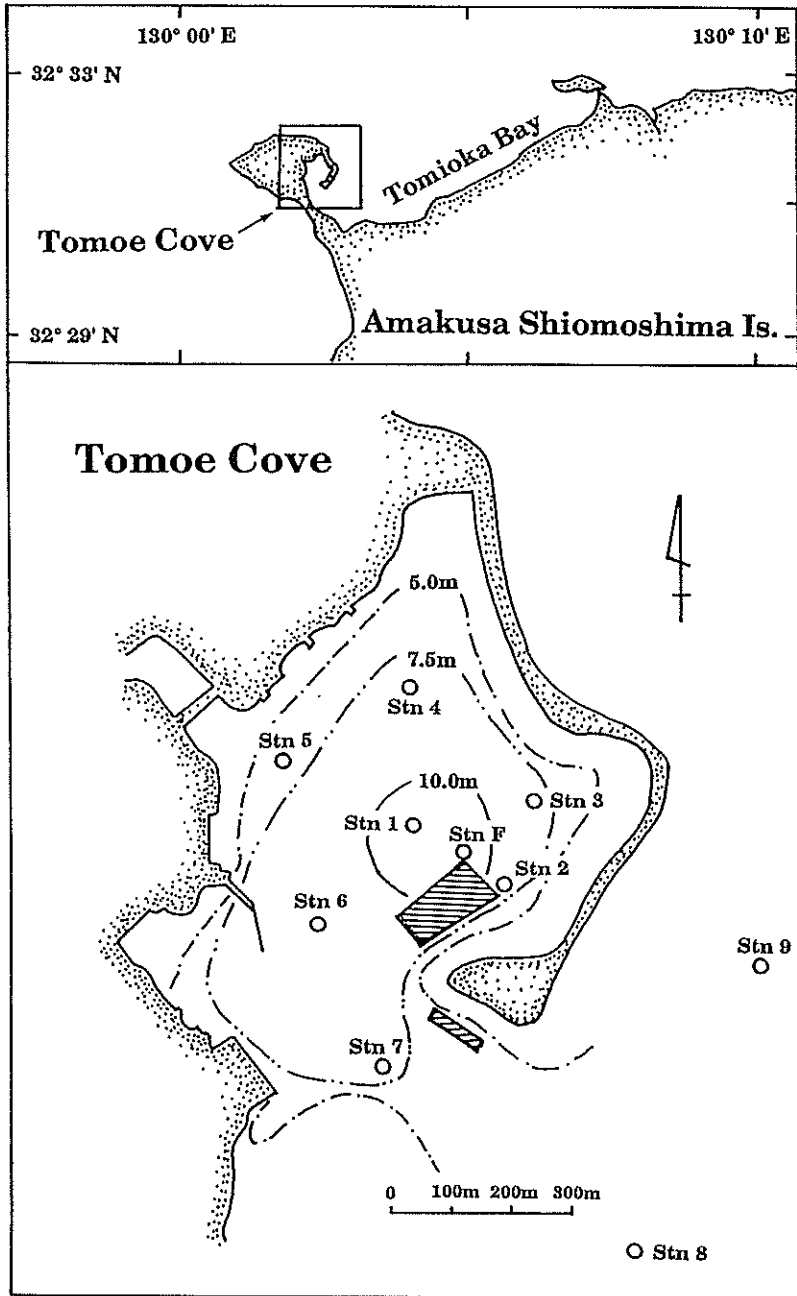


図1. 調査地域の巴湾。(○) 調査地点; (▨) 魚類養殖場.

湾である。この湾においては、1973年よりタイおよびハマチの養殖が行われてきた。この魚類養殖のために、1978年当時で年間に約1300トンあまりの餌（主に鰯のミンチ）が消費され、その

後も養殖用の餌の消費量は同様なレベルで推移していると考えられる。養殖用の餌は、養殖魚に与えられる際に、一部は魚に食べられる以前に養殖いけすから流出し、養殖魚が摂餌した分について

も、かなりの割合で排泄物として出され、これらが海底に沈積することになる。このように魚類養殖場からは多量の有機物が周辺海域に流出しており、一般に、食物連鎖における一段上位の栄養段階の生物へのエネルギー転換効率が10%程度であることから、魚類養殖場からは与えられた餌量の約9割近くが、結果的には周辺海域へ流出し、魚類養殖場周辺の海水および底質を汚染する原因となっていると考えられる。

調査域の巴湾においては、魚類養殖が開始された1973年直後から、毎年、夏季に底層水の貧酸素化現象が見られるようになり、有機物によって汚染されたことによる海底環境の嫌気化が著しくなってきた(石田, 1978; Tsutsumi & Kikuchi, 1983)。それに伴って、湾内の底生動物群集の著しい衰退が見られるようになってきた(Tsutsumi & Kikuchi, 1983)。巴湾においては、魚類養殖漁業開始以前の1966~1967年(Kikuchi & Tanaka, 1978)、および開始後の1978~1979年(Tsutsumi & Kikuchi, 1983)に、底生動物群集の定量調査が行われている。本研究においては、これらの研究結果を踏まえて、1966~1967年および1978~1979年の調査と同じ調査地点において、1989年4月6日、8月25日、12月7日に、海水の溶存酸素濃度と底質表面の総硫化物含量の測定、ならびに底生動物の定量調査を行った。今回の調査結果によって、過去17年に及ぶ魚類養殖による海水および底質の有機物汚染が、周辺海域の海底生態系に及ぼしてきた影響を明らかにする。

本研究の調査域は巴湾内に位置する8地点(地点1~7, 地点F)および湾外に位置する2地点(地点8, 地点9)の合計10地点である(図1)。各地点において、溶存酸素計による溶存酸素濃度の垂直分布の測定、ORPメータによる底質表面の酸化還元電位の測定、化学分析用の底質の採取、ならびに底生動物の定量調査のための底質の採取(エックマン・バージ型採泥器を用いて0.16 m²の底質の採取)を行った。底生動物の定量調査用の底質は1 mm目のふるいにかけて、ふるいに残った生物をホルマリンで固定後、75%アルコー

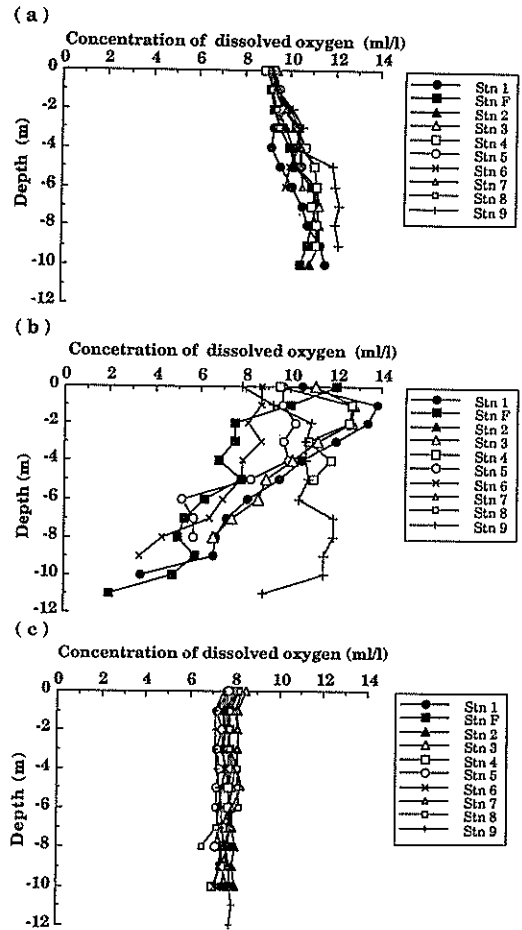


図2. 溶存酸素濃度の垂直分布。(a) 1989年4月6日; (b) 1989年8月25日; (c) 1989年12月7日。

ル中に保存し、計数と湿重量の計量を行った。
研究成果

1) 夏季の海底環境の嫌気化

図2には1989年4月、8月、12月の各調査地点における溶存酸素濃度の垂直分布を示した。4月および12月では表層から底層まで溶存酸素濃度にほとんど変化が認められず、ほぼ飽和濃度に近い値となっている。これに対して、8月では湾外に位置する地点8および地点9を除き、底層に向かうにつれて溶存酸素濃度が著しく低下し、特に養殖場に隣接した地点Fの底層水の濃度は2 ml/l以下の値を示している。このように、巴湾に

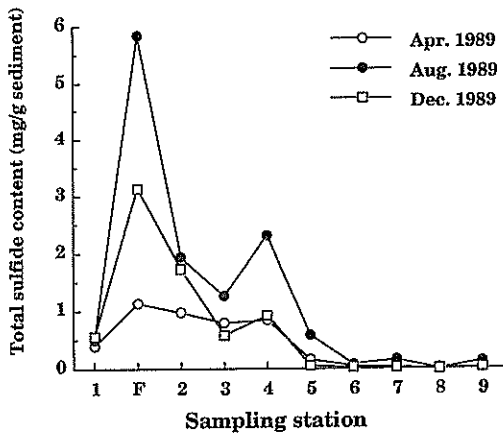


図3. 底質表層の総硫化物含量の季節変化。

においては夏季に一時的に底層水の溶存酸素が極端に低下する。

底層水の貧酸素化現象の発生に伴い、溶存酸素の欠乏した海底では底質中の嫌気性の硫酸塩還元菌が活性化され、その代謝活性によって生物には有毒な硫化水素が生産される。硫化水素のかんりの部分は底質中の金属と結合するので、硫化水素を単独で定量することは非常にむずかしいが、底質中に存在する硫化物全体の定量は検知管法を用いて容易に行うことができる。図3に1989年4月、8月、12月における、底質表層の総硫化物含量の分布を示した。4月においても湾内の地点においては底質表層の総硫化物含量が1.0 mg/g 乾泥を越え、底層水の溶存酸素濃度が高い春季においても底質はかなり嫌気的であることを示していた。8月には湾内の地点において総硫化物含量がさらに増加した。特に、魚類養殖場に隣接した地点Fにおいては5.8 mg/g 乾泥にまで達した。底層水の溶存酸素の欠乏に伴い、底質中においてはさらに多量の硫化水素が生産されたことを示している。12月には底層水の溶存酸素条件が回復しているので、総硫化物含量は8月と比較すると減少傾向にあった。しかしながら、依然として湾内の地点の底質表層は高レベルの硫化物を含んでおり、周年にわたって湾内の底質がかなり嫌気的であることがわかる。

2) 底生動物群集の季節変化と長期的な変遷

図4には、各調査地点における、1989年4月、

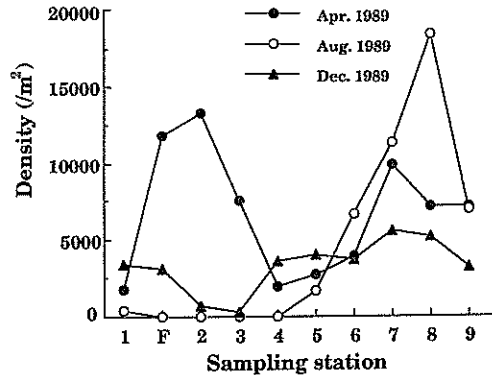


図4. 底生生物群集の密度の季節変化。

8月、12月の底生生物の密度を示した。4月には湾内において底生生物の密度が高く、地点Fおよび地点2においては10000 個体/m² を越えている。これに対して、8月では湾内の5地点(地点1, F, 2, 3, 4)において底生生物が全く分布していない。上述のように、有機物で汚染された海底においては夏季に溶存酸素が欠乏し(図2)、多量の硫化水素が生産されるので(図3)、このように夏季には底生生物が死滅し、一時的に生物の空白な地域が形成されるのである。海底の環境条件が回復する冬季には再び底生生物が周辺の健全な地域から再移民して、底生生物群集を再構築する。12月には、すでに夏季に無生物化した湾内の地点に底生生物が再移民を開始していた。

魚類養殖場から流出する多量の有機物に汚染された巴湾においては、養殖漁業が開始されて5年後の1978年に、Tsutsumi & Kikuchi (1983) が夏季の底層水の貧酸素化現象、底質の嫌気化、および底生生物の一時的な死滅を確認している。以後、毎年夏季にこの現象を繰り返している(未発表)。したがって、底生生物群集は底層水の貧酸素化現象が発生する直前の4月~5月に年間を通じて最も豊富になり、夏季に死滅後、冬季から翌春季にかけて回復するサイクルを繰り返している。そこで、底生生物のもっとも豊富な4月に焦点をあてて、養殖漁業の開始以前の1966年4月(Kikuchi & Tanaka, 1978)、養殖漁業の開始後の1978年4月(Tsutsumi & Kikuchi, 1983)、本

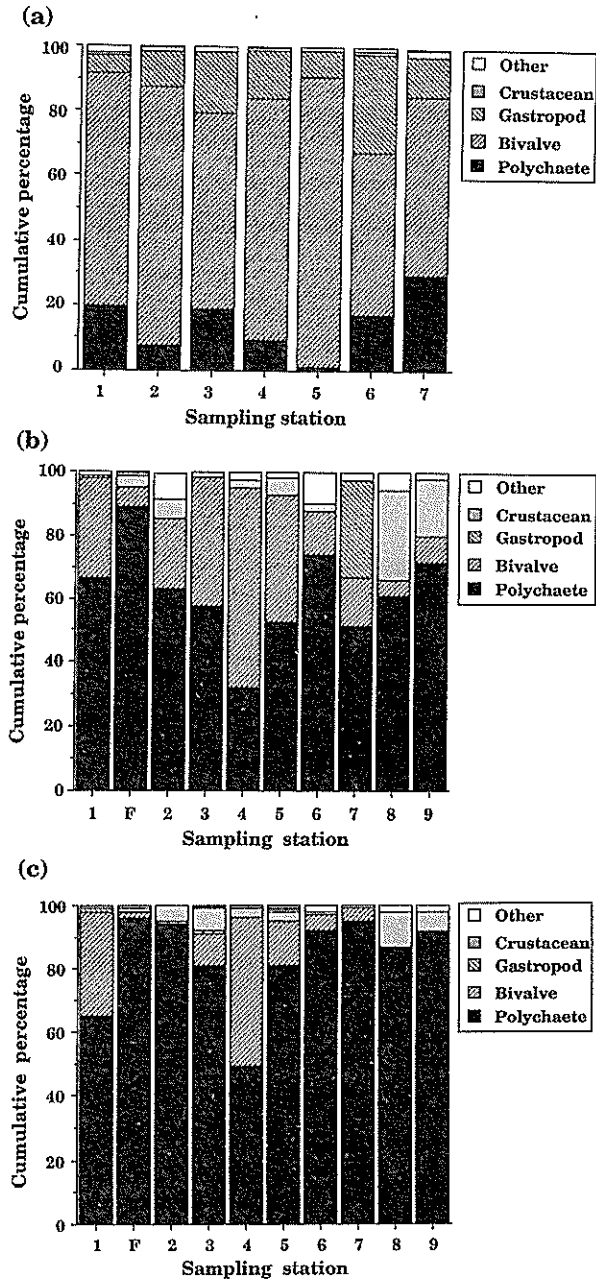


図 5. 有機物汚染の進行に伴う個体数組成比率における底生生物相の変化。(a) 1966 年 4 月 (Kikuchi & Tanaka, 1978); (b) 1978 年 4 月 (Tsutsumi & Kikuchi, 1983); (c) 1989 年 4 月 (本調査)。

調査における 1989 年 4 月の底生生物群集の組成を比較し、有機物汚染の進行に伴う生物相の変化を調べた (図 5)。

魚類養殖漁業による有機物汚染のなかった 1966 年 4 月の底生生物群集は、全体的に貝類が卓越した群集であり、個体数組成比率において

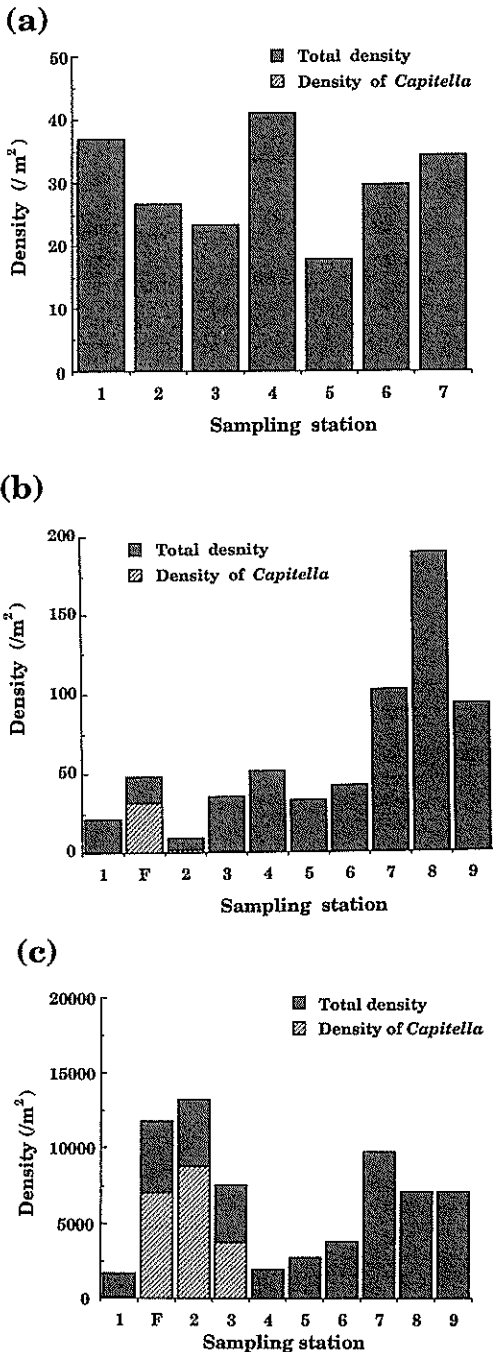


図6. 有機物汚染の進行に伴う底生動物群集の密度の変化およびイトゴカイ (*Capitella capitata*) の密度の変化。(a) 1966年4月 (Kikuchi & Tanaka, 1978); (b) 1978年4月 (Tsutsumi & Kikuchi, 1983); (c) 1989年4月 (本調査)。

70~98%が貝類によって占められていた。一方、魚類養殖漁業が開始されて以後の1978年4月の底生動物群集は、群集組成が一変して多毛類がもっとも卓越し、巻貝が消滅し、二枚貝も個体数組成比率が著しく低下していた。さらに、今回の調査時(1989年4月)においては、調査全地点において多毛類が個体数組成比率の50~95%を占めていた。このように、有機物汚染の進行に伴って夏季に生物が一旦死滅する環境下において、海底の環境条件の回復する冬季から翌年の春季に底生動物群集の棲息密度が回復する。しかしながら、その底生動物群集の生物相には、湾内における有機物汚染が始まる以前と大きな差異が認められ、個体数組成比率において多毛類が著しく増加する傾向が認められた。

この多毛類の増加に関しては、さらに特筆すべき特徴が挙げられる。図6には1966年4月、1978年4月、1989年4月の底生動物群集の全体の密度と多毛類の1種であるイトゴカイ (*Capitella capitata*) の密度を示した。1966年~1967年の調査において、イトゴカイは巴湾において全く記録されていない (Kikuchi & Tanaka, 1978)。ところが、1978年には地点Fおよび地点3に出現し、1989年には養殖場からの有機物で最も汚染された3地点(地点F, 2, 3)において、この1種の多毛類の密度がそれぞれ7000個体/m²、8800個体/m²、3700個体/m²に達し、全底生動物群集の個体数組成比率の50~67%を占めるまでに増加していた。

巴湾に棲息する底生動物群集について、その生物量についても、魚類養殖開始以前とは大きな変化が見られる。図7には、1967年4月、1978年4月、1989年4月の地点1における、底生動物群集の湿重量を示した。養殖漁業開始以前の1967年の底生動物群集は図6に示したように、個体数組成比率において貝類の卓越する群集であった。湿重量においてもホトトギスガイ (*Musculista senhousia*) とシズクガイ (*Theora lubrica*) の2種の二枚貝で、底生動物群集全体の約80%を占めていた。また、底生動物群集全体の湿重量としても113g/m²に達していた。一方、養殖漁

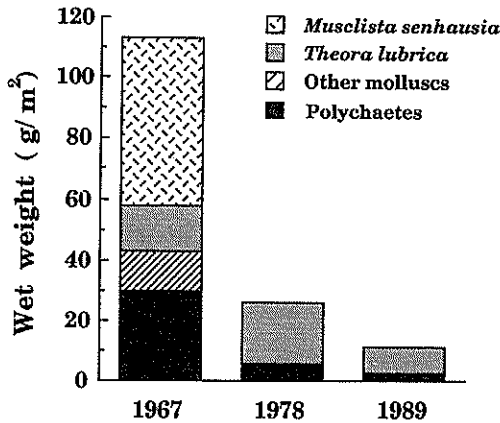


図7. 有機物汚染の進行に伴う底生生物群集の湿重量の変化。(a) 1967年4月(Kikuchi & Tanaka, 1978); (b) 1978年4月(Tsutsumi & Kikuchi, 1983); (c) 1989年4月(本調査).

業開始後の1978年4月では、貝類がわずかにシズクガイ1種だけとなり、底生生物群集の湿重量は1967年の1/4以下の26 g/m²に減少していた。さらに、今回の調査時の1989年には、底生生物群集の湿重量が11 g/m²に減少し、生物量は1967年の実に1/10以下まで減少していた。このように、巴湾においては、湾内における魚類養殖漁業に伴う海底の有機物汚染の結果、底生生物の極めて乏しい海底が形成されていた。

今後の課題と発展

巴湾は日本各地の沿岸域で近年盛んになってきたタイやハマチの養殖漁業の現状を示す最も典型的な例と考えられる。魚類養殖は一般に台風や冬季の強風や大波を避けるため半閉鎖性の海域を選んで設置されている。このような海域の場合、潮汐に伴う外洋水との交換率が悪く、特に夏季に海水の成層構造が発達したときの底層水は停滞したままになりがちである。そこに、さらに魚類養殖場からの有機物負荷が加わると、海底環境は一気に嫌気化してしまう。巴湾において1966年からの継続されてきた調査の結果は、このことを明白に実証している。現在までのところ、一般に公表された論文および報告書などでは、巴湾における研究例で明らかにされたような魚類養殖場から流出する有機物による汚染と、それに伴う海底環境

の嫌気化、および底生生物群集の著しい衰退に関する報告例は非常に少ない。しかしながら、巴湾と同様に魚類養殖場周辺の海域において魚類養殖による有機物汚染のために海底生態系に変調をきたしている海域はかなりの数にのぼると推測される。魚類養殖場は、各々の海域において独立に存在しているわけではなく、海水の流動に伴う物質の交流を通してその地域の沿岸生態系の一部として存在している。したがって、魚類養殖場周辺の水質の汚濁および海底の汚染による嫌気化は、とりもなおさず、養殖環境の悪化を意味するものであり、養殖魚の成長率の低下、生残率の低下、抵抗力の低下に伴う病気への感染率の増加をもたらすことが指摘される。また、本調査域の巴湾においては、魚類養殖場の周辺海域の海底生態系の破壊についても無視できないものがあるが、魚類養殖漁業そのものが近い将来自家汚染によって大きな打撃を被ることも懸念される。現在までのところ、これらの諸問題を踏まえて、魚類養殖の推進と養殖場およびその周辺の環境の長期的な維持に関して体系的に研究した例は皆無である。

魚類養殖漁業に関しては、その方法の根本に自家汚染を招く問題を抱えている。養殖魚が餌となるイワシを食べるとき、代謝生理学的な制約から10 kgのイワシからせいぜい1 kgのタイしか生産することができない。9 kgのイワシは何らかのかたちで養殖場から流出し、そのかなりの部分が海底に沈積し、それが分解していく過程で海底生態系に大きな打撃を与えることになる。養殖漁場およびその周辺海域の環境条件を長期的に維持していくためには、養殖場から流出する有機物をそのまま回収するか、もしくは海底に沈積した有機物の分解を、底層水および底質の間隙水の溶存酸素濃度を低下させることなく促進する必要がある。現在までのところ、この有機物汚染対策として有効な手段は全く開発されていない。

本研究の研究成果としてもっとも注目すべき点は、巴湾内において魚類養殖による有機物汚染の結果、貝類を主体とした底生生物群集が衰退していくなかで、多毛類のイトゴカイ(*Capitella capitata*)だけが棲息域を拡大し、夏季を除いて高密

度の個体群を形成していることである。この種は世界各地において工場排水や大都市からの生活排水の流入などによる有機物汚染域に高密度に出現することが知られているが (Pearson & Rosenberg, 1978), 本調査域におけるこの種の出現は魚類養殖による有機物汚染が海底生態系に対してこれらの場合と全く同様な効果を及ぼしていることを示している。

海底の有機物汚染に伴う貝類群集の衰退に関しては、沿岸生態系における貝類の機能的役割を考慮した上で評価されるべきであると考えられる。つまり、海底の有機物汚染の結果、その海域では貝類による主成分を炭酸カルシウムとする殻の生産が大幅に減少しているか、もしくはほとんど停止した状態となっている。貝類による殻の生産が海洋生態系に及ぼす効果については、その評価が現在のところまだ明確になっていない。しかしながら、この殻の生産の結果、海水中の重炭酸塩が固定されており、地球表面における炭素循環において、貝類による殻の生産が生態系を循環する炭素の吸収源 (シンク) の一つとして機能してきたはずである。海底の有機物汚染は本調査域のような狭い閉鎖性の内湾域だけではなく、工場排水や大都市からの生活排水の流入などによって大規模に進行している (Pearson & Rosenberg, 1978)。海底の有機物汚染に伴う貝類群集の衰退は、その炭素の吸収源の一つが衰退しつつあることを意味している。沿岸域における生物による殻の生産量の正確な推定と、生態系の維持という観点から生物による殻の生産が生態系に及ぼす影響について、正確な評価が急がれるべきであると考えられる。

海底の有機物の汚染の進行とともに出現し、棲息域を拡大するイトゴカイについては、汚染域の海底に沈積したヘドロの処理に関して、その生物学的な処理方法として利用の可能性が考えられる。1 mm 目のふるいで底質をふるったときに、ふるいの中に残る大きさの底生動物を大型底生動物というが、イトゴカイは現在までのところ唯一、有機物に汚染されて嫌気化した底質中に埋没して棲息し、その底質を摂食する堆積物食の底生動物である。筆者らの研究では、有機物に汚染さ

れて嫌気化した底質を摂食することによってのみ正常な成長を遂げることができる種であることが判明している。また、生活環が1ヶ月程度と非常に短く、この種の好む条件下 (有機物含量が高く、適度に嫌気的な底質) においては個体群が爆発的に増殖する (Tsutsumi & Kikuchi, 1984, Tsutsumi, 1987; Tsutsumi, 1990; Tsutsumi *et al.*, 1990)。イトゴカイは有機物に汚染された底質中の有機物を直接または間接的に消費しうる唯一の大型底生動物であるということができる。有機物による水の汚染の除去に関しては、下水処理などのように生物学的な方法を応用した例が少なくない。図3に示すように、4月の底質中の総硫化物含量の値は8月の値に比べるとかなり低い。これは、冬季における溶存酸素の濃度の高い海水の海底への供給に伴う化学的な底質表面の酸化だけではなく、底質中に棲息する底生生物の活動による直接または間接的な効果がかなり貢献していると考えられる。図6に示すように、現在、養殖場周辺の有機物に汚染された底質に棲息する底生生物の約半数がイトゴカイ1種で占められることから (底質中に棲息する種ではイトゴカイが大半を占め、他種の多くは底質表面に棲息空間を持つ)、その底質の浄化能力は無視できないものがあると考えられる。今後、このイトゴカイの生態学的特性や代謝生理学的特性についてさらに研究を進め、この種の潜在的な生物活性をうまく利用できる方法を見いだせば、有機物に汚染された底質を比較的短期間に処理するための有効な手段が考案できることも考えられる。

謝 辞

この研究は日産科学振興財団の研究助成を得て行なわれた。末筆ながらここに深く謝意を表したい。

引用文献

- 石田宏一 (1978): 浦・湾における養殖魚類放養量の一試算について。水産土木, 15, 27-33.
Mann, K. H. (1973): Seaweeds: their productivity and strategy for growth. *Science*, 182, 975-981.
Pearson, T. H. and Rosenberg, R. (1978): Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environ-

- ment. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **16**, 229-311.
- Tsutsumi, H. and Kikuchi, T. (1983): Benthic ecology of a small cove with seasonal oxygen depletion caused by organic pollution. *Publ. Amakusa Mar. Biol. Lab.*, **7**, 17-40.
- Tsutsumi, H. and Kikuchi, T. (1984): Study of the life history of *Capitella capitata* (Polychaeta: Capitellidae) in Amakusa, South Japan including a comparison with other geographical regions. *Mar. Biol.*, **80**, 315-321.
- Tsutsumi, H. (1987): Population dynamics of *Capitella capitata* (Polychaeta: Capitellidae) in an organically polluted cove. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **36**, 139-149.
- Tsutsumi, H. (1990): Population persistence of *Capitella* sp. in a mud flat with environmental disturbance by organic enrichment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **63**, 147-156.
- Tsutsumi, H., Fukunaga, S., Fujita, N. and Sumida, M. (1990): Relationship between growth of *Capitella* sp. and organic enrichment of the sediment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **63**, 157-162.

発表論文

- Tsutsumi, H., Kikuchi, T., Tanaka, M., Higashi, T., Imasaka, K. and Miyazaki, M. (in press): Benthic faunal succession in a cove organically polluted by fish farming. The Proceedings of International Conference on Environmental Management of Enclosed Coastal Seas. Marine Pollution Bulletin, Pergamon Press, London.