

特集／環境修復

洞海湾における水環境の現状と

生態学的環境修復*

山 田 眞知子*¹・田 中 和 彦*¹・吉 川 ひろみ*¹

キーワード ①富栄養化 ②ハビタット ③生態系 ④環境修復 ⑤洞海湾

1. はじめに

洞海湾は、紀元前3～4世紀に形を成して以来19世紀に至るまで、水深は浅く遠浅でアマモ場も点在し、「クルマエビの宝庫」と呼ばれるほど豊かな内湾であった。しかし、1901年に官営八幡製鉄所が設立され、北九州重化学工業地帯が発展していく中、産業港として機能を果たすべく浚渫と埋立てが繰り返され、図1に示すようにかつての海岸線がまったく消失するまでに形状は一変した。また洞海湾は、湾岸に林立する工場からの未処理排水の流入により水質汚濁が著しく進行し、魚影がほとんど認められない「死の海」と化した。しかし、70年から工場排水が処理され放流されるようになると、数年のうちにすべての水質環境基準を達成した¹⁾。また74～76年にわたって実施された汚染底質の浚渫も功を奏し、83年にクルマエビ漁が復活し、さらに93年には海洋生態系の再生も確認された²⁾。湾のこのような劇的な水質・底質改善は、「洞海湾サクセスストーリー」と称され、高く評価されている¹⁾。

しかし、これで洞海湾の水環境問題がすべて解決されたわけではない。生物が甦ったとはいえ、後述のような洞海湾生態系の疲弊状況をみれば、それは明らかである。本稿では、産業公害脱却後1980年以降の洞海湾の海域環境特性と水環境問題を明らかにし、現在研究している環境修復法について報告する。

なお、この研究は九州大学、香川大学、熊本県

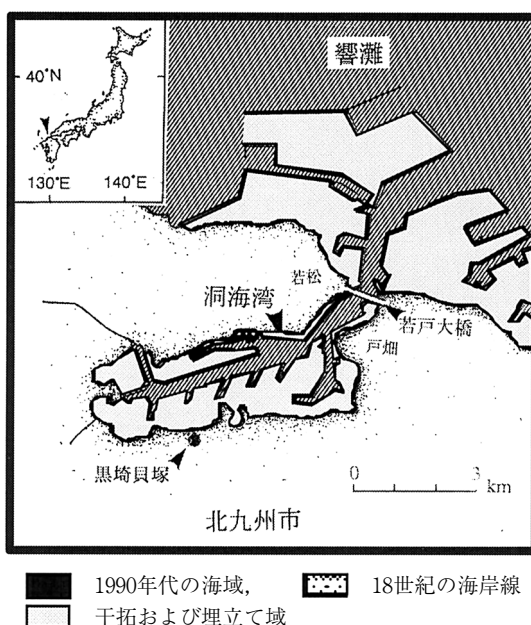


図1 洞海湾の形状の変化

立大学および北海道大学と共同で実施したもので、ご指導を賜った先生方に心から感謝申し上げます。

2. 産業公害脱却後の洞海湾の海域環境特性と水環境問題

2.1 海水中の窒素・リン濃度

1980年4月～95年3月までの15年間にわたる公共用水域水質調査結果によれば、洞海湾湾央部の

*Present Condition of Aquatic Environment and an Eco-remediation Project in Dokai Bay, Kitakyushu City

*¹Machiko YAMADA, Kazuhiko TANAKA and Hiromi YOSHIKAWA (北九州市環境科学研究所アクア研究センター), Kitakyushu City Institute of Environmental Sciences, Aqua Research Center

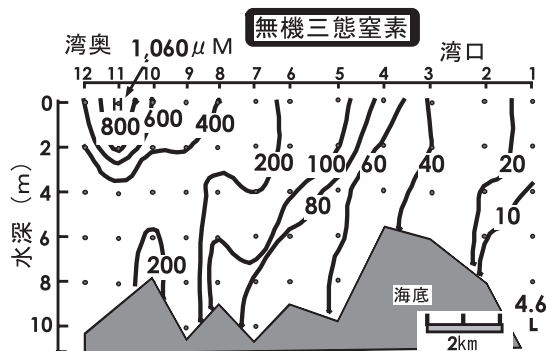


図2 洞海湾における無機三態窒素濃度(単位 μM)の鉛直断面図(1993年9月8日)

環境基準点 D6 表層(午前中)の全窒素の平均値は 6.6mg/l 、最大値は 18mg/l で、全リンは平均値 0.14mg/l 、最大値 0.43mg/l であった。この結果は、当時洞海湾が植物プランクトンの培養液のような水質になっていたことを示す。また、93年9月8日に洞海湾において初めて窒素・リンに関するトランセクト調査を実施した。全窒素の大半を占める無機三態窒素濃度は、図2に示すように湾奥部の表層でもっとも高く(最高値の $1,060\mu\text{M}$ は 14.8mg/l)、湾口部下層に向かって低下する(最低値の $4.6\mu\text{M}$ は 0.06mg/l)傾向が認められた。リンの鉛直断面図にも同様の濃度勾配が認められ、窒素・リンの排出源が湾奥部にあることが明らかになった。

なお、湾内における全窒素と全リンの滞留時間は、それぞれ12日と14日である³⁾。

2.2 赤潮の発生特性

上記の公共用水域水質調査時に植物プランクトン調査も実施し、各月の赤潮の発生率(各月において、赤潮の発生の認められた回数を調査回数で除した値の百分率)を水温との関連から検討した。図3に示すように、水温の低い11～4月の半年間にわたっては赤潮の発生がまったくみられず、5月、6月、7月および10月の4カ月は赤潮発生率が約47%、9月は60%、8月には約87%と、洞海湾では水温が高まるほど赤潮の発生確率が高くなるという特性を持っていることが示された⁴⁾。

洞海湾の赤潮形成種(赤潮生物)について、その出現状況を①単一種が高密度に出現していた場合(単独赤潮)、②2～3種が、単独でも赤潮形成密

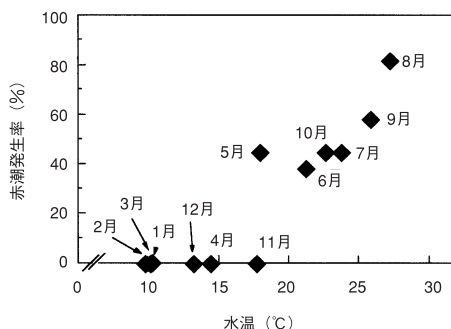


図3 洞海湾湾中央部の環境基準点 D6 における赤潮発生率(1980年4月～1995年3月に毎月1回調査)
(赤潮発生率=各月で赤潮の認められた回数/調査回数)×100

度に達する程度出現していた場合、および③2～3種のプランクトン密度の合計値が赤潮形成密度に達していた場合の3通りに分け、その出現回数を表1に示した。珪藻類の *Skeletonema costatum* と *S. tropicum* の *Skeletonema* 属は単独赤潮形成回数が20回、混合赤潮形成回数が16回、計36回と他の赤潮生物に比較しその赤潮形成頻度が傑出していた。調査期間中の全赤潮発生回数が51回であったことから、洞海湾で形成される赤潮の約70%に本属が関与していたことになる。次に赤潮形成回数の多かったのは藍藻類の *Chroococcaceae* と珪藻類の *Cyclotella striata* および *C. striata* var. *subsalina* で、これらのことから洞海湾では珪藻類と藍藻類が赤潮生物として重要であったことがわかる⁴⁾。

2.3 貧酸素水塊の発生特性

洞海湾の場合、調査地点や調査水深があらかじめ設定されている公共用水域水質調査では貧酸素水塊の発生状況を明瞭に把握できないため、1994年6月16日～9月16日の3カ月間にわたって、溶存酸素濃度(DO)の詳細なトランセクト調査と時系列調査とを実施した⁵⁾。その結果、洞海湾では図4に示すように貧酸素水塊の種場は湾奥部の底層であり、溶存酸素濃度が 3mg/l 以下の貧酸素水塊は水深1m以深で湾のほぼ中央部まで広がっており、その規模の大きさが確認された。また、 3mg/l の貧酸素水塊は6月の調査開始時にはすでに発生しており、 $0\sim 0.2\text{mg/l}$ の無酸素に近い水塊は8月から調査終了時まで断続的に発生していたこともわかった。

表 1 洞海湾環境基準点 D 6 における赤潮生物の赤潮形成回数
(1980年4月～1995年3月に毎月1回調査)

植物プランクトン		単独 赤潮	混合赤潮		計
			A*1	B*2	
藍藻綱	Chroococcaceae	3	4	3	10
クリプト藻綱				2	2
渦鞭毛藻綱	<i>Prorocentrum minimum</i>		1		1
	<i>P. triestinum</i>		1		1
珪藻綱	<i>Cyclotella striata</i>	3	6	1	10
	<i>Skeletonema</i> spp.	20	10	6	36
	<i>Thalassiosira</i> spp.			2	2
	<i>Chaetoceros salsugineum</i>	2			2
ラフィド藻綱	<i>Heterosigma akashiwo</i>			1	1
ユーグレナ藻綱	<i>Eutreptiella</i> spp.	1		6	7
プラシノ藻綱	<i>Nephroselmis</i> sp.		2		2
	<i>Pyramimonas</i> spp.			2	2

*1 1種の植物プランクトンで赤潮形成密度に到達

*2 数種の植物プランクトンで赤潮形成密度に到達

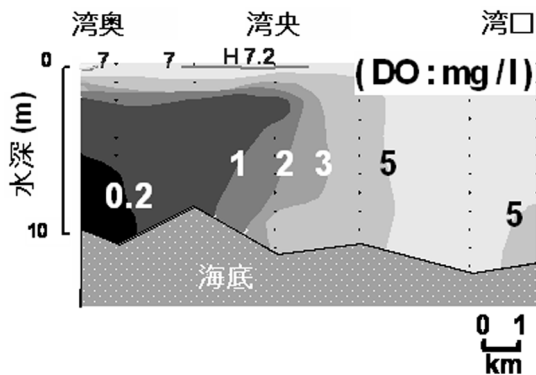


図 4 洞海湾における溶存酸素(DO)濃度の鉛直断面図(1994年8月31日)

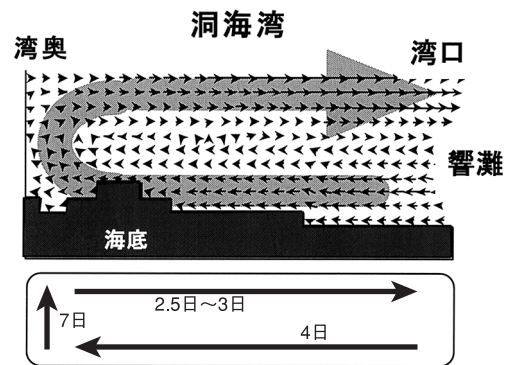


図 5 洞海湾の基本的な流れ 残差流

実際、洞海湾全域について1969年から5年間にわたり生態系の主要生物群について調査した結果、夏季や秋季には湾奥部で底生動物⁶⁾や付着動物⁷⁾の出現量が激減し、とくに湾奥部にわずに残された干潟域においても底生動物が壊滅的に減少した⁶⁾ことが確認され、貧酸素水塊が湾の生態系に悪影響を及ぼしていたことが明らかになった。

2.4 残差流と海域特性

洞海湾の基本的な流れを調べるため残差流調査を行った結果、図5に示すように湾では湾奥部から湾口部に向かって表層を流れる流れが卓越しており、この流れにより下層では湾口部から湾奥部に向かう流れが生じていた。このような流れの

駆動力は湾奥部に流入する河川水で、洞海湾では湾口循環流が卓越していることが確認された⁸⁾。

前述のように洞海湾の水質は植物プランクトンの培養液のようなレベルで、赤潮が周年にわたって発生してもよい状況にあったにもかかわらず、実際には赤潮は高水温期にしか発生しなかった。これは、洞海湾の表層ではわずか2.5～3日という速さで海水が流出するため、植物プランクトンの分裂速度が海水流出速度にまさる高水温期にしか赤潮を形成できないためである^{9,10)}。また、洞海湾で赤潮生物に珪藻が多かった⁴⁾のは、海域の植物プランクトンの中で分裂速度の速いのは珪藻類であるため、海水流出速度にまさる分裂速度を持つ珪藻類が赤潮を形成できた¹¹⁾ものと考えられ

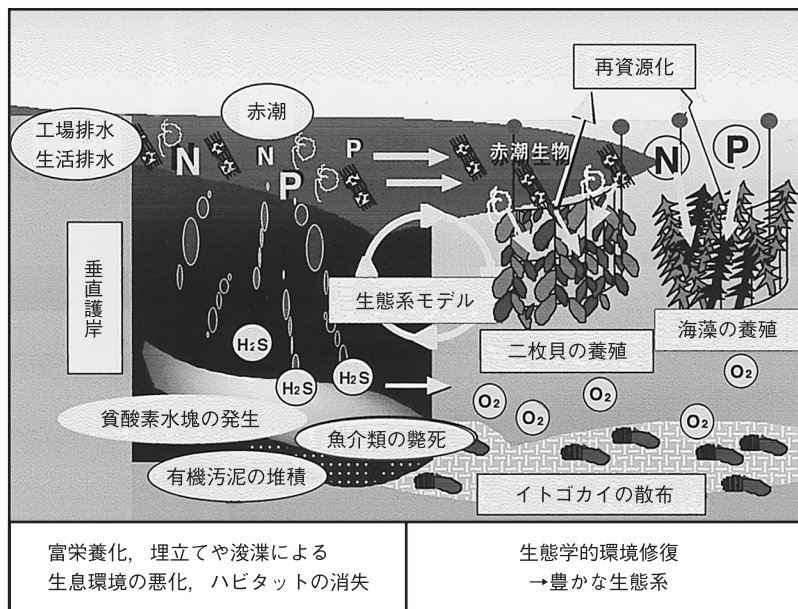


図6 閉鎖性海域の生物生態環境の悪化と生態学的環境修復法

る。これらのことから、洞海湾の赤潮発生特性には海水の流れという物理的環境要因が大きく関わっていることが明らかになった。

2.5 現在の洞海湾の水環境問題

以上のことから、洞海湾では窒素・リン濃度が高く赤潮や貧酸素水塊が発生し、これらが生態系に悪影響を及ぼしているなど、同湾では「富栄養化」という新たな水質問題が生じていることが確認された(図6の左側半分)。また、かつて豊かな自然に恵まれていた洞海湾は、現在、埋立てや浚渫、また湾岸のコンクリート護岸化により生物の生息場所(ハビタット)が著しく改変、消失している。このことから、洞海湾の2つめの水環境の問題は、海洋生物の貧弱化した居住環境といえる(図6の左側半分)。

さらに洞海湾では環境ホルモンに代表される化学物質の水質汚染^{12, 13)}も危惧されており、これに加えると洞海湾では現在3つの問題を抱えていることになる。しかし、これらの問題は洞海湾に特有のものではなく、後背に大都市を擁する東京湾や米国のチェサピーク湾等、内湾に共通の水環境問題である。そして、これらの課題に対して汎用される対策がまだ提案されていないのも現状である¹⁴⁾。さらに富栄養化の原因物質である窒素・リンはノンポイントソースからの負荷もあることか

ら、富栄養化問題は今後慢性化する水質問題であることが予測されている¹⁵⁾。

3. 水域の生態学的環境修復技術の開発

北九州市では、洞海湾が再び健全で豊かな水環境となることをめざして「富栄養化」を解消し、「ハビタット」を改善・創出する、新しい環境修復技術¹⁴⁾の開発研究に取り組むこととした。それは、湾に優占的に出現する生物の機能を活用し環境浄化を図る技術¹⁷⁾、水中のみでなく陸上の物質循環も促進する技術、さらにある程度の環境管理を行う手法を組み合わせたもので、この新しい技術を「生態学的環境修復法」¹⁴⁾と命名した(図6の右側半分)。

3.1 窒素環境基準達成のための数値生態系モデルの構築

洞海湾では、1997年に窒素・リンに係わる環境基準(第IV類型、窒素1mg/l、リン0.09mg/l)が設定された¹⁸⁾。しかし前記のように、洞海湾は窒素濃度が著しく高く基準を達成できなかったため、北九州市では工場等の排水口から湾に流入する窒素量を削減するという発生源対策をとることとした。そこで当センターは、洞海湾で実施してきた詳細な物理、化学および生物調査結果を踏まえ、湾内における窒素の挙動をシミュレーション

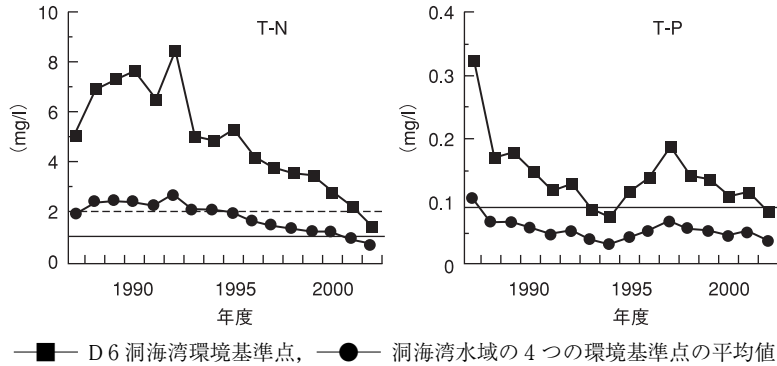


図7 洞海湾水域における全窒素(T-N)・全リン(T-P)の経年変化

全窒素、全リンの環境基準への適合状況は、洞海湾内の環境基準点D2とD6および湾と隣接する2つの泊地の環境基準点K7、K8の計4点の表層から得た値の年間平均値で判定する。全窒素の環境基準(該当海域Ⅳ)は1mg/lであるが、2001年度までは暫定基準(2mg/l)が設定されていた。全リンの環境基準値は0.09mg/lである

する数値生態系モデルを構築¹⁹⁾し、環境基準達成のための窒素負荷削減量を算出した。その結果、湾岸に立地する企業が窒素負荷量を96年度の約1/3に減少させる等の多大な協力を得て、2001年度に窒素の環境基準を達成した(図7)。

3.2 濾過食性二枚貝を用いた水環境のバイオレメディエーション

現在の洞海湾水域では、窒素・リンに係る環境基準を達成できたものの、数値生態系モデルの計算結果を参照すれば、依然として湾では赤潮と貧酸素水塊が発生することが予測されている¹⁹⁾。実際、最近の植物プランクトン調査においても、高水温期に赤潮の発生を確かめている。そこで、赤潮防除法として、湾にもっとも優占的に出現する濾過食性二枚貝ムラサキガイ *Mytilus galloprovincialis* (ムールガイ)⁷⁾に赤潮生物を摂食させることにより海水を浄化するシステムを考案し、1999年に「海水又は淡水の浄化方法」として特許3013314号を取得した。

浄化生物として濾過食性二枚貝を用いる場合、日本では食生活に馴染みの薄いムラサキガイより経済価値のあるアサリやカキを用いる方が現実的である。しかし、赤潮が頻繁に発生する洞海湾の湾央部から湾奥部にわたっては、これら2種はほとんど出現しておらず、かわってムラサキガイが優占的に出現していた⁷⁾。このような事情から、ムラサキガイを浄化生物として用いることとした。なお、東京湾や大阪湾等、富栄養化した海

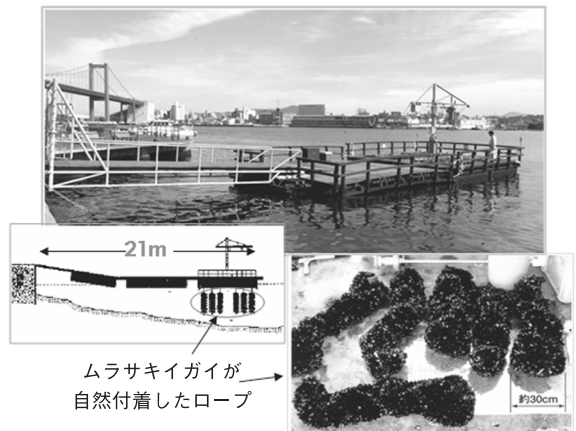


図8 洞海湾に設置した環境修復実証実験施設

右下の写真は、ロープを半年間海水中に垂下し、ムラサキガイを自然付着、繁殖させ、陸上に回収したもの

域の付着動物の優占種もムラサキガイである。

特許技術の実証実験を行うため2002年1月、洞海湾に環境修復実証実験施設(図8、以下修復施設あるいは施設と記述)を設置した。施設から垂下するロープにはカキ養殖のように貝の種付けは施しておらず、ロープはただ垂下しておくのみである。半年間垂下すると、図8の右下の写真のようにムラサキガイがロープに多量付着する。ムラサキガイの再資源化を考慮し、本種のみを選択的に得るため、ムラサキガイが足糸で基盤に付着することを利用し、付着基盤のロープには分散糸を多数織り込んだものを使用している。

なお日本では現在、水域の水質浄化(環境修復)法として藻場や干潟の造成²⁰⁾、ヨシ原の造成等¹⁴⁾が推奨されている。しかし、港湾区域のように水域内や水際線の利用目的が限定され、それらの修復方法を適用できない場合、北九州市が試みているこの修復法は広大な面積を必要とせず短期間で建設できる等、簡便な手法といえる。

この修復施設は水質浄化のみでなく多面的な機能を有することが見込まれるため、以下のように研究を展開しており、本稿では2002年度に実施した予備調査結果を中心に報告する。

3.2.1 水質浄化研究

2002年7月12日、洞海湾の施設周辺では *Skeletonema costatum* が海水 1 ml 中に23万細胞出現し、濃厚な珪藻赤潮を形成していた。一方、水質浄化生物としてムラサキガイを繁殖させていた施設内では、表2に示すように施設外と比較しクロロフィル a 濃度が約60%，化学的酸素要求量(COD)が約40%減少し、施設では水質を浄化していたことが示された。なお上記の予備調査を踏まえ、2003年度は修復施設の持つ水質浄化能を定量的に調査し、現在解析中である。

3.2.2 ムラサキガイの堆肥化研究

海水中で繁殖した浄化生物を回収し、陸上生態系の物質循環に組み込む手法として、浄化生物を堆肥として活用する実験を開始した。大阪湾では岸壁で繁殖したムラサキガイが夏季に斃死し大量脱落して、海底の新たな有機汚濁源になることが報告されている²¹⁾。洞海湾においても同様な現象が観察されるため、2002年にムラサキガイの脱落前の8月上旬に施設から約650kgのムラサキガイを回収し、北九州市総合農事センターにお

いてセンターの樹木の剪定チップと混合し、堆肥化を試みた。

その結果、「ほかし」等の発酵促進剤を添加していないにもかかわらず、堆肥化処理開始後、翌日には堆肥温度が70℃以上に上昇し、約2.5カ月という短期間で植物の病原菌の死滅している堆肥が得られた。また、肥料取締法に掲げられる水銀、ヒ素およびカドミウム等の有害成分も、この堆肥ではまったく問題のないことも確認された。さらに、コマツナの栽培試験(写真)では肥効の高さも示された。

3.2.3 海中ビオトープ研究

湾岸をコンクリート護岸に囲まれ、海洋生態系が貧弱化している洞海湾に本施設を設置した結果、多くの魚類が施設に集ってくる様子が観察された。そこで、その機能を確認するため魚類の蟄集状況調査、魚類の季節的消長調査、魚類の24時間調査、魚類の食性調査および餌生物の季節的消長調査などを実施し、成果を得ている最中である。

その一部をここに報告すれば、図9に示すように、ロープを垂下すると付着珪藻やムラサキガイなど1次付着動植物がロープ上で多量観察されるようになる。するとこれら付着珪藻や二枚貝のふん・偽ふんを摂餌するヨコエビやワレカラ等の2次付着動物が1次付着動植物の間隙や表面に多量生息するようになり、メバルやウミタナゴ、クロダイ未成魚等の小型魚類が2次付着動物を摂餌するために多数蟄集し、さらにスズキ等の大型魚類が小型魚類を追って往来する。このように施設では食物連鎖を軸として新たな生態系ができあ

表2 赤潮発生時の環境修復実証試験施設内と施設外の水質(2002年7月12日)

測定項目	単位	施設内	施設外
水温	℃	26.9	26.9
塩分	psu	29.2	29.3
クロロフィル a	mg/m ³	46	119
化学的酸素要求量	mg/l	5.0	8.2

施設内と施設外の水質測定値は、それぞれ2地点ずつ調査した結果の平均値



写真 ムラサキガイと剪定枝チップとを混合し作成した堆肥のコマツナ栽培試験(播種後49日目)

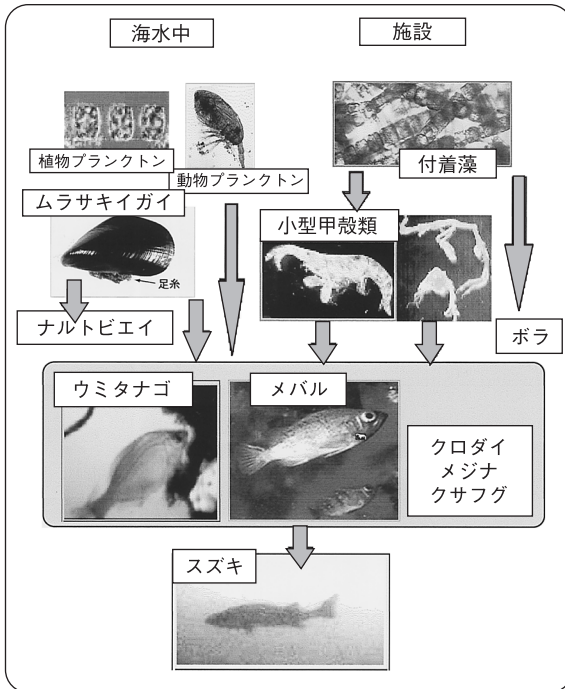


図9 洞海湾に設置した環境修復実験施設で観察される食物連鎖

がりつつあることが確認された。また、小型魚類には摂餌活動の活発でない時期にも、施設に多数蟄集している様子が観察されている。

以上のことから、魚類はこの施設を生育場所、摂餌場所、また避難場所等に利用していることが確認された。洞海湾のような港湾域において、本施設のような構造物は新たなビオトープを創出し、生態系を豊かにしていく可能性をもっていると考えられる。

4. ま と め

水域への物理的構造の改変と人為的富栄養化が強まると生態系の疲弊、多様性の低下、物質循環の阻害等が連鎖的、有機的に進行し、水質浄化能や豊かな生物生産機能が損なわれる。洞海湾はそのような水域の典型例であり、今回この水域で試みている海域環境調査とその結果に基づく生態的な環境修復法研究を報告した。今後、水環境を保全し創出するには、本方法のほかさまざまな生態工学的手法²²⁾を積極的に研究、適用して行く必要がある。

一 参 考 文 献

- 1) 山田真知子：第12章洞海湾．社日本水環境学会編集，日本の水環境行政．pp. 166-177，ぎょうせい，東京，1999
- 2) 山田真知子：洞海湾今昔～その環境と生きものたち～〈下〉．ひろば北九州，108，pp. 12-19，1995
- 3) 柳哲雄，山田真知子，中嶋雅孝：洞海湾と博多湾の富栄養化機構の比較．海の研究，10，pp. 275-283，2001
- 4) 山田真知子，梶原葉子：海の研究 投稿中
- 5) 東輝明，山田真知子，門谷茂，広谷純，柳哲雄：過栄養な内湾洞海湾における貧酸素水塊形成過程とその特性について．日本水産学会誌，62，pp. 204-210，1998
- 6) Ueda N., H. Tsutsumi, M. Yamada, K. Hanamoto, and S. Montani: Impacts of Oxygen-Deficient Water on the Macrobenthic Fauna of Dokai Bay, and on Adjacent Intertidal Flats, in Kitakyushu, Japan, *Marine Pollution Bulletin*, 40, 906-913, 2000
- 7) 梶原葉子，山田真知子：洞海湾における付着動物の出現特性と富栄養度の判定．水環境学会誌，20，pp. 185-192，1997
- 8) 井上康一，柳哲雄，山田真知子：洞海湾の潮流と残差流．愛媛大学工学部紀要，15，pp. 423-430，1996
- 9) 柳哲雄，山田真知子：洞海湾で冬季赤潮が発生しない理由．海の研究，9，pp. 125-132，2000
- 10) K. Tada, M. Morisita, K. Hamada, S. Montani, and M. Yamada: Standing stock and production rate of phytoplankton and a red tide outbreak in a heavily eutrophic embayment, Dokai Bay, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, 42, pp. 1177-1186, 2001
- 11) 多田邦尚，一見和彦，山田真知子：海の研究 投稿中
- 12) 門上希和夫，陣矢大介，岩村幸美，谷崎定二：北九州市沿岸海域の化学物質汚染とその由来．環境化学，8，435-453，1997
- 13) 陣矢大助，門上希和夫，岩村幸美，濱田建一郎，山田真知子，柳哲雄：閉鎖性内湾—洞海湾における化学物質の分布と挙動．水環境学会誌，24，pp. 441-446，2001
- 14) 山田真知子，東輝明，濱田建一郎，上田直子，江口征夫，鈴木學：生態学的環境修復法を用いた富栄養化海域の環境改善と環境管理．環境科学会誌，11，pp. 381-391，1998
- 15) 須藤隆一：第11章 今後の課題．須藤隆一，環境庁水質保全局水質規制課監修，環境庁水環境研究会編集，内湾・内海の水環境．pp. 313-320，ぎょうせい，東京，1996
- 16) 門谷茂，小濱剛，徳永保範，山田真知子：濾過食性二枚貝の生態特性を利用した海洋環境修復技術の開発．環境科学会誌，11，pp. 407-420，1998
- 17) 堤裕昭，濱田建一郎，上田直子，山田真知子，藤木智子，中村仁美，和田育子，徳田貴子，門谷茂：Capitella sp. 1 (イトゴカイ，多毛類)を用いた洞海湾湾奥部の底質環境の修復．環境科学会誌，11，pp. 421-429，1998
- 18) 平成9年4月28日付環境庁告示第19号
- 19) 柳哲雄：沿岸海域環境管理と数値生態系モデル．環境科学会誌，11，pp. 393-399，1998
- 20) 運輸省港湾局：環境と共生する港湾〈エコポート〉．p. 85，大蔵省印刷局，1994
- 21) 矢持進，有山啓之，日下敬之，佐野雅基，鍋島靖信，陸谷一馬，唐沢恒夫：人工護岸構造物の優占種が大阪湾沿岸域の富栄養化に及ぼす影響 1．垂直護岸でのムラサキガイの成長と脱落．海の研究，4，pp. 9-18，1995
- 22) 岡田光正：1 生態学と生態工学．岡田光正，大沢雅彦，鈴木基之編著，環境保全・創出のための生態工学．pp. 3-18，丸善，東京，1999