

微生物は魔法使いか、救世主か？—近年の微生物生態学の進歩から—

畑 幸彦（本研究会理事）

1. 微生物という生き物の正体

肉眼で見えない微小な生き物を微生物というが、自然界には細菌をはじめ、かび、酵母、プランクトン、ウイルスなど多種多様な微生物の存在が知られている。なかでも細菌は数量や種類の豊富さ、物質変換機能の多様さ強大さにおいて、他を大きく圧倒している。

しかし見えざる細菌の数、存在状態、増殖速度、生理機能の大きさなど実像については、従来は誤差の大きい推測がしばしばで、そのため自然環境での細菌の働きは今なお殆ど無視されるか、魔法使いの如く過大評価されるか、物質循環系における説明のつかない部分の辻つま合わせに使われることが少なくない。

だが微生物の自然生態系における実態解明が、ここ十数年の間に目覚ましい発展を遂げ、その実像がかなり明確に見えてきた。¹⁾ここでは、海洋生態系における微生物なかでも細菌の役割についての近頃の知見の一部を紹介し、海洋環境の保全・修復への応用にも触れたい。

2. 海洋生態系における細菌の位置と役割

海洋における食物連鎖の概要は、図1に示されている。植物プランクトンの光合成から出発し、動物プランクトン→小型魚類→大型魚類へと連なる系は捕食食物連鎖と言われてよく知られている。しかし近年は、

この古典的な系に加えて、溶存態有機物を出発点とし細菌（粒子態有機物つまり固形有機物）→原生動物→小型魚類→大型魚類へと続く微生物ループと呼ばれる系の重要性が強調されるようになった。溶存態有機物は各種生物の生活に伴い、あるいは生物遺体の細菌による分解によって生じるものである。また原生動物としては、今まで存在不明であった従属栄養性微小鞭毛虫や繊毛虫の挙動が注目されている。

この2つの食物連鎖は、図2のように溶存態有機物および動物プランクトンと表裏の関係で連結している。つまり細菌は、古典的な物質循環系では有機物分解者としての役割が重要視されてきたが、これに加えて菌体増殖による粒子態有機物生産者としての役割が強く認識されるようになった。近年進歩した細菌現存量測定方法の応用によって、海水中には浮遊状態で通常 10^6 細胞/ml程度以上の莫大な数の細菌が存在し（従来の培養計数では $10^3 \sim 10^4$ /ml程度の評価）、しかも細菌は他の生物群とは比較にならない程の大きい速度で増殖と死滅を繰り返していることが明らかになってきた。微生物ループは今後一層重要視され、富栄養化防除や豊度向上に資するだろう。

これらの新しい知見は、微生物の現存量、活性測定、群集構造の解析などにおいて、蛍光試薬の応用、分子生物学的手法、遺伝子情報の蓄積など、目覚ましい新手法の開発²⁾によることは言うまでもない。

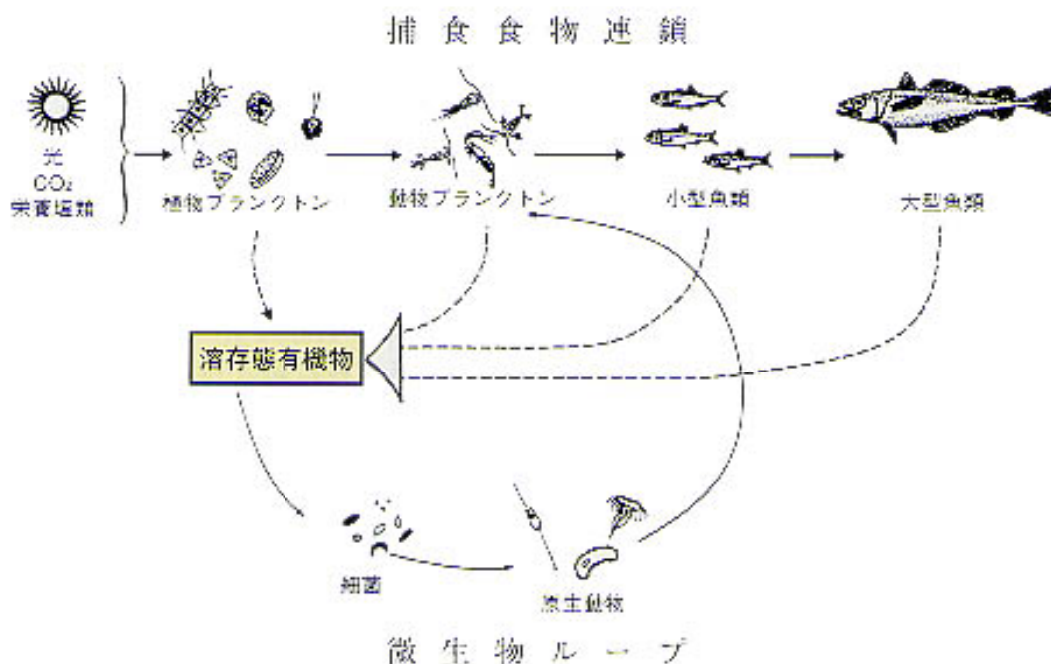


図1 海洋における2つの食物連鎖

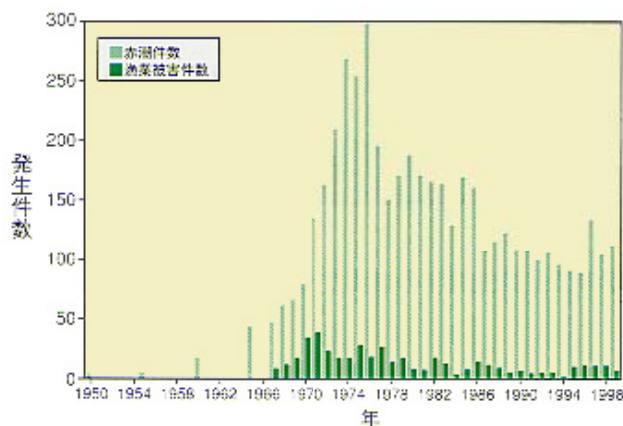


図2 瀬戸内海における赤潮発生状況
(瀬戸内海水産研究所 山口雄生氏)

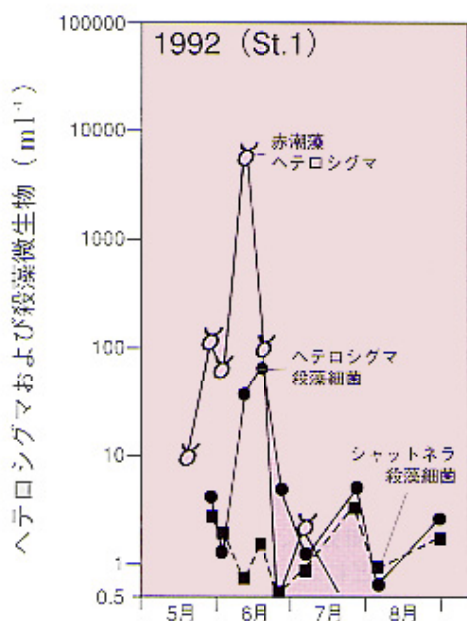


図3 北広島湾における赤潮藻（ヘテロシグマ）と
殺藻細菌の消長
(京都大学 今井一郎氏)

3. 海洋環境保全における微生物の活用³⁾

近年の微生物生態学の進歩が、実際の海洋環境の保全や開発に役立っているかという点、今のところノウに近い。しかし魔法使いか、はたまた無きに等しい生き物として考えられていた微生物の実像が次第に見えてきたこれからは、実際面で活動が有用に引き出されるだろう。ここでは、期待の持たれる2～3の例を紹介したい。

3-1. 赤潮防除における微生物の活用

赤潮は海洋汚染の象徴として語られるが、近年は社会的問題になることは以前より少なくなったとは言いながら、今なお悪性赤潮の発生は後を絶たず（図2）、養殖魚介類を中心に年間数億～数十億円の被害が続いている。赤潮防止のために、工場排水、生活廃水の流入削減をはじめ、水質や底質の物理的、化学的、生物学的改善技術が実施されているが、なお十分な効果は得られていない。

赤潮発生海域には各種の微生物が環境を共有し、微生物相互間で増殖促進、殺滅、捕食など密接な生活関係が展開されている。なかには悪性赤潮の発生を促進する細菌が存在する一方、赤潮原因プランクトン（赤潮藻）を強力に殺滅する細菌も存在する。図3に示されるとおり、赤潮はピークに達した後、突如として急速に消滅することがしばしば観察されるが、その際に赤潮藻を殺滅させる細菌が多数に増殖しているという事実が多く、海域で発見されている。その細菌を純粋分離し実験室で赤潮藻の培養液に接種すると、写真1のように明らかな殺藻現象が再現される。今までにおよそ50種に及ぶ殺藻細菌が分離され、それらは赤潮藻に生きた細菌が接触して殺滅するタイプと、細菌の培養液によって殺滅できるタイプとがある。両タイプは、遺伝子解析により系統進化的な2つの分類グループに対応することが分かってきた。

さらに殺藻現象は、ウイルスによっても起こされることが確認されている。ウイルスによる赤潮消滅が現場で起こっている可能性は、赤潮が忽然として消滅するとき殺藻ウイルスの急速な増殖が見られること（写真2）、このウイルスの接種によって実験室で殺藻現象が再現できることから証明される。

しかし、このような殺藻微生物を現場の赤潮防除に実用するには、菌体や殺藻物質の培養・貯蔵、効果の持続性、現場での散布・固定方法、環境への安全性など解決すべき課題が残されている。

3-2. 海洋環境の浄化における微生物の利用

(1) 海底泥の改善

有機物の堆積によって底泥が還元的環境になり、硫化物の発生や底層水の貧酸素化を生じて魚介類がしばしば被害をこうむる。このような悪化環境を酸化的環境に変えるのに、堆積有機物を強力に分解無機化する細菌を積極的に添加する技術がある。有機物分解力の強い細菌を選んで濃厚に培養し、多孔質の岩石破片や珪藻土などに吸着させて海底に散布する。これには酸素があってもなくても増殖できる枯草菌、寒冷の季節にも増殖して強い分解力を発揮する南極由来の好冷菌、あるいは有機態窒素を窒素ガスとして海底から放出できる脱窒細菌などについての試験があり、ある程度の成果が得られている。今後さまざまな生理機能を持った細菌を、この種の目的に応用する技術が発展する可能性があるが、自然生態系への安全性を含めて検討すべき課題は少なくない。

(2) 海岸の石油汚染の修復

1997年1月に起こったナホトカ号による日本海の油汚染は、今なお生々しい記憶にある。当時、マスコミをはじめ議会や一般市民からも油で汚れた海岸の修復に微生物製剤を適用しないのか、という声が多数あがった。しかし当時も今も、油で汚れた海岸の修復に微生物製剤ないしは微生物を活性化させる栄養剤を散布して成功したという事実も技術の保証も殆どない。石油で汚染された海岸では、その分解細菌が増えること、強い石油分解能を持った細菌は確かに汚染水域から分離できていること、実験室条件下ではそれらによる油分解の進行が見られること等は事実だが、大量の油と荒天下の過酷な現場条件では、水際の適用は全く無

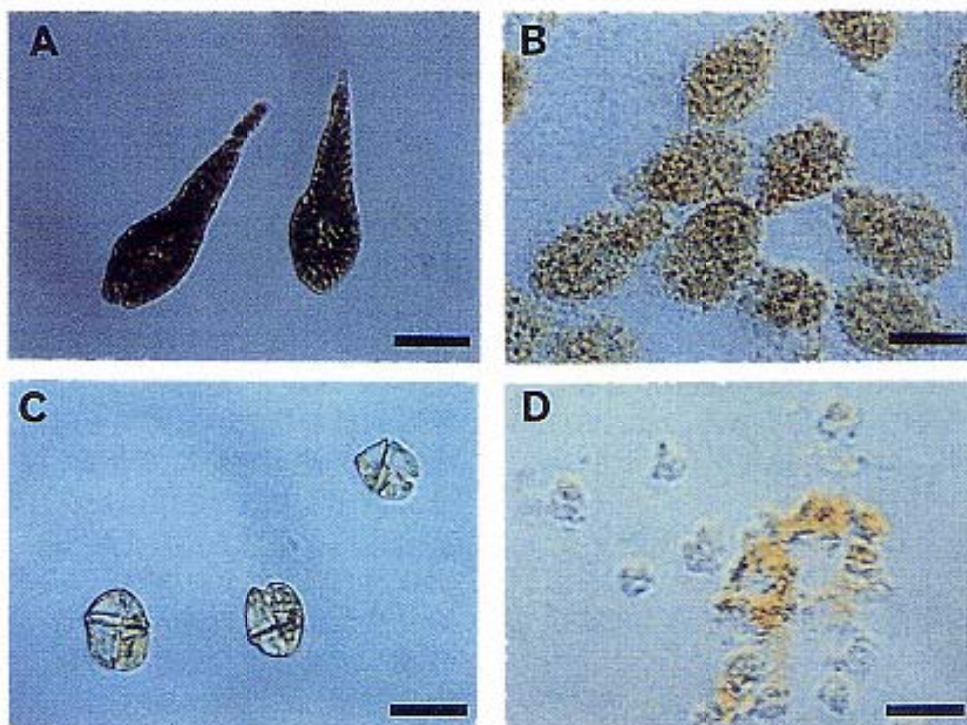


写真1 北広島湾から分離された殺藻細菌アルテロモナスによる2種の赤潮藻の溶藻現象
(A→B:シャットネラ, C→D:ギムノディニウム, 棒線:30 μm)
(京都大学 今井一郎氏)

意味である。

微生物製材による油処理は、人海戦術と物理的、化学的方法で大部分を処理してなお残る石面や砂中の油に、長期間接触させてようやく効果を見ることが出来る。自然細菌の自浄作用を促進することが、より重要である。

4. 今後に期待するもの

上述のように、近年の実験手法や観測方法の格段の進歩によって、海洋のどこに、どんな条件下で、どのような生態構造群として微生物が存在しているかの実像が見えてきた。そして、陸上生物では想像もつかない過酷な条件下でも増殖して生理機能を強く発揮できる、種々の細菌や微細藻類の培養にも成功している。

たとえば、クロロコッカムという緑藻の新種はpH4の酸性下で70%の高濃度の二酸化炭素中でも増殖して炭酸同化作用を営む。この特性を利用して、地球温暖化の元凶二酸化炭素の固定による除去に成功すれば正に救世主になるのだが、まだ技術は莫大な経費を克服できるレベルに達していない。大きい夢は育てねばならない。

それよりも、昔も今も見えざる形で黙々と物質循環を支えている地味な微生物の活性を十分に発揮させる条件を整えてやることも大切である。例えば、干潟における微生物的浄化の仕組みと速度、底泥と水との間の物質変換と移動の速度、富栄養化水域における有機物の生産と分解のバランス、物質循環モデルにおける生産・分解・沈降の速度など微生物関与の部分について、新手法と新知見を駆使して数値の精度を格段に向上させる努力を望みたい。このような作業は学会発表のような華やかさとは無縁だが、本研究会での工学分野との共同に欠くことのできない宝物（たからもの）と思う。

文献

- 1) 大和田統一(編): 海洋微生物, 月刊海洋, 号外23 (2000)。
- 2) 石田祐三郎・杉田治男(編): 微生物実験法, 恒星社厚生閣 (2000)。
- 3) 石田・本城・福代・今井(編): 有害・有毒赤潮の発生と予知・防除, 日本水産資源保護協会 (2000)。

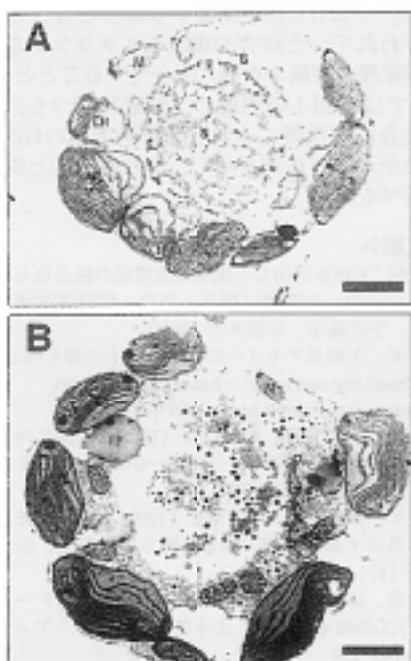


写真2 北広島湾での赤潮末期の赤潮藻(ヘテロシグマ)中に出現した殺藻ウイルス。A: 正常藻, B: ウイルス(黒点)発現藻。棒線: 2 μm
(瀬戸内海水産研究所 長崎隆三氏)

環境修復技術の最適選定法（その4：沿岸域環境GISの現状）

環境修復技術を効率的に配置する手法を検討するために、次の点を満たす環境データベースの作成をGIS（Geographic Information System）を活用し、試みた。1) 環境の問題が把握でき、その問題に対応した技術が効率的に選択できること。2) 技術の適用に必要な環境条件を満たす場を合理的に抽出できること。Free Kickでは試行結果を数回に分けて、紹介するとともに、GIS作成上の問題点について述べる。

まず沿岸域環境を対象としたGISの現状を概観する。一般に環境データを基にしたGISが構築されれば、表1に示したような様々な機能や活用方法が各人に提供できると期待されている。

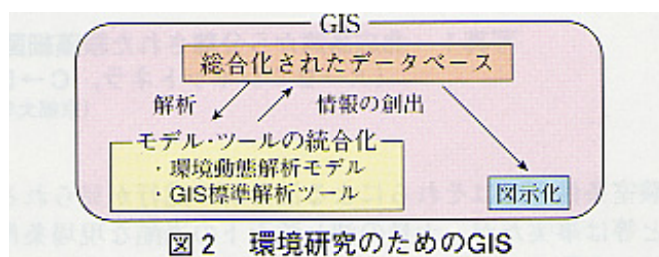
表1 GISに期待される機能と活用方法

GISの機能と活用方法	行政	研究者	市民・NGO
データの一元管理と保存	○	△	△
時・空間情報の緻密化	○	○	
環境相互作用の解析		○	
調査・研究の支援		○	
環境教育の支援	○	○	○
合意形成の支援	○		○
制作策定の支援	○	○	

実際に環境分野でGISは主に研究レベルで活用されており、陸域環境では優れた事例も発表されている¹⁾²⁾。しかし沿岸域環境を扱ったものは未だ数件見られる程度³⁾⁴⁾⁵⁾で、情報を管理する行政でも情報の収集と整理がようやく緒についたばかりと言える。沿岸域環境のGISの整備やその研究が遅々として進まない理由を“GISの作成に要する労力や費用に対する成果が不明あるいは懐疑的である”と設定し、図1のように問題を構造化してみた。問題解決にあたっては下位に位置するキーワードの解決が必要であるが、多くはモニタリングやそのデータに起因している。特にGISの作成労力の80%がデータの入力である¹⁾ことを考えると、モニタリングデータのデジタル化は急務であることがわかる。また環境変動の大きい水域を対象としたモニタリングデータの質について問題点を指摘する立場⁶⁾からは、モニタリングデータを基本としたGISの“費用対効果”は決して高く評価されないであろう。

その一方で、複数の事業の複合的かつ累積影響を広域で評価する戦略的環境アセスメント（SEA）の実施

や陸域を含めた沿岸域の環境管理に対する社会的要請は年々高まっている。陸域環境ではこれらの要請に応えるための手法も具体的に示されつつある。例えば、増田¹⁾は琵琶湖集水域の社会的属性データを字（あざ）レベルで緻密に整備し、そのデータベースと日単位で解析可能な複数のモデルを連結させ、流域の汚濁解析と将来予測が容易にできるシステムを構築している。また波田²⁾はGISを用いた森林の生態系アセスメントの合理的な手法を示している。これらの事例は、図2のようにGISでデータベース、解析と図示化機能を統合化すれば、合理的かつ緻密に環境を解析できることを示しており、今後の環境研究の枠組みのひとつと言える。



陸域環境GISの緻密さと解析に応えることのできるものが沿岸域でも構築されれば、社会的要請に応えた陸域一沿岸域の総合的な環境評価・管理も実現されるであろう。現状では先に述べたような課題の他にも、実際のGISの構築過程では様々な問題も生じると思われるが、それらは新しい研究や行政の課題と捉えるべきと考える。つまりGISを構築することとは、これまで個々に行われていた研究や環境モニタリングなどの活動を環境管理や評価を目標に統合化することと言える。

本WGでは、図1の問題点に配慮しつつも、陸域環境との統合化を視野に入れ、大阪湾環境のGISを試みた。次回からは試行例を示し、その有用性と問題点について述べる。

<参考文献>

- 1) 増田貴則：GISを活用した流域環境情報の統合化とその現象解析・計画論への適用に関する研究－琵琶湖流域を対象として－，学位論文，京都大学，2000
- 2) 波田善夫：生態系アセスへの提案－海上の森を例として－，<http://had0.big.ous.ac.jp/~hada/kaisyonomori/assessment/assessment.htm>（2001年1月現在）
- 3) 小松輝久，仲岡雅裕，川井浩史（1998）重油に汚染された沿岸生態系の中長期モニタリング－GIS法を用いて－，月刊海洋，30（10），pp. 648－654
- 4) 小松輝久，仲岡雅裕，川井浩史（1999）GISによる潮間帯生態系に及ぼす重油汚染の影響評価方法の開発，沿岸海洋研究，37（1），pp. 35－39
- 5) 高橋宏直，細川恭史，吉村藤謙（1998）環境データ解析への多次元GIS適用の試み，土木学会，環境システム研究論文集，pp. 145－150
- 6) 蓮沼啓一：観測データと環境影響評価，News Letter，生態系工学研究会，No. 7，2000

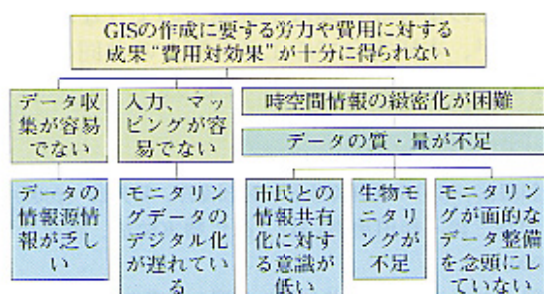


図1 沿岸域のGIS構築の問題の構造化

（上月康則：徳島大学大学院工学研究科エコシステム工学専攻）