

環境への負荷が少ない 微生物を用いた 赤潮防除策

■ 赤潮被害とその対策

有害赤潮によって与えられる漁業被害は、瀬戸内海だけでも年平均約17億円にも達し、現在も被害状況は深刻なままである。ブリ、カンパチ、マダイ、トラフグなどの養殖魚類をへい死させる有害赤潮の主要原因生物としては、ラフィド藻のシャットネラ (*Chattonella antiqua*、*C. marina*、*C. ovata*)、ヘテロシグマ (*Heterosigma akashiwo*)、渦鞭毛藻のカレニア (*Karenia mikimotoi*)、ヘテロカプサ (*Heterocapsa circularisquama*、本種は二枚貝類を特異的に殺滅する)。

京都大学大学院
今井 一郎 いまいいちろう

京都大学農学部水産学科、同大学院、水産庁南西海区水産研究所を経て、現在は京都大学大学院農学研究科准教授。日本プランクトン学会副会長。研究テーマは有害有毒赤潮の発生機構、予知、防除、富栄養化と沿岸域環境の保全、琵琶湖のアオコの発生防除。

およびコクロロディニウム (*Cochlodinium polykrikoides*) が挙げられる。これらの中で、近年被害状況が深刻なのはコクロロディニウムであり、隣国の韓国では最も恐れられている赤潮種である (写真1)。

赤潮被害を軽減抑制するためにはさまざまな対策が考案されたが、表1にそれらをまとめた。栄養塩類の流入を抑制することによって赤潮の発生を予防できるが、法的な規制と排水の浄化技術の進歩が一定の効果を上げたといえよう。直接的な防除対策として、種々の物理化学的手法がこれまでに提案され、試みられてき

たが、規模やコスト、生態系への影響などの観点からほとんど実用に耐えるものはないのが実情である。

現在は緊急対策として、粘土散布が九州西岸の八代海においてコクロロディニウム赤潮を主対象に実施されている。また、韓国において粘土散布は、コクロロディニウム赤潮を対象に、極めて通常に行われている対策である (写真1)。しかしながら、いったん有害赤潮が発生すると、最も普通に行われている緊急対策は餌止めであり、消極的な手法ではあるが養殖魚類のへい死抑制に貢献している。

以上のような背景から、有効で安全な赤潮対策が関係者の間で強く望まれている。特に赤潮の発生予防に貢献する対策は、価値が大きいと想定される。そのような観点から、環境に優しい生物的防除が注目されている。生物を用いた赤潮防除として、植物プランクトンの捕食者であるカイアシ類や二枚貝類が試験されたが、実際の現場では捕食者による赤潮のコントロールは、赤潮の規模や

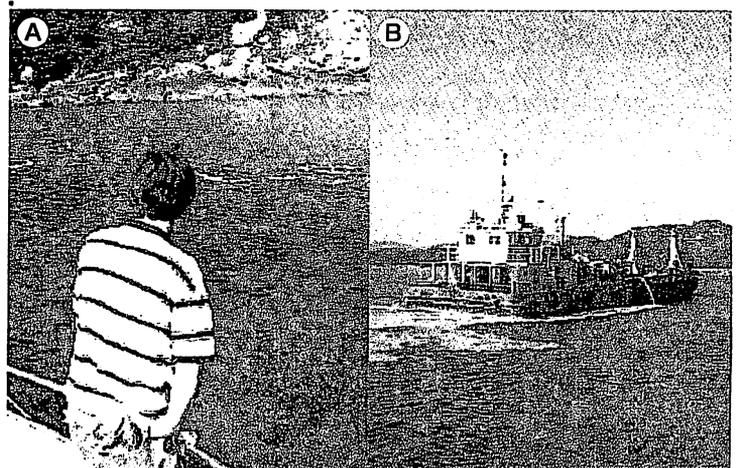


写真1 2006年8月7日に韓国麗水市沖において観察された有害渦鞭毛藻コクロロディニウムの赤潮 (船に近い着色水域で境界部が潮目でありゴミが浮遊している: A)、および同日に赤潮発生水域で赤潮駆除のために粘土散布を行っていた専用船 (公的な運用であり養殖業者の要請で出動する: B)。

捕食能力の点から困難と結論されている。

水産庁の赤潮対策事業において、細菌やウイルスなどの殺藻微生物を用いた赤潮の防除対策に関して基礎的検討がなされた。その後も研究が継続され、殺藻ウイルスと殺藻細菌に関して研究成果が蓄積されている。

■ ウィルスによる赤潮制御

ウィルスあるいはウィルス様粒子は、50種以上の微細藻類の細胞内に

表1 現在までの赤潮対策

[間接法]	
●法的規制	水質汚濁防止法、海洋汚染防止法、農薬取締法、瀬戸内海環境保全特別措置法、持続的養殖生産確保法、有明海八代海再生特別措置法
●環境改善	水質：藻類などによる栄養塩回収 底質：浚渫、曝気、耕耘、石灰・粘度・砂の散布、ベントス (<i>Capitella</i>) による浄化 養殖技術：餌料の改良 (モイストペレットなど)、漁場の適正利用
●緊急対策	生簀の移動 (水平・鉛直)、餌止め
[直接法]	
●物理的方法	物理的衝撃：超音波、衝撃波、電流、発泡 海面回収：吸引、ろ過、捕集 (赤潮表層水の回収と遠心分離除去) 凝集沈殿：高分子凝集剤、鉄粉、粘土散布
●化学的方法	化学薬品：過酸化水素、有機酸、界面活性剤、硫酸銅、アクリノール、水酸化マグネシウム 化学反応：オゾン発生、海水電解産物
●生物的防除	捕食：二枚貝 (カキ)、橈脚類、繊毛虫、従属栄養性渦鞭毛藻、従属栄養性鞭毛虫 殺藻：ウイルス、細菌、寄生カビ、寄生渦鞭毛藻

認められ、いくらかは実際に分離されている。これらのウイルスのサイズやゲノムのタイプ (RNA、DNA) はさまざまであり、有害な毒種に感染するものも含まれている。中でもヘテロシグマとヘテロカプサに感染するウイルスに関しては、わが国で研究が精力的に展開されている。これら両種の赤潮生物においては、RNAとDNAの両方のタイプのウイルスが知られている。

広島湾におけるヘテロシグマ赤潮の末期には、藻細胞内にウイルス粒子が増加することが見いだされ、ま

た海水中にはヘテロシグマを殺滅するウイルス (Hav) が増加することが観察されている。また三重県英虞湾においては、ヘテロカプサとそれに感染するウイルス (HCRNAV) の動態が研究されている。

海水中のHCRNAVの密度はヘテロカプサの赤潮のピークから崩壊期に激増し、その後減少するが、ウイルス粒子を細胞内に保有するヘテロカプサは最大88%にも達するという。このことは、本藻の赤潮の消滅にウイルスが極めて大きい役割を演じていることを示しているといえよう。

またHCRNAVは、海底泥中に長期間、高密度で感染能を持ったまま生残することも確認されており、海底泥はウイルスの貯蔵場として大変大きな意味を持つといえる。

ウイルスとホスト藻との関係は、極めて高い種特異性を示すのが通例である。ヘテロシグマとヘテロカプサにおいて、多数の培養藻株とウイルス株を用いて感染実験が精力的に実施された結果、同種の藻に対して感染が成立する場合としない場合があることが判明した。すなわち、感染について種特異性が高いというよ

りも、株特異性が高いことが明らかにされた。この性質は、ある種の赤潮の消滅に複数株のウイルスが必要であることを意味しており、赤潮制御において大きな欠点になると考えられる。

一方で、ウイルスは極めて高い複製能力を持つので、赤潮の制御に際して複数の株を常備し応用すれば他生物への安全性などに鑑みて、有望と考えられる。しかしながらウイルスは「鳥インフルエンザウイルス」に代表されるように、病気との関連で極めて悪いイメージが定着しており、沿岸生態系で赤潮制御に向けての実用化の段階では、漁業者や一般人からの理解がなかなか得にくい状況にあるようである。

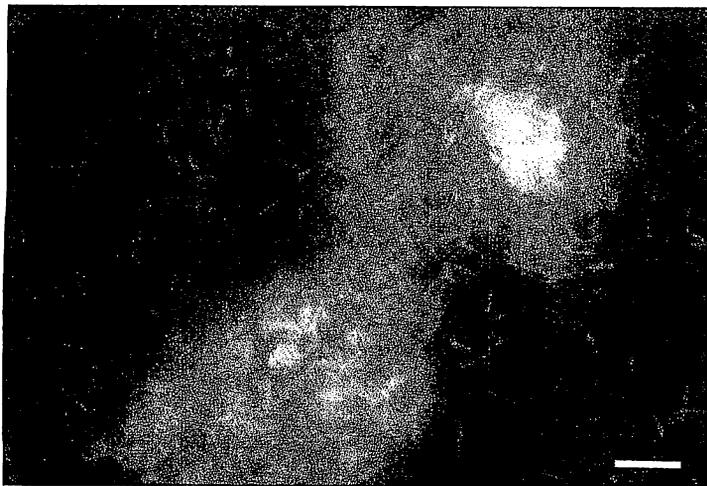


写真2 シャットネラの死細胞に多数観察された殺藻細菌 *Cytophaga* sp. J18/MO1 株の細胞。棒線は5 μ m。

赤潮藻を殺滅する殺藻細菌の研究

赤潮藻を殺滅する殺藻細菌に関する研究は約20年前から活発になり、わが国の沿岸海域においてまず存在が確認され多数の株が実際に分離培養されている。そして、赤潮の消滅におけるターミネーターとして重要な役割を演じており、注目を集めている。殺藻細菌の例として、*Cytophaga* sp. J18/MO1 株がシャットネラを殺滅し、その死細胞に群がっている様子を写真2に示した。本菌は、1細胞でも接種されると培養中のシ

ヤットネラを2〜3日で殺滅するという、極めて強い殺藻活性を發揮する。

リボゾームRNA遺伝子の解析の結果、これまで分離された殺藻細菌株の多くはグラム陰性のγ-プロテオバクテリア (*Aleromonas* 属、*Pseudoalteromonas* 属)、あるいはバクテロイデス門 (*Cytophaga* 属、*Saprospirale* 属) に属することが示された。またα-プロテオバクテリアに属するものも近年報告されている。一部の殺藻細菌についてはプロ-プ (特定の遺伝子を同定するため用いるDNA断片) が設計されており、将来定量的な検出が現場で可能になると期待される。

殺藻細菌による赤潮藻類の殺藻の仕方を見ると、直接攻撃型 (主にバクテロイデス門) と殺藻物質生産型 (γ-プロテオバクテリア) の2つに大別される。一般的に直接攻撃型の殺藻細菌は多くの藻種を殺滅する傾向があり、殺藻物質生産型の細菌は種特異性が高い傾向が認められる。

また、カレニアを殺滅する *Aleromonas* EA01株は、カレニアが生産する細胞外排出有機物に誘導されて殺藻物質を生産し (YOKO)、しかもその殺藻物質はカレニアに特異的に作用しラフィド藻や珪藻には効果を示さなかったという。さらに殺藻物質

としてはタンパク質を分解する細胞外酵素が示唆されている。

グラム陰性の殺藻細菌は、クォーラムセンシングによって細胞間情報伝達を行って殺藻活性を發揮していると考えられている。すなわち、オートインデュサーと呼ばれるシグナル物質を介して周囲の細菌密度を検知し、細菌密度が定足数 (1クォーラム) に達したところでさまざまな遺伝子の発現を活性化させる機構を活用しているというものである。これにより、殺藻物質の生産や接触攻撃を行う際に代謝の無駄がなくなると考えられる。

また、ターゲットになる赤潮藻の細胞に殺藻細菌 (*Aleromonas* sp. S株) が蟄集する現象が観察されているが、これもシグナルが働いた結果と想定され、殺藻細菌に有利な性質と考えられる。

広島湾においてヘテロシグマとヘテロシグマ殺藻細菌の動態が研究された結果、ヘテロシグマの赤潮のピークから消滅期にかけてヘテロシグマ殺藻細菌が増加することが解明された。そして、その主要メンバーはγ-プロテオバクテリアに属することが判明した。

また、播磨灘においては、滑走細菌である *Cytophaga* sp. J18/M01株がシャットネラのブルームの後に増加することが明らかにされた。しか

しこの殺藻細菌は広範囲の藻種に対して殺藻活性を示し、実際に珪藻類などのブルームの後も増加することも示された。

デトライタスやTEP (透明細胞外高分子粒子) などの凝集物には多くの細菌が付着生息しており、さまざまな生化学的過程 (分解・代謝) のホットスポットになっている。特に、*Aleromonas* 属や *Cytophaga* 属の細菌が多いといわれている。殺藻細菌は粒子に付着している場合が多く、海中ではそのような粒子の周囲は殺藻活性の「ホットスポット」になっている可能性が大きく、殺藻細菌と赤潮藻類の動態に大きな影響を与えているものと考えられる。

赤潮の発生子防対策としての藻場の役割

殺藻細菌の生態研究の過程において、莫大な数の殺藻細菌がアオサやマクサ、褐藻類の表面に付着生息している事実が発見された。その数は、海藻1g当たり10万〜100万にも上った。特に渦鞭毛藻のカレニア、ラフィド藻のヘテロシグマやフィブロカプサ (*Fibrocapsa japonica*) がよく殺滅された。主要な殺藻細菌は赤潮水域の場合と同様に、γ-プロテオバクテリアやバクテロイデス門に属するものが多く、またα-プロテオバクテリアの仲間も分離された。

このような研究成果を基に、有害赤潮の発生子防対策として2つの方策が提案できる。まず、養殖場海域における魚介類と海藻類の混合養殖が挙げられる。その際、海藻類は魚介類の排泄物としての栄養塩類を同化吸収すると同時に、殺藻細菌を周囲の海水中に大量に放出すると想定される。それらの殺藻細菌は殺藻作用を通じて、有害赤潮の発生を未然に予防してくれる確率が增大すると期待される。また人工的な藻場造成も、単に藻場回復事業としてのみでなく有害赤潮の発生子防を意識した事業として、積極的に位置付けて取り組むのも意義があると思われる (図1)。

さらに、アマモ場においてもアマモの葉体表面にアマモ1g当たり1000万〜9000万もの殺藻細菌が付着している事実が新たに見いだされた。この新事実により、アマモ場の造成も、単に自然回復の旗印というだけでなく実際に有害赤潮の発生子防対策としても重要であることが主張できよう。

このような藻場やアマモ場の造成は、バイオレメディエーションを考える際に最も理想的なやり方と考えられる。すなわち、活性の主体となる微生物 (殺藻細菌) のための環境を整え (バイオステイミューション)、かつ海藻表面から殺藻細菌が

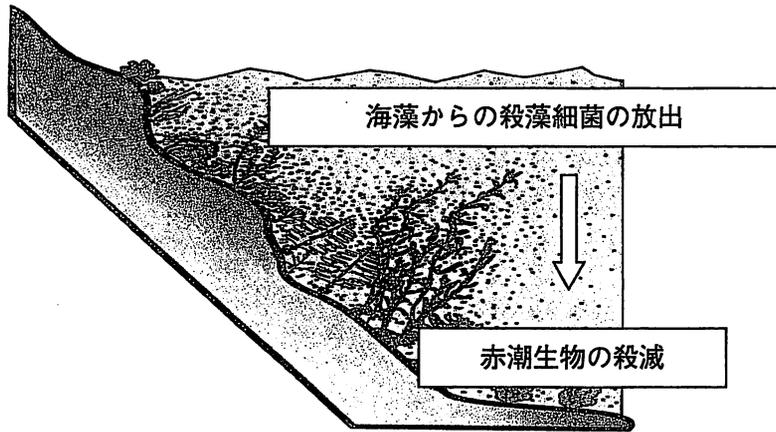


図1 沿岸域に造成した藻場による赤潮の発生予防に関する概念図。繁茂する海藻の表面が殺藻細菌の供給源となる。

海水中に人為的な補助なしに継続的に供給される（バイオオオグメンテーション）システムであるといえよう。

かつて護岸工事や埋め立てによって藻場やアマモ場が多く失われてきた。このことは、赤潮の発生を抑える海力を失わせて来たことを意味する。また、近年は磯焼けによる藻場消失の問題も深刻であり、これも赤潮の発生抑制にマイナスの材料と

いえる。

沿岸域において、藻場やアマモ場を回復あるいは造成し、有害赤潮の発生予防を目指す例を図2に示した。沿岸の湾全体に殺藻細菌が供給され、赤潮の発生が予防されること期待される。流況を考慮し、藻場やアマモ場を通過した海水が養殖水域や他の主要な水域に影響するように配慮することが、最も効果的と考

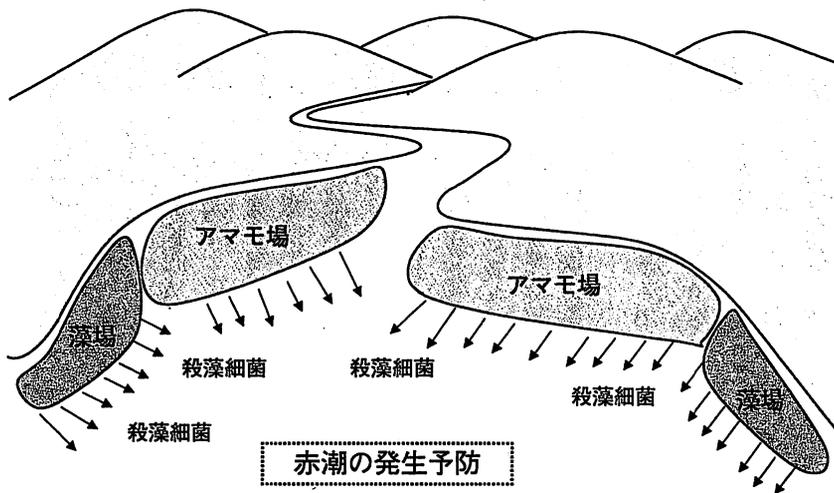


図2 沿岸域において藻場やアマモ場を回復あるいは造成し、有害赤潮の発生予防を目指す例の概念図。殺藻細菌が広く供給され赤潮の発生予防が期待される。

- 将来展望と課題
- 微生物を用いた赤潮の制御は、環境に優しい赤潮予防対策として期待されている。これらに用いられる細菌やウイルスは、
- ① 対象の赤潮藻類に強く作用し、ほかには影響は軽微で種数も少ない
 - ② 現場水域に生息し海水中で増殖できる
 - ③ ほかの動物プランクトンや魚介類などに対して無害である

といった性質を備える必要がある。加えて、作用後の細菌やウイルスは原生動物による捕食などを通じて速やかに減少し、赤潮生物由来の有機物のうち死骸は底生生物群集の食物網に、溶存有機物は微生物食物網に参入していく必要があるだろう。

コクロダイニウムは光合成をしながら餌生物を捕食する混合

栄養生物であり、細菌も捕食すると報じられている。実際に、赤潮水域から分離した殺藻細菌を作用させても再現性の良い殺藻現象が起これず、特に直接接触型の殺藻細菌は全く無力であった。この能力が韓国における本種赤潮の長期継続発生の原因と考えられた（制御者が不在）。藻場やアマモ場にはコクロダイニウムに有効な殺藻細菌が多く生息している可能性があり、この観点から追究していく必要がある。

水深のある場所では、藻場やアマモ場の自然な造成は不可能であろう。しかし海域全体にとって重要な場所に藻場やアマモ場を造成することは、重要な事業と思われる。このような観点から、浮体藻場（可能ならば浮体アマモ場）を造成してみるのは有効と考えられる。あるいは、メガフロートやギガフロートのような浮体構造物の周辺に浮体藻場を意図的に大規模に配置するというのも、将来考慮すべきであろう。

赤潮の発生予防の担い手は、実際は微生物である。しかしそれらを供給する手段として、藻場やアマモ場を造成することを提案した。海藻やアマモは一般的に好ましいイメージを持たれており、藻場やアマモ場の造成活用あるいは混合養殖は、究極的な赤潮の発生予防対策になる可能性がある。