講座

大地から地球環境・人類生存を見つめる
第7回 赤潮はなぜ発生するか（原因解説とその解決法）

小林達治
（国際応用生物研究所）

私と赤潮との関係は約20年前，本協会副会長の中西弘先生からのおさそいがあり，瀬戸内海の赤潮に関する文部省・総合研究班に入班したことに始まる．当時，赤潮問題の重要性は認識していたが，発生の場所，時期の予測が，まったくつかないという本質的な問題の為，瀬戸内海のどこかで，赤潮が発生したからといって，京都から飛んで行ったとしても，現場へ到着した頃には，すでに消滅してしまっている……．私がその研究班で，どのようにお役に立ったか自信がなかった．ところが，研究班が発足したその年，昭和51年7月11日，私は農業部門のテーマで，和歌山市での講演に招かれ，夜は奥和歌浦雑賀崎山手のホテルに宿泊，翌日早朝ホテルの窓から下方を眺めると，内湾漁港に真赤な赤潮が発生しているのが目に入ってきたのだった．

これについては後半で述べることにして，まず初めに赤潮の一般的なことについて記述しておこう．

1．赤潮の定義

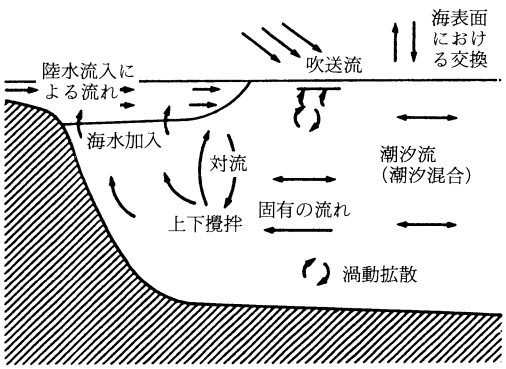
平野[1]は赤潮を次のごとく定義している．「プランクトンの異常増殖現象によって海水が変色する現象である」．青潮，白潮，苦潮，厄水なども本質的には同一の現象である．淡水域でも植物プランクトンが大繁殖し水色を変える現象があり「水の華」とよばれている．

赤潮生物の種類は研究が進むにしたがい，多数にのぼったが[2~4]，渦鞭毛藻綱（*Dinophyceae*）に属するものが最も多く，次いで珪藻綱（*Bacillariophyceae*），ミドリムシ綱（*Euglenophyte*）のものが多い．

水産上，問題になるのは渦鞭毛藻類およびミドリムシ類による赤潮が大部分である．

2．赤潮発生と水の流動[2]

赤潮発生には水域における水の流動が大きく関与する（図―1参照）．



図―1 沿岸海域の水の流動状況を示す模式図
（平野敏行，1966）

海域に発生する赤潮の規模は広大である．たとえばインド洋や東シナ海南部における *Trichodesmium* や *Ganyaulax* の発生による赤潮，また北海や北太平洋北部における夏季のケイ藻の大繁殖――この赤潮はしばしば漁況と密接な関係がある．北海でStinking Water（臭い水）と呼ばれる鉛色の不快臭を発する水塊は *Rhizosolenia shrubsolei*，*Thalassiosira nordenskiöldii*，*Phaeocystis* などが大増殖したもので，ニシンやサバの不漁を招く．また，北洋の鮭，鱒漁場で *Rhizosolenia* などが大増殖して緑色の水塊となり，鮭，鱒網漁が不漁になることがある．

北海のStinking WaterやWeedy Water，わが国北洋漁場のケイ藻赤潮などは魚を寄せつけずに排除するのであるが，消滅した後，好漁場に変貌することがよくある．それ故このようなStinking Waterを薬水と呼ぶこともある．

一方，閉鎖系海域で発生する赤潮の原因は工場や都市廃水，また，海岸や陸地の工事にともなう土砂流出などが赤潮のおこりやすい条件を作り出すという．

これは魚類など生物の“ヘイ”死を伴うので漁業の立場では重要で瀬戸内海，東京湾，伊勢湾などでは漁業被害をしばしばもたらしている．フロリダやカリフォルニア沿岸，その他世界各地から同様の被害が報告されている．

3．水の停滞にともなう栄養物質の沈降

水中の栄養物質は微粒子として浮遊しているものも、溶解して存在するものも，時間の経過とともに3次元的に広がってゆく．内湾のような停滞水域に河川が注ぎこむと，流速は急激に低下する．そこで懸濁していた粒子のうち，重い部分は沈降する．また，河川水中に懸濁していた荷電粒子は互いに反発しあっていたため沈澱しにくかったが，海域内に入ってくると電解質と接して荷電を奪われ沈降しやすくなり，河口沖合に沈殿する．他方，荷電の関与による粒子の沈降のほかに，河川水中の有機物の一部（たとえば廃水中の糖分）が河口域で異常増殖した有機栄養微生物により分解され，その結果，微生物の生産するベトベトした多糖質により他の有機物粒子が包みこまれ，いわゆる“フロック”を形成し，沈澱する．これはちょうど汚水処理施設の沈澱槽で起こる現象と同じである．以上のような種々の原因で陸水中に運ばれてきた粒状物質が沈降し，腐敗したものがヘドロである．このヘドロが後述するように赤潮発生の主原因となる．

4．底層における低酸素水塊の発達と栄養環境

停滞水域では有機質および無機質の懸濁粒子が沈降するが，これらの粒子自身が栄養源となるのみならず，粒子の界面に細菌が付着し，また，種々の物質が吸着していて，界面での生化学的活性が著しく高い．このような粒子が底質土に沈着して底泥層が形成されると好気性菌によって有機物の分解が起こるのにともなって，溶存酸素も消費され，いわゆる低酸素水塊が形成される．特に夏期停滞期には閉鎖的栄養環境が作られるために低酸素水塊は著しく発達する．

底層の低酸素水塊は内海，内湾のみならずペルー沖にみられるように外洋でも大規模のものが形成される．また，湖沼や河川の河口域底層にもできあがる(ペルー沖には大規模な低酸素水塊が発達するが，これは同水域における生産量が著しく大きいことによる．すなわち，この海域でおこる大規模な湧昇は底層の栄養塩を表層部に舞い上がらせ，その結果，藻類の生産が増大し，これにともなって魚類の著しい繁殖がおこり好漁場となっている．また，魚類を捕食する水鳥も繁殖し，そのため水鳥の排泄する糞が蓄積して“グアノ”が形成される．人類はこの“グアノ”を発掘して肥料に用い，リン酸源として利用するというリン資源の循環系を成り立たせている)．

底層に沈着した底泥中には種々の微生物が生息し複雑な生化学的反応が進行する．

まず，有機物の多くは加水分解をうけて低分子化がおこり，これにともなって，一部無機化も進行する．たとえば*嫌気条件下で炭水化物や脂肪は脂肪酸とアルコールに分解され，これらの炭素化合物はメタン発酵菌の嫌気的作用によって，メタンを生成する．生成したメタンは，それが大量の場合は気泡となって空中にでるが，多くの場合，大気中に逃げる間に好気性菌であるメタン酸化菌によって酸化されるので，これがまた水域環境の低酸素化を促進することになる．一方タンパク質やアミノ酸は脱アミノ，脱炭酸されてアンモニアと二酸化炭素を生成し，副産物として悪臭を放つアミン類やメルカプタン類を生成する．アンモニアやアミン類は他の微生物（たとえば，メタン生成菌や光合成細菌）の栄養源として利用される．これらはやがて好気性の硝化菌に酸化されて，NO_2^-やNO_3^-に酸化され，これによっても水域環境の低酸素化が促進される．また底泥中にNO_3^-が流入してくれば，それは嫌気性の脱窒菌により還元されてN_2（ガス）となり脱窒化が起こる．一方，含硫アミノ酸に含まれている硫黄分は硫化水素となる．SO_4^{2-}が存在すればそれは硫酸還元菌により還元されて硫化水素になる．底泥中に鉄塩，その他の重金属が存在すると硫化鉄などの硫化物となり黒色化する．その際，反応の相手となる鉄塩は水域上層部で可溶化されたリン酸がFe^{3+}と反応してできたリン酸鉄（3価）の沈降したものであるが，これが硫化水素と反応する際，還元されると同時にリン酸は可溶化され，再び生物に利用されうる形となる．

このようにして，低酸素状態（嫌気的，あるいは還元的）になった底泥上では，C，N，P，Sなどの化合物を主体とする生化学的，無機化学的反応が複雑に入りくんで，有機物の無機化，無機物の可溶化がおこり，また増殖する微生物からも藻類の生長を促進するような代謝産物が分秘されるなどして栄

表1　赤潮鞭毛藻（I～III類型）の生理的特性　（岩崎英雄，1972）

環境ならびに栄養要素 ＼ 類型 / 生物		I		II	
		Heterosigma akashiwo	*Rhodomonas ovalis*	*Eutreptiella* sp.	*Exuviaella* sp.
塩分濃度(Cl ‰)	最適	16.5	13.1	10.2	14.0～18.5
	好適範囲*	(12.5～18.3)	(3.0<)	(8.0～17.0)	(10.6<)
pH	最適	7.5	8.5	7.5	9.0
	好適範囲*	(6.9～8.5)	(7.8～9.0)	(6.5～8.5)	(7.7<)
窒素源	最適	$NaNO_3$	NH_4Cl	NH_4Cl	NH_4Cl
	好適濃度範囲*	<100mg/l	5～10mg/l	0.3mg/l	0.3mg/l
リン酸源	最適	グリセロリン酸塩	KH_2PO_4	KH_2PO_4	KH_2PO_4
	好適濃度範囲*	20mg/l	0.5～1mg/l	0.3mg/l	0.3mg/l
ビタミン B_{12}	要求	+	+	+	+
	好適濃度	10mμg/l	20mμg/l	10mμg/l	10mμg/l
ビタミン チアミン		—	+	*Escherichia*	−(?)
ビタミン ビオチン		—	+	+	−(?)
ビタミン B_{12}類似物への反応特性		*Ochromonas*			*Euglena*
生長促進物質			NH_4-N PO_4-P B_{12}	・Fe，Mn	・Mn，Fe ・プリン ピリミジン ・植物ホルモン

環境ならびに栄養要素 ＼ 類型 / 生物		III			
		Heterosigma inlandica	*Peridinium hangoei*	*Polykrikos schwartzi*	*Gymnodinium nelsoni***
塩分濃度(Cl ‰)	最適	6.6	13.1	9.2	11.0
	好適範囲*	(3.8<)	(8.0～18.0)	(7.6～14.0)	(5.0～18.5)
pH	最適	8.5	8.0	8.5	8.5
	好適範囲*	(7.6<)	(7.5～8.4)	(7.7～8.8)	(7.4～8.8)
窒素源	最適	$NaNO_3$	有機態窒素	NH_4Cl	$NaNO_3$
	好適濃度範囲*	50～100mg/l		0.3mg/l	(有機態窒素)
リン酸源	最適	KH_2PO_4		KH_2PO_4	KH_2PO_4
	好適濃度範囲*	10mg/l		30mg/l	1～3mg/l
ビタミン B_{12}	要求	+	+	+	+
	好適濃度	10mμg/l	10mμg/l		20mμg/l
ビタミン チアミン		−	−	+	−
ビタミン ビオチン		−	−	+	−
ビタミン B_{12}類似物への反応特性		*Ochromonas*	*Escherichia*	*Escherichia*	*Escherichia*
生長促進物質		・プリン ・ピリミジン	・酵母の自己消化物 ・カゼインの膵液分解物 ・グルタミン酸塩	・酵母の自己消化物 ・酵母抽出物 ・動物組織の消化分解物 ・カゼイン分解物	酵母抽出物 〃＋動物組織消化分解物 〃＋グアニン 〃＋DNA 〃＋土壌抽出液

*最高増殖量の2分の1増殖を示す範囲　　**酵母抽出物がないと増殖しない

養に富んだ層ができあがるのである．

赤潮生物には**表1**に示すように無機の窒素やリンに加えて，各種のビタミンや核酸塩基類を生長促進物質として要求するものが多い．特にビタミンB_{12}とは高い相関性を示すという．これは後述するように，光合成細菌のビタミンB_{12}の含量が生物界で最高の含量を示すこと，また赤潮中に光合成細菌が存在する事実を考慮に入れると後述の我々の研究の意義が明瞭になってくる．

5．赤潮中の細胞集団の消長

赤潮中の生物集団は，N，Pを初めとする無機栄養成分，また，生長促進因子も十分そろっており急速に増殖するが，やがて栄養成分の不足，過剰繁殖

など環境変化にともない増殖は停止，すなわち定常期に入ってくる．この時期になると各細胞は次第に栄養欠損（飢餓）に陥り細胞は衰退し，種々の貯蔵物質**が分解され，生命維持に利用される．飢餓状態が続くと細胞内の小器官，たとえばリボゾーム，クロロプラスト，その他原形質内成分は崩壊しはじめる．そして死細胞の割合が増してくる．多くの鞭毛藻のように細胞表層構造のぜい弱な細胞は，しばしば自己溶解を起こす．これは細胞自体の保有する加水分解酵素によって細胞が溶解することである．そのように細胞が死ねば水中に共存する細菌の侵襲をうけて細胞は腐敗の過程に入ってゆく．腐敗が進行すると水中の溶存酸素は消費されて副次的に魚介類に影響を与えるようになる．

赤潮藻類の一種 *Botryococcus* は細胞表層が破れると繊維状物質を四散し，これによって互いにからみあって，かたまりを形成するのみでなく，海水中に粘質物が放出されるため，海面がドロドロした状態になる．夜行虫赤潮の場合も細胞が破壊されると海水はドロドロになり，それが細菌に侵されて腐敗を始め，悪臭を放つ．

一般に藻細胞は元気に分裂増殖を繰り返しているときでも，光合成産物，その他，代謝産物を細胞外に排出する．たとえばグリコール酸を排出し，それを細菌が利用したり，また藻細胞自身が再び，それを取り込んで再利用したりしている．このように細胞が活発に代謝を営んでいるとき排出される物質をⅠ型排出物（**表1**参照）と呼ぶが，その中にはグリコール酸，コハク酸などの脂肪酸，セリン，アラニンなどのアミノ酸，ショ糖のような糖類もあり，比較的低分子量物質が多い．これに対して細胞が栄養欠損に陥り，増殖が停止したころ排出されるものをⅡ型排出物と呼び，細胞壁外の粘質多糖類，あるいはペプチドや核酸のような高分子物質が多い．これらⅠ型およびⅡ型排出物は自然水域における藻類同士，ならびに共存する細菌との間に微妙な働きをして，これら生物相内の相互関係に重要な影響を及ぼすものと考えられている．

また，赤潮藻類が代謝産物として有毒物質を排出することもあり，この場合には魚介類のような遊泳生物，あるいは底生動物をへい死させることがある．

6．赤潮の魚介類に対する害作用

一般的に赤潮発生により魚介類が受ける害作用の原因は，水中の溶存酵素の低下による呼吸阻害，赤潮藻類による毒素産生，赤潮藻類の死亡後の腐敗毒生成，底泥の腐敗分解中生成した有毒物質の浮上による中毒，赤潮発生時に繁殖する細菌の毒力などである．それらの概略を**表2～4**にまた毒性物質の構造の一例を**図―2**に示しておこう．

7．人畜に対する毒作用

赤潮の異常発生による被害には2つの場合がある．1つは直接的に毒作用を示す場合であり（**表3**参照），他は赤潮藻類などを捕食した貝類が毒化されて，それを人が食べることによって食中毒を起こすという間接的な場合である（**表4**参照）．

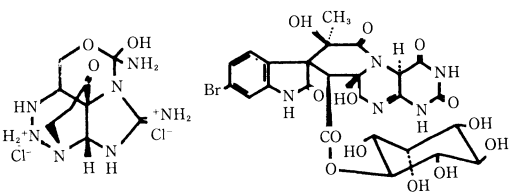
一般に赤潮が原因となる毒作用についての研究は多くの場合，著しい困難をともなう．

図―3に赤潮藻類の生活史の一例を示す[5]．赤潮藻類の中には単細胞（n）のままで増殖したり，環境の変化により接合（2n）（核融合）したりするという複雑な生活史をとるものがいるのである．

また，赤潮の異常発生は“一過性”の場合が多く，魚類のへい死や人畜の中毒事件が起こった場合，研

	分子比
アスパラギン酸	1
グルタミン酸	2
D－セリン	1
バリン	1
オルニチン	1
アラニン	2
ロイシン	2

Microcystis flos-aquae の有毒ペプチドのアミノ酸組成（Gorham, 1965）



サキシトキシンの構造（Wong ら，1971）　スルガトキシンの構造（Kosuge ら，1972）

図―2　赤潮藻類毒成分の化学構造の例

表2 魚介類に有害な藻類とその毒作用 (柳田ら)

有毒藻名	藻種	発生場所	毒物質	毒作用
Gymnodinium veneficum	渦鞭毛藻		構造未知の高分子	大部分細胞外毒素，多くの動物の神経，筋肉に作用
G. breve	〃	フロリダ西岸	上記に類似	急性毒
Prymnesium parvum	緑藻	オランダ，デンマーク，イスラエルの汽水	イクチオトキシン ヘモリジン	魚毒性(コイ大量死) 溶血性
Aphanizomenon flos-aquae			プリムネシン(サポニン?)	脊椎動物，無脊椎動物に作用，魚の鰓透過性に異常をきたす．Ca^{2+}，Mg^{2+}により毒作用増強
Peridinium polonicum	藍藻	淡水	ヒドロキシルアミン，サキシトキシン様毒素	
	渦鞭毛藻	相模湖	グレノジニン(SH含有イボガアルカロイド)	メダカ最小致死量0.13ppm，マウス腹腔内 LD_{50}，40mg/kg，pH8以上で毒作用発揮

表3 人畜に有害な藻類とその毒作用 (柳田ら)

有毒藻名	藻種	発生場所	毒物質	毒作用
Exuviaella sp.	渦鞭毛藻	福山周辺	構造未知の低分子	
Glenodinium sp.	〃	フロリダ沖		海面を風が吹くとヒトの呼吸粘膜を刺激
Trichodesmium sp.	藍藻	ブラジル，ルシフェ沖		同上，タマンデア(Tamandare)熱と呼ぶ
Anabaena flos-aquae	〃	淡水	VFDF*	急性毒，けいれん，まひを起こす．水鳥被害多し
A. lemmermannii	〃	〃		同上類似
Aphanizomenon flos-aquae	〃	〃	ヒドロキシルアミン，サキシトキシン様毒素	徐々に死亡か致死作用なし
Lyngbya birgei	〃	〃		徐々に死亡か致死作用なし
Microcystis aeruginosa	〃		FDF*	けいれん，衰弱，昏睡を起こす
M. flos-aquae	〃	〃	FDF*(ポリペプチド)	けいれん，衰弱，昏睡を起こす．肝障害を起こす
			SDF*	共存細菌に由来(?)．立毛，呼吸困難，昏睡を起こす
M. toxica	〃	南アフリカ淡水	肝臓毒(ヘパトキシン) 光感受性毒	光過敏症(強烈な日やけを起こし，耳や皮膚が脱落)

*VFDF：very fast death factor, FDF : fast death factor, SDF : slow death factor

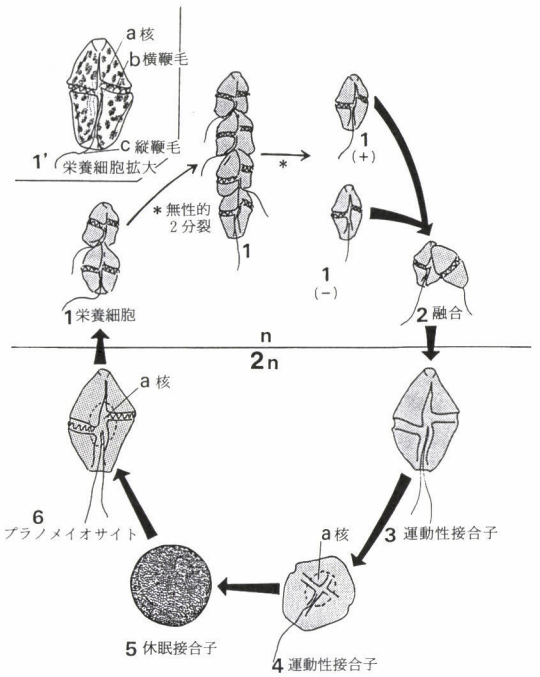
表4 貝類を毒化する藻類と毒化貝類の毒作用 (柳田ら)

有毒藻名	藻種	毒化される貝	発生場所	毒物質	毒作用
Gonyaulax catenella	過鞭毛藻	Butter clam*	アラスカ	サキシトキシン	まひ毒(症状フグ毒類似)
〃	〃	イガイ	カリフォルニア		〃
G. catenella(?)	〃	アカザラガイ	岩手県大船渡湾		〃
G. polyedra	〃			サキシトキシン類似	〃
G. tamarensis	〃	ホタテガイ	カナダ大西洋岸		〃 無毒の系統もある
不明		アサリ	浜名湖		〃
不明		アサリ	豊橋		
不明		カキ	宮津		まひ毒
不明		イガイ，カキ	大船渡湾		毒性弱きものあり
不明		バイ	駿河湾	スルガトキシン	瞳孔散大(アトロピン様症状)

* *Saxidomus* spp：ウチムラサキの仲間

究者が道具をそろえて現場に到着したときはすでに消滅している場合が多い．

なぜ，赤潮毒が“一過性”であるのか，それまで飲み水として利用していた水が，赤潮発生と同時に，なぜ急に毒性を示すのか，さらにその後，毒性が急減してしまうのかなど，赤潮の発生について，我々



図―3 *Gymnodinium catenatum* Graham の生活史[5]
(高山晴義訳)

の研究成果を次に述べ，赤潮発生の理論，ならびにその対策について考察してみたい．

8．幸運にも典型的な赤潮に遭遇

昭和51年7月11日，私は和歌山市における講演に招かれ，その夜は奥和歌浦雑賀崎山手のホテルに宿泊，翌早朝，ホテルの窓から眺めると，内湾漁港に，真赤な赤潮が発生しているのが目に入ってきた．

それまで幾度か赤潮の採取を計画していたが，その機会に恵まれなかった．遂に当日，午前6時過ぎ，理想的な赤潮採取に成功した．

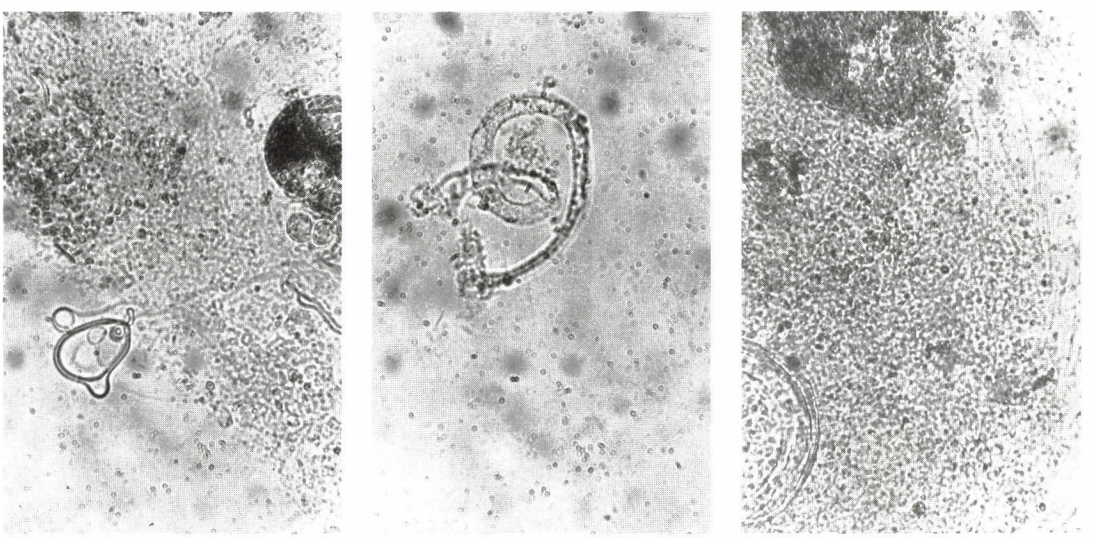
海面表層付近に浮いていた赤潮は粘稠性のあるものであった．そして採取後，3時間以内に顕微鏡観察したものが**写真1～3**である．

写真1，a）b）c）に示すように小動物の遺体と思われるものが多量に存在していた．その中にまじって，**写真2**，a）b）に示すように動物性プランクトンが活動している状態が観察された．

光合成細菌は細菌性葉緑素の吸光曲線が780nm付近にピークを持つことから，容易に，その細菌の存在を確認することができる[6]．

活動的な動物性プランクトンの周辺に，光合成細菌など，活発に運動する細菌の群れを認めることができた***．

また，**写真3**，a)，b)にみられるような土壌粒子が極在的に一団をなして含まれていた．**写真3**，c）で円形状の白く見えるものはガス状，すなわち気泡である．浮上してきた赤潮中には，このようなガスを包み込むようにしていることが確認できた．それ故，赤潮は“うき”を持ったような状態になり，発生当初，赤潮は急に底層部より上部の水域へ浮上することができるが，やがて，海面や水域で波にあ



a）　b）　c）

写真1　赤潮の顕微鏡写真（×800）小動物の遺体が多数認められる．そのそばには細菌がむらがっている．

a)

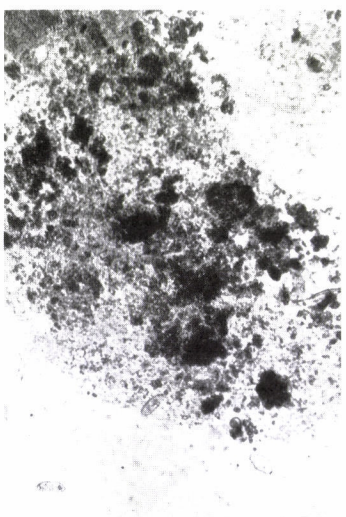
b)

写真2　赤潮の顕微鏡写真（×800）

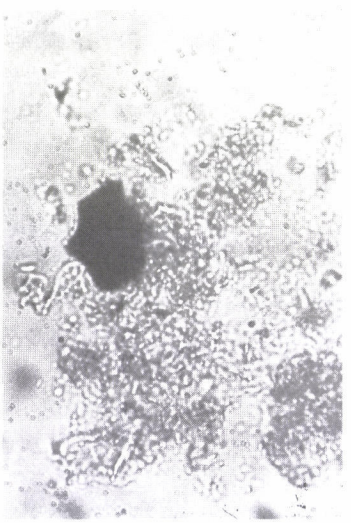
多数の動物性プランクトンが細菌塊中で動き回っている．

a）動物性プランクトンはそれら細菌を捕食しながら活発に動いている．

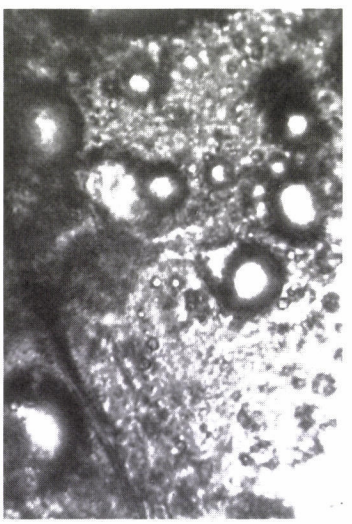
b）その細菌中には光合成細菌が認められ，光合成細菌自身も非常によく動くので，円形ないし短桿状菌体が顕微鏡写真では線状ないし，らせん状にうつってみえる．



a)



b)



c)

写真3　赤潮の顕微鏡写真

a）（×200）微生物菌塊，動物性プランクトンにまじって多量の土砂の混入が観察される．

b）（×600）土壌粒子が黒くみられる．糸状のものは放線菌である．白く，円いものは気泡である．

c）（×1500）気泡を大きく拡大したもの．この気泡で浮力がつき，赤潮は浮かび上ってくる．

らわれたり，ゆられている間に，その“ガス”は放出されたり，水に溶けこんだりしてなくなり，浮力は弱まり，水面下へ消えて去ってしまう．

9．赤潮発生のモデル実験[6)]

前記した赤潮発生内湾では例年，同様の赤潮が認められることから，その水域を調査したところ，次のようなことが判明した．

早朝，漁獲してきた魚類は解体されて，内臓を摘出し，湾内に廃棄していた．その港内の底層を調べたところ，廃棄した内臓物などは“ヘドロ”状になって残存していた．そこでその“ヘドロ”を用いて実験室内で赤潮発生のモデル実験を行ったところ，現場同様の赤潮発生を確認することができた（詳細は私たちの報文を参照されたい）．その要約は，魚類の廃棄有機汚泥が微生物分解を受ける過程において**表5**に示すようにアミンや硫化水素が生成され，時間の経過とともに変動した．また，低級脂肪酸は734

ppm と，かなりの蓄積量が認められた．

さらに有毒な2級アミンであるプトレシンやカダベリンそして催奇性や発ガン性のあるニトロサミンも存在することが確認できたのであった[7~9]．

低級脂肪酸等低分子量の可溶化物質は細菌にとっては非常に利用し易い物質であり，外界の水温がちょうど上昇する時期に，それら可溶化物が大量に蓄積していると爆発的に微生物の繁殖は加速化され，CO_2，CH_4，N_2(NxOy を含む)，ガス等（図―4参照）が発生し，どろどろした状態になった未分解有機汚泥の中にはいり込んで浮力がつき，上部水域へ浮かび始める．

このモデル実験において，予想した通り，底層蓄積汚泥は，上部水域へ浮上し始め，その浮上物中に多数の光合成細菌が共存することも確かめられた．赤潮発生の根源は底層へ堆積した有機汚泥にあることが確認できた．

10. 赤潮発生の原理

赤潮はなぜ発生するのか？ その原理をわかり易くするために図示してみよう．

図―5，図―6に示すように赤潮発生は海底や湖底の構造と密接な関係にある．図―5 a）に示すような底部が平坦で広がって蓄積有機汚泥が薄い場合，すなわち夏期に増殖した動植物プランクトンが冬期に沈澱し，そこで死滅し，また種々の微生物分解をうけて行く過程において内容物は少しずつ，溶出，拡散してしまう．しかし底部の構造が図―5 b）のように谷底状に深くなっている場合には，それらプランクトン，その他の有機物質が蓄積し，しかも何層にも多量堆積し，そのうえ，秋期の洪水期に陸上の乱開発などが，災いして，もしも微粒子状の土砂が蓄積有機汚泥を覆ってしまうと，冬期の低温期間中，ゆっくりとした低温嫌気性菌による分解ならびに溶出があったとしても，それら溶出分解産物は蓄積汚泥中にたくわえられた状態のままで，水域への拡散・放出もほとんどない．そのような状態の時に，春から初夏にかけて水温が上昇すると，そこにたまった易分解・利用性の高い物質を基質とする有機栄養微生物

表5 有機汚泥の微生物分解過程中におけるアミン，硫化水素，有機酸の生成 (ppm)

生産物＼日数	0	14	28	42	56	70	84	98
アミン	54	86	145	472	310	205	110	85
硫化水素	18	28	35	105	127	70	45	25
有機酸	105	255	317	734	603	328	117	24

(a) 光合成反応による蓄積

緑藻類，ラン藻など

$$2H_2O+CO_2 \xrightarrow{\text{光エネルギー}} (HCHO)+O_2+H_2O$$ 蓄積エネルギー－115kcal

光合成細菌（紅色イオウ細菌，緑色イオウ細菌）

$$H_2S+2H_2O+2CO_2 \xrightarrow{\text{光エネルギー}} 2(HCHO)+H_2SO_4$$ 〃 54kcal

光合成細菌（紅色非イオウ細菌）

$$2CH_3\cdot CH_2\text{-}COOH+H_2O+CO_2 \xrightarrow{\text{光エネルギー}} 7(HCHO)$$ 〃 65kcal

(b) 有機栄養細菌，イオウ酸化菌，脱窒菌，鉄酸化菌などによるエネルギーの放出

呼吸

$$C_6H_{12}O_6+6O_2 \longrightarrow 6CO_2+6H_2O$$ 放出エネルギー－686kcal

アルコール発酵酵母

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH+2CO_2$$ 〃 52kcal

アンモニア酸化，ニトロソモナス

$$2NH_3+3O_2 \longrightarrow 2HNO_2+2H_2O$$ 〃 132kcal

亜硝酸酸化，ニトロバクター

$$2HNO_2+O_2 \longrightarrow 2HNO_3$$ 〃 35kcal

硫化物酸化，ベギアトア

$$2H_2S+O_2 \longrightarrow 2H_2O+2S$$ 〃 83kcal

硫黄酸化，チオバチルス・チオパルス

$$2S+3O_2+2H_2O \longrightarrow 2H_2SO_4$$ 〃 237kcal

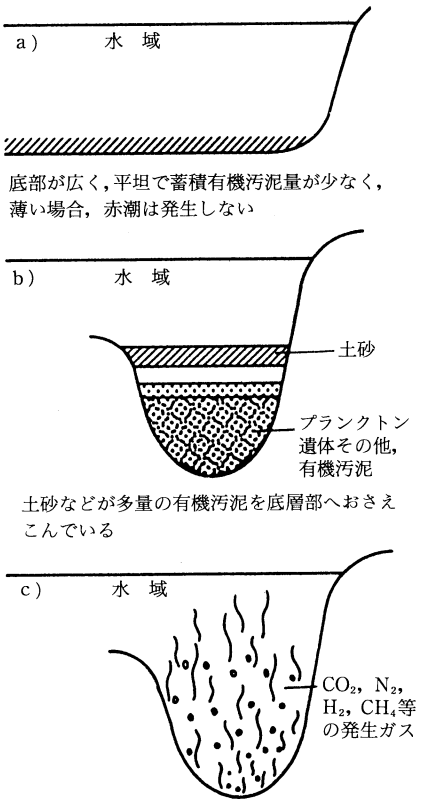
脱窒とイオウ酸化，チオバチルス・デニトリフィカンス

$$5S+6KNO_3+2CaCO_3 \longrightarrow 3K_2SO_4+2CaSO_4+2CO_2+3N_2$$ 〃 660kcal

鉄酸化，鉄バクテリア

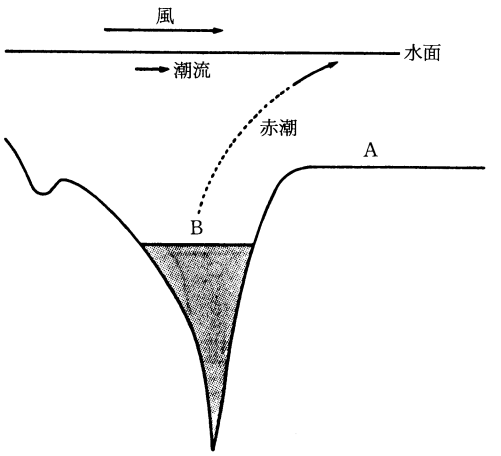
$$4FeCO_3+O_2+6H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3+4CO_2$$ 〃 40kcal

図―4 微生物によるエネルギーの蓄積・放出



長い冬の間に有機汚泥が低温微生物により分解をうけ，低級脂肪酸，その他易分解性物質が蓄積しているところへ春から夏にかけて水温が急に上昇すると，常温微生物がそれら蓄積易分解性基質を利用して急激に大増殖しはじめ，そのとき発生するガスを含んで，それまで閉じ込められていた難分解性物質残渣も浮力がついて，水域へ浮上してくる．その中に存在するバクテリア等を捕食しようとして，それより大型のプランクトンがさらに集まり，赤潮化する

図―5　赤潮発生機構を示す模式図



浮上した赤潮は潮流や風で流され，水質がかなりきれいなところにも赤潮があらわれる．

Aのような平坦な場所で蓄積有機汚泥が冬期閉じこめられないようなところにおいては，よほど水域が汚染されない限り赤潮発生源とはならない．

B．蓄積有機汚泥量が多量に閉じこめられると水温変化時に赤潮は発生する．この現象は内湾に限らず，外洋においても規模の大小はあるが，赤潮の発生はおこる．

また，堆積有機汚泥の分解過程の度合により赤潮中のプランクトン相は異なるようになり，青潮，白潮，苦潮，厄水などと呼ばれるようになる．(私見であるがエルニーニョ現象も海洋における赤潮が関与していると考えている)

図―6　赤潮発生と水域関係を示す図

が急増し，種々のガスを発生し（蓄積発酵熱も加わって増殖は加速化される．**図―4**の反応式参照），やがて**図―5 c**)のような状態に達すると浮力がつき，水域へ短時間に浮上してくる．浮上した赤潮状の層は**図―6**に示すように海流にしたがい，また風力によって押し流され，あちこちと方向を変える．

浮上した赤潮層の中には顕微鏡観察(**写真1～3**)でも示されるように多数の微生物が共存し，その中に含まれている易利用性有機物を使用しながらどんどん繁殖すると同時に魚介類の“えら”などに有害な物質（赤潮発生直後には―浮上しつつある―蓄積有機汚泥分解産物中に含まれる各種有毒アミン，硫化水素，有機酸等，また，時によっては有毒な催奇性のあるニトロサミンをも含んでいるかもしれない）はそこで急増する光合成細菌，その他の微生物によって時間の経過とともに浄化され，また波に洗われながら“ガス状物質”は吸収，放散されたりするので，浮力はなくなり，少しづつ沈降し始め，やがて海面より赤潮は消えてしまう．

ただ，その途中で増殖した光合成細菌，その他の微生物を捕食する動物性プランクトンは赤潮中に繁殖した細菌等を捕食しようとして集まり，そこで動物性プランクトンも同時に大増殖する．

光合成細菌体中のビタミンB_{12}含量は極めて高く[10]動物性プランクトンにとっては大好物の食糧源であり，また，光合成細菌などの微生物菌体は，たとえ動物性プランクトンにより捕食されず残ったとしても，やがて基質不足などにより自己消化すると，ビタミンB_{12}，その他の内容物は溶出し，植物性プランクトンの増殖を促進する．

微生物からプランクトンへ――この食物連鎖にともなうプランクトン相の変動は底部堆積有機汚泥の種類と分解状態，水温，日照条件等により異なる．

これが赤潮の種類をいろいろつくる要因となっているのであろう****．

11. 赤潮対策

以上，赤潮について一般的なことならびに発生の原因について述べてきたが，詳細については引用文献を参照してほしい[1~5]．

赤潮の発生は，その種類のいかんをとわず，底層部に堆積した有機汚泥に起因することは明らかである．赤潮生物の源になる有機汚泥の量を少なくすることが赤潮発生を防ぐ，すなわち窒素，リン等富栄養化促進物質の規制は，今さらここに書く必要もないことである．

ただ日本近海，内湾での養殖漁業の赤潮による被害をくいとめるためには，①養殖漁場の底層構造を確かめる．②底層における有機物の堆積量・堆積状態を調べる．③潮流と有機物堆積場所との相関性を調査する．この3点を見極めて行動すればかなり赤潮の被害を防ぐことができる．

また，好養殖場として長く持続させるためには堆積有機汚泥の除去・分解装置を設置すれば，その養殖場としての存続はありうるのである．

ただ，今までに大量に堆積してしまった有機汚泥を急に攪乱させるようなことをすれば，かえって赤潮の大量発生・急激な水質汚染を引き起こす可能性があるので，その点については注意してほしい．すでに堆積した有機汚泥の量を，まず調査してから養殖漁場（イケス等）をしばらく移転させるなど，蓄積汚泥の除去装置の完備，稼動の順調さを確認するまでは一時しのぎ的養殖漁場の確保も必要であろう．

赤潮対策，これは底層に堆積する有機汚泥について注意すること．有機汚泥の除去と浄化に尽きるのである．

我々はこの養殖事業について大きな成果をおさめているので，あらためて別の機会に記述したい．また，社会では“ヘドロ”を厄介視しているが，実は人類にとって大きな資源なのである．これはこの連載で後述するが，予報として一部，“ヘドロ”の効果をここに略記しておこう．

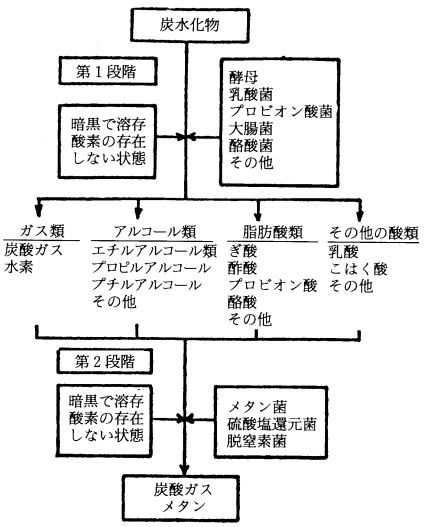
写真3，b）に糸状の放線菌が認められる．

たとえば“びわ湖”を水源とする京都市など下流域では，臭い水問題（カビ臭と表現されている）がでている．その原因は，この写真に認められている放線菌であるが，実は志向をかえた利用面で，“ヘドロ”は大きな効果を発揮するのである（この連載第4回参照）．

農地や果樹の連作障害，各地の梅林や桜並木ではフザリウムなど植物病原性菌の繁殖で衰弱症にかかり悩んでいる．しかしこのヘドロを利用するとこの放線菌が，それら有害な病原性菌を抑圧するのである．

（注）

＊炭水化物の嫌気性分解



＊＊藻類の貯蔵物質としてユーグレナ植物にはパラミロン（炭水化物）や脂肪，炎藻植物には澱粉や油，黄金藻植物にはロイコシン（炭水化物）や油などが存在する．

ガス発生の機構例

①脂肪の嫌気性分解

有機性脂肪はその分解の第1段階において脂肪分解菌の作用（Lipase 酵素作用により脂肪が加水分解され，脂肪酸は水素と結合して飽和脂肪酸に変わる．さらに第2段階では両者とも完全に変わる．さらに第2段階では両者とも完全に炭酸ガスとに分解される．

第1段階（脂肪分解菌による分解）

$$4C_3H_5(\underset{\text{ドリプチリン}}{C_7H_7COO})_3+12H_2O\rightarrow 12\underset{\text{酪酸}}{C_3H_7}COOH+4\underset{\text{グリセリン}}{C_3H_5(H)_3}$$

酪酸菌による分解：

$$4\underset{\text{グリセリン}}{C_3H_5(OH)_3}\rightarrow 4\underset{\text{エチルアルコール}}{C_2H_5OH}+4\underset{\text{ぎ酸}}{H\cdot COOH}$$

$$4H\cdot COOH\rightarrow 4H_2+4CO_2$$

第2段階（メタン菌による分解）

$$12\underset{\text{酪酸}}{C_3H_7COOH}+6CO_2+12H_2O\rightarrow 24\underset{\text{酢酸}}{CH_3}COOH+6CH_4$$

$$4\underset{\text{エチルアルコール}}{C_2H_5OH}+2CO_2\rightarrow 4CH_3COOH+2CH_4$$

$$28CH_3COOH\rightarrow 28CH_4+28CO_2$$

$$4H_2+CO_2\rightarrow CH_4+2H_2O$$

計 $4C_{15}H_{26}O_6+22H_2O\rightarrow 37CH_4+23CO_2$

②脱　窒

脱窒とイオウ酸化，チオバチルス・デニトリフィカンス

$$5S+6KNO_3+2CaCO_3 \rightarrow 3K_2SO_4+2CaSO_4+2CO_2+3N_2$$

＊＊＊原核生物である細菌は淡水・海水，どちらの水域においても増殖可能．すなわち淡水域で繁殖していたものが海水域へ入っても耐塩化（またその逆）できる能力を持っている．細菌より高等な藻類は淡水性，海水性とでは種類を異にしているものが多い．

＊＊＊＊赤潮生物は図－3に示すようなライフサイクルをとるものがあるので，赤潮問題をより複雑にしている．

謝辞：大阪工業大学中西弘先生に文部省総合研究班に入班させて頂いたから赤潮研究ができました．ここにあらためて謝意を表します．

文　献

1）平野礼次郎；赤潮，日細菌誌**30**，463～467（1975）
2）柳田友道著，赤潮，講談社，サイエンティフィック刊(1976)
3）門田元編，淡水赤潮，恒星社厚生閣刊（1987）
4）Okaichi, Anderson, Nemoto Eds,"Red Tide", Elsevier-ed. (1987)
5）L. M. Walker, CRS Press Boca Roton 19-34; K. A. Steidinger and L. M. Walker Eds. (1984)
6）小林達治，藤井国博，日水誌**45**，849～855（1979）
7）M. Kobayashi, N. Taketomo and Y. T. Tchan; J. Ferm. Technology, **55**, 615-620 (1977)
8）M. Kobayashi and Y. T. Tchan, water Research; **12**, 199-201(1978)(U.K.)
9）M. Kobayashi, K. Fujii, I. Shimamoto, and T. Maki; Prog. Wat. tech. **11**, 279-284 (1978) (U.K.)
10）M. Kobayashi and S. Kurata; Process Biochem., 27-30(1978) (U.K.)

アセス情報

中部国際空港のアセスはじまる

環境影響評価法を先取りして，6月10日から方法書の縦覧がはじまった．「空港島」「前島」「土採り場（2ケ所，この2つは6月1日に縦覧開始）」「アクセス道路」の計5冊からなっている．一番厚い「空港島方法書」は113ページもある．体裁としては，「神戸空港」「愛知万博」とよく似ており，地域の概況が70％を占め，評価の項目は1ページにも満たない．

びわこ空港のアセスがもめている

滋賀県蒲生町と日野町とにまたがる地区に予定している「びわこ空港」は候補地選定から8年たったが，地元の反対でいまだにアセス手続きに入れず，この4月3日には，地元住民が事前調査費の支出差し止め裁判をおこした．アセス手続きがはじまる前に，アセスが目的の事前調査が裁判の対象になった例は珍しい．

吉野川第十堰のアセス

吉野川の川口から14kmの所にある第十堰を取り壊し，1km下流に可動堰（ゲートをつけた堰）を新設する計画は，公共事業見直しの対象として第十堰建設事業審議委員会で議論されてきたが，それとは独立して建設省が設けた環境調査委員会から「自然環境への影響はほとんどない」との結論が出て，5月8日に建設事業審議委員会は建設推進の方向に動きだしている．一方，同じような見直しの対象となっている愛知県矢作川河口の可動堰計画では，5月13日の委員会で愛知県が利水権を返上したため，中止の方向に動いている．第十堰は治水が主な目的であるため事情が異なるが，長良川の例を見ても可動堰のアセスにはまだわからないところが多い．

アセス技術指針の公表

環境影響評価法に対応する事業ごとの技術指針は，施行1年前までに公表されることになっていたが，予定通り6月12日の官報号外として発表された．これで，スクリーニング・スコーピングの手続きを開始することができるようになった．

環境庁アセス関係
http://satoru.eic.or.jp/eanet/assess/
法令，各国へのリンクなど