

京大人気講義シリーズ

地球環境学の

すすめ

京都大学地球環境学研究会 著

環境問題は資源・エネルギーを使う経済活動が原因で生じる。それゆえ、自然科学と社会科学の両面からのアプローチが重要となる……。地球環境学には非常に多様なアプローチが存在するのである。

海を守る

瀬戸内海における富栄養化と有害有毒赤潮の発生

海は生命の故郷である。海は地球表面のおよそ七割を覆い、そして一〇〇万種を超える多種多様な生物が生息する。潮の干満がみられる潮間帯から沖合にかけて、水深二〇〇メートル程度までの浅海域を沿岸域と呼び、生物相は豊かで生物生産量も大きく生物の宝庫となっている。沿岸域の平野部には多くの人間が居住し、盛んな生産活動を営み、海からの多くの恩恵に浴しながら一方で海へ様々な影響を及ぼしてきている。我が国では、瀬戸内海が最も規模の大きい沿岸水域であり、人間との関係の一番濃密な水域である。ここでは、人間活動の結果生じた瀬戸内海の富栄養化の歴史と赤潮の発生を総括し、海を守る立場からこれらの問題について解説を加える。

瀬戸内海について

瀬戸内海（図13-1）は、本州、九州、四国に囲まれた我が国で最も規模の大きい閉鎖性の高い沿岸水域であり、その多島美から、一九三四年には我が国初の国立公園に指定されている。本水域の大

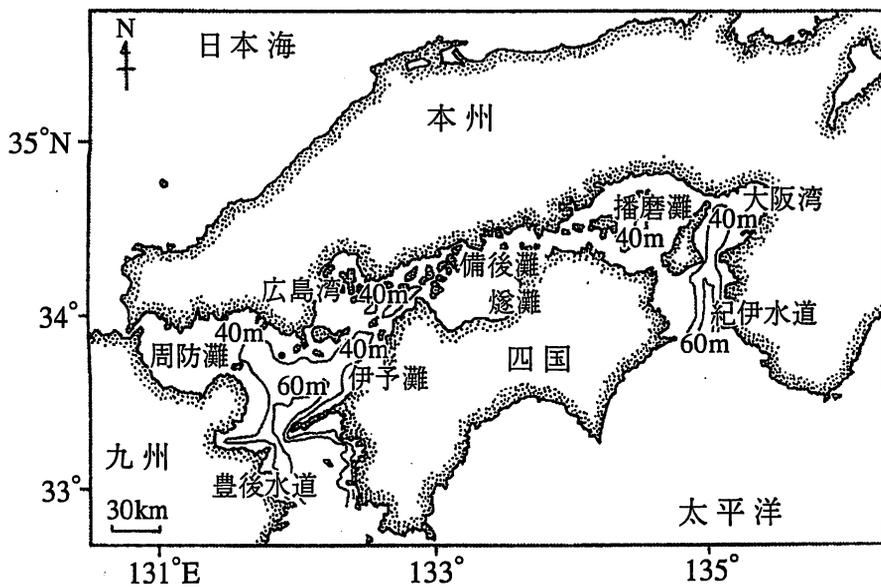


図13-1 瀬戸内海

部分は水深五〇メートルより浅い浅海域（平均三八メートル）である。瀬戸内海の面積は約二・三万平方キロメートルであり、約八八〇〇億トンの海水を湛える。気候が温暖なことから（平均気温一五度）、瀬戸内海沿岸域には日本の総人口の四分の一、約三〇〇〇万人が居住する。瀬戸内海には六六四の河川を通じて毎年約五〇〇億トンもの水が流入している。大阪湾、北部播磨灘、北部広島湾は沿岸に大都市を抱え、特に富栄養化の著しい水域となっている。

瀬戸内海は一方で漁業生産にとって重要な水域である。ピーク時の一九八〇年代には八〇万トン台の生産を誇り、現在は年間約六〇万トン前後の生産で推移している。このうち魚介類の養殖生産が約半分を占めるのが瀬戸内海の大きな特徴である。これら養殖漁業に対し、赤潮の発生によって甚大な斃死被害が与えられてきた。さらには、有毒プランクトンの発生を通じて、有用二枚貝類（カキ、アサリ、イガイ等）の毒化の問題も高い頻度で生じるようになっていた。

富栄養化の歴史

我が国の高度経済成長は一九六〇～一九七〇年代に進展したが、瀬戸内海沿岸域はその牽引的役割を果たした。その結果、大量の汚濁物質が負荷されて極端な富栄養化が進行し、赤潮の

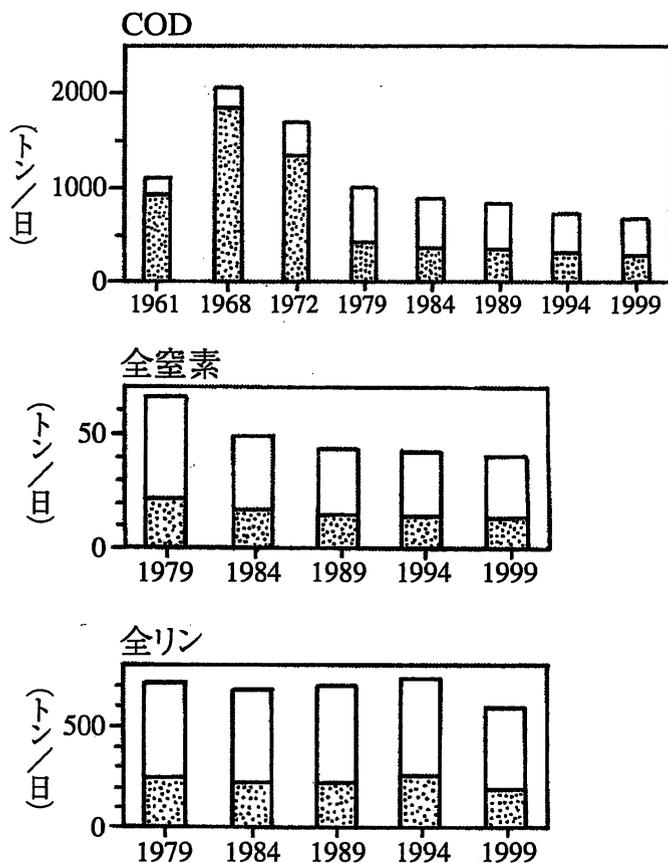


図13-2 瀬戸内海におけるCOD、全窒素、および全リン発生負荷量の推移 白抜きのカラムは生活系とその他、点のカラムは産業系（瀬戸内海の環境保全資料集より）

基本計画が定められ、汚濁負荷の総量規制が実施されるようになった。それにより瀬戸内海全体で一九七二年には一七〇〇トン／日であった化学的酸素要求量（COD・水中の有機物量の指標）負荷量が、一九九九年には七一七トン／日に減少した。全リンに関しては一九七九年から、全窒素では一九六六年から削減指導が行われ、二〇〇二年から水質汚濁防止法に基づき総量規制が導入されている。このような法的措置が奏功して、当時死に瀕していた瀬戸内海は、その水質が相当程度に改善されて現在に至っている。しかしながら後述するように、水質は一定レベルにとどまっている。

赤潮の発生

発生や貧酸素化等の様々な問題が起これり瀬戸内海は死に瀕した。この間の汚濁負荷の状況を図13-2に示した。このように深刻な状況下、一九七三年に「瀬戸内海環境保全臨時措置法」が制定され、一九七八年には赤潮等の被害に対する富栄養化対策を含む新たな施策が加えられた後継法の「瀬戸内海環境保全特別措置法」が制定された。これらの法に基づき、瀬戸内海環境保全

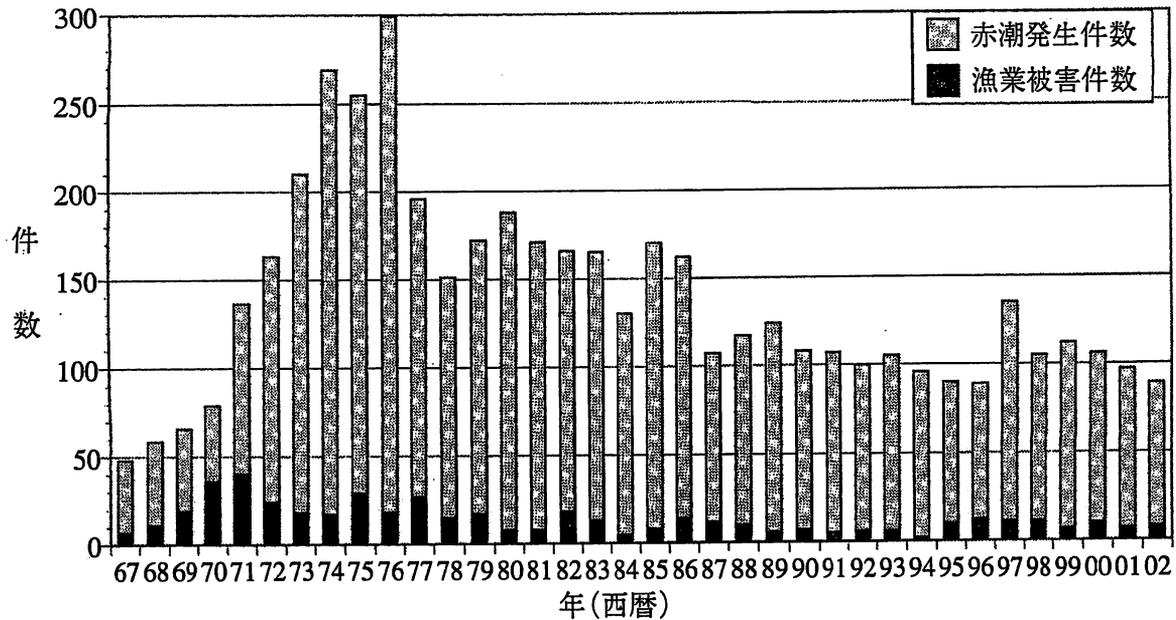


図13-3 瀬戸内海における赤潮発生件数と漁業被害件数の経年推移（瀬戸内海の赤潮より）

高度経済成長の始まったころの一九六五年以前の瀬戸内海においては、赤潮の発生件数は年間五〇件以下であった。以後、赤潮の発生件数は劇的に増加し、一九七三年には二一〇件、一九七六年には史上最多の二九九件を記録した（図13-3）。前述のように、一九七三年に「瀬戸内海環境保全臨時措置法」が制定され、後に特別措置法が後継されて以降、赤潮の発生件数は減少傾向に転じ、年間一〇〇件前後にまでなった。しかし、そのレベルは一九八〇年代後半以降、保たれたままである。

赤潮の発生水域と規模の変化をみると（図13-4）、一九六〇年は年間一八件の発生で規模も小さかったが、一九七〇年代と一九八〇年代には、大規模な赤潮が特に夏季を中心として頻繁に発生するようになった。極端な場合には、大阪湾や播磨灘、燧灘、周防灘といった海域のほぼ全域を覆うような大規模赤潮もまれではなかった。その後、一九九〇年代以降になると、赤潮の発生規模と期間は縮小傾向になった。しかしながらカキやアサリ、真珠貝等の二枚貝を大量に斃死させる渦鞭毛藻

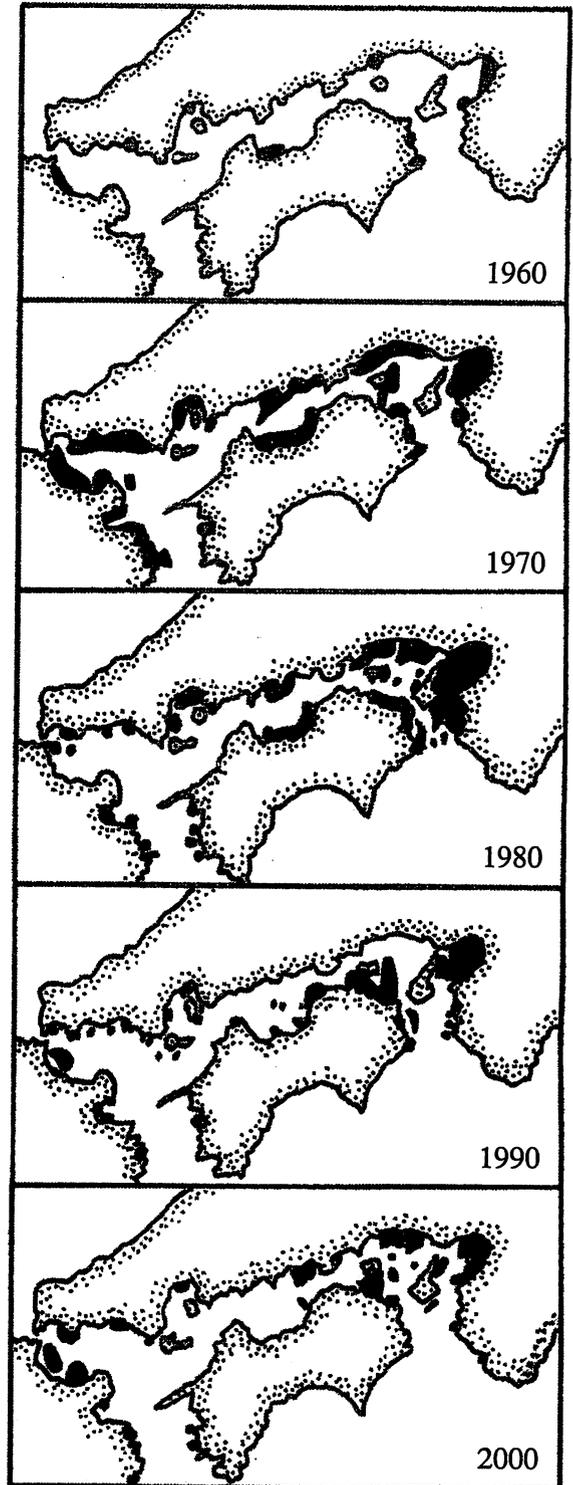


図13-4 瀬戸内海における赤潮発生海域の変化（瀬戸内海の赤潮、瀬戸内海の環境保全資料集より）

Heterocapsa circularisquama（ヘテロカプサ）の赤潮が新規に発生するようになり、新たな問題が生じてきている。

瀬戸内海における代表的な赤潮生物としては、ラフィド藻の *Chattonella antiqua* と *C. marina*（二種合わせてシヤットネラと称される）、*Heterosigma akashiwo*（クテロシグマ）、*Fibrocapsa japonica*（フィプロカプサ）、渦鞭毛藻の *Noctiluca scintillans*（夜光虫）、*Gymnodinium mikimotoi*（ギムノディニウムと称されているが、近年は分類学的検討の結果 *Karenia mikimotoi* とすることが提案され定着しつつある）、および前述のヘテロカプサが挙げられる（図13-5）。これらの赤潮生物の中で最も大きい漁業被害を与えてきたのはシヤットネラであり、渦鞭毛藻のギムノディニウムとヘテロカプサがこれに続く。上記の主要な生物が起こした赤潮発生件数と漁業被害件数の経年変化を参

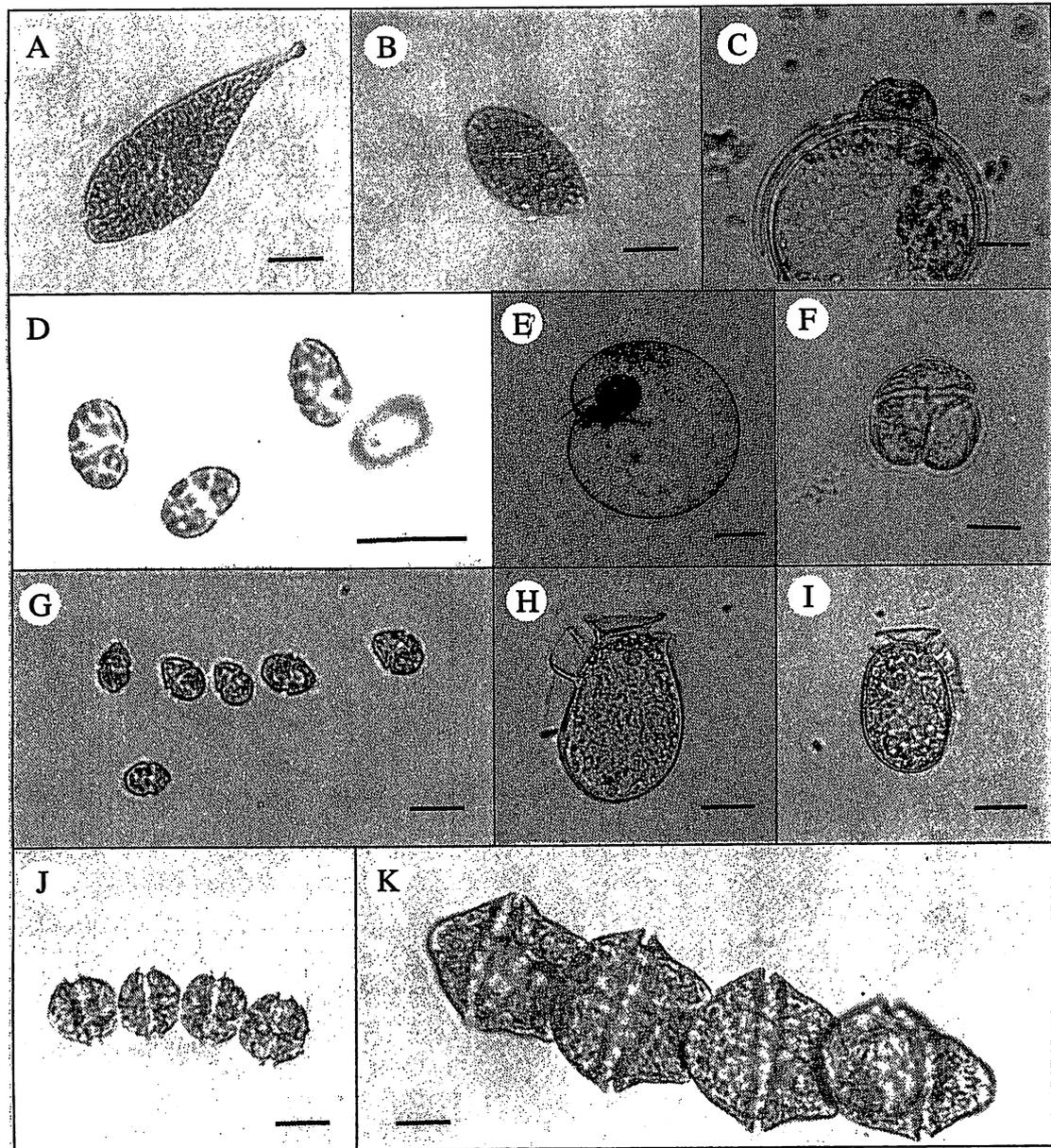


図13-5 我が国沿岸域に生息する代表的な有害有毒赤潮藻類 (A)魚類を斃死させるラフィド藻、*Chattonella antiqua*、(B) *Chattonella marina*、(C) *Chattonella*のシスト、(D) *Heterosigma akashiwo*、(E)赤潮渦鞭毛藻 *Noctiluca scintillans*(夜光虫)、(F)魚介類を斃死させる *Gymnodinium mikimotoi*、(G)二枚貝を斃死させる、*Heterocapsa circularisquama*、(H)下痢性貝毒原因渦鞭毛藻 *Dinophysis fortii*、(I) *Dinophysis acuminata*、(J)麻痺性貝毒原因渦鞭毛藻 *Alexandrium catenella*、(K) *Gymnodinium catenatum*。スケールは、Eが100 μm 、その他は20 μm (今井ら、2000)

照すると(図13-6)、一九七〇年代にはヘテロシグマ、ギムノデイニウム、ならびに夜光虫の発生が多く認められる。シャットネラの赤潮は、一九七〇年代と一九八〇年代には普通に起こっていたが一九九〇年代以降、減少傾向である。全体的な発生件数の動向は、ヘテロカプサを除き明らかに減少傾向を示している。ヘテロシグマと夜光虫による赤潮の場合、発生件数は多いが被害件数は比較的少なく被害も小さいのが一般的特徴である。これに対し、シャットネラ、ギムノデイニウム、およびヘテロカプサの赤潮は深刻な漁業被害を伴うことが多いため、要注意である。

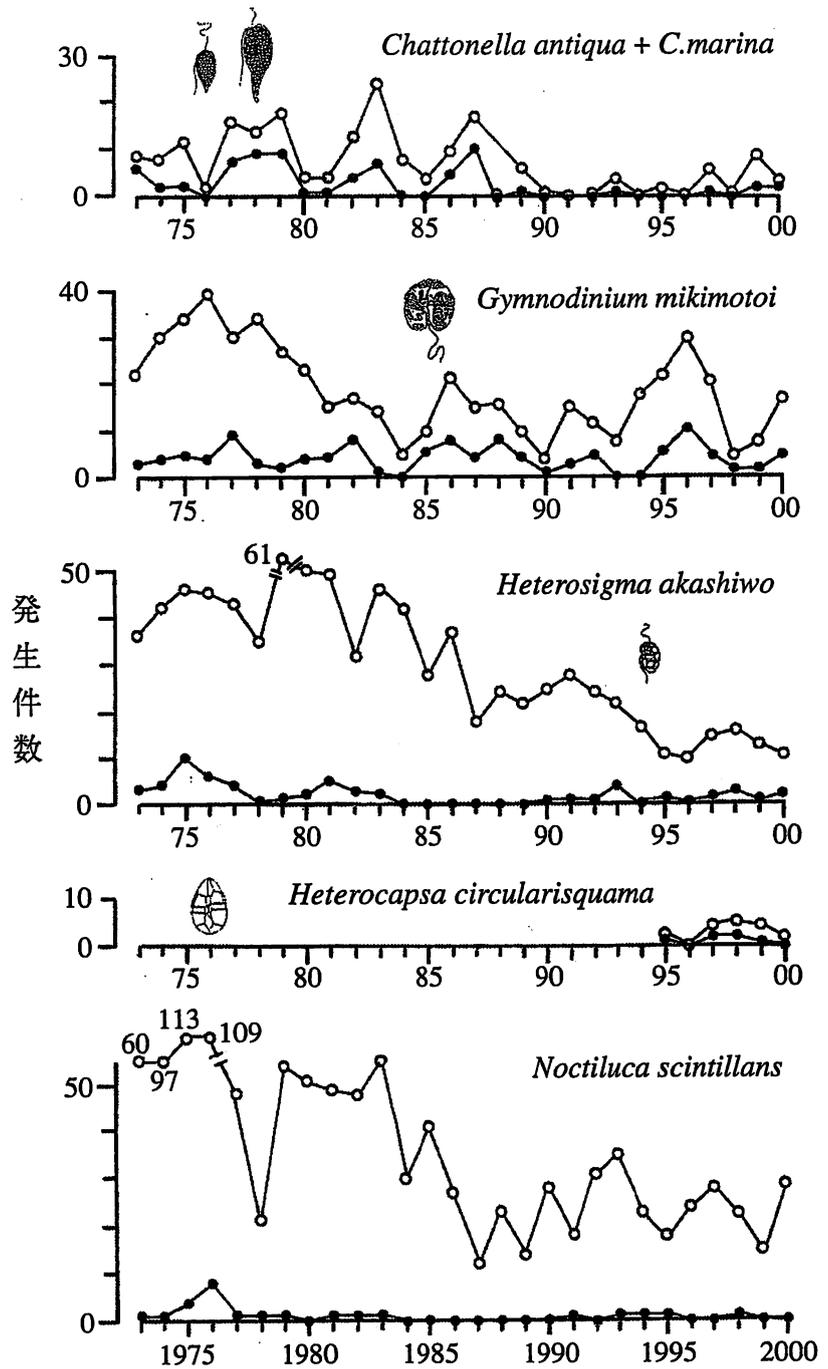


図13-6 瀬戸内海における、主要な赤潮原因藻による赤潮発生件数(○)および漁業被害件数(●)の経年変化

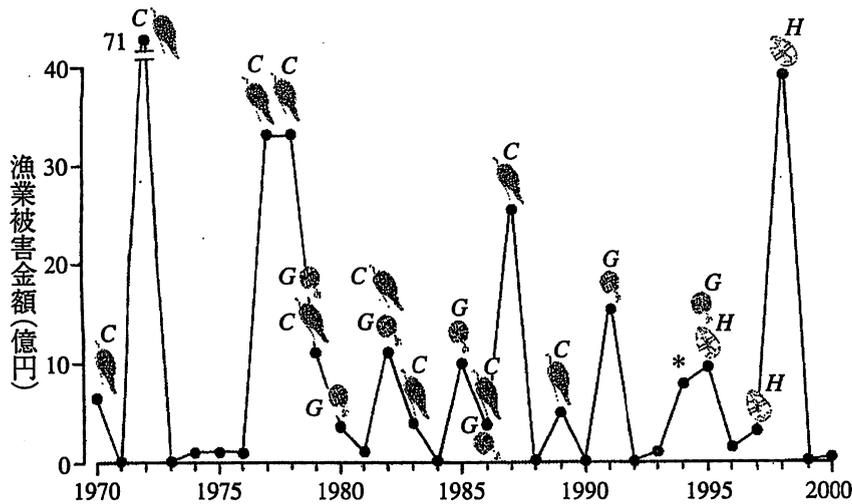


図13-7 瀬戸内海における主要な赤潮原因藻によって受けた漁業被害金額の経年変化 Cはシャットネラ、Gはギムノディニウム、Hはヘテロカプサ、*はゴニオラクセスによる

瀬戸内海において発生した赤潮による漁業被害額とその主要原因生物の経年変化をみると(図13-7)、シャットネラが最も有害な生物であることが明らかである。一九七二年夏季の播磨灘において、一四二〇万尾もの養殖ハマチを斃死させ、約七一億円という史上最大の漁業被害を与えて「播磨灘赤潮訴訟」が起きたことはあまりにも有名である。一九七〇年代と一九八〇年代は漁業被害が頻繁であったが、一九八九年を最後としてシャットネラによる一億円以上の漁業被害は一九九〇年以降瀬戸内海ではみられなくなっていた。しかしながら、二〇〇三年夏季に播磨灘においてシャットネラ赤潮が発生し、南部水域を中心として久し振りに一〇億円を越える養殖魚類の大量斃死被害が生じたことから、今後も厳重な監視と注意が必要であろう。ギムノディニウムは一九七九年以降、継続的に瀬戸内海で赤潮被害を与え続けている。ヘテロカプサ赤潮による漁業被害は、高知県浦ノ内湾で一九八八年に初めて記録されているが、瀬戸内海においては広島湾で一九九五年に養殖カキの斃死被害が起こったのが最初である。その後一九九七、一九九八年と赤潮被害が続く、後者の場合、瀬戸内海の漁業被害史上二番目の約四〇億円にも上る養殖カキが斃死した。赤潮被害額の長期的変動傾向としては、ヘテロカプサによる場合

を除きおおむね減少傾向といえる。瀬戸内海においてシャットネラ、ギムノデイニウム、およびヘテロカプサ以外で顕著な漁業被害を与えたことがあるのは、渦鞭毛藻の *Gonyaulax polygramma* (ゴニオラックス) のみであり、豊後水道付近の水域を中心に約八億円の養殖魚類斃死被害を一九九四年夏季に引き起こした。

代表的赤潮生物の特徴

瀬戸内海における代表的な赤潮生物としてシャットネラ、ヘテロシグマ、ギムノデイニウム、およびヘテロカプサが挙げられるが、これらの生物学的特徴を以下に整理する。

シャットネラが瀬戸内海で初めて赤潮を形成し確認されたのは、一九六九年の広島湾においてである。シャットネラは生活史の中で耐久細胞であるシストの時期を持ち、越冬に重要な役割を果たしている。これらのシストは落射蛍光顕微鏡を用いてプリムリン染色で検出できるが、瀬戸内海から採取した一九五〇年以前の深層の海底泥からもシャットネラのシストが検出されている。したがって、高度経済成長期以前にシャットネラは瀬戸内海に生息していたことになり、元来は目立たない生物 (*hidden flora*) であったのが、瀬戸内海の富栄養化に伴って大增殖するようになったものと考えられる。

ヘテロシグマにおける最初の赤潮の記録は、一九六六年の備後灘である。本種はコスモポリタンであり、世界中の亜熱帯〜冷温帯の海域で観察される生物である。これもシストの時期を生活史の中に持つており、もともと瀬戸内海に目立たずに生息していたのが、やはりシャットネラの場合と同様に、

水域の富栄養化に伴って大增殖するようになったといえよう。

ギムノディニウムの場合、一九〇三年に三重県の英虞湾、一九三三年に同県の五ヶ所湾で、さらには一九五七年には山口県の徳山湾で赤潮発生が報告されている。本種はこのように高度経済成長期以前からすでに沿岸海域で赤潮を形成し、魚介類を斃死させてきた実績を有しており、富栄養化が深刻でない時代から生息する、もともとの赤潮生物種 (inherent red tide species) であると結論できよう。

ヘテロカプサは、本来的には微細藻類の濾過性捕食者で天敵である二枚貝類を、特異的に斃死させることで極めて特徴的である。本種の赤潮は前述したとおり一九八八年に高知県浦ノ内湾で初めて発生した後、一九八九年に福岡湾で、一九九二年には三重県英虞湾で発生している。本種は、環境変化に対して一時的に抵抗性を示す一時シストを形成する能力を持っており、有用二枚貝類の海域間移動に伴って付随的に他の水域へと分布が拡大していったと考えられている。また本種は、水温一二・五度以下では生存できないことから、我が国沿岸の大部分の水域において越冬は不可能である。さらに本種の越冬シストの存在は、関係科学者の営々たる努力にもかかわらず確認されていない。加えて一九八七年以前に香港付近の沿岸水域において発生した赤潮の固定保存海水試料より本種の存在が確認されたことから、もともと本種は東南アジアの沿岸水域に生息していたものが、有用二枚貝類の人為的移動や海流等に伴って、我が国沿岸水域へと侵入した生物であろうと指摘されている。

主要な赤潮生物に関して、窒素 (N) とリン (P) の最小細胞内持ち分 (minimum cell quota) が報じられている。これを基本に、代表的な四種の赤潮生物について、広島県の赤潮警報基準細胞密度に相当する栄養塩濃度 (N、P) を算出することにより、これらの赤潮原因種の「危険度」を評価し

表13-1 主要赤潮生物の警報基準細胞密度、最小細胞内持ち分 (NとP)、および警報基準細胞密度に相当する栄養塩 (NとP) 濃度

赤潮生物種	警報基準細胞密度 (細胞/mL)	最小細胞内持ち分		警報基準細胞密度相当の栄養塩濃度	
		N (fmol*/細胞)	P (fmol/細胞)	(N, μM)	(P, μM)
<i>Chattonella antiqua</i>	100	7,800	620	0.78	0.062
<i>Gymnodinium mikimotoi</i>	5,000	3,130	250	15.7	1.25
<i>Heterosigma akashiwo</i>	50,000	1,440	95	72.0	4.75
<i>Heterocapsa circularisquama</i>	500	1,100	89.4	0.55	0.045

* fmol : フェムトモル (10^{-15} モル)

(広島県赤潮被害防止対策要綱および Yamaguchi et al. 2001)

てみた(表13-1)。ヘテロシグマとギムノディニウムの場合、被害発生の可能性のある警報基準細胞密度に達するまでに大量のNとPを要求するのが明らかである。しかしこれら二種の生物は顕著な日周鉛直移動能力を持っており(ギムノディニウムは水深二〇メートルにまで夜間に達する)、昼間の表層への鉛直的濃縮と夜間の下層での栄養塩吸収を考えれば、比較的容易に警報発生密度に達成し得るであろう。一方シャットネラとヘテロカプサは、ごく少ない栄養塩の消費と引き続き増殖の結果、容易に警報レベルまでに達することが明白である。したがって、シャットネラとヘテロカプサは、極めて危険な赤潮生物と結論できる。

有毒ブルーム

瀬戸内海においては、有毒微細藻類による有用二枚貝類の毒化は規模が小さく頻度も低かったため、以前は大した問題ではなかった。一九七〇年代と一九八〇年代には、アサリに麻痺性貝毒が時折検出される程度であり、その原因生物は渦鞭毛藻のアレキサンドリウム属の一種 *Alexandrium catenella* であった。もともと貝毒の問題は、東北や北海道の東日本沿岸で重要な問題であった。しかし一九九〇

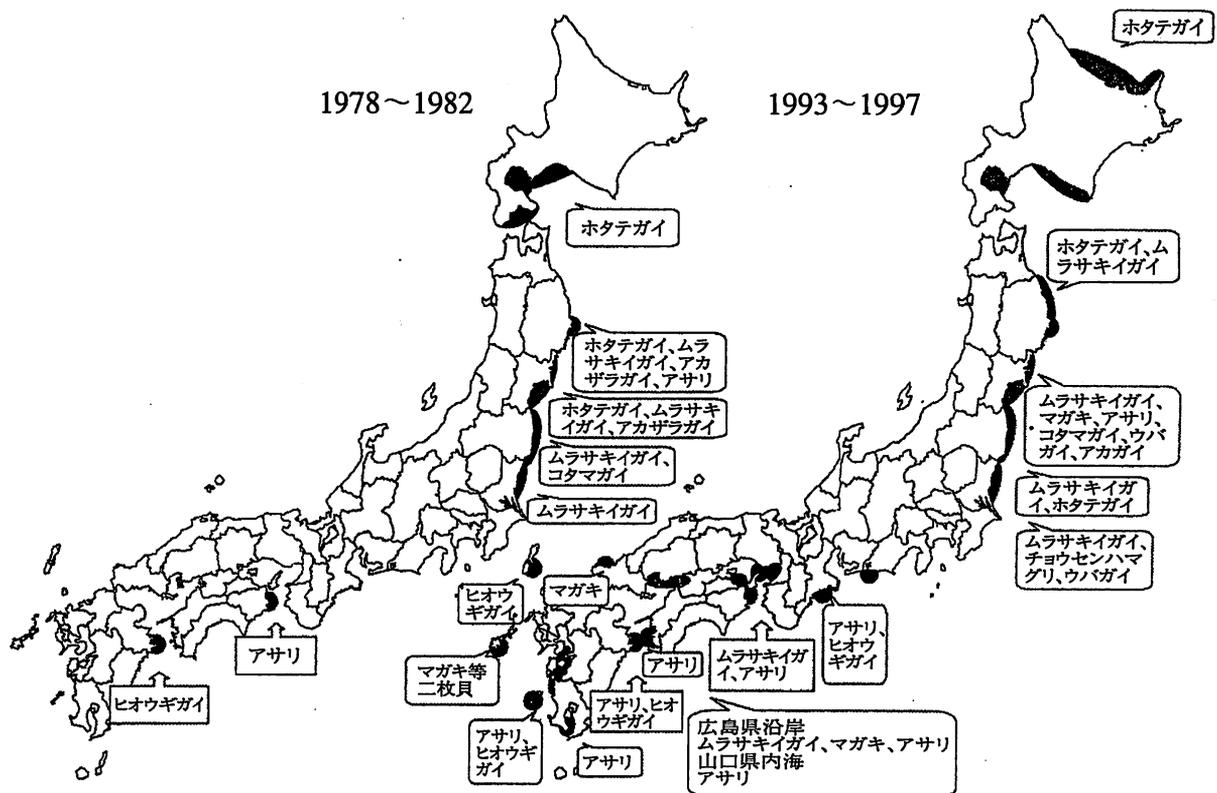


図13-8 日本沿岸における麻痺性貝毒発生状況の比較（1978～1982年と1993～1997年）二枚貝が出荷規制された水域と毒化した貝の種類を示した（今井ら、2000）

年代以降、有毒藻類のブルーム発生と麻痺性貝毒の検出件数は、瀬戸内海や九州、四国の西日本沿岸域において著しく増加し、現在に至っている（図13-8）。この増加に貢献した主要な原因生物は *A. tamarense* である。アレキサンドリウムはシストを生活史の中に持っており、瀬戸内海や九州、四国の沿岸水域の海底泥からシストが大量に検出されていることから、二枚貝類における麻痺性貝毒の問題は現時点ですっかり定着してしまったと結論できる。その他の麻痺性貝毒原因生物として渦鞭毛藻の *Gymnodinium catenatum* や *Alexandrium tamivanichii*, *A. minutum* による毒化も近年報告されており、警戒が必要である。

広島湾において *A. tamarense* の個体群動態が一九九四～一九九八年に調べられている。本湾では麻痺性貝毒が、一九九二年を嚙

矢としてほぼ毎年春に二枚貝から検出されている。本種の栄養細胞は毎年一〜六月に検出され、最高密度 ($10^3 \sim 10^4$ 細胞/リットル) は四〜五月に観察される。このブルームの期間にケイ酸塩は毎年最低濃度を示しており、ケイ藻類が春季ブルーム期間中にケイ酸塩を消費し尽くして衰退した後の時期に、毎年 *A. tamarense* (ケイ酸塩を要求しない) がブルームを形成したと合理的に指摘されている。もともと *A. tamarense* は西日本には生息しておらず、一九九〇年代以降、本種は西日本の海域に普通に検出されるようになったが、その起源は現時点では不明である。しかし、本種が普通に生息している北日本の水域から西日本の水域へ有用二枚貝類が人為的に導入されており、この際に本種のシストが付着して付随的に分布を拡大した可能性が指摘されている。

赤潮の防除と予防

赤潮の発生を未然に防止するためには、栄養塩 (NやP) の供給を阻止するか富栄養化した水域から栄養塩を除去する必要がある。前者については、種々の法的規制と、廃水の浄化処理が一定の成果を上げている。また、海底に蓄積した栄養物質や汚染物質を除去し、あるいは底質を改善するために、浚渫や海底耕耘が検討されている。養殖場においては、モイストペレット等の漁場を汚染しにくい餌の使用や投餌量の管理、適正放養密度の遵守が有効であろう。

赤潮の直接的な防除に関しては、これまでに様々な化学薬品、超音波、オゾン、高分子凝集剤、赤潮の海面回収、鉄粉吸収 (磁石)、粘土による吸着等が試みられてきたが、海の大きさをゆえの経済性の問題、生態系への事後の悪影響の懸念等があり、ほとんど実用化されたものはない。唯一、粘土散

布が緊急避難的に実行されており、特に隣国の韓国では種々の工夫がなされている。現在、いったん有害赤潮が発生した場合には、生け簀の移動や餌止めといった方法が魚介類の斃死被害軽減のために行われているが、決定的な対策がないのが現状である。このような背景から、有効かつ安全な赤潮防除対策の確立が期待されている。

近年、我が国において、赤潮生物を有効に殺してしまふ殺藻細菌や、殺藻ウイルスを用いた赤潮防除に関する研究が精力的に展開された。その結果、沿岸水域には、殺藻細菌や殺藻ウイルスが共に生息しており、赤潮発生のピーク時から消滅の過程において大量に増殖しており、赤潮の消滅において重要な役割を演じていることが明らかにされた。そして実際に赤潮の発生する海域から、種々の殺藻細菌や殺藻ウイルスが分離され、それらの殺藻作用も確認された。しかしながら、これらの細菌やウイルスを人工的に大量増殖させ、現場海域に散布するというような実用化に関しては、法的な問題、環境や他生物への影響評価等の幾つかのハードルが残されており、さらに検討を要する状況である。

筆者の研究室においては、殺藻細菌と殺藻ウイルスの研究を展開する過程で、赤潮が発生したり消滅したりしているわけではないのに、潮間帯の大型藻の表面および藻場の海水中に、赤潮藻を殺滅する殺藻細菌が高密度で生息しているという事実を近年発見した。このことにより、養殖海域で魚類と大型藻類の混合養殖を行うという赤潮予防対策が提案できる。すなわち、海藻表面から継続的に殺藻細菌が周囲の海水へと剝離供給されれば、赤潮藻類を高密度になる前から養殖水域で殺藻する効果が期待される。さらに話を進めるならば、これまで埋立てや鉛直護岸工事等で大規模に沿岸域の藻場が消失してきたが、自然再生の一環で、大規模な藻場造成を有害赤潮の発生する海域の周辺で実施する

ならば、同様に赤潮の予防効果が期待できる可能性がある。規模とコストの問題を検討する必要があるが、海藻は元来、海に生息していることから環境に極めて優しく、漁業生産者や一般市民の両方に対して感覚的にも好ましいイメージを持たれており、藻場の活用は究極的な赤潮対策になる可能性がある。

海を守る

沿岸域においては、河川が流入する所では平野が発達することから人口集中が生じ、それに伴う活潑な人間活動により、大規模な廃水流入を通じて水域の富栄養化が著しく進行する傾向がある。この問題は、先進国、途上国を問わず世界に共通するものであり、そのような観点から地球環境問題の一つと位置付けることができる。さらに、様々な物資の輸出入や有用水産生物の世界規模にわたる搬送により、人為的な有害有毒微細藻類の分布拡大が付随的に起こっている状況がある。有害有毒赤潮の発生から沿岸域を保全するためには、このような人間活動に対してのより注意深い考慮と、充実した沿岸域のモニタリング体制の構築維持が必要である。

高度経済成長期に、瀬戸内海は富栄養化と海洋汚染が極度に進行して死に瀕した。一九七三年に瀬戸内海環境保全臨時措置法が制定され、すでに三〇周年を越えた。その間、関係する機関や人々の営々たる努力により、瀬戸内海は危機的な状況を脱し、ある程度富栄養化の問題も克服された状態になったといえる。自然と人間のかかわりにおいて、我々は多くの教訓を得たといえよう。自然との付き合い方において、瀬戸内海は、人間の叡智を実践するモデル的な場として貴重な生態系で

あろう。

人類は動物の一種であり、生存と繁栄に食物と良好な生息環境を要求する。そしてそれは他の共存する生物の生存と繁栄に依拠し、また共通するものである。高度経済成長を前提とした、大量生産・大量消費・大量廃棄の社会経済システムは、環境破壊や多くの生物の絶滅を招く等様々な問題を引き起こしており、好むと好まざるとにかかわらず持続可能な循環型社会を形成しなければ、人類に将来はない。人類が共存する他の生物に配慮し共に生きる環境を良好に保つことは、究極的には将来の人類の利益と生存を保証し、そして人間だけの利益を超えて地球全体の利益（地球益）につながると考える。

我が国においては、法的な面では、「循環型社会形成推進基本法」や「新生物多様性国家戦略」が制定され、さらに二〇〇三年からは「自然再生推進法」が施行された。これからは自然再生型事業が公共事業の大きな柱になると予想されるが、環境を徹底的に配慮した事業の施行が当然の前提となる。沿岸水域においては、藻場、干潟、湿原、サンゴ礁等の保全、再生、創出、維持管理が主たる内容となる。

海を守るために、人間は海とどのように付き合っていけばよいのだろうか？ モデルケースとして、人里近くの里山が、人間の生活と里山生態系が持続可能な状態で調和している例が挙げられる。これは里山の生態系の仕組みをよく知り、上手に管理してきた結果であろう。沿岸海域を里山と同様に「里海」として認識し、そのような観点から生態系の仕組みを把握しながら漁業等を通じて上手に管理保全していくならば、里山と同様に、人間と沿岸域生態系が見事に調和した関係が実現する可能性

がある。また同時に、沿岸域を場とした環境教育を広く実施することにより、より多くの人々に海を守る意義を理解してもらうことができよう。漁業やレクリエーション、あるいは好ましい自然景観等を通じて豊かな海の恵みを長い将来にわたって享受するためには、海を守ることが大前提となる。そのためには行政のみでなく、専門家、地域の住民、NGO、NPO等による様々な有機的取り組みと活動が必要である。

〔今井一郎〕

地球環境学のすすめ

〈京大人気講義シリーズ〉

平成16年2月29日 発行

著作者 京都大学地球環境学研究会

発行者 村田 誠 四 郎

発行所 丸善株式会社

出版事業部

〒103-8245 東京都中央区日本橋二丁目3番10号

編集：電話(03)3272-0513 / FAX(03)3272-0527

営業：電話(03)3272-0521 / FAX(03)3272-0693

<http://pub.maruzen.co.jp/>

郵便振替口座 00170-5-5

©Kyoto University Global Environmental Studies Council, 2004

組版印刷・株式会社 日本制作センター / 製本・株式会社 松岳社

ISBN 4-621-07371-0 C1336

Printed in Japan

本書の複製権・翻訳権・上映権・譲渡権・公衆送信権（送信可能化権を含む）は丸善(株)が保有します。

JCLS 〈(株)日本著作出版権管理システム委託出版物〉

本書の無断複写は著作権法上での例外を除き、禁じられています。複写される場合は、そのつど事前に(株)日本著作出版権管理システム（電話03-3817-5670, FAX03-3815-8199, E-mail: info@jcls.co.jp）の許諾を得てください。