

## 1-2 水中生活者の渦鞭毛藻類と人間活動

高知大学大学院黒潮圏海洋科学研究科

関田 諭子

### 1. はじめに

渦鞭毛藻類は世界中で約 2000 種が知られていて、海やダム湖、ため池などの淡水から海水にまで幅広く分布し、水界の生態系にとって重要なグループの一つである。渦鞭毛藻類のいくつかの種は、赤潮や貝毒の原因生物になることが知られている。また、渦鞭毛藻類の約半数は葉緑体をもっていて光合成を行う独立栄養性、残りの半数は葉緑体をもたない従属栄養性である。葉緑体は、従属栄養性の真核生物が光合成能力をもつ原核生物（ラン藻）を取り込むという細胞共生によって獲得されたと考えられている。渦鞭毛藻類の葉緑体は、すでに一度、細胞共生によって葉緑体を獲得した（一次共生）真核生物をさらに取り込んだ二次共生によって獲得されたと考えられている。二次共生によって葉緑体を獲得したと考えられる生物は他にもいるが、渦鞭毛藻類の葉緑体が他の光合成生物と異なる点は、その微細構造や光合成色素組成が多様なことである。通常、同じグループに属する種は、類似した特徴をもつ葉緑体をもっている。渦鞭毛藻類にみられるこの“非常識な”葉緑体の多様性は、取り込んだ細胞内共生体の多様性に由来していると考えられている。一方、従属栄養性の渦鞭毛藻には、ヤコウチュウのように触手をもち餌を捕食するもの、被食者の細胞質だけを吸引するもの、細胞外消化をするものなどさまざまな栄養摂取様式がある。

渦鞭毛藻は多くの独自の特徴を持ち、他の生物との類縁関係がよく分かっ

ていなかった仲間である。しかし、現在では細胞の微細構造と分子系統学の研究によって、渦鞭毛藻類は、繊毛虫類（ゾウリムシなど）やアピコンプレックス類（マラリア原虫の *Plasmodium* など）と近縁であり、それら 2 つのグループと共にアルベオラータという分類群にすることが提唱されている。アルベオラータに共通する特徴として、原形質膜を裏打ちするように分布する扁平な小胞（アルベオール、渦鞭毛藻類ではアンフィエスマ小胞と呼ぶ）でできた細胞外被をもっていることがあげられる。アルベオラータに属す 3 グループは、細胞表層部の類似性以外は、生活様式や栄養様式などが全く異なる生物群である。

このように不思議な生物である渦鞭毛藻類の細胞生物学的な特徴と、生態系における役割や影響を紹介し、他の生物との関係を考える視点の参考にしたい。

## 2. 渦鞭毛藻類の特徴と基本構造

渦鞭毛藻類の生活史には、二分裂の無性生殖を繰り返す非常に単純なものから、有性生殖を行い多くの形態変化を伴う複雑なものまであり、遊走細胞、球状の不動細胞、休眠接合子（シスト）、アメーバ状の細胞、群体をつくる細胞、さらには多細胞体のステージをもつ種が知られている。渦鞭毛藻類の生活様式は多様で、多くの種は単細胞遊泳性の細胞で、自由生活を営んでいるが、有性生殖や環境の悪化にともない、厚い壁（シスト壁）をもつシストに変化して休眠する種が多く知られている。また、他の生物と共生したり、寄生することによって生活している種も存在する。さらに、渦鞭毛藻類の形態は非常に多様で、同じ仲間とは思えないようなかたちをした細胞もみられる。しかし、通常、渦鞭毛藻類は、生活史の中に単細胞で 2 本の鞭毛をもつ遊走細胞のステージが存在する。そして、その遊走細胞の基本的な外形は、渦鞭毛藻類で共通している。典型的な遊走細胞の形態（図 1a）は、細胞を一周する横溝を境にして上側の上

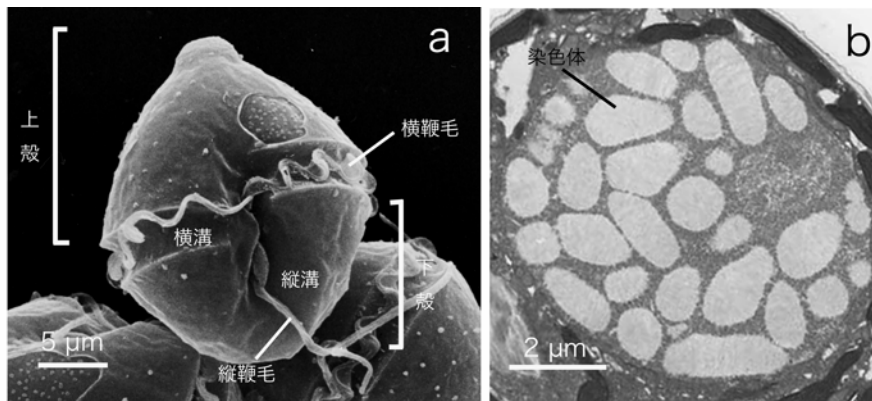


図 1. 渦鞭毛藻類の基本的な特徴

(a)典型的な渦鞭毛藻の形態を示す遊走細胞の走査型電子顕微鏡写真：横溝を境に上側を上殻，下側を下殻と呼ぶ。また，横溝，縦溝に沿って鞭毛がある。(b)核の断面の透過型電子顕微鏡写真：円形または楕円形の白い部分が染色体。

錐（または上殻），下側の下錐（または下殻）に分けることができる。さらに横溝とほぼ直角に交わる縦溝があり，それぞれの溝が交わる部分から，2本の鞭毛が伸びている。横鞭毛と縦鞭毛と呼ばれる2本の鞭毛は，形態と機能が異なる。横鞭毛は，横溝に沿って，一定の周期でらせん状にうねりながら細胞を一周するリボン状で，縦鞭毛は縦溝に沿って後方へまっすぐ延びる。渦鞭毛藻類の遊走細胞は，渦を巻くように回転しながら泳ぐが，その回転と前進するための力を与えているのが横鞭毛で，縦鞭毛は主に舵取りの役割を果たしていると考えられている。鞭毛をもつ生物は数多くいるが，細胞を一周したり，リボン状でらせんを描く鞭毛をもつのは渦鞭毛藻類だけである。また，この鞭毛を使って細胞を回転させながら渦を巻くように泳ぐことが，名前の由来になっている。次の特徴は，渦鞭毛藻核と呼ばれる核である。通常，渦鞭毛藻類の核は，渦鞭毛藻類の核は大きく，細胞の半分程度を占める場合もある。また，細胞周期を通して常に染色体が凝縮している（図 1b）。真核生物の多くは，核分裂の時だけ染色体が凝縮するので，核分裂期以外では染色体を観察することはできない。渦鞭毛藻類は，このようにいくつかの共通する特徴をもっているが，その形態は非常に奇妙で多様性に富んでおり（図 2），単細胞生物とは思えないほど

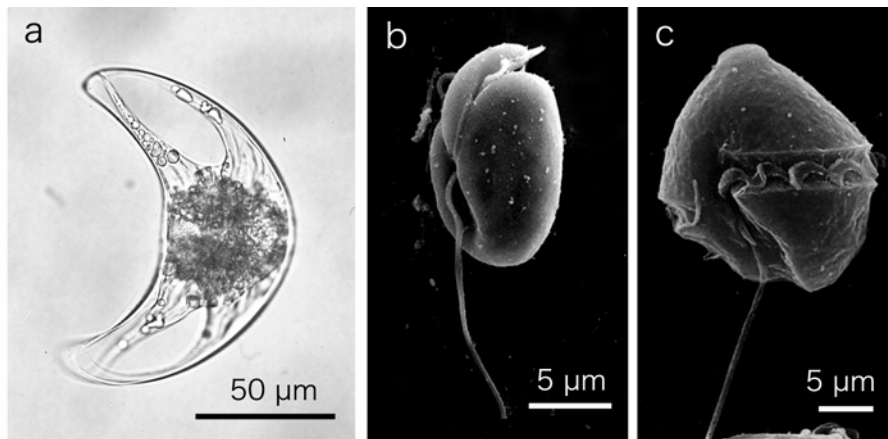


図 2. さまざまな形態の渦鞭毛藻類

(a) *Pyrocystis lunula* の栄養細胞 , (b) *Amphidimuim sp.* の遊走細胞 , (c) *Scrippsiella hexaplaecingula* の遊走細胞。

である。細胞の形態に影響する細胞表層部を構成する細胞外被の構造は種によってさまざまで、鎧板と呼ばれる板状の堅い構造に覆われる有殻渦鞭毛藻類(図 2c, 3c) とそのような鎧板をもたない裸の無殻渦鞭毛藻類(図 2b) に分けることができる。また、有殻渦鞭毛藻の場合、鎧板の厚さや表面の模様は種によって異なっているが、鎧板の存在そのものによって非常に複雑な細胞形態が維持されている。

### 3. 渦鞭毛藻類の細胞外被の構造

細胞外被はすべての植物がもち、細胞を防御するだけでなく、細胞の形を決める重要な構造である。細胞外被は進化の過程で様々に多様化し、その構造と機能が複雑化した。陸上植物に代表される多くの植物細胞は、細胞外被を原形質膜の外側にもち、それは細胞壁と呼ばれる。細胞壁が細胞の形を決定し、細胞壁がどのように成長するかによって細胞の形が決まる。一方、渦鞭毛藻類の遊走細胞は、原形質膜の“内側”に細胞外被をもつ。多様な形態を示す渦鞭毛藻類の遊走細胞も細胞外被の基本的な構造は、グループ内で共通している。一般に、渦鞭毛藻類の遊走細胞の細胞外被は“アンフィエスマ”と呼ばれている。

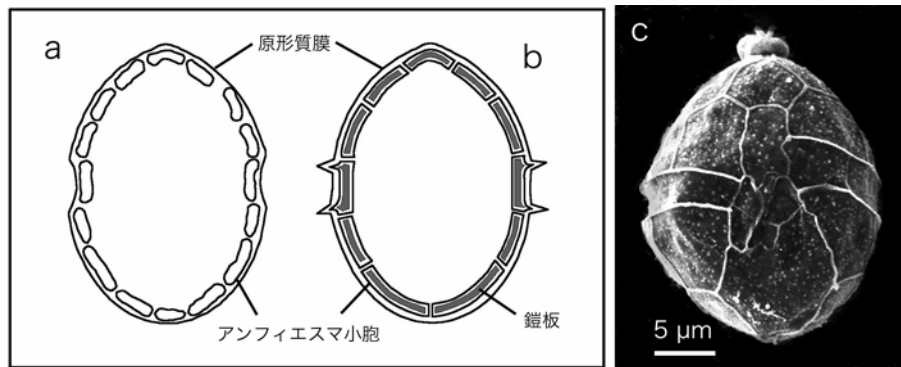


図 3. 渦鞭毛藻類の細胞外被の構造

(a)無殻渦鞭毛藻の断面の模式図：原形質膜の内側に多数の小さいアンフィエスマ小胞がある。(b)有殻渦鞭毛藻の断面の模式図：アンフィエスマ小胞の中に板状の鎧板がある。(c)有殻渦鞭毛藻の走査型電子顕微鏡写真：原形質膜とアンフィエスマ小胞を取り除き、鎧板を露出させた細胞で、複数の多角形の鎧板が決まった配列で並んでいる。

アンフィエスマは、アンフィエスマ小胞と呼ばれる原形質膜を裏打ちするように分布する多数の扁平な小胞と、その小胞の直下にある細胞骨格の微小管で構成されている(図 3a)。さらに、有殻渦鞭毛藻の間では、アンフィエスマ小胞の中に“鎧板”と呼ばれるセルロースでできた堅い板状の構造がある(図 3b, c)。したがって、渦鞭毛藻の細胞のかたちは、アンフィエスマ小胞と微小管、および有殻渦鞭毛藻の場合は、鎧板の形と配置によって決まる。さらに、有殻渦鞭毛藻では、鎧板の形・数・配列が種ごとに決まっており、属および種を分類するための重要な形質の一つである。つまり、種ごとに特有な配列パターンは、世代を越えて受け継がれていく。

上述するような細胞外被の構造をもつ有殻渦鞭毛藻の間では、生殖の際に、新たな細胞外被がつくられる。そして、その鎧板配列は親の配列と全く同じに再生され、種特有の配列パターンが維持される。渦鞭毛藻類では、有性生殖を行う種と無性生殖のみによって増殖する種がある。特に、無性生殖の細胞分裂には次の二通りの様式が知られている。一つは、泳ぎながら二分裂するタイプである。この場合、娘細胞は親の細胞外被を半分ずつ受け継ぎ、失った残りの半分を再生する。二つ目の様式では、細胞分裂の起こる前に、細胞外被を

脱ぎ捨てて (ecdysis) 不動化し、その不動細胞の中で細胞が分裂して、二個の娘細胞がつくられる。この場合、娘細胞は親と全く同じ鎧板配列をもつ細胞外被を完全に再生しなければならない。また、渦鞭毛藻類では環境の急激な変化や生育条件の悪化などによって、細胞外被の脱ぎ捨ての起こることが知られている。この場合も遊走細胞は、シスト(不動細胞)に変化する。シストの細胞外被は遊走細胞とは異なり、シスト壁やペリクルと呼ばれ、陸上植物と同じように原形質膜の外側に形成される厚い細胞壁である。これらの壁は薬剤耐性やセルロース性の層から構成されていて、過酷な環境条件での生存を可能としている。この保護されたシストの中で新しい遊走細胞がつくられる。

遊走細胞の不動化は一瞬の間に起こり、その後、不動細胞の中で新しい遊走細胞がつくられる。この時、細胞表層部分の構造が変化し、新たに形成される遊走細胞では親と同じ鎧板配列をもつ新しい細胞外被が全て再生されなければならない。渦鞭毛藻類の遊走細胞は、一番外側に原形質膜をもつので、細胞外被の脱ぎ捨てによって、その原形質膜も一緒に脱ぎ捨てられることになる。では、細胞外被を脱ぎ捨てる細胞は、どのようにして原形質膜、および親と同じ種特有の鎧板配列パターンをもつ細胞外被を再生するのだろうか。その再生過程を有殻渦鞭毛藻 *Scrippsiella hexapraecingula* を例にして説明する。*S. hexapraecingula* は明暗周期に同調して、明期には活発に泳ぐ遊走細胞、暗期には基物に固着する不動細胞を繰り返す。有性生殖は行わず、不動細胞の中で二分裂することによって増殖する。すなわち、この種は細胞外被を全て脱ぎ捨て、すべての細胞外被を新たに再生する渦鞭毛藻である。

まず、細胞外被を脱ぎ捨てるということは、細胞の一番外側にある原形質膜も一緒に脱ぎ捨てるということである。では、脱ぎ捨てられた原形質膜はどのように再生されるのだろうか。原形質膜と同様にアンフィエスマ小胞の外側の

膜(図 4a の oam)も崩壊する(図 4b)、それと同時に、隣り合うアンフィエスマ小胞の内側の膜(図 4a の iam)同士が一瞬にして融合し、細胞全体を取り囲む連続する膜になる(図 4b)。この融合した膜が新しい原形質膜になり、その膜の下にアンフィエスマ小胞が再生される。では、そのアンフィエスマ小胞はどのように形成されていくのか。その発達過程を断面でみると、まず、新しい原形質膜と微小管の間に新しいアンフィエスマ小胞が形成されはじめ(図 4c)、徐々にその数が増加する(図 4d)。最終的に、いくつかの大きな小胞に発達して細胞の表層部分全体を覆って完成する(図 4e)。

さらに、細胞を平面的に観察することで、より視覚的にアンフィエスマ小胞の発達過程を理解することができる(図 5)。アンフィエスマ小胞は、あらかじめ決められた領域内で個々に発

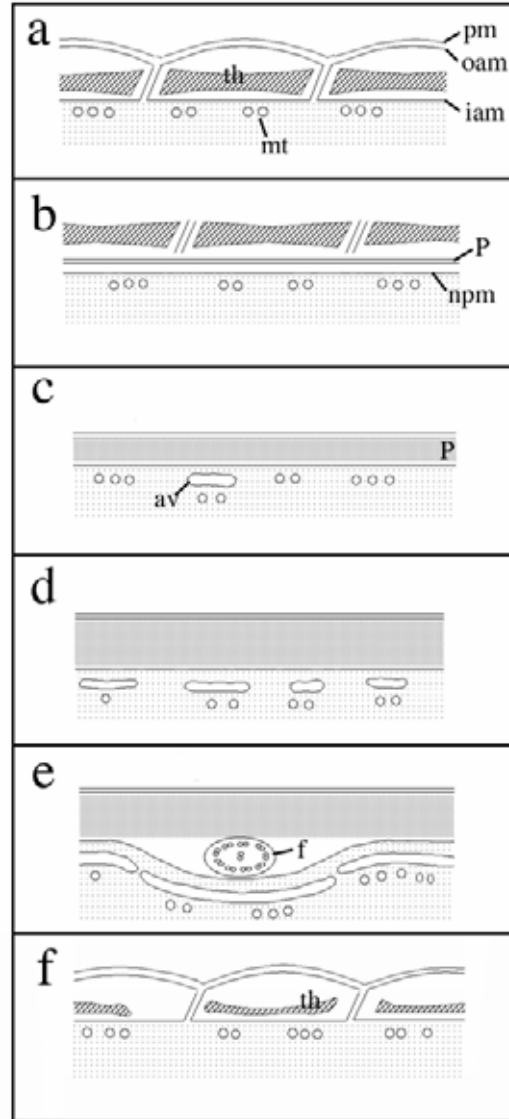


図 4. 渦鞭毛藻の細胞外被の形成過程 (a)成熟した遊走細胞の細胞表層の断面、(b)細胞外被を脱ぎ捨てた直後の不動細胞の細胞表層の断面、(c)-(e)アンフィエスマ小胞が発達している段階の不動細胞の細胞表層の断面、(f)若い遊走細胞の細胞表層の断面

av; アンフィエスマ小胞, f; 鞭毛, iam; アンフィエスマ小胞内膜, mt; 微小管, npm; 新しい原形質膜, oam; アンフィエスマ小胞外膜, P; ペリクル, pm; 原形質膜, th; 鋸板

Sekida et al. (2001)より引用

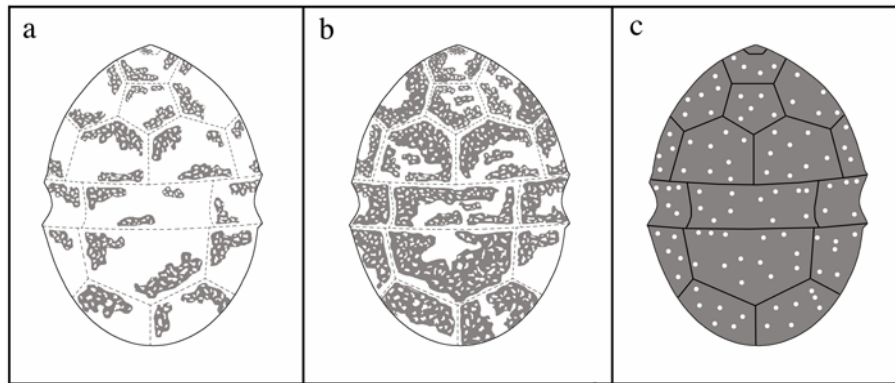


図 5. アンフィエスマ小胞の発達過程の平面の模式図

(a)小さいアンフィエスマ小胞(灰色の領域)が、破線で示した各領域内に出現し始める。(b) アンフィエスマ小胞が各領域内で網目状に発達する。(c)アンフィエスマ小胞が完成し、その配列パターンは遊走細胞の鎧板の配列パターンと一致する。

Sekida et al. (2001), Sekida (2005)より引用。

達する。まず、決められた領域の端の部分からアンフィエスマ小胞が出現し始める(図 5a)。その後、それぞれの領域内で徐々に網目状に発達し、拡大する(図 5b)。これは、各領域の多数の小さいアンフィエスマ小胞同士が融合することで、より大きな小胞になると考えられている。不思議なことに、互いに隣り合っても異なる領域の小胞同士が融合することはなく、その境界部分の小胞同士は、密着する構造をつくり、最終的にアンフィエスマ小胞は細胞表層部全体を覆うように広がって完成する(図 5c)。驚くべきことに、この発達領域は、遊走細胞の鎧板の配列パターンと完全に一致する。しかし、鎧板は新しい遊走細胞として泳ぎ出してから形成されることから、鎧板配列パターンの決定に鎧板自体は関与しておらず、鎧板はすでに配列の決まったアンフィエスマ小胞の内部を埋めるように蓄積していくのである。しかしながら、渦鞭毛藻類の属や種を決めるアンフィエスマ小胞の配列パターンの範囲が、いつ、どのようなしくみで決められているのかは分かっていない。

#### 4. 赤潮の原因生物

プランクトンの異常発生によって水の色が赤色、茶褐色、緑色などに変色す



る現象である赤潮は，一般によく耳にする用語でよく知られている。しかしながら，その赤潮を構成する生物（赤潮原因生物）や発生要因などについては，あまり知られていない。

赤潮をつくる生物には，非常に多様な分類群に属する藻類が知られている。赤潮は，これらの赤潮原因生物の異常増殖であるが，種数が多く，細胞の大きさもさまざまであるため，どの程度の密度で赤潮と定義するのかを一概には規定できない。しかしながら，赤潮の細胞の密度が 1000 細胞/mL，またはクロロフィルa量が 50mg/m<sup>3</sup>以上を赤潮と呼ぶことが多い。赤潮原因生物の代表的な仲間には，ラン藻類，珪藻類，ラフィド藻類，渦鞭毛藻類などが挙げられる。赤潮の発生要因には，気象（日照，降雨量，風など），水温，塩分濃度，栄養塩（窒素，リン，ケイ素など），潮汐などの条件が複雑に関係している。また，赤潮原因生物の種数が多いことから，個々の生物ごとに発生条件が異なることも発生要因の解明を複雑にしている。さらには，休眠細胞（シスト）の密度や分布も重要な要因である。

渦鞭毛藻類に属する種は，赤潮原因生物の中で，その種数や発生件数で非常に高い割合を占めている。一般に，渦鞭毛藻類では，シストを形成する種が多く知られてる。まず，シスト形成する渦鞭毛藻における細胞増殖（赤潮発生）の過程を説明する（図6）。種によって，遊泳性の接合子をもたない種

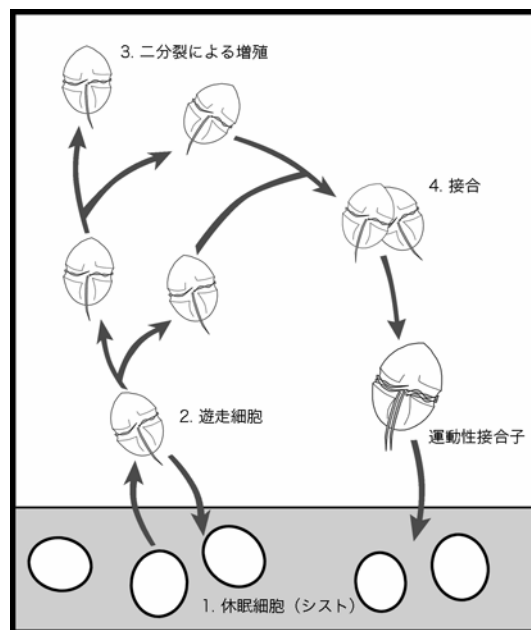


図6. 渦鞭毛藻の有性生殖とシスト形成を含む生活史

(1)休眠状態のシストは，底部の泥中に堆積している。(2)生育に適した環境条件が整うと，シストから遊走細胞が発芽する。(3)遊走細胞は，二分裂によって増殖する。(4)環境条件が悪化すると，有性生殖によって接合，または単独で休眠シストを形成し，再び底部に堆積する。

や連結して群体を形成する種，さらには，全生活史が明らかではない種も多数存在するが，基本的な増殖の過程は共通している。光条件，水温，栄養塩類などの環境条件が最適になると，海底などの泥中に埋もれていたシストが発芽して，遊走細胞が泳ぎ出す。この遊走細胞は，無性的に二分裂を繰り返して増殖する。この時，海底にシストが大量に存在すればするほど，最初に泳ぎ出てくる遊走細胞の数が多いため，爆発的に増殖して赤潮が発生し易くなる。赤潮発生後，徐々に終息してくると有性生殖による接合子（休眠シスト）や単独でシストを形成する細胞が増加して，海底に沈澱する。これらシストは，環境の悪化に対して強い抵抗力をもち，再び環境が改善されると発芽する。このため，シストの密度と分布が，赤潮発生機構を解明する上で重要視されている。

では，渦鞭毛藻が構成する赤潮には，どのようなものがあるのだろうか。発光することでも知られる従属栄養性のヤコウチュウ (*Noctiluca scintillans*) の赤潮がある。ヤコウチュウは，一個体では無色透明に近いが，大量に集まると赤く見え，まさに赤潮ということばがぴったりである。この赤潮は，春～夏に外洋に面した沿岸水域でよく発生し，夜間に波打ち際などで青白く光る様は非常に幻想的である。しかしながら，細胞内に蓄積するアンモニウムのために，湾内などの閉鎖的な海域では，魚介類に影響を及ぼすことがある。ヤコウチュウの他にも沿岸域から内湾では非常に多くの赤潮が発生し，*Alexandrium* 属，*Ceratium* 属，*Cochlodinium* 属，*Dinophysis* 属，*Gymnodinium* 属，*Heterocapsa* 属，*Prorocentrum* 属などに属するさまざまな渦鞭毛藻類の種が赤潮の原因生物として研究されている。これらの赤潮発生には，工業廃水や生活排水，化学肥料などに含まれる窒素やリンなどによる水域の富栄養化が大きく関わっている。また，外洋の湧昇域などに発生する赤潮も存在する。

赤潮による魚介類への被害には，酸素不足による斃死や中毒死がある。また，

ヒトに影響を及ぼす場合もある。渦鞭毛藻類は、多くの化学物質を作ることでも知られ、それには毒性のあるものも含まれる。有毒渦鞭毛藻が原因の貝毒はよく知られており、その成分の違いによって麻痺性、下痢性、神経性の3タイプに分けられる。麻痺性貝中毒(paralytic shellfish poisoning; PSP)は、*Alexandrium* 属の数種と *Gymnodinium catenatum* , *Pyrodinium bahamense* が原因種となる。下痢性中貝毒(diarrhetic shellfish poisoning; DSP)は、*Dinophysis* 属の数種が原因となる。神経性貝中毒(neurotoxic shellfish poisoning; NSP)は、*Karenia brevis* (Davis) Hansen et Moestrup が原因となる。これらの原因種は低密度でも被害を及ぼすため、注意が必要である。

一般に赤潮は、生態系に何らかの変化を起こす“異常”現象であることから、有害であることは明らかである。特に、漁業に甚大な被害をもたらすことから、水産関係においてはきわめて重要な現象の一つである。近年、赤潮や貝毒の原因種が、世界中で分布域を広げている。その原因の一つとして、船のバラスト水や魚介類などの移植による原因種のシストの伝播の可能性が示唆されている。また、もともとその水域に存在していた場合も、大量発生するようになった原因を環境面から調査・検討することが重要である。

## 5. サンゴとの共生

渦鞭毛藻類は光合成能力の有無にかかわらず、自由生活を営む種が大半であるが、無脊椎動物などに寄生する種や共生する仲間もいる。共生性の渦鞭毛藻は一般的に褐虫藻(zooxanthellae)と呼ばれ、有孔虫、海綿、サンゴ、イソギンチャク、クラゲ、シャコ貝など数百種の生物と共生関係をもつことが知られている。褐虫藻は、宿主に光合成産物を提供し、宿主からは住処と炭素を供給されていると考えられている。その中でもサンゴとの共生はよく知られており、

熱帯・亜熱帯海域でサンゴ礁（図 7）の形成に重要な役割を果たしており、地球環境問題の観点からも注目されている。

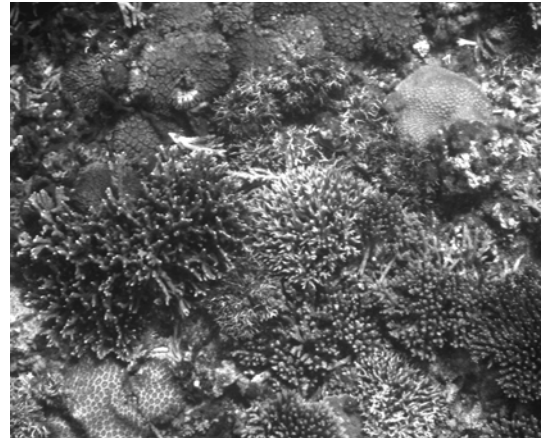


図 7. サンゴ群落

サンゴ類は、1mm - 数 cm のサンゴ虫（ポリプ）を構成単位とした刺胞動物の仲間である。造礁サンゴのイシサンゴ類には、胃層（内胚葉）の細胞に

多数の球形の不動細胞である褐虫藻が細胞内共生している。褐虫藻は、受精の前に親のコロニーから受け継ぐものと、産卵後に褐虫藻を獲得するものがある。共生する褐虫藻の種は、以前は、*Symbiodinium* 属の 1 種のみと考えられていたが、近年の分子生物学の発展によって、多くの遺伝子型が存在することが明らかになっている。サンゴがどの褐虫藻と共生関係を結ぶのかについては、光条件や温度、サンゴの生育場所、サンゴの種類などのさまざまな条件によって決まることが、これまでの多くの研究により明らかになってきている。また、サンゴは、周囲の環境条件の変化に伴って、群体内の褐虫藻の組成を変化させ、新しい環境に適応しているという説もある。いずれにしても、サンゴ類にとって褐虫藻との共生関係は、なくてはならないものであり、褐虫藻が光合成によって固定した炭素をサンゴに供給することによって、サンゴが必要とするエネルギーの大部分を担っている。また、褐虫藻は、サンゴ礁における一次生産に多大に貢献している。サンゴは、褐虫藻から受け取った炭素の半分ほどを粘液として海水中に放出し、放出された粘液は海水に溶解する。サンゴの粘液は、褐虫藻に取り込まれた光エネルギーや捕捉した粒子を、従属栄養のサンゴ礁群集に提供している。そうすることで、微細藻類やプランクトン、バクテリアな

どの底生生物を支える物質循環を成り立たせている。また一方で、サンゴ礁生態系からのエネルギーや栄養物の損失を少なくし、サンゴ礁の環境と多様な生物を維持している。

しかしながら、近年、サンゴの消失が問題となってきている。テレビなどでよく取り挙げられるものに、オニヒトデの異常発生による大規模なサンゴの食害がある。サンゴ礁 1km<sup>2</sup>に、数百～数千匹のオニヒトデが発生し、広範囲にわたってサンゴを死滅させる現象が世界各地のサンゴ礁で起こっている。このオニヒトデの異常発生が起こるメカニズムには諸説あり、例えば、陸からの栄養塩の大量流入によって、オニヒトデの幼生の餌となる植物プランクトンが増殖することによって幼生の生存率を高め、その結果、数年後に成体の異常発生が引き起こされることが分かっている。現在、オニヒトデの異常発生のメカニズムについての定説は明らかではないが、単なる自然的要因だけではなく、人為的要因が深く関与している可能性が強いと考えられている。

また、赤土の流入がサンゴ消失の原因として挙げられる。赤土とは、亜熱帯特有の赤褐色の表土で、粒子が細かく雨などで流出しやすい。陸上の乱開発などによって豪雨後の沿岸域で、赤土が広範囲に流出している光景が、しばしば観察される。赤土は、海水に流出して水を濁し、光が遮られることで褐虫藻の光合成が阻害される。また、赤土が沈澱することによって、サンゴ表面にも細かい粒子が堆積し、サンゴが窒息することもある。また、地球規模の環境変化によって、サンゴの白化現象が、世界各地で多発している。白化現象は、透明度の低下や海水温の上昇などのストレスによって、サンゴが褐虫藻を排出することによって起こる。ストレスにより、褐虫藻の光合成系が阻害され、光合成能の低下が起こる。損傷して光合成能を失った褐虫藻をサンゴが消化、排出すると考えられている。それにより、褐虫藻の密度の低下が起こり、サンゴの白

化が進む。また、褐虫藻の損傷には活性酸素が関与している可能性もある。褐虫藻がサンゴから抜けると、サンゴの白い石灰質の骨格が目立つことから白化と言われ、回復する場合もあるが、白化が長く続くとやがてサンゴは死滅する。さらに、東南アジアなどでは、サンゴ礁に棲息する熱帯魚を観賞用、食用のために捕獲し、世界中に輸出している。捕獲の際にシアン化ナトリウムが広く使用され、サンゴ礁への悪影響が指摘されている。シアン化ナトリウムは少量であっても、サンゴは大量の褐虫藻を含む粘液を放出する。また、サンゴ虫だけでなく褐虫藻にまで損傷を与え、サンゴの衰弱、さらには死滅を引き起こし、サンゴ礁の破壊につながっている。

## 6. おわりに

渦鞭毛藻類は、多様な形態と生活様式をもつ数 - 数百ミクロンの非常に小さい単細胞生物で、他の生物にはみられない種々の特殊な構造や機能を獲得した不思議な生物である。この小さな変わった生物である渦鞭毛藻が、私たちの生活や生態系に与える影響は大きい。赤潮の発生、サンゴ礁の消失だけを取り上げてみても、私たちの生活によって環境に与える負の影響が反映していることは明らかである。いま、世界中で生態系のバランスが崩れてきている。いかにして人間が自然とのバランスをとり、良好な生態系を回復・維持していくかが、今後、私たちが早急に取り組まなければならない課題である。

## 参考文献

### 1) 藻類、渦鞭毛藻類に関するもの

千原光雄（編著）. 1999. 藻類の多様性と系統. 裳華房、東京. 346 頁.

堀輝三（編著）. 1993. 藻類の生活史集成 第3巻 単細胞性・鞭毛藻類. 内

田老鶴圃、東京、313 頁.

堀輝三・大野正夫・堀口健雄（編著）. 2002. 21 世紀初頭の藻学の現況 . 日本藻類学会、山形 . 153 頁. (日本藻類学会のホームページから PDF ファイルでダウンロード可能)

## 2) 赤潮に関するもの

岡市友利（編著）. 1997. 赤潮の科学. 恒星社厚生閣、東京. 294 頁.

村上彰男 . 赤潮と富栄養化 . 1977. 公害対策技術同友会、東京 . 207 頁 .

柳田友道. 赤潮. 1976. 講談社、東京 . 198 頁 .

## 3) サンゴに関するもの

鈴木款（編著）. 1997. 海洋生物と炭素循環. 東京大学出版会、東京. 193 頁 .

サンゴ礁地域研究グループ（編著）. 1990. 熱い自然-サンゴ礁の環境誌. 古今書院、東京 . 207 頁.

チャールズ R. C. シェパード著・本川達雄訳 . 1986. サンゴ礁の自然誌. 平河出版社、東京 . 126 頁.

吉嶺全二 . 1991. 沖縄 海は泣いている「赤土汚染」とサンゴの海 . 高文研、東京 . 126 頁 .