

特集

## 光合成 — そのしくみと多様性

光合成研究へのいざない

光合成をする生き物の多様な世界

— 動物の中で生きる藻類

光合成生物は合体しながら進化した

光合成しない植物の進化

光合成が変えた地球と生物

人工光合成とは何か?

— 研究の現状と将来展望



# 光合成をする生き物の多様な世界

## —動物の中で生きる藻類

光合成生物のなかにはサンゴなどの動物の体の中で生活する藻類がいます。この藻類が光合成でつくり出す栄養分は、サンゴやその周りで生活する生き物を支えています。ここでは、この変わった環境で生きる藻類についてご紹介します。



文・図版

高橋 俊一 たかはし しゅんいち

自然科学研究機構基礎生物学研究所准教授

2002年琉球大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(理学)。日本学術振興会の特別研究員や海外特別研究員、オーストラリア国立大学リサーチフェローを経て、2014年より現職。海水温の上昇によるサンゴの白化現象に興味をもち研究を進めている。専門は光合成。

地球上のさまざまな環境に光合成生物を見ることができません。たとえば、陸上、水中、熱い場所、冷たい場所、湿った場所、乾燥した場所など。なかには、動物の細胞の中というとても変わった環境で生活する光合成生物もいます。

### 動物の中で生きる藻類

単細胞藻類のなかに、渦鞭毛藻という一群があります。渦鞭毛藻は2本の鞭毛をもち、水中を遊泳しながら生活しています。渦鞭毛藻の多くは葉緑体をもって光合成を行います。一部は葉緑体を持たず、捕食生活をしています。渦鞭

毛藻には2000もの異なる種(タイプ)が含まれており、そのなかには動物の細胞の中で生活することのできる種(シンビオディニウム属)がいます(図1)。これは褐虫藻とよばれており、海産無脊椎動物(サンゴ、イソギンチャク、クラゲ、貝など)の一部の種で見ることができます(図2)<sup>1</sup>。

なぜ褐虫藻が動物細胞の中で生活できるのか、また、なぜ無脊椎動物の一部の種だけが褐虫藻を維持できるのかはまだまだわかっていません。褐虫藻と無脊椎動物との関係は“細胞内共生”とよばれ、共生する側の褐虫藻は共生体、褐虫藻を受け入れる側の無脊椎動物は宿主とよばれます。多くの場

合、褐虫藻を共生させた宿主は褐色をしているのですが、それは、褐虫藻のもっているペリジニンという褐色の光合成色素によるものなのです。そのため、この褐色の色が、褐虫藻をもっているかどうかを判断する一つの材料となります。また、ある特殊なフィルターを通して蛍光(褐虫藻のもつクロロフィルが吸収した光の一部が蛍光として出てくる)を観察すると、褐虫藻をもっている無脊椎動物を簡単に見分けることもできます(図1)。

宿主である動物の細胞の中に取り込まれた褐虫藻は、鞭毛を失って動きがなくなっているものの、生き続けることができます。実際、宿主細胞の中でも褐虫藻は分裂して増えることができます。また、宿主から取り出された褐虫藻は、数時間のうちに鞭毛を出し動き始めます。褐虫藻は宿主の外で生活することも可能なのですが、海水中に存在する褐虫藻の密度は非常に低く、ほとんどの褐虫藻が宿主内に共生した状態で存在しています。

光合成能力をもたない生き物(動物)

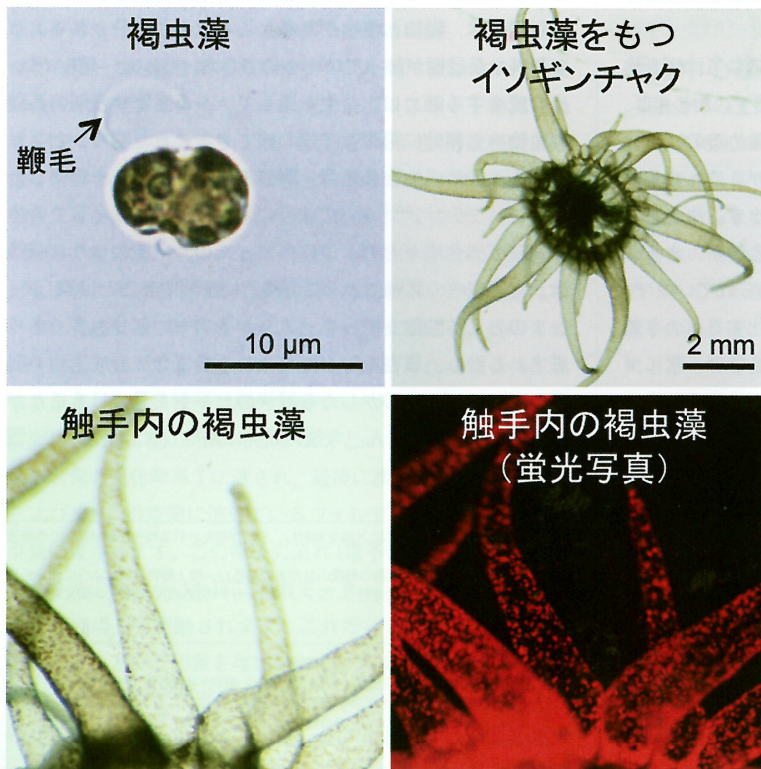


図1 共生関係  
褐虫藻(共生体)とイソギンチャク(宿主)。10 μm(マイクロメートル)は100分の1mm。





図2 褐虫藻を体の中に共生させた生き物たち (写真左より) コピエダハマサンゴ、ウスカワイソギンチャク、ヒレジャコ (写真提供: 田村裕)

が、光合成生物（または光合成器官）を自分の体の中に取り込み維持することは珍しくありません。たとえば、あるホヤのなかまは、藍藻（シアノバクテリア）のプロクロロン属を体の中に取り込みます（図3）。共生とは異なりますが、ウミウシは緑藻から細胞小器官である葉緑体だけを奪い（盗葉緑体）、体の中に維持しています（図3）。また、植物の細胞の中にある葉緑体も、もともとは光合成をするバクテリア（藍藻）が他の光合成能力をもたない真核生物の細胞に取り込まれたものだと考えられています。そのことを示す証拠に、葉緑体の中には遺伝情報をもつDNAがあり、そのDNA配列が藍藻のものと同様に似ています。つまり、葉緑体ももともとは真核生物に共生する光合成生物（共生体）だったわけで、それが次第に細胞小器官の葉緑体へと変化していったのです。

### 共生するメリット

褐虫藻は太陽光を利用して光合成をし、生活に必要な栄養分（糖）をつくることができます。しかし、光さえあればよいというわけではありません。植物を栽培するとき肥料（窒素やリンなどの栄養塩）が必要のように、褐虫藻も生きていくには栄養塩が必要なのです。しかし、海水中の栄養塩の濃

度は非常に低く、藻類の生育には適していません。そのため、海水中の藻類の密度は低いのです。サンゴ礁の海水が透き通っているのはそのためです。ただ、海の中でも栄養塩の濃度が高い場所があります。それが、動物細胞の中なのです。なぜなら、動物細胞の中に出てくる老廃物こそ栄養塩だからです。一方、宿主は、褐虫藻が光合成で生成した栄養分の提供を受けています。つまり、宿主の動物と共生体の褐虫藻はお互いにメリットのある相利共生の関係を築いているのです。なぜ陸上の動物は褐虫藻のような共生体をもっていない（もしくはもてない）のでしょうか。まだ、誰も答えを知りません。もしもっていたら、日光浴をするだけで、ほとんど食事をしなくてもよかったかもしれませんね。

### 褐虫藻が支えるサンゴ礁生態系

熱帯や亜熱帯の沿岸に発達するサンゴ礁には、多くの生物が生息しており、その種類も豊富です。単位面積あたりの生物の種類数では、熱帯雨林に並んで地球上で最も多い場所といわれています。日本では、沖縄や小笠原などに発達したサンゴ礁が見られます。サンゴ礁というのは、主に造礁サンゴの骨格（石灰質の固まったもの）で形成されていますが、サ



図3 光合成生物や葉緑体を体の中に取り込む生き物たち (写真左より) ヤッコアミメサンゴ、チャツポボヤ、チドリミドリガイ (写真提供: 田村裕)



ンゴの種類によりその形や大きさが異なり、さまざまな空間や環境がつくられています。それが多くの生物をはぐむ一つの要因と考えられています。

サンゴ礁生態系にはサンゴが不可欠であることはいうまでもありませんが、忘れてならないことは、そのサンゴの生活を支えているのは、そのサンゴの細胞の中で生活する褐虫藻だということです。サンゴは微生物を補食して栄養源としますが、生きていくために必要な栄養源のほとんどを褐虫藻に頼っています。生態系の基盤を支えているのは常に光合成生物のような一次生産者であり、サンゴ礁生態系では褐虫藻なのです。ただ、褐虫藻の生活を支えているのはサンゴであることも確かです。サンゴ礁生態系の基盤を支えているのはサンゴと褐虫藻の「共生関係」といえるでしょう。

### サンゴの白化と褐虫藻

最近、サンゴの生息域が北上しているというニュースを見かけることがあります。これには、地球温暖化に伴う海水温の上昇が関係しているといわれています。ならば、サンゴ礁は世界的に広がっているのでしょうか？

答えは「No」です。実は、サンゴ礁はその存続が危惧されるほど減ってきています。その主な原因は海水温の上昇によるサンゴの白化です。サンゴは高い温度に弱く、海水温が30℃を超える日が続くと、褐虫藻を失い白くなります（骨格の白い石灰質が見えるようになるため）。この現象が白化とよばれるもので、世界各地で見られています<sup>2</sup>。白化した直後のサンゴは褐虫藻を失っただけで、サンゴ自身はまだ生きています。しかし、白化が長期化すると栄養不足となり、サンゴは死んでしまいます。すでに、過去数十年の間に世界のサンゴ礁の30%が失われたと報告されています。地球温暖化が進むと白化の頻度と程度がさらに増え、2030年までに世界のサンゴの60%が失われると予想されています。海水温が上がるとなぜサンゴと褐虫藻の共生関係が崩れ、サンゴが白化してしまうのかはいまだにわかっていません。サンゴ礁を守るために、世界の多くの研究者が研究を進めています。

### 褐虫藻がサンゴ礁を救う？

海水温が高くなったサンゴ礁で、白化したサンゴを眺めながら泳いでいると、おもしろいことに気づきます。真っ白になったサンゴの横に、まったく白化していない褐色のサンゴ



図4 白化したサンゴ（上）と白化していないサンゴ（下）

がいることがあるのです(図4)。つまり、同じ環境にいながら、サンゴによって、白化の起こりやすさが異なるのです。これまでの研究で、サンゴの種類によって白化の起こりやすさが異なることが明らかになっています。また、隣り合った同じ種のサンゴでも一方は白化し、もう一方はまったく白化していないということもあります。いまのところ、それらの違いを生み出しているものが何なのかはよくわかっていません。ただ、共生する褐虫藻の種類の違いが関係しているのではないかと推測されています。

褐虫藻であるシズキオディニウム属は現在のところ9つのグループに分けられており（研究が進むにつれ、このグループの数は増えています）、それぞれのグループにいくつもの遺伝的に異なったタイプが存在しています。そのため、褐虫藻といっても、バリエーションがあり、特徴も異なるのです。たとえば、われわれヒトでも、人種によって特徴が異なるように。これまでの研究で、褐虫藻の種類により、細胞のサイズ、光合成活性、高温耐性などに違いがあることがわかっています。そのため、どのタイプの褐虫藻を共生させるかにより、宿主の運命は大きく変わります<sup>3</sup>。実際に、褐虫藻のタイプの違いによって、サンゴの白化の起こりやすさが異なることや、環境が変化すると共生している褐虫藻のタイプが変化し、その環境に適応することが知られています。今後、地球温暖化に伴い海水温が上昇する状況下で、サンゴが存続できるかどうかは、その状況に適した褐虫藻と出会い、取り込むことができるのかにかかっているのかもしれない。 □

#### 【参考文献】

1. 山下洋・小池一彦：「サンゴ内外から探る「サンゴ-褐虫藻共生系」解明の手掛かり」、みどりいし、22：14-20（2011）
2. 中村崇：「造礁サンゴにおける温度ストレスの生理学的影響と生態学的影響」、海の研究、21（4）：131-144（2012）
3. 井口亮・磯村尚子：「造礁サンゴの環境変化に対する順応機構と適応の可能性」、海の研究、21（5）：147-158（2012）