

造礁サンゴ（ミドリイシ）

新里 宙也

コバルトブルーに輝く透明な海の中で、サンゴの間を泳ぐカラフルな魚たち。私達のサンゴ礁に対するイメージはこのようなものだろうか。サンゴ礁の美しさに魅了され、生物学を志した私にとって「サンゴ」とは何だろうと考えたときに、真っ先に頭に浮かんだのは「憧れの的」であった。もっと深く知りたいが、簡単には研究を進めさせてくれない「高嶺の花」、そんなサンゴについて私なりの自由な印象を述べていきたい。

サンゴ礁とは

造礁サンゴ 「サンゴ」と聞いて、ある人は宝石であるサンゴを連想するかもしれない。これらは八放サン

ゴの仲間、本稿で触れるのはその親戚であるサンゴ礁を作る造礁サンゴ（六放サンゴ）である。

サンゴ礁は地球上でもっとも生物多様性の豊かな場所の一つである。世界の海域のわずか1%に満たないサンゴ礁に、全海洋生物の25%の種が生息していると言われている。そのサンゴ礁を作り出しているのが「造礁サンゴ」という動物で、クラゲやイソギンチャクの仲間、刺胞動物に分類される。サンゴは細胞内に光合成を行う微細藻類、褐虫藻（*Symbiodinium*）を共生させており、栄養の大部分を褐虫藻に依存している。褐虫藻から莫大な栄養を得て水中に炭酸カルシウムからなる巨大な構造物、サンゴ礁を作り出し、多種多様な海洋生物の命を育

連載にあたって

本会の会員には、魅惑的な生物材料との予期せぬ出会いに心臓をわしづかみにされ、その後の研究人生が変わってしまった、そういう方もおられるかもしれない。あるいは、研究室で使っているからと、半ば割り当てられた生き物に、扱いにいくいなあ、別の子（生き物）の方がよかったなあ、などと思いつつ、いつの間にか連れ合いより長い付き合いになってしまった、そういう方もおられるかもしれない。本連載はそんな方々に、生物材料への愛（と実利）を語っていただくシリーズである。

「生物工学会誌」への掲載であるから、生物生態を紹介する単なる“生き物紹介”には留まることなく、「応用」を意識した紹介をお願いした。すなわち単なる生物学的な紹介にとどまらず、生物工学の貴重な資源（研究材料）としての位置付けで、関連技術や研究成果とあわせてご紹介いただけるシリーズになれば、編集委員会のねらいは達成されたと言っている。

知る人ぞ知る特殊でユニークな生物もいるであろう。

とても役立つ、けなげな生き物もいるであろう。

太古より、人類のためにその身を捧げてくれた微生物もいるに違いない。

その生物種ならではの堪らない魅力、大変さ、楽しさ、ユニークさ、そして「一緒に研究しませんか」という、その生物種を使った研究へのお誘い、偏愛、生き物自慢も盛り込みながら、楽しくご紹介いただければと思っている。その生物種をこよなく愛する研究者であれば、どなたでも執筆いただけたらと考えている。

研究室の片隅でひっそりと、生き物への愛を語りたい方からのご寄稿もお待ちしております。研究にその身を捧げてくれる生物材料への愛と鋭いサイエンティストの眼、そして応用展開を求める生物工学者の視点を持って、楽しく語っていただくシリーズになれば幸いです。（和文誌編集委員会）



図1. ミドリイシサンゴ. 沖縄県西表島で撮影



図2. ミドリイシサンゴの産卵と配偶子採取の様子. 水面に浮かんでいるのがバンドル（精子と卵の塊）と呼ばれる配偶子.

んでいる。観光業や漁業などで世界のサンゴ礁が一年で産み出す経済価値は莫大で、約300億ドルとも言われる¹⁾。

サンゴ礁の現状 地球温暖化や海洋酸性化、海洋汚染や乱開発などの影響によって、サンゴ礁は今危機に瀕している^{2,3)}。サンゴと褐虫藻の共生関係は少しのストレスで崩壊してしまうほど繊細である⁴⁾。わずか1-2°Cの海水温上昇により、褐虫藻がサンゴから抜けだす「白化現象」が起こってしまう(図1)。栄養の大部分を依存している褐虫藻がいなくなるので、サンゴは栄養不足に陥り最悪の場合死に至る。サンゴ礁の崩壊は、そこに生息する多様な生物の消滅も同時に引き起こし、生物多様性の消失につながる。

ミドリイシ

サンゴ礁の海という、テーブル状や枝状のサンゴを思い浮かべるのではないだろうか。それらはだいたい「ミドリイシ」の仲間、サンゴ礁を形成しているサンゴの主要なメンバーである(図1)。ミドリイシ属は太平洋からインド洋、カリブ海にわたる世界中の海に広く生息しており、もっとも種分化に富んだサンゴである。彼らは5000万年前頃に誕生し、200万年前頃から急激に種分化してきたとされる。現在世界中で200種ほど確認されている。

ミドリイシを研究に使うのにはいくつかの利点がある。なんといってもポピュラーなサンゴなので材料が見つかりやすい。そして一斉産卵により大量の配偶子(実験材料)が手に入る(図2)。ミドリイシの仲間のほとんどは、生活史の初期段階で褐虫藻を外界から取り込む(水平伝播型)。そのため褐虫藻が感染する前の段階では、褐虫藻が含まれない純粋なサンゴ由来のサンプルを手に入れることができる。

遺伝子研究の歴史

ミドリイシはポピュラーなサンゴという事で、遺伝子実験の歴史はサンゴの中では古い。ミドリイシからの遺伝子クローニングは1990年代前半から報告されている⁵⁾。2000年代まではミトコンドリアDNAなどを用いたサンゴの系統分類の研究が中心であったが⁶⁾、2000年前後からはそれに加え、初期発生に関わる遺伝子の機能を比較して、動物進化の歴史を解き明かそうというEvoDevo (evolutionary developmental biology) 研究の材料としても使用された⁷⁾。さらには医学、生物学研究で幅広く使われている蛍光タンパク質もミドリイシから単離されており、遺伝子実験用として実用化されている^{8,9)}。

本格的な分子生物学、ゲノム科学的研究の幕開けとなったのは、ミドリイシの一種ハイマツミドリイシ (*Acropora millepora*) のexpressed sequence tag (EST) プロジェクトである¹⁰⁾。刺胞動物門で初めてのESTの報告となる。この報告はサンゴの遺伝子レパートリーを報告したというだけにとどまらず、(1) 6億年以上前に存在した二胚葉生物と三胚葉生物の共通祖先において主要な遺伝子レパートリーは揃っていた、(2) 遺伝子を獲得することでなく失うことが動物進化に重要であった、という動物進化の歴史のシナリオを明らかにした。最近ではミドリイシ以外のサンゴも研究対象とされ、さまざまなESTプロジェクトやそれら情報を利用したcDNAマイクロアレイ技術による遺伝子の網羅的発現解析が報告されている^{11,12)}。

サンゴゲノムの解読

世界的にサンゴ礁が減少していく中、サンゴ研究の重要性が増してきた。ゲノム情報は遺伝子研究の究極の基盤となるため、サンゴのゲノム解読が強く望まれていた。

沖縄県は世界中のサンゴの30%、約400種が生息する、生物多様性豊かなサンゴ礁を誇る。我々は沖縄周辺海域に生息し、1998年の世界的な大規模白化現象により激減したミドリイシ属サンゴの一種、コユビミドリイシ (*Acropora digitifera*) の全ゲノム解読に、世界で初めて成功した¹³⁾。このゲノム配列から約23,700個の遺伝子を見つけた。ここで一つ強調したいのは、ゲノムDNAは一斉産卵時に採取した一個体由来の精子から抽出したので、純粋なサンゴ由来のDNAであるという点である。

ゲノム情報を解析した結果、(1)化石から予想されたよりもサンゴの起源は古いこと、(2)白化に弱いミドリイシ属は、非必須アミノ酸の一種(システイン)の生合成に必要な酵素を持たず、褐虫藻に依存している可能性があること、(3)サンゴ自身がUV吸収物質を合成できる可能性があること、(4)複雑な自然免疫系の遺伝子を持つこと、(5)サンゴ特有の石灰化遺伝子候補が多数あること、などが明らかになった。サンゴの全ゲノムを解読したことにより、サンゴと褐虫藻の共生メカニズム、近い将来起こりうる海水温上昇や海洋酸性化に、サンゴがどのように応答するのかなど、詳細が明らかになることが期待される。

サンゴを扱う困難さ

サンゴ研究分野では「holobiont」という言葉が最近よく使われる。これは刺胞動物のサンゴ、細胞内共生している褐虫藻、その他バクテリアなどを含めたサンゴを構成する生物全ての共同体を表す言葉で、holobiont単位でサンゴをとらえようという考え方が主流になりつつある。つまりさまざまな生物が、健全なサンゴ一個体を形成しているということである。このようなことからサンゴから物質を抽出しようとする、雑多な生物由来の物質が入り込んでくるし、さらには外骨格という大きな障害が待ち受けている。

マイクロインジェクションによる遺伝子導入技術の確立も、今のところ成功例は聞かない。そのため遺伝子の機能解析も行えないのが現状である。その大きな要因の一つが、ミドリイシは年に一度しか産卵しないので、配偶子を使う実験を行うチャンスが年に一回に限られるということである。サンゴの配偶子を保存して受精を操作するのにも成功していない。一斉産卵がいつ起こるのか、

そのメカニズムは最大のミステリーである。未だに産卵日を正確に予測するのは難しい。そのため、産卵するまで毎晩サンゴの産卵チェックを行わなければならない(産むまでは毎晩期待と失望の連続である)。

サンゴを扱う上で注意しなければならないことは、サンゴの採集は厳しく制限されているという点である。現在世界のサンゴの約三分の一の種が絶滅の危機にあるとされており¹⁴⁾、国際自然保護連合(IUCN)の絶滅の恐れのある動物にリストアップされている。さらにワシントン条約でも造礁サンゴ全般の輸出入が規制されている。沖縄県においてはサンゴの採捕には特別採捕許可を取得しなければならない。このようにサンゴの取り扱いには十分注意する必要がある。

それでもサンゴは魅力的

ゲノムも解読されたこともあり、以前に比べてサンゴを研究材料として使う環境は整いつつあるが、いまだにさまざまな困難がある。そのためサンゴを実験材料として他の人に勧めるかと聞かれると、私は正直躊躇してしまう。しかし初夏の夜に起こる一斉産卵や、同種でも環境によって多様に変化する色・形、褐虫藻との共生メカニズムなど、我々を魅了してやまない不思議がサンゴにはたくさんある。サンゴの魅力・愛情が困難な点に勝るといふ方には、ぜひともこの繊細で美しい生き物を使っての研究をお勧めしたい。

文 献

- 1) Cesar, H. J. S. *et al.*: WWF-Netherlands, p.23 (2003).
- 2) Hughes, T. P. *et al.*: *Science*, **301**, 929 (2003).
- 3) Hoegh-Guldberg, O. *et al.*: *Science*, **318**, 1737 (2007).
- 4) Weis, V. M. C.: *J. Exp. Biol.*, **211**, 3059 (2008).
- 5) Miller, D. J. and Miles, A.: *Nature*, **365**, 215 (1993).
- 6) van Oppen, M. J. *et al.*: *Mol. Biol. Evol.*, **18**, 1315 (2001).
- 7) Hayward, D. C. *et al.*: *PNAS*, **99**, 8106 (2002).
- 8) Karasawa, S. *et al.*: *Biochem. J.*, **381**, 307 (2004).
- 9) <https://ruo.mbl.co.jp/product/flprotein/micy.html>
- 10) Kortschak, R. D. *et al.*: *Curr. Biol.*, **13**, 2190 (2003).
- 11) Schwarz, J. A. *et al.*: *BMC Genomics*, **9**, 97 (2008).
- 12) Schnitzler, C. E. and Weis, V. M.: *Mar Genomics*, **3**, 107 (2010).
- 13) Shinzato, C. *et al.*: *Nature*, **476**, 320 (2011).
- 14) Carpenter, K. E. *et al.*: *Science*, **321**, 560 (2008).