

特集

サンゴの一斉産卵 生態学的意味とそのメカニズム

●文：野澤 洋耕〔台湾〕中央研究院生物多様性研究中心・副研究員

サンゴは初夏の満月の時期に、一斉に産卵します。しかし、サンゴが何を合図に産卵日を決めて、産卵を同調させているのか、そのメカニズムはよくわかっていませんでした。そんな中、昨年、月の光がサンゴの産卵の合図となっていることを明らかにした、という論文が発表され話題になりました。

本稿では、その論文の著者のお一人である台湾中央研究院の野澤洋耕氏に、この発見につながった経緯についてご寄稿いただきました。



図1 台湾の南東にある緑島

サンゴの一斉産卵とその生態学的意味

サンゴの産卵は初夏のサンゴ礁において見られる一大イベントで、数百、数千ものサンゴが夜間に一斉産卵する様子をテレビやインターネットなどでご覧になられている方も多いと思います。私もサンゴの産卵研究を始めてから20年以上たちますが、毎年サンゴの産卵を見るたびに興奮し、やる気をもらい、今日まで研究を続けてきました。

映像的には良く知られているサンゴの産卵ですが、実は分かっていないことがまだまだたくさんあります。特に、複数のサンゴがどのようにタイミングを合わせ一斉に産卵するのかという「一斉産卵のメカニズム(仕組み)」については、サンゴの一斉産卵が広く知られるようになった1980年代以降も様々な研究努力にもかかわらずあまり理解が進んできませんでした。

サンゴの一斉産卵では、多くのサンゴが海水中に卵と精子を一斉に放出するのですが、これは海水中の卵と精子の濃度を高め、受精率を上げるために適応進化した生殖行動であると考えられています。海水中は常に何らかの流れがあるため、産卵のタイミングが30分ずれるだけで、卵と精子の海水中の濃度が急速に低下し、受精率がほぼゼロになるといわれています。

もし、何らかの影響でサンゴの一斉産卵のメカニズムが崩れてしまうとしたらどうなるのでしょうか？急速に進む地球環境変動による海水温度の上昇や酸性化などは影響を与えるのでしょうか？生態学的には、サンゴの一斉産卵は、次世代のサンゴの子供を作るという重要な意味を持ちます。例えば、一斉産卵の精度(参加するサンゴの数)が30%減少すると、サンゴの子供の数が30%減少すると考えてよいでしょう。人知れず、サンゴの子供の数が減少している可能性を考えると恐ろしくなります。なぜなら、そのような目に見えにくい単純な影響が、やがてはサンゴ礁という多様な生物を育む生態系そのものの消失につながる可能性があるからです。2019年、サンゴの一斉産卵の精度が40年前(1980年代)と比べて著しく低下しているとする研究が紅海で行われ発表されました(参考文献1)。このようなことは本当に起こっているのでしょうか？起こっているとしたら何が原因なのでしょうか？

以上のような理由から、私たち研究者はまずサンゴの一斉産卵についてよく知ること、そしてそのメカニズムを理解することを目標に研究を行っています。サンゴはどのような環境情報を使って産卵のタイミングを合わせているのでしょうか？今回の記事では、私の研究室が行ってきたサンゴの一斉産卵についての研究について最近の発見とともに紹介させていただきたいと思います。

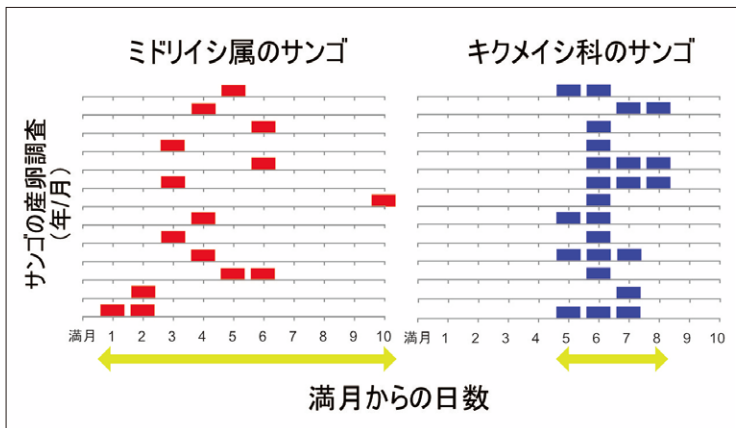


図2 サンゴに見られる2つの産卵パターン

各産卵調査において観察されたサンゴの産卵日を示す。横軸は満月からの日数を、縦軸は各調査の結果を古い順に上から並べたもの。各横線は異なる年(または月)の調査結果を表す。ミドリイシ属のサンゴは毎年ほぼ1日で産卵を終え、産卵日は満月の1日後から10日後までとばらついている。それに対し、キクメイシ科のサンゴはほぼ毎回2~3日続けて産卵し、毎年(4~6月に毎月)満月の5~8日後にきっちりと産卵を行う



写真1 ミドリイシ属サンゴの産卵



キクメイシ科サンゴの産卵

サンゴの2つの産卵パターン

私の研究室では2010年より台湾の南東にある緑島(中国語読みでリュータオ)でサンゴの産卵観察を行ってきました(図1)。リュータオでは、毎年、海水温が暖くなる初夏の(4~6月)満月から1週間ほどの間に多くのサンゴが産卵します(参考文献2)。私たちは毎年その時期に合わせてリュータオに滞在し、産卵が予想される夜8時から10時ごろにかけてスキューバダイビングを行い、産卵したサンゴの種類と数をデジタルカメラで記録してきました。毎年潜って産卵を見続けていると徐々にサンゴの産卵に異なる2つのパターンがあることが見えてきました(図2)。一つはミドリイシと呼ばれるサンゴ種の産卵パターンで、もう一つはキクメイシと呼ばれるサンゴ種の産卵パターンです。ミドリイシ(属)とキクメイシ(科)は種数・量共に、サンゴ礁を代表する2大グループで、ミドリイシは主にテーブル状や枝状、キクメイシは半球状や被覆状の形をしたサンゴです。我々の今までの観察ではミドリイシサンゴ14種とキクメイシサンゴ18種の産卵を記録することができました。

ミドリイシの産卵は、ほとんどが一晩の内に一斉に産卵するので、大産卵となり大変見ごたえがあります。そのため、毎年、ミドリイシの産卵は5月か6月の一晩でほぼ終わってしまいます。しかしながら、産卵日は毎年異なり、産卵日を予測することは大変難しいです。リュータオでは2010年から2021年までの観察で、満月の1日後から10日後までと産卵日に大きな幅が見られています(写真1)。

キクメイシの産卵はミドリイシの産卵に比べてより控えめですが、産卵日は大変安定しており、毎年4月から6月に起

こる満月の5日後から8日後にきっちりと産卵します。産卵もミドリイシとは異なり、同じサンゴの一部分または違うサンゴが2~3日間連続して産卵し、このような産卵が4月から6月まで2~3か月間繰り返見られます(写真2)。

この特徴的な2つの産卵パターンは、沖縄やグレートバリアリーフ、紅海などのデータからも見る事ができます。私たちのリュータオにおける長期産卵研究は、従来ひとまとめにされていたサンゴの産卵パターンをミドリイシ型とキクメイシ型の2つに分けるという発見をもたらしました(参考文献2)。この発見により、サンゴの一斉産卵のメカニズムもミドリイシ型とキクメイシ型で異なるのではないかとの考えに至り、私たちの次の発見につながっていきます。

キクメイシの一斉産卵メカニズム

「ミドリイシの産卵日は毎年ずれて予測が難しい。なぜだろう? 逆に、キクメイシの産卵日は毎年きっちり同じ日(満月の5日後から8日後)と決まっている。どのように決めているのだろうか?」このような素朴な疑問は毎年サ



写真3 屋上での初めての月光遮断実験

キクメイシ科サンゴ キクメイシ(*Dipsastraea speciosa*)

実験条件	サンゴ ID	満月前 (-) / 後 (+) の日数												
		-3	-2	-1	満月	1	2	3	4	5	6	7	8	9
月光あり	1													
	2													
	3													
	4													
月光なし	1													
	2													
	3													
	4													

→ 実験スタート

図3 初めての月光遮断実験

各条件につき4つのサンゴを使用。黒い四角のマークは各サンゴの産卵日を示す。自然の月光下で飼育されたサンゴ(月光あり)に比べ、月光を遮断したものでは(月光なし)、遮断を開始した満月の3日前から数えて6日後に大きな産卵が起こった。注:ミドリイシ属のサンゴでもクシハダミドリイシ(*Acropora hyacinthus*)を用いて同じ実験を行ったが、月光を遮断すると(月光なし条件)産卵は起こらなかった

ンゴの産卵を観察するたびに頭の中に浮かび、蓄積されてきました。そんな折、長年アシスタントとして研究に参加してくれていた台湾人の林哲宏(リン・ザーホン)君が大学院の博士課程に進学し、このテーマに取り組みたいということになり、それなら何か実験をしてみようかということになりました。ミドリイシとキクメイシは共に月齢に従って産卵日を決定しているように思えることから、まずは最初の一步として「月の光を遮断(つまり月齢情報を遮断)したら産卵するのか、しないのか?」を調べることにしました。

リ्यूタオには私が勤める中央研究院の臨海実験所があります。そこの屋上に水槽を設置して、産卵しそうな色づいた成熟卵を持ったミドリイシとキクメイシをそれぞれ水槽に入れ、片方の水槽は自然な月光下で、もう片方の水槽は黒い布で夜間覆うことにより、月の光だけを遮断して満月から数日間飼育しました(写真3)。すると面白いことに、ミドリイシでは産卵が起こらなかったのに対し、キクメイシでは月の光がなくても一斉産卵が起こりました(図3)。「へー、面白いねー」と言っていると、ザーホンが「先生、どうやらキクメイシでは月の光を遮断してから大体6日後に産卵が起こっているみたいですね」と言い始めました。私は「(学生は思い込みが激しくて困るなあ)」と内心思っていました、「それなら、実験して確かめてみたら」と一応、言っておきました。幸いキクメイシは4~6月の間に2~3回産卵しますので、ザーホンは早速水槽実験を行いこの現象を確かめました。私はザーホンの実行力とその結果の再現性に少し驚きましたが「ふーん」と言っておきました。

研究者の日常は忙しく、普段は異なるテーマの複数の研究を並行して行っています。それに加えて学生の研究指導がいろいろ被さってきますので、フィールド研究がメインの私の研究室では天候の良い春から秋までは常にバタバタしています。ですので、このザーホンの発見もしばらくは頭の隅に追いやられ忘れていました。そんな折、琉球大学の元同級生の高橋俊一博士が中央研究院を訪れてくれましたので、研究の話をついでとしたところ、「そのザーホンの発見、超面白いよ。ぜひともしっかりと研究すべきだよ!」とあっていただき、これにすっかり気を良くした私たちは、2020年にしっかりと実験を行ってみることにしました。特に、室内実験をメインにフィールドでも同じような実験を行ったらより信ぴょう性が上がって良いのではとの考えから、室内の水槽実験に加えて、海中でも実験を行い現象を確かめることにしました(写真4)。

結果は、いたって単純なもので、実験に使用したキクメイシサンゴの一種、その名もキクメイシ(種名:*Dipsastraea speciosa*)では、フィールド実験でも実験室

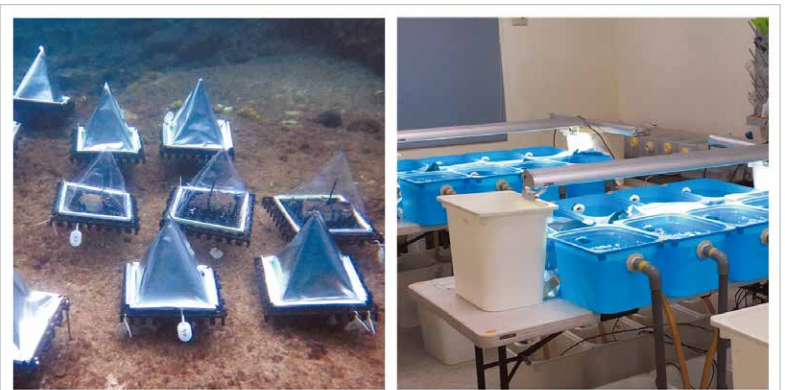


写真4 2回目の月光遮断実験 フィールド実験(左)と室内実験(右)を同時に行った

キクメイシ科サンゴ キクメイシ(*Dipsastraea speciosa*)

月光遮断 実験	サンゴ ID	満月前 (-) / 後 (+) の日数												
		-3	-2	-1	満月	1	2	3	4	5	6*	7	8	9
実験1 満月3日前スタート	1					■	■							
	2					■	■							
	3					■	■							
	4					■	■							
実験2 満月1日前スタート	1													
	2													
	3													
	4													
実験3 満月1日後スタート	1													
	2													
	3													
	4													

図4 2回目の月光遮断実験

フィールド実験と室内実験で同じ結果であったので、まとめたものをここに示す。自然の月光を海水中で遮断したフィールド実験と、月光に見立てた弱い光のLEDライトを用いた室内実験において、満月の3日前から月光(またはLEDライト)の遮断実験をそれぞれ3回、開始時期を2日ずつずらして行った。結果は単純で、月光(またはLEDライト)を遮断してから5~6日後に産卵が観察された

の水槽実験でも、「月の光を遮断してから5~6日後に産卵が起こる」というものでした(図4・写真5)。この研究結果は、1980年代から現在まで世界中で様々なサンゴの産卵研究が行われてきましたが、初めて自然の要因(月光)のみを用いてサンゴの産卵を誘引できたという画期的なものでした(参考文献3)。それでは、なぜこんなことが起こるのでしょうか？ 私たちが現在考えているメカニズムは次の通りです。月の出ている時間帯は満月の前後で大きく変化します。満月の前では日が沈む前にすでに月の出が起きているので(強い太陽の光で見えませんが)、日が沈んだ直後から月が夜空に出ている状態です。これに対し、満月の後では日が沈んでから月の出が起ころまでの間、太陽も月も出ていない真っ暗な時間帯が出現します。月の出の時間は毎日約50分ずつ遅れていきますので、この真っ暗な時間帯は満月後からどんどん長くなりしていきます。例えば満月の1日後は50分間とすると、5日後は250分間(約4時間)月の光の無い暗闇の時間が続くこととなります。この満月後に起こる「日の入りからの暗闇が出現する期間」は、月の光とは異なり、天候に左右されず必ず起こります。キクメイシ科のサンゴはこの暗闇状態を個々のサンゴが感知することで、毎年ほぼ同じ月齢(満月の5~8日後)に一斉産卵することができるのだと考えています。

2010年にリユータオでサンゴの産卵の研究をスタートさせて、早くも12年の歳月が流れました。少年老い易く学成り難しとはよく言ったものです。私たちは、12年に及ぶ研究の結果、サンゴの一斉産卵にミドリイシ型とキクメイシ型の2つのパターンが見られること、そのうちのキク



写真5 キクメイシの産卵

メイシ型の産卵メカニズムは満月の後に起こる日の入り後の暗闇を感知して起きていることを発見しました。これらの発見はサンゴの産卵メカニズムについての理解を一步前進させましたが、全貌解明への道のりはまだまだ長いようです。まず、同様の実験を様々なサンゴ種で行い、今回発見されたメカニズムがどの程度普遍的なものなのかを知る必要があります。また、もう一つの産卵パターンを示すミドリイシの一斉産卵メカニズムに挑戦する必要もあります。その後は、より生物学的な遺伝的、分子生物学的アプローチから実際にサンゴの体の中で何が起きているのかを調べていく研究も必要かもしれません。私は来年50歳になり、定年の65歳まであと15年の研究期間があります。残された時間にミドリイシの一斉産卵メカニズムの一部でも発見できればと、共同研究者の高橋先生、研究の中心的な役割を果たしてくれているザーホン(2019年度に卒業し博士となっています)と共に、いろいろとアイデアを出し合っているところです。興味は尽きません。

参考文献

- Shlesinger, T, & Loya, Y (2019) Breakdown in spawning synchrony: a silent threat to coral persistence. *Science*, 365(6457), 1002-1007.
- Lin, C-H, & Nozawa, Y (2017) Variability of spawning time (lunar day) in *Acropora* versus merulinid corals: a 7-yr record of in situ coral spawning in Taiwan. *Coral Reefs*, 36(4), 1269-1278.
- Lin, C-H, Takahashi, S, Mulla, A.J. & Nozawa, Y (2021) Moonrise timing is key for synchronized spawning in coral *Dipsastraea speciosa*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(34).



野澤 洋耕 のざわようこう

1972年大阪生まれ。
(台湾)中央研究院生物多様性研究中心、副研究員。
2006年に九州大学天草臨海実験所にて博士号を取得。
高知県の黒潮生物研究所での勤務を経て、2009年より台湾の現研究所に所属。専門はサンゴ礁のフィールド生態学、特にサンゴの生殖と生活史初期のメカニズムについて研究を行っている。