# LIGHTS IN THE DEEP

## 深海に光をともす

Nature Vol.450 (472-474) / 22 November 2007

E. WIDDER

**海面のはるか下、太陽光の届かぬ深海に棲む動物にも眼がある。光なき世界の視覚について Mark Schrope が取材した。**

8 月のバハマにて、あるないだ日の青い海で、ジョンズホプキンス大学（米国メリーランド州ボルティモア）の海洋学博士課程の学生、Erika Raymond は、船上の研究室内で数時間分のビデオ映像をチェックしていた。水深およそ 600 メートルの海底に設置したカメラから送られてきた映像だった。

その深さでは、わずかな太陽光がやっと届く程度であり、そんな暗闇の中での撮影は至難の業である。人工の光源を使うと、生き物たちは怖がって逃げてしまったり、寄ってきては困る生き物までよび寄せてしまったりする可能性がある。そのため、カメラは、大部分の深海動物の眼には見えない赤色光の光源を搭載している。しかし、このカメラシステムは深海を漫然と撮影するだけではない。「Eye-in-the-Sea（海中の眼）」と名づけられた、発光ダイオード（LED）製の疑似餌を装備している。これは、明るく光ったり特別なパターンで点滅したりするよう設計された小さい光源の集合体で、これに何か生物が反応してくれるのではないかという期待を膨らませていた。

Raymond は、スクリーンに映し出されたある映像に興奮していた。指導教官である Edith Widder をよぶと、彼女もやはり興奮して、「これはすごい」といった。Widder は、米国フロリダ州のフォートピアスにある海洋研究・保全学会（Ocean Research and Conservation Association）の共同創立者である。ほかの人々も周りに集まってきて、撮影装置をかぎ回っていた巨大なカグラザメのうちの 1 匹がよく映っている別のシーンを見ようとした。しかし、Raymond と Widder は、まったく別の、まるで能の世界のような幽玄美に興奮していたのである。

最初に、画面の中央で LED の疑似餌から繰り返し発光が起こり、続いて、遠方で同じような光が現れた。この遠方の光は 1 匹の動物が発したものであった。Raymond と Widder は早送りして、疑似餌とその動物が同じ発光パターンをしている場面へと映像を進めた。それは、彼女らが使っている 5 種類のパターンの 1 つだった。Raymond たちは動物からの応答をもう一度観察した。応答は時には複数あった。やはり本物だ。



©2008 NPG Nature Asia-Pacific

Raymond たちは LED の疑似餌を使い、その真っ暗な空間では恐ろしく目立つ表現方法であろう生物発光（コラム生物発光の仕組み参照）を言葉として、深海の動物とコミュニケーションをとり始めた。

いったいどういう会話だったのか、気になる問題である。観察された応答は、異性の気を引こうとするウインクのようなものかもしれないし、あるいは、警告と考えたほうがよいのかもしれない。しかし、そうしたやりとりが初めてできただけでも、深海の暗闇で行う研究分野にとっては、満足できるスタートであった。

深海での生物の発光活動を、行動学の面から観察した例はまれである。深海の生物種を実験室で飼育することはむずかしく、また、海洋深層を探査する機会は非常に限られているからである。しかも、遠隔操作型の探査機や潜水艇といった現地調査用の設備機材は、音や光を発して深海環境を乱す場合が多い。シティー大学（英国ロンドン）で深海映像を研究している Ron Douglas は、潜水艇による調査を、「ランドローバーを 1 台調達し、真夜中にそれに乗ってサバンナに出かけ、ステレオを音量いっぱいにかけてパワー全開でライトをつけ、サイレンを鳴らしながら、ライオンの正常な行動を観察しようとする」ようなものだといっている。

## 深海への旅

2007 年の夏、米国海洋大気庁（NOAA）の海洋調査局の資金提供を受けた 3 回目の調査航海による深海探査が、バハマで行われた。こうした、従来よりも生物を刺激しないように配慮した調査から、深海ではどんな光がみられ、そこに棲む動物は光をどのように利用していて、どんな世界を見ているのか、といった新たな情報が徐々に明らかになっている。まだはっきりしないことも多いが、1 つ明白なことは、生物発光がほぼ至るところにみられ、光は深海の住人たちの摂食や配偶行動、そして生存のためにことごとく重要な役割を果たしているらしいということである。最近の興味深いいくつかの発見からも、深海動物の少なくとも一部は、予想より物がよく見えていることがうかがわれる。

バハマの澄んだ海中を潜行していくと、水だけでなく、そこにあるすべての物がすばらしく青いことに驚きと感動を覚える。波長の長い赤色光は、海の最上層ですぐに吸収されて消えてしまう。そのため、深海の生き物の大部分は赤い色を見ることがなく、赤い物もほとんどない。もう少し深く 200 メートルくらいまで潜ると、まだ道を歩ける夕暮れ時ぐらいの明るさがある。しかし、海面から届く光が弱まるにつれて、まず、渦鞭毛藻類が放つ生物発光の小さな光がみられるようになる。さらに深く潜っていくと、光の点はもっとあちこちに現れ、モニター画面には、エビかクラゲが放っていると思われる大きい光が点々と映し出される。この「光のショー」はやがて、暗闇を増していく背景に浮かび上がる花火のようになっていく。水深 500 メートルまでいくと、もう人間の眼では太陽光がまったく見えなくなる。この深さに適応した動物たちは、この光量以下でも光を感じ取れるのかもしないが、水深 1000 メートルに達すると太陽光はまったく届かなくなる。

## 太陽光のない世界

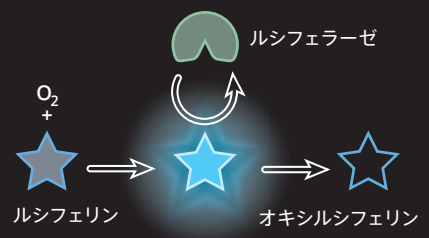
しかし、太陽光が届かない深さになっても、動物の眼はまだ普通に物を見ることができる。一生を通じて太陽の光から完全に遮断された生活を送る深海底の動物は、実際には、どちらかといえば大型化した眼をもっている。それらの眼は何かを見ているはずであり、その何かとは生物の発する光である。実際、英国アバディーン大学の Monty Priede らが行っている生物発光調査から、生物発光の頻度は水深が増すにつれて減っていくが、水深数千メートルでも発光がみられることが明らかになっている。

「光は外部環境の中で最も重要な変量であり、おそらく海洋環境でも同じように重要だという事実が忘れられています。ただし、深海動物は我々と同じように物を見ているわけではないことを理解しておく必要があります」と Widder はいう。

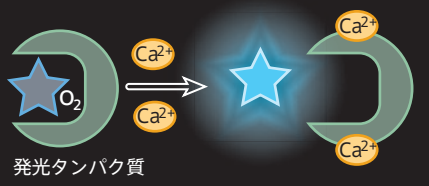
## 生物発光の仕組み

**生体内で化学的に起こる生物発光は多くの生物で知られているが、その大部分は海洋環境で観察することができる。**

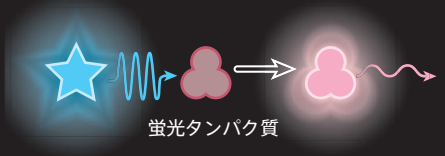
さまざまな化学反応があるが、陸上でも海中でも、発光反応が起こるときは一般にルシフェリンとよばれる基質が、ルシフェラーゼとよばれる触媒の働きで酸化される。ルシフェリン基質は生物体内で生成されるが、餌から摂取される可能性もある。




基質に触媒が働き、酸素などの補助的因子が結合して発光タンパク質が生成し、イオン（通常はカルシウムイオン）の付加によって発光が起こる。




しかし蛍光が発生するのは、化学反応においてではなく、吸収された光が再び放出されるときである。蛍光タンパク質は、生物発光で生じた光など、ある種類の光によって励起された場合、それより波長の長い低エネルギーの光を発する。




オワンクラゲ（*Aequorea victoria*）から単離された緑色蛍光タンパク質などの蛍光タンパク質とともに、発光タンパク質による生物発光は、生物医学研究で幅広く利用されている。カルシウムで活性化される発光タンパク質は、筋収縮その他のシグナル伝達系の研究に使うことができる。また、ルシフェリンとルシフェラーゼを組み合わせて、薬剤や遺伝子、細胞の活性を調べることができる。



©2008 NPG Nature Asia-Pacific

専門家たちは、視覚以外の感覚ももちろん重要だが、深海動物の中には生活面のあらゆる機能を生物発光に頼っているものがあると考えている。深海底では隠れ場所が乏しいことから、生物発光の最も一般的な用途の1つは、当然のことながら単純に「生き延びるため」である。

1つの定説として、一部の深海動物は、捕食者を驚かせるために明るい生物発光を警報器のように使ったり、自分の捕食者を捕食する生物を引き寄せるために使ったりしていると考えられている[1]。Widderによれば、Eye-in-the-Seaの最も初期の成果の1つから、後者の説が裏づけられるかもしれないという。2004年、海洋深層で初めてLEDの疑似餌をクラゲに似た発光パターンで動かしたところ、わずか1分余りで、体長2メートルのイカが画面に映った。その翌年、数百マイル離れた海域で、同じ種類だが種は未同定のイカが同じような応答をみせた。これは、生物にやさしい探査法によって新しい行動が発見できることを示す格好の証拠となり、「このイカの行動以上にインパクトのある証拠はまずないと思う」とWidderは話す。

深海の動物は、生物発光器や発光組織、さまざまな形の「噴出物」を上記の定説以外の用途に使っていることが、状況証拠から示唆されている。ときには一種の抑止力となり、一部の動物は、自分が食べられたときに捕食者の消化管をライトアップして、その捕食者の捕食者に居場所を知らせることができるらしい[2]。生物発光は、毒ヘビや毒ガエルが捕食者に、毒をもっていることやまずいことを知らせる警告色と同じように使われている可能性もある[3]。2005年、NOAAのOperation Deep Scopeの調査航海で、Widderは、知られるかぎり初めての発光するイソギンチャクを発見した。このイソギンチャクは、発光する粘液を出す。その用途は不明だが、Widderは警告信号ではないかと考えている。まったく毒のない生物が毒のある別の生物そっくりに進化するベイツ型擬態の例が、深海にも存在していることになる。

多くの動物は、光を使って捕食者から身を隠すことができる。海中の薄明層では光がまだ少し届いており、下から見ると黒っぽいシルエットが簡単にわかってしまうため身に危険が及ぶのだと、デューク大学（米国ノースカロライナ州ダラム）の生物学者で2007年のOperation Deep Scopeの主任研究員であるSönke Johnsenはいう。そこで多くの動物は、発光器を使って捕食者の眼をくらませたり、体の下方面を光らせて周囲に溶け込んだりするのである[4]。

生物発光の別の一面として、多くの動物が光を使って同種の個体や別種の動物を引き寄せたり見つけ出したりしていることを強く示す証拠も得られている。例えば、たくさんの魚やイカが生物発光をサーチライトのように使っている。また、性別に特異的な生物発光パターンを使って配偶相手を引き寄せるものもいる[5]。深海に棲むチョウチンアンコウの仲間の雌は、獲物をおびき寄せる疑似餌構造を備えていることで有名である。恐ろしげな歯が並ぶ口の前に、発光細菌が詰まった疑似餌をぶら下げているのである。

発光細菌は海洋全体に広く分布しており、これらの細菌は光を使って居心地のよい場所に行き着くのだと考えられてきた。生物の死骸の一部や糞の塊に乗った光る細菌は、魚に食べてもらう確率が高まり、魚の消化管内は細菌にとって願ったりかなったりの居場所なのである。

## 眼に眼をこらす

生物発光がどのように使われ、用途に対する成功度がどれくらいかを知るためには、もちろん、深海の動物が何を見ているかを知ることが不可欠である。Operation Deep Scopeのリーダーの1人で、深海調査で使用された調査船と探査機の保有機関であるハーバー・ブランチ海洋研究所（米国フロリダ州）の視覚生態学者、Tammy Frankは、深海動物の眼を詳しく調べている。彼女は、深海底に生息する動物の眼のサイズは同じ海域の上層にいる動物の眼よりも相当大きいが、それはエネルギー消費が関係しているためではないかと考えている。高度に発達した視覚はエネルギーを要する。開放水域に棲む動物は、捕食者より速く泳ぐことに多くのエネルギーを費やす可能性があるため、エネルギーをいたずらに消費することはできない。海底に棲む動物は、堆積物や岩などに身を隠せるため、より多くのエネルギーを視覚に振り向けることができると考えられる。

これまで調べられた深海動物の大部分は、青色から緑色の範囲の光を見ることができるようである。波長の短いこれらの光は、海の深いところまで届き、生物発光の大部分もこの色の範囲におさまる。しかし、驚くような例外もある。Frankは2005年に、メキシコ湾で実施されたOperation Deep Scopeの第2次調査航海で、標準的な青色から緑色の範囲だけでなく紫外光も感じとれる、海底に棲むカニの一種を発見した。この能力の用途はよくわかっていないが、このカニは何らかの未知の方法で、好みとする隠れ場所（柔らかいサンゴ）を見つけ出したり、時おり紫外線領域にわずかにシフトする各種の生物発光を見分けたりできるのかもしれない。当初は風変わりだとか起こりえないと考えられていた視覚能力が見つかった例は既にいくつかあり、今回こうした視覚能力の存在が実証されたとしても驚くには当たらないだろう。

赤色光は海中深くまで透過しないため、従来の常識として、深海の生物発光はすべて青色か緑色だと長い間考えられていた。ところが1981年に、英国サウサンプトン大学で生物発光の先駆的研究を行っていた（現在はセミリタイアしている）Peter Herringは、ワニトカゲギス科の一部の魚が、眼の下に赤色の光を放つ「サーチライト」を備えているという[6]、おもしろい発見を報告している。この科の仲間は世界中に広く分布し、その名（英名はdragonfish）にあるように、恐ろしげな歯と長い尾をもった深海魚である（p.18の写真参照）。Herringはほかの研究者たちとともに、これらのサーチライトは、青みがかった



©2008 NPG Nature Asia-Pacific

生物発光を赤色光領域にシフトさせる蛍光タンパク質が作り出したものであることを明らかにした。これらの魚は、眼が赤色光も見えるように適応していることから、ほかの魚類には見えない光を発して、こっそりと配偶相手を誘い寄せたり、餌をおびき寄せて捕食したりできると考えられている[7,8]。

不思議なことに、ワニトカゲギス科魚類の一種は、赤色光を見るために必要な色素を本来もっていないようだった。Douglas と同僚は最終的に、この魚は赤色光を見るために細菌由来のクロロフィル色素を使っていることを発見した。この色素がどのように獲得されるのか、また、赤色光を見ることができるようにエネルギーシフトさせる仕組みについては、まだはっきりわかっていない。しかし、このクロロフィルをマウスなどの動物の眼に注入すると赤色光の視覚が増進されることが、ほかの研究チームによって明らかにされている[9]。

## 赤い色を見る

モントレー湾水族館研究所（米国カリフォルニア州モスランディング）の Steven Haddock たちは、深海での赤色光にはほかにも使い道があるのではないかと考えた。2005 年に彼の研究グループは、魚を食べるクダクラゲの一種が、生物発光に赤色蛍光タンパク質を組み合わせて触手で赤く光る「フィッシングルアー」を作り出しているという提案をし、議論をよんでいる[10]。

赤色を見ることができるとわかっている少数の深海動物種を題材にして反論が展開されているが、その多くはまだ未検証である。また、物理学の分野からも別の反論が出されている。生物発光反応から蛍光タンパク質への移行でエネルギーが失われて、発生したり受け取ったりするシグナルは相当弱くなるため、蛍光では役に立たないというのである。

「当方の物理学チーフは『ノー』といっていますね」と、クィーンズ大学（オーストラリア、ブリストル）から Operation Deep Scope に参加している Justin Marshall は話す。「でも生物学のチーフは、『うーん、なぜだめなんだ？生物の世界は不思議に満ちているんだから、ありうるかもしれないじゃないか』と反論しています」。

Haddock と、Operation Deep Scope のもう 1 人のリーダーであるテキサス大学オースティン校の Mikhail Matz は、ワニトカゲギス科魚類のサーチライト発光器で見つかった赤色蛍光タンパク質の関連研究プロジェクトに参加している。予備研究の結果によると、この蛍光タンパク質は 2 種のあごひげにもみられる。あごひげは生物発光器官とは関連していないので、そこに赤色蛍光タンパク質が存在するのはますます不思議なことである。「赤色蛍光は何らかの獲物をおびき寄せるのだと思います」と Matz はいうが、どんな獲物をどうやっておびき寄せるのかは不明だ。ワニトカゲギス類の赤色蛍光タンパク質は、これまで知られていなかった新しい種類だとみられている。生物医学研究では、ほかの複数の蛍光タンパク質がよく使われており、今回の赤色蛍光タンパク質も、もっと浅い海に棲む動物から採取された数種の同族タンパク質とともに、研究用の新ツールとして使えるのではないかと Matz は考えている。

赤色蛍光が深海でどの程度の役割を果たしているのかといった疑問は、まだしばらく解明されそうにないが、Widder は、深海のいくつかの謎については研究を進展させる新ツールがまもなく登場するだろうと期待している。軍による資金提供のため、生物発光に関する研究のほとんどは、発光のせいで潜水艦や軍艦などの存在がわかってしまう浅海域に集中してきた。しかし、Widder は今回、Eye-in-the-Sea を使った新たな探査に対して米国立科学財団から資金の提供を受けており、カリフォルニア州のモントレー沖での海中観察設備の一部として、2008 年の初めに Eye-in-the-Sea を設置する予定である。この観察システムのおかげで、初めて生物に優しいやり方で深海を半永久的に観察できることになる。それはつまり、深海生物の発光活動の本当の姿を、初めて効率よく長期にわたって研究できるということだ。Widder や彼女の同僚たちは、このような観測の強化によってさまざまなことを発見できるだろう。そして、バハマの海で LED の疑似餌とそれに応答した未知の動物の間で交わされた会話を解読できるかもしれない。「今後、こうした問題のいくつかに、初めて取り組むことができるでしょう」と彼女は語った。 ■

深海探査機「Eye-in-the-Sea」のそばに立つ Edith Widder。

D. SMITH

Mark Schrope はフロリダ在住のフリーライター。


1. Widder, E. A. in *Adaptive Mechanisms in the Ecology of Vision* (eds Archer, S. N., Djamgoz, M. B. A., Loew, E. R., Partridge, J. C. & Vallerga, S.) 555–581 (Kluwer Academic, Boston, 1999).
2. Johnsen, S. *Biol. Bull.* **201**, 301–318 (2001).
3. Grober, M. S. *Anim. Behav.* **36**, 493–501 (1988).
4. Johnsen, S., Widder, E. A. & Mobley, C. D. *Biol. Bull.* **207**, 1–16 (2004).
5. Herring, P. J., *J. Mar. Biol. Assoc. UK* **87**, 829–842 (2007).
6. Herring, P. J. in *Bioluminescence and Chemiluminescence,* (eds DeLuca, M. A. & McElroy, W. H.) 527–530 (Academic Press, New York, 1981).
7. Widder, E. A., Latz, M. F., Herring, P. J. & Case, J. F. *Science* **225**, 512–514 (1984).
8. Douglas, R. H. *et al. Nature* **393**, 423–424 (1998).
9. Washington, I. *et al. Photochem. Photobiol. Sci.* **6**, 775–779 (2007).
10. Haddock, S. H. D., Dunn, C. W., Pugh, P. R. & Schnitzler, C. E. *Science* **309**, 263 (2005).




©2008 NPG Nature Asia-Pacific