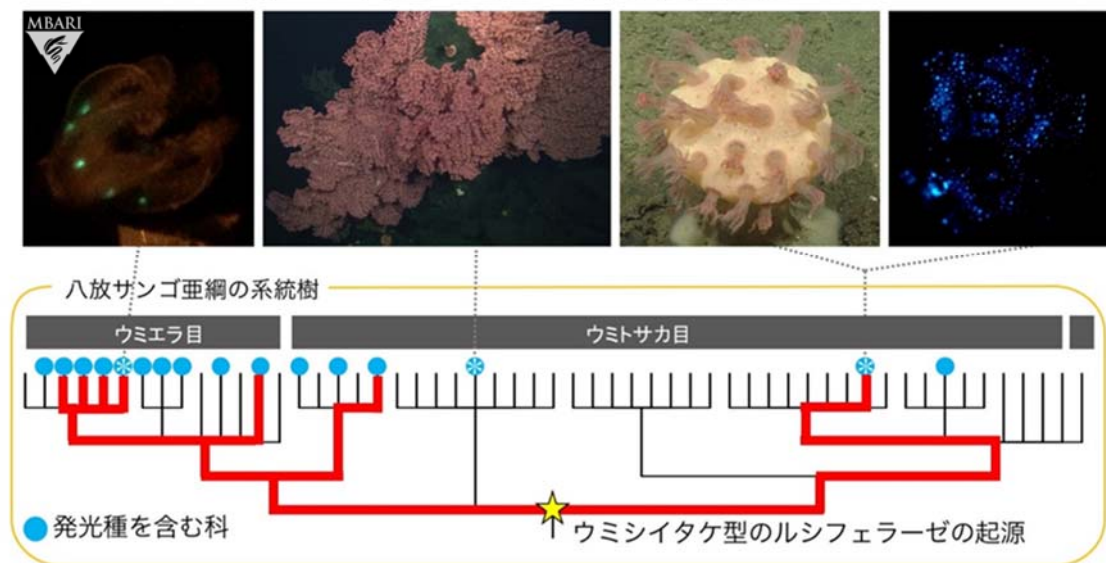


## 新たに発見された深海棲発光サンゴ



## 深海に広がる幻想的な光の世界

～新たな深海棲発光サンゴの発見とその光る仕組みを説明～

名古屋大学高等研究院の別所-上原 学（べっしょ-うえはら まなぶ）特任助教らの研究グループは、米国モンレー湾水族館研究所(MBARI)との共同研究で、深海4,000 m までの海底を調査し、新たに4種の発光するサンゴやイソギンチャクの仲間を発見しました。さらに、これらの発光の分子メカニズムを解析し、八放サンゴ亜綱における発光能力の進化の一端を明らかにしました。

サンゴやイソギンチャク類（花虫綱）は7,500種ほど報告されており、海洋生態系に重要な生物です。近年では、水族館や個人でもサンゴの飼育展示が可能になり、その多様な色彩で私たちを楽しませてくれます。実は、サンゴの仲間には暗闇で発光する能力を持つ種が報告されています。しかし、その報告例は40種ほどと少なく、また、発光種がそれぞれ離れた系統で見つかることから、花虫綱における発光の進化の歴史は謎に包まれていました。また、深海における発光サンゴに関する研究もほとんど報告はありませんでした。

研究グループは、西太平洋のモンレー湾の深海を調査し、新たに発光するサンゴ・イソギンチャクを4種発見しました。さらに、八放サンゴ亜綱のサンゴ類は共通の酵素タンパク質を用いて発光することが明らかになりました。このことは、八放サンゴ亜綱の共通祖先で発光が一度だけ進化したことを示唆しています。本研究により、発光する花虫類はこれまで考えられていたよりもはるかに多い可能性が、示唆されました。今後、より注意深い観察などにより、花虫綱における発光生物が続々と見つかるかもしれません。

この研究成果は、2020年7月9日付米国科学雑誌「Marine Biology」に掲載されました。

この研究は、David and Lucile Packard foundationの支援のもとで行われたものです。

## 【ポイント】

- ・遠隔操作深海探査機（ROV）を用いて 10 種のサンゴやイソギンチャク類（花虫綱動物）を調査した。その結果、ソフトコーラル類やウミエラ類、イソギンチャク類など 4 種が新たに発光する種として見つかった。
- ・高感度カメラを搭載した ROV により、7 種の深海の花虫綱動物が発光する様子をその生息地で撮影することに世界で初めて成功した。
- ・八放サンゴ亜綱のサンゴ類は共通の分子メカニズムにより発光することを発見した。すなわち、八放サンゴ類の発光の進化が単一起源である可能性を示唆した。

## 【研究背景と内容】

### 生物発光の進化

生物発光はバクテリアから魚類まで様々な分類群で見られる特徴で、長い歴史のなかで何度も独立に進化してきたと考えられています。しかし、生物発光の進化的な研究は、一部の生物では進展しているものの、多くの海の生物ではまだ明らかになっていません。生物発光の仕組みは、ルシフェリンとルシフェラーゼ（注1）による酵素反応です。このルシフェラーゼが、発光の進化を解明する手がかりとなります。例えば、全てのホタル（甲虫目ホタル科）は、ルシフェラーゼが共通している（相同である）ことが遺伝子解析などからわかっており、ホタル科の共通祖先で獲得された発光形質が、現生の全てのホタルに受け継がれていることが報告されています。しかしながら、海洋生物、特にサンゴの仲間では、発光の分子メカニズムに関する研究例は少なく、そのため発光の進化についてはほとんどわかっていませんでした。

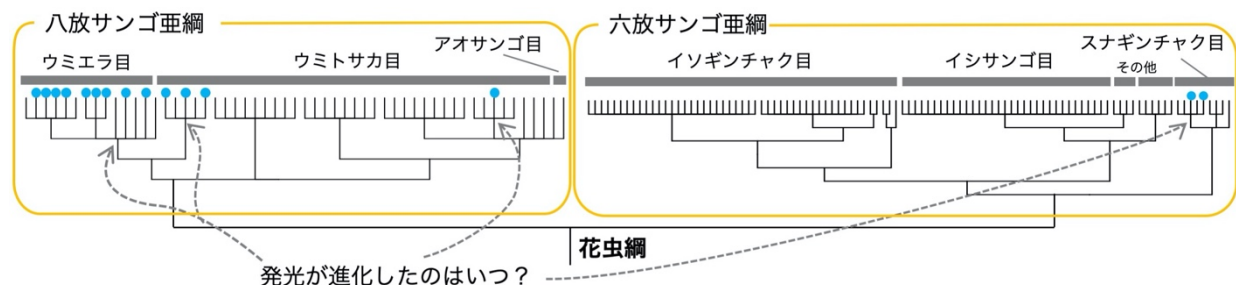


図1 花虫綱の分類系統と発光種の分布

花虫綱における科の関係を系統樹で示した。●は発光種が報告されている科を表す。発光形質がこのように系統樹上にまばらに見られる場合、発光形質がそれぞれ独立に進化したのか、もしくは、あるグループの共通祖先で進化し一部の生物でそれが二次的に失われたのか、などを推定するのが困難。分布のように系統樹上で発光種がまばらに分布していると、どこで発光が進化したかを推定するのは困難。発光の起源が同じ生物は、相同なルシフェラーゼを持つと考えられるので、ルシフェラーゼの種類を調べることで発光の進化的起源を推定することができる。

### 発光するサンゴの仲間

サンゴの仲間（花虫綱、注2）は、刺胞動物門の1大グループで7,500種ほどから構成されています（哺乳類はおよそ4,500種）。約半分がイソギンチャク類やハードコーラル類を含む六放サンゴ亜綱、残りがソフトコーラル類やウミエラ類、宝石サンゴ類などを含む八放サンゴ亜綱になります。これまでに、いくつかのイソギンチャク類やサンゴ類が発光すること（生物発光）が報告されていますが、分類学的に散見され、それぞれ独立に生物発光を進化させたと考えられていました（図1）。花虫綱で唯一、ウミシイタケ（注3）においては、発光の仕組みが明らかになっていますが、そのほかの種についてはほとんどわかっていませんでした。特に、深海に生息するサンゴにおける発光形質の有無、また、その発光システムの分子機構についての研究もほとんど進んでいませんでした。

## 【研究内容】

### 深海棲発光サンゴの発見

別所-上原特任助教は米国モンレー湾水族館研究所 (MBARI) との共同研究により、遠隔操作無人探査機 (ROV) を用いてアメリカのモンレー湾の深海 4,000 m を調査したところ、10 種の発光する花虫類を発見し採取しました。そのうち 4 種は、これまでに発光することが知られていませんでした。また、ROV に高感度カメラを搭載し、花虫類の発光している様子を深海環境下で動画撮影することにも成功しました (図 2)。

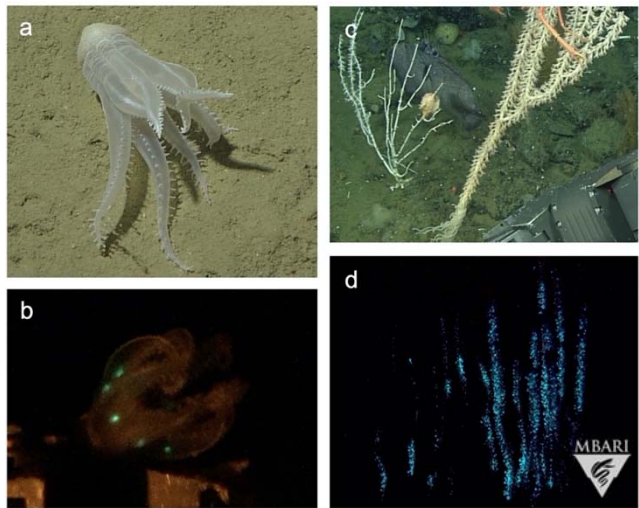


図2 深海サンゴとROVにより世界で初めて撮影された発光  
(a) 深海4,000 mで発見された*Kophobelemonn* sp. (b)ROVによる撮影により発光することが新たにわかった。触手の付け根の間に緑色の発光器が並び、オワンクラゲが持つような緑色蛍光タンパク質 (GFP) を持つと考えられる。  
(c) 宝石サンゴの近縁種*Sidella tentaculum*。枝の先にはカニが住んでいる。  
(d) *Sidella*は青色に発光する。(写真提供: MBARI)

### 発光花虫類の進化的起源

採取した花虫類を用いてさらに生化学的に調べたところ、これらはセレンテラジン (注 4) を発光基質として用いていることが明らかになりました。さらに、八放サンゴ亜綱の宝石サンゴやウミトサカなどは、ウミシイタケと相同なルシフェラーゼを持つことがわかりました。これは、八放サンゴ亜綱の共通祖先で進化したルシフェラーゼが現生のサンゴに受け継がれていることを示唆しています (図 3)。一方で、光るイソギンチャク (六放サンゴ亜綱) が持つルシフェラーゼはウミシイタケのルシフェラーゼと

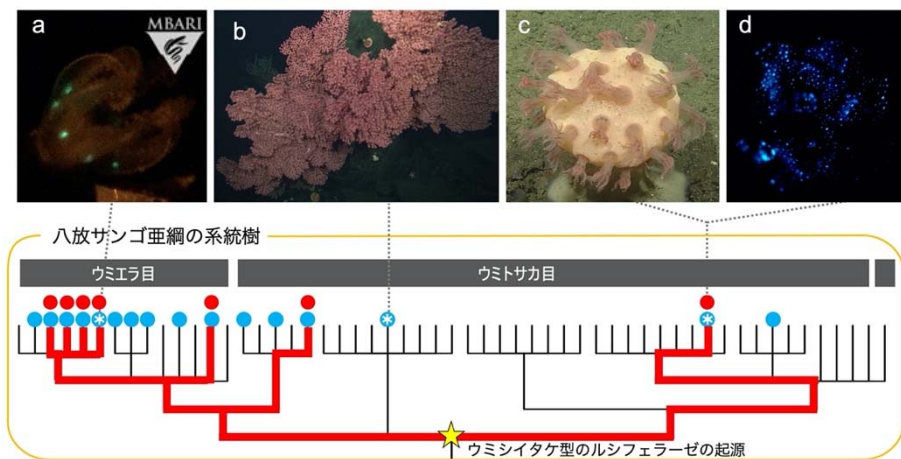


図3 新たに発見された深海発光サンゴと八放サンゴ亜綱における発光の進化  
(a) *Kophobelemonn* sp. の発光。触手の付け根の間に発光器が並び、そこから緑色の発光を放出する。(b) 宝石サンゴに近縁な*Paragorgia arborea*。(c,d) ウミテングタケの仲間*Heteropolypus ritteri* (c)とその発光(d)。(下段) 八放サンゴ亜綱の分類系統。●は発光種を含む科を示し、\*は新たに発光する種が見つかった科を示す。●はウミシイタケのルシフェラーゼと相同なタンパク質を持つ。これらの共通祖先を辿ると (赤線)、発光の進化が八放サンゴ亜綱の共通祖先(★)で起こったことが推定できる。(写真提供: MBARI, Steven Haddock, 別所-上原 学)

は生化学的に異なる種類であることが明らかとなりました。これは、八放サンゴ類と六放サンゴ類では、異なるルシフェラーゼを持っており、進化的な起源が異なることを示唆しています。以上の結果は、様々なサンゴを用いた遺伝子解析結果からも支持されました。

### 緑色に光る意味とは？

高感度カメラによる花虫類の発光の観察から、花虫類には、青色に発光する種、緑色に発光する種、さらには青と緑の二色に発光する種が存在することがわかりました。ところが、今回調査したすべての花虫類のルシフェラーゼは青色に発光します。我々はさらに、緑色蛍光タンパク質 (GFP) により発光色にバリエーションがあることを突き止めました。数十メートルより深くなると、海は青一色の世界になり、多くの生物は青色以外の光を見ることができません。そのため、多くの深海発光生物の発光は青色です。



目を持たないサンゴ類が青や緑といった発光色を使い分けているのは何のためでしょうか。その意義は未だ不明ですが、大変興味深い違いです。サンゴが幅広い発光色を持つことには、サンゴと共に生息する生物との相互関係が関係しているのかもしれませんが。

### 【成果の意義】

サンゴの仲間は、例えばグレートバリアリーフのように、生物多様性を支える場を提供しています。今回調査された深海でも、花虫類の枝や触手にヒトデやカニが捕まって生活している姿や、影に隠れているような生き物がたくさん観察されました（**図2c**）。深海に住む多くの生き物がサンゴ類やイソギンチャク類を拠り所としていますが、サンゴ類による生物発光が、サンゴ類が作り出す生態系においてどのような役割を持っているかはまだ謎に包まれたままです。

近年、海底資源の開発が世界的に議論されていますが、開発により巻き上げられる泥などが、こうした発光サンゴを中心とした光のコミュニケーションに与える影響はほとんど議論されていません。サンゴをはじめ生物発光の深海生態系における役割を調査することは急務であり、科学的根拠に基づいた深海資源開発を行うことは生物多様性の維持と持続可能な社会の実現において必要です。

八放サンゴ亜綱の共通祖先が発光していたことは、現生の全ての八放サンゴ類（宝石サンゴをはじめヤギ類、ウミエラ類、ウミトサカ類など）が発光するポテンシャルを持つ可能性を示唆しています。つまり、光らない八放サンゴ類は「発光能力を二次的に失うという進化を経た」という可能性と「実は他にも発光するが人類がまだそれに気付いていないだけである」という可能性を示しています。実際、本研究ではこれまでに報告されていなかった発光種を4種も発見しました。そのうち3種は、目レベル・科レベルで初めての報告です（**図3**）。この発見は、未発見の発光種が他にもたくさん存在する可能性を示唆しています。今後、より注意深く調査を行うことで浅い海・深海を問わず、新たな発光する花虫類の発見に繋がるでしょう。大昔の海を想像してみてください。そこは、サンゴによる幻想的な光で満ちていたのかもしれませんが。そして、深海世界には、その光る能力を受け継いだ仲間達で溢れているのかもしれませんが。

### 【用語説明】

注1 ルシフェリンとルシフェラーゼ：  
それぞれ生物発光反応における基質と  
酵素タンパク質の総称。生物の種類によ



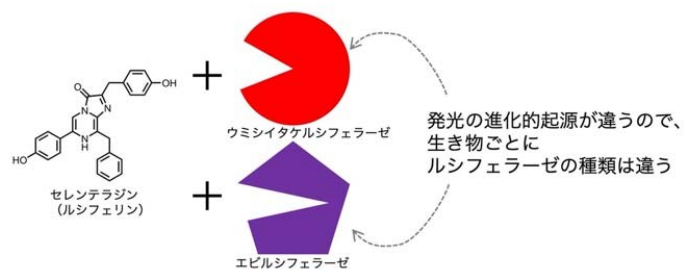
りその化学構造や遺伝子配列は異なる。したがって、ルシフェリンやルシフェラーゼがある生物群で共通している場合は、それらの共通祖先で生物発光が進化したと推定できる。

注2 サンゴの仲間：ここで言うサンゴの仲間とは分類学上の花虫綱に含まれる動物を指す。花虫綱には、一般に言われる、ハードコーラルとソフトコーラルなどのサンゴだけでなくイソギンチャクなどが含まれる。これらはポリプの触手の形態によって八放サンゴ亜綱と六放サンゴ亜綱にさらに分類される。八放サンゴ亜綱にはウミシイタ

ケやウミサボテン、ウミエラなど光る種が知られている。装飾品として扱われる宝石サンゴも八放サンゴ亜綱である。今回の調査により宝石サンゴに近縁な *Isidella tentaculum* や *Paragorgia arborea* も光ることが明らかになった。もしかしたら暗闇で発光する宝石サンゴが存在するかもしれない。

注3 ウミシイタケ：学名 *Renilla reniformis*。浅瀬で見つかる八放サンゴ亜綱ソフトコーラルの一種。

注4 セレンテラジン：ウミシイタケから発見されたルシフェリンの一種。セレンテラジンは、ウミシイタケだけでなくクラゲやエビ、イカ、魚類など多くの深海発光生物から発見されており、深海生物のルシフェリンとして広く知られている。



#### 【論文情報】

雑誌名：Marine Biology

論文タイトル：Biochemical characterization of diverse deep-sea anthozoan bioluminescence systems

著者：Manabu Bessho-Uehara (別所-上原 学), Warren R. Francis, Steven H.D. Haddock

DOI: [10.1007/s00227-020-03706-w](https://doi.org/10.1007/s00227-020-03706-w)