

光る藻類

川井浩史

はじめに

「光る藻類」というと、ヒカリモという黄金色藻の一種がそのままの名前であるし、ヤコウチュウ（夜光虫）やそのなかまの渦鞭毛藻の発光もよく知られている。また、藻類の葉緑体や褐藻の遊泳細胞の鞭毛に紫外線や青い光を当てると、それぞれ赤や緑の蛍光を発する。一方、ヒラワツナギソウやシワヤハズなどの海藻は、海中で青や緑色に光っているようにみえたり、見る角度によっては本来の色とは全く違う色に見えたりする。

これらの現象はいずれも一般に「光る」という言葉で表される。しかし、それらが光って見えるメカニズムは多様であり、そもそも「光る」という言葉の意味するところはかなりあいまいである。たとえば、次のような文章はどうだろう。「月はなぜ光るのですか？ 月は明るく光っていますが、自分で光を出しているわけではありません」。「光る」ということと「光を出す」ということは、本来同じことのように思うのだが、実際には月のように「光を反射することでまわりより明るく見える」ことも「光る」と表現されている。これは、われわれの目を見たとき、ある部分がまわりより明るく見えれば、それ自体が光を発していても、あるいは別の光源からの光を反射しているだけでも、それらを区別することは難しいので仕方ないのだろう。

前置きが長くなったが、ここではさまざまな「光る藻類」とそのメカニズムについて紹介する。

発光

「発光」は太陽のように自ら光を発している現象で、生物でもホタル（昆虫）、クシクラゲ（腔腸動物）、ホタルイカ（軟体動物）、チョウチンアンコウ（魚類）、ツキヨタケ（菌類）などさまざまな種が発光する。しかし、陸上植物や海藻などのように、もっぱら光合成によって生活している生物で自ら発光する種は知られていない。光合成を行う藻類で唯一知られているのは渦鞭毛藻のなかまであり、*Lingulodinium polyedra* や *Pyrocystis lunula* などの種は強い波などの刺激を受けると、自ら青白い光を発する（図 1a, b）。その名も夜光る虫であるヤコウチュウ (*Noctiluca* 属) は従属栄養だがこのなかまであり、発光のメカニズムも共通している（図 1c, d）。これらの渦鞭毛藻は細胞の中にたくさんのシンチロンと呼ばれる小さな顆粒を含んでおり、その中にある渦鞭毛藻型のルシフェリンとルシフェラーゼによる酵素反応で発光する。また、

Lingulodinium polyedra では、発光を担うシンチロンの数が時間帯によって変化し、夜間は多く、昼間は少ないことが知られているが、これらの渦鞭毛藻の発光がどのような役割を持っているのかについては良くわかっていない。

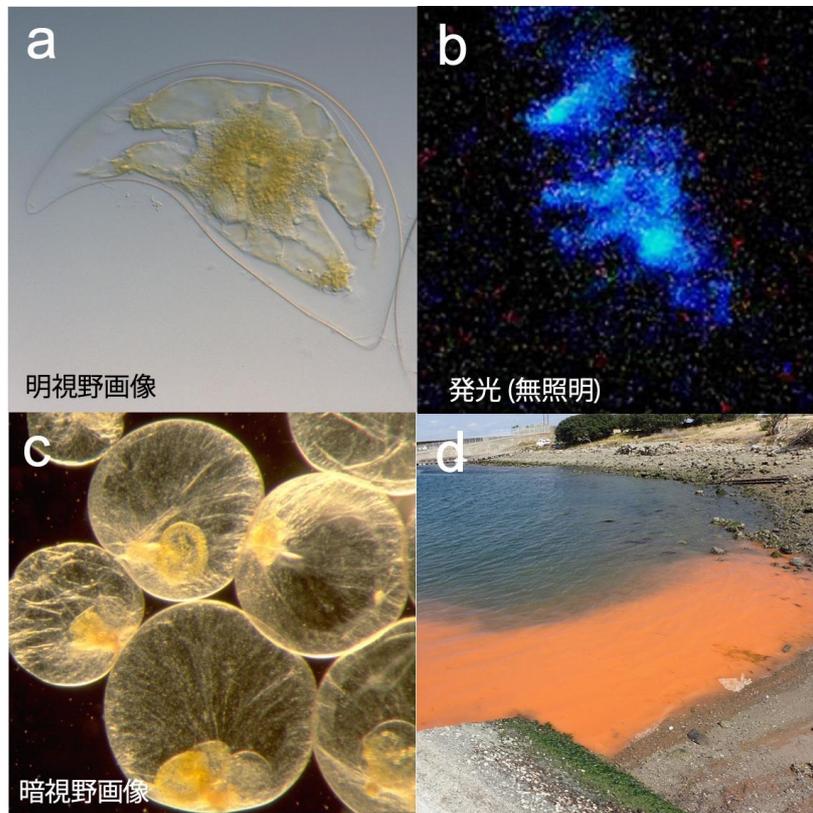


図1 発光する渦鞭毛藻 *Pyrocystis lunula* (NIES-609 株) の明視野画像 (a) と青い発光 (b) [国立環境研究所微生物系統保存施設提供]；ヤコウチュウの暗視野画像 (c) と赤潮 (d)。

蛍光

「蛍光」は、短い波長の光（励起光）を吸収して励起された物質が元の状態に戻る時に励起光より長い波長の光を発する現象で、照射された光（励起光）より放出された光（蛍光）が目立つ場合は光っているように見える。たとえば、ブラックライトと呼ばれる長波長の紫外線は人間の目ではわずかに見える程度だが、この光を照射したときにその物質が青い光を発すると、人の目はより感度が高いことから強く光っているように見える。このような蛍光現象は海藻類でも広く見られ、葉緑体に含まれるクロロフィルは、自然光に含まれる紫外線や青い光を受けて赤い蛍光を発している。しかし、野外や室内などの通常的环境では赤を含むさまざまな波長の光があるため、ことさら光っているようには見えない。一方、蛍光顕微鏡では、励起光だけを対象物に照射し、蛍光以外の波長の光を吸収することで、蛍光だけを観察できる。このため、

藻類などの細胞でも蛍光顕微鏡で青い光を照射して観察すると、クロロフィルの赤い蛍光で、葉緑体の形がよく観察できる (図 2a-d)。また、本来は蛍光を出さず、また無色で通常の観察では見ることができない物質でも、蛍光染色剤で染めると蛍光を出して光るようになり、その物質がある場所が確認できるようになる。例えば、遺伝子である DNA は無色でそのままでは見えないが、DAPI という染色剤で染めると青白く光り、核や葉緑体に含まれる DNA の分布を観察することができる (図 2a, b)。

さて、藻類のうち褐藻の遊泳細胞は一般に細胞の側方から生えた 2 本の鞭毛を持っているが、前方に伸びる鞭毛 (前鞭毛) にはマストゴネマと呼ばれる毛が生えており、この鞭毛を波状に動かすことで回転しながら前進する。一方、後方へ伸びる鞭毛 (後鞭毛) はマストゴネマを持たず、大きく屈曲することで細胞が進む方向を変える舵の役割を果たしている。そして、褐藻の遊泳細胞に蛍光顕微鏡で紫や青の光をあてると、2 本ある鞭毛のうち、後ろ側の 1 本だけが強い緑色の蛍光を発する (図 2c, d)。このような鞭毛の蛍光は、遊泳細胞が光の方向を検知してそちらの方へ泳ぐ、あるいは逃げる方向へ泳ぐ走光性というメカニズムに関係しており、同じ褐藻類でも走光性を退化させたコンブ類の遊走子や精子では鞭毛の蛍光も見られない。また、褐藻以外でも褐藻と系統的に近縁の多くの不等毛藻類も緑色の蛍光を発する鞭毛をもっており、その化学的な性質について調べられているが、その機能については未だ明らかになっていない。そもそもこの後鞭毛の蛍光が「光る」ことになにかの役割があるのか、それとも何らかの反応の副作用として光っているだけなのかも実は良くわからないのである。すなわち、クロロフィルが発する蛍光は、光合成のために光のエネルギーを取り出した結果であり、その蛍光がなにかの役割を果たしているわけではない。同じように鞭毛が光ることは、何かの反応の結果であり、特に役割が有るわけでは無いのかもしれない。

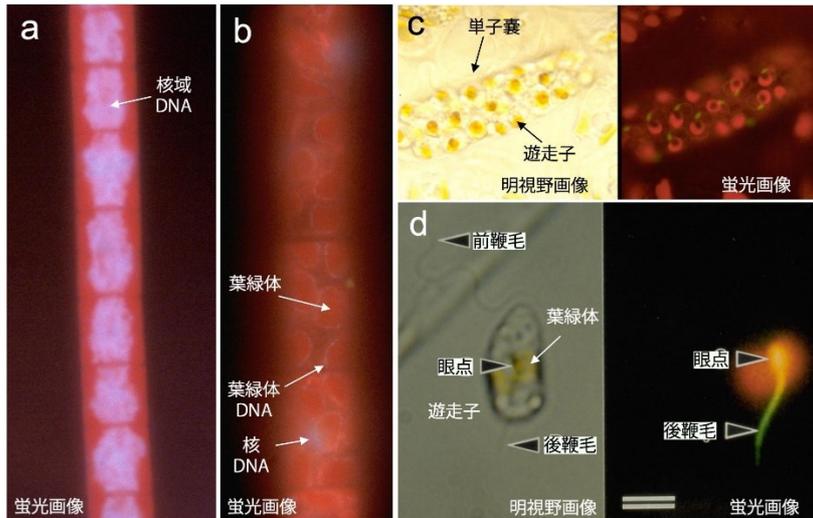


図 2 蛍光染色剤 DAPI により染色したらん藻ユレモ (a) と褐藻シオミドロ目の一種の細胞糸 (b). 細胞質または葉緑体内のクロロフィルが赤い自家蛍光を、核域、核、葉緑体縁辺部の DNA が DAPI 染色による青白い蛍光を発している；褐藻の単子嚢内 (c) と放出された遊走子 (d) の葉緑体 (赤) と後鞭毛 (緑) の自家蛍光。

反射

説明するまでもないが、反射は光が何かの構造の表面ではね返る現象で、月は太陽の光を反射して光っている。光る藻との名前がつけられた単細胞の藻類であるヒカリモ（黄金色藻類）は、東日本以西の湧き水のある洞窟などに生育しており、場所によっては天然記念物や名所となっている。ヒカリモが光るのは、本来は水中で生活している植物プランクトンであるヒカリモが水面上に浮上して、丸い細胞の中に含まれる 1 個のお椀形の葉緑体が、その向きによっては反射板のように作用して、光を反射しているのだとされている。実際、自然光下で薄暗い洞窟をのぞき込んでも、水面は黄色っぽい色に見えるだけだが、ストロボで照明して写真を撮ると、黄金色に輝いて見える (図 3 a-d)。しかし、なぜ水面上に浮かび、細胞またはその中の葉緑体が同じ向きに配向するのか、また黄金色に輝くのかについては、良くわかっていないらしい。私見では、洞窟のように光が低い角度でしか差し込まない場所では本来の生育場所である水中に到達する光は、水面での光の反射のためさらに弱くなってしまう。水面より上に露出することでより強い光を受けることができるが、もともと単細胞性の鞭毛藻であるので、常時水面上で生活できるわけではない (図 3e)。このため、温度や湿度の条件が許す季節に水面上に浮上する生活史型が進化したのではないだろうか。葉緑体の向きがそろって光を鏡のように反射する現象は、より効率的に光を集めるために葉緑体の向きを揃える配位現象と捉えられ、照射された光のうち青や赤の波長帯の光は光合成のために吸収され、一方、反射した光には吸収されなかった黄色の波長帯

が多く含まれるため黄金色に見えるのだろう。また、そもそも水中に暮らしている優占種の植物プランクトンが、ある期間、そろって姿を消すとしたら、その植物プランクトンを捕食して暮らしている動物プランクトンなどの動物にとっては、安定して生き延びることが難しくなる。このため、ヒカリモのような生活史型は捕食を免れることにも貢献しているのかもしれない。



図3 黄金色藻ヒカリモの群落（兵庫県三木市志染：a-d）と細胞の明視野画像（e）[横山亜紀子氏提供].

構造色（イリデッセンス）

冒頭でも触れたように、海藻にも光っているように見える、あるいは蛍光を発しているとされている種類がある。たとえば紅藻ヒラワツナギソウは海中で青や緑に光っているように見えるし、筆者が最近日本での分布を報告した褐藻クジャクケヤリは青や緑に輝いて見える（図4 a-i）。また、多核緑藻のバロニア類は強い光を受けると本来の色よりは青っぽく見える。このようにそれらの海藻の本来の色と異なるさまざまな色で輝いているように見える現象は iridescence（イリデッセンス；虹色または玉虫色と訳されている）と呼ばれている。このような現象は鮮やかな色を示す蝶や玉虫の翅や鳥の羽根、シャボン玉や鉱物のオパールなどでみられる現象と共通している。すなわち、そこにそのような色の色素が含まれているわけではなく、表面の微細な構造によって引き起こされる光の干渉で生じ、「構造色」と呼ばれている（図5 a-d）。

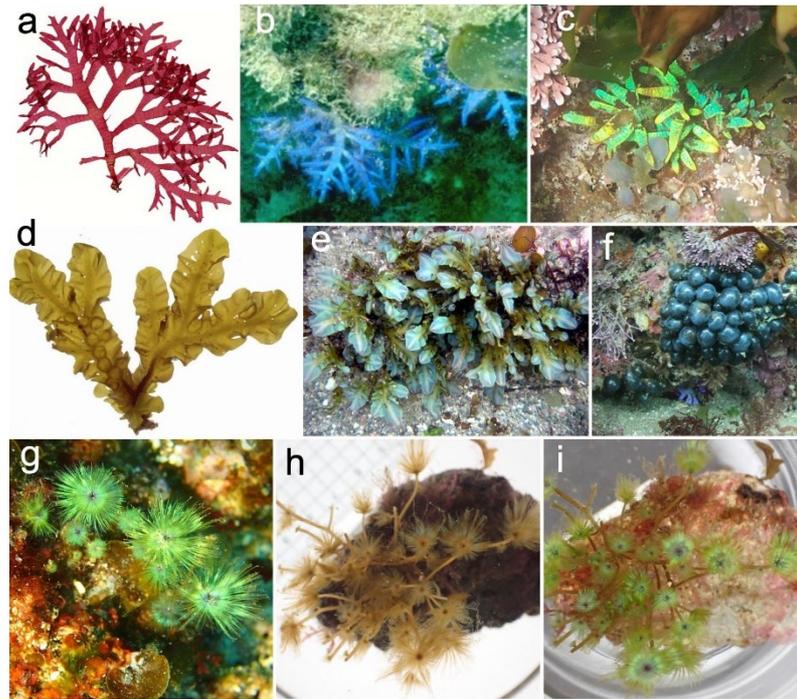


図4 さまざまな海藻類でみられる構造色。紅藻ヒラワツナギソウ (a-c)；褐藻シワヤハズ (d,e)；緑藻タマゴバロニア (f)；褐藻クジャクケヤリ (g-i)。a, d, h は藻体の下側からの照明で色素による色が，b, c, e, f, g, i は藻体上部からの照明で構造色が観察される。



図5 さまざまな生物の色のメカニズム。色素によって生じる陸上植物の葉 (a)と海藻類 (b)の色；構造色によって生じる蝶 (c) とクジャク (d) のはねの色。

海藻の構造色については、大きく分けて3つの異なるメカニズムが報告されているが、いずれも光の反射が関わっており、そういう意味では前項と関係が深い (図 6)。

1つめは紅藻で多く見られるもので、藻体表面の外被層（クチクラ層）が多層構造をしており、光がそれぞれの層を通る際の屈折と、反射による干渉のためにある色が強調されるか、見る角度によってさまざまな色に見えるというものである。具体的にはツノマタ類で見られる構造色はこのタイプである。2つめは藻体表面の細胞のなかに含まれている多くの微細な顆粒によって、藻体にあたった光が屈折したり散乱したりすることで光の干渉がおこって、その結果さまざまな色が生じるというものである。このタイプは褐藻シワヤハズなどのアミジグサ目の多くの種やウガノモク類、また紅藻ヤナギノリ属やフタツガサネ属の種で見られる。3つめはあまり一般的ではないが、多核緑藻のバロニア類などで知られているもので、細胞壁を構成する微細な結晶構造とセルロースの微細繊維の配列によって構造色を生じるというものである。いずれにせよ、図鑑などでしばしば海藻が蛍光を発すると表現されているが、これらは正確には蛍光ではなく構造色である。

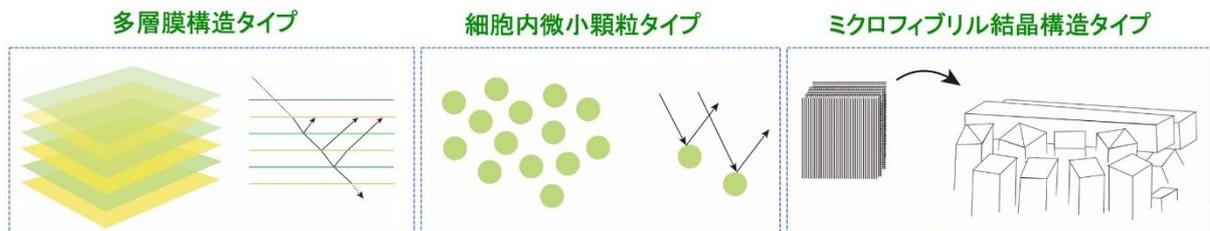


図6 海藻類で知られている構造色を生じるメカニズム（多層膜構造タイプ，細胞内微小顆粒タイプ，マイクロフィブリル結晶構造タイプ）。

さまざまな動物や陸上植物が持つ構造色については、カモフラージュ、擬態、異性や訪花昆虫へのアピールによる生殖の効率化、警告などさまざまな機能が推定され、またその検証のための実験が行われている。一方、海藻類の構造色についても、強光下での紫外線などの有害な光からの防御、弱光下での光合成の効率化、カモフラージュなどの説が出されている。しかしそもそも光ること自体には役割はなく、何かの反応や構造を獲得した副産物として引き起こされているという可能性もあり、有力な説はないという状況のようである。筆者は最近報告したクジャクケヤリが青や緑に「光る」しくみとその役割について調べており、海藻の構造色について新たな知見を加えられればと考えている。

執筆者 川井浩史(かわい ひろし)

神戸大学内海域環境教育研究センター特命教授(同センター長)・名誉教授、理学博士、日本藻類学会元会長、アジア太平洋藻類学会 (APPA) 元会長、日本藻類学会学術賞 (山田賞) 受賞 (2019)