

渦鞭毛藻の発光

大場裕一, 井上 敏

はじめに

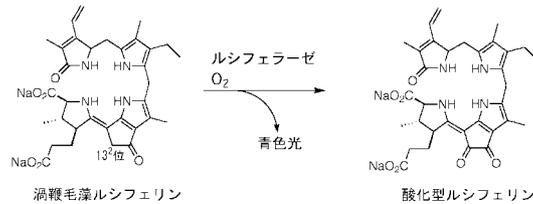
夏に海へ行ったときなど、夜の浅瀬で小さな点が青くピカピカと光る様子や、沖を過ぎる船の後尾にほの暗く光る軌跡を見た経験のある人も居るだろう。この発光の多くは渦鞭毛藻 (Dinoflagellate) の仲間である夜光虫 (ヤコウチュウ; *Noctiluca scintillans*) によるものである。代表的な発光プランクトンであるこの夜光虫は、直径1mmほどの桃の形をした透明な単細胞生物である。藻類の仲間ではあるが、この種は光合成をしない従属栄養である。また、大量に発生すると赤潮の原因となることでも知られている。

現在まで、藻類の発光は渦鞭毛藻綱にのみ知られ、計11属が確認されているが、そのすべてが海産である。ただし渦鞭毛藻の発光は、季節や時刻で光ったり光らなかつたりするものや、同じ種でも光る系統と光らない系統がいたり、記載が非常に困難であるため正確なことは判っていないのが現状である (Hastings and Morin, 1991)。生物発光研究のフィールドでは *Lingulodinium polyedrum* (= *Gonyaulax polyedra*; 1989 まで) (図1) と *Pyrocystis lunula* (図2) (共に光合成種) がもっともよく研究されており、本項ではこれらの知見を中心に渦鞭毛藻の発光研究を紹介する。

発光の分子メカニズム

発光のメカニズムは、通常の生物発光と同様に「ルシフェリン (基質) - ルシフェラーゼ (酵素) 反応」である。酸素の存在下、ルシフェラーゼの触媒によりルシフェリンの 13² 位が酸化され、酸化型ルシフェリンが生じるときに青色光 (極大波長=474 nm) が放出される (スキーム1)。実際には、渦鞭毛藻に外的刺激が加わると反応が進行し、0.1秒以下の速いフラッシュとして光が観察される。

ルシフェラーゼ遺伝子は、*L. polyedrum* と *P.*



lunula の2種でクローニングされており、両者は高いホモロジーを有している。しかし、その他の遺伝子との明確なホモロジーが見られないことから、ルシフェラーゼ遺伝子は渦鞭毛藻類で独自に進化したものと考えられている (Okamoto et al., 2001)。分子量は約140kDaで、触媒活性ドメインが3つ繰り返した構造をしている。*L. polyedrum* で調べられた結果では、この触媒ドメインは単独でもルシフェラ - ゼ活性を有することが示されており、繰り返した構造は遺伝子のタンデムな重複に起因するものと推測される。

ルシフェリンは、*P. lunula* からの抽出・構造解析により、開環状テトラピロ - ル型の蛍光を持つ分子であることが明らかとなった (Nakamura et al., 1989)。側鎖絶対配置を含めた構造の類似性から、このルシフェリンはクロロフィルあるいはその関連化合物から生合成されるものと推定される。また *Noctiluca* 属、*Lingulodinium* 属、*Pyrocystis* 属などでルシフェリン - ルシフェラー

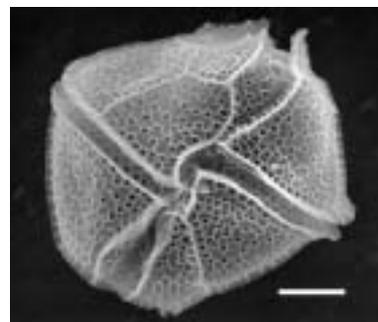


図1 *Lingulodinium polyedrum* の走査電子顕微鏡像。スケール=10μm (写真提供: 井上勲氏)

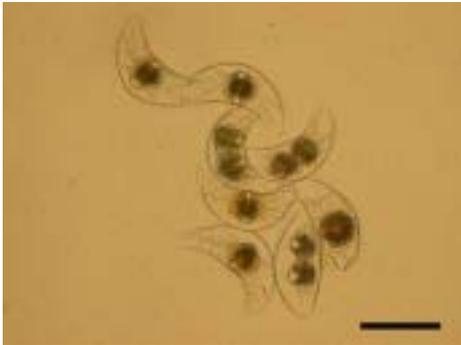


図2 *Pyrocystis lunula*の栄養細胞(不動性)。スケール=20 μ m

ゼ反応における交差反応が見られることから、ルシフェリン分子は渦鞭毛藻類で共通だと考えられる。

以上の結果は、渦鞭毛藻類の発光システムが単一起源であることを示唆する。すなわち、進化の過程で渦鞭毛藻は発光する能力を一度だけ獲得し、その後種分化が起こったのだろうと考えられる。

発光反応の制御

*L. polyedrum*と*P. lunula*がとりわけよく研究されている理由は、その発光が約24時間の「概日性リズム」(circadian biological clock)を持つためである(Hastings, 1989)。このリズムは微生物から哺乳動物まで広く見られる現象であるが、渦鞭毛藻の場合リズム自体が発光で観測できるので研究上つごうがよい。この発光周期性のために、渦鞭毛藻は夜だけ発光する。

*L. polyedrum*のルシフェリンとルシフェラーゼは、シンチロン(Scintillons)と呼ばれる細胞内顆粒中に共存しているが、ルシフェリンは分子量75kDaのルシフェリン結合タンパク質にトラップされ安定化しているため、そのままでは発光反応は進行しない(Morse and Mittag, 2000)。発光する際には、細胞内のpHが低下することによりルシフェリン結合蛋白質が不安定化し結合していたルシフェリンが遊離され、ルシフェラーゼとの反応が進行すると解釈されている。興

味深いことに、*Pyrocystis*属の発光にも概日性リズムは見られるが、ルシフェリン結合タンパク質の存在は確認されていない。また*L. polyedrum*と異なりルシフェリン量・ルシフェラーゼ量に昼夜の差が見られない。おそらくリズムに伴う発光の制御機構は、両者がそれぞれ独自に進化させたシステムだと推測される。

おわりに

そもそも渦鞭毛藻は、何のために光っているのだろうか？渦鞭毛藻が発光することの適応的意義については、補食者を驚かして身を守るため、あるいは自分が不味いことを敵にアピールする警告であるとも言われるが、明確なことは判っていない。発光生物には「何故光るのか」が分かっていないものも少なくないが、光ることに意味はなく、たまたま何かの代謝の副産物で発光が起きているだけだと考える人もいる。ただ、わざわざ概日性リズムでコントロールして夜だけ光る渦鞭毛藻の発光に生理的意味がないとは考えにくいのではないかと思う。

文献

- Hastings, J. W. and Morin, J. G. 1991. Bioluminescence. p. 131-170. In: C. L. Prosser(ed.) Neural and Integrative Animal Physiology. Wiley-Interscience, New York.
- Hastings, J. W. 1989. Chemistry, clones, and circadian control of the dinoflagellate bioluminescent system. *J. Biolumin. Chemilumin.* 4: 12-19.
- Morse, D. and Mittag, M. 2000. Dinoflagellate luciferin-binding protein. *Methods in Enzymology*, 305: 258-276.
- Nakamura, H., Kishi, Y., Shimomura, O., Morse, D. and Hastings, J. W. 1989. Structure of dinoflagellate luciferin and its enzymatic and nonenzymatic air-oxidation products. *J. Am. Chem. Soc.* 111: 360-364.
- Okamoto, O. K., Liu, L., Robertson, D. L. and Hastings J. W. 2001. Members of a dinoflagellate luciferase gene family differ in synonymous substitution rates. *Biochemistry* 40: 15862-15868.

(¹名古屋大学大学院生命農学研究所,²チッソ株式会社横浜研究所)