

## 光合成のようで光合成ではない光利用戦略

中島 悠

光合成, それは陸上植物や藻類, 細菌に至るまで, さまざまな生物が行う生命活動である. 光合成は生態系の一次生産を担い, 植物のバイオマス(≒クロロフィル量)は, 生物生産の目安とされる. たとえば, 熱帯雨林では生産力が高く, 砂漠では低い. あるいは海洋においては, 一般的に沿岸や高緯度の海域ではクロロフィル量が高い一方で, 太平洋の低緯度域などには非常にクロロフィルが少ない「海の砂漠」と呼ばれる海域が存在する. では, このような環境では, (光)エネルギーは注がれるのみで, 生物生産もないのだろうか? 答えはNOであり, 微生物型ロドプシンが鍵となる.

微生物型ロドプシンとは, 内部にレチナール色素を結合させた光受容タンパク質で, その特徴の類似性から, 我々動物の目にも存在するロドプシンと同じ名前を冠する. 微生物型ロドプシン(以降のロドプシンは微生物型を指す)の発見や, その応用面の詳細については, 本誌バイオミディアに掲載された「微生物型ロドプシンのもたらす新たな生物と光の関係とその応用」<sup>1)</sup>を参照されたい.

ロドプシンは, 高塩分環境(塩湖など)に生息する好塩古細菌から初めて発見された. これは, バクテリオロドプシン(BR)と呼ばれ, 光受容により細胞の内側から外側にプロトン(H<sup>+</sup>)を輸送(ポンプ)するという機能を有する. その後, 塩化物イオン(Cl<sup>-</sup>)をポンプするものや, 走光性に関わるセンサーとして機能するものが発見された. 約30年にわたりロドプシンは, このような好塩古細菌のみが持つと考えられてきたが, 2000年に海水を用いた網羅的な遺伝子解析により, 海洋細菌からもロドプシンが発見された. これはプロテオロドプシン(PR)と名付けられ, BRと同じH<sup>+</sup>ポンプである. さらに, PRは海洋表層に普遍的に存在しており, 表層に生息する原核生物の半数以上, 多い所で7~8割の個体がPRを持つとも言われる<sup>2)</sup>. また, 近年の遺伝子解析技術の発展により, 海洋や塩湖に限らず, 淡水湖や土壌, 植物の葉, 温泉など, さまざまな環境からロドプシンが発見されている. 系統的な分布の面では, 3ドメインすべて(原核生物では, 少なくとも20以上の門)と巨大ウイルスからロドプシンが見つかった. 機能については先述のもの以外に, 外向きのナトリウムイオン(Na<sup>+</sup>)ポンプや内向きのH<sup>+</sup>ポンプ, 硫酸イオン(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)ポンプも発見されている.

では, 多くの原核生物がロドプシンを持つ, その生理・生態的意義は何だろうか? H<sup>+</sup>ポンプの場合, 光受容により, 細胞の内外にH<sup>+</sup>濃度勾配を形成し, ATP合成や

鞭毛運動, その他輸送体を動かすことが可能となる(光合成と異なり, ロドプシンはイオン輸送のみで炭酸固定などは伴わない). 特に従属栄養の原核生物では, 光によるATP合成は大きなメリットとなるはずである. 実際, 海水程度の非常に貧栄養な培地で培養したPR保有細菌は, 光照射下では, 増殖の促進や長期の飢餓生存が可能となると報告されている<sup>3)</sup>. しかし光照射によって増殖が変化しない株も存在し<sup>3)</sup>, PR保有の生理的意義さえも謎は残る. 加えて, PRなどのH<sup>+</sup>ポンプ以外のロドプシンについては, 培養株を用いた研究の数が少なく, それらの生理・生態的意義も不明確である.

また, ロドプシン探索の過程でさまざまな培養株のゲノムが解析され, ロドプシンによる多様な光利用戦略が示唆されるようになってきた. たとえば, *Nonlabens marinus* S1-08<sup>T</sup>はPRの他, Na<sup>+</sup>ポンプとCl<sup>-</sup>ポンプも保有する<sup>4)</sup>. 外向きのNa<sup>+</sup>ポンプと内向きのCl<sup>-</sup>ポンプは, 形成される膜電位の方向だけでは違いがないとも考えられるが, 2つも保有するメリットはあるのだろうか. あるいはシアノバクテリアがロドプシンも保有する例も知られている<sup>5)</sup>. ロドプシンは主に青~緑色の波長を用いるが, 光合成とは異なる波長の光をうまく利用するような戦略が存在するのだろうか. 複数のロドプシンや, 光合成系とロドプシンが存在する「二刀流・三刀流」の光利用戦略がどのような生理的メリットをもたらすのかについても答えは出ていない.

このようにロドプシンは光エネルギーを用い, イオン濃度勾配を形成できる点では光合成のようなシステムであるが, より多様な系統に存在し, さまざまな機能を有する. 微生物生態学のロドプシン研究ではこれまで, 光合成と対比した環境中での存在割合の推定や, どのロドプシンがどのような系統に存在するのかといった「探索」が中心であった. 役者がおよそ出揃った今, 次に注目すべきは「なぜこんなにも多様なのか」という点だろう. モデル株に囚われることなく各系統や種の生き様に応じた研究が必要である.

- 1) 井上圭一: 生物工学, **97**, 616 (2019).
- 2) Fuhrman, J. A. et al.: *Nat. Rev. Microbiol.*, **6**, 488 (2008).
- 3) Pinhassi, J. et al.: *Microbiol. Mol. Bio. Rev.*, **80**, 929 (2016).
- 4) Yoshizawa, S. et al.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **111**, 6732 (2014).
- 5) Hasemi, T. et al.: *J. Biol. Chem.*, **291**, 355 (2016).