

系外惑星における光合成

滝澤 謙 二

〈アストロバイオロジーセンター 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈基礎生物学研究所 〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町字西郷中 38〉

e-mail: kenji-t@nibb.ac.jp



アストロバイオロジーセンター（ABC）設立の翌年（2016年）に設置された宇宙生命探査プロジェクト室では、系外惑星の環境に適応進化する生物の予測と、それらが発する観測可能なシグナルの検証を主要な目的の一つとしている。地球を例にとって生命探査の指標を求める場合、光合成を行う植物が発する光学的なシグナルが重要となる。本稿では植物の反射スペクトルに現れる特徴的なパターン（レッドエッジ）を中心に、光合成という機能に根差した普遍的な性質と、惑星環境に応じて変化し得る性質について紹介する。

1. なぜ光合成生物なのか？

宇宙には我々が想像もできない多様な生物が存在しうが、地球と同じような生物しか存在しない可能性もある。どちらが正しいか明らかにすることはアストロバイオロジーの目指すところであるが、現時点では唯一確認された地球の生物を典型例と仮定しておく。現存する生物に限ってもその形態・生理機能は極めて多様であり、系外惑星の環境に応じてどの生物が適応可能か推測することができる。

生物が存在可能な惑星を「中心星から適度な距離にあり液体の水が存在する惑星」と定義する場合、光と水と二酸化炭素があれば生育可能な光合成生物の存在が有望である。極域から砂漠まで、光の届く場所であれば地球上のあらゆる場所で光合成生物を見つけることができる。光合成により発生する酸素は太陽系外生命探査における重要な指標となり、ほかにも遠隔から観測できる光学的な性質を有する。生物の適応進化を予測するうえで惑星環境の情報が必須となるが、大気下の地表や海洋の環境については不明な点が多い。光合成

生物の場合、進化を決める環境要因として最も重要な光について、中心星の観測と惑星大気からの比較的正確な情報が得られる。存在可能性・観測可能性の高さに加え、予測可能性が高い光合成生物はアストロバイオロジー研究の材料として適している。

筆者は2017年にABCに着任して以来、それまで行ってきた光合成生物の環境適応研究を発展させる形で系外惑星環境への適応進化の予測と生命指標の検証を進めてきた。本稿では筆者と当室に在籍した光合成研究者による約10年間の研究成果を紹介する。

2. 赤色矮星の光を利用する植物

植物の反射スペクトル

地球を宇宙から観測した場合、大気の透過スペクトルにみられる酸素のほかに、地表面の反射スペクトルの中に陸上植生に特有の特徴（レッドエッジ：可視光と赤外線における反射率のギャップ。図3参照）を見つけることができる。より容易に識別できる酸素は非生物的に生じる [1] 可能性があるため、宇宙生命探査では酸素とレッドエッジ

の両方を観測することが望ましい。光合成に利用する波長と利用しない波長の間に反射率の顕著な違いが生じる現象は太陽系外惑星に植物が進化する場合においても普遍的に生じると考えられるが、光合成利用波長が異なる場合にはその波長も異なるため、観測に先立って検証しておく必要がある。

赤色矮星の惑星における光環境と光合成進化

宇宙生命探査の初期の観測対象となる系外惑星は可視光より赤外線を多く照射する赤色矮星まわりにあるため、光合成には豊富な赤外線が利用される [2] と考えられてきた。筆者らは太陽系近傍にあるしし座AD星のまわりに地球と同様の惑星が存在すると仮定した場合の陸上と水中の光環境を推定し、地球と比較した (図1)。

赤外線は水による減衰が大きいいため、水深1m以上では赤色矮星の惑星でもほぼ可視光しか得られないことから、進化の初期段階で水中に現れる光合成生物は地球と同様に可視光を利用すると考えられる。一方水の影響を受けない場合は波長700 nm以上の赤外線が豊富でありこれを利用した方が有利である。酸素発生型の光合成反応は水を分解するために必要なエネルギー (1.23 V) を得るために2段階の光励起による電荷分離を必要とするが、赤外線一光子あたりのエネルギーは可視光より低いため、可視光と赤外線の両方を利用する反応 [3] が最も有利であると考えられる。

可視光利用から赤外線利用への進化

光合成生物は水中から陸上へ進化する過程で浅瀬を通過するが、図2に示すようにこの領域では僅かな水深の違いにより光環境が急激に変化する。浅い水域に生息する緑藻はこうした光環境の変化に対応するために集光アンテナとして機能する色素タンパク質を二つの電荷分離を担う色素タンパク質の間で迅速に移動させる仕組み (ステート遷移 [4]) を発達させている。赤外線豊富な環境に藻類を置いた場合を想定してこの適応機構を検証したところ、可視光と赤外線の両方を利用する場合には励起バランスを維持するために必要な

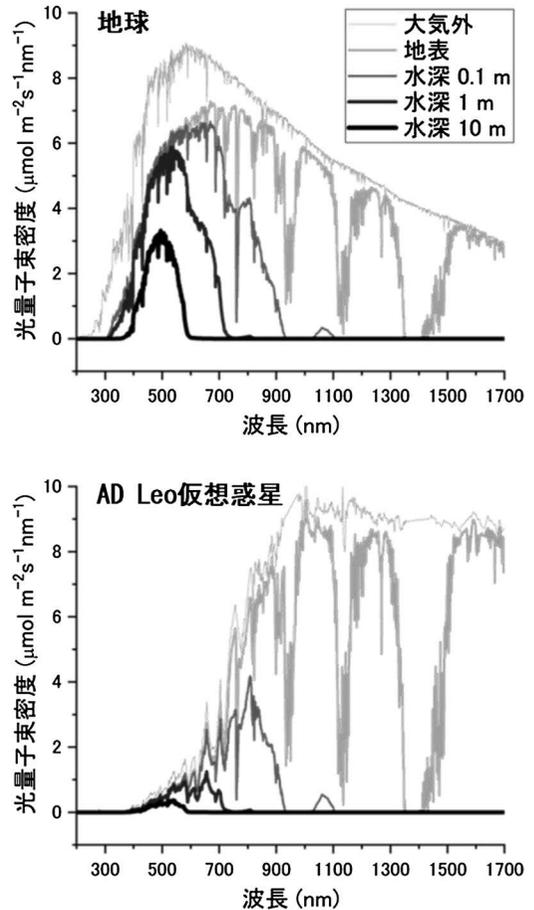


図1 地球 (上) と太陽系外惑星 (下) における光環境. 大気上端での入射スペクトル, 大気の透過率, 水の透過率から地表と水中の異なる深度に到達する光のスペクトルを推定した。

集光アンテナの移動量が多すぎるため十分に機能しないと判断された。赤外線が豊富な惑星であっても最初に陸上に出現する植物は地球と同様に可視光を利用し、レッドエッジの位置も同じであると考えられる。この研究成果は2017年にScientific Reports誌に発表された [5]。

陸上での赤外線利用への進化

陸上において赤外線を利用する能力を獲得するためにはかなり長い期間を要すると考えられるが、不可能ではない。小杉真貴子氏 (2019-2022 年在籍) らは極域の過酷な環境下に生育する緑藻

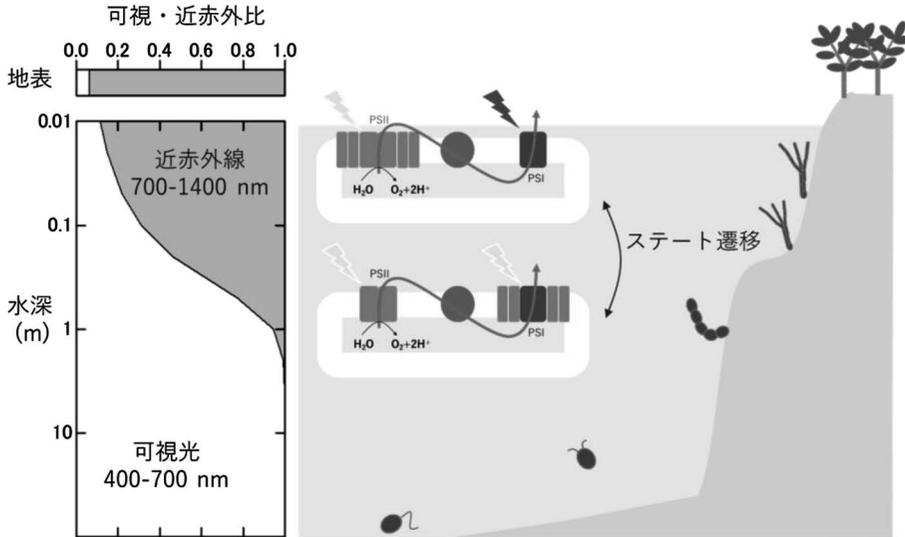


図2 赤色矮星まわりの地球類似惑星における光環境と光合成生物の適応進化。水深変化に伴う可視光と近赤外線の割合の変化を左に示す。初期の光合成生物（単細胞藻類）は強い紫外線避けるために水中深くに存在し、オゾン層の形成と共に上へと生息域を広げる。多細胞化し乾燥耐性を獲得したものが陸上植物に進化する。図の中央に光合成の集光に関わる膜タンパク質が光環境変化により可逆的に移動する仕組み（状態遷移）を簡略に示す。

のナンキョクカワノリが特殊な集光アンテナを形成することで光合成利用波長を750 nm程度まで拡大することを明らかにした [6]。この研究成果については次号に小杉氏の詳しい説明がある。

緑藻よりも進化的に古いシアノバクテリアの中には光合成反応中心のクロロフィルを長波長吸収可能な種類に置き換えることでより効率的な赤外線利用を可能にしているが、800 nm以上の赤外線を利用する酸素発生型の光合成は見つかっていない。生物進化による長波長利用の限界がどこにあるのか、更なる検証が必要である。

3. 海洋惑星の植物

海洋惑星

水の存在は生物にとって必須であると考えられるが、地球よりも水が豊富な海洋惑星では、仮に地球より生命が誕生する確率が高かったとしても、大陸が存在しないため陸上植物が進化し得ない。筆者らは陸上植生に代わる生命探査の指標として水面に浮遊する植物の反射光を検出する可能

性を検証した。

浮水葉の形態は種によって大きく異なるものの、一般的な植物と同等以上に顕著なレッドエッジを示した。これは葉を水面に浮かせるための空気を多く含んだ組織構造と撥水性を高めるための表皮構造に由来する。葉を水に浮かべた状態での測定では、乾いた状態より若干反射率が低下するものの、水中に沈む植物に比べて高い反射率を維持した (図3)。

自然界において浮遊植生はしばしば湖沼の全域を覆うように繁茂するが、陸上植生と比べて垂直方向への伸長がなく、葉の重なりが少ないため、森林などと比べるとレッドエッジが小さい。比較的大きな湖では植生は湖岸沿いに限られ (図4上)、また日本などの温帯域では冬季に完全に消滅する。このため、湖全体を一つの海洋惑星と仮定して1ピクセルに平均化した反射率から浮草を検出するのは困難である。

村上葵氏 (2022-2025年博士課程学生) は浮遊植生のリモート検出において障害となる季節変動

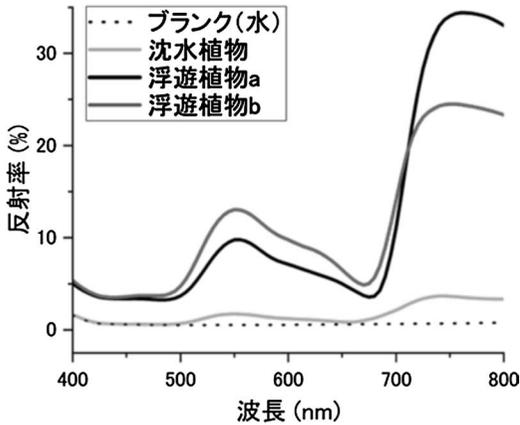


図3 水を張った容器に入れた沈水植物 (*Egeria densa*) と浮遊植物 (a: *Azolla filiculoides*, b: *Salvinia molesta*) の反射率スペクトル. 浮遊植物は波長700 nm付近で反射率が急激に変化する「レッドエッジ」が顕著. 点線は植物がない水面の反射率.

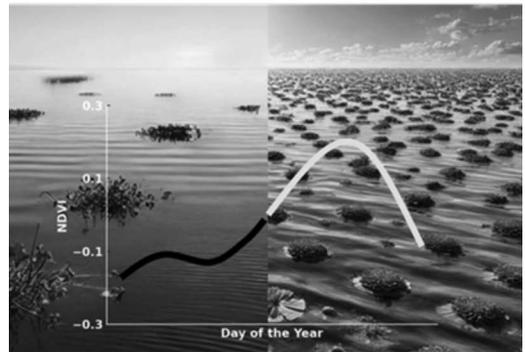
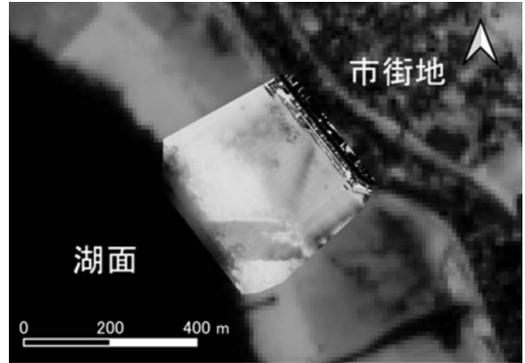


図4 浮遊植生のリモートセンシングと季節変化. 上図は諏訪湖の衛星画像(2022.7.29)に同日撮影のドローン撮影画像(中央)を重ねた. 正規化植生指数(NDVI)が高いヒシ群落が白い帯として映る. 下図は諏訪湖全体の5年間のNDVI変化から抽出された季節変動スペクトル. 背景は冬季と夏季の水圏における浮遊植物のイメージ図.

が逆に検出の指標に利用できるのではないかと仮定し、日本全国148カ所の湖沼を対象とした大規模な解析を行った。5年間分の衛星リモートセンシング (Sentinel-2: ESA) データから湖沼毎の近赤外線反射率と赤色光反射率を抽出し、それらの差分を合計値で割った値 (正規化植生指数、NDVI) によりレッドエッジを評価した。機械学習によりNDVIの周年変化を解析したところ、浮遊植生に特徴的な季節変動が確認された (図4下)。植生が陸上ではなく水上に形成された場合、植生自体のレッドエッジは減少するものの、水面の反射率はより低く安定しているため、背景のノイズは陸地に比べて少ない。植生の被覆が少なくてもNDVIは比較的高い値を示すが、完全に消失すると急激に低下しマイナスの値を取る。

プラスとマイナスの間を行き来するNDVIの季節変動は気象や雲による影響にも比較的頑強であるため、将来の系外惑星における生命探査の指標として期待できる。ただし、地球で見られる浮遊植物は全て陸上植物の環境適応の一形態であるため、陸地が存在しない惑星においても水中から水

上への進化が可能であるか検証を進める必要がある。これらの研究成果は2025年に *Astrobiology* 誌に発表された [7]。

4. 蛍光検出

植物の反射スペクトルに現れる赤外線の反射は植物の組織構造に由来するため、コケ植物や藻類など構造が未発達な植物ではレッドエッジが小さい。非酸素発生型の光合成細菌はレッドエッジが小さいだけでなく、酸素の放出もない。硫化水素などを電子供与体とする光合成では、水分解に比べて必要とするエネルギーが少ないため、赤外線

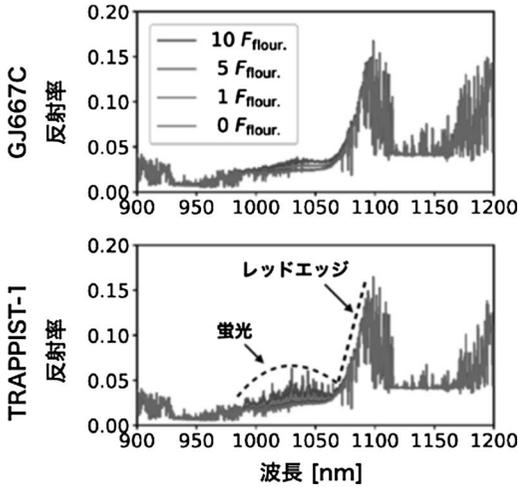


図5 バクテリオクロロフィルを有する植物が二つの赤色矮星まわりの地球型惑星に茂した場合に観測される反射率スペクトルの予測。地球の陸上植生と同等の蛍光を発する場合 ($1 F_{\text{flour}}$)、1040 nm 付近で観測される反射率が僅かに増加する。地球の植物の5-10倍の蛍光を発する生物が存在する場合 ($5 F_{\text{flour}}$, $10 F_{\text{flour}}$) より顕著な増加が期待できる。多細胞の植物が進化しない場合レッドエッジは失われるが、蛍光由来のシグナルは残る。

利用の観点から言えば酸素発生型の光合成よりも有利である。

そこで、小松勇氏 (2017-2025 年在籍) が中心となり、光合成色素を有する生物に普遍的にみられる蛍光検出の可能性が検証された [8]。光合成反応はエネルギーの変換過程で利用されなかった一部のエネルギーが蛍光として放出されることから、光合成の基礎研究では蛍光測定が伝統的に行われており、近年では地球のリモートセンシングにより植生由来の蛍光観測が実証されている。小松らは2つのM型矮星 (GJ667C、TRAPPIST-1) の周りに地球型惑星をおいた時に惑星スペクトルに現れる蛍光をシミュレーションした。その結果、1 nm 付近に蛍光を発するバクテリオクロロフィルを持つ生物が地球の植物より数倍強く発光し、惑星の雲や大気による影響が軽微な場合には、将来の観測において検出が期待できるケース

があることが示された (図5)。

5. 今後の展望

ABCに宇宙生命探査プロジェクト室が設立されてから生物と天文の垣根を超えた研究交流が活性化され、生命探査の指標についてそれまでの定説とは異なる提言が多くなされた。本稿で紹介した研究成果もその議論の結果である。天文観測の進展に伴い様々な系外惑星の特徴が明らかになりつつある中、生物研究者には個別の惑星環境に対応した生物の予測が求められている。次の10年間には、光合成研究に限らず、様々な生物分野からABCの研究への参加が求められる。また、第一線級の生物研究者を周旋するだけでなく、アストロバイオロジーを志す学生を研究者へ育成する体制を確立する必要がある。宇宙生命探査の候補惑星を発見、選定するまでの過程は天文寄りの研究者が主となり、生物寄りの研究は従の立場に留まるが、実際に生物の痕跡を発見し検証するためには生物を熟知したアストロバイオロジー研究者が必要となる。

謝辞

本稿は天文月報のABC特集の一環として執筆されました。編集委員の日下部展彦氏、センター長の田村元秀氏に感謝します。ここで取り上げた研究成果はABC内外の多くの方との共同研究の結果です。ありがとうございました。

参考文献

- [1] Narita, N., et al., 2015, *Sci. Rep.*, 5, 13977
- [2] Kiang, N. Y., et al., 2007, *Astrobiology*, 7, 252
- [3] Blankenship, R. E., et al., 2011, *Science*, 332, 805
- [4] Pan, X., et al., 2021, *Nat. Plants.*, 7, 1119
- [5] Takizawa, K., et al., 2017, *Sci. Rep.*, 7, 7561
- [6] Kosugi, M., et al., 2023, *Nat. Commun.*, 14, 730
- [7] Murakami, A., et al., 2025, *Astrobiology*, 25, 3, 209
- [8] Komatsu, Y., et al., 2023, *ApJ*, 942, 57

Photosynthesis on Exoplanets

Kenji TAKIZAWA

*Astrobiology Center, 2-21-1 Osawa, Mitaka,
Tokyo 181-8588, Japan*

*National Institute for Basic Biology, NINS, 38
Nishigonaka, Myodaiji, Okazaki, Aichi 444-8585,
Japan*

Abstract: The Exo-Life Search Project Office, established in 2016, the year after the establishment of the Astrobiology Center (ABC), aims to predict organisms that adapt and evolve to exoplanets' environment and validate the biosignatures they emit. Taking the Earth as an example, the optical signals emitted by photosynthetic organisms are important for searching for life. This article focuses on the characteristic reflection spectrum of plants named 'red edge.' The universal properties of red edge that are rooted in the function of photosynthesis and the flexible properties that can change depending on the planetary environment are described.