

第5期 第4回創発セミナー

生命の根源を支える太陽エネルギー、光合成研究の現状と将来

大隅基礎科学創成財団 理事
大谷清

大隅基礎科学創成財団は2022年2月17日午後4時から、Zoom形式で第4回創発セミナーを開きました。「生命の根源を支える太陽エネルギー、光合成研究の現状と将来」を共通テーマにまず東北大学教授 彦坂幸毅氏による「光合成のリモートセンシング」、続いて東京大学名誉教授で当財団理事でもある池内昌彦氏による「光合成微生物の世界」と題した講演のあと、約70人のオンライン参加者との間で質疑応答があり、午後6時に閉会しました。以下にその要旨を報告します。

光合成のリモートセンシング

東北大学大学院生命科学研究科教授
彦坂幸毅

どんな森林や生態系を作れば、主要な温室効果ガスであるCO₂の吸収を最大化できるのだろうか。それには地球全体の生態系のCO₂吸収量(GPP)と地球環境の変化による吸収量の変化を正確に測定する必要がある。我々は衛星を使ったリモートセンシングでこのテーマを追求している。



我々が生きているのは植物の光合成のおかげである。光合成は植物が光エネルギーを利用してCO₂を吸収し、炭水化物を合成する回路で、光合成によって生産された糖は食物網を通してヒトを含むすべての生物のエネルギー源となり、我々の生活を支えている。また、植物はCO₂を吸収することによって気候変動を緩和する重要な役割も持っている。

植物が光合成によって吸収するCO₂の量には不明点が多い。これまで発表された研究論文でも、推定された吸収量には大きなばらつきがある。近年、地球スケールで吸収量を把握するにあたり、人工衛星が観測する光学的な指標を用いた精度の高い推定方法が提案されている。

光合成の過程ではクロロフィル(葉緑素)という色素が光を吸収し、そのエネルギーを光合成系に利用する役割を持っているが、吸収したすべてのエネルギーを光合成のみに利用することはできず、一部は熱として放散(熱放散)されたり、再び光となって放出される。この再放出される光が「クロロフィル蛍光」である。

反射光とクロロフィル蛍光を区別する方法には、古くは波長フィルターが使われていた。1990年代になると、励起光に「クセ」をつけて蛍光だけを分離するパルス変調法(PAM)が利用されてきたが、これらの方法は地球規模での観測には使えない。そこで利用されているのが特定の波長で光の強度が大きく下がるフ라운ホーファー線を利用した方法である。

日本が2009年に打ち上げた温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」は高精度な分光光度計を搭載しており、このクロロフィル蛍光を検出できる。2011年にNASAが発表した論文ではクロロフィル蛍光とGPPに高い相関がみられることがわかり、クロロフィル蛍光は光合成速度の指標として多くの研究において利用されてきた。

クロロフィル蛍光と光合成速度の間の相関は、ストレス回避機構である熱放散の機能を反映している。光合成系は低温や乾燥といったストレスに弱く、強いストレスを受けると光合成速度が落ちる。ちょうどダムに水がたまりすぎると余分な水を放水するように、植物も強いストレスを

受けると熱放散の方へエネルギーを多く分配する。熱放散は過剰なエネルギーが植物の体内に蓄積しないようにする、エネルギーの安全弁のような働きをしている。熱放散がはたらくと、光合成や蛍光に流れるエネルギーが減るため、蛍光強度が下がれば光合成も下がっていると推定できる。

しかし、演者らは、ストレスがさらに強くなり、光合成系に甚大な障害が起こるとクロロフィル蛍光と光合成速度の関係が正から負に変わってしまうことを指摘した。これによるエラーを防ぐため、新たな観測方法を提案した。

熱放散については「光化学反射指数 (PRI)」によって評価することができる。PRI とは植物が反射する波長 531 nm (ナノメートル) の緑色の光の強さを指標化したものである。植物は熱放散を増やす際にカロテノイド色素の一種であるキサントフィルを、非熱放散型 (ピオラキサンチン) から熱放散型 (ゼアキサンチン) に変換する。非熱放散型と熱放散型とでは 531 nm の光の反射率が異なるため、熱放散へのエネルギー分配を推定できる。

我々は 2019 年にクロロフィル蛍光と PRI を併用することにより、熱放散へのエネルギー分配を推定し、光合成速度の推定に利用する手法を開発した。光合成、クロロフィル蛍光、熱放散、PRI の関係を生化学的な理論で数式化し、計算できるようにした。現在、2018 年に打ち上げられた日本の温室効果ガス観測技術衛星「いぶき 2 号」から観測データをとりながら、光合成速度を精度よく推定する研究を続けている。衛星を使ったサイエンスで植物の光合成機能の研究を進め、地球環境問題に貢献したい、というのがわれわれの願いである。

注

GPP : Gross Primary Production 植物の光合成によって生産される有機物質の総量

PAM : Pulse Amplitude Modulation パルス変調した光によって励起すると蛍光もパルス変調されるため周囲光と区別できる

ブラウンホーファー線: 太陽光などの連続した光のスペクトルにおいて所々生じている暗線。大気中の Na、Mg、Fe などが特定の波長だけを吸収するので生じる。ドイツの物理学者 Joseph von Fraunhofer (1787-1826) が発見した。

光合成速度: 一定時間当たりの光合成の量

カロテノイド色素: 動植物に広く存在する黄色または赤色の色素

PRI : Photochemical Reflectance Index

光合成微生物の世界

東京大学名誉教授、大隅基礎科学創成財団理事
池内昌彦

地球上の生物の存在を支える光合成には陸上植物の貢献が大きいことはよく知られているが、水圏の藻類やシアノバクテリア (藍藻) の貢献も少なくない。地球規模での光合成の基礎生産量を見ると、全体の 45% が海で生産されている。中でもシアノバクテリアが 10%、珪藻類が 30-35% と、生物全体の 1% に過ぎない存在の光合成微生物が陸上の植生を含む地球全体の光合成量のおよそ半分弱を担っている。

光合成微生物とは光合成機能を持つ微生物で、シアノバクテリア、微細藻類、光合成細菌の 3 つからなる。藻類はクロロフィル (葉緑体) を持ち、水から酸素を発生させて固定する。シアノバクテリアは窒素も固定する。光合成細菌は光化学系を一つだけ持ち、酸素は発生させない。



光合成微生物の中でもシアノバクテリアは地球上で最も多い光合成生物であり、その多様性や遺伝子改変などの可塑性も大きい。我々はその光合成装置を解明し、人間にとって有用な物質生産や遺伝子資源に結び付けられないかを研究してきた。

シアノバクテリアは海洋の中だけでなく氷河にも存在し、他の生物や泥を集めて太陽の光を吸収、真っ白な氷河に点々と黒い穴を作る。砂漠にもいる。衛星写真でイスラエルとエジプトの国境を見ると緑化が進んだイスラエル側とそうでないエジプト側との間で明瞭な線が識別できる。これは生物表土による緑化がイスラエル側で進み、砂漠表面下1ミリメートル (mm) あたりに存在するシアノバクテリアが土壌を固定しているからだ。

好熱性のシアノバクテリアが世界各地の温泉 (50–72°C) に生息している。私が調査した長野県中房温泉では、興味深い光合成微生物の集団マットが層をなして棲み分けている。最近になって脊椎動物の光受容器細胞に存在する色素である「ロドプシン」様の色素を持ったペラギバクターと呼ぶバクテリアなどが発見され、第4の光合成微生物として注目されている。

シアノバクテリアは前述した通り酸素発生型の光合成をする原核生物で、植物の葉緑体の起源ともなった生物だ。その光合成の反応中心は植物と同じ光学系複合体だが、光を捕集するアンテナは独自のタンパク質複合体だ。シアノバクテリアの多くの種では「補色順化」の現象が見られる。これは周囲の光環境の波長成分の変化を感知し、2種類のタンパク質の生合成量を調節する高度なシステムで、緑色光と赤色光のバランスを感知して、緑色光の下では緑色光を用いて光合成を行い、赤色光の下では赤色光を用いて効率よく光合成を行う。

こうした光受容機構の実態は長い間解明されていなかったが、1996年に補色順化の遺伝子が同定され、2008年には我々の研究室が全ゲノムの解読されたシアノバクテリアを使って制御因子を探索し、光受容体の同定とその生化学的解析に成功した。2011年には植物の光合成を担う光化学系Ⅱ (photosystemⅡ) の結晶の立体構造を岡山大学の沈建仁教授が解明し、光合成における水分解機構解析の基礎となる発見として世界的に注目された。

このように光合成機構の解明が進んだことで、これを物質生産に応用する研究が進んでいる。我々の研究室でも今、世界で最も使用されている糖アルコールの「ソルビトール」の生産系の構築を進めている。しかし微生物による光合成の課題は、植物は成長が止まっても光合成は継続するのに、微生物は増殖が止まると光合成も止まることだ。これを変えることが今後の研究課題だ。シアノバクテリアでいえば生産に適した親株を選定し、分子育種によって光合成効率を改善したり細胞老化を抑制して生産の維持につなげていく、いわば光合成微生物を「家畜化」する戦略が問われている。

注

光化学系 : photosystem 光合成色素分子と電子伝達成分を結合したタンパク質複合体

光化学系Ⅰ : 光エネルギーを利用して二酸化炭素を固定するために必要な還元力を作る複数の光学系タンパク質複合体の一つ

光化学系Ⅱ : 光エネルギーを利用して水を分解し酸素を発生させる複数の光化学系タンパク質複合体の一つ

補色順化 : Complementary Chromatic Acclimation 与えた光質の光を効率よく吸収するため、見かけ上は補色に見える分光特性を持つ色素タンパク質が相補的に発現することからその名前がある。