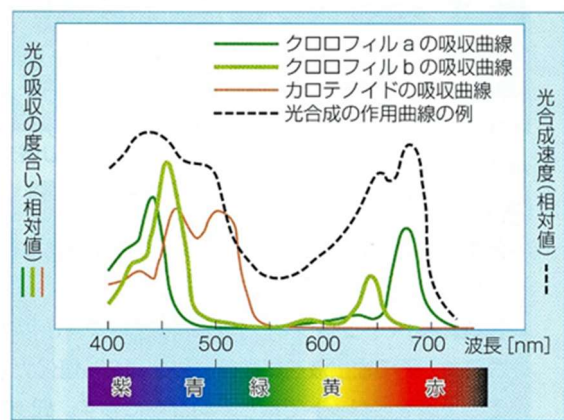


光合成

前号の地球の熱収支で紹介したように、ほとんどの生物のエネルギー源は太陽エネルギーからといえます。しかし、太陽放射エネルギーを直接受け取ることができるのは植物だけです。動物は有機物を材料にして別の有機物はつくり出せませんが、二酸化炭素や酸素などの無機物から有機物をつくり出すことはできません。植物が太陽放射エネルギーを受け取る方法の最大の方法は光合成です。

(1) 植物が受け取る太陽放射

陸上植物は波長 400–700 nm の青色～赤色の領域の光、つまり可視光領域の光を吸収して光合成を行います。会報 no.23 の図 1 では黄色い矢印の一部を吸収しています。植物細胞の中の葉緑体の中には、クロロフィルやカロテノイドといった色素が豊富に含まれており、太陽放射エネルギーをそれらの色素で吸収しています。これらの色素が吸収する光の波長は色素によって異なります。図 1 は光の波長と吸収の割合との関係を示したもので、吸収曲線と呼びます。この図から、クロロフィルは青と赤の光を、カロテノイドは青の光を強く吸収することがわかります。また、図中の作用曲線は、いろいろな波長の光が光合成にどれくらい有効かを示しています。それからは、緑や黄色以外の光が光合成に効果的であることがわかります（作用曲線は生物によって異なります）。700–800 nm の領域の光は遠赤色光と呼ばれ、単独では光合成による O₂ 発生や CO₂ 固定などには働きませんが、植物の発生や形態形成に大きく作用します。



光合成色素の吸収曲線と光合成の作用曲線の例

図 1 光合成色素の吸収曲線 (浅島ほか, 2012)

(2) 葉の組織と細胞

葉は表皮・葉肉・維管束という 3 つの組織から構成されています。表皮は葉の表面をつくり、一番上にはクチクラ層（水の蒸散を防ぎ、病原菌の侵入を物理的に阻止）が、その下には表皮の本体があり、所々に気孔が空いています。葉肉は表側の柵状組織と裏側の海綿状組織に分かれています。柵状組織は細胞が綺麗に縦方向に整然と並んでおり日光を受けやすく（光合成の

効率がよく）をするために、葉緑体の数も多い部分です（そのため一般に濃い色に見えます）。海綿状組織は名の通り隙間の多い構造になっており、気孔に繋がっていて、取り込まれた二酸化炭素が葉の

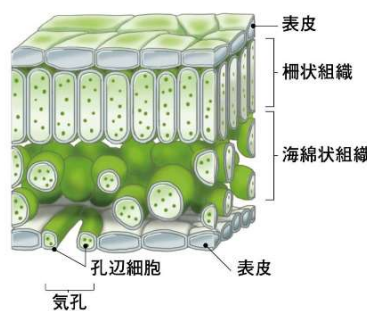


図 2 葉の模式断面 URL1

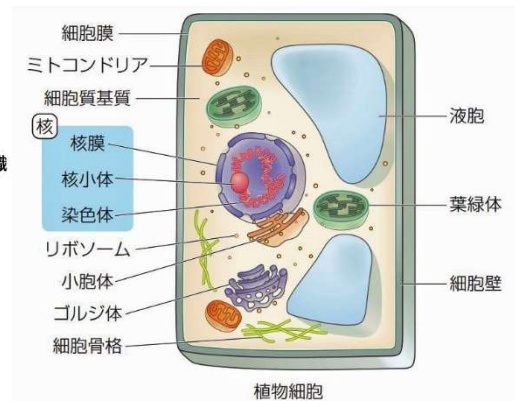


図 3 植物細胞の模式図 URL2

効率がよく）をするために、葉緑体の数も多い部分です（そのため一般に濃い色に見えます）。海綿状組織は名の通り隙間の多い構造になっており、気孔に繋がっていて、取り込まれた二酸化炭素が葉の

隔々に行き渡ります。柵状組織と比べると葉緑体の数がやや少なめで、細胞の数も少ないので色が薄く見えます。

図3は植物細胞の模式図です。動物細胞と大きく違うところは、細胞壁（主要な構成成分はセルロース）があることと、葉緑体を細胞内に含んでいることです。細胞の中の細胞小器官には、それぞれの働きがありますが、今回は葉緑体の存在を見ていただくだけにとどめます。

(3) 葉緑体(chloroplast)

光合成が行われるのは細胞小器官の一つである葉緑体で、黄色のカロテノイドや多量のクロロフィルを含むので一般的には緑色に見えます。葉緑体は細胞内に含まれる数も、大きさも形も様々ですが、平均的には図4のような回転楕円体状をしています。葉緑体は、全透性の外膜と半透性の内膜の2枚の膜で囲まれていいます。内膜の内部をストロマと呼び、高濃度の酵素、DNA、リボソーム（タンパク質を合成）、そして幾重にも折りたたまれた膜で囲まれたチラコイドがあります。チラコイドは円盤状で、積み重なっています。チラコイド膜は光合成の主要な舞台の1つで、主に糖脂質からできており、ストロマと呼ばれる葉緑体の水性の部分に浮遊しています。チラコイド膜に囲まれた内側の水性の部分は内腔（チラコイドルーメン）と呼ばれます。葉緑体は光の強弱に反応して細胞内を移動でき、強光下では光を避け、弱光下では光を捕集するように配置を変えます。

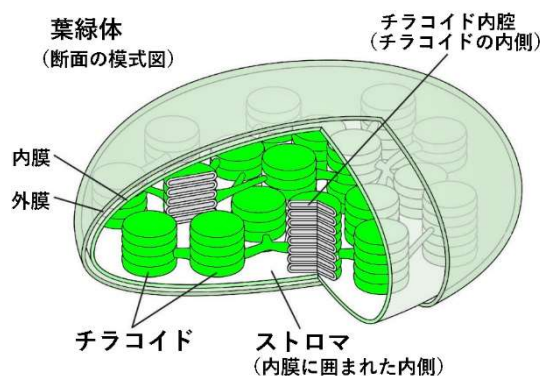


図4 葉緑体の構造 URL3を改

(4) 光合成

光合成はとても複雑な反応です。ここでは高校の生物の教科書などを参考にできるだけ簡潔にまとめてみます。

光合成の反応は葉緑体のチラコイドにおける光が直接関係する反応と、ストロマにおける光が直接関係しない反応の2段階に分けられます(図5)。第一段階は光エネルギーを受け取ることによって起こる光化学系と呼ばれる反応で、チラコイド膜上で起こる電子伝達です。その時に、 H_2O の分解が起こり、 O_2 が生じます。この反応でATPやNADPHが作られます。第二の段階はストロマに含まれる酵素によって起こる炭酸同化の反応で、カルビン・ベンソン回路と呼ばれます。第一段階で作られたATPのエネルギーとNADPHの還元力を用いて、二酸化炭素が糖に取り込まれます。光合成で登場する物質は、とても複雑な化学組成を持ち、その名称が長くなるため頭文字を使った記号で良く説明されます。

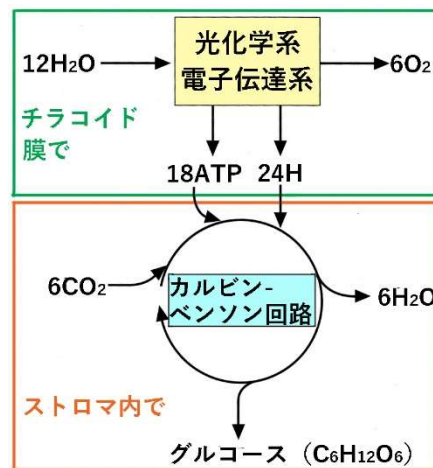


図5 光合成 (柵内ほか, 2006を改)

※ATP (アデノシン三リン酸) は、アデノシンという物質に3つのリン酸基(P)が結合しています(図6)。ATPは、生物体内の全ての化学変化とエネルギー変換の時にエネルギーを供給するために

すべての生物が使用する化合物です。図6の左側のある3つのリン酸が取れるごとに大きなエネルギーが解放され、それが各種の生命活動のエネルギーとして利用されます。

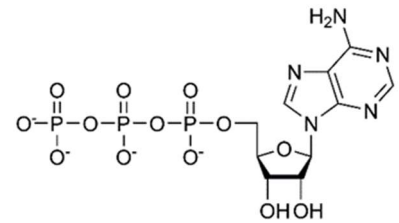


図6 ATP

※**NADPH** : NADPHは脱水素酵素(物質から水素を引き抜く酵素)が働く手助け(補酵素といいます)として、水素と電子を受け取っています。光合成では、水素を原子の形ではなく、水素イオン(H^+)と電子(e^-)の部分に分けて運びます。その運び屋がNADPHです。

光合成の過程で、働きによるまとまりを光化学系といいます。これはタンパク質とクロロフィルなどの色素の複合体で、光化学系I、IIと呼ばれる2つあります。これらはチラコイド膜に埋め込まれています。図7が第一段階の反応を示しています。反応は図の左から右へと移ります。

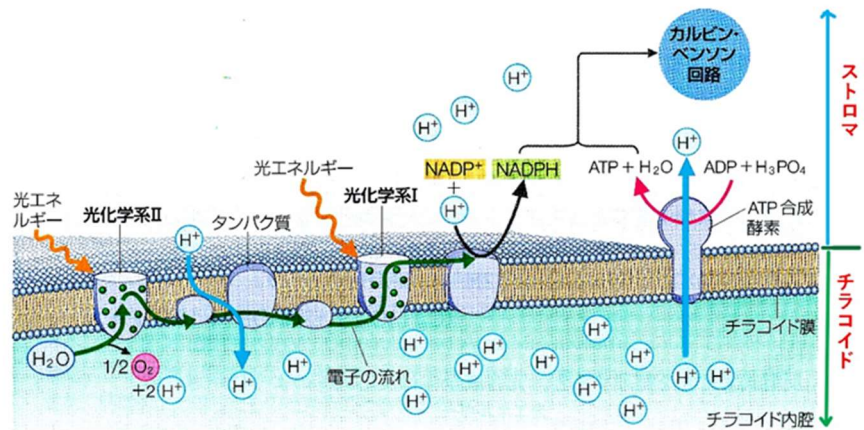


図7 第一段階の反応(浅島誠ほか, 2012を改)

光化学系IIの反応を行うクロロフィルやタンパク質の複合体に光が当たると、エネルギーを吸収したクロロフィルが活性化(励起)されて、高エネルギーの電子を放出します。活性化したクロロフィルは一時的に電子が少ない状態になりますが、すぐにチラコイド内にある水分子を分解して、そこから不足分の電子を引き抜いて自分のものにします(図の左端)。水分子の分解によって生じた H^+ と酸素のうち、 H^+ はチラコイド内腔に蓄積し、酸素は大気中に放出されます。光合成は二酸化炭素を吸って酸素を出すというよりは、デンプン合成のときに余った酸素を外に捨てているといったほうがよさそうです。

一方、光化学系IIのクロロフィルから放出された電子は、チラコイド膜に埋まっているタンパク質の間を伝達されながら次第にエネルギーを放出していき、このエネルギーを使って、ストロマから多数の H^+ がチラコイドの中へと運び込まれます。こうしてチラコイドの内部は H^+ が大量に蓄積された状態になります。水分子の分解と、チラコイド膜上における電子伝達によって蓄積した H^+ がストロマ側に移動して濃度差を解消するときに、ATPが形成されます(このATP合成は光エネルギーをもとに行われるので光リン酸化と呼ばれます)。ATPを合成するために一度エネルギーを放出した電子は、次に光化学系Iの反応を行うクロロフィルにとタンパク質の複合体に渡され、再び光エネルギーを受けて活性化します。そしてストロマにある H^+ と結合して高エネルギーを持つ H が生成され、第二段階のカルビン・ベンソン回路に使われます。このように、光化学系IIと光化学系Iの間を電子が受け渡される過程は電子伝達とも呼ばれます。

カルビン・ベンソン回路は図8のように多くの中間産物を経る複雑な反応系で、ATPと H のエネルギーを利用して大気中の二酸化炭素からグルコースなどの有機物を作り出します。まず、ルビス

コ*という酵素によって、CO₂がC5化合物のRuBPと結合します（CO₂の固定）。すると、C6化合物になり、すぐに2分子のC3化合物であるPGAになります。PGAは、第一段階の反応で生成されたATPとNADPH+H⁺によってGAPと水へと変化します。GAPはATPのエネルギーを使うことでグルコース（C₆H₁₂O₆）が生成されます。PGAからは何段階かの反応を経て初めに使われたC5化合物が再生産され、炭酸同化の反応経路は循環しています。

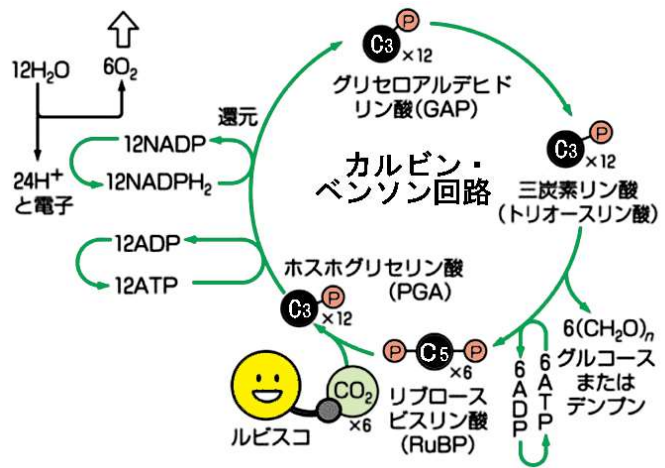
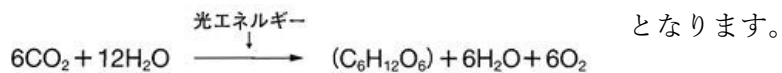


図8 カルビン・ベンソン回路 (URL4を改)

ATPとHのエネルギーに由来する化学エネルギーは、最終的にグルコース分子中の化学結合のエネルギーとして蓄えられます。

*ルビスコ Rubisco：リブローズ 1,5-ビスリン酸カルボキシラーゼ／オキシゲナーゼ

光合成の反応をまとめると



(5) 葉の色の変化 紅葉と黄葉

秋になって気温が下がると光合成の効率が悪くなります。すると、クロロフィルから、活性酸素が発生しやすくなり、クロロフィルは比較的速やかに分解されます。分解された物質は冬芽や根などの器官に運ばれ貯蔵されます。そして葉柄の付け根には「離層」と呼ばれる細胞層が形成されます。離層の形成に伴いグルコースが葉に蓄積し、やがてアントシアニンという赤色素になります。これが葉が赤くなる理由です。イチョウやポプラなどに見られる黄葉は、カロテノイドという黄色の色素が原因です。緑色の葉にもカロテノイドは含まれていますが、クロロフィルに比べ量が少なく、クロロフィルの緑色に隠されています。葉の老化に伴ってクロロフィルは速やかに分解されますが、カロテノイドは比較的分解されにくく、両者の分解速度が違うために、クロロフィルが分解されるにつれ、緑色に隠れていたカロテノイドの黄色が目立つようになるためです。葉は、赤や黄色に色づいた後、茶褐色になりますが、この色の原因はタンニンです。葉の老化が進み、アントシアニンやカロテノイドも分解されると、細胞の液胞内に多量に含まれるタンニンが、分解されたさまざまな物質と、あるいはタンニンどうしが次々に結合して、葉は茶褐色になっていきます。

文献

浅島誠ほか, 2012, 生物. 東京書籍高等学校教科書.

枥内新ほか, 2006, 新しい高校生物の教科書. 講談社.

URL1 <https://buna.info/article/1929/>

URL2 https://www.shinko-keirin.co.jp/keirinkan/digital/taiken/kou/rika/seibutsu_h26/sencor/creature_p4.pdf

URL3 https://ten.tokyo-shoseki.co.jp/spl/hl_support/files/kou

URL4 <https://miraiecosharing1.com/atpnadph/#:~:text>