

# 葉はなぜ黒くないのだろうか： 光合成工場としての葉を解剖する



理学系研究科 生物科学専攻 教授 寺島 一郎

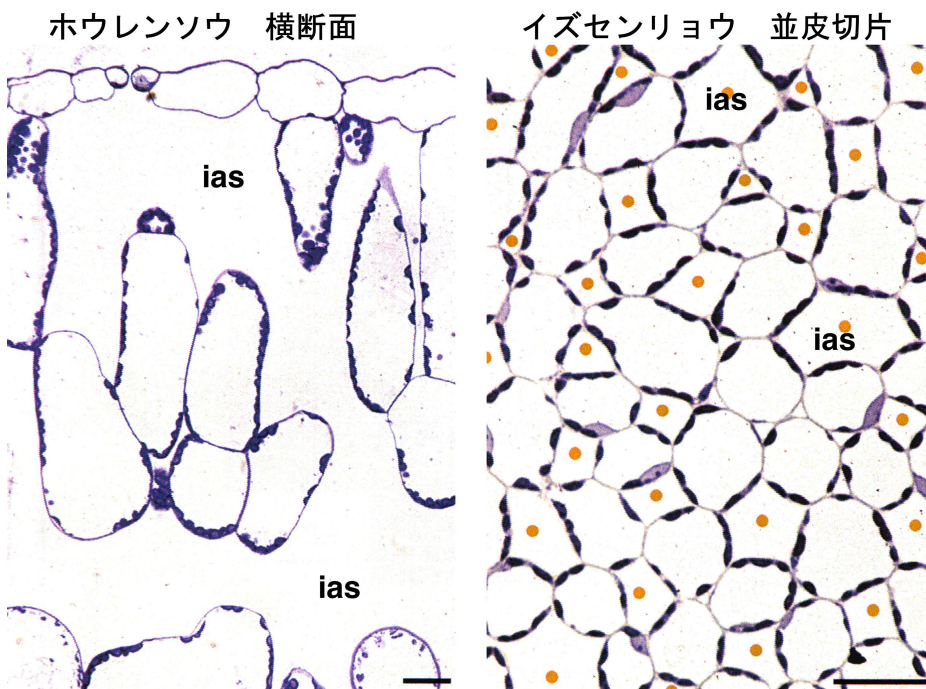


図1左：ハウレンソウの葉の断面。柵状組織の部分を拡大してある。葉緑体は細胞表面に並んでおり、細胞同士の接着部分にはほとんど見られない。葉の表側にも気孔が見られる。  
 右：常緑広葉樹イズセンリョウの柵状組織を表皮に平行に切った切片。ias およびオレンジ色の丸印の部分は、細胞間隙を示す。やはり葉緑体は細胞間隙に沿って並んでいる。バーの長さは25  $\mu\text{m}$  (0.025 mm)。

植物は、光のエネルギーを利用して、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、などの無機物から糖などの有機物を作ることができます。これが「光合成」です。動物や多くの微生物は、植物が作った有機物に依存して生きていますので、ほとんどの生物の究極のエネルギー源は太陽光です。

光合成を行うのは植物細胞にある葉緑体です。葉緑体にはチラコイドとよばれる膜系があり、クロロフィルは膜に埋め込まれたタンパク質に組み込まれています。光合成では、まずクロロフィルが光を吸収します。光吸収によって $\pi$ 電子が励起され、その励起状態は次々にクロロフィル分子間を転移していきます。そして、最後に特殊な環境にあるクロロフィル（反応中心）が

励起されると、電子は分子からとび出します。こうして酸化還元反応が始まります。チラコイド膜上に酸化還元電位の順に並んだ成分間を電子が流れ、安定な還元剤である  $\text{NADPH}^{*1}$  が作られます。また、電子の授受にともなって  $\text{H}^+$  がチラコイド膜内に蓄積され、膜の内外の  $\text{H}^+$  の電気化学ポテンシャル差によって  $\text{ATP}^{*2}$  が作られます。この  $\text{ATP}$  と  $\text{NADPH}$  を利用して、 $\text{CO}_2$  が固定され糖が合成されます（1個の  $\text{CO}_2$  を固定する際に、 $3\text{ATP}$  と  $2\text{NADPH}$  が使われる）。この経路は、Calvin、Bensonらが、放射性同位体  $^{14}\text{CO}_2$  を利用した実験によって明らかにしました。

$\text{CO}_2$  を固定する酵素は  $\text{Rubisco}^{*3}$  と呼ばれま

す。この酵素は大きい割にCO<sub>2</sub>固定速度が遅く、現在の大气CO<sub>2</sub>濃度では、最大速度の半分以下しか実現しません。しかも、CO<sub>2</sub>を固定せずにO<sub>2</sub>を固定してしまうこともあります。O<sub>2</sub>を固定してしまうと、Calvin-Benson回路を阻害するC2化合物が生成します。これを代謝し、C2化合物からCを回収するのが光呼吸経路です。しかし、この経路の駆動には多大なエネルギーを使います（O<sub>2</sub>固定1回あたり、5ATPと3NADPH!）。自身が生産したO<sub>2</sub>に、植物は首を絞められているわけです。

植物が太陽光下で、かなりの速度の光合成を行うためには、大きくて遅いRubiscoを大量に持たなければなりません。これが地球上のタンパク質の中でRubiscoが圧倒的に大量である理由です。また、光呼吸を抑え、酵素を高い速度で駆動するためにはCO<sub>2</sub>をなるべく高い濃度で酵素に与えなければなりません。そのためには、細胞表面に葉緑体を薄く拡げるのが有効です。つまり、葉は葉緑体を大量に持ちしかも細胞表面に並べなければなりません（図1）。

葉が光をなるべく多く吸収するのであれば、葉は黒色であるのが理想的です。一方、これらの葉緑体に、まんべんなく光を配分することも重要なはずで

す。葉の光合成組織は、表側の柵状組織と裏側の海綿状組織に分化しています。表側から光があたると、クロロフィルに吸収されやすい青色光や赤色光はほとんどが柵状組織で吸収されます。一方、緑色光の一部は柵状組織を透過し、海綿状組織内で散乱されます。こうして何度も葉緑体に遭遇すると、吸収されにくい緑色光も、かなり吸収されることとなります。

表側の葉緑体は光吸収量が多いので、裏側の葉緑体に比べて、光合成が光飽和状態になり

がちです。この時、さらに光を強めても、それに含まれる赤色光や青色光は表側の光飽和に達した葉緑体に吸収され、そのエネルギーのほとんどは熱として散逸されることとなります。一方、緑色光は裏側に届き、光飽和に達していない葉緑体の光合成を駆動することができそうです。私たちの研究でこれを実証しました。強い光の下で効率よく光合成を駆動するのは、予想通り、緑色光なのです。陸上植物がクロロフィルという緑色光を吸収しにくい色素を使っているのは、葉の奥深くにある葉緑体に光を配分するのに役立つからでしょう。

## 注釈

### \* 1 NADPH

ニコチンアミドアデニンジヌクレオチドリリン酸（還元型）の略称。多くの酸化還元反応において、還元力を供給する。

### \* 2 ATP

アデノシン5'-リン酸の略称。高エネルギー結合によるリン酸をもっており、生体内のエネルギー通貨として種々の過程にエネルギーを供給する。

### \* 3 Rubisco

リブロース 1,5- ニリン酸カルボキシラーゼ/オキシゲナーゼの略称。ビスケット会社のナビスコに似せて命名された。8個の大サブユニットと8個の小サブユニットからなる分子量55万の大きな酵素だが、反応はきわめて遅く、生体内の条件では、各大サブユニットにある反応部位が、1秒間に1個程度のCO<sub>2</sub>しか固定できない。このため、葉は大量のRubiscoを持たなければならず、Rubiscoは地球上でもっとも多いタンパク質になってしまう。

## 参考文献

- 日本植物生理学会監修 植物まるかじり叢書1  
葛西奈津子 著  
「植物が地球を変えた！」  
化学同人 1200円  
叢書全5巻は植物科学入門に最適。
- 園池公毅 著  
「光合成とは何か」  
講談社ブルーバックス 940円
- 東京大学光合成教育研究会 編著  
「光合成の科学」  
東京大学出版会 3800円