

## お米のはなし

お米や稲に関するちょっとした情報・豆知識を専門家が綴る「お米のはなし」の第51弾をお届けします。

(シリーズ担当：R. I.)

### 第51話 光合成のしくみ

#### 光合成は2つの経路から構成される

光合成の一般式、 $6\text{CO}_2 + 12\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$  は、光合成の全過程を要約していますが、個々のステップについては記述していません。解糖系や細胞内でエネルギーを獲得する他の代謝経路と同様に、光合成も1つの反応ではなく、多くの反応から構成されているのです。光合成は、通常次の2つの主要経路に分けられます。

**明反応（光化学反応）：**光エネルギーによって駆動される。この経路は光エネルギーをATPと還元された電子伝達体（ $\text{NADPH} + \text{H}^+$ ）の形で化学エネルギーに変換する。

**暗反応（光非依存性反応）：**光を直接は利用せず、ATP、 $\text{NADPH} + \text{H}^+$ （明反応によって産生された）、 $\text{CO}_2$ を利用して糖質を産生する。 $\text{CO}_2$ を還元する暗反応には3つの異なるタイプがある。カルビン回路、 $\text{C}_4$ 光合成、ベンケイソウ型有機酸代謝の3つである。

暗反応は、直接光エネルギーを必要としないのでこう命名されたが、明反応も暗反応も暗闇では停止します。ATP合成と $\text{NADP}^+$ 還元には光が必要だからです。両方の経路の反応は、ともに葉緑体内で進行しますが、葉緑体の異なる部位で進行します。また、2つの経路は、ATPとADPの交換、 $\text{NADP}^+$ と $\text{NADPH}$ の交換によってリンクしており、それぞれの経路の速度は相手の速度に依存しています。

明反応は、葉緑体のチラコイド中で、暗反応は、葉緑体のストロマ（葉緑体を包む二重膜とチラコイド膜の間の部分）中で起きます。<sup>1</sup>

#### 葉緑体(Chloroplast)：

光合成を行う半自律性の細胞小器官であり、プラスチド<sup>1)</sup>の一種です。黄色のカロテノイド<sup>2)</sup>や多量のクロロフィル<sup>3)</sup>を含むので一般的には緑色に見えます。多細胞の緑藻や陸上植物は、細胞ひとつあたり、通常10～数百個ほどを含みます。多細胞植物の多くでは、直径が5～10 $\mu\text{m}$ 程度、厚さが2～3 $\mu\text{m}$ 程度の凸レンズ形をしています。

1) プラスチド (plastid, chromatophore)：色素体。植物や藻類などに見られ、光合成をはじめとする同化作用、糖や脂肪などの貯蔵、様々な種類の化合物の合成などを担う、半自律的な細胞小器官の総称である。代表的なものとして葉緑体がある。

2) カロテノイド (carotenoid)：カロテノイドは黄、橙、赤色などを示す天然色素の一群である。微生物、動物、植物などからこれまで750種類以上のカロテノイドが同定されている。たとえばトマトやニンジン示す

色はカロテノイド色素による着色である。自然界におけるカロテノイドの生理作用は多岐に

<sup>1</sup> カラー図解アメリカ版大学生物学の教科書第1巻細胞生物学（サダヴァ,D.著・講談社・2010年）

わたり、とくに光合成における補助集光作用、光保護作用や抗酸化作用等に重要な役割を果たす。

3) クロロフィル (Chlorophyll) : クロロフィルは、光合成の明反応で光エネルギーを吸収する役割をもつ化学物質。葉緑素ともいう。

(Wikipedia から抜粋引用)

### 種子植物の葉緑体の構造

○葉緑体は、回転楕円体を押しつぶしたような形をしている。

○二重の膜で囲まれた内部空間をストロマ (Stroma) と呼ぶ。

○葉緑素は多数のチラコイド (Thylakoid) と呼ぶ円盤状の小胞に収められており、チラコイドは積み重なってグラナ (Granum) と呼ぶ塊になっている。

○一部のチラコイドは細長く伸びて複数のグラナ間を結んでおり、ラメラ (Lamella) と呼ぶ。

○光合成によってチラコイド膜内部、すなわちルーメン(Lumen)の水素イオン濃度が高くなる。水素イオン濃度勾配を利用してチラコイド膜上に分布する ATP 合成酵素が ADP から細胞のエネルギー源である ATP を合成する

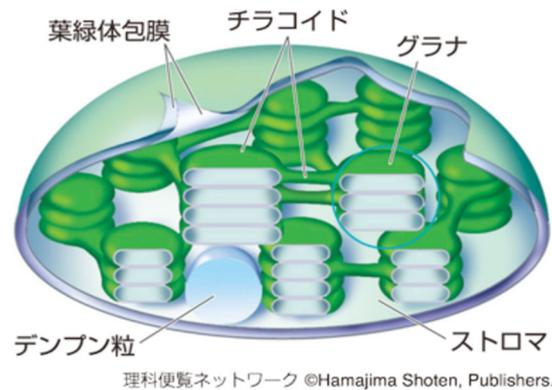


図 51-1 葉緑体の概念図

(出典) 理科便覧ネットワーク

りかびん Plus 葉緑体の内部 (p. 24) (浜島書店)

### 光合成速度と呼吸速度

光合成を行う植物や一部の動物 (ミドリムシなど) は、同時に呼吸も行っています。したがって、光が当たっている状態で放出される  $O_2$  量は、見かけの光合成速度です。これに対し、真の光合成速度は見かけの光合成速度に呼吸速度を加えたものです。

光合成による  $CO_2$  吸収速度と呼吸による  $CO_2$  放出速度が同じになる光の強さを、補償点といいます。この時、見かけの光合成速度は 0 になります。

### 光合成速度と外的要因

光合成速度は、光の強さはもちろん  $CO_2$  濃度や温度などの外的要因を強く受けます。光合成速度は、これらの要因のうち、最も少ないものによって決定されます。このように、光合成速度を決定する要因を限定要因といいます。

例えば  $10^\circ C$  と  $30^\circ C$  の環境下でその他の条件を同じにして光の照度を徐々に強めていったとき、 $10^\circ C$  の時に速度の上昇が停止する照度と、 $30^\circ C$  の時の照度では、 $30^\circ C$  の時の照度が一般的に高くなります。つまり、 $10^\circ C$  の時は温度が光合成速度の限定要因になっています。光をそれ以上強くしても光合成速度が増加しなくなる光の強さを、光飽和点と言います。もちろん、照度・温度・二酸化炭素濃度のどれもが限定要因になり得ます。

<光の強さ> イネの葉の光合成速度は、光の強さが照度で  $50\sim 60klx$  に達するまでは、光の強さにほぼ比例して増大するが、そこで光飽和 (light saturation) し、それ以上光が強くなっても光合成は一定の値にとどまる。この時の値が光合成能力である。つまり、イネの葉は夏の最大日射 (約  $106klx$ ) の 60% 程度以上に強い光を受けても、その部分は利用するこ

とができない。

光合成における CO<sub>2</sub> 固定機能としてカルビン回路のみをもつものは C3 植物と呼ばれ、イネ・ムギ・マメ類をはじめ大部分の温帯原産作物がこれに属する。一方、CO<sub>2</sub> 固定機能として C4 回路をもつものは、C4 植物と呼ばれ、トウモロコシ・サトウキビなど熱帯原産のイネ科の多くとカヤツリグサ科その他の果の一部がこれに属する。両者には、光合成特性において対照的な差異が見られる。光の強さに対する反応も、C3 植物は光飽和を示すのに、C4 植物は光飽和を示さない。(C3 植物、C4 植物については後日説明)

<光の質>光合成に有効な光は、波長 400~700nm の可視光を中心とした部分であり、直射日光にはこの部分が約 45%、散乱光を加えると約 50%含まれる。この中で、波長により光合成に対する効果が異なる。660~670nm の赤色光で最大、430nm 付近の青色光に第 2 の山があり、中間の黄~緑色光では、やや劣る。波長に対する光合成の反応には、種間差が極めて少ない。

<温度>C3 植物は一般に光合成の適温が低く (15~25℃)、C4 植物では高い (30~40℃) ことが知られている。イネの光合成の適温は、C3 植物としてはかなり高く、20~33℃と広い適温域を示す。葉面当たりの乾物生産を考えてみよう。光合成量から呼吸量を差し引いたものが乾物生産量に相当するが、呼吸量が温度の上昇に伴って指数関数的に上昇するのに対して、光合成量は 33℃以上では低下する。むしろ 20℃近くで最大となる。すなわち、葉面当たりの乾物生産の効率は、比較的低温において最大となるのである。

<CO<sub>2</sub> 濃度>空気中の CO<sub>2</sub> 濃度が零から大気中の標準濃度 (300ppm, 0.03 vol.%) の 3~3.5 倍までは、イネの光合成速度はほぼ直線的に増大するが、1,000ppm 前後で CO<sub>2</sub> 飽和に達する。それ以上の濃度では光合成は増大せず、さらに高まれば低下する。イネを含め C3 植物は、C4 植物に比べて CO<sub>2</sub> 濃度に対する光合成の反応が大きく、したがって CO<sub>2</sub> 施肥 (密閉空間で) による生育促進効果も大きい。このような CO<sub>2</sub> の効果は、日射が強いほど、また温度が高いほど大きい。

<土壌水分>ポットに植えたイネの土壌を次第に乾燥させた場合、最大容水量の 55%

(pF2.0) 以下になると、みかけの光合成が低下し始め、次いで葉のしおれがおこり、光合成は急激に低下する。土壌水分が永久しおれ点 (植物がしおれない最小の土壌水分) 以上あっても、イネは夏の日中などに光合成の低下を起こす。イネが湛水栽培される大きな理由の一つはこれです。

<窒素>各種無機養分のうち、光合成に最も大きな影響を及ぼすのは、窒素である。窒素の促進効果は、葉の窒素含量が乾物当たり 4%以下であれば、殆どの場合認められる。穂肥や実肥の効果のかなりの部分は、このような葉面当たり光合成能力の促進による。残りは、葉面生長の促進あるいは葉の枯れ上がり防止効果による。窒素追肥に伴って葉緑素の増大がおこるが、光合成能力の促進はそれよりむしろ光合成酵素の合成、葉緑体の増殖にあると考えられている。

イネの耐肥性品種では、窒素追肥をした場合、光合成能力の促進が大きいが、呼吸の促進は小さい。耐肥性の弱い品種は、その反対であることが知られている。

<その他無機養分>葉中の K<sub>2</sub>O、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MgO の含量が、乾物当たりそれぞれ 1%、0.4%、および 0.4%以下の場合には施用が有効である。

リンはリン酸塩の形で光合成や呼吸の反応に直接関与するが、カリウムの役割は多面的で、欠乏すると光合成が低下すると同時に呼吸の異常促進や葉の寿命低下をおこすことか

ら、代謝調節機能をもつと考えられている。マグネシウムや鉄の外、イオウ、銅、亜鉛も葉緑素の合成に関与すると言われ、マンガンは光化学系の賦活剤として重要である。(以上、「食用作物学」1977、文永堂、村田吉男氏担当部分から抜粋引用)

---

**発行:(公社)国際農林業協働協会(JAICAF)**  
**〒107-0052 東京都港区赤坂8丁目10-39 赤坂KSAビル3階**