

8. 生物の活力を生み出す太陽の光

生物の活力となるエネルギーは酸化反応から

ある物質が新しい物質に化学反応により変化してゆくとき、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーなどを出します。また、熱エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーを加えてやらないと化学変化が起こらないこともあります。このように物質の化学変化において、その物質の持っている総エネルギーが変化しますが、同時に一部のエネルギーが熱エネルギー、光エネルギー、電気エネルギーあるいは運動エネルギーとして発熱あるいは吸熱します。石炭や石油が燃焼するときには多量の光エネルギーと熱エネルギーを放出しますが、このとき石油や石炭などの炭化水素は二酸化炭素と水まで一気に酸化してしまいます。この燃焼という化学変化は少量の燃料分子が酸化して発生する熱エネルギーにより、近くにある他の燃料分子の酸化反応を引き起こして行く連鎖的な反応です。

燃焼のように反応が急速に進行すれば多量のエネルギーが急激に放出されますが、ゆっくり酸化反応が進行すればエネルギーも少量づつ長時間にわたって発生します。燃焼のように二酸化炭素への一段階による酸化反応ではなく、種々の中間の物質を経由する多段階の酸化反応が進行すれば、必要なときに少量づつ制御しながらエネルギーが発生すると思われる。例えば図 8 - 1 に示すように、アルコールランプでアルコールを燃焼すれば石油と同じように二酸化炭素と水まで一段階で酸化されますが、アルコールは段階的に酸化されてアルデヒド類に変化し、さらに、カルボン酸への酸化を経て二酸化炭素へと酸化されてゆき、当然そのときは段階的に反応熱が発生します。このように段階的に酸化反応を制御することによりエネルギーの発生を制御できます。これとは反対に、二酸化炭素やカルボン酸などの高い酸化状態の物質から、アルコールや炭化水素などの高い還元状態の物質への還元反応は熱

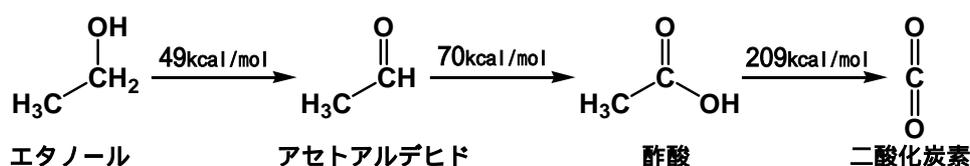


図8 - 1 エタノールの酸化反応と発熱量

エネルギーや光エネルギーや電気エネルギーを加えてやらなければ一般に進行しません。これらのことから、炭化水素やアルコール類などのように酸化することのできる高い還元状態の物質は多くのエネルギーを蓄えています。カルボン酸や二酸化炭素などの高い酸化状態の物質はもはやあまり酸化することが出来ませんから、あまり多くのエネルギーを蓄えていないと考えることができます。燃焼熱は炭素を中心とする物質が二酸化炭素まで酸化されるときに放出するエネルギーの量ですから、蓄えられているエネルギーの総量と考えることができますので、種々の物質の燃焼熱を表 8 - 1 にまとめました。

生物の生命維持活動が化学反応でなされていることから、生物体内で構成する物質が化

学的に変化し、そのとき副生する熱エネルギーや運動エネルギーが利用されて全ての生命活動を維持する活力になっているものと考えられます。当然、生命活動を維持する活力は生物体を構成する高い還元状態の物質の段階的な酸化により生み出されます。お酒やお酢を醸造するときに活躍する麹菌は、アルコール類の一種のでんぷんが二酸化炭素へ酸化するときに発生するエネルギーを利用して生きています。この多段階の酸化過程の中間に生成してくるエタノールや酢酸を、人間はお酒やお酢として横取りしています。

麹菌をはじめとして、すべての生物は栄養となる物質の二酸化炭素までの多段階の反応を経由する酸化反応の過程で発生する熱エネルギーを生命活動の維持のための活力にしています。すべての動物は栄養となる物質を食物からのみ摂取し、自分自身では生産することができません。しかし、植物は食物から栄養を摂取する能力に欠けていますから、必要な栄養を自給生産する能力を備えています。植物が自給生産した栄養を草食動物が横取りするように食物として摂取し、草食動物を食物として肉食動物が生息していますから、結局、植物

表 8 - 1 種々の有機化合物の燃焼熱(kcal/mol)

物質名	分子式	燃焼熱	物質名	分子式	燃焼熱
ホルムアルデヒド	CH ₂ O	134.1	アラニン	C ₃ H ₇ NO ₂	387.7
蟻酸	CH ₂ O ₂	62.8	ウレタン	C ₃ H ₇ NO ₃	397.2
メタン	CH ₄	210.8	プロパン	C ₃ H ₈	526.3
尿素	CH ₄ N ₂ O	151.6	グリセリン	C ₃ H ₈ O ₃	397.0
メタノール	CH ₄ O	170.9	酢酸エチル	C ₄ H ₈ O ₂	536.9
メチルアミン	CH ₅ N	256.1	ベンゼン	C ₆ H ₆	782.3
アセチレン	C ₂ H ₂	312.0	フェノール	C ₆ H ₆ O	732.2
シュウ酸	C ₂ H ₂ O ₄	60.2	アニリン	C ₆ H ₇ N	811.7
エチレン	C ₂ H ₄	331.6	ヘキサン	C ₆ H ₁₄	989.8
アセトアルデヒド	C ₂ H ₄ O	279.0	シクロヘキサジエン	C ₆ H ₈	847.8
酢酸	C ₂ H ₄ O ₂	209.4	シクロヘキセン	C ₆ H ₁₀	891.9
アセトアミド	C ₂ H ₅ NO	282.6	シクロヘキサン	C ₆ H ₁₂	937.8
グリシン	C ₂ H ₅ NO ₂	234.5	ブドウ糖	C ₆ H ₁₂ O ₆	673.0
エタン	C ₂ H ₆	368.4	ベンズアルデヒド	C ₇ H ₆ O	841.3
エタノール	C ₂ H ₆ O	327.6	安息香酸	C ₇ H ₆ O ₂	771.2
ジメチルアミン	C ₂ H ₇ N	416.7	ベンジルアルコール	C ₇ H ₈ O	894.3
エチルアミン	C ₂ H ₇ N	408.5	安息香酸メチル	C ₈ H ₈ O ₂	943.5
アセトン	C ₃ H ₆ O	426.8	オクタン	C ₈ H ₁₈	1302.7
蟻酸エチル	C ₃ H ₆ O ₂	391.7	ステアリン酸	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	2711.8

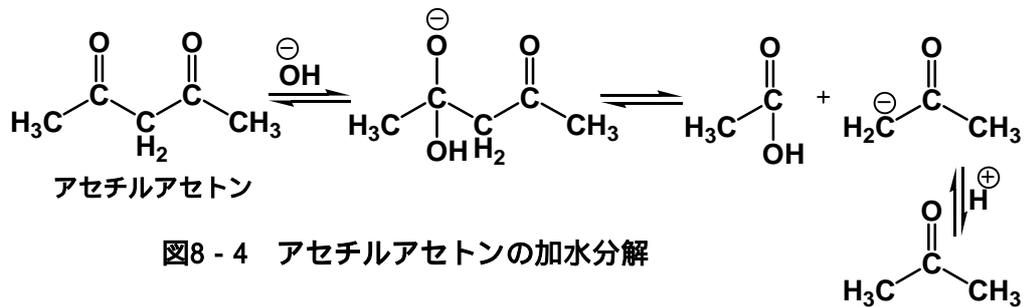


図8 - 4 アセチルアセトンの加水分解

る炭酸同化反応には複雑な多くの反応が組み合わされています。図 8 - 2 には $H-(CHOH)_{n-1}-CHO$ の一般式で表される糖類の変化の流れ図として炭酸同化反応を示しています。例えば、五炭糖 ($n=5$) は二酸化炭素と反応して六炭糖 ($n=6$) になり、2 分子の三炭糖 ($n=3$) に分解し、その三炭糖 ($n=3$) が二炭糖 ($n=2$) と反応して五炭糖 ($n=5$) に戻ります。このように種々の糖類が反応と分解を繰り返しながら周回する度に二酸化炭素を取り込みますから、反応が 6 周した時に初めて 1 分子のブドウ糖が生成します。

一般に、アセトアルデヒドに代表される炭素 = 酸素 2 重結合に隣接した炭素に水素原子が結合している化合物は図

8 - 3 に示すように容易に水酸基が結合する炭素 = 炭素 2 重結合に平衡反応で異性化しますし、炭素 = 酸素 2 重結合と反応して炭素 - 炭素結合を形成するアルドール型縮合反応が容易に進行する性質を持っています。また、アセチルアセトンに代表される 2 個の炭素 = 酸素 2 重結合が 1 個の炭素原子を挟んで連なっている - ジカルボニル化合物は図 8 - 4 に示すように容易に加水分解して炭素 - 炭素結合が開裂します。

これらの異性化反応やアルドール型縮合反応や加水分解反応や還元反応などの種々の反応が炭酸同化反応には複合的に組み込まれています。炭酸同化反応があまりにも複

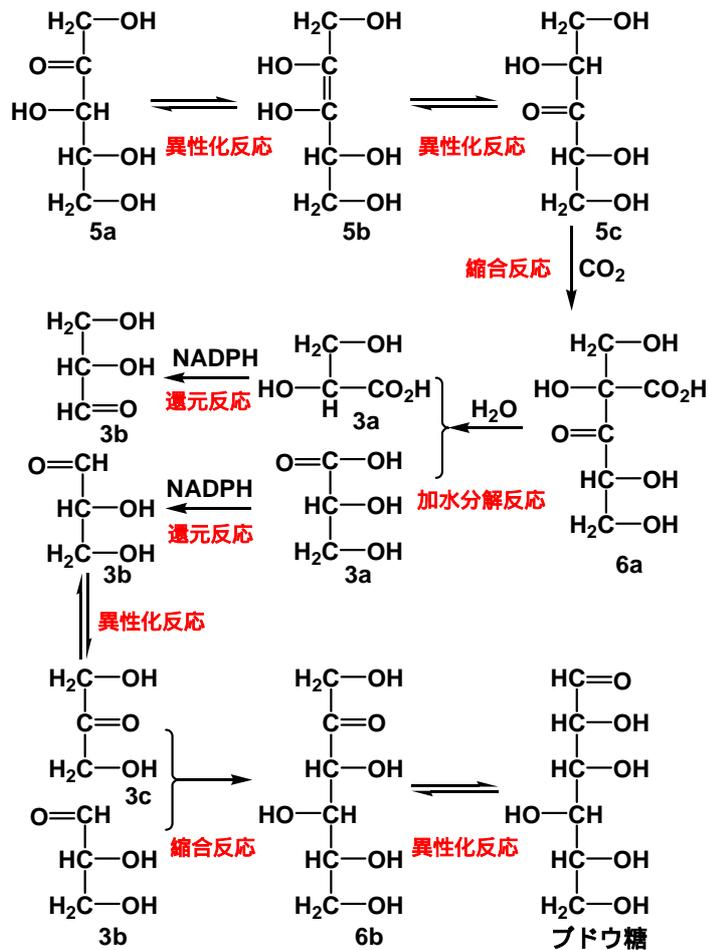


図8 - 5 炭酸同化反応の一部

雑すぎますのですべて詳細に示すことが適当に思われません。例として炭酸同化反応のごく一部分ですが、図 8 - 2 の赤矢印で示した五炭糖 ($n = 5$) が二酸化炭素を取り込んで六炭糖 ($n = 6$) のブドウ糖になる変化だけを図 8 - 5 に詳細に示しておきます。五炭糖 5a は炭素 = 酸素 2 重結合に隣接した炭素に水素原子の結合した構造を持っていますので 5b に異性化しますが、異性化反応が平衡反応ですからさらに 5c まで異性化して結果として炭素 = 酸素 2 重結合の位置が移動します。また、5c もまた炭素 = 酸素 2 重結合に隣接した炭素に水素原子の結合した構造を持っていますから、二酸化炭素の炭素 = 酸素 2 重結合とアルドール型縮合反応して 6c を生成します。6c は β -ジカルボニル化合物の構造を持っていますから、容易に 2 分子の 3a に加水分解します。

多くのエネルギーを持ち高い還元性を示す NADPH が 3a のカルボン酸部分をアルデヒドに還元して三炭糖 3b を生成します。3b もまた炭素 = 酸素 2 重結合に隣接した炭素に水素原子の結合した構造を持っていますから、異性化反応やアルドール型縮合反応により 2 分子の 3b からブドウ糖が生成します。五炭糖が二酸化炭素を取り込んでブドウ糖を形成する炭酸同化反応のごく一部分だけを見ても、異性化反応やアルドール型縮合反応や加水分解反応や NADPH による還元反応などの種々の反応が複雑に組み合わされています。

太陽の光を効率よく栄養に変える葉緑素

生物の栄養となる物質は活力の源ですからエネルギーを蓄積している物でなければならず、高い還元状態の物質であり、生産するためにはエネルギーの供給を必要とします。地球上で広く定常的に得られるエネルギーは太陽からの熱エネルギーと光エネルギーですが、地球の気温が $-50 \sim 50$ の範囲で変化しますから、高い還元状態の物質を生産する反応を進行させるために必要な熱エネルギーを充分には供給できません。これに対して、植物を構成している物質は炭素を中心元素として共有結合で結ばれていますから、紫外線や可視光線の光を吸収すると結合を形成している電子は結合軌道から反結合性の軌道に励起します。当然、非常に反応性が高い励起状態から、吸収した光エネルギーを利用して高い還元状態の物質に変化して行きます。

前節で考えたように、生物の栄養となる物質は植物の合成したブドウ糖ですし、そのブドウ糖を生合成する炭酸同化反応では多くのエネルギーを持ち高い還元性を示す NADPH がカルボン酸部分をアルデヒドに還元してエネルギーを蓄積しています。植物の中では水は酸化されて酸素と共に水素陽イオンと電子を生成しますが、NADP 陽イオンがここで生成した水素陽イオンと電子と反応して高い還元状態の NADPH に変化します。NADP 陽イオンは芳香族の性質を持つ安定な物質ですが、NADPH は芳香族の共鳴安定化エネルギーを失いますから高い反応性を持つ物質です。当然、水の酸化による NADPH への還元反応には多くのエネルギーを要しますから、植物は葉緑素により太陽からの光エネルギーを効率よく吸収して利用しています。生物の栄養を考える時に、多くのエネルギーを持ち高い還元性を示す NADPH を合成する反応は最も重要な化学変化と思われる。

太陽から地表に届く光のスペクトルは気候や環境により若干変化しますが、平均的には図 3 - 1 の赤線で示すように 460nm で最も高い強度を持ち波長が長くなるに連れて強度が小さくなっています。高い還元状態の物質の生産に太陽の光エネルギーを利用するためには、太陽光の強度の高く光エネルギーの大きな 400 ~ 500nm の領域の紫色から青色の光を吸収する物質が効率的です。この領域の色の光を吸収しますと表 3 - 8 にまとめたようにその補色に相当する緑色から橙色の光が反射してきますから、太陽の光エネルギーを効率的に利用する物質は緑色から黄色の色調を呈すると思われれます。多くの 2 重結合が共役した長い炭素鎖を持つ色素では 結合が共鳴して非局在化し、結合の結合エネルギーが小さくなり小さなエネルギーで励起状態に移行できますから、可視光線を吸収して有色を呈します。共役した 9 ~ 10 個の炭素 = 炭素 2 重結合を含む物質では 400 ~ 500nm の領域に吸収極大が現れますから、紫色から青色の光を効率よく吸収します。長く共役する炭素 = 炭素 2 重結合は同じ平面を共有するほどそれぞれの 結合が強く共鳴してエネルギー的に安定化しますが、逆に多くの原子を同一平面上に保つことがエントロピー的な不安定化をもたらします。共役した 9 ~ 10 個の炭素 = 炭素 2 重結合の系が安定に平面を保つように固定されれば、気候や環境の変動にも安定な状態で太陽の光が吸収できるよう保つことが出来ます。

実際、多くの植物は葉緑素と呼ばれる緑色の物質を用いて太陽からの光エネルギーを効率よく吸収して高い還元状態の栄養物質を生産しています。この植物が用いている葉緑素はいくつかの化合物の複合体ですが、その中心となるクロロフィル a とクロロフィル b は図 8 - 6 で赤色の太線で示すようにポルフィリン環と呼ばれる複雑な母核構造を持っています。このクロロフィル a には共役した 9 つの 2 重結合が環状に結合していますから、428、530、575、615、661nm に極大吸収を持っています。さらに、図 8 - 6 の青色で示すようにこのポルフィリン環に含まれる 4 個の窒素原子とマグネシウム原子の間を結ぶ配位結合により、全ての 2 重結合を同一平面に固定する構造を持っていますから、428nm の極大吸収が非常に大きな吸光係数を持ち、太陽の光エネルギーを定常的に効率良く吸収します。また、クロロフィル b は同じ母核を持っていますが、R=CHO ですから若干共役系が異なるために、非常に大きな吸光係数を持つ吸収極大が 446nm に移動しています。ちなみに、赤血球の中核色素のヘム

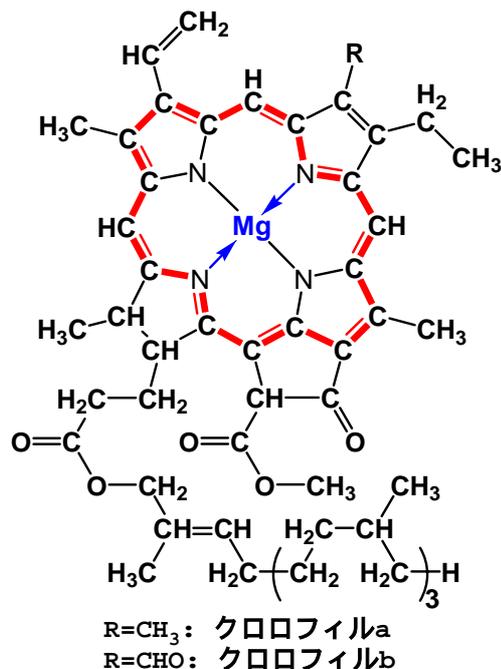


図8 - 6 クロロフィルの構造

やビタミン B₁₂ も同じようなポルフィリン環を含む構造になっています。

植物は水を酸化すると同時に二酸化炭素を還元して、生物の栄養となるブドウ糖を生合成しています。酸化反応は電子を放出する反応ですし、還元反応は電子を受け取る反応ですから、電子の受け渡しをしながら互いに両反応は同時に起こります。このような酸化・還元反応をする全ての物質は酸化する能力を示す固有の還元電位をそれぞれ持っており、大きな還元電位の値を持つ物質ほど還元されやすく高い酸化状態を示します。また、小さな還元電位を持つ物質は高い還元状態を示し、逆方向の酸化反応が容易に進行します。ある還元電位を持つ物質の酸化反応とより大きな還元電位の物質を生成する逆反応（還元反応）の組み合わせでは、発熱を伴って容易に反応が進行します。逆に、ある還元電位を持つ物質の酸化反応とより小さな還元電位の物質を生成する逆反応（還元反応）の組み合わせは、エネルギーを加えなければ進行しない吸熱的な反応です。例えば、銅イオンから金属銅への変化の還元電位は 1.980V ですし、亜鉛イオンから金属亜鉛への変化の還元電位は -0.763V を示しますから、銅イオンと金属亜鉛の間には酸化・還元反応が発熱的に容易に進行して金属銅と亜鉛イオンを生成します。逆に、亜鉛イオンと金属銅の間の酸化・還元反応はエネルギーを加えなければ進行しません。

植物の中では図 8-7 に示すように水は酸化されて酸素と共に水素陽イオンと電子を生成しますが、同時にここで生成した水素陽イオンと電子が NADP 陽イオンと反応して高い還元状

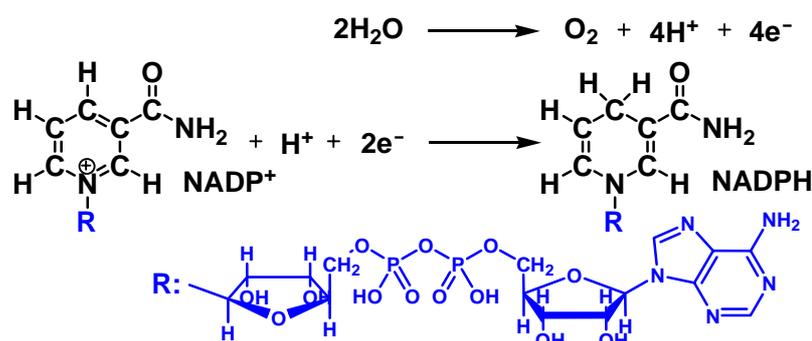


図8-7 水の酸化とNADPHへの還元

態の NADPH に変化します。NADP 陽イオンはベンゼンと同じような芳香族の性質を持つ安定な物質ですが、NADPH は芳香族の共鳴安定化エネルギーを失いますから高い反応性を持つ物質です。当然、水の酸化による NADPH への還元反応には多くのエネルギーを要しますから、植物は葉緑素を利用して効率よく太陽からの光エネルギーを吸収しています。しかし、水の酸化と NADP 陽イオンの還元と太陽からの光エネルギーの吸収が簡単な 1 段階の反応で進行するわけではなく、多くの物質が介在して進行する極めて複雑な連鎖的反應と考えられています。

図 8-8 には水の酸化による NADPH への還元反応の複雑な過程を模式的に示し、それぞれの素反応の還元電位も赤字で示しています。第 1 段階となる酸素発生複合体中の反応では、1.51V の還元電位を持つ高い酸化状態の Mn³⁺ が水と反応して 0.82V の還元電位を持つ酸素を発生すると共に水素陽イオンと Mn²⁺ を生成します。このとき水の酸化により

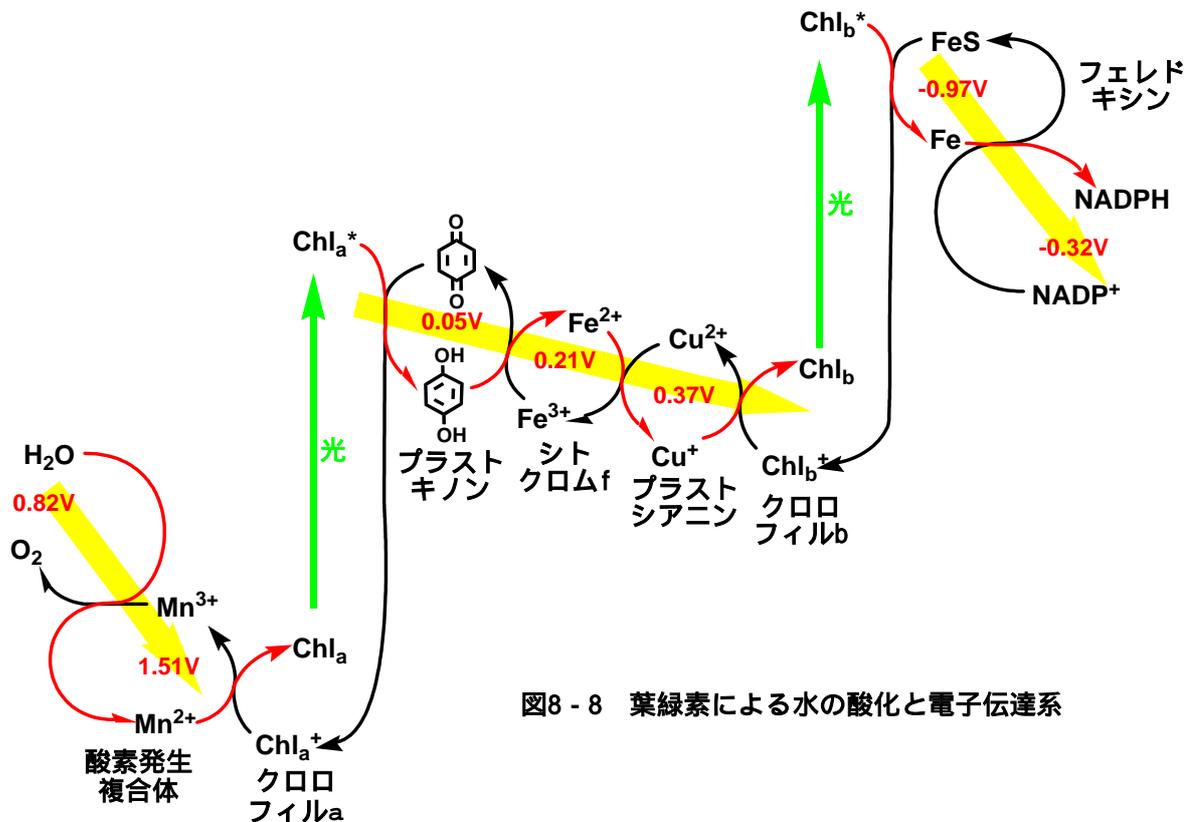


図8 - 8 葉緑素による水の酸化と電子伝達系

放出された電子は赤い矢印のように受け渡しされて Mn^{2+} に還元されます。ここで生成した Mn^{2+} はクロロフィル a の陽イオンに電子を受け渡して酸化され、元の状態の Mn^{3+} に戻りますが、同時に電子を受け取ったクロロフィル a の陽イオンも還元されてクロロフィル a に戻ります。この 2 段階の反応により水の酸化で放出された電子は Mn イオンを介在しながらクロロフィル a に徐々に受け渡しされてゆきます。このような徐々に電子を受け渡して行く変化は発熱反応ですから容易に進行しますが、還元電位が大きくなりますから、クロロフィル a の陽イオンは還元されやすく高い酸化状態を示します。そのため還元されたクロロフィル a にはもはや還元する能力がなく電子の受け渡しが容易には進行しません。

葉緑素に含まれる色素物質は長く共役した結合の電子が太陽の光エネルギーを吸収して反結合性の軌道に励起し、反応性が高くなった電子を近接する分子に与えて、色素分子は陽イオンに変化します。クロロフィル a が太陽の光エネルギーを吸収して結合の電子が反結合性の軌道に励起し、0.05V の還元電位を持つプラストキノンに電子を与えてヒドロキノン型に還元されますが、同時にクロロフィル a は陽イオンになります。さらに、ヒドロキノン型のプラストキノンからシトクロム f とプラストシアニンが介在して、クロロフィル b の陽イオンまで電子が受け渡されます。電子を受け取ったクロロフィル b の陽イオンは還元されてクロロフィル b に戻りますが、かなり高い酸化状態を示します。クロロフィル a と同じようにクロロフィル b も太陽の光エネルギーを吸収して電子を励起しますから、小さな還元電位を持つフェレドキシンに電子を受け渡します。この高い還元

状態のフェレドキシンは酸化・還元反応により NADP 陽イオンに電子を受け渡して NADPH を生成します。NADP 陽イオンは芳香族の共鳴により安定化されていますが、NADPH では共鳴安定化をもたらす芳香族の性質が失われますから、高い反応性を持つ還元状態にあり、芳香族性を持つ NADP 陽イオンに容易に酸化されます。高い還元状態にあり高い反応性を持つこの NADPH が炭酸同化反応の一連の反応のうちでカルボン酸をアルデヒドに還元する還元剤として働き、ブドウ糖を生成して生物の活力の源となるエネルギーを蓄積しています。また、NADPH は生体内で酢酸からステアリン酸などの飽和脂肪酸を生合成する反応の還元過程においても強い還元剤として働いています。

地表に届く太陽の光は 460nm で最も高い強度を持ち波長が長くなるに連れて強度が小さくなっており、太陽の光の強度の大きな 400~500nm 領域の紫色から青色の光を吸収することにより、地球の植物は太陽の光エネルギーを効率的に利用しています。この領域の色の光を吸収しますとその補色に相当する緑色から橙色の光が反射してきますから、地球の植物が太陽の光エネルギーを効率的に利用するために用いている葉緑素は緑色から黄色の色調を呈すると思われます。また、水が長波長の赤色の光を吸収してしまいますから、水深の深い所では波長の短い紫色の光をより効率的に吸収できるように褐色の物質が用いられている褐藻類が繁茂しています。言い換えれば、地表に届く太陽光のスペクトルの影響を受けて地表の植物が緑色になっていると考えられます。しかし、地球以外の天体では光の状態や大気成分なども地球とは異なりますから、その天体に植物が存在すると仮定した米航空宇宙局 (NASA) の研究者が、「太陽系外の天体には緑ばかりか黄色や赤色の植物があるかもしれない」と予測した論文を報告していると 2007 年 5 月 28 日の朝日新聞が紹介していました。