

生命を活性化する物質

—植物の生き残り戦略—

広島大学名誉教授
平田敏文

生き物は様々な「化学物質」を活用して生きています。刺激を伝える情報伝達、呼吸や栄養物の摂取などの代謝調節、病気等から身を守る生体防御などの様々な生命活動は全て化学物質を使って行われています。このような生命活動を引き起こす、すなわち生命を活性化する物質は、「生理活性物質」と呼ばれています。

天然に存在する生理活性物質は多種多様であり、生体に含まれるほとんど全ての物質が生理活性に関連していると言っても良いでしょう。例えば、水 (H_2O) は栄養物を溶かしたり、運んだりする時に不可欠な物質ですし、光合成で光エネルギーを生き物が利用できる化学エネルギーに変える時にもなくてはならない物質です。ポリエチレンの原料となるエチレンガス ($CH_2=CH_2$) は植物の生長をコントロールする植物ホルモン的一种ですし、大気汚染物質として悪名高い一酸化窒素 (NO) ですら、生体の中では神経伝達物質として重要な役割を果たしています。本講座では対象を植物に絞り、「植物の生き残り戦略」にかかわる生理活性物質をいくつか紹介しましょう。



2011年12月20日TSS文化大学で講演する筆者

(1) 細胞が自殺する？ —プログラムされた細胞死 (アポトーシス) ^{1,2)}

細胞の死には、大別して2種類あります。一つは細胞が突然の高熱や物理的な破壊に曝された時にみられる死で、「壊死」あるいは「ネクロシス」と呼ばれています。ネクロシスでは、細胞膜がはじけ、細胞の内容物が外に漏れ出て細胞は死を迎えます。もう一つの死は、死に至るまでに時間があった時にみられ、細胞が自らの内在物を分解・吸収するなどの身辺整理をして死を迎えるものです。このため、この細胞の死に方は、「細胞の自殺」あるいは「プログラムされた細胞死」と言われ、「アポトーシス」と呼ばれています。(花が役割を終えて枯れるように細胞が寿命を迎えて死に至る場合もアポトーシスの一種と考えられますが、寿命を迎えて死ぬ場合を「アポビオーシス」と呼び、アポトーシスと分ける場合もあります。)

この「アポトーシス」の現象は動物ではよく知られています。オタマジャクシからカエルに変態するとき尻尾がなくなりますが、これは尻尾の細胞がアポトーシスを起こして内容物を分解し、分解された物質がカエルの本体に吸収されるためです。また、動物の体内において、異常を起こした細胞 (例えば、癌化した細胞) はアポトーシスによって早期に取り除かれ、ほとんどの異常細胞の増殖・成長は未然に防がれていると言われています。なお、このような現象を利用して、癌患者にアポトーシスを引き起こす活性物質 (抗癌剤) を投与して、癌細胞を死滅させる治療法 (化学療

法)が行われています。

一方、植物でアポトーシスが関係する身近なものとしては、秋にモミジが紅葉して落葉する現象や果物が熟成・落果する現象があります。これは組織が老化してくると体内に老化ホルモンとも言われるエチレンガス ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) が作られ、これが活性物質となって細胞にアポトーシスを起こすからです。このような現象を利用して、エチレンガスを使ってバナナやキウイフルーツを食べごろになるように熟成させることが行われています。家庭で採れたキウイフルーツは酸味が強いですが、リンゴは熟する時にこのエチレンガスを盛んに放出しますのでキウイフルーツとリンゴを一緒の箱に入れておくだけでキウイフルーツを早く甘く熟させることができます。

次に、植物細胞がアポトーシスを起こすもう一つの例として、植物が病原菌に攻撃されたときに何が起こり、どのような活性物質が関係するのかを詳しくみてみましょう。

一般に植物が病原菌に感染すると葉が褐色に変色する(褐変と言います)などの病原菌に特有の症状(病斑)を示しますね。この現象は古くから知られており、過敏細胞死と呼ばれています。葉などの組織が病原菌に攻撃されると罹病した細胞は、殺菌作用を持つ過酸化水素 (H_2O_2) などの活性酸素化合物を発生させて病原菌と戦うとともに、細胞外にあるフェノール類を結合させて不溶性の膜を作って細胞壁を補強し、細胞の内容物が外へ漏れ出るのを防ごうとします。しかし、もし外界からの攻撃が非常に強くて、生き残るのが困難な状況であったなら、その攻撃を受けた細胞はアポトーシスを起して、自身の細胞の細胞壁と細胞内の遺伝子(DNA)や蛋白質を分解し、死への準備をします。なお、アポトーシスを起こした時のDNAの分解は、たとえば図1のように起こって、DNAは特定の長さの倍数になるように断片化されます。正常な細胞の核の中でDNA(長いリボンのような構造のもの)は、コアヒストンやヒストンH1という名の蛋白質(球状のもの)に巻きついて保護されており、分解されにくくなっています。しかし、アポトーシスが起ると、蛋白質分解酵素(プロテアーゼ)が働いてヒストンH1が分解され、この部分でDNAは剥き出しになって、切断を受けやすくなります。その結果として、DNAは特定の長さの倍数で断片化されることになるわけです。

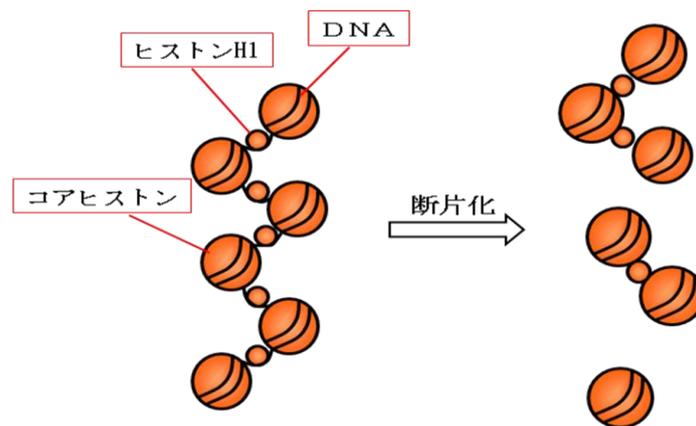


図1 アポトーシスによるDNAの断片化

細胞がアポトーシスを起こすと、同時に周辺の細胞にその情報を伝達し、周囲の細胞に防御体制をとらせて残りの細胞を守ろうとします。周辺細胞では、アポトーシスを起している細胞から送り出される活性酸素化合物を利用して、フェノール類を結合させる反応を開始します。この反応によって、周辺細胞の細胞膜の外側にはフェノール類が3次元網目状に結合した超高分子化合物の「リグニン」が形成されて、細胞壁が補強されます。さらに、周辺細胞は、感染防御に関係する特異的な蛋白質(PR蛋白質)やファイトアレキシンと呼ばれる抗菌物質を生成して、病原菌による攻撃を排除できるようになります。したがって褐変した病斑は、病原菌から身を守る防護壁だったのです。

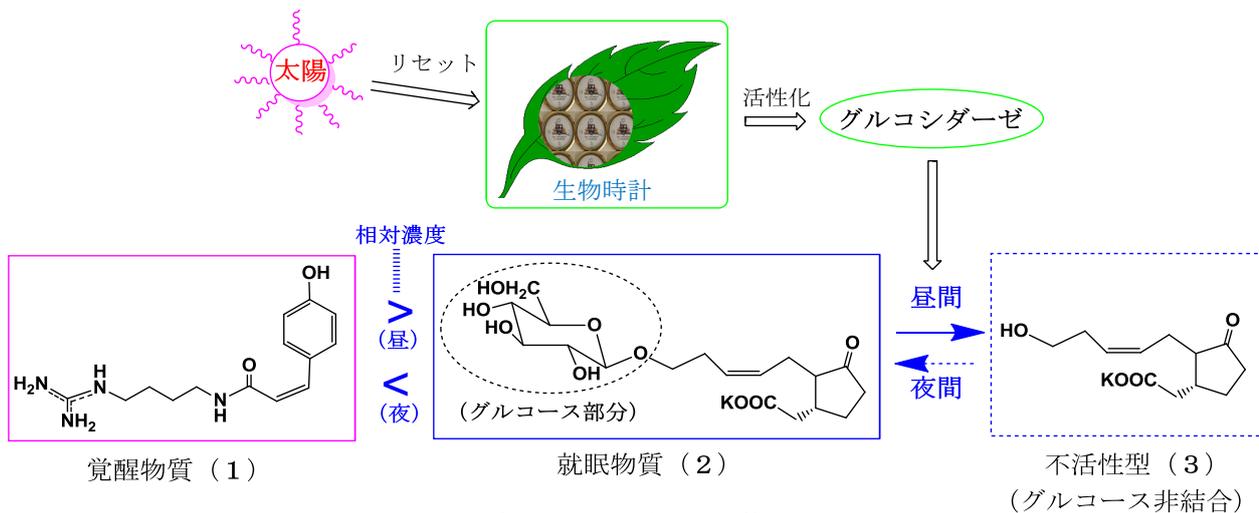
このようにアポトーシスを起した細胞に隣接した細胞は、アポトーシス情報を受けると直ちに周

囲を補強し、防御物質を発生させて、アポトーシスを起こした細胞の死因から自らを守り、死に逝く細胞とは同じ死にはしないように防衛します。したがって、アポトーシスは、単なる「細胞の自殺」ではなく、仲間を守るための「崇高なる死」であり、生物が生き残るためにプログラムされた戦略と言うべきかもしれません。

(2) 植物が眠る？ —睡眠は百薬の長²⁻⁴⁾

ネムノキやオジギソウなどのように、夜に葉を閉じ（就眠）、朝に葉を開く（覚醒）植物は紀元前から興味を持たれてきました。19世紀後半には、「種の起源」で著名な生物学者のダーウィンが、「植物の運動」について詳細な観察記録を残しています。しかし、そのメカニズムについては長い間の謎でした。

最近になって、このメカニズムが分かってきました。ネムノキやオジギソウなどのマメ科植物の就眠と覚醒に関する活性物質が相次いで発見され、いずれの植物にも昼間でも植物の葉を閉じさせる就眠物質と、夜間でも葉を開かせる覚醒物質が対になって含まれていることが報告されました。なお、ネムノキやオジギソウは昼間でも手で触るとすばやく葉を閉じますが、このような葉の開閉は「接触性傾性運動」と呼ばれていて、「就眠運動」の場合とは異なる活性物質（接触した刺激によって発生する電気信号が変換されてできる刺激伝達物質）が関わっていることが分かっています。



マメ科植物は、覚醒物質と就眠物質の両方の活性物質の濃度バランスによって、就眠・覚醒運動を規則正しく行っています。例えば、ネムノキについてみると（図2）、覚醒物質（1）の濃度は昼夜で一定であるのに対して、就眠物質（2）の濃度が夜と昼とで大きく増減します。昼間には、就眠物質（2）は分解されて、不活性型（3）に変化します。このため、就眠物質が減少し、覚醒物質の濃度が相対的に高くなることになり、ネムノキは覚醒します。しかし、夜になると、不活性型（3）が就眠物質（2）に変化する反応が起きて、就眠物質の相対濃度が高くなり、ネムノキは就眠することになります。つまり、覚醒と就眠は、就眠物質（2）の増減によって調節されているわけです。

なお、就眠物質（2）の増減には、グルコシダーゼと呼ばれる糖加水分解酵素が関与しています。特定の時間になると、このグルコシダーゼが活性化されて、就眠物質（2）のグルコース部分（点線で囲った部分）を切断して、不活性型（3）に変化させます。また、このグルコシダーゼを活性化する時刻は、生物がそれぞれの体内に持っている「生物時計」によって決められます。また、植物体内の「生物時計」は、その植物が朝に太陽光を受けることによって、リセット・調整されることが分かっています。

ところで、植物は動物のように眠る必要があるのでしょうか。覚醒物質を用いてマメ科植物を「不眠症」にすると、約1週間で枯れて死んでしまうそうです。このことは、就眠運動が植物にとってなくてはならない生命現象であることを示しています。もしかすると、見た目には眠っていないようにみえる植物も全て、夜になると眠っているのかもしれない。

(3) 植物が「催涙ガス発生装置」を持っている？— 植物と昆虫の駆け引き⁵⁾

ある種の植物は傷害を受けた際の防御手段として、有毒物質を放出することがあります。例えば、ワサビ、カラシナ、ダイコンなどのアブラナ科植物は、虫などによる食害や傷害を受けると、催涙性の刺激臭と強い辛味を有するイソチオシアネートという化学物質を発生します。これによって、虫の食害を防いでいると考えられています。また、イソチオシアネートは、強い殺菌性を有しているので、傷害を受けた傷口からの細菌感染を防ぐ効果もあります。

ところで、これらのアブラナ科植物は障害を受ける前からイソチオシアネートを細胞内に蓄積しているわけではなく、もともとは辛味が全くないカラシ油配糖体(4)という化学物質を含んでいます。しかし、細胞が障害を受けると、糖加水分解酵素(グルコシダーゼ)が分泌され、この作用によってカラシ油配糖体(4)はそのグルコース部分が切断されて、イソチオシアネートに変化します(図3)。まさに、アブラナ科植物は、傷つけられると「催涙ガス」、「殺菌剤」を発射して身を守っているわけです。

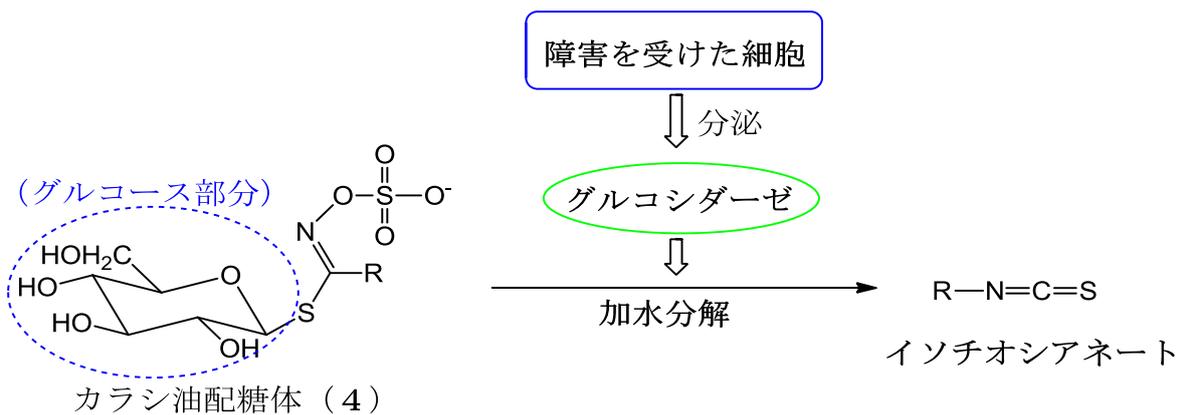


図3 カラシ油配糖体からイソチオシアネートの生成

しかし、アブラナ科のキャベツはカラシ油配糖体(4)を含んでいるにもかかわらず、モンシロチョウには効果がありません。それどころか、この配糖体(4)はモンシロチョウの産卵を刺激する活性を持っています。このため、モンシロチョウはキャベツに産卵することになります。孵化した幼虫はそのキャベツを食べて育つことになり、食事に困らないわけです。つまり、モンシロチョウは、孵化する幼虫の成育に好都合の産卵場所としてキャベツを選択するわけです。モンシロチョウはこの情報を仲間や親から教わるのではなく、植物(キャベツ)から得ているわけです。キャベツにとっては、カラシ油配糖体を含有しているが故に、モンシロチョウの食害を受けることとなります。

それでは、カラシ油配糖体を含有することがキャベツにとって何の役に立つのでしょうか。キャベツは多少の食害を受けることは織り込み済みで、花粉の虫媒介によって子孫を残すために、カラシ油配糖体を使ってモンシロチョウをコントロールしているのでしょうか。それとも、もともとは虫害を受けないための防御手段としてカラシ油配糖体を生成していたが、「タゲ食う虫も好きずき」で、モンシロチョウには効き目がなかったのか、あるいは、もしかしたら、モンシロチョウはそれを無害化する機能を手に入れて、逆に活用するようになったのかもしれない。

いずれにせよ、植物と昆虫が、比較的小さな分子を「情報伝達物質」として使用して、世代を経て伝承・実行される巧妙な「駆け引き」（生態系の制御）を行っているわけです。もっとも、これは「駆け引き」というよりも、植物と動物の垣根を越えた「絆」と言うべきかもしれません。

以上、「植物の生き残り戦略」とそれに関わる「生理活性物質」について、いくつかの例を紹介しました。植物の多様な能力（機能）は、古くから食糧生産や医薬品生産のために直接的に利用されてきましたが、その他にもエネルギー問題（太陽光発電、燃料電池やエネルギー物質の生産・蓄積）や環境問題（環境浄化や二酸化炭素削減）を解決するために重要な役割を果たすと考えられています。このため、それらに関連する活性物質と機能発現のメカニズムを解明する研究やその機能を活用する技術の開発が現在活発に行われています。植物は、私たち動物にとって欠くことのできないパートナーであり、「植物が生き残る」ことは、「人類が生き残る」ことになるわけです。

[参考にした論文・専門書等]

- (1) 「生命化学」(21世紀の化学シリーズ④) 太田・古山・佐上・平田 著, 朝倉書店(2005)
- (2) 「植物の知恵—化学と生物学からのアプローチ」山村・長谷川編著, 大学教育出版 (2004)
- (3) 「動く植物—その謎解き」山村・長谷川編著, 大学教育出版 (2002)
- (4) M. Ueda and S. Yamamura, The Chemistry and Biology of the Plant Leaf-movement, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **39**, 1400-1414 (2000)
- (5) 「天然物化学への招待」林・内尾・岡野・貫名・平田・深宮・本田・松尾 著, 三共出版 (1998)