

物質合成から見た紅葉

Autumn Leaf Tints As a Aspect of Substrate Synthesis

北原晴男*

Haruo KITAHARA

(1996.9.24受理)

要 旨

自然界では動・植物をはじめ様々な生物が生命現象を行っている。そこでは1つ1つの行動・現象が《意味のあるもの》として存在することが科学の進展と共に解明されて来た。

しかし紅葉の仕組みはほぼ解明されたが、その意味すなわち《なぜ紅葉するのか》は分かっていない。化学合成の観点から見ると不思議な現象である。そこで『物質合成から見た紅葉』を述べ、どこが《紅葉の不思議さ》なのか、その所在を明らかにした。

はじめに

「もみぢ葉のながれてとまるみなどには紅深き浪やたつらむ」(古今和歌集, 素性法師)

「わが旅の紅葉いよいよ濃かりけり」(高浜年尾)

カエデやナナカマドに代表される紅葉(もみぢ)は、時候の挨拶の言葉として用いられ、また古来から多くの和歌に詠まれ、俳句の季語として親しまれて来た。

また紅葉は自然に彩りを与え、四季の移り変わりを示す代表的なものとして我々の目を楽しませ、心豊かなものにして来た。

しかしその仕組みについては分かって来たが、なぜ紅葉するか? その意味については分かっていない。

自然界では動・植物をはじめ様々な生物が生命現象を行っており、生命の維持と種族の継続が行われている。そこでは多種多様な化学物質が関わり、生命が営まれている。

我々が庭や道路で目にするアリの隊列は、食料を発見した兵隊アリが付けた道しるべフェロモンと呼ばれる有機化合物の匂いをたどって隊列が組まれたものである。

また一般に、人の思考は物質には関係のないものとして捉えられて来たが、オウム事件に見られるように化学物質が深く関わっており、科学の進展に伴い、脳も化学物質に支配されていることが分かってきた。

生物と物質の関わり、特に生命現象には化学物質が深く関わっており、生命現象の意味を述べるとき、化学物質の存在なしには語れないものとなっている。

また自然界における様々な現象には意味があり、特に生物が行う行動・所作には必ず意味がある。

ここでは古来から秋になると我々の目を楽しませ、心を豊かなものにして来た紅葉についてその現象の『仕組み』と『不思議さ』を物質合成の観点から考えてみたい。

I. 紅葉とは

秋になると樹木の葉は次第に緑色を失って、落葉する前に赤に変わる現象が観られる。この現象を紅葉と言う。紅葉は主に北半球の温帯圏の秋に一斉に現れるので、古くから秋の気象条件と結び付けて研究されてきた。紅葉が美しく発現するには、温度・水分・光などの環境条件が密接に関係している（図1）。

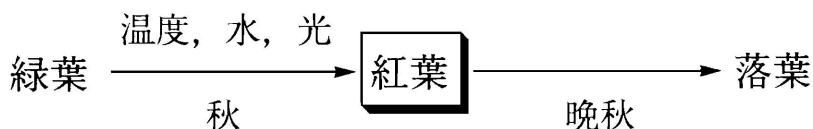


図1. 紅葉とは

紅葉する植物の種類は多種多様であり、代表的なものにAcer（カエデ科）、Rhus（ウルシ科）Eunoymus（ニシキギ科）などがある。しかしその紅葉原因物質である赤色色素は植物の

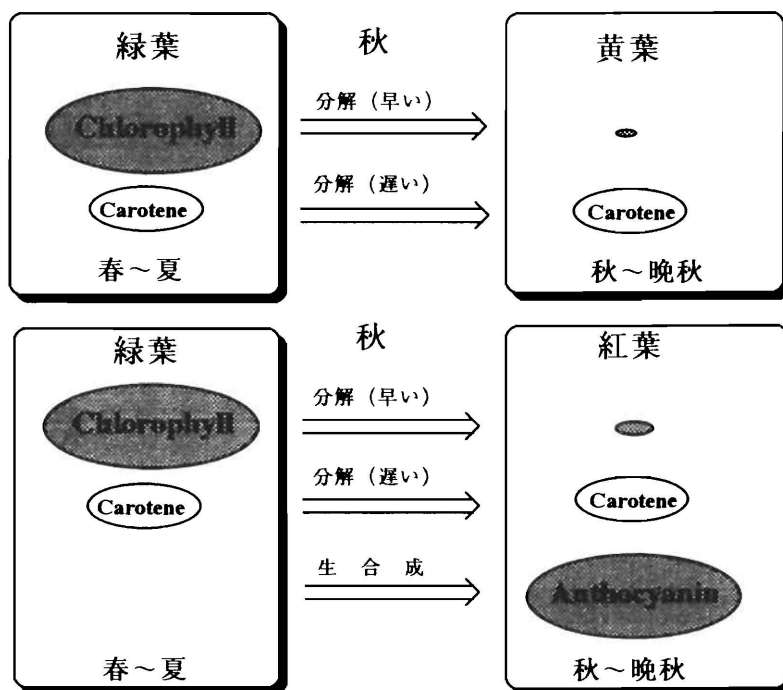


図2. 黄葉と紅葉の仕組み

種類とは無関係に、大部分はアントシアニンである。

一般に、秋に『黄葉』となる葉は、緑色のクロロフィル（1, Chlorophyll）と黄色のカロテン（2, Carotene）を8：1の割合で持っている。秋になると、翌年用いるために、クロロフィルを速やかに分解し枝や幹に回収する。残ったカロテンが葉を黄色にする。実際に緑葉をエチルアルコールに浸して1日置くと黄葉となる。すなわち緑葉にはクロロフィルとカロテンが共存している（図2及び3）。

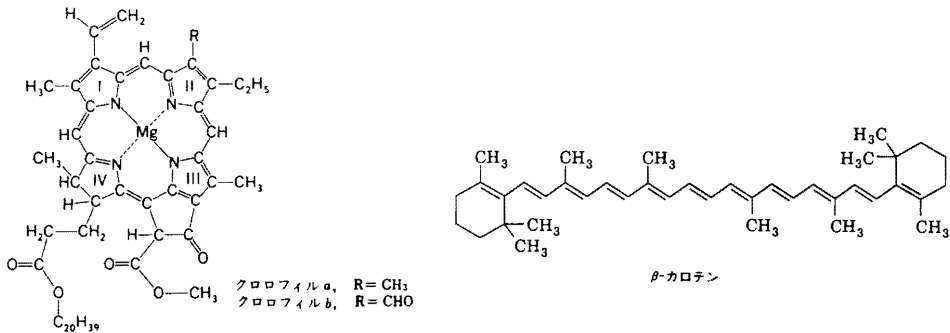


図3. クロロフィル(1)とカロテン(2)の化学構造

『紅葉』は黄葉と同様にクロロフィルとカロテンを8：1の割合で持っている。秋になるとクロロフィルを分解し、カロテンが残っている一方で紅色色素のアントシアニン（3, Anthocyanin）を活発、大量に生成して葉を赤くする（図2及び4）。

つまり『黄葉』は、『緑葉』の色（緑）を形成していたクロロフィルが分解・消失し、元来存在した黄色色素が表出したものであり、『紅葉』は、緑色色素が分解・消失し、残った黄色色素を圧倒的に越える量の赤色色素が新たに作られた（生合成）ために、赤色を呈したものである。これら色素（緑、黄、紅）は全て有機化合物である（図3及び4）。

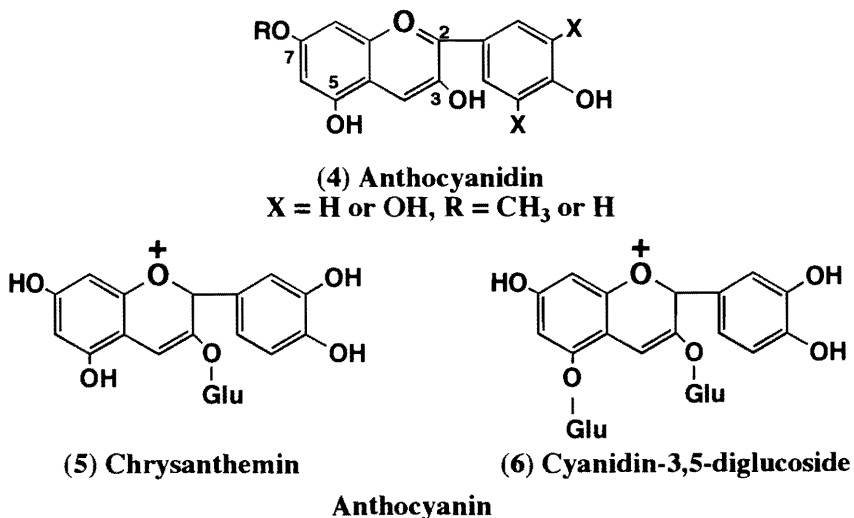


図4. アントシアニンの化学構造

アントシアニンは、アントシアニンと呼ばれるアグリコン部の3位(と、あるいは5位)にグルコース、ガラクトースやマンノースなど単糖類の1位が結合した化合物で、一群の化合物が知られている。これらの化合物としてクリサンテミン(5 .Chrysanthemine)やシアニジン-3,5-ジグルコース(6 .Cyanidin-3,5-diglucoside)がある。アントシアニン(4 .Anthocyanidin)は、3,5,7-トリヒドロキシ-2-フェニルベンゾピリリウム(3,5,7-trihydroxy-2-phenylbenzo-pyrylium)を基本骨格としており、現在まで自然界で見いだされたのは7種類だけである。

II. アントシアニン形成の仕組み

成長過程におけるアントシアニン形成のメカニズムには3種類ある。

- 1) 幼葉で一時的に形成され、葉の成長と共に消失
- 2) 葉の全成長過程で形成
- 3) 秋期に紅葉色素として形成

一般に紅葉として知られているのは3)のタイプのメカニズムで、秋期に紅葉色素としてアントシアニンが形成される。

クロロフィルとアントシアニンの相対関係は以下のようにになっている(図5)。

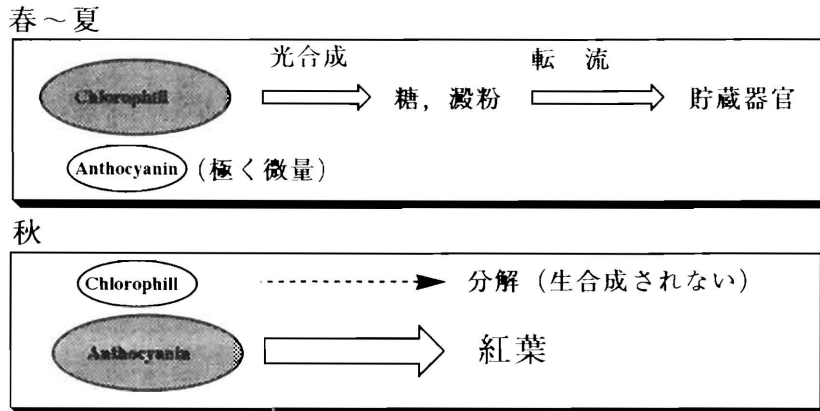


図5. クロロフィルとアントシアニンの相対関係

春から秋にかけてクロロフィルは活発に大量に生合成され、葉を緑にすると共に、光を受けて光合成を行い糖やデンプンを合成し、植物のエネルギー源を供給している。一方アントシアニンは微量にしか存在しない。

秋になるとクロロフィルの生合成は行われず、一転してクロロフィルは分解されて翌年のために各種貯蔵器官に転流貯蔵される一方、新たにアントシアニンの生合成が活発となる。

紅葉に適する条件としては、昼間太陽に光を十分に受け、夜間は5~10℃に下がると美しい紅葉となる。しかし夜間に温度が0℃まで下がると黒い色となり、15℃では黄色い葉になってしまう。

また紅葉は落葉と関係があると考えられている。葉や果実の中に含まれているオーキシニン量が減少すると離層と呼ばれる切れ目になる組織が形成される。葉では、葉柄と茎の接する部分

に離層が生じ、離層の細胞はコルク化が進み、やがて落葉を引き起こす。この時、葉で光合成された糖が、離層のために葉から枝へ移動できなくなるために糖濃度が上り、紅葉になると考えられている。しかし離層ができて赤（紅葉）にならない植物があるため、紅葉の決定的な原因としては考え難い。

Ⅲ. 葉の色素の生合成ルート

アントシアニンは、アミノ酸であるフェニルアラニン（Phenylalanine）から誘導されたp-クマロイル-CoA（p-Coumaroyl-CoA）と3分子のマロニル-CoA（Malonyl-CoA）からカルコン（Chalcone）を経て、シアニジン（Cyanidin）などアントシアニンとなり、糖と結合してシアニジン-3-グルコシド（Cyanidin-3-Glucoside, Chrysanthemine）などアントシアニンが生合成されると予測されている（図6）。

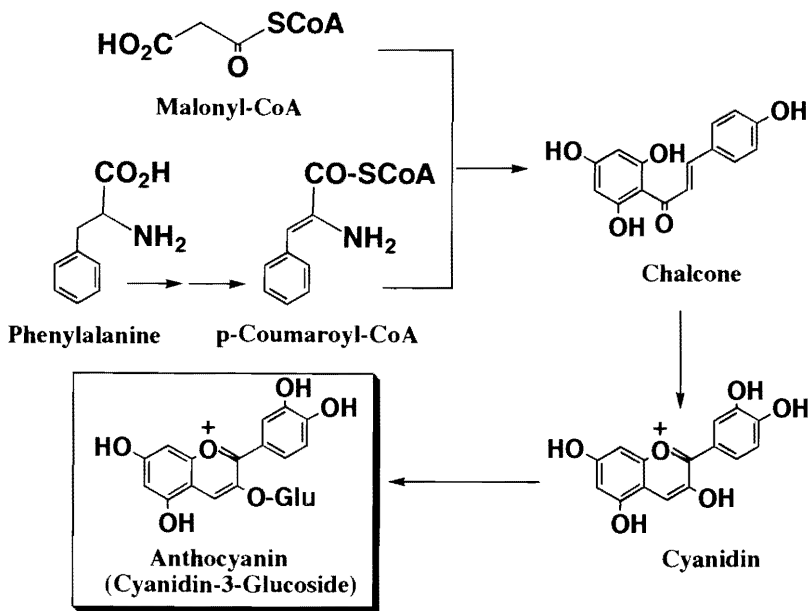


図6. アントシアニンの生合成ルート

一方、クロロフィルは、アミノ酸であるグリシン（Glycine）とスクシニル-CoA（Succinyl-CoA）、あるいはアミノ酸であるグルタミン酸（Glutamic Acid）から5-アミノレブリン酸（5-Aminolevulinic acid）を経て、ポルフォビリノーゲン（Porphobilinogen）を中間体として生合成される（図7）。

アントシアニンとクロロフィルの生合成ルートを比較検討すると、両者には共通性はなく、クロロフィルの分解物あるいは代謝物からアントシアニンが生合成されるとは考え難い。

すなわちアントシアニンはクロロフィルとは全く別のルートから生合成されると考えられる。ここに【紅葉の不思議さ】が存在している。

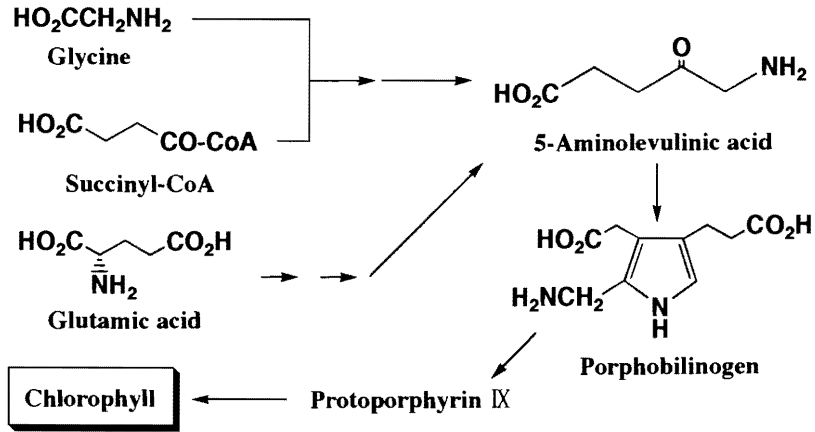


図7. クロロフィルの生合成

V. 紅葉の不思議

1) 《緑葉》の意味

地球上の生命はすべて光合成に依存する。光合成とは炭酸ガス (CO_2) と水 (H_2O) を生物が利用できる有機化合物 (グルコース, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) に変える過程である。

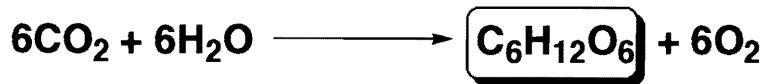


図8. 光合成＝緑葉の意味

CO_2 と H_2O をグルコースに変える反応 (図8) は、グルコースを CO_2 と H_2O とに酸化する反応の逆反応で、正反応で得られるエネルギーと同量のエネルギーを供給しなければならない。このエネルギーは光エネルギーから供給される。この太陽光エネルギーを吸収して化学エネルギーに転換してATPを生産する (光リン酸化過程) のが緑葉を形成する緑色色素のクロロフィルである。つまり正反応は、グルコースを CO_2 と H_2O に変える反応で、この反応でエネルギーが得られる。このエネルギーが動植物の生命活動のエネルギーとなっている。

すなわち緑葉は、地球上に豊富にある炭酸ガスと水と太陽の光から、人間をはじめ動・植物のエネルギー源となるグルコースを生産する工場であり、植物のみならず人間など生物にとって大きな意味を持っている。

2) 紅葉の意味

秋になると葉はクロロフィルを分解し、カロテンが残っている一方でアントシアニンを活発に、大量に生合成して葉を赤くする。IVの生合成ルートで述べたように、アントシアニンはクロロフィルの分解物あるいは代謝物から生合成されるのではなく、全く別のルートから生合成

されている。やがて木本体から切り離され落ちて行く葉で、多くのエネルギーと翌年用いることができるエネルギー源のグルコースなど糖を用いて作られている。

何故そのような大きな労力を使ってまで、葉を赤く（紅葉）する必要があるのか？

何故葉を赤くする物質（アントシアニン）を、木本体から切り離され落ちて行く葉で、合成しなければならないのか？

ここに紅葉の最大の謎がある。

現在までに『紅葉の意味』として3つの案が提示されている。

- A) 秋になり自分を目立たせ、空を飛ぶ鳥に実を食べてもらうため。
- B) 赤い物質は有害な紫外線を良く吸収するため、太陽の有害な紫外線から若い芽を守るため。
- C) 赤い色には何の意味もなく、落葉する時の単なる副産物で、偶然赤くなるに過ぎない。

A) はリンゴは何故赤くなるかと共通の問題としてあるが、紅葉の場合には当てはまらない（実を赤くすれば良い問題である）と思われる。B) は生物にとって種族保存は最大の問題であり、多いに可能性があると思われるが、未だ証明されてはいない。C) は問題外と思われる。

一方紅葉は樹木の老化との関連が言われている。細胞は老化するとリグニン（lignin）を形成し、木化する（図9）。

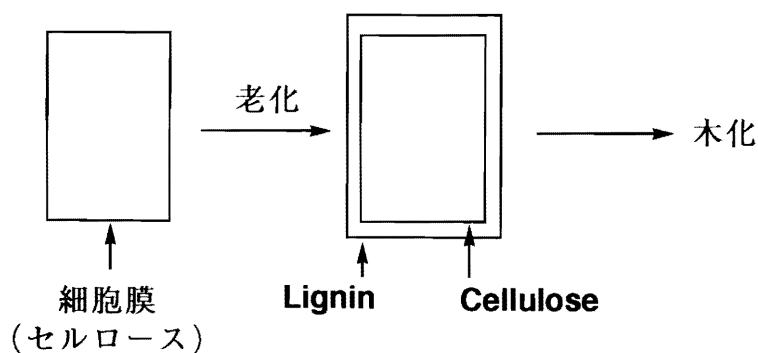


図9. 樹木の老化

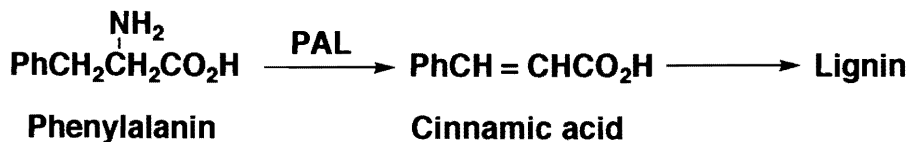


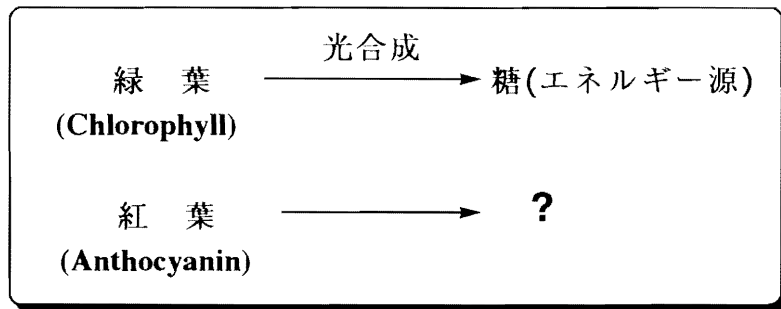
図10. Lignin 形成のメカニズム

細胞の老化に関わるリグニンの形成は、フェニルアラニンのアミノ基が酵素であるPAL（Phenylalanine ammonia lyase）の働きで取り去られることによって起こる（図10）。PALの活性化は赤外光照射、遠赤外光照射が有効である。また赤色素であるアントシアニンは赤外

線を吸収する。このようにアントシアニンの形成と「老化」とは密接に関わっていると推測され、医学をはじめ各分野で『紅葉』が注目されている。

以上考察して来たように、紅葉は

- 1) 太陽の有害な紫外線から若い芽を守るため
 - 2) 老化に関わる現象
 - 3) 生命の維持と種族の保持のために、より積極的な意味を持つ現象
- なのかを、今後は新たな視点から考察し、実験を通して検討して行きたいと考えている。



謝 辞

文献調査に協力して頂いた伊林幸子氏（現・北海道別海町立別海中央中学校）に感謝致します。

文 献

紅葉及び生物化学に関する文献.

- 1) 植物色素—実験研究への手引き 林孝三編, 1980年, 養賢堂.
- 2) 植物の成長と発育—基礎生物学シリーズ7, 賀来章輔・倉石晋共著, 1982年, 共立出版.
- 3) 植物の代謝—新しい植物生理への基礎, ストラッフォード, G.A.著, 1973年, 河出書房新社.
- 4) 花色の生理・生化学—増補版, 安田斉著, 1993年, 内田老鶴圃.
- 5) コーン・スタンプ「生化学」, 1981年, 東京化学同人.
- 6) D.Voet and J.G.Voet. "Biochemistry 2nd Ed.", John Wiley & Sons, 1995.

アントシアニンの生合成に関する文献.

- 1) G.Forkmann, "The Flavonoids", ed.J.B.Harborn, p.537-564, Chapman & Hall, 1994.
- 2) W.Heller and G.Forkmann, "The Flavonoids", ed.J.B.Harborn, p.499-535, Chapman & Hall, 1994.
- 3) C.Jayaram and P.A.Peterson, Plant Breeding Rev., 1990, 8, 91-137.
- 4) H.K.Dooner, T.P.Robbins and R.A.Jorgensen, Ann.Rev.Genet., 1991, 25, 173-199.
- 5) T.W.Stevenson, "Plant Gene Research, Molecular Approaches to Crop Improvement", ed. E.S.Dennis and D.J.Llewellyn, p.127-148, Springer-Verlag, 1991.
- 6) C.Martin and T.Gerats, Plant Cell, 1993, 5, 1253-1264.