

DNA、遺伝子、そして花産業

千葉大学園芸学部

安藤 敏夫

花卉園芸学研究室のいま

上田善弘助教授が3月に岐阜県立国際園芸アカデミーに転職したため、10月1日現在、花卉園芸学研究室のスタッフは私（教授）と、國分尚助教授（9月に昇任）の二人だけである。教員削減の影響を受けて、助手ポストは順番待ち。他の研究室の助手が空くまで採用できない。もっとも、園芸別科の花弁専攻を担当する渡辺均助手もおり、定員が補充されれば園芸学部の花弁研究者は4人体制である。

近年の花弁研は「フィールドからDNAまで」をスローガンとして活動してきた。目指すものは「園芸植物遺伝資源学」の創生。もっとも花弁しか扱わない花弁研の場合の目標は「花弁遺伝資源学」ということになる。まず、花弁の野生遺伝資源を求めて自生地（フィールド）を探索する。次に、採集してきた植物を大規模に栽培して、遺伝資源としての性能を様々な角度から評価して、育種の基礎情報を提供する。そしてDNA配列の違いなどから、野生種の類縁関係を明確にして、交雑育種の用途を予測したり、有用形質が発見されたなら、その遺伝子をクローニングしたりする。

もともと栽培系だから得意である。平成3年に農場が柏市に移転してから、旧農場跡地は研究農場となり、敷地は研究室毎に配分されている。花弁研では3棟の温室（各65坪）と11棟（34～54坪）の硬質プラスチックハウスを使って、常時1万株の遺伝資源を栽培しているが、こんなことができるのも農場が移転したお陰である。もちろん全国の花弁関係の研究室の中では最大規模である。

に関しては、1988年から著者が学生とともに、南米大陸をフィールドとして、ペチュニア属の野生種を集めている。今年で18年目を迎える。探索範囲はウルグアイ（全域）、ブラジル（南端の3州が中心）、パラグアイ（南東部）、アルゼンチン（北半分）で、現在、アルゼンチン探索の最終段階を迎えている。最後に残ったのはボリビアである。南米での走行距離は15万キロを越えてしまった。上田助教授は、1996年から、バラ属の遺伝資源を追って、中国（新疆ウイグル自治区、四川省、雲南省）、ラオスを探索していた。ともかく、

花弁研のは世界のトップレベルと言えるまでになった。事実、英国の植物学専門誌 = Annals of Botanyの最新号に発表した花弁研の論文は、その表紙を飾る栄光に浴している。

問題はである。花弁研には5年ほど前にDNAシーケンサーという、4千万円もする機械が導入されて、DNA・遺伝子解析の準備が整った。しかし、なかなか技術は向上しなかった。その原因は、勉強嫌いの上に、アルチューハイマーの気がある教授の頭だった。なかなかDNA技術を理解しない。それでも、執念深い性格が功を奏してか、だんだん分かってきたらしく、感でDNA技術をつかんでしまった。教授はもうの分野でも学生を指導している。

これは分子生物学の世界であって、世界には猛烈な強者がいてどうも分が悪いが、なんとか一流紙に投稿できるようになった。ただ、月額100万円を下回らない試薬代には頭を悩ませている。国から支給される研究費は年間50万円前後に落ち込んでいる。全て稼いでこなければならぬ時代、金の切れ目が縁の切れ目、と言われるDNAの世界の厳しさが身にしみる昨今である。

前置きが長くなったが、このようにして、一介の花弁園芸学者が見たDNAと遺伝子の世界をご紹介します。

DNAと遺伝子

DNAはヌクレオチドとよばれる塩基が、2重の螺旋構造を形作りながら非常に長いひも状に結合した物質である。その塩基にはたった4種類しかなく、A（アデニン）、T（チミン）、G（グアニン）、C（シトシン）の4文字で表記される。必ずAはTと、GはCと結合するので、螺旋構造を形作る2本鎖の一方の配列を決定すれば、自動的に他方も決定できる。このようにDNAはA T G Cの4文字で表記される4進法の暗号であり、コンピュータが0 1の2文字で表記される2進法の暗号であることとよい対比をなしている。

たった4塩基とはいいいながら、例えば5塩基配列のもつ情報量は4の5乗 = 1024にもなる。ヒトのDNAは30億塩基と言われているから、4の30億乗となり、その情報量は想像を絶する値である。驚くことにマウスは33億塩基もあってヒトより多いし、バツは50億塩

基、ユリ科には1200億塩基もある極めて長いDNAをもつ種もある。だから、DNAには無駄な、つまり意味のない配列もたくさん含まれていることが分かる。逆に、DNA配列の中に存在する意味のある配列が遺伝子ということになる。

DNAは3つの塩基で一つのアミノ酸を合成するルールになっている。例えばTTAはロイシン、GCTはアラニン、GATはアスパラギンを合成する。理論的には、3塩基によって4の3乗=64通りのアミノ酸を合成できる訳だが、実際には最初の2塩基によってアミノ酸を定義している場合も多く、例えば、GCT、GCC、GCA、GCGはどれもアラニンを合成する。これらの3塩基をコドンと呼んでいる。このようにDNA暗号は3塩基を単位としたコドンの暗号に他ならない。

ここで特別な意味のあるコドンに注目しなければならない。ATGはメチオニンを合成する唯一のコドンである。遺伝子の先頭は必ずATGで始まることから、これを開始コドンと呼んでいる。一方、TAA、TAG、TGAの3つのコドンはアミノ酸を合成しない。つまり、このいずれかが遺伝子の末尾になることから、終止コドンと呼ばれている。このように、遺伝子はDNAの中の開始コドンと終止コドンに挟まれた部分であり、DNAの中に遺伝子は飛び飛びに配置されている。

こうして遺伝子によって合成される一連のアミノ酸がペプチド結合してタンパク質が合成される。従って、一つの遺伝子の産物は、その遺伝子によって定義される一定の構造をもったタンパク質ということになる。

モデル植物

この様に非常に情報量の多いDNAであるから、その全ての遺伝子の働きを調べ上げることは簡単ではない。どこに遺伝子が存在するかという問いに答える前に、全DNA配列をとりあえず読んでしまおう、というやや乱暴な（失礼！）力仕事はゲノムプロジェクトと呼ばれていて、国毎に担当する染色体を分け合って、国威をかけて諸国がDNA配列の決定を競い合っている。植物では、シロイヌナズナとイネの全DNAの配列を読み終えている。一方で、そのDNAのどこにどのような遺伝子が存在するかを調べる研究も平行して行われている。

このように、遺伝子を徹底的に調べてしまおうと、世界の研究者が注目する植物をモデル植物と呼んでいる。花卉の中のもっとも有名なモデル植物は、ペチュニアとキンギョソウである。どちらもアントシアニン合成系の遺伝子は、ほぼすべて解読を終えている。

品種改良は遺伝子変異の歴史

花卉研では、モデル植物の一つであるペチュニアを用いて、品種改良の歴史を遺伝子変異の歴史として記録するための研究を始めている。その手始めとして、ペチュニアの花色育種の歴史を、アントシアニン合成

系遺伝子の変異の歴史として記載する、園芸界として初めての研究に挑戦している。品種レベルでペチュニアのアントシアニン合成系遺伝子を調べているのは今のところ花卉研だけであるが、いつ競争相手が登場するか、戦々恐々とした日々でもある。だが、こうして少し見えてきた花色育種の歴史は、意外な表情をもった遺伝子の歴史であった。

1990年代に日本から発信されたサフィニアを代表とするカスケード型ペチュニアは、新たな野生種の遺伝子が追加されたことから、非常に大きな形質の変化を生んだ。まさにペチュニアの革命であった。しかし、それ以前のペチュニアは、1830年代に英国で2種の野生種（アキシラリスとインテグリフォリア）を両親として作出された雑種の後代と考えられており、カスケード型ペチュニアとは一線を画したまとまりのある形状をもっている。これは遺伝子の変異幅が狭いことの証拠と考えられる。これをスタンダード型とすることにしよう。スタンダード型には、かつて第3、第4の野生種も交配されているという意見もあるが、いまのところその証拠は遺伝子に発見できない。

アントシアニンの単純化

ペチュニア野生種の花に蓄積している主要なアントシアニンは複雑な構造のマルビジン誘導体である。比較的簡単な構造のアントシアニンを蓄積する野生種もあるが、どれも1960年代以降に発見された新種であり、1990年代以前のスタンダード型ペチュニアの育種には使われていないようだ。

スタンダード型ペチュニアの両親の花色は白（アキシラリス）と赤紫（インテグリフォリア）である。野生種に比べれば、品種は非常に花色が豊富で、複雑なアントシアニンをもっている様に思われる。しかし、実際には、品種のアントシアニンの構造は野生種のそれに比べれば単純なものばかりである。特に、120年もの品種改良を経て1950年代になってやっと作出された赤を発色するアントシアニン（シアニジン3グルコシド）は、もっとも単純な構造である。つまり、品種改良が進むほど、花のアントシアニンは単純構造になっていく、という意外な事実が見えてくる。

野生種の花に存在する複雑なアントシアニンを合成する一連の遺伝子群のどれかが、何らかの原因で働かなくなると、アントシアニン合成系が中断してしまい、野生種には存在しないアントシアニンが蓄積することになる。それは野生種には存在しない色彩であって、園芸的には新花色として尊ばれる色彩となる。

花色に関する育種家の仕事を、野生種にない色彩を作出することとするならば、腕のいい育種家は、このように壊れた遺伝子を発見して、それを上手に使いこなす技術に長けた技術者と表現可能であろう。どうやらこれはペチュニアだけの話ではないらしい。次第に

分かってきたことは、どの花卉においても野生種のアントシアニンに比べて、品種のアントシアニンの方が構造的に単純であり、育種家は同じように壊れた遺伝子を上手に使ってきたらしいのである。専門的には壊れた遺伝子のことを、変異遺伝子と呼んでいるが、同じ意味である。

遺伝子を破壊する遺伝子

ヒトのDNAも例外ではないが、DNAの中には、自分の力で動き回り、DNAの他の領域に潜り込むことができる奇妙な遺伝子が含まれている。これをトランスポゾンと呼んでいる。普通の状態だとトランスポゾンは静かにしているが、DNAにストレスがかかると、急に動き出す。トランスポゾンが動いて、遺伝子の途中で潜り込んでしまうと、その遺伝子の塩基配列は変わってしまう。つまり遺伝子の変異してしまう。こうしてトランスポゾンは遺伝子変異の主要な原因と考えられているのである。

遺伝子にトランスポゾンが刺さると、遺伝子の先頭から3塩基（コドン）単位で読んできた暗号にずれが生じてしまう。これをフレームシフトという。ずれた塩基暗号の中に偶然ストップコドンがあれば、遺伝子の翻訳はそこで止まってしまい、機能をもったタンパク質が作れないこともある。これは遺伝子の破壊である。新しい位置のストップコドンによって作られた、別のタンパク質が生存競争に有利なものであれば、遺伝子の破壊と言うより、遺伝子の進化と言った方が妥当となる。このように遺伝子を破壊する遺伝子は進化の原動力でもある。

アントシアニン合成系遺伝子の場合には、こうした遺伝子の破壊によって新花色を作る変異遺伝子が誕生する。事実、市販されているペチュニアのアントシアニンの質（どのアントシアニンを蓄積するかという意味）は、たった3つの遺伝子の変異によって全て説明できる。最初の遺伝子（3Rt）には花卉研がdTph3Cと名付けたトランスポゾン（Cは千葉大学のC）が刺さっており、フレームシフトの結果、その遺伝子にストップコドンが生じて翻訳が止まっていた。

第2の遺伝子（Hf1）には、2種類の変異が見つかった。つまり、この遺伝子には2回、別々の変異が起こっていた。それらを発見した育種家が二人いたのかもしれない。

その一つは花卉研がdTph9と名付けたトランスポゾンが刺さっていた。もう一つの変異を起こしたトランスポゾンをrTph1と名付けたが、これはペチュニアで発見された最初のレトロトランスポゾンとなった。どちらの変異にもストップコドンが生じており、それらが遺伝子破壊の原因となっていた。

第3の遺伝子（Hf2）の破壊の原因はトランスポゾンではなかった。遺伝子の途中で挿入されている意味

のない塩基配列（イントロン）の一部が欠損していることと、遺伝子本体（エクソン）の塩基が数カ所別の塩基に置換されていることが、変異の原因と思われるが、ストップコドンが生じているわけではないので、この変異の原因追及を進めているところである。

第1と第2の遺伝子に生じた変異は、おそらく栽培中に生じた変異であろうが、第3の変異は、もともと品種の歴史的な母親がもっていたものにそっくりである。

ペチュニアの花色に関しては、新花色の登場というトピックスとして記事が残されているから、かなり歴史をさかのぼることができる。歴史的資料と、こうした遺伝子の変異を重ね合わせると、最初に変異したのが、第2の遺伝子であって、第3の遺伝子の変異と重なって、ピンク（アントシアニンはペオニジン）を生じたい。次いで第1の遺伝子に変異が起こりサーモン（シアニジン）が誕生した。引き続いて、アントシアニン濃度を高める何らかの遺伝子変異が起こって、1950年に赤が誕生した、というペチュニア育種の歴史の一端が垣間見え始めた。

更なる挑戦

アントシアニン濃度を高めたのは第4の遺伝子（FLS）とする説が有望だったが、実際の市販品種のこの遺伝子には変異が見つからないため、濃色化の原因は分かっていない。

ペチュニアで白花を作り上げるには二つの方法が考えられる。一つは、アントシアニン合成系の初めの部分、つまりまだアントシアニンになっていない無色の原料の段階を司る遺伝子で、これが破壊されれば、簡単に白花が誕生する。アントシアニンを合成するために必要な各々のステップに働く遺伝子を総称して構造遺伝子とよぶが、その他にもアントシアニン合成系の全体を動かすために必要な、いわば電源のような遺伝子も知られている。これらを総称して制御遺伝子と呼ぶが、この制御遺伝子が破壊されてもアントシアニンは合成されず、白花になってしまう。従来の説は、ペチュニアの白花を一つの制御遺伝子（An1）の変異としているが、実際の市販白花品種のこの制御遺伝子に変異は見つからなかった。白花の原因追求も急がねばならない。

おわりに

もうじき24時を回る。著者は明日、南米に行く。この17年間、11月を南米で過ごし、四季は春夏春冬を繰り返し、秋がなかった。一昨年、家族の事情で日本に留まったが、日本の秋の美しさが心にしみた。あと4回の11月が終われば、日本の秋をたっぷり楽しみたいと思う。もう著者の研究生活も秋だから。