

2022年 市民講座

生き物の豊かな世界
- 謎解きと応用の楽しさ -

大隅基礎科学創成財団 理事
大谷清

大隅基礎科学創成財団は2022年8月21日午後3時から「生き物の豊かな世界—謎解きと応用の楽しさ」をテーマにオンライン形式で市民講座を開きました。

冒頭、大隅良典理事長が「当財団は、科学が人間活動の文化の一つとして認知されることを願って活動している。科学にはまだまだ未知の世界がたくさんある。今回は二人の研究者によるカブトムシと植物の世界の最先端の研究を楽しんでほしい」と挨拶、財団理事の池内昌彦東大名誉教授の司会の下、全国各地から約150人が講演と質疑に参加して午後5時まで続けました。以下にその要旨を報告します。

講演1 カブトムシの角づくりの謎を解き明かす

基礎生物学研究所 教授
新美 輝幸

昆虫の種は同定されているものだけでも100万種、地球上の全動物種の約4分3、全生物種の2分の1を占め、個体数はアリの仲間だけでもヒトの人口（70億人）の10億倍もの数が存在する。種の数と個体の数が圧倒的に多く、多様性に富むのが最大の特徴だ。したがって昆虫は興味深い生命現象の宝庫であり、進化を研究する上で格好の研究材料になる。さらに、ヒトが応用すれば蚕の繭から絹糸が取れ、蜂からは蜂蜜が得られるように有益な存在でもある。



なかでも私の興味を引いたのは、進化の過程で獲得した翅や角などの適応形態だ。昆虫の中でもカブトムシを研究材料にしたのは、まず第1に角をもつ昆虫であること。クワガタにだって角はあると思われるかもしれないが、クワガタの「角」は実は角ではなく大顎、蜂の大顎が顕著に発達したようなものだ。その点、カブトムシの角は表皮から発達した全く新規の形態形質だ。その獲得メカニズムは進化学において重要なトピックになっている。

もう一つの理由はいうまでもなく入手や飼育のしやすさだ。カブトムシは日本の本州以南、台湾、中国、朝鮮半島、インドシナ半島に広く分布し、夏になると樹液の出る樹に集まるカブトムシを容易に捕まえることができる。最近ではホームセンターなどで昆虫栄養ゼリーとともにペットとしても売られており、容易に入手可能だ。

我々の研究室では充分発育した幼虫を毎年約3000匹購入している。これらの幼虫の雌雄は容易に判別できる。腹部の腹側にV字マークの入ったのは雄、ないのが雌だ。このマークを指標に雌雄を判別し、購入した幼虫を低温保存することで一年中研究に用いることが可能だ。カブトムシは土の中で卵から孵化（ふか）して幼虫になり蛹化（ようか）して蛹（さなぎ）になる。蛹化が始まるとまず胸の角が伸び、次に頭の角が伸びてくる。胸の角（胸角；きょうかく）は先端部が2又になった角として完成するが、頭の角（頭角；とうかく）は2回枝分かれして大きな角に伸びていく。このような頭角の形は日本のカブトムシだけといわれている。

問題はなぜ雄だけに角が現れ、雌にはないのか。ダーウインはこの解答を考え、1871年に発表した著書『人間の進化と性淘汰』の中で、二つの可能性があるとして分析した。一つは「異性間性淘汰」、つまり雌にアピールするために角がある。もう一つの可能性は「同性内性淘汰」で、同性と戦って勝って雌と交尾する権利を得るために角がある、という考え方だ。この説に従えばカブトムシは同性内性淘汰に分類される。ちなみに日本のカブトムシは闘争の際に「すくい投げ」に適した形状の角をもち、また「突き」に適した構造の角をもつ外国産のカブトムシもいる。

角はいつできるか。角形態を最初に観察できるステージは、蛹になる直前（前蛹；ぜんよう）である。前蛹のステージで角になる部分には角原基（つのげんき）が作られる。電子顕微鏡やマイクロCTで角原基を観察すると、頭角原基には多くのしわがあり、胸角原基にはしわが少ない。頭角は長く伸びるためにしわが密になっている。カブトムシの角研究を行う上で重要な発生ステージである前蛹期間は、前蛹に特異的な「頭振り」行動を指標にすることで、正確に規定することが可能だ。

ではカブトムシの性を決める遺伝子は何か。一般に昆虫は雄雌で色や模様が違うように性差がある。昆虫には雌雄モザイクが存在し、たとえば体の半分が雄で半分が雌というものもある。ヒトなどの哺乳類の性は性ホルモンによって決定されるが、昆虫の性は細胞一つ一つの遺伝子によって自律的に決定される。このため発生過程で性染色体などに異常が起きると雌雄モザイクが生じる個体が現れる場合がある。

カブトムシの遺伝子分析で分かってきたことは、性を決める遺伝子と性差を作る遺伝子があることだ。つまり、雌は雌という性を決める遺伝子が機能するため、雌にする遺伝子が働き雌へと分化するが、雄には雄を決める遺伝子がなく、雌を決める遺伝子が機能しないため、雄にする遺伝子が働いて雄へと分化する。

前蛹直前の幼虫の段階で、性差を作る遺伝子の働きをRNA干渉（RNAi）の手法を使って抑えてやると、雄の頭角は小さくなり、雌には小さな頭角が発生した。いわば雌雄中間型のカブトムシができた。次に雌を決める遺伝子の働きを同じようにRNAi手法を使って抑えてやると、雌は雄のような形質の角を作ることが分かった。

さらに次世代シーケンサーなどの最新技術を使って角を形成する遺伝子を探ってみると、雌雄で働きの異なる遺伝子が多数あることが分かった。これらの遺伝子の機能をRNAi手法で阻害してやると角が消失したり、短くなったり、形が変わったりすることが11個の遺伝子について観察された。

さらにこの11遺伝子は、肢や頭部の形成にも重要な機能を担うことが知られた遺伝子であった。これらのことからカブトムシは肢や頭部を作る遺伝子を角の形成にも利用するように進化したのではないかと考えている。現在、カブトムシを材料に角を作る遺伝子の全貌の解明を目指している。

編集者注

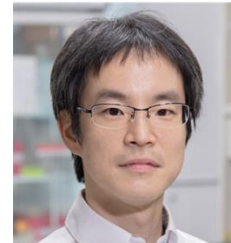
- ・ダーウイン：Charles R. Darwin (1809-1882)。『人間の進化と性淘汰 (The Descent of Man, and selection in Relation to Sex)』
- ・マイクロCT：マイクロコンピュータ断層撮影。X線を用いて物体の断面を撮影し、非破壊的に物体の3次元モデルを再現する技術。病院のCTスキャンと原理は同じだが、小規模で解像度が大幅に向上し、断面の画素サイズがマイクロメートルであることから接頭語のマイクロが用いられている。

- RNAi : RNA interference。目的とする遺伝子の配列に従って合成した二本鎖 RNA を導入することで、その配列と相補的な配列を持つメッセンジャーRNA (mRNA) を特異的に分解する現象。特定の遺伝子の機能を阻害する方法として広く用いられている。1998 年に米国のアンドリュー・ファイアー博士と C クレイグ・メロー博士によって論文が発表され、二人は 2006 年のノーベル生理学・医学賞を受賞した。
- 次世代シーケンサー : (NGS、Next Generation Sequencer)。膨大な数の DNA 分子を高速で配列決定する装置。

講演 2 持続可能な農業を目指した接ぎ木の研究

名古屋大学生物機能開発利用研究センター 准教授
野田口 理孝

私がかねて農業に役立つ研究がしたいと思い、接ぎ木（以下、接木）の研究を続けている。接木に着目したのは、地球環境の変化、特に温暖化で土壌の塩分濃度が上昇して塩害による「問題のある耕作地（ストレス土壌）」が増え、今では世界の畑の 40% がストレス土壌になったといわれる。その対策として、ストレス土壌にも強い植物を接木の手法でつくりたいと考えたからだ。



接木は私たちの身近に存在する。ソメイヨシノはすべて接木で繁殖したものだし、トマトの生産では約 6 割、キュウリでは約 9 割で接木の苗が使われている。リンゴ、ナシ、ブドウ、モモなどの果物も接木が応用されている。江戸時代後期、歌川国芳の浮世絵にも「百種接分（接ぎ分け）菊」が描かれている。茎を切って二つの植物をつなぎ合わせる接木は世界的に見ても人類が 2000 年も前から世界中で利用してきた技術だ。

しかし 2 つの課題がある。一つは組合せは種の近い植物同士でしかできず、限定的であること。もう一つは手作業で生産効率が悪いこと。この二つの課題をわれわれは異科接木法 (iPAG) と接木カセットを開発することで乗り越えようとしている。

接木によって分子がどのように移動するかを研究するため、モデル植物のシロイヌナズナを使って実験したが、同種の植物では流れが見えにくい。そこで異なる科のタバコ属を接木してみると、その上でも発育することを偶然に発見した。アブラナ科 (シロイヌナズナ) とナス科 (タバコ属) という二つの異なる科の植物の間で水や栄養、メッセンジャーRNA (mRNA) やタンパク質などの生体高分子が運ばれていくのが観察された。

タバコ属はキャベツ、ブロッコリー、カリフラワーなどのアブラナ科、大豆や小豆などのマメ科とも接木することができた。さらにウリ科に属するキュウリ、カボチャとも接木が成功した。これら 4 つの科は我々の日々の食卓を飾る大事な植物で、それらがタバコ属と接木できたことは大きな発見だった。タバコ属はこれまでに 73 種、38 科の広範な植物と接木可能なことが実証されている。

まずはこうした現象の分析・解明だ。電子顕微鏡でシロイヌナズナとタバコを V 字型に接木した部分を観察すると、お互いの細胞が良く接し合っており、細胞壁が消化され溶けてなくなっていた。園芸で広く楽しめる花のペチュニア (ナス科) もタバコ属と並んで異科接木が可能な植物であることがわかった。

タバコ属植物とペチュニアが異科接木を成立させることのできる共通因子を遺伝子レベルで調べてみると、細胞同士を接し合わせるのに働く遺伝子がタバコ属植物で 189 個見つかり、その中

で細胞壁を溶かす酵素 β -1, 4-グルカナーゼをコードしている遺伝子 GH9B3 が見つかり、その遺伝子発現と酵素活性が重要であることが分かった。そこでわれわれはこの共通のメカニズムに基づく植物の接木を iPAG (interfamily Partner Accepting Graft) と名付けた。

β -1, 4-グルカナーゼは同じ科同士の接ぎ木でも働いていることが分かったが、異なる科の接ぎ木ではタバコ属だけで機能することも分かった。我々はストレス土壤に強い根を持つキクを土台にタバコの茎を挟んでトマトを接ぎ木することに成功した。まだ小さな実が一つになっているにすぎないが、これを大きく沢山ならせることが目標だ。

次の課題が接木の生産性の向上だ。我々は光造形技術などを使って接木の苗づくりを効率化する接木チップを開発した。植物の種をまいて葉が出たら接木する仕組みになっている。これによって接木のイメージングが可能になった。その後、トマト用の接木カセットと接木装置を大学発ベンチャーを作って開発した。接木カセットと接木装置を組み合わせることで作業を自動化し、人の手作業による接木作業と生産性を比較したところ、生産性は8倍に上がった。

今後はシンクロトロン光施設でのマイクロ CT、超高压電子顕微鏡などを利用して組織の可視化や細胞の3次元解析をしながら、接木した時に働く新たな分子の探索を続けていくつもりだ。

編集者注

- β -1, 4-グルカナーゼ：細胞外に分泌されて細胞壁消化に関与するとされるタンパク質
- 大学発ベンチャー：2017年に野田口氏らが創設した名大発のグランドグリーン（株）
- シンクロトロン光施設：SPring-8などで知られる放射光施設。太陽の100億倍もの明るさの放射光という光を使って物質を原子・分子レベルでその形態や機能を調べることができる
- 超高压電子顕微鏡：ultra-high voltage electron microscope。1000kvの電子は波長が0.00087nm（ナノメートル）まで短くなる。この波長の短さを利用して高分解能化が図られ、0.1nm程度の分解能が得られる。