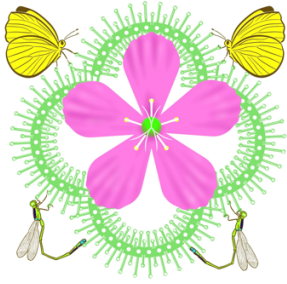


NAGOYA
2020

第84回日本植物学会名古屋大会



公開講座

植物は

大モシロイ!

食虫植物 vs. 昆虫のドラマをさぐる

田川 一希 (宮崎国際大学教育学部)

つながる根 :

寄生植物と宿主植物のフシギな関係

吉田 聡子 (奈良先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科)

花びらの数にみる植物の適当な形づくり

北沢 美帆 (大阪大学全学教育推進機構)

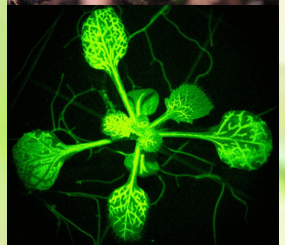
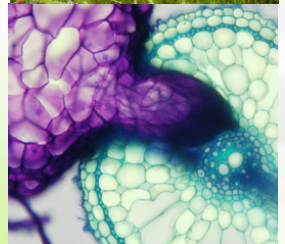
なぜ植物は切られても再生できるのか

池内 桃子 (新潟大学理学部)

虫にかじられた

植物が発する緊急信号を見る

豊田 正嗣 (埼玉大学理工学研究科)



2020年9月21日 (月) オンライン開催

公開講座「植物はオモシロイ！」

日時 9月21日(月) 15:30～17:30

会場 A会場 (Zoom ウェビナー)

参加方法 事前参加登録が必要です。登録アドレスに、事前に Zoom ウェビナーの URL 及び講演要旨集のパスワードを送信します。講演要旨集は大会 HP からダウンロードして下さい。質問はチャットを利用して書き込んで下さい。時間の都合上全ての質問に回答することはできませんが、投稿された質問を司会がピックアップして代読し、発表者に答えていただくことにしますので、ぜひ質問して下さい。下記の情報セキュリティ(注)にご留意の上、ご参加ください。

内容 植物は様々な生き様を持っています。虫と共に生きたり、他の植物や動物に寄生して生きる生き様。そして、動物のように自由に動くことのできない植物は、動物からのその身を守ることや自分自身を再生させるなど、ありとあらゆる工夫を凝らして進化してきました。そのような植物のおもしろさを、マクロからミクロまで研究している若手研究者の方々に紹介してもらいます。とくに、これから研究を始めようとする人たちや、研究者を目指している大学生や高校生たちの刺激となるようなプログラムです。

プログラム

- 15:30-15:35 はじめに
森田 (寺尾) 美代 (基礎生物学研究所)
- 15:35-15:55 食虫植物 vs. 昆虫のドラマをさぐる
田川 一希 (宮崎国際大学教育学部)
- 15:55-16:15 つながる根：寄生植物と宿主植物のフシギな関係
吉田 聡子 (奈良先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科)
- 16:15-16:35 花びらの数にみる植物の適当な形づくり
北沢 美帆 (大阪大学全学教育推進機構)
- 16:35-16:55 なぜ植物は切られても再生できるのか
池内 桃子 (新潟大学理学部)
- 16:55-17:15 虫にかじられた植物が発する緊急信号を見る
豊田 正嗣 (埼玉大学理工学研究科)
- 17:15-17:30 最後に
三村 徹郎 ((公社) 日本植物学会・会長、神戸大学)
司会：森田 (寺尾) 美代 (基礎生物学研究所)、渡邊幹男 (愛知教育大学)

(注) 情報セキュリティ

発表内容に関して、画面の録画・撮影、音声の録音は厳に禁止します。Zoom ウェビナーの URL、要旨集等の PDF のパスワードは非公開ですので、公開講座参加登録者以外に伝えないで下さい。公開講座の Zoom にアクセスした時点で、この注意事項に同意をいただいたとみなします。遵守をお願い致します。

食虫植物 vs. 昆虫のドラマをさぐる

田川 一希

宮崎国際大学教育学部 講師

夏に野外を散歩していると、クズの葉をもくもくと食べるマメコガネ、イネの葉を食べるコバネイナゴと、植物を食べる昆虫の姿をたくさん見つけることができます。このように、一般的に、植物は「食べられる」側、昆虫は「食べる」側の存在です。しかし、そのような立ち位置が逆転している植物が存在します。それが食虫植物です。食虫植物は、昆虫を誘引・捕獲・消化し、栄養分を吸収します。虫を食べる性質は、土壤栄養に乏しい環境での生存に有利であり、被子植物の系統で少なくとも 10 回独立して進化したことが知られています [1]。

私は、食虫植物と、昆虫やほかの植物との相互作用に興味を持ち、日本各地のフィールドで野外観察を手法とする研究を行ってきました。本講演では「食虫植物とまわりの植物との関係」「食虫植物と、食虫植物を食べる昆虫との関係」の 2 つのトピックについて、研究の一端を紹介させていただきます。

1. 食虫植物とまわりの植物との関係

食虫植物は非食虫植物と同所的に自生しています。食虫植物とまわりの非食虫植物はどのような関係性を持っているのでしょうか。

一般的に、同所的に自生する植物どうしは、光や栄養塩類をめぐる競争関係にあります。食虫植物も例外ではありません。例えば、食虫植物のモウセンゴケ *Drosera rotundifolia* では、背が高い植物が上部に存在すると、捕虫葉表面の粘毛の数や、捕獲する昆虫のバイオマスが減少します [2]。これは大型の植物がモウセンゴケを覆うことで、光合成能が低下したり、昆虫が捕虫葉に近づきにくくなったりすることが原因です。つまり、まわりの植物は、食虫植物の生存にネガティブな影響をもたらすと言えるでしょう。

それでは、まわりの植物が花をつけている場合はどうでしょうか。私達は、まわりの植物が花をつけている場合、食虫植物はその花に誘引された昆虫を効率的に捕獲できるのではないかと予想しました。

この予想を確かめるため、食虫植物ナガバノイシモチソウ *Drosera toyoakensis* とシロバナナガバノイシモチソウ *D. makinoi* について、食虫植物の花の有無、まわりの植物（イトイヌノヒゲ、ヌマトラノオ）の花の有無を組み合わせた区画を用意し、食虫植物が捕獲する昆虫のバイオマスを比較しました。統計解析の結果、まわりの植物の花の存在が、食虫植物が捕獲する昆虫のバイオマスにポジティブな影響を与えることが分かりました [3]。この結果は、まわりの植物が誘引能の高い花を咲かせるとき、部分的に昆虫密度が増加し、食虫植物が捕獲する昆虫のバイオマスにポジティブな影響を与えることを示唆しています。

また、食虫植物は植食者を捕獲することで、まわりの植物の生存にポジティブな影響を与えるかもしれません。私達はセイヨウヒキヨモギとシロツメクサ、そしてシロツメクサの植食者であるハダニ類に着目して、この仮説を検証しました。セイヨウヒキヨモギは、植物体全体から粘液を分泌し、微小な虫を捕獲します。野外観察の結果、セイヨウヒキヨモギの密度が高いほど、シロツメクサのハダニによる食害率は低下することが明らかになりました [4]。この結果は、セイヨウヒキヨモギがハダニを捕獲することで、周辺のシロツメクサが食害に遭いにくくなることを示唆しています。

2. 食虫植物と、食虫植物を食べる昆虫との関係

多くの小型の昆虫にとって、食虫植物のトラップに捕獲されることは死を意味します。しかし、興味深いことに、トラップに捕獲されず、食虫植物を食べてしまう昆虫が存在します。それがガの 1 種のモウセンゴケトリバ *Buckleria paludum* の幼虫です。モウセンゴケトリバの幼虫は、食虫植物モウセンゴケのみを食べるスペシャリストで、粘着トラップに捕獲されることなく、葉や花、果実を食べます。



モウセンゴケトリバは、どのようにしてモウセンゴケによる捕獲を回避しているのでしょうか。私たちがモウセンゴケの葉上

でのモウセンゴケトリバの行動を観察したところ、モウセンゴケトリバは、粘毛から分泌される粘液を舐め取る行動を示すことが分かりました (図)。モウセンゴケトリバは粘液を舐め取った場所を這って進んでいくため、モウセンゴケに捕獲されることはありませんでした [5]。

モウセンゴケは、モウセンゴケトリバの食害に対する防衛戦略を進化させているのでしょうか。モウセンゴケは花の周辺に対する接触刺激に応じて、2-10 分程度で花を閉鎖する反応を示します [6]。最近の私達の研究から、この反応が、モウセンゴケトリバによる繁殖器官の食害に対する防衛として機能することが分かってきました [7]。

[1] Ellison & Adamec (2018) Introduction: What is a carnivorous plants? In: Carnivorous Plants, Physiology, Ecology, and Evolution.

[2] Tagawa, Watanabe and Yahara, in prep.

[3] Tagawa, Watanabe and Yahara (2018) Ecological Research 33: 487494.

[4] Tagawa and Watanabe, under review.

[5] Osaki and Tagawa (2020) Entomological Science 23: 227-230.

[6] Tagawa, Watanabe and Yahara (2018) Plant Species Biology 33: 153-157.

[7] Tagawa, Osaki, Watanabe and Yahara, in prep.

つながる根：寄生植物と宿主植物のフシギな関係

吉田 聡子

奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科

皆さんは植物と聞くとまず何を思い浮かべますか？大きく広がる緑の葉、大地に根を張ってそびえ立つ木、朝顔やヒマワリなどの花を思い浮かべる人も多いのではないのでしょうか。一般的に植物は、根から水分や無機栄養を吸収し、葉で光合成をすることで二酸化炭素から酸素や有機栄養を作り出して生育します。しかし、他の方法で栄養を獲得する植物もいます。寄生植物です。寄生植物は宿主植物に寄生し、栄養を宿主植物から獲得して生育します。地球上の被子植物種の約1%にあたる4500種ほどが寄生植物であることが知られていますが、その寄生の程度は種によって異なります。そのうち、寄生しないで生活環を回すことができる植物を条件的寄生植物、宿主へ寄生しないと生きることができない植物を絶対寄生植物と呼びます。宿主への依存度が高くなると、栄養獲得のツールであった根や葉は必要なくなります。例えば、世界一大きな花で知られているラフレシアは絶対寄生植物ですが、自身根や葉を持たず、ブドウ科の植物の根に寄生して栄養をもらい、大きな花を咲かせます。寄生植物は宿主植物の栄養を奪って生育するため、作物に寄生すると農業に大きなダメージをもたらします。ハマウツボ科の寄生植物であるストライガやオロバンキは、イネやトウモロコシなどの穀物、トマトやニンジンなどの野菜類にそれぞれ寄生し、年間10億ドルを超える農業被害をもたらしています(図1)。しかし、寄生植物がどうやって寄生するのか、その詳しいメカニズムはまだほとんど分かっていません。

ハマウツボ科寄生植物は、自身の根に寄生器官である「吸器」を作って宿主の根に侵入し寄生を成立させることが知られています(図1)。つまり、根同士をつなげることで栄養をもらうのです。では、ハマウツボ科寄生植物の根はどうやって宿主植物の存在を知り、根をつなげることができるのでしょうか？ストライガなどの絶対寄生植物は、宿主の認識に特殊な発芽誘導機構を使っていることが知られています。ストライガのタネは0.2 mmほどの大きさしかなく、宿主から分泌されるストリゴラクトンと呼ばれる物質を認識して発芽します。ストリゴラクトンは土壤中で不安定な物質であるため、宿主根の近傍でのみ検知でき、ストライガは宿主のすぐそばで発芽することができます。一方で、独立栄養でも生きることができる条件的寄生植物は、ストリゴラクトンによる発芽制御を受けず、環境条件が整えば発芽

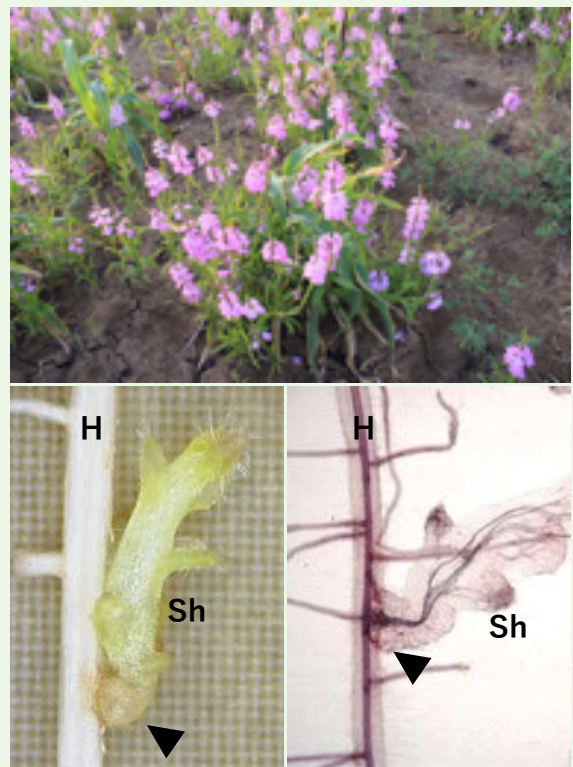


図1 寄生植物ストライガ(*Striga hermonthica*)の花(上)と、トウモロコシの根に寄生している様子(左下)。道管を染めると、宿主植物とつながっている様子がわかる(右下)。H:宿主植物。Sh:ストライガ。鋏は吸器を示す。

することができます。発芽した寄生植物の根は、宿主へ向かって成長を続け、そして、宿主の根のすぐそばで、吸器を形成します。吸器の形成にも宿主由来の物質が関与しています。細胞壁の成分由来のキノンやフェノール類は吸器を誘導することができ、吸器誘導物質と呼ばれています。吸器は、宿主の根の中に侵入して宿主の栄養を運ぶ管である維管束に到達します。維管束に到達すると、吸器の中に道管が分化し宿主植物と寄生植物の道管同士をつなげる道管の橋を作り、この構造を通じて栄養を吸収することができます。このように、寄生植物は宿主植物とシグナルをやり取りしながら、根をつなげ、栄養を獲得して生きています。

私たちは、寄生植物がどうやって宿主に寄生するのかという謎を解きたいと思っています。そのために、日本に自生しているコシオガマという植物を使って寄生の変異体を見つけることにしました。変異体とはゲノム上にランダムに変異を入れることにより、遺伝子配列が変化し、形質が変化した植物のことです。寄生植物のゲノムに変異を入れると、吸器の形成ができなくなるものや吸器の形が変わったものが取れてきました。ある変異体は、通常（野生型）の吸器に比べて長い吸器を作るという特徴を持っていました。興味深いことに、この変異体の吸器は宿主植物へ侵入しづらいいということも分かってきました。つまり、変異が起こった遺伝子は、吸器の形と宿主への侵入に影響を及ぼすということです。そこで、原因となっている変異の起こった遺伝子を見つけることにしました。変異体のコシオガマのゲノムのシーケンスを決定し、野生型と比べることにより、変異が起こった遺伝子を見つけることができました。その結果、植物ホルモンであるエチレンのシグナル伝達に関わる遺伝子であることが分かりました。さらに、エチレンを作らない宿主植物に感染させてみると、侵入がしづらくなることもわかりました。これらの結果から、寄生植物は宿主由来のエチレンを頼りに、宿主の存在を見つけて侵入を成立することが分かってきました。

宿主への侵入には、侵入細胞と呼ばれている特殊な細胞の分化が必要です。この侵入細胞は、寄生植物しか持っていない細胞で、宿主の細胞の間に割り込んで進んでいくことができます。そして、侵入細胞は宿主の維管束を目指して進み、宿主の道管に到達すると、自身も道管に分化します。こうして寄生植物は宿主植物とつながります。そのつながりを可視化するために、寄生植物の吸器を薄くスライスして作った切片画像から、吸器の内部構造を立体再構築しました。すると、寄生植物の細胞が宿主の道管細胞を握りしめるようにつながっている様子が見えてきました。

寄生植物と宿主植物は維管束をつなげ色々なものをやり取りしています。栄養分や水分はもちろん、植物ホルモンや RNA など動くことが知られています。寄生植物のゲノムの中には、宿主植物由来の遺伝子配列が見つかります。これは、水平伝播といって親子関係のない生物同士で遺伝子が伝播する、真核生物では珍しい現象です。しかも、宿主依存度の高い寄生植物ほど水平伝播遺伝子を多く持っていることが分かっています。寄生植物は宿主植物とコミュニケーションをしながら、色々なものをやり取りすることで進化し、寄生生活に最適化されてきたようです。一方で、宿主に依存しすぎたことで、一人で生きていくことができなくなり、宿主植物の減少に伴って絶滅の危機に立たされている種もいます。本講演では、そんな寄生植物と宿主植物の不思議な関係についてご紹介したいと思います。

花びらの数に見る植物の適当な形づくり

北沢 美帆

大阪大学全学教育推進機構

生物の体はどのように形づくられるのだろうか？高校で生物学を学んだ人なら、ある遺伝子が花の色を決めて、別の遺伝子が幅を決めて、といったように、一つ一つの遺伝子が一つ一つの形の要素を決めている、と考えるかもしれない。実際そのような例もあるのだが、すべてがそれで説明できるわけではない。多くの場合、たくさんの遺伝子が複雑に関連しあって、形を決めている。それでは遺伝子の組み合わせが同じなら、必ず同じ形としてアウトプットされるのだろうか？実は、そうとは限らないのだ。平均的には特定の形に見えても、よく見るとばらつきがあることは多い。

身近なばらつきの例として、花占いを考えてみよう。フランス菊などのキク科の頭花は、たくさんの小さな花が集まってできている（図1）。花占いは、多くの場合、頭花の周りで目立つ花弁状の小花（舌状花）の数によって占う。花占いが占いとして成立するのは、場合によって結果が違うからである。もし舌状花の数がすべての頭花で同じだったら、結果がいつも同じになってしまう



図1. キク科の頭花は、多数の小花から成る。

占いとしての面白みがなくなる。頭花ごとに舌状花の数が違うから、花占いが成り立つのである。逆に、舌状花の個数がきちり決まっているコスモスのような花は、花占いには向かない。

こうした「ばらつき」と「きちり」は、それぞれの小花を構成する花弁や雄蕊などの花器官の数にもみられる。キク科の花弁の数は、多少ばらつくこともあるが、基本的には5個である。花の咲く植物全体でみると、被子植物全体の四分の三を占める真正双子葉植物で最も多いのが五数性（萼片や花弁の数が5個）の花で、次いで四数性が多い。桜（バラ科）、ハコベ（ナデシコ科）、キキョウ（キキョウ科）、カタバミ（カタバミ科）やゲンノショウコ（フウロソウ科）など、身近な花でも五数性がよくみられる（図2）。四数性の花の例としては、モデル植物シロイヌナズナやぺんぺん草に代表されるアブラナ科が挙げられる。一方、単子葉植物



図2. ナデシコ科、フウロソウ科、アブラナ科の花。

はほとんどが三数性である。例えばチューリップの花は、萼片に相当する外側の花被片が3個、花弁に相当する内側の花被片が3個の三数性である。以上のように、萼片や花弁の数については、種ごとにきちり決まっている例がよく知られている。

しかし、生物には例外がつきものである。きっちり決まっているように見える種に小さなばらつきがみられる例や、そもそもきっちり決まっていなかった例もある。私たちが教科書で習うのは大抵、前者のきっちり決まっている方である。教科書的には、単子葉植物は三数性で、チューリップの花被片と雄蕊は6個ずつである。しかしチューリップでも、花被片の数が異なる花が時折みられる(図3)。これは園芸品種に限った話ではなく、例えば同じユリ科のキバナアマナの野外集団でも、変な花被片数の花は珍しくない。

そもそもきっちり決まっていなかった例としてはキンポウゲ科が挙げられる(図4)。オダマキ属の花弁数は比較的安定に5個だが、同じく五数性が基本のウマノアシガタの仲間(キンポウゲ属)では6個や7個の花弁を持つ花が一つの枝に混在することがある。ニリンソウやシュウメイギクなどアネモネの仲間(イチリンソウ属)にはばらつきがな



図3. 大学の花壇のクルシアナ系チューリップ(上段)と伊吹山麓のキバナアマナ(下段)。左列が標準的な三数性の花。

い集団を見つける方が難しい種もあり、セツブンソウやミスミソウに奇形花が多いのは愛好家の間では常識である。こうした奇形は、ミスミソウ(雪割草)の交配で知られるように固定できる場合もあり、ある程度は遺伝的に決まっている。一方、同じ植物体の中でもばらつくことから、すべてが遺伝子で決まっているわけではないこともわかる。

以上に述べたような花器官のばらつきは、どのように生じるのだろうか?一つの仮説として、どの花器官になるか(例えば花弁になるか萼片になるか)を決める遺伝子の働く領域がばらつく、という考えが提案されている。花器官のもととなる原基の確率的な分裂など、そのほかの原因を重視する意見もある。私たちは、主にキンポウゲ科を対象として、野外調査と数理モデルを使ってばらつきの発生過程を解明しようとしている。野外調査を通して調べているのは、「どのようにばらつくのか」である。増える方にも減る方にも対称にばらつくのか、それともある方向にのみばらつくのか?また、各器官のばらつき方にはどのような特徴があるのだろうか。そして、発生過程に基づく数理モデルを構築し、野外調査で発見した特徴を再現するためには、どのような仮定が必要なのか検討している。

野外でひたすら花弁の数を数え、その分布の特徴をあらゆる統計量を計算した結果、花器官の数のばらつきには一定の法則が存在することが見えてきた。適当に見えても、好き勝手にばらつくわけではなく、形づくりの過程の特徴を反映してばらついているのだ。ここから、ばらつきの研究は、形づくりの法則の解明にもつながると考えている。



図4. キンポウゲ科の花。オダマキ属(上段左)やキンポウゲ属(上段右)など萼片と花弁が明確に分化しているものと、イチリンソウ属(中段、いずれもニリンソウ)のように分化しないものがある。ばらつきの大きさは種や個体群によって異なる。同じ株内で花器官数がばらつくこともある(下段、ミスミソウ)

なぜ植物は切られても再生できるのか

池内 桃子

新潟大学理学部

切っても切っても生えてくる — 植物についてはそういうイメージを持っている人が多いのではないだろうか。動物では高い再生能力を持つのはプラナリアやイモリなど特殊なケースであり再生能力の不思議が関心を集める一方、植物の再生現象は身近でありふれていて当たり前だと思うかもしれない。しかし、植物が葉や根の一部から体全体を構築できるのは、切り落とされた手や足から体全体を再生できるようなものだと考えると改めてその凄さを実感してもらえるのではないかと思う。なお、右の写真は再生能力が高いことで知られるイワタバコ科の植物で、葉の傷口から芽が再生している様子を示している。では、傷ついた植物はどうやって再生するのだろうか。意外にもつい最近までそのメカニズムはまったくわかっていなかった。本発表では、植物の器官再生を制御する植物ホルモンや遺伝子の働きについて最新の成果をご紹介します。



植物ホルモンといえば、「オーキシンとサイトカイニンを追加した培地で組織片を培養すると、根やカルス、シュート（茎葉）が再生する」という 1950 年代の発見は皆さんにもおなじみだと思う。Skoog & Miller が確立したこの組織培養系は、有用な作物のクローン増殖や遺伝子組換え作物の作出のために世界中で使われ続けている。一般的に、オーキシン濃度が高い培地で培養すると根の再生を誘導でき、サイトカイニン濃度が高い培地ではシュート、どちらも高濃度ではカルスの形成が起こることが知られている。しかしこれはあくまでも試験管内の (*in vitro*) 現象であり、自然界において植物の体内で起こるどのような現象を反映しているのかについては長年不明であった。

我々はモデル植物シロイヌナズナを研究材料として使い、胚軸を切断し傷口にカルスが形成される過程について研究を進めた。その結果、切断刺激にตอบสนองしてサイトカイニンを合成するための酵素の遺伝子発現が誘導され、組織のサイトカイニン濃度が高まることを発見した (Ikeuchi et al. 2017; 図 2)。さらに、同じ研究グループの岩瀬 研究員 (理化学研究所) は、傷口で発現が誘導される *WOUND INDUCED DEDIFFERENTIATION 1 (WIND1)* という遺伝子を発見し機能を調べたところ、*WIND1* が細胞のサイトカイニン応答性を制御していることを明らかにした (Iwase et al., 2011)。すなわち、切断刺激によってサイトカイニンを新たに作る仕組みと、そのシグナルに対して細胞の応答性を高めるという二つの仕組みによって、細胞分裂を促進してカルスを形成していることが見えてきた。

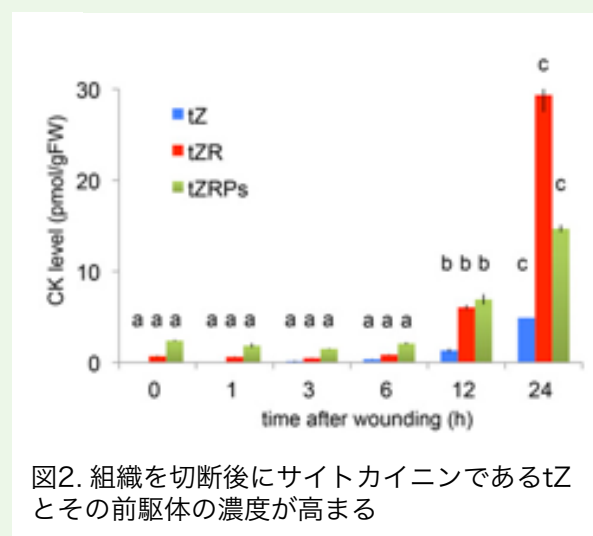


図2. 組織を切断後にサイトカイニンであるtZとその前駆体の濃度が高まる

もう一方の植物ホルモンであるオーキシシンについても同様に、切断刺激に応答して合成が活性化される場合があることが報告されている。Xu らのグループは切断した葉の傷口から根が再生する現象に関して活発に研究を進めており、2016 年には切断葉の細胞においてオーキシシン合成酵素の遺伝子発現が活性化されることを報告している。昨年発表された彼らの最新の研究成果は、切断刺激によって活性化される傷ホルモンであるジャスモン酸が、オーキシシンの合成を引き起こすことによって根の再生を誘導することも示している。

このような一連の研究によって、傷ストレスを受容、認識した細胞が細胞分裂を活性化し、器官を再生するメカニズムがついに見えてきた。特に、サイトカイニンとオーキシシンが切断刺激に応答して新たに細胞の中で合成される点は新たな知見であり、組織培養系では自然のメカニズムを増強することによって器官再生を促進していると捉えることもできる。

講演においては、幹細胞や細胞リプログラミングの話題についてもご紹介しますので楽しみに！

もっと詳しく知りたい人へ：

池内桃子, 杉本慶子「傷口からの再生—植物の細胞リプログラミング」遺伝 第 74 巻 第 5 号
(2020 年 9 月号)

虫にかじられた植物が発する緊急信号を見る

豊田 正嗣

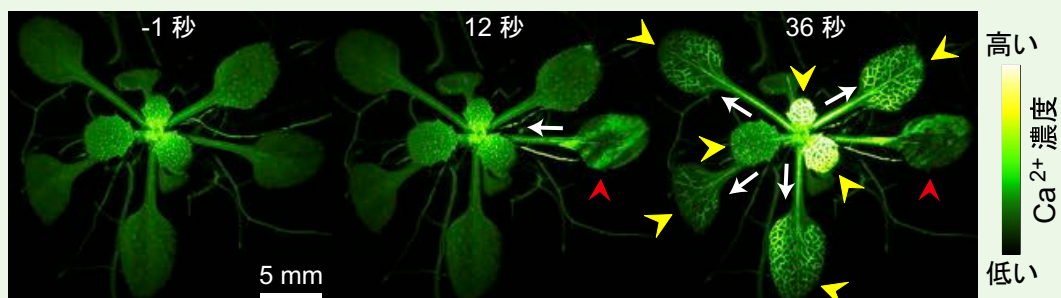
埼玉大学理工学研究科

植物に神経や脳はない。しかし、局所的な環境ストレスを感知し、その情報を遠く離れた器官に伝えることで全身性の反応を引き起こすことができる。例えば、シロイヌナズナの葉が幼虫に捕食された時や、物理的に傷つけられた時、3~4cm 離れた健康な葉でも約 90 秒後にはジャスモン酸を合成することができる。ジャスモン酸は、害虫や傷害に対する抵抗性を上昇させることができる植物ホルモンの一種であり、植物はあらかじめ合成しておくことで、将来の攻撃に備えていると考えられている。このような全身性の傷害防御反応には、器官間を高速伝搬する長距離シグナルが関与しているはずであるが、その分子実体は長らく不明であった。

カルシウムイオン (Ca^{2+}) は、地球上のほぼすべての生物にとって生命維持に必須なミネラルであり、細胞内の Ca^{2+} 濃度変化 (Ca^{2+} シグナル) は、生体内の様々な情報を伝達する役割を担っている。例えば、骨格筋の収縮を引き起こす神経伝達物質 (アセチルコリン) は、神経細胞内に Ca^{2+} が流入し、 Ca^{2+} 濃度が上昇することで放出される。また、アセチルコリンを受容した骨格筋が収縮する時も、筋細胞内の Ca^{2+} 濃度が上昇する必要がある。植物においても Ca^{2+} シグナルは、光・乾燥・塩・低温などの様々な環境刺激を感知し、情報伝達する時に利用されている。演者は、 Ca^{2+} シグナルが植物の全身性の抵抗性を制御する長距離シグナルではないかと仮説を立て、その可視化を試みた。

Ca^{2+} シグナルを可視化するためには、蛍光指示薬や発光タンパク質を用いる方法があるが、いずれも植物全体を撮影するための感度や輝度が不足している。そこで、蛍光タンパク質の中でも特に高感度かつ高輝度な緑色蛍光タンパク質 (GFP) 型バイオセンサー (GCaMP) に着目した。GCaMP は、 Ca^{2+} を結合すると GFP が明るく光る仕組みをもち、GCaMP が細胞内に発現している時、細胞内の Ca^{2+} 濃度上昇に連動して GFP の蛍光強度が増加する。この Ca^{2+} 依存的な GFP 蛍光を、個体レベルかつリアルタイムで可視化するために、広視野・高感度イメージングシステムを開発した。

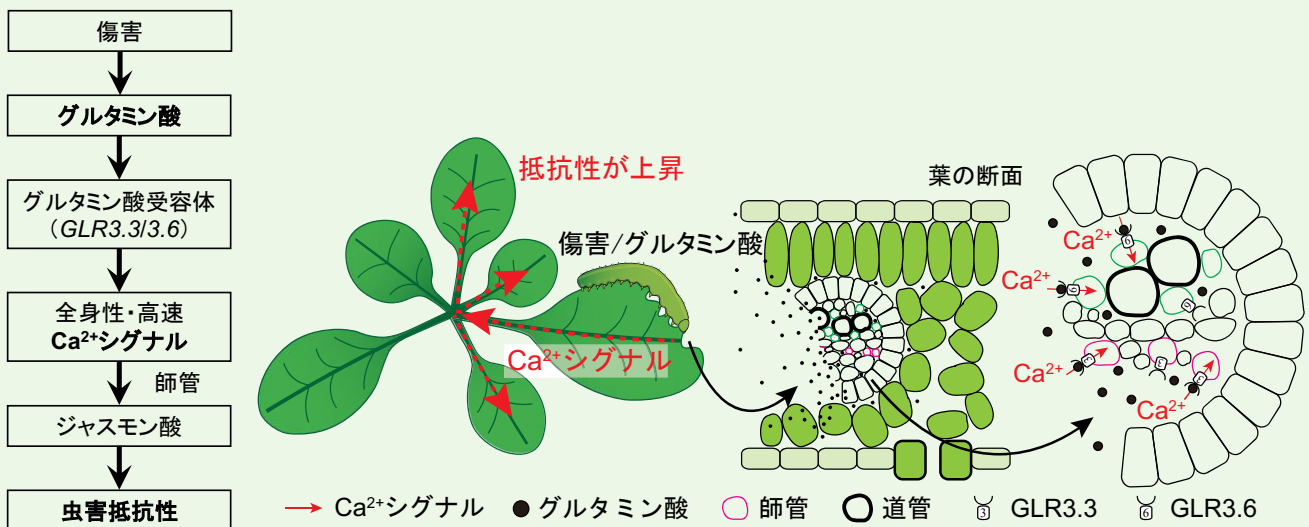
このシステムを用いて、傷害時に発生する植物の長距離・高速 Ca^{2+} シグナル伝搬の可視化に成功した。シロイヌナズナの葉がモンシロチョウの幼虫に捕食された時や、物理的に傷つけられた時 (下図、赤矢尻)、傷害を受けた部位で即座に Ca^{2+} 上昇が起こり (12 秒、赤矢尻)、この Ca^{2+} シグナルは葉脈を伝搬して (12/36 秒、白矢印)、直接傷つけられていない遠く葉でも Ca^{2+} 上昇を引き起こした (36 秒、黄矢尻)。この時、 Ca^{2+} シグナルの伝搬速度は約 1 mm/s であり、過去に推定された未知の長距離シグナルの速度と一致した。



組織特異的な Ca^{2+} イメージング、グルタミン酸のバイオセンサー (iGluSnFR) を用いた細胞外のグルタミン酸イメージング、LC/MS (液体クロマトグラフィー質量分析計) を用いたジャスモン酸の定量化、qPCR を用いた抵抗性遺伝子発現の解析などの結果、以下のことが明らかになった。

1. 長距離・高速 Ca^{2+} シグナルは、養分を通す管である師管を介して器官間を高速伝搬する。
2. 傷害後、 Ca^{2+} シグナルが伝搬した葉ではジャスモン酸の合成量および抵抗性遺伝子の発現量が増加する。
3. Ca^{2+} を透過させるイオンチャンネルと考えられているグルタミン酸受容体 *GLUTAMATE RECEPTOR LIKE* (*GLR3.3* および *GLR3.6*) を欠損した植物体では、傷害時の長距離・高速 Ca^{2+} シグナルが起こらない。
4. *GLR3.3* は Ca^{2+} シグナルが伝搬する師管に、*GLR3.6* は道管に接した柔細胞に局在しており、両者ともに維管束 (葉脈) 内に発現している。
5. 細胞外からグルタミン酸を投与すると、野生型では高速 Ca^{2+} シグナルが起こるが、*glr3.3glr3.6* 欠損変異体では起こらない。
6. 傷害後、傷つけられた部位で即座に細胞外のグルタミン酸濃度が上昇する。

これらの結果に基づき、グルタミン酸/*GLR*/ Ca^{2+} シグナルを介した植物の傷害感知・高速情報伝達モデルを提唱した (下図)。植物が害虫に捕食された時や、物理的に傷つけられた時、①傷ついた細胞や組織からグルタミン酸が細胞外に流出する。②このグルタミン酸が師管などに発現している *GLR* を活性化させることで、③細胞内に Ca^{2+} が流入する。④この Ca^{2+} シグナルが師管などを介して遠方の葉に向かって高速伝搬し、⑤傷害を受けていない葉でジャスモン酸を合成させることで、将来の攻撃に備えた虫害抵抗性を上昇させる。



アミノ酸の一種であるグルタミン酸は、うまみ成分として有名だが、私たちの脳内では神経伝達物質として働いている。神経細胞の末端から放出されたグルタミン酸が、シナプス間隙 (神経細胞間の隙間) を拡散し、隣の神経細胞のイオンチャンネル型グルタミン酸受容体に結合すると、この受容体が活性化し、電気的シグナル (活動電位) が発生する。このグルタミン酸受容体を介した神経 (シナプス) 伝達が、私たちの記憶や学習に関与していると考えられている。シロイヌナズナには、このイオンチャンネル型グルタミン酸受容体に似た遺伝子 (*GLR*) が 20 種類存在することが知られている。本研究は、シナプスや神経、脳をもたない植物におけるグルタミン酸および *GLR* の新たな役割を発見しただけではなく、*GLR* を標的とした植物の抵抗性を制御できる新しいバイオスティミュラント (農薬や肥料) の開発につながると期待している。

植物学会よりお知らせ

【特集「30年後の植物科学」への寄稿のお願い】

日本植物学会では、昨年から今年春に掛けて、植物科学の最前線（BSJ-Review）発行 10 周年を記念して、「30 年後の植物科学」というテーマで、特集記事を募集しました。

多くの皆さまに、自由に将来への希望や予測を語って頂いた原稿が学会ホームページに掲載されています (<https://bsj.or.jp/jpn/general/bsj-review-10th/BSJreview-10thAnniversary.php>)。

しかし、その後、世界は新型コロナウイルスの蔓延により、思いもよらない社会へと変貌を遂げつつあります。半年前には想像もしなかった世界が広がりつつあります。このような状況の中で、それでも植物の研究を続けるということについて、若い方々も含めて、是非もう一度皆さまの「30 年後の植物科学」を考えて頂きたいと、この募集を再開することとしました。

募集サイト (<https://bsj.or.jp/jpn/general/bsj-review-10th/30bsj-review-10-1.php>)

会員の皆さまはもちろんですが、今回第 84 回名古屋大会に参加頂く高校生や高校の先生方、あるいは公開講演会にご参加頂いている方々、植物科学に興味をお持ちの多くの方々に、ご寄稿いただけたら誠に幸いです。

詳細は募集サイトの「投稿規定」をご覧ください。

皆様のご寄稿、心よりお待ちしております。

(公社) 日本植物学会会長 三村徹郎
(公社) 日本植物学会 電子出版物編集委員会

Tel:03-3814-5675 Fax:03-3814-5352

【植物学会公式 Twitter】

植物学会では公式の Twitter も開設しています。学会に関するお知らせや、学会誌（英文）Journal of Plant Research に掲載される最新の論文について、簡単な日本語の要旨を見ることができます。以下の URL から、ぜひご利用ください。

https://twitter.com/BSJ_pr

日本植物学会第 84 回大会 公開講座担当

基礎生物学研究所 森田（寺尾）美代

愛知教育大学 渡邊 幹男

名古屋大学 石黒 澄衛

問い合わせ先

〒444-8585 愛知県岡崎市明大寺町西郷中38

基礎生物学研究所 森田（寺尾）美代

Tel: 0564-55-7556

E-mail: mimorita@ nibb.ac.jp