

植物の感覚を可視化する

～最新のイメージング技術で見えてきた植物の知られざる情報伝達～



豊田 正嗣氏

埼玉大学 大学院理工学研究科 教授
科学技術振興機構(JST) 戦略的創造研究推進事業(ERATO)
豊田植物感覚プロジェクト 研究総括



<https://park.saitama-u.ac.jp/toyotalab/index.html>

プロフィール・2002年名古屋大学理学部物理学科卒業。2008年名古屋大学大学院医学系研究科博士課程修了。博士(医学)取得。奈良先端科学技術大学院大学(日本学術振興会特別研究員)やウィスコンシン大学・マディソン校(日本学術振興会海外特別研究員、JSTさきがけ研究者など)、サントリー生命科学財団 SunRISE Fellowなどを経て、2022年から現職。ScienceやNature Communicationsなどの論文多数。2015年日本生物物理学会若手奨励賞、2017年文部科学大臣表彰若手科学者賞、2020年NIKON JOICO AWARD 2019 最優秀 JOICO賞、2024年日本植物生理学会奨励賞、2025年島津奨励賞、2025年 Tsuneko & Reiji Okazaki Award(岡崎賞)、2026年木原記念財団学術賞、など受賞。

・はじめに

普段よく目にする植物。雨に打たれても、風に吹かれても、虫にかじられても何も感じていないように見える。しかし本当にそうだろうか。何も感じず、どこにも伝えることもなく、静かに生きているのだろうか。近年、植物の情報伝達をリアルタイムで可視化する技術が進歩し、植物の驚くべき能力が見えてきた。植物に神経や脳はないが、触れられたことや傷つけられたことを感じて、その情報を体の別の場所や周りの植物に伝えていることが明らかになってきた。本稿では、最新の実験映像を使って、植物の体内を流れる信号や、揮発性物質(匂い)を用いた植物間コミュニケーションについて紹介する。

・植物の感覚を司るCa²⁺シグナル

骨や歯の成分として知られているカルシウム(Ca)の一部は、細胞の中で電気を帯びたカルシウムイオン(Ca²⁺)として存在する。このCa²⁺は、地球上のほぼすべての生物において、細胞内で情報を伝え、様々な反応を引き起こす信号(シグナル)として働いている。例えば、神経や筋肉の細胞内のCa²⁺濃度が上昇すると、神経伝達物質の放出や筋収縮が起こる。

植物においても、Ca²⁺は環境の変化を感知し、応

答するために重要な役割を果たしている。虫害や病害、塩害、接触、低温、強光、乾燥などの環境ストレスを受けると、植物の細胞内ではCa²⁺濃度が変化し、それぞれのストレスに応じた反応が引き起こされる。このような細胞内のCa²⁺濃度の時間的・空間的な変化を「Ca²⁺シグナル」と呼ぶ。つまり、Ca²⁺シグナルを可視化し、いつ、どこで、どのように変化するかを解析することは、植物が環境の変化をどのように感じ、その情報を伝え、応答するのかという植物の「感覚」の仕組みを解き明かす上で重要である。

・Ca²⁺シグナルを可視化するイメージング技術

植物の細胞内で起こるCa²⁺シグナルを可視化するために、私たちはGCaMPと呼ばれる蛍光タンパク質を利用している。GCaMPは、オワンクラゲ由来の緑色蛍光タンパク質(GFP)をもとに作られたもので、Ca²⁺と結合すると明るく光る性質をもつ。つまり、細胞内のCa²⁺濃度が上昇すると、その場所が緑色の蛍光として見えるようになる。

遺伝子組換え技術を用いてGCaMPを植物の体内で作らせることで、植物のCa²⁺シグナルをリアルタイムで観察することができる。しかし、蛍光は肉眼で観察することが難しいため、高感度なカメラを搭載し

図1 広視野・高感度蛍光イメージング装置

	第1世代 (I)	第2世代 (II)	第3世代 (III)
視野	4 cm x 4 cm	7 cm x 7 cm	50 cm x 50 cm
感度/波長	30 fps / 2波長	40 fps / 2波長 (2波長同時測定可)	40 fps / 1波長
特徴	電気生理学的装置 (蛍光/電気シグナル同時測定可)	2台のsCMOSカメラ ステージ着脱式 (対物レンズ直下に 50 cmのスペース)	カメラ型 セミポータブル 任意の角度(水平) から撮影可

た蛍光観察が可能な顕微鏡などのイメージングシステムが必要となる。

そこで私たちは、植物の一部分だけでなく、植物全体で起こる Ca^{2+} シグナルを広い視野で捉えるための蛍光イメージング装置を開発してきた(図1)。

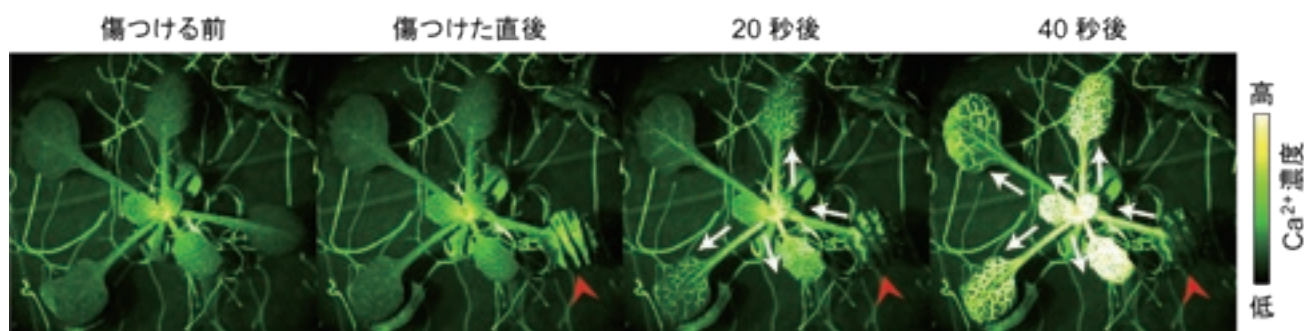
第1世代の装置では、約4cm×4cmの範囲を1秒間に30枚という速さ(30fps)で撮影でき、 Ca^{2+} シグナルと活動電位のような電気的シグナルを同時に解析することが可能になった。第2世代では、視野を約7cm×7cmに広げるとともに、2台の高感度カメラを使って異なる2種類の蛍光を40fpsの速度で同時に撮影できるようにした。さらに第3世代では、顕微鏡ではなくカメラ型へと発展させ、最大約50cm×50cmという非常に広い範囲を蛍光観察できるようになった。装置を可動式にして、撮影する角度も自由に変えられるため、大きく成長した植物の体内を伝わる Ca^{2+} シグナルを真横から観察できるようになった。

・傷つけられた植物の緊急信号を見る

この広視野・高感度蛍光イメージング装置を用いて、植物が傷つけられたことを感じ、その情報を全身へ伝える様子が見えるようになった(図2)。シロイヌナズナは、日本でも道端などに生育している小さなアブラナ科の植物で、植物研究のモデル植物として広く使われている。シロイヌナズナの葉をピンセットで傷つけると、まず傷口付近で Ca^{2+} シグナルが発生する(図2、赤矢尻)。興味深いことに、このシグナルはその場にとどまらず、葉脈に沿っておよそ1秒間に1mmの速さで広がり、数十秒で離れた葉まで到達する(図2、白矢印)。同じような Ca^{2+} シグナルは、昆虫に葉をかじられた時にも発生する。

植物は、動物のようにその場から逃げたり、外敵を追い払ったりすることはできない。その代わりに、攻撃を受けた葉から全身へ Ca^{2+} シグナルを送り、まだ傷つけられていない葉にも危険を知らせる。シグナルを受け取った葉では防御反応が始まり、その後の昆虫による攻撃に備える。つまり Ca^{2+} シグナルは、植物の体内を伝わる緊急信号として働いているのである。

では、植物はどのような仕組みを用いて傷つけられたことを Ca^{2+} シグナルへと変換しているのだろうか。その鍵の1つが、うま味成分としても知られるグルタミン酸である。植物が傷つけられると、損傷を受けた細胞からグルタミン酸が外へ漏れ出す。これを葉脈周辺の細胞にあるグルタミン酸受容体が受け取ると、細胞内に Ca^{2+} が流れ込み、 Ca^{2+} シグナルが引き起こされる。

図2 シロイヌナズナの長距離 Ca^{2+} シグナル

興味深いことに、動物ではグルタミン酸受容体が脳の神経伝達や記憶、学習に重要な役割を果たしている。植物には神経も脳もないが、進化的に保存されたグルタミン酸受容体を、傷つけられたことを感知するためのセンサーとして利用している。傷口から漏れ出したグルタミン酸をこの受容体が受け取ることで Ca^{2+} シグナルが発生し、傷害の情報が全身へと伝えられるのである。

・動く植物の長距離 Ca^{2+} シグナル

オジギソウは熱帯アメリカ原産のマメ科植物で、触れたり傷つけたりすると、葉を次々と閉じ、最後にはお辞儀をするように葉全体を垂れ下げる。神経も筋肉もない植物が、どのような情報を伝えながら、これほど速く動くのかは、古くから研究されてきたが、長年の謎であった。私たちは、シロイヌナズナの長距離 Ca^{2+} シグナルを発見したことをきっかけに、このような全身性の情報伝達が動く植物にも共通して存在するのではないかと考えた。

そこで、遺伝子組換え技術を用いて、GCaMPをオジギソウに作らせ、 Ca^{2+} シグナルを可視化した。葉に触れたり傷をつけたりとすると、刺激を受けた場所から Ca^{2+} シグナルが発生し、全身を高速に伝わっていく様子が観察された(図3)。そして、 Ca^{2+} シグナルが葉の付け根の運動器官である葉枕に到達すると、そのわずか0.1秒後に葉が動き始めることがわかった。すなわち、 Ca^{2+} シグナルは刺激情報を遠くまで伝えるだけでなく、オジギソウの運動を開始させる引き金として働いている。

では、オジギソウは何のために動くのであろうか。薬理学的処理やゲノム編集技術によって、葉を動かすことができないオジギソウを作り、昆虫に食べさせる実験を行った。その結果、動けないオジギソウは通常のオジギソウよりも約2倍多く食べられることがわかった。昆虫に

かじられると Ca^{2+} シグナルが伝わって葉が次々と閉じ、その動きによって昆虫の足場を不安定にすることで、食害を減らしていると考えられる。つまり、私たちにとってお辞儀のように見える運動は、オジギソウが昆虫から身を守るための物理的な防御応答なのである。

ハエトリソウは北アメリカの湿地に生育する食虫植物で、二枚貝のような形をした葉を素早く閉じて昆虫を捕らえる。葉の内側には感覚毛と呼ばれる感覚器があり、昆虫が触れたことを感知する。興味深いことに、感覚毛に一度触れただけでは葉は閉じず、30秒以内に二度目の刺激を受けた時に初めて葉を閉じる。つまりハエトリソウは、一度目の刺激を一時的に記憶し、その記憶が残っている間に二度目の刺激を受けると、葉を閉じて獲物を捕らえるのである。しかし、脳や神経をもたないハエトリソウが、どのように接触刺激の情報を記憶し、葉の運動を引き起こしているのかは長い間謎であった。

そこで私たちは、遺伝子組換え技術によってGCaMPを作らせたハエトリソウを用いて、感覚毛を刺激した時の Ca^{2+} シグナルを可視化した(図3)。その結果、一度目の刺激によって Ca^{2+} 濃度が上昇し、30秒以内に二度目の刺激を与えると Ca^{2+} 濃度がさらに増加して、葉が閉じることがわかった。一度目の刺激による Ca^{2+} の上昇が次の刺激まで一時的に残ることで、刺激の回数を記憶していると考えられる。すなわち、 Ca^{2+} シグナルはハエトリソウの捕虫運動を開始するための引き金であると同時に、刺激を一時

図3 様々な植物の Ca^{2+} シグナル



的に記憶する仕組みの中心的な役割を担っているのである。

さらに私たちは、ハエトリソウが昆虫に触れられたことを感じるセンサーの一つとして、DmMSL10というイオンチャネルが働いていることを明らかにした。DmMSL10は、細胞の膜が引っ張られると開いてイオンを通すタンパク質であり、これに相同な機械感受性チャネルは大腸菌にも存在する。DmMSL10は、特に感覚毛に多く存在し、ゲノム編集技術によってDmMSL10を働かなくすると、昆虫が感覚毛に触れても Ca^{2+} シグナルが起こりにくくなり、獲物を捕らえる能力も低下した。つまりハエトリソウは、大腸菌にも見られる進化的に保存された機械受容チャネルを利用して、昆虫のわずかな接触を感じ取っているのである。

・植物間コミュニケーションを可視化する

植物は自分の体内だけでなく、周囲の植物とも情報のやり取りをしている。例えば、植物が昆虫に食べられたり傷つけられたりすると、様々な揮発性物質、すなわち空気中を漂う匂いの成分が放出される。近くにいる植物はこれらの匂いを感知すると、まだ自分自身が攻撃されていないにもかかわらず、防御反応を始める。このように、匂いを介して植物同士が情報をやり取りする現象は、植物間コミュニケーションと呼ばれている。

これまで私たちは様々な植物の体内を流れるシグナルを可視化してきたが、広視野・高感度蛍光イメージング装置を用いれば、植物が別の植物から放出された匂いを感じる瞬間を捉えることで、植物間コミュニケーションを可視化できると考えた。昆虫に食べられているシロイヌナズナやトマトの葉から放出される匂いを、別のシロイヌナズナに送り込むと、直接昆虫に攻撃されていないにもかかわらず、葉の様々な場所で Ca^{2+} シグナルが発生した(図3)。つまり、別の植物から空気中を伝わってきた情報が、受け手の植物の中で Ca^{2+} シグナルへと変換される瞬間を捉えることができたのである。

では、植物はどのような匂いを感じて Ca^{2+} シグナルを発生させているのであろうか。傷ついた葉からは様々な揮発性物質が放出されるが、これらの匂い成分を一つずつ植物に嗅がせて調べたところ、草を刈った時に感じる青臭い匂い、いわゆる緑の香りの成分である青葉アルデヒドが Ca^{2+} シグナルを引き起こすことがわかった。さらに、この青葉アルデヒドを感知した植物では、防御に関わる遺伝子が働き始めることから、緑の香りは周囲の植物に危険を知らせる情報の一つとして働いていると考えられる。

さらに Ca^{2+} シグナルを細胞レベルで観察すると、緑の香りを嗅がせた直後に、葉の表面にある気孔で Ca^{2+} 濃度が上昇し、その後、葉の内部へとシグナルが広がっていった。気孔は、二酸化炭素や酸素、水蒸気などを出し入れするための小さな空気の入出口である。実際に気孔を閉じると、緑の香りに対する Ca^{2+} シグナルの発生が遅くなることもわかった。これらの結果から、植物は気孔を通して緑の香りを葉の内部に取り込み、 Ca^{2+} シグナルを発生させていると考えられる。つまり植物は、鼻のような感覚器官をもたなくても、空気中を漂う化学物質を利用して周囲の植物から情報を受け取り、将来の攻撃に備えているのである。

・おわりに

普段何気なく目にしている植物は、動かず、物も言わず、何も感じていないように見える。しかし、蛍光イメージングを通してその体内を覗いてみると、その印象は大きく変わる。植物は、昆虫にかじられたり、触れられたりすると Ca^{2+} シグナルを全身へ伝え、時には葉を動かし、さらには空気中を漂う匂いを介して周囲の植物から情報を受け取っている。植物は、動物とは異なる仕組みを使って周囲の環境を鋭敏に感じ、ダイナミックに生きているのである。

次に道端の植物を目にした時、その静かな姿の内側に、私たちには見えない「植物の感覚」の世界が広がっていることを、ふと思い出してほしい。