

2020 年度第 4 回創発セミナー報告

大隅基礎科学創成財団理事
大谷清

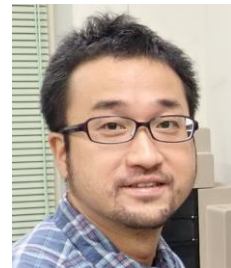
大隅基礎科学創成財団は 2021 年 1 月 29 日、第 4 回創発セミナーを Zoom 方式で開きました。テーマは「植物に学ぶ一巧妙な環境応答の仕組み」で、講師は埼玉大学大学院理工学研究科准教授の豊田正嗣氏と自然科学研究機構基礎生物学研究所教授の長谷部光泰氏のお二人です。

植物に神経はあるのか

ー 長距離・高速カルシウムイオンシグナルを介した植物の虫害抵抗応答

埼玉大学大学院理工学研究科 准教授
豊田正嗣

植物に神経や脳、筋肉はない。しかし植物は刺激を受けると動物とは異なる仕組みで高速情報処理を行っている。進化的に動植物に保存されてきた仕組みに加えて、植物特有の仕組みが加わっている。オジギソウやハエトリソウは接触などの刺激を受けるとそれを感知し、その情報を全身に伝達、記憶させることで瞬時に葉を閉じることができる。これらの全身性、高速・機械刺激応答には局所的なストレス情報を他の器官に伝えるシグナル・伝達機構が関与しているはずで、我々はバイオセンサーや広視野・高感度蛍光顕微鏡などの可視化技術を駆使してその実態解明に挑んでいる。



植物は、かじられたりするとジャスモン酸という傷害抵抗性ホルモンを出し、かじられていない部分でも 1 分ないし 90 秒以内にジャスモン酸の合成が始まる。その情報を何が伝達しているのか未解明だったが、我々はシナプス伝達にも重要な役割を果たしているカルシウムイオン (Ca^{2+}) に注目し、シロイヌナズナを用いて全身獲得抵抗性の分子機構の解明とその可視化に挑んだ。

シロイヌナズナの葉をはさみで切ると遠く離れた葉にも 1 分以内という高速で情報が伝わる。これを蛍光顕微鏡とバイオセンサー (G-CaMP =蛍光カルシウムプローブ) を用いてリアルタイムで観測すると、刺激を受けた葉の Ca^{2+} 濃度が上昇して (Ca^{2+} シグナルがオンになって) GFP (緑色蛍光蛋白質) が明るく光り、維管束の中の師管を通じて伝播していきことが分かった。(動画: <https://youtu.be/iEewaBvm7G0>)

では、葉は傷つけられたことをどうやって感知するのか。これには我々の脳にも発現しているグルタミン酸受容体が必須で、葉が傷つけられた時、グルタミン酸濃度が急上昇して細胞外に漏れ出し、それが受容体を活性化して Ca^{2+} シグナル (傷害感知システム) が作動する。グルタミン酸が Ca^{2+} シグナルを介して植物の全身性、傷害防御情報伝達を引き起こす模様も、蛍光リアルタイムイメージング技術によって GFP が明るく光ることで可視化できた。

次にオジギソウの高速接触運動機構について。よく知られているように葉が接触刺激を受けると順に閉じていく。これまで小葉の付け根にある小葉枕が刺激を受けて水が移動することで組織が収縮して葉が閉じることが知られていた。残された謎は二つ。まずその高速運動を起こすシグナルは何か、次に葉を閉じる生理学的な意味は何か、だ。

そこで高速運動のメカニズムを長谷部光泰先生（自然科学研究機構基礎生物学研究所教授）らが開発したオジギソウの形質転換技術を用いて可視化してみた。カルシウムセンサーをオジギソウに入れて葉に刺激を与えると小葉枕が明るく光り、 Ca^{2+} シグナルが起きたことがわかる。そして 0.1 秒後に運動が始まり、それが葉の全身に伝播する。

次の疑問は「何のためにお辞儀（オジギ）するのか」だ。そこでゲノム編集技術の CRISPR/Cas9 を用いてお辞儀できないオジギソウを作り、バッタに両方の葉を食害させて実験してみた。するとバッタは運動しない（葉を閉じない）葉の上には長く滞在し、お辞儀をするオジギソウでは葉が閉じると別の場所に移動することが分かった。つまり葉を閉じる運動は、虫から身を守るための傷害反応であり防御行動ではないか。

これからも先進のイメージング技術が植物の秘めた能力を映し出し、新しい生物学の始まりになると信じている。

植物の秘められた能力とその仕組み — 植物の再生と記憶、運動

自然科学研究機構基礎生物学研究所 教授
長谷部 光泰

生物の進化の源は突然変異であり、突然変異は DNA の複製ミスが最大の原因で、その結果、生物の多様性が生まれる。

植物も動物と同じで生きている。植物も死ぬが寿命が無いものが多く、動物より再生能力が高い。タンポポが小さな種を作るのは遠くまで飛ばすためだし、逆にセーシェル諸島で見かけたオオミヤシは人のお尻より大きな種を作るが、これは島の外に飛ばされないで、かつ、狭い島の中で他の個体との競争に勝つためである。

まず植物の再生能力の仕組みについて。植物は遺伝子操作しなくても挿し木や葉刺しによって容易に植物全体を作り出すことができる。これは分化した細胞から幹細胞が作られるためだ。われわれはその仕組みをヒメツリガネゴケを使って研究してきた。

ヒメツリガネゴケの葉を切って水につけておくと、葉の切れ端からニョキニョキと細胞が伸びて、再び個体となるという高い再生能力を持っている。葉の細胞がわずか数日で様々な細胞に分化できる多能性を持つ幹細胞に変わる。（動画：<https://youtu.be/-eOmvWezpjQ>）

その秘密をゲノムの解読と遺伝子組み換えを使って調べていたところ、たった一つの遺伝子を働かせるだけで植物体の中の葉細胞を幹細胞に直接変えることができることを発見した。我々はこの遺伝子をステミン（stem cell inducing factor、幹細胞誘導因子、略して STEMIN）と名付けた。

京都大学の山中伸弥先生が発見した iPS 細胞は 4 つの遺伝子で体細胞が多能性幹細胞になったが、植物ではステミン一つで多能性幹細胞ができることになる。

次は植物の運動と記憶について。引っかけ虫で知られるアレチヌスビトハギの花に虫が触れると花がはじけて花粉が飛ぶ。オジギソウを指で触ると葉が閉じる。植物には神経がないのになぜ動くのか。



豊田正嗣先生の講演にあるようにオジギソウでは触るとカルシウムイオンが広がり、師管を通して全身に広がる。葉の付け根の縮む上側と伸びる下側で働く遺伝子を比べ、上側で働いている遺伝子を過剰に働かせるとオジギソウの葉は高い運動能力を獲得した。なぜなのかは現在研究中である。

植物の運動と記憶で面白いのがハエトリソウだ。ハエトリソウは葉の表側に1mm程度のトゲ（感覚毛）が生えていて、この小さなトゲに1回触れるだけでは葉は閉じないが、続けて2回触れると葉は閉じて虫を捕まえてしまう。神経も筋肉もない植物がどんな仕組みで刺激を受けると葉を閉じ、しかも受けた刺激の回数を数えているのか。

われわれは遺伝子操作したハエトリソウを用いてCa²⁺シグナルを可視化することでその謎を解こうとした。ハエトリソウに遺伝子を入れるのは大変だったが、分かったことは1回目の刺激で明るくなるが、時間とともに次第に暗くなる。30秒以内に2回目の刺激を与えると再び明るくなって葉が動く（閉じる）が、減りすぎて十分な量にならないと葉は動かない（閉じない）。つまりハエトリソウは最初の刺激を記憶していて2回目の刺激が加わって活動電位がある閾値を超えると動く（葉が閉じる）。(動画：<https://youtu.be/xFtiCdtX2QA>)

動物に突然変異が起きるとアポトーシス（プログラムされた細胞死）が働いて排除する。しかし植物は突然変異がおきるとDNAが修復して幹細胞化させる。植物は動物とは違った仕組みで生きている。

以上