

白石科学振興会だより

No. 23001

[2023年度助成研究の紹介]

2023年9月1日発行

埼玉大学理学研究科 教授 豊田正嗣先生

研究テーマ「植物の長距離・高速カルシウムシグナルの伝播機構」

“植物、実は賢い！ 害虫から自分で身を守っている”

朝ドラの影響で、最近、植物への関心が非常に高まっていますが、本年度の助成研究に、植物の「驚くべき賢い能力」の発見に関連して世界の注目を集めている研究が採択されました。この研究を紹介します。カルシウムが関係する素晴らしい植物のヒミツを知り、新たな思いで草花を楽しんでください。

1. 植物の秘密を発見！

森や野原で、風にそよぐ木々や草花は、何事にも動じることなく、ゆったりとしており、我々を清々しい気分にし、和ませてくれる。

その一方で、家庭菜園や公園では、虫に齧（かじ）られた野菜や樹木を目にすることがあり、痛々しい。植物は、虫に齧られても、何も感じないのだろうか？

最近、豊田教授のグループは、植物が虫に齧られると、“齧られた傷口からカルシウムシグナルを発生し、そのカルシウムシグナルが植物の体内を高速で駆け巡り、虫に齧られたことを全身に知らせていることを発見した。とくに、全身を高速で駆け巡るカルシウムシグナルを世界で初めてリアルタイムで撮影し、世界中を驚かせた¹⁾。これにより、植物は、人間や他の動物と同じく、体内の情報伝達のためにカルシウムシグナルを用い、しかも、そのカルシウムシグナルが伝わった、まだ齧られていない健康な葉では、害虫が嫌がるジャスモン酸などの物質を合成し、葉に蓄え、将来の害虫からの攻撃に備えて、自分の身を守る準備をしていることも分かった。

この素晴らしい発見は、農薬（殺虫剤）を用いない安全な食料生産技術の開発、あるいは動物・植物に共通の進化理論の展開など、学問の世界にも渡って壮大な素晴らしい貢献が期待されている²⁾。本年度の助成研究では、「植物の中を高速で駆け巡るカルシウムシグナルの発生と伝播機構」について、さらに基礎的で、詳しい説明がなされる。この「だより」では、助成研究のキッカケとなった「植物の生体内を流れるカルシウムシグナルと植物の賢い能力の発見の様子」を豊田先生の解説^{2,3)}をもとに、易しく紹介する。



（秋の花、コスモス）

2. 植物の中を流れるカルシウムシグナルの観察

カルシウムシグナル（以下、Ca シグナルと略記する）は、我々の体の中でも重要な情報伝達を担っている。よく知られているのは、筋肉の収縮である。脳から「腕を動かせ！」という命令が出ると、運動神経からの信号を受けて、腕の筋肉細胞の中のカルシウムが情報を伝えて、筋肉全体筋を伸び、縮みさせ

る。長年に渡って、人や植物のCaシグナルを研究され、Caシグナルのイメージングに深い経験を持っておられた豊田先生は、独自に開発されたイメージングシステムにより植物の中を流れるCaシグナルの撮影に成功された。これにより、植物の中でも、人間などの動物と同じく、Caシグナルで情報が伝達されていることが明らかになった。はじめに、植物の中を駆け巡るCaシグナルの観察方法を簡紹介しよう。

「カルシウムシグナルの観察」 植物の生体内を流れるCaシグナルの検出には、カルシウムイオン(Ca^{2+})が結合すると、緑色の蛍光を発するGCaMPと呼ばれるタンパク質が使われた。実験に使われた植物は、植物の実験では一般的な、キャベツと同じアブラナ科の「シロイヌナズナ」である。実験前に、このシロイヌナズナの体内に、遺伝子組換え技術を用いて蛍光を発するタンパク質GCaMPを作らせた。これにより、もし、シロイヌナズナの細胞の中のカルシウムイオンが増大すると、そのカルシウムイオンがGCaMPと結合し、生体内で蛍光を発する。その蛍光の様子を、外部から蛍光顕微鏡で観察すると、植物体内のカルシウムイオンの動きを知ることができる。次に実例で説明しよう。



(シロイヌナズナ)

「観察実験の例」 図1は、健康なシロイヌナズナ(図a)の右側の一枚の葉(図b)の破線部分をピンセットで挟んだ時、シロイヌナズナの全身にCaシグナルが伝わる様子を示している。葉がピンセットで挟まれて傷つけられると、すぐ傷口のカルシウムイオン濃度が高くなり、強い蛍光を発する。その蛍光が葉脈を流れ(白矢印)、遠くの傷つけられていない葉に次々と伝播して(赤矢印)、「葉が傷つけられた」ことを全身に知らせている。このカルシウムイオンの濃度変化による情報伝達をカルシウム(Ca)シグナルと呼んでいる。

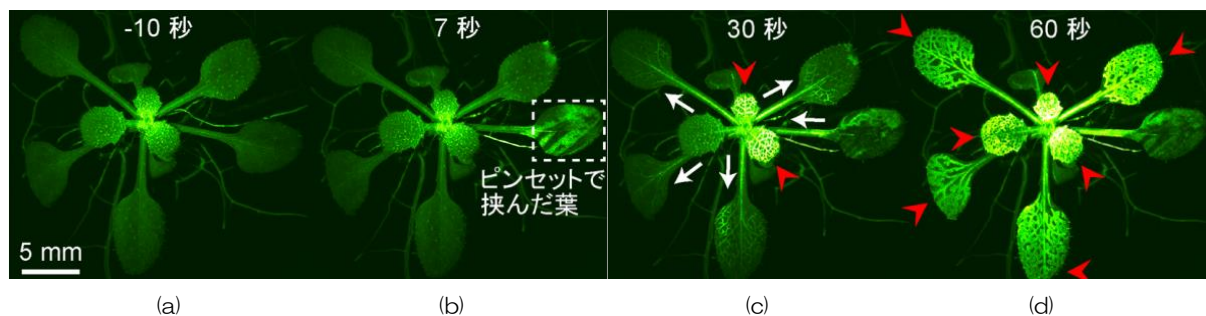


図1 シロイヌナズナの葉をピンセットで挟んだ時、傷口からカルシウムシグナルが伝わる様子²⁾
(図中の時間は、葉をピンセットで挟んだ瞬間からの経過時間を示す)

「カルシウムシグナルの観察から分かったこと」 この実験と同様の実験観察を繰り返して行い、次のことが明らかになった。

- ◎ シロイヌナズナの葉を、モンシロチョウの幼虫に齧らせた実験でもCaシグナルが発生した。すなわち、シロイヌナズナは、虫に齧られたことをCaシグナルにより全身に知らせている。
- ◎ 葉を幼虫が齧っても、ピンセットで挟んで機械的に傷つけても、Caシグナルが伝播した。虫でも機械的な原因でも、とにかく、葉が傷つくとCaシグナルが発生するのである。
- ◎ さらに驚くべき事は、Caシグナルが到達した葉では、まだ傷つけられていないにも関わらず、虫が嫌うジャスモン酸を瞬時に合成し、葉に蓄えていた。
- ◎ すなわち、植物は害虫にかじられたことをCaシグナルにより全身に知らせ、まだ齧られていない葉では、将来の害虫の攻撃に備えて害虫が嫌う物質を蓄積し、自分の身を守っている。

◎ 人間のように神経を持たない植物では、Ca シグナルは植物が水や養分を運ぶ師管（しかん、末尾の用語説明参照）の中を伝搬していることも分かった。

3. 植物の葉に含まれるグルタミン酸がカルシウムシグナルを発生させる

グルタミン酸は、食物の旨味成分として知られているが、人間の脳における神経伝達物質でもあり、神経にあるグルタミン酸受容体（用語説明参照）と呼ぶタンパク質を活性化して、カルシウムイオンを神経細胞に流入させ、神経での情報伝達を行っている。

シロイヌナズナにも、20種類のグルタミン酸受容体があり、葉が虫に齧られたり、傷つけられると、葉からグルタミン酸が流れ出て、細胞膜にあるグルタミン酸受容体を活性化し、シロイヌナズナの細胞内にカルシウムイオンを流入させることにより、Ca シグナルが発生するものと類推される。

ということは、葉が傷つけられなくとも、グルタミン酸受容体を活性化するグルタミン酸をシロイヌナズナの細胞外から与えても、Ca シグナルが発生するはずである。そこで、図2に示すように、シロイヌナズナの1枚の葉（赤矢印の場所）にグルタミン酸溶液が塗布された。すると、推測通り、白矢印で示す

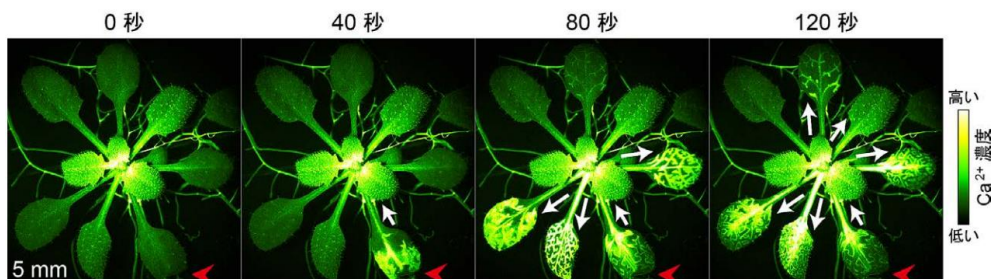


図2 1枚の葉（赤矢印の場所）にグルタミン酸溶液を塗布した時のカルシウムシグナルの発生³⁾

通り、Ca シグナルが全身に伝播した。しかも、Ca シグナルが到達した葉では、害虫が嫌がるジャスモン酸を合成し、蓄積していた。この知見は、植物のグルタミン酸受容体を活性化する農薬が開発されれば、殺虫剤を使わないで、安全な、高品質の食料生産が可能であることを示唆している²⁾。

4. カルシウムシグナルが発生する仕組み

そこで、植物のCa シグナルシステムを利用するために、その仕組みが詳細に検討された²⁾。

すなわち、植物が害虫に齧られると、①傷ついた葉の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や柔細胞にあるグルタミン酸受容体を活性化させ、③細胞内にCa²⁺イオンが流入する。④このCa シグナルが師管などを通して遠方の葉に高速で伝播し、⑤遠方の葉では、将来の害虫の攻撃から自身を守るために、ジャスモン酸を合成し、葉の中に蓄積する。

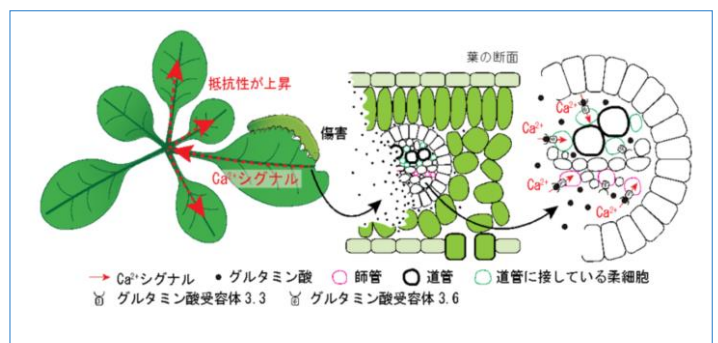


図3 カルシウムシグナルの発生機構²⁾

5. 本研究の応用への期待

静かに風にそよいでいる植物は、一見何も感じていないように見えるが、実際には、虫に齧られていることをCaシグナルにより、全身に伝えていた。しかも、そのCaシグナルにより、ジャスモン酸の合成と蓄積を行って害虫に抵抗する「植物特有の賢いシステム」を持っていた。

また、虫に齧られ、傷つけられなくとも、グルタミン酸を葉に塗布すると、害虫に抵抗する植物特有のシステムが作動することも分かった。このことは、植物のグルタミン酸受容体を活性化させるアミノ酸型農薬が開発されれば、大量の殺虫剤を散布することなく、人間を含む動物に、無害で安全な高品質の食料生産が可能であることを示唆している。

近年、アフリカの砂漠では、バッタが大量発生して穀物が失われ、大飢饉が発生している⁴⁾。地球温暖化とともに、バッタは徐々に北へ移動しており、大飢饉はインドの砂漠に拡大している。このような地球規模の困難な課題が、大量の殺虫剤を散布することなく解決される日も近いと思われる。



バッタの被害を伝える書籍⁴⁾

「引用文献」1) Toyota, M. *et al.*: Science, 361, 1112 (2018)、2) 豊田正嗣; 生物物理、62, 56-57 (2022)、3) 豊田正嗣: 化学と生物、58, (2) 70-72 (2020)、4) 前野ウルド浩太郎: 「バッタを倒しにアフリカへ」光文社新書 (2017)、

「研究者紹介」

豊田正嗣 (とよた まさつぐ) 先生

埼玉大学大学院理学研究科教授, Honorary Fellow, University of Wisconsin-Madison
サントリー生命科学財団フェロー

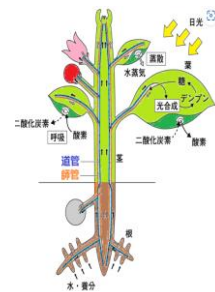


「用語説明」

「師管 (しかん)」植物の葉で、光合成により作られた栄養分を運ぶ植物の器管、右の説明図①に赤線で示した管

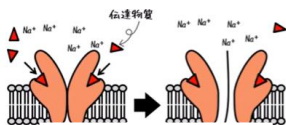
「グルタミン酸受容体」

グルタミン酸受容体には、いろいろな種類があるが、イオンチャンネル型グルタミン酸受容体を例にして説明する。細胞膜に存在するグルタミン酸受容体にグルタミン酸 (説明図②中赤色三角印) が結合すると、チャンネルが開き、陽イオンのCa²⁺のみを (この図では、陽イオンのNa⁺であるが)、細胞内に選択的に取り込み、細胞内のCa²⁺イオン濃度が高くなる。



師管の説明図①

<https://kagakuhanou.net/vascular-bundle> より



グルタミン酸受容体

グルタミン酸受容体の説明図②

(Youtube TEKIBO 高校勉強動画

「生物第7講」~情報伝達と受容体~)より

おわりに~予告~

今、植物の世界では、多くの植物との共生に必要な、植物間でのコミュニケーション方法の発見をはじめ、植物が持つ賢い能力が次々と明らかにされており、目が離せません。

一方、人間を含む動物の世界でも、驚くべき秘密が明らかにされています。次の「だより」では、本年度採択研究の中から、「Ca²⁺シグナルが関与する寿命制御機構」を紹介いたします。ご期待ください。