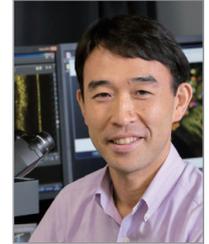


[植物と情報処理] &lt;カテゴリ① 植物の情報処理機能&gt;

## 1.2 花の中の知られざる情報処理

応  
般

東山哲也

名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所/  
東京大学 大学院理学系研究科

## 植物の情報処理を視る

植物の情報処理と言われても、ピンとこないかもしれない。植物はじっと存在しているだけの静的なものに見られ、情報処理を行う動的なものとして認識されにくいからである。しかし顕微鏡を通して植物を多細胞体として眺めたとき、脳を持つ動物とは違うユニークな情報処理が見えてくる。

生きた細胞のライブイメージング（顕微鏡によるバイオイメージング）が発展し、植物の中で起こるさまざまなことが見えてきた。本特集で中島氏が紹介するように、重力を感じる特定の細胞の中では、大きなデンプンを持つ細胞小器官がゆらゆらと動きながら沈降する「動き」がセンシングされる。虫にかじられると、維管束（葉脈など全身に張り巡らされた構造）の細胞のグルタミン酸（神経伝達物質でもある）やカルシウムイオンの濃度の高まりが、防

御態勢をとるためのシグナルとして波のように数十秒で全身に「伝播」する。

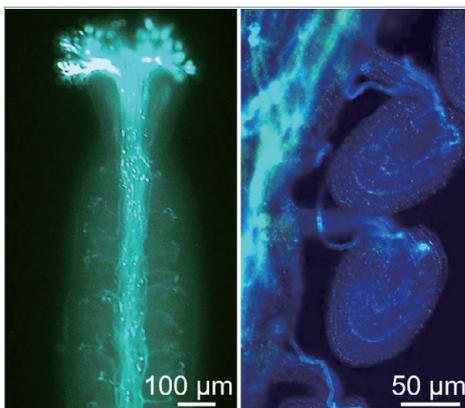
植物と動物、まさに静と動の象徴であるが、これらは共通祖先から派生した。共通祖先の単細胞生物が、それぞれ独立に多細胞化し、異なる情報処理の仕組みで維持される多細胞体になった。ここでは、植物が次世代に命をつなぐための精密な装置と言える「花」の内部で起こる、植物らしい情報処理を紹介する。

## 花粉管ガイダンスとは？

細胞壁を持つ植物細胞は、多細胞化するにつれて生じた場所から動きにくいという宿命を負った。しかし「鞭毛」という、細胞が泳ぐための装置は進化の過程で手放さず、植物が陸上に進出したあとも、受精のときだけ泳ぐ精子を作り続けた。ところが花を咲かせる被子植物は、この装置を捨てた。

被子植物の最大の強みの1つは、何ととっても短期間で種子を作って、次世代に命をつなぐことだろう。庭の雑草と格闘して、勝ち目がないと思ったかたもいるに違いない。鞭毛をなくした精細胞（泳がないので精子と呼ばない）は、花の中でどのように受精して種子を作るのだろうか。

植物の精細胞は、花粉から伸びだす花粉管という細胞の中にある。精細胞を花粉管細胞の中に飲み込み（エンドサイトーシスと言う）、花粉管を卵細胞まで伸ばすことで素早く送り届ける（図-1）。しかし花粉が付着する雌しべ先端から卵細胞までは、長



■ 図-1 シロイヌナズナの雌しべ(左)とその内部にある胚珠(右)における花粉管ガイダンス

## 特集

## Special Feature

い距離がある。花粉のサイズはおおよそ  $30\ \mu\text{m}$  ( $0.03\ \text{mm}$ ) 前後であるのに対し、卵細胞までの距離はおおよそ数 mm から数 cm, 長い場合には  $30\ \text{cm}$  を超える。そこで植物は、花粉管ガイダンス (花粉管誘導) と呼ばれる仕組みで、驚くほど正確に花粉管をナビゲーションする。まるで飛行機が空港に着陸するように正確に到達する。

## ナビゲーションシステム

飛行機の管制システムと比較しながら、花粉管ガイダンスの情報処理を説明しよう。雌しべ先端に受粉した花粉は、搭乗が完了した駐機場の飛行機のような状態である。飛行機が管制塔のやりとりで離陸許可をもらうように、花粉は表面のペプチドなどの分子を使い、雌しべの細胞膜にある受容体などを介してコミュニケーションをとり、発芽の許可をもらう。雌しべが同種の望ましい花粉 (自家受粉を拒否する植物も多い) と認識すると、雌しべが水が供給し、花粉管が発芽して伸長を開始する。伸長速度は速く、1 時間あたり数 mm 前後に達する。

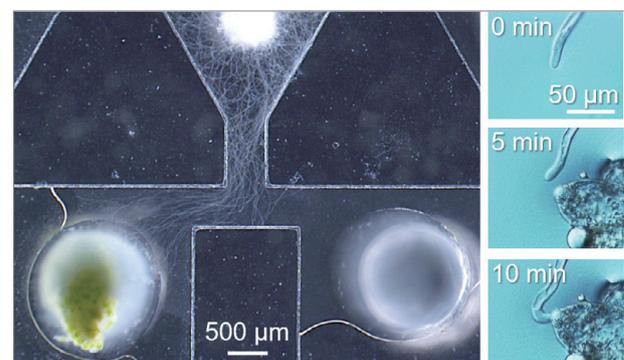
飛行機は安定した高度に達すると、途中の基地局からの電波 (ビーコン) などを頼りに、自動操縦により比較的直線的に遠距離を航行する。雌しべの内部に進入した花粉管も、雌しべの細長い組織 (花柱) を、ひたすら一直線に伸長する。ビーコンのような方向シグナルは存在せず、自動的に長いトンネルの出口に向かうと考えられている。

飛行機が目的地に近づくと、空港の管制塔と頻繁なやりとりが始まる。花粉管も花柱を抜けると目的の胚珠 (はいしゅ; 受精前の種子組織) との複雑なやりとりが始まる。まず胚珠が花粉管に対して拡散性の誘引物質を与え、胚珠側に向かわせる。長距離誘引と呼ばれ、たとえばマイクロ流体デバイスで花粉管の先に T 字路をつくり一方の先に胚珠を置くと、花粉管は胚珠のある側に曲がる (図-2)。花粉管の曲率半径は大きく、距離にして数 mm 離れた

位置を伸びる花粉管を誘引できる。質量分析による誘引物質の同定が進んでいる。

飛行機の操縦席では、目的地が近づくと、操縦士たちの緊張や気合も高まるものと想像される。花粉管も胚珠に近づくと誘引物質に応答できる状態に生理状態を変化させる。花粉管の受精能獲得とも言える現象であり、その情報分子の 1 つとして、胚珠が分泌する糖鎖を発見した (アモールと命名)。アモールを受容すると花粉管が活性化し、興味深いことにアモールは化学合成した末端の二糖だけでも生理活性を示す。

着陸に入る前に、飛行機は管制塔から着陸許可を得る。複数の航空機が近づいている場合や、あるいは滑走路の状況によって、上空で待機させられたり、別の空港に向かわされたりする。花粉管と胚珠は、実は 1 つの雌しべの中に複数あることが多い。シロイヌナズナというモデル植物での状況をたとえると、100 機ほどの飛行機 (花粉管) が飛び立ち、60 程度の隣接する空港 (胚珠) に着陸することになる。そして飛行機が着陸しはじめると、その空港には他機が着陸できなくなる。1 機が無事に着陸する (受精する) と、その空港は完全に閉鎖される。しかし 1 機目が着陸に失敗すると、空港は再び開かれ、別の飛行機を受け入れる (受精リカバリー)。ただし後述の理由で、再チャレンジは 1 機だけが可能だ。

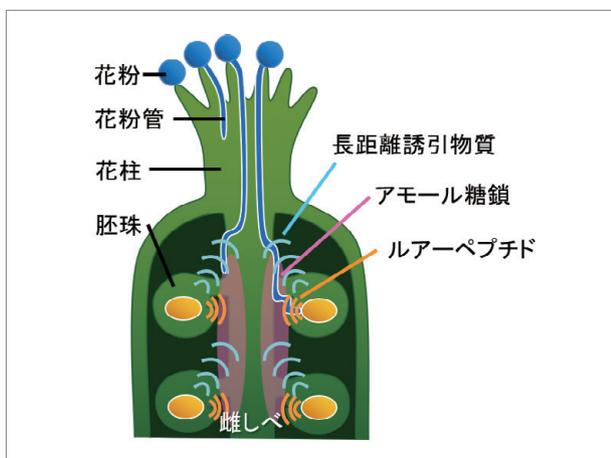


■ 図-2 マイクロ流体デバイスで左側の胚珠群に長距離誘引される花粉管 (左) と前方に置いた胚珠のルアーによって誘引される花粉管 (右)

## 特集 Special Feature

さて、実際の飛行機の着陸に際しては、計器着陸装置などで飛行機に精密な位置情報が与えられる。花粉管に対しては、卵細胞の隣にある2つの助細胞という細胞から、花粉管を誘引するペプチド（ルーアと命名）が分泌されることを発見した（図-2右）。ルーアによる誘引は、200  $\mu\text{m}$  前後の範囲で有効であり、花粉管は小さい曲率半径で精密に誘引される。花粉管の直径は10  $\mu\text{m}$  前後であるが、花粉管が到達する領域も同程度である。花粉管が到達すると先端を破裂させて精細胞を放出するが、このときに助細胞の1つと一緒に崩壊する。受精に失敗しても、花粉管を合計2本までしか受け入れられないのはこのためだ。

我々は花粉管先端の細胞膜にある受容体も同定したが、ルーアを与えた側に偏ることで伸長方向（伸長のための先端への細胞壁や細胞膜成分の分泌の位置）を制御しているようである。花粉管のような細胞を模した、災害地などで使えるソフトロボットが報告されたが、方向制御は先端のカメラで行われる。直径わずか10  $\mu\text{m}$  前後の花粉管が、先端で受容する分子に次々に反応しながら、位置情報にも応答することを想像すると、花の見方が変わるのではないだろうか（図-3）。



■図-3 花粉管ガイダンスの仕組み

## 柔軟なリカバリーシステム

顕微鏡を通して花の受精の研究を行っているとき、受精リカバリーのように、植物の柔軟性を支える情報処理が見えてくる（図-4）。たとえば、私たちはシロイヌナズナの受精直後の種子組織をマイクロデバイス内で培養し、2光子レーザー顕微鏡と呼ばれる深部観察に優れた顕微鏡で、初めて生きたまま受精卵の分裂をリアルタイムに観察することに成功した。観察に成功するという事は、同時に光操作が可能になるということの意味する。芽生えを作るための重要な細胞をレーザーで破壊したところ、周りの細胞がこれに置き換わり、再び芽生えを作る様子が捉えられた。植物細胞は周囲や遠隔の細胞とのコミュニケーションで自身の役割を決定することで、状況に応じて柔軟に対応できる。そんな植物らしい情報処理を、顕微鏡を通して興味深く視ることができる。

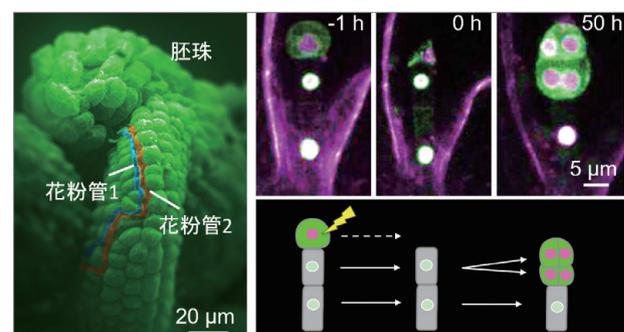
### 参考文献

- 1) 東山哲也：植物の生長調節, 53, pp.131-138 (2018).
- 2) Gooh, K. et al. : *Dev. Cell*, 34, pp.242-251 (2015).
- 3) Hawkes, E. W. et al. : *Sci. Robot.*, 2, ean3028 (2017).

(2021年9月27日受付)

■東山哲也 higashi@bs.s.u-tokyo.ac.jp

1999年東京大学修了、博士（理学）。東京大学助手を経て、2007年より名古屋大学教授、2013年より名古屋大学WPI-ITbM 副拠点長、2019年より東京大学教授を兼務。



■図-4 胚珠に花粉管が2本(青と赤)誘引される受精リカバリー(左)と、レーザー照射(黄印;照射時刻は-20h以前)で破壊した細胞の隣の細胞が芽生えを作り直し始める様子(右)