

[植物と情報処理] &lt;カテゴリ① 植物の情報処理機能&gt;

# 1.1 植物の運動を駆動する情報処理とメカニクス

応  
般

中島敬二 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科



## ダーウィンが注目した植物の運動力

植物の器官がさまざまな運動を行っていることはよく知られている。朝顔のツルは棒に巻き付こうと廻旋し、雨や風で横倒しになった植物は自発的に起き上がろうとする。植物の運動を初めて科学的に考察した論文は Charles Darwin と Francis Darwin の父子が 1880 年に著した "The Power of Movement in Plants" である<sup>1)</sup>。彼らが注目したのは、器官の旋回や屈曲といった緩慢な運動であったが、観察技術が進歩した現代では、より高速の運動を駆動するシステムの研究も進んでいる。本稿では植物が示す 2 つの運動性について、情報処理と駆動機構の観点から紹介したい。

## 植物器官の屈曲運動

植物の器官が環境刺激に応答して曲がる性質を「屈性 (tropism)」と呼ぶ。刺激に応じた接頭辞をつけ、光屈性 (phototropism)、重力屈性 (gravitropism)、水分屈性 (hydrotropism) などと呼ぶ。植物の屈性には、刺激の受容、情報処理、器官変形の 3 つのステップが必要である。刺激の受容に関しては、分子実体こそ異なるものの、動物の感覚器と似た仕組みが植物にも存在する。一方で情報処理と器官変形の 2 つのステップに関しては、植物と動物でまったく異なる仕組みが採用されている。

屈性の研究は、Darwin 父子によるオートムギの子葉鞘 (単子葉植物の芽生えを保護する円筒状の器官) の光屈性の観察を基盤として発展してきた (図-1)。彼らは子葉鞘の先端を除去したり、遮光性のキャップで覆うと屈曲が起こらないが、先端を透明なキャップで覆ったり、屈曲が起こる部位を遮光材で覆うと屈曲が起こることを見出した。この観察結果は、光の受容と屈曲の場が空間的に離れており、両者の間を何らかの情報が伝達されていることを示していた。

生物の光受容体は、発色団 (特定波長の光を吸収する化合物) を含むタンパク質分子である。ヒトの視細胞にあるロドプシンやオプシンが有名だが、植物にも赤色光や青色光を受容する複数の光受容体タンパク質がある。光屈性ではたらく受容体タンパク質は 1997 年に発見されており、その名もフォトトロピン (Phototropin) という青色光受容体である。

先端部で知覚した光刺激を屈曲部に伝える情報伝達系路については、1913 年に Boysen-Jensen が

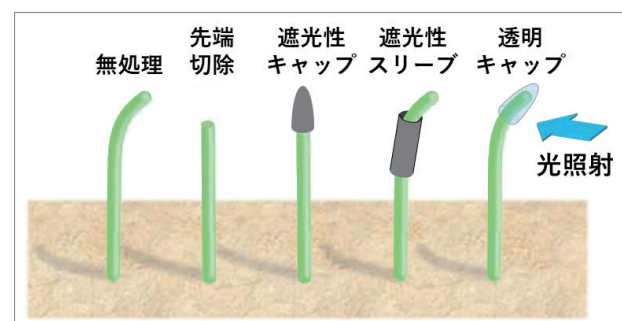


図-1 Darwin 父子によるオートムギの光屈性の実験 文献 1) を基に作成

## 特集

## Special Feature

解剖学的実験により考察している。切り離した先端部と基部側を、ゼラチンブロックを挟んで再構成すると光屈性が回復し、雲母片を挟むと回復しないことから、情報伝達物質の実体は低分子化合物であると考えられた。後に明らかになったこの情報伝達物質こそ、植物の形態形成で中心的かつ多面的な働きを持つ「オーキシン」である。オーキシンは植物の器官内を特定の方向に流れており、その流れの変化が、葉や枝といった器官の配置や細胞の形を決める。光屈性においては、受容した光の強弱に応じてオーキシンの流れが変化し、屈曲部に流れ込むオーキシン量の非対称性が細胞の偏差成長を介して器官を屈曲させる(図-2A)。器官内でオーキシンが流れる方向や量は、オーキシンを細胞外に汲み出すPINタンパク質が、細胞のどちら側にどれくらい存在するかにより決められるのだが、フォトトロピンが、PINタンパク質の分布を変化させるメカニズムはいまだに不明である。

重力屈性においては、重力感受細胞が器官軸と重力ベクトルの相対関係を感じ取る。重力感受細胞の内部には、デンプンを溜め込んで比重を増したアミロプラストという顆粒がいくつも浮かんでおり、これらが重力方向に従って細胞内で沈降する(図-2B)。この動きを細胞内の繊維状のタンパク質(細胞骨格)が認識し、これが未知の経路を介してPINタンパク質の分布を変化させることで、オーキシンの流量に非対称性を生み出す(図-2B)。植物においては、

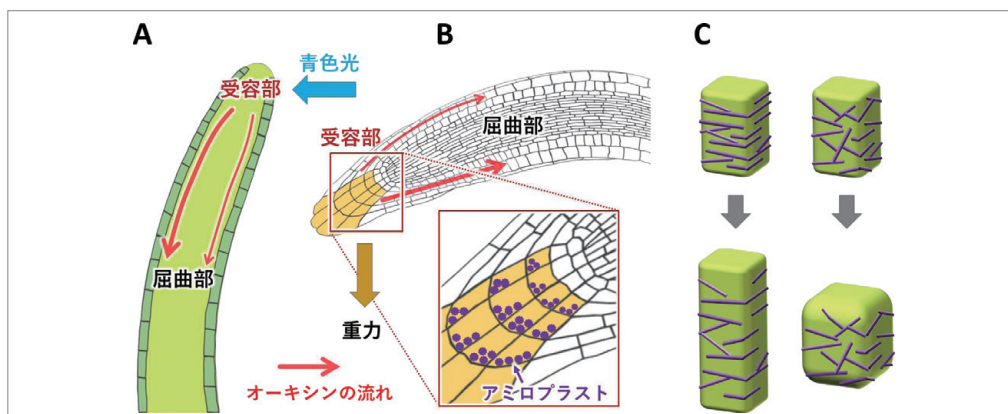
重力感受という複雑な機構すら、細胞単位で完結していることが興味深い。

それでは細胞の形態変化はどのようにして駆動されるのだろうか？植物細胞の形態は、細胞壁のメッシュを、膜につつまれた細胞が内側から押し広げることで保たれている。細胞を変形させるには、膨らませたい方向に合わせてメッシュを繋ぎかえればよい(図-2C)。このように書くと簡単だが、実際の器官変形では無数の細胞の形を統合的に調節せねばならない。この複雑な作業を、中枢神経を持たない植物が自律分散的に統御していることは驚異的であるが、その仕組みはいまだに明らかでない。

Darwin父子は、屈性を植物の器官が示す定常的な廻旋運動の変形と捉えた。その一方で、廻旋運動そのものが果たす役割についても研究が進んでいる。米国の植物学者とロボット学者は、イネの変異体やソフトロボットを用い、根の廻旋運動が障害物の回避に重要な役割を果たすことを示している<sup>2)</sup>。植物の運動機構を積極的に模倣したソフトロボットの開発も行われている<sup>3)</sup>。

## 植物の高速運動

上で紹介した屈性や廻旋は、いかにも植物らしい緩慢な運動であるが、ある種の植物では、種子の散布装置に非常に速い運動性が見られる。このような



■ 図-2 A. 光屈性. B. 重力屈性. 子葉鞘で高濃度のオーキシンが細胞の伸長を促進し、根では抑制するが、その原理は不明である. C. 細胞壁のメッシュ構造(紫色)が細胞の伸長方向を決定する原理



## 特集

## Special Feature

装置の仕組みを、植物発生学と動力学の融合研究から明らかにした論文が最近相次いで発表されているので、以下に2つを紹介しよう。

1つ目は、ミチタネツケバナというアブラナ科植物で、日本でも帰化植物として繁殖している。ミチタネツケバナの種は半円筒形の蓋の内側に並んでいる(図-3A)。この蓋の内側の細胞は、リグニンという堅いポリマーの蓄積により進展性がない。一方、外側の細胞は柔らかく、蓋の厚み方向に膨らもうとするため、それと直行した蓋の長軸方向に張力が生じる。内外の張力差により、蓋はゼンマイバネのように巻き上がろうとするが、半円筒形という形態に制約されて巻き上がることができない。鞘の成熟が進むと、蓋の内側のリグニン層がヒンジのように開き、鞘の形態は半円筒形から平板へと転換する。形態の制約が解かれた蓋は、わずか3ミリ秒という短時間で巻き上がり、内側に付着していた種を周囲へ<sup>4)</sup>投擲する。

2つ目はカタバミというお馴染みの植物である。カタバミの種は、果皮の裂け目からマシンガンのように飛び出す<sup>5)</sup>が、そのエネルギーは鞘ではなく、種を包む珠皮に蓄えられている(図-3B)。カタバミの珠皮は吸水により膨張しようとするが、堅い果皮に制約され膨れることができない。珠皮の一端が開裂すると、それを起点に珠皮全体が高速で裏返り、

中に含まれていた種が弾き出される(図-3B下)。弾き出された種は隣の珠皮にぶつかることで、その開裂を誘起する(図-3B上)。これを繰り返すことで、一列に並んだ種が連続的に発射される仕組みである<sup>5)</sup>。

これらの高速運動装置に共通するのは、力学特性が異なる細胞層を非対称に配置することで作られるバネ構造である。この仕掛けは、植物の成熟状態や周囲の水分環境の情報をバネの開放に直接リンクさせるものである。中枢神経を持たない植物が進化の過程で獲得した単純だが巧妙な情報処理システムと言えるのではないだろうか。

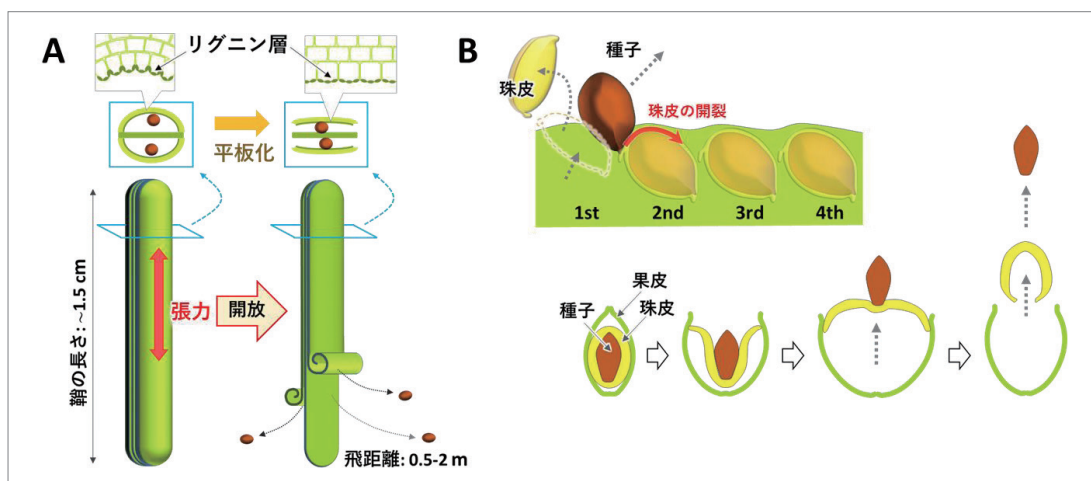
## 参考文献

- 1) Darwin, C.: The Power of Movement in Plants (1880). (渡辺仁 訳 森北出版 1987).
- 2) Taylor, I. et al.: Mechanism and Function of Root Circumnutation, *PNAS*, 118, e2018940118 (2021).
- 3) Barbara Mazzolai 著, 久保耕司 訳: ロボット学者, 植物に学ぶ, 白揚社 (2021).
- 4) Hofhuis, H. et al.: Morphomechanical Innovation Drives Explosive Seed Dispersal, *Cell*, 166, 222-233 (2016).
- 5) Li, S. et al.: Seed Ejection Mechanism in an *Oxalis* Species, *Sci. Rep.*, 10, 8855 (2020).

(2021年9月24日受付)

■中島敬二 k-nakaji@bs.naist.jp

ニューヨーク大学研究員, 奈良先端科学技術大学院大学助手, 同准教授を経て, 同教授, 博士(農学). 新学術領域研究「植物の周期と変調」領域代表者. 現在の専門は植物発生学.



■図-3 弾性エネルギーの開放による種子の飛散機構 A. ミチタネツケバナ. B. カタバミ. 文献<sup>4)</sup>, <sup>5)</sup>を基に作成