

植物による環境の感知と水分の制御： 気孔の開閉と蒸散の調節のしくみ

東京理科大学 創域理工学部
生命生物科学科 教授

くちつ かず ゆき
朽津 和幸

東京理科大学 創域理工学部
生命生物科学科 助教

しんかわ
新川 はるか

植物の気孔が操る光合成・養分吸収・節水の バランス

陸上植物は、太陽光をエネルギー源として空気中の二酸化炭素 (CO₂) から有機物を作り出すが、それ以外の栄養分は土壌から水と共に吸収しなければならない。この吸収を支える大きな原動力が、葉から水蒸気を放出する蒸散である。蒸散は、根から養分を吸い上げるためのポンプのような役割を果たしており、植物の生育に水が必要不可欠な原因の一つとなっている。

光や土壌水分が十分な条件では、植物は盛んに CO₂ を取り込んで光合成を行うと共に、蒸散により養分を吸収する。しかし、周囲が乾燥すると、水分の損失を抑える必要に迫られる。そこで植物は、大気と体内とのガス交換の窓口として気孔^{あな}という小さな孔を開閉させ、体内の水分を巧みに制御している。気孔は、CO₂ の取り込み口であると同時に、蒸散を介して水や無機養分の移動を支えている。

気孔の開閉は、孔辺細胞の体積変化により制御される。一般に植物は、水の吸収や排出により細胞の体積を制御する仕組みを高度に発達させている。イオンポンプやイオンチャンネルなどの膜タンパク質の活性を調節し、細胞内外のイオンの移動を制御することで、細胞内の浸透圧を変化させ、水の出入りを操っている。イオンチャンネルは動物の神経系における機能に注目が集まりがちだが、植物も情報処理や細胞の体積制御などに活用している。

ここで重要なのは、植物はさまざまな外部環境を鋭敏に感知し、その情報を細胞内で処理している点だ。例えば、青色光を感知すると CO₂ を吸収するため気孔を開くが、暗所では閉じる。さらに乾燥ストレス下で

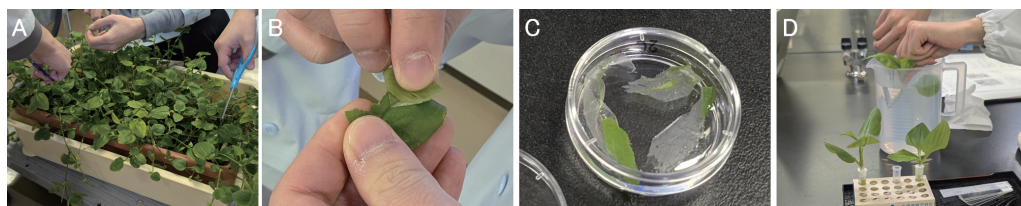
は、危険信号を伝える植物ホルモンであるアブシシン酸 (ABA) が蓄積する。ABA は、さまざまなイオンチャンネルを活性化させて K⁺ や Cl⁻ などのイオンを排出させ、水を移動させて孔辺細胞の体積を小さくすることにより、気孔を閉鎖させる。

実験 環境感知に伴う気孔開閉の観察と測定

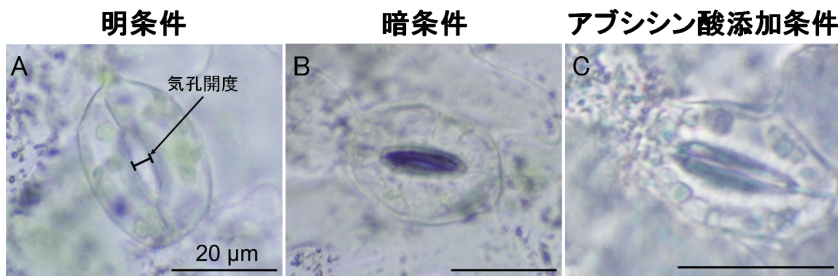
気孔が多い、葉の裏側の表皮を剥いで、気孔や孔辺細胞を顕微鏡で観察してみよう。例えば、青い花が美しいツクサの仲間はカミソリとピンセットを使って簡単に葉の表皮を剥くことができる【図1B】。ここではマルバツクサを用いた。可能なら、種子から5~8週間程度育てたものを用いると良い【図1A】。

葉の裏側の表皮のプレパラートを作り、顕微鏡で観察すると、ジグソーパズルのような表皮細胞の中に、一对の孔辺細胞から構成される気孔が見つかる【図2】。葉緑体を持たない表皮細胞や、葉緑体が密集した内部の葉肉細胞と比べながら、孔辺細胞内の葉緑体の数を数えてみよう。文献1)で紹介した方法などで蛍光を観察すると、葉緑体が赤く光って見え美しい。

明条件の植物と、前日から暗所に置いた植物を比べると、明条件の方が大きく開いていることがわかる【図2A、B】。また、暗条件から採取した表皮片を、塩化カリウム (KCl) を含む弱酸性の緩衝液 (例えば 50 mM KCl, 0.1 mM CaCl₂, 5 mM MES-bis-trispropane pH 6.5; 調整が難しい場合は、水道水で試してみよう) に浸漬し、光を当てると、徐々に気孔が開いてくる過程を観察できる。



【図1】 実験1および2の手順。(A)ツクサの生育状態。播種後2ヶ月。(B)葉の裏側の表皮を剥ぎ取る様子。めくるようにちぎる。(C)剥いだ表皮の浸漬。(D)水切りの様子(奥)と蒸散量を測定するために孔辺細胞用緩衝液につけパラフィルムで封をした植物体(手前)。



【図2】植物表皮の気孔の写真。(A)明条件。(B)暗条件(24時間)。(C)アブシシン酸添加条件。

定性的な観察だけでなく、各条件で多くの気孔の開き具合を測定し【図2A】、平均値やばらつきを求め、定量的に比較してみよう。複数の測定値を統計的に比較(検定)し、客観的に意味のある差(有意差)と言えるかがあるか否かを判断することが大切だ。

蒸散量の測定：目に見えない動きを数値化する

気孔の開閉は蒸散を制御する主要因となる。そこで、葉の蒸散量を重量変化として測定してみよう。茎に気泡が入らないように水中で茎を切った後【図1D】、水(可能なら上記の緩衝液)を入れたチューブなどの容器に移して、パラフィルム(またはラップ)で蓋をする【図1D】。初期重量(a)を測定し、明条件、暗条件で2時間ほど置く。2時間後の重量を測定し(b)、最後に葉を全て切り取って茎の重量(c)を測る。

葉の単位質量・単位時間当たりの蒸散量＝

$$\frac{a-b}{(b-c) \times 2} \text{ [g 水の蒸散量/g 湿潤量/h 時間]}$$

明条件では蒸散量が大きいものに対して、暗条件では蒸散量が小さくなる、すなわち気孔が閉じることで水分の放出が抑制される。蒸散という目に見えない現象を、数値として捉え、定量的に評価することが大切だ。

気孔開度と蒸散に対する乾燥ストレスやアブシシン酸の影響

乾燥ストレスを感知した植物は、危険信号としてABAを合成する。ドライヤーで風を当てるなどの方法で植物に乾燥ストレスを与え、気孔の開度や蒸散量に対する影響を調べてみよう。

さらに、ABAを入手できれば、より深い実験が可能だ。剥がした表皮を緩衝液に浸漬して明所で1~2時間程度静置し、気孔を十分に開かせた上で、ABAを与えてみよう。ABAは水に溶けにくいので、エタノールまたはジメチルスルホキシド(DMSO)などの溶媒に溶かし、終濃度10 μM程度のABAを添加する。経時的に顕微鏡で気孔を観察すると、ABAにより気孔閉鎖が誘導される様子を観察できる。

その際、溶媒のみの対照区(コントロール)を用意し、他の条件を完全に同一にすることが科学的な評価には不可欠である。可能なら、さまざまなイオンチャンネルのはたらきを抑える試薬の効果も調べてみよう。例えば、Cl⁻を細胞外に選択的に排出する陰イオンチャンネルの阻害剤ア

ントラセン-9-カルボン酸を処理しておく、気孔は大きく開き、ABAを与えても閉鎖しにくくなる。

地球環境問題が深刻化する中、乾燥ストレスによる農作物の傷害を回避する技術の開発は世界的に重要な課題だ。気孔開閉のメカニズムの解明は、その最前線にある。本実験から、こうした最先端研究の息吹を感じてほしい。

蒸散量に関しても、終濃度10 μMのABAを含む緩衝液と比較対象の溶媒のみを添加したものを調整し、明所で2時間静置した後、重量を測定する。孔辺細胞がABAを感知すると、その体積の減少に伴い、気孔が閉鎖すると共に、植物体の蒸散が抑制されることを確かめられるだろう。

まとめと考察

本実験では、孔辺細胞が環境を感知してその体積を制御した結果、気孔の開閉が調節されることを視覚的に実感できる【図2】。さらに、各条件における気孔開度と蒸散量を比較することにより、気孔の開閉と蒸散量が密接に関係していることが理解できるだろう。

顕微鏡観察による形態変化と、重量測定による蒸散量という、性質の異なる二つの指標により、同じ現象を別の側面から捉えることが大切である。目に見える形態変化と、数値として得られる測定結果とを対応づけることで、気孔の開閉が植物全体の水分調節にどのように関与しているかを実感してほしい。

植物が気孔を発達させたことは、陸上環境への適応において決定的な役割を果たした。水分損失というリスクを伴いながらも、気孔を通じてCO₂を取り込み、光合成を行う仕組みを獲得したことで、植物は陸上での繁栄を可能にしたのだ。この実験を契機として、多様な情報を感知し、環境に適応する植物の生き様に思いを馳せてみよう！

参考文献

- 1) 橋本研志、朽津和幸 植物細胞の蛍光を簡単な顕微鏡で観察してみよう 科学フォーラム 436: 60-61 2023.8