



報道の解禁日(日本時間)

(テレビ,ラジオ,インターネット) : 2025年8月25日(月) 18時

(新聞) : 2025年8月26日(火) 付朝刊

2025年8月22日

報道機関 各位

赤色光による気孔開口の分子機構を解明 ～シヨ糖の増加が細胞膜プロトンポンプのリン酸化を促進～

【本研究のポイント】

- ・植物において気孔^{注1)}開口のエンジンとして働く細胞膜プロトンポンプ^{注2)}は、これまで青色光による特定部位のリン酸化^{注3)}によって活性化されることが知られていた。
- ・葉の大部分を占める葉肉細胞^{注4)}における光合成^{注5)}により生合成されたシヨ糖^{注6)}が孔辺細胞^{注7)}周辺に移動し、細胞膜プロトンポンプのリン酸化による活性化と、気孔閉鎖を誘導する陰イオンチャネル^{注8)}の不活性化を誘導し、赤色光による気孔開口を引き起こしていることを発見した。

【研究概要】

名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所(WPI-ITbM※)の木下 俊則 教授、同大学院理学研究科の安藤 英伍(研究当時 博士研究員、現国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 野菜花き研究部門 施設生産システム研究領域 施設野菜花き生育制御グループ 研究員)らの研究グループは、理化学研究所 環境資源科学研究センターの平井 優美部門長、ミシシッピ大学の Sixue Chen 教授、ペンシルバニア州立大学の Sarah M. Assmann 教授らとの共同研究で、葉肉細胞で光合成によって合成された糖(シヨ糖)が葉肉メッセンジャーとして、気孔を構成する孔辺細胞において気孔開口のエンジンの働きをする細胞膜プロトンポンプの活性化と気孔閉鎖を誘導する陰イオンチャネルの不活性化を引き起こし、気孔開口を誘導することを明らかにしました。

植物は、太陽光に含まれる青色光と赤色光に反応して気孔を開口し、ガス交換を行うことが知られています。これまでの研究により、青色光による気孔開口は、青色光受容体フォトロピン^{注9)}により青色光が受容され、細胞膜プロトンポンプを活性化し、気孔開口が誘導されることが明らかとなっていました。赤色光による気孔開口の分子機構の詳細は未解明でした。メタボローム解析^{注10)}の結果、赤色光を照射した葉のアポプラスト^{注11)}には、光合成産物であるシヨ糖が蓄積することを見出しました。そこで、表皮をシヨ糖で処理すると、気孔が開口すること、その時、孔辺細胞の細胞膜プロトンポンプの活性化を誘導するC末端のスレオニン残基がリン酸化されるとともに、気孔閉鎖を誘導する陰イオンチャネルが不活性化されることを発見し、赤色光による気孔開口の分子機構が明らかとなりました。

気孔は、植物の成長や収量、乾燥応答において極めて重要な働きをすることが知られています。本研究で明らかとなった気孔開口の分子機構を基盤として、今後、気孔開度を制御した植物の作出などが期待されます。

本研究成果は、2025年8月25日18時(日本時間)付英科学誌『Nature Plants』でオンライン公開されます。

【研究背景と内容】

植物の表皮には気孔が数多く存在し、植物はこの孔を通して光合成に必要な二酸化炭素を取り込み、また、蒸散や酸素の放出など、大気とのガス交換を行っています。一つの気孔は一对の孔辺細胞により構成され、太陽光に含まれる青色光と赤色光に反応して開口します。一方、気孔は、暗黒条件や二酸化炭素、乾燥ストレスに反応して生合成される植物ホルモンのアブシジン酸(ABA)^{注12)}により閉鎖します(図1)。孔辺細胞に青色光が当たると、光受容体であるフォトロピンが活性化し、細胞内でシグナル伝達を誘導します。このシグナルにより細胞膜プロトンポンプが活性化され、その後、孔辺細胞内にカリウムイオンが取り込まれることで最終的に気孔が開口します(図2)。

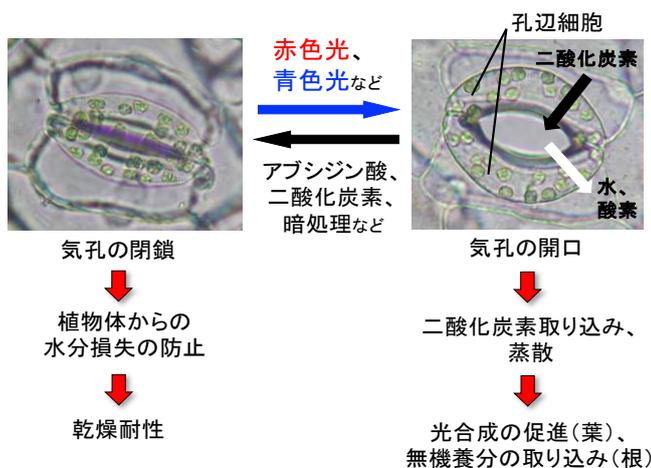


図1 気孔の開閉とその働き

気孔は赤色光や青色光によって開口し、乾燥ストレスにより生合成される植物ホルモンのアブシジン酸や二酸化炭素、暗処理により閉鎖する。気孔は、光合成に必要な二酸化炭素の唯一の取り込み口として働く。

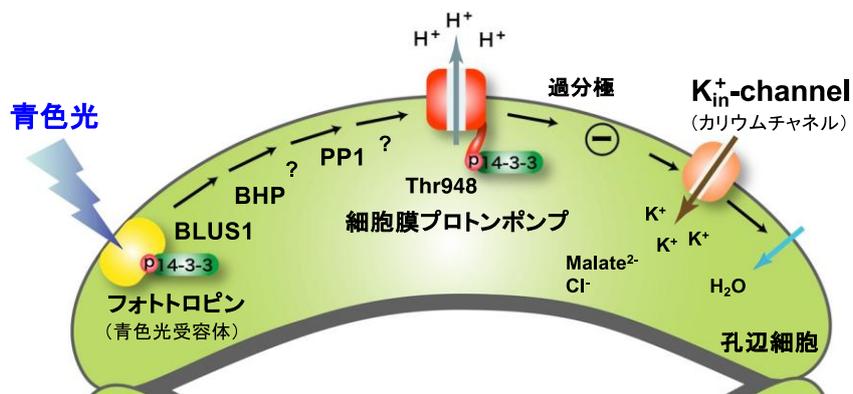


図2 これまでに明らかとなっている、青色光による気孔開口のシグナル伝達

青色光は、フォトロピンに受容され、細胞膜プロトンポンプの C 末端から 2 番目のスレオニン残基(Thr948)のリン酸化により活性化し、カリウムイオン(K⁺)取り込みを誘導する。これにより、浸透圧が上昇し、水が取り込まれ、孔辺細胞の体積が増加することで気孔が開口する。BLUS1、BHP と PP1 はシグナル伝達に関わると考えられているシグナル伝達因子、14-3-3 は細胞膜プロトンポンプの活性化に関わる 14-3-3 タンパク質。

これまでに研究グループは、気孔開口においてエンジンの働きをする細胞膜プロトンポンプが、青色光や赤色光に依存して C 末端から2番目のスレオニン残基(Thr948)がリン酸化され活性化され、気孔開口を誘導すること、さらに孔辺細胞の細胞膜プロトンポンプのタンパク質量を増やすと、気孔開口が促進され、光合成活性や植物の成長や収量が増加することなどを明らかにしてきました。このように、細胞膜プロトンポンプの活性化は、気孔開口の駆動力を生み出す重要な反応です。青色光による気孔開口では、青色光受容体フォトピンが細胞膜プロトンポンプのリン酸化を誘導し、活性化することが明らかとなっています。一方、赤色光による気孔開口は、葉の大部分を占める葉肉細胞における光合成が重要であることが明らかとなりましたが、どのように細胞膜プロトンポンプのリン酸化を誘導し、活性化するのか、その分子機構の詳細は明らかになっていません。

そこで研究グループは、葉肉細胞において光合成により何らかの物質が作り出され、それが、葉肉メッセンジャーとして孔辺細胞に伝わり、細胞膜プロトンポンプのリン酸化を誘導していると考えました。実際、ソラマメの葉を実験材料に用いてアポプラスト成分を調べたところ、120 分の光照射でショ糖が 2 mM 程度に上昇することが明らかとなりました(図3A)。そこで、ショ糖が葉肉メッセンジャーとして機能しているかどうか、さらに細胞膜プロトンポンプがこれに関与するかを調べるため、遺伝学的実験に用いるモデル植物シロイヌナズナを用いて気孔開口実験を行いました。シロイヌナズナの葉から単離した表皮に外部からショ糖を与えたところ、0.4 mM と 1 mM ショ糖が有意に気孔開口を誘導することから、ショ糖が葉肉メッセンジャーとして機能していることが明らかとなりました。さらに、孔辺細胞における主要な細胞膜プロトンポンプである *AHA1* 欠損変異体においては、ショ糖による気孔開口が抑制されることもわかり(図3B)、ショ糖による気孔開口には細胞膜プロトンポンプが関与することが示唆されました。

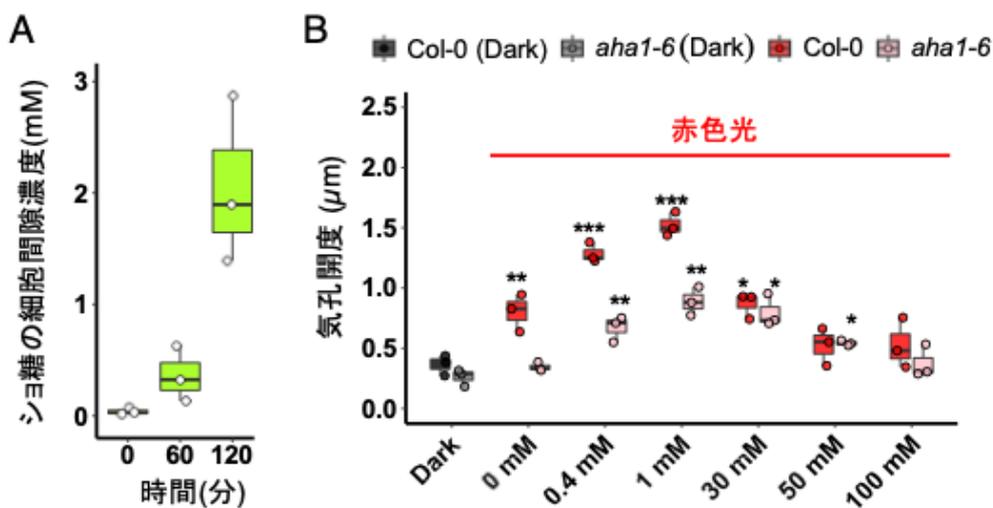


図3 アポプラストのショ糖濃度(A)とショ糖による気孔開口(B)

(A) 光照射後、120 分で 2 mM 程度までショ糖濃度が増加。(B) 外部から与えた 0.4 mM と 1 mM ショ糖が有意に気孔開口を促進し、この気孔開口は、細胞膜プロトンポンプ欠損変異体 (*aha1-6*)で抑制されていた。

次に、1 mM ショ糖の孔辺細胞の細胞膜プロトンポンプのリン酸化レベルへの影響を調べた結果、30 分程度でリン酸化レベルが上昇することが明らかとなりました(図4A)。さらに、気孔閉鎖を誘導する孔辺細胞における陰イオンチャンネル活性へのショ糖の影響を調べた結果、1 mM と 3 mM ショ糖処理により、陰イオンチャンネル活性が有意に低下することが明らかとなりました(図4B)。

葉に赤色光が照射されると、葉肉細胞において光合成が始まり、その結果、ショ糖が合成されます。合成されたショ糖の一部は、アポプラスト経路を通じて維管束の篩管に運ばれ、植物体全体に栄養分として輸送されます。同時に、ショ糖は葉肉メッセンジャーとして孔辺細胞に作用し、細胞膜プロトンポンプの活性化と陰イオンチャンネルの不活性化を引き起こし、気孔開口を誘導することで、光合成に必要な二酸化炭素の取込みを促進しているということが明らかとなりました(図 5)。

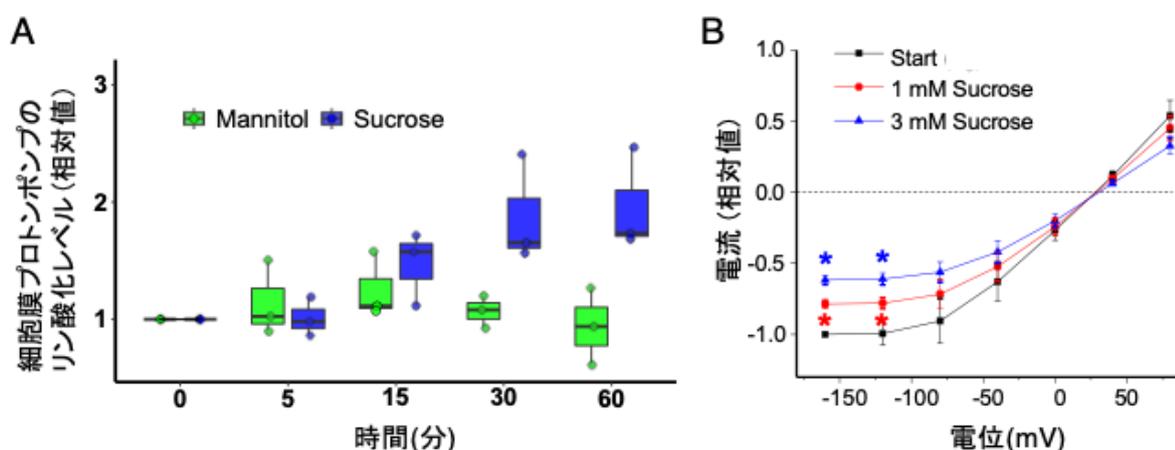


図 4 ショ糖による細胞膜プロトンポンプのリン酸化(A)と陰イオンチャンネルの阻害(B)
 (A) 1 mM ショ糖(Sucrose)またはマンニトール(Mannitol)で表皮を処理後、各時間で細胞膜プロトンポンプのリン酸化レベルを検出。(B) 1 mM または 3 mM ショ糖(Sucrose)が、陰イオンチャンネル活性を阻害した。

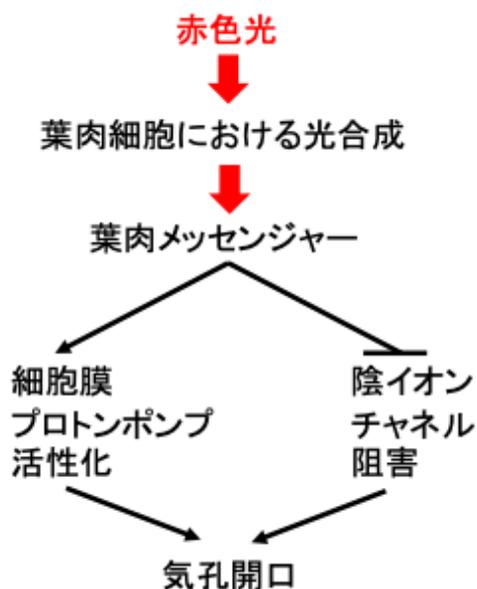


図 5 葉における赤色光による気孔開口の模式図

【成果の意義】

本研究により、これまで不明であった葉における赤色光による気孔開口の分子機構の一端が明らかとなってきました。孔辺細胞の細胞膜プロトンポンプは、これまで知られていた青色光受容体フォトロピンを介した青色光によるリン酸化のみならず、葉肉細胞において光合成によって生合成されたショ糖によりリン酸化され、活性化されることで、光による気孔開口の駆動力を生み出していることが明らかとなり、細胞間シグナル伝達を介した気孔開口の分子機構が新たに明らかとなりました。

気孔は、植物の成長や収量、乾燥応答において極めて重要な働きをすることが知られています。本研究で明らかとなった葉肉メッセンジャーであるショ糖による気孔開口の分子機構を基盤として、今後、気孔開度の人為的操作法の確立などが期待されます。

【支援・謝辞】

本研究は、基盤研究(S)[20H05687:木下俊則]、基盤研究(A)[25H00989:木下俊則]、学術変革領域研究(A)[25H01346:木下俊則]、JST ASPIRE [JPMJAP24A3:木下俊則]、日本学術振興会・特別研究員奨励金[20J00392:安藤英伍]のもとで行われました。

【用語説明】

注1)気孔:

植物の表皮に存在し、一对の孔辺細胞から形成される孔で、植物は気孔を通して大気とのガス交換を行っている。孔辺細胞はさまざまな環境シグナルに応答して体積を変化させ、気孔開度を調節している。光による気孔開口では細胞膜プロトンポンプの活性化が必須となっている。

注2)細胞膜プロトンポンプ:

ATP(アデノシン三リン酸)をエネルギーとして、細胞の内側から外側に水素イオンを輸送する一次輸送体。細胞膜を介して形成される水素イオンの濃度勾配は、さまざまな物質を輸送する二次輸送体の駆動力として利用される。気孔孔辺細胞においては、青色光により活性化され、カリウム取り込みの駆動力を形成し、気孔開口を引き起こすことが知られている。

注3)リン酸化:

タンパク質の翻訳後修飾の一つ。セリン残基、スレオニン残基など特定のアミノ酸にリン酸基が付加されることにより、そのタンパク質の構造変化や他のタンパク質との相互作用に変化が生じ、活性や局在、安定性などさまざまな調節に関与する。

注4)葉肉細胞:

葉において上下表皮細胞の間に存在する細胞。維管束を除く。葉緑体を多く持ち、植物の光合成の主要な場となる。

注5)光合成:

植物の葉緑体や光合成色素を持つ生物で行われる化学反応で、二酸化炭素、水、光エネルギーを利用して、炭素化合物と酸素を生み出す。地球上のほぼすべての動物は、植物の光合成により作り出される炭素化合物をエネルギー源として生きている。

注6)ショ糖:

糖の一種でグルコースとフルクトースが結合した化学構造を持つ。光合成により作り出される炭素化合物はショ糖の形で植物体全身へ輸送される。

注 7)孔辺細胞:

気孔を取り囲む細胞。さまざまなシグナルに応答して周囲の細胞とイオン、水などをやり取りし、膨張・収縮することで気孔の開き具合が変化する。表皮組織の中で唯一葉緑体を持つなど、特殊化した細胞である。

注 8)陰イオンチャネル:

細胞膜において塩化物イオン (Cl⁻) などの陰イオンの通り道となるタンパク質。気孔孔辺細胞においては、細胞内に蓄積した塩化物イオンやリンゴ酸を細胞外に流出させることで、さらにカリウムを流出させるチャネルを開かせて気孔閉鎖を誘導することが知られている。

注 9)フォトトロピン:

植物特有の光受容体で、光による気孔開口の光受容体として機能する。フォトトロピンは、気孔開口の他に、光屈性や葉緑体の光定位運動の光受容体として機能することが知られている。

注 10)メタボローム解析

生体内の化学反応によって合成される代謝産物を、質量分析装置などを活用して網羅的に分析する研究手法。

注 11)アポプラスト:

植物体内、細胞膜の外側の部分の総称。細胞壁空間、導管、および気体(酸素や二酸化炭素)の通り道となる細胞間隙から成る。特に細胞壁空間は水やそれに溶け込んだ物質の輸送の場として機能し、この輸送経路はアポプラスト経路と呼ばれる。

注 12)アブシジン酸(ABA):

植物ホルモンの一種で、乾燥などのストレスに対応して合成される。気孔の閉鎖や種子の休眠、生長抑制などを誘導する。

【論文情報】

雑誌名: Nature Plants

論文タイトル: Apoplastic metabolomics reveals sugars as mesophyll messengers regulating guard cell ion transport under red light (アポプラストのメタボローム解析による赤色光による気孔開口における葉肉メッセンジャーの解明)

著者: *Yotam Zait, *Mengmeng Zhu, *Eigo Ando (本学元研究員、共同第一著者), Yunqing Zhou, Adi Yaaran, Sunheng Yon, Mami Okamoto (理化学研究所、テクニカルスタッフⅡ), Yuki Hayashi (本学教員), Masami Y. Hirai (理化学研究所、部門長), Timothy Jegla, **Toshinori Kinoshita (本学教員、共同責任著者), **Sixue Chen, **Sarah M. Assmann

DOI: 10.1038/s41477-025-02078-7

※【WPI-ITbM について】(<http://www.itbm.nagoya-u.ac.jp>)

名古屋大学トランスフォーマティブ生命分子研究所(ITbM)は、2012年に文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)の1つとして採択されました。

ITbMでは、精緻にデザインされた機能をもつ分子(化合物)を用いて、これまで明らかにされていなかった生命機能の解明を目指すと共に、化学者と生物学者が隣り合わせになって融合研究を行うミックス・ラボ、ミックス・オフィスで化学と生物学の融合領域研究を

Press Release

展開しています。「ミックス」をキーワードに、人々の思考、生活、行動を劇的に変えるトランスフォーマティブ分子の発見と開発を行い、社会が直面する環境問題、食料問題、医療技術の発展といったさまざまな課題に取り組んでいます。これまで10年間の取り組みが高く評価され、世界トップレベルの極めて高い研究水準と優れた研究環境にある研究拠点「WPI アカデミー」のメンバーに認定されました。