

病原体への抵抗性か？ガス交換か？

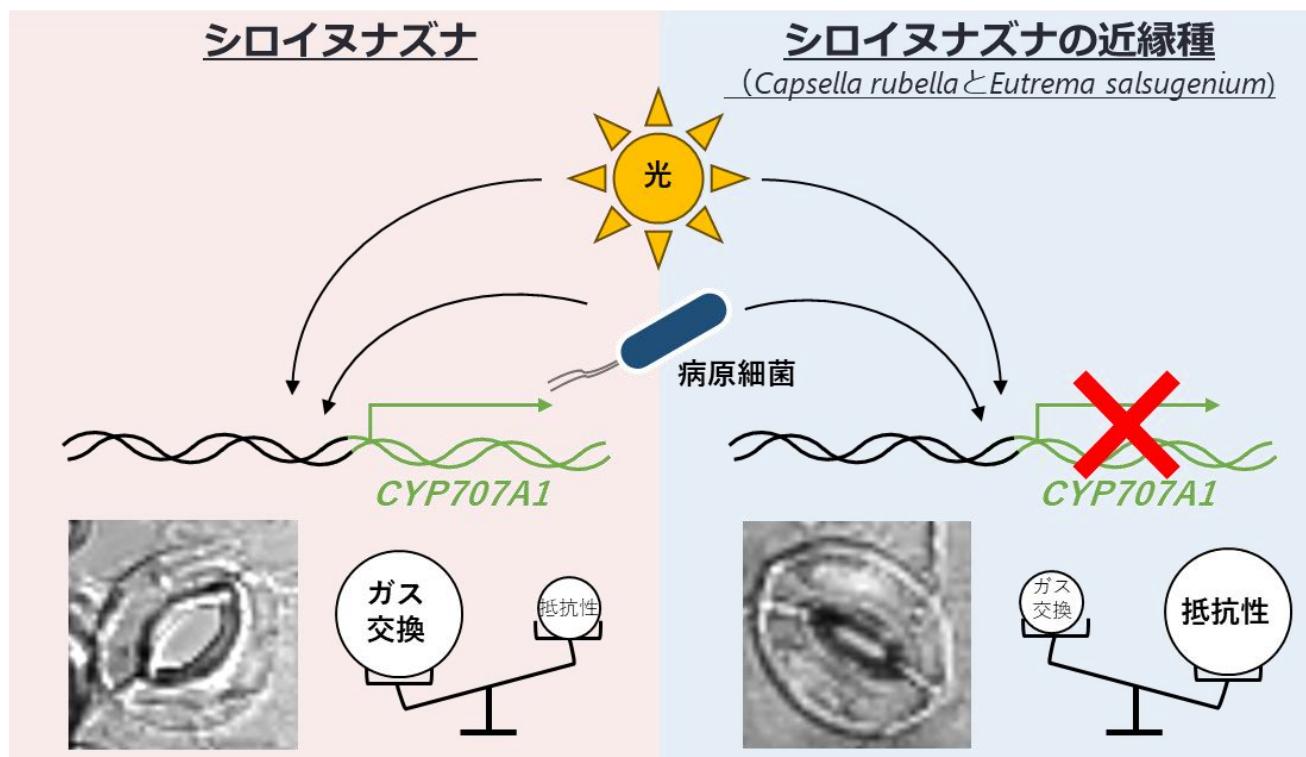
—植物の進化におけるトレードオフ—

概要

気孔は葉の表面に存在する小さな穴で、光合成に必要なガス交換を担う重要な器官であるとともに、植物と細菌が繰り広げる攻防の最前線でもあります。植物は気孔を閉じることで細菌の侵入を防ぎますが、病原細菌は閉じた気孔を再び開かせることが知られていました。しかし、その仕組みの詳細は長らく不明でした。

峯彰 京都大学大学院農学研究科准教授、平田梨佳子 同特定研究員、津田賢一 中国華中農業大学 (Huazhong Agricultural University) 教授らの研究グループは、病原細菌がシロイヌナズナの遺伝子発現制御の仕組みを転用することで、気孔を再び開かせることを発見しました。さらに、この遺伝子発現制御の仕組みは本来、シロイヌナズナが朝の光に応じて素早く気孔を開き、ガス交換を開始するために欠かせないものであることを突き止めました。加えて、シロイヌナズナに近縁のいくつかのアブラナ科植物では、この遺伝子発現制御が起こらない代わりに、病原細菌による気孔開口に対して抵抗性を示すことを発見しました。これは、気孔を速やかに開くための仕組みを犠牲にする一方で、細菌抵抗性が発揮されることを示す例であり、植物の進化における重要な「トレードオフ」を明らかにした成果です。

本研究成果は、2025年11月17日に、国際学術誌「Current Biology」にオンライン掲載されました。



1. 背景

気孔は葉の表面に存在する 2 つの孔辺細胞に囲まれた小さな穴で、光合成に必要なガス交換を担う重要な器官であると同時に、植物と細菌の攻防の最前線でもあります。植物は細菌を認識して気孔を閉じることでその侵入を防ぐ免疫機構を備えています。この気孔免疫においては、気孔閉鎖を誘導する植物ホルモンであるアブシジン酸が重要な働きを担います。一方、病原細菌は閉じた気孔を再び開かせる物質を作ります。例えば、病原細菌 *Pseudomonas syringae*^{注1)} pv. *tomato* DC3000 (*Pto*) が産生する植物毒コロナチンは植物ホルモンの一種であるジャスモン酸に似た構造を持ち、気孔開口を誘導することが知られていました。しかし、その仕組みの詳細は長らく不明でした。

2. 研究手法・成果

本研究では、アブラナ科のモデル植物シロイヌナズナを用いて、コロナチンによる気孔開口の仕組みに迫りました。シロイヌナズナはアブシジン酸を分解する遺伝子を 4 つ持っています。このうち、気孔を形成する孔辺細胞で特異的に発現する *CYP707A1* という遺伝子だけが、*Pto* の感染あるいはコロナチン処理によって発現が誘導されることを発見しました。この結果から、*Pto* はコロナチンを使って *CYP707A1* の発現を高め、アブシジン酸による気孔閉鎖を妨げることで気孔を再び開かせることが示唆されました。実際、*CYP707A1* 遺伝子を働かなくしたシロイヌナズナでは、*Pto* による気孔開口が起こらないことが確認されました。

さらに、シロイヌナズナと近縁のアブラナ科植物である *Capsella rubella* や *Eutrema salsugineum* では、コロナチンによる *CYP707A1* の発現誘導が起こらず、*Pto* による気孔開口に対して抵抗性を示すことを発見しました。この結果は、アブラナ科植物の進化の過程で生じた *CYP707A1* の発現制御様式の変化が細菌抵抗性を左右することを示唆しています。では、なぜシロイヌナズナには、病原体に利用される遺伝子発現制御の仕組みが存在しているのでしょうか？

この疑問に迫るために、*CYP707A1* の本来の調節因子が植物ホルモンのジャスモン酸であることに着目しました。ジャスモン酸によって制御される遺伝子群の発現は日周変動（一日の中で上下する変化）を示し、朝方に高くなることが報告されていました。ここから着想を得て、*CYP707A1* はジャスモン酸の働きで朝に発現が高まり、光に応じた気孔開口を促進するという仮説を立てました。実際、ジャスモン酸による *CYP707A1* の発現誘導が起こらないシロイヌナズナでは、朝光に応じた気孔開口が遅延し、ガス交換が低下することを見いだしました。朝光に応じた気孔開口の遅延は、*C. rubella* や *E. salsugineum* でも観察されました。さらに、シロイヌナズナおよび *E. salsugineum* を用いたプロモータースワップ実験^{注2)} により、朝の光に応じた素早い気孔開口が起こるかどうかは *CYP707A1* 遺伝子のプロモーターによって決まる事を証明しました。

以上により、病原細菌による気孔開口は、植物が朝に気孔を素早く開きガス交換を開始するための遺伝発現制御の仕組みを細菌側が転用することで生じることが示されました。加えて、アブラナ科の一部の植物種では、この遺伝子発現制御が起こらない代わりに細菌による気孔開口に対する抵抗性を発揮しており、「気孔を速やかに開く能力」と「病原体への抵抗性」の間に進化的トレードオフ^{注3)} が存在することが明らかになりました。この進化的トレードオフは、植物と病原体の 5 億年ともいわれる進化的競争の結果なのかもしれません。

3. 波及効果、今後の予定

病原体による作物の損失は甚大で、毎年 5 億人分以上の食料に相当するという試算もあります。植物病害防除は、食料の安定供給に加え、余剰な生産や輸送を減らすことで CO₂ 排出削減にも貢献する重要な社会課題です。

本研究の成果は、育種やゲノム編集（DNA 配列を狙って改変できる技術）を用いて *CYP707A1* 遺伝子のプロモーターを操作することで、気孔開口を制御する能力を植物に付与するための基礎となる知識です。

口モーターを改変し、病原細菌による気孔開口を阻止することで抵抗性を付与できる可能性を示しています。アブラナ科のいくつかの植物種が病原細菌による気孔開口に対して抵抗性を示すことからも、これは有望なアプローチだと言えるでしょう。

ただし、このアプローチは、光に応じて気孔を速やかに開く能力の喪失を伴うと考えられます。今後は、この能力の欠如が植物の生育や収量、環境適応にどの程度影響を与えるのか、また、生育環境の工夫によって補うことができるのかを明らかにする必要があります。さらに、植物が抱える進化的トレードオフを人為的に乗り越えるための研究を進めることで、「気孔を速やかに開く能力」と「病原体への抵抗性」の両方を備えた新しい植物の創出につながると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科研費若手研究(B)JP17K17802、同学術変革領域研究(B)「植物超個体の覚醒」JP21H05149 および JP21H05151、JST 革新的 GX 技術創出事業 (GteX) 「GX を駆動する微生物・植物「相互作用育種」の基盤構築」JPMJGX23B2、JSPS 科研費特別研究員奨励費 JP24KJ0131 などの助成を受けて行われました。

<用語解説>

注 1) *Pseudomonas syringae*

植物病原細菌の一種で、様々な作物に感染し病気を引き起こします。その被害額は年間 10 億ドルを超えるとの試算もあります。シロイヌナズナにも感染するため（図 1）、植物の抵抗性や細菌の病原性を研究する材料として世界中で広く用いられています。



図1. *P. syringae*に感染したシロイヌナズナが示す黄化症状

注 2) プロモータースワップ実験

遺伝子には「タンパク質をつくる部分」だけでなく、「その遺伝子がいつ、どの細胞で、どのくらい働くかを調節する部分」があります。この調節部分をプロモーターと呼びます。プロモーターは、遺伝子の「スイッチ」や「リモコン」のような役割を果たしています。

プロモータースワップ実験とは、ある遺伝子のプロモーター部分を入れ替えて、その遺伝子がどのように働き方を変えるかを調べる実験です。本研究では、シロイヌナズナと *E. salsugineum* の *CYP707A1* 遺伝子のプロモーターを入れ替え、病原細菌や光に対する気孔開口がどう変化するのかを調べました（図 2）。

プロモーター	タンパク質コード領域	光に応じた素早い気孔開口	病原細菌による気孔開口
シロイヌナズナ	シロイヌナズナ	○	○
<i>E. salsugineum</i>	シロイヌナズナ	×	×
シロイヌナズナ	<i>E. salsugineum</i>	○	○
<i>E. salsugineum</i>	<i>E. salsugineum</i>	×	×

図2. プロモータースワップ実験の方法と結果

注 3) トレードオフ

生物学でいうトレードオフとは、ある性質を高めると別の性質が損なわれる関係を指します。つまり、「一方を取れば、もう一方を犠牲にしなければならない」状況です。例えば、植物においては、病害抵抗性と生長速度はトレードオフの関係にあることがよく知られています。

<研究者のコメント>

本研究は、今から 10 年前、私がドイツ・マックスプランク研究所の津田先生（現 中国華中農業大学）の研究室に留学していた時に始めたものです。その後、私が日本に戻り、津田先生が中国に移られてからも共同研究を続け、大きな成果として発表することができました。植物と病原体の共進化に関する本研究を通じて、「他人と関わって生きること」の面白さとその難しさを学ばせていただきました。（峯彰）

<論文タイトルと著者>

タイトル：Evolutionary trade-off between stomatal defense and gas exchange in Brassicaceae（アブラナ科植物における気孔免疫とガス交換の進化的トレードオフ）

著 者：Wenshang Kang, Masahito Nakano, Kaori Fukumoto, Rikako Hirata, Pei Zhai, Yulin Du, Kunqi Hong, Jörg Ziegler, Yayoi Tsuda, Dieter Becker, Eiji Nambara, Ryohei Thomas Nakano, Shunsuke Miyashima, Akira Mine, Xiaowei Han, Kenichi Tsuda

掲 載 誌：*Current Biology* DOI：<https://doi.org/10.1016/j.cub.2025.10.037>