

植物の表皮細胞に存在する機能未知の小さな葉緑体の存在意義を解明 —表皮葉緑体は免疫因子を搭載して細胞内を移動し病原菌の侵入阻止に関与する—

概要

病害による世界の農業生産被害の70~80%は糸状菌（カビ・菌類）によって引き起こされています。これら植物病原糸状菌にとっては、植物の表皮細胞内に菌糸を侵入できるかどうか感染の可否に大きく影響します。そのため、植物の表皮細胞はこれら病原糸状菌の侵入を防ぐ重要なバリアとして機能する最初の砦です。興味深いことに、植物の表皮には、光合成にあまり関与しない小さな葉緑体が存在することが知られていました。しかし、何のために存在しているのか、どのような機能を担っているのかは不明でした。

信州大学学術研究院(農学系)の入枝泰樹 助教(文部科学省 卓越研究員)と京都大学大学院農学研究科の高野義孝 教授は、植物の表皮に存在する機能未知の小さな葉緑体が、病原糸状菌の攻撃に対して細胞内をダイナミックに表層側へと移動し、防御応答に関与することを発見しました。さらに、表皮葉緑体には植物の防御応答に関わる複数の免疫因子が特異的に集積し、病原糸状菌の侵入に対する抵抗性の強化に貢献していることを突き止めました。本研究を基盤に、外敵に対するバリアとして機能する植物表皮の葉緑体機能を増強・制御する技術を開発し、植物の免疫力を高めることで病害被害の軽減や生産性の向上につなげたいと考えています。

本研究成果は、2021年5月20日18時(日本時間)にOAの英国科学誌「Nature Communications」に掲載されました。

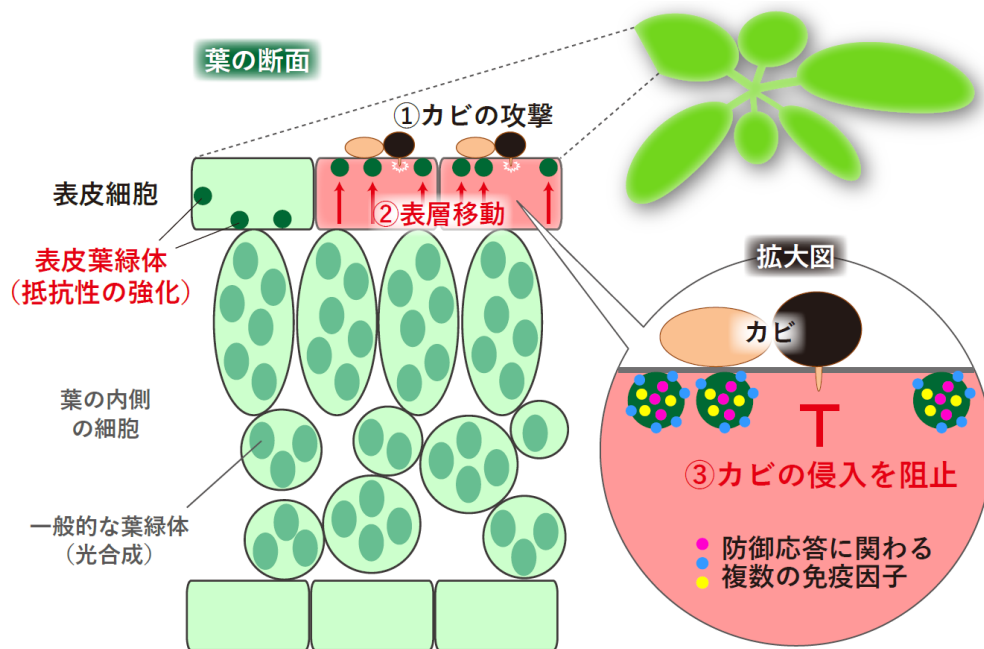


図. 植物の表皮葉緑体は病原糸状菌（カビ）の侵入に対する抵抗性の強化に関与する。カビの感染は植物表皮への侵入からスタートする。①カビの攻撃に応答して、②植物の表皮細胞に存在する小さな表皮葉緑体は細胞内を移動し、表層に出現する。③表皮葉緑体には複数の免疫因子が特異的に集積し、カビの侵入を阻止する抵抗性を強化している。

1. 背景

世界の農業生産被害の10~15%は病害が原因といわれており、これは約5億人の食糧に値します。そして、この植物病害の70~80%は、糸状菌（カビ・菌類）によって引き起こされるため、植物病原糸状菌から作物を保護することはとても重要な課題とされています。病原糸状菌が植物に感染するためには、植物の表皮細胞を突破して内部に侵入する必要があります。言い換えると、植物の表皮細胞は環境中の多くの病原糸状菌の攻撃を最初に食い止めるバリアとして機能しています。では、表皮細胞にはどのような防御機能が備わっているのでしょうか？

近年になり、植物の表皮細胞に、通常の葉緑体よりもサイズが小さい葉緑体（表皮葉緑体）の存在が認識されてきました。一般的な葉緑体とは葉の内側の細胞に多数存在するサイズの大きな葉緑体を指し、太陽エネルギーを利用して二酸化炭素と水から有機物と酸素を作り出す光合成を行っています。一方で、表皮葉緑体の内部は、光合成に関与する構造が未発達であり、その役割や存在意義は不明でした。

本研究グループは、植物病原糸状菌と植物の戦い（互いの生存戦略）を研究する中で、植物の表皮葉緑体が病原糸状菌に応答して表層側へ移動してくる興味深い現象を発見しました。しかし、本現象が何のために起こるのか、その理由は分かっていませんでした。表皮葉緑体の機能が未知であること、さらに植物の表皮は外敵に対するバリアとして機能することから、本研究では表層に移動する表皮葉緑体が病原菌に対する免疫に関与するのではないかと予想し、その機能解明に挑戦しました。

2. 研究手法・成果

本研究ではまず、表皮葉緑体がどのような病原糸状菌に応答するのか調べました。その結果、複数の病原糸状菌が表皮葉緑体の表層移動を引き起こすことを見出しました。また、興味深いことに、これらの病原糸状菌は表皮細胞への侵入を阻止されていることが分かりました（図1）。一方で、容易に侵入し感染できる、つまり、その植物を宿主とする特定の病原糸状菌に対しては、表皮葉緑体は表層側にあまり移動していないことから、侵入できない複数の病原糸状菌はこの表皮葉緑体の働きにより撃退されている可能性が考えられました。

次に、表皮葉緑体の表層移動に関与する植物のタンパク質を見つけ出すことに成功しました。遺伝子導入により、このタンパク質を過剰に生産する植物を作出したところ、病原糸状菌に対して表皮葉緑体が表層に移動しなくなりました。この表皮葉緑体が表層に移動しなくなった植物では病原糸状菌が表皮に侵入しやすくなることも分かりました（図2）。これらの結果は、表皮葉緑体の表層への移動が病原糸状菌の侵入を阻止する防御応答に関与していることを示しています。

さらに、表皮葉緑体には植物の免疫に関わる複数の因子が特異的に集積していることも明らかにしました。また、これら表皮葉緑体に集積するタイプの免疫因子が機能しなくなった変異体植物では、表皮葉緑体の表層への移動は確認できましたが、病原糸状菌の侵入率が上昇しました。

以上より、植物の防御戦略において表皮葉緑体が植物病原糸状菌の表皮侵入を阻止する重要な役割を果たしていることを明らかにし、これまで未知であった植物の表皮葉緑体の機能の一端を突き止めました。

3. 波及効果、今後の予定

今回、存在意義が不明であった植物の表皮葉緑体の機能の一つが、病原糸状菌の侵入を阻止する防御応答への関与であることを明らかにしました。表皮葉緑体の細胞内移動を抑制した植物では病原糸状菌の表皮侵入に対する免疫が低下しますが、この免疫低下は炭疽病菌やイネいもち病菌など複数の病原糸状菌に対して起こることから、広範な病原糸状菌の侵入に対する共通の免疫応答である可能性が考えられました。本成果を基盤として、病原糸状菌の攻撃を受けた際の表皮葉緑体の細胞内移動効率を上昇させるなど、表皮葉緑体の機能を増強・制御する技術を開発できれば、様々な病原糸状菌に抵抗性を示す免疫強化型植物の作出につながる可能性があると期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

本成果は文部科学省 科学技術人材育成費補助金 卓越研究員事業（入枝泰樹）、日本学術振興会(JSPS)科学研究費助成事業（植物における色素体の動態と病原菌応答に関する研究、15K18648、入枝泰樹；植物の微生物応答と葉緑体のダイナミクスに関する研究、18K05643、入枝泰樹；宿主侵入ステージにおいて高発現する炭疽病菌エフェクター群の研究、18H02204、高野義孝）および旭硝子財団研究助成（高野義孝）の支援を受けて行われました。

<研究者のコメント>

植物の表皮には光合成にあまり寄与していない小さな葉緑体がなぜ存在するのか？病原微生物の侵入に対抗するためのバリアである表皮細胞において、その存在意義はこれまで謎にまつまれていました。今回、表皮葉緑体の機能の一端を明らかにできたことは、植物が備える未知の機能を開拓し、作物生産に活用する上でとても重要な意味をもつと考えています。今後、病原微生物に対する表皮葉緑体の応答を制御することで、病害による被害の軽減や生産性の向上に資する作物保護技術の開発を目指します。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Epidermal chloroplasts are defense-related motile organelles equipped with plant immune components（植物の表皮に存在する葉緑体は免疫因子を搭載して防御応答に関与する移動型の細胞小器官である）

著者：Hiroki Irieda（責任著者） and Yoshitaka Takano

掲載誌：Nature Communications（ネイチャー・コミュニケーションズ）

DOI：10.1038/s41467-021-22977-5

<イメージ図>

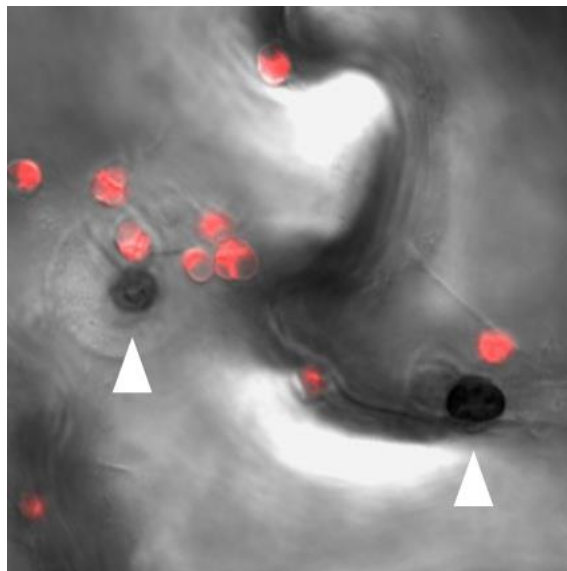


図 1. 植物病原糸状菌を接種した葉の表面の拡大写真。

植物の表皮葉緑体（自家蛍光：赤色）が植物病原糸状菌（カビ）に応答して表層側に出現した。

（カビの黒い侵入器官をやじりて示した）

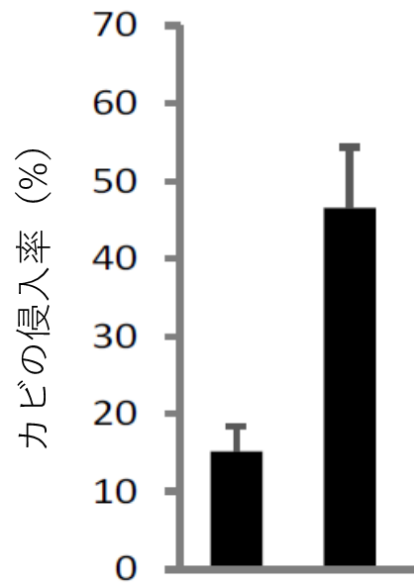


図2. 病原糸状菌（カビ）の表皮侵入能力。

健全な植物（左）と比べて表皮葉緑体の表層移動を抑制した植物（右）では、表皮へのカビの侵入率が上昇する。