

植物の根の栄養分の通り道を守るバリアをつくるホルモンを発見 －変動する土壤栄養環境への植物の適応のしくみ－

名古屋大学大学院理学研究科（研究科長：松本 邦弘）生命理学専攻の松林 嘉克（まつばやし よしかつ）教授と篠原 秀文（しのはら ひでふみ）助教らの研究グループは、植物の根において栄養分の通り道となる維管束（道管などが含まれる）を取り囲む疎水性のバリアであるカスパリー線の形成に必要なホルモン（Casprian strip Integrity Factor: CIF）を発見しました。

このホルモンが作れない植物では、カスパリー線に多数の穴があき、根から栄養分が漏れ出たり土壌から有害な成分が侵入したりするために、植物体が土壌成分の変動に耐えられず、正常に生育できないことが明らかとなりました。

これらの結果は、刻々と変動する土壤栄養環境への植物の適応のしくみを理解する上で重要な手がかりとなり、今後の農業分野への応用に期待されます。

この成果は、平成29年1月19日（木）午後2時（米国東部時間）に米国科学誌「Science（サイエンス）」で発表されました。

道管液中の鉄イオンの定量は、あいちシンクロトロン光センターの BL5S1 ビームラインを用いて行なわれました。

【研究の背景と内容】

植物は根から栄養分を吸収して成長しますが、土壌中には生育に必須なイオン成分のみならず、生育に害を与える成分も存在しています。またそれらの濃度は、環境によって大きく変動します。植物の細胞と細胞の隙間（細胞間隙）には、細胞壁が存在しますが、細胞壁はすべての物質を通すため、そのままでは細胞間隙を通過して組織の内部にまで各種イオン成分が侵入してきます。

今から約 150 年前の 1865 年に、Robert Caspary が発見したカスパリー線は、根の内側の内皮細胞の周囲に形成される疎水性の防水バリアで、細胞同士の隙間を完全に埋めることによって、栄養分の輸送に関わる道管と外界との間における分子の自由な行き来を防ぐ働きをしています（図 1）。カスパリー線がバリアとなるおかげで、変動する土壌環境の影響を受けることなく道管内に安定して栄養分を取り込むことができます。

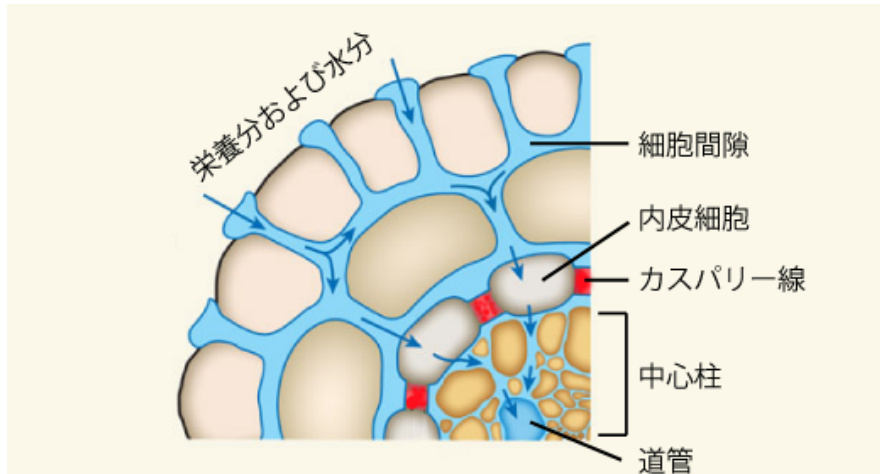


図1. 根の横断面とカスパリー線. 細胞間隙に入り込んだ栄養分や水分は, カスパリー線でブロックされるため, 内皮細胞が選択的にくみ上げる経路でのみ道管に入ることができる. (Nature 473, 294–295 (2011) より改変)

海外のグループのこれまでの研究により、内皮細胞の表面に発現している受容体タンパク質 GSO1/SGN3 が、カスパリー線の形成に必要であることが明らかとなりました。この受容体型タンパク質が属するファミリーには、ペプチドホルモンを認識するものが多いことから、カスパリー線の形成を制御する未知のペプチドホルモンの存在が示唆されていました。

本研究グループは、モデル植物であるシロイヌナズナのゲノム情報を利用して、ペプチドホルモンをコードする可能性の高い遺伝子群を選び出し、それらの機能を解析する研究を行なっています。また、多数存在する受容体タンパク質を個々に発現させたライブラリーを使って、ペプチドホルモンの受容体を迅速に見つけ出すシステムを確立しています。この研究過程で、本研究グループは、カスパリー線の形成に関わる受容体 GSO1/SGN3 とその類縁タンパク質 GSO2 に特異的に結合する 2 つのペプチドを発見しました (図 2)。

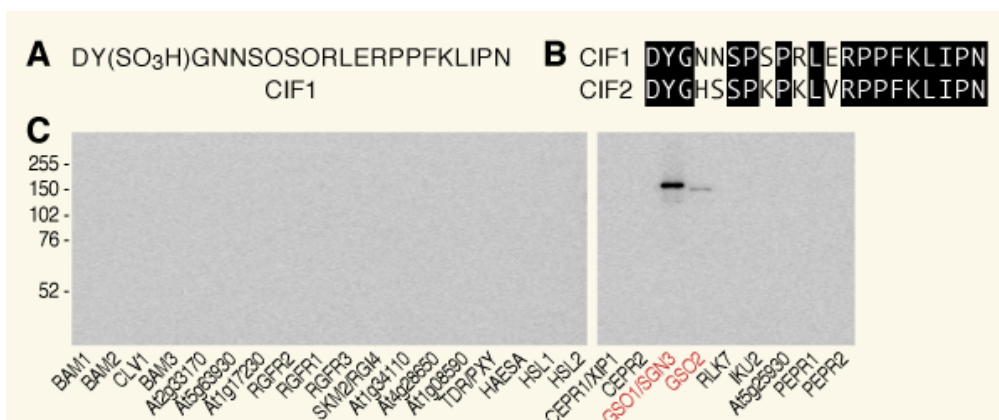


図2. CIF の構造と受容体. (A) CIF1 のアミノ酸配列. Y(SO₃H) は硫酸化チロシン, O はヒドロキシプロリンを示す. (B) CIF1 と CIF2 のアミノ酸配列の比較. (C) 受容体 GSO1/SGN3 とその類縁タンパク質 GSO2 への CIF1 の結合.

2つのペプチドは、アミノ酸配列が互いに非常に類似しており、ファミリーであると考えられます。これら2つのペプチドを欠損する植物では、カスパリー線が正しく形成されず多数の穴があくこと、また合成ペプチドを欠損株の根に与えると正常なカスパリー線が回復することなどから、これら2つのペプチドがカスパリー線形成の重要な制御因子であると結論づけ、Casparian strip Integrity Factor (CIF) と命名しました (図3)。

CIF1 と CIF2 は、カスパリー線がつくられる内皮細胞よりも内側の細胞層(中心柱)で発現しています。このことは、カスパリー線の形成が内側の細胞群から制御されていることを示しています (図4)。

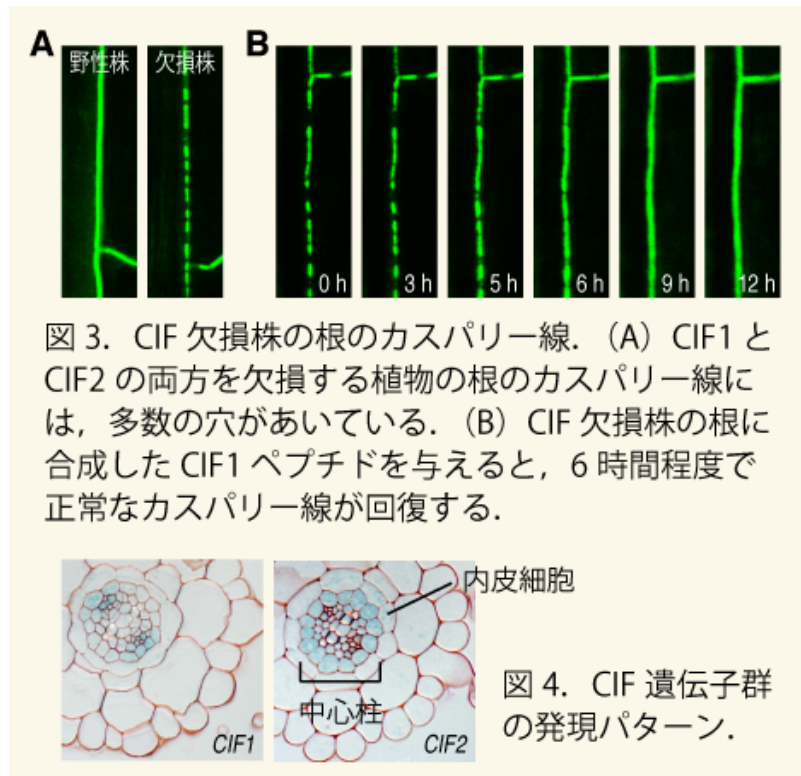


図3. CIF欠損株の根のカスパリー線. (A) CIF1とCIF2の両方を欠損する植物の根のカスパリー線には、多数の穴があいている. (B) CIF欠損株の根に合成したCIF1ペプチドを与えると、6時間程度で正常なカスパリー線が回復する.

図4. CIF遺伝子群の発現パターン.

さらに、本研究グループは、CIF1とCIF2を欠損する植物ではカスパリー線が機能せず、根から栄養分が漏れ出たり土壌から有害な成分が侵入するために、植物体が土壌成分の変動に耐えられず、正常に生育できないことを見出しました (図5)。例えば、過剰の鉄イオンは植物に有害ですが、通常はカスパリー線がブロックするため、道管内への流入は起こりません。しかし、CIFを欠損する植物では過剰の鉄イオンがそのまま道管内へ流入するため、植物が枯れてしまいました。また、植物にとって重要な栄養素のひとつであるカリウムイオンは、根が活発に吸い上げるため通常はかなりの高濃度で道管内に蓄積していますが、CIFを欠損する植物ではカリウムイオンが道管外へ漏れ出てしてしまい、植物の生育が悪くなりました。

これらの結果は、カスパリー線が根からの安定的な栄養吸収に大きな役割を担っていることを示しています。

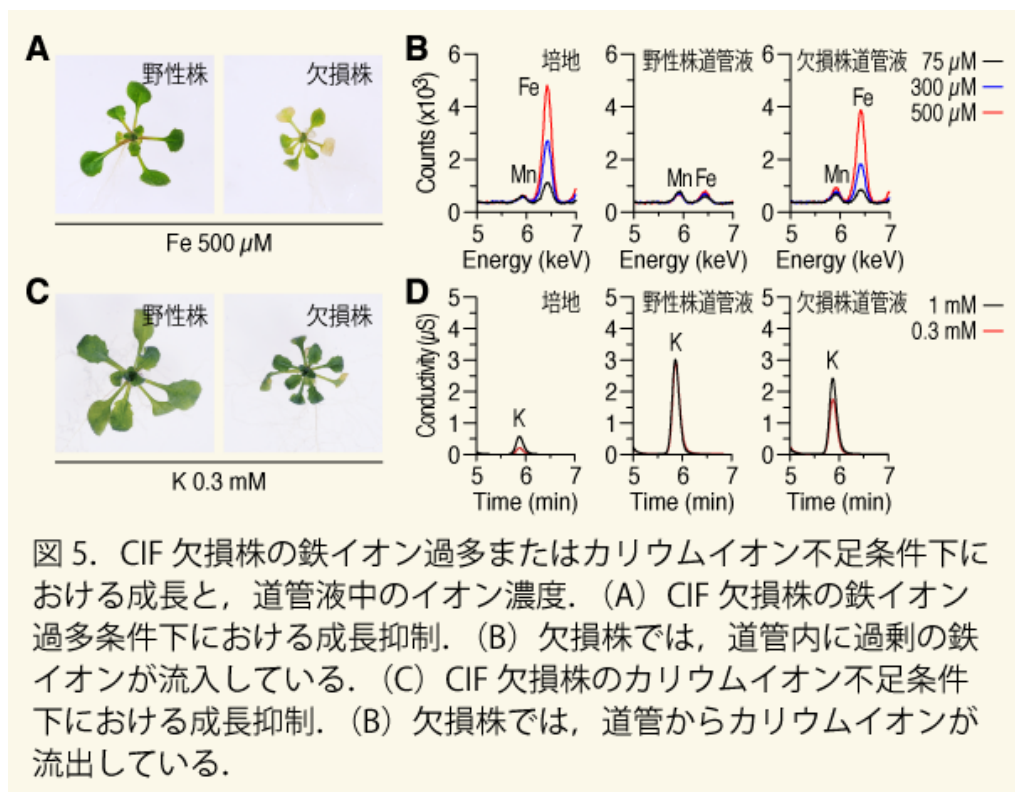


図 5. CIF 欠損株の鉄イオン過多またはカリウムイオン不足条件下における成長と、道管液中のイオン濃度. (A) CIF 欠損株の鉄イオン過多条件下における成長抑制. (B) 欠損株では、道管内に過剰の鉄イオンが流入している. (C) CIF 欠損株のカリウムイオン不足条件下における成長抑制. (D) 欠損株では、道管からカリウムイオンが流出している.

【成果の意義】

植物は動物のように動き回ることにはできませんが、変動する自然環境に巧みに適応するしくみを持っています。今回のペプチドホルモンの CIF の発見は、常に至適栄養条件とは限らない自然界で、植物が生き延びるための戦略の一端を解明したものとして、極めて大きな意義があります。また、カスパリー線は、植物の耐塩性と密接に関連していると考えられています。国土を海に囲まれた日本では、耕作地の塩害がしばしば問題になりますが、今回得られた知見はカスパリー線機能の人為的な改変を可能にするものであり、今後の農業分野への応用が期待されます。

【論文名】

A peptide hormone required for Casparian strip diffusion-barrier formation in *Arabidopsis* roots (シロイヌナズナの根における拡散障壁であるカスパリー線の形成に必要なペプチドホルモン)

Takuya Nakayama¹, Hidefumi Shinohara¹, Mina Tanaka, Koki Baba, Mari Ogawa-Ohnishi and Yoshikatsu Matsubayashi* (¹These authors contributed equally to this work)

中山拓弥、篠原秀文、田中美名、馬場江輝、小川大西真理、松林嘉克

DOI : 10.1126/science.aai9057

【研究費】

本研究は、科研費による支援を受けました。

科研費種別：基盤研究 (S)

課題名：翻訳後修飾ペプチドを介した植物形態形成の分子機構

研究代表者：松林嘉克

課題番号：25221105

科研費種別：新学術領域研究「植物の成長可塑性を支える環境認識と記憶の自律分散型統御システム」

課題名：長距離シグナリングを介した変動環境への適応機構

研究代表者：松林嘉克

課題番号：15H05957

科研費種別：新学術領域研究「植物発生ロジックの多元的開拓」

課題名：受容体ライブラリーを基盤とした植物リガンド-受容体ペアの探索

研究代表者：篠原秀文

課題番号：26113520 および 16H01234

科研費種別：若手研究（B）

課題名：根端メリステムの活性制御を行うペプチドホルモン RGF 受容体の探索

研究代表者：篠原秀文

課題番号：25840111