

平成30年11月5日
京都府立大学 生命環境科学研究科
九州大学
熊本大学

植物の根毛側面を硬くするしくみの解明に成功～根の毛はなぜまっすぐに伸びる？～

これまで根毛側面の伸長抑制メカニズムの分子機構は全く明らかになっていませんでしたが、この度、京都府立大学の平野朋子特任助教、佐藤雅彦准教授らの国際共同研究グループ*は、モデル植物シロイヌナズナを用いて、**根毛の微小管を制御し、側面の細胞壁を硬くすることで、根毛が細長く真っ直ぐ伸びながら、その形を維持する仕組みを解明しました。**

今後、この仕組みを活用して、側面強度を増強した根毛を持つ植物体を作成することで、**栄養源が乏しい土壤中から効率よく栄養を吸収できる植物体を開発できる可能性があります。**

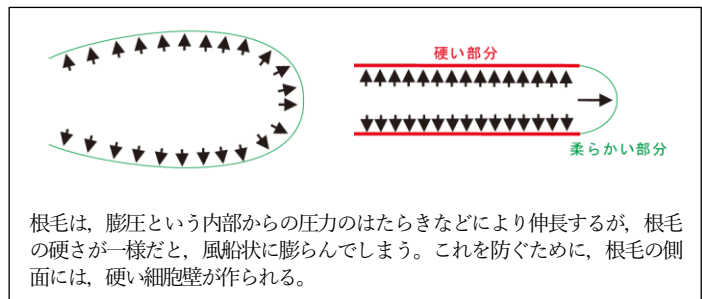
本研究成果は、**国際学術誌”Nature Plants”**（ネイチャー・プランツ）に11月2日午後4時(GMT)にオンライン掲載されました。

論文タイトル：**PI(3,5)P₂ mediates root hair shank hardening in Arabidopsis**

著者：Tomoko Hirano, Hiroki Konno, Seiji Takeda¹, Liam Dolan, Mariko Kato, Takashi Aoyama, Takumi Higaki, Hisako Takigawa-Imamura, and Masa H. Sato
doi.10.1038/s41477-018-0277-8

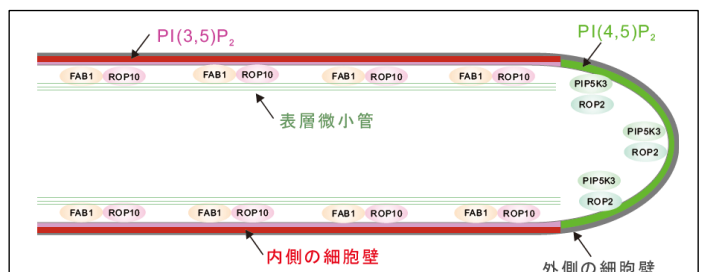
【研究概要】

植物の表皮細胞の一部が管状に外側に伸びた構造体である「根毛」は、根の表面積を大きくして土壤中の水や養分を吸収する役割があります。根毛の細長い管状構造を作るためには、先端部分が伸びると同時に根毛の側面部分の伸長を抑制しないと、風船上に膨らんで細長い管状構造を形成できません。また、土の抵抗に逆らって細長く伸びるためには側面の硬さが必要です。



今回、京都府立大学を中心とする国際共同研究グループは、モデル植物シロイヌナズナを用いて、

1. リン脂質の一種、ホスファチジルイノシトール 3,5-二リン酸[PI(3,5)P₂]を作る酵素である FAB1 と低分子量 GTPase ROP10 という分子が、根毛側面の細胞膜上で複合体を形成することで、根毛側面の細胞膜直下の表層微小管の構造を安定化すること、
2. さらに PI(3,5)P₂ が目印になり、細胞壁を硬くする成分を根毛側面の細胞壁に運ぶことで、根毛の細長く、真っ直ぐな構造を形成することを明らかにしました。



研究成果の概略図

シロイヌナズナ根毛側面の細胞膜上では、FAB1 が ROP10 と共同で、PI(3,5)P₂ を合成する。合成された根毛側面の PI(3,5)P₂ は、表層微小管の伸長と細胞側面の細胞壁を硬くする成分の分泌を制御することで、根毛の側面を硬くしている。

問 合 せ 先	京都府立大学	【取材】事務局企画課 075-703-5212	【研究】生命環境学部細胞動態学研究室 准教授 佐藤雅彦 TEL/FAX: 075-703-5448 E-mail: mhsato@kpu.ac.jp
	九州大学	広報室 (電話 092-802-2130)	
	熊本大学	国際先端科学技術研究機構 檜垣 匠 (電話 096-342-3975 e-mail thigaki@kumamoto-u.ac.jp)	

* 国際共同研究グループ

- ・京都府立大学大学院生命環境科学研究科 細胞動態学研究室

特任助教 平野朋子

准教授 佐藤雅彦

- ・京都府立大学大学院生命環境科学研究科 細胞工学研究室

准教授 武田征士

- ・金沢大学 ナノ生命科学研究所

准教授 紺野宏記

- ・京都大学化学研究所 生体分子情報研究室

助教 加藤真理子

教授 青山卓史

- ・九州大学大学院医学研究院系統解剖学分野

助教 今村寿子

- ・熊本大学 国際先端科学技術研究機構

准教授 檜垣匠

- ・オックスフォード大学植物科学部 (University of OXFORD Department of Plant Sciences)

教授 Liam Dolan

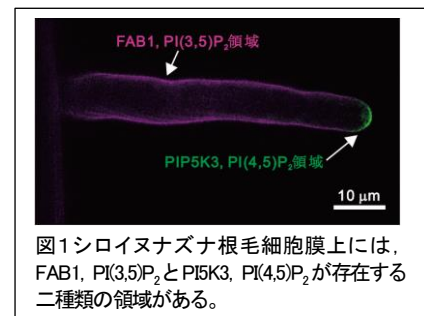
【研究の詳細】

研究の背景

植物の根には、根毛と呼ばれる表皮細胞の一部が管状に外側に伸びた構造体が密生しています。根毛には、根の表面積を大きくすることで、土壌中の水や養分を吸収する役割があります。根毛は、先端部分が特異的に伸長する先端成長という成長様式で伸びることが知られており、この根毛先端が伸びる仕組みについては、数多くの研究がありました。しかしながら、土壌中で根毛の細長い構造を作るためには、先端部分が伸びると同時に根毛の側面部分の伸長を抑制しながら、側面部分を硬くしないと、細長い管状の構造を作ることはできません。ところが、現在までに根毛側面の伸長抑制メカニズムの分子機構は全く明らかになってはいませんでした。

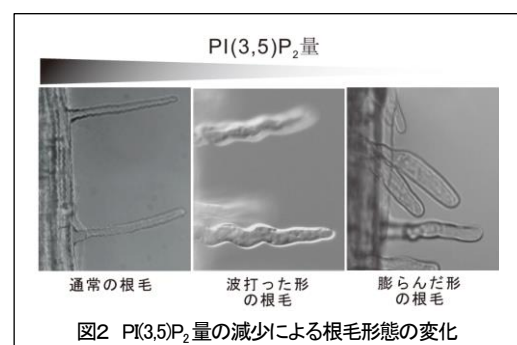
研究の成果

平野特任助教、佐藤准教授らの研究グループは、最初に、伸長中の根毛側面の細胞膜にホスファチジルイノシトール3リン酸5-キナーゼ、FAB1とその生成産物ホスファチジルイノシトール3,5二リン酸[PI(3,5)P₂]^{注1}が局在することを見出しました。青山教授、加藤助教らの先行研究により根毛の先端成長時の根毛先端には、ホスファチジルイノシトール4リン酸5-キナーゼ、PIP5K3とその生成産物ホスファチジルイノシトール4,5二リン酸[PI(4,5)P₂]^{注2}が存在することが明らかになっていたので、PI(3,5)P₂とPI(4,5)P₂を蛍光標識するマーカータンパク質を同時発現するシロイヌナズナ形質転換体を作成して両者の局在性を伸長中の根毛で同時観察したところ、PI(3,5)P₂は、根毛の側面に、そして、PI(4,5)P₂は、根毛の先端にそれぞれ分かれて存在することが明らかになりました(図1)。



このことは、伸長中の根毛の細胞膜にPI(3,5)P₂とPI(4,5)P₂で標識される明確に異なった領域が存在することを意味しています。

次に、根毛の側面に存在するPI(3,5)P₂が根毛の形づくりにどのように働いているかを、PI(3,5)P₂量を人為的に減少させることで調べました。その結果、寒天中で伸長させた根毛の形態は、PI(3,5)P₂量が低下するとともに、太く、波打った形態になり、最



最終的にはぷっくりと膨らんだような状態に変化しました (図2)。

PI(3,5)P₂量が低下した状態の根毛側面の機械的強度を平野特任助教、紺野准教授が原子間力顕微鏡^{注3}で直接測定したところ、通常の根毛の半分程度の硬さしかありませんでした (図3)。つぎに根毛側面の硬さが低下した原因を調べるために、平野特任助教、檜垣准教授が、根毛の形態形成に關与する表層微小管^{注4}の構造を調べたところ、その繊維状構造が極度に断片化していることが明らかになりました (図4)。

さらに、細胞壁に硬さを与えるはたらきのある二次細胞壁の成分であるキシラン^{注5}の存在量が PI(3,5)P₂量の低下に応じて、極度に減少することも明らかになりました (図5)。さらに Dolan 教授、武田准教授が、細胞骨格の制御に關わる低分子量 G タンパク質の一種である ROP(Rho-related GTPases from plants)ファミリータンパク質^{注6}の発現を調べたところ、ROP2 と ROP10 が根毛特異的に発現していることがわかりました。そこで、平野特任助教、佐藤准教授が、PIP5K3 と FAB1 との相互作用を調べたところ、PIP5K3 は ROP2 と FAB1

は ROP10 とそれぞれ特異的に相互作用していることがわかりました。これらの結果を踏まえて、今村助教が、

根毛側面の PI(3,5)P₂量が表層微小管の構築と細胞壁の硬さを制御しているという仮定を導入した数理モデルを構築し、計算機シミュレーションしたところ、「寒天の抵抗で根毛の伸長方向とは逆の力がかかると、PI(3,5)P₂量の低下により側面の硬さが低下した根毛は、側面の細胞壁に抵抗による応力とひずみが不均等に生じることによって根毛の側面が歪む座屈^{注7}と呼ばれる現象がおこる。つまり、PI(3,5)P₂量の低下がおこると、根毛が伸長方向にひしゃげることで根毛の波打つ形態が発生する。」ということが明らか

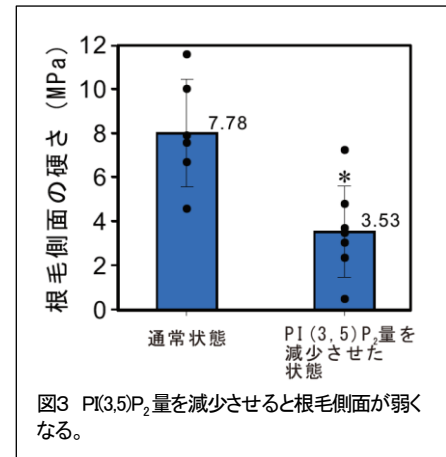


図3 PI(3,5)P₂量を減少させると根毛側面が弱くなる。

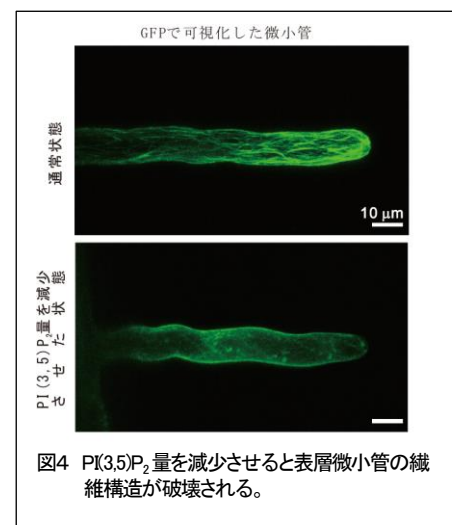


図4 PI(3,5)P₂量を減少させると表層微小管の繊維構造が破壊される。

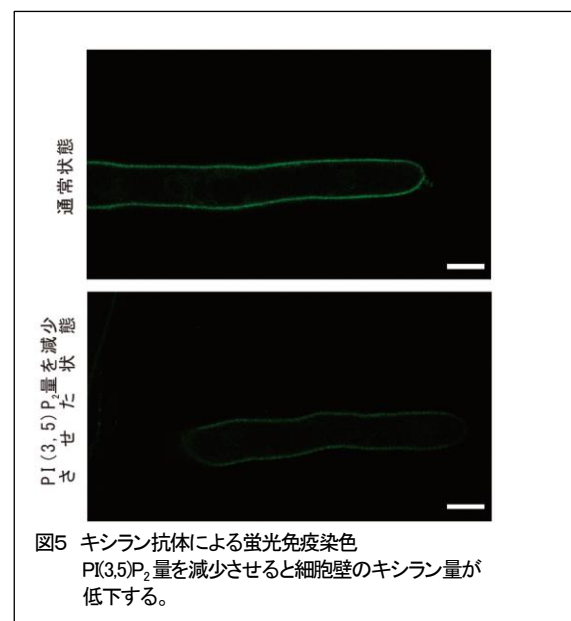
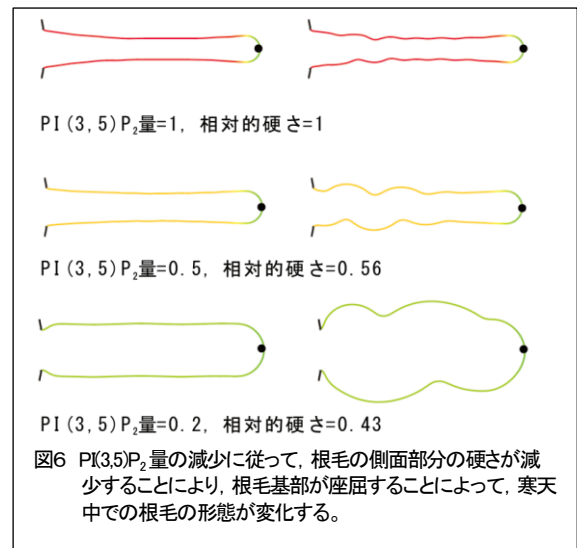


図5 キシラン抗体による蛍光免疫染色
PI(3,5)P₂量を減少させると細胞壁のキシラン量が低下する。

かとなりました (図 6)。これらの結果より、植物は、PI(3,5)P₂ の作用により、根毛側面を強固にすることで、土中などで根毛をまっすぐ伸ばすことができることがわかりました。

今後の展望

PI(3,5)P₂ 量を手動的に操作することにより、側面強度を増強した根毛を持つ植物体を作成することで、栄養源が乏しい土壌中から効率よく栄養を吸収できる植物体を開発できる可能性があります。



用語説明

注1：ホスファチジルイノシトール 3,5-二リン酸 [PI(3,5)P₂]

ホスファチジルイノシトールは、リン酸基にイノシトールが結合しているリン脂質の一種である。ホスファチジルイノシトールのイノシトール環の3位と5位の水酸基がリン酸化されたものが、ホスファチジルイノシトール 3,5-二リン酸 [PI(3,5)P₂]である。PI(3,5)P₂は、ホスファチジルイノシトール-3リン酸 5-キナーゼ、FAB1によりホスファチジルイノシトール 3-リン酸(PI3P)の5位の水酸基をリン酸化することで、合成される。

注2：ホスファチジルイノシトール 4,5-二リン酸

ホスファチジルイノシトールは、リン酸基にイノシトールが結合しているリン脂質の一種である。ホスファチジルイノシトールのイノシトール環の4位と5位の水酸基がリン酸化されたものが、ホスファチジルイノシトール 4,5-二リン酸 [PI(4,5)P₂]である。PI(4,5)P₂は、ホスファチジルイノシトール-4リン酸 5-キナーゼ、PIP5Kによりホスファチジルイノシトール 4-リン酸(PI4P)の5位の水酸基をリン酸化することで、合成される。

注3：原子間力顕微鏡 [Atomic Force Microscope (AFM)]

走査プローブ顕微鏡の一種であり、試料と探針の原子間に働く力を検出して、試料を走査することにより画像を得たり、試料の硬さを直接測定できる。

注4：表層微小管

微小管は、 α チューブリンと β チューブリンが構成単位となって形成される中空の繊維状構造であり、微小管の中でも、細胞分裂していない細胞の細胞膜直下に存在する微小管のことを表層微小管と呼ぶ。表層微小管は、ある特定の方向に配向することにより、細胞壁に付加されるセルロース微繊維の方向を制御することで、細胞の伸長方向を決定する役割がある。

注5：キシラン

β 1-4 結合したキシロースの主鎖に様々な側鎖が結合した分子式 (C₅H₈O₄)_n の構造を持つ多糖類である。植物の二次細胞壁に多く含まれる。

注6：ROP (Rho-related GTPases from plants) ファミリータンパク質

Ras スーパーファミリー低分子量 GTPase は、GTP 結合型と GDP 結合型の ROP が存在し、両者が相互変換することで、シ

グナル伝達など様々な細胞内制御機構の分子スイッチとして働く。ROP ファミリータンパク質は、Ras スーパーファミリーに属するタンパク質ファミリーで、主にアクチンや微小管などの細胞骨格の形成制御の分子スイッチとして機能している。

注7：座屈

圧縮力を受けた物体がその力の軸の横方向に折れ曲がること。

発表雑誌 Nature Plants ** doi.10.1038/s41477-018-0277-8

論文タイトル：PI(3,5)P₂ mediates root hair shank hardening in Arabidopsis

著者：Tomoko Hirano, Hiroki Konno, Seiji Takeda¹, Liam Dolan, Mariko Kato, Takashi Aoyama, Takumi Higaki, Hisako Takigawa-Imamura, and Masa H. Sato

研究サポート 本研究は科学研究費補助金、京都府立大学重点戦略研究などの支援のもとに行われました。