

植物の根の成長を支える新しいホルモンの発見 —根の幹細胞の維持に必要なペプチドシグナル—

【概要】

名古屋大学大学院生命農学研究科の松林嘉克准教授と松崎 曜（大学院生（平成 21 年度卒業））、小川-大西真理（研究員）、森 彩華（大学院生）らの研究グループは、植物の根の幹細胞の維持に関与し、根の成長に重要な役割を果たす新しいホルモンを発見し、2010 年 8 月 27 日発行の米科学誌サイエンスに発表する。植物の根は植物体を支え、土壌から栄養分を吸収するなど生命を維持するうえでの重要な機能があるが、新しいホルモンの発見により根の成長を調節できるようになれば、作物の効率的な育成につながるとして期待される。

植物の根の先端には、根の細胞をつくり出すもとになる幹細胞が存在する（図 1）。一般的に幹細胞（stem cell）の維持には、特別な細胞外環境（ニッチ、niche）が必要であると考えられており、これに関与する細胞外シグナルはニッチシグナルと呼ばれる。根の成長メカニズムは世界中で研究されているが、根の幹細胞の維持に関与するニッチシグナルについては、それが実際に存在するかどうかも含めて、全く分かっていなかった。今回の論文は、このニッチシグナルである可能性が高い分子の発見に関するものである。

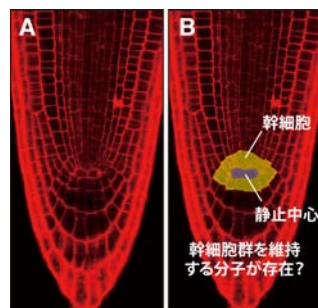


図 1 植物の根の構造。植物の根の先端部を蛍光色素で染色し、顕微鏡で観察した拡大写真（写真 A）。根の先端部には、細胞分裂をしない静止中心と呼ばれる細胞があり、それを取り囲むように幹細胞が存在する（写真 B）。

ホルモンの中には、ペプチドと呼ばれる小さいタンパク質からなるタイプがあり、ペプチドホルモンと呼ばれている。ペプチドホルモンの一部では、翻訳後修飾と呼ばれるアミノ酸の修飾が、ホルモンとしての働きに必須であることが知られており、チロシンの硫酸化もそのひとつである。松林准教授らは、これまでにチロシン硫酸化に関わる酵素の同定に成功していたが、チロシン硫酸化酵素を破壊した植物では極端に根の成長が抑えられ、短くなることに注目した（図 2A-C）。チロシン硫酸化酵素を破壊した植物では、チロシンが硫酸化されたホルモンが全く作られなくなるため、この特徴的な根の形態は、チロシンが硫酸化されたペプチドホルモンが根の成長に必要なことを強く示唆しているからである。

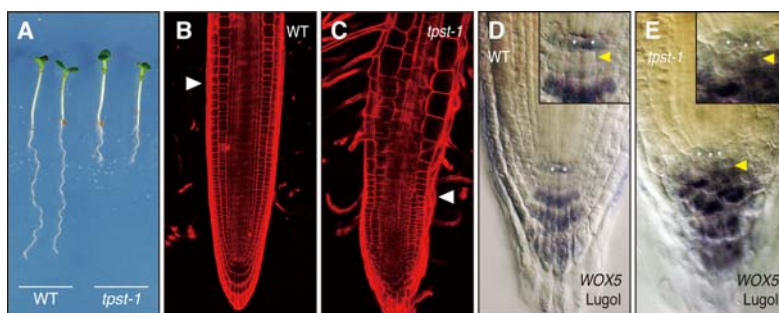


図 2 チロシン硫酸化酵素を破壊した植物の形態。野生型（WT）に比較して破壊株（*tpst-1*）では根が極端に短くなる（写真 A）。根端を拡大すると、野生型に比較して破壊株では細胞分裂の盛んなメリステム領域（白色矢印より下の部分）が小さくなっている（写真 B, C）。また、根の幹細胞（黄色矢印）が、破壊株では紫褐色に染色したコルメラ細胞に分化してしまい、失われている（写真 D, E）。

詳細な解析の結果、チロシン硫酸化酵素を破壊した植物では、根の先端に存在する幹細胞が維持されなくなって根端の細胞分裂活性が顕著に低下するために、根の成長が著しく抑え

られていることが明らかになった (図 2D-E). また, 既に知られている 2 種類のアミノチロシン硫酸化ペプチドホルモン (PSK と PSY1) を培養液に加えても, 根の成長は回復しなかったことから, まだ見つかっていない未知のアミノチロシン硫酸化ペプチドホルモンが根の幹細胞維持に関与することが示された.

そこで, 松林准教授らは, モデル植物として既にゲノム配列が解読されているシロイヌナズナの全遺伝子の中から, 配列上の特徴を手がかりにしてアミノチロシン硫酸化ペプチドをコードする可能性が高い遺伝子を選び出し, 遺伝子産物がアミノチロシン硫酸化ペプチドであることを実験的に確かめた上で, 化学的に合成した硫酸化ペプチドをアミノチロシン硫酸化酵素を破壊した植物に与えるという戦略で, 新しいペプチドホルモンの探索を行なった. その結果, これまで知られていなかった新しい硫酸化ペプチド群が, 根の幹細胞の維持および根端における細胞分裂に関与していることを突き止め, root meristem growth factor (RGF) と命名した (図 3). RGF は 13 個のアミノ酸がつながった構造をしている.

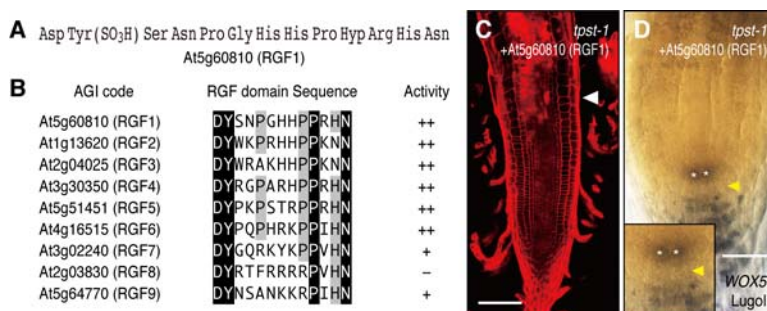


図 3 RGF の構造と活性. RGF1 のアミノ酸配列 (A). RGF ファミリーのペプチド群の構造と活性 (B). アミノチロシン硫酸化酵素を破壊した植物の根に RGF1 を与えると, 細胞分裂が活性化され, メリステム領域 (白色矢印より下の部分) が拡大する (写真 C). また, RGF1 を与えると, 根の幹細胞 (黄色矢印) が回復する (写真 D).

RGF ペプチド遺伝子群は, 根端の静止中心と呼ばれる数個の細胞, およびその下側に存在するコルメラ幹細胞と最内層のコルメラ細胞などで強く発現していた (図 4A-D). また, 細胞外に分泌された RGF は, 根の幹細胞領域を中心に拡散分布していた (図 4E).

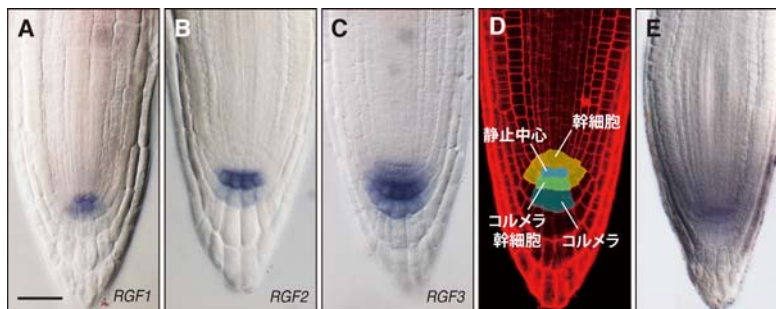


図 4 RGF の発現部位. RGF1 遺伝子は, 根端の静止中心と呼ばれる数個の細胞, およびその下側に存在するコルメラ幹細胞 (写真 A) で, RGF2 および RGF3 遺伝子は, コルメラ幹細胞と最内層のコルメラ細胞などで強く発現している (写真 B-D). 抗体を用いてペプチドの分布を可視化すると, 根の幹細胞領域を中心に拡散分布している様子が観察された (写真 E).

さらに解析を続けた結果, RGF は根の幹細胞の維持および根端における細胞分裂を制御する転写因子 (多数の遺伝子群の発現調節を行なうマスター遺伝子) である PLETHORA の発現を調節していることも明らかになった (図 5). 実際, PLETHORA の遺伝子を破壊した植物の根では, RGF は活性を示さなかった. PLETHORA の発現レベルが高いところでは幹細胞が維持され, 中程度の領域では細胞分裂が活性化され, さらに発現レベルが下がるにしたがって細胞分化が促進されることが知られている. 松林准教授らは, 根端における RGF の拡散分布のパターンが, PLETHORA の発現パターンとよく一致することから, 細胞外に分泌された RGF が PLETHORA の発現調節を介して根の幹細胞の維持や成長を制御していると考えている.

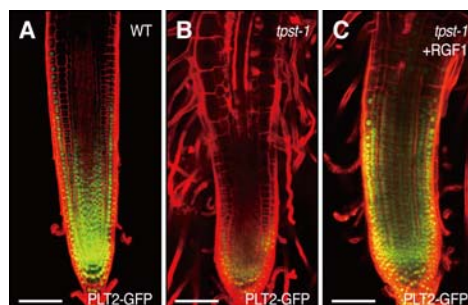


図 5 RGF は転写因子である PLETHORA (PLT) の発現を活性化する. 野生株では PLT は根端から基部にかけてなだらかに発現している (写真 A の緑色の蛍光). アミノチロシン硫酸化酵素を破壊した植物の根では PLT の発現は顕著に低下しているが (写真 B), 培地に RGF を加えると 24 時間以内に発現が回復する (写真 C).