



根から、第二の緑の革命が始まる

An underground revolution

VIRGINIA GEWIN 2010年7月29日号 Vol. 466 (552-553)

これまでの農業研究では、根はほとんど無視されてきた。しかし、環境にダメージを与えずに収量を増やすという目標に向けて、特に植物育種の分野で、根の重要性が注目され始めている。

根は、地面の下でこんがらがって、泥だらけになって埋もれているため、研究対象としてはたいへんなシロモノだ。根を掘り出すには時間がかかり、時には骨の折れる作業となる。根の繊細な分岐パターンや根毛、さらには根に付着した微生物を損なわないよう、シャベルで慎重に掘り進めなければならない。こうした現実ゆえに、これまでの農業研究では根はほとんど顧みられず、見過ごされてきた。しかし、多くの科学者が今、生産性の優れた作物を作り出すカギとして、根をとらえ始めている。めざすは「緑の革命」を超えることだ。

1940年代に始まったその徹底的な研究開発の時代には、高収量作物品種の開発、および農薬、肥料、大量の水の使用により、急激な食糧増産が進められた。しかし、その増産によって地下水が枯渇し、1998年には窒素肥料使用量が8倍に増加して¹、水系汚染などの環境問題

が発生した。収量が飛躍的に増加した一方で、飢餓に苦しむ人々はなお多数存在している。そして、土壌がやせた国々、灌漑システムが利用できない国々、高価な肥料が買えない国々など、多くの開発途上国が緑の革命から取り残された。ペンシルベニア州立大学（米国ユニバーシティパーク）の植物栄養学者であるJonathan Lynchは、「こうした過去の戦略は、現在の増え続ける食糧需要を満たすには役立ちません」と話す。

「根こそが、高コストなインプットに依存しない『第二の緑の革命』のカギを握っています」とLynch。根は、植物が必要とする最も重要な「水」と「栄養素」を運ぶが、この2つの要素は、十分得られないことが多いのだ。だから根の能力を高めることができれば、既にそこにあるものが利用でき、それによって「耕作限界地」を生産性の高い土地に変えることもできるはずだ。そうした可能性が

あるのに、水や肥料を次々に与え続ける必要があろうはずがない、とLynchらは考える。

明らかに、改善の余地がある。植物育種では、茎ではなく穀粒の生産に多くのエネルギーを投入する矮性品種の開発など、「地上」形質の操作によって多大な進歩が既に達成されている。しかし、根の形質に関しては、ほとんど手が付けられていない。「そこに収量を向上させる可能性が残されているのです。根に仕掛けられたさまざまな遺伝的変異が見過ごされてきました」とLynchは話す。ここでは、根を通じた食糧増産に関する有望な先進的事例を4つ紹介しよう。

特製の根

根は、その構造が環境に合わせて作られたときに、最も効率よく働く。深い根は乾いた土壌の下から水を吸い上げる能力をもち、また細かな浅い根は、土壌の表

層にとどまっている限られた栄養素を取り込むことができる。

オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO; キャンベラ) の植物生物学者である Michelle Watt は、乾燥しやすい地域に適したコムギ品種の開発に携わっている。最近のコムギ系統の研究で、Watt の研究チームは、一部の系統の根がほかの系統よりも 25 パーセント深く伸びていくことを発見した²。研究チームは、この系統を一般的な栽培品種と交配して、新しいコムギを 400 系統作り出し、現在インドとオーストラリアで圃場試験を進めている。

Watt は新しい遺伝子ツールも利用している。しかし、170 億塩基対のパンコムギゲノムを使っているわけではない。研究チームが使っているのは、コムギと同じ亜科に属する温帯性のイネ科植物で、今年の前半にゲノム配列が解読されたミナトカモジグサ (*Brachypodium distachyon*) のゲノムだ。この小さなゲノム (2 億 7100 万塩基対) を用いて、深い根と関係する遺伝子マーカーを探索しているのだ。そうしたマーカーを利用できれば、種から育てた植物を掘り出して根の長さを測るといったたいへんな作業をせずに、どのコムギ品種の根が深くまで伸びそうか、種子の段階で明らかにできるのではないかと期待している。

ペンシルベニア州立大学では、Lynch が興味深い形質を発見している³。根の組織に細胞間の通気空隙を大量に作るトウモロコシ系統が、その能力をもたない系統と比べて、水の少ない場合に 8 倍の収量をあげるのだ。ストレスが加わると、根に取り込む空気量を増やすことで、新たな根の組織を作る代謝コストを抑え、浮かせたエネルギーを穀粒の成長に回すのではないかと Lynch は語る。この形質が今後の育種研究にどれだけ役立つのかについては、Lynch にはまだ確信がない。

Lynch によれば、根の構造に関する研究はまだ始まったばかりだという。「いってみれば、今は個々の文字を分析

しているような段階で、ここから始めて、いずれはシェイクスピア演劇の内容まで予測したいわけです。予測できない根の構造から新しい特性が現れてくることもあるはずですよ」。

目に見えない掃除屋

根は栄養素を探す。そこで、それを助ける方法を探している研究者もいる。具体的には、土壌から栄養素を遊離させたり、毒素を中和したりする能力を高めようというのだ。

ブラジル中央部の「セラード」とよばれる草原では、大部分の土壌の酸性度が高いため、アルミニウムが水に溶けて植物の根に害を及ぼす。ところが一部の作物品種は、その害から身を守ることができる。根の先から放出する有機酸がアルミニウムイオンを化学的に不活性化するからだ。

2007 年、コーネル大学 (米国ニューヨーク州イサカ) の植物遺伝学者である Leon Kochian の研究チームは、セラードのモロコシ品種について、アルミニウム耐性のもとアルミニウム感受性のもとを比較して、アルミニウム耐性をもたらす遺伝子を見つけたと発表した⁴。研究チームは現在、さらに優れた変異体や別のアルミニウム耐性遺伝子を求めており、モロコシや他の作物の地域品種を選別できるような遺伝子マーカーの探索を進めている。Kochian によれば、ブラジルでの最初の野外研究では、アルミニウム耐性をもたらす遺伝的変異を備えた系統は、酸性土壌で生育させた場合、ほかの品種よりも収量が約 3 分の 1 高かったという。

アデレード大学 (オーストラリア) の植物生物学者である Trevor Garnett は、農業バイオテクノロジー企業のアルカディア・バイオサイエンシーズ社 (米国カリフォルニア州デービス) と共同で、根による土壌からの窒素取り込み効率を高める方法を実用化しようとしている。それは、窒素を含むアミノ酸「アラニン」の合成に関与する遺伝子の過剰発現



を利用する方法だ。Garnettは、「現在は、肥料として投入した窒素の40～50パーセントしか植物体には取り込まれていません。これはとんでもないことです」と話す。利用されなかった窒素は、むだになるばかりでなく、湖沼や河川を汚染するからだ。「環境に流出してしまう前に窒素をすばやく取り込んで保存し、後々の成長で必要になったときに利用するような、貪欲な植物が欲しいですね」とGarnettは語る。

微生物の操作

別の研究チームは、^{こんけん}根圏（根を取り巻く狭い範囲の土壌）で増殖する微生物を利用して、作物収量を高めようとしている。ただし、まだ初期段階でしかない。例えば、カビと戦う新たな遺伝子を微生物に導入したり、新たな微生物を正体不明の微生物群集に投入したりすることが実行可能なのかどうか、まだ明らかになっていない。

ローザンヌ大学（スイス）の生態学者であるIan Sandersは、ある有望な方法を最近発見した。Sandersの研究材料である*Glomus intraradices*は、一般に植物から炭素をもらって植物にリン酸などの無機栄養素を供給している相利共生菌だ。2010年6月、Sandersは、*G. intraradices* 個体の交配で新たな核の組み合わせをもつ子孫が出現し、その一部を温室育ちのイネに与えるとイネの生育が5倍になることを明らかにした⁵。現在、なぜそうなるのか調べている最中だ。Sandersは、この技術がリン欠乏土壌での収量維持に役立つのではないかと考えている。

微生物の中には、抑えなければいけないものもある。ワシントン州立大学（米国プルマン）の植物育種学者Kim Kidwellは、*Rhizoctonia* というカビが原因の根腐れ病に抵抗性をもつ植物を探索している。彼はエチルメタンスルホネートという物質を使ってコムギの変異体を作り出した。変異体50万個から選別することにより、根腐れ病に非常に高



根の成長が盛んなコムギ系統(右)を使って、高収量性の試験が行われている。

い耐性をもつ系統が発見された。「前途は洋々です」とKidwellは語るが、研究チームは、その原因遺伝子の同定に手間取っている。また、それが子孫に受け継がれていることを確認する遺伝子マーカーがなければ、その形質をもつ植物体を大規模に選別するのは難しい。さらに、根腐れ抵抗性遺伝子は、たとえ見つかったとしても、野外の条件で同じような結果を生み出すかどうか、確信はもてないという。「環境の役割は非常に大きいので、野外で必ずその形質が現れるとは限らないのです」とKidwellはいう。

窒素の固定

コムギやトウモロコシ、イネなどの穀類の遺伝子を組み換えて自前で窒素を供給させようという考え方は、何十年も失敗し続けているにもかかわらず、今後も消え去ることはないだろう。窒素を土壌から吸収する代わりに、大気中から「固定」できるようになれば、環境を破壊する高価な肥料は、減少または消滅するだろう。しかし、その能力を始めからもっているレンズマメやダイズのようなマメ科植物を模倣するには、*Rhizobium* などの窒素固定微生物との複雑な共生的相互作用を植物体内に構築する必要がある。そのため、多くの研究は、植物に根粒(*Rhizobium* が棲む根の無酸素的なこぶ)

を形成させることに集中してきた。

1990年代前半、根粒形成因子Nodの同定が次々に発表された。このNodはシグナル伝達分子であり、微生物がこれを土壌中に出して、マメ科植物に根粒形成を開始させている。このNod因子の受容体をほかの作物に導入する取り組みは、これまでのところうまくいっていない。新しい知見として、ある種の窒素固定共生細菌*Bradyrhizobium*がnod遺伝子をもっていないことがわかり、窒素固定遺伝子がほかにも存在することが示されている。ノッティンガム大学（英国）の植物生理学者で、作物窒素固定センターの所長を務めるEdward Cockingは、「もはや根粒形成はそれほど重要ではなく、ただ植物細胞内に窒素固定細菌を定着させることのほうが、大事なのです」と話す。

何らかの窒素固定遺伝子を非マメ科植物に導入することが、農業科学の重大目標の1つだと考える研究者は多い。フロリダ大学（米国ゲインズビル）で微生物学・細胞科学科長を務めるEric Triplettは、「10年以上かかることになる研究に取り組む勇気と資源をもったチーム」が必要だろうと話す。

スコットランド作物研究所（英国ダンディー）を率いるPeter Gregoryは、「これまで40年間の研究では、根は全く顧みられませんでした。しかし、非効率的な栄養素の投入によって経済的・環境的な帰結がどうなるのか、もはや明らかです。そうした損害を回避できる唯一の方法が、根をもっとよく知ることなのです」と話している。

（翻訳：小林盛方）

Virginia Gewinは、米国オレゴン州ポートランドに拠点を置くフリーランスのライター。

1. Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. & Polasky, S. *Nature* **418**, 671-677 (2002).
2. Kirkegaard, J. A., Lilley, J. M., Howe, G. N. & Graham, J. M. *Aust. J. Agric. Res.* **58**, 303-315 (2007).
3. Zhu, J., Brown, K. M. & Lynch, J. P. *Plant Cell Environ.* **33**, 740-749 (2009).
4. Magalhaes, J. V. et al. *Nature Genet.* **39**, 1156-1161 (2007).
5. Angelard, C., Colard, A., Niculita-Hirzel, H., Croll, D. & Sanders, I. R. *Curr. Biol.* **20**, 1216-1221 (2010).

社説（32ページ）およびオンライン特集（www.nature.com/food）もご参照ください。