

植物に共生する菌根菌でリン肥料を減らす

植物の根に入り込み、共生関係を築くアーバスキュラー菌根菌 (AM菌)。その役割は、土壤中に菌糸を張り巡らしてリンなどの栄養分を吸収し、宿主作物に供給することである。世界的にリン鉱石の枯渇が懸念される中、この機能を応用した技術を開発することで、リン肥料の使用量を削減できないか。そんな目的を持ったプロジェクトが、自然科学研究機構基礎生物学研究所の川口正代司教授とJSTの齋藤雅典ACCELプログラムマネージャーとの二人三脚で進んでいる。



アーバスキュラー菌根菌で植物の生長を促進

人口増加に伴い食料増産が求められる中、収量を増やそうと過剰に使用されたリン肥料による環境汚染が深刻な問題となっている。また、材料となるリン鉱石も枯渇しつつあり、食料生産を維持しつつ、リンの使用量を削減することが求められている。この問題の解決に、植物と共生するアーバスキュラー菌根菌 (AM菌、P7下「こぼ」参照) を利用しようと考えたのが、自然科学研究機構基礎生物学研究所の川口正代司教授とJSTの齋藤雅典ACCELプログラムマネージャーだ。AM菌は植物の根にすみ着き、土壤中のリンなどの栄養分を吸収し、宿主植物に受け渡す。この性質を作物の生長促進に利用する技術の開発を目指している。川口さんが研究代表者として研究面でプロジェクトをけん引し、齋藤さんは農学、土壌学の知識と経験を駆使して事業化への道を切り開く役割を担う。

「AM菌を与えることで植物が効率よくリンを取り込めれば、リン肥料の量を減らせるはず。そのために、AM菌

の単独培養技術とそれを利用する診断技術の開発を目指しています。優れたAM菌を安価に簡便に培養する技術と共に、農地の状態からどのように作物に与えれば高い効果をえられるかを、医者が病気を診断して薬を処方するような技術も作っていきたいですね」。基礎研究の農業生産現場への還元を目指す齋藤さんは意気込みをこう語る。

実用化の鍵は培養技術と効果の診断技術

人為的に単独培養するというが、これは常識をひっくり返す挑戦的な試みだ。なぜなら、AM菌は植物に共生しないと増殖できないという性質を持つ絶対共生菌だからだ (図1)。

AM菌の効果として、作物の根に共生し、根張りを良くして養水分の吸収力を高める他、リン酸を効率よく作物に供給しミネラル欠乏症の改善が期待できる。また乾燥や土壌障害などに対する抵抗力を高めて、健康な苗の育成に役立つとされる。こうした効果を狙い、既にAM菌を使った土壌改良剤が市販されているが、単独培養ではなく、植物と

の共生状態で培養した菌を材料としている。この方法では菌の培養に手間も時間もかかるため、価格はどうしても高くなる。齋藤さんは「通常の栽培で使用される肥料や農業より高価です。もっと低コストで提供するには、単独培養の技術が必要だ」と話す。

もう一つの壁は、AM菌が働く環境条件がはっきりとはわかっていないことだ。農業や肥料のように、過去の栽培履歴や土壌分析の結果、病虫害などを踏まえて、どのように使えばいいのかわからない。そこで、まずは農地や作物の状態に基づき、効果の有無を診断する技術の確立が不可欠だ。「将来は、土壌の状態を診断した上で、適切にAM菌をまき、栽培作物に最適な環境を整える技術として普及させたいですね」と齋藤さんは意気込む。

AM菌は、植物の根から分泌される共生シグナル物質「ストリゴラクトン」により宿主を認識する。共同研究している、大阪府立大学の研究チームが過去に突き止めた物質だ。こうした過去の知見に加え、新たな研究成果と栽培試験を組み合わせながら、最適なAM菌の利用技術の開発を目指している。

プロジェクトを構成するのは、3つのグループだ。1つ目はAM菌のゲノムを解析し、単独培養を試みる。2つ目は、遺伝子マーカーによって菌の集団 (菌叢) を構成する菌種を解析し、接種した菌がどのぐらい根に入っているかを調べる。3つ目は、農研機構などの試験研究機関で市販されているAM菌の土壌改良剤で栽培試験をする。

生存に必要な栄養素の合成遺伝子が欠損

このうち最大の難関といえるのは単独培養である。これを成功させるには、AM菌が絶対共生の性質を持つ謎に迫らなければならない。そこで比較的長い塩基配列も効率的に読み解ける次世代シーケンサーを用いて、AM菌の代表格である *Rhizophagus irregularis* (ライゾファガス・イレギュラリス) のゲノムを高精度に解読した。

その結果、AM菌には、生存に必須な栄養素である脂肪酸やビタミンB1 (チアミン) などの合成に関わる遺伝子が欠損していることが明らかになった (図2)。研究者の間では、AM菌は単独で生きるための能力を失っているだろうと考えられてきたが、それを証明したかたちだ。同時に、多糖類をエネルギー源として利用可能なブドウ糖に分解する酵素も、ほとんど失っていることを突き止めた。

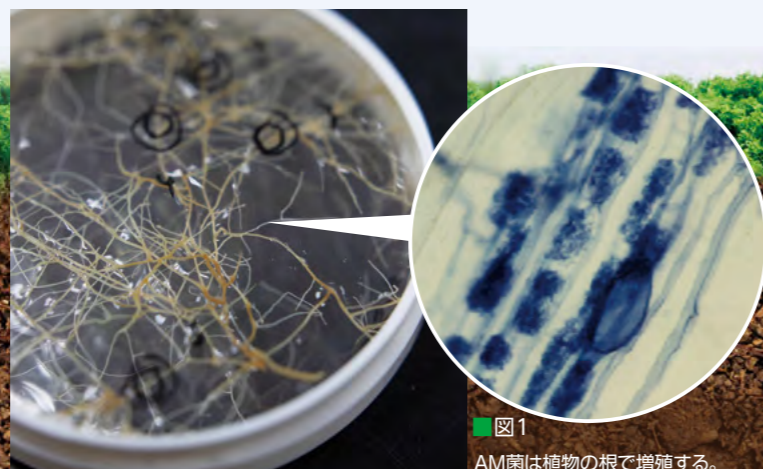
「生物が増殖するに当たっては、生体エネルギーのATPを作る脂肪酸代謝や糖代謝がとても重要です。AM菌は脂肪酸やビタミンB1、ブドウ糖といった生存に必要な物質を宿主植物に頼りきっています。このため、宿主植物からこれらの物質をもらえなければ、生きていけないだろうと考えています」。

こう語る川口さんは、こういった栄養素をAM菌に与えることで、単独培養が可能になるのではと考え、研究に取り組んでいる。

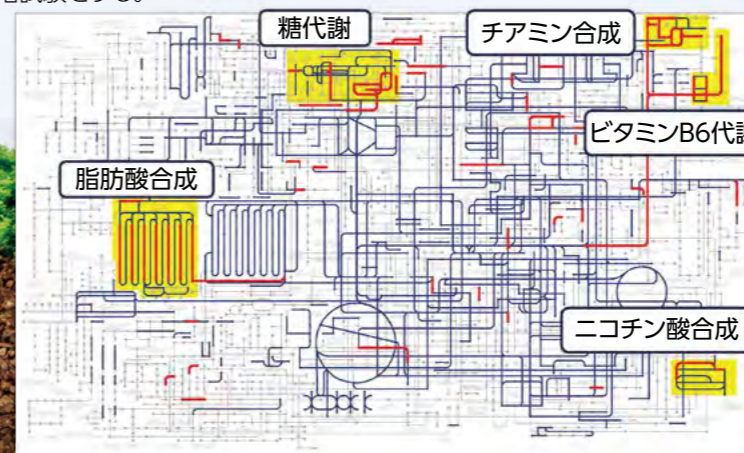
ゲノム解析からわかったリボソームDNA遺伝子の多様化

今回のゲノム解析では従来の常識を覆すもう一つの事実がわかった。それはAM菌が1菌体当たり10タイプものリボソームDNA遺伝子を持つことだという。

リボソームとはたんぱく質の合成に重要な役割を果たす、RNAとたんぱく質の複合体だ。このRNAの鋳型となる



■ 図1 AM菌は植物の根で増殖する。青色に染色されている部分が、菌体と菌糸。



■ 図2 ゲノム解析から明らかになった代謝マップ。普通の菌類が保持している代謝経路を青線です。図中の赤線、黄色で示した経路は、AM菌で失われている代謝経路。生存に必要なビタミン (チアミン) の合成や糖代謝などを失っていることがわかる。

かわくち まさよし 川口 正代司

自然科学研究機構 基礎生物学研究所 教授
1992年 東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。理学博士。1993年 東京大学教養学部助手、2001年新潟大学理学部助教授、03年 東京大学大学院理学系研究科助教授を経て、09年より現職。研究領域は生物学・農学・環境学。14年よりACCEL研究代表者。

さいとう まさのり 齋藤 雅典

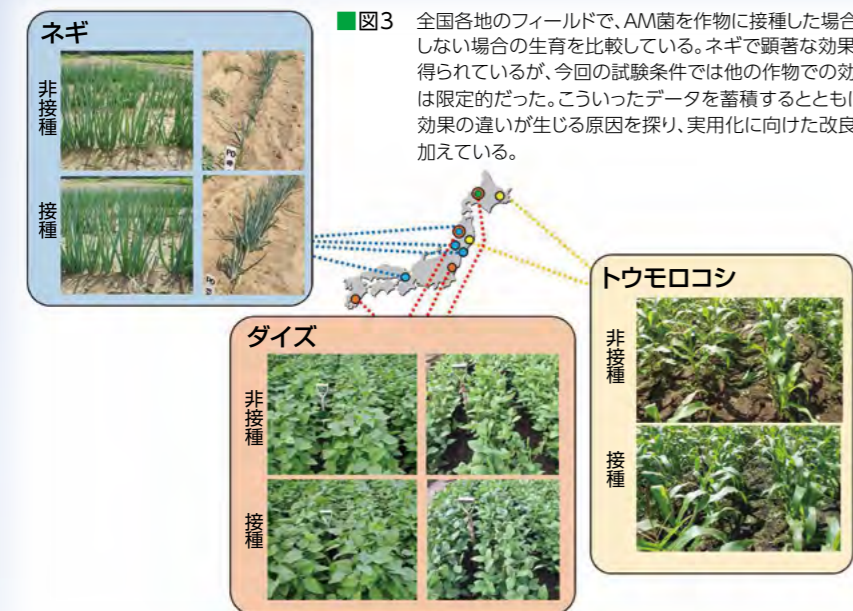
JST ACCELプログラムマネージャー
1981年 東京大学大学院農学系研究科博士課程修了。農学博士。農林水産省東北農業試験場、農業環境技術研究所などを経て、2006年 東京大学大学院農学生命科学研究科教授 (併任)。08年 東北大学大学院農学研究科附属複合生態フィールド教育研究センター教授、18年 同大学名誉教授。14年より現職。

のがリボソーム遺伝子で、形態だけでは識別しにくい種の同定や、土壌中での種がどれだけの割合でいるかを調べる菌叢構造解析に使われる重要なマーカー遺伝子だ。これまでは一般的に生物の1個体には同一の配列のリボソームDNA遺伝子しかないと言われてきた。その常識を今回のゲノム解読が打ち破った。1個体にいくつもの異なる配列のリボソームDNA遺伝子が存在していたのである。このような特徴を持つ生物はマラリア原虫などごくわずかだ。これまでもAM菌のリボソームDNA遺伝子がマーカー遺伝子として

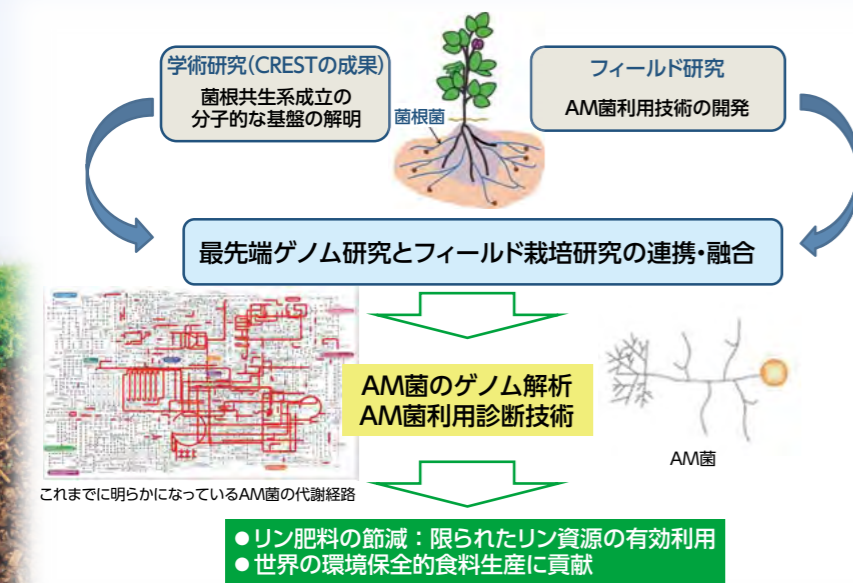
不可解な挙動を示すことが報告されていた。今回の発見でこの原因の1つが遺伝子配列の多様化にあることが明らかになった。

川口さんは「リボソームDNA遺伝子の多様性が、気候が異なる土地への適応や、コケヤスギ、種子植物といった非常に多様な植物宿主への共生を可能にしたのかもしれない」と話す。

今後、これらの知見をもとにAM菌の種の同定法や、植物への接種効果の評価法を見直すつもりだ。フィールドでのAM菌の種の構成を正確に評価できるようにになると期待している。



■図3 全国各地のフィールドで、AM菌を作物に接種した場合としない場合の生育を比較している。ネギで顕著な効果が得られているが、今回の試験条件では他の作物での効果は限定的だった。こういったデータを蓄積するとともに、効果の違いが生じる原因を探り、実用化に向けた改良を加えている。



■図4 ACCELでの研究全体像イメージ。最先端のゲノム研究とフィールドでの栽培研究を連携・融合させ、農業への応用を目指す。

実験室ではわからない AM菌の効果を確か

市販のAM菌の土壌改良剤を使った栽培試験も全国で実施してきた(図3)。ネギやダイズ、トウモロコシなどで試したところ、ネギで最も高い効果を得ている。齋藤さんは「菌根菌を入れると太いネギが採れ、全体的に収量上がる」と話す。

栽培試験ではリン肥料との組み合わせを評価する他、環境条件の違いに応じて効果がどう変わるのかも解析している。一連のデータはデータベースに蓄積されている。

「土壌の分析情報や植物への感染能力などのデータを使い、AM菌を与えた時にどの程度が定着し効果が得られるかが、ある程度、予測できるようになってきました」と川口さん。

齋藤さんが注目しているのは、AM菌を土壌に投入した際、他の微生物がどのような動きを示すかだ。「土壌中にどんな種類のバクテリアがいると効果が高くなるか、あるいは低くなるかもわかりつつある。AM菌を中心とした土壌微生物叢の姿を明らかにしたい」。

齋藤さんとの協働の結果、視点が大きく変化したと川口さんは語る。農地での研究経験も豊富な齋藤さんと仕事をすることで、フィールドの世界を知った。実験研究者として思い描いていた世界とは大きな違いがあったという。

川口さんは当初、AM菌のゲノム解読によって欠損している代謝酵素の遺伝子を特定さえできれば、後はその代謝産物を菌に与え増殖させるだけで、すぐ



に現場で役立てられると考えていた。AM菌は種数が少なく、世界中でよく似た菌が生息しているため土地ごとの多様性を考慮していなかったからだ。

「北海道のフィールドで、自分の認識が間違っていることを教えられました。北海道のような寒冷な場所の土壌では、AM菌の土壌改良剤に使っている千葉県由来の系統は使えないと実感できたし、むしろ土着の良いAM菌が利用できるなら、もっと効率的にその土地にすぐ根付くはずだとわかりました。これは研究室にいただけでは知りえなかったことです。この点が大きかったですね。菌根菌の多様性の研究にも力を入れるようになりました」。

単独培養に成功すれば、続いてAM

菌の多様性を解き明かして、それぞれの土地に合った系統を選別することも検討している。

環境問題や食料問題の解決につなげたい

最先端のゲノム研究と、フィールド栽培研究の連携、融合による今回のプロジェクト(図4)。その背景にあるのは環境や資源、人口の問題である。

「環境の問題は深刻です。化学肥料を過剰に使用することで河川や生活環境が汚染されています。また、リン肥料の原料であるリン鉱石の枯渇も心配です。日本はリン肥料をすべて輸入に依存していますから、リンの価格が高騰

すると困ったことになります。今回の研究をそうした問題への解決につなげていきたいですね」と川口さん。

齋藤さんは人口増加の問題を付け加えた。「世界では増加した人口を支える食料を生産するために不適切な土地に畑を作って、結果的に自然破壊や塩類障害が起きています。こうした事態を防ぐには、さまざまなアプローチがありますが、その1つとして劣化した土壌を再緑化するのにAM菌を活用できないかと考えています。とはいえ、今のようが高価な土壌改良剤では普及が困難です。だから今回の研究はなんとか成功させたいのです」。

地球規模の問題の解決へ一石を投じる研究は着々と進んでいる。

■ことば=菌根菌

菌根菌とは、植物の根に共生する菌類を指す。菌根菌は、宿主である植物から糖分や脂肪酸などの光合成産物を得る一方、土壌中に伸ばした菌糸から吸収するリン酸やミネラルといった養分や水分を宿主植物へと供給する。菌根菌には樹木に共生しキノコを形成する外生菌根菌など多くの種類が知られているが、本研究で対象としているのは、農作物をはじめ多様な植物に共生することのできるアーバスキュラー菌根菌(AM菌)である。AM菌は真菌類の中でも系統的に最も古い種類に属し、植物が海から陸に進出した4億年以上前には植物と共生関係を始めていたとされる。



ニンジン由来の毛状根と共生するアーバスキュラー菌根菌