

資 料

2011年つくば大会
シンポジウムの概要

アーバスキュラー菌根菌：
研究の最前線と土壌肥料分野への貢献

坂本一憲¹・秋山康紀²・林 英雄²・磯部勝孝³・江澤辰広⁴・菊池裕介⁴・
土方野分⁴・俵谷圭太郎⁵・伊豆 進⁶・齋藤勝晴⁷

1. はじめに

アーバスキュラー菌根菌 (AM 菌) は多くの植物に共生してリン酸や微量元素の供給などを行い、宿主植物の生育を促進する。これまで AM 菌は根粒菌と並び極めて有用な土壌微生物として精力的に研究されてきたが、特に最近では分子生物学的手法やミヤコグサなどのモデル植物の活用等によって、菌根共生系の成立や AM 菌の機能の解明がめざましく進展している。しかしその反面、微生物資材としての AM 菌の利用は足踏み状態が続いていると感じられる。そこで第3部門 (土壌生物) では、AM 菌に関する研究の最新状況を総括するとともに、土壌肥料、農業、環境分野等における今後の AM 菌の利用について議論する機会を設けようとして今回のシンポジウムを企画した。

まずシンポジウムでは AM 菌研究の最新情報として、1) AM 菌 - 植物共生系における相互認識シグナル物質 (秋山康紀)、2) アーバスキュラー菌根共生系と根粒共生系の共通性と特異性 (坂本一憲)、3) わが国の畑圃場における AM 菌フロラ (磯部勝孝) に関する講演が行われた。次に話題を AM 菌の最も有用な機能である宿主植物へのリン酸供給に絞り、4) AM 菌のリン酸吸収・運搬メカニ

ズム (江澤辰広)、5) AM 菌を用いたリン酸施肥の削減 (俵谷圭太郎)、6) AM 菌資材ビジネスの現状と課題 (伊豆進) の各講演が行われた。そして最後に総合討論を行い、本シンポジウムを締めくくった。(坂本一憲)

2. AM 菌 - 植物共生系における相互認識シグナル物質

AM 菌は 80% 以上もの陸上植物と共生する。AM 菌のルーツは古く、植物が陸上に進出した約 4 億 6 千万年前とされる。本菌は皮層細胞内に樹枝状体 (arbuscule) と呼ばれる栄養交換器官を形成することからその名が付けられている。AM 菌は宿主植物にリン酸を供給する有用微生物であり、農業生産や自然生態系において極めて重要な役割を果たしている。このため、植物生産への利用など応用研究が盛んに行われている。しかし、AM 共生の分子機構に関する研究は遅々として進んでこなかった。これは AM 菌が菌単独ではほとんど生育しない絶対共生菌であり、実験生物としては取り扱いが極めて難しいからである。1996 年に AM 共生研究に着手して以来、我々は天然物化学的手法を用いて AM 共生における相互認識シグナル物質の単離同定を目標に研究を行ってきた。

AM 菌の菌糸は宿主の根の近傍に達すると激しく分岐する。この菌糸分岐は非宿主であるアブラナ科やアカザ科などの植物では見られないことから、AM 菌の宿主認識反応と見なされている。この形態変化は根から分泌される分子量 500 以下の脂溶性物質により引き起こされることが分かっていた。本物質は **branching factor (BF)** と呼ばれ、その単離が試みられてきた。しかし、BF は根から極微量しか分泌されず、化学的にも不安定であるため、なかなか単離されなかった。2005 年、我々はマメ科モデル植物であるミヤコグサ (*Lotus japonicus*) の根分泌物から世界で初めて BF の単離に成功し、これを 5-デオキシストリゴールと同定した (Akiyama *et al.*, 2005)。本物質は強毒雑草であるストライガやオロバンキなどの根寄生雑草の種子発芽刺激物質として単離されていたストリゴラクトンと呼ばれるテルペノイドの一種であった。他のすべてのストリゴラクトン類にも菌糸分岐誘導活性が認められ、AM 共生における宿主認識シグナル物質 BF はストリゴラクトンであることが明らかになった。その後、ストリゴラクト

Kazunori SAKAMOTO, Kohki AKIYAMA, Hideo HAYASHI, Katsutaka ISOBE, Tatsuhiko EZAWA, Yusuke KIKUCHI, Nowaki HIJIKATA, Keitarou TAWARAYA, Susumu IZU and Katsuharu SAITO: Recent advances in research on arbuscular mycorrhizal fungi and its contribution to the fields of soil science and plant nutrition

¹ 千葉大学大学院園芸学研究所 (271-8510 松戸市松戸 648)

² 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科 (599-8531 堺市中区学園町 1-1)

³ 日本大学生物資源科学部 (252-0813 藤沢市亀野井 1866)

⁴ 北海道大学大学院農学研究院 (060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目)

⁵ 山形大学農学部 (997-8555 鶴岡市若葉町 1-23)

⁶ 出光興産株式会社アグリバイオ事業部 (107-0061 港区北青山 1-3-6 SI ビル青山)

⁷ 信州大学農学部 (399-4598 上伊那郡南箕輪村 8304)

2011 年 12 月 13 日受付・2011 年 12 月 27 日受理

日本土壌肥科学雑誌 第 83 巻 第 2 号 p. 216~221 (2012)

ンは植物の地上部のシュートの分岐を制御する内生植物ホルモンとしても働くことが明らかになった (Umehara *et al.*, 2008).

AM 菌は Myc factor (MF) と呼ばれるシグナル物質を生産すると考えられてきたが、MF が実在するという実験的証拠はながらく得られなかった。しかし、マメ科モデル植物を用いた研究により、菌根共生と根粒共生との間で共生初期のシグナル伝達系に共通過程 (common sym pathway, CSP) が存在することや、根粒菌や根粒菌の生産するシグナル物質である Nod ファクターによって誘導される初期ノジュリン遺伝子 (*ENOD*) のいくつかは AM 菌の感染初期にも誘導されることが明らかになり、MF が存在する可能性が高まってきた。そして、2003 年、AM 菌がタルウマゴヤシ (*Medicago truncatula*) の *MtENOD11* の発現を誘導する物質を菌糸から分泌していることが報告され、AM 菌が共生シグナル物質を生産していることが明らかとなった。これ以降、AM 菌の菌糸分泌物が側根形成やカルシウムスパイクなど植物の様々な共生応答を引き起こすという報告が相次いだ。MF の単離同定は、我々を含む、フランスなど海外のグループとの国際的な競争の中で行われてきた。2011 年初頭、フランスのグループが AM 菌から Nod ファクターに極めて似たりポキチンオリゴ糖 (Myc-LCO) を同定した (Maillet *et al.*, 2011)。本物質は CSP 依存的に側根分岐や菌根形成促進を引き起こしたことから、フランスのグループは Myc-LCO が MF であるとしている。

(秋山康紀, 林 英雄)

3. アーバスキュラー菌根共生系と根粒共生系の共通性と特異性

1) はじめに

マメ科植物には AM 菌と根粒菌が二重に共生している。ともに宿主植物から光合成炭素の供給を受けながら、AM 菌はリン酸供給や宿主の病害抵抗性を高める働きを行い、根粒菌は固定した窒素を宿主へ供給している。両共生菌は宿主の光合成炭素に関して競争関係にあると思われるが、一般に根粒の着生や窒素固定活性は菌根形成によって促進されることが知られており、ふたつの共生系を同時に維持している宿主植物の代謝機構に興味を持たれる。ここでは今までに明らかにされた菌根・根粒共生系に関する宿主遺伝子の共通性と特異性に関する知見を整理してみたい。

2) 菌根共生系と根粒共生系の共通機構

90 年代初めにミヤコグサおよびタルウマゴヤシという 2 種類のマメ科モデル植物の利用が提唱され、分子遺伝学的研究のための基盤整備が進められた。その結果、AM 菌または根粒菌に由来するシグナル物質を処理する宿主植物の初期シグナル伝達系が共通であることが明らかにされ、現在これは Common Symbiosis Pathway (共通シグナル伝達系) と呼ばれている (Kouchi *et al.*, 2010)。この伝達系の上流部分に関与する遺伝子群 (*SYMRK*,

CASTOR, *POLLUX*, *NUP85*, *NUP133*) は主にカルシウムスパイクの起動に関与していると考えられ、その下流に位置する *CCaMK* がカルシウムスパイクを変換してさらにその下流のシグナル伝達系を活性化させることで、菌根形成および根粒着生を導いていることが推定されている。

2000 年にいわゆるマメ科植物の根粒超着生変異体は AM 菌の樹枝状体形成が過剰であることが、タルウマゴヤシ、エンドウ、ミヤコグサ、ダイズにおいてほぼ同時に報告された (Shrihari *et al.*, 2000; 坂本ら, 2005)。その後根分け法や交互接木法によってマメ科植物のオートレギュレーション機構が根粒着生だけでなく、菌根形成をも抑制できることが証明された (Sakamoto and Nohara, 2009)。またアルファルファにおいて菌根形成と根粒着生はオートレギュレーション機構を介して相互に抑制できることが報告された。著者らはダイズについて検討したところ、AM 菌単独でのオートレギュレーションの発現は小さいが、根粒着生によって発現したオートレギュレーションによって菌根形成が抑制されていることを明らかにした。

3) DNA マイクロアレイを用いたダイズの菌根・根粒共生系に関与する宿主遺伝子の網羅的解析

著者らは DNA マイクロアレイを用いてダイズの菌根・根粒共生系に関与する宿主遺伝子の解析を行っている。本研究ではダイズ (品種エンレイ) に AM 菌 (*Gigaspora rosea* MAFF520062) または根粒菌 (*Bradyrhizobium japonicum* USDA110) を接種し、温室内でダイズを栽培した。また対照区として共生菌非接種のダイズも栽培した。各試験区の根から RNA を抽出後逆転写し、DNA マイクロアレイ (Agilent 社) を用いて宿主遺伝子の発現解析を行った。その結果、AM 菌接種では 441 個、根粒菌接種では 187 個の遺伝子が発現上昇した。両共生菌の接種で共通して発現上昇した遺伝子は 34 個であった。このように菌根・根粒共生系では、共通して発現する遺伝子よりもそれぞれに特異的に発現する遺伝子が多いことが明らかとなった。両共生系で共通して発現上昇したのは、*Nodulin 21*, *Nodulin 26*, 防御応答およびメタロチオネインなどをコードする遺伝子であった。また各共生系に特異的に発現上昇したのは、菌根共生系が各種トランスポーター、エネルギー代謝系および防御応答、根粒共生系が各種 *Nodulin* タンパクおよび防御応答をコードする遺伝子であった。以上のようにダイズは菌根共生系と根粒共生系のそれぞれに特異的な遺伝子を発現し、両共生系を同時にかつ巧妙に制御していると考えられる。

4) おわりに

内生菌根 (現在のアーバスキュラー菌根に相当) の先駆的研究者である浅井東一はマメ科植物の根粒の発達には菌根形成が不可欠であることを早くも報告している (Asai, 1944)。その後最近になって分子遺伝学的手法などを用いて菌根・根粒共生系の機構解明に関する研究は急展開し

たが、マイクロアレイでの結果が示すように両共生系は数100の遺伝子が関与する巨大システムであり、その全貌解明にはまだ時間が必要である。今後両共生系の相互作用と進化的関連に関する研究等がさらに進展すれば、二重共生系を強化したマメ科植物の分子育種等が可能となると考えられる。そして化学肥料や農業に依存しない持続的農業や劣化した土壤環境における植生回復等への多大な貢献が期待される。(坂本一憲)

4. わが国の畑圃場における AM 菌フロラ

1) はじめに

AM 菌には作物の種類との間に宿主親和性が存在することが考えられており、実際作物に感染する AM 菌の種類によってリン吸収や生育促進の程度が異なる事例は数多くある(磯部・坪木, 1999)。よって、圃場で栽培されている作物が AM 菌の感染によってより多くの恩恵を受けるには感染率を高くするだけでなく、根に感染している AM 菌のフロラも重要になる。そこで、各地の畑圃場で栽培されている作物の根に感染している AM 菌と畑土壌中の AM 菌フロラを調査した。

2) 畑圃場で栽培されている作物に感染している AM 菌

全国5ヶ所でダイズとトウモロコシを採取して、根における AM 菌感染率を比較した。その結果、両作物とも感染率には地域間差があり、神奈川県や山梨県、山口県で採取したもので高く、北海道で採取したものは両作物とも最も低かった(Isobe *et al.*, 2007)。これらの作物の根に感染している AM 菌フロラはダイズとトウモロコシの作物間差よりも地域間差のほうが明確で、このことは地域によって生息する AM 菌フロラが異なることを示唆するものとする(Isobe *et al.*, 2008)。

次に神奈川県6箇所と北海道4箇所ですべて同時にダイズを栽培して根に感染する AM 菌フロラを調査したところ、*Gigaspora* 属や *Scutellospora* 属の AM 菌は北海道のダイズの根からは認められず、神奈川県のダイズの根からのみ認められた。このことから同じダイズでも栽培地域によって根に感染している AM 菌のフロラが異なることが推察され、特に北海道で栽培されているダイズには *Gigaspora* 属や *Scutellospora* 属の AM 菌があまり感染していないと考えられた。

3) 畑土壌に生息する AM 菌フロラの地域間差

さらに北海道と神奈川県で栽培されているダイズの根圏土壌の AM 菌フロラを解析した。その結果、神奈川県で採取した土壌では *Gigaspora* 属や *Scutellospora* 属の AM 菌も認められたが、北海道で採取した土壌からは *Gigaspora* 属や *Scutellospora* 属の AM 菌は認められなかった。このことから畑土壌に生息する AM 菌フロラにも地域間差があり、特に北海道の畑土壌には *Gigaspora* 属や *Scutellospora* 属の AM 菌が生息していないか生息していてもその密度は神奈川県の土壌に比べ低いと考えられた。

4) 播種期の違いが感染する AM 菌フロラに与える影響
同じ圃場で秋に播いたコムギと春に播いたコムギの根を同じ時期に採取して根に感染している AM 菌のフロラを比較したところ、秋に播いたコムギの根からは *Glomus* 属の AM 菌しか認められなかったが、これを春に播くと *Gigaspora* 属や *Scutellospora* 属の AM 菌も根に感染することが明らかになった(肥後ら, 2011)。このことから同じ作物でも播種期を変えると根に感染する AM 菌のフロラが異なることが示唆された。(磯部勝孝)

5. AM 菌のリン酸吸収・運搬メカニズム

1) はじめに

AM 菌からのリン酸 (Pi) 供給が植物の生存にとっていかに重要であるかは、4億年にも及ぶ共生の歴史が証明している(Smith and Read, 2008)。AM 菌の菌糸には細胞と細胞を隔てる隔壁が存在せず、チューブ状の細胞壁に囲まれた細胞質に核を始めとするオルガネラが浮遊しているだけの極めて原始的な細胞構造であるにも関わらず、高等植物同様、物質吸収を担う部位とそれを利用する部位を分化させ、輸送の双方向性—宿主方向への Pi 輸送と菌糸先端方向への炭素輸送—を兼ね備えている。

2) リン酸吸収と濃縮

Pi は土壌中での拡散速度が遅いため、吸収の効率化には表面積の拡大が最も有効である。菌糸は根毛よりも細く長いので、炭素投資当たりの吸収表面積が極めて大きく、これが植物にとっての最大のメリットと言える。条件が良いと、わずかに数百 mL の土壌中に総延長 1,000 m 以上の菌糸ネットワークが構築される。菌糸の Pi 吸収を担うのは H⁺/Pi 共輸送体である。H⁺-APTase により駆動されるこの輸送体が、現在、Pi 吸収の主役であると考えられている。興味深いことに、AM 共生が成立すると、植物自身の H⁺/Pi 共輸送体遺伝子の発現量は低下し、Pi 吸収を AM 菌に依存するようになる(Smith *et al.*, 2003)。

AM 菌の高い—大過剰な—Pi 吸収能力を支えているのは、吸収した Pi を迅速に高分子化するポリリン酸 (polyP) 合成系の存在である。PolyP は Pi が高エネルギーリン酸結合により連結された無機高分子で、AM 菌では管状液胞に蓄積される。AM 菌は polyP を最大で全リンの 60~70% に達するまで蓄積可能であり、その蓄積速度も活性汚泥などで知られている polyP 超集積細菌のそれに匹敵する(Hijikata *et al.*, 2010)。このシステムにより、Pi がどんなに高速で吸収されても細胞内の Pi レベルは一定に保たれ、Pi 吸収効率の低下を防いでいる。ただ、polyP 合成酵素の基質は ATP であるため、取り込まれた Pi は呼吸鎖での ATP 合成を経由しているはずであり、膜輸送体群の駆動と合わせて、AM 菌の呼吸系は Pi 吸収プロセスに瞬時のうちに膨大なエネルギーを供給する能力を持つ。

3) 菌糸内長距離輸送と植物への移行

古典的には、Pi は小胞輸送(原形質流動)によりエネルギー依存的に菌糸内を輸送されると考えられてきた。し

かし、polyPは管状液胞ネットワークに蓄積されること (Kuga *et al.*, 2008), 他の糸状菌での実験から、管状液胞内の可溶性物質の輸送は拡散モデルで説明できること、AM菌の *in vitro* 二者培養系では、Piの輸送は根方向だけでなく菌糸末端方向にも起こることから、polyPは拡散により輸送されると現在は考えられている。

樹枝状体まで運ばれたpolyPは、ポリホスファターゼ (またはホスファターゼ) による加水分解後、Piの形でアポプラストに放出されると考えられている (Ezawa *et al.*, 2002). 放出されたPiは、植物原形質膜上にあるAM特異的Pi輸送体によって植物へ取り込まれる。

4) 菌根経路を介したリン酸供給の生態的インパクト

菌根形成により、植物の直接吸収経路が縮小されてAM経路からのPi吸収にシフトすることの生態的意義は大きい。たまたま能力の低いAM菌が優占している場合 (そのような生態系の存在は報告されていないが)、AM共生は植物にとって負のインパクトを与える。一方、根の機能に障害が出るようなストレス環境では、根の機能を相補することでその生存に大きく貢献する。

(江澤辰広・菊池裕介・土方野分)

6. AM菌を用いたリン酸施肥の削減

1) はじめに

ネギ、タマネギ、ニラおよびニンニクなどのユリ科作物の根系は他の作物に比べて小さいため、これらの作物の養分吸収量は他の作物に比べて小さい (Greenwood *et al.* 1982). これらの作物の栽培には多量のリン酸施肥が必要である。一方、リン酸質肥料の原料であるリン鉱石は、現在の採掘技術と使用量ではあとリン鉱石の産出は2030年頃にピークを迎えると試算されている (Cordell *et al.* 2009). さらに、原油価格も上昇している。このためリン酸質肥料の国内価格もここ数年で急激に上昇している。また、リン酸質肥料を多量に施用した土壌の周辺河川・湖沼のリン濃度が上昇し、富栄養化が起こっている (西尾道徳, 2005). これらの問題に対応するために、持続的かつ環境保全的なリン酸資源利用技術の開発が求められている。AM菌は、植物の生育とリン吸収を促進する。AM菌による植物の生育とリン吸収促進効果はポット条件では多数報告されているが、圃場条件ではほとんど報告されていない。ここではAM菌接種により圃場におけるネギへのリン酸施肥を削減できるかどうかについて述べる。

2) ネギへのAM菌の接種

2008年4月に滅菌黒ボク土に非接種区とAM菌 *Glomus R-10* 接種区 (以下、接種区) を設け、ネギ (*Allium fistulosum* L.) 品種元蔵を播種し、ガラス室で58日間育苗した。山形県戸沢村の圃場に30, 60, 100および150 mg P₂O₅ 100 g⁻¹ (以下、P30, P60, P100およびP150) になるように過リン酸石灰を施用し、ネギを定植した。109日間の栽培後に菌根形成率、地上部リン含有率、地上部新鮮重、草丈、葉鞘径、地上部乾物重を測定した。接種区の定

植時の菌根形成率は94%で、収穫時には60~77%であった。非接種区では収穫時に土着AM菌による菌根形成が認められた。接種区の草丈および葉鞘径はP30とP60で非接種区より大きかった。地上部リン吸収量は、P30およびP60では接種区で非接種区より多かった。非接種区の収量はP100とP150でP30とP60より高かった。接種区の収量はリンレベル間で差がなかった。P30の接種区の収量はP100の非接種区の収量と差がなかった。このことからAM菌接種により圃場におけるネギへのリン酸施肥を削減できることが明らかになった。

3) 接種資材導入のコスト及び条件

土壌の可給態リン酸濃度が30 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の接種区のネギの1個体当たりの地上部新鮮重は200 gで、100 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の非接種区と差がなかった (図1). この非接種区の過リン酸石灰施用量は9850 kg ha⁻¹で、過リン酸石灰は1 kg 当たり57.45円 (2008年) であったので、ha当たりのリン酸施肥の費用は565,882円であった。30 mg P₂O₅ 100 g⁻¹の接種区の菌根菌資材の施用量は500 kg ha⁻¹で、1 kg 当たり840円 (2008年) であったので、ha当たりのAM菌資材の費用は420,000円であった。従ってこの圃場ではネギへのAM菌資材の導入によりha当たり145,882円のコストを削減できることが明らかになった。

圃場実験を行った土壌には土着のAM菌が生息していたが、この菌のネギに対する生育及びリン吸収促進効果は *Glomus R-10* より小さく、土壌の可給態リン酸濃度が30 mgと低く、使用したネギ品種元蔵がAM菌依存性であったため、AM菌接種によりネギへのリン酸施肥を削減することができた。接種資材の導入に当たっては (1) 土着のAM菌の密度とその生育促進効果、(2) 圃場の可給態リン酸濃度、及び (3) 作物種及び品種の菌根依存性を予め確認する必要がある。

本研究は農林水産省生物機能を活用した環境負荷低減技術の開発プロジェクト及び地域内資源を循環利用する省資源型農業確立のための研究開発プロジェクトの支援を受けた。AM菌資材 *Glomus R-10* は出光興産株式会社から提供していただいた。 (俵谷圭太郎)

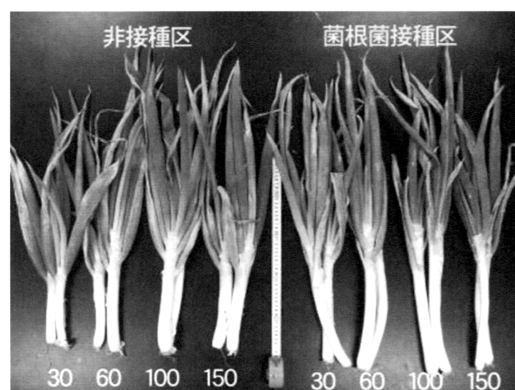


図1 非接種区と接種区におけるネギの生育

7. AM 菌資材ビジネスの現状と課題

AM 菌資材は微生物製剤で唯一地力増進法に基づく政令指定土壌改良資材として認定されており、農業登録なしにその植調作用を標榜して販売することが可能な商品である。出光興産(株)、セントラル硝子(株)をはじめ数社が独自に AM 菌の工業的製造プロセスの開発に成功し、*Glomus* 属、*Gigaspora* 属の生産・販売を行っている。環境に配慮した食の安心安全に貢献する農業資材として農業生産者や緑化の分野で使用されているが、一方でビジネスとしては各社困難な状況にあると言われている。

肥料に比べて一般的に高コストである、使用方法に手間がかかる、効果を実感しづらいなど、商品としての基本的なコストパフォーマンスに課題があり、市場拡大が進んでいないのが実状である。メーカーにとっても、普及に時間とコストがかかるため重要品目には挙げづらいものとなっている。実際、農林水産省生産局農業環境対策課の統計によると AM 菌の年間出荷量は平成 15 年の 42 トンから年々減少を続け、平成 20 年には 15 トンとなっている。

本報告では、AM 菌資材が環境保全型農業の一翼を担い、社会に貢献していくために解決していくべき課題について、ビジネスの観点から総括したい。

(1) 製造コスト

一般的に微生物製造では液体培養や固体培養が用いられるが、AM 菌は絶対共生菌であるため現在多くの場合植物の根を介した生産方法がとられている。この方法は、現在の年間供給量を考えた場合、液体培養や固体培養法に比べて安価に製造できる優れた製造方法である。液体培養や固体培養に比べてコンタミネーションや均一製造を実現する技術対策のハードルが高いものの、各社その対策技術についてはほぼ確立済みであり、海外品に対しても品質的優位性を維持することができている。今後は各メーカーの製造の一本化を通じてスケールメリットを出すなど、メーカー間のアライアンスの推進が必要と思われる。

(2) 効果の考え方

農業生産者にとってのコストメリットを再度検証する必要がある。ある施用期間における生育促進効果や根量アップデータの他に、各作物ごとに、単位面積当たりの増収や省力化によるコストダウンなど作期を通した生産者の総合的な経済メリットを示すデータを蓄積し、そのコストパフォーマンスを検証していくことが重要と思われる。

(3) その他、産官学の協力の必要性、海外ビジネスの動向など (伊豆 進)

8. あとがき

本シンポジウムではアーパスキュラー菌根の基礎研究から農業への活用まで 6 名の講演者に紹介していただいた。AM 菌は研究材料としての扱いの難しさから、これまで基礎研究の進展は割とゆっくりであった。しかしこの約 10 年の間に、マメ科モデル植物の利用により菌根形成のメカ

ニズムが急速に解明されつつあり、また実験系の工夫や新たな実験手法の開発によりリン酸輸送メカニズムの理解も進んでいる。フィールドレベルでは、遺伝子マーカーを利用した分子生態学的な解析から圃場や荒地の AM 菌の多様性が理解されるようになってきた。一方で、今回のシンポジウムで改めて浮き彫りになった課題は、AM 菌の農業への活用である。リンが蓄積した現在の日本の土壌では AM 菌資材のコストパフォーマンスに課題があり、また圃場では AM 菌資材や土着菌の効果が実感しにくいなど問題点がある。このような課題に対して今回の講演では、菌根反応性の高いネギ品種への AM 菌接種によって圃場へのリン酸施肥を削減できることが紹介されており、あるいは北海道農業研究センターを中心とした研究では、土着菌を利用した輪作体系によりリン酸質肥料の削減が可能であることが実証されつつある。

菌根活用に向けた今後の研究課題としては、1. 作物品種と菌株の組み合わせのスクリーニングに加えて化学・有機質肥料の組み合わせや栽培法の検討、2. 共生機能を発揮しやすい作物品種の育種開発、3. 初期感染が早く土着菌との競合に優れた AM 菌資材や接種法の開発などがあげられる。4. 菌根によるベネフィットを圃場で評価するためには、例えば根粒で窒素固定活性を測定するように菌根でもベネフィットに関する数値指標を開発する必要があるだろう。菌根機能の評価指標が確立すれば AM 菌資材だけでなく土着菌の活用にもつながるかもしれない。また、5. 菌根の機能としてリン酸吸収以外にも微量元素の吸収促進や耐病性・耐乾性の付与なども指摘されており、作物によってはそれら機能を利用できるかもしれない。

リン酸質肥料の価格はこの数年高い水準で推移しており、減肥技術や代替肥料に対する関心が高まっている。また、リン資源の持続的な活用や保全のためには、リン鉱石の産出国から国内へと一方向的であったリンの流れを循環系に乗せることも重要な課題である。それらを解決する 1 つの領域として菌根研究や AM 菌資材が貢献できるよう、基礎研究と応用研究がさらに有機的に結び付くことを期待したい。(齋藤勝彦)

文 献

- Akiyama, K., Matsuzaki, K., and Hayashi, H. 2005. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi. *Nature*, 435, 824–827.
- Asai, T. 1944. Über die Mykorrhizenbildung der leguminösen Pflanzen. *Jpn. J. Bot.*, 13, 463–485.
- Cordell, D., Drangert, J. O., and White, S. 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change—Human and Policy Dimensions*, 19, 292–305.
- Ezawa, T., Smith, S. E., and Smith, F. A. 2002. P metabolism and transport in AM fungi. *Plant Soil*, 244, 221–230.
- Greenwood, D. J., Gerwitz, A., Stone, D. A., and Barnes, A. 1982. Root development of vegetable crops. *Plant Soil*, 68, 75–96.
- 肥後昌男・磯部勝孝・前川富也・石井龍一 2011. 種々の冬作物の

- 根に感染したアーバスキュラー菌根菌の群集構造. 土と微生物, 65, 3-10.
- Hijikata, N., Murase, M., Tani, C., Ohtomo, R., Osaki, M., and Ezawa, T. 2010. Polyphosphate has a central role in the rapid and massive accumulation of phosphorus in extraradical mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytol.*, 186, 285-289.
- 磯部勝孝・坪木良雄 1999. インゲンマメ栽培におけるアーバスキュラー菌根菌の利用に関する研究—接種菌種間でのインゲンマメの生育の違い—. 日作紀, 68, 112-117.
- Isobe, K., Aizawa, E., Iguchi, Y., and Ishii, R. 2007. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in upland field soil of Japan 1. Relationship between spore density and the soil environment factor. *Plant Prod. Sci.*, 10, 122-128.
- Isobe, K., Sugimura, H., Maeshima, T., and Ishii, R. 2008. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in upland field soil of Japan 2. Spore density of arbuscular mycorrhizal fungi and infection ratio in soybean and maize fields. *Plant Prod. Sci.*, 11, 171-177.
- Kouchi, H., Imaizumi-Anraku, H., Hayashi, M., Hakoyama, T., Nakagawa, T., Umehara, Y., Suganuma, N., and Kawaguchi, M. 2010. How many peas in a pod? Legume genes responsible for mutualistic symbioses underground. *Plant Cell Physiol.*, 51, 1381-1397.
- Kuga, Y., Saito, K., Nayuki, K., Peterson, R. L., and Saito, M. 2008. Ultrastructure of rapidly frozen and freeze-substituted germ tubes of an arbuscular mycorrhizal fungus and localization of polyphosphate. *New Phytol.*, 178, 189-200.
- Maillet, F., Poinot, V., André, O., Puech-Pagès, V., Haouy, A., Gueunier, M., Cromer, L., Giraudet, D., Formey, D., Niebel, A., Martinez, E. A., Driguez, H., Bécard, G., and Dénarié, J. 2011. Fungal lipochitooligosaccharide symbiotic signals in arbuscular mycorrhiza. *Nature*, 469, 58-63.
- 西尾道徳 2005. 農業と環境汚染. 農山漁村文化協会, 東京.
- 坂本一憲・宍戸雅宏・津久井真紀・岩本育子 2005. MIDI システムを用いた脂肪酸組成分析による畑作物根に定着したアーバスキュラー菌根菌の検出. 土肥誌, 76, 317-320.
- Sakamoto, K., and Nohara, Y. 2009. Soybean (*Glycine max* [L.] Merr.) shoots systemically control arbuscule formation in mycorrhizal symbiosis. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 252-257.
- Shrihari, P. C., Sakamoto, K., Inubushi, K., and Akao, S. 2000. Interaction between supernodulating or non-nodulating mutants of soybean and two mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 10, 101-106.
- Smith, S. E., and Read, D. J. 2008. Mycorrhizal symbiosis, Academic Press.
- Smith, S. E., Smith, F. A., and Jakobsen, I. 2003. Mycorrhizal fungi can dominate phosphate supply to plants irrespective of growth responses. *Plant Physiol.*, 133, 16-20.
- Umehara, M., Hanada, A., Yoshida, S., Akiyama, K., Arite, T., Takeda-Kamiya, N., Magome, H., Kamiya, Y., Shirasu, K., Yoneyama, K., Kyojuka, J., and Yamaguchi, S. 2008. Inhibition of shoot branching by new terpenoid plant hormones. *Nature*, 455, 195-200.