

「1 + 1 = 2」 じゃない共生の世界 — 2種の菌が植物にもたらす相乗効果と相殺効果 —

概要

京大大学生態学研究センター 堀淑恵 元修士課程学生、藤田博昭 同博士課程学生、東樹宏和 同准教授らの研究グループは、複数種の微生物と植物が共生することによって、1種の微生物のみが共生するときに比べて、植物の成長に複雑な反応が現れることを、膨大な実験データとともに明らかにしました。

近年、DNA分析技術の発展とともに、従来考えられてきたよりもはるかに多様な種の微生物が土壌中に存在し、植物の根を取り巻いたり、植物の根の中に入り込んだりしていることが明らかになってきました。そうした微生物たちは、その1種1種が植物に対して成長を促進する効果を持っていたり、病原菌や乾燥・高温ストレスから植物を守る効果を持っていたりします。しかし、複数の微生物が植物と共生する場合に何が起こるのかについては、知見が非常に限られていました。

本研究では、植物の根から単離された13種類の真菌（きのこ・かび類）のそれぞれについて、1種だけ植物に接種した場合と、2種を組み合わせで接種した場合（78通り）で、植物の成長がどのように変わるか、包括的に評価しました。その結果、1種だけの場合に植物の成長を大きく促進する菌を2種組み合わせた場合に元々の効果が相殺されてしまう一方、1種だけだとあまり植物にプラスの効果をもたらさない菌を2種組み合わせた場合に、植物の成長が大きく促進される場合があることを発見しました。

この成果は、「エースストライカーだけを集めたサッカーチームが必ずしも強いわけではない」ことを自然界の地下共生系において実証したもので、生物種どうしの組み合わせによって大きく変化する生物機能について、重要な視点を与えるものです。今後、植物に共生する微生物の組み合わせをうまく活かした持続可能な農林業を設計していく上で、新たな科学的アプローチを提案につながると期待されます。

本成果は、2021年9月13日に国際学術誌「Frontiers in Microbiology」にオンライン掲載されました。



図1. 植物の根と共生する真菌類の菌糸。

1. 背景

植物は、地下で様々な微生物と関わり合いを持っています。1つの森林や草原、畑の中であっても、数千種から数万種の細菌（バクテリア）類や真菌（かび・きのこ）類が生息していると推定され、植物の根の表面や植物組織の中で、植物と密接に関わり合いを持っています。特に真菌類は、土壌中に菌糸を張り巡らせることで、多様な役割を果たすことができ、植物に窒素やリンといった養分を輸送したり、土壌中の有機物を植物に利用しやすいよう変換したり、病原菌から防御したり、乾燥や高温ストレスに対する植物の耐性を高めたり、と、植物と密接に関わっています。

植物と真菌類の共生系に関しては、4億年以上前から陸上植物と共生するアーバスキュラー菌根菌や、ブナ科・マツ科といった樹木と共生する外生菌根菌（マツタケもその一種）などを主な対象として研究が進められてきました。しかし、大量 DNA 配列分析装置を用いた近年の研究から、菌根菌以外にも、植物の根圏内に多様な真菌類が共生し（「内生菌」や「土壌菌」と総称されるが、その全容はまだつかめていない）、何らかの役割を担っていることが明らかになってきました。

自然生態系であれ、農業生態系であれ、野外環境下で微生物類と全く関わりをもたない植物の生活は存在し得ません。しかし、顕微鏡や DNA 分析装置を使ったとしても、一度に多数の微生物種を対象とする研究が難しいこともあり、地下微生物と植物の共生系に関する人類の知識は、まだ非常に限られています。特に、複数の微生物種が植物に共生した際に何が起こるのか、という点については、一番単純な2種の微生物と植物の関係性に関する研究でさえ、極めて限定的な知見しか得られていません。

2. 研究手法・成果

本研究プロジェクトでは、植物の根から単離された13種の真菌類（「内生菌」や「土壌菌」）を用い、1種だけ植物に接種した場合と、2種を組み合わせで接種した場合で、植物が示す反応を比較しました。1種で接種した場合に植物の成長を大きく促進する菌が存在する場合、そうした単独接種で効果を発揮する菌を2種組み合わせれば、植物の成長がさらに大きく促進される可能性があります（相乗効果）。一方で、そうした単独接種で効果を発揮する菌どうしであっても、2種を組み合わせた場合には、効果が薄れてしまうか、植物にマイナスの影響を及ぼしてしまうかもしれません（相殺効果）。

1種の微生物のみが植物と共生するシステムは、森林や草原といった自然生態系であっても、畑のような農業生態系であっても現実的ではありません。複数種の微生物が存在した場合に、1種だけ存在する場合と比較して、どのように植物に与える影響が変わってくるのか明らかにするため、一番単純な例である2種の組み合わせを網羅的にコマツナ（*Brassica rapa* var. *perviridis*）に接種する実験を行いました。2種だけとは言え、その組み合わせは78通りあり、合計で2,000個体以上のコマツナを使った生育実験となりました。

菌を1種だけ接種した場合、13種のうち半数ほどが非接種の場合に比べて、コマツナに対して明瞭な成長促進効果を示しました。ただ、そうした明瞭な成長促進効果をもつ菌どうしを組み合わせでコマツナに接種した場合、それぞれを1種だけコマツナに接種した場合に比べて、大幅に成長促進効果が小さくなってしまいました（相殺効果）。

その一方で、単独接種ではほとんどコマツナに対する効果がみられなかった菌を2種組み合わせで接種したときに、どの菌を単独接種しても得られないような大きな成長促進効果を示すことができました（相乗効果）。

こうした相乗効果は、実験を行った 78 通りの組み合わせのうち、数通りで確認することができました。

3. 波及効果、今後の予定

微生物の組み合わせを網羅的に評価する今回の研究によって、「共生者が複数いる場合の効果は、1 種しか共生者がいない場合の知見だけでは予測できないのが普通」、ということが明らかになりました。従来、植物にとって有用な微生物を開発する際には、1 種だけを植物に接種する実験を通じて評価が行われてきましたが、そうした開発戦略では、2 種以上が存在する条件（自然生態系でも農業生態系でも普遍的な条件）下で重要な機能を発揮する微生物を見落としてしまうことが、本研究で示唆されました。エースストライカーだけを集めたサッカーチームが必ずしも強いわけではなく、派手さはなくとも息のあったパス回しで高いパフォーマンスを示すチームもあるでしょう。そのような、「チームとしての微生物たちのパフォーマンス」を最大化するための科学的アプローチが、今後重要になってくるでしょう。

こうした観点で、生物種どうしの関係性を「ネットワーク」として捉え、そのネットワーク構造を俯瞰することで、最適な微生物種の組み合わせを設計する試みを本研究室で進めています。これまでの研究成果につきましては、下記、「**関連する先行研究成果**」をご参照ください。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、以下の資金の援助を受けて行われました。

JST さきがけ「頑健な植物共生システム的设计に向けた「コア共生微生物」探索技術の開発」

NEDO ムーンショット型研究開発事業 「資源循環の最適化による農地由来の温室効果ガスの排出削減」

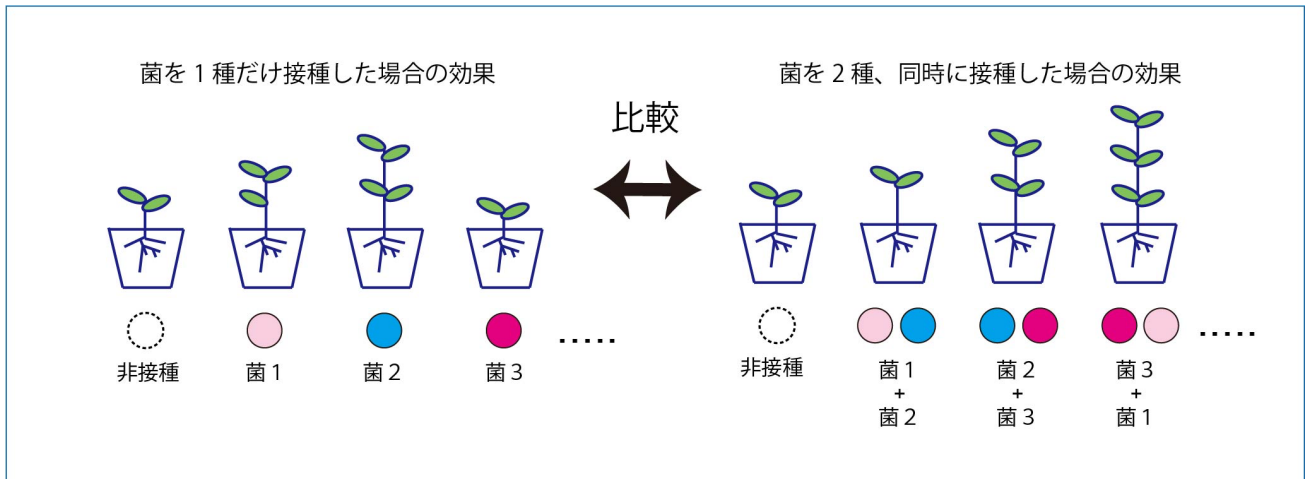
Human Frontier Science Program 等

5. 参考図表

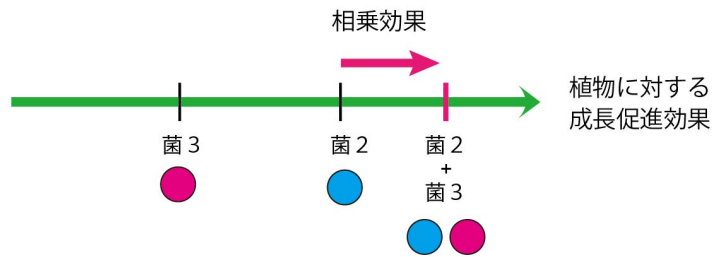


図 1. 植物の根と共生する真菌類の菌糸。

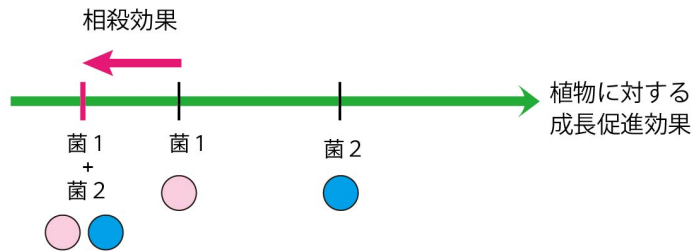
植物の根は、肉眼で細く見える部分であっても $200\ \mu\text{m}$ ($0.2\ \text{mm}$) ほどの直径があり、土壌中の細かい隙間に入り込む能力はそれほど高くない。それに対して真菌の菌糸は、直径が数 μm と極めて細く、土壌中の細かい隙間から水や養分を吸収し、張り巡らされた菌糸を通じて植物に養分を輸送することができる。水や養分の供給以外にも、病原微生物からの保護や、各種の環境ストレスに対する耐性付与といった効果を植物に対して示す真菌類が知られている。しかし、あまりに真菌類の種数が膨大なため、そうした地下共生系でみられる現象のごく一部しか、人類はまだ理解していない。写真は、京大生態学研究センター付近の森林で採取された土壌サンプルから、植物根（未同定）と土壌団粒を取り出して撮影したもの。植物根から伸びた菌糸が土壌団粒に絡みついている様子を観察できる。



単独接種の場合よりも、2種接種した場合のほうが成長を大きく促進する場合



単独接種の場合よりも、2種接種した場合のほうが成長を大きく促進する場合



コマツナの栽培風景

図2. 実験の概要

ワーク・データー」

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2018/180623_1.html

「植物体内の共生菌社会を動かす中心核 – 農業における微生物利用の新たな戦略 –」

http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2015/160309_1.html

「微生物の生態系を設計する基幹技術を開発 – 生態系レベルの機能を農業・医療・工業に一」

<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2020-06-26>

< 論文タイトルと著者 >

タイトル： Synergistic and offset effects of fungal species combinations on plant performance (真菌の組み合わせが植物にもたらす相乗効果と相殺効果)

著 者： Yoshie Hori, Hiroaki Fujita, Kei Hiruma, Kazuhiko Narisawa and Hirokazu Toju

掲 載 誌： Frontiers in Microbiology DOI： 10.3389/fmicb.2021.713180