

植物を支える「共生ネットワーク」は 地上と地下で構造が違う

—見えてきた地下生物圏の構造—

京都大学大学院人間・環境学研究科 東樹 宏和 助教 を中心とする国際共同研究チーム（京都大学、ブラジル・サン・パウロ大学、デンマーク・オーフス大学、米・カリフォルニア大学）は、植物と動物や植物と真菌類（きのこ・かび類）が構成する「共生関係のネットワーク」に着目し、植物をとりまく共生ネットワークの構造が地上と地下で根本的に異なっていることを発見しました。この成果は、植物が地上と地下の共生生物たちと織りなす関係性を俯瞰するもので、自然生態系や農地生態系を包括的に管理していく上での基礎情報を提供すると期待されます。

本研究成果は、米国科学誌「Science Advances」誌に掲載される予定です。

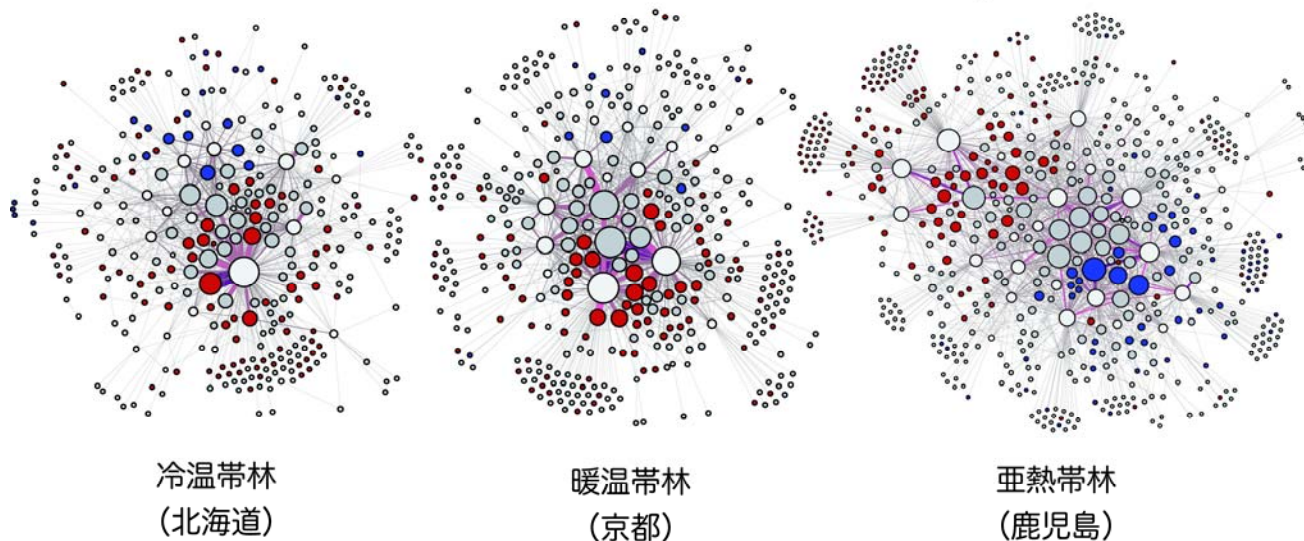
概要

無数の生物が関わり合って構成される生物群集や生態系は、科学が対象とするシステムのなかでもとりわけ複雑なもののひとつです。特に地下の生物圏内では、地上の生物圏と比べてさらに多様な生物たちが生息しており、地下生態系の動態を理解することは、科学上の大きな挑戦といえます。

東樹助教を中心とするグループは、DNA 情報に基づいて生物の名前を特定する [DNA バーコーディング](#) という技術で得られたデータを大量に解析し、植物とその根に共生する真菌（きのこ・かび類）で構成される「共生ネットワーク」の構造を解明しました。この地下における植物-真菌ネットワークを、従来研究されてきた地上の植物-動物ネットワークと比較したところ、その基本構造に根本的な違いがあることが判明しました。

本研究成果は、生態系内における植物とその共生者たちとの関係性に関して、地上と地下ではその動態が異なっていることを示唆します。また、土のなかの生物圏の構造を網羅的に明らかにする本研究の手法は、土壌を対象とするさまざまな応用科学分野に新たな視点を提供していくと期待されます。

- 植物種
- 外生菌根菌
- アーバスキュラー菌根菌
- 機能不明真菌（内生菌含む）



植物と共生真菌で構成される地下のネットワーク構造。

研究者からコメント

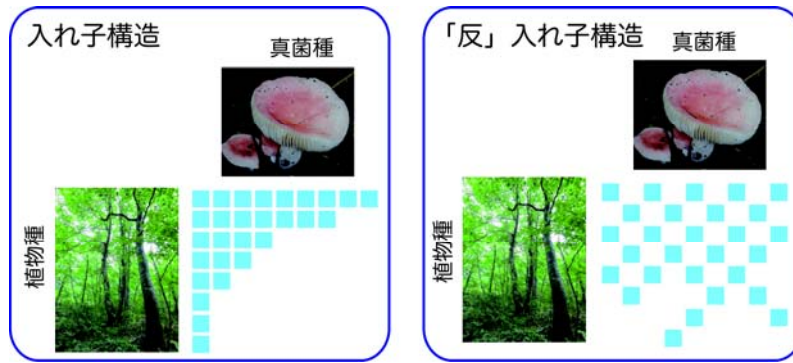
この研究の背景には、「無数のきのこやかびたちが繰り広げる地下の世界をのぞいてみたい」という基礎科学的な欲求があります。その一方で、「基礎科学上の発展は応用科学の新たな土台を作る」という期待も込められています。地球規模で進行する資源の枯渇や耕作不適地の拡大に対処するためには、生態系の動態を根本から理解し、その知見を自然生態系の再生や農業生態系の設計に活かしていくことが必要になります。こうした問題に基礎科学上の枠組みづくりから取り組むのは遠回りなのかもしれませんが、科学者の考え方にも多様性があるのではないかと思います。

この研究成果は育児休業を挟んで発表に漕ぎ着けました。支えていただいた職場の方々に感謝するとともに、国立大学における男性の育児休業取得率が今後向上していくことを願っています。

1. 背景

ひとつの森や草原に生息する植物たちは、光や土壌中の養分をめぐる争っています。ですので、植物種どうしの関係に着目すると、競争に強い少数の植物種ばかりが成功し、他の植物種はやがて消失してしまうことが予想されます。しかし、この競争関係にある植物種どうしが、利益になる動物や真菌類（きのこ・かび類）を「共同経営」しているとすると、お互いの存在が利益となる側面もあると予想されます。

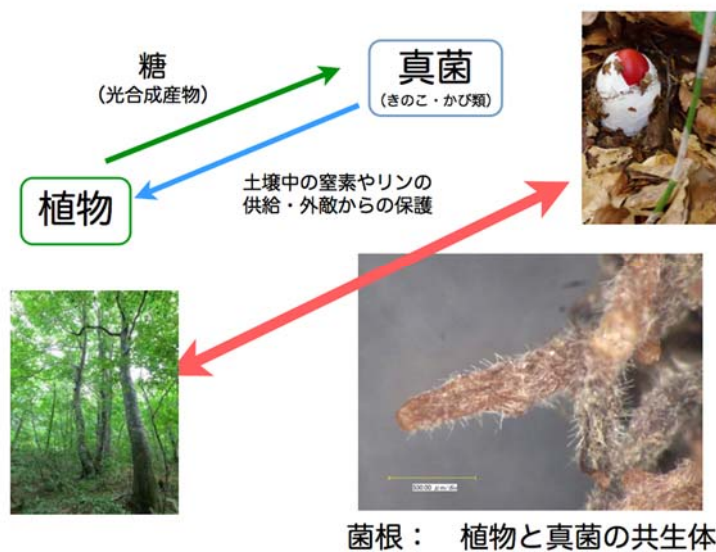
こうした予測は、植物の花粉や種子を運んでくれる動物たちを対象とした研究で盛んに議論されてきました。それらの理論によると、利益になる動物（花粉を媒介する昆虫や種子を運ぶ鳥など）を植物種間で数多く共有する「入れ子構造」がある場合、その森林や草原でより多くの植物種が共存できることが指摘されてきました。実際に、植物と花粉媒介昆虫や植物と種子散布動物の関係性に注目したこれまでの研究では、この「入れ子構造」が植物種と動物種の関係性をあらゆるネットワークにおいて普遍的であることが示されてきました。



植物と共生者の関係性における「入れ子構造」。本研究では、「入れ子構造」と正反対の特徴をもつ「反」入れ子構造」が地下の植物-真菌ネットワークで観察された。

このような植物と植物を支える相利共生者の関係性に関する研究は、研究技術上の制約から、地上で起こっている現象ばかりが注目を集めてきました。しかし、実際には、植物は地下で数多くの微生物たちと関わりを持っており、その地下の関係性を無視して植物種の共存過程を理解することはできません。

植物と関係する地下の生物たちのなかでも、最も植物の生存や生育に影響を与ええるのが、真菌類たちです。陸上に生息する植物種のほとんどは、「菌根菌」と呼ばれる真菌類と根で共生しており、この菌根菌たちから土壤中の養分を提供してもらっただけでなく、病原生物から保護してもらっています。さらに、「内生菌」と呼ばれるさまざまな真菌たちが普遍的に植物体内に存在することが近年注目を集めています。こうした真菌たちと植物が土のなかでどのような関係性のネットワークを構築しているのか解明することは、自然生態系の理解だけでなく、将来的に農業生態系の管理の面でも重要になってくると予想されます。

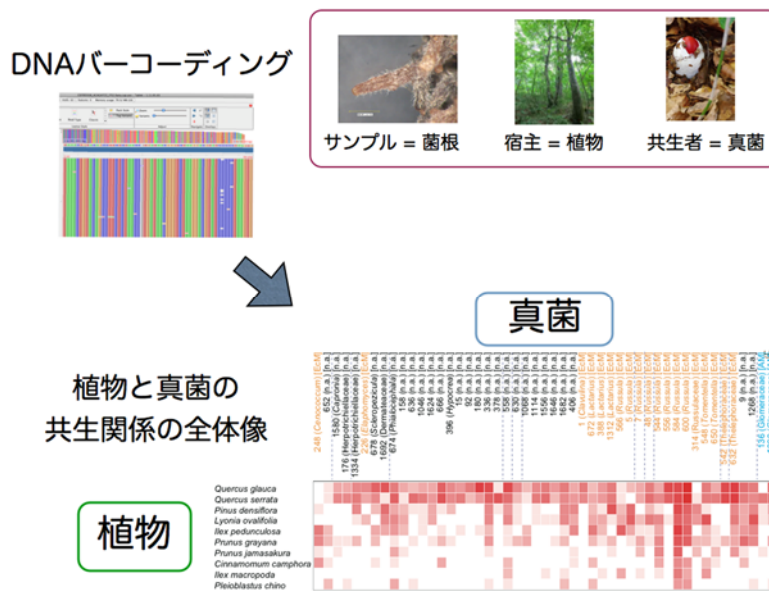


植物と菌根菌の関係。

2. 研究手法・成果

植物と地下の真菌類との共生関係は、肉眼では観察することができません。また、顕微鏡下で観察にしても、真菌は極めて種の多様性が高く、また、形態的な特徴に乏しいのが制約となります。

こうした研究上の制約を打破する技術として注目されているのが、「DNA バーコーディング」です。地球上に存在するすべての生物は、その種に固有の DNA 配列を持っています。そのため、特定の DNA 領域を「バーコード」とみなして、そのデータベースを作ったり、照合を行ったりすることが可能です。この技術があれば、植物根内に共生する目に見えない微小な真菌類であっても、DNA 配列を解読することでその種を特定することが可能です。日本の研究チームは、この DNA バーコーディングの理論的基礎の構築と自動化の面において、重要な貢献をしています ([「あらゆる生物の名前を DNA に基づいて特定する「DNA バーコーディング」の理論的枠組みを確立」](#) [2013 年 10 月 19 日発表] を参照)。



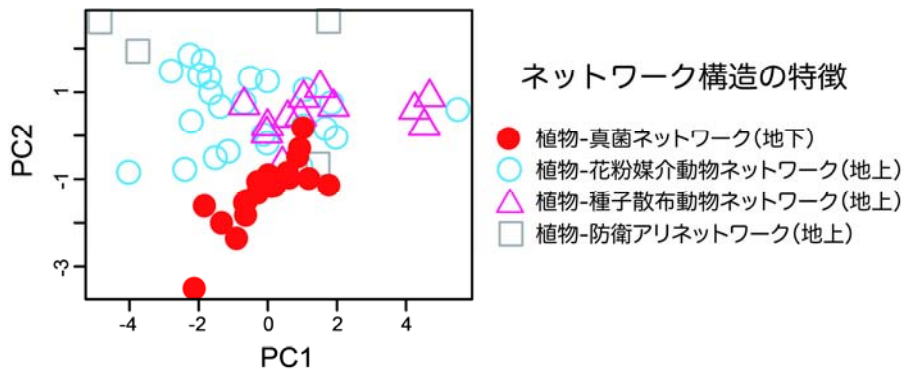
地下の共生関係を探る上での DNA バーコーディング利用。

こうした技術革新により、地下で繰り広げられる植物と真菌たちの複雑な関わりを大規模に解明できるようになってきました ([「植物と根に共生する真菌がつくり出す複雑な「ネットワーク」構造を解明」](#) [2014 年 10 月 20 日])。今回、植物根内の真菌を網羅的に DNA バーコーディング処理した膨大なデータを再解析し、これまでに報告されている地上の植物-動物ネットワークとその構造を比較しました。

その結果、地下のネットワークが地上のネットワークと正反対の性質の構造を持っていることが明らかになりました。地上の植物-動物ネットワークでは「入れ子構造」が普遍的であり、その入れ子構造によって植物種の共存が促進されていると考えられてきました。しかし、植物と真菌で構成される地下のネットワークでは、この「入れ子構造」が存在しないどころか、入れ子構造を崩す何らかの強い作用が働いていることが示唆されました。地下ネットワークの構造をさらに詳しく解析したところ、植物の根のなかで起こる真菌種間の住み場所をめぐる争いが「入れ子構造」を壊す要因であることが推測されました。

この研究により、地上の共生関係と地下の共生関係の間で、植物種の共存過程に与える影響が全く異

なる可能性が示唆されました。植物種の共存に関する理論研究自体がまだ発展途上であるため、本研究成果が持つ意味を解釈するためにはさらなる研究が必要です。しかし、目に見えない地下の生物界が地上のそれとは異なる原理で動いている可能性を考慮に入れることは、私たちをとりまく生態系を眺める上で重要といえます。



地上と地下の共生ネットワーク構造の比較。

3. 波及効果

「作物は土で決まる」といわれるように、地下の生態系は植物の生存と生育に思いがけない強い効果を及ぼします。しかし、地下の生態系を動かしている微生物たちは極めて種の多様性が高く、個々の微生物の性質を明らかにすることはできても、多様な微生物たちが集まって生じる効果を推測するにはまだほど遠い状態です。

植物の根に共生する真菌のなかには、植物の生育を飛躍的に向上させたり、病害虫に対する植物の抵抗性を高めたりするものが知られています。しかし、単体で有効な微生物であっても、実際の自然生態系や農地生態系では、その他の無数の微生物たちとの関わり合いを通じて植物に影響を及ぼします。単独の微生物を大量に培養して生態系に投入したとしても、それが定着するとは限りませんし、また、複雑な相互作用ネットワークを通じて思いがけない悪い影響を及ぼしてしまうかもしれません。こうした背景から、地下の生態系全体を眺める視点の必要性が改めて認識されるようになってきています。

本研究では、真菌を解析対象として、地下の微生物と植物が織りなす関係性の全体像を明らかにしました。この解析手法自体は、ネットワーク内の個々の微生物種の性質を明らかにするものではありませんので、私たちの地下生態系に対する理解はまだまだ限られたものであるといえます。しかし、地下の生物圏の全体像を俯瞰できるようになってきたのは大きな発展であり、基礎科学と応用科学の両面において、今後の発展を促進すると期待されます。

4. 今後の予定

本研究成果は基礎科学の領域に属するものですが、自然生態系の再生や農業生態系の設計・管理といった課題に関して、応用科学の新たな柱を打ち立てることを重要な目的としています。今回示されたよ

うなネットワークの構造があれば、名もない無数の微生物たちのなかから、特に重要な働きをしていることが予測されるものを選び出してくることができるかもしれません。実際、今回明らかになったネットワークの中心には、学名もついていない内生菌たちが数多く存在し、地下生態系の「影のフィクサー」として機能している可能性があります。

複雑な生物界のなかにも、視点をかえれば秩序を見いだすことができます。植物と微生物の相互作用や微生物どうしの相互作用を、その全体像を背景として理解することがまず必要です。その上で、生物界の秩序を崩すことなく、逆に活用することを目指して、自然生態系の再生や農業生態系の管理手法を模索していきたいと思います。

<論文タイトルと著者>

論文名:

Below-ground plant–fungus network topology is not congruent with above-ground plant–animal network topology

著者名:

Hirokazu Toju, Paulo R. Guimarães Jr., Jens M. Olesen, and John N. Thompson

掲載誌:

Science Advances

<用語解説>

「菌根菌」:

植物の根に共生して、植物に窒素やリンといった土壌養分を提供する真菌類(きのこやかびのなかま)。植物はこの土壌養分の見返りに、光合成で生産した炭水化物の2割ほどを菌根菌に提供している。陸上植物種の90%以上が、根に何らかの菌根菌を共生させているとされる。マツタケは菌根菌の代表例である(生きたマツから炭水化物をもらわなければ生きられないため、工場栽培できず、価格が高い)。

「内生菌」:

植物の体内に共生しているが、その機能がよくわかっていない真菌類。内生菌と呼ばれてきたもののなかにも、宿主植物の栄養状態を改善するものや、宿主植物の病原抵抗性を高めるものが知られるようになってきている。

<研究資金>

この研究は、内閣府の「最先端・次世代研究開発支援プログラム」(GS014)および日本学術振興会の科学研究費(若手A)の研究資金を基に実施されました。

<注意事項>

Science Advances 誌に掲載された論文は、オープンアクセスとなっております。論文内の図表は、Creative Commons Attribution NonCommercial License 4.0 (CC BY-NC) に基づいてご利用ください。