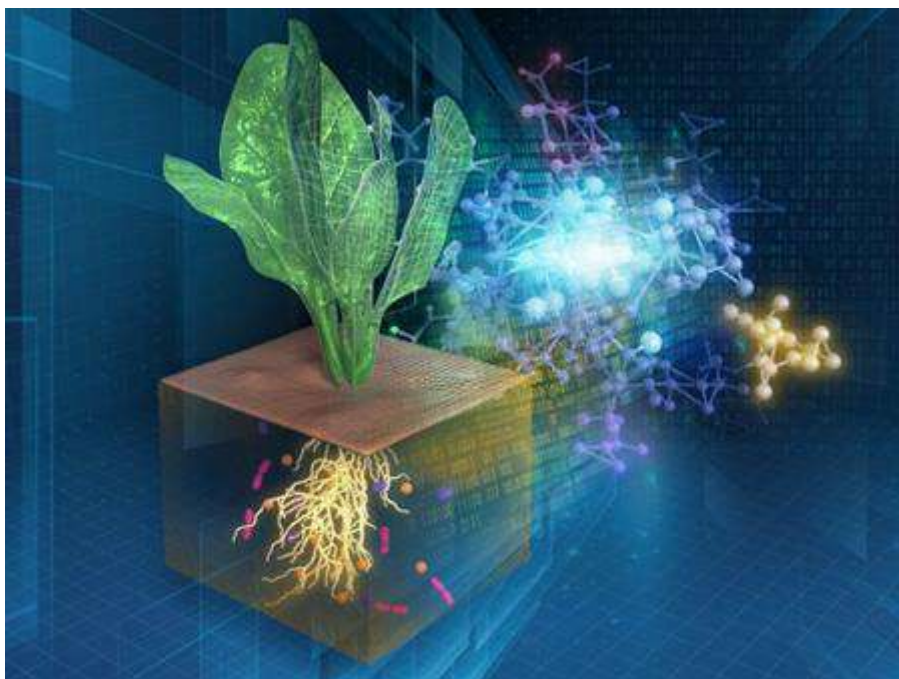


植物-微生物-土壌の複雑なネットワークのデジタル化 ー作物生産における土壌有機態窒素の重要性を解明ー

理化学研究所（理研）、福島大学食農学類農業生産学コースの二瓶直登准教授らの共同研究グループは、農業生態系における植物-微生物-土壌の複雑なネットワークのデジタル化に成功し、これまでは熟練農家の経験として伝承されてきた高度な作物生産技術を科学的に可視化できるようになりました。

本研究成果は、化学肥料に頼らず有機態窒素を活用することで、持続可能な作物生産が可能であることを示しており、環境共存型の新しい農業に向けた持続的な作物生産の実現に貢献すると期待できます。



植物-微生物-土壌の複雑なネットワークのデジタル化

今回、共同研究グループは、農業現場でのマルチオミクス解析により農業生態系のデジタル化を試みました。結果、農業生態系は作物が示す特定の形質（収量や品質など）と特定の微生物種や土壌成分で構成されたモジュールが複数組み合わせられてネットワークを形成していることが明らかになりました。また、有機農法の一つである太陽熱処理により植物根圏に特徴的な細菌叢が形成され、土壌中に蓄積する有機態窒素が作物の生育促進に関与していることが見いだされました。さらに、同定した土壌有機態窒素のうちアラニンとコリンが、窒素源およ

び生理活性物質として作物生育を促進することが証明されました。

研究手法と成果

1) 同一圃場内に異なる農法 2) マルチオミクス解析によるデジタル化

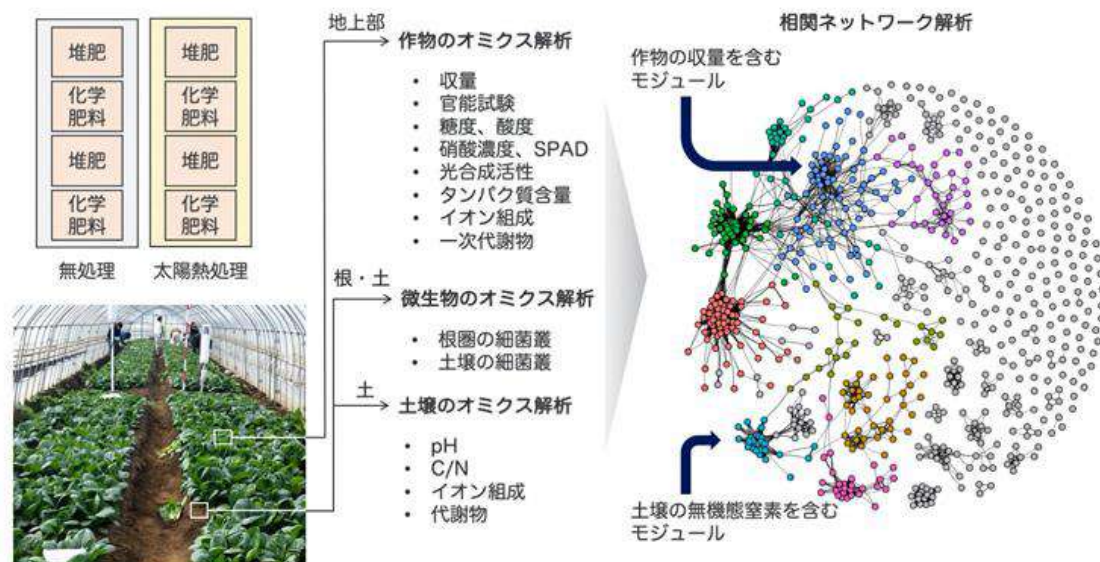


図1 マルチオミクス解析による農業生態系のデジタル化

(1) 同一圃場を分割して、異なる農法によりコマツナを栽培した。(2) 試験区ごとに作物および土壌をサンプリングした後、それぞれ作物、微生物、土壌のマルチオミクス解析を実施した。取得した全データを統合したデータ行列を用いて相関ネットワーク解析を行うことにより、農業生態系をデジタル化することに成功した。解析の結果、農業生態系は、作物の形質と特定の細菌種や土壌成分で構成されたモジュールが複数組み合わせられて織りなされるネットワークを形成していることが分かった。特に今回の解析から、作物の収量を含むモジュールは土壌中の無機態窒素を含むモジュールとは異なることが分かった。

共同研究グループは、千葉県八街市の農家が実践している有機農法に着目しました。そこでは太陽熱処理が実施されており、これまで太陽熱処理を実施した圃場（ほじょう）では、滅菌や雑草防除とともに作物の生育促進効果が認められていました。しかし、その要因については未解明でした。そこで、同じ圃場内において異なる農法、すなわち化学肥料もしくは堆肥を施肥して太陽熱処理有無の4種類の試験区を設置し、それぞれの試験区においてコマツナを栽培しました（図1-1）。

その結果、太陽熱処理（本試験では5週間実施し、毎日の土壌温度を合計すると1000℃を超えた）は、土壌設置の電位センサーから土壌物理環境を大きく変化させることが分かり、化学肥料、堆肥によらず、コマツナの収量をおよそ1.7倍に増加させることが明らかになりました。一方で、コマツナの他の形質（植物地上部の全代謝物、葉の形、光合成活性、糖度、酸度、葉の色素、病害、食味）に有意な違いは検出されなかったことから、太陽熱処理は同等の品質を維持した上で、コマツナの収量を増加させることが分かりました。また、翌年も太陽熱処理による成長促進効果が確認されました。

そこで、太陽熱処理によって農業生態系を構成する植物-微生物-土壌がどのように変化するかを捉えるために、まず作付け前および収穫時の土壌について、核磁気共鳴（NMR）法[10]による代謝物質のプロファイリングを行いました。検出された代謝物データを用いて主成分分析を行なった結果、試験区間で明確な違いが検出されたことから、物理的に異なった場所に設置した試験区であっても、4種類の異なる処理による土壌特性をそれぞれ反映していることが分かりました。しかし、アンモニア態および硝酸態窒素である無機態窒素の濃度は、太陽熱処理の有無で有意な違いはありませんでした。したがって、上述したリービッヒの無機栄養説では、今回の太陽熱処理による成長促進効果を説明できないと考えられます。

続いて、次世代シーケンサーを用いて土壌および根圏における細菌叢を解析したところ、太陽熱処理は土壌全体の細菌でなく、作物の根圏に生息する細菌の種類に大きく影響を与えていることが分かりました。そこでは門レベルでの大きな影響が確認され、デイノコックス・テルムス門やフィルミクテス門が太陽熱処理をした根圏で多くなること、特に植物の成長促進に関与する根圏細菌としてパエニバシラス属とシュードモナス属が太陽熱処理により多くなることが分かりました。これらの結果から、自然の物質循環である有機物と根圏細菌叢の相互作用が、太陽熱処理による成長促進効果に関与していることが示唆されました。

そこで、太陽熱処理に呼応する植物-微生物-土壌の複雑なネットワークについて、その「ありのままの姿」をデジタル化するために、全てのデータを統合した相関ネットワーク解析を行いました（図1-2）。その結果、農業生態系は、作物が示す特定の形質（収量や品質など）と特定の細菌種や土壌成分で構成されたモジュールが、複数組み合わせあってネットワークを形成していることが明らかになりました。このような構造は、他の生物学的な現象でよく観察されるネットワ

一クと類似の構造であり、また農業生態系における植物-微生物-土壌の異なる階層が、幾十にも複雑に相互作用していることを反映しています。

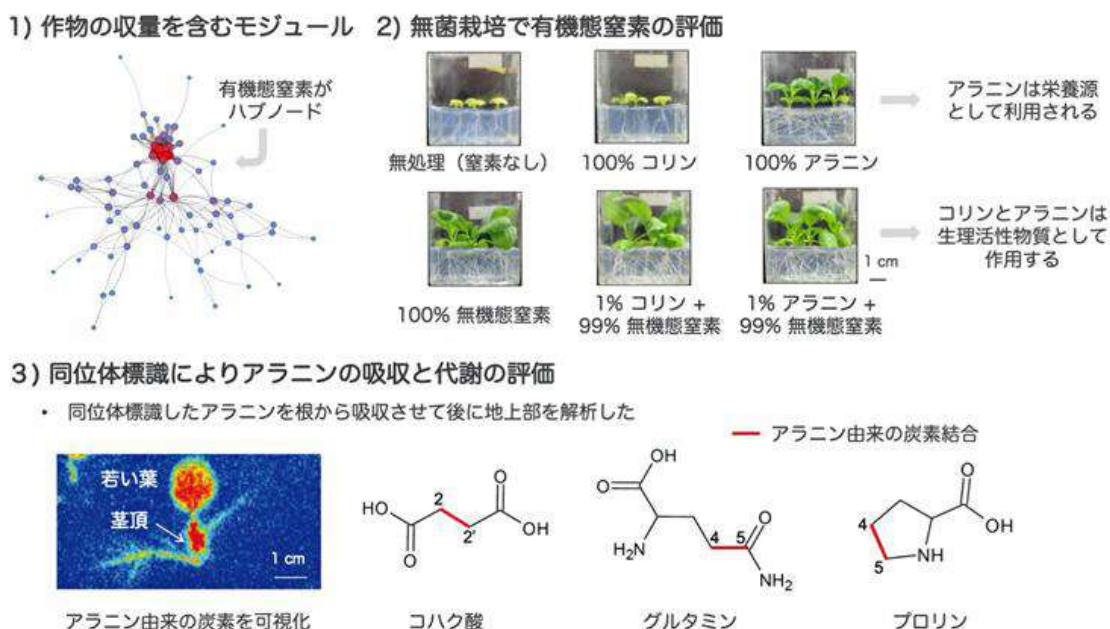


図 2 作物生育に及ぼす有機態窒素の影響

(1) 作物の収量を含むモジュールにおいて、アミノ酸などの有機態窒素がハブノードとして位置していた。(2)そこで、ハブノードであった有機態窒素の作物への影響について無菌栽培の実験系により解析したところ、アラニンが栄養源として、コリンとアラニンが生理活性物質として作物の生育に作用することが分かった。(3)さらに、同位体標識をしたアラニンの添加試験により、アラニンが根から吸収され、コハク酸、グルタミン、プロリンに代謝されていることが分かった。

さらに、作物の収量を含むモジュールには、アミノ酸などの有機態窒素や根圏細菌が含まれており、特に土壌中の有機態窒素がハブノードとして検出されました(図 2-1)。これにより、検出された有機態窒素が太陽熱処理によって誘導された有機物と根圏細菌叢の相互作用の最終産物として、植物の成長を促進させていることが示唆されました。

次に、コマツナの無菌培養系により有機態窒素の添加実験を行った結果、アミノ酸のアラニンと栄養素のコリンが、栄養源や生理活性物質として収量を増加させることが明らかになりました(図 2-2)。特にアラニンは栄養源と生理活性物質の両方として振る舞うため、実際にどのように植物に吸収され代謝されてい

るかを、炭素と窒素両方の安定同位体で標識したアラニンを使うことで調べました。その結果、コマツナが直接アラニンを吸収していることが分かり、さらに吸収されたアラニンが、コハク酸、グルタミン、プロリンと代謝されることが明らかになりました（図 2-3）。このことは、植物がアミノ酸を栄養源として直接吸収することで、無機態窒素からアミノ酸を合成する代謝エネルギーを節約できることを示唆しています。

さらに、アラニンを土壤に添加して試験を行った結果、無機態窒素と同等の収量増加が確認され、栽培期間中に土壤のアラニン濃度が低下するとともに、無機態窒素濃度が上昇することも分かりました。このことは、アラニンは土壤の中で植物に直接吸収されるとともに、無機態窒素へ分解されることを示しています。以上より、太陽熱処理により誘導された有機態窒素は、直接および間接的に栄養源として利用されながら、生理活性物質としても機能するという複雑な作用機序を示すことが明らかになりました。

論文情報

タイトル : Multi-omics analysis on an agroecosystem reveals the significant role of organic nitrogen to increase agricultural crop yield

雑誌 : 「Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) 」

DOI : 10.1073/pnas.1917259117

日本語原文

https://www.riken.jp/press/2020/20200609_2/index.html

文 JST 客観日本編集部