

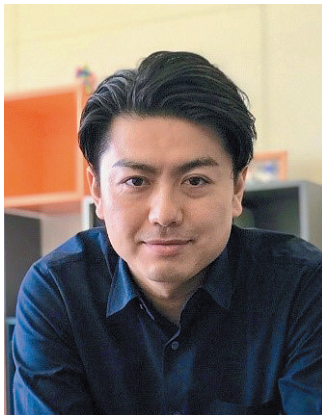
第2回 農業の持続的生産とスマート農業研究会報告

農業生態系のデジタル化について

農業の担い手の確保、耕作放棄地の活用、更なる農業総産出額の増加、国際競争力の強化など、政府は持続的な農業・食料生産の実現のため、スマート農業の普及、スマートフードチェーンの導入を進めているところです。持続可能な農業の実現を図るためには、政府による規制緩和・法整備、産官によるイノベーションの創出、農業と多様な分野との連携によるスマート農業サービスの展開、事業インフラの整備など、従来の農業の枠を超えた幅広い取り組みが必要であると考えられます。当財団では、2020年度から農業の持続的生産とスマート農業研究会（座長：生源寺眞一 福島大学教授・食農学類長）を立ち上げて、変貌していく農業について研究をすすめています。

本レポートは、第2回研究会（2021年3月31日開催）でのご講演「農業生態系のデジタル化」を元に、講師の理化学研究所の市橋泰範チームリーダー、福島大学の二瓶直登准教授、株式会社前川総合研究所の篠崎聡社長にその概要を執筆いただいたものです。

理化学研究所バイオリソース研究センター
チームリーダー 市橋 泰範



2010年 東京大学 博士課程修了 理学博士
2010年 University of California Davis 研究員
2014年 理化学研究所基礎科学特別研究員
2016年 科学技術振興機構さきがけ研究者
2018年 理化学研究所チームリーダー

専門：植物生理、植物微生物相互作用

福島大学農学群食農学類
准教授 二瓶 直登



1998年 福島県 入庁
2009年 東京大学博士課程修了農学博士
2013年 東京大学大学院農学生命科学研究科准教授
2020年 福島大学食農学部 准教授

専門：植物栄養学、放射線環境工学

株式会社前川総合研究所
代表取締役社長 篠崎 聡



1989年 東京農工大学大学院工学研究科修了
1991年 株式会社前川製作所入社
2000年 株式会社前川製作所技術研究所植物工学研究グループリーダー
2007年 理化学研究所植物微生物共生機能研究チームリーダー（出向）
2012年 株式会社前川製作所企業化推進機構リーダー
2014年 株式会社前川総合研究所代表取締役現職

専門：植物微生物相互作用

1. 緒言

人類は緑の革命により人口増加を支える食糧供給を実現した一方、農地への過剰な施肥により農業由来窒素による環境汚染や土壌の劣化など、大量生産・大量消費・大量廃棄型社会の弊害が表出している。加えてリン鉱石の枯渇傾向等のため、安心・安全な食料生産を維持した上で農地への適正な施肥を実現する持続可能な循環型農業が求められている。2050年に世界人口は98億人に達するとされるものの、これだけの人口を維持するには、世界の食料生産を2005～2007年の平均水準に比べ、70%増加させる必要がある。しかしながら、国連食糧農業機関の報告によると世界の土壌の4分の1が「著しく劣化している」とされ、持続的な食料生産が脅かされている。またバイオエコノミーの拡大と関連産業の競争力強化が求められる中、食やものづくり等への作物やバイオマスの利用に向けた議論は活発なもの、それらを持続的に生産するための資源循環についての取組みは十分ではない。そのためバイオエコノミーによる持続可能な成長社会の実現や国連が掲げる「持続可能な開発目標（SDGs）」の達成に向け、資源循環プロセスの中でいかに土壌の豊かさを維持しつつ新たな原料や食料となるバイオマスを持続的に生産していくかは重要な課題である。

また国内の農業に目を向けると、過疎化や少子高齢化等により農家の後継者不足が深刻化している。例えば、1965年と2016年の農業人口を比較すると、566万人から192万人へと66%も減少している。さらに、1965年では73%あった食料自給率（カロリーベース）は2018年では37%に減少している。この問題の主な原因として、多くの優秀な農家が勘や経験に基づく主観的な農業を行っており、次世代へ技術の継承が困難なため新規就農者が定着しづらいといった負のサイクルの結果、農業人口が減少してしまう。そのため新規就農者の定着に向けて、高い生産性を実現する生産技術の開発、農作物の高付加価値化、および就農する地域の自然環境等を活かした農産物のブランディン

グなどを行うことが重要である。

一方、農作物の栽培環境は、植物-微生物-土壌の複雑な相互作用で成り立っており、本稿ではこの相互作用を「農業環境」と定義する。特に土壌微生物は植物残渣や堆肥等のバイオマスを分解し、その含有成分を植物が利用可能な形態に変化させるなど作物の生産には欠かせない役割を担うが、作物生育を阻害する種類もあり、微生物叢のバランスが重要である。このように農業環境は植物-微生物-土壌の各階層が絡み合う生態系の上に成り立っているが、土壌の無機成分や培養可能な微生物を評価するこれまでの各階層での単独解析のみでは農業環境の実態を部分的にししか解明できず、農業環境を生態系として理解するには技術的に困難であった。この問題解決には、近年の解析技術の進展により可能となった微生物や代謝物の一斉解析を活用した圃場レベルでの植物-微生物-土壌に関するマルチオミクス解析が利用できる。

そこで本稿では、まずマルチオミクス解析の概要と農業生態系のデジタル化に関する研究事例を紹介する。続いて、本研究から重要性が明らかになった土壌中の有機態窒素および植物共生微生物に関する知見をそれぞれ紹介する。最後に筆者らが取り組んでいる研究開発を紹介しながら、データ駆動による次世代型の農業イノベーションを実現する未来ビジョンを共有したい。

2. マルチオミクス解析による農業生態系のデジタル化

(1) マルチオミクス解析について

農業現場における植物-微生物-土壌の各階層の構成要素を網羅的に解析する技術の一つにオミクス解析がある。上記したように、オミクス解析には、微生物叢を対象としたマイクロバイーム解析、発現遺伝子を対象としたトランスクリプトーム解析、代謝物を対象としたメタボローム解析等があり、解析対象に応じて異なる分析技術や計測機器が用いられている。例えば、マイクロバイオー

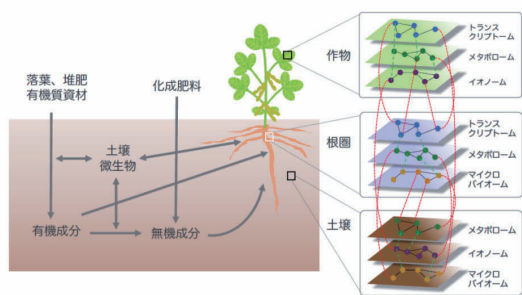


図1 マルチオミクス解析の概要

農業現場では、作物や微生物、土壌内における発現遺伝子や代謝物などの各要素が複雑に絡み合い、極めて複雑な農業生態系を形成している。マイクロバイオーム解析やメタボローム解析などの個別のオミクス技術を統合したマルチオミクス解析は、農業生態系の全容を解き明かし、ありのままの姿を可視化できる。

ム解析やトランスクリプトーム解析では、ここ10年ほどで急速に普及した次世代シーケンサーが一般的に利用されており、シーケンシング技術の進歩に伴い短時間で大量の塩基配列を解読することができる。このため、マイクロバイオーム解析では微生物叢の種類や存在量を、トランスクリプトーム解析では発現している遺伝子群の情報をビッグデータとして取得することができ、総合的に評価することが可能になった。一方、メタボローム解析では、質量分析（MS）装置や核磁気共鳴（NMR）装置などが利用されており、生体内に含まれる低分子化合物を定性的および定量的に評価することができる。

農業現場では、微生物や発現遺伝子、代謝物などの各構成要素が複雑に絡み合い、極めて複雑な農業生態系を形成している。この複雑な生態系の全容を解き明かすためには、複数のオミクス解析によって得られた情報や各構成要素同士の相互関係などを統合的に解析する必要がある。このような解析アプローチはマルチオミクス解析と呼ばれており、農業生態系内で生じている現象を包括的に調べることができる（図1）。

（2）マルチオミクス解析による農業現場への適用例

筆者らが行ったマルチオミクス解析を用いた研究事例として、有機農法で用いられる土壌の太陽

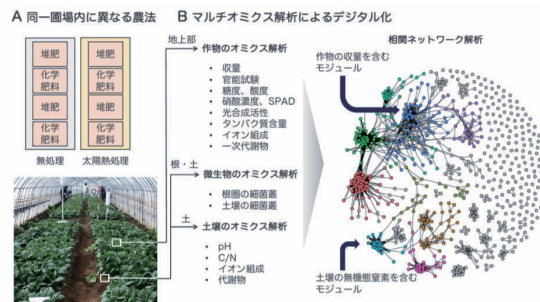


図2 農業生態系のデジタル化の研究事例

A) 異なる農法によりコマツナを栽培した圃場試験。B) 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。

熱処理を対象とした研究を紹介する（Ichihashi et al., PNAS 117(25): 14552-14560, 2020）。太陽熱処理とは、耕起した畑をビニールマルチで数十日間覆うことで、土壌中の病害虫や雑草種子を死滅させ、農薬を使わずに良好に土壌環境を維持できる手法として知られている。これまで、太陽熱処理を実施した圃場では、滅菌や雑草防除と共に、作物の生育促進効果が認められていたが、その要因については未解明であった。

筆者らは太陽熱処理後の圃場における生育促進効果を解明すべく、千葉県八街市の農家と共に太陽熱処理を実施した圃場でコマツナを栽培し、品質を維持した上で収量が増加することを確認した。具体的にはコマツナの収量に加え、コマツナの糖度、酸度、硝酸濃度、葉色（SPAD）値、タンパク質含量、イオン組成、および一次代謝物、土壌におけるpH、炭素／窒素比（C/N比）、イオン組成の他、主要な代謝物のメタボローム解析、非根圏および根圏土壌に存在する全細菌のマイクロバイオーム解析により合計395測定項目について、太陽熱処理の有無と、化学肥料・有機肥料の違いについて評価した。その結果、農業生態系は作物が示す特定の形質、すなわち収量や品質等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たネットワークを形成していることを世界で初めて明らかにした（図2）。

明らかにしたネットワークの情報から、作物の

収量を含むモジュール（測定項目の集合）に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（他の測定項目と多く関係性をもつ測定項目）として検出された。このことから、解析対象とした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判明した。さらに無菌培養系と同位体ラベルを用いた試験により、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を証明した。

マルチオミクス解析を用いたデジタル化技術により農業生態系を総合的に評価することで、有限な鉱物資源を原料とした化学肥料に頼らず、有機態窒素や植物共生微生物を活用して持続可能な食料生産が可能であることが示唆された。そこで次節3.と4.にて、マルチオミクス解析で明らかになった現象の意味について土壌有機態窒素および植物共生微生物に関する知見をそれぞれ紹介する。

3. 土壌有機態窒素の作物生育の影響

(1) 植物栄養と無機栄養説

植物体内に存在する元素のうち、植物の生活環になくなくてはならない、かつ他の元素で代替がきかない元素は必須元素と呼ばれ、植物では17元素ある（動物は28元素）。炭素と酸素は光合成により葉の気孔から二酸化炭素として吸収され、水素は酸素とともに水として根から吸収される。残りの14元素は主に土壌溶液から吸収されている（図3）。必須元素のうち窒素、リン、カリウムは三大必須元素に分類され、一般的に窒素は葉肥、リンは実肥、カリウムは根肥と言われるなど、各元

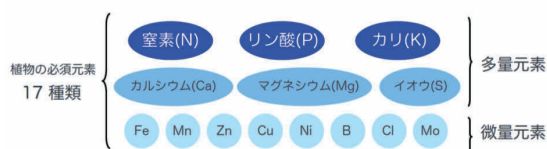


図3 作物の必須元素

素は生育に関しての役割が明確である。これらの元素は自然界では植物－土壌間で循環しているが、農業においては人が食料として子実、果実、葉などの生産物を収穫し、圃場の外に持ち出すため、農業環境では元素の収支がマイナスとなる。そのため、食料生産を継続的に維持するには、人が食料として収穫した分の元素を圃場へ補給しなければならない。18世紀までは補給される資材として人畜の糞尿、山野草、落葉、腐葉土、海藻など自給できるものを施用していた。1840年、ドイツのリービヒによって「植物は太陽の光エネルギーを利用して大気中の二酸化炭素と土壌中の無機養分（窒素であれば、硝酸、アンモニア）を吸収して生育する、すなわち植物の栄養は動物のように有機物に依存しない」という内容を含む無機栄養説が提唱された。無機栄養説は農業に対し有機物にかわる新しい資源の利用を喚起することとなり、1910年にハーバーとボッシュは空中窒素に高温高圧の下水素を反応させてアンモニアを製造する技術を開発した。18世紀後半からヨーロッパの産業革命により工業化が推進され都市に人口が集中すると、従前の自給肥料だけでは増大する食料需給を満たせない背景もあり空中窒素固定を可能にしたハーバー・ボッシュ法は、化学肥料時代の基盤を作る大きな役割を果たし、ハーバーとボッシュはともにノーベル賞を受賞した。土壌肥沃度が低い圃場での化学肥料の効果は絶大であり食料増産に大きく寄与したが、化学肥料は従来の有機肥料に比べて有効成分の濃度が高く、施用効果が現れやすいため、生産性向上を求めるあまり作物が必要とする量以上に施肥する傾向にある。結果として、土壌を荒廃させ、水系や作物を汚染する環境負荷が問題となり、ひいては人間の健康を脅かすなども問題が生じて化学肥料が非難されることになり、堆肥等の有機質資材を活用した持続型農業が再度着目されている。

(2) アミノ酸と作物生育

リービヒの無機栄養説以来、植物は元素を無機態で吸収すると考えられてきたが、生育を最も

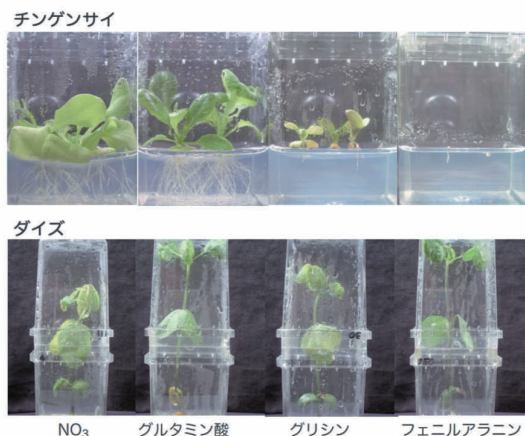


図4 アミノ酸の植物生育への影響

窒素形態を変えて無菌栽培した作物（チンゲンサイとダイズ）の生育（窒素濃度は全て5 mM）

左右する窒素成分について考えても、土壌中には硝酸、アンモニアなどの無機態窒素以外にアミノ酸やタンパク質等の様々な有機態窒素も存在する。しかし、植物生育に及ぼす有機態成分の研究については、有機成分はその形態が多数ありターゲットが絞られていなかったこと、解析機器が十分でなかったことから、実際の栽培の場でどの有機成分の効果があるか、無機態成分と比べると研究事例が非常に少ない。近年、水耕や無菌栽培等の限られた条件で試験が行われ、植物生育に関する有機成分の機能が徐々にではあるが評価されてきている。著者らはタンパク質を構成する20種類のアミノ酸を個別に作物（イネ、コムギ、ダイズ、コマツナ、キュウリ）へ与えて生育の影響を検討したところ、作物の種類やアミノ酸の種類によって生育への影響が異なった（図4）。一部のアミノ酸では、無機態窒素を窒素源とした場合より根系の発達（側根の形成、根長の促進）が見られ、地上の生育もよくなったが、アミノ酸の種類によっては、根系が伸長せず、無窒素で栽培したより生長せず、生育を阻害するものも見られた。また、アミノ酸をアミノ酸として作物は吸収するのかを明らかにするために、アミノ酸を構成する炭素と窒素の安定同位体（ ^{13}C 、 ^{15}N ）で標識したアミノ酸を用いた試験を行った。その結果、地下部、地上部のどちらでも、標識したアミノ酸が確認さ

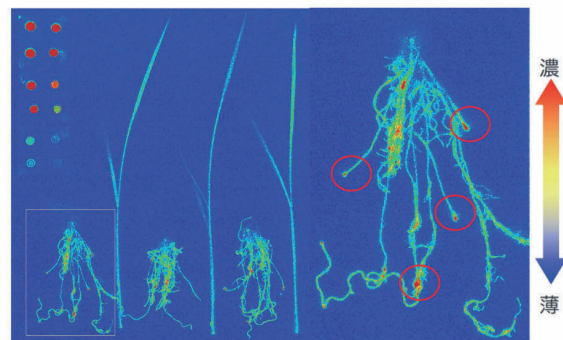


図5 アミノ酸由来の炭素の可視化

^{14}C -グルタミンを吸収したイネ体内の ^{14}C 分布

れ、作物がアミノ酸を直接吸収していることが分った。無機態窒素と有機態窒素（アミノ酸）の植物にとっての利用上の違いとしては、アミノ酸態窒素の吸収は無機態窒素より遅いが、吸収した窒素量のうち無機態窒素は地上部へすぐに移行する割合が多いのに対し、アミノ酸態窒素は地下部での利用割合（特に根端）が多かった。これは放射性同位体（ ^{14}C ）を用いた試験でも確認された（図5）。アミノ酸は窒素と光合成産物の炭水化物を含んでいるため、日照不足等環境下では無機態窒素を吸収するより生育阻害を抑制する効果があるのではないかと考えており、今後更なる試験を重ねたい。一方、アミノ酸間同士の生育への影響の違いは、作物体内でのアミノ酸の生合成の順番に依存すると想定している。つまり、生育を促進するアミノ酸は、アミノ酸合成の上流に位置するアミノ酸に多く、そのアミノ酸が植物体内へ取り込まれると下流の生合成経路へと移行し必要なアミノ酸に作り変えられるため、生育促進を考えると考えられる。それに対し、生育を阻害するアミノ酸は、アミノ酸合成の下流に位置するものが多く、そのアミノ酸を取り込んでも他のアミノ酸への生合成にはつながらず、吸収したアミノ酸のまま蓄積され、逆に生育を阻害すると考えている。

上記の結果以外の研究も多数報告されており、植物は無機態成分だけでなく有機成分も吸収、利用していることは実験室内の実験では明確である。実際の圃場でのアミノ酸の作物生育への寄与については圃場の複雑性から困難を極めていたが、

2. (2) に記載されているようにマルチオミクス解析により徐々に明らかにされている。今後、環境共存型の持続的な作物生産の実現に向け、無機態、有機成分および土壌微生物との相互作用も含めた農業生態系全体での養分動態の理解がますます重要になるであろう。

4. 微生物資材とビジネス

(1) エンドファイト

エンドファイトは植物の病虫害抵抗性を誘導

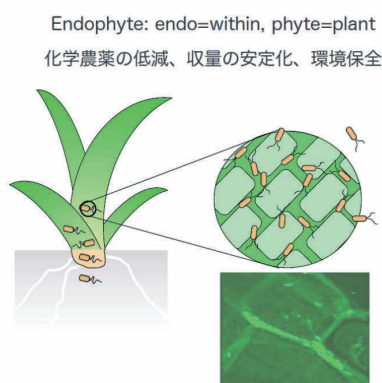


図6 エンドファイト

本章では、筆者らが進めた植物と微生物の相互作用を活用したビジネス展開について紹介する。植物には、多くの微生物が共生しているが、その機能はほとんど解明されていない。エンドファイト (endophyte) とは、endo (内側) と phyte (植物) の合成語であり、植物に内生する微生物のことである (図6)。旧来は、イネ科植物に共生する糸状菌が主な研究対象であった。糸状菌エンドファイトが共生した植物は、耐病性、耐虫性などが向上する機能がある一方で、家畜に対しては毒性があることも報告されている。糸状菌が産生するアルカロイドが原因とされ、現在では家畜に対する毒性のないアルカロイドを産生する糸状菌が選抜されている。

植物は病原菌等から身を守るために、防御作用を備えており、これをかいくぐった特定の細菌エンドファイトが共生している。ヒトにおける腸内細菌をイメージしていただくと理解しやすいと思

われる。また、細菌エンドファイトについては、糸状菌エンドファイトのアルカロイドなどの問題は報告されておらず、筆者らは、全国各地で植物を採集し、共生している細菌エンドファイトを分離し特定してきた。分離された細菌エンドファイトを栽培イネ品種に接種し、イネの生長促進、耐虫性、耐病性などを評価して、有用な細菌エンドファイトを選抜してきた。ある細菌エンドファイトは、イネの害虫であるコブノメイガに対する抵抗性を有していた。コブノメイガへの殺虫効果はないが、摂食を阻害する効果が認められた。また、いもち病への抵抗性を付与する細菌エンドファイトも確認された。さらに、細菌エンドファイトを接種したイネは、初期成育の向上効果が観察された。

細菌エンドファイトによる病虫害抵抗性の発現

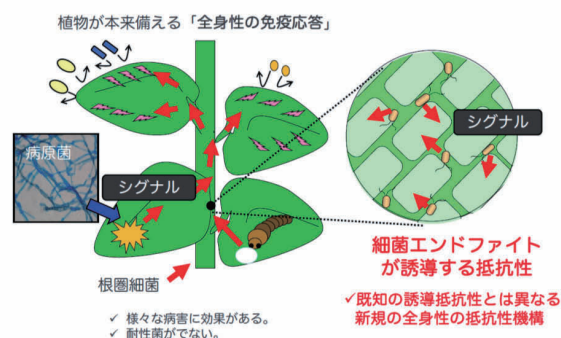


図7 細菌エンドファイトの植物免疫への影響

このような現象のメカニズムは、当時は全く研究されておらず、理化学研究所に企業との連携チームを設立して、研究開発を実施し、誘導抵抗性が関与していることを突き止めた (図7)。植物と微生物の相互作用を活用した技術は、当時はオリジナリティが高く、日本が先導できる技術であると考えられる。

このように、エンドファイトを接種したイネは、病虫害抵抗性や生長促進などの機能が付与されることから、農林水産省や経済産業省のプロジェクトとして、エンドファイトの製剤化など、製品化を進めると同時に、北海道などの現場での大規模実証を進めた。当初、生物農薬として登録する準

イネ用エンドファイト資材「イネファイター」

- ✓ *Azospirillum*属細菌農業用資材
- ✓ イネの免疫機能の活性化
- ✓ 元気に生育し、収量増加も期待



図8 エンドファイト資材、イネファイター

備を検討したが、農業現場での実証により害虫の摂食抑制効果はあっても殺虫効果はないなどの結果から、農業資材のカテゴリーでの登録を選択した。このイネ用のエンドファイト資材は、「イネファイター」として上市し、現在は北海道から九州までのエリアで販売している（図8）。

(2) 化学農薬・肥料とバイオスティミュラント

日本では、農薬は農薬取締法、肥料は新肥料法が整備され、適切な管理がなされている。改正された新肥料法では、化学肥料と有機肥料の配合が可能となり、土壌の地力増進を目指した施肥が可能となってきた。日本では、化学農薬の出荷額は3,000億円、化学肥料も3,000億円規模の大きな市場である。世界的には、化学農薬の市場は2,500億ドル規模に達している。生物農薬やバイオ肥料の市場はまだ小さいが、急激に増加してきている（図9）。

日本の化学農薬、化学肥料の現状

- ✓ 化学農薬の出荷額（日本） 3,300 億円（農薬取締法）
- ✓ 化学肥料の出荷額（日本） 3,200 億円（新肥料法）
- ✓ 日本の農業施肥量（畑地） 13 kg / ヘクタール
- ✓ 欧州の使用量（英、仏、独等） 3 kg / ヘクタール
- ✓ 日本の農業における投入費用に占める農薬のウエイト：11%（畑作）

【参 考】世界の農業資材の動向

- 生物農薬の出荷額 16億ドル（年成長率 16%）
- バイオ肥料の出荷額 5億ドル（年成長率 16%）*成長のトレンド
- 化学農薬市場：2,500億ドル（CRDS2016レポートより）

図9 化学農薬と化学肥料の現状

世界的な動向として、持続可能な農業を目指した体系作りが急務となっている。持続可能な農業として、有機農業が注目されている。現状の有機農業は、科学的なエビデンスが乏しく、技術や技能が「見える化」されていないケースが多い。現在の農業、いわゆる慣行農法では、化学肥料や化学農薬の使用を前提とした体系が基盤となっており、これを有機肥料や生物資材の使用を基盤としたシステムへのシフトが必要となる。今後、持続可能な農業を推進するには、堆肥などの有機肥料や微生物資材の施用方法や効果について、エビデンスに基づいた施用体系が不可欠である。また、農林水産省が今年5月に発表した「みどりの食料システム戦略」の中で、農業におけるカーボンニュートラルの方針が示された通り、環境負荷を低減できる農法、資材、システムの研究開発も非常に重要である。

欧州や米国では、バイオスティミュラントが注目されている。従来の栽培では、育種や植物栄養、病虫害や雑草の防除といったアプローチで収量の増加や品質の向上を目指してきた。バイオスティミュラントは、これとは異なり、植物に対する非生物的なストレスを制御することで気候や土壌などのストレスを軽減し、本来植物が有している能力を最大限に発揮させる技術である。現在は、バイオスティミュラントとして、化学的資材、微生物的資材、土壌改良剤などが注目され、欧州では化学農薬や肥料などのカテゴリーに加えられている。バイオスティミュラントを活用するには、植物、微生物、土壌のマルチオミクス解析は、非常に重要なツールであり、現状の相互作用を「見える化」することで、対処方法としてソリューションを提供することができるようになる。日本では、日本バイオスティミュラント協議会が発足し、普及活動が行われている。また、筆者らは後述される「植物微生物シンバイオロジー協議会」にて、部門横断的に科学的なエビデンスや情報を意見交換できる場を創設している。

（3）海外動向とバイオエコノミー

海外ではバイオエコノミーが形成され、多くのスタートアップ企業が誕生している。米国ノースカロライナ州のIndigo Ag社は植物共生菌40,000系統についてゲノム解析し、データと圃場での収量についてAI解析し、ムギやトウモロコシなどの作物の収量増加に関する微生物の予測と選抜を行っている。さらに、有用な微生物を種子にコーティングし、付加価値のある種苗ビジネスを目指している。また、米国カリフォルニア州のPIVOT BIO社では、植物に共生して、窒素固定能力が高い微生物を活用して、収量の増加に貢献する技術開発を行っている。また、Monsanto（現Bayer）とNovozymesは、Bio Ag Alliance を提携し、米国内の土壌分析、微生物の探索調査を行い、有用な微生物を活用した種苗ビジネスを行っており、5億エーカーの農地への普及を目指している。このように、バイオとAI技術の融合による新規のビジネスモデルが構築され始めている。

近年、農業分野における環境配慮が大きなウェイトを占めている。食料問題と持続可能な農業のバランスは非常に重要な課題である。欧州では、農場から食卓まで（Farm to Fork）としてサステナブルな食料システムの構築を目指している。2020年に欧州委員会により、EU各国にリリースされた。ここでは、持続可能な食料生産、持続可能な食品加工と流通、フードロスの抑制を目指している。このような世界的な動向の中で、ESG（Environment, Social, Governance）投資などが活発になっており、持続可能な農業システムは注目されている。また、日本では前出の通り「みどりの食料システム戦略」が公開され、今後具体的な研究開発や法整備が行われる。

また、企業においてはCSR（Corporate Social Responsibility）調達として、環境配慮された原料、製造方法、機器、輸送システム、エネルギーなどが対象とされ始めている。現状は、再生可能なエネルギーが中心であるが、環境配慮したグリーン調達でないと取引できない状況が想定される。CSR調達の認証制度は複数の機関があり、企業

や事業所としての認証を受けることが要求される。食品産業分野でも、持続可能な農産物が調達の対象になる可能性がある。さらには、海外との貿易においても障壁となる可能性も考えられる。持続可能な農業へのシフトは、大きなビジネスチャンスであり、今後の研究開発は重要性を増してきている。

5. 次世代型の農業イノベーションに向けて

（1）内閣府SIP課題での研究活動

最後に筆者らが取り組んでいる研究開発を紹介し、次世代型の農業イノベーションを実現する未来ビジョンを共有したい。著者らが2018～2020年度で取り組んできた、内閣府・生物系特定産業技術研究支援センター・SIP戦略的イノベーション創造プログラム（スマートバイオ産業・農業基盤技術）の課題「持続可能な循環型社会を実現する「農業環境エンジニアリングシステム」の開発」について紹介する。

本課題では、持続可能な農業を実現する上で最も重要だとされる土作りについて、今まで全くのブラックボックスであった土の中を見える化し、エンジニアリングすることを可能とするイノベーション基盤である「農業環境エンジニアリングシステム」の骨子を開発することを目標として活動してきた。農業環境エンジニアリングシステム開発におけるキーテクノロジーであるマルチオミクス解析技術の作物オミクス解析・微生物オミクス解析・土壌オミクス解析について農業現場で実施できる高精度かつハイスループットな手法を確立し、本技術を用いてダイズおよびコマツナを対象とする圃場試験を行った。本圃場試験では、参画民間企業が開発した農業資材・営農法等の13のシーズ農業技術について試験した。

その一部の成果として、2.（2）ですでに紹介したマルチオミクス解析を利用して農業生態系のデジタル化に成功した。また取得したビックデータについてより詳細な解析を進めており、ニュー

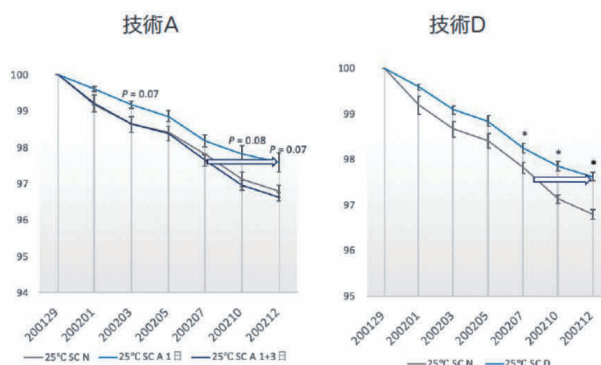
A コマツナ葉のセシウム蓄積を抑える技術



B ダイズ圃場の湿害を大幅に軽減する技術



C レタスの鮮度保持を向上させる技術



Welch's t 検定 vs 無処理区
($P < 0.01$)
生鮮野菜の商品価値範囲
($> 95\%$)

図10 SIP研究成果の一部

収量増加や作物生育といったこれまでに市場にある効果を発揮することに加えて、セシウム吸収を抑制する技術（A）、湿害を大幅に軽減する技術（B）、鮮度保持を向上させる技術（C）の例。地域や市場のニーズに合わせた作物生産につながる農業環境エンジニアリングのツールとしての活用が期待できる。

ラルネットワークを使った圃場データのノイズ補正や因果推論等の最新インフォマティクス手法を導入して、より強力な解析パイプラインの実装を進めた。これまでに非破壊モニタリングデータを入れた統合解析により、水分およびEC（電気伝導率：土壌の肥瘦の指標）センサーによる時系列データの標準偏差と作物生育に関する測定項目に相関関係があることがわかっており、土壌環境の安定性と作物生育の新しい関係性が示唆され、作物生育のモニタリングの有効な指標になることが期待される。

また各社のシーズ農業技術13種について技術毎に31～278項目で慣行農法に比べて有意差（ $P < 0.05$ ）が検出された。これらの測定項目は収量増加や作物生育といったこれまでに市場にある効果を発揮することに加えて、セシウム吸収を抑制する技術、湿害を大幅に軽減する技術、鮮度保持を向上させる技術（特許出願済み）等があることを見出しており、地域や市場のニーズに合わせた作物生産につながる農業環境エンジニアリングのツールとしての活用が期待される（図10）。

（2）植物微生物シンバオロジー協議会の形成

筆者らは上記のSIPの研究活動等を通して、植物と共生する微生物の重要性を認識し、植物微生物学をより強く推進していくためには産学官の連携が必須だと考えるに至った。そこで、本研究分野をけん引する有識者14名の発起人により省庁の垣根が無い体制の「植物微生物シンバオロジー協議会」を設立した。本協議会では植物微生物学分野における産学官の交流の場を提供し、植物微生物研究から開発される農業技術・資材の認証制度の整備や新規市場の開拓を進めることを目的としている。

その活動の一環としてこれまでに、植物微生物学の2030年に向けたロードマップを議論してきた（図11）。この議論により本分野の解決すべき課題を抽出でき、人類が持続可能な農業を実現する解決策として、従来の植物科学や農学には無い新たな切り口を本分野が提供することを確認した。また日本微生物生態学会と日本植物生理学会の初の共催シンポジウム「植物微生物研究で共創する未来」を企画し、アグリバイオ誌2021年1月号にて

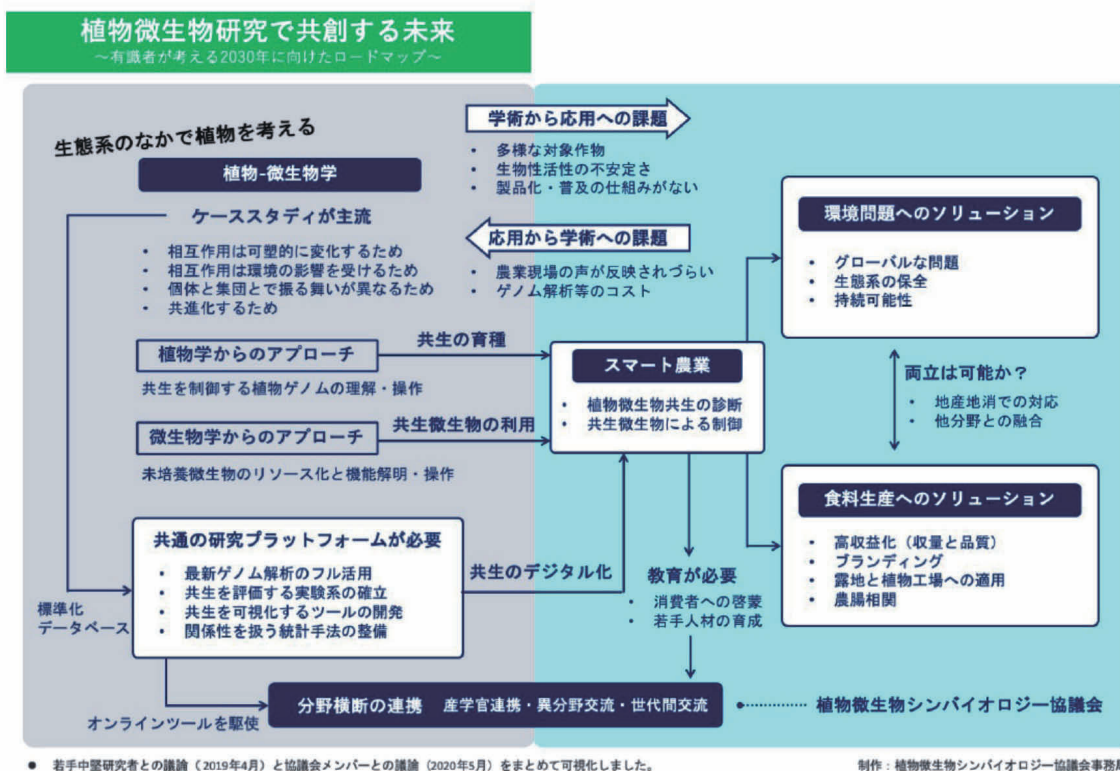


図11 植物微生物研究で共創する未来

日本の植物微生物学を担う新進気鋭の研究者とともに特集を発表した。

(3) 内閣府ムーンショット課題での研究活動

SIP課題で構築した研究体制は、2020年度から内閣府・生物系特定産業技術研究支援センター・ムーンショット型農林水産研究開発事業の課題「^{びせいぶつそう}土壤微生物叢アトラスに基づいた環境制御による循環型協生農業プラットフォーム構築」に移行し、農業環境エンジニアリングシステムの本格的な開発に着手している。

これまでの知見を合わせて、農業環境エンジニアリングシステムを「収穫時期までの気象予測とその土地の土壤データを入力して、作物の収量や品質、さらに環境負荷を自由に選択でき、その実現に最適な栽培管理法を出力させることで、作付けの意思決定をサポートするシステム」と定義して、デジタル化情報を活用してサイバー空間で農業をシミュレーションするシステムを開発する(図12)。本システムを用いることで、それぞれの土地で安定した収量・品質の作物をオーダーメイ



図12 ムーンショット研究課題の概要

農業を取り巻く環境である農業生態系をデジタル化してサイバー空間でエンジニアリングする「農業環境エンジニアリングシステム」を開発し、国内外で事業化および産業化することを目指す。

ド生産することを可能とし、高収益化とともに完全資源循環を実現することが期待される。

本研究課題では、1) さまざまな環境条件からのデジタルデータを大規模に取得し、2) システムの骨格となる気象-土壤環境-作物生育の統合モ

デルを構築する。加えて、システムから予測された最適な栽培管理法をフィジカル空間で実現するために、3) 農業環境のエンジニアリングツールとして化学肥料に頼らず生物機能を活用した栽培技術の開発を進める。具体的には、ダイズを対象作物として国内にモデル圃場^{ほじょう}を6地点設置し、それぞれの地域および環境における施肥の違いのデジタルデータを取得する。特に福島県郡山市ではメインモデル圃場^{ほじょう}として、施肥の違いに加えて、播種^{はくしゅ}時期、栽植密度、品種の違いについてデータを取得しながら、エンジニアリングツールとしての新規の栽培技術の開発を進める。加えて、農林水産省生産局が進める「土づくりコンソーシアム」および統計部が進める「農地の区画情報（筆ポリゴン）」と連携のもと都道府県の農業試験場の協力を得ながら、全国^{ほじょう}の圃場を対象にデジタルデータを取得する計画である。さらにシステムの統合モデルを構築するために情報系研究者が集まるハッカソンを企画して、既知の構成モデルの統合手法ならびにマルチオミクス解析のデジタルデータの統合手法を検討している。以上の課題の実施を通して、前半5年間でシステムのプロトタイプを開発し、後半5年間でシステムの実証試験を行う計画で進めている。

(4) 未来ビジョン

近年スマート農業として自動走行トラクターや農業用ドローン等の技術開発が盛んに行われており、多くのIT企業がアグリビジネスに参入している。また農林水産省においても農業データ連携基盤（WAGRI）や土づくりコンソーシアムが立ち上がり、筆ポリゴンIDによる農地管理が進められる等、バイオ戦略で掲げられている世界最先端のバイオエコノミー社会の実現を目指して、様々な情報を一元的に集約して管理することで日本が抱える少子高齢化と国内自給率の低迷の問題に対処する地盤を整えている。加えて、内閣府ムーンショット型研究開発制度や宇宙の食の課題解決を目指した産学官連携「SPACE FOODSPHERE」等が始まり、今まさに農業という一次産業が大き

な変革を遂げようとしている。

しなしながら、国外に目を向けると日本の基礎研究やアグリ産業の存在感の低下は否めない。欧米においてはすでにセンサーやドローン等を駆使してデータを収集し、生産技術の向上に活用している。また前述したように、国外大手種苗会社は育種だけでなく土壌生物性に着目してビジネスに取り組み、産学官連携の大型プロジェクトも進んでいる。2020年以降の新型コロナウイルス感染症の流行により、国外からの輸入に頼った日本の食の危うさを多くの日本人が感じたことであろう。今まさに日本人は日本の食を支える農業を見つめ直す必要に迫られている。

そこで、筆者らが考案する農業環境エンジニアリングシステムが開発されれば、農業生産者にとって所有する農地を科学的に評価し個別の経営方針に沿った作物生産の計画を実行に移すことが可能になり、農作物の高付加価値化や地域の自然環境等を活かした農産物のブランディング等に利用できるだろう。またメーカー企業にとって、科学的エビデンスに基づいて精密かつ効率よく農業技術を開発することができるため、農業関連以外の企業でも比較的容易に農業セクターへ参入することが可能となるだろう。さらに農業政策にとって、農地の様々な情報をデジタルデータ化して解析することで、その中から取得すべき測定項目を特定することができ、農地が潜在的に持つ地力を正確に定量化することにより、持続可能な地域資源利用を国策として実行することができるだろう。以上のように、農業環境エンジニアリングシステムに基づいた新しい農業活動へのシフトは、環境共存型の持続的な作物生産の実現に大きく貢献が期待され、世界のバイオエコノミーで通用する日本イノベーションが生まれると信じている。

今回の第2回「農業の持続的生産とスマート農業」研究会では、本システムの有用性について社会科学的見地から議論することができた。まず本システムがスケールニュートラルであることを座長・生源寺教授（福島大学農学群 食農学類長）からご指摘いただき、これまでのスマート農業の

技術とは異なり、大規模農業だけでなく小規模農業にも適用可能である強みを抽出することができた。加えて、インプットデータの更新により、日本のみならずアジアやアフリカ等の国外への適用も可能であること、さらには竹下准教授（名古屋大学大学院生命農学研究科）から地球温暖化への対応や農村・地域への貢献等にも適用可能性を追求すべきであることをご助言いただいた。さらに生源寺教授から、研究開発におけるサプライサイドからの発案とデマンドサイドからの要請のバランスが重要であること、本課題で開発をするシステムが前者に偏らないようにすることをご指摘いただいた。そこで本研究会の後、著者らは実際に対象作物であるダイズの農業経済に詳しい専門家からのヒアリングを通して、本システムの構成モデルにダイズの国内市場の動きを組み込むことを検討している。最後に、石井所長（株式会社共同通信社アグリラボ）および松田教授（三重大学副学長 伊勢志摩サテライト長）から、本研究課題のようなデータ駆動型の技術が開発されることで、日本農業における政策と現場のギャップを埋めることが期待されると伺い、筆者らは研究に邁進する決意をあらたにさせていただいた。