

## 項目 1 :

### 土壤マイクロバイームアトラス

主たる実施者： 竹山春子（早稲田大学 教授）

キーワード： 土壤微生物, 土壤健康度, 土壤微生物叢アトラス, シングルセル解析, 循環型協生農業, 未来型食料生産

## 研究背景と達成目標

### 研究開発テーマの背景と必要性

農業生産における化学肥料・農薬を極力削減し、持続的な生産技術基盤を構築することが求められています。そのためには、土壤微生物の機能を解明し、それを最大限活かした作物生産システムを構築することが有効です。

### 技術開発目標

環境負荷の少ない循環型の農業の実現に向け、2030年までに、これまでブラックボックスとされてきた土壤の生物因子に着目して、作物が健康に育つために必要な微生物を特定し、土壤環境の改良に資する有用微生物および微生物を担持した資材を開発します。

## 主な研究成果

- ① 全国から収集した農業土壤を対象に、生物因子を主体とする土壤データ（細菌叢データ、メタゲノム、シングルセルゲノム、培養株ゲノム等）と解析ツールを組み込んだ機能的データベース「農業土壤微生物叢アトラス」を作成・公開しました。また、これを用いてダイズの生育を促進する有用な微生物の組み合わせを同定しました。
- ② 生物因子を活用した「土壤健康度」を、機械学習によって評価する基本プロトコルを策定しました。さらに、化学肥料の代替が可能なりサイクルリン資材を開発するとともに、ダイズの生育促進効果を示す微生物株を獲得しました。
- ③ 複数微生物の共接種により、ダイズの生育促進効果が高まることを確認しました。また、微生物とリサイクルリンを活用したバイオ肥料を開発し、バイオ肥料を用いた圃場試験においてダイズ収量が増加することを実証しました。

## 【具体的成果】

### 「農業土壤微生物叢アトラス」の構築と「土壤健康度」の評価指針

微生物の機能遺伝子情報から、生物因子を主体として農業土壤健康度を評価する手法を開発しました。ゲノムデータから生育良好圃場と生育不良圃場を判定する機械学習モデルを構築しました（図1）。

また、一部のデータを用いてアトラスの機能を試用することができる [デモページ](#) を公開しました。



### 有用微生物の獲得

土壤およびダイズの根内から累計2,000株を超える微生物を単離しました。単離された株には、希少放線菌やリン可溶化機能によりダイズの生育を促進する効果が確認された株が含まれており、これらの情報も「農業土壤微生物叢アトラス」に登録されています。

図1. 土壤微生物叢アトラスを活用した土壤診断の一例

【具体的成果】

**ダイズの生育を促進する微生物株の取得およびリサイクルリンによる化学肥料の代替**

ドイツとの国際連携において、冷涼・乾燥気候に適応した根粒菌を単離しました。この根粒菌をダイズ根より単離した放線菌と共にダイズに接種し、低温条件で栽培した結果、根粒菌単接種よりも窒素固定活性やダイズの生育が向上することがわかりました。

有機質原料および排水由来のリンをもとに、窒素・リンの化学肥料代替率が50%以上の資材を作製しました。このリサイクルリン資材とリン溶解菌を含む微生物資材のポット試験での生育促進（図2）、さらに圃場試験でのダイズ収量増加への効果も確認しました。

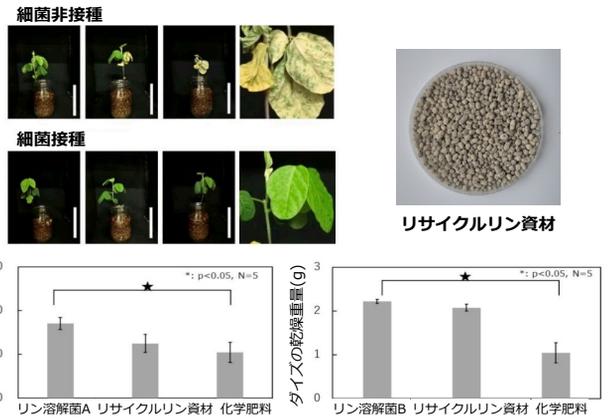


図2. 微生物資材によるダイズの生育促進

今後の研究の展開方向

5年間の研究成果を踏まえて、社会実装を目指す研究開発を機動的に進めます。

達成目標：リサイクルリン資材等と組合せた有用微生物資材で化学肥料使用量30%低減を実証

農業土壤微生物叢アトラスを用いて生物学的な側面から農業土壤の健康度を診断し、有用な微生物を処方することで作物の生育を促進するシステム作りに取り組みます（図3）。そのために、作物が健全に育つために必要な土壤の生物学的因子をさらに特定し、ビッグデータを用いた解析によって土壤環境の改良に資する有用微生物を開発・普及することに取り組みます。さらに、農業土壤健康度の指標を国内連携で明確化し標準化を目指します。

科学的データに基づく基礎知見をもとに、新たな微生物戦略を社会実装する事業化構想を実現することによって、農業生産の現場が抱える課題解決に寄与します（図4）。あわせて、産官学民連携や地域コミュニティとの協力を強化し、持続可能な農業モデルを構築することで、社会全体のレジリエンス向上にも貢献します。



図3. 微生物の機能を活用した作物生産

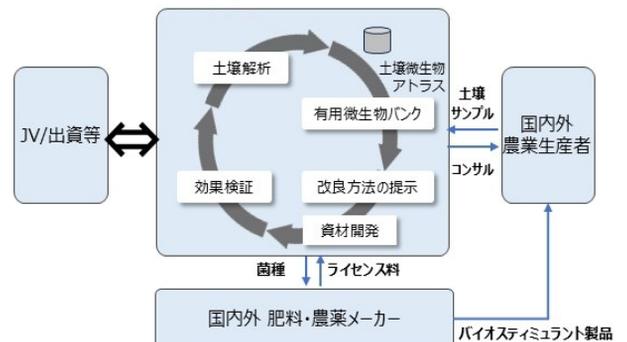


図4. 事業化構想

分担機関（太字は主たる実施者の機関）

- (1)早稲田大学/ (2)産業技術総合研究所/ (3)堀場製作所/ (4)マリンオープンイノベーション機構/ (5)京都大学/ (6)東京農工大学/ (7)太平洋セメント/ (8)朝日アグリ

## 項目2：

### 作物

主たる実施者： 松井南、濱崎英史 (理化学研究所・横浜市立大学)、穴井豊昭 (九州大学)

キーワード： 連作障害、遺伝子発現解析、イソフラボン、根の生長

## 研究背景と達成目標

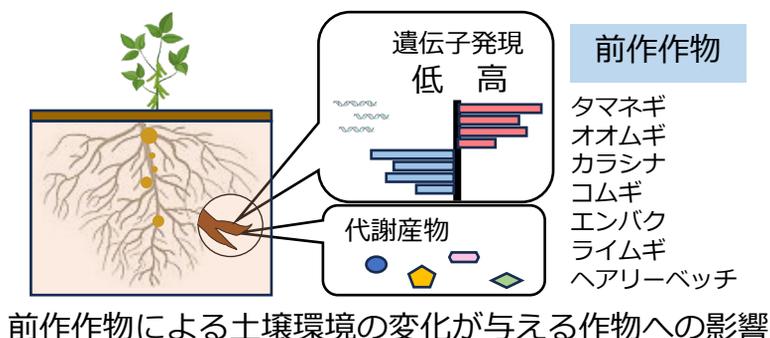
### 研究開発テーマの背景と必要性

土壤環境の違いによって、作物の生育は大きく異なります。そのため、土壤の違いによる作物の生育を遺伝子発現や代謝産物の変化で知ることは重要です。得られたデータを土壤中の根圏微生物データと組み合わせることで、作物の生産性向上が期待できます。

### 技術開発目標

前作作物が原因で、土壤中の栄養バランスの崩壊・病害虫の発生などによる土壤環境が変化し、結果として次に栽培する作物の生育・収量に影響が生じます(連作障害)。

そこで我々は、前作が異なる作物の遺伝子発現と代謝産物データを獲得することを目標としました。



## 主な研究成果

- ① 前作が異なる土壤で栽培したダイズの側根または葉での遺伝子発現を比較し、特に生育初期段階では遺伝子発現パターンが前作の違いにより影響を受けることが分かりました。
- ② 前作が異なる土壤で栽培したダイズの側根のイソフラボン含量を測定し、総イソフラボン量は、前作の違いにより異なることが分かりました。

### 【具体的成果】

#### 前作が異なる土壤で栽培したダイズ側根での遺伝子発現比較

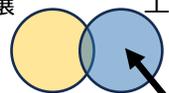
前作作物が異なる圃場で栽培したダイズの側根から得られたRNAを用いて、遺伝子発現解析を行いました。



作物の遺伝子発現パターンと生育状態との関係づけが可能になりました。

#### 解析結果 (例；タマネギ土壤)

コントロール土壤      タマネギ土壤



- ・窒素輸送遺伝子 減少
- ・傷害応答遺伝子 減少
- ・ホルモン応答遺伝子 減少 などなど

【具体的成果】

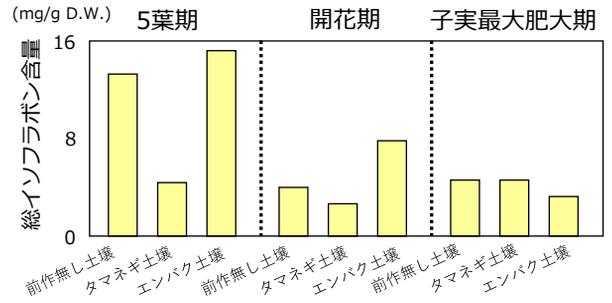
**前作作物が異なる土壌で生育したダイズ側根のイソフラボン含量の比較**

ダイズ側根から土壌中に分泌されるイソフラボンは、根圏微生物叢に影響を与え、生長の助けとなる根粒菌の誘因・着生を誘導します。



側根中のイソフラボン蓄積量は5葉期に極大を示し、その後減少することが明らかになりました。

イソフラボン蓄積量は前作作物により変化することが明らかになりました。



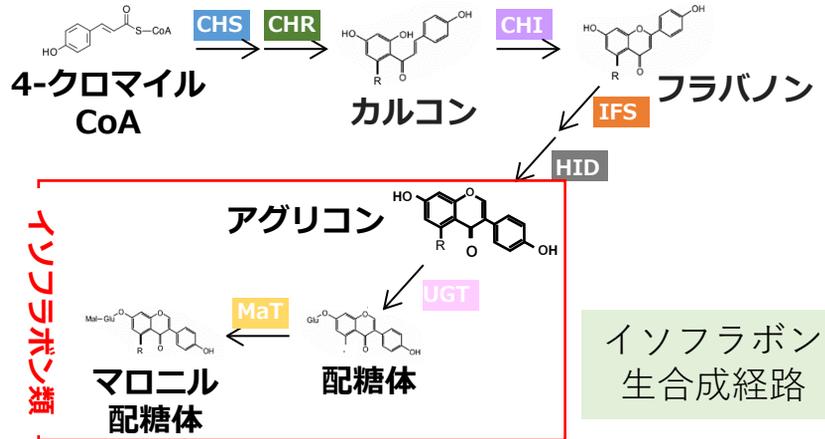
前作作物によるイソフラボン蓄積量の違い

今後の研究の展開方向

生育初期段階におけるイソフラボン生合成と根の生長に着目し、以下の解析へと展開します。

**イソフラボン変異体の解析**

近年、世界的に需要が拡大している植物性タンパク質原料のうち、ダイズではエストロゲン様作用を持つイソフラボンの過剰摂取に対する懸念が広がっています。そこで、根圏微生物との有用な相互作用に影響を与えることなく、ダイズ種子中のイソフラボン蓄積量が低下している変異体を単離し、低イソフラボンダイズ品種開発のための新たな育種母本としての登録・知財化を目指します。



イソフラボン生合成に関わる酵素遺伝子の変異体を単離

**生育初期段階の根粒形成と側根の生長解析**

作物において根は、土壌から栄養素や水分を吸収する重要な器官です。良好な根張りや根粒形成は、品質の向上や収量の増加に対して大きな効果が期待されます。

異なる土壌でのダイズ栽培、またはイソフラボン変異体を栽培し、根部の生長と根粒形成についてリアルタイムな観察を行います。



遺伝子発現と根圏微生物データに加え、根粒形成・根の生長データを利用して、作物の生産性向上を目指します。

分担機関 (太字は主たる実施者の機関)

(9)横浜市立大学/ **(10)理化学研究所**/ (11)九州大学

## 項目3：

### 環境制御・測定

主たる実施者： 和田智之（理化学研究所 光量子工学センター 光量子制御技術開発チームディレクター）

キーワード： **ダイズ、エダマメ、計測機器開発、栽培システム開発、人工気象制御、土壌環境制御**

## 研究背景と達成目標

### 研究開発テーマの背景と必要性

次世代の農業では、栽培によって失われる土壌中のミネラルの循環やカーボンニュートラルへの対策、土壌中の微生物を有効に使った農法の実現が課題です。そのためには、土壌—植物—環境の相互関係を明らかにする精緻なデータの取得が必要となります。本研究では、あらゆる環境パラメータが制御可能な栽培システムと、土壌の情報を含む非破壊かつ連続的な栽培データを得るための測定技術の開発をします。

### 技術開発目標

圃場環境に近い状態の植物や土壌微生物叢の再現を目的とした大型人工気象制御システムの開発を行い、制御された環境下でのダイズ（エダマメ）栽培を通して、レーザー分光各種、ライダーなどの光技術を駆使した計測システムの導入を目指します。

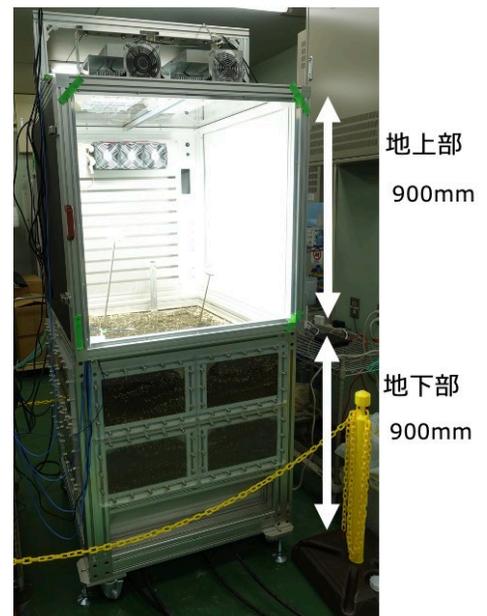
## 主な研究成果

- ① 世界に類のないダイズ栽培研究および栽培土壌分析が可能な高度人工気象制御システムを開発しました。
- ② 開発した高度人工気象制御システムを用いて、ダイズの出芽から収穫までの栽培モデルを構築しました。
- ③ 量子カスケードレーザーを用いたレーザー分光法を基礎として、約10 ppmの濃度分解能で、大気及び土壌に含まれる温室効果ガス（CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O等）の濃度変化の追跡が可能な分析法を確立しました。

### 【具体的成果】

#### 高度人工気象制御システムの開発

農業気象と土壌環境を地上部と地下部として分け、一方の条件を固定し（温度・光条件、土の種類など）、もう一方の反応（植物、根、細菌叢など）を調査できる形になっています。また、枝葉と根がストレスなく広がるようにそれぞれ900立方mmの大きさを確保し、圃場と同様に地下水脈からの給水が行えるようにしました。



高度人工気象制御システム

【具体的成果】

**ダイズ出芽から収穫までの栽培モデルを構築**

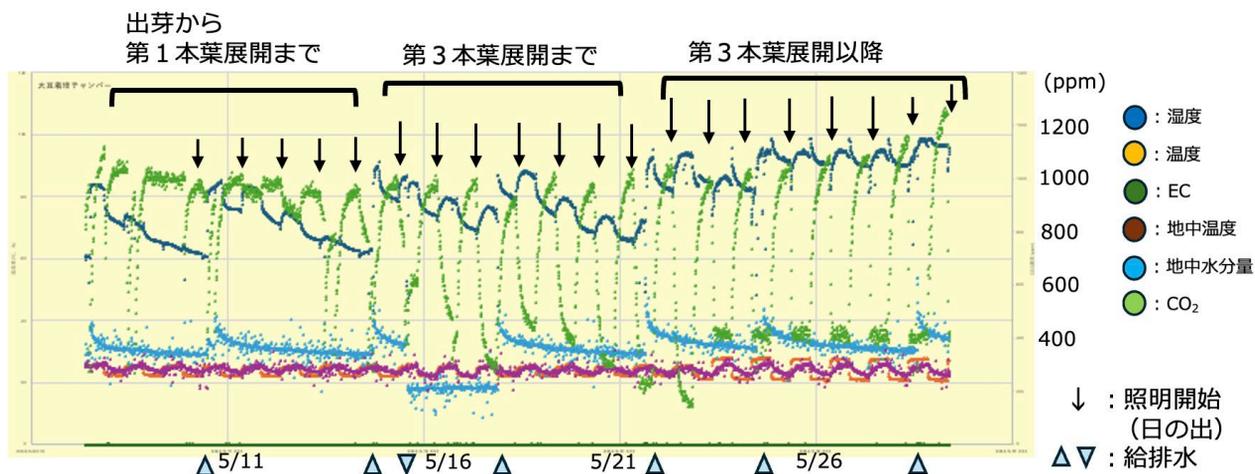
高度人工気象制御システムにより光環境（光量、日長、光質）、温度、湿度、二酸化炭素濃度などの地上部環境と土の保水性、通水性、硬度などの地下部環境を調整し、ダイズ「フクユタカ」を供試した出芽から収穫までの栽培モデルを構築しました。



高度人工気象制御システムによるエダマメ・ダイズ栽培

**ダイズ栽培中の各種センシング**

高度人工気象制御システムは多様な環境の再現とそのデータの収集ができます。対象地域の土を運び入れ、その環境下でのエダマメ収穫までの栽培を行い、遠隔地の土壌微生物叢や二酸化炭素濃度などの変動データ取得が可能となりました。



高度人工気象制御システムにおけるダイズ栽培の各種センシングデータ

今後の研究の展開方向

本研究で開発した高度人工気象制御システムを用いて、多様な地域の土や土質・気象条件を再現した栽培を行います。栽培過程の二酸化炭素をはじめとする GHG (Greenhouse Gas: 温室効果ガス) の測定を試み、検出技術の開発を進めます。これらの知見を活かし、次世代の農法の確立を目指して圃場にフィードバックします。

分担機関 (太字は主たる実施者の機関)

**(10)理化学研究所/ (12)アグリオープンイノベーション機構**

## 項目4：

### 社会科学

主たる実施者： 下川哲（早稲田大学 教授）

キーワード： 消費者需要、経済性評価、社会的受容性、食品・農業産業企業、ESG

## 研究背景と達成目標

どんなに優れた技術や仕組みも、社会に受け入れられて普及しない限り、その真価を発揮することはできません。そのため、本プロジェクトで開発・提案する技術や仕組みに対する社会的な受容と経済的な需要について、社会科学の視点から、政策、市場、生産者、企業、消費者の動向を踏まえつつ分析・検証します。

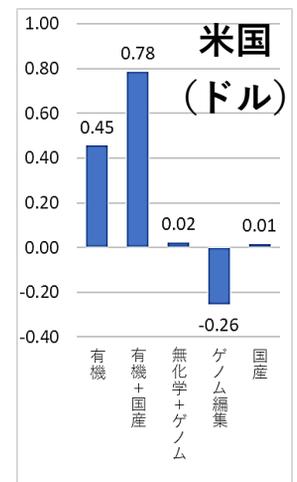
## 主な研究成果

- ① 日米でオンライン調査を実施し、大豆ミートと牛肉に着目し、有機栽培、国産、ゲノム編集といった生産方法の特性が消費者の需要に与える影響の類似点と相違点を明らかにしました。
- ② 福島県の大規模農家への聞き取り調査を実施し、栽培・経営に関するAI支援プログラムの需要は現状では限定的であり、特に規模やコストの課題がボトルネックとなっていることがわかりました。
- ③ 日本における食品・農業産業における非上場企業のSDGsやESGへの取り組みに注目し、食品産業の上流・中流・下流において、取り組み量および経済的メリットの違いについて比較・検証しました。

### 【具体的成果】

#### 日米での大豆ミートへの支払意思額の比較

- 両国とも、有機栽培、国産有機の付加価値がもっとも高く、+15%~30%。
- 日本では、化学肥料・農薬やホルモン剤を減らすためのゲノム編集なら、+15%の付加価値。米国は効果なし。
- 技術の理解度としては、約50%がゲノム編集を正しく理解する一方、大半が有機栽培を過大評価。
- 健康土壌の認知度はまだ低い。



大豆ミートへの支払意思額の日米比較  
(輸入原料使用との相対比較額)

## 【具体的成果】

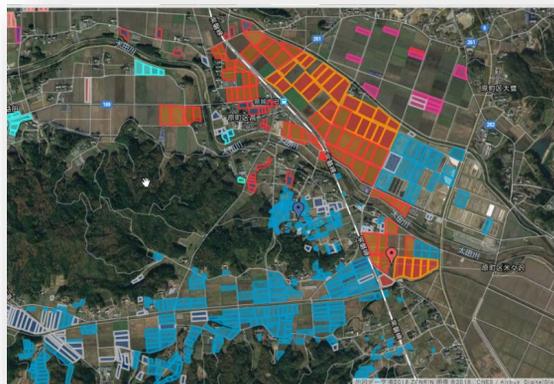
### 福島県における大規模水田作農家への聞き取り調査

#### ＜調査結果概要＞

- ・ 米・小麦・大豆の2年3作体制（約244ha）。
- ・ 政策の影響が大きく、大豆栽培は約60ha。
- ・ 大豆は「里のほほえみ」や「タチナガハ」を栽培。初年度から、福島県の平均収量の約130kg/10aを大幅に超える、240kg/10a程度を収穫。
- ・ 2003年から、省力化のため大豆の不耕起栽培に取り組む。

#### ＜新技術実装時の留意点＞

- ・ 新技術を実装してもらうためには、初年度の結果や省力が肝心。
- ・ 規格外にも対応できるパッケージングが必要。



#### 圃場の分散状況

■ 水稲 ■ 大豆 ■ 水稲（乾田直播）

### 日本の食品・農業産業の非上場企業のESG動向

- ・ 2018年から2024年までの日本の農業食品産業における514の非上場企業のデータセットを構築。
- ・ 食料供給チェーンの上流、中流、下流の各セクターにおけるESGの取り組みのパターンと経済的利益（売上と純利益）との関係を調査。
- ・ 上流および中流セクターでは、下流セクターよりも、ESGの取り組みが著しく多い。
- ・ ESGの取り組みと経済的利益の関係では、中流セクターで負の関係があり、上流セクターでは明確な関係は見られなかった。
- ・ 農業・食品産業の非上場企業におけるESGの取り組みは、経済的な負担となっている可能性が高く、さらに促進するためには政府の支援などが必要。

## 今後の研究の展開方向

引き続き、本プロジェクトで開発・提案する技術や仕組みに対する社会的な受容と経済的な需要に・微生物資材・水産加工残渣発酵肥料・低イソフラボン大豆など）に対して、社会科学の視点から分析・検証します。より具体的には、食料・農業部門におけるカーボンクレジット市場の拡大と社会的需要や、新しい技術や新製品（リサイクルリンする消費者の認知と受容度が支払意思額に与える影響について実証的に検証します。

## 分担機関（太字は主たる実施者の機関）

### (1)早稲田大学

## 項目5：

### 栽培マネジメント

主たる実施者： 市橋泰範（理化学研究所 環境資源科学研究センター）

キーワード： デジタルツイン, マルチオミクス, 土壤微生物, 大豆栽培

## 研究背景と達成目標

世界規模での人口増加・気候変動や、食生活の変化による農業生産や自然環境への影響を軽減するため、あらゆる環境・食生活の変化に対応できる持続的な生産技術基盤の構築が求められています。

そこで本研究では、土壤、微生物、作物データのマルチオミクス解析より、大豆栽培における生育状況予測モデルの研究開発します。

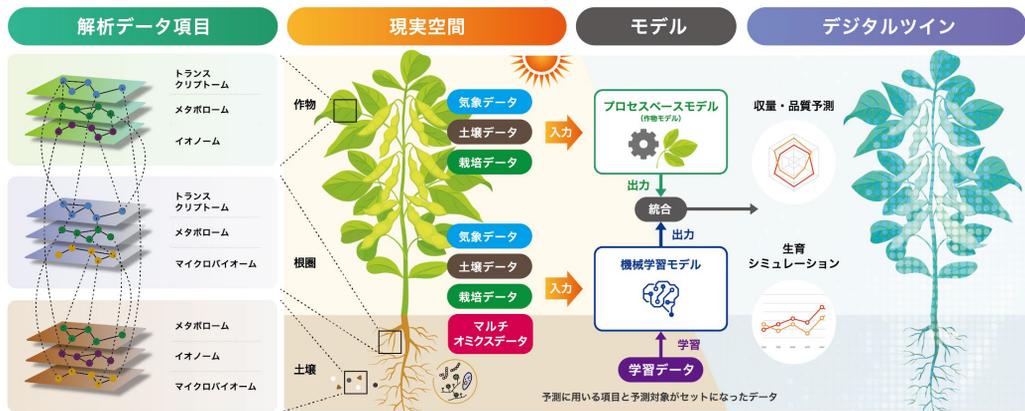
## 主な研究成果

「農業環境エンジニアリングシステム」として、演繹的アプローチと帰納的アプローチの双方を活用した農業デジタルツインのプロトタイプを開発し、そのプロトタイプを基盤とするビジネスモデルを構築しました。

### 【具体的成果】

#### 農業環境エンジニアリングシステムのプロトタイプを完成

全国ダイズ圃場の大規模データに基づく作物・土壤モデルに機械学習モデルを統合してダイズ収量予測シミュレーションの精度を向上し、農業環境エンジニアリングシステムのプロトタイプを完成しました。



農業環境エンジニアリングシステムの構成

## 今後の研究の展開方向

土壤微生物解析データと本モデルを活用し、データに基づいた土づくり、効率的な有機大豆栽培を実現します。また、耕作放棄地の維持管理へ本技術を積極活用することで、産地保全への貢献を目指します。

## 分担機関（太字は主たる実施者の機関）

(5)京都大学/ (6)東京農工大学/ **(10)理化学研究所**/ (11)九州大学/ (13)福島大学/  
(14)東京大学/ (15)筑波大学/ (16)福島県/ (17)北海道大学/ (18)農研機構/ (19)新潟県/  
(20)三重大学/ (21)名古屋市立大学/ (22)前川総合研究所

連絡先 早稲田大学 竹山研究室 ムーンショット型農林水産研究開発事業推進事務局

E-mail: [moonshot5@list.waseda.jp](mailto:moonshot5@list.waseda.jp)

プロジェクトHP: <https://www.microbe-soil.sci.waseda.ac.jp/>

