



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Integrated Multidimensional Omics Analysis of Soil-Plant-Microbe Interactions in Soybean Agroecosystems
Author(s)	村島, 和基
Description	この博士論文の全文は利用可能日以降に公開されます。利用可能日以前の閲覧方法は https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/ をご参照ください。
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16768号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16768
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99613
Type	doctoral thesis
File Information	MURASHIMA_Kazuki_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称： 博 士（農学）

氏名 村島 和基

学 位 論 文 題 名

Integrated Multidimensional Omics Analysis of Soil–Plant–Microbe Interactions in Soybean Agroecosystems

（多次元オミクス統合解析によるダイズ農業生態系における土壌–植物–微生物相互作用の解明）

農業生態系は土壌や植物といった異なる階層における養分、代謝物、微生物などが相互作用して成立しており、その関係性は環境条件や栽培条件によって動的に変化する。従来の研究手法では、単一の要因に着目して作物生育や養分獲得能を評価してきたが、その効果は圃場環境や作物種の違いで異なる。これは、複数因子が相加的、相乗的、拮抗的に作用して正味の作物応答を規定するためであり、生態系全体を捉える研究が必要である。この複雑な相互作用を解明するためには、土壌と植物の階層に加え、生育段階や植物器官といった時空間的な階層の違いも考慮して、元素、代謝物、微生物などの多次元オミクスデータを取得し、統合的に解析する手法が有効である。

以上を踏まえ本研究では、ダイズを供試作物とし、日本国内の異なる環境条件の複数圃場から多次元オミクスデータを取得し、複数要因が同時に作用する圃場での現象の解明を目指した。ケーススタディとして、初めに、農業由来の環境負荷増大の背景から注目される堆肥に関して、圃場共通の施用効果とそれらの連動的変動が作物生育や養分動態に及ぼす影響を明らかにすることを目指した。次に、土壌からダイズへのセシウム（Cs）移行について、化学的に類似したカリウム（K）で主に制御される一方で、その効果が土壌種や作物種で変動する要因を、元素間相互作用および植物–微生物相互作用の観点から明らかにすることを目的とした。これらを通して、日本のダイズ生産圃場における生態系としての応答機構を捉え、適切な栽培管理手法の検討に資する知見の構築を目指した。

フィールド多次元オミクスによる牛糞堆肥施用条件下のダイズ農業生態系構造の変動解析

19 世紀の植物栄養学の進展と産業革命に伴う機械化と化学肥料普及が農業生産を向上させたが、一方で農業由来の環境負荷も増大した。そのため減肥や土壌肥沃度の維持を目的とした堆肥の活用が促進されている。しかし、その施用効果は圃場環境により変動するため、一貫した作用機序の解明が課題である。さらに、堆肥は Cs 等の元素動態に影響を及ぼすが、堆肥由来の元素との相互作用だけでは説明できず、その機構解明が望まれる。本研究では、日本国内 6 圃場に無施肥区・化成肥料区・牛糞堆肥区を設け、ダイズを 2 年間栽培した。開花期・成熟期に土壌および植物体を採取し、イオノーム、メタボローム、マイクロバイオーム、土壌物理性データを取得した。混合効果モデルの解析では、堆肥施用が土壌交換態 K(ex-K)や二価カチオン、土壌代謝物など土壌化学性に関する変数を主に変動させた一方、化成肥料では 2 年共通して変動する変数は確認されなかった。また、堆肥連用は開花期の土壌微生物多様性、植物乾物重の増加と土壌乾燥密度の低下を引き起こし、養分供給に加えて土壌物理性・生物性を緩やかに改善し、生育を相乗的に高めることを示した。土壌生物性に関するネットワーク構造解析により、短期的な堆肥連用が土壌微生物の機能的分化を促進することが明らかになった。さらに、堆肥施用で有意に変動した変数群のネットワーク解析から、ダイズ葉の Cs 濃度が ex-K だけでなく土壌の炭素濃度や二価カチオン、間隙率、土壌微生物とも連動的に変動することが示された。

土壌からダイズへの Cs 移行に関与するミネラルネットワーク

福島第一原子力発電所事故以降、放射性 Cs の作物移行が課題となり、これまで主に K 施用による移行抑制が研究されてきた。しかし、Cs は他元素とも相互作用し、その関係は生育段階によ

って変化する可能性がある。したがって、Cs 移行（吸収・分配・蓄積）を適切に評価するには、土壌および植物体内の元素間相互作用を時空間的に把握し、Cs 移行に関与する元素群とその動態を明らかにする必要がある。本研究では、異なる土壌養分条件を設定するため、窒素、リン、カリウム、硫黄の単独欠乏区、無施肥区、完全施肥区の 6 処理でダイズを栽培した。5 つの生育段階で根圏およびバルク土壌を採取し、複数の抽出法で元素濃度を測定した。同時に地上部を器官別に採取し元素分析を行った。K 欠乏条件では子実および地上部の Cs 濃度が有意に高まり、他の欠乏条件でも完全施肥区とは異なる Cs 分配パターンが確認され、Cs 移行が K 以外の元素の影響も受けることが示された。また、生育段階で土壌 ex-K と地上部 Cs の負の相関の傾きが変動し、Cs 移行が生育に応じて変化する可能性がある。Cs 吸収に関して、生育段階別の土壌元素のネットワーク解析により、Cs 吸収に関与する元素群が特定された。土壌 K 濃度は生育期間を通して地上部 Cs 濃度と負の相関を示した一方、土壌 Na は正の相関を示した。さらに、生育前期では土壌二価カチオンと地上部 Cs の関係が他時期より強まったが、土壌抽出形態で正負が異なり、土壌中の元素存在形態を考慮する必要性が示された。植物体内の Cs 分配・蓄積は、器官および生育段階別の元素のネットワーク解析により、K に加えて Mg と Rb の関与が示唆された。

根粒菌共生下におけるマメ科植物の Cs 移行機構の解明

前項では、Cs 移行が K 以外の元素の影響も受けることが示されたが、植物-微生物相互作用の関与は未解明である。K 施用による Cs 移行抑制効果ที่เขา作物より小さいダイズでは、マメ科特有の移行機構の解明が求められている。本研究ではマメ科で特徴的な根粒菌共生に着目し、共生下での Cs 移行機構の解明を目的とした。根粒菌接種下のダイズ水耕栽培により、 ^{137}Cs が根粒に集積することが可視化された。さらに、北大畑作圃場で根粒着生能の異なる 3 系統のダイズを栽培し、器官ごとの元素濃度を測定した。圃場条件でも Cs 濃度は根粒で有意に高く、K では同様の傾向はみられなかった。また、土壌 ex-K と地上部 Cs 濃度の共分散分析から、同等の K 条件下では根粒着生数の多い系統で Cs 移行が低下した。根粒数の増加は土壌 ex-K に依存せず地上部 Cs 濃度を減少させた。これらの結果から、根粒での Cs 蓄積が地上部への Cs 移行を低減させる可能性が示唆された。

加えて、マメ科モデル植物のミヤコグサを用いて、根粒での Cs 輸送機構を調査した。Cs 添加条件と根粒菌接種の有無から 6 処理区を設け、地上部、根、根粒を採取した。接種区では非接種区に比べ地上部 Cs 濃度が低下した。さらに遺伝子発現解析から、Cs 添加濃度に応答して根粒で特異的に発現増加する 3 つの K 輸送体遺伝子を同定した。

本研究の成果

本研究では、初めに (1) 堆肥施用が栽培条件に関わらず土壌化学性を改善し、連用により土壌物理性改善や土壌微生物の機能的分化を促進することで生育を相乗的に向上させる可能性があること、堆肥施用が土壌 ex-K を高めるだけでなく土壌物理化学および生物的に Cs 移行低減に資する土壌環境形成に関わることを明らかにした。次に (2) Cs 移行が K に加えて Na、Rb、Mg など複数元素との相互作用および生育段階の影響を受けること、(3) 根粒に Cs を蓄積し、地上部への Cs 移行を抑制すること、を明らかにした。これらの知見は、日本のダイズ生産に対して、堆肥施用が多様な圃場条件下でも安定して土壌環境を改善し得ることを農業生態系の構造変化として示すとともに、K 施用だけでなく元素間および植物-微生物間相互作用を基盤とした持続的な Cs 移行対策の可能性を提起するものである。今後は多次元オミクスで示唆された仮説の生理生態学的な検証と異なる圃場環境での実証試験が求められる。