

見る！わかる！科学する！～ふかふか土壌×データ解析がつなぐ持続可能な農業～

笹原 丈幸・金栄 智治・篠原 百絵(関西学院大学アカデミックコモンズ・プロジェクト
チャレンジ・タイプ 関西学院 AgriNOVA)

動機と目的

近年、農業分野ではデータ活用の進展により作業の効率化が図られている。データを活用した作業の効率化には、栽培環境ごとに最適化された栽培方法の選択が重要であり、土壌の質をはじめとする栽培環境を定量的に評価することの重要性が高まっている (Raj & Prahadeeswaran, 2025)。しかし、従来の土壌評価法は物理・化学分析を中心とするため、手法が複雑で高コストであり、継続的な評価が難しいという課題がある。また、「肥沃な土壌」の定義は評価の観点によって異なり、統合的に捉える枠組みは十分に確立されていない。特に、自然における「肥沃な土壌」を農業における土壌の評価・最適化にも活用する知見は少ない。そこで本研究では、農作物の生育に適した土壌の評価を目的に、生物学的指標を用いた簡便で持続可能な土壌評価法の確立を行った。具体的には、土壌呼吸量 (CO₂) や土壌生物といったマイクロ指標と、植生の活発さ (NDVI) や昆虫群集組成などのマクロ指標を組み合わせて、関西学院大学神戸三田キャンパス内の3地点を対象に比較評価を行った。これらの関連性を検討することで、生物の活動が促進される状態にある“ふかふか土壌”の特性を明らかにし、簡便かつ総合的な評価手法の可能性を探り、その有効性を評価した。

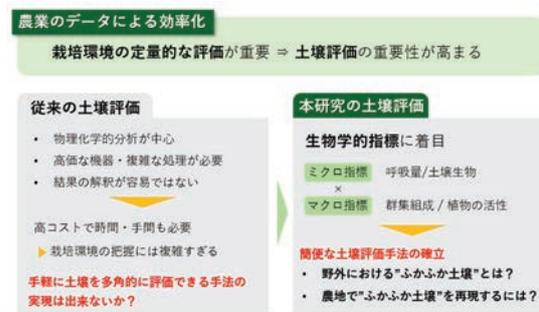


図1. 取り組みの全体像

材料と方法

キャンパス内から、植生の異なる3つの区画として、畑周辺の草原 (区画A)、一部に竹も見られる法面 (区画B) および、広葉樹林 (区画C) を設定し、これらの地点を対象にサンプリング・解析を行った (図2)。

各地点における植生の活性を評価するため、Google Earth Engine から 2022 年から 2025 年までの 4 年分の人工衛星 Sentinel-2 の衛星データを取得した。取得したデータから、植生の活性を表す指標である Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) を式 (1) の通り算出した。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

ただし、NIR は近赤外領域、R は赤色光領域の反射率を示している。

各月の時系列データは、雲による影響を補正するために、各月の中央値を代表値として、3つの区画内のすべてのデータを平均値で処理し、4年間の平均値と標準誤差で比較した。また、時系列で最も活性の高く



図2. サンプリング地点の設定
赤丸 (●) は土壌採取地点を示す

なることが示された5月のデータを地図上に示すことで関西学院大学神戸三田キャンパス周辺のNDVIの分布を調査した(清水, <https://sorabatake.jp/42307/>)。次に、それぞれの地点の植生を評価するために、iNaturalist上の昆虫の観察記録(iNaturalist, <https://www.inaturalist.org>)を取得し、区画ごとに集計した。非計量多次元尺度構成法(nMDS)により、Raup-Crick係数に基づく次元削減を行った。

次に、それぞれの区画A, B, Cから、2026年1月16日に各地点5箇所を採取し、同27日に使い捨てカイロを用いた簡易ツルグレン装置(加藤ほか, 2013)による土壌中の生物相調査とCO₂センサーMG812とArduino UNOを用いた土壌呼吸量測定を行った。呼吸量の測定は、タッパーを用いた簡易チャンバー内に、センサーを5分間静置した。大気及び呼気の二酸化炭素濃度をそれぞれ400, 4000ppmとする2点の校正により、測定電圧を濃度に換算した。

結果

サンプル採取地点付近のメッシュ区間におけるNDVI平均値を4年平均±標準誤差でプロットしたところ、NDVIは季節によって変動し、Cにおいて活性が最も高く、次いでA, Bの順であった(図3(a), LM, Type II Anova, * $p < 0.05$, Bonferroni post-hoc test: A-B; * $p < 0.05$, B-C; * $p < 0.05$, A-C; * $p < 0.05$)。また、サンプル採取地点の違いによる群衆組成を調べるためにRaup-Crick係数を用いたnMDSによる解析を行ったところ、地点Cだけ異なる群衆組成を示す傾向が見られた(図3(b))。それぞれの地点で観察された生物相としては、地点Cではコウチュウ目が地点AとBはバッタ目が多く見られた。

各地点の土壌呼吸量ではグラフの傾きに差が見られなかったものの上下方向のシフトが見られ、その関係はCにおいて最も高く、次いでA, Bの順であった(図3(c), LM, Type II Anova, * $p < 0.05$, Bonferroni post-hoc test: A-B; * $p < 0.05$, B-C; * $p < 0.05$, A-C; * $p < 0.05$)。ツルグレン装置

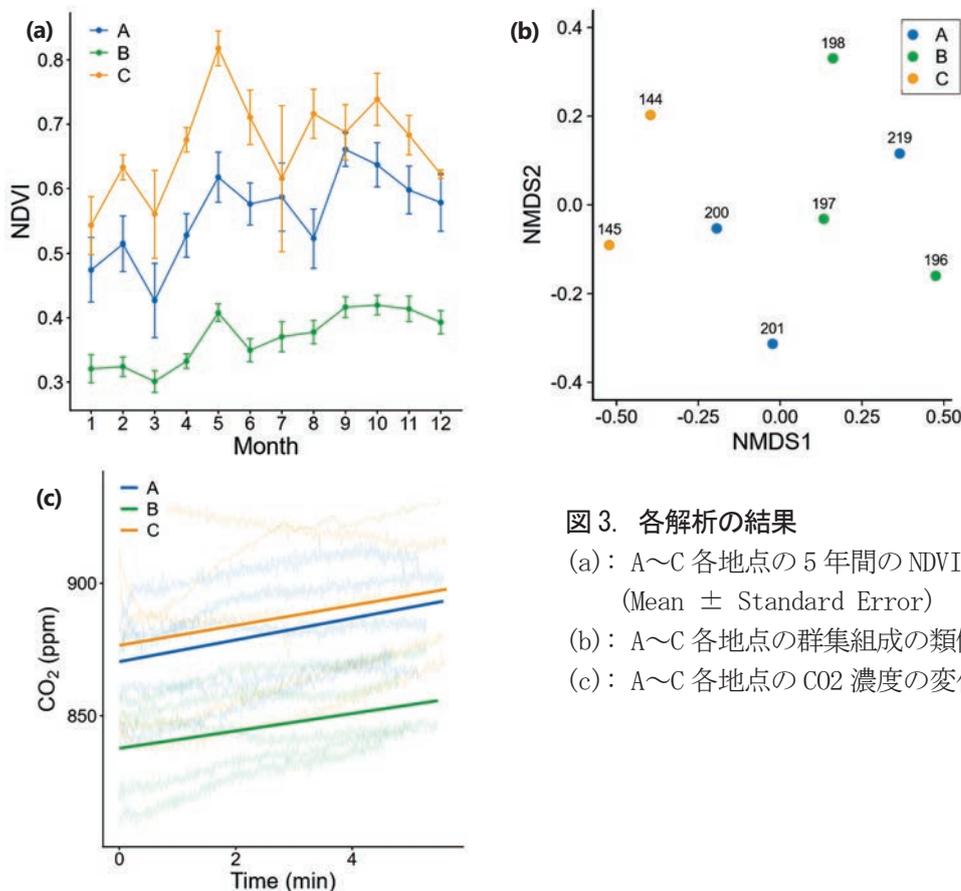


図3. 各解析の結果

- (a): A~C各地点の5年間のNDVI季節変化 (Mean ± Standard Error)
- (b): A~C各地点の群衆組成の類似度
- (c): A~C各地点のCO₂濃度の変化

による生物相の調査ではいずれのサンプルでも土壌生物は確認できなかった。

考察

群集組成を解析した結果、A地点およびB地点ではバッタ目など草原に生息する昆虫種が優占であった。一方、C地点では甲虫に代表される、森林性の昆虫が広く見られた。また、NDVIはC地点でも高く次いでA、Bの順であったことから、植生で比較すると森林で最も植物の活性が活発であることが示唆された。また、A地点とB地点の間でもNDVIに有意な差が検出されたことから、植生間でもその活動量には差があることが示された。

また、土壌呼吸量はC地点で最も高く、次いでA地点、B地点という植生の活性と同様の変動パターンが見られた。この結果は、植物と土壌生物相の活動量には相関が見られる可能性を示唆しており、生物学的な評価を行うことで土壌の特性を多面に評価することができるという当初の仮説を支持している。一方で、土壌呼吸量はいずれも増加していたが、時系列で傾きは変化せずグラフの上下方向のシフトのみ見られたことから、その時点での活性はサンプリングからの期間で平衡状態に達したが、それまでの活動が蓄積された結果を反映している可能性が考えられた。

A地点とB地点では、同様の群集組成から似た植生が示唆されていたにもかかわらず、NDVIおよび土壌呼吸量はA地点の方が高かった。B地点付近には竹林が存在し、タケの高い優占性により、生物多様性が低下し、生物学的活性も低下した可能性がある。実際に、竹林付近の土壌では、タケが土壌中の栄養を吸収し土壌が貧栄養になることが示唆されており (Bai et al., 2016)、今回の結果を説明する一つのメカニズムであると同時に、周囲の植生環境に基づいたサンプリング地点の設計は、より複合的な視点から土壌の評価を行う一つのアプローチとしての可能性を提示している。

ツルグレン装置で土壌生物は観察されなかったが、これは直接的にその区画に生物が生息していないことを示唆しているわけではなく、サンプル時期が冬であり土壌生物は土中深くに潜っている可能性が高い。

展望

本研究では、土壌呼吸量 (CO₂) や植生の活発さ (NDVI)、昆虫群集組成といった生物学的指標を組み合わせることで、“ふかふか土壌”を総合的に評価する手法の可能性を示した。今後は、生物の活動が活性化する夏にサンプリングを行うことで、評価の解像度向上を目指す。また、サンプリング地点付近の植生によっても土壌状態は変化することが示唆されたことから、植生を含めたより広範で包括的な評価を行う。さらに、土壌の色や団粒構造などの画像情報を活用し、物理的状態を定量化することで、従来の指標との整合性についても検証する。こうして得られた知見をもとに、NDVIなど取得しやすいデータから呼吸量を推定する機械学習モデルを構築し、誰でも簡便に土壌状態を把握できる仕組みを確立する。これらの指標をもとに農地において“ふかふか土壌”を再現するための要因を解明することは、単に生産の最適化のみならず、肥料や農薬の開発においてもデータ駆動型アプローチの提案に寄与する。AgriNOVAでは、“ふかふか土壌”に注目して、より良い栽培手法の提案と、食品残渣などの未活用資源の活用による肥料開発の2つ軸から、肥料や農薬に過度に依存しない持続可能な農業の実現への応用可能性を模索する。

謝辞

本研究の遂行にあたり、キャンパス内の生物相の調査では関西学院大学生物サークルの皆様の調査結果 (iNaturalist プロジェクト：関西学院大学神戸三田キャンパスの生き物マップ) を活用させていただきました。また、キャンパス内の生物群集の解析においては清原涼平氏 (関西学院大学生物サークル) に多大なるご協力をいただき、測定用のArduinoなどは関西学院大学ロボコン団体 AiMEiBA の皆様よりお借りいたしました。心より御礼申し上げます。

参考文献

Bai, S., Conant, R. T., Zhou, G., Wang, Y., Wang, N., Li, Y., & Zhang, K. (2016). Effects of moso bamboo encroachment into native, broad-leaved forests on soil carbon and nitrogen pools. *Scientific Reports*, 6(1), 31480.

iNaturalist. Available from <https://www.inaturalist.org>. Accessed Jan. 31st, 2026

加藤良一・谷原一弥・長根智洋・鈴木隆 (2013). 使い捨てカイロとペットボトルを用いた簡易型ツルグレン装置

[https://yamagata.repo.nii.ac.jp/records/1744/file_details/kiyoued-15-4-](https://yamagata.repo.nii.ac.jp/records/1744/file_details/kiyoued-15-4-041to052.pdf?filename=kiyoued-15-4-041to052.pdf&file_order=0)

[041to052.pdf?filename=kiyoued-15-4-041to052.pdf&file_order=0](https://yamagata.repo.nii.ac.jp/records/1744/file_details/kiyoued-15-4-041to052.pdf?filename=kiyoued-15-4-041to052.pdf&file_order=0) (2026年2月20日).

Raj, M., & Prahadeeswaran, M. (2025). Revolutionizing agriculture: a review of smart farming technologies for a sustainable future. *Discover Applied Sciences*, 7(9), 937.

清水悠太郎 (2025). 衛星データ×QGISではじめる、生物多様性の地図デザイン

<https://sorabatake.jp/42307/> (2026年1月31日).