

生態系の動態を予測・制御するデータ分析の体系化

—微生物叢の「崩壊」はなぜ起こるのか—

概要

京都大学大学院生命科学研究科 東樹宏和 教授らの研究グループは、多様な微生物種で構成される生態系が急激にその構造と機能を変化させる現象について、その仕組みを統一的に理解するためのデータ分析手法を体系化しました。

近年、腸内細菌叢や農地土壌の微生物叢などが、人の健康や作物生産、環境浄化に深く関わる事が明らかになってきています。その一方で、こうした微生物叢は、一見安定に見えても環境条件の変化に伴って急激に崩壊し、元の状態に戻らない場合があることが知られています。そのため、微生物叢の予測や制御は大きな課題となってきました。

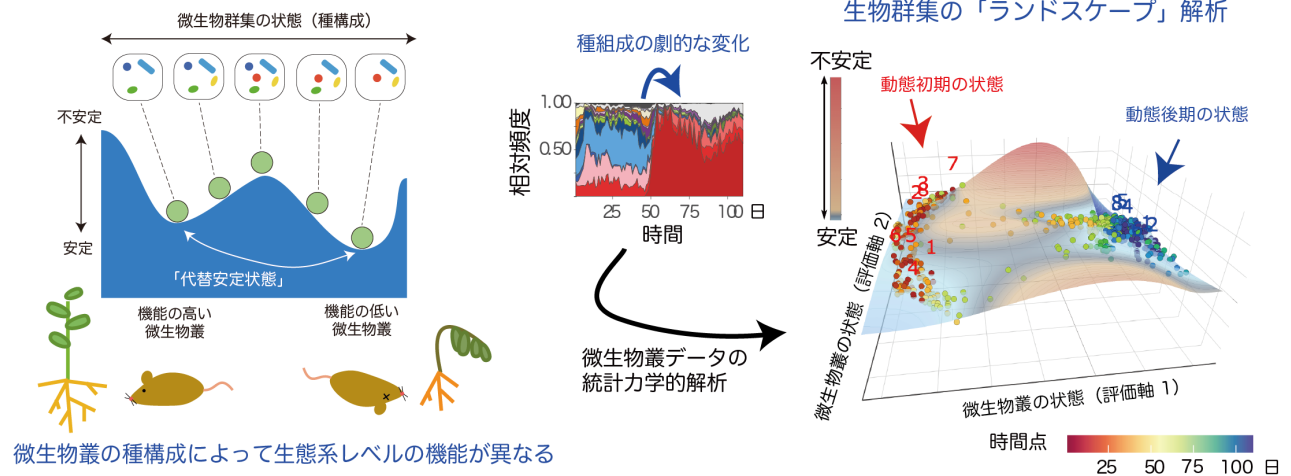
本研究では、理論生態学や統計物理学、非線形力学を用いた分析を比較しつつ、微生物群集の状態変化を「ランドスケープ（地形）」として捉える視点から得られる知見を体系的に整理しました。これにより、群集の安定状態や遷移経路、崩壊のリスクを定量的に評価し、異なる生態系間でその基本的な性質を比較することが可能となります。

特に農業生態系に着目して土壌微生物叢の「群集集合ランドスケープ」を推定したところ、施肥量のある閾値を超えた場合に、作物病害が頻発する微生物叢へと不可逆的に移行する現象（ヒステリシス）が見出されました。

本成果は、微生物生態系の機能を安定的に管理するために必要なデータ解析を俯瞰・統合するもので、農業・医療・環境分野にまたがる幅広い分野での応用が期待されます。

本研究成果は、4月10日に、国際学術誌「*The ISME Journal*」にオンライン掲載されました。

坂を転がるボールのように、安定な種構成へと向かう



微生物叢の種構成によって生態系レベルの機能が異なる

図 生態系の振る舞いをランドスケープ（地形）として俯瞰する：発表論文を基に作成（東樹宏和）

1. 背景

地球上のあらゆる環境において、多様な微生物種が相互作用しながら生態系を形成しています。こうした微生物叢は、人の健康や農作物の生産性、自然生態系の機能維持に深く関わっていることが明らかになってきました。

しかし、微生物群集（微生物叢）は極めて複雑な動態を示し、その構造が突然大きく変化する現象が広く知られています。こうした変化は、腸内環境の悪化（ディスバイオシス: ※1）や農地における作物病害の急速な拡大といった深刻な課題としてしばしば表面化しますが、どうやったらそうした問題を根本的に封じ込めることができるのか、手探りの状態が続いています。

従来、微生物叢の研究は構造の記述や分類に重点が置かれてきましたが、こうした急激な変化（レジーム・シフト）を予測・制御するための理論的枠組みは、十分に整理されていませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究では、理論生態学における群集動態の基礎理論と統計物理学的な実データ分析の関係性を整理しつつ、群集の振る舞いを記述する「群集集合ランドスケープ」(assembly landscapes: ※2) の解析によって複雑な微生物叢の動態を予測・制御できる可能性を示しました。また、近年急速に発展する非線形力学的な手法をとの関連性を概念的に整理しつつ、生物群集の振る舞いを俯瞰するデータ分析によって、

- 群集がどのような状態に向かって安定化しやすいか
- どのような環境条件で別の状態（代替安定状態: ※3）へと遷移するか
- 崩壊のリスクがどの程度高まっているか

を評価できることを明らかにしました。

こうした分析手法を日本全国 1,644 箇所の農地土壌から得られた真菌（きのこ・かび類）叢の大規模データに適用したところ、施肥量が一定の閾値を超えた農地において作物病害が頻発する真菌叢への劇的な変化が起こることが示されました。詳しい分析を行ったところ、この変化は通常の管理の仕方では後戻りすることのできない不可逆的なものであり、一旦その閾値を超えてしまうと、その後に施肥量を抑制しても病害が少ない元の状態へと自然と戻ることができずと示唆されました。物理学において「ヒステリシス」(※4) と呼ばれるこうした現象に関する知見は、生物群集や生態系といったスケールで起こる現象を大局的に理解・制御する上で欠かすことのできないものです。

3. 波及効果、今後の予定

本研究で整理・統合された理論・データ解析の枠組みは、農業生態系からヒト腸内細菌叢にわたる多様なシステムに共通する動態原理を理解するための基盤となります。

農地土壌微生物叢の解析で明らかになったような「ヒステリシス」の構造を俯瞰することで、生態系の制御において「越えてはならない一線（三途の川）」がどこにあるのかが見えるようになります。一方で、「群集集合ランドスケープ」に関する知見を集積することで、好ましくない状態で安定化（固定化）してしまった生態系を人為的に元に戻すための「抜け道」（三途の川に渡す橋）が見出される可能性もあります。

微生物叢がもたらす生態系レベルの機能を農業・医療・工業・環境再生において利用する動きが活発化していますが、その安定的な管理には、複雑系としての微生物叢の振る舞いを俯瞰し、その駆動原理を明らかにすることが必須です。多様な生態系に関する群集動態のデータを蓄積しつつ、共通する原理を解明し、幅広い応用の場で利用できる分析の枠組みを提示していきたいと思えます。

4. 研究プロジェクトについて

●科学技術振興機構（JST）CREST「バイオ DX: データ駆動・AI 駆動を中心としたデジタルトランスフォーメーションによる生命科学研究の革新」領域採択課題：「多種生命システムの安定化と機能最適化を実現する融合科学の創生」（研究代表：東樹宏和）[JPMJCR23N5]

<用語解説>

※1 ディスバイオシス

腸内や土壌などに存在する微生物叢のバランスが崩れ、機能が低下した状態を指す。ヒトでは疾患リスクの増加、農地では作物病害の発生などに関連することが知られている。

※2 群集集合ランドスケープ（assembly landscapes）

多様な生物種からなる群集が、どのような種の組み合わせ（群集構造）をとりやすいかを、統計的に地形のように表現したもの。谷は実際に観測されやすい安定な状態（アトラクター）を、山は異なる状態の間の遷移のしにくさを表す。複雑な生物群集の振る舞い（生物群集動態の規則）を俯瞰的に理解するための枠組みである。

※3 代替安定状態

複数の生物種集団を含む生物群集は、種間で相互作用を及ぼしながら、種組成を遷移させていく。遷移しきった先の生物群集を安定状態と呼ぶが、これは数学的に定義される平衡点を反映している。この安定状態は一つに定まるとは限らない。腸内細菌叢を例にとると、同じ腸内環境下であっても、病原菌が優占する場合としない場合といった複数の安定状態が存在することがある。この複数の安定状態を代替安定状態と呼ぶ。

※4 ヒステリシス

システムの現在の状態が、過去の変化の履歴に依存する現象を指す。例えば、環境条件を元に戻しても、一度変化した生態系が元の状態に自然には戻らない場合があり、このような不可逆的な挙動を説明する概念である。

<研究者のコメント>

1種の生物でさえとても複雑な挙動をします。そんな種が数百・数千と集まって形成される微生物叢の振る舞いは絶望的に複雑だと一般的にみなされています。しかし、微生物群集に関する膨大なデータを蓄積し、適切な分析を行えば、システムとしての大局的な挙動を俯瞰し、未来に起こり得ることを予測したり、効率的に管理したりすることが可能となります。

しかし、微生物学や農学といった実際の「モノ」を扱う学問領域と情報や数学といった「コト」を扱う学問領域の間には未だに大きな溝があるようで、「生態系全体を実データから俯瞰し、その駆動原理を探る」というアプローチはまだ確信をもって受け入れられていないのが実情です。これまでに本研究室から世の中に送り出そうとしてきた研究成果も、投稿した科学誌から「このような複数領域の専門性を必要とする研究を評価できる査読者（評価者）が見つからない」という理由で査読さえしてもらえないことがありました。こうした状況を打開するため、世界中の研究者に向けて発信する目的で執筆したのが本論文です。

今後も、生態系が本来持つ機能を最大限に活かす道を農業・医療・工業・環境分野に提示するとともに、世界中で劣化してしまった生態系を迅速に再生する道を探る試みを続けていきたいと思えます。

< 論文タイトルと著者 >

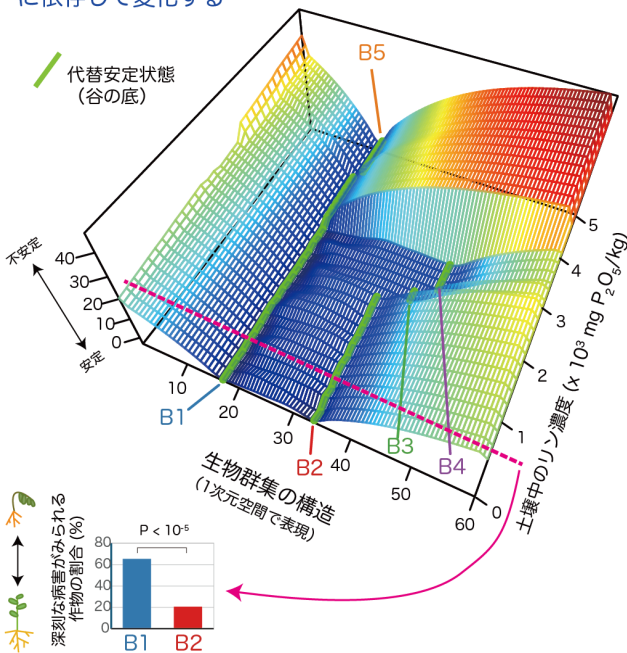
タイトル: Microbiome assembly statistics toward ecosystem-scale insights, forecasting, and management

著者: Toju H, Suzuki S, Sánchez-Pinillos, M, Shima G, Kageyama T, Hayashi I, Noguchi M, Fujita H, Goto Y, Nakaoka S, Ushio M, Ichihashi Y, Fricke WF, Mizumoto K, Takayasu L, Suda W, Takayasu M, Yamamichi M, Weckwerth W.

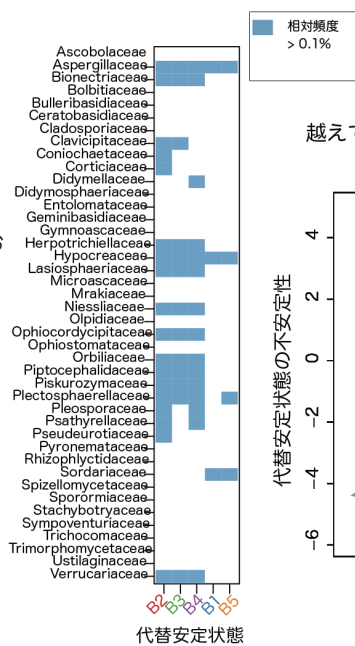
掲載誌: *The ISME Journal* DOI: <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrag085>

< 参考図表 >

群集集合地形の構造は環境条件（リン濃度）に依存して変化する



代替安定状態の群集構造



環境条件の変化と群集構造のシフト

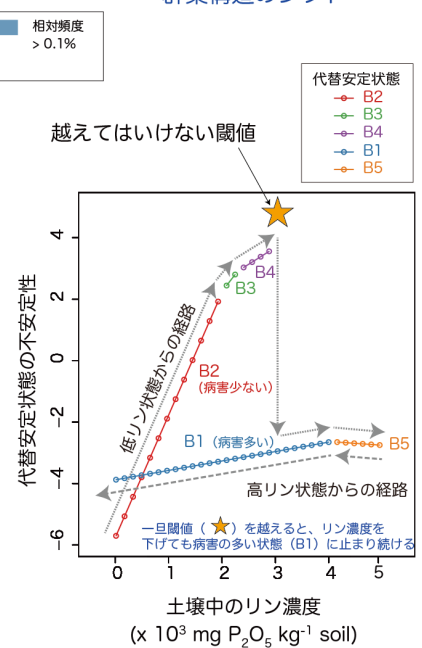


図 環境条件が変化すると、生物群集動態の規則（ルール）が変化する。