

# 「やわらかい」ネットワークを作るコア生物種

## —生態系の柔軟性を支える種を探索する—

### 概要

京都大学生命科学研究科の東樹宏和 教授、生態学研究センター 鈴木紗也華 元博士課程学生 および 馬場友希 農業・食品産業技術総合研究機構上級研究者らの研究グループは、多様な生物種が織りなす相互作用ネットワークに着目し、生態系全体の「柔軟性」を高める役割を果たす種を探索する手法を開発しました。

社会の中において人と人が網の目のように構築されているように、生態系の中における生物種間の関係性も複雑なネットワークを形成しています。こうした相互作用で構築されるシステムが、環境の変化に対して脆弱なのか、頑健なのか、という問いは、基礎科学の面でも、応用科学の面でも、重要な意味を持っています。

本研究では、生物種間ネットワークの構造が、時間の移り変わりとともに変化していく程度を定量化するとともに、ネットワーク全体の柔軟性を高める働きをする生物種を探索する指標を開発しました。「DNA メタバーコーディング」と呼ばれる技術を用いた先行研究で明らかになった草原生態系内における「食う-食われる」関係のネットワークにこの手法を適用したところ、数種類の捕食者と被食者が生物群集全体の柔軟性に寄与していることが推測されました。

生物多様性が世界中で減少する中、生物群集全体の柔軟性を高める種を見出すことで、頑健な生態系を効率的に再生していく道が見えてくると期待されます。DNA 分析や情報科学的手法の発展によって、生物種間ネットワークの動態が徐々に明らかになってきていますので、さまざまなタイプの生態系のそれぞれにおいて、システム全体の柔軟性・頑健性を高める鍵を見出していくことができると期待されます。

本成果は、2024年3月5日（現地時間）に米学術誌「*PNAS Nexus*」に掲載されました。

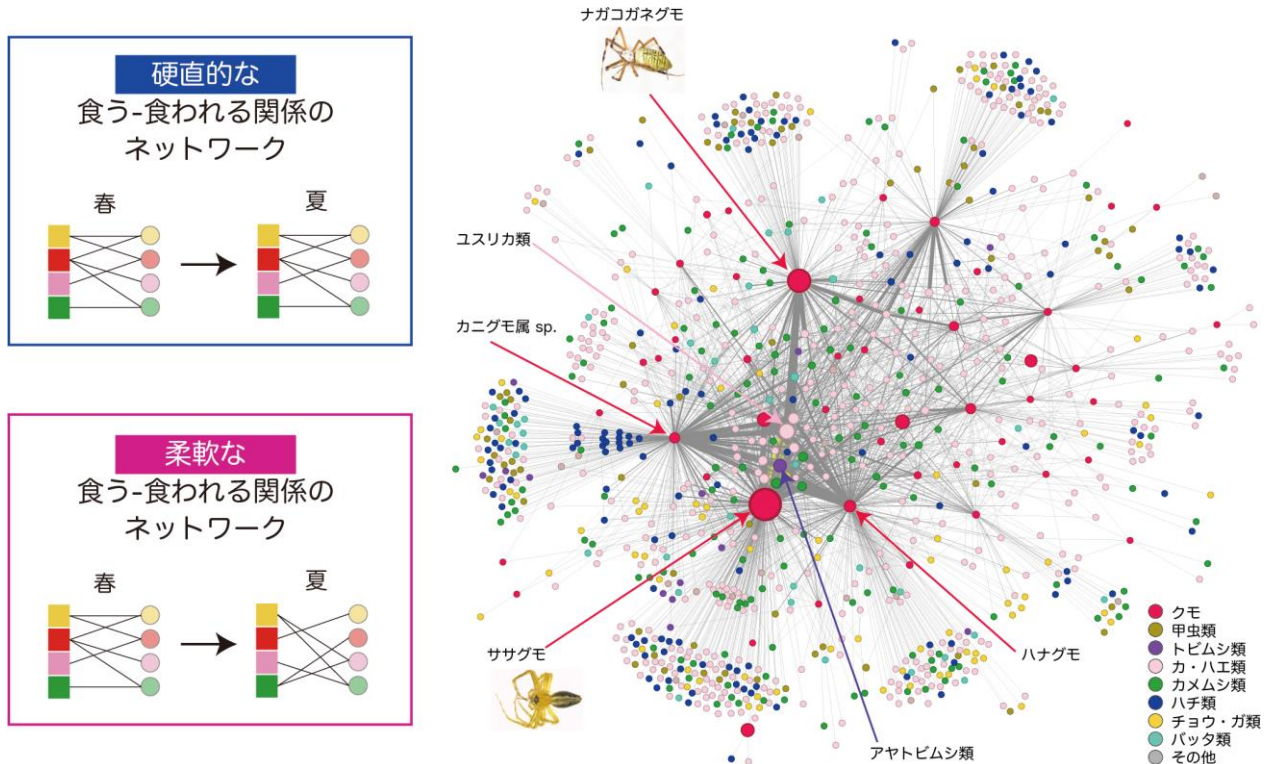


図 1. 構造が柔軟な相互作用ネットワークは、環境攪乱に対して頑健であると期待される（左）。ネットワークの柔軟性に寄与する種を探索する手法を開発した（右）。

## 1. 背景

生態系内において、生物種たちは、複雑な関係性のネットワークでつながっています。このネットワークの中で、絶滅してしまう種が現れると、その種と関係性を結んでいた他の生物種にまで影響が及び、生物群集全体の構造が崩れてしまう恐れがあります。しかし、多種とのつながりが柔軟な種が存在すれば、こうした連鎖的な生物群集の崩壊を防ぐ働きを担っていると期待することができます。

こうした、「柔軟な相互作用ネットワーク」に関しては、数理モデルを用いた理論的研究がこれまでに進められてきました。その一方で、実際の生態系において相互作用ネットワークの構造がどの程度変動しているのか、また、そうした変動の中で中核的な役割を果たす種が存在するのか、という点での実証研究は立ち遅れてきました。

## 2. 研究手法・成果

本研究では、DNA メタバーコーディング（※1）という技術で明らかになった膨大な相互作用ネットワークの情報を分析し、生物間相互作用ネットワークの柔軟性に寄与する種を探索しました。草原生態系を対象とした先行研究（※1）で、50種のクモ（捕食者）と約1,000種の餌生物（被食者）の関係性で構築されるネットワークについて、8ヶ月間に渡る時系列変化が解明されていました。そこで、このネットワーク構造が変化していく過程（図）で、相互作用する相手を柔軟に変化させていた種を検出するアルゴリズムを構築しました。

その結果、季節によって餌生物種を柔軟に変化させる傾向の強い捕食者種や、季節によって異なる捕食者に利用されやすい被食者種の存在が明らかになりました（図）。特に、被食者については、トビムシやユスリカといった「腐食性」（生きていない植物体ではなく、植物遺体や植物遺体を分解する真菌類を食べる性質）の節足動物が相互作用ネットワーク全体の柔軟性に特に強い効果をもたらしていることが推測されました。こうした「地味」な腐食性生物たちが生物群集を安定化させる役割を担っている可能性が浮き彫りになることで、生態系全体の機能の劣化を食い止めるための糸口が見出されると期待されます。

## 3. 波及効果

今回開発した解析手法は、対象とする生物群や生態系を問わず、適用することが可能です。これまで、「静的」なものと仮定されることが多かった生物種間の関係性ネットワークですが、実際にはダイナミックに変化しています。環境の攪乱に対して生物群集が柔軟に応答できるかどうか、という視点は、地球温暖化をはじめとする各種の問題が深刻化してきた現代においてとても大切です。相互作用ネットワークの柔軟性を高める働きをする種を見出すことで、生態系を再生・強化していく道が見えてくると期待されます。

## 4. プロジェクト立ち上げの経緯と将来展開

本研究室では、数百・数千種の生物たちが織りなす相互作用ネットワークの構造を解明するとともに、その複雑な動態を解明する作業を進めています。生物38億年の進化史を経て形成されている現在の地球生態系は、こうした複雑な相互作用ネットワークをもとに成り立っています。ありとあらゆる生物機能を取り込んだ最強生物1種が存在するわけではありません。異なる機能をもつ生物種でシステムが構成されているという現象自体に、生命を理解する上で避けては通れない原理が潜んでいるのだと考えています。

本研究により、研究者の世界においてさえその存在があまり顧みられていない腐食性節足動物たちの重要性が浮き彫りになりました。世界中で生態系の劣化が進む中、こうした生態系の陰の立役者たちが人知れず果たす役割を解明し、頑健かつ自律的に再生していく生態系を設計していきたいと思っております。

## 5. 研究プロジェクトについて

本研究は、以下の資金の援助を受けて行われました。

科学研究費基盤 A「先端技術の融合で解き明かす地下生態系のブラックボックス」(18H04009)

JST 創発的研究支援事業「生態系レベルの生物機能最適化を実現する越境科学フロンティア」(JPMJFR2048)

### <用語解説>

#### ※1 DNA メタバーコーディング

次世代 DNA シーケンサーと呼ばれる機器で、膨大な生物種の存在を明らかにする技術。捕食者をサンプルとした場合は、その体内に含まれる餌生物種のリスト作成に応用することができる。詳しくは、先行研究に関する資料を参照（「地上と地下の生態系をつなぐ「コア生物種」—DNA メタバーコーディングで見えてきた食物網の季節動態—」：<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2023-07-18-0>）。

### <研究者のコメント>

自律的に自分の役割を変化させる人の多い柔軟な組織と、各自が縦割りの領域内で硬直的にしか動かない組織とでは、パフォーマンスも危機に対する頑健性も、格段に違います。システム全体の柔軟性を高める働きを担う要素をネットワーク構造の中から見出すことで、生態系の安定性と機能に関する理解が深まってくると期待しています。

### <論文タイトルと著者>

タイトル：Interaction network rewiring and species' contributions to community-scale flexibility

(相互作用ネットワークの構造変化と群集レベルの安定性における種の役割)

著者：Hirokazu Toju, Sayaka S. Suzuki, and Yuki G. Baba

掲載誌：PNAS Nexus

DOI：<https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgae047>

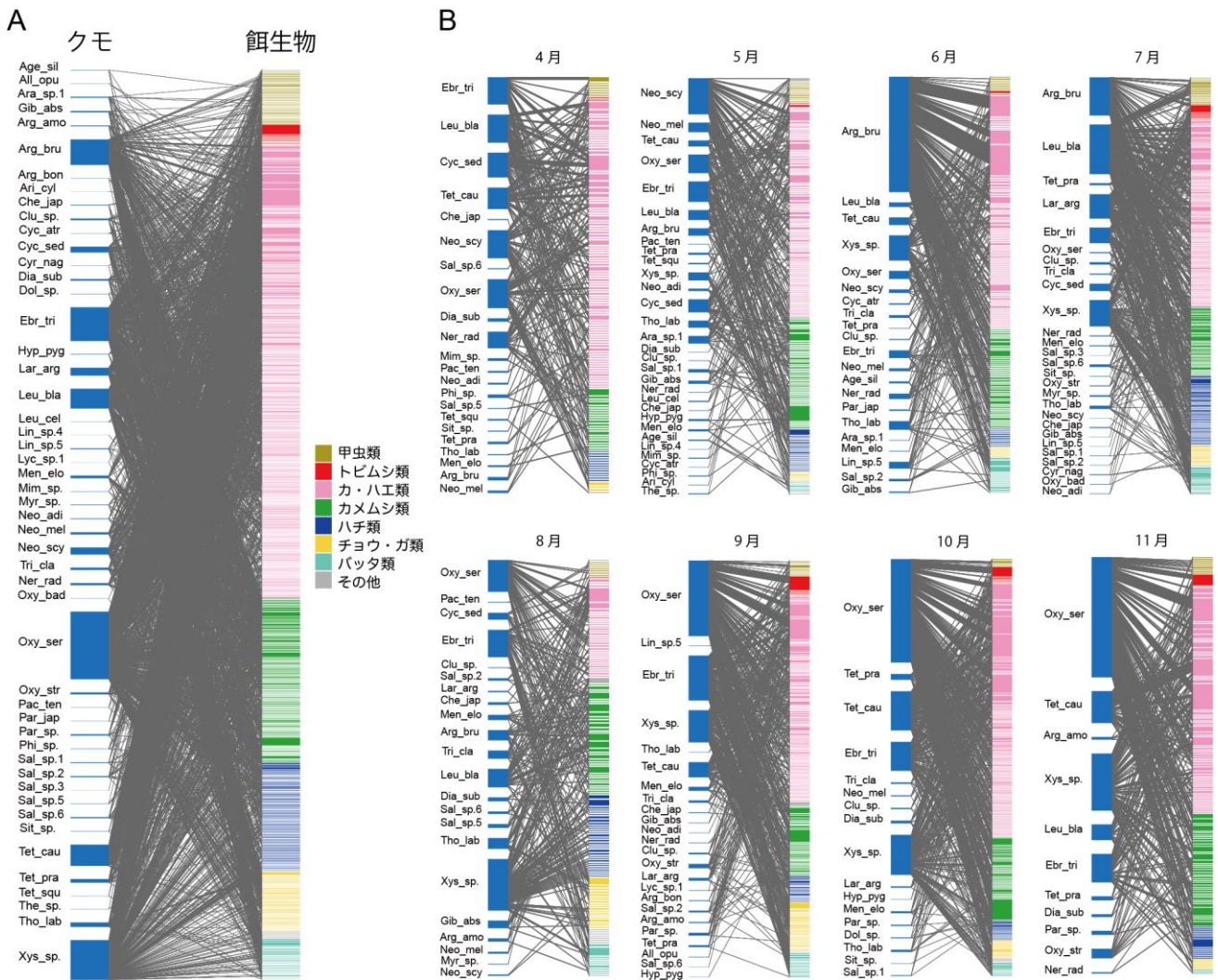


図 2. 50 種のクモと 974 系統/種の餌生物種のネットワーク。4~11 月の間に検出された食う-食われる完成の全体像 (A) と、各月における相互作用ネットワーク (B)。先行研究 (Suzuki et al. 2023 *Nature Ecology & Evolution* 7:1432-1443) のデータをもとに作図)。

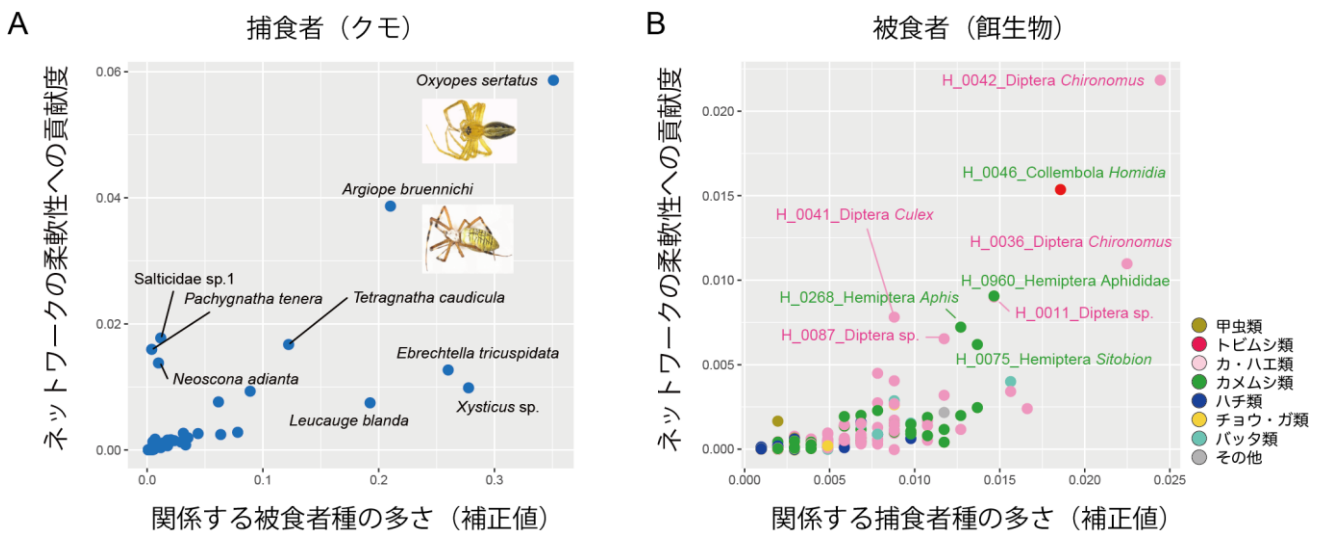


図 3. ネットワークの柔軟性に対する貢献度。捕食者 (A) と被食者 (B) のそれぞれにおいて、ネットワークの時系列変動の中で、相互作用する相手を変化させる度合いの大きかった種を探索した。