

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—

概要

京都大学生態学研究センター 鈴木紗也華 元博士課程学生と東樹宏和 同准教授 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員らの研究グループは、生物多様性を網羅的に解明する「DNA メタバーコーディング」技術を応用し、50 種のクモと約 1,000 種の餌生物が織りなす食物網の構造とその動態を解明しました。

他の生物を捕食する生物の体内には、餌種の DNA が含まれています。本プロジェクトでは、早春から晩秋の草原生態系を対象とした野外調査で 2,000 個体以上のクモを採集するとともに、その全個体について餌種 DNA をターゲットにした分析を実施しました。その上で、食物網の構造をネットワーク科学の観点から解析しました。

その結果、食物網の構造が季節の移り変わりとともに劇的に変化している様子を捉えることに成功しました。検出された約 1,000 種の餌種の中には、植物の葉を食べる昆虫や地下の有機物を食べるトビムシ類、他の節足動物を餌とする捕食者や寄生者が含まれていました。こうした多様な餌を捕食し、地上と地下の生態系間をつなぐ役割を果たしているクモを探索したところ、季節の変化とともに食う-食われる関係のネットワーク内で中核に位置する種（「コア生物種」）が入れ替わっていることが明らかになりました。

肉眼観察だけでは捉えきれない生物種間の関係性を一挙に解明する本研究のアプローチを今後拡大することで、生態系内でどのように物質が循環しているのか、生態系の機能と安定性に「コア生物種」がどのように寄与するのか、といった核心的な問いに答える基礎が構築されると期待されます。

本成果は、現地時間 2023 年 7 月 17 日 16:00 (London time) に英学術誌「*Nature Ecology and Evolution*」に掲載されました。

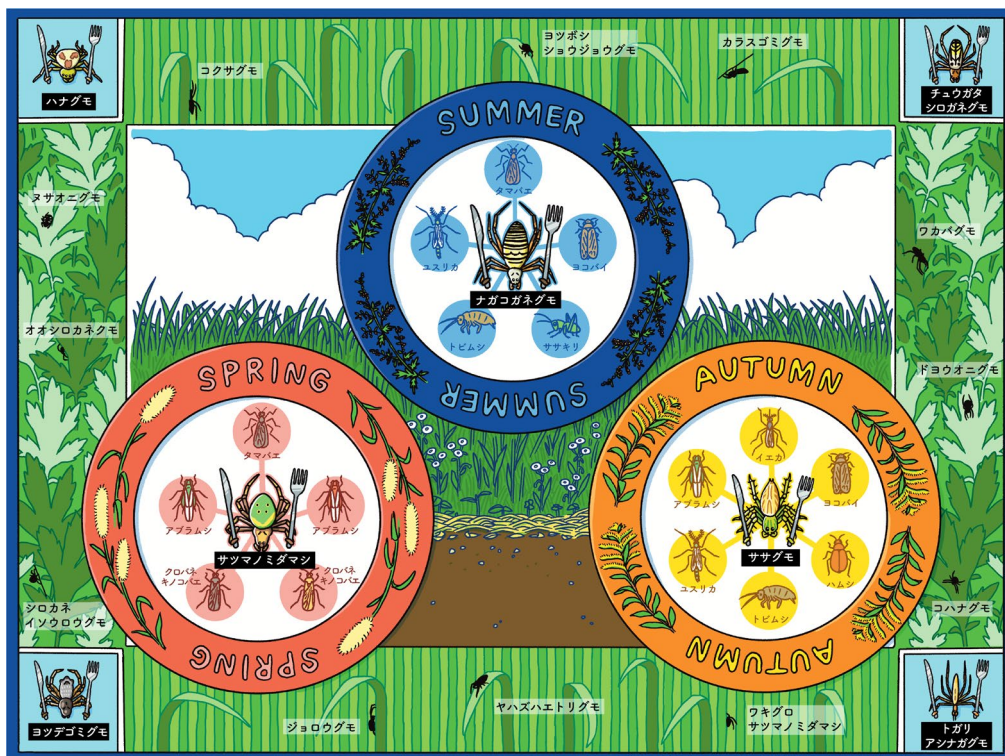


図. クモを中心とする食物網構造の季節変動（概念図）。©きのしたちひろ

1. 背景

生態系内では、「食う-食われる」関係の複雑な相互作用ネットワークが人知れず張り巡らされています。これまで、直接観察で生物種のこうした関係性を探る試みがなされてきましたが、小さな生物や夜行性の生物の捕食行動までを網羅的に観察することは極めて困難でした。

そうした中、DNA メタバーコーディング（※1）という技術で対象生物の体内や糞に含まれる餌生物の情

報を取得する技術が注目を集めてきています。しかし、捕食者の DNA ばかりが検出されて餌生物に関する情報が得られない、といった技術的な課題がありました。また、分析の対象とする捕食者も、1種から数種程度の研究が大多数で、食物網の構造を解明するような規模の研究はほとんどありませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究では、綿密な技術的検討で餌生物種の検出効率を高めるとともに、かつてない規模での捕食者種のサンプリング (2,000 個体以上の捕食者の採集) を行い、食物網の構造を解明することを目指しました。また、その食物網の構造が、季節の変遷とともにどのように変化していくのか、世界に先駆けて大規模に追跡することを目指しました。

研究対象として、滋賀県大津市の草原生態系におけるクモ群集に着目しました。クモは身近な生態系においても高い種多様性を示し、広範な餌生物を捕食することが知られています。しかし、その個々のクモ種がどういった餌レパートリーを持ち、季節の移ろいの中、生態系内でどのような役割を果たしているのか、といった点については、ブラックボックスのままでした。

まず、春 (4 月) から晩秋 (11 月) までの 8 ヶ月間にわたり、合計で 63 種 2,224 個体のクモを採集しました。その上で、全個体のそれぞれから DNA メタバーコーディングによる餌種の分析を行い、50 種 1,556 個体から合計で 974 種類の餌種 DNA を検出することができました。

この膨大な餌内容の情報をもとに、食物網の構造が季節の推移とともにどのように変化していくのか解析しました (図 1)。各月の食物網構造をネットワークとして分析すると、「食う-食われる」関係が特に密になっているクモと餌種で構成されるグループ (「ネットワーク・モジュール」) がいくつか定義できます (図 2 の M1、M2 等)。この捕食-被食関係のモジュールの間で、地上の餌 (植食性昆虫等) と地下の餌 (土壌動物等) が占める相対的割合が異なっていました。また、季節の推移とともにこのモジュールが離合集散するパターンがみられ、地上の生態系と地下の生態系が密接に絡み合っている様子が明らかになりました。

また、季節によって食物網の中核に位置するクモの種が変化することも明らかになりました (図 3)。こうした「コア生物種」は地上と地下の生態系の物質循環や安定性に大きな影響を与えられそうですが、その役割が季節の推移とともにリレーされていくことがこの結果から推測されます。

3. 波及効果

本研究によって、約 1,000 種もの生物たちが織りなす関係性のネットワークを、その動態とともに一挙に解明する手法を確立することができました。従来の食物網研究では、「食う-食われる」関係のネットワーク構造が固定されていることを前提に分析や解釈が行われてきました。しかし、本研究で示されたように、生物種間の関係性は、非常にダイナミックに変動しており、生態系の要としての役割を果たす生物種も、時間とともに交替していきます。明確なデータとともに自然界のありのままの現象を捉える技術が発展することで、なぜ多様な生物が生態系内で共存できるのか、なぜ崩壊しやすい生態系と崩壊しにくい生態系があるのか、といった根源的な問いに答える土台が固まっていくと期待しています。

4. プロジェクト立ち上げの経緯と将来展開

生態学の古典的な問いの一つに、「世界はなぜ緑なのか？」というのがあります。精緻な進化を遂げた植食性昆虫たちが地球上に溢れかえっているのに、なぜ植物は多くの生態系で食べ尽くされていないのでしょうか？ シンプルですが、実はまだ決定的な答えが出ていない重要な問いなのです。重要な仮説として、植食性昆虫の捕食者が植食性昆虫の数を抑えている、という説があります。しかし、「生態系ピラミッド」と表現さ

れるように、捕食者は餌生物よりも遥かに数が少ないことが生態学の「教科書的事実」とみなされてきており、植食性昆虫の急激な増殖を抑制するだけの効果が捕食者にあるのか、疑問に感じられます。

本研究プロジェクトを立ち上げた背景には、「世界はなぜ緑なのか？」という問いに答えたい、という動機がありました。実は、野外で草や木の上にいる虫たちを虫網でごっそりと採集すると、植食性昆虫に負けない数のクモが採れることが多く、全然「生態系ピラミッド」になっていないのです。そこで、「地下生態系の膨大な餌を食べて数を増やしたクモたちが、地上の植食性昆虫の増加を制御している」という仮説にたどり着き、それを徹底的に証明しようとしたのが本プロジェクトでした。

「こわい」存在とみなされがちなクモたちですが、実はクモたちのおかげで「緑の地球」が保たれているのです！ 本研究を通じて、クモたちをいままでとちょっと違った視点で見ただけだったら幸いです。ハエトリグモなんて、つぶらな腫でぴよこぴよこはねて、獲物を狙っているところなどを見つけると、ついつい見入ってしまいます。

本研究で膨大な生物種間の関係性を明らかにできたとは言え、生態系内にはクモ以外にも多様な捕食者が存在します。より幅広い生物群を分析の対象とすることで、生態系が刻々と変化していくようすを捉えていきたいと思います。

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

土壌や海水といった多数の生物種のゲノムが含まれるサンプルを分析し、そこに存在する生物種の組成を解明する DNA 分析技術。次世代 DNA シーケンサーと呼ばれる機器で、膨大な種のリストを作成することができる。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が、捕食者自体の DNA が大量に含まれるため、技術的な工夫が必要となる。

<研究者のコメント>

餌生物への選り好みがないと言われてきたクモでも、種や季節によってその振る舞いが違うことを、長期的なサンプリングにより明らかにすることができました。今後は食物網の季節動態がより注目されていくことを期待しています。

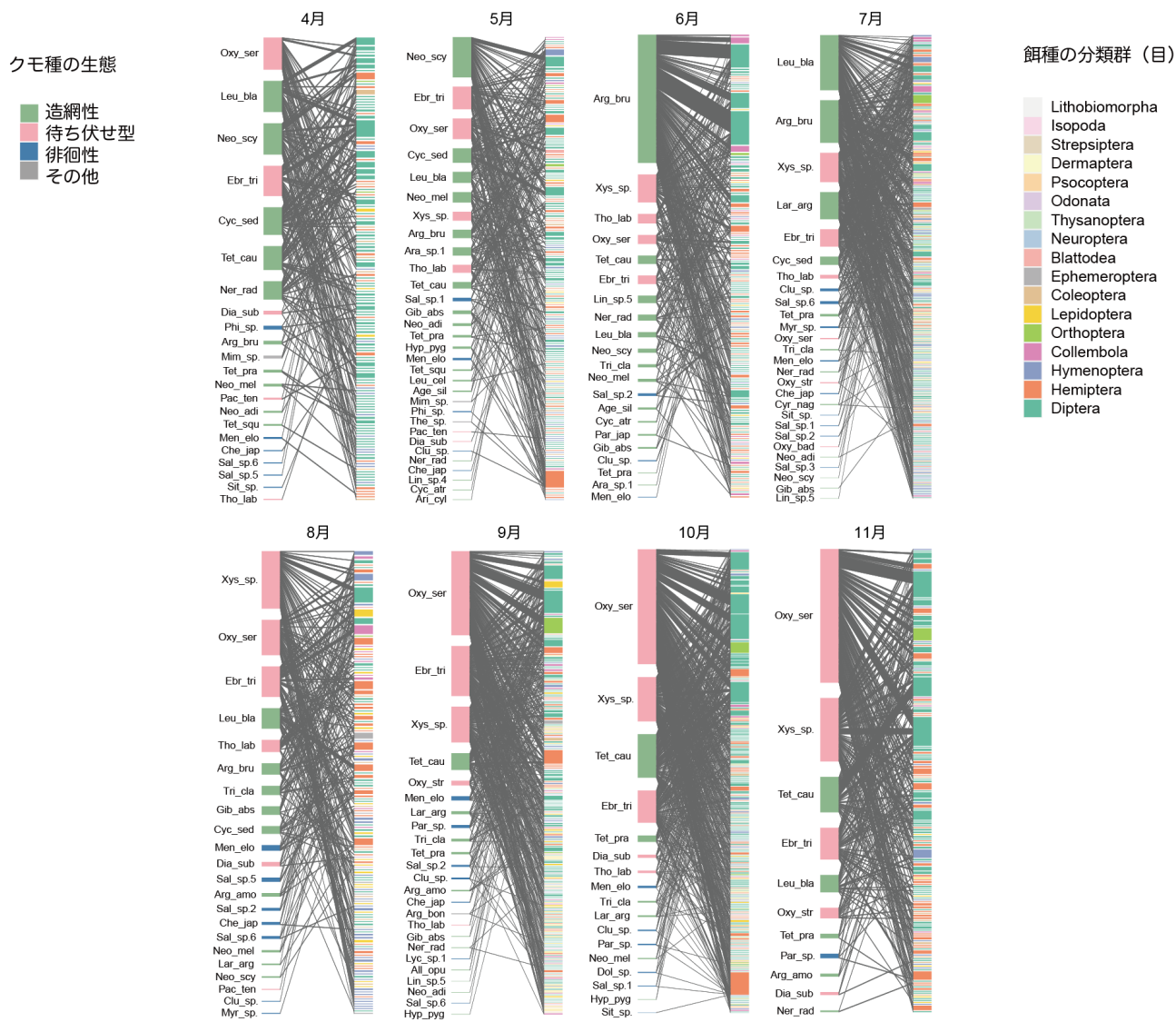


図 1. クモと餌種のネットワーク。各月の登場したクモの種（左）とそれぞれのクモ種から検出された餌生物（右）を線で結んである。

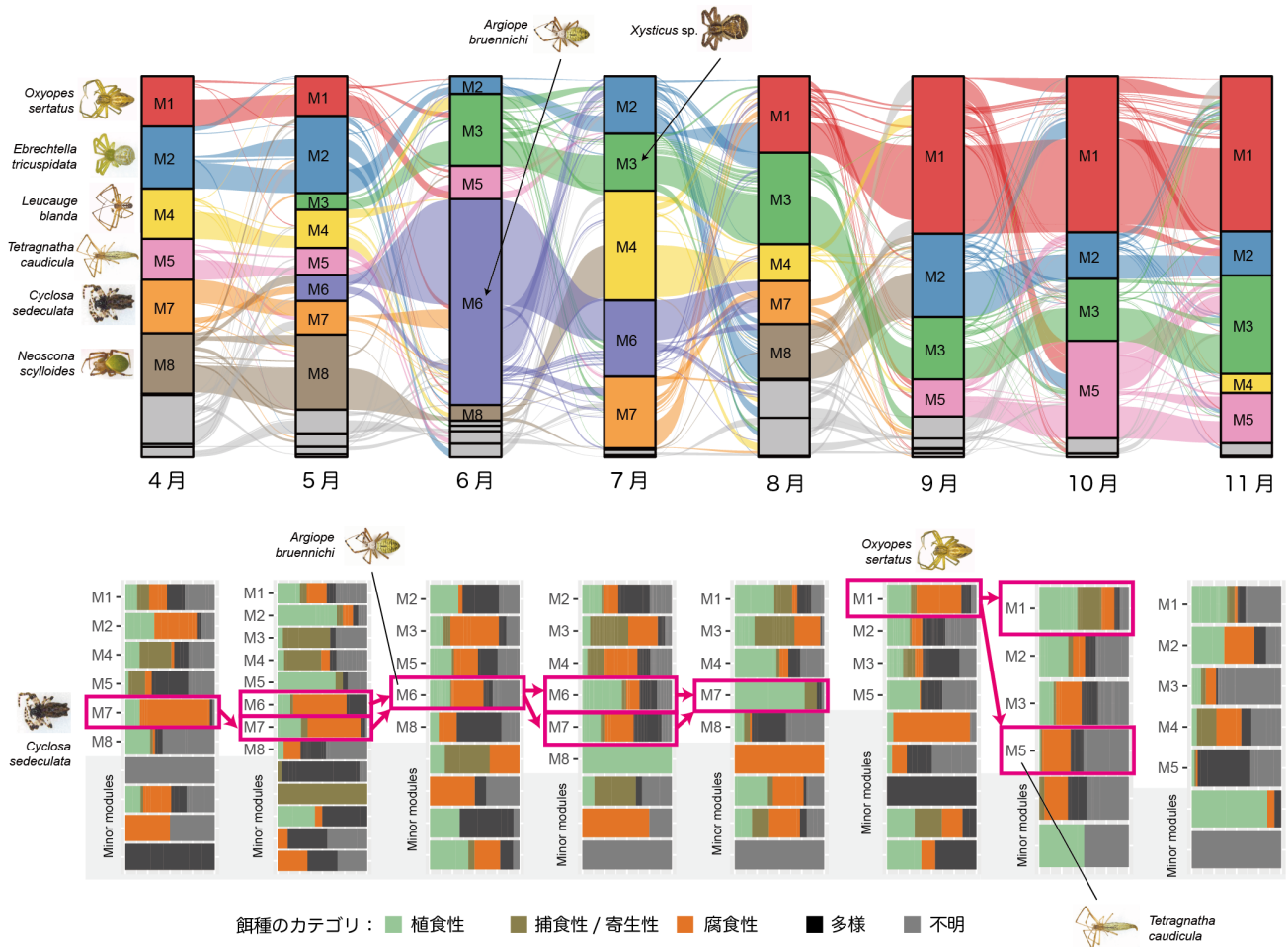


図2. ネットワーク・モジュールの推移（上）と各モジュール内の餌構成（下）。「食う-食われる」関係が密になっているクモ種と餌生物で構成されるネットワーク・モジュールを異なる色で示した（上）。そのモジュールの構成種が季節の移ろいととも受け継がれていく様子を示している。M1~M8のモジュールそれぞれについて、代表的なくモ種を写真で示した。下図では、各モジュールを構成する餌生物の構成を、割合で示している。餌の構成比率が違うモジュールが季節の変化とともに分離・融合する様を、ピンク色の枠線と矢印で例示した。

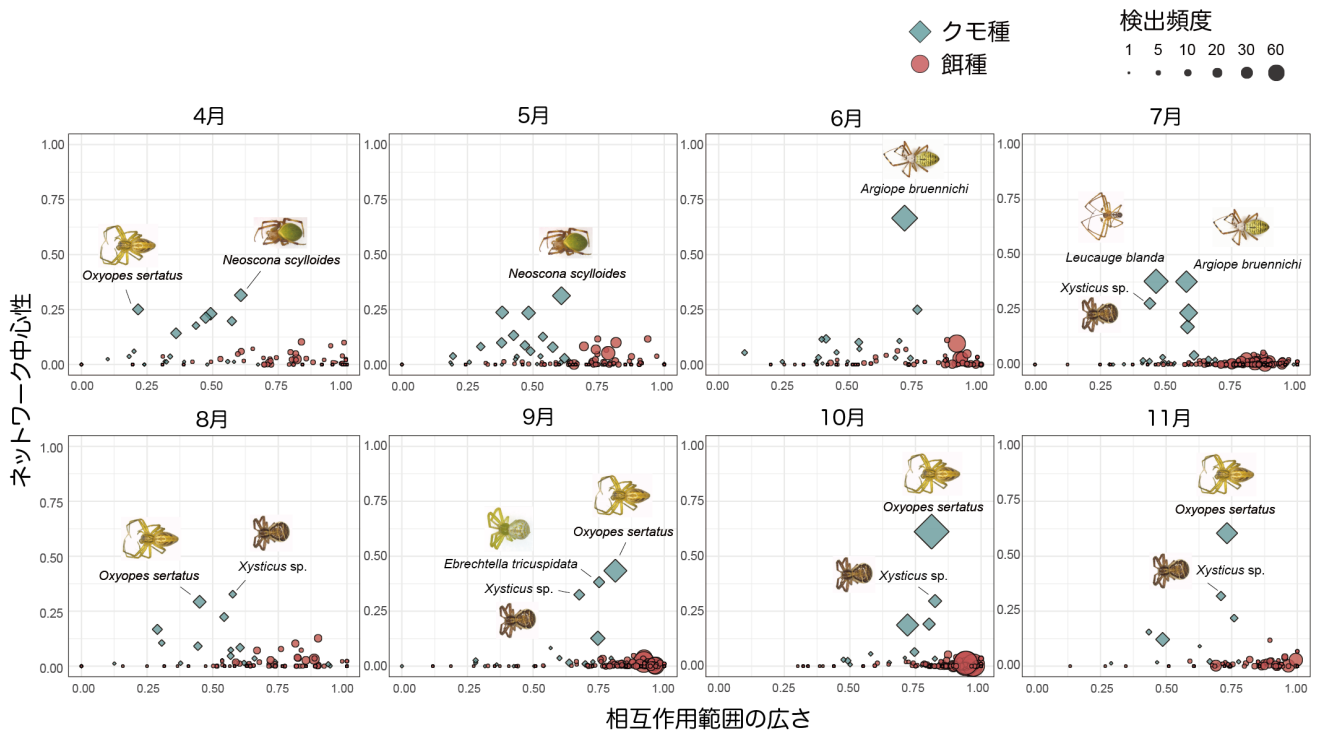


図 3. 「コア生物種」の変遷。右上に位置する種ほど、ネットワーク内で重要な位置を占める。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Dynamics of species-rich predator-prey networks and seasonal alternations of core species
(種多様な捕食-被食ネットワークの動態とコア生物種の季節交替)

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

掲載誌：Nature Ecology and Evolution

DOI：10.1038/s41559-023-02130-9.