

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K06341

研究課題名（和文）所属群集と生息環境推定により国内未定着外来種の分布を高度に予測する

研究課題名（英文）Predicting the fine scale distribution of invasive alien species through analyzing their potential habitats and community

研究代表者

池上 真木彦（IKEGAMI, Makihiko）

国立研究開発法人国立環境研究所・生物多様性領域・主任研究員

研究者番号：60791366

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はアリ類を対象に、在来種と外来種の原産域・侵入域の気候ニッチと土地利用ニッチを評価し、生態ニッチモデルの精度を比較した。さらに、外来アリが利用するニッチおよび所属群集、日本国内に定着可能な既知外来アリ種数の推定も行った。解析の結果、外来アリは土地利用において保守的であり、土地利用データを元にした分布推定が有用であることが示された。また、群集解析により潜在的な外来アリの推定が可能で、国内では最大で60種程度の既知外来アリが定着可能であることが判明した。これらの成果は、未定着外来種や潜在的な外来種の侵入リスク評価や生態系管理に重要な知見を提供し、実践的な防除対策に役立つことが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の結果は、外来種の生態ニッチに関する新たな知見を提供し、特に土地利用データを用いた種分布予測の有用性を示している。また、原産地域における外来種の所属する群集解析が潜在的な外来種の予測に有用であることも示された。これは外来種の侵入リスク評価や生態系管理において、本研究の予測手法は実践的な防除対策の策定に寄与し、社会的意義も大きいと考えられる。本手法は他の分類群に対する分布予測にも応用可能であり、従来の気候データのみを用いた手法に比べて、より現実的かつ詳細な予測が可能となると考えられるため、保全生態学や生物地理学の分野においても貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：This study focused on alien ant species, including their native distribution and non-alien species to compare ecological niches using climate and land use data. Through analysis of niche breadth, niche conservatism, niche shifts, and community analysis, we identified alien ant species showed niche conservatism and ecological niche models (Maxent models) with land use data is effectively predict their distributions. Additionally, principal component analysis was used to evaluate the conservatism and shifts of ecological niches between native and invaded regions, showing that invasive species often exhibit generalist tendencies with broad niche breadths and similar land use types in both native and invaded regions, suggesting species in the same groups can become alien species. These findings provide crucial insights for assessing invasion risks and managing ecosystems and are expected to contribute to effective control measures.

研究分野：侵入生物学

キーワード：外来種 生態ニッチ 種分布モデル GIS アリ 土地利用

1. 研究開始当初の背景

物流や人の移動の増加に伴い、非意図的に導入される外来種の数が増加しており、その中でも多大な被害が予測される侵略的外来種の侵入を防ぐため、水際での防除や駆除に多大なコストがかけられている。効果的な防除のためには、定着の可能性が高い種とその定着場所を予測することが重要であり、生態ニッチモデル(ENM: Ecological Niche Model あるいは種分布モデル SDM: Species Distribution Model) が用いられている。生態ニッチモデルは、種の分布と環境要因を統計的に解析し地図化することが可能なため、リスクマップなどに広く用いられているが、防除の現場ではその活用が進んでいない。これは気候を基にした種分布モデルの最小予測単位(解像度) が 1 km 程度であるのに対して、実際に対象となる外来種が生息する範囲はその中でも限られているため防除を要する具体的な地点推定には不向きであることが理由として挙げられる。詳細な予測には土地利用なども考慮する必要があるが、近年まで土地利用データが全球規模で整理されておらず、また土地利用データは種分布予測には不向きとする研究も存在していたため、その利用は進んでいない。さらに国内未定着種に関しては、国内での生息データが存在せず、気候や土地利用が異なる他国のデータを元に推測することとなり、予測の精度に疑問が残る。そのため、従来の気候を基にした生態ニッチモデルよりさらに詳細なスケールで土地利用などが考慮され、また国内におけるデータが存在しない未定着種であっても精度よく国内での生息地推定が可能な手法の開発が必要であった。

2. 研究の目的

本研究は、外来種群集とその生息環境に着目し、「外来種が生息する場所(生態ニッチ)」と「外来種が所属する群集」を気候・土地利用から推定し、未定着種が生息する可能性が高い地域の評価を試みる。そして得られた知見を基に、情報が不足しがちな国内未定着外来種を含む外来種が定着する地域と生息環境を高精度に予測し可視化する技術の開発を目指す。研究上の第一の目的は、土地利用データと気候データを用いた生態ニッチ評価とニッチモデルの精度検証であり、従来の気候データに基づく予測の限界を超え、より高精度な分布予測を実現することを目指す。第二の目的は、外来種の原産域と在来種が利用するニッチの比較による潜在的な外来種の推定であり、侵入種を輩出する可能性の高い群集を土地利用データと気候データから推定し、外来種が生息する・輩出する群集を規定する生息環境を予測する。これらを達成することにより、外来種の分布範囲を高精度で予測し、潜在的な外来種のリスク評価と管理において実践的な成果を上げることが可能であると考えられる。そして予防的な防除対策を策定するための基盤情報と手法を提供し、潜在的な外来種のリスク評価と管理において実践的な成果を上げること最終目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、まず生態ニッチモデルの根幹となる「生態ニッチ」に着目し、外来種が原産域と侵入域で利用するニッチの違いを土地利用ニッチと気候ニッチで評価を行った。そして、ニッチ利用の違いが生態ニッチモデルによる外来種分布予測精度に与える影響を検証した。外来種が原産域で利用するニッチと同じニッチを利用する在来種は、潜在的に外来種となる可能性があるかと仮定できる。また外来種が侵入域で利用する生態ニッチと同じニッチを利用する在来種は外来アリの影響を受けやすいと考えられる。そこで主成分分析を用いて、在来種の自生域および外来種が原産域および侵入域で利用する土地利用ニッチと気候ニッチを定量化し、クラスター分析による群集解析を行った。次いで外来アリの侵入域・原産域それぞれで同じ群集に属する在来アリを特定し、その群集を規定する生息環境を土地利用・気候ニッチに分けてロジスティック回帰により推定し、各種が各地域で利用するニッチを「景観スコア(主成分)」として表現した。最後に、得られた生態ニッチ評価と外来種群集を規定する環境要因(景観スコア) を基に、土地利用ニッチと気候ニッチによる生態ニッチモデルを作成し、それらを組み合わせたモデルにより日本定着種を含め今後日本に定着・分布拡大する可能性のある種とその分布範囲の予測を行った。

材料と方法

(1) アリデータ収集

本研究では、外来種としてアリ類を研究の対象とした。アリ類の詳細な分布データは、GBIF (Global Biodiversity Information Facility) から 2000 年以降の全アリ分布データを入手し、AntWeb や AntMap を用いて各分布地点における外来・在来を決定した。また在来種であっても AntWeb の分布域外に存在する地点は信頼性が低いとして除去し、バイアス補正のため 10 km 以内の同種データの除去を行った。最終的に 20 地点以下の種(外来種の場合原産域・侵入域それぞれで 20 地点) は解析から除外し、在来種(自生域) 1638 種、外来種(86 種) を対象として解析を行った。

(2) 気候データ・土地利用データ

気候データは、WorldClim 2.1 から 10 の生物気候パラメーター(気温日変化、気温季節変化、最高気温、最低気温、年降水量、降水季節変化、夏季降水量、冬季降水量、雨季気温、乾期気温) を 2.5 arc minutes (赤道下で概ね 5km²) の解像度で取得した(Fick and Hijmans 2017)。土地利用

用データは、Copernicus Global Land Operations の 2015 年データを 24 区分から 10 区分（低木、草原、農地、市街、裸地、湿地、水域、閉森林、開森林、海域）に整理し、100m ごとのデータから 5km²内での土地利用比率を計算して解析に用いた(Phillips and Dudík 2008) (<https://land.copernicus.eu/>)、

(3) ニッチ幅の計算

各種の各分布地点周辺の気候データ・土地利用データを抽出し、原産域・侵入域それぞれの生態ニッチを Di Cola (2017)による EcoSpat パッケージの手法を参考に算出した(Cola et al. 2017)。まず主成分分析(PCA)を用いて環境データの情報を集約し、各軸の最大値・最小値や分散を用いてニッチ幅を算出し、外来アリに関しては原産域・侵入域におけるニッチ保守性(重なり具合)とニッチ進出性(侵入域で新たに利用したニッチ)の計算を行った。

(4) 生態ニッチモデル(ENM)

本研究では、アリ分布データに不在情報が存在しないため、在情報のみでも高精度の予測が可能な Maxent モデルを利用した(Phillips and Dudík 2008)。Maxent は様々なモデルオプションが存在するが、本研究ではデータへの過剰適合を防ぐために、線形式と二次式のみを利用した。各種の現在の分布地点から 400 km 範囲内をバックグラウンドとして環境データを取得してモデルを作成し、全球を対象として分布予測を行った(Ikegami and Jenkins 2018)。モデルの作成には各種の分布データをランダムに選んだ 70% を使用し、残りの 30% で精度テストを行うプロセスを 10 回繰り返し、その平均を最終モデルとして評価した。また気候データと土地利用データを用いた 2 種類のモデルを作成し、予測精度による重みづけを行い「統合モデル」を作成した。モデルの精度は、AUC (Area Under Curve: 受信者動作特性曲線下面積)という、種分布モデルの予測(陽性・偽陽性・陰性・偽陰性)を総合的に評価する指標を用いて評価した。AUC は、モデルがランダムな予測よりも優れているかどうかを判断するための指標であり、1 に近いほど予測精度が高いことを示している。

4. 研究成果

(1) ニッチ保守性

主成分分析を用いて、外来種が原産域そして侵入域で利用する土地利用・気候それぞれのニッチを計算したところ、外来アリの多くは侵入先であっても、原産域と同じ土地利用ニッチを利用する比率が高い(保守的)一方、侵入域では新しい気候ニッチに進出する傾向があることが示された。これは、外来種の分布予測において土地利用では高精度に予測できるが、気候では予測が難しいことを示唆していると考えられた。そこでその検証のため、土地利用・気候それぞれで生態ニッチモデル(ENM)を作成し、AUC を用いてモデルの精度を検証したところ、生態ニッチモデルの予測精度とニッチ保守性の間には相関関係がないこと(図 1 左)、土地利用ニッチモデルと気候ニッチモデルの AUC には正の相関があることから(図 1 右)、生態ニッチモデルの予測精度はニッチ保守性以外の要因が大きいことが示唆された。

(2) 外来種のニッチ比較と景観スコアから見た潜在的な外来種

主成分分析を用いて在来種そして外来種が原産域および侵入域で利用する土地利用ニッチと気候ニッチを定量化し、クラスター分析を行ったところ、外来種の侵入域および原産域の気候ニッチは様々なクラスターに出現するが、土地利用ニッチは原産域・侵入域ともに比較的限られた範囲に出現する傾向がみられた。また気候・土地利用ニッチともに、外来種が頻出するクラスターの存在も確認された。これは在来アリが存在しない海洋等(ハワイ等)の影響だと考えられた。ロジスティック回帰モデルと LASSO によるパラメーター選択により、在来種・外来種の侵入域・原産域を規定する土地利用と気候要因の推定を行ったところ、気候要因では、外来種は侵入域および原産域において暖かく、気温変動が少なく、降水量が少ないが乾期降水量は多いという、やや乾燥した安定した気候に多いことが示唆された。また土地利用からみると、外来アリの侵入域は海洋、都市、湿原が選択され、原産域もそれに準ずる土地利用タイプであった。外来生物は一般的に人間の活動範囲に分布することが多く、都市圏は人が住みやすいやや乾燥した安定した気候に多く存在している。そして都市は沿岸部や河川周辺に発達することからも、本結果は外来種の分布は都市の分布を反映したものと考えられる。そこでアリ各種それぞれの分布域における土地利用の平均割合を算出し、都市・海洋の利用比率が高い方から低い方に配置した景観スコアの積み上げ棒グラフを作成したところ、外来アリの侵入域・原産域ともに都市や海岸が多い図の左側に多く出現することが判明した(図 2)。また在来アリ・外来アリが原産域および侵入域で利用する土地利用ニッチ幅とその景観スコアを算出したところ、外来種は人為的攪乱環境に多く出現し、攪乱環境に特化した Specialist よりも広いニッチを持つ Generalist が外来種になりやすいことが判明した。特に、外来種は原産域でも広い気候ニッチと土地利用ニッチを持ち、主に「攪乱環境」を利用する種が多いことも確認された。

(3) 分布予測

気候データのみ、土地利用データのみそして、その二つを統合した 3 つのモデルを作成し、その精度を比較したところ、土地利用データを用いたモデルも高精度であり、全球規模での解析であっても、種分布制限要因として土地利用が重要であることが示唆された。これは従来土地利用データは種分布モデルの精度向上には寄与しない・狭い範囲での分布予測でしか有用でないとされた知見とは反するものであるが(Thuiller et al. 2004)、他方で土地利用などを加味した全球予

測モデルはまだ事例が少ないため今後検証が必要だと考えられる。各パラメーターの重要度を精査したところ、外来種は土地利用の影響を受けやすく、都市や浜辺、湿地などに侵入する傾向があることが生態ニッチモデルからも確認された。気候データのみモデルも精度は高く、気候データと土地利用データを組み合わせることで、より現実的な分布予測が可能と考えられた。そこで気候と土地利用を組み合わせた統合モデルにより、各地点で生息可能な予測外来アリ種数を可視化したところ、熱帯の沿岸部や島、森林域や河川が多く種にとって好適な生息地となっていることが判明した(図3)。日本国周辺での外来アリ予測分布種数を精査したところ、既知の外来アリ82種のうち、既に定着しているものを含め、本州で20-30種、沖縄で50-60種ほどが定着可能と予測され、定着可能性が高いのは暖かい地方の都市部や沿岸、河川などを含む地域、そして島嶼部であることも判明した。

課題と結論

本研究により、外来種は気候よりも土地利用において保守的であることが確認された。生態ニッチモデルは、生物種が利用する生態「ニッチ」の存在を前提とし、その生態ニッチを地理上に描くことで生物の分布予測を行っているため、ニッチ保守性が高い種ほど予測精度が高いと考えられる。この考え方に従うと、土地利用による生態ニッチモデルの方が高い予測精度になると予測されるが、本研究ではニッチ保守性とニッチモデル精度に相関関係が見られなかった。一方各種の土地利用モデルと気候モデルの予測精度には相関関係があったため、ニッチモデルの精度を規定する他の要因があると予測された。同傾向は近年 Liu らによる研究でも報告されており(Liu et al. 2022)、生態ニッチモデルの根幹に関するため、今後の研究上の課題としたい。また初期の研究計画では景観スコアと群集データを統合したベイズモデルを作成する予定としており、そのために JSMD (Joint Species Distribution Model) の利用を進めたが、分布データから推定した群集データは地点数が限られ、同じグリッドに存在する種数が限定的な一方、地点数そのものが膨大となった。そのためか計算量が膨大となり別のアプローチが必要なことが示唆されたため、こちらも今後の課題としたい。

土地利用データと気候データを組み合わせた生態ニッチモデルは、現実的で高精度な分布予測が可能であることが示された。本研究で得られた定着可能な外来アリ数(アリ種)の知見は、外来種の侵入リスク評価や生態系管理において重要な役割を果たし、実践的な防除対策の策定に役立つと考えられる。本研究の結果は、他の生物種に対する分布予測にも応用可能であり、保全を必要とする在来種や病原体の分布予測や感染地理学などにも適用が可能であり、保全生態学など様々な分野に寄与することが期待される。またニッチ保守性と生態ニッチに関する新たな疑問点を示しており、今後生態学や生物地理学の分野においても活発な議論が出来るよう、論文発表を急ぎたい。

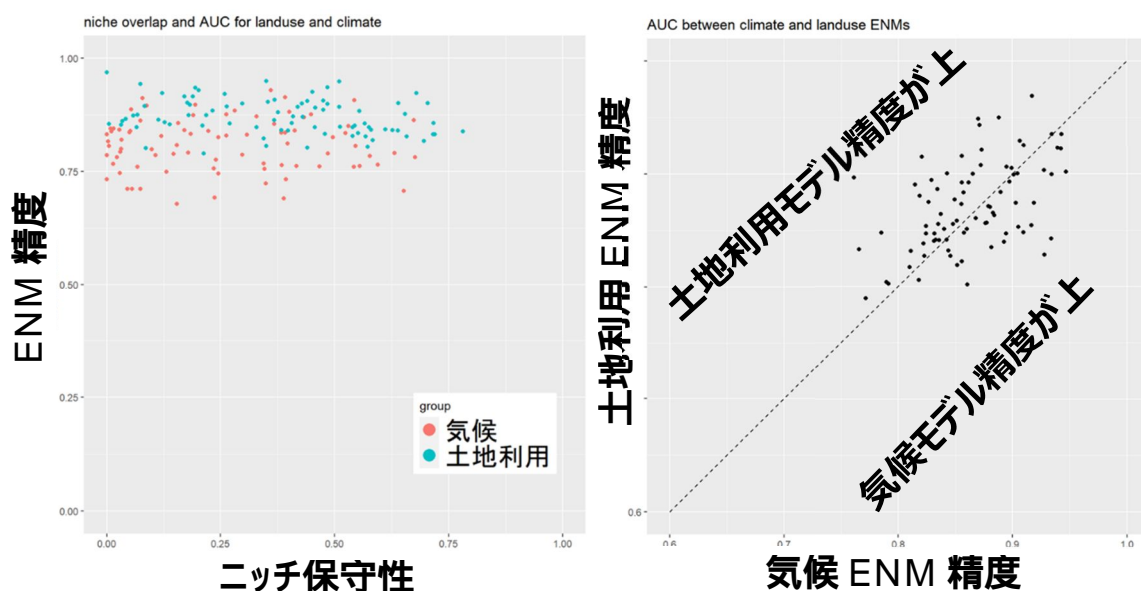


図1 左図: ニッチ保守性を X 軸に、ENM モデル精度を Y 軸にプロットしたものの両者に相関は見られない。右図: 各種の気候データ ENM の精度を X 軸に、土地利用データ ENM の精度を Y 軸にプロット。土地利用 ENM と気候 ENM の間に正の相関が見られた。

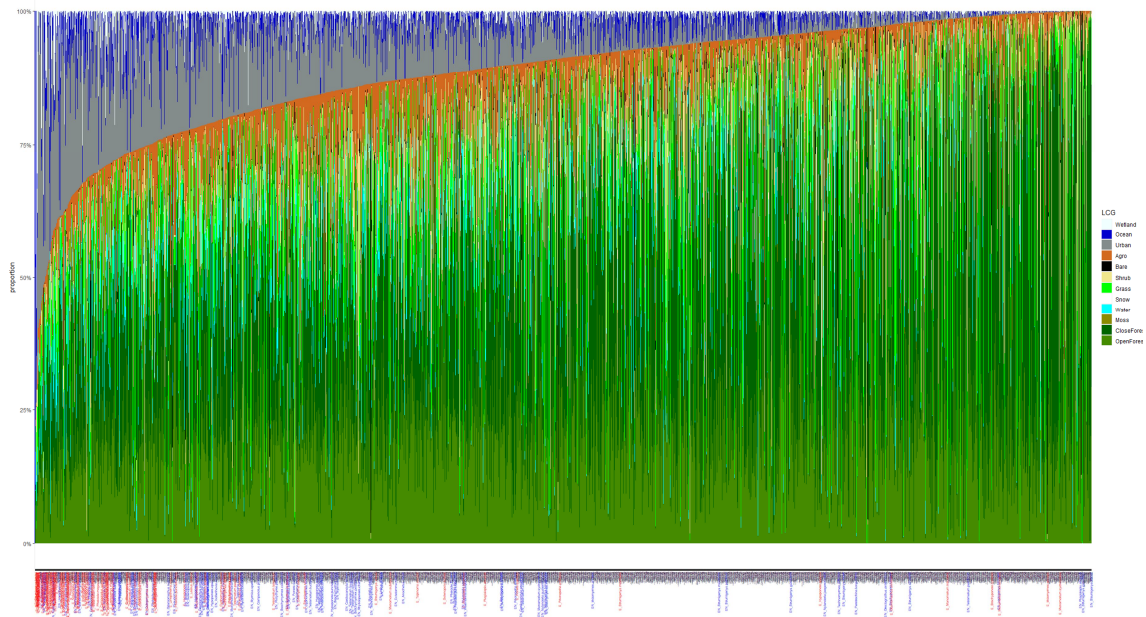


図2 アリ各種の分布域（外来アリ原産域：青、外来アリ侵入域：赤、在来種：黒）の土地利用タイプ積み上げ棒グラフ。出現地点周辺の土地利用の平均割合を算出し、左から右にかけて都市・海洋の利用比率が高い方から低い方に配置。外来アリの侵入域・原産域ともに左に多く出現。

Prediction from Combination

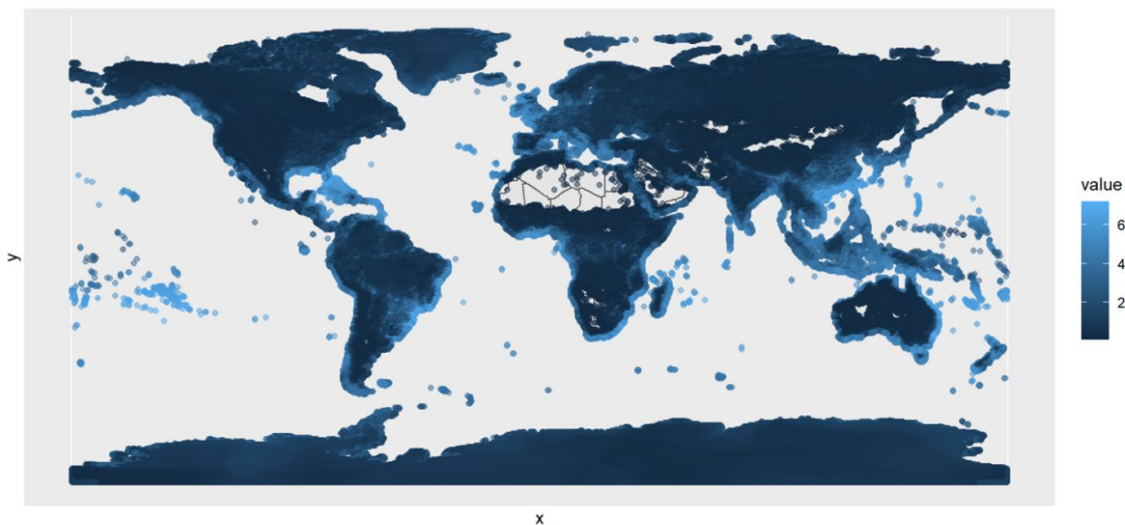


図3 域や河川が多く種の種にとって好適な生息地と予測される。日本周辺では既知の外来アリ82種のうち、既に定着しているものを含め、本州で20-30種、沖縄で50-60種ほどが定着可能と予測された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 池上真木彦
2. 発表標題 全球解析からみた外来アリと在来アリが利用する生息環境の違い
3. 学会等名 日本生態学会第70回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池上真木彦
2. 発表標題 原産地域と侵入地域において外来種が生息する気候ニッチと生息環境ニッチの比較
3. 学会等名 日本生態学会第69回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池上真木彦、坂本洋典
2. 発表標題 土地利用データを用いた外来種分布予測モデル高精度化
3. 学会等名 第66回日本応用動物昆虫学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池上真木彦
2. 発表標題 外来アリと在来アリが利用する気候ニッチと土地利用ニッチの比較
3. 学会等名 第68回日本応用動物昆虫学会大会合同大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------