

氏 名 本間 翔太

学位(専攻分野) 博士(統計科学)

学位記番号 総研大甲第 2680 号

学位授与の日付 2026 年 3 月 24 日

学位授与の要件 先端学術院先端学術専攻 (統計科学コース)
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 生物の空間分布を形成するプロセスに着目した統計モデリング

論文審査委員 主 査 村上 大輔
統計科学コース 准教授
二宮 嘉行
統計科学コース 教授
金藤 浩司
統計科学コース 教授
深谷 肇一
国立環境研究所 生物多様性領域 主任研究員

博士論文の要旨

氏名：本間翔太

論文題目：生物の空間分布を形成するプロセスに着目した統計モデリング

本論文は、生物の観測データに表れる空間パターンを、それを駆動する外部要因に基づいて記述するための新しい空間統計モデルを開発するものである。近年、環境科学分野においては、生物種の分布や生物群集構造の決定要因を理解し、その変動や不確実性を定量的に評価することの重要性が高まっている。これらの現場観測に基づくデータは、しばしば空間的な自己相関を含み、通常の解析手法では適切に扱えない場合が多い。空間統計モデルはこれらの問題を扱う方法を提供するが、従来の空間統計モデルは、地理的距離に基づく相関構造に焦点が置かれてきたため、空間依存を生み出す駆動プロセスそのものを明示的に表現する枠組みは十分に整備されていない。したがって本研究では、生物の空間分布を形成するプロセスを統計的に記述し、その理解と予測を高めることを目的とする。

論文は5章から構成されている：第1章では研究の背景と本論文で設定された課題を述べる。まず、環境と生物の関連性を理解する上での空間的自己相関の重要性、および複雑な空間依存構造を持つデータが統計解析の対象となっていることを示す。次に、これらの空間依存性を生じさせるプロセスが、地理的距離そのものにより駆動されるものではない点を述べ、さらに本論文の主題が、物流および水流に基づいた場所間の接続性に基づく空間依存構造を統計モデルに組み込むことであることを述べる。

第2章では、空間統計モデルの理論的基礎を整理し、また本論文で扱う課題の数理的な位置づけを説明する。まず、条件付き自己回帰(CAR)、および固有ベクトルマップという、本研究に関連する既存の空間統計モデルの背景と数理的性質を概観する。ここでは、通常異なる文脈で用いられている複数のモデルを、モデル間の関係性の理解に焦点をあてて整理する。

第3章では、物流ネットワークを空間構造として捉え、港湾間の接続性に応じて導入圧を考慮するモデルを提案する。その前提として、まず、条件付き自己回帰モデルの共分散構造として場所間に作用する導入圧を解釈可能な形でモデル化できることを示した。本章ではさらにこれを拡張し、複数のデータソースを統合して解析が可能なモデルを構築し、希少事象の推定という現象特有の課題に対する解決策の一つを提示した。モデルは、港湾で観測されたヒアリ・アカカミアリの侵入データを用いて解析され、物流ネットワークを考慮したデータ統合モデルが、単一のデータソースに基づいたモデルよりも、侵入ポテンシャルの予測を改善することを明らかにした。

第4章では、流向・流量情報に基づいて非対称な空間パターンを表現する固有ベクトルを抽出することで輸送プロセスを考慮した空間モデルを提案する。まず、既存の非対称固有ベクトルマップにおいて、複数方向プロセスの考慮に制約があることを示す。次に、提案モデルとして、主要な経路のみに基づいたモデルにより、その制約に対する解決策を提

示す。シミュレーション実験では、多方向性をもつ空間パターンを既存モデルより正確に再現できることを示した。さらに環境 DNA データへの適用により、地理的距離や環境変数では説明できない魚類群集構造の固有分散を記述可能であることを示した。

第 5 章では、全体を総括し、今後の課題を示す。

本研究の貢献は、2つの空間統計モデルにおいて、対象とする生物の空間分布を形成するプロセスを明示的に統計モデルに組み込んだ点にある。これは、従来では地理的距離としてプロセスが不明のままに見過ごされてきた、新たな依存性を記述する方法論を提供する。この意義として、環境データの統計解析における予測や解釈の向上が期待される。

以上

Results of the Doctoral Thesis Defense

博士論文審査結果

Name in Full

本間 翔太

Title

生物の空間分布を形成するプロセスに着目した統計モデリング

本間翔太氏の博士論文本審査を、2026年1月16日の13時から2時間にわたって、本人および4名の審査委員の出席のもとに行った。出願論文および本審査の結果、審査委員会は本論文が学位（統計科学）の授与に値すると判断した。

[論文の概要]

本論文は、生物の観測データに表れる空間パターンを、それを駆動する外部要因（導入圧や流動等）に基づいて記述するための新しい空間統計モデルを開発したものである。

本論文は日本語で書かれ、5章とAppendixの合計91頁で構成されている。第1章では研究の背景と本論文で設定された課題を述べている。第2章では空間統計モデルの理論的な研究手法として、条件付き自己回帰、固有ベクトルマップ等の本研究に深く関連する既存の空間統計モデルの数理的性質や背景を概観している。第3章では物流ネットワークを空間構造として捉え、港湾間の接続性に応じて導入圧を考慮するモデルを提案している。まず初めに条件付き自己回帰モデルの共分散構造として場所間に作用する導入圧を解釈可能な形でモデル化できることを示している。本章ではさらにこれを拡張し、複数のデータソースを統合して解析が可能なモデルを構築し、希少事象の推定という現象特有の課題に対する解決策の一つを提示している。提案されたモデルは、日本の港湾で観測されたヒアリ、アカカミアリの侵入データを用いて解析され、物流ネットワークを考慮したデータ統合モデルが単一のデータソースに基づいたモデルよりも、外来生物の侵入ポテンシャルの予測を改善することを明らかにしている。第4章では流向・流量情報に基づいて非対称な空間パターンを表現する固有ベクトルを抽出し移流プロセスを考慮した空間モデルを提案している。まず初めに既存の非対称固有ベクトルマップにおいて、複数方向プロセスの考慮に制約があることを示している。次に提案モデルとして主要な経路のみに基づいたモデルにより、その制約に対する解決策を提示している。またシミュレーション実験では多方向性をもつ空間パターンを既存のモデルより正確に再現できることを示している。さらに環境DNAデータへの適用により地理的距離や環境変数では説明できない魚類群集構造の固有分散を記述可能であることを示している。第5章では全体を総括し、今後の課題等を示している。

[論文の評価]

本研究の主な貢献は、地理的距離以外の導入圧などの概念を空間統計モデルに取り入れることにより、生態学データにおける空間相関を生じさせる接続性や方向性を組み込む新たな手法を提示した点にある。提案されたモデリング手法は、外部要因によって駆動される生態学データの空間構造をより現実的に捉えることを可能にしており、関連分野への応用可能性も高い。以上の理由から、

本審査委員会は、本論文が博士論文として十分に高い水準に達していると判断した。

第3章に関する一編の論文が査読付き国際誌(PLOS one)に採択されている。また、第4章の理論的課題の発掘につながる一編の論文が査読付き国際誌(Environmental DNA)に採択されている。