

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 14 日現在

機関番号：62603

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25340110

研究課題名(和文) 生物群集の種多様性に関する個体ベース空間明示モデリング

研究課題名(英文) Individual-bases spatially-explicit modeling for species diversity of ecological communities

研究代表者

島谷 健一郎 (Shimatani, Kenichiro)

統計数理研究所・大学共同利用機関等の部局等・准教授

研究者番号：70332129

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：空間点過程の数学的基盤を固めるため、数学的細部の記載を伴う先行研究をゼミ形式で精読し、詳細なノートを作成し、証明や論理をより厳密なものに仕上げた。最尤法及びベイズ推定の枠組みを、非定常空間点過程モデルへ導入し有効性を検証した。方向情報を含む点分布データに対し、方向統計を用いるモデルを構築し実データに適用した。エシュロン解析によるパッチ同定法を開発し、森林樹木データに適用した。広がり情報を伴うデータに対し、情報を重心に集約させない手法を提唱し、サンゴデータに適用した。空間情報を含むデータのモデリング及びその評価法について、2つの国際シンポジウムを開催した。

研究成果の概要(英文)：This study aims at investigating both theoretical and practical aspects in spatial point processes. Our study began with intensively reading the mathematical book about spatial point processes. We produced detail notes about our discussion, and have advanced mathematical details in spatial point processes. The maximum likelihood method and a Bayesian estimation were induced into spatial point process models, and the methodology was examined both by simulations and applications to real forest data. For spatial point data with directional information, using circular statistical techniques, we have applied non-isotropic models. Applying the Echelon analysis, we proposed a patch identification method and examined forest patch mosaic structures. We organized two international symposiums about model evaluation for spatio-temporal data.

研究分野：時空間モデリング

キーワード：空間点過程 モデル評価 マルコフ連鎖モンテカルロ法 ポアソン過程 赤池情報量規準 生態統計

1. 研究開始当初の背景

生物多様性について広く社会で論議される今日であるが、生物群集の種多様性については、統計モデルの発達が遅れており、未だデータに基づく科学的な議論を行う土台が整っていない。特に、群集の種多様性に関する中立理論の提唱以来、データと統計モデルに基づく研究が世界各地で進められるようになった。その結果、種数や相対種個体数だけでは多様性を醸し出すメカニズムを論ずるだけの情報量を持たないことが認識された。とりわけ個体の空間分布は、その重要性が古くから認識されながら、適切なモデリングやパラメータ推定法がなかなか提唱されないでいる。

群集のデータと統計モデルに基づく種多様性研究で日本の研究者は出遅れている感を伴うが、空間点過程を用いた研究ではその限りではない。実際、本研究代表者は、群集の空間明示中立モデルの基礎を提唱し、ベータ多様性指数の解析解を導き、実データに適用している。分担者田中は、集中分布を形成する点過程モデルに最尤法の枠組みを導入する理論的枠組みを提唱し、樹木の空間分布データに適用している。分担者小田はエシュロン解析という空間統計手法を空間点分布データへ応用する試みに携わっている。

こうした空間点分布データの統計手法並びに生物データへの応用研究を進めてきている研究者が共同研究を実施することで、空間情報を生かした生物群集の多様性研究の発展に寄与できるはずである。

2. 研究の目的

本研究では、個体ベース・空間明示モデルを、空間点過程によって構築する。そのさい、空間点過程はしばしばその数学的基盤があやふやな中で応用が先走る。本研究では、まず空間点過程の数学的基礎を確立

させる。それを踏まえた上で、最尤法及びベイズ推定という標準的な統計手法を、空間点分布データと点過程モデルに適用しやすく改良して導入する。その数学的基盤を整えつつ、有効性を実データ及びシミュレーションで検証する。パッチ構造や方向性など、点分布に付帯する空間パターンの特徴を適格に定量化する統計手法を開発する。

3. 研究の方法

まず、空間点過程の数学的基礎を固めるため、この件について最も数学として精確な記述をしていると思われる書籍

Moller and Waagepetersen (2004) *Statistical Inference and Simulation for Spatial Point Processes*. Chapman & Hall/CRC.

を、ゼミ形式で数学的細部まで精読する。レポートは、本代表者と分担者が交替で行なう。関心ある研究者をゲストとして招待し、議論を活性化させる。数学の証明の不完全な部分を厳密に補い、空間点過程の数学的基礎を固める。

分担者田中らが提唱した空間点過程における疑似最尤法は定常性を仮定するが、これを非定常の点過程に拡張する。さらに、実データに対し有効な計算ができるよう、定式化及び推定法を改善する。並行して、疑似最尤法に関する数学的基礎、特にモデルの同定問題(異なるモデルが同じ集約統計量を与えるためその統計量だけではモデルの優劣などの評価ができない)の解を探す。

エシュロン解析はホットスポット抽出を諸目的とするが、その応用可能性は極めて広い。空間点分布データに対する新たな応用を、実データと森林生態学の問題に沿って開発する。

空間点分布データは方向情報を有し、また多くの場合、樹木の大きさなど座標以外の情報(マーク)を持ち、それがしばしば方向や広がり情報を付帯する。そうした場合のモデル

や集約統計量を開発する。

最終年度は国際シンポジウムを開き、空間や時間情報を含むデータのモデリングと、その評価法について、生物及び統計数理の両面から議論を行なう。

4. 研究成果

(1) 空間点過程の数学的基礎の確立

Moller and Waagepetersen (2004)は予想以上に数学の記述が精確で、この本の出版により、ようやく空間点過程の数学的基礎が固められたことを知った。ただ、まだ随所に数学の細部を詰める甘さが見られ、ゼミ形式輪読でそれらをより厳密なものに仕上げていった。特に、各レポーターが作成する発表ノートに加え、聴講する側も詳細なノートを作成した。これらは、後日、空間点過程に関する教科書を出版するための素案となる。

残念ながら研究期間内にすべてを精読するには至らず、全 11 章の 8 章半ばで時間切れとなった。しかし、これまで最もあやふやで数学的基盤の弱かった部分は、ゼミにおける議論を通して、ほぼ十分なレベルに仕上げられた。

(2) 疑似最尤法の非定常過程への拡張

非定常な空間点過程モデルにも最尤法の枠組みを導入した。単なる拡張は積分を多用すれば決して難しくないが、実際のデータに対し短時間で計算を終えられる推定法になっているかは別問題である。実際に収集されているデータの特徴を踏まえながらいくつか有効と思われる定式化を試した。さらに、最尤法から MCMC(マルコフ連鎖モンテカルロ法)アルゴリズムを用いるベイズ推定法への移行を行い、十分に有効な推定法であることを実データ及び人工データで確認した。

この成果は、島谷(2013a,b), 島谷(2015)で発表した。

(3) 疑似尤度法の数理とモデル同定問題

疑似尤度法で中心的役割を果たす Palm 強度の原点における極と相関域に関する性質は、一般に Palm 強度を明示できないため、明らかにされていなかった。そこで、Palm 強度が原点において極をもつための十分条件および相関域に関する上下からの評価を与えた。さらに、これらの結果を connected component Markov 点過程や superposed Neyman-Scott クラスタ点過程モデルへ適用した。後者では、モデル同定問題を、新たに最近接触距離型最尤法を導入することにより回避できることを示した。

これらの成果は、Tanaka (2013), Tanaka and Ogata (2014)で公表し、Tanaka (2013), 田中 (2013a)で発表した。

(4) エシュロン解析によるパッチ同定

森林はすべて同程度の年齢の樹木の集まりであるパッチが集まったモザイク構造をしている。このモザイク構造を成すパッチは、現状では主観的に同定を行っている。そこで、各データの値の高低とその位置情報に基づいて位相的な階層構造を形成するエシュロン解析を利用した客観的なパッチ同定法を提案した。この手法により、特定の種にのみ限定したパッチの同定ではなく、すべての種を対象にしたパッチを同定することが可能になった。同定したパッチの状態については、空間的な条件を考慮した対数尤度比統計量を用いることで、同一の森林内においての評価を可能にした。

これらを踏まえ、日本国内の異なる気候帯の森林から同定されるパッチ自体に焦点を当て、森林ごとにパッチサイズやパッチ密度などを計算した。これにより、異なる環境が原因で生じているであろう森林ごとの差異を定量的に示した。

これらの成果は、小田ほか(2014)で発表した。

(5) 方向を有する空間点分布データ

空間点分布データがあれば、当然、2点間の方向という情報が得られる。森林樹木の場合、樹冠投影図を描きそれをデジタル化しておく、樹冠の方向という方向情報が得られる。こうしたデータでは、方向相互の相関や、樹木の大きさなどの連続量と方向の相関、あるいは回帰モデルによる予測といった統計解析が必要となる。そこでは、通常の統計でなく、方向統計という手法が必要となる。そこで、周辺競合木までの距離及び方向と樹冠の偏り(もっとも遠くまで伸びた枝の先端までの水平距離と方向)について方向統計モデルを構築し、競合木の影響の強さなどを定量的に評価した。

この成果は、Aakala et al (2015)で公表した。

(6) 大きさを伴う空間点分布データ

テーブル状のサンゴなどでは、空間情報は、単なる点でなく、どの範囲を占めているかで与えられる。森林樹木でも、樹冠投影図を描くと林冠のどの範囲を各樹木が占めているかがわかる。そうした場合、競合はそれぞれが占めている範囲がどのくらい離れているかに依存する。多くの先行研究では、データは重心などで1点に集約しているが、各個体が占める範囲が詳細にデータ化されているなら、その情報を有効活用すべきである。この論文では、そうした状況で競合の程度を定量的に評価する統計量を提唱し、実際のサンゴデータでその有効性を検証した。

この成果はMuko et al. (2014)で公表した。

(7) 3次元空間分布データ

最近では3次元の空間点分布情報も得られるようになってきている。そうしたデータでは、3次元の点過程モデルが必要になるし、方向に注目する場合、3次元(球面)上の方向統計手法が必要となる。その基本となるモデルを

提唱し、動物が滞在した場所という3次元データでその有効性と限界を検証した。

この成果は、島谷(2015)で公表した。

(8) 国際シンポジウム

2016年1月、北米から4名の生態統計研究者を招聘し、時空間データのモデリングに関する国際シンポジウムを2回、行った。1月12-13日には統計数理研究所において、What is a good model? と題するシンポジウムを行い、約60名が参加した。情報量規準によるモデル評価法を主題に、主に統計学の観点から議論を交わした。(1)の精読ゼミに参加したこともある高須が、空間点分布に関する講演を行った。

1月21日には品川において Ecological statistics を主題とするシンポジウムを行い、日本の若手生態統計研究者と北米からの招待研究者で議論を交わし、交流を図った。Hoso and Shimatani (2016)で、動物の時空間データに関する階層ベイズモデルの結果と問題点を発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

Aakala, T., Shimatani, K., Abe, T., Kubota, Y. and Kuuluvainen, T. (2015) Crown asymmetry in high latitude forests: Disentangling the directional effects of tree competition and solar radiation. OIKOS (in press). doi: 10.1111/oik.02858.

島谷健一郎 (2015) 3次元軌跡データの基本モデルとその限界. 数理解析研究所講究録 1940, 95-100.

Muko, S., Shimatani, I. K. and Nozawa, Y.

(2014) Spatial analyses for nonoverlapping objects with size variations and their application to coral communities. *Journal of Animal Ecology* 83: 980–990.

Tanaka, U. and Ogata, Y. (2014) Identification and estimation of superposed Neyman-Scott spatial cluster processes', *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 66, 687-702.

Tanaka, U. (2013) Remark on the Palm intensity of Neyman-Scott cluster point processes, *International Journal of Applied Mathematics*, 26, 433-445.

〔学会発表〕(計 19 件)

Hoso, M. and Shimatani, K. (2016) Predation intensity on a free-living animal from a specific predator estimated by capture-mark-recapture method in combination with laboratory experiments.

小田牧子・久保田康裕・楠本聞太郎・正木隆・石岡文生・栗原考次 (2016) パッチベースでの森林の比較について. 第 127 回日本森林学会大会. 神奈川.

Shimatani, K. (2015) Statistical inference for nonstationary cluster point processes: an extension of Tanaka-Ogata's Palm likelihood method, 科研費研究集会・富山.

島谷健一郎 (2015) 田中・尾形の Palm 尤度法の拡張による非定常なクラスター点過程のパラメータ推定. 応用統計ワークショップ. 東京.

小田牧子・久保田康裕・楠本聞太郎・石岡文生・栗原考次 (2015) スキャン統計量を利用した森林帯の評価. 日本計算機統計学会 第 29

回大会. 山梨.

Oda, M., Koljonen, S., Ishioka, F., Alho, P. Suito, H. Huttula, T., and Kurihara, K. (2015) A novel approach for comparing spatial data obtained by different measurement systems. The 9th Conference of the Asian Regional Section of the IASC (IASC-ARS 2015), Singapore.

島谷健一郎 (2014) 森林施業と統計数理, 共同研究集会(基調講演). 東京.

尾形良彦, 田中潮 (2014) 集中型点配置から群れの中心の空間分布を導く: Searching for locations of parents from superposed clusters. 日本統計学会. 東京.

小田牧子, 久保田康裕, 楠本聞太郎, 石岡文生, 栗原考次 (2014a) 空間的視点からの森林構造の表現と比較. 日本計算機統計学会第 28 回シンポジウム. 沖縄.

小田牧子, Koljonen, S., Alho, P., 水藤寛, Huttula, T. and 栗原考次 (2014b). 空間的階層構造を利用したサーモンの生息場評価法. 統計関連学会連合大会. 東京.

小田牧子・Saija Koljonen・石岡文生・Petteri Alho・水藤寛 (2014c) 生態学的プロセスに基づいた領域の分割について. 日本分類学会第 32 回大会. 東京

Shimatani, K. (2014) Circular statistics for animal/plant behaviors and movement ecology. 科研費研究集会. 富山.

田中潮 (2013) クラスター点過程の Palm 型強度の幾何学的性質とそれの疑似最尤法に対する漸近論. 日本統計学会. 大阪.

島谷健一郎(2013a) クラスタ点過程 Palm 尤度を用いた空間的遺伝構造の最尤推定, 日本数理生物学会. 静岡.

島谷健一郎 (2013b) 実データに直接適用可能な空間モデルとしての点過程, 数理解析研究所研究集会. 京都,

Tanaka, U. (2013) Remark on the Palm intensity of Neyman-Scott cluster point processes. Probability , Statistics and Applications , Braunschweig, Germany , Technische Universitat Braunschweig

田中潮 (2013a) クラスタ点過程の Palm 型強度の幾何学的性質とそれの疑似最尤法に対する漸近論. 統計関連学会, 大阪.

田中潮 (2013b) Remark on the Palm intensity of Neyman-Scott cluster point processes. 石垣統計国際会議. 沖縄.

田中潮 (2013c) Remark on the Palm intensity of Neyman-Scott cluster point processes. 科研費シンポジウム. 仙台.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年月日:

国内外の別:

○取得状況(計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

島谷 健一郎 (SHIMATANI Kenichiro)

統計数理研究所・データ科学研究系・准教授

研究者番号: 70332129

(2)研究分担者

田中 潮 (TANAKA Ushio)

大阪府立大学・理学(系)研究科(院)・助教

研究者番号: 60516897

(3) 研究分担者

小田 牧子 (ODA Makiko)

防衛医科大学校・医学教育部医学科進学課程及び専門課程、動物実験施設、共同利用研究・進学課程・助教

研究者番号: 40595766