

Title	Statistical Mechanics of Diversity in Ecosystems
Author(s)	吉野, 好美
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/49722">https://hdl.handle.net/11094/49722</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

***Osaka University Knowledge Archive : OUKA***

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	よし の よし み 吉 野 好 美
博士の専攻分野の名称	博 士 (理 学)
学位記番号	第 2 2 6 7 3 号
学位授与年月日	平成 21 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	Statistical Mechanics of Diversity in Ecosystems (生態系における多様性の統計力学)
論文審査委員	(主査) 教授 菊池 誠 (副査) 教授 阿久津泰弘 教授 川村 光 大阪府立大学教授 難波 利幸 准教授 時田恵一郎

論文内容の要旨

実証研究の歴史から、種の多様性とその生態系の安定性の起源になっていると、長い間信じられてきた。ところが、May (1972) の理論的研究により、種が多様で複雑であればあるほど系が不安定化するという逆説的な結果が得られ、これは、生態系研究に大きな波紋を起こした。May は、多種共存系の相互作用として、相互作用をランダムだと仮定し、線形微分方程式の安定性を調べている。これは一般的な微分方程式において安定平衡点まわりの局所安定性解析に相当する。このように、多体系の物理学として、相互作用系をランダムだと仮定するのは自然な発想である。しかし、生物種間の相互作用においては、種 A が種 B に与える影響は一般的に強い相関があり、したがってそれを無相関なランダム相互作用と仮定するのは現実的でないと考え、本論文では概して、種間相互作用に非対称性を与えたときの生態系の振る舞いを調べている。相互作用が対称な場合は、生態学的には、相利共生、競争などの意味づけがなされるが、非対称な場合は、捕食関係の意味する。捕食関係は、生態系にとって必要不可欠な種間相互作用である。また、同種では一般に限られた資源（食糧や場所）を競争すると考えられている。

多種共存生態系の安定性は何によってもたらされているのだろうか？

まず第一に、生態系において、その安定性が、環境（資源）によるものか種間相互作用によるものかという問題について調べた。これは、生態学には大きな関心である。私たちは、種が存在していないときの資源の分布のばらつきと種数に対する資源の種類をパラメータに線形安定性解析を行った結果、両方の変数が小さくなると系が不安定化し、資源が枯渇することを確認した。これは、De Martino と Marsili (2006) の先行研究によっても調べられている。私たちは、ここに種間相互作用を導入し、系の安定性の振る舞いの変化を調べた。すると、資源のばらつきと資源の種類が小さいときに現れた資源の枯渇がおこらなくなることを発見した。また、相互作用の非対称度を増すと系が安定化することも分かった。

第二に、生態学者の関心として、個体数分布がある。個体数分布とは、個体数  $x$  をもつ種の数の分布である。私たちは、私たちのモデルと観測系を比較するために、解析的に個体数分布を求め、どういった要因が分布の形や傾向を決定するのか調べた。そこから、種内競争が大きいほど系は安定で、また、対称より非対称相互作用系のほうが安定だということがわかった。種内競争が大きい極限での分布は  $x = 1$  のまわりにデルタ分布する。これは、少数ずつ、多種が共存していることを意味し、一方で分布が広がっているのは、個体数が多い少数の種が系において支配的になっていることを意味している。

本博士論文では、以上のように、種の多様性がもたらす生態系の安定性を、生成汎関数を用いた統計力学的手法によって議論している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、数理生態学における古典的問題を、現代物理学の視点及び方法論から再考することにより、物理学と生態学の両分野に新しい重要な知見を与えるものである。1970年代の数理生態学における古典的な線形モデルにおいては、複雑な生態系の種間相互作用が無相関のランダム行列で与えられると仮定された。このとき、より種数が多く、行列の要素が従う分布の分散がより大きく、かつ行列要素がより密であるほど（結合度が高いほど）、全ての種が共存する確率が低くなることが示された。この、種数、分散、結合度が系の不安定化要因であるという数理的結果は、1960年代までの実証研究に基づく生態学的知見と相容れないものであったため、「生態学のパラドックス」と呼ばれ、現在までに至る生態学上の大問題の一つとされてきた。本論文における研究の究極的な目的の一つは、上記の古典的な線形モデルにおける、無相関ランダム行列や線形性などの仮定を緩めて、より現実的なモデルを解析することにより、系の安定化条件を発見し、上記のパラドックスを解決することである。これに関して、本論文においては、資源競争も考慮した多種からなる高次元の非線形個体数動力学系が解析的に調べられ、種間相互作用の非対称性の度合いや、水や光など種が必要とする資源の種類や量の不均一性が系の安定化要因になることや、種間相互作用が資源の枯渇を抑制するといった、実証研究の知見を支持する新たな理論的知見が示されている。また、群集生態学においては、ある地域にどのような種が、何個体存在するかという、「種個体数分布」が調べられてきており、構成種や気候条件、季節変動、系の成熟の度合いなどに応じて特徴的な分布のパターンが観測されている。これらのパターンを生み出す条件も生態学における重要な問題であるが、補食、競争、相利共生などの複雑な種間相互作用を考慮した多種個体数動力学モデルにもとづく種個体数分布の研究は、モデルが非線形非平衡系であることに起因する解析上の困難からほとんど行われてこなかった。これについても、生成汎関数の方法を用いることにより、本論文において初めて非対称種間相互作用をもつ多種個体数動力学モデルに対する種個体数分布が解析的に求められ、食物網に対応するような反対称相互作用が多いほど、熱帯雨林や珊瑚礁などの多種が共存する系に特有の分布に近いパターンが生み出されることが示された。一方、原子核物理学研究に端を発するランダム行列理論は、レプリカ法などの方法論とともに、スピングラスの理論研究などに大きく寄与し、さらに最近では神経回路網、情報科学、数理経済学などにも応用され、ヘテロな相互作用をもつ不規則系研究に必須のものとなっている。これに対して、本論文が対象とする、非対称相互作用をもつ数理生態学モデルはレプリカ法が使えないため、生成汎関数の方法が適用可能な好例の一つであり、より一般的な非平衡不規則系のプロトタイプとなっている。従って、本論文における議論と得られた知見は、数理生態学研究のみならず、ガラスなどの非平衡不規則系に対する物理学にも関係し、その今後の発展にも寄与するものである。このような意味で、本論文は生物学と物理学の双方に貢献可能な境界領域研究が、極めて建設的に実践され成功した例の一つであるといえる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。