



Title	Statistical Mechanics of Stability and Diversity in a Large Ecosystem with Adaptation and Mutation
Author(s)	杉浦, 正康
Citation	大阪大学, 2011, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/58592
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"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

氏名	すぎ 杉 うら 浦 まさ 正 のり 康
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 24326号
学位授与年月日	平成23年3月25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 Stability and Diversity in a Large Ecosystem with Adaptation and Mutation (適応と変異をもつ大規模生態系における安定性と多様性の統計力学)
論文審査委員	(主査) 教授 菊池 誠 (副査) 教授 川村 光 教授 小川 哲生 生物科学専攻特任准教授 藤本 仰一 准教授 時田恵一郎

論文内容の要旨

熱帯雨林や珊瑚礁、または免疫ネットワークなどの大規模生態系ネットワークは複雑な種間関係をもち、個体数などのダイナミクスが安定で恒常的であるという特徴をもつ。1960年代まで生態学者は豊富な種数と関係性の複雑さが大規模な生物ネットワークの安定性と恒常性を保つと考えてきた。これに対して、1970年代に Gardner と Ashby による数値シミュレーション、続いて May によるランダム行列理論の解析から全く逆の結果が導かれた。それ以後、この「複雑性と安定性のパラドクス」は「複雑性-安定性論争」として議論され、今も続いている。この問題を解消しようとこれまでに様々な研究が行われてきた。その一つとして 2003 年の Kondoh によるロトカ・ヴォルテラ型の数理モデルを用いたシミュレーションがあり、相互作用の適応的変動が生態系の多様性を促進するという結果を示して注目を集めた。しかし、それに対する理論的な説明は存在しない。そこで、この博士論文では統計力学の手法を用いて相互作用の適応的変動が生態系の多様性と安定性にもたらす影響を理論的に調べる研究を行った。これまでも大規模生態系モデルであるレプリケータダイナミクスをスピングラスの理論、特にレプリカ法を用いて解析した研究は数多くあるが、どれも相互作用は特定の確率分布から選ばれてダイナミクスの過程では固定されたものとして考えられてきた。今回の研究の新しいところは Partial annealing と呼ばれるレプリカ法を拡張した手法により、生態学の問題に対して初めて相互作用の適応的変動を理論的に考慮した解析を行ったことである。Partial annealing では二温度系について断熱的な極限を考える。すなわち個体数変数と相互作用変数の時間スケールを完全に分離して、それぞれにノイズとしての温度を与える。相互作用ハミルトニアンを特別な形に仮定したとき、通常のレプリカ法では最終的にゼロとするレプリカ数を有限のまま計算することで、相互作用変数の適応的変動を考慮した生態系のマクロな性質を求めることができる。今回の解析では Kondoh のシミュレーション結果をサポートするとともに、現実の生態系に見られる多様性のパターンを再現することができた。また、生物種の変異を取り入れた、レプリケータ・ミューテータダイナミクスに対する統計学的解析を行った。このモデルは集団遺伝学において提唱されたモデルであるが、言語の進化や経済学などに応用されている。本論文の解析でこれまで知られていなかった生態系

の多様性が急激に変化する変異の値を見積もることができた。

論文審査の結果の要旨

本論文は、数理生物学における個体数ダイナミクスや進化に関する古典的問題を、現代物理学の視点及び方法論から再考することにより、物理学と生物学の両分野に重要かつ新たな知見を与えるものである。1970年代の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、「生態学のパラドクス」と呼ばれ、現在に至る生態学上の大問題とされてきた。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、無相関なランダムネスや線形性などの仮定を緩めて、適応や変異などの進化的な形質の変化を考慮し、より現実的なモデルを解析することにより、新たな系の安定化条件を発見し、上記のパラド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、種間相互作用を定数とみなす多種生態系モデル(物理における「クエンチ系」)を、近年様々な系に対して適用されている「部分徐冷系」へと初めて拡張した。さらに、そのような、種間相互作用の時間変化及び種の適応を考慮したより現実的なモデルを、ランダム系の統計力学の手法により解析し、生態系における様々な多様性の指標を系の生産力などのパラメータに依存して初めて解析的に求め、実証研究の結果を支持する新たな理論的知見を与えた。さらに、集団遺伝学や言語進化の理論などで調べられてきた種間の変異を考慮した一般的な多種進化動力学系を、平衡統計力学及び非平衡統計力学の手法を用いて解析的に調べ、特にランダムな相互作用をもつ場合についての解析を世界で初めて行い、多様度が急激に変化する転移現象が、スピングラスの統計力学理論で知られるレプリカ対称性の破れを伴う転移であることを示した。本論文が対象とする、変異を考慮したモデルは平衡統計力学が前提とするハミルトニアンが存在が証明されていなかったため、厳密にはレプリカ法による解析の妥当性が問題となっていたが、本論文により非平衡統計力学的な生成汎関数の方法と解が一致することが確認された。このような、本論文が対象とする「相互作用の変動」は、物理学においてはこれまであまり注目されてこなかった性質であるが、最近では様々な複雑系のもつ本質的な性質であると認識され始めており、本論文の研究は今後の複雑系物理学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。