

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 坂田 綾香

適応進化の理論的研究は集団遺伝学に端をなし、数理生物学等では確率過程を用いたダイナミクスを議論することが多く、また力学系の観点から多くの知見が得られている。本論文では、適応進化の静的な性質に注目し、単純化されたモデルとして、環境への適応度の対象となる表現型と世代間継承を担う遺伝子型の自由度を持つ統計力学的なスピンモデルを導入した。それらの自由度の時間発展に伴う時間スケールを完全に分離する理想極限を考えることによって、ある種の平衡統計力学的記述が可能となる。この理想化の元で、適応可能条件や進化で重要とされる頑健性の獲得可能性とその機構、またそれらへのゆらぎの影響を明らかにすることが、本論文で考察される主な問題である。

本論文は五章と付録からなり、第一章では進化研究の歴史を概観し、本論文の立場を明確にしている。第二章では、前章を受けて導入された単純化された進化の統計力学的モデルの数値的研究がまとめられている。また、第三章では、第二章で調べた理論モデルと同じグラフ構造を持つ系の平均場解析を行い、適応度関数の重要性を指摘する。さらに、第四章ではスピングラス理論におけるレプリカ対称性の破れが進化モデルにおいて、相構造を特徴付ける可能性を具体例を用いて示し、最後に、第五章で、本論文のまとめと展望が丁寧に述べられている。付録には、本文で用いた理論及び数値計算での技術的な点がまとめられている。

まず、第一章では、これまでの進化研究の中で、特に本論文に関連する先行研究が紹介され、適応度地形などの重要な概念が説明される。また、先行研究で調べられた数理モデルにおける遺伝子型と表現型の二重の時間発展が断熱近似の理想極限においてスピングラス理論での部分的除冷系と形式的な類似性があることを指摘する。この類似性より、本論文で展開されるように平衡統計力学で培われた様々な技法を用いて、進化モデルの統計力学的性質を議論できる。ここで、本来はダイナミックな進化過程のある種の平衡系ととらえる本論文の立場を明らかにし、議論すべき問題を表現型のゆらぎの進化におよぼす影響や進化を通じて出現する頑健性の獲得機構の解明とすることが述べられる。また、それらをスピングラス理論での相転移や自由エネルギー地形の言葉で説明することで、新たな知見を得ることを目的として挙げている。

第二章では、表現型と遺伝子型をそれぞれスピンとスピン間相互作用としたモデルを導入する。そのモデルでは、スピンを速い変数、相互作用を遅い変数と考え、スピン配位のある一部分に設定された適応度の平衡状態での期待値を参照しながら相互作用を進化させる。実際に、これを実現する二重のモンテカルロ・シミュレーションを行い、二つの自由度のゆらぎを制御する温度を変数とした相図を明かにした。その結果、スピン、すなわち表現型の温度が、ある中間の温度において興味深い相互作用（遺伝子型）が進化することがわかった。それは、スピン系の概念であるフラストレーションの極端に少ない相互作用として特徴づけられる。この性質が表現型発現に伴うゆらぎに対する頑健性の獲得をもたらす、また同時に突然変異のような遺伝子型に直接作用するノイズに対しても頑健であることが示された。この二種類の頑健性が互いに関係することはこれまでに議論されてきたが、

統計力学モデルを用いてその特徴を定式化したことは本研究が初めてである。

第三章では、前章で見出された頑健な遺伝子型の出現機構を探るために、同じグラフ構造を持つ同様な進化モデルの平均場解析をレプリカ法を用いて行った。特に、表現型として、一部のスピンは予め特定の配位を埋め込んだ上で、それをとりまく相互作用の進化による影響を考察した。ここでは、解析の都合上、適応度関数をスピン系の自由エネルギーとした。その結果、温度の低下に伴い、フラストレーションの減少を導くことはできたものの、ゆらぎが特別な役割をするわけではなかった。このことから、適応度関数の選択が中間温度における頑健な遺伝子型の出現に重要であることがわかった。

続いて、第四章では、適応度関数に表現型の局所性を陽に取り込み、かつ、レプリカ法で解析可能なモデルを見出し、その相図を明らかにした。その結果、適応可能な相の中に二つの相が現れることがわかった。一つはレプリカ対称な適応相であり、先に導いた頑健な遺伝子型が出現する温度領域と対応していると考えられる。実際に、フラストレーションがその相内で減少していることが導かれた。もう一つはより低温に現れるレプリカ対称性の破れた適応相である。この相の内部の熱力学的性質はまだ明らかにはされていないが、スピングラス理論からの類推によれば、この相は複雑な適応度地形を持つと想像される。このことから、適応可能で頑健な遺伝子型の出現のためにはゆらぎが少ないことが必要であるが、ゆらぎが小さすぎると、このレプリカ対称性の破れた適応相になり、高い適応度に到達が困難になるという描像が得られた。

以上のように、本論文は、適応進化の研究として平衡極限からの新たなアプローチを提案し、適応進化において表現型発現時のゆらぎの役割と重要性を理論的に示したものであり、進化の数理的研究の進展に重要な寄与をし、またスピングラス理論の新たな展開としても意義があるものと認められる。

なお、本論文の内容の一部は、金子邦彦氏、福島孝治氏との共同研究であるが、論文提出者が主体になって解析を行ったものであると判断される。また、本論文の第二章及び第三章の内容は学術論文として出版されており、第四章と付録の内容は投稿準備中である。

したがって、本論文は博士(学術)の学位を授与するにふさわしい内容であると審査委員会は全員一致で判定した。