

論文の内容の要旨

論文題目 断熱的二温度系における 適応的進化の統計力学的研究

(英訳: Statistical mechanical study of adaptive evolution in partially annealed systems)

氏名 坂田 綾香

進化という現象は、Darwin により「種の起源」が著されて以来、様々な手法を用いて研究されてきた。本博士論文では、適応度地形上におけるダイナミクスとして進化を考える。適応度地形とは、各遺伝子型の環境適応度を地形として表したものであり、この描像は集団遺伝学において提案されたものである。これまで、いくつかの数理的研究において、遺伝子型の状態空間の写像として適応度地形を構成するモデルが開発されてきた。本博士論文では、この写像が一意ではなく、確率的に決まる場合を考える。具体的には、各遺伝子型から発現する表現型が、ある分布関数に従うと仮定する。これは、遺伝子型と表現型の断熱的な二変数系として進化を捉えている。つまり、表現型は遺伝子型により与えられる力学的な過程を経て発現するが、遺伝子型の単位時間内で緩和し、そして表現型の平衡分布に基づいて遺伝子型の適応度が決まるという状況を表している。このように時間スケールの離れた二種類の変数から成る系は、スピングラス模型において、partial anneal 系として定式化されている。partial anneal 系は、スピン変数と相互作用変数に関する断熱的な二変数系である。クエンチ系とは異なり、スピン変数だけではなく相互作用変数も力学変数と見なされる。ただし時間スケールは十分離れており、相互作用の単位時間内でスピンは緩和する。スピンと相互作用のダイナミクスは、それぞれスピン温度 T_S 、相互作用温度 T_I とスピンのハミルトニアン H_S 、相互作用のハミルトニアン H_I で与えられる。

本博士論文では、partial anneal 系において、表現型をスピン配位に、遺伝子型を相互作用配位に対応させたモデルを構成する。そして、速い変数である表現型と、遅い変数である遺伝子型からなる断熱的な二温度系において、ある特定の表現型を獲得することが進化という現象であると見なす。つまり、特定の表現型が発現するか否かが、遺伝子型の生存に

大きく影響すると考える。partial anneal 系におけるモデル化の自由度は、二つのハミルトニアンを選び方である。partial anneal 系を進化のモデルとして捉えると、スピンのハミルトニアン H_S は表現型の発現ダイナミクスを与え、スピン温度 T_S はそのダイナミクスの過程で受ける熱揺らぎに対応する。また H_J は遺伝子型の環境適応度に対応し、 T_J は自然淘汰の強さを表す。遺伝子型は H_J を上昇させる方向へ進化していく。適応度地形の構造を決めるのは、 H_J と T_S である。これらを変化させることで、いくつかの適応度地形を構成し、その地形上での進化を議論する。適応度地形の構造と、得られた相互作用配位の関係から、断熱的二温度系としての進化を明らかにすることを目的とする。これまでの先行研究では、表現型揺らぎに対応する T_S が進化に与える影響や、遺伝子型の特徴づけ、また partial anneal 系における H_J 依存性に関する議論が不十分である。断熱的二温度系としての進化を明らかにするためには、これらの疑問点を明確にする必要がある。

このような問いに答えることを目的とし、本博士論文では、3つの partial anneal 系の模型についての結果を示す。第二章では、Sakata-Hukushima-Kaneko model (SHK model) についての結果を示す。第三章では、coupled mean-field model についての結果を示す。第四章では、SHK model を変形した模型について、レプリカ法により解析した結果を示す。各章では、フラストレーションを用いて相互作用を特徴づけ、スピンに関する転移と相互作用に関する転移の関係性や、適応度地形の H_J , T_S 依存性について議論する。

本博士論文を通して明らかにされることは、 H_J としてスピン配位に関する物理量の期待値を選んだ場合と、自由エネルギーを選んだ場合では、相互作用の進化が全く異なるということである。その違いは、適応度地形の構造の違いから理解できることを示す。特に、 H_J としてある配位が実現する確率を選んだ場合には、ある中間 T_S 領域で、適応度が高く、エネルギーの低い相互作用が得られる。このような相互作用は、機能的に重要な部分についてはフラストレーションを持たず、その他の部分にフラストレーションを持つことから、local Mattis 状態と呼ばれる。この local Mattis 状態が得られる温度領域は、レプリカ対称性を持つスピングラス相に対応すると考えられる証拠を示す。また、この温度領域では、変異に対する頑健性が獲得される。適応度地形の解析を通して、変異に対する頑健性は、変異に対する頑健性という性質そのものにかかる淘汰ではなく、熱揺らぎに対する頑健性にかかる淘汰に基づく進化の副産物として獲得されるというシナリオを提示する。また、進化におけるレプリカ対称性の意味について考察し、レプリカ対称性とは、表現型発現に関して、大域的安定状態への緩和を保障するものであり、また異なる遺伝子型を持つ集団が、同じ表現型を発現するという状況に対応すると結論付ける。本博士論文により得られた結果は、先行研究において示されていた様々な概念に対して、スピングラス理論としての説明を与えるものである。また本研究で用いる数値計算手法や解析手法は、これまでの partial anneal 系を一段階拡張したものである。本研究により、断熱的二温度系の進化そのものに対する理解が発展しただけではなく、partial anneal 系という考え方を様々な分野に応用するための新しい展望が開けた。