

## 論文の内容の要旨

# 論文題目 “Statistical-Mechanics Study on Community Assembly” (群集形成の統計力学的研究)

村瀬 洋介

平成21年12月15日

### 1 導入

統計物理学の目的は、ある系における「微視的な構成要素」と「巨視的な性質」との関係を明らかにすることである。近年では、計算機の進歩と数理的手法の発達により莫大な自由度の系についての情報を詳細に得ることが可能になっており、特に熱平衡近傍の物性予測などにおいて統計力学の果たす役割は非常に大きくなっている。統計物理学の扱う対象は、原子・分子などの力学に従う要素によって構成される系に限らない。多様な分野（例えば生物学、生態学、社会学、経済学、神経学など）において、微視的な要素と巨視的な性質との間の関係性は重要な問題であり、統計力学的なアプローチが有効であると期待される。

これらの問題の中でも特に、構成要素が「多種多様」でありかつ「要素が動的に入れ替わる」系（ここでは便宜的に多種開放系と呼ぶことにする）を本論文では取り扱う。これらの特徴を持つ系は身の回りに多く見つけることができる。例えば生態系は多種多様な種が互いに相互作用をし、さらに絶滅・種分化・侵入等により種構成が動的に入れ替わる系として見ることもできる。また社会における企業ネットワークについても、個々の企業が多様な個性を持ち、なおかつ倒産や起業によって動的に入れ替わるという意味で多種開放系であるとみなせる。他にも製品、メディアコンテンツ、ひいては人間関係のネットワーク等も例として挙げることができるだろう。多種開放系の研究は広範な分野の理解に貢献しうる重要な課題であると言える。しかし、原理的には分配関数から計算できる熱平衡物性と異なり、多種開放系を扱う一般的な理論や手法は未だ得られていない。構成要素が個性を持つという意味ではランダムスピンモデルやニューラルネットワークモデル等の研究が進んでいるものの、構成要素が動的に入れ替わる系についての理解は未だ不十分であると言わざるを得ない。

このような動機のもと、多種開放系として生態群集の形成過程を、種間相互作用を取り入れたモデルを用いて研究していく。生態系は多種多様な種が共存している典型的な例であり、またダーウィンの生存競争によって進化と絶滅を繰り返しながら自己組織化された相互作用系であると考えられる。フィールドワークや化石のデータからは興味深い統計性の存在が示唆されている。例えば、個体数分布は様々な生態系でlog-normal的な分布になることや、化石データから推定された種の寿命分布は単純な指数分布やベキ分布ではなく両者の中間の分布を示すことがわかっている。これらの統計性が、多種開放系において一般的に期待される性質なのか、それとも生物進化に固有の性質であるのかは未解決の問題である。本論文では理論研究により、これらの統計データに対する解釈を与え、現存する生態系の保全や制御に役立つ知見を得ることを目指す。

## 2 多数のモデルに対する解析の必要性とデータベース管理ソフトウェア

生態学・社会学的な対象を取り扱う際に一般的に見られる難しさは、構成要素間の相互作用のモデルとして多くの仮定に基づいた現象論的なモデルを使わざるを得ないということである。例えば生態系では個体数変動を記述するためのモデルとしてLotka-Volterraモデルを始めとする様々なモデルが提案されているが、こういった関数形が最もよく現実の個体数変動を記述するかということについてのコンセンサスは未だに得られていない。そこで我々は様々なモデルを調べ、その中にモデルの詳細に依存しない普遍的なパターンを見つけ出すというアプローチを取った。

近年の計算機の進歩によって多数のモデルを解析するだけの計算資源を得ることは容易になってきている。しかしその一方で、モデルの種類やパラメータの数が膨大になり、データを研究者が手動で管理することが難しくなっている。これは本研究に限ったことではなく、計算機シミュレーションを用いる科学全般に言えることであり、この傾向は今後の計算機の進歩と共にますます顕著になると考えられる。

そういった現状を打破するために、数値計算の実行・結果のデータ管理およびデータ解析を補助するソフトウェアを開発した。スナップショットとソフトウェアの概念図を図1と2に示す。このソフトウェアではデータベース、シミュレーターと解析ソフトが連動して動作する。ウェブブラウザ又はCUIで動作する直感的なインターフェースを持っており、ユーザーはジョブのサブミット・データベースへの計算結果の取り込み・データ解析等の操作が簡単にできるように設計されている。また各ユーザーは新規にシミュレータを次々に追加することができるようになっている。これにより数値計算に際しての人間の手間やエラーを回避し、効率的な計算資源の利用が可能になる。

さらにスクリプト言語から呼び出せるAPI関数も提供しているので、原理的にはあらゆる処理を自動化することができる。これまでは不可能であった多数のモデルの同時解析や複雑な解析も可能となり、質的に新しい研究が期待される。

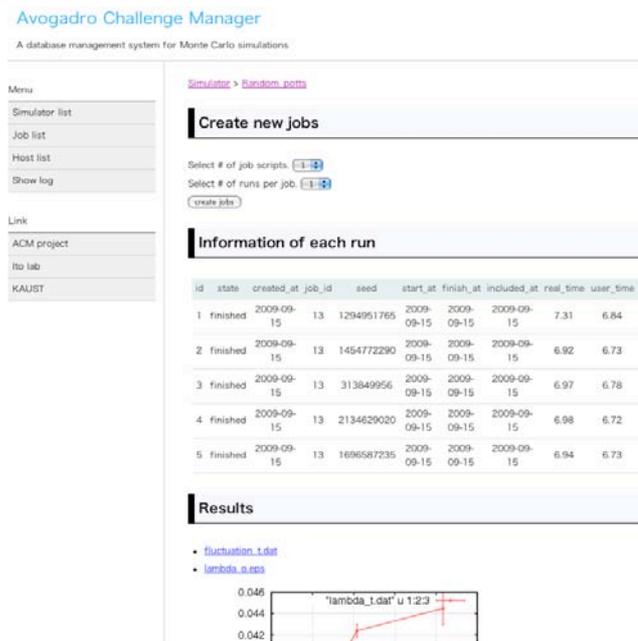


図1 スナップショット

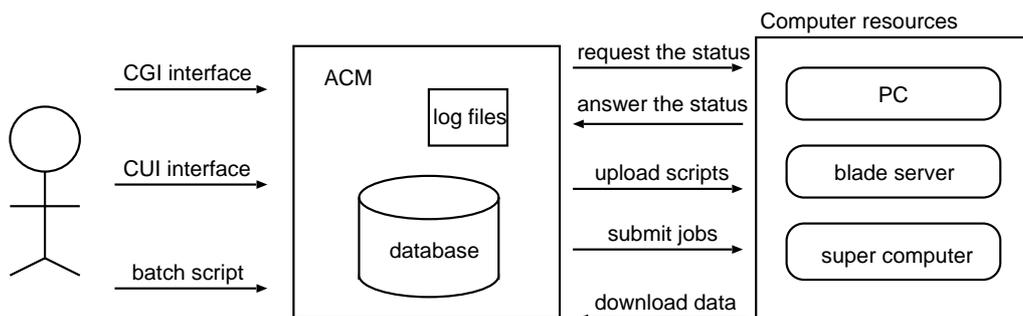


図2 ソフトウェアの概念図

### 3 群集形成における統計分布の普遍性

生態系の進化論的時間スケールでのダイナミクスを複数のモデルにより研究した。モデルとして各種の個体数変動と、新種の導入および既存種の絶滅のルールから成り立つものを考える。

このような生態群集形成モデルはこれまでいくつか提案されている。例えば島田らによって提案されたScale-Invariantモデルでは、個体数変動が以下の式の様なスケールレスな相互作用系を採用している。

$$\dot{x}_i = -b_i x_i + \sum_{a_{ij} < 0} a_{ij} x_i^\lambda x_j^{(1-\lambda)} + \sum_{a_{ij} > 0} a_{ij} x_i^{(1-\lambda)} x_j^\lambda$$

ここで $x_i$ は種 $i$ の個体数密度、 $a_{ij}$ は種 $i$ - $j$ 間の相互作用の強さを表す係数、 $\lambda$ は種間相互作用の非線形性を特徴付ける変数である。個体数密度が0になった種は絶滅したとみなされ系から取り除かれる。新種の侵入のルール (“migration”) が導入されており、一定頻度で相互作用係数がランダムに割り当てられた新種が系に現れる。このモデルにより多種が共存する生態系が実現されることが知られている。

また他のモデルとしてHallらにより提案され、Rikvoldらにより単純化されたTangled-Natureモデルと呼ばれるモデルがある。このモデルは個体ベースのモデルであり、種 $i$ に属する個体が次の世代に子を残す確率は

$$P_I(R, \{n_J(t)\}) = \frac{1}{1 + \exp[-\Delta_I(R, \{n_J(t)\})]}$$

という形で与えられ、その生態系に存在する他種の個体数に依存する。更に各個体は “genome” と呼ばれる長さ $L$ のビット列を持ち、ビットの並びと種が一对一に対応する。各個体は子を残す際に一定の確率 $\mu$ でgenomeに変異を起こし (“mutation”)、これにより系に新種が現れる。つまり個体が $L$ 次元の超立方体上を移動するというモデルである。

これらを含む複数のモデルについて、種数や全個体数のゆらぎ、種の寿命分布、絶滅サイズ分布、個体数分布などの統計的な性質について解析した。

まず最も興味深いのは、これらの統計分布が個体数変動のモデルの詳細に依存しないということである。仮定する種間相互作用によって、典型的な種数や食物網構造などが大きく変わる。それにも関わらず得られる分布の形状は非常に似たものとなる。この普遍性は単純な個体数変動の式を使うことの妥当性を支持しているだけでなく、生態系以外のモデルにも適用できる可能性を示唆している。

他方でこれらの統計分布は新種導入のルールに依存する。既存の種構成によって新種の候補が決まるmutationモデルでは、種構成が断続的に変化し $1/f$ 揺らぎが現れる。種および群集レベルでの寿命分布はベキ則を示し、内部のダイナミクスは非常に長い時間相関を持っていることが明らかとなった。これとは対照的に、既存種と無相関な種を導入するmigrationモデルの場合には、ゆるやかなランダムウォーク的な揺らぎが観測され、特徴的な時間スケールを持った寿命分布が観測された。新種の候補が限定されるという効果に

よって生態系の進化論的時間スケールでのダイナミクスが質的に変化し得ることが明らかとなった。

migrationモデルで観測された寿命分布は、単純な確率過程では説明できない興味深い分布を示すだけでなく、化石から推定されたデータを再現する（図3）。この分布が発生する機構を理解するため、単純化された動的なグラフモデルを提案した。このモデルは個体数変動を持たず非常に単純なルールで更新されるが、個体数変動モデルで見られたような特徴的な寿命分布を再現する。このモデルを解析した結果、寿命分布が指数が1/2のstretched exponential分布でよくフィットでき、さらにそれが種数のランダムウォークと赤の女王仮説から説明できることを示した。

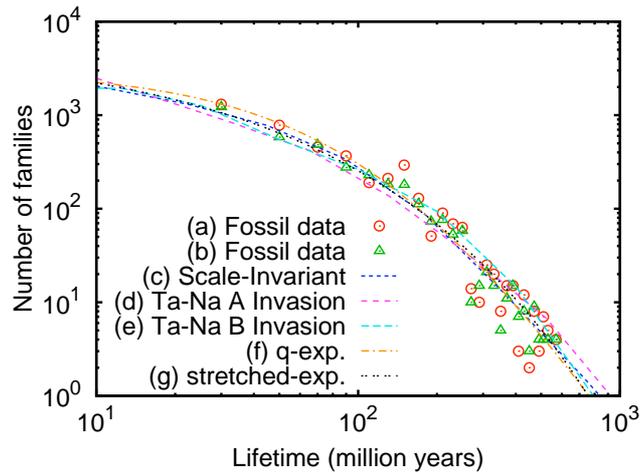


図3 化石から推定された種の寿命分布とモデルから得られた寿命分布

#### 4 結論と展望

本論文では、統計力学的なモデルを用いて生態群集形成の統計的性質についての研究を行った。データベース管理ソフトを開発し様々なモデルについて調べた結果、広範なクラスにおいて統計分布がいくつかの普遍的なパターンに分類できることが明らかとなり、化石やフィールドワークにおける観測データが単純化されたモデルによって説明できることが示された。これらの性質は多種開放系一般について期待される結果であり、生態系だけでなく社会学・経済学・生物学的な問題など広い範囲の現象についても適用できると考えられる。この結果は、普遍的性質だけではなく様々な系の個別的性質についての今後の研究にも大きく寄与することが期待される。