

淘汰圧を考慮した進化モデル

佐藤 倫太郎[†] 長谷川 智史[†] 穴田 一[†]
東京都市大学大学院 工学研究科

1. 背景及び目的

周りにいる生物の違いや食べ物の違い、地形の違いなど、生物の進化には様々な要因が考えられる。そして、進化の要因として考えられる様々な事柄に焦点をあてた進化に関する活発な議論が行われている。ところで、自然界でよく見られる性質にべき則という性質がある。これは化石データから見た種の寿命分布にも見られる性質で、生物の進化モデルなどを評価する際、そのモデルから得られた寿命分布がべき則を再現しているかどうか1つの評価基準になる。寿命分布のべき則を表しているモデルにBak-Sneppenモデルがある。しかしこのモデルは生物の生存競争において弱い種を淘汰しようとする力、淘汰圧が考慮されていない。そこで本研究では、生物種間の淘汰圧に着目した新しい生物の進化モデルを構築し、その有効性を検証することを目的とする。

2. Bak-Sneppen モデル

生物の進化説に断続平衡説という説がある。これは生物が安定している時期と激しく進化をする時期を繰り返して進化が進んでいくという説である。これを説明したモデルにBak-Sneppenモデルがある[1]。このモデルはある種の変化が相互作用している種に影響を及ぼし、その影響が徐々に生態系全体に波及していく一種の雪崩的な側面に焦点をあてたモデルである。シミュレーションの結果、得られる種の寿命分布にはべき則が見られ、この点でも評価されている。Bak-Sneppenモデルは生態系を要素数 N 個の一次元トラス構造で表現しており、両隣の隣接している要素は相互作用関係にあるとしている。各要素は $[0,1)$ の適応度を表す値を持っている。以下にモデルの初期設定及び実際の動きを示す。なお n ステップにおける i 番目の要素の適応度を b_n^i と表す。

初期設定: すべての要素 b_0 に $[0,1)$ の乱数で発生させた値を設定する。

Step1: 全要素中、最小の b_n^i を持つ要素を選択する。

Step2: 1で選択された要素の隣接している要素の b_n^{i-1} 、 b_n^{i+1} を $[0,1)$ の1様乱数で更新し、その他の適応度はそのままとする。

Step1、2を繰り返す。

これは、適応度の最も低い種が淘汰され、新たな種が出現し、その影響が相互作用範囲に及ぶという動きを表している。Bak-Sneppenモデルにおいて得られた種の寿命分布を次に示す。

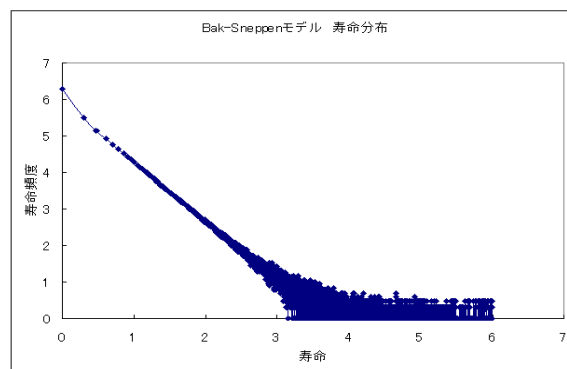


図1 Bak-Sneppen モデル寿命分布

横軸は種の寿命、縦軸は頻度。要素数は2048、step数は100万。両軸対数表記である。べき則が現れ、傾きは約1.6になった。

ここでいう寿命とは、適応度が更新されてから次に更新されるまでのステップ数である。この図のようにBak-Sneppenモデルから得られた寿命分布にはべき則が表れる。化石データから得られた種の寿命分布にもべき則が表れることがわかっておりそれを再現している。しかしこのモデルは、寿命分布がネットワーク構造に依存している。ネットワーク構造の形によって、傾きが変わったり、寿命分布が崩れてべき則が現れないという結果になるのである。

3. 提案モデル

本研究では種が受ける淘汰圧に着目した生物の進化モデルを提案する。種の淘汰は、相互作用する相手から圧力を受け、その圧力が蓄積されて起こっていると考えられる。そこで相互作用している種から圧力を受け、一定以上圧力を受けたら種が淘汰され、新たな種が誕生するモデルを提案する。生態系を一次元トラス構造で表現し、各要素はそれぞれ両隣の要素と相互作用関係にあるとする。それぞれの要素は種の適応度を表す 0 以上 1.0 未満の値 b と累積した淘汰圧を表す値 s を持つ。 s には1ステップごとに受けた淘汰圧が累積していく。淘汰圧は、両隣の要素のうち適応度が自身より大きい要素から受ける。そしてこの s が閾値(th)以上になった要素の適応度に -0.1 以上 0.1 未満の乱数を加算し、適応度の値を更新する。これは一定以上の圧力を受けた種が淘汰され、以前の種の適応度に近い適応度を持つ新たな種が出現することを表している。なお、圧力を計算する際には、その時点での生態系全体の適応度の状態を考慮して計算するために、そのステップにおける最

も大きな適応度が1になるように規格化を行い、圧力を計算する。実際のモデルの動きを以下に示す。ステップ n の i 番目の要素の適応度と淘汰圧をそれぞれ b_n^i, s_n^i と表す。

初期設定: 一次元トラス状の全要素 N 個の b_0^i に $[0,1)$ の乱数を与え、淘汰圧を表す値 s_0^i を0に設定

Step1: s_n^i を次の式で更新する

$$s_n^i = s_{n-1}^i + f \left\{ \left(\frac{b_n^{i+1}}{B_n} - \frac{b_n^i}{B_n} \right) \cdot \theta(b_n^{i+1} - b_n^i) \right\} + f \left\{ \left(\frac{b_n^{i-1}}{B_n} - \frac{b_n^i}{B_n} \right) \cdot \theta(b_n^{i-1} - b_n^i) \right\}$$

$$\theta(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases}$$

B_n : ステップ n における最大の適応度

f : 淘汰圧の適応度差依存性を表す関数

Step2: s_n^i が閾値 th 以上なら b_n^i に $[-0.1, 0.1)$ で発生させた乱数を加算し、 s_n^i を0にする

Step1、2を繰り返す

3.結果

$f(x) = x$ 、閾値 $th=10$ のときの提案モデルの寿命分布を以下に示す。

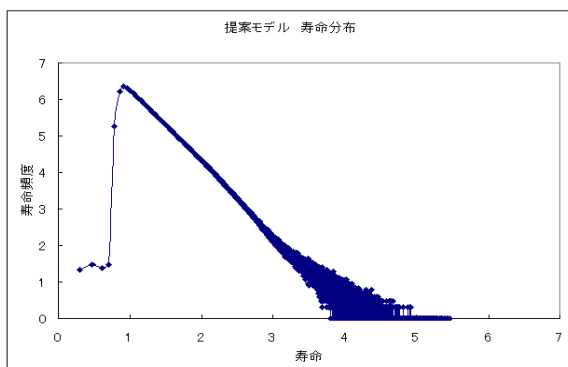


図2 提案モデル寿命分布

横軸は種の寿命、縦軸は頻度。要素数は 2048、step 数は 100 万。両軸対数表記である。べき則が見れ、傾きは約2になった。

寿命の定義は Bak-Sneppen モデルと同様である。上の図のように提案モデルの寿命分布にもきれいなべき則が見れた。このグラフからわかるように低寿命の種が少数しか存在していない。これは受けた圧力が閾値を越えないと淘汰されないというモデルの性質上、必然的に現れるものである。提案モデルではこのほかに生態系のネットワーク構造を二次元、ランダムネットワーク、完全ネットワーク、スケールフリーネットワークの場合についてシミュレーションを行ってみたが、どの寿命分布にもべき則が見られた。また傾きに関しても全て約2になった。次にある一つの要素(種)について、一万ステップ毎の更新回数を示したグラフを以下に示す。

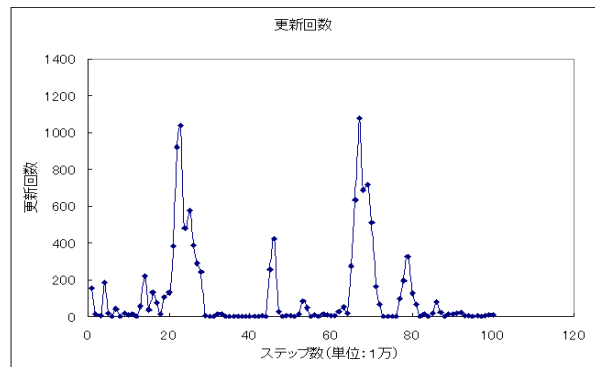


図3 提案モデル 更新回数のグラフ。

更新回数の合計を1万ステップ毎に計算したグラフである。値横軸はステップ数で単位は1万ステップ。縦軸は更新回数である。ある1万ステップでは高い頻度で更新が起きているが、その後安定するという振

このグラフは、種の更新回数がある期間では非常に高く、ある期間では非常に少なくなっているという振る舞いを示している。この振る舞いは全ての種についても同様に見られた。

4.考察

今回、淘汰圧を考慮した生物の進化モデルを提案した。既存の Bak-Sneppen モデルでは、寿命分布が生態系のネットワーク構造に依存する。ところが、提案モデルでは生態系ネットワーク構造を様々な構造に変えても、寿命分布にきれいなべき則が見られ、その傾きもほとんど変わらなかった。また、わずか10要素という少ない要素でも寿命分布のべき則は保たれていたことから要素数にも依存しないという結果も得られた。さらに提案モデルでは全体の適応度がステップを経ると徐々に高くなっていくという振る舞いを示した。これは種が徐々に環境に適応し、進化していく様子を表していると考えられる。そして、各要素の更新の振る舞いを見ると図3のように、高い頻度で更新される期間と、ほとんど更新されない期間が繰り返されている。これは生物の進化説のひとつである断続平衡進化説を表していると考えられる。淘汰圧を考慮することによって、提案モデルはネットワーク構造や要素数にも依らずに寿命分布のべき則が見られ、さらに断続平衡説に則した振る舞いを示しながら種が適応していく様子を示した。このことから、提案モデルは Bak-Sneppen モデルと比べてもより自然なモデルであり、淘汰圧は生物の進化において非常に重要な要素であると言える。しかし提案モデルには相互作用の範囲の中で、適応度の最も高い種が淘汰圧を一切受けないという不自然な部分もある。発表ではこの点についても言及する予定である。

参考文献

[1]Par Bak and Sneppen Punctuated Equilibrium and Criticality in a Simple Model of Evolution Phys.Rev.Lett vol71 No 24