

環境と物質交換を行う膜による人工生命の進化と適応に関する研究

鈴木 遥介[†][†]筑波大学情報学群情報科学類長谷部 浩二[‡][‡]筑波大学システム情報系

1. 研究の背景と目的

人工生命はコンピュータやロボットなどを用いて生命現象の持つ性質を再現することを目的とした研究分野である。人工生命研究において注目される生命の特徴の一つが進化である。進化とは遺伝情報の突然変異と生命個体間での生存競争により、生存に適した生命が発生してくる現象である。進化の結果発生する生命の性質は周囲の環境の状態に大きく左右される。そのため生命の行動や形態、個体数、他の生命との関わり方などと物理法則や物質の種類、量などの環境の性質との関係を解明することで将来の進化の結果を予測することや全く異なる環境における生命の形態の理解に役立てることができると言える。

しかし、現実の生命の進化について実験や観察を行うことは難しい。そこで人工生命による進化のシミュレーションを用いて分析や検証を行うことで現実の生命の進化の研究に役立てるようとするアプローチが取られてきた。このような研究を行った人工生命の例として、Tierra[1]や Avida[2]が挙げられる。これらのモデルは仮想環境の中で資源を奪い合う仮想生命をシミュレーションしており、それらの行動や性質が世代毎に変化することにより、進化が発生するよう設計されている。しかし、これらのモデルにおいては環境の状態は静的で単純なものであり、生命と環境との相互作用や状態変化といった要素は取り入れられていなかった。そのため、環境と生命の形態の関係性を分析する目的には不向きであった。

そこで本研究では生命と環境の間の相互作用、特に物質交換に注目した進化モデルの構築を行う。このようなモデルを用いることで生命が現実とは異なる物質の性質や量などの制約のもとでどのように進化するかシミュレーションし、生命と物質の関係性についての実験を行うことができる。モデルでは生命を遺伝情報に基づいた物質交換のみを行う膜として抽象化し、物質現れる生命の振る舞いやの種類や量、物質の反

Analysis of evolution by artificial life model focusing on substance exchange

[†]Yosuke Suzuki, College of Information Science, University of Tsukuba.

[‡]Koji Hasebe, Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba.

応規則などにより環境の状態を定義する。このようなモデルを用いて様々な環境設定でのシミュレーションを行い、生存時間、個体数などと遺伝情報や環境設定との関係性を分析する。

2. モデルの概要

本研究で用いるモデルでは物質を文字で表し、物質の化学反応を文字列の書き換え規則として表現する。生命は膜として表現され、遺伝情報に従って環境と物質交換を行う。このモデルは次のように定義される。 \mathbb{N} は自然数の集合を、 \mathbb{Z} は整数の集合を表す。

定義 1 (モデル)

モデルは組 (M, R, C, B) から構成される。 M は物質のアルファベットである。 M 上の全ての多重集合の集合を M^* と表記する。 R は物質反応規則の集合である。 $C \in M^*$ は環境に存在する物質を表す。また、 B は環境に存在する膜の集合である。

物質反応規則は環境や膜内部の物質がどのように変化するかを定めた書き換え規則である。これは次のように定義される。

定義 2 (物質反応規則)

物質反応規則 r は組 (Re, Pro, act) から構成される。 $Re \in M^*$ は反応物質を表す。 $Pro \in M^*$ は生成物質を表す。 $act \in \mathbb{N}$ は活性度であり、その反応の起こりやすさを表している。この反応を $Re \rightarrow Pro$ のように表記する。

物質反応規則は反応物質 Re が生成物質 Pro に変化する反応を表しており、物質多重集合 $W \in M^*$ が $Re \subseteq W$ となるときの W に対して適用できる。

膜は次のように定義される。

定義 3 (膜)

膜 b は組 (Con, Gen, Mat, dur) から構成される。 $Con \in M^*$ は膜内部に存在する物質を表す。 Gen は遺伝子の集合であり、膜が行う物質交換を決定している。 $Mat: M \rightarrow \mathbb{Z}$ は物質が膜に対して及ぼす影響を表している。 $dur \in [0, dur_m]$ は膜が物質から受けた影響の度合いを表している。

$Mat(m) > 0$ であるとき物質 m は膜に良い影響を及ぼし、 $Mat(m) < 0$ であるとき膜に悪い影響を及ぼす。また物質とは関係なしに膜は時間ス

ステップごとに d_{env} の悪い影響を受ける。これらの影響は dur の増減で表現される。 $dur = 0$ となったとき膜は破壊され、 $dur = dur_m$ である状態が一定時間継続すると膜は自己複製の機会を得る。膜の自己複製とは自身と同じ Gen 及び Mat を持つ膜を新たに作成することである。このとき、一定の低確率で遺伝子の突然変異が起こる。

遺伝子は次のように定義される。

定義 4 (遺伝子)

遺伝子 $g \in Gen$ は組(Bag, Dir, act)から構成される。 $Bag \in M^*$ は輸送物質を表す。 $Dir \in \{in, out\}$ は輸送方向を表す。 in であれば環境から膜内部への輸送を、 out であればその逆の輸送を行う。 $act \in \mathbb{N}$ は活性度であり、その遺伝子の実行されやすさを表している。

遺伝子 g はその輸送元に存在する物質が Bag を含む場合に実行可能となる。実際に実行される遺伝子はそれぞれの act の値に応じた確率に基づいた n_{exe} 回の重複あり選択により決定される。また遺伝子は膜の自己複製時に一定の低確率で突然変異を起こす。突然変異を起こした遺伝子は異なる遺伝子として複製された膜に保持される。突然変異には遺伝子の構成要素のうち一つがランダムに変化するものと遺伝子が重複して複製されたり複製されなかったりするものがある。

3. シミュレーションによる分析

以上で定義したモデルを用いてシミュレーションを行う。シミュレーションの結果は発生した膜の持つ遺伝情報に注目して行う。ここで同一の遺伝情報を持つ膜の集合を種と呼ぶとする。種の大きさや時間発展を観察し、その特徴を分析する。

3.1. シミュレーションの設定

シミュレーションでは $M = \{A, B, C, D, E\}$, $R = \{r1, r2, r3\}$, $C = \{A^{500}D^{100}E^{100}\}$, $B = \{b0\}$ と設定した。ここで、 R の要素はそれぞれ $r1 = AD \rightarrow BD$, $r2 = B \rightarrow C$, $r3 = CE \rightarrow AE$ である。また $b0$ はランダムな遺伝情報を持った膜で、その各要素は $Con = \{\}$, $Mat(A) = 0$, $Mat(B) = 10$, $Mat(C) = -10$, $Mat(D) = 0$, $Mat(E) = -10$, $dur = 500$ と設定した。また、 $dur_m = 500$, $n_{exe} = 200$, $d_{env} = 50$ とした。

このような初期状態からシミュレーションを開始した。膜 $b0$ を始祖膜、その種を始祖種と呼ぶ。シミュレーションは1000時間ステップ経過するか環境に膜が存在しなくなったときに終了

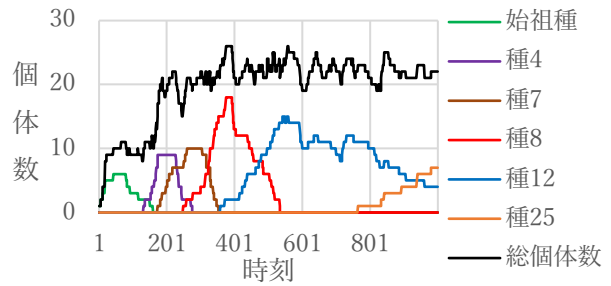


図1 繁栄種と総個体数(黒線)の変化

する。シミュレーションを複数回を行い、環境に存在した膜の数や種類に注目した分析を行った。

3.2. シミュレーションの結果

シミュレーションの結果を図1に示す。今回は各時刻で最も個体数が多い種に注目して分析を行った。このような種を繁栄種と呼ぶ。図1から繁栄種が移り変わっていく様子を確認できた。例えば種8(赤線)と種12(青線)について注目すると、種12が発生した時刻357直後の時刻392から種8の個体数は減少し続け、時刻479で種12が繁栄種となった。またこのような変化の間でも総個体数は大きく変化していなかった。

このことから環境内の限られた物質を巡って膜同士の生存競争が起きていることが分かった。繁栄種はその時点で最も生存に有利な遺伝情報を持った種である。しかしより生存に有利な種が登場するとそれらに生存や繁殖のための物質を奪われ、個体数が減少することになる。これらの結果からこのシミュレーションでは膜の進化が起きていることが分かった。

4. 結論と今後の課題

本研究では環境と物質交換を行う膜を用いた進化モデルを構築した。また構築したモデルを用いてシミュレーションを行い、膜の進化が起きていることを示した。今後は物質の性質や量の異なる幾つかの環境でのシミュレーションを行い、環境の違いが進化に及ぼす影響について分析したいと考えている。

参考文献

[1] T.Ray. Evolution, ecology and optimization of digital organisms. *Technical report working paper*, 92-08-042, 1992.
 [2] C.Ofria, C.O.Wilke. Avida: A software platform for research in computational evolutionary biology. *Artificial Life Volume 10 Issue 2*, p.191-229, Spring 2004.