

三次元仮想物理環境における捕食被食関係に基づく 個体群動態と形質進化

伊藤 孝† Marcin L. Pilat† 鈴木 麗璽† 有田 隆也†

名古屋大学 大学院情報科学研究科†

1. はじめに

捕食被食相互作用は生態系における代表的な種間構造であり、これを理解することは生態系の理解や保全の上で非常に重要である。このため Lotka-Volterra 方程式をはじめ様々な数理モデルが提案され、個体数変動に着目した分析がなされてきた。特に近年の理論研究において、捕食被食相互作用内で生物の形質進化が個体群動態へ大きな影響を与えることがわかってきた[1]。

本研究ではこの形質進化と個体群動態の相互作用のダイナミクスを解明することを目的とし、三次元仮想物理環境下で仮想生物の形態と行動が進化可能なモデルを用いて進化シミュレーションを行った。これは従来一対一の捕食被食相互作用を扱っていたモデル[2]を、多数の仮想生物が個体数を変化させながら進化できるように拡張したものである。従来の数理モデルでは数種類の行動戦略を予め仮定しその個体数変化で進化を表現したが、本モデルでは個体群動態に応じて多様な戦略自体が創発する過程を議論することが可能となったため、個体群動態研究に新たな知見をもたらすことが期待できる。

2. モデル

実験環境としてオープンソースな三次元物理環境での形態と行動の進化シミュレーションソフトウェアである Morphid Academy [3]を用いる。

各エージェントはヒンジ状の関節で接続された複数の直方体のパーツで構成される。その形態はパーツに対応したノードと関節に対応したリンクで構成される、再帰的な構造が可能な有向グラフによって、その行動は有向グラフの中に組み込まれたニューラルネットワークによってそれぞれ決定される。エージェントは一定距離内の他エージェントの位置を検知しニューラルネットワーク内のセンサーノードに入力し、各パーツにあるエフェクターノードの出力に従って関節を動かすことによって行動する。

シミュレーションは摩擦と重力が働く三次元



図1 Morphid Academyを用いた捕食被食モデルでの進化例。大きな個体が捕食者、小さな個体が被食者、半透明な個体が捕食された被食者。

物理空間上のフラットな平面上で行われる。捕食者群と被食者群は一定距離内にランダムに配置される。試行開始後、各エージェントは重力に従って自由落下した後、一定ステップ経過後から定められたステップの間平面上を動き回る。各エージェントの適応度は以下の式のように定める。被食者のルートパーツに捕食者が触れたとき捕獲したと定義し、捕食者の適応度はその捕獲数と最も近い被食者との距離をどの程度縮めたかで、被食者の適応度は捕獲された個体は0、逃げ切った個体はその体積に応じて決まる。体積が大きいかほどコストがかかり、捕獲されにくい形質を持つ被食者は持たない被食者より適応度は低くなる。

$$F_{predator} = \alpha \times \left(\text{捕獲数} + 1 - \frac{\text{標的との現在距離}}{\text{標的との初期距離}} \right)$$

$$F_{prey} = \begin{cases} 0 & (\text{捕獲された個体}) \\ \beta \times \left(1 - \frac{\text{体積}}{\gamma} \right) & (\text{逃げ切った個体}) \end{cases}$$

進化には個体数変動する遺伝的アルゴリズムを用いる。まず、現在の個体数と同数のランダムな親個体のペアを作成し交叉、接合し有向グラフの構造や内部のパラメータ値を突然変異させることで子個体を生成する。子個体の数は親の適応度の合計に比例して確率的に決める。よって、高適応度の親から多数の子が生成される一方、低適応度の親からは生成されない。個体数は5から50とし、それを超えて増減しない。

Population Dynamics and Trait Evolution based on Predator-Prey Relationship in 3D Physical Simulation

† Takashi Ito, Marcin L. Pilat, Reiji Suzuki and Takaya Arita

‡ Graduate School of Information Science Nagoya University

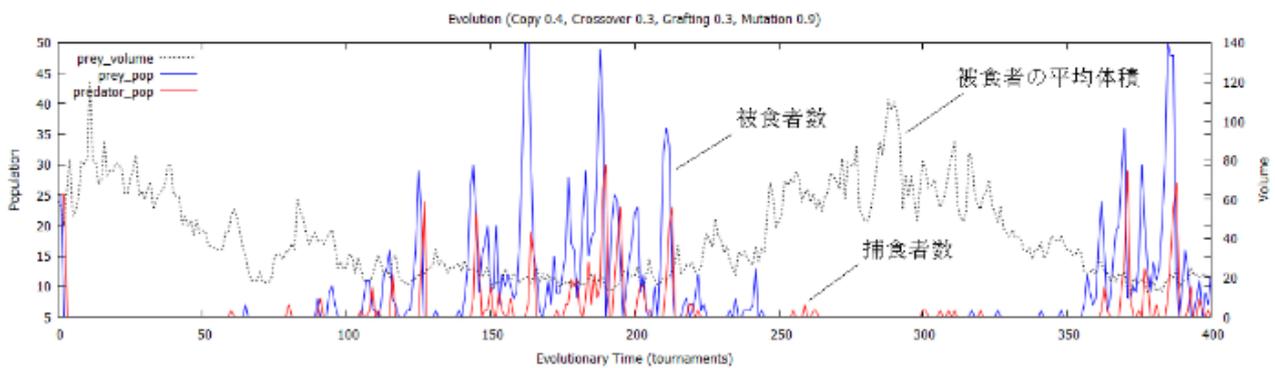


図2 被食者のみ進化する設定での個体数変動と被食者の体積の推移

3. 実験結果

まず、個体数変動の傾向を調べるために進化が起こらない設定で実験した。事前に進化させた、被食者を捕えられる捕食者と、コストを下げ高い適応度を得られる被食者を初期個体として5体ずつ用い、進化操作では親と同一の個体のみが生じるものとした。その結果、被食者の増減に遅れて捕食者が増減を繰り返す Lotka-Volterra 方程式と同様の個体数変動を示すことが観察できた (図3)。

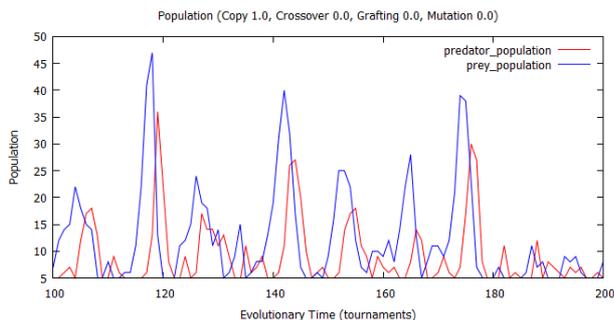


図3 進化が起こらない設定での個体数変動

次に被食者のみを進化させる実験を行った。初期個体として、捕食者は前の実験と同様の個体、被食者はランダムに生成した個体を用いた。その結果 (図2)、進化初期は両者の個体数は最少だが、世代が進むと両方とも増加し、図1と同様な Lotka-Volterra 方程式のような振動が見られた。この振動はしばらく続いた後に消失したが、その後再度生じた。

この時の形質進化と個体数変動の関係を調べるために被食者の体積の平均値を測定した。その結果、振動が起こっている際には、被食者の平均体積 (及びその分散) は起こっていない時と比較して低かった。

個体数変動は振動の有無で2つの状態に分かれた。振動がある時は、前の実験と同様の挙動が起こった。一方、振動が無い時は被食者の体

積が大きいためコストが高く適応度は低い。このため個体数は増加せず、両者の個体数は最少となった。本モデルでは被食者はコストと捕食の2種の選択圧を受ける。振動が無い時は捕食者の個体数は少なくコストの選択圧により体積が小さくなる進化が起こる。一方振動がある時は捕食者の数が多く、捕食者の選択圧によりコストをかけて生き延びるため体積が増加する進化が起こる。この選択圧の変化によって体積が変化し、振動の有無が切り替わると推測される。

4. おわりに

本稿では、個体群動態と形質進化の相互作用のダイナミクスを解明することを目的とし、三次元仮想物理空間で多数の仮想生命体を用いた捕食被食モデルによる進化シミュレーションを行った。進化を抑止した設定では Lotka-Volterra 方程式と同様の個体数振動を認め、被食者を進化させた設定では、被食者の体積の大きさによって振動が生じ、形質進化と個体群動態の間に相互作用が起こっていることがわかった。捕食者、被食者双方が進化する実験や、個体数振動の際の形質進化の解析により、両者の相互作用の一層の解明が期待できる。

5. 参考文献

[1] Yoshida T., Ellner S.P., Jones L.E., Bohannan B.J.M., Lenski R.E., Hairston N.G., Jr (2007). Cryptic population dynamics: Rapid evolution masks trophic interactions. *PLoS Biol.* 5, pp. 1868–1879.

[2] T. Ito, M. L. Pilat, R. Suzuki and T. Arita (2013). Coevolutionary dynamics caused by asymmetries in predator-prey and morphology-behavior relationship, *Proc. of the 12th European Conf. on Artificial Life*, pp. 439-445.

[3] Pilat, M. L. and Jacob, C. (2008). Creature academy: A system for virtual creature evolution. *Proc. of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2008)*, pp. 3289–3297.