

柔軟な仮想生物を用いた環境変化に対する発生可塑性の進化に関する一検討

東中 隆之介[†] 鈴木 麗璽[‡] 有田 隆也[‡]

名古屋大学 情報学部[†]

名古屋大学 大学院情報学研究科[‡]

1. はじめに

表現型可塑性とは 1 つの遺伝子型から環境条件に応じて複数の表現型を発現する能力のことであり、進化において重要な役割を果たしていると考えられている [1]。その中でも、Plasticity-First 仮説は、新奇な形質が遺伝的要因のみから生じるという従来の考え方に対し、環境変化が新奇で多様な表現型の発現をもたらす、そこで生じる適応形質の遺伝進化を先導・促進するものであるが、同時に自然環境での包括的な検証の不足も指摘されている [2]。

本研究は、特に生物が受精卵から成体に至るまでの発達過程における可塑性である、発生可塑性の進化における役割を明らかにすることを目的とする。そのために、2次元ボクセル型ソフトロボット進化環境である Evolution Gym [3] を柔軟な仮想生物の進化に用いる。本研究では、環境条件において異なる特徴が発現する発生可塑性ボクセルを新たに導入し、実験中のある世代で生じる環境変化における発生可塑性の適応的役割や、その後の進化への影響を検討する。

実験の結果、発生可塑性により環境変化時の集団に多様性が生じ、数種の発生可塑性を活用した適応的な個体が現れることや、より適応的な形質は集団中に維持されやすいことが確認できた。

2. モデル

Evolution Gym は奥行きがなく下向きに重力が働く 2次元空間上において、ボクセルと呼ばれる正方形を用いてソフトロボットや環境が構成される。仮想生物(ロボット)を構成するボクセルの種類には硬質(変化なし)、軟質(受動的に変化)、横伸縮(横方向に自ら伸縮)、縦伸縮(縦方向に自ら伸縮)がある (Fig. 1)。ここに、発生可塑性ボクセルを導入する。これは環境条件に応じて硬質、軟質、横伸縮、縦伸縮のいずれかのボクセルを表現型として発現するものである。どのボクセルの表現型を持つかは後に説明する発生可塑性遺伝子によって決定される。

本研究では、ソフトロボットは形態遺伝子、制御遺伝子、発生可塑性遺伝子の 3 種類の遺伝子から形態と制御が決定される。形態遺伝子は生物を構成するボクセルの種類を決定する遺伝子であり、0~5 の整数が格納された長さ W^2 の 1 次元配列である (Fig. 1)。これを生物の形状に対応する $W \times W$ の 2 次元形状に変換し、整

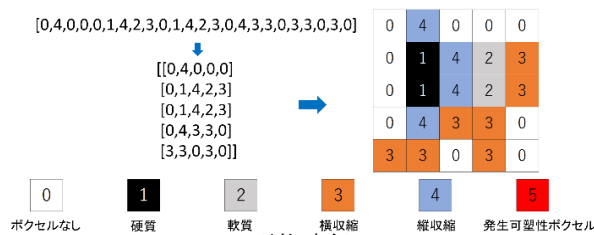


Fig. 1: 形態遺伝子

数の種類に対応して硬質、軟質、横伸縮、縦伸縮、発生可塑性ボクセル、ボクセルなしのいずれの形質が発現するかを決定する。各ボクセルは隣接するもの同士の辺がつながり、全体として一つの形状を構成していると想定する。

生物の横伸縮・縦伸縮ボクセルは各時刻 t において関数 S で定義される値を標準の長さに乗じたものを現在の縦・横の長さとして伸縮を表現する。

$$S(t) = A\{\sin(\omega t + \phi) + 1\} \quad (1)$$

A は振幅、 ω は振動数でありこれらは予め決定された一定の値を用いる。 ϕ は位相のずれであり、制御遺伝子によって決定される。制御遺伝子は形態遺伝子と同サイズの 1 次元配列であり、0~ 2π の実数が格納され、対応する各縦横伸縮ボクセルの ϕ を決定する。

各時刻 t において式 1 に従って横伸縮、縦伸縮の形態を持つボクセルが伸縮して生物の行動が生成される。この時、軟質ボクセルは他のボクセルの伸縮によって柔軟に形状が変化するが硬質ボクセルは変化しない。ただし、物理シミュレーションの都合微妙な形状の変化は生じうる。

ここに、新たに発生可塑性遺伝子 (以下 (DP (Developmental Plasticity) 遺伝子) と発生可塑性ボクセルを導入する。これは整数値で表現される M 種の環境条件に応じて形質が変化する性質を持つ。その変化を決める DP 遺伝子は要素数 M の配列であり、従来のボクセルの種類に対応する 1~4 の整数が格納される。環境 m における発生可塑性ボクセルの種類を決定する m 番目の遺伝子を DP 遺伝子 m と名付ける。Fig. 2 は、本研究で採用する $M=2$ の例であり、DP 遺伝子 1 は 3、DP 遺伝子 2 は 4 であるため、発生可塑性ボクセルは環境 1 では横伸縮、環境 2 では縦伸縮の形質が発現する。

適応度は環境 1 では初期位置から T ステップ後の生物の重心の x 座標の相対位置、環境 2 ではこの符号を逆転したものとす。つまり、環境 1 では画面上右に進むほど、環境 2 では左に進むほど適応度が高い設定である。また、集団内に負の適応度を持つ個体が存在す

A preliminary analysis of the evolution of developmental plasticity in response to environmental changes using flexible virtual creatures
[†] Ryunosuke Higashinaka, School of Informatics, Nagoya University
[‡] Reiji Suzuki and Takaya Arita, Graduate School of Informatics, Nagoya University

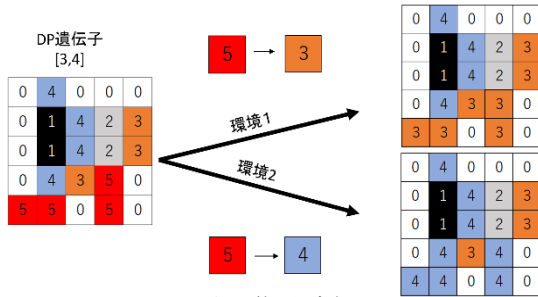


Fig. 2 : 発生可塑性遺伝子

る場合は、最低適応度を持つ個体の適応度が 0 となるように集団内の全個体の適応度をスケリングした値を選択時にのみ用いた。次世代生成において各遺伝子はルーレット選択と交叉を用いた遺伝的アルゴリズムで決定される。各遺伝子の突然変異(値をランダムに再割り当て)率は、形態・制御遺伝子は p_{mg} 、DP 遺伝子は p_{md} とする。交叉率を p_c とする。なお、交叉においては一点交叉ののち、生成された子個体が一塊のボクセル群から構成されない場合は、空白をランダムにボクセルで埋めるように遺伝情報を改変する操作を一塊になるまで行う操作を加えた。

3. 実験と考察

$W=6, M=2, T=800, A=0.7, \omega = \pi/48, p_{mg}=0.01, p_{md}=0.03, p_c=0.05$, 集団数は 64 とし、環境 1 で 600 世代進化させた後環境 2 でさらに 600 世代進化させた。

Fig. 3~Fig. 5 は、5 試行した際、後述の 3 種の発生可塑性の利用がすべて観測された 1 試行のデータである。Fig. 3 は各世代の集団の平均適応度と最高適応度を示す。適応度は初期位置にはほとんど 0 付近から徐々に増加し、600 世代までに平均で約 35 ほどに至った。環境変化直後には適応度が平均-15 程度まで激減したのち急激に回復し 1200 世代までには 30 弱に至った。

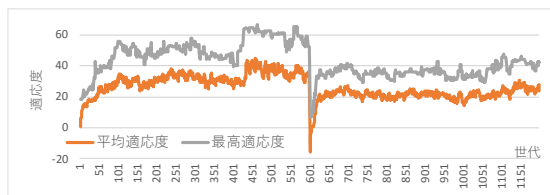


Fig. 3 : 最高適応度と平均適応度

Fig. 4 は環境変化直前の 600 世代の集団において DP 遺伝子 1 が発現した場合、仮に DP 遺伝子 2 が発現した場合の各個体の最終位置 (x 座標) のヒストグラムである。DP 遺伝子 2 の場合のほうが分布が左寄りであり正負をまたぐ形になり、環境が変化した際の適応度の低下が減少しうることがわかる。分析から、このような従来環境への適応を和らげ行動を多様化する傾向は、環境 1 では発現しない DP 遺伝子 2 に対して働く中立進化がもたらす遺伝的多様性によるものであるとわかった。

環境変化直後の 601 世代の多様な集団において、高い適応度を獲得した個体を 3 パターン発見した (Fig. 5)。1 つは発生可塑性ボクセルが環境 2 において硬質ボクセルとなるパターン(a)であり、周囲の伸縮ボクセルの動きを封じて右移動を抑制することで比較的高い適応度を獲得した。2 つ目は生物がバランスを崩して転

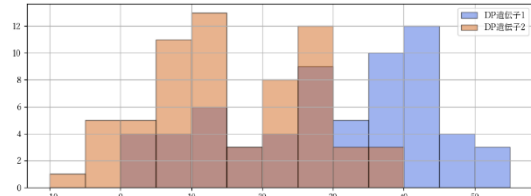


Fig. 4 : 環境変化直前 (600 世代) での各 DP 遺伝子発現時の右移動距離の分布

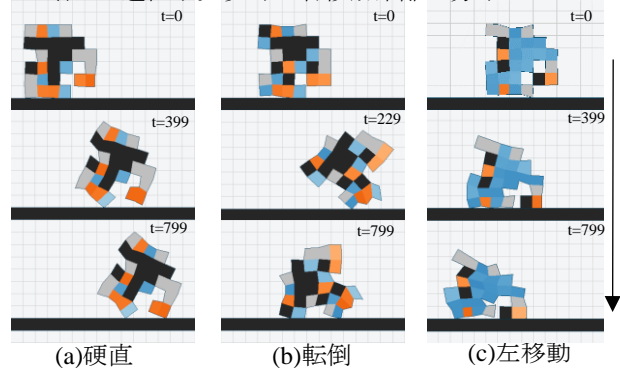


Fig. 5 : 発生可塑性を利用した 3 種の適応的形態と行動

倒するパターン(b)である。図中では横伸縮ボクセルが硬質ボクセルが変わることで $t=200$ 頃まで右移動した後、生物が左に 90 度回転し転倒することで元の位置に戻り停滞することで、比較的高い適応度を獲得した。3 つ目は初めからうまく左に移動できるパターン(c)である。図中では発生可塑性ボクセルが横伸縮から縦伸縮となることで右移動から左移動に変化した。

5 回の実験の内 2 回はパターン(c)が環境変化直後から確認され、その個体の子孫が最終世代まで受け継がれた。発生可塑性が進化を先導したと考えられる。残りの 3 回ではパターン(a), (b)の子孫いずれかが環境変化後 10 世代から 50 世代ほど集団内で広がるが、その後左移動する個体にとってかわられた。(a), (b)は左移動において(c)と比べ十分適応的ではないが環境変化直後では比較的高い適応度を獲得して集団に広がるためかえって適応進化を妨げた可能性も示唆される。

4. おわりに

本稿では、発生可塑性を持つ柔軟な 2 次元仮想生物を進化させ、環境変化時の発生可塑性の適応性とその進化を分析した。発生可塑性によって突然変異がなくとも環境変化時の表現型に多様性が生じ、外適応のように従来の形状も生かしつつ変化にうまく適応した個体が集団中に生き残る過程を観察した。今後、発生可塑性によって得られた形質がどのように遺伝的に定着していくかに注目していきたい。

参考文献

- [1] Sultan, S., E. (2017). Developmental plasticity: Re-conceiving the genotype. *Interface Focus*, 7(5): 20170009.
- [2] Levis, N. A., Pfennig, D. W. (2016). Evaluating 'Plasticity-First' evolution in nature: Key criteria and empirical approaches, *Trends in Ecology & Evolution*, 31(7): 563-574.
- [3] Bhatia, J. S., Jackson, H., Tian, Y., Xu, J., Matusik, W. (2022). Evolution Gym: A large-scale benchmark for evolving soft robots, *arXiv:2201.09863 [cs.RO]*.