

学習とニッチ構築の共進化に関するミニマルモデル

林直輝[†] 鈴木麗壘[‡] 有田隆也[‡]

名古屋大学 情報文化学部[†] 大学院情報科学研究科[‡]

1 はじめに

生物は自然選択によって、環境に適応するよう集団レベルで進化してきた。同時に、個体レベルの生態的活動においても、生物は環境との相互作用を通して自身の適応性を改変し、適応してきた。その中でも表現型の可塑性によって環境に適した形質を獲得する学習と、環境条件を改変することで自身の適応性を改変するニッチ構築[1]が、進化にどう影響するかについては近年進化学において注目されている[2]。我々は、学習とニッチ構築が環境条件の変化を介して密接に影響し合ってきたという視点から、両形質の共進化モデルを構築し、一方が他方のメリットとコストのバランスを改変することで、両者の適応進化が交互に生じる周期的な共進化過程が創発することを示した[3]。

ニッチ構築によって改変された環境は、その状態が何世代にもわたって持続する場合もあれば、その世代限りとなる場合もあると考えられる。このような、改変された環境条件の世代を通した継承である生態的継承の度合いは、学習とニッチ構築の共進化に大きな影響を及ぼすと考えられるが、そのような視点に基づく議論は皆無であった。

そこで、本研究では、生態的継承の度合いが学習とニッチ構築を行う集団の進化に与える影響を議論可能な、学習とニッチ構築の共進化に関するミニマルな個体ベース進化モデルを構築した。本稿では世代間での環境の継承度合いが集団の進化にどのような影響をもたらすか実験と解析を行う。

2 モデル

N 個体からなる集団の各個体は、自身の生得的な形質値をあらわす遺伝子 gp とその可塑性（学習可能性）を表す遺伝子 gl 、また、自身のニッチ構築を表す遺伝子 gn を持ち、それぞれ 0 以上 1 以下の実数値をとる。また、全ての個体は同一の環境を共有し、世代 t におけるその状態を実数値 E_t ($0 \leq E_t \leq 1$) で表す。

各世代では、まず、すべての個体が自身の持つ gn の値に E_t を近づけるようにニッチ構築を同時に行う。具体的には、 E_t は以下のように定義される。

$$E_t = \alpha GN + (1 - \alpha)E_{t-1} \quad (1)$$

ただし、 GN は t 世代目の集団の gn の平均である。また α は生態的継承の度合いを調節するパラメータであり、 α が小さいほど前世代の環境の状態を引き継ぐ傾向が高いことを表す。

次に、改変された環境において各個体が学習を行う。本モデルでは、各個体はその形質値が環境値に一致した場合に正の適応度を得るものとする。さらに、可塑性が大きい程生得的な形質値から離れた形質を学習で獲得可能であるが、その分大きなコストが生じるものとする。学習結果に基づく各個体の適応度の算出を、図 1 の適応度関数で表現する。x 軸はその世代での環境値 E_t 、y 軸はその環境値での個体の適応度 f である。関数の形は個体の持つ gp と gl に依存し、高さ $2S/gl$ (S はパラメータ)、 gp を中心とした x 軸上の底辺の長さが gl の二等辺三角形形状のピークを 1 つ持つ。

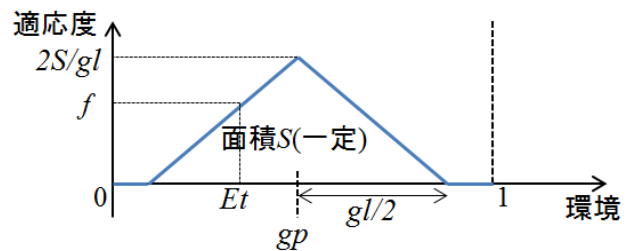


図 1: 適応度関数

同図は次のことを示している。可塑性 gl は形質値を生得的な値 gp から増減可能な最大範囲であり、形質値と環境値が一致した場合にのみ正の適応度を得る。ただし、学習にかかるコストにより、 E_t が gp と等しいときに適応度は最高値 $2S/gl$ をとり、 gp と E_t との差に比例して減衰する。また、三角形の面積 S は gl に関わらず一定であるため、 gl が小さい程背が高く尖ったピーク、大きい程背が低く裾野の広いピークとなる。つまり、可塑性が小さいほど環境条件は限られるが高い適応度が得られる一方、可塑性が大きい程広い環境条件で中程度の適応度を得ることができる。なお、三角形の領域の一部が E_t の定義域を超える場合は、超えた分の面積を補うように底辺の長さを定義域上で延長し、面積を S に保つ操作を加えた。

集団を進化させる遺伝操作では、算出した適応度に比例したルーレット選択によって親個体を選び、同じ遺伝子を持った子個体を生成する。その際に一定確率 μ で各遺伝子に対して突然変異が発生し、 0 から 1 のランダムな実数値に置き換えられるものとする。

3 実験結果と解析

今回の実験は、 $N=300$ 、 $S=0.02$ 、 $\mu=0.005$ の設定で $\alpha=1.0$ から $\alpha=0.05$ まで 0.05 の間隔でそれぞれ 30000 世代に渡り実験した。以降、 GP 、 GL 、 GN 、 F をそれぞ

A minimal model of coevolution of learning and niche construction

[†] Naoki Hayashi

School of Informatics and Sciences, Nagoya University

[‡] Reiji Suzuki and Takaya Arita

Graduate School of Information Science, Nagoya University

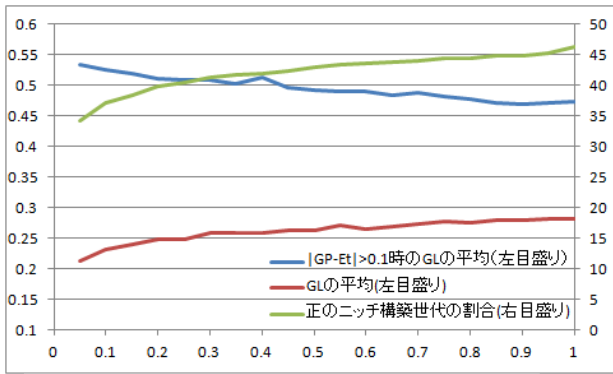


図 2: α の学習・ニッチ構築への影響

れ各世代における集団の gp, gl, gn, f の平均とする.

図 2 はそれぞれの α のもとで実験を行い, GL の全世代での平均, および, $|GP-E_i| > 0.1$ の条件を満たす世代のみにおける GL の平均をとったものである. 各値は 10 試行の平均である. $|GP-E_i| > 0.1$ の条件は, 大きな環境変化が生じて環境値と生得的形質値の差が大きくなり, 不安定な状況における GL の進化傾向を表している. まず, α の増加に伴い, 全世代での GL の平均が大きくなっていることが分かる. これは, 環境が現世代のニッチ構築によって改変される度合いが大きい程全体的には環境変化が激しく, 学習がより適応的である事を示している. 逆に, 環境変化時の GL は α の増加に伴い小さくなっていることが分かる. これは, 大きな環境変化に対する進化過程に注目すると, ニッチ構築による環境改変の影響が小さい場合の方が, 学習がより適応的である事を示している.

図 2 の正のニッチ構築世代の割合は, 式 (1) のニッチ構築前後で, 環境値と全個体の形質値との距離の総和が縮まった世代の割合, つまり, 集団全体にとって適応度増加に貢献する正のニッチ構築が生じた世代の割合である. α の増加に伴い増加する傾向があり, ニッチ構築による環境改変の影響が大きいほど正のニッチ構築が進化しやすいことを示している. なお, 割合が全体として低めなのは, ニッチ構築は集団全体で行われるため, 各個体にとって良くない結果となる場合が多いことによると推測される.

以下, α が小さい 0.05 の場合と大きい 0.9 の場合を取り上げ, 挙動について詳しく分析する. 図 3 は横軸に世代, 縦軸に GP, GN, GL, F, E_i をとった, $\alpha=0.05$ の場合のグラフである. 環境値 E_i の推移からおよそ前半 400 世代までは環境が比較的安定しており, 後半 600 世代は不安定であることが分かる. 安定した前半 400 世代を見てみると, GP が E_i に一致しがちで, GL が小さいことから, 可塑性を小さくして安定した環境に適した形質に特化することで高い適応度を得ていることが分かる. しかし, 400 世代あたりから, 集団全体で行われるニッチ構築の影響により GP と E_i の差が大きくなると, 集団の適応度が低下した. このとき, GL が大きくなることで, 学習によって変化する環境へ適応する過程が見られた. その後も, 環境は不安定な状態が続き GL が 0.9 付近まで増加する場合も見ら

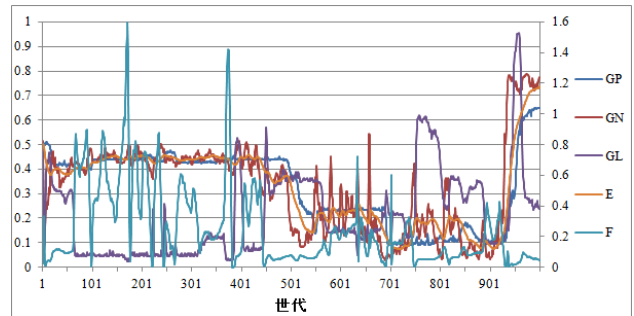


図 3: GP, GN, GL, F (右目盛り), E_i の推移($\alpha=0.05$)

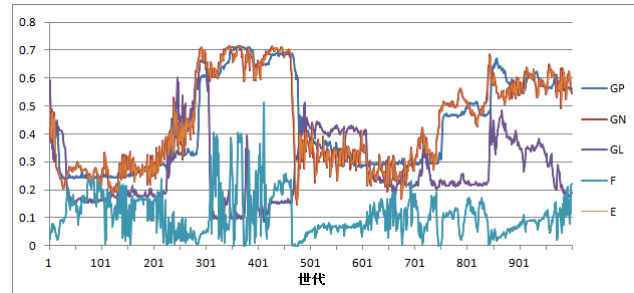


図 4: GP, GN, GL, F, E_i の推移($\alpha=0.95$)

れた. α が小さい場合は, 前者の過程のように環境が安定する場合がよく見られ, 各個体が gl を小さくすることで高い適応度を得ることができていた. しかし, 後者のように大きな環境変化が生じると, ニッチ構築の環境に対する影響が小さいため, ニッチ構築ではなく学習に大きく選択圧が働き適応する傾向があった.

一方, 図 4 に示す $\alpha=0.9$ の場合では, 常に環境が不安定であるため全体を通して比較的 GL が大きい傾向があった. また, 振動する E_i を正のニッチ構築によって GP 付近に留める適応 (約 30-180 世代) と前述の高い可塑性に基づく学習による適応 (約 200-300 世代) の両方のプロセスが見られた. これは, この条件ではニッチ構築が環境に与える影響が大きいため, 集団が環境に適応する際に, 正のニッチ構築にメリットがより大きく生じた結果だと考えられる.

4 おわりに

本研究では, 学習とニッチ構築の共進化に関するミニマルなモデルを構築し, 環境の継承度を変更して実験を行った. 結果, 現世代のニッチ構築による環境改変の影響が大きくなるにつれて学習・正のニッチ構築共に選択圧が強く働くことがわかった. また, 環境改変の影響が小さい条件での大きな環境変化への適応では学習が進化し易い傾向があることなどが分かった.

参考文献

- [1] Odling-Smee, F. J., Laland, K. N. and Feldman, M. W.: *Niche Construction-The Neglected process in Evolution*, Princeton University Press (2003).
- [2] Gilbert, S. F. and Epel, D.: *Ecological Developmental Biology: Integrating Epigenetics, Medicine, and Evolution*, Sinauer Associates (2009).
- [3] Suzuki, R. and Arita, T.: Effects of Temporal Locality of Ecological Processes on Coevolution of Learning and Niche Construction, *Artificial Life XII (ALIFEXII)*, pp. 471-477 (2010).