

大域的環境変動に順応して進化する人工生命体のモデルとその解析

A Model of Artificial Life Adapting to the Global Environmental Change and its Analysis

沢田 高政*¹ 加藤 昇平 武藤 敦子 伊藤 英則
Takamasa Sawada Shohei Kato Atsuko Mutoh Hidenori Itoh

名古屋工業大学

Nagoya Institute of Technology

We have proposed an artificial life as an agent expressed by extended binary decision diagrams and made it evolve using genetic programming method. In this paper, we defined an agent having a gene composed of a strategy and a selective value for the environment, and proposed an evolution model of the biological differentiation. We observed agents evolving so as to adapt themselves to the environment and becoming to differentiate into two types. In addition, we gave the global change to the environment in this model and observed the biology like "monarch butterfly" which migrates in North America from generation to generation.

1. はじめに

人工生命研究は生命体の生命維持行動の解明、遺伝と生態分化・進化の關係の解析、世代交代の速度と環境変化の速度の評価などを目的とする。

このような目的に応えるために、これまでに我々は疑似生命体をエージェントとしてコンピュータ上で記述し、このエージェントが遺伝的プログラミング技法により環境の変化に順応して進化するモデルを提案してきた。たとえば、植物と草食動物と肉食動物が食物連鎖關係を安定させて進化する条件を明らかにした [1][2][3]。また、同一種のエージェントが環境の変化に順応して、一方は渡り鳥に、他方は留鳥に分化する過程を示した [4][5]。これらの研究結果を踏まえて、本稿では環境の変化が広域的でかつ長期間にわたるモデルを提案する。ここでは、地球の気象環境が約 1 万年前の第 4 期氷河期から変化してきた期間に、生命体がこの変化に順応して、行動戦略を獲得して生態を進化させてきたことに注目する。

エージェントの行動戦略の獲得メカニズムは遺伝的プログラミング技法を用いて多出力二分決定グラフ [2] の交叉・突然変異・評価を繰り返し進化させることで実現する。この遺伝的手法と環境変化をモデルとして、北米大陸のメキシコ、アメリカ、カナダを渡るオオカバマダラ (蝶) [6] の生態発現メカニズムを明らかにする。

2. エージェント

2.1 エージェントの定義

エージェントは遺伝要素として環境順応値と行動戦略を持ち、それらはエージェントが環境により順応していくように決定される。 i 番目のエージェント a_i を環境順応値 b_i と行動戦略 st_i より、式 (1) と定義する。

$$a_i(b_i, st_i) \quad (1)$$

2.2 エージェントの生成

エージェントの生成は交叉によって行われ、親エージェント a_j, a_k から子エージェント a_i が生成される。エージェント a_i の生殖活動による生成は式 (2) で定義される。

$$a_i(b_i, st_i) = c(a_j(b_j, st_j), a_k(b_k, st_k)) \quad (2)$$

連絡先: 武藤敦子, 名古屋工業大学, 名古屋市昭和区御器所町, 052(732)2111 (内線 5819), atsuko@ics.nitech.ac.jp

*1 現在, 株式会社トヨタコミュニケーションシステム

エージェントの交叉関数 c は式 (3) で定義される。

$$c(a_j(b_j, st_j), a_k(b_k, st_k)) = a_i(mb(cb(b_j, b_k)), ms(cs(st_j, st_k))) \quad (3)$$

ここで、 cb および cs はそれぞれ環境順応値および行動戦略の交叉関数である。また、 mb および ms はそれぞれ環境順応値および行動戦略の突然変異関数である。

2.3 エージェントの知覚と行動

エージェントは自己のエネルギーと外部情報を知覚する。外部からの情報には、視界内の情報と気温 $tmpr$ がある。エージェントはそれらの情報をもとに行動を決定する。行動の決定には戦略を持つ。エージェントは有限個の行動集合 ACT から 1 つの行動 act_i を決定する。行動戦略 st_i は時刻 t におけるエージェントのエネルギー値 $en_i(t)$ と外部情報 $ex_i(t)$ から行動 act_i^t を決定する関数であり、式 (4) とする。

$$act_i^t = st_i(en_i(t), ex_i(t)) \quad (4)$$

2.4 エージェントの内部状態

エージェントは act_i^t を行動し、その行動に伴いエネルギー値 $en_i(t)$ を更新する。すなわち、環境順応値 b_i を持つエージェントが行動 act_i^t を行ったときのエネルギー変化量を $d_{act_i^t}(b_i)$ 、初期エネルギー値を C_0 としたとき、エージェント a_i のエネルギー値 en_i を、

$$\begin{cases} en_i(t+1) = en_i(t) + d_{act_i^t}(b_i) \\ en_i(0) = C_0 \end{cases} \quad (5)$$

とする。また、生存しているエージェント a_i はエネルギー値が式 (6) を満たすときを空腹状態、式 (7) を満たすときを満腹状態とする。エージェントはこれらの条件のもとで、後述する表 2 に示す行動を遺伝的に獲得する。

$$en_i(t) < C_1 \quad (6)$$

$$en_i(t) > C_2 \quad (7)$$

2.5 エージェントの死滅

エージェント a_i の生存可能時間、生存可能内部エネルギー値、生存可能気温をそれぞれ T_0, C_3, D とすると、以下のいずれかの条件を満たすときエージェント a_i は死滅する。

$$t \geq T_0 \quad (8)$$

$$en_i(t) \leq C_3 \quad (9)$$

$$tmpr > D \quad (10)$$

3. 生態進化と分化

3.1 生態進化メカニズム

エージェント a_i のエネルギー値 $en_i(t)$ は、式(5)よりエージェントの持つ環境順応値と実行した各行動によって変動する。また、エージェントの生死はエネルギー値により決定されるため(式(9)), エネルギーをより多く蓄積する環境順応値 b と行動戦略 st の組み合わせを持つエージェントの生き残る確率が高い。よって、環境に適した遺伝子を持つ個体は多く生き残り、交叉により子孫を残すことができる。すなわち、世代交代を重ねることで自然淘汰によって進化が起こる。

3.2 生態分化メカニズム

エージェント a_i の 1 世代におけるエネルギー蓄積量 gr_i を、環境適応値 b_i と行動戦略 st_i から蓄積エネルギー関数 f より、

$$gr_i = f(b_i, st_i) \quad (11)$$

と定義する。図 1 は、2 つのある行動戦略 st_l, st_m を持つエージェントの環境適応値 b_i による 1 世代のエネルギー蓄積量 gr_i を示した例である。行動戦略 st_l, st_m において、

$$f(st_l, b) = f(st_m, b) \quad (12)$$

$$\frac{\partial f(st_l, b)}{\partial b} \cdot \frac{\partial f(st_m, b)}{\partial b} < 0 \quad (13)$$

を満たす環境順応値を $b = b_0$ とすると、以下の式が成り立つ。

$$f(st_l, b_i) > f(st_m, b_i) \quad ; if \ b_i < b_0 \quad (14)$$

$$f(st_l, b_i) < f(st_m, b_i) \quad ; if \ b_i > b_0 \quad (15)$$

すなわち、自然淘汰により環境順応値が $b_i < b_0$ であるエージェントは行動戦略 st_l を、 $b_i > b_0$ であるエージェントは行動戦略 st_m を採るように生態が分化する。環境順応値 b_0 を境として生態が分化することより b_0 を生態分岐点と呼ぶ。さらに世代交代を重ね、 gr_i が大きくなるように自然淘汰が働くことで、エージェントの持つ環境順応値 b_i が b_0 から両極に離れていくように進化する。

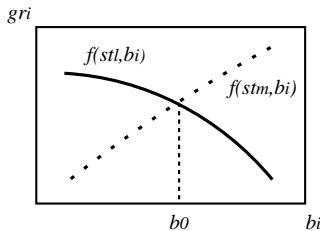


図 1: 環境適応値と行動戦略によるエネルギー蓄積量の概念図

4. 実験モデル

4.1 環境

エージェントは複数のエリアで構成される空間で存在するものとする。単位時間を 1 ステップとし、エージェントは 1 ステップ毎に行動を行う。一定のステップを 1 年として気温

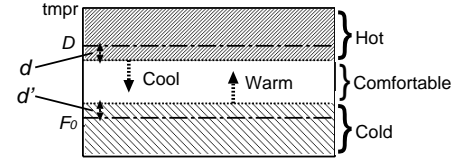


図 2: 気温の知覚

$tmpr$ を周期的に変動させ、各エリアには気温差を設けた。エリア内にはエージェントの食糧となる植物が存在する。植物は気温 $tmpr$ に基づき成育し、成育可能下限気温を F_0 、成育可能上限気温を F_1 とすると、以下の条件を満たす環境で植物は成育する。

$$F_0 \leq tmpr \leq F_1 \quad (16)$$

エージェントには図 2 に示すように気温 $tmpr$ が式(17)を満たすときを”暑い”, 式(18)を満たすときを”寒い”と知覚する。

$$tmpr \geq D - d \quad (17)$$

$$tmpr \leq F_0 + d' \quad (18)$$

また、これらの式を満たさないときを心地よいと感じる適温とする。エージェントは、暑い状態から適温に変化することを”涼しくなる”, 寒い状態から適温に変化することを”温かくなる”と知覚する。

本稿では、複数のエリアが地球の異半球上にある環境と同一半球上にある環境、さらに大域的環境変動を想定しそれぞれ実験を行う。

4.2 行動戦略

エージェント a_i が知覚する情報を表 1 に示す。エージェント a_i はその知覚情報に基づいて表 2 に示す行動から 1 つを決定し実行する。行動の決定には行動戦略モデルを用いる。行動戦略モデルには多出力二分決定グラフ(以下、 n -BDD)[2], クラシファイアシステム[7], 有限状態オートマトン[8]などがある。この中で、 n -BDD は Akers[9] によって考案された二分決定グラフを多出力に拡張したものであり、論理変数節点を終端節点にたどり着くまで評価し、終端節点により n 値の出力を表現するダイアグラムである。 n -BDD は二分ダイアグラム構造により複雑な行動戦略も容易に表現可能であり、また、遺伝操作との親和性に優れていることから、疑似生態系シミュレーションにおいてその有効性が確認されている[1]。ゆえに、本稿ではエージェント a_i の行動 act_i^t は、

$$act_i^t \leftarrow bdd_i(en_i(t), ex_i(t)) \quad (19)$$

と定義する。これは時刻 t における a_i の行動を bdd_i によって決定することを表す。図 3 に n -BDD を用いて表現した行動戦略の例を示す。

4.3 エネルギー変化量

エージェントは行動することによって、エネルギーを増減させる。ここでは、エージェント a_i が前述の表 2 に示す行動を行ったときの、各エネルギー変化量 $d_{act_i^t}(b_i)$ を以下の式とした。

$$\begin{cases} d_{N_i^t}(b_i) = -|E_0 - |E_1| \cdot b_i| & ; if \ Cold \\ d_{N_i^t}(b_i) = -|E_2| & ; else \end{cases} \quad (20)$$

表 1: エージェント a_i の知覚情報

X_1	満腹である
X_2	空腹である
X_3	食糧が a_i の視界にある
X_4	食糧が a_i の位置にある
X_5	他エージェント a_j が a_i の視界にいる
X_6	他エージェント a_j が a_i の位置にいる
X_7	暑い
X_8	寒い

表 2: エージェント a_i の行動

N	何もしない
E_1	食糧に近づく
E_2	食糧を食べる
C_1	他エージェントに近づく
C_2	他エージェントと交叉する
M_1	温くなるエリアに渡る
M_2	涼しくなるエリアに渡る

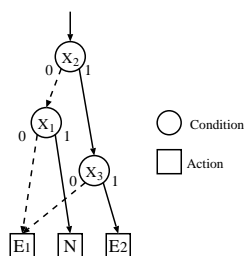


図 3: n -BDD の例

$$d_{E_1^t}(b_i) = d_{C_1^t}(b_i) = -|E_3| \quad (21)$$

$$d_{E_2^t}(b_i) = |E_4| \quad (22)$$

$$d_{C_2^t}(b_i) = -|E_5| \quad (23)$$

$$d_{M_1^t}(b_i) = d_{M_2^t}(b_i) = -|E_6 + |E_7| \cdot b_i| \quad (24)$$

これらの式より、エージェントは行動 E_2 を行ったときのみエネルギーが増加する。また、環境順応値を、 $b_m \leq b_i \leq b_n$ とすると、行動 N を行ったときの環境順応値 b_i が b_n に近いほどエネルギー消費が小さく、行動 M_1 および M_2 を行ったときの環境順応値 b_i が b_m に近いほどエネルギー消費が小さくたと仮定した(式(20)(24))。

4.4 生殖隔離

生殖隔離は生態分化の重要な要因の一つであると言われている。ここでは、特徴の異なるエージェント間の交叉を制限する生態的隔離を行い、これにより生態分化が促進されることを期待する。生殖隔離により、エージェント a_i と a_j は式(25)の条件を満たすときに限り交叉できるものとする。

$$gd(a_i(b_i, st_i), a_j(b_j, st_j)) < K \quad (25)$$

ここで、 gd はエージェント間の遺伝子距離関数であり、 K は隔離定数である。

5. 異半球上の環境での実験

5.1 環境

異半球上にあるエリア ($P_1 \dots P_n$) (ここでは $n = 4$ とする) におけるシミュレーション実験を行う。各エリアは直線上に位

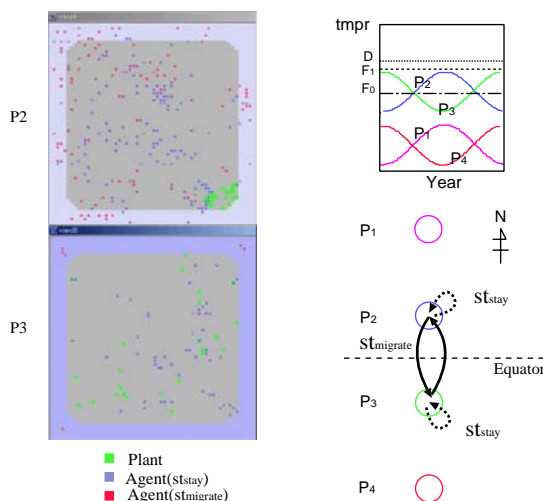


図 4: 異半球上の実験のスナップショット (左) と結果 (右)

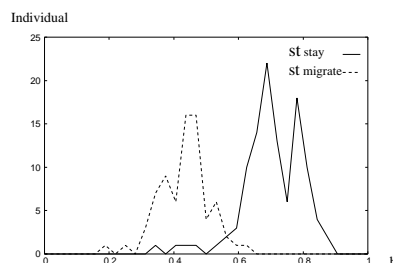


図 5: 安定期における環境適応値の分布

置し、 P_2 と P_3 の間に赤道を存在させたため、図 4 (右上) のように気温が交互に周期的に変化する環境を想定した。

5.2 実験結果

図 4 (左) に実験のスナップショットを示す。実験の結果、安定期において多く見られたエージェントの行動の様子を図 4 (右下) に示す。主に 2 つの行動戦略 st_{stay} , $st_{migrate}$ を持つエージェントが多く見られた。このとき、行動戦略 st_{stay} を採るエージェントは同一エリアに常に留まり、植物が存在する期間はエリア内のみ移動により植物を食べてエネルギーを蓄積し、存在しない期間は動かずエネルギー消費を抑える。また、行動戦略 $st_{migrate}$ を採るエージェントは植物の存在するエリア間を、エネルギー消費してでも常に求めて渡り行動をして植物を食べることによりエネルギーを蓄積する。

5.3 生態分岐点

図 5 に、安定期における 2 つの行動戦略 st_{stay} , $st_{migrate}$ を持つエージェントの環境適応値 b_i の分布を示す。環境順応値 b_i ($0 \leq b_i \leq 1$) によって、実線で示す行動戦略 st_{stay} と破線で示す行動戦略 $st_{migrate}$ の 2 つの行動戦略を持つ生態に分化したことが分かる。図 5 に示す結果の場合、3.2 節で述べた生態分岐点は $b_0 = 0.6$ 付近であると考えられる。

6. 同一半球上の環境での実験

6.1 環境

大域的環境変動を有する同一半球上にあるエリア ($P_1 \dots P_n$) (ここでは $n = 4$ とする) におけるシミュレーション実験を行う。各エリアは直線上に位置し P_1 から P_4 へは気流を存在さ

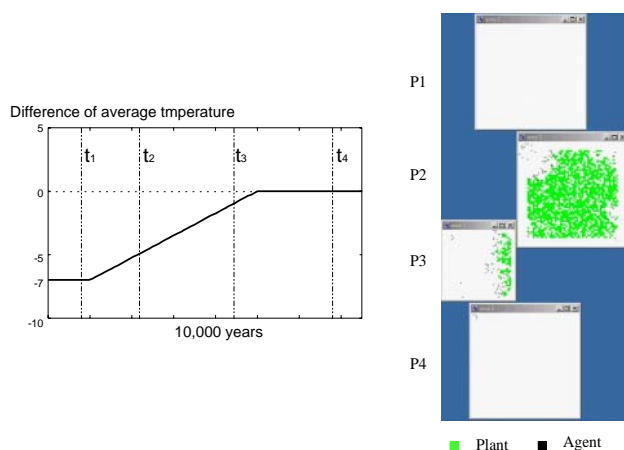


図 6: 大域的環境変動による平均気温差 (左) と時期 t_4 のスナップショット (右)

せた。よって、エージェントは P_4 方向へは気流に乗って短い期間で渡ることができる。

さらに、この環境において氷河期を想定した大域的環境変動を導入する。現在の時期 t_4 の平均気温を 0 として年数により図 6 (左) で示した気温差を有する [10]。4 つの時期 ($t_1 \dots t_4$) における各島の年間の気温変化は図 7 (上) に示す通りである。

6.2 実験結果

時期 ($t_1 \dots t_4$) において発現した生態を図 7 に、時期 t_4 における実験のスナップショットを図 6 (右) に示す。時期 t_1 でのエージェントは、常に生存可能である P_4 で生息し、冬の間は動かない戦略 st_{stay} を採ることでエネルギー消費を抑えている。時期 t_2 では、大域的環境変動による温暖化で P_4 が暑くなるため涼しくなるエリア P_3 へ渡る戦略 $st_{migrate}$ が発現している。その後、 P_3 が寒くなったときには P_3 では冬が越せない環境のため P_4 へ再び渡る。さらに温暖化が進んだ時期 t_3 においては、さらに涼しいエリアである P_2 に渡り、 P_2 が寒くなると、気流に乗って P_4 へ渡る戦略が発現している。現在の時期 t_4 においては、気流に乗って P_4 に一旦渡るが暑さのためすぐに涼しくなるエリア P_3 に渡る戦略が発現した。このとき、 P_1 方向には数世代かけて渡り、 P_4 方向には 1 世代で渡っている。また、 P_4 には食糧がないにもかかわらず越冬するためだけに渡っている。これらの行動パターンがオオカバマダラの生態に類似している結果となった。

7. おわりに

1. 疑似生命体が環境に順応して生態が進化・分化するモデルを提案した。生命体が行動戦略として採るべき最も重要な判断事項は食糧および適温帯を求めることであり、それらの存在する環境に順応して行動し世代交代を通して生態を進化・分化させることが確認できた。
2. すでに [4][5] が示した、2 つの地域の食糧存在が期間的な周期を持ち交互になる場合に発現する「渡り」が、大域的環境変動によりさらに広域的渡りを発現させることを示した。
3. 北米大陸を渡るオオカバマダラの生態の進化とその進化を生んだ環境条件のいくつかについて整理・検討を行った。

今後の課題として、生存寿命、出生率、食糧量、温度変化、大気移動、蓄積・消費エネルギー、などの条件をきめ細かに設定

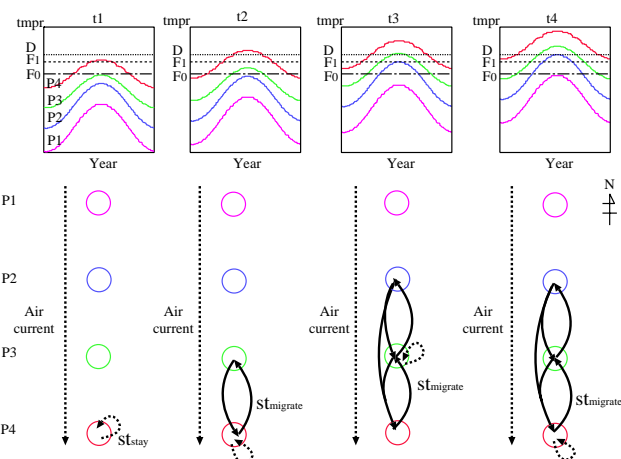


図 7: 同一半球上の実験結果

して実験を実施する必要がある。また、まだ発見されていない現実界における生命体の生態進化の存在を示唆することなどである。

参考文献

- [1] 森脇康介, 横井大祐, 犬塚信博, 伊藤英則: “遺伝的プログラミング技法を用いた多出力二分決定グラフの進化 - 食物連鎖におけるマルチエージェントの進化シミュレーション”, 人工知能学会誌, Vol.14, No3, pp.477-484, 1999
- [2] K. Moriwaki, N. Inuzuka, M. Yamada, H. Seki and H. Itoh: Self adaptation of Agent's Behavior using GA with n -BDD, 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp.96-101, 1996
- [3] 武藤敦子, 犬塚信博, 伊藤英則: “多出力二分決定グラフの APPLY 交叉を用いた食物連鎖モデル”, 電気学会論文誌 C, Vol.121, No.2, pp.423-429, 2001
- [4] 高見敦司, 田村謙次, 武藤敦子, 中村剛士, 伊藤英則: “季節変化を伴う食物連鎖シミュレーションにおける生存戦略の発現”, 第 62 回 情報処理学会全国大会, 2001
- [5] Takamasa Sawada, Atsuko Mutoh, Shohei Kato and Hide-nori Itoh: A Model of Biological Differentiation in Adaptogenesis to the Environment, Proceedings of the Eighth International Conference on Artificial Life, pp.93-96, 2002
- [6] The University of Kansas Entomology Program: “Monarch Watch”, <http://www.monarchwatch.org>
- [7] Holland, J. H.: Escaping brittleness: The possibilities of general-purpose learning algorithms applied to parallel rule-based systems. In R.S. Michalski, J. G. Carbonell & T. M. Mitchell(Eds.), Machine learning: An artificial intelligence approach (Vol.2), Los Altos, CA: Morgan Kaufmann, 1986
- [8] L. J. Fogel, A. J. Owens and M. J. Walsh.: Artificial Intelligence Through Simulated Evolution, John Wiley & Sons, 1967
- [9] S. B. Akers: Binary Decision Diagrams, IEEE Trans. Comput., pp. 509-516, 1978
- [10] Budyko, M.I., 内嶋善兵衛, 岩切 敏 訳: 気候と生命 (上・下), 東京大学出版会, 1973