

# 凸凹した適応度地形において繰り返し生じる Baldwin 効果

## Repeated Occurrences of the Baldwin Effect on Rugged Fitness Landscapes

鈴木麗壘 有田隆也  
Reiji Suzuki Takaya Arita

名古屋大学 大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science, Nagoya University

The Baldwin effect is a possible scenario of interactions between evolution and learning. It is still controversial how learning can affect evolution on rugged fitness landscapes because previous studies merely focused on a process in which the population reaches a local optimum through a single occurrence of this effect. Our purpose is to clarify whether and how learning can facilitate the adaptive evolution on rugged fitness landscapes in view of the repeated occurrences of the Baldwin effect. We constructed a simple fitness function that represents a multi-modal fitness landscape in which there is a correlation between the adaptivity of the individual and the effect of the epistatic interactions among its traits. The evolutionary experiments of phenotypic plasticity clearly showed that the Baldwin effect repeatedly occurred through the evolutionary process of the population on this landscape, and facilitated its adaptive evolution as a whole.

### 1. はじめに

生物には、集団レベルにおいて働く進化と、個体レベルにおいて働く学習の2つの適応メカニズムが存在する。両者がどのようにして相互に影響し合ってきたかは100年以上前に端を発する生物学的に重要な問題である。特に、Lamarck的な獲得形質の遺伝を仮定しない自然選択の枠組みにおいて、学習(表現型可塑性)によって獲得していた形質が次第に先天的な形質へと進化していく過程である Baldwin 効果 [Baldwin 96] について議論されてきた [Weber 03]。一般に、この効果は学習によるメリットが選択圧として働き、適応的な形質を学習可能な個体が集団中に広まる第1段階と、学習にかかるコストが選択圧として働き、学習によって獲得していた形質をより生得的に獲得している個体が広まる第2段階(遺伝的同一とも呼ばれる [Waddington 53])とで構成される [Turney 96]。

学習が進化に与える影響を適応度地形の概念を用いて説明することができる。適応度地形とは、平面を可能な遺伝子型もしくは表現型の作る空間、高さを各遺伝子型・表現型に対応する適応度としてつくられる地形である。生物集団はその遺伝子型・表現型構成を代表する点もしくは領域で表され、適応進化の過程は地形上の傾斜が高い方向への山登りで表すことができる。図1は遺伝子型・表現型空間を直線で表した場合の地形の例である。

個体の生涯の学習は、地形上の近傍を局所探索することに相当し、図1のようなとがった適応度地形をなだらかにする効果があるといえる。その結果、遺伝子レベルの進化は次に示される2つの異なる影響を受けることが指摘されている。たとえば、図1(a)のように地形のピークから離れた平らな位置に集団が存在する場合、学習の結果地形に傾斜ができ、ピークに向かう進化が促進される。このような学習によって進化が促進される効果は、Hintonらによる遺伝的アルゴリズムに基づく表現型可塑性の進化実験によって初めて明確に示された [Hinton 87]。一方、図1(b)のようにピークにとても近い位置に存在する場合、学習はむしろ地形の傾斜を緩やかにしてしまい、ピークに向かう進化は抑制される [Mayley 97]。従って、

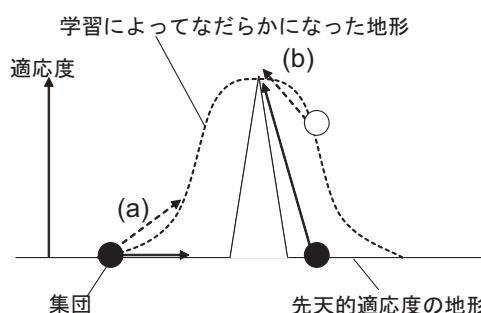


図1: 凸凹した適応度地形における学習の影響

学習が遺伝子レベルの進化を促進するか抑制するかは地形の形とその上の集団の位置に依存すると言える。

適応度地形の形が凸凹しているかなだらかであるかを決める要因として遺伝子間の相互作用であるエピスタシスがあり、これが Baldwin 効果に与える影響について議論がなされている。たとえば、遺伝子型と表現型の両空間における近傍の相関が高いほど [Mayley 96]、もしくは、学習に関するタスクが容易であるほど [Watson 02]、Baldwin 効果の第2段階が発生しやすいことが指摘されている。また、我々は、複数の形質を学習によって変化させる過程において形質間の相互作用が存在する場合、Baldwin 効果は単純な2つの段階ではなく3つの段階からなることを、NK 適応度地形上において量的形質の可塑性が進化する人工生命モデルによって示している [Suzuki 07a]。2つめの段階は、第1段階で獲得された余分な可塑性を取り除くことで、近傍の地形をより指向的に探索する学習メカニズムが進化する過程に相当する。

Baldwin 効果に注目した従来研究では、集団が適応度地形上におけるある一つの山の頂点に遺伝的に到達する過程における学習の役割についてのみ議論していた。しかし、実際の生物進化において、もしくは、進化的計算手法によって複雑な問題の解を探索する場合においては、一般には地形は凸凹していると考えられ、一回きりの Baldwin 効果の結果たどり着いた山が最適である保証はなく、局所最適に陥っている場合がある。そのような場合、Baldwin 効果が繰り返し生じることで、ある山からより高い山へ集団が移動を繰り返しながらよ

連絡先: 鈴木麗壘, 名古屋大学 大学院情報科学研究科, 〒464-8601 名古屋市千種区不老町, Tel/Fax +81-52-789-4258, e-mail: reiji@nagoya-u.jp

$g_i$	1	3	3	2	4	3	4	4	5	8
$p_i$	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0
$t_i$	1	4	4	2	4	2	4	4	6	8

最も適応的な形質群の獲得に貢献した形質の変化  
 可塑的な形質  
 最も適応的な形質群  $num(4)=5>4$ : fitness=4

図 2: 遺伝子表記と形質 ( $M=10$ ).

り適応的で複雑な形質を獲得していくシナリオを描くことができる。しかし、そのようなシナリオが実際に生じうるかどうか、また、生じるとすれば各 Baldwin 効果がどのように働くかについてはほとんど議論されていない。また、進化と学習の相互作用の工学的応用を考える上でも、凸凹した適応度地形上で Baldwin 効果によってどれほど解の質の向上が見られるかは重要であると言える。

以上をふまえ、本研究は、凸凹した適応度地形における進化の過程で Baldwin 効果は繰り返して生じうるか、また、その結果、集団の進化はいかに促進されるかについて知見を得ることを目的とする [Suzuki 07b]。そのために、単純な多峰性の適応度地形を新たに定義し、表現型可塑性の進化を導入した遺伝的アルゴリズムによる進化モデルを構築し、実験を行った。

## 2. モデル

### 2.1 遺伝子と適応度地形

$N$  個体からなる集団における各個体には、図 2 に示すように  $M$  個の形質  $t_i$  ( $i = 0, \dots, M-1$ ) があり、それぞれ 1 から  $M$  までの整数値を取り得る。また、各形質に対応する  $M$  個の遺伝子  $g_i$  ( $i = 0, \dots, M-1$ ) を持ち、各形質の初期値をあらわすものとする。さらに、各形質が可塑的であるかどうかを決める遺伝子  $p_i$  ( $i = 0, \dots, M-1$ ) を持ち、可塑的な場合は 1、可塑でない場合は 0 をとるものとする。対応する  $p_i$  が 1 である形質のみ、後述する学習過程においてその値が変化しうる。

本モデルでは、次に挙げる適応度関数を用いて多峰性の適応度地形を表現し、各個体の持つ形質の適応度を評価する。個体の適応度を次のように定める。

$$fitness = \arg \max(f(n)), \quad (1)$$

$$f(n) = \begin{cases} n & \text{if } num(n) \geq n, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $num(n)$  は全形質中においてその値が  $n$  である形質の数とする。この適応度関数は次のような状況を表している。各形質は同一の形質値を持つ形質ごとに形質群をつくる。各形質群はそのサイズがその形質値以上の場合のみ、形質値と同じ値の適応度が生じる。個体の適応度はそれらのうちの最大値となる。

この関数には 1) 適応度が高い形質群ほど形質間の相互作用が必要のため獲得されにくい、2) 適応度がある値 ( $N/2$ ) を超えると、より適応的な形質群を獲得する過程において、一端、現在適応的な形質群を捨てる必要があるという特徴を持っている。2) は、持ちうる形質数 ( $M$ ) が限られているため、高い適応度を持つサイズの大きい形質群を同時に 2 つ持つことができなくなること起因する。以上の特徴から、適応度地

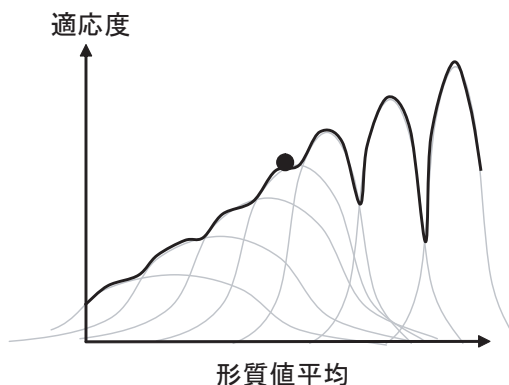


図 3: 関数がつくる適応度地形のイメージ

形を大まかに図 3 のように描くことができる。横軸は個体を持つ形質値の平均値である。形質値が増えるほど、1) により地形は高く鋭くなり、一定値を超えると 2) により谷ができる。この意味で、この適応度関数は多峰性の凸凹した地形に相当する。

### 2.2 学習

本モデルでは、各個体は生涯のうちに  $L$  ステップの間学習を行う。学習を開始する前に、個体の遺伝子によって定められる形質の初期値を用いて計算した適応度を計測し、先天的適応度と定義する。次に、各ステップ  $l$  において、個体の各形質の値を次のように決定する。

$$t_i = \begin{cases} g_i + rand() & \text{if } p_i = 1, \\ g_i & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $rand()$  は -1, 0, 1 のうちランダムに選んだ値を返す関数である。また、式 3 の結果  $t_i$  がその定義域の上限または下限を超えた場合は、再度式 3 を用いて値を決定しなおすものとする。以上の形質を用いて適応度を計算し、先天的適応度を含むこれまでの  $l+1$  回の適応度評価で得られた値の最大値を、そのステップにおいて得られる適応度とする。 $L$  ステップの学習の後、先天的適応度を含めた  $L+1$  個の適応度の平均を、各個体の生涯適応度とする。

### 2.3 進化

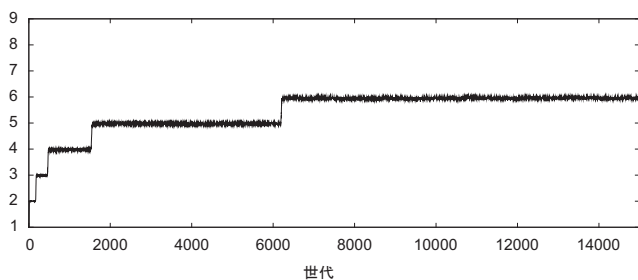
以上の学習を各個体が行った後、遺伝的アルゴリズムで集団を進化させる。各個体について、前節で示した学習過程を用いて生涯適応度を求める。次に、各生涯適応度に比例した確率で個体を  $N$  個体選択し、それを次世代の集団とする。その際、各個体の各遺伝子について、一定の確率 ( $g_i$  については  $p_{mg}$ 、 $p_i$  については  $p_{mp}$ ) で突然変異が生じるものとする。突然変異は、 $g_i$  については現在の値にランダムに選択した +1 または -1 を加え (定義域を超えた場合には再度加える値を選択し直す)、 $p_i$  については現在の値を反転させるものとする。

## 3. 実験結果

以上のモデルを用いて 15000 世代に渡って実験を行った。今回はパラメータ設定として、 $N=400$ 、 $M=12$ 、 $p_{mg}=0.002$ 、 $p_{mp}=0.005$  を用いた。また、初期集団として、すべての  $g_i$  が 1、 $p_i$  についてはランダムな値からなる個体群を用いた。

### 3.1 学習なしの場合

図 4 は、学習なし ( $L=0$ ) の条件での典型的な試行における先天的適応度平均の推移を示したものである。この条件では、

図 4:  $L=0$  の条件における先天的適応度の推移

先天的適応度は世代を通して緩やかに増加し、最終的に 6.0 程度の中程度の値に収束する結果となった。

### 3.2 学習ありの場合

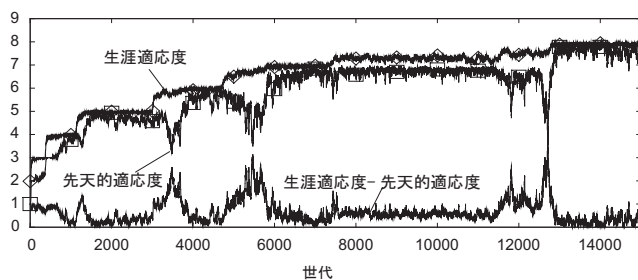
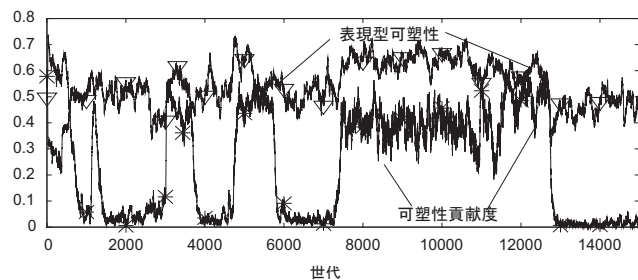
一方、学習あり ( $L=100$ ) の条件では、進化と学習の相互作用による複雑な進化の過程が生じた。図 5, 6 はこの条件での典型的な試行における各適応度と可塑性に関する指標の平均値の推移である。表現型可塑性は、全形質における可塑性な形質の割合である。可塑性貢献度は、学習期間中最も適応的な形質群を獲得した際の、適応的形質群に含まれる変化した形質の数を全可塑性の形質の数で割ったものである。この指標は、学習による形質の変化が適応的な形質群を獲得するのに実際どの程度貢献しているかを示している。

図 5 から、生涯適応度のみが一端増加した後に、先天的適応度が生涯適応度に追いつく過程が何回か繰り返されていることがわかる。両者の差の一度の増減が一回の Baldwin 効果の発生に対応しており、集団は Baldwin 効果が繰り返し生じた結果、8.0 付近の高い適応度に達したと言える。

各 Baldwin 効果の発生を約 4300 世代から 6000 世代までの過程を例に説明する。約 4300 世代のような Baldwin 効果が発生する少し前の世代では、2 つの適応度はほぼ同一 (約 6.0) であり、学習は適応度増加に貢献していない状態であった。その後、生涯適応度のみが緩やかに増加を開始して 7.0 程度まで至り、先天的適応度はわずかに減少した。同時に、表現型可塑性は 0.5 以上の値に増加し、可塑性貢献度は 0.5 付近まで急増した。これは、集団は学習に依存してより高い適応度を獲得していることを示しており、Baldwin 効果の第 1 段階にあると言える。その後、約 5500 世代付近から先天的適応度が増加に転じ、生涯適応度とほぼ同じ値 (約 7.0) にまで達した。同時に、表現型可塑性は 0.5 付近に戻り表現型貢献度もほぼ 0 付近まで減少した。これらは、第 1 段階において獲得していた形質値 7 からなる形質群が先天的に獲得されたことを示しており、Baldwin 効果の第 2 段階であると言える。

ここで注目すべき点は、第 2 段階によって獲得された形質は、約 7300 世代から生じている次の Baldwin 効果の第 1 段階において、より形質値 8 からなるより適応的な形質群を学習する土台になっていることである。本モデルでは学習によって各形質値は 1 ずつしか増減しないため、学習によってより高い適応度を獲得するには、その前の Baldwin 効果における遺伝的同化が不可欠であったと言える。以上の過程が繰り返し生じた結果、集団は学習なしの場合と比べてより高い適応度を獲得したと言える。

また、各 Baldwin 効果の発生の過程は基本的には上と同様であったが、適応度の増加によるエピスタシスの影響の増加の結果、世代が進むにつれて、1) Baldwin 効果が生じる間隔が長くなる、2) 第 1 段階における先天的適応度の減少が

図 5:  $L=100$  の条件における適応度の推移図 6:  $L=100$  の条件における可塑性に関する指標の推移

顕著になる、3) 第 1 段階で増加した過剰な可塑性が取り除かれて可塑性貢献度が増加する中間的な段階を含む、3 段階の Baldwin 効果が生じる傾向が増えるなどの違いが生じた。

### 3.3 学習の役割に関する定量的解析

前節から、凸凹した適応度地形において Baldwin 効果が連続して生じた結果、集団は最終的により高い適応度を獲得できたことが明らかになった。しかし、各 Baldwin 効果の発生が、実際に進化を促進したのか、もしくは抑制したのかはより詳細な検討が必要であると言える。そこで、最後に学習ありの場合となしの場合において、先天的適応度が増加する速度に注目して、各 Baldwin 効果の発生がどのような影響をもたらしたのかを明確にする。具体的には、それぞれの場合において、先天的適応度がいくつかの値に到達するまでに要した世代数を計測した。

図 7 はそれぞれの場合について 15 試行<sup>\*1</sup>ずつ実験を行った際に要した世代数平均の比較である。横軸は先天的適応度が到達した値、縦軸は要した世代数を表している。同図から、先天的適応度が 3 より小さい場合には、学習ありの場合の方がわずかに長い世代数を要していることがわかる。これは、前述の形質群の適応性とエピスタシスの影響の強さとの相関により、適応度が低い場合には容易に形質を獲得できてしまうために進化のみで形質が即座に獲得可能であり、学習によって適応度地形の傾きが緩やかになる効果のみが大きく影響した結果であると言える。

一方、先天的適応度が 3 より大きい場合には関係が逆転した。先天的適応度が増加するにつれ、次第に学習なしの方が多くの世代数を要するようになり、適応度が 6 付近に到達するのに要した世代数では、学習なし場合の約 3500 世代に比べ、その 3 倍程度の約 11000 世代がかかった。これは、獲得されるべき形質群がエピスタシスによって進化のみでは獲得されにくく

\*1 実際には、学習あり・なしの場合それぞれで 20 試行ずつ実験を行い、前者の場合において 7.95 に達しなかった試行と後者において 5.95 までに達しなかった例外的な数試行をのぞいてランダムに選択した 15 試行ずつを用いた。

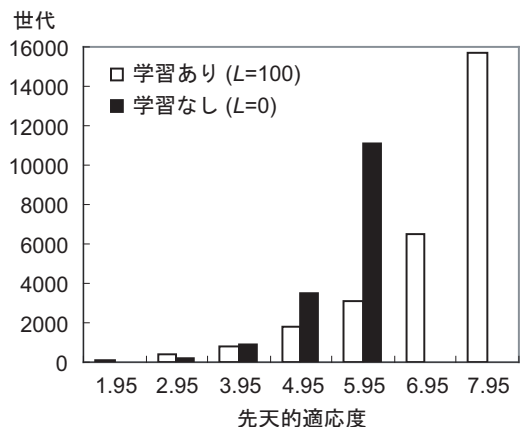


図 7: 先天的適応度の増加速度の比較

なるに従って、Baldwin 効果の第 1 段階において一端学習で適応的な形質を獲得する過程が、その後の遺伝的な獲得を促進した結果であると言える。さらに、学習なしの場合ではそれ以上の適応度を得られなかったのに対し、学習ありの場合でのみ約 8.0 の適応度に達することができた。これは学習があって初めて先天的適応度の深い谷を越えられたことを示していると言える。

以上のように、Baldwin 効果が生じた結果進化を促進するか抑制するかは、エピスタシスの影響の強さといった集団が置かれる状況に強く依存することが明らかになった。

#### 4. おわりに

Baldwin 効果に代表される進化と学習の相互作用に関して、様々な議論がなされてきた。しかし、従来の研究では、一回きりの Baldwin 効果が生じる過程のみが注目されてきた。本研究では、形質の適応性とエピスタシスの影響に相関が存在する多峰性の適応度地形を用い、表現型可塑性の進化に関する計算機実験を行った。その結果、Baldwin 効果が繰り返し生じ、集団は進化のみの場合と比較してより高い適応度を獲得することができた。

本研究から示唆される重要な知見の一つは、ある Baldwin 効果の発生によって生じる結果が、次の Baldwin 効果の発生の土台となりうることを示されたことである。学習を伴う高度な適応行動の多くは、多数の形質間の相互作用の上に成り立っている。たとえば、言語などのコミュニケーション能力はその代表例であり、これらが進化と学習の相互作用によってどのように獲得されてきたかについては様々な議論がなされている [Watanabe (in press)]。本研究は、そのような複雑な形質群が Baldwin 効果の枠組みで獲得されうる場合、それはただ一回きりの Baldwin 効果の発生によって一度にもたらされるのではなく、Baldwin 効果が繰り返し生じた結果である可能性があることを示している。

今後は、異なる種類の多峰性の地形を用いた解析、および、工学的応用に向けた進化と学習の相互作用の定式化などが課題である。

#### 参考文献

- [Baldwin 96] Baldwin, J. M.: A new factor in evolution, *American Naturalist*, Vol. 30, pp. 441–451 (1896).
- [Hinton 87] Hinton, G. E. and Nowlan, S. J.: How learning can guide evolution, *Complex Systems*, Vol. 1, pp. 495–502 (1987).
- [Mayley 96] Mayley, G.: Landscapes, learning costs and genetic assimilation, *Evolutionary Computation*, Vol. 4, No. 3, pp. 213–234 (1996).
- [Mayley 97] Mayley, G.: Guiding or hiding: explorations into the effects of learning on the rate of evolution, *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life*, pp. 135–144 (1997).
- [Suzuki 07a] Suzuki, R. and Arita, T.: The dynamic changes in roles of learning through the Baldwin effect, *Artificial Life*, Vol. 13, No. 1, pp. 31–43 (2007).
- [Suzuki 07b] Suzuki, R. and Arita, T.: Repeated occurrences of the Baldwin effect can guide evolution on rugged fitness landscapes, *Proceedings of the First IEEE Symposium on Artificial Life (CI-ALife'07)*, pp. 8–14 (2007).
- [Turney 96] Turney, P., Whitley, D. and Anderson, R. W.: Evolution, learning, and instinct: 100 years of the Baldwin effect, *Evolutionary Computation*, Vol. 4, No. 3, pp. 4–8 (1996).
- [Waddington 53] Waddington, C. H.: Genetic assimilation of an acquired character, *Evolution*, Vol. 7, pp. 118–126 (1953).
- [Watanabe (in press)] Watanabe, Y., Suzuki, R. and Arita, T.: Language evolution and the Baldwin effect, *Artificial Life and Robotics* (in press).
- [Watson 02] Watson, J. R., Geard, N. and Wiles, J.: Stability and task complexity: a neural network model of evolution and learning, *Proceedings of the Eighth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems*, pp. 153–156 (2002).
- [Weber 03] Weber, B. H. and Depew, D. J. (eds.): *Evolution and Learning - The Baldwin Effect Reconsidered* -, MIT Press (2003).