

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19700137
 研究課題名（和文） 適応度地形の特性に注目した進化と学習の相互作用の解析とその工学的応用
 研究課題名（英文） An analysis on interactions between evolution and learning based on properties of fitness landscapes and its applications
 研究代表者
 鈴木 麗瑩 (Reiji Suzuki)
 名古屋大学・大学院情報科学研究科・助教
 研究者番号：20362296

研究成果の概要：

本研究は、集団レベルで働く進化と個体レベルで働く学習という2つの適応メカニズム間の相互作用に関し、遺伝子・表現型空間の各点に対応する適応度の山として描かれる適応度地形の特性に注目してそのダイナミクスを明らかにすることを目的とし、人工生命モデルに基づく解析と工学的応用への検討を行った。その結果、凸凹した複雑な適応度地形や、コミュニケーション能力や言語能力の進化、ニッチ構築形質の進化など、個体間の相互作用に依存する動的環境において、学習が進化に大きな影響を果たしうることを示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：人工生命

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：進化と学習，進化とニッチ構築，遺伝的アルゴリズム，人工生命

1. 研究開始当初の背景

適応，すなわち，環境条件に合わせて個体や集団が変化する仕組みは，生命の本質的な特性の一つである。生物には，個体レベルにおいて環境との相互作用を通して自らの形質を適応的に変化させる学習（表現型の可塑性）と，集団レベルにおいて自然淘汰によって環境に適した個体が生き残る進化という2

つの異なるレベルで生じる適応プロセスがある。これらがどのように影響しあっているかは100年以上前に端を発する生物学的に重要な問題であり，特に，ラマルク的な獲得形質の遺伝の仕組みが無くても，学習により後天的に獲得されていた形質が次第に生得的な形質へと進化していく過程である Baldwin 効果は，Hinton と Nowlan による先駆的な計

算機実験 (Hinton and Nowlan 1987) によって存在が明確化されて以来、構成論的手法に基づく解析が盛んに行われている。同時に、強化学習や遺伝的アルゴリズムなどに代表される、生物の適応メカニズムの工学への応用が盛んになっている中で、進化と学習のハイブリッドなシステム構築等の工学的観点からも注目を浴びている。

適応進化の過程を理解する際の重要な概念に適応度地形がある。これは、可能な遺伝子や形質の組み合わせを一点として、それに対応した適応度を高さとして描かれる地形であり、生物集団の適応進化は地形上のある地点からより高い方向への山登りとして表現される。適応度地形上の進化における学習の役割として、一般に適応度地形をなだらかにし、進化の過程を促進する働きがあることなどが指摘されている (Hinton and Nowlan 1987, Mayley 1997, Mills and Watson 2006 など)。

研究代表者は、Baldwin 効果の工学的応用も念頭に置いて、次の 2 つの特徴を持つ適応度地形上の Baldwin 効果について研究してきた。一つは、マルチエージェント系などにおける個体間相互作用等に起因する環境の動的変化であり、ゲーム論的状況設定として繰り返し囚人のジレンマを採用し、学習可能性の進化を導入した戦略の進化実験を行ったところ、Baldwin 効果が有効に働き、必要最小限の可塑性を用いて協調集団を維持する強力な戦略が創発することを明らかにした (Suzuki and Arita 2004)。もう一つは、遺伝子間の非線形な相互作用 (エピスタシス) の影響であり、エピスタシスの強さが明示的に調節可能な Kauffman の NK 適応度地形モデルを用いて表現型可塑性の進化実験を行ったところ、エピスタシスの存在によって、Baldwin 効果は一般的な解釈より複雑な 3 つの段階からなることを明らかにした (Suzuki and Arita 2007)。

2. 研究の目的

上記の我々の研究を含め、従来の進化と学習の相互作用に関する研究の多くは、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、実際の生物進化では、地形上には多数の局所最適が存在し、一度の Baldwin 効果の結果たどり

着いた山の頂上が最適である保証はない。むしろ、局所最適に陥っている場合が頻繁にありうると言え、このような状況では、Baldwin 効果が繰り返して生じながらある山からより高い山へ集団が移動を繰り返した結果、より適応的な集団へ進化するシナリオを描く事ができる。これは、工学的観点からも、進化的手法で難しい問題を解く場合において、適応度地形は凸凹しており繰り返し生じる Baldwin 効果の結果どれくらい解の質の向上が見られるかは重要であるといえる。

また、近年、生物の生態的な活動を通じた環境要因の改変であるニッチ構築 (Odling-Smee et al. 2003) が進化の過程に与える影響が注目されており、微生物による土壌の化学組成の改変、動物による巣作り、人間による文化的活動など、生物進化の様々な時代とレベルにおいて重要な役割を果たしてきたことが知られている。学習による表現型の生涯の変化は環境条件との相互作用によって生じるため、環境条件そのものを改変するニッチ構築と学習は密接に影響し合いながら進化してきたと考えられる。従って、ニッチ構築を環境要因の改変を介した間接的な適応度地形の改変と見なすことで、動的な適応度地形における進化と学習の相互作用に関して、従来とは異なる知見を得ることが期待できる。

さらに、性選択や言語進化など、適応度地形を動的にする様々な要因が、複雑な進化と学習の相互作用をもたらすことが考えられるが、従来これら適応度地形の特性が進化と学習の相互作用に与える影響に関する統一的理解は十分なされていなかった。

そこで、本研究は、上に挙げた様々な適応度地形の特性と進化と学習の相互作用の関係について、人工生命手法に基づくモデル化と解析によって明らかにすると同時に、その工学的応用の方向性を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

進化と学習の相互作用、動的な適応度地形に注目した次の 6 つの個別のテーマを立て、それぞれ実験と解析を行った。

- (1) 局所最適を多数含む凸凹した適応度地形上において生じる Baldwin 効果について明らかにする。多峰性の適応度地形をあ

らわすシンプルな適応度関数を用いた、個体の持つ形質間の相互作用とその適応性についての相関に起因して凸凹した適応度地形を想定し、各形質の初期値とその可塑性を決める遺伝子を持つ個体群が進化する計算論的モデルを構築した。

さらに、本モデルをシグナルの送信受信に関する形質の共進化で表現したコミュニケーション能力の共進化モデルに拡張し、解析を行った。

- (2) 生物の生態的活動に基づく適応度地形の改変であるニッチ構築が学習に与える影響を明らかにするため、両形質の共進化を想定した人工生命モデルを構築した。

各個体は、状態が実数値で表される同一の環境に共存し、環境値との差で適応度が決まる形質の初期値に加え、学習で形質値を環境値に近づける大きさ、ニッチ構築で環境値を形質値に近づける（遠ざける）大きさを決める3つの遺伝子を持つ。各世代ですべての個体が両活動を一定回数行い、その間の適応度に基づき集団が進化するものとした。

- (3) セルオートマトンは、局所的な相互作用から生じる大域的な振る舞いを解析するための抽象モデルの1つとして知られ、その基本特性について理解されてきた。しかし、外界との相互作用を考慮したセルオートマトンの振る舞いについては、十分議論されていなかった。

そこで、群ロボットなどの自律分散システムが外界と相互作用することによる挙動の変移を、集団レベルでの表現型可塑性と捉え、外乱による局所的な状態の改変をきっかけに、セルの状態種別の分布で表される大域的な状態を切り替える問題を設定し、その遷移規則を遺伝的アルゴリズムによって探索した。

個体間相互作用に起因する動的な適応度地形における進化の代表的状況設定として、言語の進化に注目し、言語能力の進化と話し言葉の文化進化のモデルを構築し、実験と解析を行った。

具体的には、各個体は意味と言葉の対応関係を表すニューラルネットワークを持ち、その結合重みの初期値と可塑性が遺伝子で決められている。各個体は親を

含む前世代の個体から言語を学習した後、個体間で会話と学習を繰り返すものとした。

- (4) 個体間相互作用に起因する動的な適応度地形における進化のもう一つの事例として性選択に注目し、複数のキューを用いたえり好みに基づく同所的種分化に関するモデルを構築した。

具体的には、オスは2種類のキューを遺伝的に決まる整数値として持ち、メスは各キューに対する選好性を遺伝的に決まる整数値として持つ。オスはキューの絶対値が大きいほど自然選択により生殖可能年齢まで生き残りにくく、メスは生殖可能なオスから各キューと自身の選好性の積の和が大きい個体ほど選択しやすいものとした。

- (5) 表現型可塑性と関連の深い発生過程の進化に関して、人工発生を対象に、異なるモデルや問題間におけるヘテロクロニー（発生過程の異時性）を比較するための統計手法について検討を行った。

4. 研究成果

3での各研究事例に対応して、進化と学習の相互作用とその応用に関連して次の知見を得ることができた。

- (1) 局所最適が多数ある状況においても、Baldwin 効果が繰り返し生じ、集団はより高い山に到達可能であることが示された。

さらに、コミュニケーション能力の進化においても、Baldwin 効果が繰り返し生じることで、動的に生じる局所最適を乗り越えられ、適応的なコミュニケーション体系が獲得されうることも示された（図1）。

- (2) 学習・ニッチ構築の活動に関する遺伝子の値が交互に増減する共進化の過程が見られ、これはニッチ構築による環境状態の安定・不安定化が学習のメリットとコストのバランスの変移を駆動するためであることが判明した。

- (3) 外乱（セルの状態に対するノイズ）によ

って状態を可塑的に変化させるセルオートマトンが進化的探索で得られた。そのルールは、外乱の蓄積が一定量を超えるとその影響が系全体に広まる自己組織的な性質によって、セルの状態数以上の大域的な安定状態を周期的に推移するものであった。

- (4) 言語進化の文脈においても Baldwin 効果が生じることが明らかになった。特に、Baldwin 効果の第 2 段階における可塑性の減少の要因として、第 1 段階における生得的な言語の一致による学習の必要性の減少や、言語のコンパクト化による学習の容易化、突然変異などによって特異な言語を話す親から悪影響などが考えられることが示された。
- (5) 基礎的実験の結果、自然選択圧が中程度の場合、ランナウェイ過程が双方向に生じて正または負の極端な値のキューと選好性を持つ複数のサブ集団への棲み分けが生じたり、単一の集団に収束してキューと選好性が変動したりする過程が繰り返されることなどが判明した。
- (6) 異なる問題・発生モデル間におけるヘテロクローニの比較を行い、多くの傾向は発生間で異なることが判明した。同様の傾向を示すものも存在したが、必ずしも同じ要因によるとは限らないことも示唆された。

以上から、複雑かつ動的な適応度地形上の進化を理解する上では、表現型可塑性とその進化の役割が極めて重要であることが明確に示されたと言える。また、コミュニケーション

能力、自律分散システムなど、工学システムの進化的設計への応用に関しても、重要な示唆を与えることができたと言える。進化と学習の観点から、このような広い研究領域にアプローチする試みは国内・国外においてもほとんど無く、この意味でも貴重な知見が得られたと考えている。

今後は特にコミュニケーション能力の進化における進化と学習の相互作用に焦点を合わせ、理解を深めたいと考えている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Artur Matos, Reiji Suzuki and Takaya Arita: "Heterochrony and Artificial Embryogeny: A method for Analyzing Artificial Embryogenies based on Developmental Dynamics", *Artificial Life*, 15 (2), 131-160 (2009). [査読有]
- (2) Reiji Suzuki: Book review of "Evolution and Learning: The Baldwin Effect Reconsidered. Bruce H. Weber and David J. Depew (Eds.), *Artificial Life*, 15 (2), 247-250 (2009). [書評, 査読無]
- (3) Yusuke Watanabe, Reiji Suzuki and Takaya Arita: "Language Evolution and the Baldwin Effect", *Artificial Life and Robotics*, 12(1), 65-69 (2008). [査読有]
- (4) 岩瀬雄祐, 鈴木麗壘, 有田隆也: 外乱によって自己組織化するセルオートマトンの進化的な探索, *情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用*, 48(SIG 19(TOM 19)), 23-32 (2007). [査読有]

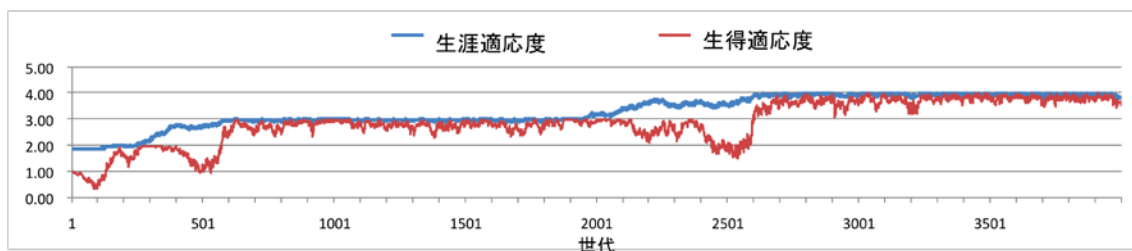


図 1: コミュニケーション能力の進化モデルにおける適応度の推移。生涯適応度は選択に用いられる学習後の適応度、生得適応度は先天的形質のみを用いると仮定した場合の適応度である。同図から、生涯適応度が増加した後に生得適応度が追いつくボールドウィン効果の過程が繰り返され、集団が適応度の高いコミュニケーション能力を獲得したことがわかる。

[学会発表] (計 13 件)

- (1) 黒島麻衣, 鈴木麗璽, 有田隆也: 複数のキューを用いたえり好みに基づく同所的種分化に関する個体ベースモデル, 第 21 回自律分散システムシンポジウム, 2009 年 1 月 22 日, 鳥取.
- (2) Yusuke Iwase, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolutionary Search for Cellular Automata that Exhibit Switching Behaviors of Their Global States Induced by Different External Perturbations, *International Symposium on Frontiers of Computational Science 2008*, 2008 年 11 月 28 日, 名古屋, 日本.
- (3) 鈴木麗璽: コミュニケーション能力の進化とボードウィン効果, 東京大学大学院理学系研究科・理学部生物学専攻 人類学談話会, 2008 年 11 月 14 日, 東京, 日本.
- (4) 鈴木麗璽, 有田隆也: コミュニケーション能力の進化において繰り返し生じるボードウィン効果, 日本進化学会第 10 回大会ワークショップ“言語の起源と進化”, 2008 年 9 月 2 日, 東京, 日本.
- (5) Reiji Suzuki and Takaya Arita: How Learning Can Guide Evolution of Communication, *Proceedings of Artificial Life XI*, 2008 年 8 月 6 日, サウザンプトン, イギリス.
- (6) 岩瀬雄祐, 鈴木麗璽, 有田隆也: 人間とのインタラクションによって自己組織化するセルオートマトン, 第 9 回 MYCOM (AI 若手の集い: 人工知能学会主催), 2008 年 6 月 5 日, 岐阜, 日本.
- (7) 鈴木麗璽: 学習はコミュニケーション能力の進化をいかに促進するか, 北陸先端科学技術大学院大学橋本研究室セミナー, 2008 年 5 月 12 日, 石川, 日本.
- (8) 野場康徳, 鈴木麗璽, 有田隆也: ニッチ構築と学習の相互作用に関する個体ベー

ス進化シミュレーション, 第 35 回知能システムシンポジウム, 2008 年 3 月 17 日, 東京, 日本.

- (9) Yusuke Iwase, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolutionary Search for Cellular Automata that Exhibit Self-Organizing Properties Induced by External Perturbations, *The Second International Workshop on Natural Computing*, 2007 年 12 月 11 日, 名古屋, 日本.
- (10) Yusuke Iwase, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolutionary Search for Cellular Automata that Exhibit Self-Organizing Properties Induced by External Perturbations, IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2007 年 9 月 26 日, シンガポール.
- (11) 鈴木麗璽, 有田隆也: 凸凹した適応度地形において繰り返し生じるボードウィン効果, 日本進化学会大会第 9 回大会, 2007 年 9 月 1 日, 東京, 日本.
- (12) 鈴木麗璽: 凸凹した適応度地形において学習は進化をいかに促進するか, 第 8 回 MYCOM (AI 若手の集い: 人工知能学会主催), 2007 年 6 月 24 日, 宮崎, 日本.
- (13) 鈴木麗璽, 有田隆也: 凸凹した適応度地形において繰り返し生じる Baldwin 効果, 人工知能学会全国大会, 2007 年 6 月 22 日, 宮崎, 日本.

[その他]

研究成果は研究代表者の Web ページ (<http://www.alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~reiji/>) にて随時公開している.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 麗璽 (Reiji Suzuki)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号: 20362296