

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21700156

研究課題名（和文）

コミュニケーション能力の創発における進化と学習の相互作用に関する構成論的研究

研究課題名（英文）

A Constructive Approach to Interactions between Evolution and Learning in Emergence of Communication Abilities

研究代表者

鈴木 麗瑩 (SUZUKI REIJI)

名古屋大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：20362296

研究成果の概要（和文）：

本研究では、準最適な状態が動的に生じる複雑な環境における進化の観点から、コミュニケーション能力の進化において学習が果たす役割について、人工生命手法に基づくモデル化と解析で明らかにすると同時に、その応用の可能性を探った。まず、学習能力（表現型可塑性）とその進化が適応的コミュニケーションの創発に与える影響を最小の構成論的モデルで示した。次に、より具体的な状況として、言語の起源と進化に焦点を合わせたモデル、および、野鳥の歌重複回避行動の共進化モデル等に発展させ、有用な知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

This project aims at understanding roles of learning in evolution of communication abilities from the viewpoint of complex and dynamically changing environments. First, we clarified how learning (or phenotypic plasticity) could contribute to the emergence and evolution of adaptive communication abilities using minimal constructive models. Then, we conducted computational experiments that specifically focused on the origin and evolution of human language and the coevolution of the temporal avoidance in singing behaviors of songbird species, etc.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：学習，進化，ボールドウィン効果，コミュニケーション，ニッチ構築，動的な適度地形，遺伝的アルゴリズム，人工生命

1. 研究開始当初の背景

生物には、個体の学習（表現型可塑性）と集団の進化という2種類の適応過程がある。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問題である

が、両者は異なるレベル・時間スケールで生じるものであるため理解が容易ではなかった。しかし、近年、特に獲得形質の遺伝の仕組み無しに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

ていくボールドウィン効果とよばれる現象の存在が先駆的な計算機実験によって明確化されて以来、構成論的手法に基づく議論がその理解に貢献している。同時に、進化発生生物学 (Evo-Devo) や、広く学習を含む表現型可塑性の生物学的理解の進展から、その進化的意義について盛んに論じられている。また、強化学習や遺伝的アルゴリズムに代表される、生物の適応過程の工学的応用において、進化と学習のハイブリッドなシステム構築等の観点からも重要な知見が得られている。

研究代表者らは、ボールドウィン効果に代表される進化と学習の相互作用の理解と応用を目指し、様々な観点から人工生命手法に基づく研究を継続的に行い、人工生命学・進化学・複雑系科学・工学にわたる広い領域で成果を示してきた。特に、四人のジレンマや多峰性の適応度地形上の進化など、準最適な状態が動的に、また、多数生じる厳しい状況に置かれても、進化と学習の相互作用によって集団が段階的に進化しうることを示してきた。

そのような進化が容易でない典型的状況の一つとして、コミュニケーション、すなわち、社会的集団における個体間の情報の授受に関する能力の進化が考えられる。一般に、コミュニケーションが成立するには送信者によって送られた情報を受信者が正しく解釈する必要がある。しかし、例えば、あるコミュニケーションの形式（共有する語彙、プロトコルやチャネル）を、可塑性のない遺伝的基盤のみによって共有する集団を想定した場合、突然変異によって潜在的に従来よりも適応的なコミュニケーションの形式を可能にする個体が生じたとしても、他の個体がそれを正しく解釈できず適応性が発揮されないため、進化が停滞することが考えられる。

しかし、情報の受け手が試行錯誤的な学習で送り手の言葉を少しでも理解することができれば、送り手の遺伝的形質や受け手の学習能力に選択圧が生じ、ボールドウィン効果が繰り返して生じながらより上位のコミュニケーションが可能な集団へと段階的にシフトすることが考えられる (図 2)。

人工生命研究では、コミュニケーションの創発と進化はその黎明期から議論されており、近年では、言語の起源と進化の文脈においても、言語能力の遺伝的基盤と文化進化との関係について論じられている。しかし、先に挙げた学習の役割の存在についてそのシナリオを明確に示した研究は申請者の知る限り無かった。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究は、準最適な状態が動的に生じる複雑な環境における進化の観点から、コミュニケーション能力の進化にお

いて学習（とそれ自体の進化）が果たす役割について、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

具体的には、コミュニケーション能力の進化に関わる様々な抽象度と状況設定を想定したモデルを構築し、実験と解析を進めることで、学習がコミュニケーション能力の進化に与える影響に関する包括的な理解と応用の可能性を検討した（詳細は次節で成果とともに個別に説明）。

(1) コミュニケーションシグナルの送信・受信に関する形質とその可塑性の共進化モデル

(2) 量的形質とその表現型可塑性の進化に関する最小モデル

(3) 学習とニッチ構築の共進化モデル

(4) 野鳥の歌重複回避行動に関する共進化モデル

(5) ヒトの言語能力と言語（話し言葉）の共進化モデル

(6) 表現型可塑性進化、コミュニケーション能力の進化、動的な適応度地形に関する構成論的モデル（その他）

4. 研究成果

(各番号は前節の番号に対応)

(1) コミュニケーションシグナルの送信・受信に関する形質の共進化が議論可能なシンプルな状況設定を考え、その進化における学習の影響について検討した。

具体的には、シグナル送受信の方法を採用しそれが成功した際に生じる適応度への貢献度をコミュニケーションレベルとして定義した。各個体は自身が送信者・受信者それぞれの場合において用いるレベルを独自に持ち、コミュニケーションの成否は送信側と受信側のレベルが一致するかどうかで決まるとした。以上の送受信に関するレベルとその可塑性が、レベルが高いほど先天的・後天的に生じにくい制約のもとで共進化するモデルを構築し、実験を行った。

その結果、生得的なレベルのみでコミュニケーションを行う場合には、一旦レベルが集団内で共有されると進化が停滞してしまうのに対し、学習能力の進化を導入した条件では、ボールドウィン効果と呼ばれる現象が繰り返して生じてレベルが次第に増加していくことが確認された。進化ダイナミクスのより詳細な解析の結果、本研究で注目する動的な適応度地形（遺伝子空間上に描かれる適応度の山）においては、学習は適応度地形に新たなピークを作り出すことで、動的に生じる適応度地形の谷をうまく越える働きがあることが明らかになった (図 1)。これは、学習

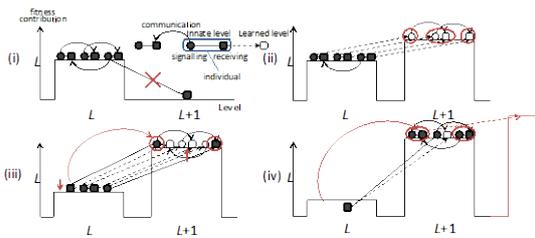


図1：シグナル送信・受信に関するレベルの進化を学習が促進するシナリオ。

には、従来指摘されてきたような単に適応度地形をなだらかにする以上の働きがあることを明確に示した点で、新規な知見であるといえる。

また、生態学的により妥当な拡張に向けて、送信・受信者が受けるメリットの比を変更した場合の基礎的解析も行った。

(2) (1) で論じた正の頻度依存選択下におけるコミュニケーション能力関連形質の進化モデルをさらに洗練させ、最小限のモデルを再構築した。

具体的には、連続値によって表現された量的形質とその可塑性（学習可能性）の大きさのみを進化の対象とし、その値の大きさと個体間での一致度を適応度の構成要素とした単純なモデルを構築した。

これを用いて学習がコミュニケーション能力の進化を促進する(1)のシナリオをより一般的・普遍的に示した(論文投稿中)。

(3) 表現型の改変に基づく適応である学習と、環境要因の改変による適応度の改変に基づく適応であるニッチ構築との共進化モデルを構築し、解析を行った。特に、本研究では、両生態的過程の持つ時間的局所性が与える影響に注目した。

その結果、特に、時間的局所性が低い、つまり、各生態的過程が非同期に行われる場合には、両過程が交互に進化する共進化サイクルが生じることが判明した(図2)。

また、本モデル、および、(1)のモデルを言語的ニッチの共有に基づく言語の学習能力と言語的ニッチ構築の共進化モデルとして位置づけた(図3)。

(4) 日本学術振興会平成21年度優秀若手研究者海外派遣事業での研究代表者によるカリフォルニア大学ロサンゼルス校生態・進化生物学科、Charles Taylor 教授研究室での在外研究に関連し、コミュニケーション能力とその学習能力の進化に関するより生物学的に具体的な状況設定、ワイヤレスネットワークの通信プロトコルなどへの工学的応用も念頭に置いた状況設定として、野鳥の歌行動の時間的可塑性に注目し、歌特性の異なる複数種による歌重複回避行動に関する共進

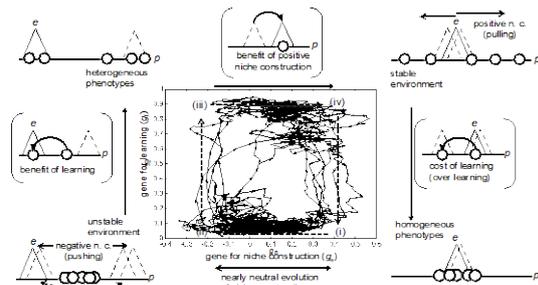


図2：進化とニッチ構築の共進化のシナリオ(時間的局所性が低い場合)。

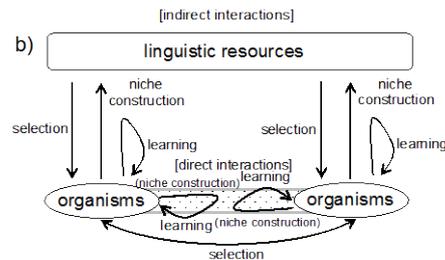


図3：言語進化における進化と学習、ニッチ構築の関係。直接的個体間相互作用が(1)、間接的個体間相互作用が(3)のモデルにそれぞれ相当。

化シミュレーションモデルの基礎的解析を行った。

その結果、重複回避のための行動変化が他種にとつてのニッチ構築となり、動的なゲーム論的状况が生じた結果、可塑性の分化進化といった複雑な過程が生じうる事が示された(図4)。

(5) 本研究が論ずる状況の典型例として、ヒト言語の起源と進化に注目し、個体の言語学習能力と先天的言語能力が進化し、言語能力の複雑化と多様化の過程が可視化可能なモデルを構築し、言語を共有する集団の分化や収束の過程の可能なシナリオを提示した。

さらに、ヒトの言語能力と言語(話し言葉)の共進化モデルを構築し、両者の関係のダイナミックな変容の過程に関して基礎的な知見を得た(図5)。

(6) 季節などの外的な環境条件の変化が、学習能力を形作るモジュール構造と可塑性の関係に与える影響に注目し、周期的変化環境におけるニューラルネットの結合重みの可塑性進化モデルを構築・実験した結果、ネットワークにおける可塑性を持った結合重みに偏りが生じ、環境変動に対して即座に対応可能な振る舞いを可能にすることが判明した。

個体間相互作用のネットワーク構造とゲーム戦略、および、ゲーム構造の共進化の理解のために、ゲーム戦略とネットワーク構造に加えてゲーム構造も進化可能なモデルを構築し実験したところ、ゲーム戦略・ゲーム

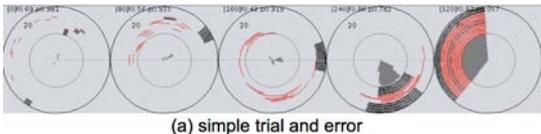
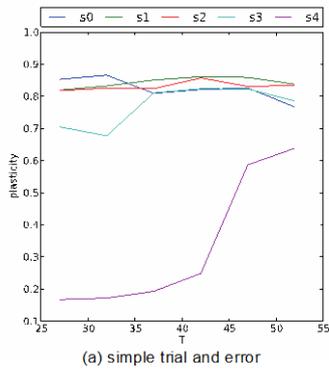


図4：(上段) 共有する音空間の混雑度と複数種の可塑性(歌重複回避行動の頻度)の進化傾向の関係。混雑するほど一番長い歌を歌う種の可塑性が低下する一方、残りの全ての種の可塑性は高まる傾向を示している。(下段) 混雑度合いが高い場合の歌行動の分布例。

構造とネットワーク構造のサイクリックな共進化過程が生じることが判明した。

さらに、協調ネットワークにおける選択の強さの影響や、外乱によって自己組織化するセルオートマトン、食物網の進化ダイナミクス等、個体間相互作用の理解に関する基礎的研究や、適応度地形概念のアートや教育を含む様々な応用の可能性の検討等を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- 1) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Coevolution of Game Strategies, Game Structures and Network Structures, *International Journal of Autonomous and Adaptive Communications Systems (Special Issue on Computation and Networks with Biological and Social Metaphors)* (印刷中). 査読有
- 2) Hirofumi Ochiai, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Self-organizing Stability of Food Web that Emerges from the Evolution of Restrictions on Speciation, *Artificial Life and Robotics*, 16(4), 637-640 (2012). 査読有
- 3) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolution of Cooperation on Different Pairs of Interaction and Replacement Networks with Various Intensity of Selection, *International Journal of Bio-inspired Computation*, 3(3), 151-158 (2011). 査読有

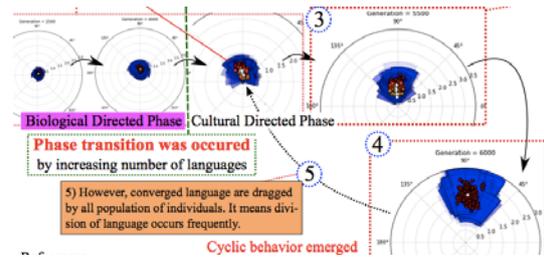


図5：ヒトの言語能力と言語(話し言葉)の共進化モデル。進化初期には言語の学習能力(可塑性)の進化が系全体の変移を駆動するが、言語の爆発的な多様化が生じた後は、言語の文化進化が系全体の主要な変移の要因となる。

- 4) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Visualizing Language Evolution as an Emergent Phenomenon based on Biological Evolution and Learning, *Artificial Life and Robotics*, 16, 366-372 (2011). 査読有
- 5) Kenichi Minoya, Reiji Suzuki and Takaya Arita: A Constructive Approach to the Evolution of the Planning Ability, *International Journal of Artificial Life Research (IJALR)*, 2(3), 22-35 (2011). 査読有
- 6) Hirofumi Ochiai, Reiji Suzuki and Takaya Arita: The Effects of the Trophic Level on the Stability of Food Webs, *Artificial Life and Robotics*, 14(3), 379-383 (2009). 査読有

[学会発表] (計7件)

- 1) Reiji Suzuki, Charles E. Taylor and Martin L. Cody: Soundscape Partitioning to Increase Communication Efficiency in Bird Communities, *Proceedings of the 17th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, (2012/01/19), 別府/日本.
- 2) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: A Simple Integrated Framework for Investigating Genetic and Cultural Evolution of Language, *Proceedings of the 9th International Conference on the Evolution of Language (EvolangIX)* (2012/03/16), 京都/日本.
- 3) Reiji Suzuki, Souichiro Yamaguchi, Martin L. Cody, Charles E. Taylor and Takaya Arita: iSoundScape: Adaptive Walk on a Fitness Soundscape, *Applications of Evolutionary Computation, LNCS 6625 (Proc. of the 9th European Event on Evolutionary and Biologically Inspired Music*,

- Sound, Art and Design (evomusart2011)*), (2011/04/27), トリノ/イタリア.
- 4) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Reconsidering Language Evolution from coevolution of learning and niche construction using a concept of dynamic fitness landscape, *Five Approaches to Language Evolution (Proceedings of the Workshops of the 9th International Conference on the Evolution of Language (EvolangIX))*, (2012/03/13), 京都/日本.
- 5) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Coevolution of Game Strategies, Game Structures and Network Structures, *Proc. of the 5th International ICST Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information, and Computing Systems (Bionetics 2010)*, (2010/12/02), ボストン/米国.
- 6) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Effects of Temporal Locality of Ecological Processes on Coevolution of Learning and Niche Construction, *Proceedings of Artificial Life XII (ALIFEXII)*, (2010/08/22), オデンセ/デンマーク.
- 7) Solvi Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolving Learning Ability in Dynamic Environments: The Structuring Force of Environmental Heterogeneity, *Proceedings of Artificial Life XII (ALIFEXII)*, (2010/08/22), オーデンセ/デンマーク.

[図書] (計1件)

- 1) Yusuke Iwase, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolutionary Search for Cellular Automata with Self-Organizing Properties toward Controlling Decentralized Pervasive Systems (Ch. 17), Shu-Heng Chen, Yasushi Kambayashi and Hiroshi Sato (eds.), *Multi-Agent Applications with Evolutionary Computation and Biologically Inspired Technologies: Intelligent Techniques for Ubiquity and Optimization*, 379-383, IGI Global (2010).

[その他]

ホームページ等

<http://www.alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~reiji/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木麗璽 (SUZUKI REIJI)

名古屋大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号:20362296

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

有田隆也 (ARITA TAKAYA)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号:40202759