

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24500168

研究課題名(和文) 同所的種間相互作用に基づく学習とニッチ構築の共進化に対する複雑系アプローチと応用

研究課題名(英文) Complex systems approaches to coevolution of learning and niche construction in sympatric species and their applications

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、学習とニッチ構築が同時に存在しうる、また、一つの形質が両者の役割を持ちうる状況として同所的種間関係に注目し、複雑系手法に基づく計算モデルの構築と分析、また、応用の検討を行った。まず、複数種間での資源利用重複回避行動の共進化モデルの構築と分析を行い、種間で可塑性が多様化しうることを明らかにした。次に、言語と言語の学習能力、絶対送粉共生系、被食捕食関係などを想定した共進化モデルを構築し、関連する文脈での進化傾向を分析した。また、学習とニッチ構築の進化の基本的性質の分析、応用を念頭にした通信競合回避モデルの構築等も行った。知見と野鳥の歌行動における時間的重複回避との比較検討も行った。

研究成果の概要(英文)：This project aims at understanding coevolution of learning and niche construction in sympatric species using complex systems approaches. First, we constructed a minimal model where several different species participate in a partitioning of their shared niches, and evolve their behavioral plasticity to avoid an overlap of their niche use. We found that the two different types of asymmetric distributions of phenotypic plasticity emerge depending on the settings of the degree of congestion of the shared niches. Then, we constructed and analyzed computational and coevolutionary models of language-language ability, plant-insect, predator-prey interactions, etc. We also conducted related computational experiments on evolution of learning or niche construction, considered engineering applications of the findings assuming the information transmission in wireless sensor networks, and considered relationships between the findings and singing behaviors of birds.

研究分野：人工生命

キーワード：学習 表現型可塑性 ニッチ構築 共進化 資源共有問題 個体ベースモデル 人工生命

1. 研究開始当初の背景

個体レベルの生態的活動が集団レベルの進化に与える影響が注目を集めている。環境との相互作用に基づく形質の変化である表現型可塑性や学習は、近年の進化発生生物学の進展に伴い、集団レベルの進化を方向付ける重要な要因であると位置づけられていると同時に、進化計算と機械学習などのハイブリッドな適応アルゴリズムへの応用の観点からも注目されている。また、学習、もしくは、環境との相互作用で生じる形質の変化である表現型可塑性は生物自体の改変に基づく適応であるが、いわばその逆、つまり、生物による環境条件の改変に基づく適応も遍在する。この過程は近年ニッチ構築と呼ばれ、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、生物進化の様々な場面で果たす役割の統一的な理解が行われている。

我々は、これらの個体レベルの学習やニッチ構築（とそれ自体の進化）が集団の進化に与える影響に対し、計算モデルによるアプローチに基づく先駆的研究を継続的にを行い、様々な状況設定において両者が集団の適応性に寄与するシナリオを提示してきた。これまでの研究を総合して得られた重要な知見は、両者は密接に関係し進化に複合的に影響しうること、また、一つの個体レベルの行動がもたらす影響は多様であり、個別に切り離して考えられないため、ある適応行動が学習とニッチ構築両方の意味を同時に持つ場合がありうるということである。しかし、従来、ある行動の進化を学習とニッチ構築の両観点から捉えた議論は我々の研究グループの知見を除いて皆無であった。

同時に、我々は複数種の野鳥による歌（なわばりの主張や異性へのアピールを目的にした周期的な鳴き声）における時間的重複回避の進化を、コミュニケーション能力に関する可塑性の進化の具体的な状況設定として取り上げ、複雑系・集団遺伝学者や生態学者を交えて議論を進めてきた。計算モデルに基づく予備的解析からは、重複回避のための行動変化が他種にとっ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ており、本課題にとって格好の題材であるといえる。しかし、種間相互作用に注目し、かつ、上記のような観点に注目した一般的な議論はやはり皆無であった。

2. 研究の目的

以上の問題意識を踏まえ、本研究は、学習とニッチ構築の共進化ダイナミクスの理解と応用を目的とする。具体的には、一つの適応行動が両者の意味を持ちうる典型的な状況設定として、同所的種間相互作用、特に、複数種間での資源利用重複調整行動（可塑性）の共進化に焦点を合わせ、基本的知見を得る。それを踏まえ生態的・工学的に妥当な

状況を設定し、上記の問題意識に基づく共進化過程の理解の発展と応用の可能性を検討する。さらに、上記の知見と野鳥の歌行動の時間的可塑性との関連も検討する。

3. 研究の方法

本課題では具体的に次のことを行った。まず、野鳥の生態に限らず広く同所的種間相互作用に関する普遍的な知見を得ることを狙い、(1)複数種間での資源利用重複回避行動の共進化について議論可能な一般モデルの構築と実験・分析を行った。

同時に、これらの知見を踏まえつつ、様々な種間関係・環境資源の構造や特徴に注目し、より生態的・工学的に妥当な設定を想定した種々のモデルを構築し解析することで、広く学習およびニッチ構築の共進化の観点に基づく種間相互作用の理解について検討した。具体的には、(2)学習とニッチ構築の複数種共進化に関するミニマルモデル、(3)言語と言語の学習能力の共進化、(4)絶対送粉共生系における花の匂いと昆虫の選好性の共進化、(5)個体数変動を伴う被食捕食系に関する共進化モデル等を構築し、資源共有・学習・ニッチ構築・共進化に関する様々な文脈における進化傾向を分析した。また、自律分散システムにおける適応的コミュニケーション等への工学的応用を念頭に置き、(6)資源共有の時間・空間的構造を導入したエージェント間通信に関する競合回避モデル構築と分析等も行った。さらに、(7)得られた知見と野鳥の歌行動における時間的重複回避との比較のための基礎的検討を行った。また、関連するモデル構築と分析等を行い、多面的な視点からの理解に努めた。

4. 研究成果

上記の(1)~(7)に関して、次の成果を得た。

- (1) 複数種が共有する資源を繰り返し利用する際の重複回避を行動の可塑性（学習）と捉え、利用効率に基づいて回避行動が共進化する抽象モデルを構築した（図1）。資源利用の度合いに関して種間で差がない状況であっても、可塑性が分化するように進化するという基本的な知見を得た。特に、ニッチの混雑度合いに依存して異なる可塑性の分化傾向が創発することが判明した。具体的には、種数に比べてニッチ数が相対的に多い場合は、一種のみの可塑性が小さくなる一方、残りの種の可塑性が高まる傾向があった。逆に、種数に比べてニッチ数が少ない場合は、一種の可塑性が高まる一方、残りの種の可塑性が小さくなる傾向があることがわかった（図2）。これらの知見は、生物種間関係に限らず、広く資源を共有する主体間関係における自律的な適応過程の理解とその応用に寄与することが期待できる。
- (2) 本研究課題のきっかけとなった学習とニッチ構築の共進化に関するミニマル

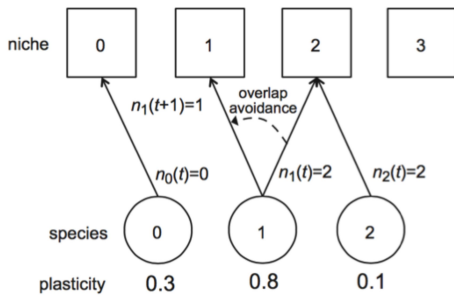


図1: 複数種における資源利用の重複回避行動共進化モデル(種数3, 資源数4). 各種から一頭ずつ計3個体が4つの資源(ニッチ)を繰り返し利用する. 利用の重複がない場合は次回も同じ資源を利用し, 重複した場合には, 遺伝子で記述された種率(可塑性)で他の資源を次回利用する.

なモデル構築を洗練して, 変更された環境条件が次世代に受け継がれる生態的継承と複数種の存在が系の挙動に与える影響について解析し, 学習とニッチ構築の共進化で環境変化がスケールフリー的な変動を示すことを発見した.

- (3) まず, 一方の学習がもう一方のニッチ構築となり得る状況設定として, コミュニケーション能力とその可塑性の進化に注目したシンプルなモデルを構築し, 突然変異率や学習回数に応じて学習が異なる形で進化を促進することを示した. 特に, 突然変異率が高い場合には遺伝的多様性を維持し, 突然変異率が低い場合は個体間の適応度差を広げることで, 進化を促進しうることがわかった. これらの知見を踏まえ, 言語の文化進化と言語能力の生物進化に関する共進化モデルを構築し, 一方の変化・進化が他方の進化のきっかけとなることを繰り返すサイクリックな共進化過程が生じることを示した. また, 両者の進化速度が共進化過程に与える影響等について検討した.
- (4) 種間で共有する資源の利用戦略が共進化するより具体的な生態状況として, カンコノキとハナホソガの絶対送粉共生系における花の匂いの性的二型とその選好性の共進化に注目し, 共進化モデルの構築とその基礎的な分析を行った. カンコノキの授粉とホソガの産卵が同時に生じ利益を共有するとき, カンコノキの雄花雌花の匂いの分化とホソガの能動的な授粉行動が創発することを確認した. この傾向は雄花の割合が比較的小さい場合に生じやすいことも判明した. また, 両者の関係を最後通牒ゲームと見なした平面版の共進化モデルを構築・分析し, 両者の動的な進化過程が公平な資源配分に貢献する状況がありうることを明らかにした.
- (5) 種間に存在する非対称な関係として, 一方の種の存在が直接資源である被食捕食関係に注目し, 3次元仮想生物進化環境を用いて被食・捕食生物の進化モデルを構築した. 特に, 一方の進化が他方の環境資源として働く状況として, 適応度に応じた個体数変動を導入したところ, 生態・進化フィードバックと呼ばれる複

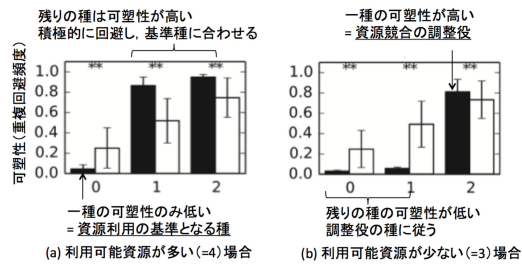


図2: 資源共有問題における可塑性の分化の創発(黒い棒グラフ). 種数3)に対して(a)共有可能な資源数が多い場合, 一種の可塑性が低い基準となる種が共進化の結果創発し, 残りの種はそれを基準にして競争を避ける. 一方, (b)資源数が少ない場合, 一種の可塑性の高い種が調整役となる. どちらも平等な資源利用が実現.(白い棒グラフは中立進化させたときに生じる可塑性の平均.)

雑な過程が生じることがわかった.

- (6) 得られた知見をワイヤレスセンサーネットワークなどの近傍個体(ノード)間の通信における時間的・空間的資源共有における競合回避へ応用することを念頭にして, 二次元平面に分布し近傍の個体とのみネットワークを形成して周期的に情報発信し合う状況を想定し, 情報発信の時間的な重複回避行動に加え, 重複時に個体が空間を移動する空間的な重複回避行動も同時に進化する個体ベースモデルを構築し, 両者の共進化過程の解析を行った. その結果, 情報が周囲に届きにくい場合には時間的重複回避を利用するように進化する一方, 情報が広範囲に届く場合には空間的重複回避を利用するように進化することが判明した.
 - (7) 研究協力者から提供された野鳥の歌行動データを用いて, 移動エントロピーを用いた種間の多様かつ非対称な影響の予備的分析を行ったところ, 種間で行動の可塑性に違いがあることが示唆された. より豊富なデータの取得のため, ロボット聴覚システム HARK を利用した音環境観測の可能性と種間相互作用の抽出に関する予備的検討を行った.
- 以上の成果に加え, 学習, ニッチ構築, 進化, および, その応用に関わるモデル構築・およびデータ分析を行った.
- 以上を総括し, 資源共有問題とその拡張を含む多様な種間相互作用, および, 共進化の文脈において, 一方の行動の適応的变化が他方のニッチ構築となり, 複雑な進化過程が生じうることを明らかにした.

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 20件)

- 1) Reiji Suzuki, Tomoko Okamoto and Takaya Arita: Emergent dynamics of fairness in the spatial coevolution of proposer and responder species in the ultimatum game, *PLOS ONE*, 10(1), e0116901 (2015). DOI: 10.1371/journal.pone.0116901. 査読有.
- 2) Solvi F. Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Selection for

- representation in higher-order adaptation, *Minds and Machines*, 25(1), 73-95 (2015). DOI: 10.1007/s11023-015-9360-3. 査読有.
- 3) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Emergence of a dynamic resource partitioning based on the coevolution of phenotypic plasticity in sympatric species, *Journal of Theoretical Biology*, 352, 51-9 (2014). DOI: 10.1016/j.jtbi.2014.02.035. 査読有.
- 4) Takuro Kojima, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Effects of ecological inheritance of cooperative behaviors and physically niche constructing behaviors, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 18(3), 391-400 (2014). 査読有.
- 5) 鈴木麗璽, 有田隆也: 言語と言語能力の共進化に対する構成論的アプローチ, 計測と制御(特集:言語とコミュニケーションの創発に対する複雑系アプローチ), 794-800 (2014). 査読有.
- 6) Kenichi Minoya, Reiji Suzuki, Tatsuo Unemi and Takaya Arita: A constructive approach to the evolution of the planning ability investigations into living systems, *Artificial Life, and Real-World Solutions*, 23-35 (2013). DOI:10.4018/978-1-4666-3890-7.ch004. 査読有.
- 7) 西本恵太, イヴァンタネヴ, 下原勝憲, 鈴木麗璽, 有田隆也: 拡張マイノリティゲームにおける役割の分化と切替えダイナミクスの検討, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, 6(3), 124-133 (2013). 査読有.
- 8) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Coevolution of multiple species through niche construction modifying shared environments, *Artificial Life and Robotics*, 18(3-4), 144-151 (2013). DOI: 10.1007/s10015-013-0116-y. 査読有.
- 9) Reiji Suzuki and Takaya Arita: A simple computational model of the evolution of a communicative trait and its phenotypic plasticity, *Journal of Theoretical Biology*, 330(7), 37-44 (2013). DOI: doi:10.1016/j.jtbi.2013.04.006. 査読有.
- 1 0) Solvi F. Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Selection for Reinforcement-free learning ability as an organizing factor in the evolution of cognition, *Advances in Artificial Intelligence*, 2013, Article ID 841646 (13 pages) (2013). DOI: 10.1155/2013/841646. 査読有.
- 1 1) Takashi Ito, Marcin L. Pilat, Reiji Suzuki and Takaya Arita: A Life approach for body-behavior predator-prey coevolution: body first or behavior first?, *Artificial Life and Robotics*, 18(1-2), 36-40 (2013). DOI: 10.1007/s10015-013-0096-y. 査読有.
- 1 2) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Coevolution of game strategies, game structures and network structures, *Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering)*, 87, 143-154 (2012). DOI: 10.1007/978-3-642-32615-8_17. 査読有.
- 1 3) Reiji Suzuki, Charles E. Taylor and Martin L. Cody: Soundscape partitioning to increase communication efficiency in bird communities, *Artificial Life and Robotics*, 17(1), 30-34 (2012). DOI: 10.1007/s10015-012-0014-8. 査読有.
- (学会発表)(計55件)
- 1) Reiji Suzuki and Martin L. Cody: Complex systems approaches to temporal soundscape partitioning in bird communities as a self-organizing phenomenon based on behavioral plasticity, *The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 別府国際コンベンションセンター (大分県別府市) (2015/01/22) (invited talk).
- 2) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Directional effects between language and biological evolution in gene-culture coevolution of language, *The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 別府国際コンベンションセンター (大分県別府市) (2015/01/22).
- 3) Naoki Hayashi, Reiji Suzuki and Takaya Arita: A minimal model of coevolution between learning and niche construction, *The 8th International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (BICT2014)*, Boston (USA) (2014/12/02).
- 4) 鈴木麗璽, 有田隆也: 言語と言語能力の共進化に対する構成論的アプローチ, 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会 2014 (SSI2014), 岡山大学 (岡山県岡山市) (2014/11/23).
- 5) 寺澤明仁, 鈴木麗璽, 岡本朋子, 有田隆也: 絶対送粉共生系における花の匂い

- の性的二型とその選好性に関する共進化モデル, 日本進化学会第 16 会大会, 高槻現代劇場 (大阪府高槻市) (2014/08/22).
- 6) Reiji Suzuki, Charles E. Taylor and Martin L. Cody: Temporal partitioning to avoid soundspace overlap by bird communities, *The 26th International Ornithological Congress*, p. 41, 立教大学(東京豊島区) (2014/08/20).
- 7) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Gene-culture coevolution of language: measurement-interval dependence of evolutionary rate, *The Fourteenth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems (ALIFE 14)*, New York City (USA) (2014/08/02).
- 8) Takashi Ito, Marcin L. Pilat, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Population and evolutionary dynamics based on predator-prey relationship in 3D physical simulation, *The Fourteenth International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems (ALIFE 14)*, New York City (USA) (2014/08/01).
- 9) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Does biological evolution keep pace with cultural evolution?: an analysis of gene-culture coevolution of language", *The 19th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 別府国際コンベンションセンター (大分県別府市) (2014/01/24).
- 10) 鈴木麗璽, Charles E. Taylor and Martin L. Cody: 野鳥の歌コミュニケーション理解への試み, 第 38 回人工知能学会 AI チャレンジ研究会, 早稲田大学 (東京都新宿区) (2013/12/06).
- 11) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Cyclic behavior in gene-culture coevolution mediated by phenotypic plasticity in language, *The Twelfth European Conference on Artificial Life (ECAL2013)*, Taormina (Italy) (2013/09/04).
- 12) Takashi Ito, Marcin Pilat, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Coevolutionary dynamics caused by asymmetries in predator-prey and morphology-behavior relationships, *The Twelfth European Conference on Artificial Life (ECAL2013)*, Taormina (Italy) (2013/09/04).
- 13) Reiji Suzuki, Takuro Kojima and Takaya Arita: Reconsidering the coevolution of cooperative behaviors and network structures from the viewpoint of the evolution of niche construction, *NetSci Satellite Symposium on State-Topology Coevolution in Adaptive Networks*, Copenhagen (Denmark) (2013/06/03).
- 14) Keita Nishimoto, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Social particle swarm: explosive particle dynamics on cooperative/defective force, *IEEEALIFE2013 (SSCI2013)*, Singapore (Singapore) (2013/04/17).
- 15) Keita Nishimoto, Ivan Tanev, Katsunori Shimohara, Reiji Suzuki and Takaya Arita: The evolution of pre-play communication in the interactive minority game, *The 18th International Symposium on Artificial Life and Robotics*, Daejeon (Korea) (2013/01/31).
- 16) Keita Nishimoto, Ivan Tanev, Katsunori Shimohara, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Coevolutionary dynamics between roles and social sensitivity in an extended minority game, *The 13th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE XIII)*, Lansing (USA) (2012/07/21).
- 17) Solvi F. Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Second order learning and the evolution of mental representation, *The 13th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE XIII)*, Lansing (USA) (2012/07/20).

〔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・大学院情報科学研究科・准教授

研究者番号:20362296

(2)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

(3)研究協力者

Prof. Charles E. Taylor and Prof. Martin L. Cody

Department of Ecology and Evolutionary Biology · University of California, Los Angeles