

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23500176

研究課題名(和文) 共進化型知能創発観に基づく人間の社会性の起源に関する構成的研究

研究課題名(英文) A constructive approach toward the origin of human sociality from the viewpoint of the coevolutionary emergence of intelligence

研究代表者

有田 隆也 (ARITA, Takaya)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：40202759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの本性に関わる言語、心、利他行為の3つに関わる各形質がいかに進化しえたのかという難問に対して、シミュレーション、解析、被験者実験による多面的な構成論的手法によって可能なシナリオを検討することにより、それら3形質が互いに影響しながら共進化してきたという共進化型社会的知能創発仮説を構築し、明確化した。その過程で、利他行為促進システム等の応用可能性を提示した。

研究成果の概要(英文)：This study focused on the origin of the human nature, especially these three traits: language, theory of mind, and altruistic behavior. We used multifaceted constructive methods based on simulation, analysis and experiments with human subjects, and successfully proposed and demonstrated a hypothesis that these traits were coevolved affecting each other. We also explored the possibility for utilizing the results to encourage altruistic behavior in the real world.

研究分野：知能情報学，複雑系科学，人工生命

キーワード：共進化 社会的知能 利他性 言語起源 心の理論 構成論的手法

1. 研究開始当初の背景

ヒトを他の生物とは違う存在たらしめている形質として、1) 協力 (利他行為)、2) 心 (特に「心の理論」)、3) 言語、4) 道具作り、5) 模倣、があげられる。これらヒト独自の形質がいかに獲得されてきたかということは大きな謎である。一方で、近年、現象の本質を抽出して計算論的モデルを構成し、計算機で現象を再現してプロセスやメカニズムの理解を試みる「構成的研究」が盛んである。構成的研究を含む、従来のほとんどの研究は、形質のいずれかを個別に対象としてきた。例外として、計算論的あるいは実証的研究は伴わないが、Szathmáry は上記 5 形質の一体的進化を主張し、Bickerton は 5 形質の最初の 3 形質の推移に関して記述している。

2. 研究の目的

本研究では、「共進化型社会的知能創発仮説」を立てた上で、構成論的手法を用いて、そこに内在する普遍的な進化ダイナミクスや進化シナリオを抽出・理解する。そのダイナミクスの応用可能性も同時に検討する。ここで、「共進化型社会的知能創発仮説」とは、ヒト独自の社会的知能が、言語、心の理論、協力に関わる 3 形質の共進化の中で、形質間相互作用によって選択圧の焦点が 3 形質間をらせん状に移り渡りながら、ヒトの社会性が萌芽・進化したとする説明である。また、ここでの「構成論的手法」は、計算論的モデルに基づく進化シミュレーションと、モデルでの生物進化プロセスを文化進化と解釈した文化進化実験の両者の相補的実行とその数理的・情報論的分析を意味する。これによって、ヒトに特異な知能の進化的基盤の理解が進むことを目的とする。これは、ヒトのアイデンティティの解明の進展を意味する。また、ヒトの知能の成り立ちを理解するための新しい方法論としての、進化シミュレーションやエージェントベースモデリングから構成される構成的手法の有効性を示す。得られた知見、特に、社会的知能に関する進化ダイナミクスや進化シナリオを応用することも検討する。

3. 研究の方法

ヒト独自の 3 形質に関する基盤の創発を検討するためのミニマムな計算論的モデルを構築し、進化ダイナミクスや進化シナリオを検討する。また、同等モデルについて被験者を使った実験を行い、生物進化と文化進化の関わりに関する理解を深める。これらの結果を踏まえ、形質進化の間に相互作用を導入し、3 形質間の共進化に基づく知能創発のシナリオを詳細に検討する。同時に、これらの適応プロセスの基盤として学習の果たす役割の進化的推移を分析する。ヒトに特異な知能の進化的基盤に関する得られた知見について、従来の知見や言説との比較評価に基づき位置付ける。また、それらの知見から応用

可能性を検討する。

4. 研究成果

「共進化型社会的知能創発仮説」(図 1) に基づいて、言語、心の理論、協力にそれぞれ関わる形質の進化に関して、以下のように研究成果が得られた。

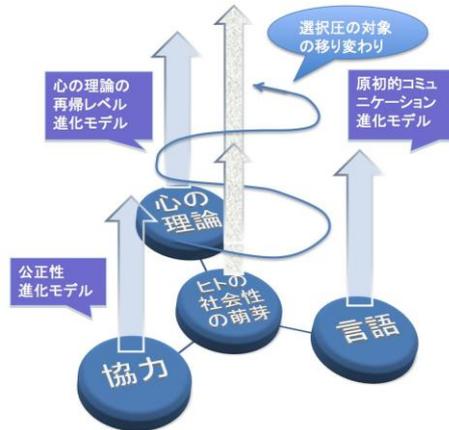


図 1 共進化型社会的知能創発仮説の概要

(1) 言語に関わる形質に関しては、言語に関する二者間関係を利得行列で表す単純な関係を縮約する一方、ダイナミカルな信号交換をゲーム前交渉として行う枠組みを洗練させた上で、Kirby らの「伝搬連鎖パラダイム」を採用し、被験者間に多様なコミュニケーションが文化進化で創発するか実験を行った。その結果、ゲーム設定において、多様なコミュニケーションが文化進化によって創発することが示された。また、2 者間の競合度が低いほどゲームが成功することが示された。

また、コミュニケーションの起源や進化を考えるためのインタラクティブ・マイノリティゲームを提案した。リカレント型ニューラルネットワークで構成された 3 体のエージェントを用いて、ゲーム前コミュニケーションの進化を調べた。その結果、コミュニケーションにおいて、適応的な調停の振る舞いや振動する振る舞いが創発することが確認された。

さらに、脳と言語の共進化モデルを一次元版に洗練した上で、詳細な分析を行い、共進化のプロセスの理解を深めた。生物進化と文化進化の速度差の問題に取り組み、特に測定時間間隔への依存問題を定量的に分析し、生物進化と文化進化の速度差について、移動エントロピーによる検討によって、その実態を明確化した。その結果、生物進化は短時間スケールでは文化進化に追いつけないものの、ある閾値を越えた時間スケールで見ると共進化しうることを定量的に示した。

(2) 心の理論に関わる形質に関しては、脳を機能レベルでモデル化し、対人コミュニケーション行動の情報処理構造の基盤を明らか

にするため、脳のダイナミクスを含む社会場面の行動モデル構築を行い、複数エージェント間の協力タスクを対象に計算機シミュレーションを行った。その結果、インタラクションする相手の内部状態に応じた心の理論を処理する回路が学習を通しダイナミックに獲得されることを示すことができた。さらに、人間を用いた実験も開始し、心の理論に関する基礎的結果も得られた。

また、心の理論を実現する基盤的形質として、「心的表象」にターゲットをしぼって構成論的にアプローチした。具体的には、異なるレベルの適応プロセスの相互作用が、環境と心の同型性を生み出すという考えから、「2次の学習が心的表象の機能を生み出す」という仮説をたてた。そして、計算機実験によりそれをサポートする結果を得た。さらに、この仮説を発展させて、心の理論の起源に関わることを示す計算機シミュレーションにより、「心の理論」の進化的基盤を説明することに成功した。一方で、メタ認知の問題にも取り組み、「知っていることを知っている能力」を神経修飾モデルによって創発させることを示した。

(3) 協力に関わる形質に関しては、ナッシュ要求ゲームを拡張して、D-Iゲームを定義した上で、ゲーム論的分析、進化シミュレーション、リプリケータダイナミクスの3手法に基づく検討を行った。その結果、公正性に関わる3つの規範が存在すること、そのうちの1つは、リバタリアニズム的であるが、実現される社会における利得は平等主義から構成される社会と同じく理想的であることなどを示した。さらに、人間を被験者とした行動実験も行うための3つの手法を考案した。被験者実験の結果、そのうちの進化シミュレーションと同様な多様な戦略が文化進化により創発することが示された。

さらに、資源の二重の創発特性を考慮した「配分のジレンマゲーム」を考案し、配分的正義が創発しうる条件を明らかにした。プレイヤー間に社会的構造を導入することにより、適度な空間的局所性が強力に進化に重要であることを明らかにした。また、協力の構築において、第3者が当事者を媒介する行動の適応性の検討を行った。

以上の3形質の共進化において、多かれ少なかれ共通して関連する、基本的な個体間インタラクションの進化に関する理論的検討を行った。具体的には、定量的な形質とその形質の可塑性の両者が進化しうるシンプルな計算論的モデルを設定して、方向性選択と正の頻度依存選択の両者が働きうる状況を実現した上で、個体間インタラクションに基づくダイナミクスのもとで学習が進化を促進しうる条件を明らかにすることができた。また、資源の競合が生じる種の間での動的な配分において表現型可塑性が果たす役割で

ある。非対称な可塑性の進化が起こることが示された。

提案仮説の応用可能性の一端を探るために、協利行為の促進を促すようなシステムのプラットフォームを考案した。心理メカニズムに基づく協利促進に関わる印象、感情を明示化、共通化、可操作化し、さらに文化進化ダイナミクスを利用することにより、ヒトの持つ協利関係を築く先天的な心理傾向の強化を狙うというものである。被験者実験を行い、基本的な枠組みの検証を行った。

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15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 (査読有).
DOI: 10.1371/journal.pone.0116901
- 2) Fuki Ueno and Takaya Arita: The Role of the Emergent Property of Resource in the Evolution of Distributive Altruism based on Spatial Reciprocity, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 20, No. 1, pp. 78-85, 2015 (査読有).
DOI: 10.1007/s10015-015-0198-9
- 3) Kazuaki Kojima and Takaya Arita: Evolution of Three Norms of Distributive Justice in an Extended Nash Demand Game, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 18, No. 3, pp. 409-417, 2014 (査読有).
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=JACII001800030022.xml>
- 4) 鈴木 麗瑩, 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, 2014年9月号 (Vol. 53), pp. 794-800, 2014 (査読有).
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020213660>
- 5) Solvi Fylgja Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Selection for Representation in Higher-order Adaptation, *Minds and Machines*, Vol. 25, Issue 1, pp. 73-95, 2015 (査読有).
DOI: 10.1007/s11023-015-9360-3
- 6) 有田隆也: 言語進化問題への人工生命アプローチで明らかになるヒトの独自性,

- シミュレーション, Vol. 32, No. 2, pp. 97-105, 2013 (査読有).
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009625044>
- 7) Reiji Suzuki and Takaya Arita: A Simple Computational Model of the Evolution of a Communicative Trait and its Phenotypic Plasticity, *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 330, pp. 37-44, 2013 (査読有).
 DOI: 10.1016/j.jtbi.2013.04.006
- 8) 西本恵太, 下原勝憲, イヴァンタネヴ, 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), Vol. 6, No. 3, pp. 124-133, 2013 (査読有).
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009656651>
- 9) Takuro Kojima, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Effects of Ecological Inheritance on Coevolution of Cooperative Behaviors and Physically Niche Constructing Behaviors, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 18, No. 3, pp. 391-400, 2014 (査読有).
<http://www.fujipress.jp/finder/xslt.php?mode=present&inputfile=JACII01800030020.xml>
- 10) Solvi Fylgja 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*, Volume 2013, Article ID 841646, 13 pages, 2013 (査読有).
 DOI: 10.1155/2013/841646
- 11) Kazuaki Kojima and Takaya Arita: How Do Equity Norms Evolve? - An Evolutionary Game Theory Approach to Distributive Justice, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 17, No. 2, pp. 287-292, 2012 (査読有).
 DOI: 10.1007/s10015-012-0057-x
- 12) Kengo Kobayashi, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Emergence of Autocatalytic Reaction in a Meme Propagation Model Based on Particle Motion, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 17, No. 1, pp. 92-96, 2012 (査読有).
 DOI: 10.1007/s10015-012-0032-6
- 13) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Visualizing Language Evolution as an Emergent Phenomenon based on Biological Evolution and Learning, *Artificial Life and Robotics*, Vol. 16, No. 3, pp. 366-372, 2011 (査読有).
 DOI: 10.1007/s10015-011-0953-5
- 14) Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolution of Cooperation on Different Combinations of Interaction and Replacement Networks with Various Intensity of Selection, *International Journal of Bio-inspired Computation*, Vol. 3, No. 3, pp. 151-158, 2011 (査読有).
 DOI: 10.1504/IJBIC.2011.040313
- 15) Kenichi Minoya, Tatsuo Unemi, Reiji Suzuki, and Takaya Arita: A Constructive Approach to the Evolution of the Planning Ability, *International Journal of Artificial Life Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 22-35, 2011 (査読有).
 DOI: 10.4018/jalr.2011070103
- [学会発表] (計14件)
- 1) 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, 2015年1月22日, ビーコンプラザ(別府, 大分).
- 2) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Gene-culture Coevolution of Language: Measurement-interval Dependence of Evolutionary Rate, The Fourteenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE 14), 2014年8月2日, ニューヨーク(アメリカ).
- 3) Solvi Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Using Second Order Learning to Evolve Social Representation (Theory of Mind), The 8th International Conference on Bio-inspired Information and Communications Technologies (BICT2014), 8 pages, 2014年12月2日, ボストン(アメリカ).
- 4) Fuki Ueno and Takaya Arita: The Role of the Emergent Property of Resource in the Evolution of Distributive Altruism based on Spatial Reciprocity,

- The 19th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2014年1月22日, ビーコンプラザ (別府, 大分).
- 5) 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, 2014年1月24日, ビーコンプラザ (別府, 大分).
 - 6) Solvi F. Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Evolution of Social Representation in Neural Networks, The 12th European Conference on Artificial Life, 2013年9月5日, タオルミーナ (イタリア).
 - 7) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Cyclic Behavior in Gene-Culture Coevolution Mediated by Phenotypic Plasticity in Language, The 12th European Conference on Artificial Life, 2013年9月4日, タオルミーナ (イタリア).
 - 8) Keita Nishimoto, Ivan Tanev, Katsunori Shimohara, Reiji Suzuki, Takaya Arita: The Evolution of Pre-play Communication in the Interactive Minority Game, The 18th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2013年1月31日, ビーコンプラザ (別府, 大分).
 - 9) Kazuaki Kojima and Takaya Arita: Evolution of Three Equity Norms of Distributive Justice in an Extended Nash Demand Game, The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and the 13th International Symposium on Advanced Intelligent Systems 2012 (SCIS-ISIS2012), 2012年11月21日, 神戸コンベンションセンター (神戸, 兵庫).
 - 10) Keita Nishimoto, Ivan Tanev, Katsunori Shimohara, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Coevolutionary Dynamics between Roles and Social Sensitivity in an Extended Minority Game, The Thirteenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE XIII), 2012年7月21日, イーストランシング (アメリカ).
 - 11) Solvi Arnold, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Second Order Learning and the Evolution of Mental Representation, The Thirteenth International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems (ALIFE XIII), 2012年7月20日, イーストランシング (アメリカ).
 - 12) 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 (The 9th International Conference on the Evolution of Language (EvolangIX)), 2012年3月13日, キャンパスプラザ京都 (京都, 日本).
 - 13) Kazuaki Kojima and Takaya Arita: How Do Equity Norms Evolve? - An Evolutionary Game Theory Approach to Distributive Justice, The 17th International Symposium on Artificial Life and Robotics, (2012年1月19日, ビーコンプラザ (別府, 大分).
 - 14) Kenichi Minoya, Takaya Arita and Takashi Omori: An Artificial Life Approach for Investigating the Emergence of a Theory of Mind based on a Functional Model of the Brain, 2011 IEEE Symposium on Artificial Life, 2011年4月14日, パリ (フランス).
- [図書] (計1件)
- 1) 有田 隆也: 生物から生命へ, 筑摩書房, 2012.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
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) 連携研究者
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