

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500131

研究課題名(和文) 言語起源の根本問題に対する創発的言語観に基づく構成論的アプローチ

研究課題名(英文) A Constructive Approach to the Fundamental Aspects of the Origin of Language from an Emergence Perspective

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

研究成果の概要(和文)：人間のアイデンティティに関わる言語起源の根本的な問題に対して創発的言語観に基づいて構成論的アプローチを行った。その結果、極めて限定された条件下でのみコミュニケーションが創発しうることを、言語の進化の過程では学習が大きな役割を果たしてその度合いを調整しながら言語のレベルを進化させていくこと、さらに、個体集団が複数のグループに分かれている構造が利他的な話し手を適応的にすることにより言語進化を促進することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We conducted a constructive approach to the fundamental aspects of the origin of language from an emergence perspective. Evolutionary simulations showed that communication could emerge under the restricted conditions, learning could play an important role in the evolution of communication levels, and population structure could accelerate language evolution by making altruistic speakers adaptive.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

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：知能情報処理, 創発システム

1. 研究開始当初の背景

言語起源への現在の関心の高まりは1990年代初頭から顕著となった。計算論的モデルの構築による構成論的手法に基づく研究は大きな役割を演じてきており、申請者はパイオニア的役割の一部を担った。近年、計算論的モデルに基づく言語起源の研究は、言語学者 J. Hurford や S. Kirby, ロボット工学者 L. Steels, ゲーム理論研究者 M. Nowak, 複

雑系科学者橋本敬らによって積極的に行われている。申請者は、次の3つの根本問題に対する解決指針の明確化が計算論的モデル研究の進展に不可欠と考え、ここ10年ほど、多面的に研究してきた。その結果、次のように、3つの方向性を持つ解決指針が定まり、言語起源に直接アプローチする段階に入ったと考えた。

1) 計算論的モデルに基づく多くの言語進化研究では、a) コミュニケーション成立で両者の適応度が同等に増加し、b) 話し手と聞き手の役割が時間的に分かれ、c) 離散的情報が伝達される。しかし、言語創発現象の本質的理解には、前提を取り払い、次のように考えることが重要である。a') 個体間関係は様々な関係を含む中で、b') 同時双方向も含む通信から、聞き手・話し手の役割が創発し、c') もともと仕草や声などの連続値を取る媒体で表されるシグナルから離散的記号が表出したはずである。これらの問題意識を総称し「原初的コミュニケーションの創発問題」と呼ぶ。本計画では、両者の関係をゲーム理論の利得行列で表す単純な関係に縮約する一方、この3条件を満たすダイナミカルなシグナル交換をゲーム前の交渉として行うという枠組みを扱う。これにより、どのようなコミュニケーションがどのような関係において創発して利得がどう変化するか、両者の関係を網羅的に変化させて調べることができる。

2) 言語能力の適応度は他個体に依存（頻度依存）するので、適応的体系（たとえば構文の改良）をもつコミュニケーションが可能な突然変異体であっても、それを誰も理解できなければ適応的にならないという言語に本質的な問題があり、言語の適応進化の説明にはこの問題の解決が必要である。これを「言語における相手依存の適応度の問題」と呼ぶ。この問題は、基本的には進化と学習の相互作用（Baldwin 効果）によって解決可能であると申請者は考える。進化と学習の相互作用に関しては、Hinton と Nowlan の先駆的研究以来、活発になされてきたが、ほぼすべての研究が単純な適応度地形を想定したものであった。申請者らは、頻度依存の進化シナリオや最近では凸凹な適応度地形での進化シナリオを示すのに成功した。基本的なアイデアは、「学習による見かけ上の適応度の増加により、適応度地形の谷間を横断することが可能となり、その後、遺伝的同化によって（ラマルク進化なしに）学習で獲得していた形質が遺伝子に獲得される」というものである。突然変異体との適応的コミュニケーションが可能な学習個体が広まり、さらに遺伝的同化によって生得的な形質へ進化することの繰り返しが言語進化をもたらす。

3) 話し手と聞き手は基本的に非対称であり、聞き手に有用な情報を伝えるとき、話し手にメリットがない場合があり、聞き耳を立てる沈黙個体の増加傾向が想定される。さらに、話し手が嘘の情報で聞き手を欺くこともありうる。したがって、個体レベルの適応進化だけでコミュニケーション創発を説明する

のは難しい。聞き耳個体や嘘つきのような利己的個体を言語的フリーライダーと捉え、この問題を「言語におけるフリーライダー問題」と呼ぶ。自然選択を集団レベルに適用するグループ選択の概念は古い歴史を持つが、最近、血縁選択も包含する「マルチレベル選択」という現代理論として再構築されつつある。グループ間に多様性があると、グループ内選択を上回るグループ間選択の力が働きフリーライダーが排除される。ただし、最大の問題は、グループ間の多様性が存在しても、各グループでは最終的にはグループ内選択でフリーライダーばかりになる点である。これに対し、Pepper らは、環境に応じた移住（環境フィードバック）が集団間の多様性を作り出すことを示した。さらに、申請者らは、より一般的なメカニズム（環境応答移住）を提案し、環境悪化に加速的に移住確率を高める応答が重要であることや、進化メカニズムの導入で「創始者効果」が相乗的に働き、協調進化を促進することを示した。ただし、言語創発との関連（言語的フリーライダー等）に関しては未検討である。

2. 研究の目的

まず、「原初的コミュニケーションの創発問題」に関しては、リカレント型ニューラルネットワークで表現される2個体間の関係を利得行列で表し、ゲーム前の交渉として3条件を満たすダイナミカルなコミュニケーションを行う枠組みを採用してアプローチする。進化的アルゴリズムによりニューラルネットワークの結合重みを進化させ、どのようなタイプの原初的コミュニケーションが創発するか、利得行列の表す2個体間の関係を網羅的に変えて、詳細な分析を通して明らかにする。さらに、2個体間の関係をN個体間の関係に拡張した場合についても明らかにする。

「言語における相手依存適応度の問題」については、凸凹の関数を設定し、各個体の適応度はペア個体の関数値と同じ（同等の複雑度を持つ統語システムを有する）場合にのみ適応的であるとして、言語現象の特質を表す相手依存の適応度関数を定義する。この設定に基づき、表現型の可塑性自体も遺伝子に含めた個体表現を用い、適応度地形上の位置とともに可塑性自体も進化させる。これにより、可塑性の伸縮を利用することで、いかに頻度依存の適応度地形を登ることが可能となるか明らかにする。さらに、このような遺伝子の垂直伝播だけでなく、文化的な水平伝播も加えた拡張モデルを用いた表現型可塑性進化のモデルを検討し、多様な言葉の存在が学習のメリットを増すことや、進化過程で言語自体が話しやすいものに変化することなど、

言語に特異な現象の影響も明らかにする。

「言語におけるフリーライダー問題」に関しては、コミュニケーション創発に関する典型的な利得行列を選択し、グループ構造化した上で、「環境応答移住に基づくマルチレベル選択」がいかに言語的フリーライダーの進化を抑制するか明らかにする。特に、マルチレベル選択を加えた場合に、コミュニケーションによる適応度向上率がどのような条件下でもっとも増加するか特定する。また、限定された条件下でハミルトンの法則を適応した理論解析を行い、その予測と比較する。

さらに、創発型コミュニケーションの応用として、実進化型群ロボットシステムによるタスク実行の状況に置き換えて実験する。さらに、研究の成果に応じて、創発型コミュニケーションに基づく実進化型群ロボットシステムとしての応用のための方法論を検討する。

3. 研究の方法

まず、「原初的コミュニケーションの創発問題」に対して、コミュニケーション創発の基本モデルを作成して計算機実験を行い、2個体間の関係に応じて、コミュニケーションが創発するか、創発した場合にはそれがいかなるものか詳細に分析して分類する。また、「言語における相手依存の適応度の問題」に対して、表現型可塑性がいかなる進化シナリオでこの問題を解決しうるか、言語の有する頻度依存の特徴を表す最小限の適応度関数を設定した基本モデルと、言語現象により特化した発展モデルの両者によって検討する。

引き続き、検討したコミュニケーション創発の基本モデルを基にして拡張したモデルを検討する。また、「言語におけるフリーライダー問題」に対しても、環境応答移住に基づくマルチレベル選択による進化を導入して計算機実験を行う。

最終ステージでは、実進化型群ロボットシステムを用い、実世界におけるロボット動作によって評価するとともに、創発型コミュニケーションを自律分散型システムにおいて応用するための方法論を検討する。最後に、言語起源に関する従来の知見との整合性や位置づけを評価する。

4. 研究成果

第一に、まず、本研究全体の基づく「基本的な方法論」を対象とした。具体的には、心の理論、感情、言語などを「作って理解する科学」がいかなるものか、その方法論的な根拠、科学としての根拠を検討した。特に、従来の枚挙的帰納法や仮説演繹法とは大きく異なり、創発現象を重視しながら、要素間の

関係や動的特性を計算論的、あるいは数学的に記述し、計算機の中で時間発展させ、興味深い創発現象を起こし得たときに、その挙動を従来の仮説や法則の中に位置付けながら解釈することによって、従来の検証のループに代替するプロセスを構成し、科学としての根拠を持ちうることを示した。

第二に、「原初的コミュニケーションの創発問題」を検討した。具体的には、シグナリングに基づく交渉とゲーム戦略決定という2段階から構成される枠組みを用いたエージェントベースモデルを設計し、ゲームの利得に基づいた進化シミュレーションを行った。その結果、譲る合図を示すタイミングで調停する「収束型」と両者のシグナルの共振で調停する「振動型」という2つのコミュニケーションの型が創発した。さらに、それらのコミュニケーションを明らかにするために情報量などの指標を用いて分析した。

さらに、コミュニケーション創発の基本モデルを拡張し、網羅的にシグナルの進化する領域の探索を行った。その結果、個体間が複雑にカップリングしたコミュニケーション（たとえば振動型）は容易には創発せず、譲るタイミングをある時点で知らせる収束型が、きわめて限定されたゲーム領域で創発することが確認された。

第三に、「言語における相手依存適応度の問題」を検討した。具体的には、個体間相互作用に起因する動的環境としてコミュニケーション能力とその学習可能性（表現型可塑性）の進化を取り上げ、個体ベースモデルによる進化実験に基づいて、ヒトの言語能力に代表されるような複雑かつ適応的なコミュニケーション能力の進化可能性に学習が果たす役割について検討した。個体が学習しない比較実験ではコミュニケーションレベルは増加しないが、学習する場合にはボールドウィン効果が繰り返し生じ、集団が段階的に高いレベルを獲得していくことが示された。

また、違った角度からのアプローチとして、コミュニケーションに関する表現型可塑性の進化モデルを次のように拡張した。可能な言語が存在する空間を極座標で表し、先天的にもつ言語の位置する点として各個体を表すことにより可視化する。各個体は他個体とコミュニケーションを可能とする可塑性の大きさも遺伝的に有する。このモデルで、会話可能な個体数がメリット、可塑性の大きさがコストと働く適応度を設定して進化させた。その結果、ボールドウィン効果が言語進化を加速することが示された。

第四に、「言語におけるフリーライダー問題」に取り組んだ。具体的には、環境応答移住に基づくマルチレベル選択モデルに基づくエージェントベースモデルにより、語彙の進化における話し手の利他性の進化を検討

した。語彙行列を持つエージェント間で言語ゲームを各グループ内で総当たり式に行う。次に、設定した移住関数(利得に対する移住確率で定義)を用いて、移住個体を選び、グループ間で移住させる。その後、利得に比例した割合で子孫個体を複製する。この際、一定確率で突然変異を起こす。これを繰り返す進化実験を行った結果、マルチレベル選択が話し手の利他性を進化させることが確認できた。さらに、詳細な検討により、集団の構造が話し手の利他性を進化させうること、さらに単一集団においても、似た遺伝的情報をもつ個体が言葉を理解しやすいという、血縁選択に類推するメカニズムが非明示的に働き、利他性促進の圧を生むことも示された。また、Bickerton の仮説を支持する結果も得られた。

また、利他性に関する研究の発展として、フリーライダー個体を抑えるメカニズムの一般的な考察を行った。具体的には、物の分配における平等性の創発を調べるためのモデル(D-Iモデル)を考案し、均衡解の解析、および進化実験を行った。ナッシュ考案のDemandゲームに対し、要求の量だけでなく、要求の強さも戦略としてもたせるものである。その結果、対称的な規範をもつ進化シナリオをデモンストレーションすることができた。

第五に、「創発型コミュニケーションの応用」を検討した。具体的には、ロボット間で優良遺伝子の交換というインタラクションを行う実進化型ロボットシステムに、先行評価を行う共進化系を導入するロボットシステムの構築を行った。その際、環境評価系として、単純な関数を採用した場合とニューラルネットワークを使用した場合を比較した。実験の結果、基本的にはこの問題設定では、単純な関数を使用した場合にスムーズな進化が実現することがわかった。これらを通じて、実進化型群ロボットシステムの応用に向けての方向性を示した。

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 6 件)

- 1) Tsubasa Azumagakito, Reiji Suzuki and Takaya Arita: Visualizing Language Evolution as an Emergent Phenomenon based on Biological Evolution and Learning, *Artificial Life and Robotics*, 査読有 (印刷中).
- 2) 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*, 査読有 (印刷中).

- 3) Kana Sugiura and Takaya Arita: Why we talk?: Altruism and multilevel selection in the origin of language, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, Vol. 15, No. 4, pp. 431-435, 2010.
- 4) 中井淳一, 有田隆也: 実進化型 2 足歩行ロボットシステムへの先行評価の導入, 人工知能学会誌, 査読有, Vol. 25, No. 3, pp. 388-393, 2010.
- 5) 有田隆也: 人工生命モデルによる構成的研究の方法論, 人工知能学会誌, 査読有, Vol. 24, No. 2, pp. 253-259, 2009.
- 6) 有田隆也: コミュニケーションの創発, 計測と制御, 査読有, Vol. 48, No. 1, pp. 39-46, 2009.

[学会発表] (計 6 件)

- 1) 有田隆也: Visualizing Language Evolution as an Emergent Phenomenon based on Biological Evolution and Learning, 16th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2011 年 1 月 27 日, 別府/日本.
- 2) 鈴木麗璽: Effects of Temporal Locality of Ecological Processes on Coevolution of Learning and Niche Construction, *Artificial Life XII*, 2010 年 8 月 22 日, オーデンセ/デンマーク.
- 3) 有田隆也: Why we talk?: Altruism and multilevel selection in the origin of language, 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2010 年 2 月 5 日, 別府/日本.
- 4) 有田隆也: A framework for embodied evolution with pre-evaluation applied to a biped robot, 15th International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2010 年 2 月 4 日, 別府/日本.
- 5) 鈴木麗璽: Coevolution of Learning and Niche Construction, 9th Asia-Pacific Complex Systems Conference, 2009 年 11 月 5 日, 東京/日本.
- 6) 鈴木麗璽: How Learning Can Guide Evolution of Communication, *Artificial Life XI*, 2008 年 8 月 6 日, ウィンチェスター/イギリス.

[図書] (計 1 件)

- 1) Takaya Arita and Yasuyuki Suzuki: Evolution and Cooperation: How to Evolve a Cooperative Team,

Introduction to Modern Robotics (ed.
by Sho Yokota and Daisuke Chugo),
iConcept (印刷中).

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

鈴木 麗瑩 (SUZUKI REIJI)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・准教授

授

研究者番号：20362296