

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 9 月 24 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700291

研究課題名(和文)動物の行動文法の定量化とその構造特性の解明

研究課題名(英文)A quantitative study of action grammars in animals and their structural properties

## 研究代表者

笹原 和俊 (SASAHARA, Kazutoshi)

名古屋大学・情報科学研究科・助教

研究者番号：60415172

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、動物の「行動文法」(行動の規則)の構造特性を複数の動物種を対象として比較分析し、複雑な行動を生み出す計算能力の特徴を定量的に明らかにした。具体的には、オオムジツグミモドキのさえずり(歌)の構造がスモールワールド構造を持つこと、チャバライカルの歌の地域差が音要素の共有ネットワークのクラスターを形成することを示した。また、キンカチョウとジュウシマツの歌の系列構造の発達は、新生児の喃語の発達過程と類似性があることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We have studied behavioral rules or action grammars in animals by comparing structural properties of behavioral sequences among different animals, addressing computational abilities that generate complex behaviors. In particular, we demonstrated that the structure of the California Thrasher song has a small-world architecture and the Black-Headed Grosbeaks in different locations exhibit distinct clusters in their syllable-sharing structure. Furthermore, we revealed that songbirds (the Zebra finch and the Bengalese finch) and human infants do share the similar developmental constraints in a combinatorial sequential ability for vocal sequence.

研究分野：情報行動学

キーワード：行動生物学 定量化手法

1. 研究開始当初の背景

言語進化研究の変遷

言葉はどのように始まり、どうしてこのような形式になったのか。なぜヒトだけが言葉話し、動物は話さないのか。言語進化の問題は多くの研究者を惹きつけ、様々な研究がなされてきたが、答えは未だに謎のままである。それどころか、科学的根拠のない仮説かが流布された結果、1866年にパリ言語学会でこの話題が禁止されるなど、長い間タブーとされてきた。

しかし、動物の前言語的機能とヒトの言語機能を比較することで、その起源と進化にアプローチする生物言語学の登場によって、言語進化研究は新しい局面を迎えた。特に大きな影響を与えたのが「広義の言語機能」(FLB)と「狭義の言語機能」(FLN)という考え方である。FLBは、ヒトと動物に共通する一般的な認知能力のことである。一方、FLNには物事を階層的に操作する計算能力が含まれるとされ、これは「再帰」(Recursion)と呼ばれる。FLNとFLBが相互作用することで始めて言語が成立し、再帰はヒト固有の能力だと考えられている。

この仮説が出て以降、動物行動に再帰的計算能力の萌芽を探す試みが盛んに行われるようになった。

動物行動研究の新しい展開

このような経緯で、動物行動を計算能力という軸で比較するという新しい視点をもたらされた。これまでの研究では専ら統計的手法が用いられ、行動の構造が研究されることはあまりなかった。

しかし近年、鳥類のさえずり(歌)の研究において、ジュウシマツの歌には文法的構造があることが発見され(図1)、動物行動の構造が注目されるようになった。私は、計算論的学習理論やネットワーク理論を応用して歌構造を抽出する手法を提案してきた。現在、行動データの定量化手法が提案されるようになり、行動を生成する構造特性を種を超えて比較する準備ができてきた。

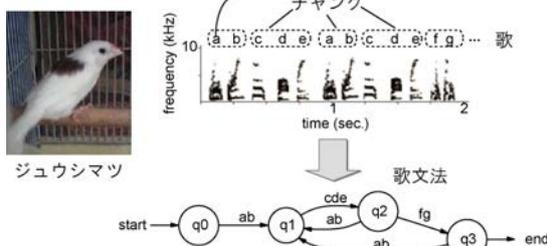


図1: ジュウシマツのさえずり(歌)と歌文法 (音要素の遷移規則)

鳥類やクジラの歌、マウスやラットの採餌行動、サルは道具使用、これらはいずれも多様な行動単位を組み合わせ、系列的に組織化

することで成立する複雑な行動である。このような行動の規則をGreenfieldに習い「行動文法」(Action Grammar)と呼ぶ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、動物の「行動文法」(行動の規則)の構造特性を複数の動物を対象として比較分析し、複雑な行動を生み出す計算能力の特徴を定量的に明らかにすることである。さらに、新たな行動系列の分析方法を提案し、行動文法の有効な定量化手法を標準化することを目指す。

まず、4種類の動物を対象として分析を行う。鳥類からはキンカチョウ、ジュウシマツ、オオムジツグミモドキの歌を採取する。鳥類以外にはげっ歯類のデグーの行動データを採取する。デグーは道具を使用することが報告されており、その行動文法は興味深い。

採取した行動データに対して、既に確立している手法を用いて、その適用範囲を見極めながら行動文法を定量化する。

3. 研究の方法

本研究では、複数の動物種の行動系列を分析対象とする。鳥類からはキンカチョウ(Zebra finch)、ジュウシマツ(Bengalese finch)、オオムジツグミモドキ(California Thrasher)のさえずり(歌)を採取する。歌を構成する要素数および歌の複雑さはこの順番で大きくなるので、比較の目安となる。鳥類以外では、げっ歯類の行動データを分析対象とする。

採取した行動データに対して、既に確立している手法を用いて、その適用範囲を見極めながら行動文法を定量化する。

キンカチョウやジュウシマツの歌のように、数個ないし十数個程度の要素からなる定型性の高い行動データでは、「正例からの学習」と呼ばれる手法が有効である。この手法は、行動要素を記号で表した系列データから行動単位を特定し、最小の有限オートマトンを行動文法として出力する(図2)。

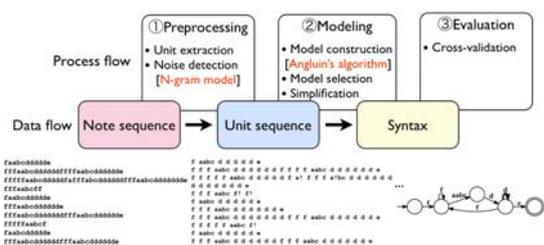


図2: 歌の系列データから歌文法を抽出する手法の概念図。データの前処理、モデル化、モデルの評価の三段階からなる。

一方、オオムジツグミモドキの歌のように、多様な要素が確率的に配置された定型性の低い行動データでは、この方法は適用できない。この場合、要素間の遷移をネットワークとして表現し、平均経路長や平均クラスター係数などの統計量で構造を評価する方が良い。また、ネットワークによる解析手法を異なる地域に生息する鳥類のさえずりの比較にも使用できるように手法を拡張する。

本研究は3人の共同研究者、岡ノ谷一夫教授（東京大学大学院総合文化研究科）、Ofer Tchernichovski 教授（Department of Psychology, City University of New York, Hunter College）、Charles Taylor 教授（Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of California, Los Angeles）に行動データの採取に関してご協力いただく。岡ノ谷教授は、ジュウシマツの歌文法を発見した方で、東京大学駒場キャンパス内の施設でジュウシマツを、理化学研究所の施設でデグーを飼育している。定期的にかがってデータ採取を行う。Tchernichovski 教授は、キンカチョウを用いて歌の発達学習や文化進化に関する数々の重要な発見をした方で、ニューヨーク市立大学内施設でキンカチョウを飼育している。Taylor 教授は鳥類の野外調査を専門とし、北カリフォルニアに生息するオオムジツグミモドキの歌を研究している。以上2名の海外の共同研究者のもとに、年に一度、短期滞在してデータを採取し、予備解析と議論を行う。本研究の成果は、全て共著論文として出版する。

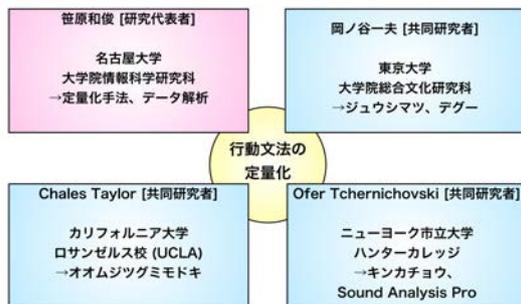


図 3：研究体制

#### 4. 研究成果

共同研究者のもとでデータの採取を行い、当初予定していたキンカチョウ、ジュウシマツ、オオムジツグミモドキの歌以外に、チャバライカル(Black-headed Grosbeak)の歌を採取した。チャバライカルの歌は、カリフォルニア州やワイオミング州など複数地域で採取した。鳥類の行動系列データ以外では、げっ歯類のデグー (Octodon degus) の自発的行動のデータをビデオ撮影した。しかし、デグーの場合、通常の飼育状態ではアクティ

ブな活動が見られなかったため、今回の分析対象からは除外した。今後、求愛活動など特定の行動文脈において、どのような解析が可能かを検討することとした。

キンカチョウとジュウシマツの歌に関しては、発達過程における歌の系列構造、特に音要素間の遷移の多様性の変化を定量化し、比較した。また、これらの鳥類の系列構造の変化と新生児の喃語の発達過程に類似性があることを共同研究によって突き止めた。この研究成果は Nature 紙に掲載された①。

また、ジュウシマツのさえずりの時間構造(リズム)の発達を定量化する「リズムランドスケープ」の手法を開発した。この手法では、音要素のオンセット間の時間間隔を発達にわたり計測したデータを可視化・定量化するというものである。この手法を用いてジュウシマツのさえずりのリズム発達に適用した結果、さえずりが時間モードの分岐と水路化を伴って発達することを明らかにした(図4)。これはワディントンの発達理論が予測する特徴と一致する。これらの結果については、現在、論文を準備中である。

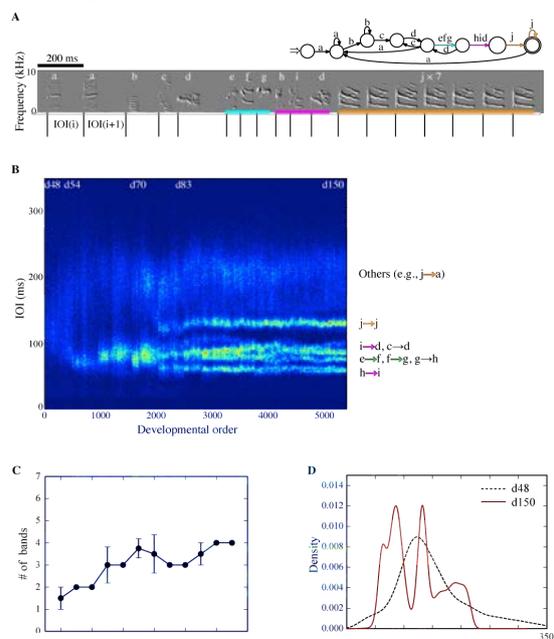


図 4：ジュウシマツのさえずりの発達。(A) 成鳥のソナグラム。(B)リズムランドスケープの例。(C) リズムランドスケープ(B)のバンド数の変化。(D) 48日齢と150日齢のリズムランドスケープの断面。K. Sasahara et al. (投稿中)

オムジツグミモドキの歌に関しては、この種の音要素間の遷移ネットワークがスモールワールド構造をもつことがわかっているため(②と④)、それをさらに複数個体で分析し、確かにそうであることを追加で確認した。この分析手法は他の研究グループにも採用され、オオムジツグミモドキ以外にも同様の性質が確認されている。

カリフォルニア州やワイオミング州などの複数地域のチャパライカルの歌に関して、複雑ネットワークを用いてこれらのデータの地域差を解析する方法を提案した。その結果、異なる地域の歌がネットワークのクラスターに分かれて表現されることを示した(図5)。また、生息地域が異なっても音要素レベルでは高い割合で共有されるのに対して、音要素間の遷移はほとんど共有されないことがわかった(図6)。これは、歌学習や個体認知の性質を反映した特徴だと推測される。

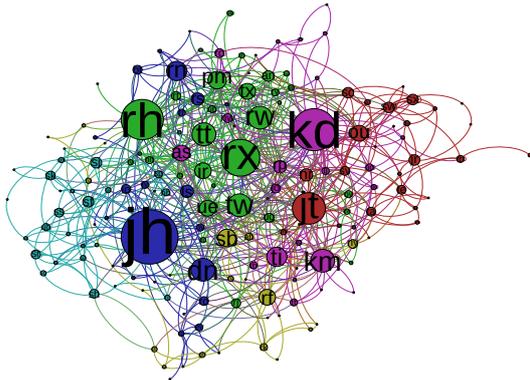


図 5: 複数地域のチャパライカルの音要素の共有ネットワーク。色は音要素クラスターを表す。(学会発表①のスライドより)



図 6: 複数地域のチャパライカルの音要素および遷移の共有割合。(学会発表①のスライドより)

分析手法の標準化に向けては、2013年10月にテネシー大学で開催されたワークショップ「Analyzing Animal Vocal Sequences」に参加し、行動系列の定量化手法に関して議論を行った。ここでは、理論生物学から行動生態学の研究者まで、様々な分野の研究者が一堂に会し、情報交換を行った。その後、参加者全員で共著論文①を出版した。オオムジツグミモドキとチャパライカルの歌のデータに関しては、その他の②に記載したサイトで公開されている。

以上の一連の研究を通じて、動物の行動文法の構特性を比較分析し、複雑な行動を生み出す計算能力の特徴を定量的にするための基礎を確立することができた。今後の発展が期待できる。

## 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 5 件)

- ① A. Kershenbaum et al (46 人中 36 番目). Acoustic Sequences in Non-Human Animals: A Tutorial Review and Prospectus, *Biological Reviews*. 2014 (published online). 査読有
- ② 笹原和俊. 鳥の複雑なさえずりの進化的デザイン (招待論文), *京都大学数理解析研究所講究録* 1917. pp. 159-163, 2014. 査読有
- ③ D. Lipkind, G. Marcus, D. Bemis, K. Sasahara, J. Nori, M. Takahasi, K. Suzuki, O. Feher, P. Ravbar, K. Okanoya, and O. Tchernichovski. Stepwise Acquisition of Vocal Combinatorial Capacity in Songbirds and Human Infants. *Nature* 498, pp.104-108. 2013. 査読有
- ④ K. Sasahara, M. L. Cody, D. Cohen, and C. E. Taylor, Structural Design Principles of Complex Bird Songs: A Network-Based Approach. *PLoS ONE* 7(9): e44436. 2012 .査読有
- ⑤ 笹原和俊, 高橋美樹, 鈴木研太, 岡ノ谷一夫, 大規模データに基づく動物行動学の新展開. *人工知能学会誌* 27(4). pp.418-423. 2012. 査読有

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① K. Sasahara. Exploring Birdsong Structure Using Networks. 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics. 招待講演. 2015.1
- ② K. Sasahara. Modeling Birdsong Syntax: Network-based Approaches. Birdsong: Rhythms and Clues from Neurons to Behavior. 招待講演. 2014.11
- ③ 笹原和俊. 鳥のさえずりの発達学習ダイナミクス. 総合コミュニケーション学第1回研究会. 2014.6
- ④ 笹原和俊. 鳥の複雑なさえずりの進化的デザイン. 第10回生物数学の理論と応用. 2013.11
- ⑤ 笹原和俊, M. L. Cody, C. E. Taylor, 鳥の複雑なさえずりの進化的デザイン. 日本動物行動学会第31回大会

〔図書〕(計 1 件)

- ① 笹原和俊. 「社会ネットワーク」他3項目. 『行動生物学辞典』(上田恵介他編). 東京化学同人. 2013.11

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

- ① <http://colorlessgreen.info>
- ② <http://taylor0.biology.ucla.edu/birdDBQuery/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

笹原 和俊 (SASAHARA, Kazutoshi)  
名古屋大学 情報科学研究科・助教  
研究者番号：60415172

### (2)研究分担者

( )

研究者番号：

### (3)連携研究者

( )

研究者番号：