

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18005

研究課題名(和文)「鳴く」生物の省エネルギー戦略に潜む数理法則の解明と応用

研究課題名(英文) Modeling and application of energy-efficient behavior in calling animals

研究代表者

合原 一究 (Aihara, Ikkyu)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：70588516

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：「カエルや昆虫といった動物が長時間スケールで発声状態と無音状態を切り替える行動を記述する数理モデルを構築し、無線センサネットワークの制御に応用すること」を目的とした。まず、疲労度、エネルギーなどの内部自由度に応じて、鳴く状態と鳴かない状態を切り替える数理モデルを構築し、数値シミュレーションによって長時間での消費エネルギーの低減性能を評価した。次に、実際に複数種の動物の発声行動を計測し、長時間スケールでは複数の状態を間欠的に切り替えていることを見出した。最後に、無線センサネットワークへの応用可能性を数値的に検証し、中規模なネットワークでの安定した動作を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は生物の音声コミュニケーションを詳細に観測し、その成果に基づいて新しい通信方式を目指すものである。生物は進化の過程で多用かつ洗練された行動を実現しており、そのメカニズムの解明は生物学的にも応用上も重要である。本研究では、カエルや昆虫が近くの個体と鳴くタイミングをずらしたり、突然鳴き止んだりする行動に着目した。鳴くためには大きなエネルギー消費を伴うことから、これらの行動には個体間で良好なコミュニケーション状態を維持しつつ、長時間に渡っては消費エネルギーを低減する機能が期待できる。本研究では、このような機能を備えた数理モデルを提案し、無線センサネットワークの通信制御への有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project was to propose a hybrid dynamical model incorporating the switching between calling state and silent state and apply the model to the autonomous distributed control of wireless sensor networks. First, we proposed the model in which each animal switches between calling state and silent state depending on their interval conditions as well as the interactions with others and numerically evaluated the energy efficiency of the proposed model. Second, we carried out indoor experiments and field recordings and quantified dynamical features of the behavioral switching in multiple species. Third, we performed numerical simulations on the assumption of several wireless sensor networks and confirmed that the proposed model allows us to established well communication and energy efficiency in the assumed networks.

研究分野：非線形動力学

キーワード：動物行動学 数理モデリング 音響計測 通信技術 バイオミメティクス

## 1. 研究開始当初の背景

多数の個体で構成される集団において、生物は優れた戦略をとる。アリやミツバチは群れの中で役割をうまく分担し、鳥は群れで飛行する際にその配置を柔軟に変化させる。これらの生物は人間や人工システムよりも遥かに少ないエネルギーで生活しており、進化の過程で優れた行動メカニズムを獲得したものと考えられる。このような生物の行動は、生物に学ぶ新しい技術(バイオミメティクス)の観点からも近年注目を集めている。

本研究で扱うカエルや昆虫は音を操る代表的な生物である。視覚の効きづらい暗闇で繁殖するために、オスは求愛を目的とした鳴き声を発する。その際、何十匹もの個体が限られた範囲に集まり、長時間に渡って鳴き声を発する。しかし、体力を大きく消費する発声行動を常に持続することはできず、あいまで発声を停止する行動が観察できる。しかし、これらの行動選択が集団の機能にどのような影響を与えるのかは不明な点が多い。

本課題の核心をなす問いは、「生物はどのようなルールに従って休息すれば、集団として高いパフォーマンスを維持できるのか?」である。鳴き声を発する種のカエルや昆虫は、集団として発声状態を長時間持続できれば、それだけ多くのメスを集められる。例えば、周辺個体との相互作用によって発声状態と鳴かない状態をうまく切り替えれば、群れ全体として省エネルギー化につながる。このような生物の優れた省エネルギー戦略を数理法則として抽出できれば、未知の行動メカニズムの解明に加えて、実社会への応用も期待できる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、「カエルや昆虫といった動物が長時間スケールで発声状態と無音状態を切り替える行動を記述する数理モデルを構築し、その数理モデルを拡張して無線センサネットワークの自律分散型制御に応用すること」を目的とした。

## 3. 研究の方法

上記の目的を達成するために以下の課題に取り組んだ:

課題1: 内部自由度に応じて力学系を切り替えるハイブリッド力学モデルの提案と解析

課題2: 実際の生物から取得した実験データに基づく行動特性分析

課題3: 無線センサネットワークへの応用を志向した提案モデルの改良と解析

課題1では、疲労度、エネルギーなどの内部自由度および他個体との相互作用に応じて、鳴く状態と鳴かない状態を切り替える数理モデルの構築を進めた。この数理モデルを用いた数値シミュレーションおよび実験データの解析によって、間欠的かつ同期して状態を切り替える現象を定性的に説明した(項目4の査読付き学術論文1)。また、数理モデルの未知パラメータを求める手法を実際に取得した行動データに応用し、相互作用の法則性を数理モデルとして抽出した(項目4の査読付き学術論文2)。次に、課題2については複数種の動物の鳴き声の計測データを分析し、種に応じた発声行動特性の違い

を明らかにした（項目4の査読付き学術論文1、3、国内学会での発表1、2）。この際、鳴き声計測用の音響計測システムを新たに構築し、その有効性を野外環境で検証した（項目4の査読付き学術論文3）。最後に、課題3については、対象とする無線センサネットワークの空間構造について様々なケースを想定した数値シミュレーションを進めた。その結果、小規模ないしは中規模なネットワークにおいて、提案手法が安定して動作することを確認した（項目4の査読付き学術論文1、国際学会での発表1、国内学会での発表3、4）。

#### 4. 研究成果

本研究課題で得られた代表的な成果を以下に記載する。なお、査読付き学術論文1の成果については、アウトリーチのために筑波大学および大阪大学からプレスリリースし新聞等の報道機関にてご紹介いただいた。

##### 査読付き学術論文1：

I. Aihara (\* corresponding author), D. Kominami, Y. Hirano, & M. Murata, "Mathematical Modelling and Application of Frog Choruses as an Autonomous Distributed Communication System," *Royal Society Open Science*, 6:181117 (2019).

##### 査読付き学術論文2：

K. Ota, I. Aihara (\* corresponding author), & T. Aoyagi, "Interaction mechanisms quantified from dynamical features of frog choruses," *Royal Society of Open Science*, 7, Article Number 191693 (2020).

##### 査読付き学術論文3：

H. Awano, M. Shirasaka, T. Mizumoto, H.G. Okuno, & I. Aihara (\* corresponding author). "Visualization of a chorus structure in multiple frog species by a sound discrimination device," *Journal of Comparative Physiology A*, Vol. 207, pp. 87-98 (2021).

##### 国際会議での発表1：

I. Aihara, D. Kominami, Y. Hosokawa, M. Murata, "Modeling and application of frog choruses as an autonomous distributed communication system over multiple time scales," *the 3rd International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics (SWARM)*, Okinawa, November 2019.

##### 国内学会での発表1：

白坂誠浩, 武田龍, 河辺徹, 合原一究, 「音響計測に基づくスズムシの鳴き交わしの特徴分析」, 動物行動学会, 2020年9月.

##### 国内学会での発表2：

白坂誠浩, 武田龍, 河辺徹, 合原一究, 「音響計測と信号処理に基づくスズムシの鳴き

交わしの特徴分析」、生態学会、2021年3月。

国内学会での発表3：

合原一究、小南大智、細川侑嗣、村田正幸、「カエルの合唱法則に学ぶ通信方式の提案」、電子情報通信学会総合大会、2019年3月。(招待講演)

国内学会での発表4：

細川侑嗣、小南大智、合原一究、村田正幸、「ニホンアマガエルのサテライト行動に着想を得た LPWA ネットワークのカバレッジ設計手法」、電子情報通信学会ネットワークシステム研究会(NS2019-86)、2020年3月。

筑波大学および大阪大学からのプレスリリース：

<https://www.tsukuba.ac.jp/journal/technology-materials/20190109093325.html>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 H. Awano, M. Shirasaka, T. Mizumoto, H.G. Okuno, I. Aihara	4. 巻 107
2. 論文標題 Visualization of a chorus structure in multiple frog species by a sound discrimination device	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Comparative Physiology A	6. 最初と最後の頁 87-98
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00359-021-01463-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Ota, I. Aihara, T. Aoyagi	4. 巻 7
2. 論文標題 Interaction mechanisms quantified from dynamical features of frog choruses	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsos.191693	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 H. Legett, I. Aihara, X. Bernal	4. 巻 39
2. 論文標題 Signal Synchrony and Alternation Among Neighbor Males in a Japanese Stream Breeding Treefrog, <i>Buergeria japonica</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Herpetological Society of Japan	6. 最初と最後の頁 80-85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5358/hsj.39.80	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 H. Legett, R. Madden, I. Aihara, X. Bernal	4. 巻 126
2. 論文標題 Traffic noise differentially impacts call types in a Japanese treefrog ( <i>Buergeria japonica</i> )	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ethology	6. 最初と最後の頁 576-583
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/eth.13009	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 I. Aihara, D. Kominami, Y. Hirano and M. Murata	4. 巻 6
2. 論文標題 Mathematical Modelling and Application of Frog Choruses as an Autonomous Distributed Communication System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Royal Society Open Science	6. 最初と最後の頁 181117
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsos.181117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 白坂誠浩, 武田龍, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 音響計測と信号処理に基づくスズムシの鳴き交わしの特徴分析
3. 学会等名 生態学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白坂誠浩, 武田龍, 河辺徹, 合原一究
2. 発表標題 音響計測に基づくスズムシの鳴き交わしの特徴分析
3. 学会等名 動物行動学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 カエルの合唱法則の実験的・数理的研究
3. 学会等名 京都大学MACSセミナー
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 情報学で紐解くカエルの合唱法則
3. 学会等名 第38回京都大学地球環境フォーラム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Hosokawa, Y. Hirano, D. Kominami, I. Aihara, M. Murata
2. 発表標題 Implementation of a real-time sound source localization method for outdoor animal detection using wireless sensor networks
3. 学会等名 International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Kaneko, I. Aihara, T. Kawabe
2. 発表標題 A Computational Study and its Application of Strategic Mating Behavior in Frogs
3. 学会等名 The Twenty-Fifth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Shirasaka, I. Aihara, H. Awano, T. Kawabe
2. 発表標題 Development and application of a sound discrimination device for field recordings on choruses of male Japanese tree frogs
3. 学会等名 生物音響学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ishimaru, I. Aihara, R. Takeda, T. Kawabe
2. 発表標題 Interaction mechanism of male cicadas ( <i>Meimuna opalifera</i> ) examined by audio recording and signal processing
3. 学会等名 生物音響学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 I. Aihara, D. Kominami, Y. Hosokawa, M. Murata
2. 発表標題 Modeling and Application of Frog Choruses as an Autonomous Distributed Communication System over Multiple Time Scales
3. 学会等名 SWARM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 那須悠太, 合原一究, 武田龍, 青柳富誌生
2. 発表標題 カエルの合唱における相互作用の非自明な特徴
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 I. Aihara
2. 発表標題 Modeling of Biological Rhythms
3. 学会等名 Workshop at Lorentz Center: Synchrony and Rhythmic Interaction: From Neurons to Ecology (招待講演)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 細川侑嗣, 小南大智, 合原一究, 村田正幸
2. 発表標題 二ホンアマガエルのサテライト行動に着想を得たLPWA ネットワークのカバレッジ設計手法,
3. 学会等名 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会 (NS2019-86)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Ishimaru, R. Kaneko, I. Aihara, T. ODA, H. HINO, and T. Kawabe
2. 発表標題 Development of a frog-robot and its application to the behavioral experiment of wild frogs
3. 学会等名 第40回日本比較生理生化学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Kaneko, I. Aihara, T. Kawabe
2. 発表標題 A computational study on an energy-efficient mating strategy of male frogs
3. 学会等名 第40回日本比較生理生化学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 I. Aihara
2. 発表標題 Spatio-temporal Structure and its Role
3. 学会等名 第40回日本比較生理生化学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 合原一究
2. 発表標題 カエルの合唱構造と寄生者との関係
3. 学会等名 第63回日本応用動物昆虫学会大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 合原一究、小南大智、細川侑嗣、村田正幸
2. 発表標題 カエルの合唱法則に学ぶ通信方式の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀之内翔大，合原一究，青柳富誌生
2. 発表標題 位相振動子モデルに基づいたカエルの鳴き声の相互作用の解析と統計的検証
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

筑波大学からのプレスリリース「カエルの合唱法則の研究と通信システムへの応用」  
<https://www.tsukuba.ac.jp/journal/technology-materials/20190109093325.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------