

ニホンアマガエルの発声行動における時空間構造

Spatio-temporal Structure

in Calling Behavior of Japanese Tree Frogs

合原 一究
Ikkyu Aihara

京都大学大学院・理学研究科・物理学宇宙物理学専攻・物理学第一教室・非線形動力学研究室, 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, ikkyu@ton.scphys.kyoto-u.ac.jp,
Department of Physics, Graduate School of Sciences,
Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan.

概要

We experimentally observed antisynchronization in calling behavior of two interacting Japanese tree frogs[1]. Moreover, we modeled calling behavior of two or three Japanese tree frogs as a system of coupled phase oscillators, and theoretically confirmed that spatial structure can affect the synchronization modes especially in calling behavior of three frogs[2,3].

Keywords

Synchronization, Calling Behavior, Japanese Tree Frogs, Frustration, Spatio-temporal Structure.

1 はじめに

ニホンアマガエルは南は屋久島から北は北海道までの日本全域に生息する、一般によく知られたカエルである(図1)。オスは単独では周期的に鳴く一方で、目の後ろに鼓膜を備えており他の個体の鳴き声を認識できる。そのため、水田におけるアマガエルの集団発声行動は、単独では周期的に振る舞う振動子が複数個体空間的に分布し、互いに影響を及ぼしあう状況として近似的にとらえることができる。

講演者らはニホンアマガエルの発声行動に注目し、



図 1: ニホンアマガエル。

その実験的・理論的研究を行っている [1,2,3]。特に、2匹のアマガエルの発声行動においては、交互に鳴く逆相同期現象を実験的に観測した [1]。本講演においては、3匹のアマガエルの発声行動の数理モデリングおよびその分岐解析、リアプノフ関数解析結果 [3] を中心に、発声行動における空間的配置が同期状態に影響を与える可能性についても言及したい。

2 3匹のアマガエルの発声行動

3匹のアマガエルが鳴き交わす状況を考える。2匹では交互に鳴く逆相同期現象が実験的に観測されることがわかったが、3匹の場合にはすべてのペアが互いに逆位相で同期することは出来ない。講演者らは、このようなフラストレーションが内在する系において、どのような非線形現象が起きるかを、結

合振動子系の数理モデルを用いて理論的に明らかにしてきた [2,3]。本節では、その概要を紹介する。

まず3匹のニホンアマガエルの鳴き交わす状況を次式でモデル化する：

$$\begin{aligned}\frac{d\theta_a}{dt} &= \omega_a - K_{ab} \sin(\theta_b - \theta_a) - K_{ac} \sin(\theta_c - \theta_a), \\ \frac{d\theta_b}{dt} &= \omega_b - K_{ab} \sin(\theta_a - \theta_b) - K_{bc} \sin(\theta_c - \theta_b), \\ \frac{d\theta_c}{dt} &= \omega_c - K_{ac} \sin(\theta_a - \theta_c) - K_{bc} \sin(\theta_b - \theta_c).\end{aligned}$$

ここで、 $\theta_i (i = a, b, c)$ はそれぞれのカエルの発声タイミングを表す位相を、 $\omega_i (i = a, b, c)$ は固有周波数をモデル化している。上式において、カエル同士の相互作用を一次の正弦波関数を用いて表している。これによって、それぞれのペアは逆位相 π で同期しやすいという性質を表現することになる [3]。ここで、よく知られた蔵本モデルとは相互作用項の符号が逆になっていることに注意してほしい [3,4]。

講演者らは、上記のモデルに対して、分岐解析およびリアプノフ関数解析を行なった [2,3]。その結果、上式におけるパラメーター ω_c および K_{ac} を変化させた場合、その値に応じて様々な同期状態や分岐現象が起こることが明らかになった。また、新たな変数 $\psi_i = \theta_i - \Omega t (i = a, b, c)$ を用い、この系におけるリアプノフ関数 H を以下のように定義することで、その性質を理論的に調べた [3]：

$$H = - \sum_i (\omega_i - \Omega) \psi_i + \frac{1}{2} \sum_{i,j} K_{ij} \cos(\psi_i - \psi_j).$$

(ただし、 $i = a, b, c$ に対して $K_{ii} = 0$ とする。) これらの理論的な解析結果と、実際のカエルの発声行動との対応を調べるのは今後の重要な課題である。

3 考察

上記の研究により、個体間の結合強度の値に応じて、様々な同期状態が起こることがわかってきた。ここで、ニホンアマガエルは音声を介した相互作用をしていること踏まえると、実際の発声行動において、個体間の距離は相互作用の大きさに影響を与えると推測される。なぜなら、アマガエル同士が互いに離れている場合には鳴き声が減衰して小さくなるため弱く相互作用し、互いに近くにいる場合には鳴き声が大きく聞こえるので強く相互作用すると考え

られるからである。講演者らが理論的に明らかにした同期状態の結合強度への依存性は、カエル達が置かれている空間的な配置が同期状態に影響を及ぼす可能性を示唆するものとして理解できるだろう。

4 まとめ

我々の行ってきた研究から、2匹のアマガエルは交互に鳴く傾向があること、そして結合振動子系の数理モデルを用いて現象の定性的な説明ができることがわかってきた。一方で、3体系についても結合振動子系の数理モデルを用いた分岐解析およびリアプノフ関数を行なうことで、その振る舞いを理論的に明らかにした。

ただし、実際の水田では何十匹といったアマガエルが鳴き交わしており、空間的にも移動することが出来る。そのため、水田における集団発声行動は時々刻々と空間構造を変化させる結合振動子系として理解できるだろう。このような状況を実験的かつ理論的に研究するのは今後の課題である。

謝辞

本研究に関して、貴重な御議論をいただいた京都大学大学院情報学研究科の武田龍さん、水本武志さん、高橋徹助教、奥乃博教授、京都大学大学院理学研究科の太田隆夫教授、東京大学生産技術研究所の合原一幸教授に感謝いたします。

参考文献

- [1] I.Aihara et al. : IEICE TRANSACTIONS on FUNDAMENTALS , Vol.E90-A , No.10 (2007) , pp.2154-2161 .
- [2] I.Aihara et al. : Artificial Life and Robotics , Vol.12 , No.1-2 (2008) , pp.29-32 .
- [3] I.Aihara and K.Tsumoto : Mathematical Biosciences 214 (2008) , pp.6-10 .
- [4] Yoshiki Kuramoto : Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence , Springer-Verlag (1984) .