

ニホンアマガエルの同期した発声行動に関する 数理的研究および音響信号解析

京都大学大学院・理学研究科 合原 一究 (Ikkyu Aihara)
Graduate School of Sciences, Kyoto University
京都大学大学院・情報学研究科 武田 龍 (Ryu Takeda)
水本 武志 (Takeshi Mizumoto)
高橋 徹 (Toru Takahashi)
奥乃 博 (Hiroshi G. Okuno)
Graduate School of Informatics, Kyoto University

1 イントロダクション

同期現象は、ホタルの集団発光や振り子時計の振動現象など、単独では周期的に振る舞う素子（振動子）が互いに影響を及ぼす状況、すなわち結合振動子系において広く観察されてきた [1]。一方で、同期現象に関する理論研究としては、複数のリミットサイクル振動子が結合した系の振る舞いを、位相という変数のみで記述できることを示した位相縮約が特に有名である。例えば、 N 個のリミットサイクル振動子集団の弱結合状態での振る舞いは近似的に以下の式で記述される [2]：

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \sum_{j=1}^N \Gamma_{ij}(\theta_i - \theta_j), \quad (1)$$

ここで、 θ_i (ただし $i = 1, 2, \dots, N$) は個々の振動子の位相を、 ω_i は固有周波数を、 $\Gamma_{ij}(\phi_{ij})$ (ただし $\phi_{ij} \equiv \theta_i - \theta_j$) は i 番目の振動子と j 番目の振動子の相互作用関数を表している。式 (1) は位相方程式とも呼ばれ、系の詳細に依らず様々な現象を数理的に記述できることが実証されてきた [3, 4]。近年でも、空間構造を時々刻々変化させる結合振動子系 [5] や共通ノイズに対する引き込み現象 [6]、振動子集団のフィードバック制御 [7] などの研究が盛んに行なわれており、同期現象は理論的にも実験的にも広く興味を集め続けている研究対象と言える。

著者らは、ニホンアマガエル (図 1 (a) 参照) の同期した発声行動を実験的・数理的に研究してきた [8]。ニホンアマガエルは、南は屋久島から北は北海道までのほぼ日本全域に生息し、春から夏にかけて水田などのフィールドで多数の個体が鳴き交わす様子を観察できる [9]。オスのアマガエルは単独ではほぼ周期的に鳴く一方、鼓膜を用いて周囲の音声を認識することが知られている。著者らはまず室内での録音実験を行いアマガエルの同期した発声行動を実験的に明らかにする一方で、結合振動子系の数理モデルを導入しその振る舞いを解析することで同期した発声行動のメカニズムを数理的に研究してきた。本稿では、まず著者らによる 2 匹ないしは 3 匹の発声行動に関する研究成果 [10–12] を概説する。その上で、最近取り組んでいるフィールドでのアマガエル集

団発声行動の解明を目的とした、独立成分分析（ICA）の実験データへの応用研究および音源定位デバイス「カエルホタル」の開発研究を紹介する。

2 2匹のアマガエルの発声行動に関する数理的・実験的研究

著者らは、ニホンアマガエルの発声行動を録音する室内実験を行ない、単独ではほぼ周期的に鳴く一方で、2匹では交互に鳴く傾向を明らかにした(図1(b)参照) [10]。これは、2つの位相振動子がほぼ逆位相 π で同期する現象として数理的には理解できる。カエルが交互に鳴く性質についてはいくつか例が知られている [13] が、ニホンアマガエルの逆相同期現象に関する報告は著者らの研究が初めてである。他方で、数理モデルを用いた解析を行ない、観測した同期現象の定性的な説明を試みた。まず、位相方程式(式(1))を元に、2匹のアマガエルの発声行動を次式でモデル化した [11,12]：

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \sum_{j=1}^2 K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i). \quad (2)$$

ここで、 K_{ij} は i 番目の振動子と j 番目の振動子との結合強度である (ただし、 $i = 1, 2$ 、 $K_{12} = K_{21} > 0$ 、 $K_{ii} = 0$ とする)。著者らは、式(2)の振る舞いを解析的に調べ、たとえば固有周波数の差 $|\omega_1 - \omega_2|$ が結合強度 K_{12} よりも十分小さい時に、逆相同期状態が安定に存在することを示した [11,12]。

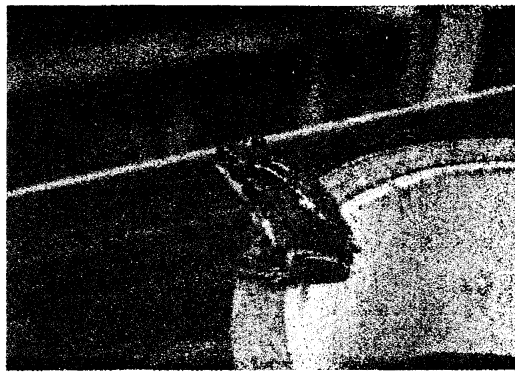
さらに、単独ないしは2匹の発声データを詳しく解析することで、逆相同期中は単独での発声行動中よりも周期(コール間間隔 [13])が長くなる傾向を見出した [14]。式(2)は、逆相同期というほぼ π の位相差を保つ同期現象を定性的に説明するが、このような周期が伸びる現象は説明できない [15]。次に、著者らは式(2)の相互作用関数に時間遅れや $\sin$ 的相互作用からのずれを表すパラメーターを導入することで、同期中の位相差に加えて、周期の変化をも定量的に説明できることを示した [15]。ただし、これらの関数が実際にニホンアマガエルの発声タイミングを制御する相互作用関数とどの程度一致するかはいまだ不明である。2匹の発声行動における非同期データから上記相互作用関数を直接推定し、本モデル解析 [15] の妥当性を議論するのは今後の重要な研究課題である。

3 3匹のアマガエルの発声行動に関する数理的研究

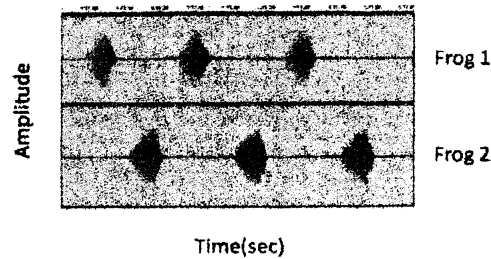
第2章で紹介したように、ニホンアマガエルの場合、2匹では交互にほぼ逆位相 π で同期して鳴く傾向がある。しかしながら、2体系の逆相同期という安定解を直ちに3体系に拡張することは出来ない [8]。すなわち、ニホンアマガエル3匹の発声行動にはフラストレーションが内在するため、2体系と比べてより複雑な非線形現象が観察される可能性がある。フラストレート系は、反強磁性体のスピン配列や真正粘菌の振動現象など多岐に渡り、複数の状態間遷移など多様な現象が観察されることが広く知られている [16,17]。本章では、ニホンアマガエル3匹の数理モデリング、およびそのモデルに対する分岐解析・リアプノフ関数解析結果を紹介する [11,12]。

著者らはアマガエル3匹の発声行動を次式でモデル化した [11,12]：

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \sum_{j=1}^3 K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i). \quad (3)$$



(a)



(b)

図 1: (a) ニホンアマガエル、(b)2 匹の逆相同期発声行動。図 1 (b) は、第 4 章で紹介した手法を用いて分離した、2 匹の発声成分それぞれの音声波形を表している。

(ただし、 $i = 1, 2, 3$ 、 $K_{ij} = K_{ji} > 0$ 、 $K_{ii} = 0$ とする)。ここで、式 (2) と同様に、個体間の相互作用を $\sin$ 関数でモデル化している点に注意してほしい。これにより、個々のペアが逆位相 π で同期しやすいというアマガエル 2 体系の性質を 3 体系に拡張したことになる。次に著者らは、式 (3) の振る舞いを分岐解析により詳細に調べた。具体的には、振動子 1 および振動子 2 の固有の周波数、そして振動子 1,2 間とカエル 2,3 間の結合強度を $\omega_1/2\pi = \omega_2/2\pi = 3.9$ 、 $K_{12}/2\pi = K_{23}/2\pi = 1.0$ に固定し、その上で残った分岐パラメーター ω_3 、 K_{13} を変化させ、この 3 体系の分岐構造を解析した [12]。その結果、 ω_3 と K_{13} の値に応じて、2 対 1 の逆相同期状態や三相同期状態、非同期状態といった多彩な現象が実際に起こりうることを示した。さらに、著者らは式 (3) に対して以下のリアプノフ関数を定義できることを示した [12]：

$$H = -\sum_i (\omega_i - \Omega) \psi_i + \frac{1}{2} \sum_{ij} K_{ij} \cos(\psi_i - \psi_j). \quad (4)$$

ここで、 $\psi_i = \theta_i - \Omega t$ である (ただし Ω は定数とする)。本モデル解析の妥当性を、実際のアマガエル 3 匹の録音実験で検証するのは今後の重要な研究課題である。

4 アマガエル発声行動に関する音響信号解析手法

第 2 章および第 3 章で紹介したように、著者らはニホンアマガエルの発声行動に関する録音実験および数理モデル解析を行ってきた。これまでは、2 匹ないしは 3 匹という少数のアマガエルを研究対象としてきたが、実際のフィールドでは多数の個体が鳴き交わしており、さらに時々刻々その位置を変えていく。このような、多体かつその空間配置が変化する系を実験的に調べるには、フィールドにおける音声分離および音源定位手法を確立する必要がある。著者らは音響信号解析の手法をアマガエルの発声行動研究に応用することで、より効率的かつ大規模なデータ収録およびその解析を目指している。本章では、フィールドでのアマガエル多体系発声行動の解明を目的とした、独立成分分析 (ICA) のアマガエルの発声データへの応用研究および音源定位用デバイス「カエルホタル」の開発研究を紹介する。

独立成分分析 (ICA) は、観測信号から統計的に独立な信号を抽出する時系列データ解析手法である [18]。音声分離に用いる場合でも、対象とする音源の詳細によらず分離が可能のため、様々

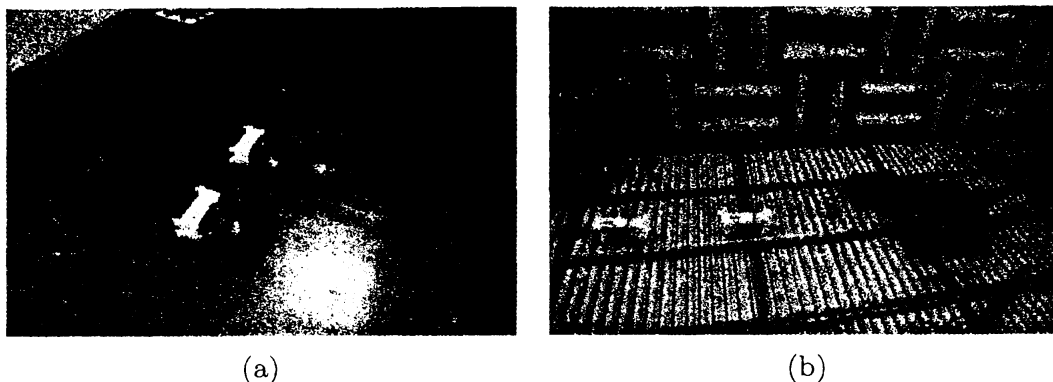


図 2: 室内実験の様子。著者らは、(a) 音が反響する通常の部屋と (b) 無響室の 2 つを使い分け、アマガエル発声行動の音声分離や音源定位に関する実験を行っている。

な音声信号への応用が期待できる。しかし、アマガエルの集団発声行動を含めた動物の行動研究への応用はあまり例がない。ICA を音声分離に用いるには、(1) 対象とする音声信号のヒストグラムが非ガウスのこと、(2) 録音実験に用いるマイクロフォンの数が音源数と同数またはそれよりも多いことの 2 点が要求される。著者らは、アマガエル単独での発声データを解析し上記 (1) を確認した上で、2 つのマイクロフォンを用いて録音した 2 匹のアマガエルの音声データを ICA を用いて解析することで、個々のアマガエルの発声成分を分離した (図 1 (b) および図 2 参照)。第 2 章で述べたように、著者らによる研究 [10] において、2 匹のアマガエルが交互に鳴く逆相同期現象を報告したが、発声成分の分離は行なっていなかった。本解析結果は、ICA の手法をアマガエルの発声データに応用することで、2 匹の逆相同期発声行動をより明確に示した点が重要である。多数のアマガエルの発声成分の分離について研究は現在進行中である。

一方で、著者らは音源定位デバイス「カエルホタル」(図 3 参照) の開発研究を行なってきた [20]。本章の導入部でも紹介したが、フィールドにおけるアマガエル発声行動の特徴として、多個体が同時に鳴き交わすことがあげられる。それに加え、フィールドには対象のアマガエル以外にも、他種のカエルや昆虫など様々な雑音源が存在しその空間分布も広範囲に渡る。一方、従来研究されてきた音源定位手法としては、マイクロフォンアレイによるビームフォーミング [19] などがあげられる。しかし、それらを上記フィールド研究に応用する場合、すなわち水田全体に分布した多数の音源をカバーし、かつ音声分離も同時に行なうには、音源数以上の膨大な数のマイクロフォンおよびそれらを統合する録音設備が必要となる。従って、莫大な金銭的コストがかかることになり、その実現は大変困難である。著者らが開発した「カエルホタル」は、安価に大量の測定装置を構築できるのが特徴である。個々のカエルホタルは、マイクロフォンと LED を中心とした電気回路から構成されており、ある閾値以上の振幅の音声入力があると発光する。さらに、回路に組み込まれた可変抵抗により、発光に必要な閾値をコントロール出来る。そのため、対象とする生物信号の音響的特徴およびその空間分布に応じて「カエルホタル」の特性を柔軟に調整することで、音源定位のみならず発声タイミングの検出をも同時に行える可能性がある。実際に、著者らは多数の「カエルホタル」を 2 次元平面上に設置した状況を数値シミュレーションによって調べ、音源を正確に定位できる可能性を示した [20]。ビームフォーミングを含む従来法との性能比較、および実際のアマガエルを用いた室内実験、フィールドでの実証研究は今後の重要な研究課題である。

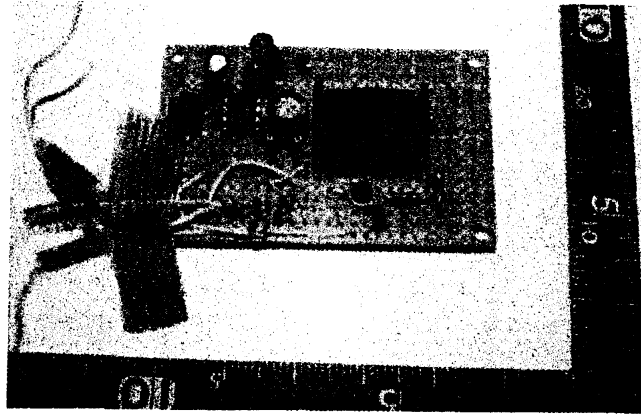


図 3: 音源定位用デバイス「カエルホタル」。

5 まとめ

本稿で紹介したように、著者らはニホンアマガエルの同期した発声行動を実験的・数理的に研究してきた。まず著者らは、2匹のアマガエルの発声行動を録音実験により調べ、交互に鳴く逆相同期現象を発見した [10]。その上で、2体系の逆相同期発声行動を記述する数理モデルを導入し、さらにそのモデルを3体系へ拡張することで3匹のアマガエル発声行動の理論的予測を行った [11,12]。このように、位相方程式においては、2体系の相互作用関数が決まればそれを多体系に拡張するのは比較的容易である。これにより、多体系の振る舞いを実際に予測できる可能性があるのは本モデル解析の重要な点である。アマガエル3匹の発声行動の録音実験は、現在実行中である。

一方で、フィールド調査を目的とした研究として、音声分離および音源定位に関する2つの試みを紹介した。まず、著者らは、独立成分分析 (ICA) の手法をアマガエルの発声データに応用することで、個々のアマガエルの発声成分の分離が可能であることを示した。これにより、特にアマガエル多体系において、1つのマイクロフォンで録音しただけではわからなかった複雑な同期状態が明らかになる可能性がある。さらに、著者らは、音源定位用デバイス「カエルホタル」 [20] を開発し、実際にフィールドでの音源定位に応用できる可能性を数値シミュレーションにより示した。これらの手法をフィールド調査に応用し、その有用性を調べるのは今後の重要な研究課題である。将来的には、数理モデリングによる同期メカニズムの解明および現象の予測に加え、音声分離・音源定位に関する音響情報処理の技術を導入することで、フィールドにおける多数のアマガエルの発声行動を明らかにしていく予定である。

参考文献

- [1] A. Pikovsky et al.: "Synchronization: A universal concept in nonlinear sciences," Cambridge University Press, Cambridge (2001).
- [2] Y. Kuramoto: "Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence," Springer-Verlag., N.Y. (1984).
- [3] Y. Tsubo et al.: European Journal of Neuroscience **25**, 11, pp.3429-3441 (2007).

- [4] J.Miyazaki and S.Kinoshita: Phys. Rev. Lett. **96**, 194101 (2006).
- [5] D.Tanaka: Phys. Rev. Lett. **99**, 134103(2007).
- [6] H.Nakao et al.: Phys. Rev. Lett. **98**, 184101 (2007).
- [7] I.Z.Kiss et al.: Science **316**, 1886-1889 (2007).
- [8] 合原一究：科学, 78:11, pp.1267-1270, 岩波書店 (2008).
- [9] 前田憲男、松井正文: "日本カエル図鑑," 文一総合出版 (1999).
- [10] I. Aihara et al.: IEICE Trans. Fundamentals, E90-A(10), pp2154-2161 (2007).
- [11] I. Aihara et al.: Artificial Life and Robotics, Vol.12, No.1-2, pp.29-32 (2008).
- [12] I. Aihara and K. Tsumoto: Mathematical Biosciences 214, pp.6-10 (2008).
- [13] K.D.Wells: "*The Ecology and Behavior of Amphibians*," The University of Chicago Press, Chicago (2007).
- [14] 寶来 俊介, 合原 一究, 合原 一幸: 電気学会論文誌. C, 電子・情報・システム部門誌, 127(10), pp.1692 -1698 (2007).
- [15] I.Aihara: submitted to Phys. Rev. E.
- [16] H. T. Diep ed. : "*Frustrated Spin Systems*," World Scientific (2005).
- [17] A.Takamatsu et al. : Phys. Rev. Lett. **87**, 078102 (2001).
- [18] A.Hyvarinen et al.: "*Independent Component Analysis*," Wiley-Interscience, New York (2001).
- [19] H. L.Van Tree: "*Optimum Array Processing*," John Wiley and Sons, Inc., New York (2002).
- [20] 水本 武志, 合原一究, 高橋徹, 尾形 哲也, 奥乃 博: 情報処理学会第 71 回全国大会, 6U-5 (2009).