

# 音声可視化デバイス「カエルホタル」による ニホンアマガエル合唱の時空間構造解析

Spatio-temporal Analysis of Frog Choruses using Sound-to-Light Conveting Device *Firefly*

水本 武志<sup>1</sup> 合原 一究<sup>2</sup> 奥乃 博<sup>3</sup>

Takeshi MIZUMOTO Ikkyu AIHARA Hiroshi G. OKUNO

<sup>1</sup> 株式会社ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン<sup>2</sup> 理化学研究所<sup>3</sup> 京都大学

<sup>1</sup> Honda Research Institute Japan, Co., Ltd. <sup>2</sup> RIKEN <sup>3</sup> Kyoto University

t.mizumoto@jp.honda-ri.com ikkyu@brain.riken.jp okuno@i.kyoto-u.ac.jp

## Abstract

本稿では生物の合唱可視化システムと、それを  
用いたニホンアマガエルの合唱の時空間構造  
解析について報告する。ニホンアマガエル  
のような小型の夜行性生物の生息地におけ  
る合唱の時空間構造は、各発声の位置と時  
刻の計測が困難なため明らかではなかつた。  
そこで我々は、音を光に変換するデバイス  
「カエルホタル」によって野外の合唱を可  
視化し、同期状態を解析するシステムを開  
発した。フィールド実験の結果、6匹の合唱  
を観測した。その解析の結果、隣り合う  
個体同士が逆相同期しており、距離の近い  
ペアほど同期が安定していた。

## 1 はじめに

日本では、梅雨の時期にニホンアマガエル (*Hyla japonica*) の合唱が広くみられる (図 1)。彼らの合唱をよく聴いていると、互いにタイミングを合わせているように聞こえることがある。実際、室内で 3 匹のニホンアマガエルを 1 列に配置すると、隣り合う個体同士が交互に鳴いたり (1:2 逆相同期)、各個体がワルツのように順番に鳴く (3 相同期) 現象を観察できる [1]。合唱する種は、カエルに限らず、コオロギ、バッタ、ゴリラ、コウモリなど多く知られている。合唱の目的は、繁殖、縄張りの維持、餌の定位など多岐にわたり、合唱中の個体位置 (空間構造) も、その時間間隔 (時間構造) も様々である。

合唱の時空間構造、すなわち各個体の鳴く位置と時刻、の計測は彼らの音声コミュニケーションを明らかにする上で重要である [2]。典型的には観測者の耳に頼った計測方法が用いられていたが、得られる情報の精度と質には限界があった。特にカエルをはじめとする小型の夜行性生物は、目視が困難な夜間に鳴くうえ、人が近づきすぎると鳴き止むので距離を取らなければならず、野外での詳細な



図 1: ニホンアマガエル (*Hyla japonica*)

音声の計測は困難であった。そのため、音声コミュニケーションの実験は主に屋内で行われていた [2]。

本稿で対象とするニホンアマガエルとその合唱の特徴は以下のとおりである。繁殖期は春から夏であり、その時期に水辺、主に水田に集まって交配する。このときの集団での発声行動が合唱と呼ばれる。鳴くのはオスのみで、鳴き声の種類には、*advertisement call* と呼ばれるメスヘアピールする鳴き声や、*aggressive call* と呼ばれる縄張り維持のための鳴き声などが知られている [2]。各個体は 1 秒間に 3-4 回という高頻度で鳴くので、合唱中は常に複数個体が同時に発声している。体長は通常 3-4cm と小さく、水田では 1-2m の間隔を空けて疎に分布している [3]。

以上の議論から、小型夜行性生物の合唱における時空間構造を計測するシステムは、次の 4 つの要求条件を満足する必要がある。

1. 対象種の生息地で使用可能
2. 複数個体の同時発声を検出可能
3. 動物行動への影響の最小化
4. 多様な空間配置の動物へ適用可能

本稿では、安価で容易に使用できる合唱可視化システム (*Sound Imaging System*) と、それをういたニホンアマガエルの合唱構造の解析について述べる。本システムは、数十の音声可視化デバイス カエルホタル (図 2) と、市販のビデオカメラから構成される。まずカエルホタルを対象生物の合唱するフィールドに配置する。各カエルホタルは

周囲の音を検出して LED 発光に変換するので、ビデオカメラでその発光パターンを録画する。次に動画から LED の輝度時系列を抽出し、それを表示することで合唱の時空間構造を可視化する。さらに各発声時刻の系列から合唱中の同期状態を解析する。本システムは、次のとおり要求条件を満たしている。(1) 生物の生息地に設置して使用可能。(2) 各カエルホタルのマイクは近い位置の音声のみを検出するので、離れた個体が発声すればその個体の近くの LED が光る。したがって、光のパターンから同時発声を検出可能。(3) 発光パターン計測中はフィールドから離れてよい。(4) カエルホタルの配置数や間隔を変えれば異なる空間配置へ応用可能。

本稿の構成は以下のとおりである。まず第 2 節で関連研究をまとめる。次に第 3 節で合唱可視化システムについて述べる。第 4 節でフィールド実験とその結果について議論し、第 5 節で結論を述べる。なお、本論文は文献 [4, 5] の概説である。詳細は文献を参照されたい。

## 2 関連研究

生物学の観点からの音声コミュニケーションについては、古くから様々な種について調べられてきた。たとえば、カエルの合唱や [6, 7]、コオロギの合唱 [8]、コウモリのエコーロケーション [9, 10] などの報告がある。

音声コミュニケーションの計測手法はさまざまな手法が提案されているが、いずれもニホンアマガエルの合唱の計測への適用は困難である。まず、人の耳で聞いて記録する方法は、カエルが多数の個体が同時かつ頻繁に鳴く特徴を持つので、現実的ではない。近年、バイオリギングと呼ばれる動物にデータロガーを装着する方法が広く使われており、ウミガメの回遊ルート [11] やイルカの音声コミュニケーション [12] などが計測されている。この手法の問題はデータロガーのサイズと個体数である。ニホンアマガエルは小型動物なので装着すると行動に影響を与えてしまい、そのうえ数十の全個体に装着しなければ各鳴き声の時空間情報が得られないため、現実的ではない。

マイクアレイ処理による音源定位や音源分離は有望なアプローチである。到達時間差による音源定位が最も広く用いられており、ウシガエルや [13] ヒキガエル [14] などの発声タイミングの推定と行動解析の報告がある。また、複数マイクアレイとその全地球測位システム (GPS) を組み合わせた鳴き声の定位手法も提案されている [15]。これらの手法の問題点は、発声の時間的スパースネスを仮定していることである。ウシガエルやヒキガエルなどの発声間隔の長い種では同時に鳴くことは少ないので問題ないが、ニホンアマガエルではほぼ常に同時発声が生じているので仮定が成立しない。より高度な信号処理手法、たとえば独立成分分析を用いたブラインド音源分離 [16] やロボット聴覚ソフトウェア HARK [17] の使用も考えられるが、

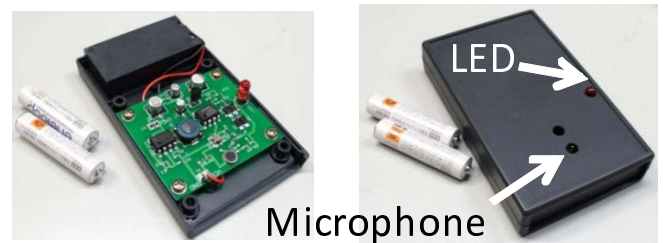


図 2: カエルホタルの写真

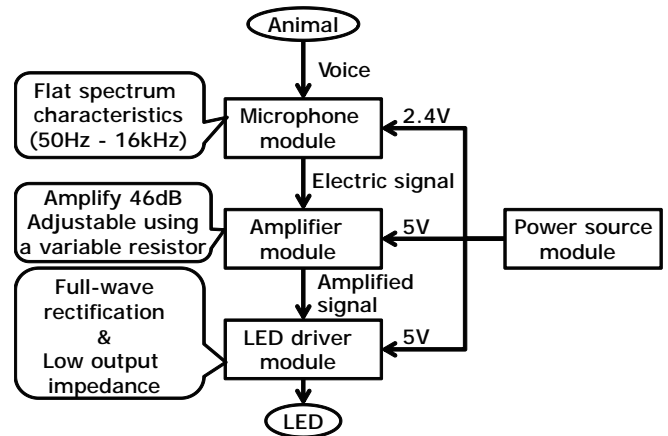


図 3: カエルホタルのブロック図

少なくとも筆者らの経験では合唱中の各音声の信号対雑音比が低すぎて十分な性能は得られなかった。

## 3 音声可視化システム

本節では、音声可視化システムについて概説する。詳細は [4, 5] を参照されたい。

### 3.1 システム概要

本システムは市販のビデオカメラと多数のカエルホタルから構成される。ビデオカメラは、ソニー社のハンディカム (HDR-XR520; 29.97 fps) を用いた。実験では HD モード (解像度 1480×1080) に設定し、三脚で地面に固定して使用した。

カエルホタルは、マイクと調整用可変抵抗、LED、単 4 充電電池 2 本がプラスチックケースに収納されている。図 2 左側にカエルホタルの内部回路を、右側に外観を示す。内部処理は図 3 に示す通り、音声収録、増幅、全波整流と LED 駆動の各回路で構成されている。部品の誤差などによる個体差は、可変抵抗の手動調整で合わせる。LED には赤色を使用する。これは、筆者らの経験からニホンアマガエルは光に近寄る特性 (photopositive) を持つことが分かっており、photopositive な生物は赤色への感度が低いからである [18]。したがって、赤色の使用で行動への影響の最小化が期待できる。また、ビデオカメラはカエルホタルの側面から撮影するため、光の側面からの視認性を高め

る必要がある。そこで、LED にシリコン製キャップを装着して光を拡散している。

### 3.2 音声可視化システムによる計測

音声可視化システムによる合唱の解析は、(1) データ収録、(2) 時空間構造可視化、(3) 同期状態解析から構成される。

#### 3.2.1 データ収録

まずカエルホタルをフィールドに配置し、発光パターンをビデオカメラで収録する。カエルホタルは小雨程度なら動作するのでデータ収録は可能であるが、その場合はビデオカメラを防水ケースで覆うことで故障を防ぐ必要がある。

データ収録で重要な点は次の3点である。2, 3 については対象種に対する知見に基づいているので、他の種の合唱を計測する場合はそれに合わせる必要がある。

1. ビデオカメラはすべてのカエルホタルが見渡せる位置に三脚で固定する。
2. ニホンアマガエルは水田の縁(あぜ道)で鳴くことが知られているので、カエルホタルはあぜ道に沿って等間隔に配置する。
3. ニホンアマガエルは日没後に鳴くので、実験はすべて日没後に行う。

#### 3.2.2 時空間情報可視化

時空間情報の可視化には動画像からのLEDの位置検出と、輝度時系列の抽出が必要となる。このとき問題となるのは、(1) LEDの光が弱いので単独フレームのみでは検出が困難、(2) カエルホタルの輝度特性の個体差の存在の2点である。それぞれに対して、(1) 30秒程度の平均フレームを用いてコントラストを向上することで検出を可能とし、(2) 各輝度時系列の平均値の正規化によって個体差を吸収することで解決する。

時空間情報可視化は5ステップから構成される。

(1) フレーム分割 まず、動画をフレームごとに分割する。ffmpegをはじめとして様々なツールがあるが、我々はPegasys社のTMPGEncを使用した。

(2) 平均フレーム計算 各フレームからNTSC規格[19]に基づいて輝度を計算し、グレイスケールに変換する。

$$I_g(x, y, t) = 0.2989I_R(x, y, t) + 0.5870I_G(x, y, t) + 0.1140I_B(x, y, t) \quad (1)$$

ただし、 $I_g(x, y, t)$ 、 $I_R(x, y, t)$ 、 $I_G(x, y, t)$ 、 $I_B(x, y, t) \in [0, 255]$  はそれぞれ  $t$  フレーム目の座標  $(x, y)$  のピクセルの輝度、赤成分、緑成分、青成分を表す。

こうして求めたグレイスケールのフレームを用いて平均フレーム  $\bar{I}(x, y)$  を計算する。

$$\bar{I}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N I_g(x, y, t) \quad (2)$$

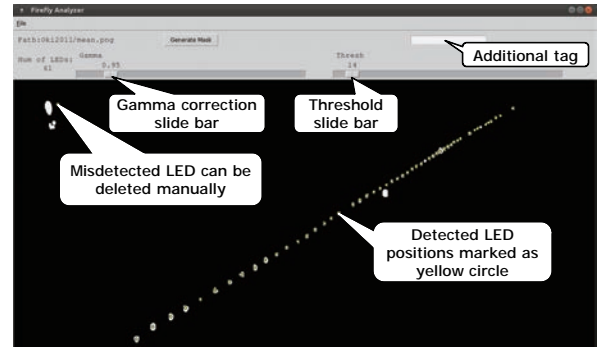


図4: マスク修正GUIツールのスクリーンショット。マウス操作で、誤検出されたマスクの削除や検出に漏れたマスクの追加が可能

ただし、 $N$  は30秒分のフレーム数をあらわす。

(3) LED位置検出とマスク生成 LED部分を抽出するため平均フレームを2値化する。フレームの輝度ヒストグラムは、ほぼすべての領域が0にすべき小さい値を持ち、狭い領域のみが大きな値を持つという特性がある。そこで、次のアルゴリズムで閾値を求める。

まず、閾値  $\theta$  を輝度ヒストグラムの最大値に設定する。次に、頻度が単調減少する間  $\theta$  を増加させる。単調減少が停止したときの値  $\theta$  を2値化の閾値とする。この方法で、0にすべき小さい値の山を0にし、1にすべき大きい値の山の手前に閾値を設定できる。擬似コードは次のとおりである。

```

 $\theta \leftarrow \operatorname{argmax}_i h(i)$ 
while  $h(\theta) > h(\theta + 1)$  and  $\theta < 255$  do
     $\theta \leftarrow \theta + 1$ 
end while

```

ただし、 $i \in [0, 255]$  を輝度、 $h(i)$  を頻度とする。

こうして得られたバイナリ画像を4連結で結合し、各連結成分にラベル(通し番号)を与える。そして誤検出されたラベルをGUIツール(図4)によって手作業で取り除くと、各LEDに対応するマスクが得られる。LED周辺に漏れた光も抽出するため、各ラベルには膨張処理を施す。ビデオカメラは固定しているため、こうして得られたマスクは同一動画内では同じものが使える。

(4) 輝度時系列抽出 マスクのラベルを  $m$  で表すと、第  $m$  マスクのフレーム  $t$  での輝度  $l(m, t)$  は、次式で求まる。

$$l(m, t) = \sum_{x=0}^W \sum_{y=0}^H \left( I_{mask}(x, y, m) I_g(x, y, t) \right) \quad (3)$$

ただし、 $W, H$  はフレームの幅と高さとし、 $I_{mask}(x, y, m) \in [0, 1]$  は座標  $(x, y)$  が第  $m$  マスク内のとき1、マスク外のとき0の値を取るとする。

このままでは、カエルホタルごとの輝度の違いがあるために発声位置・時刻が特定できない。そこで、各マスクご

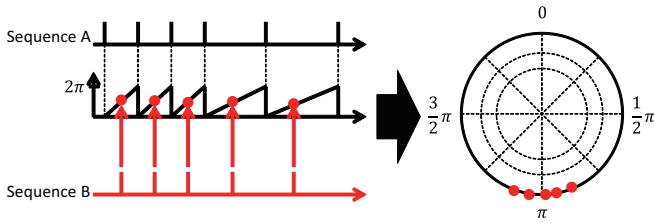


図 5: ストロブスコープ法による同期解析の概要

とに輝度の平均値を求め、それを減算することで個体差を正規化する。そして、輝度の値域を  $[0, 1]$  とするため、輝度の総和で除算する。

(5) 発声位置・時刻検出 最後に、発声時刻と位置を  $l(m, t)$  のローカルピークから求める。1 辺  $L$  の正方形の窓を、 $l$  上にスライドさせ、窓の中央の座標  $(m, t)$  の輝度  $l(m, t)$  が窓内で最大の場合、 $(m, t)$  をローカルピークとする。 $L$  は実験的に 3 とした。

### 3.2.3 同期状態解析

発声位置・時刻からカエルの同期状態を統計的に解析する。まず、近接する 2 匹のカエルの発声系列の同期状態をストロボスコープ法 [20] で求める。図 5 にストロボスコープ法の概要を示す。2 つの発声系列を A, B とし、A の位相を、発声時刻で 0、次の発声時刻で  $2\pi$  となるように線形な単調増加の組み合わせで定義する (図左側)。次に、B の各発声時刻における A の位相をプロットすることで、A と B の位相差を計算できる (図右側)。図 5 の場合、位相差が  $\pi$  に偏っているため、A と B は逆相同期している。

次に、この位相差データから同期状態を統計的に検定する。直感的には、位相差が一様分布であれば発声系列は同期しておらず、いずれかの値に偏っていればその位相差で同期しているといえる。方向統計で用いられる Rayleigh 検定 [21] は、帰無仮説が「位相データは一様分布に従う」なので、これを用いれば位相差が統計的に有意に偏っているかを検定できる。もし有意に偏っているのであれば、そのカエルの組は同期しているといえる。

## 4 フィールド実験

合唱可視化システムを用いた野外でのニホンアマガエルの合唱の解析を行い、本手法の有効性を示す。

### 4.1 実験条件

フィールド実験は 2011 年 6 月 9 日から 16 日にかけて島根県隠岐島の水田で行った。実際に使用した水田の外形を図 6 に示す。なお、カエルホテルを配置したあぜ道は湿った土と高さ 10cm ほどの草に覆われていた。カエルホテルは、図 6 中の赤丸の位置から、同図の矢印で示すあぜ道に沿って 33.8m に渡って 40cm 間隔で配置した。ビデオカ

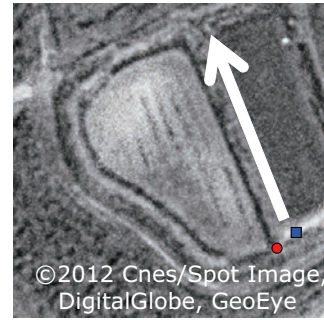


図 6: 実験を行った水田の概形

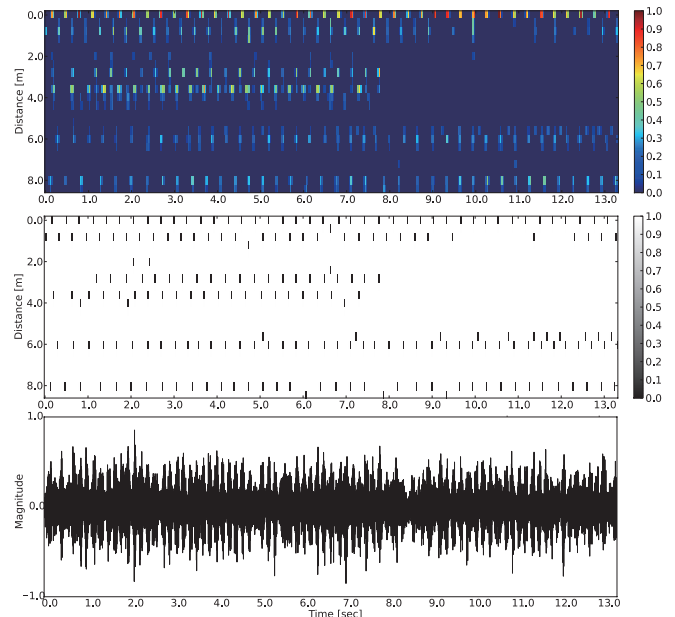


図 7: 6 匹の合唱の可視化 (2011 年 6 月 12 日)

メラは水田より 2m 程度高い図中の青い四角の位置に設置した。

### 4.2 実験結果

複数のカエルの合唱の可視化例を図 7 に示す。図上段は輝度時系列、図中段は輝度時系列のピーク、図下段は同時に録音した音声波形である。上段と中段の縦軸はカエルホテルの位置を、下段は振幅をそれぞれ表す。横軸はすべて時間を表す。まず、下段をみると多数のピークが見られる。各ピークがカエルの発声時刻に対応しているので時間情報はわかるが、空間情報が欠落している。

図 7 中段には、安定した発声がある 0, 0.5, 2.5, 3.5, 6, 8[m] の位置に 6 系列見られる。各系列をそれぞれ a, b, c, d, e, f と名付ける。ニホンアマガエルは鳴きながら動かないことから、1 つの系列が 1 匹のカエルに対応する。したがって、図には 6 匹のカエルがいたと推測できる。カエル間距離が近いので (a, b), (c, d), (e, f) がそれぞれペアを構成していると仮定すると、各ペアが逆相同期していることが定性的に観察できる。このことは、2 匹のカエルが逆相同

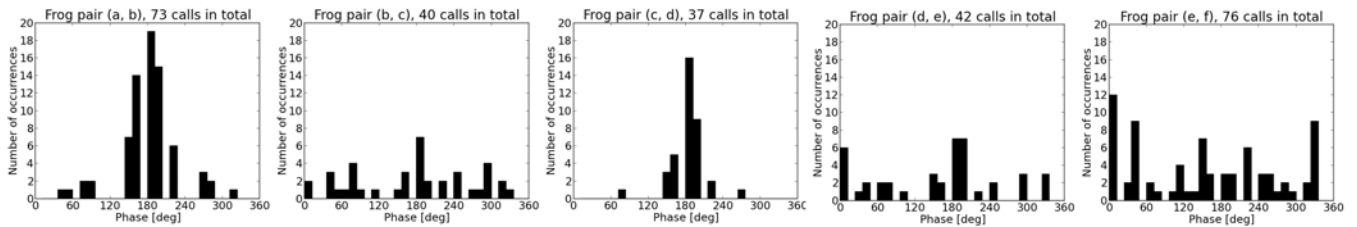


図 8: 隣り合うペアの位相差ヒストグラム

表 1: 同期解析結果 ( $p < 0.01$ )

系列 A	系列 B	距離 [m]	平均位相 [deg]	$p$ 値
a	b	0.8	179.4	$< 0.01^*$
b	c	2.0	179.5	0.13
c	d	0.8	181.2	$< 0.01^*$
d	e	2.4	185.1	0.32
e	f	2.0	4.5	0.34

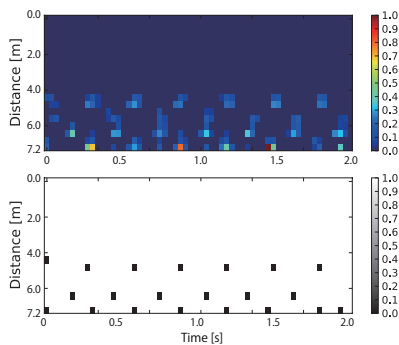


図 9: 1:2 逆相同期の観測例

期しやすいという室内実験の結果に対応している [1].

次に、定量的に議論するために同期解析を行う。図 8 に隣り合う全ペアの位相差ヒストグラムを、表 1 にペアの距離と平均位相、 $p$  値を示す。統計的に有意 ( $p < 0.01$ ) に位相差に偏りがある行には \* を付している。表より、a から e まではどのペアも平均的に逆相同期しており、カエル間距離が 0.8m と短い 2 つのペア (a, b) と (c, d) が有意に逆相同期している。したがって、合唱中でも隣り合う個体同士は逆相同期する傾向があり、それは個体間距離が近いほど安定すると思われる。

他の観測例について議論する。まず、図 9 に 1:2 逆相同期の観測例を示す。これは屋内で観測した 1:2 逆相同期が野外でも再現していることを表している。次に図 10 に同相同期の観測例を示す。ニホンアマガエルは逆相同期が安定状態にもかかわらず同相同期が生じたのは、合唱の開始時点では同期が不安定であることが理由だと考えられる。実際、図下側のカエルは 1.5 秒付近から鳴き始め、同相同期を経て 4.0 秒付近では逆相同期になっている。この観測は、逆相同期には数回の鳴き交わしが必要であることを示唆している。

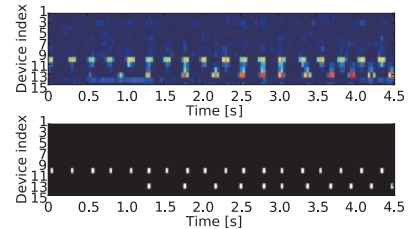


図 10: 同相同期の観測例

### 4.3 考察

まず、合唱の解析結果について議論する。

実験結果は、野外における大規模な合唱においてもニホンアマガエルの数理モデルによる予測や屋内実験の結果 [22] と同様に、カエルたちは隣り合う個体と相互作用し逆相同期していることを示唆している。

繁殖行動の観点ではこの同期現象は理にかなっている。なぜなら、隣り合うオス同士の発声タイミングをずらせば発声の時間的な重なりが減るので、メスに自分の位置を知らせやすいからである。一方で、離れたオス同士の安定した同期状態は見られない。この現象は、ツングラガエルで報告されている、ある音量より大きな音にしか反応して鳴かない *selective attention* [23] に対応していると考えられる。なぜなら、個体同士の距離が離れるほど伝わる音量は下がるからである。

次に、本システムの利点と限界について議論する。

本システムの利点のひとつは、マイクアレイ処理では必須のセンサ間同期が不要となることである。この理由は、音声の存在を LED の光で伝えることにある。光の速度は音声に比べて非常に速いので、水田の幅 20-30m 程度であれば、光の到達時間差はほぼ無視してよい。したがって、離れた場所の LED であっても、同一フレーム内で光っていれば実際に同時に光っていたと言える。この利点のおかげで、各カエルホタルは相互に接続することなく自由な位置に配置できるので、データ収録はマイクアレイの収録に比べて容易である。

本手法の限界は、(1) 使用できるフィールドに条件がある点と、(2) 生物の空間配置に条件がある点である。(1) については、まずに、フィールドは LED が全て見える平坦な場所にビデオカメラを設置できる必要がある。ただし、複数カメラを同期収録できるなら、それらを組み合わせるこ

とで凹凸のあるフィールドでの収録も可能である。次に、フィールドが背の高い草で覆われている場合はLEDが隠れるので、台に乗せるなど高さを上げる工夫が必要となる。天候に関しても、強い雨の場合は回路が破損する恐れがあるので使用できず、強風の場合はマイクへの風音が原因で鳴き声を検出できないという制約がある。(2)については、まず、対象生物の空間配置はおおよそ既知である必要がある。なぜなら、安定した定位のためにはカエルホタルは生物の空間配置の5-6倍の密度で設置する必要があるからである(詳細な解析は[5])。ニホンアマガエルの場合は、およそ1-2mの間隔で交互に鳴く、すなわち実質的な個体間距離が2-4mなので、40cm程度の距離で設置した。次に、カエルホタルは地面に配置するので平面上に分布する種でなければ計測できない。したがって、鳥やコウモリの鳴き声の時空間構造の可視化は困難である。

## 5 まとめ

本稿では、音声可視化デバイス「カエルホタル」を用いた合唱可視化システムと、それを用いたニホンアマガエルの合唱のフィールド実験について述べた。実験の結果、6匹の合唱で隣り合う個体たちと逆相同期していることが明らかになった。多個体の合唱の数理解析は[24]を参照されたい。今後は、より大規模なカエル合唱の解析や異なる種のカエル同士のコミュニケーションの解析、またカエル以外の生物の合唱の解析を行う予定である。

本研究はJSPS 基盤研究S(No. 24220006)、特別研究員奨励費(No. 08J00608)、理化学研究所・基礎科学特別研究員制度の支援を受けた。

## 参考文献

- [1] I. Aihara, R. Takeda, T. Mizumoto, T. Otsuka, T. Takahashi, H. G. Okuno, and K. Aihara. Complex and transitive synchronization in a frustrated system of calling frogs. *Phys. Rev. E*, 83(3):031913 (5 pages), 2011.
- [2] K.D. Wells. *The ecology and behavior of amphibians*. The University of Chicago Press, Chicago, 2007.
- [3] M. Matsui. *Natural history of the amphibia*, pages 150–152. University of Tokyo Press, 1996.
- [4] T. Mizumoto, I. Aihara, T. Otsuka, R. Takeda, K. Aihara, and H. G. Okuno. Sound imaging of nocturnal animal calls in their natural habitat. *J Comp Physiol A*, 197(9):915–921, 2011.
- [5] T. Mizumoto. *Temporal Synchronization among Interacting Individuals in Human-Robot Ensembles and Frog Choruses*. PhD thesis, Kyoto University, 2013.
- [6] A.S. Feng, P. M. Narins, C-H Xu, W-Y Lin, Z-L Yu, Q. Qiu, Z-M, and J-X Shen. Ultrasonic communication in frogs. *Nature*, 440:2333–2336, 2006.
- [7] P. M. Narins, A. S. Feng, R. R. Fay, and A. N. Popper, editors. *Hearing and Sound Communication in Amphibians*. Springer, 2007.
- [8] B. Hedwig and JFA Poulet. Complex auditory behavior emerges from simple reactive steering. *Nature*, 430(7001):781–785, 2004.
- [9] J. A. Simmons, M. B. Fenton, and M. J. O’Farrell. Echolocation and pursuit of prey by bats. *Science*, 203(4375):16–21, 1979.
- [10] H. Riquimaroux, S. J. Gaioni, and N. Suga. Cortical computational maps control the auditory perception. *Science*, 251(4993):565–568, 1991.
- [11] J. Okuyama, K. Kataoka, K. M Kobayashi, O. Abe, K. Yoseda, and N. Arai. The regularity of dive performance in sea turtles: a new perspective from precise activity data. *Animal Behaviour*, 84(2):349–359, 2012.
- [12] P. Tyack. An optical telemetry device to identify which dolphin produces a sound. , 78(5):1892–1895, 1985.
- [13] A. M. Simmons, J. A. Simmons, and M. E. Bates. Analyzing acoustic interactions in natural bullfrog (*Rana catesbeiana*) choruses. *J Comp Physiol*, 122(3):274–282, 2008.
- [14] D. L. Jones and R. Ratnam. Blind location and separation of callers in a natural chorus using a microphone array. , 126(2):895–910, 2009.
- [15] D. T. Blumstein, D. J. Mennill, P. Clemins, L. Girod, K. Yao, G. Patricelli, J. L. Deppe, A. H. Krakauer, C. Clark, K. A. Cortopassi, S. F. Hanser, B. McCowan, A. M. Ali, and A. N. G. Kirschel. Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48(3):758–767, 2011.
- [16] A. Hyvarinen, J. Karhunen, and E. Oja. *Independent component analysis*. Wiley-Interscience, New York, 2001.
- [17] K. Nakadai, H. G. Okuno, H. Nakajima, Y. Hasegawa, and H. Tsujino. Design and implementation of robot audition system “HARK”. *Advanced Robotics*, 24:739–761, 2009. doi:10.1163/016918610X493561.
- [18] J. P. Hailman and R. G. Jaeger. Phototactic responses to spectrally dominant stimuli and use of color vision by adult anuran amphibians: a comparative survey. *Anim Behav*, 22:757–795, 1974.
- [19] ITU-R. *Recommendation ITU-R BT.606-6: Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide screen 16:9 aspect ratios*. International Telecommunication Union Radiocommunication Sector, 2007.
- [20] A. Pikovsky, M. Rosenblum, and J. Kurths. *synchronization: a universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge University Press, 2001.
- [21] K.V. Mardia and P. E. Jupp. *Directional Statistics*. Wiley, 2000.
- [22] I. Aihara. Modeling synchronized calling behavior of Japanese tree frogs. *Phys. Rev. E*, 8:011918, 2009.
- [23] M. D. Greenfield and A. S. Rand. Frogs have rules: Selective attention algorithms regulate chorusing in *Physalaemus pustulosus* (loptodactylidae). *Ethology*, 106:331–347, 2000.
- [24] I. Aihara, T. Mizumoto, T. Otsuka, H. Awano, K. Nagira, H. G. Okuno, and K Aihara. Spatio-temporal dynamics in collective frog choruses examined by mathematical modeling and field observations. *Scientific Reports*, 4(3891), 2014. doi:10.1038/srep03891.