

解説

鳥類の音響モニタリング

——生物多様性評価と行動生態研究への展開——*

橘 亮 輔 (産業技術総合研究所)**・鈴木麗壘 (名古屋大学)***

1. はじめに

2025年4月から10月にかけて大阪・関西万博が開催された。読者の中には訪れた方も多いただろう。万博の全体テーマは「いのち輝く未来社会のデザイン」であったが、これに呼応して9月下旬に「地球の未来と生物多様性ウィーク」と題したプログラムが実施されたことをご存じだろうか。このプログラムでは、エネルギー、炭素排出、資源循環といった話題に加え、自然生態系を回復させることを目指す考え方である「ネイチャーポジティブ nature positive」に関する展示やイベントが展開された。

生態系は、食料や水の供給、気候の調整など、私たちの暮らしを支える多様な機能を果たしている。これらの機能を持続させるためには、生物多様性の保全によって生態系の強靱性を高めることが肝要である。環境省は、生物多様性の損失を食い止め、回復に向かわせるという目標を2030年までに達成することを掲げている。

この万博会場として整備された夢洲はもともと埋立地であり、一部は干潟となっていた。この干潟はシギ・チドリ類をはじめとする渡り鳥の重要な中継地として機能している。大阪湾全体では戦後に干潟の大部分が失われており、残存している湿地の生態学的価値はきわめて高い。実際、夢洲では113種もの鳥類が確認され、そのうち51種が絶滅危惧を含む重要種に指定されているという [1]。このため、万博会場の整備にあたっては環境影響評価や事後のモニタリングが行われたが、微地形

の変化や生息地の攪乱を懸念する市民やNGOからの声も絶えなかった。すなわち、万博開催そのものが「自然を損なわずに未来を設計できるか」という問いを内包していたのである。

このような状況は、本解説の主題である鳥類生態の音響モニタリングの意義を示唆している。すなわち、環境変化に敏感な鳥類を対象とすることで、生態系の健全性を評価する手段となりうる。ただし、人手による巡回調査では観測の漏れが生じやすく、また調査そのものが環境に与える影響も無視できない。そこで、鳴き声を発する鳥類に対しては、音響的なモニタリング手法がとりわけ有効となる。近年は、長期かつ高頻度での録音に加え、鳥種の自動識別・計数が可能になりつつあり、時間的・空間的に高精度な環境評価の実現が現実味を帯びてきている。

本解説ではまず、鳥類モニタリングの背景にある環境評価とその調査手法について概説し、続いて現在の音響モニタリング技術の概要を紹介する。具体的な技術要素や公開データの利活用について網羅的に解説し、保全的な意義だけでなく、生態学的・行動学的な観点からも議論を加える。更に、筆者(鈴木)の最近の取り組みを紹介する。これにより、本誌の読者が持つ音響技術をこの分野に応用・発展させる契機となることを期待する。

2. 鳥類調査の意義と方法

2.1 鳥類音声の概要

鳥類は種間で異なる多様な発声を行う。その中で、最も鳴き声が目立ち、日常的によく観察されるのは、スズメ亜目に属する鳴禽類 (songbirds) と呼ばれるグループである。身近なさえずる小鳥の多くはこの鳴禽類に含まれる。彼らの発声には学習性のさえずり (song) とそれ以外のコール (call) がある (詳細は過去の解説を参照 [2])。それ以外の鳥類 (身近な例ではハト、カモ、トビ、サギ、カ

* Acoustic monitoring of birds: Towards biodiversity assessment and behavioral ecology.

** Ryosuke O. Tachibana (AIST, Tsukuba, 305–8566)
e-mail: ryosuke.tachibana@aist.go.jp

*** Reiji Suzuki (Nagoya University, Nagoya, 464–8601)
e-mail: reiji@nagoya-u.jp
[doi:10.20697/jasj.82.2.78]

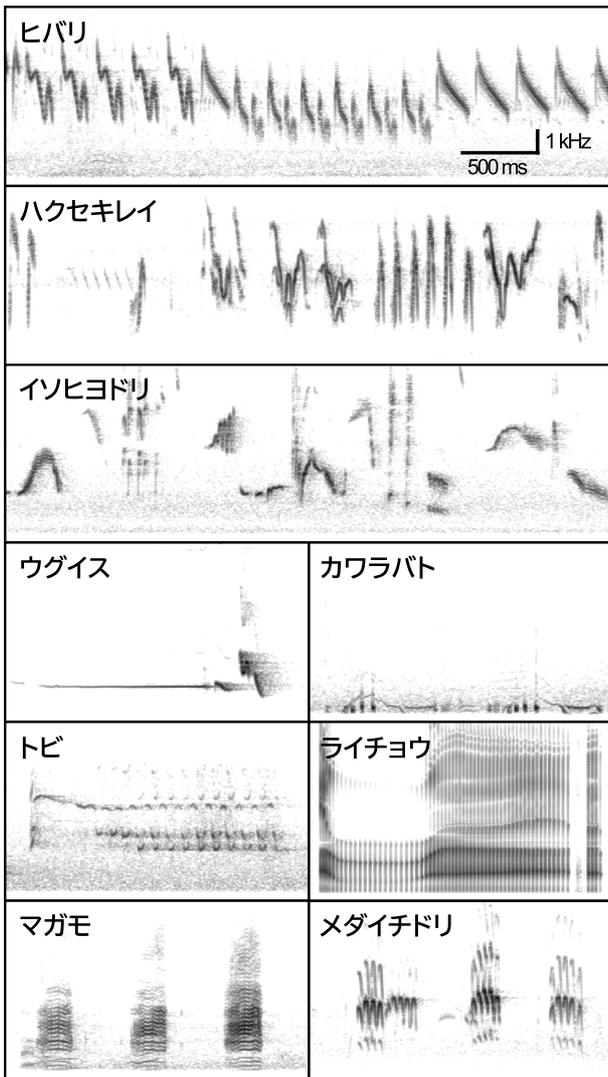


図-1 多様な鳥類の音声のスペクトログラム
録音データは xeno-canto [3] から得た¹。

モメ、アジサシなど)の発声は、学術的にはすべてコールに分類される。

鳥類の発声は、ヒトのように喉頭の声帯ではなく、気管支の分岐部周辺にある「鳴管」と呼ばれる声帯状の構造の振動によって生じる [2]。鳴管の構造の多様性や周囲の筋肉による精緻な制御によって、様々な音響パターンが生み出される (図-1)。鳥類全体でみると、その発声はおおよそ数百 Hz から 10 kHz 程度の周波数帯に分布する。一方で、彼らの可聴域は高々 8 kHz にとどまる。そのため、発声に高周波成分が含まれていても、それを有効に利用しているわけではない。ただし例外もあり、フクロ

ウでは全般に聴覚感度が高く、ハトでは可聴域が低域側に広いなど、種ごとに異なる特徴を持つ [4]。

鳥類はまた、状況に応じて多様な場面で発声する。求愛、警戒、採餌、集団攻撃、飛翔など、場面ごとに異なる声を使い分けることが多く、それぞれに固有の機能を持つと考えられる。そのため、音響モニタリングによって鳥種を判別したり個体の状態を把握したりするには、行動生態学的な視点から各種の音声パターンをあらかじめ理解しておくことが望ましい。

2.2 鳥類調査の生態学的・保全的意義

鳥類は広く分布し研究も進んでおり、環境変化に敏感なため、生態系の健全度を測る指標として国際的に利用されてきた。ヨーロッパでは Common Bird Index (共通鳥類指数) や Farmland Bird Index (農地鳥類指数) が政策評価に使われ [5], 世界的にも「地球環境のバロメータ」とされる。鳥類保護の国際 NGO である BirdLife の 2022 年の報告では、鳥類の半数が減少傾向、8 分の 1 が絶滅危惧とされ、環境保全の重要性が示されている [6]。こうした知見は持続可能な開発目標 (SDGs) や他の国際目標にも反映され、Essential Biodiversity Variables (EBVs: 重要生物多様性変数) 体系にも組み込まれている [7]。鳥類データは生物多様性の定量評価や管理に役立ち、環境変化の検出や政策効果の検証に有効な手段となっているのである。

例えば、北米の鳥類繁殖調査 (Breeding Bird Survey: BBS) は鳥類の長期・広域モニタリングの基盤として 1966 年に開始され、これまでに 500 種超の傾向を解析してきた。その結果、連邦・州レベルでの資源管理や気候・土地利用による影響の評価に使われている [8]。この調査は、研究者だけでなく市民の参加によって維持されており、環境変動の早期警戒システムとしての有効性が確立されている。また、米国コーネル大学の鳥類学研究所は、約 1 万種の鳥類の情報をまとめたオンラインデータベース「eBird」を公開しており [9], この大規模データを利用した環境調査も行われている [10]。

ただし、鳥類だけを見て生物多様性を判断するのは危険であろう。鳥の多様性は昆虫や植物と強くは相関しないため、生態系全体を代表するわけではない。注目度が高いため研究資源が偏り、両生類や無脊椎動物の監視が手薄になるという構造的リスクもある [11]。更に、渡りや移動によって、

¹Recordist name: XC155631 Frank Lambert; XC285868, XC286069 Peter Boesman; XC217672 Albert Lastukhin; XC284642 Antony Schubert; XC858024 Joshua Chong; XC993503 Johan Södercrantz; XC999260 Ding Li Yong.

どこで影響を受けたかが分かりづらいことから、局所的な指標として使いにくい。鳥類は中～高次捕食者であるため、環境変化に対する応答が遅く、逆に個体数が増えることもある。これらのことから、生物学・生態学的な知見を十分に考慮した上で、他の指標と組み合わせて目的別に評価すべきである。

2.3 従来の鳥類調査手法

野鳥の調査については、環境省の生物多様性センターや日本自然保護協会、日本野鳥の会が取りまとめたマニュアルが存在する [12, 13]。調査手法の詳細については各マニュアルや他の解説に譲るが、本解説では簡単に説明しておく。一般に、大規模な調査はラインセンサスとスポット（定点）センサスで行われる。ラインセンサスは、あらかじめ定めたルートを一定速度で歩行しながら、両側の一定幅に出現した種と個体数を記録する。スポットセンサスは、あらかじめ設定したスポットに一定時間とどまり、周囲に出現した種と個体数を記録する。

これら以外にも、任意観察法、夜間調査、呼び寄せ法などが補助的に利用される。任意観察は小規模の調査や大規模調査の準備で行われることが多く、調査範囲の鳥類相を網羅的かつ迅速に把握するのに有効である。また、夜間調査は夜行性のトリ（フクロウやヨタカなど）の把握に必要となる。呼び寄せ法は、藪や茂みに潜んでいる潜行性の高いトリを標的として、鳴き声を再生して呼び寄せることにより検出する。別の調査法としてバンディング（標識調査）がある。資格を有する調査員が、鳥を捕獲して足環を付け放鳥し、再捕獲や観察によって個体を識別する。なお、一般に野鳥の捕獲は国の鳥獣保護管理法により禁止されているため、捕獲調査には鳥獣保護管理法に基づき許可が必要である。

以上のように、いずれの調査手法も人手と時間のコストが高い。調査者の熟練度や気象条件に左右され、人件費や対象個体への影響（調査圧）も大きい。そのため、広範囲かつ長期間にわたった計測を大規模に行うには、何等かの自動化手法が求められる。

2.4 音響モニタリングの活用

音響モニタリングは、鳥類調査における人手と時間のコストを効果的に低減できる手法として注目されている。録音機器を併用した調査は以前か

ら行われてきたが、近年では汎用計算機の小型化・低コスト化に伴い、自律的に録音を行う ARU (autonomous recording unit) の重要性が一段と高まっている。ARU を用いた音響モニタリングは、人手による観測に比べて広域かつ長期間のデータ取得を可能にし [14]、更に調査者が現地に入らずに記録できるため、調査圧を軽減できる。また、夜行性の種や警戒心の強い種の観察にも適している。実際、ギニア湾のプリンシペ島では、夜間に録音された謎の鳴き声の解析が、新種のコノハズクの発見につながったという [15]。

更に、長期的かつ広範囲な計測によって、季節変動や日変動といった時間スケールを超えた活動パターンを把握することができる。例えば、沖縄科学技術大学院大学が進める OKEON 美ら森プロジェクトでは、島内 24 地点に ARU を設置し、連日記録を継続している [16]。この音響データの解析から、2018 年の台風が環境に及ぼした影響が評価されており [17]、音響指標は環境変化や人為的影響を把握する上で有効な手段となることが示されている。

音響モニタリングは生態系保全だけでなく行動学研究にも利用されている。求愛や縄張りディスプレイなどの行動生態学的研究に加え、群れを形成する鳥では、コールを通じた集団形成や社会階層性も解析できる。発声位置や個体の移動パターンを追跡することができれば、個体間相互作用や社会構造の解明にも貢献しうる [18]。

もっとも音響モニタリングには限界もある。機材には直射日光や雨、湿度による故障・浸水のリスクがあり、盗難の可能性もある。背景雑音の多い環境では計測が困難な場合があり、特に低周波の鳴き声は通常の処理では扱いにくい。ARU では記録しきれない行動パターンや相互作用の詳細観察については、人間による直接観察の優位性が指摘されており、両手法の併用が望ましい [19]。特に、イヌワシやクマタカなどの大型猛禽は重点的な調査対象であるが、発声頻度が低いため音響手法のみでは不十分な場合もある。そのため、十分な調査計画の検討が不可欠である。

3. 音響モニタリング技術の現在

3.1 録音ユニット

ARU には、市販品・非営利製品・自作モデルを

含め、様々なタイプが存在する。その多くは1~2チャンネルのマイクロホンを搭載し、長時間録音を実現するために、低消費電力設計の電子回路と録音スケジュールを設定できるプログラム機能を備えている。録音データは主にSDカードなどの記録メディアに保存される。例えば「10分間録音・20分間スタンバイ」といったプログラム設定を繰り返すことで、電池駆動でも長期間の録音が可能となるタイプもある。更に、野外使用を想定して、耐熱性や耐紫外線性に優れ、防水・防滴仕様の筐体を採用した機種が多い。最近では、Bluetooth通信機能を備え、スマートフォンアプリから筐体を開けずに各種設定が行える使いやすいモデルも登場している。これらのARUは軽量で、調査地点の木の下などに容易に固定して設置できるよう設計されている。

市販製品の中では、Wildlife Acoustics社のSong Meterシリーズが最も広く利用されており、研究全体の約6割で採用されているとの報告もある[20, 21]。このシリーズには複数のバリエーションがあり、サイズや録音可能時間が異なる。他にもFrontier Labs社のBAR/BAR-LTや、コーネル大学鳥類研究所によるSwift Recorder（非営利モデル）も、比較的低価格で提供されている。

一方で、研究者が自作する低コストARUも広まりつつある。代表例として、AudioMoth [22] が挙げられる。このプロジェクトでは基板情報がGitHub上で公開されており、誰でも入手・改良が可能である。近年は、録音機材の性能向上と低価格化、更にオープンソース化の流れが進み、完成済み基板の購入サービスも提供されている。このほかにも、Raspberry Piを基盤としたARUプロジェクトも提案されており、野外音響モニタリングの手法は今後更に多様化していくと考えられる。

3.2 鳥類音声の検出と種判別

野外に設置したARUで膨大な音声データを得たとしても、そこに含まれる有効な情報を抽出するには、録音中のどこで鳥の鳴き声が現れているかを自動的に検出する必要がある。当然、いつ、どのような種が鳴くのかを事前に定めることはできないため、鳥の鳴き声を対象とした音響イベント検出（sound event detection: SED）[23]が必要となる（SEDと環境音分析については過去の解説を参照[24]）。多くの場合、スペクトログラムを入

力とした、事前学習済み畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いられる。例えば、CNNであるEfficientNetを利用したGoogle Bird Vocalization Classifier [25] が、現時点ではよく利用されているようだ。

そもそも、自然環境の録音には常に背景雑音が伴う。風、木々のざわめき、川の流水の音などに加え、道路が近ければ車両の走行音なども重畳する。夏季にはセミの鳴音が解析の大きな妨げとなる。近年の深層学習を利用した方法では、こういった雑音を単に排除するのではなく、学習データの一部として与えることで目的の音イベントの誤検出を回避する手法が取られている。

最近は特に、より詳細に鳥種を識別できるよう、鳥種と音声データの対応を大量に学習させた分類器が急速に発展している。特に注目されるのが、コーネル大学鳥類学研究所が開発したBirdNETである[26]。BirdNETは、先述のeBirdに登録された膨大な録音データを学習し、900種以上の鳥を識別可能とする。スマートフォンアプリとして一般に公開されており、利用者が録音した音を即座に解析して種名を表示する。最新のモデルはGitHubでオープンソース化され、研究利用も進んでいる。

こうした自動認識技術の発展を支えるのが、世界中の研究者や愛好家によって共有される大規模な録音データベースである。代表的なものが、オープンアクセスの「xeno-canto」である[3]。ここでは10,000種を超える鳥類の録音に登録され、種名・録音地・録音者の情報と共に自由に閲覧・ダウンロードできる。データ分析のためのアプリの充実（AviaNZ [27], Koe [28]）も背景に利活用が活発化している。ただし、録音品質やラベルの正確さにはばらつきがあり、解析前に外れ値を除外するなどの前処理が必要である。また、絶滅危惧種の音声は違法採取を防ぐ目的でダウンロードが制限されている場合がある。このような技術の進展を競い合い、洗練させる場として、国際的な音声解析コンペティション「BirdCLEF」がある。これは情報検索分野のコンペティションCLEFの一部として実施されるもので、近年はコンペティションのプラットフォームであるKaggle上で開催されている。テーマは年ごとに異なり、2022年にはハワイの絶滅危惧種、2024年にはインド西ガーツ

山脈の未研究種が対象となった。いずれも、実際の生態モニタリングの課題を反映した現実的な設定であり、参加者は世界中の研究者や開発者に及んでいる。近年の上位モデルは、SED と詳細な種分類を統合し、擬似ラベルを用いた半教師あり学習や、効率的なモデル軽量化を取り入れるなど、実用性と汎用性の両立を目指しているものがほとんどである。BirdCLEF は、音響モニタリング技術の最先端を知ると共に、その社会的応用への可能性を示す格好の舞台となっている。

音響モニタリングと深層学習をはじめとした AI 技術を組み合わせた研究は、様々な展開を見せている。ターゲットとする特定の種の生態を調べる目的でも、音声の自動検出が試みられつつある [29]。また、大規模言語モデル (LLM) と組み合わせ、AI エージェントとの対話によって多様な動物音声を含む自然音分析の可能性が示されている (NatureLM-audio) [30]。一方、生成モデルの進展により、自然な鳥類音声を生成できる可能性が出てきた。これは、野外でスピーカから再生することで、対象種の応答 (鳴き返す、呼び寄せられる、など) を調査する上で有用である。例えば、変分オートエンコーダなどを用いた表現学習に基づく潜在空間から非線形な音声特徴を操作しつつ生成する手法や [31]、学習範囲外の生成音の特徴を分析して動物音声に潜在する役割を調べる手法が提案されている [32]。一方、AI によって生成された音声に対し、実際の動物が自然な応答するかについての検証は容易でなく、慎重な議論が必要であるとの指摘もある [33]。

3.3 音響モニタリング技術の課題

音響モニタリングには限界や制約があるため、それらを十分に理解したうえで適切に活用する必要がある。以下に、現時点で指摘されている主な課題をまとめる。

まず、原理的な制約が存在する。検出には不完全性があり、近くに個体がいっても声を出さなかった場合や、声を発したものの分析システムの精度の問題で検出されなかった場合が考えられる。この問題は、計測可能範囲に同一個体が複数回訪れることを統計的にモデル化するなどして影響をある程度低減できるものの、その結果は常に確率的な推定値として解釈する必要が出てくる。更に、発声頻度は種によって大きく異なるため、種ごと

に異なる事前確率を設定するなどの調整が求められる。また、距離減衰によって検出精度が低下することから、検出基準をどのように定めるかも重要な課題である。精度を評価するため、人手によるポイントセンサスを対照とした補正や調査環境でスピーカ再生音を用いた音圧レベル校正も行われている [21]。

次に、機械学習による検出・分類を用いる場合は、学習データの規模と質が重要となる。eBird や xeno-canto といった市民科学プロジェクトは強力なデータセットを提供しているが、ボランティアによる収集に依存するため、人が訪れやすい場所への偏りや、鳥種ごとの人気の有無によってデータ量が大きく異なるという固有の問題がある。更に、バードウォッチング文化の浸透度や、ウェブアプリの言語障壁などの影響で、日本を含む欧米以外の地域では依然としてデータが少ない。近年、日本でも日本野鳥の会を中心に eBird の日本語化が進められており、今後のデータ充実が期待される。

また、録音方法やメタデータの標準化も課題である。検出可能性の推定、録音スケジュール、設定最適化などを含む設計フレームの一般化はまだ十分に整備されていない。比較可能な音響モニタリングの実現に向けた標準化や実務ガイドも少ないのが現状である。更に、データ共有やメタデータ標準の整備、転移可能な分析パイプラインの構築といったデータ基盤の整備が今後の重要な課題だと考えられる。

4. 音源定位技術がもたらす新たな知見と社会構造の理解

ARU 利用の盛り上がりの中で、単に音を録音・識別するだけでなく、音源の位置を推定する技術への展開も進んでいる。野外動物音声の位置推定は動物行動観測や環境調査など様々な場面で重要であり、マイクロホンアレイを用いた手法が古くから期待されてきた [34]。最近でも音源定位技術に関する包括的な調査報告 [35] があり、この分野への関心の高さが伺える。音源定位技術の活用は ARU の広域・長期間・非侵襲的という利点を生かしつつ、人が現地で観測するような詳細な行動パターンや相互作用の把握、更にはそれ以上に詳細な観測を実現する点で重要である。

音源定位技術の一つとして、複数のマイクロホン

を距離をおいて設置し、音源到達時間差 (TDOA) を用いる手法がある。University of Windsor の Daniel Mennill 教授のグループは、屋外設置型の市販ステレオマイクロホン複数設置した TDOA ベースのフィールドでの音源定位実験を行い [36], 様々な野外応用を展開している。最近では立方形状に配置したマイクロホンを用いて飛行中の鳴き声を定位し、鳴き声の音響的類似度が渡り鳥の混群形成パターンと対応することを示し、野外で音源定位を用いた手法の有用性を実証している [37]。

もう一つのアプローチとして、複数のチャンネルが搭載されたマイクロホンアレイユニットを用い、マイクロホンに対する音源到来方向をチャンネル間の位相差から推定する手法がある。UCLA の Taylor 教授らは早くから独自開発の複数のマイクロホンアレイユニットシステムを構築する [38] など音源定位技術の生態観測への応用に取り組んできた。Suzuki らはロボット聴覚オープンソースソフトウェア HARK (Honda Research Institute Japan Audition for Robots with Kyoto University) [39] とマイクロホンアレイを活用し、鳥類生態観測のためのスクリプト HARKBird を構築した。PC 上でのマイクロホンアレイ録音・MUSIC 法による音源定位・GHSS 法による音源分離・UMAP による簡易分類、複数アレイによる三点測量等の処理が一貫して可能であり、対象個体がいづ、どこで、どんな鳴き声を発したかを抽出できる。最近では、Heath ら [40] も録音装置を開発し HARKBird を利用し音源定位性能を評価している。このようなマイクロホンアレイユニットは、公園での鳥種表示などの社会的応用にも活用されつつある [41]。

マイクロホンアレイを用いた研究の具体例として、筆者 (鈴木) の取り組みを二つ紹介する。一つ目は、UC Berkeley の保護区 (Blue Oak Ranch Reserve) の森林に生息するホシワキアカトウヒチョウに対するプレイバック実験である [42]。プレイバック実験とは、録音した動物の鳴き声をスピーカで再生して野生個体に聞かせ、その反応を観察することで、なわばり防衛や求愛などの社会行動における音声コミュニケーション機能を調べる手法である [44]。この取り組みでは、道沿いに東西に分かれたなわばりの境界付近で同種の鳴き声をスピーカで再生し、目視などでは詳細な観測が

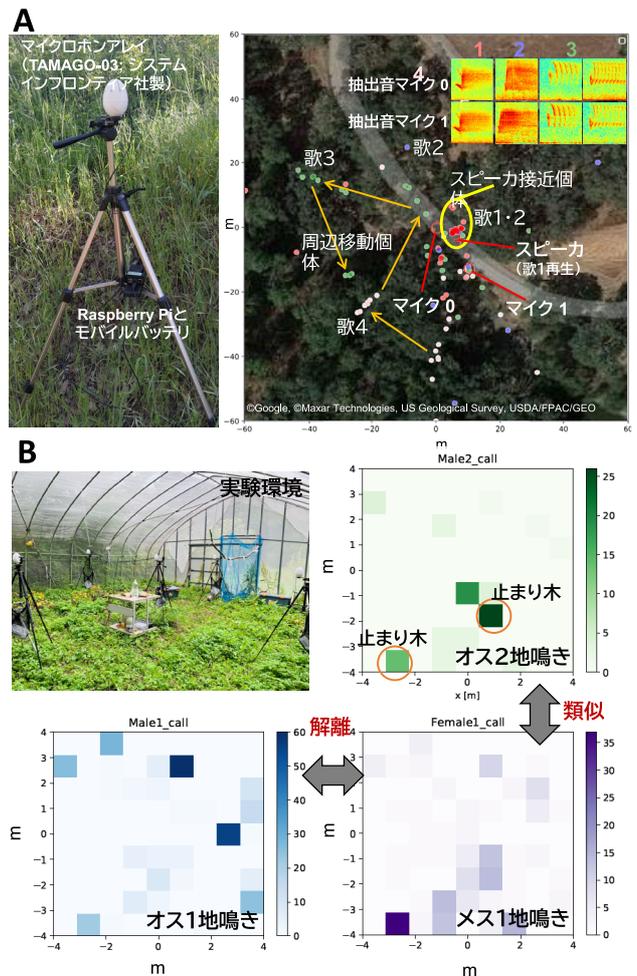


図-2 (A) (左) 野外録音用マイクロホンアレイノード, (右) 鳴き声プレイバックに対する複数のホシワキアカトウヒチョウの反応 [42]。 (B) 屋外テント内での3羽のキンカチョウ (オス2羽, メス1羽) の鳴き声分布 [43]。

難しい2個体の反応を、図-2(A)左に示すような録音機材を2か所に設置して観測した。図-2(A)右は、定位・分離音源を変分オートエンコーダで表現学習した特徴空間を利用して、あらかじめ用意した4種の典型的な歌に近い音源を取り出し、半自動的に2個のアレイからの音源情報を紐づけて三点測量に基づき2次元定位したものである。東側の道沿いのスピーカから、そのなわばり個体の鳴き声を再生した結果、東側の個体は終始スピーカ近くに接近し侵入者への激しい威嚇反応を示し続けたのに対し、西側の個体は数十メートルの距離を置いてさえずる様子が観測された。

二つ目は、より自然な環境での複数個体間の社会関係の観測である。北海道大学の圃場にテントを張り数羽のキンカチョウを放つことで自由に飛翔可能な環境を構築し (図-2(B)左上), 複数のマイクロホンアレイで鳴き声位置と種類 (個体と歌・

コール) の推定を試みた [43]。その結果, 次のような予備的知見が得られた。オス 1 羽のみを放った場合, えさ場や止まり木で頻繁にコールを鳴く様子が観察された。このコールは distance call と呼ばれるもので, 仲間を探していたと考えられる。オス 2 羽の場合, コールの頻度は減少したが, 両個体が近い場所で一緒に鳴きがちであることが, 鳴き声場所の時系列データから推定した個体間距離より明らかになった。ところが, オス 2 羽にメス 1 羽を加えた場合, オス同士は距離を保って鳴く一方, メスはオスのいずれかの近くにとどまる傾向があった (図-2(B) 右上から左下)。つまり, 第三者の存在が二者の関係を改変する様子を定量化できた。キンカチョウは発声学習等のモデル動物であり, マイクロホン付きリュックサックを装着する方法 [45] など様々な観測手法が開発されている。その中で, 本結果はテント内ながら非侵襲的な方法で繊細な個体間関係の変化を観測できる可能性を示した。

5. おわりに

鳥類生態の音響モニタリングは, 環境保全・生態学・行動学のいずれの観点からも, 新しい知見をもたらす研究基盤として急速に発展している。本解説では, 鳥の声を手がかりに環境や行動を調べる方法を, 従来の現地調査, ARU による長期・広域の録音, 深層学習による検出・種判別, 音源定位, そしてデータ共有の要点と課題まで通して整理してきた。録音装置の小型化・低価格化により, これまで観測が困難だった時空間スケールでの生物多様性の把握が可能になってきた。また, 深層学習や音源定位技術の進歩により, 単なる種識別にとどまらず, 個体間の相互作用や社会構造の解析, 環境変化の早期検知など, より高次の情報抽出が実現しつつある。更に, AI 技術の導入と市民科学活動によるデータの拡充は, この研究領域を広げると共に, 新たな自然理解の枠組みを形づくりつつある。一方, 標準化・データ共有・倫理的配慮といった課題は依然として残されており, 科学的信頼性と社会的受容性を両立させる仕組みづくりが求められている。こういった技術の成熟には現場専門家との継続的な連携が不可欠であり, その融合によって生態学的研究や生物多様性評価にさらなる発展がもたらされるだろう。

謝 辞

執筆にあたりご助言をいただいた博多屋汐美 (琉球大学), 外谷弦太 (東京科学大学), 水本武志 (ハイラブル株式会社) の各氏に感謝します。

文 献

- [1] “夢洲 Photo Album #5 夢洲にふたたび湿地を,” 公益社団法人 大阪自然環境保全協会, Nov. 15 (2023).
- [2] 橘 亮輔, “小鳥の音声伝えるもの,” 音響学会誌, 79, 28–33 (2023).
- [3] “xeno-canto:: Sharing wildlife sounds from around the world,” <https://xeno-canto.org/> (参照 2025-10-13).
- [4] R. J. Dooling, B. Lohr and M. L. Dent, “Hearing in birds and reptiles,” in *Comparative Hearing: Birds and Reptiles*, R. J. Dooling, R. R. Fay and A. N. Popper, Eds. (Springer, New York, 2000), pp. 308–359.
- [5] “Common bird index in Europe,” <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/common-bird-index-in-europe> (参照 2025-09-27).
- [6] “State of the World’s Birds (2022),” BirdLife International, <https://www.birdlife.org/papers-reports/state-of-the-worlds-birds-2022/> (参照 2025-09-27).
- [7] H. M. Pereira *et al.*, “Essential biodiversity variables,” *Science*, 339(6117), 277–278 (2013).
- [8] M.-A. R. Hudson, C. M. Francis, K. J. Campbell, C. M. Downes, A. C. Smith and K. L. Pardieck, “The role of the North American Breeding Bird Survey in conservation,” *Condor*, 119, 526–545 (2017).
- [9] “eBird,” <https://ebird.org/home> (参照 2025-10-06).
- [10] A. Johnston *et al.*, “North American bird declines are greatest where species are most abundant,” *Science*, 388(6746), 532–537 (2025).
- [11] B. Guénard, A. C. Hughes, C. Lainé, S. Cannicci, B. D. Russell and G. A. Williams, “Limited and biased global conservation funding means most threatened species remain unsupported,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 122, p. e2412479122 (2025).
- [12] “調査マニュアル—モニタリングサイト 1000,” <https://www.biodic.go.jp/moni1000/manual/> (参照 2025-09-28).
- [13] “全国鳥類繁殖分布調査,” <https://bird-atlas.jp/index.html> (参照 2025-09-28).
- [14] J. Shonfield and E. M. Bayne, “Autonomous recording units in avian ecological research: Current use and future applications,” *ACE*, 12, art 14 (2017).
- [15] M. Melo *et al.*, “A new species of scops-owl (Aves, Strigiformes, Strigidae, Otus) from Principe Island (Gulf of Guinea, Africa) and novel insights into the systematic affinities within Otus,” *ZooKeys*, 1126, 1–54 (2022).
- [16] M. Suwabe *et al.*, “OKEON: A community-collaborative terrestrial biodiversity monitoring network in Okinawa, Japan,” *Biodivers. Inf. Sci. Stand.*, 8, e138109 (2024).
- [17] S. R. P.-J. Ross *et al.*, “Divergent ecological responses to typhoon disturbance revealed via landscape-scale acoustic monitoring,” *Glob. Change Biol.*, 30, p. e17067 (2024).
- [18] 外谷弦太, 水本武志, 岡ノ谷一夫, 橘 亮輔, “音源定位および運動追跡システムを用いた鳴禽の社会相互作用分析,” 音響学会聴覚研資, 52(4), pp. 243–248 (2022).
- [19] S. Hofer, D. T. McKnight, S. Allen-Ankins, E. J. Nordberg and L. Schwarzkopf, “Passive acoustic monitoring in terrestrial vertebrates: A review,” *Bio-*

- acoustics*, 32, 506–531 (2023).
- [20] K. Darras, P. Batáry, B. J. Furnas, I. Grass, Y. A. Mulyani and T. Tschardt, “Autonomous sound recording outperforms human observation for sampling birds: A systematic map and user guide,” *Ecol. Appl.*, 29(6), e01954 (2019).
- [21] C. Pérez-Granados and J. Traba, “Estimating bird density using passive acoustic monitoring: A review of methods and suggestions for further research,” *Ibis*, 163, 765–783 (2021).
- [22] A. P. Hill, P. Prince, J. L. Snaddon, C. P. Doncaster and A. Rogers, “AudioMoth: A low-cost acoustic device for monitoring biodiversity and the environment,” *HardwareX*, 6, p. e00073 (2019).
- [23] A. Mesaros, T. Heittola, T. Virtanen and M. D. Plumbley, “Sound event detection: A tutorial,” *IEEE Signal Process. Mag.*, 38(5), pp. 67–83 (2021).
- [24] 井本桂右, “環境音分析の研究動向,” 音響学会誌, 75, 512–518 (2019).
- [25] B. van Merriënboer, V. Dumoulin, J. Hamer, L. Harrell, A. Burns and T. Denton, “Perch 2.0: The bitter lesson for bioacoustics,” *arXiv*, 2508.04665 (2025).
- [26] S. Kahl, C. M. Wood, M. Eibl and H. Klinck, “BirdNET: A deep learning solution for avian diversity monitoring,” *Ecol. Inform.*, 61, p. 101236 (2021).
- [27] S. Marsland, N. Priyadarshani, J. Juodakis and I. Castro, “AviaNZ: A future-proofed program for annotation and recognition of animal sounds in long-time field recordings,” *Methods Ecol. Evol.*, 10, 1189–1195 (2019).
- [28] Y. Fukuzawa *et al.*, “Koe: Web-based software to classify acoustic units and analyse sequence structure in animal vocalizations,” *Methods Ecol. Evol.*, 11, 431–441 (2020).
- [29] 前川侑子, 他, “AI 技術による鳥類の鳴き声モニタリング手法の検討～サシバを事例として～,” *Bird Res.*, 18, A71–A86 (2022).
- [30] D. Robinson *et al.*, “NatureLM-audio: An audio-language foundation model for bioacoustics,” *arXiv*, 2411.07186 (2024).
- [31] T. Sainburg, M. Thielk and T. Q. Gentner, “Finding, visualizing, and quantifying latent structure across diverse animal vocal repertoires,” *PLOS Comput. Biol.*, 16, p. e1008228 (2020).
- [32] G. Beguš, A. Leban and S. Gero, “Approaching an unknown communication system by latent space exploration and causal inference,” *arXiv*, 2303.10931 (2023).
- [33] Y. Yovel and O. Rechavi, “AI and the Doctor Dolittle challenge,” *Curr. Biol.*, 33, R783–R787 (2023).
- [34] D. T. Blumstein *et al.*, “Acoustic monitoring in terrestrial environments using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus: Acoustic monitoring,” *J. Appl. Ecol.*, 48, 758–767 (2011).
- [35] T. A. Rhinehart, L. M. Chronister, T. Devlin and J. Kitzes, “Acoustic localization of terrestrial wildlife: Current practices and future opportunities,” *Ecol. Evol.*, 10, 6794–6818 (2020).
- [36] D. J. Mennill, M. Battiston, D. R. Wilson, J. R. Foote and S. M. Doucet, “Field test of an affordable, portable, wireless microphone array for spatial monitoring of animal ecology and behaviour,” *Methods Ecol. Evol.*, 3, 704–712 (2012).
- [37] Z. G. Gayk and D. J. Mennill, “Acoustic similarity of flight calls corresponds with the composition and structure of mixed-species flocks of migrating birds: Evidence from a three-dimensional microphone array,” *Philos. Trans. R. Soc. B*, 378(1878), p. 20220114 (2023).
- [38] T. C. Collier, A. N. G. Kirschel and C. E. Taylor, “Acoustic localization of antbirds in a Mexican rainforest using a wireless sensor network,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, 182–189 (2010).
- [39] K. Nakadai, H. G. Okuno, T. Mizumoto, Honda Research Institute Japan Co., Ltd., Graduate Program for Embodiment Informatics, Waseda University, and Graduate School of Information Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, “Development, deployment and applications of robot audition open source software HARK,” *J. Robot. Mechatron.*, 29, 16–25 (2017).
- [40] B. E. Heath *et al.*, “Spatial ecosystem monitoring with a Multichannel Acoustic Autonomous Recording Unit (MAARU),” *Methods Ecol. Evol.*, 15, 1568–1579 (2024).
- [41] 柳楽浩平, 水本武志, “音環境分析を用いた都市公園のにぎわいと鳥の声の可視化技術,” 2025 年度日本建築学会大会学術講演会 概要集 11032, p. 63 (2025).
- [42] R. Suzuki *et al.*, “Extracting bird vocalizations from a complex natural soundscape in forests using robot audition techniques,” *Proc. 2023 IEEE/SICE Int. Symp. System Integrations (SII2023)*, pp. 728–733 (2023).
- [43] 炭谷晋司 他, “複数マイクアレイを用いたキンカチョウの時空間的発声パターンに基づく個体間相互作用の調査,” 第 58 回人工知能学会 AI チャレンジ研究会資料, pp. 12–20 (2021).
- [44] C. K. Catchpole and P. J. B. Slater, *Bird Song: Biological Themes and Variations*, 2nd ed. (Cambridge University Press, 2008).
- [45] L. F. Gill, W. Goymann, A. Ter Maat and M. Gahr, “Patterns of call communication between group-housed zebra finches change during the breeding cycle,” *eLife*, 4, p. e07770 (2015).



橘 亮輔

2011 年同志社大学大学院生命医科学研究科 博士後期課程修了。博士 (工学)。東京大学特任研究員, 学術振興会特別研究員 PD, ETH Zurich Scientist, 東京大学助教及び特任准教授を経て, 2023 年より産業技術総合研究所 主任研究員。動物の音声, 小鳥の歌学習, 人の聴覚と発声制御の研究に従事。音楽好きで, ジャンルを問わず雑多に聞か, たまにオーケストラで指揮をする。共訳書『音楽と脳科学』(S. ケルシュ, 北大路書房, 2016)。



鈴木 麗壘

2003 年名古屋大学大学院人間情報学研究科 博士後期課程修了。博士 (学術)。同大学院情報科学研究科助手・助教, 同大学院情報学研究科助教・准教授, UCLA 客員研究員を経て, 現在名古屋大学大学院情報学研究科教授・情報学部教授 (兼務)。人工世界で生命現象を理解し応用する人工生命研究に従事。進化と学習, 協力的行動の進化, 進化とニッチ構築に関するエージェントベースモデルや, AI 技術を活用した鳥類の鳴き声に基づく相互作用の生態観測などに興味を持つ。