

外来種ソウシチョウが在来種の歌行動へ与える影響を探る：マイクロフォンアレイを用いた森林性鳥類の観測実例

Exploring the effect of invasive Red-billed Leiothrix (*Leiothrix lutea*) on songs of native birds: An example of observing forest birds using microphone arrays

松林志保¹・斉藤史之²・鈴木麗璽³・千葉尚彬⁴・中臺一博⁵・奥乃博⁶

¹大阪大学大学院工学研究科附属オープンイノベーション教育研究センター

²いであ株式会社大阪支社生態保全部

³名古屋大学大学院情報学研究科

⁴名古屋大学大学院情報科学研究科

⁵東京工業大学工学院システム制御系、Honda Research Institute Japan Co., Ltd.

⁶早稲田大学理工学術院創造理工学研究科

要旨

本稿は、マイクロフォンアレイとロボット聴覚ソフトウェア HARK を用いた森林性鳥類の観測実例として「日本の侵略的外来種 100」に選定されるソウシチョウと近傍他種の歌行動に関する予備的調査結果を報告する。音の到来方向情報を伴った歌の始まりと終わりのタイミング情報から、ウグイス同士は同時に鳴くことを避ける重複回避行動を示すことが明らかになった。異種間ではヒヨドリとソウシチョウ間では歌行動に相互関係は見受けられなかったのに対し、ウグイスとソウシチョウ間では有意な重複回避行動が確認された。種間による相互関係の違いは、周波数が近く、かつマイクロハビタットが似た種間では歌空間をめぐる競争が発生する可能性を示唆する。音源を 6 つのクラスに分けて試行した簡易音源分類ツールの総合的な分類精度は 76.1%、 k 係数は 0.66 (Substantial agreement) であり、分類エラーは鳥の歌行動の違いを反映した。

1 はじめに

鳥類の種類や位置などの正確なデータの蓄積は、生態学者や環境実務者、鳥類保護に携わる政策者にとって喫緊の課題である。鳥類生態学者にとって、ターゲットとする種の種類や数を正確に把握することは重要だが、野外調査は今もなお、目と耳による種類の同定や位置の推定が主流である。この基本的な観測技法の内、特に歌を歌う種に関しては、IC レコーダーの導入は、長時間にわたる観測を実現し、録音を後から再生できるためデータの再現性を高めた。しかし単一のマイクロフォンによる録音では歌の位置の推定には限界がある。この問題を解決するため、近年、複数のマイクロフォンで構成されるマイクロフォンアレイを用いて音の到来方向 (Direction of arrival: DOA) を推定する技術を野外環境に応用する研

究例が徐々に増えつつある[1]。マイクロフォンアレイ技術の鳥類観測への応用実例は、独自機材を用いた熱帯雨林に生息するムナジロカンムリアドリ¹の 2 次元位置推定[2]や、6 つの 2 チャンネル長期録音型録音機材¹から成る 12 チャンネルのアレイを用いたハシナガハチドリ¹の個体間距離の算出[3]などがあげられるが、機材の入手および収録作業が一般の生態学者にとって容易ではないため、まだその利用は限定的である。

我々は野鳥の歌行動の情報収集を効率よく行うことを目的として、ロボット聴覚オープンソースソフトウェアである HARK (Honda Research Institute Japan Audition for Robots with Kyoto University) [4]、市販のマイクロフォンアレイとノート PC を用いた簡易な録音システム HARKBird²を構築し、比較的廉価で汎用性の高いデータ収集を試みている。3 つのマイクロフォンアレイと HARKBird を用いて揖斐川河川敷で実施したオオヨシキリの観測実験では、高頻度で定位された音源の位置と、実際に人間の観測者が記録した鳥の 2 次元空間内での位置分布パターンは高い類似性が示された[5]。また、定位された歌情報から得た各個体の総歌時間を、縄張り争いにおける個体間の優劣の指標と仮定した上で、観測した個体間の歌空間をめぐる優劣が示唆された[6]。この観測実験は、音の伝達環境のよい河川敷において定点で比較的長時間大声でさえざるオオヨシキリのような鳥類を対象とした場合の当該技術の高い実用性を実証した。

本研究は、観測地を遮蔽物が少ない河川敷から、多様な植物相が遮蔽物として音の減衰率を高める森林に移し、より実践的な環境で HARKBird の実用可能性を試した。観測対象としては日本の侵略的外来種 100 [7]にも選定されるソウシチョウ (*Leiothrix lutea*) と同所的に生息する在来周辺鳥類 (鳴禽類) を採択した。

¹ SongMeter, SM2, Wildlife Acoustics, Inc, U.S.A.

² <http://www.alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~reijsi/HARKBird/>

ソウシチョウ (Figure 1³) は元来中国南部や東南アジアに生息し、その美しい鳴き声から日本では江戸時代には飼鳥として輸入が始まり古くから親しまれていた。その分散由来には諸説あるが、1980年代になると日本各地の山林でソウシチョウの生息及び繁殖が報告されるようになり、現在では特にニホンジカによって下層植生が衰退した森林内を中心に、主に九州から南関東にかけての広範囲で爆発的に数を増やしている[8][9]。九州地方の落葉広葉樹林では、採餌方法の違いから餌資源に関しては在来種との直接的な競争は少ない [10]との報告がある一方で、大きな歌声によりカケスなどの捕食者を誘引する可能性がある[11]など、在来鳥類への間接的な悪影響が懸念されている。しかしながら、その影響の実態は未解明な点が多い。



Figure 1 ソウシチョウ

本研究では、ソウシチョウが他鳥種へ与える影響の一例として歌行動に着目する。ウグイスなどソウシチョウと似通った生息環境に住み、かつ似通った周波数帯のさえざりを持つ種間では、より歌を伝達しやすい周波数帯をめぐる競争が行われ劣位の種の歌行動に変化があるのではないかという可能性を探る。複数のマイクロフォンアレイと HARKBird で 2 次元音源定位を、そして深層学習に基づく簡易な教師無し分類を試み、この生態学的な仮説検証のために音源定位技術がいかに貢献しうるかを検討した。

2 手法

2.1 録音方法

2017 年 7 月のほぼ無風の気象条件の下、複数のマイクロフォンアレイを用いて、林内で鳥の歌を夜明けから 3~6 時間録音した。調査地は、標高約 300 m の落葉広葉樹林 (室池園地・大阪府四條畷市) に位置する。元来は薪炭林であり、現在は混生するコナラ、リョウブ、ケヤキの林床に高さ約 0.5~1 m の笹類を主とする下層植生が繁茂する (Figure 2)。調査地ではソウシチョウは留鳥で、その密度は一年を通して非常に高く年に複数回の繁殖が推定される。

鳥の歌の録音には、8 チャンネル (TAMAGO-02 システムインフォロンティア社製) を 2 つ用いた。このマイクロフォンアレイの卵形のケースの胴体部分には各マイクロフォンが 45° 間隔で水平に配置され、

24 ビット、16K Hz の集音が可能である。各マイクロフォンアレイを約 10m 離れた高さ約 1.5 m の三脚の上に設置し、USB ケーブルで野外調査用 PC (TOUGHBOOK, CF-C2, Panasonic) に接続して録音を行った (Figure 2)。また、各マイクロフォンアレイの位置を GPS で測定した。



Figure 2 観測風景

2.2 定位推定方法

各マイクロフォンアレイで収録した音声信号から方向・分離音を抽出するために、HARKBird⁴ を用いて音源定位・分離を行った。まずそれぞれのマイクロフォンアレイにおいて、8 チャンネルの音声信号を読み込み、短時間フーリエ変換によって得た各チャンネルのスペクトログラムから MUSIC 法[12] を用いて音源定位を行った。次にその定位結果をもとに Geometric High order Decorrelation based Source Separation (GHSS) 法[13] を用いて各音源方向に対応した音源を分離する音源分離を行った。なお後述のように、今回の録音では周波数の高いセミの鳴き声が含まれていたためこれは定位せず、主な観測対象であるウグイス、ソウシチョウ、ヒヨドリ の 3 種の鳥の歌の周波数帯を含む 1800~5000 Hz を定位対象とした。

2.3 2次元統合方法

鳥の歌を録音後、人間による直接観測結果と比較するため、各マイクロフォンアレイで計測した音の到来方向を統合することで音源の 2 次元空間内での位置を推定した。具体的には、2 つのマイクロフォンアレイで同時帯に定位され、かつ後述する簡易音源分類ツールで同一の音源の種類と判定された音源のペアに関し、各マイクロフォンアレイから各定位音源の方向に伸びる半直線の交点を 2 次元位置と推定した。定位時刻に関しては、定位位置に近いマイクロフォンアレイによる音源を定位時刻として採用した。

2.4 人間による鳥類観測方法と歌情報の抽出

録音開始と同時に、録音機材の付近に立った人間の観測者が、周辺でさえざる鳥の種類や数、大まかな位置、歌い初めと終わりの時間を 5 分ごとに分単位で記録した。鳥種の識別や位置の推定は目視と耳による観測に基づく (Figure 3)。次に録音の中で複数種が鳴きあう時間帯の録音 1 時間分に着目し、音声分

³ 四條畷市室池園地にて衣川直美氏撮影

析ソフトウェア Praat⁵を用いて、鳥種および個々の歌の始まりと終わりのタイミングを手動によるアノテート作業で抽出した。種の判別や歌のタイミングに関する判断はスペクトログラム(声紋)と音声再生に基づく。

2.5 重複回避

手動で抽出した鳥の歌の始まりと終わり時間のタイミングを観測値とし、観測値に基づく歌の長さをランダムに入れ替えた時系列を1000回作成し計測した期待値を比較することで、各鳥の歌のタイミングが他個体の歌のタイミングに与える影響を調べた。分析には、統計分析フリーソフト R パッケージ Song Overlap - Null-model Generator for animal communication (SONG)[14]を用いて各鳥が近傍個体と同時に鳴くことを積極的に回避する場合(重複回避: $p \geq 0.975$)、反対に積極的に重複($p \leq 0.025$)する場合、もしくは各鳥の歌うタイミングは近傍個体の歌のタイミングとは無関係($0.025 < p < 0.975$)であるという関係性の統計的有意性を調べた。期待値算出の際には、各鳥種の歌の順番は固定した。これは観測されたウグイスが複数の歌のレパートリーを持ち、各歌は求愛や威嚇など異なった役割を果たすこと[15]、そしてその歌の順番には何かしらの行動学的意味(文脈)を持つ可能性があるためである。さらに、同種の複数個体が同時に鳴いていた場合、各歌がどの個体によって発せられたかは、定位された音の到来方向と人間による直接観測に基づく位置や歌のタイミング情報から総合的に判断した。

2.6 簡易音源分類

録音した音を人間が聞き返し、スペクトログラムでチェックするアノテート作業は、鳥の種類や歌のタイミングに関する分析に不可欠なステップではあるが、莫大な時間的コストがかかる。また、機械学習を実施する際の教師データを作成する際にも同様のコストがかかる。一方、録音データには分析対象である種や個体特有の特徴を持つ固有の歌が繰り返し出現するため、周辺の環境音に起因する多様なノイズや、数回偶発的に鳴くだけの種や個体に比べて定位がしやすい可能性がある。これまで、分離音源のスペクトログラムを Deep auto-encoder による教師なし学習を用いて特徴量を抽出し、2次元平面上に落とし込むことで分析対象の種の歌を大まかにグルーピングする HARKBird の簡易音源分類機能はウグイスの歌の抽出に試行されている[16]。本研究ではこの機能を用いて、耳で分離音を聞き、さらに目で分離音のスペクトログラムを確認しながら音源を6つのクラス(ウグイス、ソウシチョウ、ヒヨドリ、セミ、セミと他鳥種の混合音、環境音などのそ

他の音源やセミで断片化された音源)に識別した。

2.7 簡易音源分類性能の検証

録音に用いたマイクロフォンアレイのうち1つが定位・分離・分類した10分間のデータに着目し、6つのクラスへの分類結果と、分類音を再生し耳で確認した結果に基づいて作成したエラーマトリックスから、全体の精度(overall accuracy)と各クラスのカテゴリ分類エラーを算出した。分類エラーは過誤認(Commission error)および認識漏れ(Omission error)の双方を考慮した。また全体の精度はエラーマトリックス上で偶然による一致率(chance agreement)を勘案していないため、偶然ではない一致率として k 係数(Kappa coefficient)を以下の数式から算出した。

$$\hat{k} = \frac{N \sum_{i=1}^k x_{ii} - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i})}$$

数式中 k は分類クラス数、 x_{ii} は行 i と列 i のクラスの音源がそれぞれ観測された回数、 x_{i+} と x_{+i} は行 i と列 i の各周辺合計、そして N は総観測回数であり[17]、 k 係数は1に近いほど一致率が偶然に起因しないことを示す[18]。

3 結果と考察

3.1 簡易音源分類・定例

Figure 3 は約3時間分の分離音源の特徴量を2次元平面上に表示したものであり、図中各色点は6つの分類クラスに対応する。ウグイス(JBWA)、ソウシチョウ(RBLE)、およびヒヨドリ(BEBU)の鳥3種は垂直座標の高いエリアから低いエリアへ順に位置すると同時に、セミおよびセミと各鳥種の混合音と

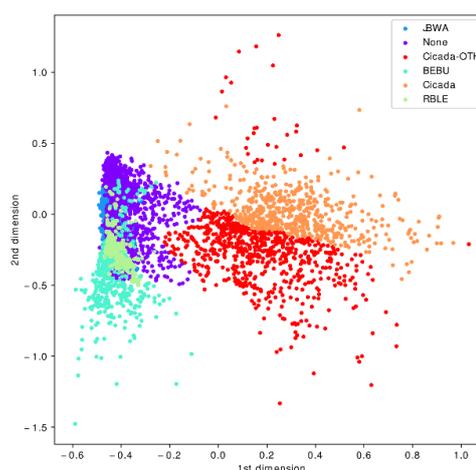


Figure 3 簡易音源分類一例

⁵ Boersma, Paul & Weenink, David (2017). Praat: doing phonetics by computer [Computer program]. Version

6.0.34, retrieved 10 October 2017 from <http://www.praat.org/>

比べて水平座標において比較的低いエリアに分類された。

この簡易音源分類結果を反映させたマイクロフォンアレイのうちの1つが定位した音源のスペクトログラム(上パネル)、それぞれの音源の到来方向に対応したMUSICスペクトラムおよびその分類結果(下パネル)をFigure 4に示す。分類結果及び分離音の耳による確認により、図中はじめの約20秒間はセミ(Cicada)が鳴き、これと同時にソウシチョウ1個体がマイクロフォンアレイからおおよそ-50度(北東)方向で鳴いていることがわかる。このソウシチョウはこの位置で1分間に計8回鳴いたがそのうち5回は該当種に分類された。一方1回目の歌の一部は環境音として、2回目はセミとの混声として、4回目はヒヨドリと誤検出された。また、ウグイス1個体がおおよそ20度(北北東)方向で2回鳴いたことも確認された。

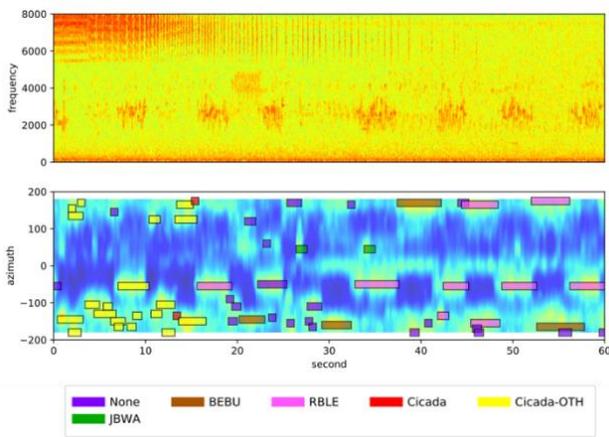


Figure 4 定位例(10時から1分間の録音データの解析)

3.2 2次元定位結果

録音に用いた2つのマイクロフォンアレイから得た20分間の情報を統合し、その定位音源の位置を2次元平面上に示したものをFigure 5に、同時刻帯に

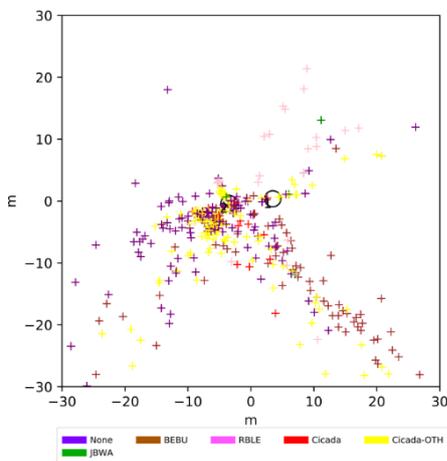


Figure 5 定位音源の2次元分布。図中黒丸はマイクロフォンアレイを示す。

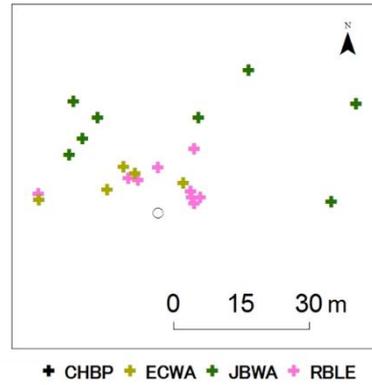


Figure 6 人間が観測した鳥の位置。図中黒丸は観測者に最寄りのマイクロフォンアレイを示す。

人間が観測した鳥の大まかな位置をFigure 6に示す。定位結果は20分間にわたって歌毎に分析し続けた結果なので、全方向に多数の音源が観測された。ただしこれらの音源にはセミやウシガエル、周辺の環境音など鳥以外の音源が多数含まれる。一方人間が直接観測した結果は、当初分析の対象になり得ると期待した種や方向に注意して、歌っている鳥の位置を5分ごとに主に音に基づいて大まかにプロットしたものであるため、定位結果のようにすべての歌を詳細にカバーしたものではない。そのためこれらの図を直接比較することはできないが、鳥種ごとにいくつかの傾向が明らかになった。

まず観測対象のソウシチョウ(RBLE)に関しては、北方向およびマイクロフォンアレイ周辺で定位された様子は直接観測結果と類似した分布パターンを示した。これはソウシチョウの歌が比較的長く今回定位対象とした周波数帯とも合致すること、そして移動はしつとも定点でさえずり続け定位がしやすかったことが原因と考えられる。また南東方向では、フィールド調査中は観測対象とはしなかった一般種ヒヨドリ(BEBU)が定位されており、各マイクの定位結果からも存在が確認された。一方ウグイス(JBWA)に関しては、人間は観測したが定位確率は著しく低かった。これは、この観測時間帯ではウグイスが頻繁に移動しながら比較的遠方で控えめに鳴いていたため、その歌の「ケキョ」部分のみが短く聞こえがちで、2つのマイクで同時に定位される確率が低かったためと考えられる。同様に、センダイムシクイ(ECWA)も短時間に移動を繰り返しながら単発の歌を歌っていたため人間は観測ものの2次元上では定位されなかった。また、分析に用いたパラメータ設定および周辺音環境下で観測された鳥の歌声の定位限界距離は20~30m弱であった。この距離限界を超えると人間の耳では容易に識別できるコジュケイ(CHBP)の甲高く数分間繰り返される歌なども定位されなかった。

3.3 簡易音源分類精度の検証

10分間の録音で定位された音源を6つのクラスに分類した結果と耳で確認した後に分類した音源のエラーマトリックスをTable 1に、それぞれのクラスの

認識漏れおよび過誤認識エラーを Table 2 にまとめる。エラーマトリックスから得られる全体的な分類精度は 76.1%、偶然による一致を排除した k 係数は 0.66 (Substantial Agreement) [18]であった。

Table 1 定位音源を6つのクラスに分類したエラーマトリックス

Class types determined from classified source	Class types determined from reference source						
	None	BEBU	RBLE	Cicada	Cicada-OTH	JBWA	
None	134	23	6	0	0	13	
BEBU	5	109	11	0	0	0	
RBLE	10	7	24	0	1	5	
Cicada	1	0	0	1	0	0	
Cicada-OTH	3	0	1	0	15	1	
JBWA	10	2	1	0	0	35	

Table 2 各クラスの分類エラー

	Omission error	Comission error
None	17.8	23.9
BEBU	22.7	12.8
RBLE	44.2	48.9
Cicada	0.0	50.0
Cicada-OTH	6.3	25.0
JBWA	35.2	27.1

鳥以外の自然環境音や、セミで断片化された鳥の歌で構成されるクラス (None) の認識漏れおよび過誤認識エラーはともに他の鳥種に比べて低いことから、鳥の歌とその他の音源の識別は容易であったことがわかる。鳥3種のうち、ソウシチョウの両分類エラーが比較的高かった要因は、個々の歌の長さや抑揚の幅の広さ、そして複雑な歌構造が、セミや他鳥種と混声もしくは断片化を招いたと推定される。同様にウグイスも単発の歌を頻繁に移動しながら発した場合が多かったこと高い認識漏れにつながった可能性がある。一方ヒヨドリは多彩なバリエーションの歌を発したものの、一つ一つの歌は単純な構造を持つこと、さらに大声量で歌っていたため他2種に比べ過誤認識が低かったと考えられる。

3.4 鳥種間・個体間の歌を介した相互関係

1時間の録音時間中、調査地では、ウグイスやソウシチョウ、センダイムシクイに加えハシブトガラスやヒヨドリ、そして外来種コジュケイなど住宅地から低山まで幅広い生息地に住み環境適応力の高い種が観測された。各種の鳥の数および総歌時間に占める割合を Figure 7 に示す。このうち歌数が20以上、かつ各個体が総歌時間に占める割合が5%以上の個体に着目すると、ウグイス、ヒヨドリ、ソウシチョウが総歌空間の92%を占有した。

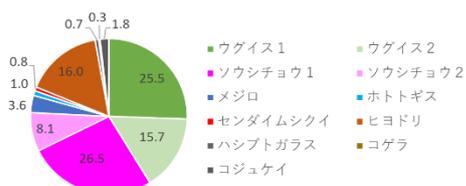


Figure 7 各鳥の歌が総歌時間に占める割合

各個体の歌のタイミングから、各個体の歌によるやりとりを介した相互関係を Figure 8 にまとめる。

同種間の相互関係に着目すると、ウグイス同士は重複を有意に回避する傾向が示唆された。この結果はこれまで鳥類の他種ハシナガハチドリ [3] やオオヨシキリ [5] [6] で確認された重複回避行動と一致する。ソウシチョウに関しては、1個体がもう1個体を回避したが、その逆の回避行動は確認されなかった。ソウシチョウの種内での重複回避行動に関しては、当該種は主に雄のみが歌う他鳥種と異なり、雌雄が交互にデュエットを行う歌行動の影響もあるため追跡調査が必要である。

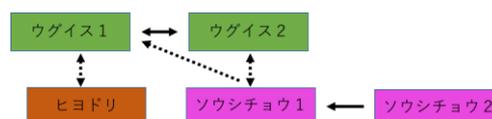


Figure 8 各鳥の歌を介した相互関係。矢印実線は同種間、破線は異種間で、矢印元の種が矢印先の種の歌のタイミングに有意な影響を与えた関係を示す。

異種間では各個体・鳥種は場合に依じた相互関係を示した。観測ターゲットであるソウシチョウとウグイス1ペアは双方で回避し合った。観測されたウグイスとソウシチョウ各2個体の相互関係を総合的に見ると、ソウシチョウがウグイスを回避する確率に比べ回避される確率のほうが低い。つまりソウシチョウがウグイスを効率よく回避しているのに対し、ウグイスはソウシチョウを回避しきれていないのであるならば歌空間をめぐる2者の競争でソウシチョウが有意に立っている可能性が示唆された。歌空間をめぐる競争で有意に立つ種は共存する生息環境をめぐる競争でも有意に立つ可能性が高いため、ソウシチョウはウグイスに負の影響を与えている可能性がある。一方ウグイスとヒヨドリの在来種間では、歌のタイミングに関する相互関係は観測されなかった。

今後のフィールド調査の課題として、ソウシチョウの歌の性差の追跡調査に加え、密度や近傍個体との距離が重複回避行動に与える影響の解明があげられる。また、ソウシチョウが周辺他種の歌行動に与える影響を検証する際、巣や卵、抱卵班の確認などにより各種の繁殖タイミングが一致しているかの確認も必須である。

4 おわりに

本稿は、マイクロフォンアレイとロボット聴覚を使った森林性鳥類の観測実例として、侵略的外来種ソウシチョウがその周辺在来種種の歌行動に与える影響の解明を試みた。鳥類の歌は、求愛や縄張り宣言、警戒、威嚇など一日の時間帯やシチュエーションにより多様な機能を持つが、特に繁殖期においては歌でいかに効率よくメッセージを送るかが繁殖成功率に大きな影響を及ぼす。重複回避の解析からソウシチョウが歌の周波数帯の近いウグイスに負の影響を及ぼす可能性が示唆された。

位置情報付きの音声データを解析することは鳥類の歌行動を理解するにあたり大きな意義を持つ。当該技術の活用により、音の到来方向に裏付けされた個体間識別が実現し、鳥がいつどこで鳴いたかの情報が明確になった。また、当初観測対象としていなかったヒヨドリとソウシチョウの歌を介した相互関係の解析が可能になるなど、当該技術を用いる利点のひとつであるデータの再現性・検証性の高さが実証された。

2次元における定位の試みに関しては、予測していた音の伝達を妨げる植物などの遮蔽物の課題に加え、セミなど観測対象以外の音声を含む多様な周辺音の問題が浮き彫りになった。一方で、多様な障壁にもかかわらず、歌の特徴によっては森林内でも大まかな位置の推定が可能であることも示唆された。歌数の多い種は検出されやすい中でも特に、定位対象の周波数帯の歌を定点で長時間繰り返すソウシチョウやヒヨドリは2次元上でも定位されやすく、頻繁に移動し歌の頻度や音量が低い種はそもそも複数のマイクで同時に定位される確率が低いいため、その結果として2次元上で定位されにくい傾向を示した。

また、簡易音源分類機能の全体的な分類精度は76.1%、偶然による一致を排除した k 係数は0.66 (Substantial Agreement)であった。この分類機能は、特に鳥の歌とその他の音源を識別する際に有効であった。鳥の歌の分類精度は、2次元定位と同様に種毎の歌行動や歌の特徴を反映した。定点に留まり大音量で単純な構造の歌を繰り返すヒヨドリに比べ、複雑な歌構造を持つソウシチョウや、頻繁に移動を繰り返したウグイスはセミと混声そして断片化されやすく、その結果高い分類エラーを示した。

マイクロフォンアレイと HARKBird を用いた野鳥観測とその生態理解への今後の課題として、自動分類機能のさらなる洗練があげられる。自動分類精度の向上により歌の分析コストが大幅に軽減し、長期間にわたる観測が実現するため、鳥類の位置的そして時間的棲み分けに関する生態の解明に向け応用の可能性が高まると考えられる。

謝辞

炭谷晋司氏、森松健充氏 (名古屋大学) のデータ分析、衣川直美氏 (NPO 法人里山サロン) のフィールド調査における協力を深く感謝申し上げる。本研究の一部は JSPS 科研費 JPA17H068410、JP15K00335、JP16K00294、JP24220006 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Mennill, D.J., Battiston, M., Wilson, D.R., Foote, J.R., & Doucet, S.T. (2012). Field test of an affordable, portable, wireless microphone array for spatial monitoring of animal ecology and behaviour. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 704-712.
- [2] Collier, T.C., Kirschel, A.N.G., & Taylor, C.E. (2010). Acoustic localization of antbirds in a Mexican rainforest using a wireless sensor network. *Journal of Acoustical Society of America*, 128(1), 182-189.
- [3] Araya-Sales, M. Wojczulanis-Jakubas, K., Phillips, E.M., Mennill, D.J., & Wright, T.F. (2017). To overlap or not to overlap: context-dependent coordinated singing in lekking long-billed hermit. *Animal Behaviour*, 124, 57-64.
- [4] Nakadai, K., Takahashi, T., Okuno, H.G., Nakajima, H., Hasegawa, Y., & Tsujino, H. (2010). Design and implementation of robot audition system "HARK"- open source software for listening to three simultaneous speakers. *Advanced Robotics*, 24, 739-76.1.
- [5] Suzuki, R., Sumitani, S., Naren, Matsubayashi, S., Arita, T., Nakadai, K., & Okuno, H.G. Field observations and virtual experiences of ecoacoustic dynamics of bird songs using an open-source software for robot audition HARK. (accepted).
- [6] Matsubayashi, S., Suzuki, R., Saito, F., Murate, T., Masuda, T., Yamamoto, K., & Okuno, H. G. (2017). Acoustic monitoring of the great reed warbler using multiple microphone arrays and robot audition. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 29(1), 224-235.
- [7] 鷲谷いずみ (監修) 日本生態学会 (編). (2002). 「外来種ハンドブック」. 地人書館, 東京.
- [8] 江口和洋, 増田智久 (1994). 「九州におけるソウシチョウ *Leiothrix lutea* の生息環境」 *日本鳥学誌* 43, 91-100.
- [9] 東條一史. (1994). 「筑波山塊におけるソウシチョウ *Leiothrix lutea* の増加」 *日本鳥学誌* 43, 39-42.
- [10] 江口和洋, 天野一葉. (2008). 「ソウシチョウの間接効果によるウグイスの繁殖成功の低下」: *日本鳥学会誌* 57 (1), 3-10.
- [11] Amano, H.E. & Eguchi K. (2002). The foraging niches of introduced red-billed leiothrix and native species in Japan. *Ornithological Science*, 1, 123-131.
- [12] Schmidt, R.O. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, 34(3), 276-280.
- [13] Nakajima, H., Nakadai, K., Hasegawa, Y. & Tsujino, H. (2008). Adaptive step-size parameter control for real world blind source separation, *In Proc. ICASSP*, 149-152.
- [14] Masco, C., Allesina, S. Mennill, D.J., & Pruett-Jones, S. (2016). The song overlap null model generator (SONG) - a new tool for distinguishing between random and non-random song overlap. *Bioacoustics*, 25 (1), 29-40.
- [15] Hamao, S. (2013). Acoustic structure of songs in island population of the Japanese-bush warbler, *Cettia diphone*, in relation to sexual selection. *Journal of Ethology*, 31, 9-15.
- [16] 千葉尚彬, 炭谷晋司, 松林志保, 鈴木麗瑩, 有田隆也, 中臺一博, 奥乃博. (2017). 「ロボット聴覚を活用した野鳥の歌行動分析のためのツール HARKBird の機能強化」. 第 35 回ロボット学会学術講演会講演概要集, RSJ2017ACA3-03.
- [17] Jensen, J.R. (2005). *Introductory Digital image processing. A remote sensing perspective*. NJ: Pearson Prentice Hall.
- [18] Landis, J.R., & Koch, G.G. (1977). The measurements of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.