

ウグイスに対するプレイバック実験における マイクロホンアレイを用いたさえずりの方向分布分析

An analysis on a directional distribution of songs of Japanese Bush-Warbler

in playback experiments using a microphone array

炭谷晋司*¹ 松林志保*² 鈴木麗璽*²

Shinji SUMITANI*¹, Shiho MATSUBAYASHI*², Reiji SUZUKI*²

名古屋大学 情報文化学部*¹, 名古屋大学 大学院情報科学研究科*²

School of Informatics and Sciences, Nagoya University*¹

Graduate School of Information Science, Nagoya University*²

Abstract

本稿では、マイクロホンアレイとロボット聴覚ソフトウェア HARK を用いた野鳥の歌行動観測システム HARKBird の更なる活用可能性の検討として、大学演習林におけるウグイス 1 個体の縄張り内に、同種の歌をスピーカで再生可能にしたシステムを用いてプレイバック実験を行った際の、対象個体のさえずりの種類とその方向を抽出した。また、対象個体のさえずりに対して鳴き返すインタラクティブ実験も行った。実験の結果、本システムは対象個体のさえずりをよく定位できることを確認した。また、再生音の有無が対象個体のさえずりと移動のパターンに大きく影響することなどが明らかになった。

1 はじめに

1.1 背景

野鳥の生態の理解においては、録音機材の進歩や低価格化に伴って録音に基づく行動観測データが容易に得られるようになった。しかし、単一のマイクロホンを用いた録音では、位置情報等を記録できないために個体識別が容易でないなど、個体間で生じる動的な相互作用の分析に問題が生じる場合がある。一方、近年では複数のマイクで構成されるマイクロホンアレイを用いて音源の方向や位置を定位したり、定位した音源を分離したりする技術がロボット工学分野等において発展している。

我々のグループでは、この音声処理技術を野鳥の生態観測に活用することを目的として、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) [1] と、市販の会議などに用いられるマイクロホンアレイを用いた簡易なシステムである HARKBird を構築し、野鳥

の歌行動のタイミング、方向、および、音源の自動抽出を試行している [2, 3]。このシステムでは、従来の単一のマイクロホンを用いた録音では得られなかった空間的な情報が取得できるため、生態理解への大きな貢献が期待される。

これまで、我々のグループでは HARKBird システムの定位精度などの基本的な検討を行ってきた。本研究では、HARK の野鳥観測への更なる活用の可能性の検討として、HARK の拡張性と実時間処理を活用した野鳥の歌行動の詳細な方向的・時間的ダイナミクスの計測を試みた。

具体的には、大学演習林におけるウグイス 1 個体の縄張り内に、同種の歌をスピーカで再生可能にした HARKBird システムを用いてプレイバック実験を行った際の、対象個体のさえずりの種類とその方向を抽出した。また、HARK の特徴の一つである実時間処理を活用し、対象個体のさえずりに対して鳴き返すインタラクティブ実験も行った。また、自然環境と人工システムとの相互作用の理解の観点から、ボコーロイド初音ミクによるウグイスの真似歌を用いた実験も行った。これらの結果から、HARKBird を用いた野鳥の歌行動のより詳細な計測と理解への応用の可能性を検討する。

1.2 HARKBird

HARKBird は、フィールドにおいて安価で容易に利用可能なシステムを目指した、野鳥の歌行動観測のためのノート PC と USB マイクロホンアレイを用いた観測・分析システムである (Figure 1)。このシステムは、マイクロホンアレイでの録音の開始、終了をはじめ、HARK の機能を用いた音源定位と分離や、分析結果の可視化がノート PC 上の GUI で実行可能な Python をベースとしたスクリプト集である。詳細は、Web ページ¹や [2, 3] を参照されたい。

本研究では、HARKBird 内で用いる音源定位・分離の

¹<http://www.alife.cs.is.nagoya-u.ac.jp/~reiji/HARKBird/>

ためのネットワークを拡張し、録音中に一定の時間間隔で音声ファイルを再生したり、実時間での音源定位に応じて再生ができるようにした。また、実験後に得られた音声ファイルの分析にも HARKBird を用いた。

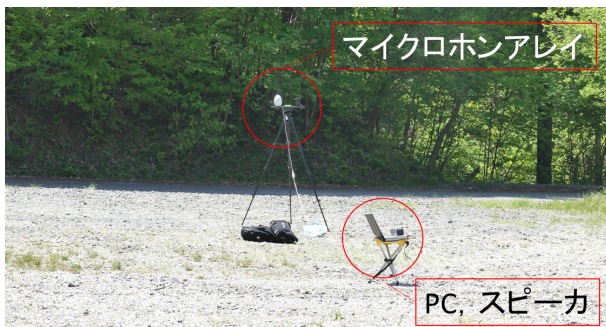


Figure 1: 実験システム

2 手法

2.1 対象種：ウグイス

多くの小鳥（鳴禽類）のオスは、春から夏にかけての繁殖期になると比較的長い音声を繰り返し発するさえずり（歌）を行う。さえずりには、主に他のオスに向けての縄張りの主張と自分の存在をメスにアピールする2つの役割があるといわれている。

百瀬は、本研究で対象とするウグイスのオスのさえずりには、ホーホケキョと聞こえる高いピッチで歌う H 型とホーホホケキョなどとホーの部分で断続する低いピッチで歌う L 型があることなどを、スピーカから同種の鳴き声を再生するプレイバック実験を行って示した [4]。この実験では、スピーカから同種のさえずりの再生を一定期間行い、その間に行われた注目個体のさえずり回数とその種類の計測を行った。結果、スピーカからさえずりを再生している間は再生を行っていない間と比べ H 型の頻度が減少し、L 型の割合が増加することを示唆している。この結果から、L 型のさえずりには近隣個体への威嚇の意味があると考えられることを示した。また、同時に探索飛行といわれる、他個体を探索するために行う飛行回数も測定し、再生音がある場合は探索飛行の回数が増加する結果を示した。

本研究では、プレイバック実験中に音源定位を行い、再生音がウグイスの移動とさえずりの種類に与える影響を調べた。

2.2 実験方法

実験は、2016年5月21、22日に名古屋大学大学院生命農学研究科附属フィールド科学教育研究センター稲武フィールド（愛知県豊田市稲武町）の森林で行われた。Figure 2 に示す、周囲を木々に囲まれた開けた場所に三脚に固定し

た USB 接続マイクロホンアレイ（8チャンネルマイクロホンアレイ TAMAGO（システムインフロンティア社製²⁾）を配置し、スピーカ（サンワサプライ社製 MM-SPBTBK）および PC はマイクロホンアレイを原点として真東の方向に 5m 離れた地点に配置した。このとき、スピーカは指向性を考慮して上向きに設置した。この周辺は、ある1個体のウグイスの縄張りであり、このウグイスを今回のプレイバック実験の対象個体とした。実験中、対象個体がさえずるソングポストは、マイクロホンアレイ周辺からそれほど大きな差のない距離の木々にあり、方向を計測することで個体の移動パターンをおおよそ把握することができるので、ここを実験場所とした。



Figure 2: 実験フィールド

今回の実験では、再生音源として注目するウグイスについて事前に録音した H 型、L 型のさえずり、昨年の調査で周辺において録音した同種他個体の H 型、L 型のさえずり、ボーカロイド初音ミクを用いてウグイスのさえずりを模した L 型の音を使用した。各再生音源は、正規化することによって最大音量を統一した。

さえずりの再生方法として、数秒毎に再生音を繰り返して周期的に再生する方法と、対象個体のさえずりに対して応答して数秒後に再生する2つの方法を採用した。周期的な再生では、8秒毎、12秒毎にスピーカから音源を再生し、さえずりに応じて再生する場合には、HARK でリアルタイムに音源を定位した3秒後にスピーカからさえずりを再生するように設定を行った。

各実験中に同時に行った録音に対し、ウグイスの鳴き声をよく定位するように HARKBird のパラメータを適宜調整し、音源定位を行った。音源定位結果は、Figure 3 の可視化した音源定位結果が示すように、対象個体の歌行動の時刻と方向をうまく記録することができた。この出力結果を修正し、対象個体のさえずりの時刻、方向、およ

²http://www.sifi.co.jp/system/modules/pico/index.php?content_id=39

び、応答実験におけるシステムの再生時刻のデータを作成した。さえずりの種類に関しては、出力結果を元に手作業で集計した。応答実験における注目個体以外の音で反応した場合もスピーカの再生回数として集計した。

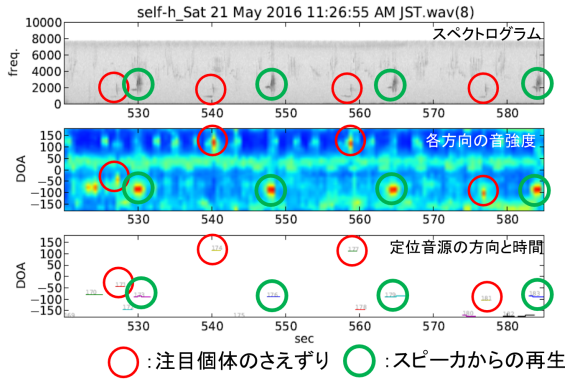


Figure 3: 音源測定結果 (注目個体 H 型, 応答実験)

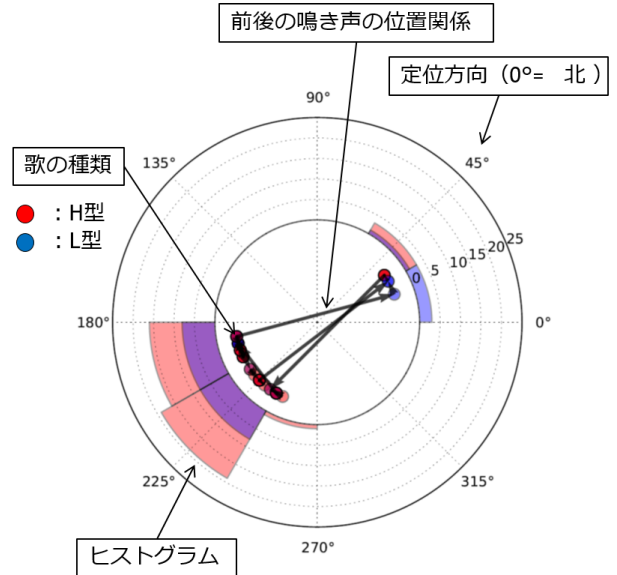


Figure 4: 方向分布 (録音のみ)

3 実験結果

3.1 さえずりの種類と方向の分布

各条件での実験 500 秒間における注目個体が行ったさえずりの種類と方向の分布について報告する。ここでの 500 秒間は、注目個体がスピーカ周辺から離れた場所へ移動したなどの理由で長時間鳴いていなかった期間を省いた時間である。

まず、Figure 4 のプレイバックなし、録音のみの結果を例に図を説明する。赤色と青色の丸は H 型あるいは L 型のさえずりをマイクから見てその方向で歌ったことを意味し、方向は 0 度が北 (磁北) を指す。さえずり同士を繋ぐ矢印は、定位したさえずりを順に繋いだものであり、さえずり前後での移動を簡易的に示したものである。ヒストグラムは、方向を 30 度ごとに区切った各範囲内での H 型、L 型の各さえずりの回数を示す。

Figure 5 は、各条件における結果を Figure 4 と同様な方法で示したものであり、Figure 1 はその結果に関する定量的な値を示したものである。これらの図と表を元に、全体的な傾向や個別の条件の影響について論ずる。

3.1.1 再生音の有無の影響

まず、プレイバックを行わず、録音のみ行った場合は、南東方向でほとんどのさえずりが定位されているように、ほぼ定位位置で頻繁にさえずる傾向があった。さえずりの種類は、L 型のさえずりも用いる (58 回中 20 回) が、H 型のさえずりをより多く歌うこと (58 回中 38 回) が明らかとなった。また、移動に関しては、近隣の木々を少しずつ移動する様子がみられるが、定位方向が大きく変化するような移動はあまり行わない傾向があった。他個体のない環境においては、定位位置に留まって頻繁にさえず

りを行う傾向があるようである。

これに対して、再生音のある場合においては、いずれの条件でも再生音のない場合と比較してさえずり回数が減少した。H 型でのさえずり回数の減少がみられる一方で (全再生音平均 11 回, 27 回減), L 型のさえずりに関しては増加傾向はあったが、H 型ほど変化はみられなかった (全再生音平均 22 回, 2 回増)。また、移動に関しては、定位方向の大きく変わる移動が増加する傾向がみられた。さえずり方向の分散をみても、ほぼ全ての条件において再生音のない対応する条件より高い値を示しており (録音のみ 0.464 全再生音平均 0.876, 0.412 増)、個体は同じ場所に留まらず、あちこち動き回るような傾向があった。これらのことから、ウグイスは H 型のさえずりを減らし、L 型の比を高め、周囲を飛び回ること強い警戒を示していることが考えられる。

3.1.2 プレイバック間隔・応答の影響

次に、プレイバックの間隔の影響について考える。プレイバック間隔の違いは、さえずりの頻度や動きに影響を与えることが明らかとなった。まず、8 秒間隔と 12 秒間隔それぞれの H 型のさえずり回数を比較すると、8 秒の場合平均 9 回、12 秒の場合平均 19 回であり、全ての再生音において H 型のさえずり回数が 8 秒間隔で再生を行った際に少なくなる傾向がみられた。また、移動に関しては、8 秒間隔では分散は平均 0.916 であるに対して、12 秒間隔では、平均 0.798 であるように、大きな移動の頻度が 8 秒間隔において高い傾向にあった。一方、L 型に関しては、さえずり頻度が 8 秒の場合に大きくなるものの影響は小さかった (12 秒平均 22 回 8 秒平均 23 回)。これより、頻繁な再生は注目個体に対して強い警戒を生じさせ、

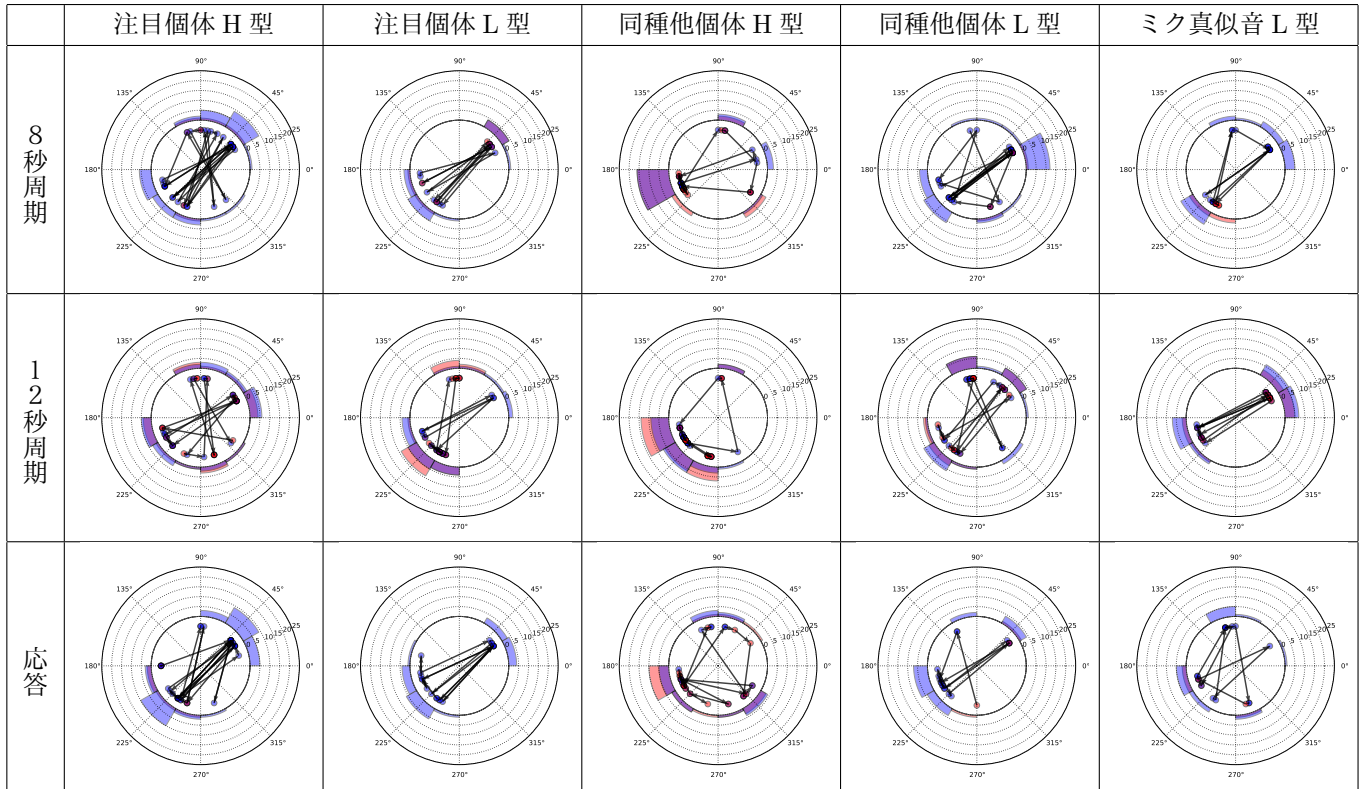


Figure 5: さえずりの種類と方向の分布と推移

Table 1: 各条件におけるさえずり回数と方向分散，スピーカからの再生数

再生音		対象個体のさえずり回数				さえずり方向の分散	スピーカからの再生回数	
		H	L	H + L	H : L			
録音のみ(プレイバックなし)		38	20	58	0.655 0.345	0.464	0	
注目個体	H	8秒	4	31	35	0.114 0.886	0.960	60
		12秒	19	25	44	0.432 0.568	1.000	40
		応答	4	33	37	0.108 0.892	0.998	28
	L	8秒	6	14	20	0.300 0.700	0.995	60
		12秒	20	18	38	0.526 0.474	0.780	40
		応答	0	19	19	0.000 1.000	0.958	25
同種他個体	H	8秒	27	24	51	0.529 0.471	0.674	59
		12秒	29	22	51	0.569 0.431	0.370	40
		応答	20	17	37	0.541 0.459	0.854	29
	L	8秒	2	28	30	0.067 0.933	0.959	60
		12秒	16	22	38	0.421 0.579	0.941	40
		応答	2	17	19	0.105 0.895	0.885	21
初音ミク	L	8秒	4	18	22	0.182 0.818	0.992	59
		12秒	11	21	32	0.344 0.656	0.900	40
		応答	3	16	19	0.158 0.842	0.869	30
平均		8秒	9	23	32	0.238 0.762	0.916	60
		12秒	19	22	41	0.458 0.542	0.798	40
		応答	6	20	26	0.182 0.818	0.913	27
		全再生実験	11	22	33	0.293 0.707	0.876	42

H型のさえずり頻度を減らし、移動頻度を増加させることが示唆される。

これらに対し、対象個体のさえずりの3秒後に再生する応答実験では、対象個体のさえずり回数はさらに少なくなることがわかった（H型平均6回、L型平均20回、合計26回）。特にH型のさえずりは8秒周期と同程度、あるいはそれを超えるほどの抑制がみられた。このとき、全体としてスピーカによるシステムからの応答回数は平均27回であり、他の条件（8秒周期平均60回、12秒周期平均40回）と比べて少ない傾向があった。

以上から、周期的なプレイバック実験の結果ではスピーカからの再生回数が多いほど注目個体のH型でのさえずり回数は抑制されていたが、応答実験ではその傾向とは異なり、少ない頻度でも大きな抑制の効果があったといえる。これは、注目個体が応答によるスピーカからの再生音を、単純なプレイバックと比べてより自分自身に向けられたものとして意識し、警戒を強めた可能性を示唆している。8秒間隔の実験でのスピーカからの再生回数は、応答実験での再生回数の倍近くあることと、また8秒間隔と12秒間隔にある差を考慮すれば、注目個体のさえずりに与える影響の度合いとしては、再生間隔よりも、再生のタイミングによる影響が強いことが示唆される。観測とプレイバック実験において個体の鳴き声による反応が異なることは知られているが[5]、この結果は、単純なプレイバック実験とインタラクティブ実験においても異なる反応が得られうることを示唆している。

3.1.3 再生音の種類による影響

再生音の種類によっても、さえずりや動きに変化がみられた。再生音のある場合、定位方向が大きく変化する移動が増加したと述べたが、その移動は大まかに、スピーカ上近くを通過するように2つのソングポスト間を繰り返して行き来する移動と、スピーカ周りの移動を繰り返し、周りからスピーカの様子をうかがう移動の2種類が確認できた。

前者の移動は、注目個体のH型、L型、同種他個体のL型、ミクの真似音L型を再生した場合に多くみられた。この移動は、Figure 5に示す方向グラフの中央付近（270度方向）にスピーカがあり、その周辺を矢印が横切っていることから確認できる。特に、注目個体のH型を再生した場合、分散も高く（0.960-1.000）、図からも様々な場所へ移動してあらゆる方向でさえずりを行っていることが確認できた。また、他の実験に比べてスピーカ上近くを通過する回数が多いことから（約10回程、他の実験では5-7回程程度）、注目個体は注目個体H型の再生音に対して、より強い警戒を示したことが示唆される。

また、後者の移動は、同種他個体のH型、L型を再生した場合に多く確認できた。特に、同種他個体L型を再生した場合に多くみられ、またスピーカ上近くを通過する

ような移動がほとんどみられなかったり、他の再生音を用いた実験に比べてH型のさえずり回数の減少が少なく、さえずり方向の分散も低い値を示すなど、異なった傾向がみられた。これは、自分（注目個体）の縄張り内に他個体が侵入し、縄張りの主張としてH型をさえずるという状況に、対象個体が呼応してさえずりの頻度を高めたのではないかと推測される。

さらに、初音ミクの真似音L型に関して、先ほど述べたように本物のウグイスの録音を用いた他の再生実験と同様な傾向がみられていることから、注目個体は初音ミクの真似音に関しても同種の個体であると認識していることが考えられる。

以上のように、注目個体は、再生音の違いによって異なった挙動をみせた。人間には判断の難しいわずかなさえずりの違いでも、ウグイスは認識し、その状況に応じて歌と移動のパターンを変化させているということが示唆される。

3.2 さえずりの種類と移動の関係

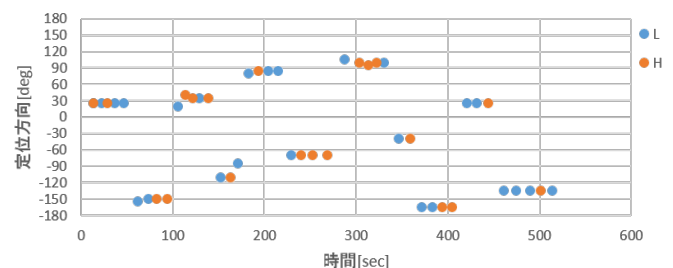
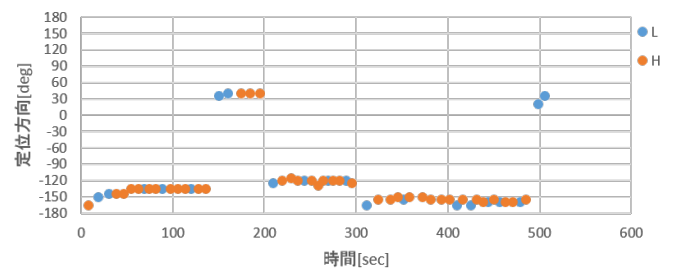


Figure 6: さえずりの方向と種類の推移. 上: 録音のみ, 下: 注目個体H型の録音を12秒周期で再生した場合.

次に、注目個体の移動と歌の種類の関係について、分析で得られた結果を報告する。Figure 6は、録音のみと注目個体H型の録音を12秒周期で再生した場合のさえずりの方向と種類の推移を示したものである。このグラフから、注目個体は定位位置が大きく変化する移動を行った後、最初にさえずる歌の種類としてL型を用いる確率が非常に高いことが確認できる。Table 2は、各条件における、定位位置の変化回数と、その変化後の最初のさえず

Table 2: さえずりの種類と移動の関係

再生音		30度以上の定位位置変化回数	その後のさえずり	
			H型	L型
録音のみ(プレイバックなし)		5	0	5
注目個体	H	8秒	19	2
		12秒	11	1
		応答	17	0
	L	8秒	10	1
		12秒	6	0
		応答	12	0
同種他個体	H	8秒	6	1
		12秒	5	0
		応答	8	0
	L	8秒	15	0
		12秒	8	0
		応答	7	0
初音ミク	L	8秒	7	0
		12秒	7	0
		応答	7	1

りの種類を示した表である。定位位置の変化回数は、さえずり前後で30度以上の定位角度の変化があるときを移動と考え、その回数を集計した。表からわかるように、すべての条件において、定位位置の大きく変化するような移動を行った後の最初のさえずりは、L型を用いる傾向があった。再生音の種類、有無に関わらず、この傾向がみられることから、注目個体の行動として移動後はL型のさえずりを行う傾向があることが示唆される。

例えば、現在地点から遠方で移動し、最初にH型でさえずりを行った場合、移動先に他個体がいれば、他個体はすぐさま攻撃してくる可能性がある。しかし、L型を最初にさえずることにより、移動先に他個体がいなくても、他個体は自分の存在が気付かれていると認識し、攻撃を行ってこないかもしれない。そういったリスクを排除するために、移動直後にL型のさえずりを行っていることは考える。いずれにしても、ウグイスにとって何らかの意味ある行動であることが強く示唆される。

4 議論

我々の実験で得られた結果において、周期的なプレイバックとさえずり頻度の関係については、先行研究 [5] の結果とよく一致した。従来のモノラルマイクによる実験方法では、多くの場合、歌の種類やタイミングは録音から手作業で抽出することが多い。また、探索行動などの個体の動きを観測する場合も、対象とする野鳥は小さく素早く動くため、その場で目視で確認するのが一般的であり、どちらの意味でも時間や作業のコストが掛かる。一方、我々の行ったマイクロホンアレイを用いた録音での観測は、どちらに関しても、容易に様々なデータを得ることができただけでなく、より正確なデータを得られることが期待できる。

その結果、今回の実験では、従来研究と同様な結果に加えて、スピーカ上を通過する、スピーカ周りを移動するなどのように、探索飛行の詳しい挙動も確認できたり、更には移動後におけるさえずりの特徴など、これまで確認されていなかった挙動もみることができた。この結果は、

移動情報を伴う録音データを分析することによって得られたものであり、実験と同時に調査を行うことなく分析が可能な点もマイクロホンアレイを用いた録音のメリットでもある。

また、応答実験では、周期的な再生による実験と異なる結果が得られた。これは、ウグイスが他個体のさえずりと相互作用しうることを意味しており、実時間での処理によるインタラクティブ実験の有用性を示唆している。今回の実験では、単に音源定位の3秒後というタイミングで再生音を流したが、様々に拡張しうる。例えば、注目個体のさえずりの間隔に合わせて再生したり、再生を行う、行わない、あるいは再生音にバリエーションを持たせるなどの変化を加えることで、従来研究では確認できなかった新たな挙動も確認できる可能性がある。

一方で、本実験の課題もいくつか存在した。今回の実験では、ノイズや近隣個体のさえずりによる応答実験でのプレイバックの誤動作などの不具合も確認された。音源の定位は、環境に大きく依存するため、場所ごとにパラメータを変更する必要がある。応答実験では、そういった問題も考慮しつつ、注目した個体のさえずりにのみ反応するといった方法も考えていかなければならない。

再生音の選定に関しても課題がある。例えば、注目個体のさえずりは、注目個体自身がどのように捉えているか、同種他個体のさえずりは同じフィールドで得た録音であるが、近隣個体として捉えているのか、あるいは全く知らない個体として捉えているかなど、不明な点があった。この問題は、他の再生音を用いて実験を行うことで解決できると考えられる。

さらに、今回の実験では1個体のみを実験対象としたため、実験結果に個体特有の特徴が現れている可能性が示唆されること、実験の順番や実施時間、注目個体の再生音に対する慣れの影響など、考慮すべきことがいくつかあった。今回の結果を踏まえ、より信頼できるデータが得られる実験を行うことも今度の課題となる。

5 おわりに

本稿では、マイクロホンアレイを用いたロボット聴覚ソフトウェア HARK に基づく野鳥歌行動解析システム HARK-Bird を拡張し、ウグイスに対して行ったプレイバック実験におけるさえずりの時間的・方向的ダイナミクスの分析結果を報告した。本システムは対象個体のさえずりをよく定位した。録音のみ行った場合、定位置で縄張りを主張するH型のさえずりを多く歌う一方、プレイバックを行った場合、H型のさえずりの頻度が減少して敵を警戒するL型のさえずりの割合が増加したり、ソングポスト間をより頻繁に移動するなど、注目個体はスピーカからの再生音を警戒する傾向がみられた。その傾向は、再生音によって異なることも確認された。また、ソングポストの

移動直後はL型の歌を歌う傾向があるという、歌行動と移動の複合的なパターンを抽出することができた。以上の分析はHARKBirdを用いることによって容易に可能であり、野鳥の生態観測への活用の可能性が示された。

謝辞

高部直紀氏(名古屋大学)の調査協力, クリプトン・フューチャー・メディア株式会社関係各氏のボーカロイド音声作成協力を謝意を表す。本研究の一部はJSPS科研費15K00335, 16K00294, 24220006の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] K. Nakadai, T. Takahashi, H. G. Okuno, H. Nakajima, Y. Hasegawa and H. Tsujino: Design and implementation of robot audition system 'HARK' - Opensource software for listening to three simultaneous speakers, *Advanced Robotics*, 24. 739-761 (2010).
- [2] R. Suzuki, S. Matsubayashi, R. Hedley, K. Nakadai and H. G. Okuno: HARKBird: Exploring acoustic interactions in bird communities using a microphone array, *Journal of Robotics and Mechatronics* (accepted).
- [3] R. Suzuki, S. Matsubayashi, K. Nakadai and H. G. Okuno: Localizing bird songs using an open source robot audition system with a microphone array, *Proc. of 2016 International Conference on Spoken Language Processing (Interspeech 2016)*, 2626-2630 (2016).
- [4] 百瀬博: 音声コミュニケーションによるなわばりの維持機能. 山岸哲(編). 鳥類の繁殖戦略(下), 127-157, 東海大学出版会, 東京(1986).
- [5] D. F. Maynard, K. A. A. Ward, S. M. Doucet and D. J. Mennill: Calling in an acoustically competitive environment: duetting male long-tailed manakins avoid overlapping neighbours but not playback-simulated rivals, *Animal Behavior*, 84(3): 563-573 (2012).