

# 複数の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 野鳥の位置観測精度の検討

## Assessing the accuracy of bird localization derived from multiple microphone arrays and robot audition HARK

松林志保 鈴木麗璽

名古屋大学大学院情報科学研究科

小島諒介

東京工業大学大学院情報理工学科

中臺一博

(株) ホンダ・リサーチ・インスティテュート・ジャパン, 東京工業大学大学院  
情報理工学科

### 要旨

本研究は、3つのマイクロフォンアレイとロボット聴覚ソフトウェア HARK を用いた野鳥の観測精度に関する予備的調査の結果を報告する。1つ目の調査では、愛知県豊田市の森林内でスピーカーからの鳥の歌の再生音を用いて HARK による定位精度の検討を行った。2つ目の調査では、人間による野鳥の観測結果と HARK により定位された野鳥の位置を比較し、その定位精度を調べた。

### 1 はじめに

近年、複数のマイクロフォンで構成されるデバイスであるマイクロフォ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する技術が急速に発展している。この技術の野鳥研究への応用は、従来の単一のマイクロフォンによる録音と比べてより豊富な生態情報の記録を可能にするため、生態理解へ大きな貢献を果たすことが期待される。

しかし、独自開発のシステムに基づく研究[1, 2]等はなされているものの、この技術の野鳥研究への活用は未だ限定的な状況にあるといえる。その要因として、録音のためのデバイスの入手と分析のためのソフトウェアの利用が容易でない点や、野鳥の鳴き声の定位・分離性能の評価が十分でない点等が挙げられる。

我々はこれらの課題を克服すべく、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) [3]と、市販の会議用マイクロフォンアレイを用いたシステムを構築し、野鳥の歌に基づく方位の定位等を試みている[4]。HARK は、音響工学等に関する詳細な知識を必要とせず市販のマイクロフォンアレイ等を用いて PC 上に音源定位や分離等を含むシステムを柔軟に構築可能なソフトウェアであり、これまでロボットの聴覚のために開発されてきた。現在様々な文脈における応用が展開中であるが、野鳥の歌などの野外での音源定位の精度は十分

検証されていない。

本研究は、複数のマイクロフォンアレイと HARK を用いた野鳥の二次元位置推定精度を検討することを目的とする。その手段として2種類の実験を行った。まず、事前に録音された野鳥11種の歌を野外でスピーカーを用いて流し、マイクロフォンアレイからの距離や鳥の種類が HARK による定位精度におよぼす影響を測った。次に、HARK が実際のさえずりに基づいて定位した野鳥の位置を人間による野鳥観測結果と比較し、その定位精度を調べた。

### 2 手法

#### 2.1. 複数のマイクロフォンアレイの設置

野鳥の録音実験は2015年6月、スピーカーテストは同年10月に名古屋大学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)内の標高約1000m、樹齢60~70年のカラマツ植林と広葉樹の混合林内において、晴天ほぼ無風の気象条件下で行われた。録音には3つのマイクロフォンアレイ (Dev-audio 社 Microcone) を用いた。

各マイクロフォンアレイは、林内に定めた一辺が10mの正三角形の各頂点の位置に設置した三脚上に配置した。録音に用いた Microcone はそれぞれ7つ(水平方向に6つ、天井部分に一つ)のマイクロフォンから成る。

#### 2.2 再生音源とスピーカーテスト

事前に録音された音源として、野鳥大鑑[5]付属のCD から調査地で営巣する野鳥11種の代表的なさえずりとその他の声(地鳴き等)を用いた(Table 1)。これらの音を、iPod と地上約1mに設置した外付けスピーカー (Sanwa supply bluetooth wireless speaker MM-SPBTBK) から一辺が10mの正三角形の中心、中心から西、北東、南東方向に25、50m離れた地点から流した(Figure 1)。25m地点でのマイクロフォンアレイの位置、スピーカーの距離および角度が正確に設置された場合に、鳥の歌の再生音が各

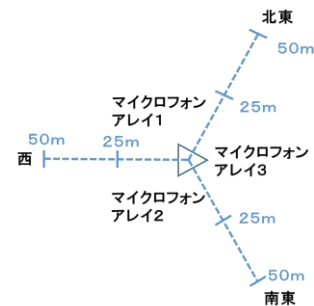
マイクロフォンアレイに届く理想的な角度を Table 2 にまとめる。

再生音は正三角形の中心に向けて流した。野鳥の歌の大きさは鳥の種類や競争相手の存在、外部音の有無などによる状況で異なるが、本実験では再生音の大きさは約 35 ~ 40 dB の周辺音に対して約 0 ~ 20 dB 大きい音（周辺音とほぼ同じかわずかに大きい音）で流した。音の大きさは無料の騒音測定器アプリ[6]を用いて測定した。同時に正三角形の頂点に設置した3つのマイクロフォンアレイを用いてスピーカーから流れる再生音を録音した。

**Table 1** スピーカーテストに用いた野鳥リストと歌の種類。

鳥の種類	英名	鳥の名前コード	歌の種類
ウグイス	Japanese bush warbler	JBWA	さえずり、間奏
オオルリ	Blue-and-white flycatcher	BAWF	さえずり、間奏
ソウシチョウ	Red-billed leiothrix	RBLE	さえずり
キビタキ	Narccissus flycatcher	NAFL	さえずり、間奏
ヤマガラ	Varied tit	VATI	さえずり、威嚇音
ヒガラ	Coal tit	COTI	さえずり、地鳴き
センダイムシクイ	Eastern crowned willow warbler	ECWW	さえずり
ヒヨドリ	Brown-eared bulbul	BEBU	さえずり、時鳴き
カッコウ	Common cuckoo	COCU	さえずり
ツツドリ	Oriental cuckoo	ORCU	さえずり
ホトトギス	Lesser cuckoo	LECU	さえずり

**Figure 1** 3つのマイクロフォンアレイと鳥の歌の再生音を流す地点の位置関係。一辺が10mの正三角形の北の頂点にマイクロフォンアレイ1、南の頂点にマイクロフォンアレイ2、東の頂点にマイクロフォンアレイ3を配置した。



**Table 2** 三角形の中心、および各方向25m地点から鳥の歌の再生音を流した場合、音源が定位される理想的な角度。マイクロフォンアレイを設置した三角形の中心から北方向は0°、南方向は180°、東方向は-90°、西方向は90°とする。

	中心	西方向	北東方向	南東方向
マイクロフォンアレイ1	-150°	103°	-47°	-150°
マイクロフォンアレイ2	-30°	77°	-30°	-137°
マイクロフォンアレイ3	90°	90°	-17°	-163°

### 2.3 野鳥の位置観測と歌の分析

人間の観測者がマイクロフォンアレイを設置した正三角形の中心に立ち、録音開始と同時に周辺で観測された鳥の種類、中心からの大まかな位置等を約5分毎に記録した。野鳥の位置や種類は歌から推定し、正三角形の中心から25、50、100mの同心円を用いてフィールドノートに記録した[7]。野鳥

観測は目視と聞き取りに基づく (Figure 2)。



**Figure 2** 野鳥の観測と3つのマイクロフォンアレイを用いた録音風景。図中黄色い線は一辺が10mの正三角形を示す。

録音した野鳥の歌から、歌の再生と音声分析ソフトウェア Praat[8]を用いてのスペクトログラム（声紋）分析により手動で鳥種を分類し、個々の歌の始まりと終わりの時間を抽出した。これらの手動分析の結果を後述の HARK による音源定位結果と比較することで自動音源定位精度の検討を行った。

### 2.4 HARK による音源定位・分離・位置の推定

3つの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、HARK 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ついて7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[9] 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(GHDSS)法[10]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。

最後に、音源定位によって得た各マイクロフォンアレイを起点とした3つの方向（半直線）の交点を計算することで、音源の二次元空間内での位置を求めた。この時、音源定位の方向の誤差を許容するために、3つの半直線のすべての中心を音源とした3つの半直線のうちひとつでも交点を持たない半直線の組み合わせがある場合は誤検出として棄却した。

## 3 実験結果

### 3.1 スピーカーによる録音再生テスト

#### 3.1.1. 定位音源の位置分布の確認

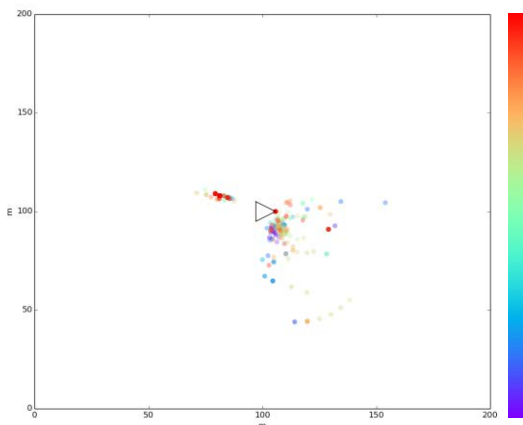
HARK により鳥の歌を自動定位した結果を参考に、個々の分離音を人間の耳で確認することで再生音源との比較作業を行った。実際に再生音が定位された方角と、マイクロフォンアレイや音源の設置位置が理想的な場合の音源とマイクロフォンアレイの角度を Table 3 に示す。各方向毎に HARK が再生音を定位した角度と理想的な角度との差異に着目すると、西方向からの音源は北方向、北東方向からの音

源は南方向、南東方向からの音源は北方向と一定方向にずれが生じていた。このずれは HARK により定位された音源の 2 次元空間位置分布 (Figures 3~5) にも反映された。しかしながら Figures 3~5 に示されるように、システムティックな位置のずれはあるものの再生音はおおむね各スピーカーの位置付近で定位された。

再生音以外にマイクロフォンアレイ付近で定常的に定位された音源は、定位の際に 3 つのマイクロフォンアレイが異なる音源を同一の音源として定位したことにより生じたものと推測される。この現象は特に西、北東方向から再生音を流した場合に南東方向で頻繁に発生した (Figures 3 & 4)。これらの音源は南東方向に密生する笹群の葉音と推定される。逆に南東方向から再生音を流した場合には、北東方向にも再生音以外の音源が定位された (Figure 5)。北東方向の分離音を調べるとその多くは再生音の反響音であった。この反響音は付近のプレハブ小屋に起因すると考えられる。また、南東方向から再生音を流した地点は笹群内に位置する。笹群内では鳥の歌は定位されたものの分離しきれず、前後のさえざりや周囲の音と結合する現象も確認された。

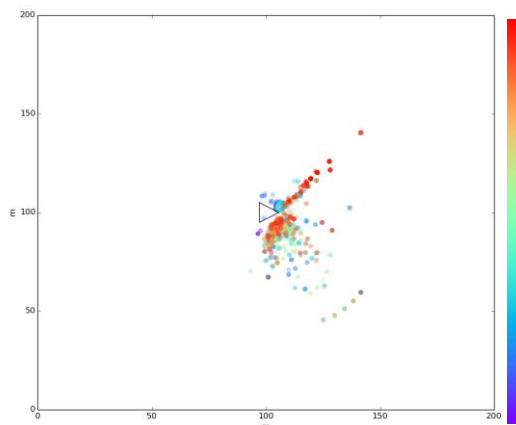
**Table 3** 各マイクロフォンアレイで定位された実際の音源の方角と理想の方角の比較。音源とマイクロフォンアレイの位置関係は Figure 1 を参照のこと。マイクロフォンアレイを設置した三角形の中心から北方向は  $0^\circ$ 、南方向は  $180^\circ$ 、東方向は  $-90^\circ$ 、西方向は  $90^\circ$  とする。

西方向(録音#137)	A: HARKが定位した方向	B: 理想の方向	AB間のずれ
マイクロフォンアレイ1	$95^\circ$	$103^\circ$	北方向に $8^\circ$
マイクロフォンアレイ2	$55^\circ$	$77^\circ$	北方向に $22^\circ$
マイクロフォンアレイ3	$75^\circ$	$90^\circ$	北方向に $15^\circ$
北東方向(録音#138)	A: HARKが定位した方向	B: 理想の方向	AB間のずれ
マイクロフォンアレイ1	$-60^\circ$	$-47^\circ$	南方向に $13^\circ$
マイクロフォンアレイ2	$-45^\circ$	$-30^\circ$	南方向に $15^\circ$
マイクロフォンアレイ3	$-50^\circ$	$-17^\circ$	南方向に $33^\circ$
南東方向(録音#139)	A: HARKが定位した方向	B: 理想の方向	AB間のずれ
マイクロフォンアレイ1	$-145^\circ$	$-150^\circ$	北方向に $5^\circ$
マイクロフォンアレイ2	$-120^\circ$	$-137^\circ$	北方向に $17^\circ$
マイクロフォンアレイ3	$-150^\circ$	$-163^\circ$	北方向に $13^\circ$

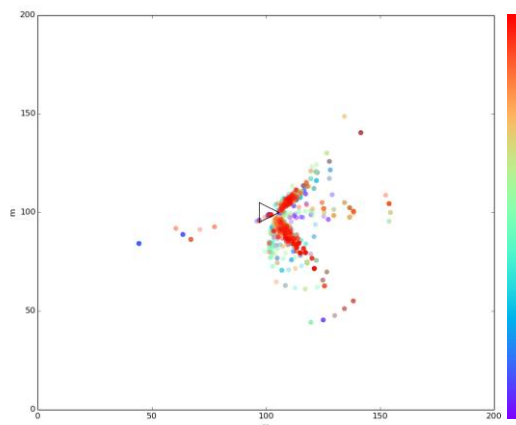


**Figure 3** 西方向 25 m 地点からの音源を定位した二次元位置分布。各色点は定位された音源を時系列で

示す。これらの音源は再生音以外の音源も含む。



**Figure 4** 北東方向 25 m 地点からの音源を定位した二次元位置分布。各色点は定位された音源を時系列で示す。これらの音源は再生音以外の音源も含む。



**Figure 5** 南東方向 25 m 地点からの音源を定位した二次元位置分布。各色点は定位された音源を時系列で示す。これらの音源は再生音以外の音源も含む。

### 3.1.2. 各方向における音源定位性能の検討

HARK による音源自動定位の精度は、音源からの距離と鳥の種類の影響を受けたようである。西、北東、南東方向における、25、50 m離れた地点から鳥の歌の再生音流した場合の各方向の 3 つのマイクロフォンアレイの平均定位指数を Table 4 に示す。音源との距離が 25 m の場合は、3 方位とも全鳥種が定位され、全 11 鳥種の平均定位指数は各方向ともに 90 を超えた。一方、音源との距離が 50 m に伸びると、全鳥種の平均定位指数は西方向で 37.9、北東方向で 68.2、南東方向で 59.1 に低下した。

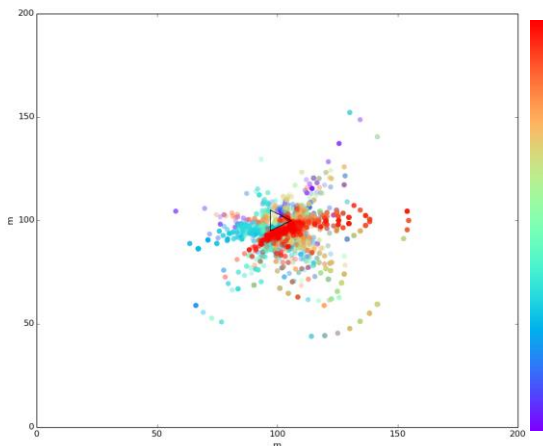
鳥種による違いに着目すると、50 m 地点における三方向の平均定位指数に見られるように、ウグイス、キビタキ、ヒガラなど比較的高音でさえざる種は 70 を超えたが、低周波の音域の歌を持つカコウヤツドリは 20 以下となった (Table 4)。

**Table 4** 3つのマイクロフォンアレイによる平均定位指数。指数は、HARKにより分離された音を人間が耳で確認した際に、各マイクロフォンアレイが音源とほぼ同質の質を保ちつつ各鳥の歌を定位した場合にはそのマイクロフォンアレイに2、歌を部分的に定位した場合や分離精度が不十分な場合は1、全く定位しなかった場合は0のスコアを与えた後、3つのマイクロフォンアレイのスコアを合計した最大可能スコア（6）との比率を計算しその平均値を0から100までの値で正規化した。例えば、西方向50m地点での場合、ウグイスのスコアはマイクロフォンアレイ1では2、マイクロフォンアレイ2と3では各1ずつとなり、3つのマイクロフォンアレイの平均定位・分離指数は66.7となる。音源と3つのマイクロフォンアレイの位置関係はFigure 1を参照のこと。

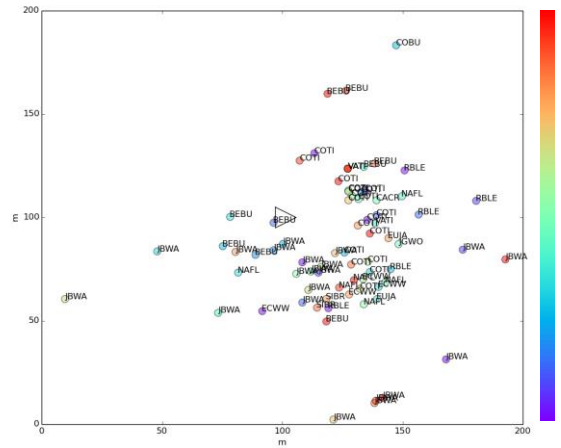
	音源との距離25m				音源との距離50m			
	西方向	北東方向	南東方向	3方位平均	西方向	北東方向	南東方向	3方位平均
ウグイス	100	100	100	100	66.7	83.3	83.3	77.8
オオルリ	100	100	100	100	50.0	66.7	66.7	61.1
ソウシチョウ	100	100	100	100	33.3	83.3	83.3	66.7
キビタキ	100	100	100	100	66.7	83.3	83.3	77.8
ヤマガラ	100	100	100	100	33.3	83.3	50.0	55.6
ヒガラ	100	100	100	100	66.7	83.3	66.7	72.2
センダイムシクイ	100	100	100	100	33.3	66.7	50.0	50
ヒヨドリ	100	100	100	100	33.3	83.3	33.3	50
ツツドリ	33.3	66.7	100	66.7	0	0	33.3	11.1
カッコウ	100	100	100	100	0.0	33.3	16.7	16.7
ホトトギス	100	100	100	100	33.3	83.3	83.3	66.7
全11種平均	93.9	97.0	100	97.0	37.9	68.2	59.1	55.1

### 3.2. 野鳥の自動音源定位結果と人間による鳥観測結果の比較

Figure 6はHARKにより定位された音源の2次元位置分布を、Figure 7は人間の野鳥観測に基づく個々の野鳥の種類とその推定位置を示す。HARKによる音源の定位結果と人間の観測者による野鳥の推定位置を比較すると、その空間的分布パターンには類似性が見られた。

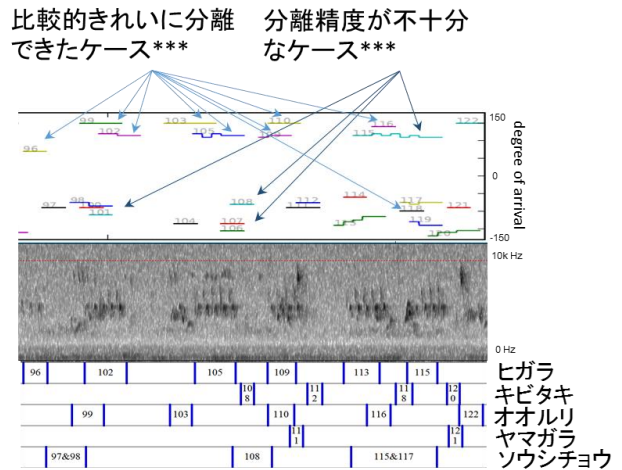


**Figure 6** HARKにより定位された音源。各色点は定位された音源を時系列で示す。これらの音源は観測者の足音や周辺音等も含む。図中の正三角形は、マイクロフォンアレイを設置した正三角形に対応する。



**Figure 7** 人間による野鳥観測結果。各色点は観測された鳥の種類と大まかな位置を時系列で示す。鳥の位置は16方位で表示した。鳥の名前コードはTable 1参照のこと。図中の正三角形は、マイクロフォンアレイを設置した正三角形に対応する。

HARKによる自動音源定位精度の検討のため、録音全体のスペクトログラムとその再生に基づく手動分析（歌の開始・終了時間の抽出と種の分類）と比較した。その一例をFigure 8に示す。この比較により、数個体の歌が一定方向で定位・分離されることを確認したが、その精度にはばらつきが見られた。



**Figure 8** HARKによる鳥の自動音源定位・分離 vs. 人間による手動分析の一例。上段：HARKを使った自動音源定位。図中の各色線に対応する数字は分離されたファイル名を示す。中段：録音全体のスペクトログラム。数字は上記のファイル名に対応する。下段：スペクトログラムとその再生に基づく手動分析。人間の耳による分類が正しいという仮定に基づく。

精度にはばらつきが見られたものの、HARKによる音源定位結果は、人間による観測を補完する可能



性を示した。例えば、連続的なヤマガラの威嚇音にかき消され聞き落としていた他の種のさえずりがスペクトrogramにより明らかになった例や、さえずりの音質・バリエーションがよく似たキビタキとオオルリの判別に迷う際に、定位された鳥の位置を前後の時間帯の位置と比較することで区別が容易になった例などがある。

#### 4 考察

スピーカーテストの結果、周辺音よりわずかに大きい音で流した野鳥 1 1 種の歌の定位距離の限界はおよそ 50~75 m と推定された。この結果をもとに、HARK が定位した音源の二次元位置分布と人間による観測結果を比較すると、その分布パターンには類似性が見られた。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種、例えば比較的大きく特徴的な歌をもつウグイス (JBWA) やソウシチョウ (RBLE) も定位されなかった (Figures 6 & 7)。

定位限界距離の推定に加え、スピーカーテストは HARK による野鳥の定位精度 (accuracy) の検討には音源の位置だけではなく音源の分類作業が不可欠であることを明示した。その顕著な例として、3 方向の中で最も高い、位置の正確さ (precision) を示した西方向からの再生音実験 (Figure 3~5) が、最も低い平均定位指数 (Table 4) を示したケースが挙げられる。つまり西方向では定位された再生音自体が少なく、逆に北東および南東方向では比較的多くの再生音が定位されたが、定位された音源の中には再生音以外の多くの音源も含まれていた。

常時定位される野鳥の歌以外の音源はスピーカーテストだけではなく、HARK による定位結果と人間の観測者による野鳥観測の比較実験でも確認された。この現象は、各マイクロフォンアレイが異なる音源を定位しているにもかかわらず、同一の音源として処理することに起因する。これらの音源を除去するためには、ひとつひとつの分離音を人間が聞き分け各マイクロフォンアレイが同じ音源を指しているかを確認する作業が必要であるが、耳作業による音源の聞き分けは多大な労力と時間を要する。この事例は HARK による音源の自動分類性能の必要性を強く示唆する。

HARK による音源の定位性能は、音源からの距離だけではなく環境要因に大きく左右された。音が空気を振動して伝わる際には、空気そのものに加え、伝達途中にぶつかる障害物による減衰、吸収、拡散の影響を受けてひずみが生じる。音の伝達、ひいては HARK の定位性能に影響を及ぼした最も影響力の大きい障害物としては、録音現場付近のプレハブ小屋、地形、植生の 3 つが挙げられる。Figure 9 は、調査地周辺の航空写真と地形を示す。プレハブ小屋は北方向のマイクロフォンアレイ (Figure 1) にほぼ隣接し、北東方向からの音の伝達の障壁になっただけではなく、その他の方向からの音にも影響を及ぼした。小屋に起因する音の拡散や反響効果は、同じさ

えずり音が複数の方向で細切れに定位される事例や再生音以外の音源が一定方向で定位される事例 (Figure 5) から確認できた。

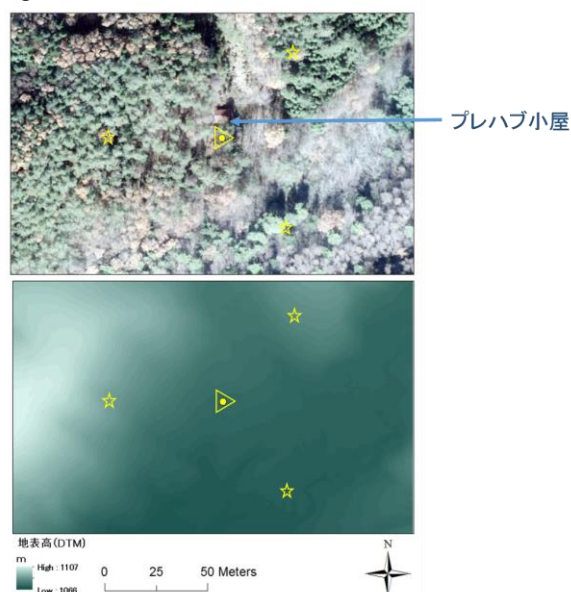


Figure 9 調査地周辺図。上：航空写真（撮影年不明、落葉期）。下：航空機 LiDAR による数値地形モデル（2014年）。地形図に関する観測と作成は中日本航空株式会社による。図中の黄色い三角形は、3つのマイクロフォンアレイを設置した一辺が10mの正三角形に対応し、星印は各方向50mから再生音を流した地点を示す。

西、北東方向に広がる急勾配な地形 (Figure 9) も HARK による音源定位性能に影響を及ぼしたと考えられる。斜面に加え、音源とマイクロフォンアレイの間に位置する植生の影響も無視できない。特に比較的単純な森林構造を持つ針葉樹内に位置する西、北東方向から鳥の歌の再生音を流した場合、再生音以外の周辺音は主に南東方向で顕著に見られた。これは南東方向に位置する広葉樹林の林床に密生する笹群の葉音と推察される。笹の葉音は南東方向からの再生音を流した際には、HARK による分離性能を低下させ複数の音源を結合する現象を起こした。

音源からの距離に加えて、鳥の鳴き声の種類も定位精度に影響を与えた。一般的に低周波の歌は高周波の音に比べて減衰やそのほかの干渉を受けにくいいため効率よく遠くに届く。また、森林への依存度が特に高い鳥は残響の影響や音のひずみを避けるため、比較的単純な構造の歌を歌うことが知られている [9]。本来であれば、スピーカーテストに使われた、ツツドリ、カッコウ、ホトトギス（いずれも Cuckoo 科）は順に約 500、800、1500 Hz [8] と比較的 low frequency かつ単純な構造の歌を歌うため、定位される可能性は高いことが予測された。しかしながら実際の平均定位指数は低い結果となった。これは、HARK による音限定の際にノイズカットのため 2000 Hz

以上に注目して定位を行ったため、特に低周波の音域で鳴くツツドリとカッコウの歌がカットされる結果となったためである。近距離で定位された音源は、これらの種の歌の一部のうち比較的高音部分がノイズカットをすり抜けた、もしくは偶然同方向の周辺音を拾った可能性がある。一方、高周波でさえずるヒガラや、比較的複雑な歌構造を持つキビタキは高い定位指数を示した。この一因としては、ヒガラやキビタキの歌の周波数が、風などの周辺の低周波の音とははっきり異なることがあげられる。今後のスピーカーテストで考慮すべき点として、音源の音質を鳥の周波数に絞ること、そして鳥種毎に歌の大きさを調整する必要がある。今回の実験では全鳥種を一定の地上高、大きさで流したが、実際には音の伝達効率は鳥の鳴く位置や環境の影響を受け、同時に鳥の歌の大きさは鳥の体の大きさなどに比例するからである。

## 5 おわりに

本稿は、複数のマイクロフォンアレイを用いた野外に置けるスピーカーテストおよび野鳥の音源定位精度の予備的調査の結果を報告した。スピーカーテストでは、晴天の無風状態で周辺音よりわずかに大きな音で鳥の歌の再生音を流した場合、その種類によりマイクロフォンアレイから約50～75mの距離まで定位できることが明らかになった。また、音源定位性能は周辺の人工物、地形、植生に加え、鳥の歌の周波数に影響を受けることが示された。これらの点を考慮した上で、HARKによる音源定位結果と人間による野鳥観測結果を比較すると相互間には類似した二次元位置分布が示された。さらに、分離された音源のスペクトログラムとその再生に基づく手動分析による種類の識別や歌の始まりと終わりの切り出しは、鳥がいつどこで鳴いたかという情報をより明確にした。このことは、HARKが人間による野鳥観測を補完する可能性を示唆している。

いずれの実験も初期的な段階にあるが、位置情報をもつ音声データを解析することは、野鳥の生態理解へ向け重要な意義を持つ。野鳥観測においては、瞬時に識別が難しい場合が頻繁に起こりうる。例えばオオルリやキビタキなど声の音質や歌のフレーズが似た個体が交互に鳴きその識別に迷う場合、さえずりの位置情報を前後の情報と比較することで2種の聞き分けが容易になった。このような例では特にデータの再現性が大きな意義を持つ。

今後の課題として、HARKによる自動分類機能の充実があげられる。野鳥のさえずりは、同種でも様々なレパートリーがあり、人間による手動分析は多大な時間と労力を要する。また、人的エラーの可能性も否めない。自動分類の機能が加われば分析の効率は格段に向上し、野鳥の位置的空間及び時間的空間利用の解明に向けた応用の可能性が高まると考えら

れる。

## 謝辞

高部直紀氏、近藤崇氏（名古屋大）のフィールドワークへのご協力に謝意を表す。また航空写真とLiDAR 地表モデルをご提供いただいた山本一清先生（名古屋大学）に感謝申し上げる。本研究の一部はJSPS 科研費 15K00335, 24220006 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Collier, T.C., Kirschel, A.N.G., and 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.
- [2] Blumstein D.T., Mennill, D.J., Clemins, P., Girod, L., Yao, K., Patricelli, G., Deppe, J.L., Krakauer, A.H., Clark, C., Cortopassi, K.A., Hanser, S.F., McCowan, B., Ali, A.M., and Kirschel, A.N.G. (2011). Acoustic monitoring in terrestrial environmental using microphone arrays: applications, technological considerations and prospectus. *Journal of Applied Ecology*, 48, 758-767.
- [3] Nakadai, K., Takahashi, T., Okuno, H.G., Nakajima, H., Hasegawa, Y., and Tsujino, H. (2010). Design and implementation of robot audition system "HARK"-open source software for listening to three simultaneous speakers. *Advanced Robotics*, 24, 739-761.
- [4] Suzuki, R., Hedley, R., and Cody, M.L. (2015). Exploring temporal sound-space partitioning in bird communities emerging from inter- and intra-specific variations in behavioral plasticity using a microphone array. *Abstract book of Joint Meeting of the American Ornithologists' Union & Cooper Ornithological Society*, 86.
- [5] 蒲谷鶴彦・松田道生著 日本野鳥大鑑鳴き声 420. (2011). 小学館.
- [6] Noise level meter. Retrieved October 1, 2015, from <https://itunes.apple.com/jp/app/noiselevelmeter/id694670057?ign-mpt=uo%3D5>
- [7] Ralph, C.J., Droege, S., and Sauer, J.R. Managing and monitoring point counts: standards and applications. (1995). USDA Forest Service general technical report. PSW-GTR 149.
- [8] Boersma, P and Weenink, D. (2015). Praat: doing phonetics by computer (Version 5.4.20) [Computer program]. Retrieved July 26, 2015, from <http://www.praat.org/>
- [9] Schmidt, R.O. (1986). Multiple emitter location and signal parameter estimation. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions*, 34.3. 276-280.
- [10] Nakajima, H., Nakadai, K., Hasegawa, Y. and Tsujino, H. (2008). Adaptive Step-size Parameter Control for real World Blind Source Separation, In *Proc. ICASSP* 149-152.
- [11] Gill, F.B. (2007). *Ornithology*. NY: W.H. Freeman and Company.