

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公 募 区 分 : 環境問題対応型研究 (技術実証型)

研究予定期間 : 令和3 (2021) 年度 ~ 令和5 (2023) 年度

課 題 番 号 : 【4G-2102】

体系的番号 : (J P M E E R F 2 0 2 1 4 G 0 2)

研 究 課 題 : 「環境アセスメントへの活用を目指した鳥類および
コウモリ類の飛翔を識別するレーダ画像解析システムの開発」

Research Title : Development of the Radar Image Analysis System for
Distinguishing a Flight of Birds and Bats Aiming at an
Application to Environmental Impact Assessment

研 究 代 表 者 : 関島 恒夫

研究代表機関 : 新潟大学

研究分担機関 : 北海道大学、徳島大学、一般財団法人日本気象協会

研究協力機関 : 帯広畜産大学

研 究 領 域 : 自然共生領域

キ ー ワ ー ド : AI分類、飛翔動物、Sバンドレーダ、衝突リスク評価、
Xバンドレーダ

令和6 (2024) 年5月

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	7
2. 研究開発目的	7
3. 研究目標	7
4. 研究開発内容	9
5. 研究成果	11
5-1. 成果の概要	11
5-2. 研究目標の達成状況	17
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	20
6. 研究成果の発表状況の概要	22
6-1. 成果の件数	22
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	22
7. 国際共同研究等の状況	23
8. 研究者略歴	23
II. 成果の詳細	24
II-1 サブテーマ1「S バンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法の開発」	24
〔サブテーマ1要旨〕	24
1. サブテーマ1研究開発目的	24
2. サブテーマ1研究目標	25
3. サブテーマ1研究開発内容	26
4. サブテーマ1結果及び考察	30
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	37
II-2 サブテーマ2「X バンドレーダを用いたコウモリ類に対する環境アセスメント手法の検討」	38
〔サブテーマ2要旨〕	38
1. サブテーマ2研究開発目的	38
2. サブテーマ2研究目標	39
3. サブテーマ2研究開発内容	40
4. サブテーマ2結果及び考察	48
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	55
II-3 サブテーマ3「レーダ画像から飛翔軌跡を AI 識別する画像解析手法の確立」	57
〔サブテーマ3要旨〕	57
1. サブテーマ3研究開発目的	57
2. サブテーマ3研究目標	57
3. サブテーマ3研究開発内容	58
4. サブテーマ3結果及び考察	64
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	68
III. 研究成果の発表状況の詳細	69
(1) 成果の件数	69
(2) 誌上発表	69
(3) 口頭発表	71
(4) 知的財産権	72
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	72
(6) マスメディア等への公表・報道等	73
(7) 研究成果による受賞	73
(8) その他の成果発表	73

Abstract	75
別紙 公募審査・中間評価結果への対応	

I. 成果の概要
 <課題情報>

公 募 区 分 :	環境問題対応型研究（技術実証型）
研 究 実 施 期 間 :	令和 3（2021）年度 ～ 令和 5（2023）年度
課 題 番 号 :	【4G-2102】
研 究 課 題 :	「環境アセスメントへの活用を目指した鳥類および コウモリ類の飛翔を識別するレーダ画像解析システムの開発」
研 究 代 表 者 :	関島 恒夫（新潟大学、教授）
重点課題（主）:	【重点課題⑬】生物多様性の保全に資する科学的知見の充実や対策手法の技術 開発に向けた研究
重点課題（副）:	【重点課題⑭】生態系サービスの持続的な利用やシステム解明に関する研究・ 技術開発
行政要請研究テーマ （行政ニーズ）:	非該当
研 究 領 域 :	自然共生領域

<キーワード>

AI分類
飛翔動物
Sバンドレーダ
衝突リスク評価
Xバンドレーダ

＜研究体制＞

サブテーマ1 「S バンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法の開発」

＜サブテーマ1 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
新潟大学	自然科学系	教授	関島 恒夫	
北海道大学	水産科学研究院	教授	綿貫 豊	

＜サブテーマ1 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
新潟大学	自然科学系	科学技術振興研究員	鎌田 泰斗
北海道大学	水産科学研究院	博士研究員	三上 かつら

サブテーマ2 「X バンドレーダを用いたコウモリ類に対する環境アセスメント手法の検討」

＜サブテーマ2 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
徳島大学	大学院社会産業理工学研究部	准教授	河口 洋一	

＜サブテーマ2 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
徳島大学	大学院社会産業理工学研究部	学術研究員	佐藤 雄大
帯広畜産大学	畜産学部	准教授	赤坂 卓美

サブテーマ3 「レーダ画像から飛翔軌跡を AI 識別する画像解析手法の確立」

＜サブテーマ3 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
一般財団法人日本気象協会	環境・エネルギー事業部	主任技師	島田 泰夫	

＜サブテーマ 3 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
一般財団法人日本気象協会	環境・エネルギー事業部	調査役	黒田 幸夫
一般財団法人日本気象協会	環境・エネルギー事業部	技師	工藤 嘉晃
一般財団法人日本気象協会	環境・エネルギー事業部	準職員	夏目 安由美
一般財団法人日本気象協会	環境・エネルギー事業部	主任技師	藤井 直紀
一般財団法人日本気象協会	環境・エネルギー事業部	環境アセスメント事業課長	桃谷 辰也

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	28,046千円	7,954千円	36,000千円
2022	28,033千円	7,967千円	36,000千円
2023	27,989千円	8,011千円	36,000千円
合計	84,068千円	23,932千円	108,000千円

1. はじめに（研究背景等）

脱原発の機運の高まりや地球温暖化防止対策としてのCO₂削減の推進により、わが国では再生可能エネルギーの導入が大幅に増加している。その中でも風力発電については、東北地方から北海道にかけてのエリアが世界有数の良好な風況が見込めるという予測から、これまで東日本を中心に多数の風力発電事業が計画・実施されてきた。さらに、海に囲まれたわが国では洋上風力の適地が多く、陸上の5倍にも及ぶ発電量が見込めるとの試算から、国は2019年4月に再エネ海域利用法を定め、発電事業者が一般海域を利用できる制度を設けた。これにより、風力発電は立地制約がある陸上から洋上の時代に突入すると予想されている。一方、風力発電の推進とともに、周辺環境に及ぼす風車の影響が顕在化している。特に、鳥類・コウモリ類などの飛翔動物については、風力発電に適した地点が渡りルートや主要な生息地になっていることが多く、風車ブレードに衝突する事故が世界的に多発している。環境に対する影響の懸念から、国は法対象事業に風力発電を追加し、平成24年10月から環境影響評価を義務づけるようにした。風力発電に関する環境影響評価の多くは今のところ陸上風力が占めるが、鳥類・コウモリ類に関しては供用後のブレード衝突に関わる予測の難しさが審査の手戻りを引き起こす原因にもなっており、影響予測の精度向上や評価方法の改善が課題となっている。さらに洋上風力については、洋上での飛翔動物の確認が容易でなく、陸上に比べ環境影響調査が極めて難しいことから、海洋に特化した評価手法の早急な開発が求められている。

2. 研究開発目的

本研究は、目視観察に代わる新たな飛翔動物の調査手法として、広範囲にわたり物標を捕捉することができるレーダを用い、取得したエコー情報から鳥類・コウモリ類の飛翔を識別する画像解析システムを開発するとともに、飛翔動物と紐付いた飛翔軌跡を用いた環境影響評価手法の確立を目的とする。

3. 研究目標

全体目標	洋上の鳥類に関してSバンドを、夜間のコウモリ類に関してXバンドレーダを用い広範囲のエコー画像を取得した上で、エコー画像から動体を抽出する手法の開発とともに、併せてGPSロガー・測距器等を用いた飛翔動物の詳細な移動軌跡を取得することにより教師データを作成し、AI学習を適用することで種の識別を可能にする画像解析システムの開発を目指す。さらに、本システムを通して鳥類・コウモリ類と識別された動体軌跡に対し、種ごとの総飛翔軌跡数を求めることにより、実際の環境アセスメントを想定した定量的な衝突リスク評価の手法開発を目指す。 具体的には下記に、開発技術の実用化に向けた3つの達成目標を示す。 第1目標： 現行のレーダシステムで用いられている動体軌跡の作成手順が不明であることから、エッジ処理などの画像処理技術に加え、オブティカルフロー等を適用した、新たな動体軌跡抽出の手法を開発する。 第2目標： 第1目標で作成した動体軌跡に対し、GPSロガー・測距器等により作成された教師データに基づくAI学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛翔であることを識別する手法を開発する。本目標を達成することにより、洋上あるいは夜間の飛翔動物について、鳥類もしくはコウモリ類という大括りの飛翔動物に対する衝突リスクの評価が実現できる。 第3目標： 種ごとの教師データに基づくAI学習をさらに発展させ、種レベルもしくは目レベル（カモメ類、猛禽類など）で飛翔軌跡を分別する手法を開発する。本目標を達成することにより、種もしくは目レベルの衝突リスク評価が実現できる。
------	---

サブテーマ 1	「Sバンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法の開発」
サブテーマ 1 実施機関	新潟大学、北海道大学

サブテーマ 1 目標	サブテーマ1では、洋上の鳥類に対して高密度な飛行軌跡を取得することにより画像解析用の教師データを作成することに加え、AI学習で得られた生物情報と紐付いた飛行軌跡を用いて定量的に衝突リスクを評価する手法の開発を目指し、以下の目標を設定する。 ① GPSロガーや測距器等を用いて、オオミズナギドリ・ウトウなどウミスズメ類・カモメ類・ウ類といった海鳥、オジロワシ・サシバといった猛禽類、ガン・ハクチョウ類といった水禽類に関し、毎秒～数秒間隔の高密度な飛行軌跡を取得し、それを基にレーダ画像解析用の教師データを種ごとに数百～数千個作成する。 ② 飛行軌跡の種判別の精度を向上させるため、サブテーマ3によるAI学習の結果に、対象種の生物学的特性（例えば、活動時間、飛行速度等）を組み合わせた解析手法を検討・開発する。 ③ AI学習による動体軌跡の解析結果を受けて、Sバンドレーダを設置した全5地点のレーダ有効範囲内において、各鳥種の総飛行軌跡数を求め、その値から仮想的な事業計画に対する衝突確率を算出する。
------------	--

サブテーマ 2	「X バンドレーダを用いたコウモリ類に対する環境アセスメント手法の検討」
サブテーマ 2 実施機関	徳島大学
サブテーマ 2 目標	サブテーマ2では、コウモリ類の中でも風車との衝突リスクが高いとされるハイリスク種（環境省EADAS）を指標に、画像解析用の教師データを作成するとともに、AI学習による判別結果を踏まえ、従来の手法では達成できなかった飛行数の定量評価に基づく環境アセスメント手法の開発を目指し、以下の目標を設定する。 ① ハイリスク種の中でも特に高空域を飛行する傾向が強く、風車との衝突事例もあるヤマコウモリやヒナコウモリ等について、Xバンドレーダによる観測可能距離を明らかにする。 ② 目標①の対象種に関してレーダ観測可能域で数十頭を放獣し、各種の飛行軌跡取得を試みるとともに、環境省により絶滅危惧Ⅱ類に指定されているヤマコウモリ等については、GPSロガーを用いて毎秒～数秒間隔の詳細な飛行軌跡を取得する。これらを基に画像解析用の教師データ百～数百個程度を作成する。 ③ サブテーマ3のAI学習で得られた移動軌跡からハイリスク種を判別して飛行個体数を定量化するとともに、従来のコウモリ調査で多用されてきた音声波形による活動量データを個体数情報に補正する手法を検討し、環境アセスメントでの活用方法を提案する。

サブテーマ 3	「レーダ画像から飛行軌跡を AI 識別する画像解析手法の確立」
サブテーマ 3 実施機関	一般財団法人日本気象協会
サブテーマ 3 目標	サブテーマ3では、取得されたレーダ画像に画像処理技術を施し、新たな動体軌跡を抽出する手法を開発する。また、教師データに基づくAI学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛行であることを分別する手法を開発する。さらに、AI学習を発展させ、種レベルもしくは目レベル（カモメ類、猛禽類など）で飛行軌跡を分別する手法を開発する。 目標とする識別率は以下の通りである。 ① 鳥類識別率として精度80%以上を、コウモリ類の識別率として精度70%以上とする。 ② 次に、鳥類もしくはコウモリ類と識別された動体軌跡を、さらに60%～70%の識別率で特定分類群まで識別する。

4. 研究開発内容

各サブテーマの位置づけ

本研究ではレーダデータを活用した鳥類およびコウモリ類の環境アセスメント手法を開発するために、はじめに、サブテーマ1および2が、地形および波浪クラッタが少なくなるようなレーダ観測手法を検討した。次に、サブテーマ1が鳥類を、サブテーマ2がコウモリ類を対象とし、レーダ観測にあわせて測距器、GPSロガー、および目視観察による教師データの取得を行った。飛翔動物のレーダ検出ポテンシャルを明らかにすることで、レーダエコーの定量的解析が可能となる観測範囲を定義した。サブテーマ1および2が取得したレーダ画像、および鳥類・コウモリ類の飛翔軌跡はサブテーマ3に提供され、レーダ画像解析のためのトラッキングシステムおよびAI分類システムの開発に用いられた。最後に、仮想的な風力発電事業地を設定し、鳥類およびコウモリ類に対する環境アセスメントの試行をサブテーマ1とサブテーマ2が行った。

4-1. サブテーマ1

4-1-1. レーダ設置方法の検討

レーダ設置場所の検討のために新潟県村上市と聖籠町でXバンドレーダ（KODEN社製MDC-7910）による観測を行った。ビームの照射方向が水田帯であり障壁のない海岸（村上市）と砂丘および海岸林のある海岸（聖籠町）にレーダを設置し、クラッタ量を比較することで障壁による地上反射の抑制効果を検証した。

4-1-2. 鳥検出ポテンシャルの検証

Xバンド（KODEN社製MDC-7910, MDC-7920）およびSバンドレーダ（FURUNO社製FAR-2167DS）の鳥検出ポテンシャルを検証するために、秋田県能代市でレーダ観測を行った。レーダエコーの照合用データ作成のために、レーダ観測にあわせて、測距器（Vecrtonix社製 VECTOR21 Aero）により、鳥の出現時刻および3次元座標（緯度、経度、および高さ）を取得した。測距器で取得した飛翔軌跡とレーダ画像をオーバーレイし、飛翔軌跡と重なるエコー画像を抽出し、エコーの重心座標を算出した。エコーが検出されなかった座標については、同一軌跡内における検出エコー間に等間隔になるように新たな座標を設けた。

Sバンドレーダの鳥検出に定量性があるか否かを検証するために、千葉県南房総市および愛媛県伊方町佐田岬でレーダ観測を行い、あわせて目視観察による鳥飛翔数の計数を行った。目視観察は、南房総市では、設置したレーダから3.2km東側の洋上に2kmのライントランセクトを作成し、通過するオオミズナギドリを計数した。佐田岬では、設置したレーダから2.4km東側の地点に300mのライントランセクトを作成し、通過する猛禽類（サシバ、ハチクマ等）を計数した。

4-1-3. 統計解析

能代市で行われたXバンドレーダの観測データを用いて、波浪によるクラッタ量に影響を及ぼす要因を明らかにした。クラッタ量を応答変数とし、波数、1/3有義波の周期、1/3有義波の波高、風速、風向ごとの吹走距離、および使用したレーダの出力を説明変数とする線形モデルを作成した。

SバンドおよびXバンドレーダの鳥の検出力に影響を及ぼす要因を明らかにするために、エコーの出現の有無を応答変数（0-1）とし、対象となる鳥の体重、群れサイズ、レーダからの距離、アングル、およびレーダ出力を説明変数とする一般化線形モデルを作成した。

Sバンドレーダが鳥の飛翔数を定量的に捉えられるか否かを明らかにするために、エコー数と飛翔数の関係をPearsonの相関係数により解析した。

4-1-4. 仮想的環境アセスメントの試行

日本海側において渡り鳥にとって主要な越冬・中継地となる八郎潟に近く、また風力発電の大量導入が進む秋田県能代沖に仮想的な洋上風力発電事業地（1.3km²）を設定し、Xバンドレーダによる観測データを用いて、鳥衝突リスクに関する環境アセスメントを試行した。サブテーマ3が開発したトラッキングソフトウェア（BbTracker）を用いてレーダ画像を飛翔軌跡図にし、測距器による追跡データを学習させ（BbTrainer）、種グループ分類を行った（BbClassifier）。測距器による3次元追跡の結果として、鳥類の高度利用は、①軌跡内高度変動の小さい種群（水禽類、海鳥類、カラス、サギ等）と②軌跡内高度

変動の大きい種群（猛禽類）に大きく二分されたことから、前者の種群については、軌跡ごとに利用高度を特徴付けできるとし、軌跡内平均飛翔高度を算出した。後者のソアリングをする種群については、1軌跡内における利用する高度帯が広く、軌跡ごとの利用高度の特徴付けが難しいことから、LおよびMゾーン利用が1度でも認められた軌跡はソアリングによってMゾーンを利用する可能性がある軌跡として取り扱った。算出されたMゾーン飛翔率および飛翔軌跡長と、一般的な洋上風力発電事業に関するパラメーターから種グループごとの年間衝突数を算出し、現地に生息する鳥種の存在比に当てはめた。

4-2. サブテーマ2

4-2-1. コウモリ類に対するレーダ観測手法の確立

サブテーマ2では、船舶用Xバンドレーダを用いたコウモリの観測手法を確立した上で、飛翔数定量性と観測可能距離を明らかにすることを研究目標とした。対象種は風車との衝突事例が多いヒナコウモリとし、本種の集団ねぐらが形成される新潟市で調査を行った。分類群判別に必要とされる高質なレーダ画像を得るためには、クラッタを低減して観測範囲を確保する必要がある。そこで、アンテナ設置高を地面に近づけることにより、クラッタの低減効果を検証した（図0-1）。設置高は2.2mまたは0.4mとし、それぞれの設置方法で得られた画像を用いて、レーダから1km以内のクラッタ割合を算出した。また、本研究で用いたレーダの物標色は、内部で扱われる信号強度幅に応じて15階調のグラデーションが設けられ、デフォルトではシグナルの弱い物標ほど暗色となる。そこで、コウモリの検出可能性を高めるため、物標色を全ての階調において同一色（黄色）に設定した。レーダ設置方法および物標色の最適化により、飛翔数を定量的に捕捉できるか否かを検証するため、設置高2.2mかつデフォルト表示色の場合と、設置高0.4mで同一色とした場合のそれぞれについて、物標数と目視カウントした飛翔数の関係を解析した。さらに、レーダによる観測可能距離を明らかにするため、測距器で得た飛翔軌跡データと、同時時間帯に観測されたレーダ画像を照合してコウモリの物標を抽出し、ImageJを用いて物標の移動軌跡を作成した。その上で、各軌跡における物標出現の有無を応答変数とし、レーダから軌跡の各点までの距離を説明変数とした一般化線形モデルを作成し、コウモリの検出に対する距離の影響を解析した。

4-2-2. 教師データの取得

AI判別用の教師データを数十～百個取得することを研究目標とし、ヒナコウモリとヤマコウモリを対象に、測距器を用いて行動追跡を行った。ヒナコウモリの調査は、新潟市のレーダ調査点周辺で2022年8月と2023年7月に、ヤマコウモリの調査は、帯広市内に位置する都市公園で2023年8月に、それぞれ日没後に出巢して移動する個体を対象に行った。得られたデータから、軌跡ごとに飛翔速度の平均値と標準偏差（以下、SD）、角度変化量の平均値とSDを算出し、それぞれの特徴量について同所的に出現した鳥類5種と比較を行った。得られた全てのデータは、サブテーマ3に提供された。また、2023年7月のレーダ調査で得られたヒナコウモリのエコー画像から、ImageJを用いて物標の軌跡データを作成し、同様にサブテーマ3へ提供した。

4-2-3. 環境アセスメント手法の開発

AI分類によるコウモリの判別精度を高めるため、出現候補種の整備方法と、分類器教師データとする種群の決定方法について検討した。コウモリの出現候補種を整理するため、ねぐら調査とバットディテクターによる音声調査を実施した。また、レーダ調査地で確認された鳥類相から、コウモリと活動時間が重なり得る種群を分類器教師データとして選定した。サブテーマ3が実施したトラッキングとAI分類の結果を受け、コウモリと判別された飛翔軌跡図を作成した。その上で、風車ブレード衝突確率計算に活用可能なデータ作成のため、観測範囲においてコウモリの飛翔軌跡延長を算出し、測距器で得た高度データからMゾーン飛翔率（1度でもMゾーンを通過した軌跡数/全軌跡数）を算出した。

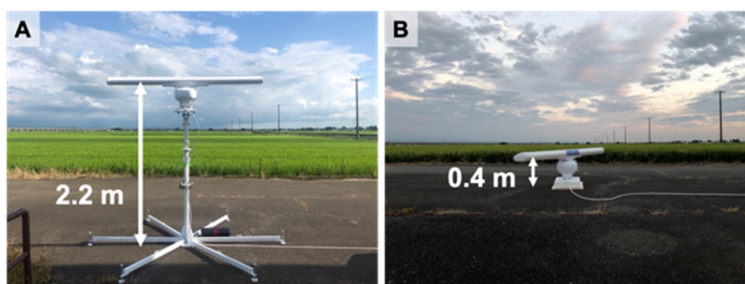


図0-1（図2-2）．レーダ設置方法の検討

バットディテクターで得られた音声データから飛翔個体数を推定する手法を検討するため、レーダ物標数と音声活動量の関係を解析し、その結果を踏まえて、コウモリの通過を反映した活動量の集計方法を確立した。その上で、徳島県南部を流れる那賀川において、音声録音と同時に、音声検出域内における通過個体数を赤外線サーモグラフィによりカウントし、活動量と通過個体数の関係を明らかにした。

4-3. レーダ画像から飛翔軌跡を AI 識別する画像解析手法の確立

4-3-1. レーダ観測によるレーダ画像の取得

Sバンドレーダの観測では、古野社製Sバンドレーダ（FAR-2167DS、60kW）を使用した。照射半径は8km、GAIN感度50、STC海面反射抑制50、FTC雨雪除去0とした。Xバンドレーダ観測では、古野電気株式会社製Xバンドレーダ（バードレーダ、DRS25A-NXT、25kW）と、株式会社光電製作所製Xバンドレーダ（MDC7920、25kW）を用いた。DRS25A-NXTは、照射半径1ないし2km、バードモードの「中」を原則とした。MDC7920は、現在エコーを黄色（濃淡なし）に、エコートレイル等の過去のエコーを青（濃淡なし）に設定し、照射半径4km、GAIN感度7.5、STC海面反射抑制0、FTC雨雪除去0とした。

これらのレーダを、観測地点と出現種に応じ、使い分けることとした。

4-3-2. 取得したレーダ画像からノイズ処理等の前処理アルゴリズムの開発

ノイズ処理等の前処理として、(a) 画像の二値化、(b) ノイズ除去、(c) 静止エコー除去等のアルゴリズムを開発した。「画像の二値化」は、レーダ画像の色情報をもとに、抽出すべき色群と、抽出しない色群の2群を設定し、レーダ画像の各ピクセル値が、2群のどちらに近いかにより二値化を決定した。「ノイズ除去」は、二値化画像にメディアンフィルタ法を適用した。「静止エコー」の判定方法は、過去n枚分の画像から、同一ピクセルにおいて特定の割合%（m）で静止エコーとする際、nとmを指定できるようにした。この処理は、断続的な降雨エコーが通過する場合等に有効である。さらに、静止エコー領域について、その領域の外縁（領域を決める境界線）付近のエコーを除去可能とするため、静止エコー領域を膨張（拡大）させる機能を付加した。

これらの効果を検証するため、上記の新アルゴリズムと旧アルゴリズム（BirdStrike）に、同じレーダ画像群を与えて、ノイズ除去の程度を比較した。

4-3-3. 前処理済みのレーダ画像から軌跡を得るトラッキング手法の開発

本研究で開発したトラッキング法の手順は、以下に示した1)～4) のとおりである。1) 上述した前処理で得られた二値画像についてクラスタリングを行い、各クラスターの重心を動体の中心とする。2) 動体の追跡には「探索円による追跡」と「確率楕円による追跡」の2つの手法を利用可能とした。3) 追跡する点の組み合わせについては、コスト値を計算し、最も妥当と思われる点の組み合わせを、優先的に軌跡として連結することとした。4) レーダ画像の時系列が続く間、時刻を進めながら2) と3) を繰り返す。

開発したトラッキング法の特徴について、従来アルゴリズム（BirdStrike）と比較し、考察を行った。なお、解析に用いたレーダ画像は、能代で観測したXバンドのもので、波浪がほぼない風の時間帯を用いた。

4-3-4. 抽出した軌跡群を用いた識別アルゴリズムの開発

AI識別の手順として、「軌跡の抽出」を行い、「（軌跡の）特徴量に基づいた分類器」を作成してから、「分類器による軌跡の識別」を行うこととした。それを実現するため、本研究において「軌跡を抽出」するトラッキングプログラム（BbTracker）、「分類器の作成」を行う訓練プログラム

（BbTrainer）、「分類器による軌跡の識別」を行う識別プログラムBbClassifierを新たに開発した。識別に用いる特徴量は、軌跡の平均速度とその標準偏差、平均加速度とその標準偏差、平均移動方向とその標準偏差、および直線度とした。識別アルゴリズムには、ランダムフォレストを採用した。

レーダ画像をトラッキングした軌跡の識別率は、測距器のような高い精度が見込めない可能性もある。このとき、二つの原因が考えられる。一つ目の原因として、レーダ画像と測距器について、互いの解像度の違いに起因するもの、二つ目の原因として、対象鳥類の飛翔パターンが環境（観測範囲）に依存する場合である。そこで、測距器データだけで分類器を作成し、精度を確認したのち、前述の（種名等が判明した）軌跡群を用いて精度を確認した。解析レーダ画像は、前項と同じく能代で観測したXバンドの画像を利用し、波浪がほぼない風の時間帯を用いた。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

サブテーマ1では、GPSロガーを用いて海鳥類の飛翔パターンの分析を（1-1, 1-2）、測距器をもいい手

水禽類の飛翔パターンの分析（1-3）を行った。サブテーマ1およびサブテーマ2では、レーダによる鳥観測手法の確立（1-4）と風力発電における環境アセスメント手法の提案を行った（1-5, 1-6）。

5-1-1. レーダ観測手法の確立

海岸部での調査において、レーダビームの障壁となる砂丘の有無でクラッタ量の違いを比較したところ、砂丘のある場所では、ない場所と比べて、観測範囲におけるクラッタ割合が2km範囲で65%少ないことが明らかとなった（サブテーマ1）。また、周辺に障壁となるものが少ない平坦な地形（水田帯）では、レーダアンテナを床置き（設置高0.4m）にしたことで、観測範囲におけるクラッタ割合が1km範囲で64%少なくなることも明らかとなった（図0-2、サブテーマ2）。これらの結果から、地形クラッタを低減し、鳥・コウモリの観測範囲を確保するためには、調査地周辺の地形的特性を考慮したレーダ設置場所の選定およびアンテナ設置高の検討が重要となる。地形クラッタと異なり、海上の波浪クラッタ量は、調査日の天候条件によって異なる（図0-2）。波浪クラッタ量に影響を及ぼす要因を解析した結果、波高、波周期、および風速と吹走距離の交互作用といった、波の強さを表す変数がクラッタ量を増加させることが明らかとなった（サブテーマ1）。このことから、洋上を対象にした調査では、日による天候の違いを考慮して、観測可能な日数を確保することが重要である。

レーダ画像解析により得られた軌跡を用いて、鳥の検出に影響を及ぼす要因を解析した結果、Xバンドについては、単独飛行の鳥種の検出率はレーダからの距離が遠いほど低下し、群れ飛行の検出率は群れサイズが大きいほど高く、レーダから離れるほど低下することが明らかとなった。これに対し、Sバンドについては、単独飛行・群れ飛行いずれの場合においても、有意な効果を示す変数は得られなかった。Xバンドに関して得られたモデルから、検出確率50%以上を保証する観測範囲を推定したところ、個体を対象とした場合には約2km、群れの場合には約4kmとなった（サブテーマ1）。また、コウモリの検出率はレーダからの距離が遠くなるほど緩やかに低下する傾向を示し、検出確率が50%以上となる観測範囲を求めた結果、約1.5kmであることが明らかとなった（サブテーマ2）。

Sバンドレーダについて、海鳥（オオミズナギドリ）と猛禽類（サシバ、ハチクマ等）を対象に、レーダに映った物標数と目視観察でカウントした飛翔数の関係を解析した結果、その相関係数は、海鳥では0.62～0.82と強い正の相関を、猛禽類では0.46と弱い正の相関を示した（サブテーマ1）。海鳥については、物標数と飛翔数の間に10～100倍程度の違いがみられたことから、洋上ではSバンドレーダによる個体の追跡は難しく、飛翔数の相対定量に適していると考えられた。猛禽類については、物標数と飛翔数の間に大きな乖離はみられなかったものの、飛翔する高度帯が広いことで、目視での発見およびレーダによる検出精度が低下し、洋上に比べて定量性は低い可能性がある。Xバンドレーダに関して、コウモリの検出可能性を高めるため、モニター表示される物標色を、レーダ内部で扱われている信号強度幅に関係なく同一色に設定したところ、コウモリを物標として探知しやすくなることが明らかとなった（サブテーマ2）。これを踏まえ、レーダに映った物標数と実際の飛翔数の関係を解析した結果、その相関係数は0.88と強い正の相関を示した（サブテーマ2）。

以上の結果から、Xバンドレーダについては、クラッタに配慮したレーダ設置方法、物標色設定の最適化、および調査日数の確保により、小型種から大型種まで幅広い分類群を対象とした観測が可能となり、地形や気象条件に起因する影響を低減し、分類群判別に必要とされる高質なレーダ画像を取得することが可能になると考えられた。

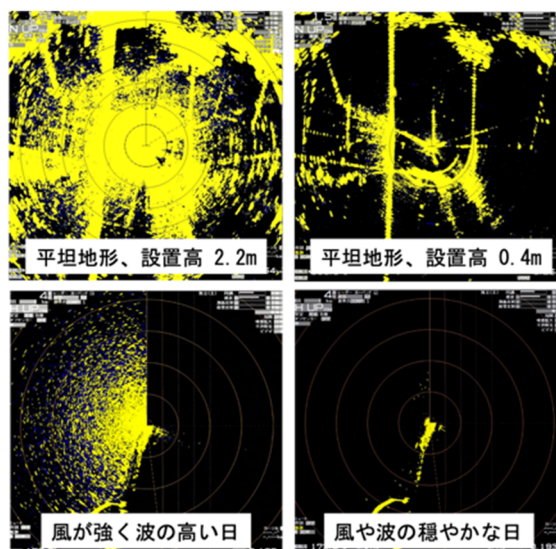


図0-2. レーダ設置方法と天候条件によるクラッタ量の違い

5-1-2. 前処理済みのレーダ画像から軌跡を得るトラッキング手法の開発

「抽出点の総数」は、新アルゴリズムが23205、旧BirdStrikeが14087であり、前者が多かった（図0-3A）。軌跡のノード数（ID別の点数）の頻度分布（ヒストグラム）についてみると（図0-3B）、新と旧のアルゴリズムはいずれも3点の軌跡から追跡を開始するため、3点（ノード3）の軌跡数が最多であり、それ以降ノード数の増加に伴い、軌跡数は減少した。この減少パターンをポアソン回帰してみると、新アルゴリズムは、旧BirdStrikeよりも減少の程度が緩やかであった。これはレーダ画像の前処理を含めた追跡アルゴリズムが、「より自然に」追跡を行うことができた結果と考えられた。追跡軌跡についてみると、旧BirdStrikeは取りこぼした軌跡が多数あるように判断できる（図0-4A）。また、3点で構成される最少軌跡の分布をみると、旧BirdStrikeのものは、背景画像領域の周辺に多数分布していた（図0-4B）。これに対して、新アルゴリズムのそれは少なかった。以上より、背景画像領域の膨張処理の重要性が示唆された。

探査範囲における次点の決定について、同一レーダ画像群を用い新アルゴリズムで（従来の）「探査円方式」と「確率楕円方式」を比較した。その結果、得られた軌跡数は確率楕円のものが少なかった。また、従来の探査円方式では追跡できなかった動体も、確率楕円方式では追跡できた事例があったことから、飛翔軌跡を高精度に追跡できる、より現実的なアルゴリズムであることが示唆された。

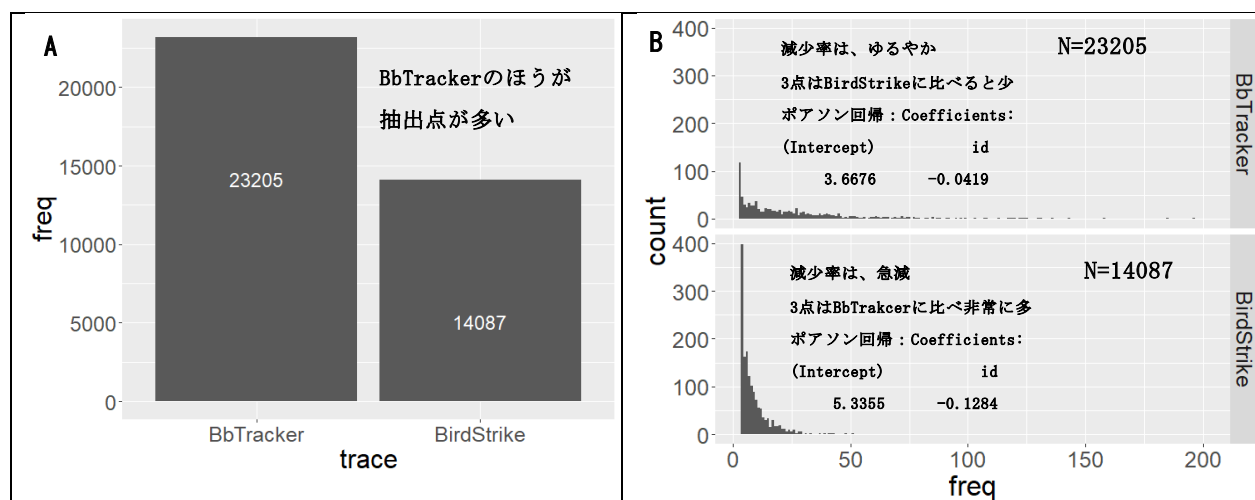


図 0-3(3-11). 抽出点の総数 (A) とノード数 (ID 別の点数) の頻度分布 (B)

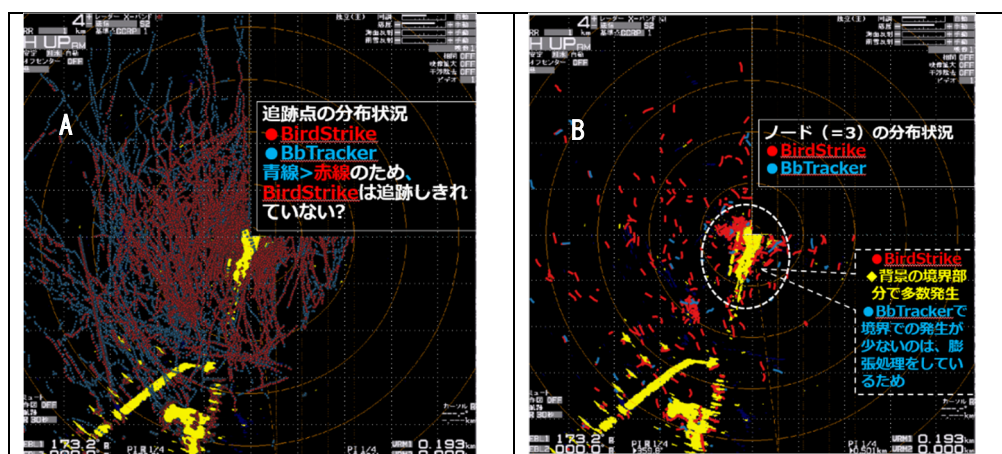


図 0-4(3-12). 新アルゴリズムと旧 BirdStrike による軌跡の追跡状況の比較 (A: 全ノード、B: ノード 3)

5-1-2. 抽出した軌跡群を用いた識別アルゴリズムの開発

サブテーマ 1 から提供された鳥類の測距器データを用いてPoC（概念実証）を行った結果、正解率は、ニューラルネットNNで0.5572、ランダムフォレストRFで0.6016、サポートベクターSVMで0.6057であったので実現可能性は高いと判断した。なおプログラム構築に際してSVMはデータ量が増えると計算量が膨大になる欠点があるため、RFを採用することとした。

識別の精度検証は以下の通りとした。

- (1) 測距器データだけで分類器を作成し、能代のラベリング済み軌跡データを識別した

- (2) 高精度に識別できた分類群、精度が良くなかった分類群を整理した
 (3) 精度が良くなかった分類群については、後述する二つの原因を考慮して、ラベリング済み軌跡データの一部を用いて分類器を作成して精度を確認した

測距器データだけで分類器を作成し、ラベリング済み軌跡データを用いて検証したところ、再現率は鳥種グループ（目レベル）で水禽類 0.675、猛禽類 0.837 であったのに対し、海鳥類は 0.037 と極めて低かった（表 0-1）。これは科レベルでも同様であり、カモ科 0.654、タカ科 0.798 に対して、カモメ科は 0.011 と極めて低かった。海鳥類の再現率の低さは、前述した測距器とレーダ画像の解像度の違い、あるいは環境依存性に起因するものと考えられたため、検証済みのトラッキング軌跡のうち 1/2 を分類器の作成に用い、残り 1/2 を検証用とし、再度分類を実施した。その結果に関し、科については表 0-2 に、群については表 0-3 に示す。カモメ科は 0.617、海鳥類についても 0.574 と精度の向上が認められた。コウモリ類のうち、ヤマコウモリについては、GPS は装着したもののデータ回収ができず、レーダ観測は市街地のため実施を見送ったことから、当該種を識別することはできなかった。ヒナコウモリについては、前述した鳥類と同様、BbTrainer により測距器データだけで分類器を作成し、残りの測距器データでテストしたところ、ヒナコウモリ科について 0.909 という高い精度を得た（表 0-4）。しかしながら、レーダで得られた軌跡が、測距器で得られた軌跡のような高い解像度を持たないこと等は、前述した鳥類同様、コウモリ類でも懸念された。そこで、測距器データ（時刻、場所）に対応したレーダ画像群を選定し、トラッキング法により軌跡を抽出し、測距器データとの一致性を検討することとした。コウモリ類については、新潟での X バンドレーダ（15kW）での対応関係を確認した。その結果、測距器データと概ね一致した事例は、新潟（ヒナコウモリ）の X バンドレーダ（15kW）であり、303 事例が確認された。BbTrainer を用い、このうちの 1/2 を訓練して分類器を作成し、残りの 1/2 でテストしたところ、識別率が 0.793 という高い値が得られた（表 0-5）。以上をふまえ、軌跡の抽出プログラム（BbTracker）、訓練（分類器作成）プログラム（BbTrainer）、および分類器を用いて軌跡を識別するプログラム（BbClassifier）を、Bb（Bird&bat）シリーズとして呼称することとした。

表 0-1(3-4). 訓練を測距器データ、検証をレーダ画像からのトラッキング軌跡とし、識別単位を群と科としたときの再現率

分類群	名称	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
科	サギ科	0.000	0	11
	アマツバメ科	NaN	0	0
	ウミスズメ科	NaN	0	0
	ウ科	0.040	1	25
	カモメ科	0.011	5	454
	カモ科	0.654	225	344
	カラス科	0	0	119
	サギ科	NaN	0	0
	タカ科	0.798	75	94
	ツバメ科	NaN	0	0
	ハト科	NaN	0	0
	ハヤブサ科	NaN	0	0
	ヒヨドリ科	NaN	0	0
	ミサゴ科	0.000	0	4
	ミズナギドリ科	NaN	0	0
	不明	NaN	0	0
	船舶	0.429	6	14
	飛行機	NaN	0	0
群(グループ)	アマツバメ類	NaN	0	0
	カラス類	0.000	0	119
	サギ類	0.000	0	11
	ツバメ類	NaN	0	0
	ハト類	NaN	0	0
	不明	NaN	0	0
	人工物	0.429	6	14
	水禽類	0.675	249	369
	海鳥類	0.037	17	454
	猛禽類	0.837	82	98
	陸鳥留鳥	NaN	0	0

注：NaN は、N が 0 の場合で、0 除算になるため

表 0-2(3-5). 識別単位を科としたときの再現率

科	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
サギ科	0.000	0	5
アマツバメ科	NaN	0	0
ウミスズメ科	NaN	0	0
ウ科	0.125	1	8
カモメ科	0.617	116	188
カモ科	0.669	93	139
カラス科	0.030	1	33
サギ科	NaN	0	0
タカ科	0.511	23	45
ツバメ科	NaN	0	0
ハト科	NaN	0	0
ハヤブサ科	NaN	0	0
ヒヨドリ科	NaN	0	0
ミサゴ科	0.000	0	1
ミズナギドリ科	NaN	0	0
不明	NaN	0	0
船舶	0.500	3	6
飛行機	NaN	0	0

注：NaN は、N が 0 の場合で、0 除算になるため

表 0-3(3-6). 識別単位をグループとしたときの再現率

群 (グループ)	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
アマツバメ類	NaN	0	0
カラス類	0.0303	1	33
サギ類	0.000	0	5
ツバメ類	NaN	0	0
ハト類	NaN	0	0
不明	NaN	0	0
人工物	0.167	1	6
水禽類	0.707	104	147
海鳥類	0.574	108	188
猛禽類	0.500	23	46
陸鳥留鳥	NaN	0	0

注：NaN は、N が 0 の場合で、0 除算になるため

表 0-4(3-7). 識別単位を科としたときの、ヒナコウモリ科の再現率

科名	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
カモ科	0.990	214	216
ヒナコウモリ科	0.909	30	33
ヒヨドリ科	0.000	0	1

表 0-5(3-8). 識別単位を科としたときの、ヒナコウモリ科の再現率

科名	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
アマツバメ科	NaN	0	0
カモ科	NaN	0	0
サギ科	NaN	0	0
ツバメ科	NaN	0	0
ヒナコウモリ科	0.793	23	29
ヒヨドリ科	NaN	0	0

注：NaN は、N が 0 の場合で、0 除算になるため

5-1-3. レーダデータの風力アセスへの実装

XバンドおよびSバンドレーダの設置例

SバンドレーダおよびXバンドレーダの特性を考慮し、洋上風力発電の環境アセスメントの際の使用方法を提案する。Sバンドレーダについては、観測範囲が広く、鳥の飛翔数の相対量の把握が可能であることが明らかになったことから、有望区域における広域なスクリーニングに用いる。一方で、Xバンドレーダの観測範囲は、Sバンドと比べて狭いものの個体の追跡が可能であることが明らかとなったことから、促進区域選定のための詳細な調査に用いる。ここで、レーダ設置のイメージを図0-5に示す。

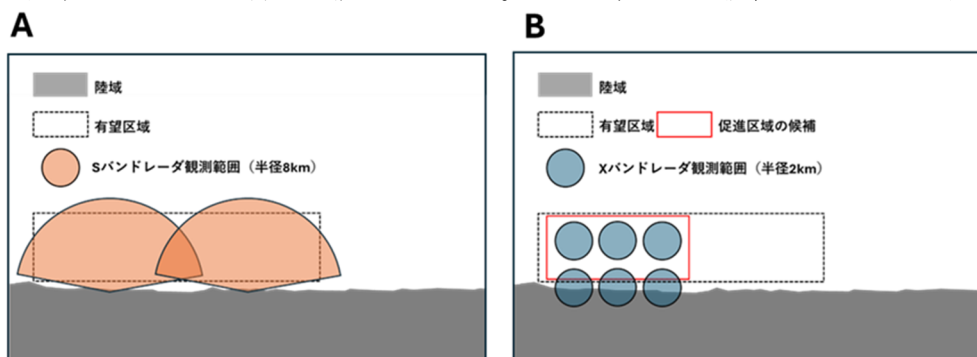


図0-5(1-15). 環境アセスメントにおけるレーダ設置例

鳥類およびコウモリ類に対する仮想的環境アセスメント

鳥類について、解析の流れを図0-6に示す。事業地内における総飛翔軌跡長および総軌跡数は、事業地1.3km²・1時間あたり、海鳥類が84kmおよび195軌跡、水禽類が166kmおよび319軌跡、猛禽類が71.5kmおよび245軌跡となった。測距器調査により洋上における鳥の飛翔軌跡数は、海鳥類、水禽類、および猛禽類でそれぞれ42軌跡、31軌跡、および0軌跡であったことから、種分類精度の高精度化のために、現地で確認された鳥の飛翔頻度を条件付き確率として補正に用いた。結果として、海鳥類、水禽類、および猛禽類の総飛翔軌跡長と総軌跡数は、それぞれ146kmおよび344軌跡、176kmおよび415軌跡、0kmおよび0軌跡と算出された。海鳥類と水禽類のMゾーン飛翔率は、それぞれ4%と6%であった。猛禽類について、LもしくはMゾーンを1度でも利用した軌跡は、82%であった。現地調査で確認された種組成を各種群にあてはめると、海鳥類はセグロカモメ（95%）およびカワウ（5%）で、水禽類はマガン（61%）およびカモ類（39%）となり、それぞれの種について、年間衝突確率が算出された。その結果、年間鳥衝突確率として、セグロカモメ12.2羽、カワウ0.6羽、マガン201羽、カモ類33羽となり、当該海域に洋上風力発電所が建設された場合、水禽類への影響が極めて大きいことが仮想的アセスメントの結果として、明らかとなった。

コウモリ類について、サブテーマ3から提供されたトラッキングおよび種分類結果を用いてコウモリ類の飛翔軌跡図を作成するとともに、得られた結果から総軌跡延長を算出し、コウモリ類2種のMゾーン飛翔率を乗じ、衝突リスクを推定した(図0-7)。コウモリ類に対する従来の環境アセスメント手法では実現できなかった飛翔軌跡数の定量化と、衝突リスクの可視化が可能となった。

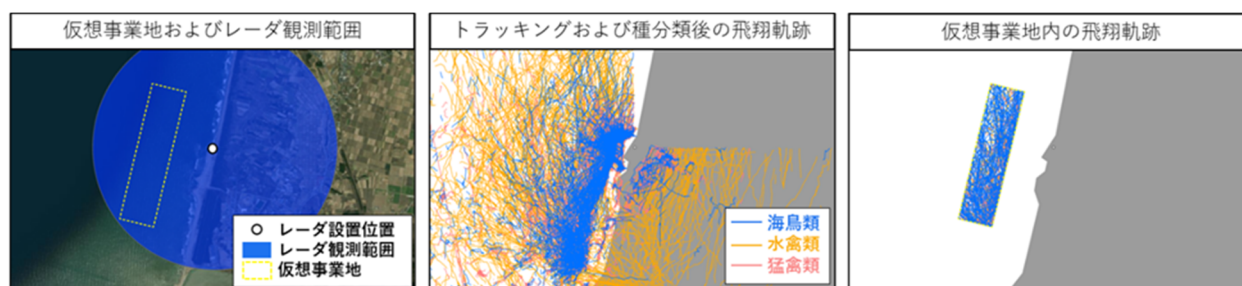


図0-6(1-16). 仮想事業地の設定およびレーダを活用した鳥の観測と分類

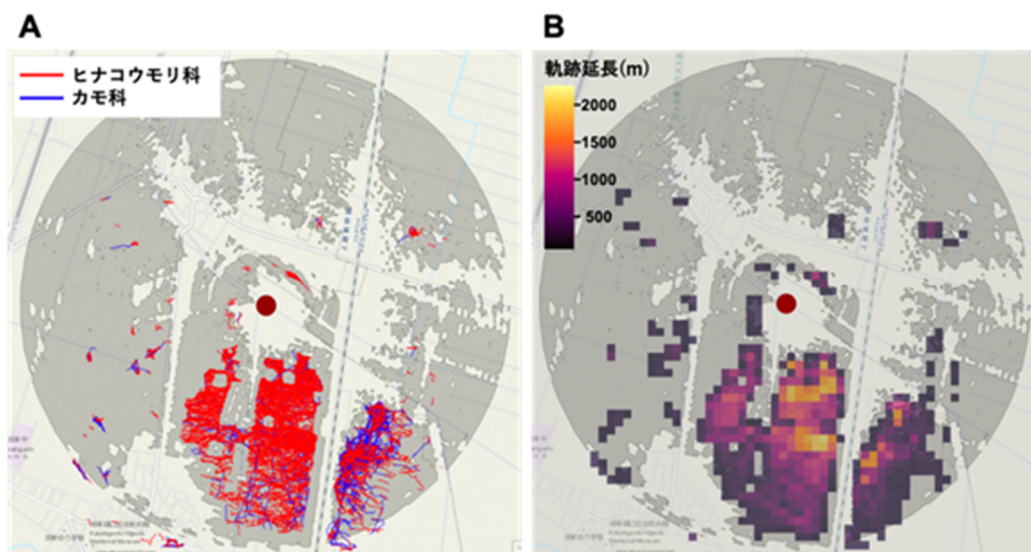


図0-7 (2-19). トラッキングおよびAI判別によって得られたコウモリ類の飛翔軌跡 (A) とその密度図 (B)

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> 2. 目標を上回る成果をあげた

「環境アセスメントへの活用を目指した鳥類およびコウモリ類の飛翔を識別するレーダ画像解析システムの開発」

全体目標	全体の達成状況
洋上の鳥類に関してSバンドを、夜間のコウモリ類に関してXバンドレーダを用い広範囲のエコー画像を取得した上で、エコー画像から動体を抽出する手法の開発とともに、併せてGPSロガー・測距器等を用いた飛翔動物の詳細な移動軌跡を取得することにより教師データを作成し、AI学習を適用することで種の識別を可能にする画像解析システムの開発を目指す。さらに、本システムを通して鳥類・コウモリ類と識別された動体軌跡に対し、種ごとの総飛翔軌跡数を求めることにより、実際の環境アセスメントを想定した定量的な衝突リスク評価の手法開発を目指す。 具体的には下記に、開発技術の実用化に向けた3つの達成目標を示す。 第1目標： 現行のレーダシステムで用いられている動体軌跡の作成手順が不明であることから、エッジ処理などの画像処理技術に加え、オプティカルフロー等を適用した、新たな動体軌跡抽出の手法を開発する。 第2目標： 第1目標で作成した動体軌跡に対し、GPSロガー・測距器等により作成された教師データに基づくAI学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛翔であることを識別する手法を開発する。本目標を達成することにより、洋上あるいは夜間の飛翔動物について、鳥類もしくはコウモリ類という大括りの飛翔動物に対する衝突リスクの評価が実現できる。	研究開始当初の目標として、洋上の鳥類に対してSバンドレーダを、コウモリ類に対してはXバンドレーダを用いてエコー画像を取得する予定であったが、本研究を通してSバンドとXバンドのレーダ特性が明らかとなり、マグネトロン方式のSバンドレーダでは、個体レベルの追跡が困難であることがわかった。本研究で目指したレーダ画像から種判別を行う画像解析システムの開発は、鳥類・コウモリ類ともにXバンドレーダで行われた。それを踏まえて、第1目標から第3目標までの達成状況を評価する。 第1目標： 従前の動体軌跡抽出プログラム (BirdStrike.exe) の課題を整理し、鳥類・コウモリ類の飛翔パターンを考慮したトラッキング法を新たに開発したことで、高精度に動体軌跡を抽出できるようになったことから、目標を上回る成果を達成できた。 第2目標： GPSロガーおよび測距器で取得された膨大な飛翔軌跡情報を教師データとして活用し、鳥類とコウモリ類の移動軌跡をAI学習により、高精度に判別するプログラムを開発できたことから、目標を上回る成果を達成できた。 第3目標： GPSロガーおよび測距器で取得された膨大な飛翔軌跡情報を教師データとして活用し、飛翔動物の移動軌跡をAI学習により種グループレベルで判別するプログラムを開発できた。さらに、生物情報が紐付いた軌跡長をもとに、種グループ

第3目標：種ごとの教師データに基づくAI学習をさらに発展させ、種レベルもしくは目レベル（カモメ類、猛禽類など）で飛翔軌跡を分別する手法を開発する。本目標を達成することにより、種もしくは目レベルの衝突リスク評価が実現できる。	レベルの衝突リスク評価を可能とした。 以上の結果を踏まえ、全体の達成状況として、当初目標を上回る成果をあげたと判断した。 本研究を通して、レーダ画像から種グループの判別を行う画像解析システムを確立できる見通しが立ったことから、影響予測手法が十分に確立していない洋上風力発電の環境アセスメントにおいて、広域の洋上を飛翔する動物を効率的かつ高精度に評価できる手法として、今後、本解析システムが汎用されることが期待される。また、本解析システムの活用を通して影響予測の精度が高まることにより、環境負荷を極力抑えた洋上風力発電の導入が可能となり、カーボンニュートラル2050とネイチャーポジティブの両立の実現に貢献できる。
--	---

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・ 1. 目標を大きく上回る成果をあげた

「Sバンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法の開発」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
サブテーマ1では、洋上の鳥類に対して高密な飛翔軌跡を取得することにより画像解析用の教師データを作成することに加え、AI学習で得られた生物情報と紐付いた飛翔軌跡を用いて定量的に衝突リスクを評価する手法の開発を目指し、以下の目標を設定する。 ① GPSロガーや測距器等を用いて、オオミズナギドリ・ウトウなどウミスズメ類・カモメ類・ウ類といった海鳥、オジロワシ・サシバといった猛禽類、ガン・ハクチョウ類といった水禽類に関し、毎秒～数秒間隔の高密な飛翔軌跡を取得し、それを基にレーダ画像解析用の教師データを種ごとに数百～数千個作成する。 ② 飛翔軌跡の種判別の精度を向上させるため、サブテーマ3によるAI学習の結果に、対象種の生物学的特性（例えば、活動時間、飛翔速度等）を組み合わせた解析手法を検討・開発する。 ③ AI学習による動体軌跡の解析結果を受けて、Sバンドレーダを設置した全5地点のレーダ有効範囲内において、各鳥種の総飛翔軌跡数を求め、その値から仮想的な事業計画に対する衝突確率を算出する。	① 目標に掲げていた鳥種より多くの対象種から飛翔軌跡に関する教師データを取得した。データ量は、飛翔軌跡数としては種ごとに数十軌跡から数百軌跡、および位置情報としては数百から数万ポイント取得できており、目標を上回る成果を達成できた（P. 32-33、表1-4、P. 69 成果番号1、2、3）。 ② 鳥の観測可能範囲を実際の観測データを基に定義した。実際の鳥の移動パターンをエコトラッキング方法に組み込むことで、解析の効率化を図った。AI分類後の飛翔軌跡データをより実際的にするために、調査地における鳥種ごとの飛翔頻度を条件付き確率による補正を行う方法を開発した（P. 30-32、図1-7, 10、P. 69 成果番号4）。 ③ クラッタの除去およびレーダ観測範囲の定義が綿密に行われた秋田県能代沖をモデルケースとして、レーダデータを活用した環境アセスメントを試行し、衝突確率および年間鳥衝突数の算出をした。さらに、高度データを測距器で取得することでMゾーン飛翔率を算出し、衝突リスクとしての補正を行った。レーダを用いた調査方法から、画像解析方法、および衝突確率計算方法までを網羅した環境アセスメント方法を開発・提案することができたことから、目標どおりの成果を達成できた（P. 35-37、図1-15, 16, 17、P. 69 成果番号5、P70 成果番号6）。

<【サブテーマ2】達成状況>・・・・・・・・・・ 3. 目標どおりの成果をあげた

「X バンドレーダを用いたコウモリ類に対する環境アセスメント手法の検討」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
サブテーマ2では、コウモリ類の中でも風車との衝突リスクが高いとされるハイリスク種（環境省EADAS）を指標に、画像解析用の教師データを作成するとともに、AI学習による判別結果を踏まえ、従来の手法では達成できなかった飛翔数の定量評価に基づく環境アセスメント手法の開発を目指し、以下の項目を設定する。 ① ハイリスク種の中でも特に高空域を飛翔する傾向が強く、風車との衝突事例もあるヤマコウモリやヒナコウモリ等について、Xバンドレーダによる観測可能距離を明らかにする。 ② 目標①の対象種に関してレーダ観測可能域で数十頭を放獣し、各種の飛翔軌跡取得を試みるとともに、環境省により絶滅危惧Ⅱ類に指定されているヤマコウモリ等については、GPSロガーを用いて毎秒～数秒間隔の詳細な飛翔軌跡を取得する。これらを基に画像解析用の教師データ百～数百個程度を作成する。 ③ サブテーマ3のAI学習で得られた移動軌跡からハイリスク種を判別して飛翔個体数を定量化するとともに、従来のコウモリ調査で多用されてきた音声波形による活動量データを個体数情報に補正する手法を検討し、環境アセスメントでの活用方法を提案する。	1. ハイリスク種であるヒナコウモリを対象に、観測可能距離の検証を行った。その結果、物標検出率が50%以上となる観測範囲は1.5kmであることが明らかとなった。さらに、地表クラッタを低減して飛翔数を定量的に観測できる手法を確立したことから、①については目標を上回る成果をあげた（P.48-49、図2-9, 10, 11, 12、P.72 成果番号21）。 2. ヒナコウモリとヤマコウモリの2種を対象に、測距器を用いて計198軌跡を取得した。また、レーダ画像からヒナコウモリの移動軌跡を355軌跡作成した。これらをサブテーマ3に提供し、AI判別システム開発のための教師データとして活用された。従って、②についても目標通りの成果をあげた（P.50、図2-13, 14、P.72 成果番号21）。 3. サブテーマ3と共同で、現地情報からAI判別に用いる分類群を絞り込むことでコウモリ類の判別精度を向上できることを明らかにした。得られた判別結果を受けて飛翔軌跡とその密度図を作成し、測距器で得た高度データも踏まえて衝突確率計算への活用を可能とした。また、音声波形データから飛翔数を推定する新たな活動量の集計方法を見出すことができたことから、③についても目標通りの成果をあげた。（P.53、表2-2、図2-18、P.54、図2-19）

<【サブテーマ3】達成状況>・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「レーダ画像から飛翔軌跡を AI 識別する画像解析手法の確立」

サブテーマ3 目標	サブテーマ3 の達成状況
サブテーマ3では、取得されたレーダ画像に画像処理技術を施し、新たな動体軌跡を抽出する手法を開発する。また、教師データに基づくAI学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛翔であることを分別する手法を開発する。さらに、AI学習を発展させ、種レベルもしくは目レベル（カモメ類、猛禽類など）で飛翔軌跡を分別する手法を開発する。目標とする識別率は以下の通りである。 ① 鳥類識別率として精度80%以上を、コウモリ類の識別率として精度70%以上とする。 ② 次に、鳥類もしくはコウモリ類と識別された動体軌跡を、さらに60%～70%の識別率で特定分類群まで識別する。	1. 取得されたレーダ画像に画像処理技術を施し、新たな動体軌跡を抽出する手法を開発し、追跡プログラム（BbTracker）を開発した（P.65-66）。また、教師データに基づくAI学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛翔であることを分別する手法を開発し、それぞれ訓練プログラム（BbTrainer）、識別プログラム（BbClassifier）を開発した（P.63、P.66-69）。当該のプログラムで、AI学習を発展させ、種グループレベル（カモメ類、猛禽類など）や科レベルで飛翔軌跡を分別することを検証した。 2. 上記プログラムを用いて種判別を試みたところ、①については、鳥類の識別率98.9%、種グループレベルで、水禽類70.7%、海鳥類57.4%、猛禽類50%、コウモリ類79.3%の精度を得たことから、目標を上回る成果をあげた（P.66-68、表3-6）。②については、科レベルで、カモメ科61.7%、カモ科66.9%、タカ科51.1%、ヒナコウ

モリ科79.3%の精度を得たことから、タカ科を除き目標通りの成果をあげた。(P. 66-68、表3-5)
--

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

＜得られた研究成果の学術的意義＞

サブテーマ1～3から得られた成果にもとづく学術的意義を以下に列举する。

サブテーマ1

1-1. レーダによる鳥類調査の精度向上

これまでのレーダによる鳥検出を目的とした研究において、レーダエコーの参照に用いる鳥のデータは、目視観察やGPS追跡由来のもので不確実性を孕むものであった。目視観察では位置の精度、高度の精度が保証されておらず、レーダの照射範囲に入っているかの確認が容易ではない。GPS追跡に関しては、特定の個体に関して確度の高いデータが得られるものの、調査対象地におけるGPS未装着個体の情報の把握ができない。そのような現状において、本研究は測距器由来の精度の高い3次元位置情報と、現地での目視観察による他個体の有無の確認を両立させており、極めて確度の高い鳥の参照データを作成した。本研究で示したレーダによる鳥の検出ポテンシャルおよび調査基準は、これまでのレーダ研究において、最もロバストなフィールド検証を基に作られたものであり、より普遍的で汎用的な技術である。

1-2. 環境ベースでの鳥の空間利用状況の把握

これまでの鳥の空間利用に関する研究は、GPSロガーやラジオテレメトリーを中心とした“個体ベース”のデータを活用しており、空間的な個体のバリエーションを網羅できていたとはいえなかった。例えば、以前実施した利島のオオミズナギドリのGPS個体追跡データのみでは、北海道沖を利用する他コロニーのオオミズナギドリの空間利用、同所している別種の空間利用、同じ場所における空間利用の時系列的変動はわからない。一方、レーダから得られる鳥の空間利用は“環境ベース”であり、対象地域の空間利用の個体あるいは種間のバリエーションを直接的に調べることを可能にする。したがって、レーダから得られるデータはこれまでの鳥調査では得られない新規性を有しており、希少鳥類の渡りルート、特定エリアにおける鳥類網羅的な空間利用、あるいは空間利用の種差および進化学的意義といった生態学的課題の解明に貢献することができる。

サブテーマ2

2-1. 季節移動解明への期待

本課題を通じて、レーダを用いたコウモリ類の飛翔判別をする道が開けたと言っても過言ではない。今後、さらに教師データを充実させていくことで、例えば、国内では殆どわかっていない、季節的な長距離移動の実態を解明できるのではないかと考えられる。特に、国内の風力発電所での事故は、コウモリが移動分散するとされる晩夏から晩秋に集中していることから、渡り行動に注目した研究は、その課題解決に向けても有用な知見を提供できる。

2-2. 個体群動態の長期モニタリングの可能性

今回調査地としたような、集団ねぐらの存在がわかっている場所で、かつ直接的な調査が難しい場所（例えば海蝕洞など）においては、レーダ観測が有効なモニタリング手段となる。レーダを活用した自動モニタリングが国内でも導入されることになると、長期的な個体群動態と風力発電建設の関係性、さらには気候変動も含めた環境変化との関係性の解明に発展できる可能性を持つ。

サブテーマ3

3-1. 新規のレーダ画像解析システムの開発

従来、船舶レーダ画像から鳥類（動体）を抽出、追跡するプログラムは、国内では環境省による「風力発電施設バードストライク防止策実証業務」（環境省、2007-2009）において、BirdStrikeというWindows版ソフトウェアとして開発されたのが最初である。それ以降、現在（2024年）に至るまで10年以上が経過したが、アップデートは行われず、OSやPCの処理速度の進歩に対応しきれていなかった。本サブテーマでは、船舶レーダ観測により得られたレーダ画像群を解析し、画像中の動体を軌跡として抽出し、得られた軌跡の形状特性に基づくAI識別を実施するプログラムの開発を行った。このうち前半部分（画像群の解析～軌跡の抽出）は、ソフトウェアBirdStrikeの諸課題の解決策を意味しており、なおかつ、後半部分（軌跡の形状特性に基づくAI識別）は、国内外においてこれまで着手されていないことから、極めて新規性・先進性が高い。

<行政等に既に貢献した成果>

令和6年3月14日に開催された、環境省の「洋上風力発電所に係る環境影響評価技術手法に関する検討会」において、洋上風力発電で活用可能な調査技術について審議された際に、サブテーマ3の成果であるレーダ画像を用いた鳥類判別システムの紹介が行われ、洋上風力発電の環境アセスメントに係る調査手法を検討する上で貴重な情報を提供した。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

① 洋上風力アセスメント・セントラル方式の実施に向けたレーダ調査手法導入への貢献

令和6年3月、中央環境審議会から「風力発電事業に係る環境影響評価の在り方について」の一次答申が行われた。その答申案の中で、①再エネ海域利用法による促進区域の指定前に、洋上風力発電事業の適正な環境配慮を確保するため、環境省による現地調査が実施されること、②今後の洋上風力の導入にあたっては、領海のみならず、排他的経済水域（EEZ）の利用も視野にいたした制度設計の必要性等が盛り込まれた。これは、EEZも含めた広大な海域に対し、今後、国が責任をもって風力発電を導入するエリアの環境影響を評価していくことを意味している。それを実現する上で、海鳥など、洋上を利用する飛翔動物の生息実態を広域に把握する手段として、レーダ技術の導入は欠かせない。しかしながら、現時点のレーダ画像解析レベルでは、レーダで捕捉された物標や、それを連続的に繋げたエコートレイルが何を表現したものか、判断できる術がないのが実情である。本研究で開発した、レーダ画像から飛翔動物を識別する画像解析システムは、広域な海域における鳥類やコウモリ類の利用状況を高精度に分別できるものであり、国が主体となり実施する環境影響評価の手法として、大きな貢献が見込まれる。

② 洋上風力供用後の有効な事後モニタリングの実現に向けた貢献

上述した中央環境審議会の一次答申案では、洋上風力発電所供用後の事後モニタリングについても触れられている。従前の事後モニタリングは事業者が主体で行うものであったが、新制度のもとでは、技術的に手法が確立していない項目に関する調査については、選定事業者の協力の下、当面は環境省が実施し、技術の確立を図るとしている。供用後の環境影響を適切に評価するためには、供用前との比較が不可欠であり、レーダによる飛翔動物の捕捉は事後モニタリングでも強力なツールになることが期待される。本研究を通じて開発されたレーダ画像解析システムは、国が主体となり実施する事後モニタリングでも、大きな貢献が見込まれる。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	6
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	18
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	4
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	0

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Mikami K, Kazama K, Kazama M.T, Watanuki Y (2022) Mapping the collision risk between two gull species and offshore wind turbines: Modelling and validation. Journal of Environmental Management 316: 115220. Epub (IF 8.6)
2	Kumagai A, Kazama K, Mikami K, Watanuki Y (2023) Black-tailed gulls alter their flight height and airspeed according to wind conditions during their coastal commuting trips. Mar Ecol Prog Ser 723: 201-212
3	Kamata T, Sato H, Mukai H, Sato T, Yamada S, & Sekijima T (2023) Sensitivity analysis of collision risk at wind turbines based on flight altitude of migratory waterbirds. Ecological Solutions and Evidence, 4(2), e12222.
4	Kamata T, Sato T, Sekijima T (under review) Field validation of avian radar surveys: effects of differences in species and flock sizes on echoes. Scientific reports

5	関島恒夫、望月翔太、綿貫豊、河口洋一（2023）特集：鳥衝突を未然に防ぐセンシティブマップの普及に向けて 巻頭言：鳥衝突を未然に防ぐ脆弱性マップ（sensitivity map）の普及に向けて．保全生態学研究（Japanese Journal of Conservation Ecology） 28：229-232
6	関島恒夫、浦達也、赤坂卓美、風間健太郎、河口洋一、綿貫豊（2023）総説 鳥類に対する風力発電施設の影響を未然に防ぐセンシティブマップとその活用方法．保全生態学研究（Japanese Journal of Conservation Ecology） 28：233-250

※この欄の成果番号は「Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

＜国際共同研究等の概要＞

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

＜研究代表者略歴＞

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
関島 恒夫	東京大学大学院農学系研究科修了 博士（農学） （財）神奈川科学技術アカデミー 近藤「冬眠制御」プロジェクト研究員（三菱化学生命科学研究所）、新潟大学大学院自然科学研究科・准教授を経て、現在、新潟大学自然科学系教授 中央環境審議会委員、環境省「洋上風力発電所に係る環境影響評価技術手法に関する検討会」委員、経産省環境審査顧問会顧問など 専門は生態系管理学、研究テーマは「鳥類に対する風力発電の影響評価および影響緩和策の開発」

＜研究分担者（サブテーマリーダー）略歴＞

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 河口 洋一	新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了 博士（学術） 日本学術振興会科学技術特別研究員、（独）土木研究所水循環研究グループ任期付き研究員、九州大学工学研究院助教、を経て、現在、徳島大学大学院社会産業理工学研究部・准教授 環境省・環境影響審査会助言委員、環境省・保護増殖検討会委員、徳島県環境影響審査会委員 専門は生態系管理学、研究テーマは風力発電事業の環境影響評価	
2) 島田 泰夫	横浜国立大学環境情報学府 博士課程修了 博士（工学） 現在、日本気象協会 環境・エネルギー事業部 主任技師 専門は、生態モデリング、生態リスク評価	

Ⅱ． 成果の詳細

Ⅱ－1 サブテーマ1「Sバンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法の開発」

〔サブテーマ1 要旨〕

本サブテーマでは、SバンドレーダおよびXバンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法の開発を目的とした。

はじめに、クラッタの少ないレーダ画像取得方法を確立するために、地形を障壁とした地上反射抑制効果の検証と波浪クラッタの少ない天候条件の検討を行った。レーダビームの照射方向に海岸砂丘がある場所と砂丘がない場所で内陸部における地形クラッタ量を比較したところ、砂丘がある場所ではない場所に比べ、観測範囲におけるクラッタの発生割合は65%減少し、観測範囲の著しい増加が認められた。また、波浪クラッタ量に対して、その発生に有意な影響を及ぼしていた変数は、波高、波周期、風速、および吹走距離といった波の強さを表す要因が影響していた。波が出現しにくい風向きや、風速の弱いタイミングでは波浪クラッタが出現しにくいことから、日による天候の違いを考慮して、適切な観測日が担保できるように十分な調査日数を設けることが重要であると考えられた。次に、XバンドおよびSバンドレーダの鳥検出率に影響を及ぼす要因をモデル解析により明らかにした。結果として、Xバンドでは対象物までの距離と群れの大きさが検出率に影響していることが明らかになった一方、Sバンドでは安定した検出が認められなかった。Xバンドについては、単独飛行する鳥では2km、群れ飛行する鳥では4kmまでが検出可能範囲として定義された。

サブテーマ3が開発するトラッキングシステムおよび種分類システムの教師データ作成のために、鳥類の飛行軌跡を取得した。オジロワシ、サシバなどの猛禽類6種、セグロカモメ、カワウなどの海鳥類6種、コハクチョウ、マガンなどの水禽類5種から累計95,000点ほどの位置情報を測距器により取得した。また、GPSロガーによりオオミズナギドリ28個体、ウミネコ5個体の追跡データを取得した。得られた飛行軌跡はサブテーマ3に提供され、レーダ画像解析のためのトラッキングシステムおよび種分類システムの開発に用いられた。種分類システムには飛行軌跡から生成される特徴量が用いられるため、現地における鳥の飛行頻度が反映されていない。したがって、調査地における鳥の飛行頻度を条件付き確率として補正に用いることで、種分類の高精度化を図った。

秋田県能代市に仮想事業地を設定し、そこで取得したレーダ画像データに対し、サブテーマ3が開発したトラッキングシステムおよび種分類システムを適用することで、風車に対する鳥衝突確率および年間衝突数の推定を行い、仮想的な環境アセスメントを試行した。風力発電事業に関するパラメーターは一般的な事業に則って設定した。Mゾーン（風車ブレード高）飛行率については、Mゾーンを30m～150mと定義した上で、測距器により取得された種ごとの飛行高度から算出した。飛行軌跡内における高度の標準偏差（飛行中にどれだけ高度変化するか）に着目すると、海鳥類および水禽類は高度変化が小さいのに対して、猛禽類は高度変化が大きかった。高度変化が小さい種群である海鳥類と水禽類のMゾーン飛行率はそれぞれ4%と62%であった。猛禽類について、LもしくはMゾーンを1度でも利用した軌跡は82%であった。現地において飛行が確認された鳥類の種組成に基づき各種の総飛行軌跡長を求め、種ごとに衝突数の算出を行った。衝突確率および年間鳥衝突数は、セグロカモメが0.002%と12.2羽、カワウが0.002%と0.6羽、マガンが0.023%と201羽、カモ類が0.016%と33羽となり、一般的な風力事業地よりも極めて高い衝突数が推定され、当該海域は風力事業を進める上で不適地であると判断された。高い衝突数が推定された要因として、本調査が渡りのルート上で行われたことが関係していると考えられる。本研究を通して、レーダの使用、レーダ画像解析、および衝突確率計算までを通した、一連の風力アセスメントの工程に係る調査方法を提案した。

1. サブテーマ1 研究開発目的

レーダは空間および時間的なデータ網羅性の高さや、調査範囲の広さが利点となっている調査ツールである。これまで主に、個体または群れの鳥類やコウモリの大規模な渡り調査や空港におけるバードストライク防止で使用されており、近年では、風力発電における環境アセスメントにも利用されるようになった。しかしながら、レーダの使用手法や提供するデータの解析方法、データの精度は必ずしも十分

に検証されているとはいえない。そこで、サブテーマ1では、SバンドレーダおよびXバンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法開発を目的とし、①レーダによる鳥観測手法の確立、②レーダ画像解析手法の確立と高精度化、および③レーダデータを活用した環境アセスメントの試行をした。

- ① はじめに、クラッタの少ないレーダ画像取得方法を確立するために、地形を障壁とした地上反射抑制効果の検証と波浪クラッタの少ない天候条件の解明を行った。次に、猛禽類、海鳥類および、水禽類などの広い分類群の鳥種を対象とし、XバンドおよびSバンドレーダの鳥検出率に影響を及ぼす要因をモデル解析により明らかにした。モデル解析のための説明変数として、対象種の体重や群れサイズといった生物学的要因、対象までの距離、アングルといった位置的要因、レーダ出力を用いた。作成されたモデルを用いて、レーダによる鳥検出可能範囲の定義を行った。また、Sバンドレーダに関しては、個体追跡が困難であったことから飛翔数カウントの定量性を検証した。
- ② サブテーマ3が開発するトラッキングシステムおよび種分類システムの教師データ作成のために、鳥類の飛翔軌跡を取得した。オジロワシ、サシバ、ハチクマ、およびトビなどの猛禽類、ガン・ハクチョウ、カモなどの水禽類、ウ、ウミスズメ、カモメ、ミズナギドリなどの海鳥類などを対象とした。ウミネコおよびオオミズナギドリに関してはGPSロガーを用い、それ以外の鳥種については測距器を用いた。種分類システムには飛翔軌跡から生成される速度や角度変化などの特徴量が用いられるため、現地における鳥の飛翔頻度（存在比率）が反映されていない。したがって、ランダムサンプリングに基づく鳥の飛翔頻度調査を行うことで種分類の精度向上のための補正を行った。
- ③ 秋田県能代市の海岸で行われたレーダ観測データに、サブテーマ3が開発したトラッキングシステムおよび種分類システムを適用することで、鳥衝突確率および年間鳥衝突数の推定をし、環境アセスメントを試行した。衝突リスクを表す鳥のMゾーン飛翔率（風車ブレード高飛翔率）について、水平回しによるレーダ観測では鳥の飛翔高度データが取得できないため、測距器由来の飛翔高度データを用い、Mゾーン飛翔率を種特性として鳥衝突確率の計算式に組み込んだ。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「Sバンドレーダを用いた鳥類に対する環境アセスメント手法の開発」
サブテーマ1 実施機関	新潟大学、北海道大学
サブテーマ1 目標	サブテーマ1では、洋上の鳥類に対して高密な飛翔軌跡を取得することにより画像解析用の教師データを作成することに加え、AI学習で得られた生物情報と紐付いた飛翔軌跡を用いて定量的に衝突リスクを評価する手法の開発を目指し、以下の目標を設定する。 ① GPSロガーや測距器等を用いて、オオミズナギドリ・ウトウなどウミスズメ類・カモメ類・ウ類といった海鳥、オジロワシ・サシバといった猛禽類、ガン・ハクチョウ類といった水禽類に関し、毎秒～数秒間隔の高密な飛翔軌跡を取得し、それを基にレーダ画像解析用の教師データを種ごとに数百～数千個作成する。 ② 飛翔軌跡の種判別の精度を向上させるため、サブテーマ3によるAI学習の結果に、対象種の生物学的特性（例えば、活動時間、飛翔速度等）を組み合わせた解析手法を検討・開発する。 ③ AI学習による動体軌跡の解析結果を受けて、Sバンドレーダを設置した全5地点のレーダ有効範囲内において、各鳥種の総飛翔軌跡数を求め、その値から仮想的な事業計画に対する衝突確率を算出する。

3. サブテーマ1の研究開発内容

3-1. 研究開発の流れ

本研究開発の全体の流れを図1-1に示す。サブテーマ1は、はじめにクラッタ除去のためのレーダ設置場所の検討を行った。次に、XバンドおよびSバンドレーダの鳥検出ポテンシャルを検証し、レーダで鳥観測が可能な調査範囲の定義を行うことで、レーダによる鳥観測手法を確立した。

測距器およびGPS由来の飛翔軌跡データから鳥の飛翔特徴量を抽出し、サブテーマ3に提供することで、エコトラッキングシステムおよびAIによる種分類システムを開発し、レーダ画像解析手法を確立した。さらに、軌跡に依存しない分類基準を検討することで、分類精度の高精度化を図った。

最後に、仮想的な風力発電事業地を設定し、サブテーマ3において種分類された飛翔軌跡図を基に、当該事業に対する環境アセスメントを試行した。

3-2. 調査地

Sバンドレーダによる観測は、秋田県能代市、千葉県南房総市、および愛媛県佐田岬で行った。Xバンドレーダによる観測は、徳島県鳴門市、新潟県村上市、新潟県聖籠町、および秋田県能代市で行った。上述した調査地に加え、北海道猿払村、幌延町のパンケ沼、羽幌町、宮城県登米市の伊豆沼、および愛媛県伊方町の佐田岬において、AI分類に用いる教師データとなる鳥の飛翔軌跡を測距器により取得した（図1-2）。加えて、北海道利尻島金崎および天売島、東京都利島において、野外個体にGPSロガーを装着することにより飛翔軌跡を取得した。

3-3. レーダ観測

南房総市では2022年9月9日～12日に、佐田岬では2022年9月23日～26日に、能代市では2023年3月1日～8日にて、Sバンドレーダ観測を行った（FURUNO社製FAR-2167DS）。レーダはマグネトロン式であり、アンテナ長は300cm、水平ビーム幅（ハーフパワーポイント）は 2.25° 、垂直ビーム幅は 25° で、回転数は26rpm（2.3秒に1回転）、出力は60kWである。感度設定は50、反射抑制設定は50とした。鳴門市では2022年9月28日～10月2日に、村上市では2022年10月19日～22日に、聖籠町では2022年10月25日～26日に、Xバンドレーダ観測（KODEN社製MDC-7910）を行った。レーダはマグネトロン式であり、アンテナ長は195cm、水平ビーム幅は 1.2° 、垂直ビーム幅 22° で、回転数は48rpm（1.25秒に1回転）、出力は12.5kWである。感度設定は75、反射抑制設定は0とした。能代市では、上述したXバンドレーダに加え、同じXバンドレーダであるものの、出力が異なる機種を調査に用いた（KODEN社製MDC-7920）。MDC-7920はマグネトロン式であり、アンテナ長は270cm、水平ビーム幅は 0.8° 、垂直ビーム幅は 25° 、回転数は24rpm、出力は25kWである。2022年3

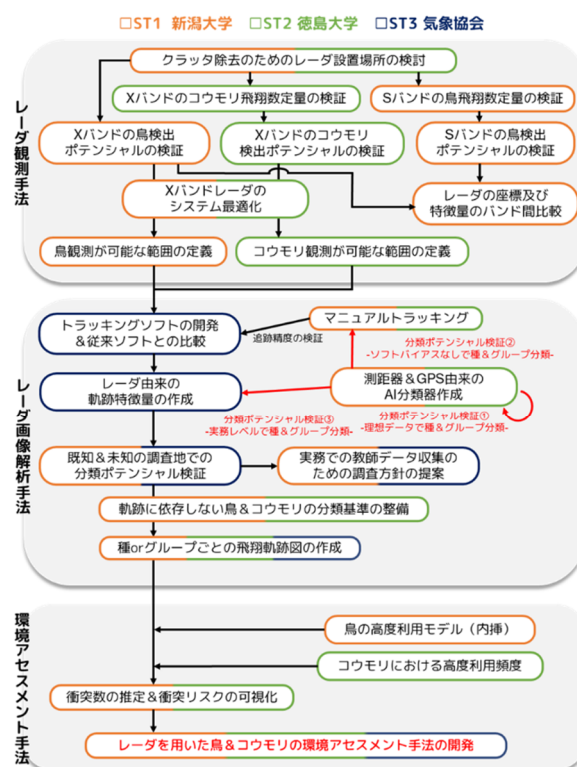


図1-1. 研究フロー

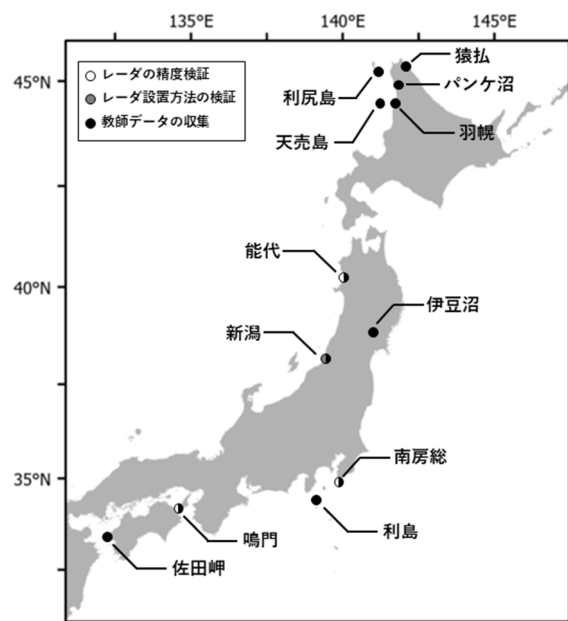


図1-2. 調査地

月1日から8日まではMDC-7910を、3月9日から17日まではMDC-7920を使用した。感度設定は75、反射抑制設定は0とし、表示されるすべてのエコーの色をR:G:B=255:255:0とした。

3-4. 測距器およびGPSによる飛翔軌跡の取得

XバンドおよびSバンドレーダの精度検証に用いる照合データおよびAI分類に用いる教師データの作成のために、測距器 (Vecrtonix社製 VECTOR21 Aero) による鳥の追跡を行った。測距器により鳥の出現時刻および3次元座標 (緯度、経度、および高さ) を取得し、併せて目視により種および群れ個体数を確認し、記録した。

オオミズナギドリの捕獲およびGPS追跡の調査は東京都利島村の南ヶ山園地で、2022年8月25日～9月15日に行われた。育雛期間中の親個体43個体を捕獲し、雌雄判別後にGPSロガー (TechnoSmart社:AxyTrek) を背部にテサテープにより固定し、放逐した。その後、33羽について再捕獲し、GPSロガーを再回収後に形態計測を行った。なお、捕獲調査は、東京都の許可を受け、新潟大学動物実験倫理委員会の審査を受けたプロトコルを遵守した上で、新潟大学学長の承認のもとで行われた。

ウミネコの捕獲およびGPS追跡の調査は、北海道天売島の金崎海岸および天売島の黒崎海岸において、2017年5月19日～6月11日および2022年5月9日～6月4日に行われた。営巣地付近で捕獲したウミネコに回収型GPSロガーを装着し、2-7日以内に再捕獲することで、その間の1秒ごとの位置情報および高度データを取得した。利尻島のウミネコについては、TechnoSmart 社のGipSy5というロガーを利用し、環境総合推進費JPMEERF20164003で得ていたデータを解析に用いた。天売島のウミネコについては、2022年5月に、同社のAxytrek miniを、それぞれテサテープを用いて背中側に装着した。利尻の13羽、天売の4羽から得た飛行軌跡を図1-3に示す。本研究は天然記念物現状変更許可、特別保護区域における新築物等に関する許可、鳥獣捕獲許可のもとに、また北海道大学動物倫理委員会の承認を受けて実施された。

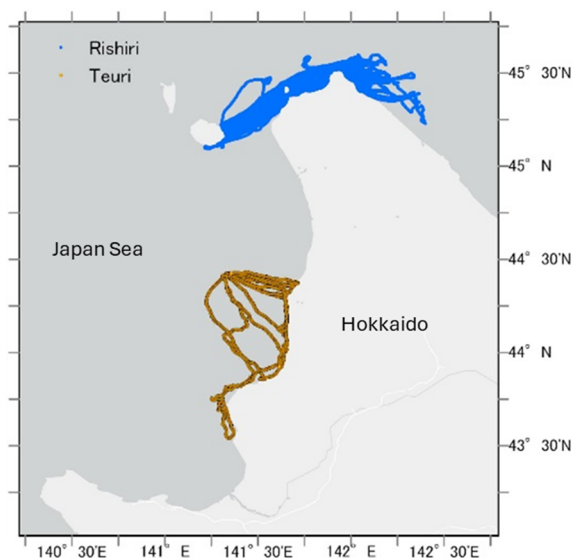


図1-3. ウミネコのGPSトラック

3-5. 目視観察

Sバンドレーダの鳥検出に定量性があるか否かを検証するために、レーダ観測に併せて目視観察による鳥飛翔数のカウントを行った。目視観察は2022年9月9日～12日に千葉県南房総市で、2022年9月24日および25日に愛媛県伊方町佐田岬で行われた。南房総市では、設置したレーダから3.2km東側の海上に2kmのライントランセクトを作成し、通過するオオミズナギドリを計数した。佐田岬では、設置したレーダから2.4km東側の地点に300mのライントランセクトを作成し、通過する猛禽類 (サシバ、ハチクマ等) を計数した。

3-6. レーダ画像解析

(1) クラッタの抽出

Xバンドレーダ画像をImageJに取り込み、2値画像に変換し、エコー全体のピクセルサイズを算出することでクラッタの量を算出した。

(2) 鳥のエコーの抽出

ArcGIS Proソフトウェア (ESRI ver. 2.7.0) を使用して、測距器で取得した飛翔軌跡とレーダ画像をオーバーレイし、飛翔軌跡と重なるエコー画像を抽出した (図1-4A)。レーダ画像を、ImageJに取り込み、2値画像に変換した。4ピクセル以上かつ真円度0.05以上のエコーを解析対象とし、重心座標を算出した。ただし、エコーがノイズと重なっている、または連続した画像の中でエコーが他のエコーと結合した場合もしくは対象のエコーが分裂した場合は、鳥のデータとの対応が困難になるため解析から除外した。なお、除外前後の軌跡は、別の軌跡として扱った。エコーが検出されなかった座標については、同一軌

跡内における検出エコー間に等間隔になるようにあらたな座標を設けた(図1-4B)。

3-7. 統計解析

能代で行われたXバンドレーダ観測データを用いて、波浪によるクラッタ量に影響を及ぼす要因を明らかにした。レーダから1kmごとに4kmまでの4段階の範囲で区分けされたクラッタ量を応答変数に、波数、1/3有義波の周期、1/3有義波の波高(全国湾岸波浪情報網)、風速(気象庁)、風向ごとの吹走距離、および使用したレーダの出力を説明変数とする線形モデルを作成した。吹走距離の最大値は10kmとし、風速と乗じることで調査地における「波の立ちやすさ」を示す指数をあらたに作成し、変数として用いた。また、クラッタ量は時系列データであることから、調査日ごとに自己相関関数を作成し、自己相関の有意限界5%を下回るラグ値を算出し、150分から200分の間隔でデータを間引いた。すべての変数の組み合わせを検討し、AICが最も低い変数の組み合わせのモデルをベストモデルとした。

SバンドおよびXバンドレーダの鳥の検出に影響を及ぼす要因を明らかにするために、能代市、鳴門市、聖籠町で行われた観測データを用い、エコーの出現の有無を応答変数(0-1)とし、対象となる鳥の体重、群れサイズ、レーダからの距離、アングル、およびレーダ出力を説明変数とするロジスティックモデルを作成した。レーダの周波数ごと(Xバンド、Sバンド)、鳥の飛行様式ごと(単独飛行する鳥、2羽以上の群れ飛行する鳥)に4つのモデルを作成した。データの独立性を保証するために、1つの鳥の軌跡データにつきランダムに1つのエコーデータを抜き出し、モデル作成に用いた。Sバンドレーダはシステム上の設定の地上反射除去により、2km未満のエコーが表示されにくくなっていることを考慮して、レーダから2km未満の範囲のデータは解析から除外した。

Sバンドレーダが鳥の飛翔数を定量的に捉えられるか否かを明らかにするために、エコー数と飛翔数の関係をPearsonの相関係数により比較した。

鳥種ごとの2次元的な飛翔特徴を比較するために、測距器およびGPSロガーによって取得された飛翔軌跡から、速度および軌跡内における平均速度、角度変化量、および軌跡内における平均角度変化量を算出した。さらに、レーダ画像上での鳥の移動パターンをエコートラッキングシステムに組み込むために、猛禽類、水禽類、および海鳥類を対象とし、鳥の移動の相対的な位置関係を種グループごとに散布図に示した。なお、本研究では、タカ目からなる猛禽類、カモ目からなる水禽類、ミズナギドリ科、カモメ科、ウミスズメ科、ウ科からなる海鳥類を種グループとして取り扱った。レーダによる鳥の検出率が低い状況におけるトラッキングも想定し、1回から最大4回連続でエコーが映らなかった場合の移動パターンも図示した。さらに、鳥種ごとに飛行高度の特徴づけをするために測距器で取得した飛翔軌跡から軌跡内における平均飛行高度と飛行高度のばらつき(標準偏差)を明らかにした。

猛禽類特異的な飛翔パターンである帆翔が、大気中における熱上昇気流の動態と関連しているかどうか明らかにするために、帆翔中の移動方向と風向、移動速度と風速の関係をRayleigh TestおよびPearsonの相関係数により比較した。さらに、帆翔中の高度上昇速度を応答変数とし、風速、日照時間、時刻、および鳥種を説明変数に、調査地をランダム効果とする一般化加法混合モデルを作成することで、猛禽類の飛翔パターンに影響を及ぼす要因を明らかにした。

ウミネコについて、GPSデータにより、広範囲な環境や夜間など、ほかの観測・測定方法では得難い移動軌跡を得ることにより、場所および風、昼・夜別に飛行パターンを解析した。場所の影響については、先行研究(Kazama et al. 2018)から、利尻島のウミネコはコロニーと宗谷岬の東の海域を往復する定型化された長距離トリップを行うことがわかっているため、この定型を満たす14トリップを対象に、海峡通勤区、陸棚域通勤区、防波堤通勤区、および採餌区の4つを設けた。ここで、飛行の特徴量としては

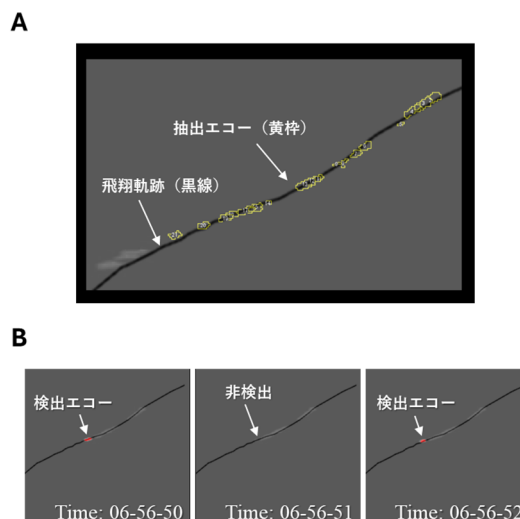


図1-4. 画像解析によるエコーの抽出

(A) ArcGISにより飛翔軌跡とレーダ画像をオーバーレイさせることで軌跡とエコーの照合を行い、ImageJにより検出されたエコーの重心座標を算出した。(B) 検出エコーの間に非検出座標を設けた。

速度に着目した。このとき各区内において、各軌跡のランダムな位置に10パス（11秒分）の断片を作成し、断片毎の速度を場所区間で比較した。防波堤通勤については、防波堤に沿った飛行から断片を抽出した。各飛行断片の速度は4.2-33.9m/s、直線度0.5以上であった、また、先行研究からウミネコの飛行速度には風が影響することがわかっているため（Kumagai et al. 2023）、風向・風速を含めた一般化線形混合モデルを作成し、モデル選択によってその影響を確かめた。夜間飛行について、利尻のウミネコについては、北海道沿岸で夜間の滞在が確認された5羽のべ9日、および天売島から北海道沿岸への採餌トリップを行った4羽のべ8日分を対象に、飛行速度と高度を夜と昼とで比較した。この解析では、飛行速度は2点間とし、4.2-33.9m/sかつ海域のデータのみを使用した。夜間のトリップ数が少なく独立なデータとはみなせなかったため、検定は行なわなかった。夜は19:00-3:59の間とし、昼はそれ以外とした。

3-8. レーダデータを活用した衝突リスク評価

能代沖に仮想的な洋上風力発電事業地（1.3km²）を設け、Xバンドレーダによる観測データを用いて、鳥衝突リスクに関する環境アセスメントを試行した。サブテーマ3が開発したトラッキングソフトウェア（BbTracker）を用いてレーダ画像を飛翔軌跡図として描き、測距器による追跡データを学習させ（BbTrainer）、種グループ分類を行った（BbClassifier）。

飛翔軌跡図から衝突数計算および衝突リスク推定をするためには、飛翔軌跡長に風車ブレード高飛翔率（Mゾーン飛翔率）を乗じることがこれまでの環境アセスメントでは一般的である。測距器による3次元追跡の結果として、鳥類の高度利用は、①軌跡内高度変動の小さい種群（水禽類、海鳥類、カラス、サギ等）と②軌跡内高度変動の大きい種群（猛禽類）に二分されたことから（4-4参照）、前者の種群については、軌跡ごとに利用高度を特徴付けできるとし、軌跡内平均飛翔高度を算出した。次に、それぞれの軌跡を平均飛翔高度の値に基づき、L/M/Hゾーン利用に区分した。したがって、Mゾーン飛翔率の計算式（1）は、

$$\text{種群①のMゾーン飛翔率} = \text{Mゾーン軌跡数} / \text{全軌跡数} \quad \dots \dots \dots (1)$$

である。後者のソーリングをする種群については、1軌跡内における利用する高度帯が広く、軌跡ごとの利用高度の特徴付けが難しいことから、LおよびMゾーン利用が1度でも認められた軌跡はソーリングによってMゾーンを利用する可能性がある軌跡とした。したがって、Mゾーン飛翔率の計算式（2）は、

$$\text{種群②のMゾーン飛翔率} = \text{Mゾーンを1度でも利用した軌跡数} / \text{全軌跡数} \quad \dots \dots \dots (2)$$

である。また、Mゾーン飛翔軌跡長を求める計算式（3）は、

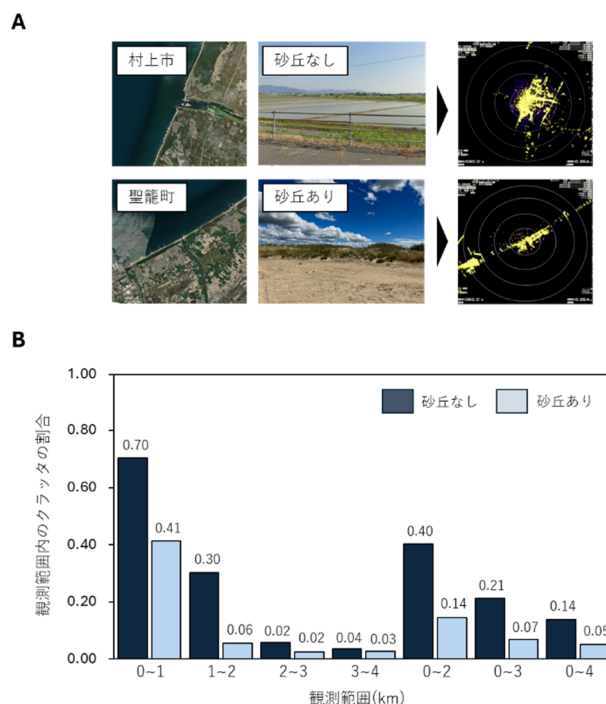


図1-5. 地形を利用したクラッタの除去

(A) 新潟県の下越地方を調査地とし、海岸線沿いに砂丘がなく見晴らしのよい場所（村上市）と砂丘がある見晴らしの悪い場所（聖籠町）にレーダを設置し、(B) 観測範囲ごとのクラッタ量を比較した。

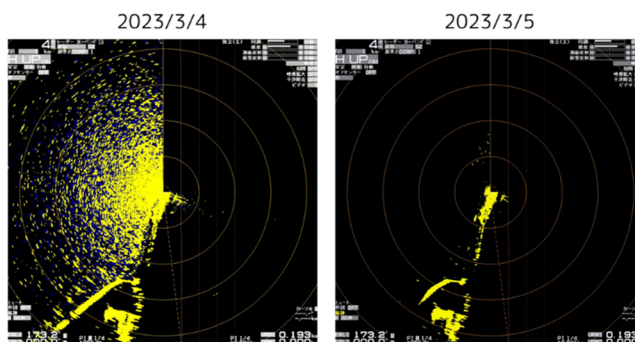


図1-6. 能代市における日による波浪クラッタ量の違い

Mゾーン飛翔軌跡長=種群ごとの飛翔軌跡長×種群ごとのMゾーン飛翔率　・・・・・・・・（3）

とした。

4. サブテーマ1の結果および考察

4-1. 地上および波浪クラッタへの配慮

海岸沿いに砂丘がある聖籠町と砂丘がない村上市において、内陸部における地形クラッタ量を比較した（図1-5A）。地形クラッタの大部分は、水平からマイナス方向へのビーム照射によって生じる。砂丘をビームの障壁として活用したことにより、観測範囲におけるクラッタ割合は2km範囲内で65%減少され、観測範囲が増加した（図1-5B）。なお、レーダ設置位置を地形よりも相対的に低くしてクラッタを削減する場合、地形よりも低い高度帯の観測ができないことから、事前に観測可能な高度範囲を確認する必要がある。

図1-6は、能代（西側が海、東側が陸地）で行われたレーダ画像であり、日の天候条件によって波浪クラッタ量が異なる。波浪クラッタ量に対して有意な影響を及ぼしていた変数は、波高、波周期、および風速×吹走距離であり、いずれも波の強さを直接的に表す環境要因であった（表1-1）。波が出現しにくい風向き（本調査地域では東風）や、風速の弱いタイミングでは波浪クラッタは出現しにくいことから、海上を対象にしたレーダ観測の際は、日による天候の違いを考慮して、観測可能な日が十分担保できるように調査日数を設けることが重要であると考えられる。

表1-1. 線形モデルを用いた波浪クラッタ量に影響を及ぼす要因解析

モデル	切片	kWh	風速	吹走距離* 風速	波高	波数	波周期	R ²
0-1km	58.84 [*]	—	—	0.83 ^{***}	34.31 ^{***}	—	-13.25 ^{**}	0.78
1-2km	33.81	—	—	0.45 ^{***}	23.41 ^{***}	—	-9.34 [*]	0.59
2-3km	10.61	—	—	0.15 ^{**}	6.16 [*]	—	-2.79	0.57
3-4km	2.13	—	—	0.03 ^{**}	1.12 [*]	—	-0.54	0.54

4-2. レーダによる鳥観測のための調査基準

（1）鳥の検出に影響を及ぼす要因

Sバンドについて、画像解析により11種類の鳥種、288の軌跡が得られ、3,853のエコーと、1,544の非検出が得られた。取得された群れのサイズは1羽から200羽（対数変換：0.00から2.30）で、レーダからの距離は0.41から8.07km、仰角は0.87から28.33、体重は0.49から4.97kgの範囲であった。Xバンドについて、画像解析により13種類の鳥の553の軌跡が得られ、18,163のエコーと、8,267の非検出が得られた。取得された群れのサイズは1から300羽（対数変換：0.00から2.48）で、レーダからの距離は0.26から5.25km、仰角は-0.22から27.24（絶対値：0.00から27.24）、体重は0.49から4.97kgの範囲であった。

Sバンドにおける単独飛行の鳥種および群れ飛行の鳥種いずれのモデルにおいても、切片を含めたすべての変数で有意性が認められなかった。一方、Xバンドにおける単独飛行の鳥種については、有意な負の効果を示したのはレーダからの距離であり、仰角、対象種の体重、レーダ出力は有意な効果を示さなかった（表1-2）。Xバンドの群れ飛行の鳥種については、対象の群れサイズが

表1-2. 一般化線形モデルを用いた単独飛行する鳥に対するXバンドレーダの検出精度に影響を及ぼす要因解析

パラメータ	推定値	SE
(切片)	2.53 ^{***}	0.43
レーダからの距離	-1.37 ^{***}	0.29
レーダからの仰角	—	—
対象種の体重	—	—
レーダ出力	—	—

表1-3. 一般化線形モデルを用いた群れ飛行する鳥に対するXバンドレーダの検出精度に影響を及ぼす要因解析

パラメータ	推定値	SE
(切片)	1.85 ^{***}	0.41
対象の群れサイズ	1.41 ^{***}	0.37
レーダからの距離	-0.82 ^{***}	0.19
レーダからの仰角	—	—
対象種の体重	—	—
レーダ出力	—	—

有意な正の効果を、レーダからの距離が有意な負の効果を示し、仰角、対象種の体重、およびレーダ出力は有意な効果を示さなかった（表1-3）。

Xバンドレーダで鳥類を捉える場合、ビームの距離拡散が検出率に強く影響を及ぼし、種の違いといった個体レベルのサイズ変化よりも、群れの個体数のように規模が大きいサイズ変化の方が検出率に影響を及ぼしていた。これは前者より後者的の方が断面積のばらつきを生みやすいことが関与していると推察される。また、出力差について、レーダ方程式によると、2倍の出力では1.2倍の検出距離が増加すると推定できるが、本研究ではそのような効果は認められなかった。鳥調査のような出力以外の要因による影響が強く検出率に影響する条件下では、出力差の影響は限りなく小さくなるのかもしれない。Sバンドレーダについては、検出率は安定していなかった。これには周波数が低いことによる分解能の低さが起因している可能性があり、数十cmから数mといった鳥の大きさレベルでは、安定した検出力を保証できないのかもしれない。

Xバンドに関して、作成したモデルを用いて、対象の群れサイズおよび距離に応じた検出率を予測した（図1-7）。検出確率50%以上を保証するための調査範囲は、個体を対象にした場合には約2km、10羽の群れの場合には4km、100羽の群れの場合には4km以上であった。本調査の検証範囲の最大が4kmであったため、それ以上の範囲は未検証とした。

（2） Sバンドレーダの定量性

オオミズナギドリの飛翔数とSバンドレーダのエコー数の関係について、日による波浪クラッタの量に配慮し、日ごとに解析を行った。相関係数は、0.62から0.82と強い正の相関がみられた（図1-8）。しかしながら、エコー数と実際の飛翔数の間には10倍から100倍程度のオーダーの差がみられたことから、鳥の個体を網羅できていないことも明らかとなった。海上において、Sバンドレーダは個体の追跡は難しく、相対定量に適していると考えられる。

猛禽類の飛翔数とSバンドレーダのエコー数の関係について、相関係数は0.46と弱い正の相関がみられた（図1-9）。海上と違い陸上においては、相関係数は小さく定量性は低下したものの、エコー数と飛翔数の間にあきらかなオーダーの差は認められなかった。海鳥に比べ猛禽類は利用する高度帯が広いことが要因となり、目視観察の精度およびレーダによる検出精度が低下した可能性がある。

4-3. レーダ画像解析のための教師データの収集

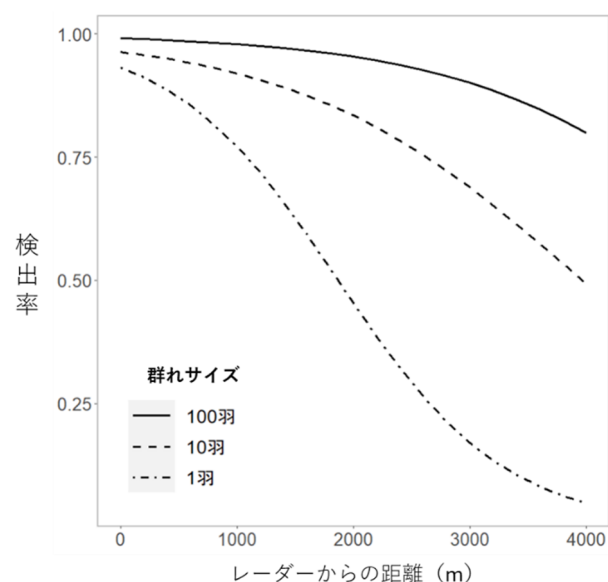


図1-7. 対象および距離に応じた鳥検出率の推定

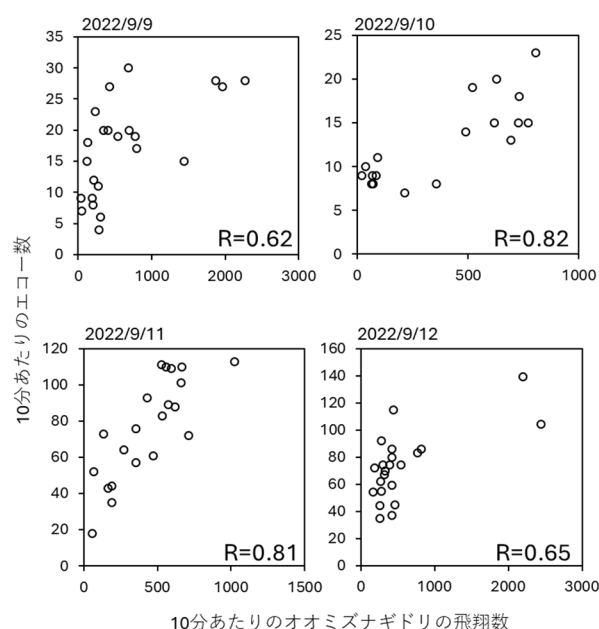


図1-8. Sバンドレーダのエコー数とオオミズナギドリの飛翔数の関係

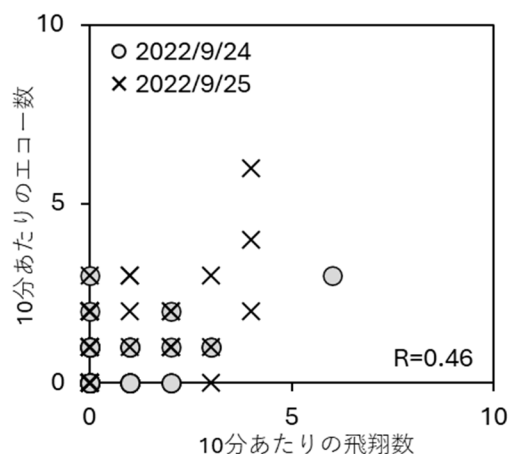


図1-9. Sバンドレーダのエコー数と猛禽類の飛翔数の関係

(1) 鳥類の移動パターン

レーダ画像上で効率的に鳥のエコトラッキングを行うシステム開発に向けて、測距器データを用いて、鳥の移動パターンを猛禽類、水禽類、および海鳥類を対象に再現した（図1-10）。それぞれの種群の特徴として、進行方向（縦軸プラス）に対して、猛禽類はマイナス方向からプラス方向への移動が再現された。これは帆翔による巡回行動を頻繁にすることが影響していると考えられる。水禽類は、プラス方向への大きい移動が再現された。これは高い飛行速度を維持する飛行様式が影響していると考えられる。海鳥類は、0からプラス方向への移動が再現された。海鳥は、飛行中に移動や探餌・採餌をすることが影響していると考えられる。エコーの非検出回数（Skip数）が増加するのに従い、移動の範囲は広がっていた。散布図から確率楕円を発生させることで、エコトラッキングの探索領域とした（確率楕円を用いたトラッキングの検証についてはサブテーマ3を参照）。

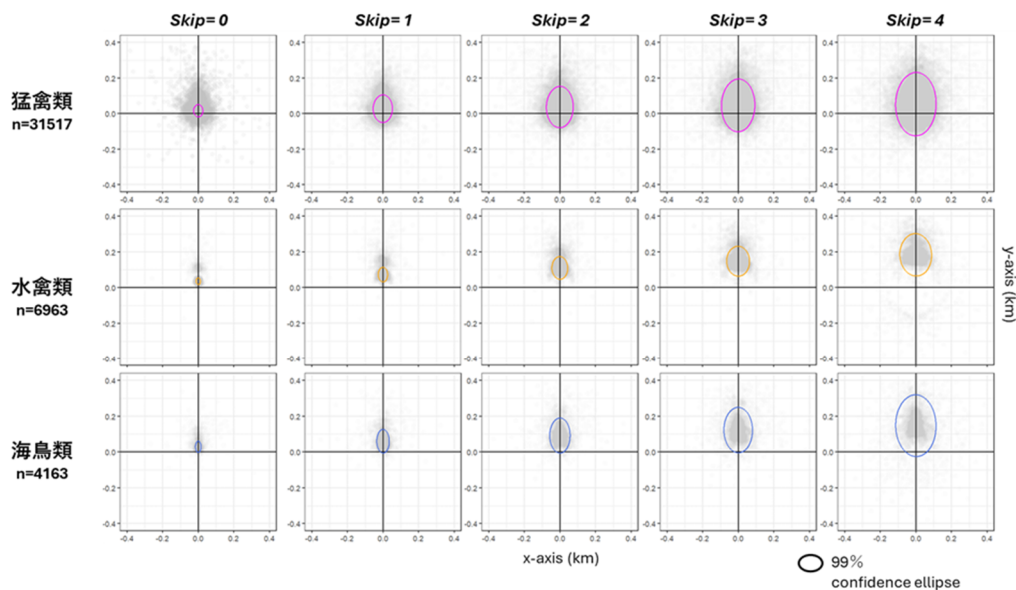


図1-10. 鳥類の相対的な移動パターン

測距器追跡によって得られた飛翔軌跡から鳥の相対的な移動位置をレーダ回転頻度に合わせて算出し、散布図および確率楕円として表した。Skip数はレーダが連続して捕捉できなかった回数を示しており、最大4回とした。

表1-4. 鳥類の飛翔軌跡の収集

種名	調査方法	軌跡数 (GPS台数)	ポイント数	繁殖期	渡り期	越冬期	不明
猛禽類							
オオワシ	測距器	267	20,012		○		
オジロワシ	測距器	197	14,474	○	○		
トビ	測距器	257	12,074				○
サンバ	測距器	25	615		○		
ハチクマ	測距器	133	3,285		○		
ミサゴ	測距器	62	3,566				○
海鳥類							
ウミネコ	測距器	83	1,910	○		○	
ウミネコ	GPS(1fix/1sec)	5	1,048,575	○			
セグロカモメ(オオセグロカモメを含む)	測距器	292	5,224	○		○	
ウミウ	測距器	105	1,870	○			
ウトウ	測距器	26	507	○			
カワウ	測距器	101	1,863			○	○
オオミズナギドリ	GPS(1fix/1sec)	28	2,325,043	○			
水禽類							
オオハクチョウ	測距器	86	2,320			○	
コハクチョウ	測距器	208	6,591			○	○
マガン	測距器	598	15,234			○	
ヒシクイ	測距器	65	1,595			○	
カモ類	測距器	109	1,792			○	
その他							
カラス	測距器	119	1,536				○
アオサギ	測距器	36	950				○

(2) AI分類のため教師データの収集

測距器およびGPSロガーを用いて猛禽類6種、海鳥類6種、水禽類5種、およびその他2種の飛翔軌跡を取

得した。種ごとの軌跡数、GPS台数、ポイント数、およびデータを取得した生活環フェーズを表1-4に示した。取得した飛翔軌跡から種ごとに飛行速度と角度変化を算出した。飛行速度については、水禽類が高いのに対し、猛禽類が低い傾向が、海鳥類についてはウミウやウトウが高いのに対し、カモメ類やミズナギドリ類が低い傾向があった。角度変化については、水禽類および海鳥類が低く、猛禽類が高い傾向にあった。種ごとの飛行特徴量は、サブテーマ3におけるAIによる種分類器の開発に用いられた。

(3) 猛禽類の帆翔行動に影響を及ぼす要因

測距器により追跡した猛禽類の飛翔軌跡から、旋回を伴う帆翔行動を抜き出した(図1-12A)。帆翔中の移動速度は、種や地域に関わらず、現地における風速と高い相関を示した(図1-12B)。さらに、帆翔中の移動方向は、有意性を持って風下を示していた(図1-12C)。

帆翔中の上昇速度について、時刻、日照時間、および風速が規定要因として選択された(表1-5)。時刻は、昼間12時付近で正の効果がピークを示しており、日照時間および風速は正の効果を示していた(図1-13)。時刻および日照時間は熱上昇気流が、風速は地形と組み合わせる発生する強制上昇気流に関連していると考えられた。さらに、有意でないものの、オジロワシやミサゴといった大型の種ほど上昇速度が遅く、ノスリ、サシバといった小型の種ほど上昇速度が早い傾向にあった。この種差には、形態の差異だけでなく、陸域もしくは水域といった生息環境の違いも内包されている。今後、よりサンプル数を増やし、さまざまな生息環境を有するトビやミサゴなどに焦点をあて解析することで、帆翔行動の種特性が明確になると考えられる。

猛禽類の帆翔は熱上昇気流の発生や、大気中における動態と密接に関連していることが明らかとなった。これは、帆翔中の猛禽類は熱上昇気流の中に留まるような飛行をするためであると考えられる。風況や時刻から帆翔の発生やその移動パターンが予測できることは、レーダによる追跡精度向上や、風車

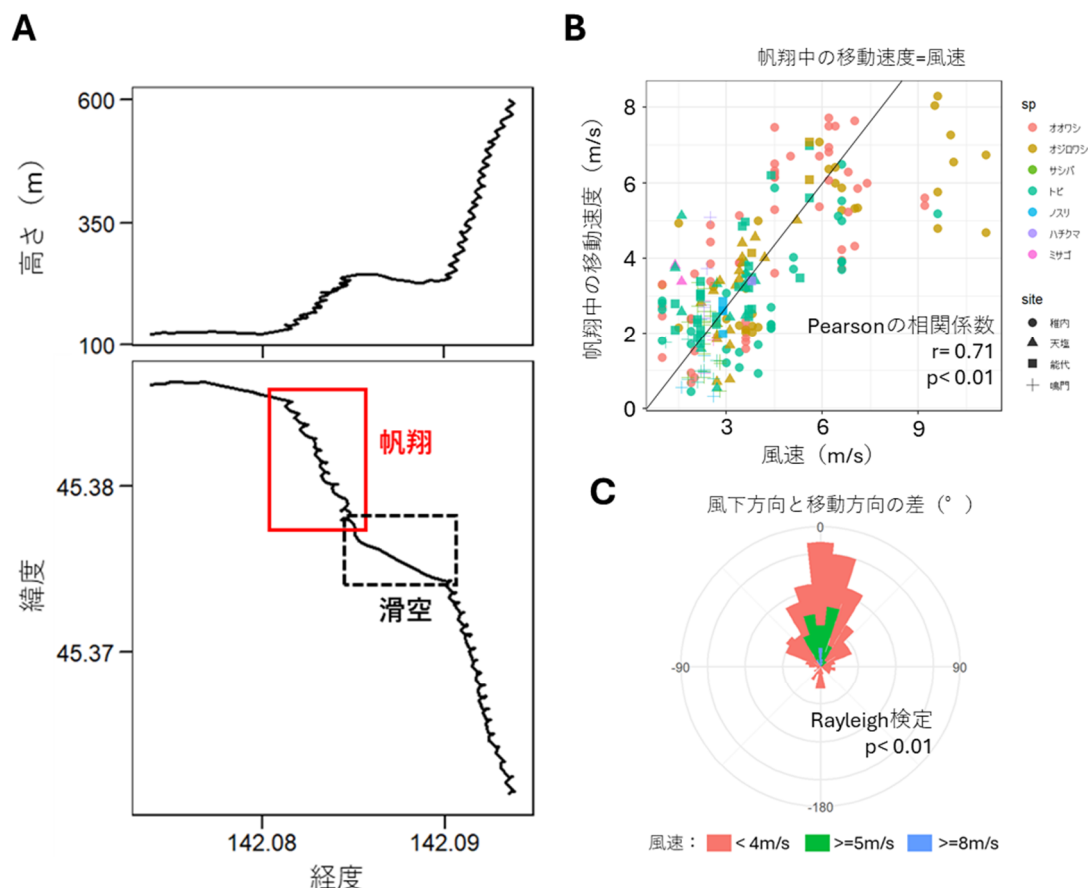


図1-12. 風況に依存した猛禽類の帆翔行動。

(A) 測距器で取得された猛禽類の飛翔軌跡から旋回を伴う帆翔を抽出し、(B) 帆翔中の移動速度と風速および (C) 帆翔中の移動方向と風向の関係を調べた。

への衝突リスクの評価および緩和策（稼働制限等）の提案に貢献できる。

（４）ウミネコの場合および風による飛行速度のバリエーション

表1-5. 一般化加法混合モデルを用いた帆翔中の上昇速度に影響を及ぼす要因解析

パラメータ	推定値	SE	Pr
(切片)	0.51	0.21	***
風速	0.05	0.03	**
日照時間	0.24	0.16	**
種 [オジロワシ]	-0.17	0.17	**
種 [サシバ]	0.31	0.23	*
種 [トビ]	0.03	0.16	N.S.
種 [ノスリ]	0.29	0.33	N.S.
種 [ハチクマ]	0.37	0.31	*
種 [ミサゴ]	-0.08	0.41	N.S.
Smooth term (時刻)			***

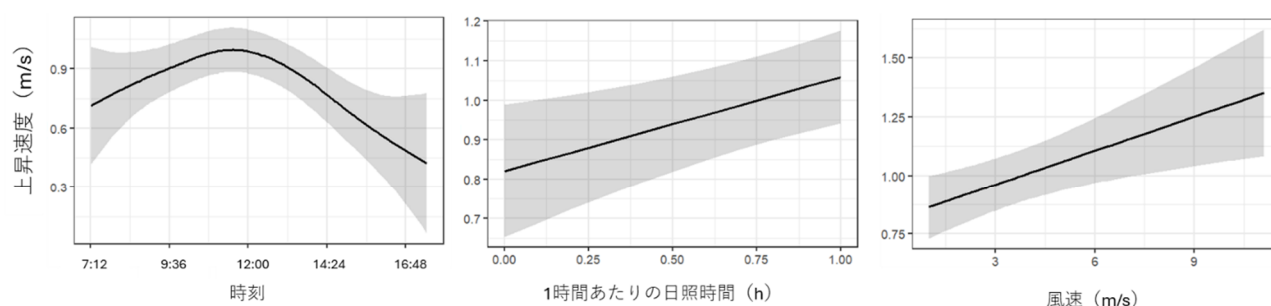


図1-13. 環境条件に対する帆翔中の上昇速度の応答

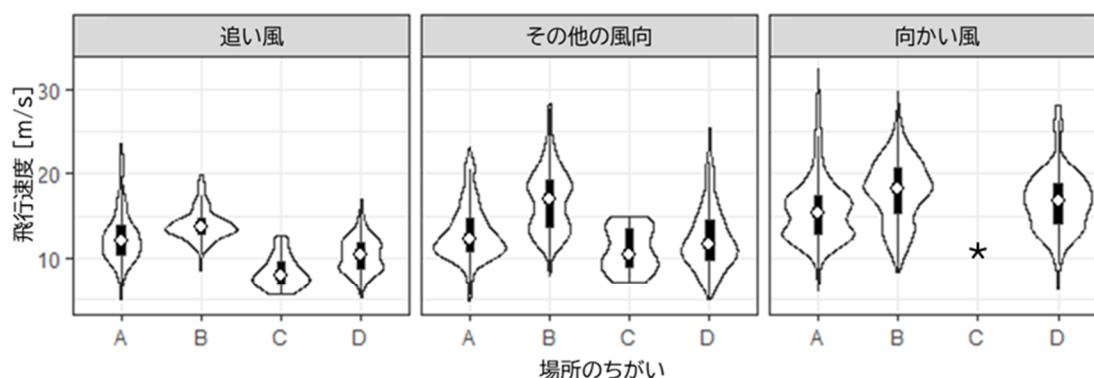


図1-14. 追い風、その他の風向、向かい風時のウミネコの飛行速度

追い風、その他の風向、向かい風それぞれにおける場所による速度の違いを示す。A,B,C,Dは、それぞれ海峡トリップ区、陸棚域トリップ区、防波堤トリップ区、および採餌区である。*向かい風時にCでの飛翔は認められなかった。

ウミネコの飛行速度を説明するためのモデル選択の結果、風（風向、風速）の影響を考慮しても、場所によって飛行速度が異なることが明らかになった。例えば、追い風状況下では、Cの場所は他の場所より低速であり、向かい風では飛行が確認されなかった一方、Bの場所はいずれの風条件においても他の場所より高速飛行であった（図1-14）。利尻および天売のウミネコは、概ね夜より昼のほうが速く、そして高く飛行する傾向があった（表1-6）。ただし、最高速度を見ると、利尻および天売ともに、昼と夜の間で大きな違いはなかった。昼の飛行高度では、最高で512mが記録された。夜間の記録は、1または2トリップの中での連続的な点から得られた結果であるため、一般性はないが、ウミネコは夜であっても昼と同等の速度で飛行することが示された（表5）。これは、夜間に高速あるいは高高度飛行が観察された付近には、町や港湾施設など人工光の量が多く、それらを目印として利用していたのかもしれない。また、夜は日中ほど高く飛ばないものの、風車のブレード高にかかる範囲まで飛ぶ可能性があることが示された。

表1-6. ウミネコの飛行速度[m/s]と高度[m]

変数	コロニー	昼夜	25%	中央値	75%	最大値
速度	利尻	夜	9.4	11.1	13.9	33.8
		昼	10	12.2	16	33.9
	天売	夜	7.8	11	14.6	32.8
		昼	8.2	10.8	13.9	33.5
高さ	利尻	夜	2	4	10	152
		昼	2	10	30	512
	天売	夜	2	8	12	62
		昼	4	10	16	112

4-4. レーダを活用した鳥類アセスメントの試行

(1) レーダ設置方法の提案

SバンドレーダおよびXバンドレーダの特性を考慮し、環境アセスメントの際の使用方法を提案する。Sバンドレーダは観測範囲が広く、鳥の飛翔数の相対量の把握が可能なものの、個体の追跡には向いていないことは先述したとおりである。一方で、Xバンドレーダは、観測範囲はSバンドと比べ狭いものの、個体の追跡が可能である。これらの特性を考慮し、洋上風力開発における有望区域における広域なスクリーニングにSバンドレーダを活用し、その中における促進区域抽出に向けた詳細調査にXバンドレーダを用いることを推奨したい。ここで、レーダ設置のイメージを図1-15に示す。

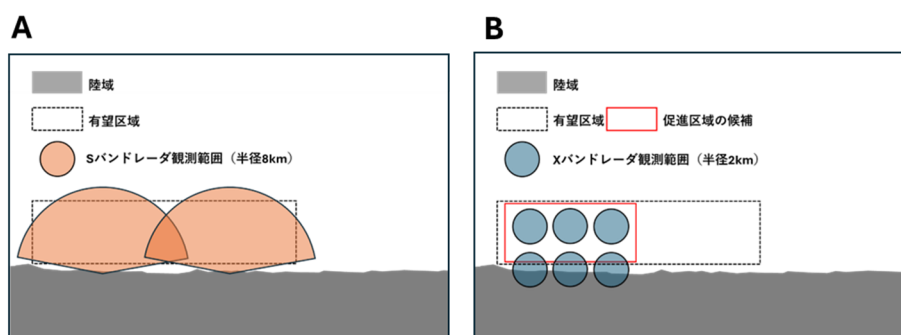


図1-15. 環境アセスメントにおけるレーダ設置例
例として、(A) 有望区域における広域な調査にSバンドレーダを、(B) 促進区域内における詳細な調査にXバンドレーダをする。

(2) 仮想事業地における鳥衝突確率計算

能代沖に洋上風力発電の仮想事業地を設定した（表1-7）。風車の規格、配置数、および稼働率は、一般的な洋上風力発電事業を想定している。

仮想事業地内のレーダ観測データに対してトラッキングを行い、種グループ分類を行った（図1-16）。事業地内における総飛翔軌跡長および総軌跡数は、事業地1.3km²あたり海鳥類が84km 195軌跡、水禽類が166km 319軌跡、猛禽類が71.5km 245軌跡となった。分類精度の高精度化のために、現地における鳥の飛翔頻度を条件付き確率として補正に用いた。飛翔頻度のデータとしては、本解析に用いた3月6日の測距器による追跡データを用いた。測距器による追跡は、調査地点から観測者が無作為に鳥を選択し、追跡および種同定していることから、現地における飛翔頻度データとして用いることができる。海上における鳥の飛翔軌跡数は、海鳥類、水禽類、および猛禽類で42軌跡、31軌跡、および0軌跡であった。飛翔頻度の割合を飛翔軌跡長の補正に用いた結果、海鳥類、水禽類、および猛禽類の総飛翔軌跡長と総軌跡数は、それぞれ146kmと344軌跡、176kmと415軌跡、および0kmと0軌跡と算出された。

現地調査で確認された種組成を各種グループに当てはめた。海鳥類はセグロカモメ（95%）、カワウ（5%）で、水禽類はマガン（61%）、カモ類（39%）として、それぞれの種について、環境省による「鳥類等に関する風力発電施設立地適正化のための手引き」に則り、鳥衝突確率および年間鳥衝突数の推定が行われた。鳥種に関するパラメータを表1-7に示す。飛翔高度については、種ごとの傾向として、海鳥類は30m以下のLゾーンを、水禽類は30mから150mのMゾーンを、猛禽類はMゾーンからHゾーン（150m以上）を頻繁に利用していた（図1-17）。飛翔軌跡内における高度の標準偏差（飛翔中にどれだけ高度変化するか）に着目すると、海鳥類および水禽類は高度変化が小さいのに対して、猛禽類は高度変化が大きかった（図1-17）。高度変化が小さい種群である海鳥類と水禽類のMゾーン飛翔率はそれぞれ4%（287

表1-7. 鳥衝突数計算に用いたパラメータ

		単位	種名			
			セグロカモメ	カワウ	マガン	カモ類（マガモ）
風力発電事業に関する入力パラメータ						
事業地面積			1300000	1300000	1300000	1300000
風力発電機の基数	基	4	4	4	4	4
回転面の半径	m	40	40	40	40	40
ブレード回転速度	rpm	20	20	20	20	20
ブレードの枚数	枚	3	3	3	3	3
稼働率	%	70	70	70	70	70
鳥に関する入力パラメータ						
全長	m	0.60	0.80	0.70	0.55	0.55
飛翔速度	m/s	11	17	15	17	17
滞在日数	日	90	90	30	30	30
調査日数	日	0.042	0.042	0.042	0.042	0.042
群れサイズ	羽	1	1	57	21	21
1日における活動時間	日	0.500	0.500	0.167	0.167	0.167
Mゾーン飛翔率	%	4	4	62	62	62
回避率	%	98	98	98	98	98
レーダーデータから得られたパラメータ						
平均軌跡長	m	536	28	418	264	264
全軌跡長	m	175128	485	106275	42392	42392
算出されたパラメータ						
接触率		0.071	0.063	0.061	0.043	0.043
衝突率		0.002	0.002	0.023	0.016	0.016
風力発電機回転面積比		0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
年間飛翔頻度		352776	18567	61191	38647	38647
年間確認個体数		327	17	254	161	161
年間衝突数（群れ数）		12.2	0.6	28.4	12.6	12.6
年間衝突数（個体数）		12.2	0.6	808.2	132.1	132.1

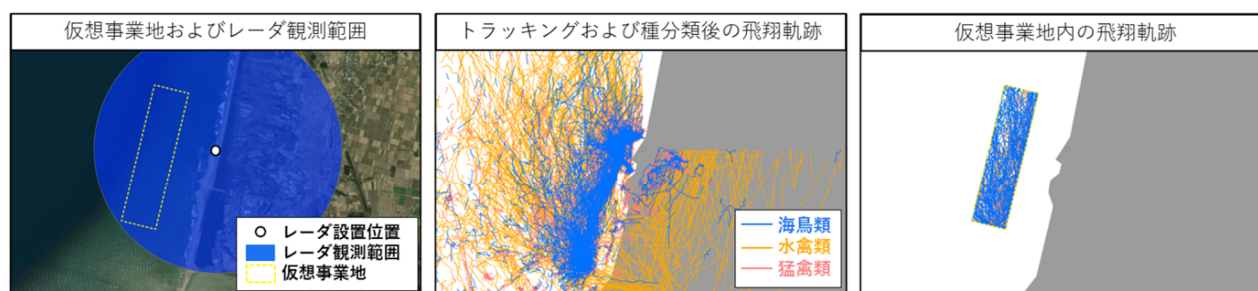


図1-16. 仮想事業地の設定およびレーダーを活用した鳥の観測と分類

軌跡中11軌跡）と62%（279軌跡中174軌跡）であった。猛禽類について、LもしくはMゾーンを1度でも利用した軌跡は、82%（118軌跡中97軌跡）であった。上述した手順を経て、最終的に仮想事業地において予測された年間鳥衝突数は、セグロカモメが12.2羽、カワウ0.6羽、マガン201羽、カモ類33羽となった。当該海域に洋上風力発電所が建設された場合、水禽類への影響が極めて大きいことが仮想的アセスメントの結果として、明らかとなった。

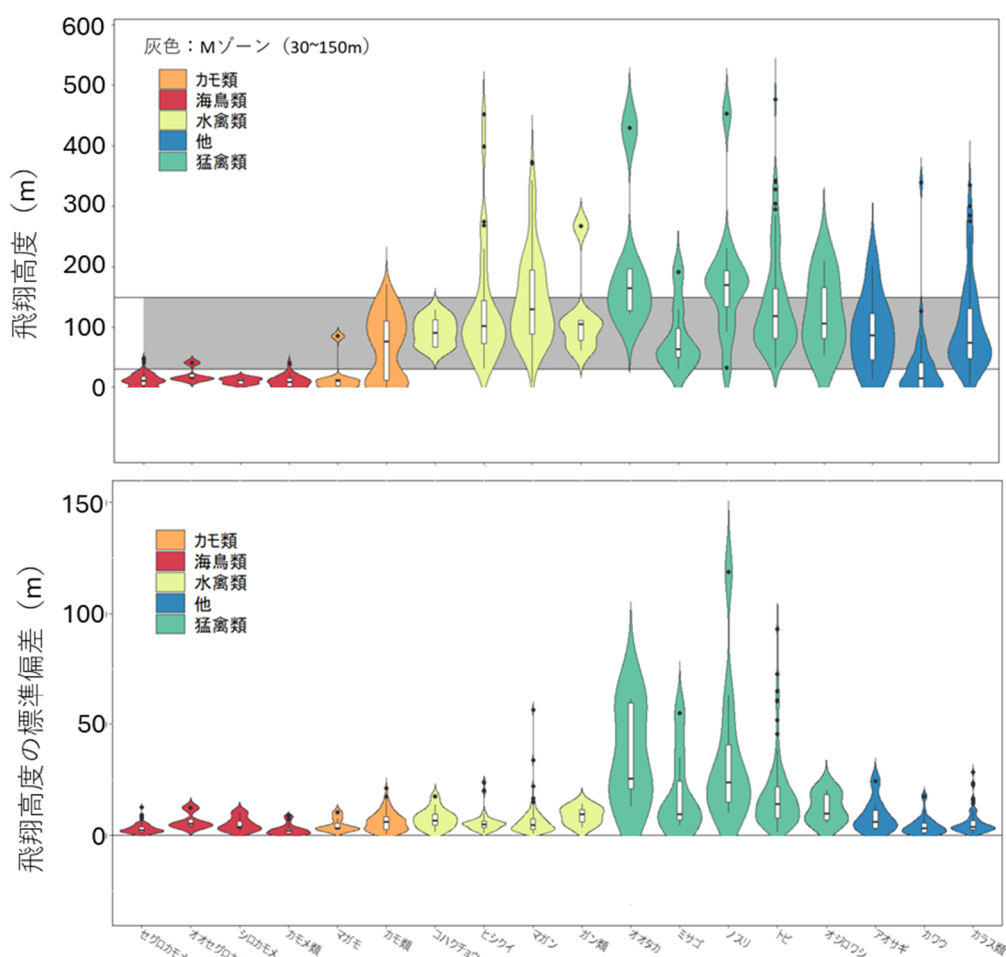


図1-17. 鳥種ごとの飛翔高度および飛翔高度の標準偏差

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

① 教師データとなる飛翔軌跡の収集

目標に掲げていた鳥種に加え、合計で19種において教師データを取得した。データ量は、種ごとに数十から数百軌跡、および数百から数万ポイント取得できており（表4参照）、目標どおりの成果を達成することができた。

① 種分類精度向上の検討

分類対象となるレーダによる観測データの精度を向上させるために、クラッタ除去方法を開発するとともに、鳥の観測可能範囲を実際の観測データを基に定義した。さらに、実際の鳥の移動パターンをエコトラッキング方法に組み込むことにより、効率化を図った。AI分類後の飛翔軌跡データをより現実的にするために、調査地における鳥種ごとの飛翔頻度を条件付き確率による補正を行う方法を開発した。以上より、分類精度向上に関し、目標どおりの成果を達成することができた。

② 鳥類に対する環境アセスメントの試行

マグネトロン式のSバンドおよびXバンドレーダそれぞれについて、観測特性を考慮した使用方法を提案した。クラッタの除去やレーダ観測範囲の定義が綿密に行われた秋田県能代沖をモデルケースとして、レーダデータを活用した仮想的環境アセスメントを試行し、総飛翔軌跡長を算出した。さらに、レーダデータでは取得が困難である高度データを測距器で取得することにより、Mゾーン飛翔率を算出し、衝突リスクとしての補正を行うことで、鳥衝突確率計算に用いるMゾーン飛翔軌跡長を算出した。衝突確率は、風車設置基数、稼働率、風車の回転半径等のパラメーターを組み込むことで算出可能である。レーダを用いた調査方法から、画像解析方法、および衝突確率計算方法までを網羅した環境アセスメント方法を開発・提案することができたことから、目標どおりの成果を達成することができた。

Ⅱ－２ サブテーマ２「X バンドレーダを用いたコウモリ類に対する環境アセスメント手法の検討」

〔サブテーマ２の要旨〕

サブテーマ２では、Xバンドレーダを用いたコウモリ類に対する環境アセスメント手法開発を目的とした。本目的達成のため、風力発電事業における風車衝突リスクの高いコウモリ類（以下、ハイリスク種）を対象とし、飛翔数を定量的に観測できるレーダ設置方法とシステム設定を検討した。その上で、物標検出率と観測距離の関係を解析し、コウモリの観測可能範囲を定義した。また、測距双眼鏡（以下、測距器）を用いて、ハイリスク種であるヒナコウモリとヤマコウモリの飛翔軌跡データを取得し、AI判別用の教師データとしてサブテーマ３に提供した。その後、調査地で観察された鳥類相をもとにAI判別の教師データとする種群を決定し、コウモリ類の分類精度を検証した。鳥類と同様、風車ブレード衝突確率計算への活用を目指し、レーダ観測範囲において、コウモリと判別された飛翔軌跡長を算出した。さらに、バットディテクターで得られたデータから飛翔数を推定する手法を検討するため、これまで多用されてきた音声活動量の集計方法を見直した。そのうえで、徳島県南部の那賀川において、バットディテクターによる音声録音と赤外線サーモグラフィーを用いた同時観察を行い、録音データから抽出された通過イベント数（bat pass数）と、カメラ画角内を通過した飛翔数の関係を解析した。

新潟市で行ったヒナコウモリを対象とする調査においては、アンテナを床置き（設置高0.4m）とした結果、設置高2.2mの場合と比べて地表クラッタ量を大幅に低減することに成功した。レーダ画面に表示される物標色は、通常、レーダ内で扱われている信号強度幅に応じて15階調のグラデーションが設けられている。本研究では、物標色設定において全ての階調を同一色に統一したところ、レーダに映った物標数は、目視観察でカウントされたコウモリの飛翔個体数と高い正の相関を示した。また、物標検出率が50%以上となる観測距離は、1.5kmの範囲であることが明らかとなった（研究目標④の達成）。測距器を用いた行動追跡により、ヒナコウモリ124軌跡、ヤマコウモリ74軌跡を取得した（研究目標⑤の達成）。これらのデータは、レーダ画像から抽出したヒナコウモリの移動軌跡（ $n=355$ ）とともにサブテーマ３に提供し、AI判別用の分類器教師データとして活用された。AI判別において、データが取得されたすべての種を対象とした場合のコウモリ判別精度は低かったものの、調査地での観察情報をもとに解析対象とする分類群を絞り込んだところ、その判別精度は9割に達した。これらの検証結果を踏まえ、サブテーマ３から提供されたAI判別結果をもとにコウモリ類の飛翔軌跡図を作成した（研究目標⑥の達成）。観測範囲において計算された軌跡総延長は、測距器データから計算したMゾーン飛翔率

（83.3%）を乗じることで、衝突確率計算に活用することが可能であろう。本研究で検討したbat pass集計方法で得られた活動量データは、カメラ画角内を通過する飛翔数を定量的に反映できることが明らかとなった（研究目標⑥の達成）。以上の結果から、サブテーマ２では目標通りの成果を達成した。

１． サブテーマ２の研究開発目的

風力発電施設の世界的な導入量増加に伴い、鳥類だけでなく、コウモリ類に対する影響が顕在化している。これまで、陸上風力発電所では風車の立地に適した場所がコウモリ類の主要な生息地や移動経路となっている場合が多く、風車ブレードへの衝突や、ブレード周辺での急激な気圧変化による内臓破裂で死亡する事故が相次いでいる。例えば、アメリカとカナダでは年間60万-88万頭、ドイツでは年間30万頭が風車により死亡したと推定されている（Hayes, 2013）。日本においても、2016年に東北地方の10事業地で、絶滅危惧種を含む7種39頭の死亡が確認されている（NEDO, 2018）。また、コウモリ類は季節移動の際に洋上を利用することもわかってきており、フィンランドとスウェーデンに面したバルト海では、11種の出現が確認されている（Gaultier et al., 2020）。日本ではコウモリ類の洋上利用を詳細に調べた研究はないが、北海道羅臼町の9km沖合において、海面で採餌するモモジロコウモリが観察されている。こうした事例を踏まえ、今後導入が加速する洋上風力発電に関する環境アセスメントでも、コウモリ類の生息状況を適切に評価する必要がある。

コウモリ類は小型で夜行性のため、目視観察は極めて困難である。それゆえ、これまでコウモリ類を対象とした環境アセスメントでは、カスミ網やハーブトラップを用いた捕獲調査や、コウモリの発する音声を自動検出・録音するバットディテクターを用いた出現種の把握が主流となってきた。特に最近で

は、録音装置の小型化・低コスト化や、音声解析による種判別の高精度化が進んだことで、音声調査が急速に普及した。しかし、この方法では事業実施区域において生息種・種群を同定できる一方、高高度や広範囲をカバーすることができないため、風車建設による影響予測の難しさが指摘されてきた

(Lintott et al., 2016)。小型GPS発信機の登場によってコウモリ類の高精細な行動追跡も可能となってきたが、多数の個体からデータを得ることは依然として難しい状況にある。

レーダは、広域スケールにわたってコウモリ類の飛翔状況を把握するうえで有用な調査手法となる可能性がある。広範囲から移動体を探知・追跡し、その飛翔軌跡数を定量化することは従来手法では実現できなかったことから、コウモリ調査への適用が可能となれば、これまでの環境アセスメント技術を大きく発展させることができる。これまでレーダを活用した飛翔動物研究は鳥類を対象としたものが大半を占め、レーダの捉えた物標にコウモリ類が含まれることは認識されてきたものの、それらを精度よく分類することは難しいと考えられてきた (Kunz et al., 2007)。その理由として、コウモリ類では、判別に必要な飛翔特性に関する教師データ収集が難しいことが挙げられる。また、Kreutzfeldt et al. (2020) は、船舶用Xバンドレーダによるコウモリ類の探知可能レンジをシミュレーションで示すとともに、水平方向の飛翔探知におけるクラッタノイズ低減の重要性を指摘している。その一方で、コウモリ類に対するレーダ調査精度に関して、野外でコウモリが飛翔している状況下での検証は、直接観察の難しさから進んでこなかった。

そこでサブテーマ2では、風車衝突リスクが高いとされるコウモリ類（以下、ハイリスク種）を対象に、クラッタノイズを低減したうえでコウモリ類を検出できるレーダ観測手法を確立するとともに、行動追跡によって対象種の飛翔特性を明らかにし、画像解析およびAI判別用の教師データを作成する。そのうえで、サブテーマ3によって実施されるAI学習の判別結果を受け、従来手法では達成できなかった飛翔数の定量評価に基づく環境アセスメント手法を開発することを目的とした。

Gaultier, S. P., Blomberg, A. S., Ija's, A., Vasko, V., Vesterinen, E. J., Brommer, J. E., & Lilley, T. M. (2020). Bats and wind farms: The role and importance of the Baltic Sea countries in the European context of power transition and biodiversity conservation. *Environmental Science & Technology*, 54, 10385-10398.

Hayes, M.A. (2013). Bats killed in large numbers at United States wind energy facilities. *BioScience*, 63, 975-979.

Kreutzfeldt, J., Floeter, C., Lingner, T., Schmitz-Beuting, L., Reich, M., & Kunz, V. D. (2020). Analytical volume model for optimized spatial radar bat detection in onshore wind parks. *Plos one*, 15, e0239911.

Kunz, T. H., Arnett, E. B., Cooper, B. M., Erickson, W. P., Larkin, R. P., Mabee, T., ... & Szewczak, J. M. (2007). Assessing impacts of wind - energy development on nocturnally active birds and bats: a guidance document. *The Journal of Wildlife Management*, 71, 2449-2486.

Lintott, P. R., Richardson, S. M., Hosken, D. J., Fensome, S. A., & Mathews, F. (2016). Ecological impact assessments fail to reduce risk of bat casualties at wind farms. *Current Biology*, 26, R1135-R1136.

NEDO H26-H28成果報告書。(2018)．環境アセスメント迅速化研究開発事業・順応的管理手法の開発。

2. サブテーマ2の研究目標

上記の研究開発目的に対し、サブテーマ2では、以下の表に示す研究目標を掲げた。

サブテーマ2	「X バンドレーダを用いたコウモリ類に対する環境アセスメント手法の検討」
サブテーマ2 実施機関	徳島大学

サブテーマ2 目標	サブテーマ2では、コウモリ類の中でも風車との衝突リスクが高いとされるハイリスク種（環境省EADAS）を指標に、画像解析用の教師データを作成するとともに、AI学習による判別結果を踏まえ、従来の手法では達成できなかった飛翔数の定量評価に基づく環境アセスメント手法の開発を目指し、以下の項目を設定する。 ① ハイリスク種の中でも特に高空域を飛翔する傾向が強く、風車との衝突事例もあるヤマコウモリやヒナコウモリ等について、Xバンドレーダによる観測可能距離を明らかにする。 ② 目標①の対象種に関してレーダ観測可能域で数十頭を放獣し、各種の飛翔軌跡取得を試みるとともに、環境省により絶滅危惧Ⅱ類に指定されているヤマコウモリ等については、GPSロガーを用いて毎秒～数秒間隔の詳細な飛翔軌跡を取得する。これらを基に画像解析用の教師データ百～数百個程度を作成する。 ③ サブテーマ3のAI学習で得られた移動軌跡からハイリスク種を判別して飛翔個体数を定量化するとともに、従来のコウモリ調査で多用されてきた音声波形による活動量データを個体数情報に補正する手法を検討し、環境アセスメントでの活用方法を提案する。
-----------	--

3. サブテーマ2の研究開発内容

3-1. レーダ観測手法の確立 [研究目標④に相当]

3-1-1. レーダのセットアップと調査地

本研究では、光電製作所の船舶用Xバンドレーダ MDC-7910を採用した。表2-1に、使用レーダの諸元と各設定項目を示した。当該機種は、増幅器にマグネトロンを採用したパルスレーダであり、長さ1.97mのスロットアンテナ（スキャナー：RB718A、アンテナ：RW701A-06）が48rpmの回転周期で走査する（1.25秒/1回転）。エコー画像の取得においては、モニター映像をキャプチャーボードで市販のノートパソコンに取り込み、アンテナ回転周期に合わせて1.2秒間隔で画像データとして記録した。得られた画像サイズはレーダモニターと同様1280×1024ピクセルであり、観測レンジを1kmに設定した場合のXY方向の解像度は1ピクセルあたり約1.6mとなる。

レーダ観測手法検討のための現地調査は、ヒナコウモリ（*Vespertilio sinensis*）を対象とし、本種のねぐらが分布する新潟市内の水田帯で行った（図2-1）。ヒナコウモリは近年、国内の風力発電施設で死亡事故が相次いでおり、環境省によりハイリスク種に指定されている。新潟市では、上越新幹線の高架橋に本種の繁殖コロニーが多数形成されることがわかっている。コウモリの飛翔を捉えるのに適したレーダ設置場所を決定するため、2021年8月と2022年6月に、ねぐらの分布と出巢後の移動経路を把握する予備調査を実施した。新潟市内に位置する高架橋の沿線約13kmにわたっ

表2-1. 本研究に用いたレーダの諸元と設定項目

仕様	諸元	仕様	諸元
MDC-7910		RB718A/RW701A-06	
周波数	9410 MHz	空中線形式	スロットアンテナ
増幅器	マグネトロン	アンテナ長	1.97 m
出力電力	12 kW	空中線走査	48 rpm
最小受信電力	-90 dB	電力半減幅 水平	1.2°
空中線利得	28.5 dB	電力半減幅 垂直	22°
パルス幅	0.08 μs	方位分解能 (1 km)	20.9 m
繰返し周波数	2500 Hz	距離分解能 (1 km)	12 m
設定パラメーター			
レンジ	1.0 or 1.5 km		
感度	75 [手動調整モード]		
海面反射除去	off [手動調整モード]		
雨雪反射除去	off [手動調整モード]		
映像モード	1		
干渉除去	off		
ビデオ	2		

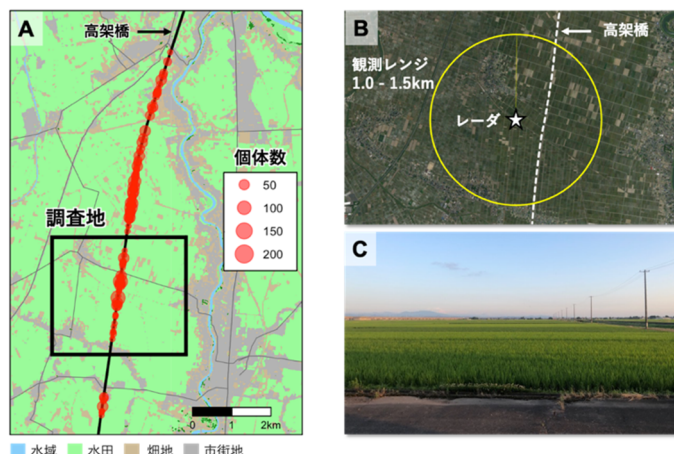


図2-1. コウモリ類に対するレーダ観測手法検討のための調査地

図は、予備調査により特定されたヒナコウモリのねぐらと生息個体数 (A)、予備調査を踏まえて決定されたレーダ設置地点 (B)、およびレーダ設置地点周辺の代表的な景観 (C) をそれぞれ示す。

てすべてのスリット（高架橋に設けられた幅数cmの隙間）を目視で確認し、ねぐらの位置情報と個体数を記録した（ねぐら数：141箇所、個体数：6300頭）。また、ねぐらと個体数の集中する地点において、夕方に出巢する個体を双眼鏡により目視観察し、移動方向を確認した。そのうえで、ヒナコウモリの移動経路上に位置し、周囲に障壁となるものが少ない場所をレーダ設置地点として選定した（37° 46.85′N、138° 58.75′E）。調査地の周囲は、水田が優占しており、海拔約0mの平坦な地形が広がっている。本研究におけるレーダの使用は、総務省による無線局免許状（実験試験局、四実第588号）を受けて行われた。また、レーダの設置および調査の実施にあたっては、土地管理者の許可を受けたうえで実施した。

3-1-2. クラッタを除去する設置方法の検討

レーダ観測において、地形や波浪によって発生するクラッタは、鳥やコウモリのような小物標の探知を困難にする要因である。特に、地表面に対して水平方向に走査する場合、アンテナより下方へ照射されたビームの反射やサイドローブにより、近距離レンジほどクラッタが多く発生す

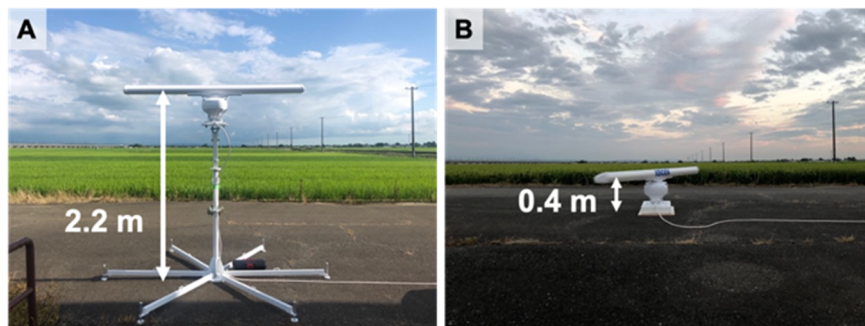


図2-2. レーダ設置方法の検討

る。コウモリ類は小型で、その探知範囲は多くの鳥類に比べて狭いことが想定されるため、物標として検出・追跡するためには、クラッタ発生量をいかに少なくできるかが重要となる。レーダに搭載されている機能として、海面反射除去および雨雪反射除去の設定値を高めることでクラッタを表示しないようにすることは可能だが、これらの機能では信号強度の微弱な鳥やコウモリの物標も同時に除去してしまう。こうした操作による観測バイアスを回避するため、本研究では、レーダの内部設定を変えることなくクラッタを低減し、コウモリ類の探知範囲を確保する手法を検討する必要があると考えた。

これまで国内外で実施されてきたレーダ調査では、アンテナを高さ2m程度の台座に載せた状態で使用することが一般的であった。これに対し本研究は、アンテナの設置高を下げることで、地表面からの反射を低減できると考えられた。そこで、従来通り台座を用いて高さ2.2mに設置した場合（図2-2A）と、台座を使用せずにビーム照射点の高さを0.4mにした場合（図2-2B）のそれぞれについて、エコー画像に映る地表クラッタ量の割合を算出した。クラッタ量の割合は、画像解析ソフトウェアであるImageJを用いて、画像上でレーダ設置地点から半径500mと1kmに相当するバッファをそれぞれ発生させて求めた。算出に用いたエコー画像は、2022年8月2日、2023年7月10日および8月16日に取得されたものを用いた。

3-1-3. 物標色の設定

レーダモニターに表示される物標色は、レーダ内部で取り扱われている信号強度幅に対応している。その表示色は、15階調に区分されており、使用者が任意で各階調のRGB値を指定することができる（図2-3）。MDC-7910の場合、デフォルトの物標色にはグラデーションが設けられており、内部で

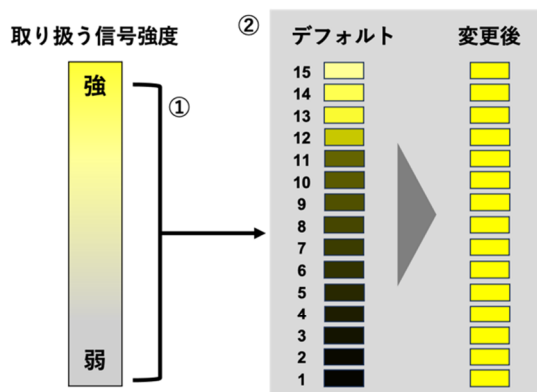


図2-3. 物標色の設定

エコー画像に表示される物標色は、レーダ内部で取り扱われている信号強度幅に応じて設定される。「ビデオ」設定では、モニターに表示させる信号強度幅を5段階で設定することができる（①）。数値が小さいほど取り扱う信号幅が大きく、信号の弱いものまで表示できる一方、数値が大きくなるほど信号の弱い側から非表示となる。物標色の設定では、取り扱う信号幅に対応して多段階の表示色設定が可能である（②）。光電製MDC-7910では15段階に区分されており、それぞれ使用者が任意にRGB値を設定することができる。

扱われている信号強度の上位側にのみ配色がなされ、信号強度の弱い物標はほとんど表示されない暗色となっている（図2-3）。そこで、エコー表示色をすべて同一色（本研究では黄色）で統一することにより、信号強度に関係なく小物標も探知することが可能になると考えられた。そこで、物標色をデフォルト設定にした場合と変更後のそれぞれについて、クラッタの割合と、飛翔数定量性の違いについても検討した。クラッタ割合の算出に使用したエコー画像は、3-1-2と同様である。飛翔数定量性の検証方法については、3-1-4で詳しく述べる。

3-1-4. レーダによる飛翔数定量性の検証

レーダによって捕捉された物標数が、観測域内を飛翔するコウモリの個体数を反映しているかどうかを検証するため、コウモリの飛翔を直接確認できる状況下で、目視観察数とレーダ物標数の関係を解析した。定量性の検証は、アンテナの回転方向を地面に対して水平にした場合（図2-4A、D）と、垂直にした場合（図2-4B、E）のそれぞれについて行った。調査地は、(1)と同様である。なお、ヒナコウモリは日没直後の比較的明るい時間帯から出巢を開始するため、ねぐらの周辺ではその飛翔を目視により直接観察することが可能である。

垂直回転での調査は、2022年6月下旬から8月上旬にかけて計12日間行った。コウモリの飛翔を観察する地点は、ねぐらから出巢する個体を確認でき、レーダ画像上でクラッタ発生量の少ないエリアから選定した。レーダビームの照射方向は、コウモリの移動方向に対して可能な限り垂直となるよう配置した（図2-4C）。目視観察は、コウモリの出巢開始から完了までをカバーするため、日没時刻の10分前から40分間行った。観察者は上空を通過した個体数を計数し、5分ごとに集計した。レーダ物標数の集計については、目視観察を行った時間帯の画像を抽出し、ImageJにより観察点に相当するポイントから30m上空までの範囲において通過物標を計数した（図2-4F）。

水平回転での調査は、2022年7月中旬に計4日間、2023年7月中旬に計5日間行った。目視による観察方法は、垂直回転による調査時と同様である。得られたレーダ画像から、目視観察と同時時間帯に記録された画像を抽出し、ImageJにより移動物標を確認した。物標は、画像上で目視観察点に相当する場所から半径30m範囲内を通過したものを計数した。目視によるカウント数とレーダ物標数の関係は、スピアマンの順位相関係数による無相関検定で解析した。

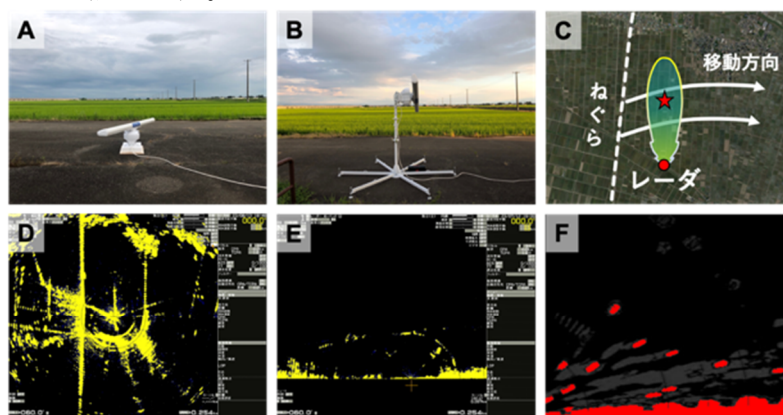


図2-4. レーダによる飛翔数定量性の検証

定量性の検証は、水平回転（A）と垂直回転（B）のそれぞれについて実施した。目視による直接観察は、出巢したコウモリの移動経路上に位置し、レーダの観測範囲内でクラッタ発生量の少ない地点を選定した（C、赤星は観察地点を表す）。（D）および（E）は、それぞれの回転方向で得られた代表的なエコー画像を示す。エコー画像上で移動物標を確認し、観察点上を通過した物標数をカウントした（F、画像はImageJにより2値化処理を施してある）。

3-1-5. 検出可能距離の検証

上述した3-1-2から3-1-4の検討結果を踏まえ、コウモリ類の検出可能距離について検証した。レーダ観測範囲内に調査地点を設け、測距器（VECTOR 21, SAFRAN Vectronix）を用いてヒナコウモリの飛翔軌跡データを取得した。測距器による調査は、ヒナコウモリが出巢し、レーダ観測域内を通過する時間帯（日没直後～15分程度）に行った。その後、測距器で得られた飛翔軌跡データと同時時間帯のレーダ画像を照合し、コウモリの物標を抽出した。本研究の調査地では同時に多数のコウモリが通過するため、どの物標が測距器で追跡した個体に相当するかを正確に照合することは困難であった。そのため、測距器で得た軌跡データの周辺も含め、移動方向および軌跡形状の類似する物標も解析対象とした。抽出されたコウモリの物標は、ImageJのManual Trackingプラグインを用いて手動で追跡し、飛翔軌跡データを作成した。追跡中に物標が消失した場合は、前後の画像で記録された座標値から補間した。作成された各軌跡について、軌跡を構成する個々のポイント（座標データ）からレーダまでの直線

距離を算出した。その上で、コウモリの検出に対する距離の影響を解析するため、各軌跡における物標出現の有無を応答変数に、レーダから軌跡を構成する各点までの距離を説明変数とした一般化線形モデル（GLM, 二項分布）を作成した（46軌跡、1490ポイント）。なお、ここでの検出率は、1軌跡の中で物標が出現した割合を表す（解析では出現を1、消失を0としたロジスティック回帰を適用）。

3-2. 教師データの取得〔研究目標⑤に相当〕

3-2-1. 対象種と調査地

飛翔軌跡データを取得する対象種は、ヒナコウモリおよびヤマコウモリ（*Nyctalus aviator*）とした。いずれの種も環境省によりハイリスク種に位置づけられており、ヤマコウモリは環境省と新潟県のレッドリストにおいて絶滅危惧Ⅱ類に指定されている。ヒナコウモリを対象とした調査は、3-1-1に記載した新潟市のレーダ調査地とその近傍（37° 47.94′N、138° 59.31′E）で行った。ヤマコウモリの調査対象地は、2022年6月に実施した予備調査を踏まえ、北海道帯広市内に位置する都市公園（42° 54.47′N、143° 11.28′E）とした。当該公園では、7-8月にかけて敷地内に林立するシラカバ（*Betula platyphylla*）等の樹洞に、ヤマコウモリの繁殖コロニーが形成される。ヒナコウモリの捕獲および発信機の装着は、環境省関東地方環境事務所および新潟県より鳥獣捕獲許可を受けて行われた（環境省：第2205181号、新潟県：第1121号）。ヤマコウモリの捕獲および発信機の装着については、環境省北海道地方環境事務所の許可を受けて行われた（第21-05-0347号）。本研究における個体への処置等は、徳島大学動物実験委員会の承認を受けて実施された（T2021-102号）。また、新潟市の新幹線高架下ならびに帯広市の公園内での調査行為は、いずれも土地管理者の許可を受けて行った。

3-2-2. GPS発信機による行動追跡

【ヒナコウモリ】

調査地では、ヒナコウモリは6月下旬から高架橋にコロニーを形成し始め、7月に出産して哺育期間に入り、8月中旬から下旬にかけてコロニーを解散する。個体の捕獲による出産・哺育コロニーへの攪乱を最小限にとどめるため、調査の実施時期は、幼獣が自力飛翔し始める8月上旬（2022年）とした。捕獲は、日没後の出巢時に捕虫網を用いて行った。捕獲された個体は、成獣・当歳獣の別および雌雄を判定したうえで、体重と前腕長（体サイズの指標値）を計測した。行動追跡用のGPS発信機には、小型・軽量機種であるnanofix GEO mini（0.9g, 1 fix/30 sec., Pathtrack Ltd., UK）を用いた（図2-5A）。装着個体は、いずれも発信機重量が体重の5%以内となる個体を選定した。個体の栄養状態を考慮し、発信機の装着は2個体にとどまった。発信機は、個体の背中に医療用の皮膚接着剤を用いて装着した。装着個体は捕獲地点で放獣し、3日後に再捕獲を試みたが、この時点で対象としたねぐらから個体を確認することができなかった。その後、捕獲地点周囲のねぐらについても確認を行ったが、コロニーの解散により発信機回収には至らなかった。

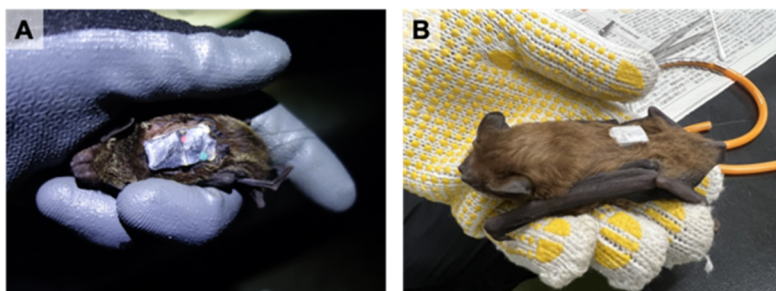


図2-5. GPS発信機による行動追跡の試み

写真は、ヒナコウモリ（A）およびヤマコウモリ（B）にGPS発信機を装着した様子をそれぞれ表す。

【ヤマコウモリ】

2022年には長雨の影響により、調査地とその周辺でまとまった繁殖コロニーが形成されず、捕獲調査を実施することができなかった。そのため、2023年7月下旬に、本種がコロニーを形成している樹洞を特定する予備調査を行ったうえで、個体の捕獲と発信機装着を8月上旬に実施した。捕獲は、自作のトンネルトラップを用いて、日没後にコウモリが樹洞から出巢するタイミングで行った。本種に対しては、毎秒間隔で位置情報を記録できる機種であるGipsy6（1.5g, Technosmart Europe, Italy）を用い

た（図2-5B）。捕獲された個体は、ヒナコウモリと同様の方法で計測と発信機の装着を行い、捕獲地点で放獣した（ $n=5$ ）。発信機の重量は、装着個体の体重の5%以内である。装着後、対象のコロニーが解散したため、8月中旬から下旬にかけて2-3日おきに個体が入り出している樹洞を確認し、トンネルトラップを用いて再捕獲を試みたが、発信機を回収することはできなかった。

なお、研究期間を通じ、いずれの種についてもGPS発信機では飛翔軌跡データを得ることができなかったため、当該項目の結果及び考察については記載しない。本研究では、GPS発信機のほかに測距器による行動追跡を行い、飛翔軌跡データを得ることに成功したため、以降では測距器を用いた調査について記載する。

3-2-3. 測距器による行動追跡

測距器による飛翔軌跡データの取得は、2022年8月にヒナコウモリを対象として計8日間、2023年7-8月にかけてヒナコウモリとヤマコウモリを対象に計20日間行った（図2-6）。調査は日没後、コウモリがねぐらから出巢するタイミングで行った。本研究で用いた測距器には暗視機能がないため、データを取得できるのは薄暮の時間帯に限られる。調査に先立ち、出巢後に多数の個体が通過する移動経路を目視とバ

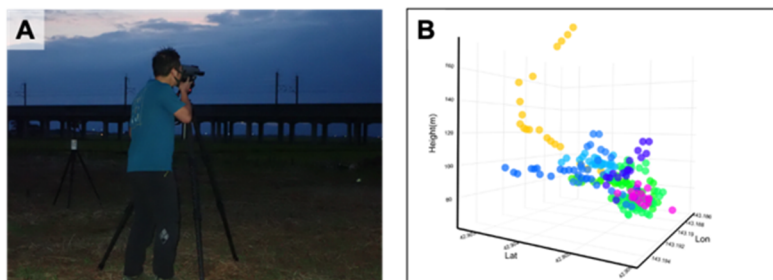


図2-6. 測距器による行動追跡

(A) は、ヒナコウモリを対象とした調査地において測距器による行動追跡を行っている様子である。測距器により、コウモリ類の3次元的な飛翔軌跡データを取得することが可能である (B)。

ットディテクターにより直接確認し、観察地点を決定した。ヒナコウモリについては、レーダ観測の対象範囲内に観察地点を設けた。また、コウモリ類の飛翔特徴を明らかにするため、それぞれの調査地に出現した鳥類の飛翔軌跡データも取得した。コウモリ類の出現と可能な限り同時時間帯のデータを取得するため、調査は原則として日没2時間前から目視が困難となるまで行った。

得られたデータは、軌跡ごとに平均飛翔速度と平均角度変化量、およびそれぞれの標準偏差（SD）を算出した。そのうえで、それぞれの飛翔特徴量について、Steel-Dwassの多重比較により種間における違いを検定した。種間で飛翔特徴量を比較するにあたり、コウモリ類については位置座標を測位できなかったデータが存在するため、連続して測位できたポイントデータ（2秒間隔）のみを抽出したうえで統計解析に用いた。また、コウモリ類2種の飛翔軌跡データは、すべてサブテーマ3に提供され、分類器を構築する際の教師データとして用いられた。

3-2-4. マニュアルトラッキングによる軌跡データ作成

ヒナコウモリについては、レーダ調査で得られた画像からも飛翔軌跡データを作成した。使用したレーダ画像は、2023年7月4～7日に得られた調査データのうち、コウモリが出巢してレーダ観測域内を通過した時間帯から抽出された。エコー画像からの軌跡データ作成には、3-1-5で述べたManual Trackingを用いた。軌跡データを作成する画像上の対象範囲は、可能な限り測距器によってデータが得られているエリアと重なるよう設定した。作成した軌跡データは、サブテーマ3に提供された（ $n=355$ ）。なお、研究目標においては、捕獲個体をレーダ観測範囲内で放獣し、その飛翔軌跡を取得する計画（研究目標⑤）であったが、対象コロニーの個体数が過去の調査時と比べて著しく減少しており、多数の個体を捕獲することによるコロニーへの攪乱を回避する必要性が生じたため、放獣実験は行わなかった。代替として、3-1に述べた水平回転での観測手法を確立したことで、ヒナコウモリを対象としたねぐら付近でのレーダ観測により、多数の飛翔軌跡データを取得することができた。

3-3. 環境アセスメント手法開発 [研究目標⑥に相当]

本報告では、プロジェクトで提案する以下のデータ取得・解析プロセスに準じ、コウモリ類に対する

環境アセスメントにおいて必要と考えられる調査手順に則って記載する。なお、以降の項目については、「3-3-2. 音声活動量と飛翔数の関係」を除き、レーダ調査を行った新潟県で実施されたものである。

【データ取得・解析プロセス】

- ① 事前調査
- ② 出現候補種の整理
- ③ レーダデータの取得（3-1を参照）
- ④ ②を踏まえて分類器教師データとする種群の決定
- ⑤ 学習プログラムによる分類器の構築（サブテーマ3）
- ⑥ トラッキング&AI判別の結果出力（サブテーマ3）
- ⑦ ⑥を受けて飛翔軌跡図の作成・衝突リスクの可視化

3-3-1. 事前調査による出現候補種の整理

【事前調査1：生息種・ねぐら調査】

本稿では、レーダ調査を行った新潟市を中心に、生息種およびねぐら情報を整理した。生息種の確認は、既存の文献情報および新潟県レッドリストから参照した。ねぐらについては、プロジェクト実施期間内に現地調査で把握した地点と、過去に実施した調査で得られているハイリスク種のねぐら情報をもとに整理した。

【事前調査2：音声録音調査】

従来の環境アセスメントと同様、本研究でもバットディテクターを用いた音声録音調査により、出現種を特定した。音声調査から出現候補種をリストアップするステップを示すため、本研究では新潟県で実施した調査を事例として紹介する。現地調査は、新潟県村上市から胎内市にかけて続く海岸線から3地点を選定し、2023年10月上旬に3晩連続で行った。この時期は、多くのコウモリ類が越冬に向けて移動分散する期間に相当する。各録音地点は、互いに1km以上離れた場所を選定したうえで、海岸の水際から100m以内の範囲にマイクを設置した（マイク設置高は地表から1.8m）。バットディテクターは、フルスペクトラム方式のSong Meter Minibat (Wildlife Acoustics Inc., USA) を用いた。録音設定は、原則としてメーカー推奨のデフォルト設定とし、サンプリング周波数256kHz、最小トリガー周波数16kHz、最大録音時間15秒、トリガーウィンドウ3秒、トリガーレベルを12dBとした。これらの設定パラメーターに基づき、バットディテクターによって検出された音声データは、本体内のSDカードに音声ファイル（wav形式）として記録される。後述する音声解析による種判別は、各音声ファイルに対して適用される。録音時間は、コウモリ類の活動時間に合わせ、日没30分前から日の出30分後までとした。調査期間中、録音に影響を及ぼす天候の変化（降雨）はなかったため、解析には記録されたすべての音声データを用いた。

得られた音声データの解析・分類には、専用ソフトウェアであるKaleidoscope Pro (Wildlife Acoustics Inc.) を用いた。現時点では、日本産コウモリ類を種レベルで自動判別するためのプログラムは存在しないため、ソフトウェアに収録されているデータベースのうち、種構成が日本にもっとも近いヨーロッパ産コウモリ類（キクガシラコウモリ属、オヒキコウモリ属、ホオヒゲコウモリ属、クビワコウモリ属、ヤマコウモリ属、ヒナコウモリ属、チチブコウモリ属、ウサギコウモリ属）の音声情報を用いて自動分類を行った。その後、分類された音声情報をすべて目視で確認し、誤分類（ノイズ音がコウモリに分類されているもの等）を修正するとともに、音声特徴量が記載されている国内生息種については、文献値 (Fukui et al., 2004; Kobayashi et al., 2021) または過去に取得した捕獲個体の音声データも参照して可能な限り種まで同定した。なお、ヤマコウモリ属とヒナコウモリ属については、音声構造や周波数等の特徴量が類似し、完全な分離は困難であることから、2属をまとめて低周波種群とした。本研究では、飛翔活動の集中する時間帯を明らかにするため、出現した各種または種群につい

て、1時間ごとに総録音時間に占める音声パルス検出時間の割合を算出した。

3-3-2. 音声活動量と飛翔数の関係

これまでのコウモリ調査で多用されてきた音声データから、飛翔個体数を推定する手法を検討するため（研究目標⑥）、新潟市で行ったレーダ調査と同時に、バットディテクターを設置して音声データを取得し、レーダ画像から計数された個体数との関係を解析した。その結果、音声データ数とレーダの捉えた飛翔個体数の間には正の相関が認められたものの（ $r = 0.69$ 、スピアマンの順位相関係数）、飛翔数が増えるほど、音声データ数とその状況を反映できないことがわかってきた。その理由として、これまで使われてきた音声活動量の集計方法に課題があること、また、レーダ画像から集計された個体数では、バットディテクターの音声検出域を通過した個体数を正確に反映できているか不明なことが挙げられた。そこで、バットディテクターによる音声録音と同時に、高感度赤外線サーモグラフィーを用いた観察を行うことで、音声検出域を通過する個体数の直接的かつ網羅的な把握を試みた。その上で、得られた録音データから音声活動量を集計する方法を再検討し、活動量と飛翔個体数との関係を解析することとした。

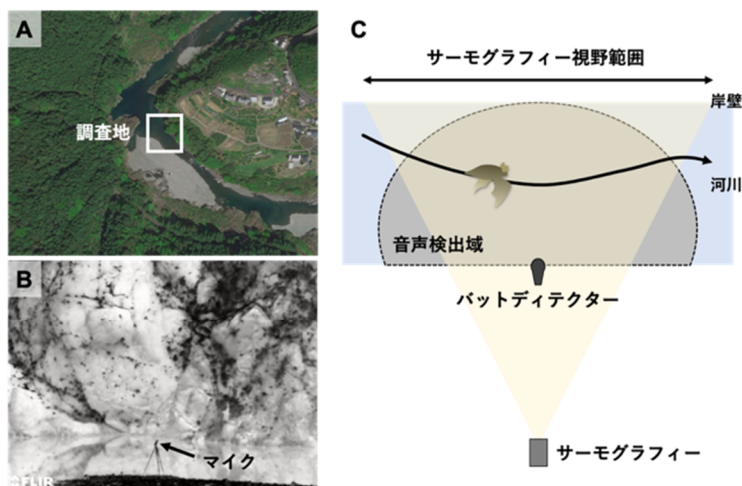


図2-7. バットディテクターで得られた音声活動量と通過個体数の関係性解析

調査地は徳島県南部を流れる那賀川上流域に位置し、河川蛇行部に形成された砂州の水際に機材を設置した（A、B）。観察では、赤外線サーモグラフィーによる観察範囲が、バットディテクターの音声検出域（40-50kHz帯の種では約30m）を可能な限りカバーできるよう機材を配置した（C）。

調査は、2022年4月上旬に、徳島県南部を流れる一級河川的那賀川上流域で行った（図2-7）。観察地点は、河川の蛇行部分に形成された砂州上に位置し、兩岸を傾斜の急な斜面に挟まれた構造となっている。2021年から2023年にかけて行ってきた生息状況調査により、当該調査地では、コウモリ類が流路に沿って水面上を移動することがわかっている。また、水面幅は25mであり、水際にバットディテクターを設置することで、川面を通過するコウモリ類の音声を網羅的に検出・録音することが可能である。

コウモリ類の音声録音には、ハンディタイプのバットディテクターであるEcho Meter Touch 2 Pro (Wildlife Acoustics Inc.) を用いた。音声検出域内を通過するコウモリ類の直接観察

は、赤外線サーモグラフィー（E96、FLIR製、画像解像度：640×480、視野角：24度、分解能：0.66mrad、動画撮影フレームレート：30fps）を用いて行った。サーモグラフィーは、カメラの視野角が音声検出域をカバーできるよう、バットディテクターから陸側に30m離れた場所に設置した。観察は、当該調査地におけるコウモリ類の活動時間帯に合わせ、日没時刻の20分後から40分間行なった。バットディテクターは連続録音モードを使用し、サーモグラフィーによる動画撮影と同時に音声データを記録した。

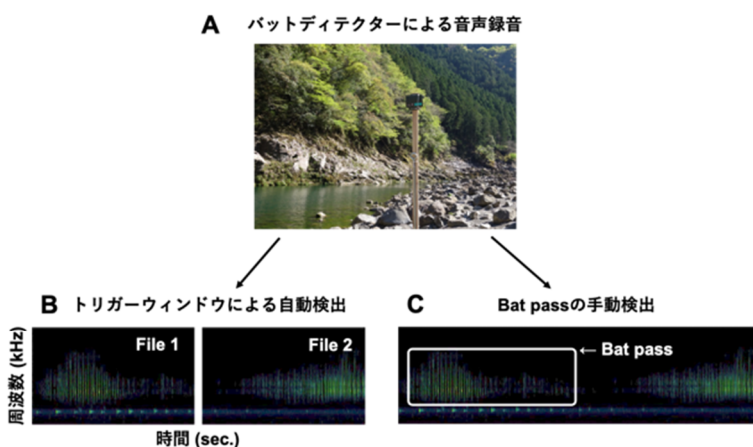


図2-8. 音声データによる活動量の集計方法

デフォルトの録音設定では、トリガーウィンドウに基づいてコウモリ類の音声を検出・録音される。録音された1つの音声ファイルを1回の通過イベントとみなし、単位時間あたりのファイル数を集計することで活動量が定量化される（A→B）。本研究では、連続録音された音声ファイルから、コウモリの通過に伴って記録される一連の音声パルス（以下、bat pass）を目視で確認し、単位時間あたりのbat pass数を集計することで活動量を求めた（A→C）。

本研究では、2つの方法により、得られた音声データから活動量を集計した。一つ目は、既存研究や従来の環境影響調査において多用されている方法で、機械的に自動検出されたコウモリ類の音声を含む1つの録音ファイル（最短3秒-最長15秒）を1回の通過イベントと定義し、単位時間あたりのファイル数を集計することで活動量を定量化する方法である。二つ目は、連続録音された音声データ（総録音時間＝40分）を1分単位に分割した上で、各音声ファイルに確認された一連のbat passの数を集計する方法である（図2-8）。サーモグラフィーで撮影された動画については、1分ごとに画角内を通過した延べ個体数をカウントした。そのうえで、音声ファイル数またはbat pass数と通過個体数の関係を、ピアソンの積率相関係数により解析した。

3-3-3. 分類器教師データとする種群の決定

【取得教師データをすべて使用】

レーダ画像からコウモリ類の飛翔をAI判別することを目指し、サブテーマ3に提供した教師データに基づき判別精度の検証が行われた。最初のステップとして、分類器にはすべての鳥類・コウモリ類が含まれた。なお、解析方法の詳細については、サブテーマ3の該当項目を参照されたい。

【現地情報に基づく選定】

コウモリ類を対象とした環境影響調査では夜間の観測データが解析対象となるため、日中に活動する鳥類が分類器に含まれることで判別精度が低下する可能性が考えられた。そこで、サブテーマ2のレーダ調査地において、コウモリ類と同所的に出現し得る鳥類を判別対象としてリストアップした。対象とする鳥類は、原則としてレーダ調査地での観察事例に基づき、夜間も活動する可能性のある分類群（カモ類、小鳥類）とした。また、本調査地における鳥類の出現状況は、レーダ観測域内に設置された2台のカメラ（赤外線サーモグラフィー：E96、FLIR、ビデオカメラ：HDR-CX900、Sony）により撮影された動画でも確認した。これらのカメラは、コウモリ類の飛翔状況を確認する目的で、ねぐらから約200m離れた地点にバットディテクター（Song Meter Minibat）とともに設置された（カメラ間距離：約500m）。動画は、当該調査地をコウモリ類が通過する日没5分前から計40分間記録された。記録された動画を確認し、鳥類が出現した場合には可能な限りその分類群を同定した。対象とする鳥類を決定したうえで、サブテーマ3により判別精度の検証が行われた。

3-3-4. 飛翔軌跡図の作成と衝突リスクの可視化

レーダ観測範囲におけるコウモリ類の飛翔数を定量化するため（研究目標⑥に記載）、サブテーマ3によってエコー画像から抽出された移動軌跡を上述の解析ステップによりAI判別し、得られた結果を受けてコウモリ類の飛翔軌跡図を作成した。トラッキングとAI判別には、2023年7月9日のレーダ調査で得られたデータを用いた（解析はサブテーマ3により実施）。解析対象とした時間帯は、18:55から19:40の画像とした。この時間帯は、ヒナコウモリの出巢前から、観測エリア内の通過が完了するまでに相当する。

現行の環境アセスメントにおける衝突確率計算では、対象エリア内に占める飛翔軌跡の総延長に、Mゾーン飛翔率を乗じた値が用いられる。本研究の調査地は風力発電の実施対象区域に該当しないが、レーダデータを用いてコウモリ類の衝突リスクを推定するプロセスを示すため、サブテーマ3から提供された結果を受けて飛翔軌跡長を算出した。軌跡長の算出にあたっては、レーダ設置地点を中心に、3-1-5の解析で得られた検出可能距離を半径とするバッファを発生させ、そこから地表クラッタの発生エリアを除外した。そのうえで、対象範囲内を50mメッシュで区切り、各メッシュ内における軌跡の総延長を求めた。また、測距器によって取得されたコウモリ類2種の飛翔軌跡データのうち、Mゾーン（30-150m）に相当する高度を通過した軌跡の占める割合を求め、Mゾーン飛翔率として扱った。なお、いずれの種も、1軌跡内における高度変化が大きく、追跡中にLゾーンからMゾーン、あるいはMゾーンからHゾーンへ移行した軌跡も多く確認された。そのため、Mゾーン飛翔率の計算では、一度でもMゾーンを通過した軌跡については、Mゾーン飛翔軌跡として扱った。

Fukui, D., Agetsuma, N., & Hill, D. A. (2004). Acoustic identification of eight species of bat (Mammalia: Chiroptera) inhabiting forests of southern Hokkaido, Japan: potential for conservation monitoring. *Zoological Science*, 21, 947-955.

Kobayashi, K., Masuda, K., Haga, C., Matsui, T., Fukui, D., & Machimura, T. (2021). Development of a species identification system of Japanese bats from echolocation calls using convolutional neural networks. *Ecological Informatics*, 62, 101253.

4. サブテーマ2の結果及び考察

4-1. レーダ観測手法の確立 [研究目標④に相当]

4-1-1. 設置方法と表示色の違いが可視領域と飛翔数定量性に及ぼす影響

アンテナの設置高および物標色の統一化による可視領域の違いを、図2-9および図2-10に示す。図2-9の画像中において、黄色のエリアがクラッタエコーに相当する。デフォルト設定色（設置高2.2m）では、レーダから500mの範囲に占めるクラッタ割合が多く、それよりも遠方では少ない傾向を示した（0-500m: 76.4%、500-1000m: 15.7%、図2-9A、図2-10）。

同じ設置高でも、物標色をすべての階調で同一色に設定すると、レーダから1000mレンジはそのほとんどがクラッタに覆われ、移動物標を確認することは極めて困難な状態となった（0-500m: 95.9%、500-1000m: 71.9%、図2-9B、図2-10）。これに対し、アンテナを床置きとした場合（物標色は同色に統一）、広範囲にわたってクラッタが低減されることが明らかとなった（0-500m: 21.1%、500-1000m: 17.8%、図2-9C、図2-10）。

出巢するヒナコウモリを対象に、レーダ物標数と、目視でカウントされた飛翔数の関係を解析した結果、デフォルト表示色で設置高2.2mでは、コウモリの飛翔をほとんど捕捉できなかったのに対し（ $r = 0.16$, $p = 0.45$ 、図2-11A）、物標色を統一して床置きとした場合には、物標数と飛翔数の間に強い正の相関が認められた（ $r = 0.88$, $p < 0.0001$ 、図2-11B）。設置高2.2mで物標色を統一した場合は、目視観察地点に相当する範囲もすべてクラッタに覆われてしまったため、物標数をカウントすることができなかった。アンテナを垂直回転で行った調査では、物標数と目視による飛翔数との間に強い正の相関が認められた（ $r = 0.90$, $p < 0.0001$ ）。垂直回転では、物標数の方が目視数よりも多く計数される傾向があり、目視で捉えきれていない範囲の飛翔個体もレーダで捕捉されている可能性が考えられた。なお、本研究プロジェクトでは、水平回転で得られたレーダ画像を軸

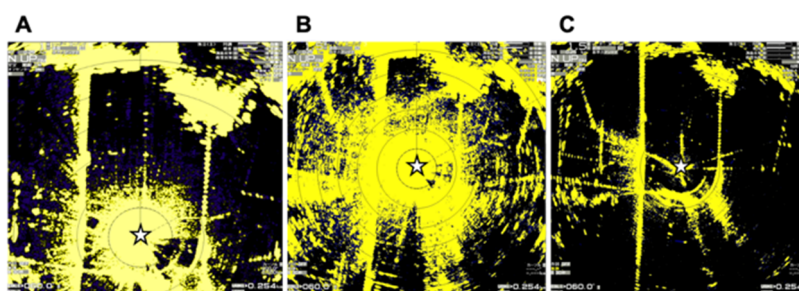


図2-9. 設置方法と物標色の変更による可視領域の違い

レーダ設置高は、(A)および(B)が地表から2.2m、(C)が0.4mである。物標色の設定は、(A)がデフォルト設定（グラデーションあり）、(B)および(C)が設定可能な15階調すべてを同一色に統一している。図中の星印は、レーダ設置地点を表す。

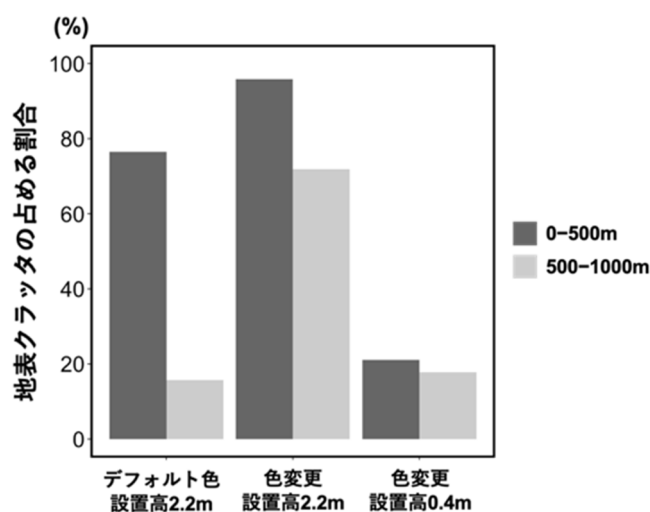


図2-10. 設置方法と物標色設定の違いによるクラッタ割合の比較

にトラッキングアルゴリズムならびに分類器が開発されるため、以降については、水平回転で得られた結果についてののみ言及する。

これらの結果から、レーダ備え付けのクラッタ除去機能（海面反射除去、雨雪反射除去）を使うことなく、設置方法と表示色設定により、コウモリ類の検出可能性を高められることが示唆された。可視領域を確保することができれば、水平回転による運用でもコウモリ類の飛翔数を概ね定量的に評価することができる

といえるだろう。物標色の統一化により信号強度の弱い物標も明示されるため、この方法はコウモリ類だけでなく、小鳥類を対象とした調査でも効果が期待される。その反面、設置高によってはクラッタの影響を受けやすくなると考えられるため（図2-9B）、サブテーマ1によって示されたように、周囲の地形的特性や見通しを考慮した設置場所の選定が重要となる。また、本研究の検証結果は、平坦地形の広がる環境下で得られたものであるため、特に設置高の調整については、地形特性の異なる条件下や洋上についても同様の効果が得られるかどうか検討する必要があるだろう。

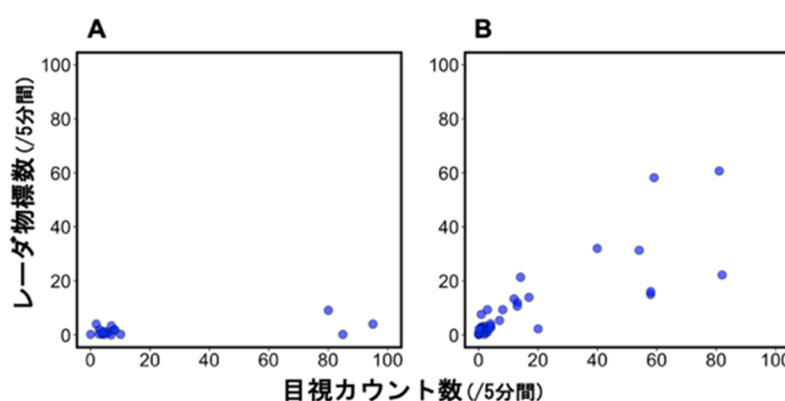


図2-11. レーダ物標数と目視カウントで確認された飛翔個体数の関係
(A)はデフォルト表示色かつ設置高2.2m、(B)は物標色を統一して床置きとした場合の結果を、それぞれ表す。

4-1-2. 物標検出率と距離の関係

ロジスティック回帰モデルによる解析の結果、物標検出率は、レーダからの距離が離れるに従って緩やかに減少する傾向を示した（推定値 $= -0.002$ 、 $SE = 0.0003$ 、 $z = -7.456$ 、 $p < 0.0001$ 、図2-12）。得られたモデルから、物標検出率が50%となる観測距離は、レーダからおよそ1.5kmであることが明らかとなった。このことから、トラッキングアルゴリズムにおいて、2回に1回の頻度で物標が消失することを許容するならば、1.5kmの範囲内ではコウモリの移動軌跡を抽出することが可能であると考えられる。以降の飛翔軌跡図の作成においては、解析で得られた検出距離を半径とするエリアを、コウモリ類の観測可能範囲として定義した。

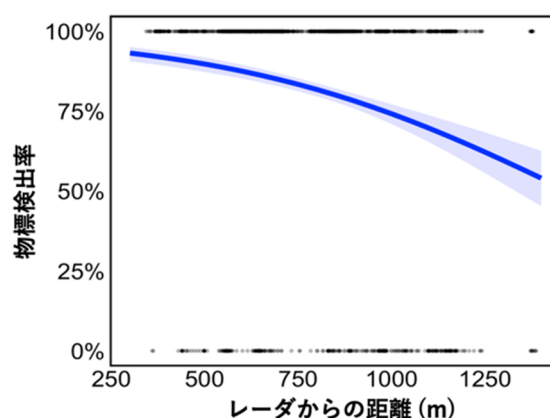


図2-12. 物標検出率と距離の関係
図は、ロジスティック回帰モデル(GLM)によって推定された応答曲線を表す。誤差範囲は、標準誤差(SE)を示す。

4-2. 教師データの取得 [研究目標⑤に相当]

4-2-1. コウモリ類の飛翔特徴

測距器による行動追跡の結果、ヒナコウモリについては2シーズンで計124軌跡、ヤマコウモリについては計74軌跡を得ることに成功した。図2-13には、それぞれの種について得られた飛翔軌跡のうち、取得ポイント数が10点以上あり、連続測位できたデータを含む軌跡を示している。鳥類については、アオサギ ($n = 13$)、ダイサギ ($n = 13$)、ゴイサギ ($n = 7$)、ハシボソガラス ($n = 15$)、およびムクドリ ($n = 5$) の飛翔軌跡データが取得された。なお、ムクドリについては、100-200羽からなる群れの中の個体を対象としたデータである。

ヒナコウモリは、鳥類と比べて飛翔速度が遅い傾向を示したが、ヤマコウモリは鳥類と同程度であった。速度の中央値 (min-max) は、ヒナコウモリ 6.9 m/s (1.9-16.8)、ヤマコウモリ 9.3 m/s (3.9-13.6)、アオサギ 11.3 m/s (8.0-14.6)、ダイサギ 11.3 m/s (6.8-16.7)、ゴイサギ 8.0 m/s (7.3-

13.7)、ハシボソガラス10.9 m/s (8.6–13.1)、ムクドリ15.6 m/s (10.3–16.1)であった。また、コウモリ種間では、ヤマコウモリに比べてヒナコウモリの方が有意に遅かった(図2-14A)。軌跡内における速度の標準偏差(SD)についても同様の傾向がみられ、特にヒナコウモリは、ヤマコウモリおよび鳥類よりも有意にばらつきが小さかった(図2-14B)。角度変化についてみると、ヒナコウモリは、ヤマ

コウモリに比べて直線的な飛翔をする傾向がみられたものの、鳥類5種との比較では明瞭な違いはなかった(図2-14C)。軌跡内における角度変化のSDについても、コウモリ2種と鳥類の間に統計的有意差は認められなかった(図2-14D)。ただし、コウモリ類は、いずれの種も角度変化のデータに大きなばらつき幅がみられた(ヒナコウモリ: 0.3–68.6°、ヤマコウモリ: 0.0–58.5°)。コウモリ類では、採餌行動の際に直線的な飛翔から急激な方向転換を示すことがあり、本研究で得られた結果もそのような行動が含まれていると考えられた。しかし、急な方向転換を伴う飛翔パターンは測距器による追跡が困難であり、鳥類との判別に用いる特徴量として十分に反映できていない可能性がある。

今回、測距器によって得られたコウモリ2種の軌跡データは、そのほとんどがねぐらを出て採餌場所へと向かう移動フェーズの飛翔に相当する。近縁種を対象にGPS追跡で飛翔特性を調べた先行研究によると、移動中は直線的に飛翔し、採餌場所の周辺ではより複雑な飛翔軌跡となる傾向を示している(Roeleke et al., 2016)。また、コウモリ類の飛翔速度については、体サイズが大きい種ほど速い傾向にあるが、その多くは10 m/s以下であることが知られている(Holderied and Jones, 2009)。これまで測距器によって飛翔速度が計測された事例はないが、既存研究において、GPS発信機のほか複数手法(スピードガン、マイクロフォアレ、カメラシステム)で計測されたヒナコウモリ科15種の平均飛翔速度は3.2–9.3 m/sであり、本研究で得られたデータと矛盾しない(Britton et al., 1997; Bullen and McKenzie, 2002; Grodzinski et al., 2009; Roeleke et al., 2016; Barré et al., 2021; Gilmour et al., 2021)。これらのことから、測距器で得られたデータはスナップショットであるものの、少なくとも移動フェーズにおけるコウモリ類の飛翔特性は反映できるものと考えられた。季節的に長距離移動する種群は洋上を飛翔することもあり、洋上風力発電に関わる影響調査においてそのような行動を捉えようとする場合には、本研究で得られた飛翔軌跡を教師データとして活用していくことが可能であろう。

一方、コウモリ類の飛翔速度は、夜間に渡りをするスズメ目と重複することがあり、速度データのみではレーダでの判別が困難となる可能性も指摘されている(Kunz et al., 2007)。特に、本研究で対象としたヤマコウモリは大型で飛翔速度が速く、スズメ目の種群が渡りをする春や秋には、それらの小鳥類を捕食することが知られている(Fukui et al., 2013)。採餌環境におけるコウモリ類の飛翔パターンは移動時に比べてより複雑な軌跡となるため、小鳥類が同所するような状況下では、角度変化など軌跡の複雑度を指

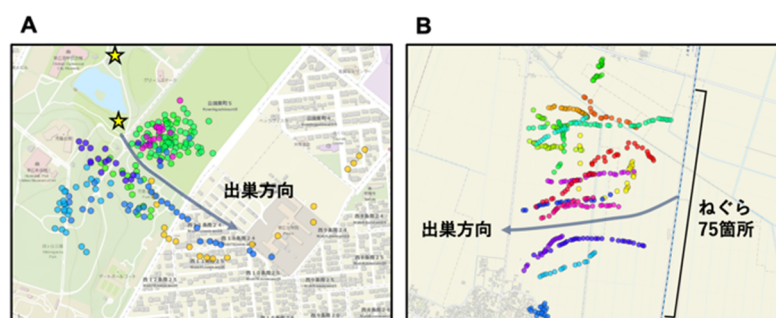


図2-13. 測距器によって取得されたコウモリ類の飛翔軌跡

(A)はヤマコウモリ、(B)はヒナコウモリの飛翔軌跡をそれぞれ表す。図に示した軌跡は、取得ポイント数が10点以上あり、連続測定できたデータを含む軌跡を抽出した。それぞれの種について、軌跡ごとに異なる色で示した。(A)の図中の星印は、ねぐらの位置を表す。

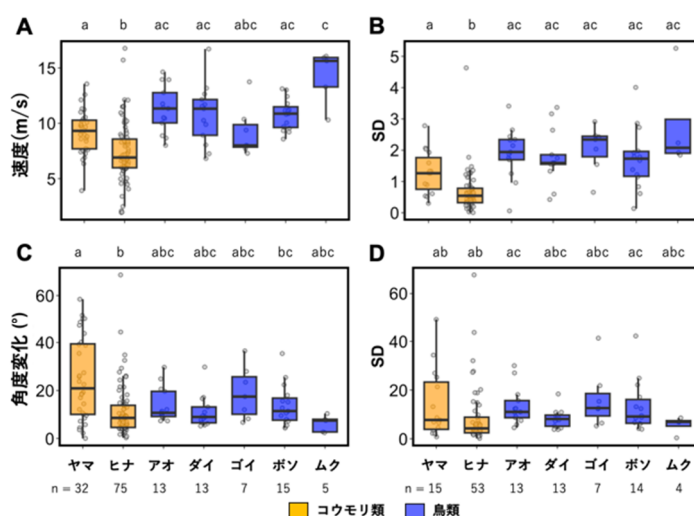


図2-14. コウモリ類と鳥類における飛翔特徴の比較

各図の上に表示したアルファベットの違いは、Steel-Dwassの多重比較により差(有意水準5%)がみられたことを示す。ヤマ: ヤマコウモリ、ヒナ: ヒナコウモリ、アオ: アオサギ、ダイ: ダイサギ、ゴイ: ゴイサギ、ボソ: ハシボソガラス、ムク: ムクドリ。

標する特徴量が分類群判別において重要となるだろう (Beason et al., 2013)。本研究では測距器によってコウモリの採餌飛行を捕捉することは困難であったことから、今後、測距器の代替となる教師データ取得方法について別途検討する必要がある。

4-2-2. 飛行高度

行動圏を網羅するデータではないものの、測距器を用いたことで、国内では初めて風力発電ハイリスク種の詳細な飛行高度データを得ることに成功した。計測された全てのポイントデータについてみると、ヒナコウモリの飛行高度は10.0–141.3m (中央値: 42.7m)、ヤマコウモリの飛行高度は10.9–248.5m (中央値: 36.1m) であった (図2-15A)。風車ブレード回転域を30–150mとした場合、Mゾーンに相当する高さを飛行したポイントの割合は、ヒナコウモリで63.4%、ヤマコウモリで76.1%に達した。同所的に出現した鳥類については、ハシボソガラスがコウモリ類と同様の高度帯を利用する傾向にあり、サギ類ではそれよりも低空を、ムクドリではより高空を飛行していた (図2-15A)。また、軌跡単位でみると、得られた軌跡のうち一度でもMゾーンを通過した軌跡の占める割合は、ヒナコウモリで85.5% (106/124軌跡)、ヤマコウモリで79.7% (59/74軌跡) であった (図2-15B、C)。いずれの種も、ねぐらは地上から10m以下の高さに位置し、出巢から徐々に高度を上昇させていく傾向がみられた (図2-15B、C)。特にヤマコウモリでは、移動距離に対して高度変化の大きい軌跡が確認された。

コウモリ類の高度利用に関して得られている知見は限られるものの、ヤマコウモリ属の1種 (*N. noctula*) を対象にGPS追跡を試みた研究によると、開放空間を飛行する際の高度は0–144mであったことが報告されている

(Roeleke et al., 2016)。ただし、コウモリ類の飛行高度は地形特性の影響を受けることや、地表付近から高空域 (高度500–1000m) を頻繁に行き来することもわかってきている (Roeleke et al., 2018)。それゆえ、高度利用の実態解明に向けてはGPS発信機による行動追跡が必要となり、そのためにはより効率的なデータ回収方法の確立が課題となる。

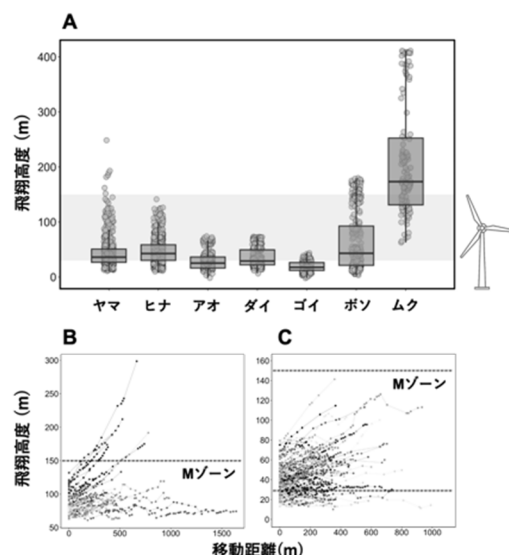


図2-15. コウモリ類の飛行高度

(A)は測距器により記録された全てのポイントデータの高度を示す。図中のグレーの網掛け部分は、風車ブレード回転域に相当する高度帯を表す (30–150m)。(B)はヤマコウモリ、(C)はヒナコウモリについて、移動距離に対する軌跡の高度変化を表している。ヤマ：ヤマコウモリ、ヒナ：ヒナコウモリ、アオ：アオサギ、ダイ：ダイサギ、ゴイ：ゴイサギ、ボソ：ハシボソガラス、ムク：ムクドリ。

4-3. 環境アセスメント手法開発 [研究目標⑥に相当]

4-3-1. 出現候補種のリストアップ

【事前調査1：生息種・ねぐら調査】

調査対象地となった新潟県では、これまでに、日本産コウモリ類37種のうち16種の生息が確認されている。このうち、ハイリスク種と位置付けられているのは、ユビナガコウモリ、ヤマコウモリ、アブラコウモリ、モリアブラコウモリ、ヒナコウモリ、クビワコウモリ (標本記録) の計7種である。風力発電に関わる環境アセスメントでは、配慮書の段階で候補地となっている市町村で過去に確認された種の一覧が作成される。ハイリスク種については、長距離を移動するものが多いことを考慮すると、事前の確認において都道府県レベルでの生息種一覧を整備しておく必要があるだろう。例えば、過去に新潟県佐渡市で実施した、ユビナガコウモリを対象とする標識調査では、捕獲したねぐらから1週間で約40km離れた別のねぐらへ移動したことがわかっている。また、風車衝突事例の多いヒナコウモリについても、季節的に数百kmを移動することがあり、対象事業実施区域の設けられている市町村で生息情報がなかった場合でも、周辺地域を含めて生息情報を確認しておく必要がある。

これまでに新潟県内で明らかとなっているハイリスク種の集団ねぐら分布を図2-16に示す。新潟県では胎内・村上沖に洋上風力発電の計画が立ち上がっているが、村上市や新潟市には沿岸部にユビナガコウモリの集団ねぐらが存在し、柏崎市には国内でも数少ない本種の出産・哺育コロニーが分布する。このように、洞窟を主なねぐらとするユビナガコウモリは海蝕洞を利用することがあり、日常的に洋上を飛翔している可能性も高い。また、新潟-東京間を結ぶ上越新幹線の沿線では、ヒナコウモリの繁殖コロニーが多数形成される。これらの種の移動能力が広範囲におよぶことを考慮すると、事業実施区域が陸上よりも広範囲にわたる洋上風力発電においては、周辺地域も含めて事前にねぐら調査を行い、生息種やコロニー規模を把握する必要性が極めて高いといえる。

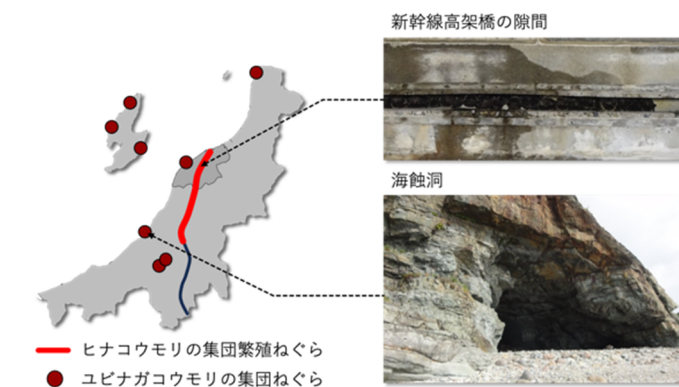


図2-16. 新潟県における風力発電ハイリスク種の集団ねぐら分布

上の地図は、レーダ調査を実施した新潟県内に位置するヒナコウモリおよびユビナガコウモリの集団ねぐらの分布を表す。同じくハイリスク種であるモリアブラコウモリ、ヤマコウモリについては、集団ねぐらは特定されていない。またクビワコウモリについては佐渡島で標本記録が確認されているにとどまる。アブラコウモリについては市街地を含め全域に生息しているため、地図には示していない。

【事前調査2：音声録音調査】

新潟県北部の沿岸域で行った音声調査の結果、ハイリスク種を含む計5種群が同定された（ハイリスク種：ユビナガコウモリ、アブラコウモリ、ヤマ/ヒナコウモリグループ、図2-17）。ヤマ/ヒナコウモリグループは、3地点いずれの録音サイトでも出現が確認され、その活動は日没から3時台まで続き、特に夜の前半に集中する傾向がみられた。アブラコウモリは、どの録音サイトも日没から3時間程度の時間帯に活動量が集中していた。ユビナガコウモリについては、もっとも北側と南側のサイトにおいて、それぞれ短時間の活動が確認された。注意すべき点として、バットディテクターは、周波数によって検出可能域が異なるため、得られたデータ数は種間で比較できないことが挙げられる（周波数帯の異なる種間で記録データ数の多い、少ないといった議論はできない）。ただし、少なくとも図2-17に示すような出現種リストを整備することで、ハイリスク種の生息状況や種ごとの活動時間帯の特徴を把握することは可能である。

バットディテクターは設置が容易なため、広範囲にわたって録音サイトを設けることができる。事前調査を踏まえてレーダデータの取得を行う場合は、音声調査の結果に基づき、ハイリスク種の活動量が高いサイトを含むようレーダを配置する必要があるだろう。また、渡り鳥が多く飛来する春や秋については、鳥類用マイクロフォンも併用することにより、コウモリ類と鳥類それぞれの活動時間帯を明らかにし、AI分類器による判別の際に注意すべき時間帯を把握できると考えられる。最近になり、陸上風力の環境アセスメントでは風況観測塔などにマイクを長期間設置し、高高度を飛翔する種の出現状況を捉えようとする調査も普及しつつある。国内海域においてはコウモリ類の利用実態がほとんどわかっていないことを踏まえると、洋上についても観測塔やブイなどにマイクを設置し、複数の地域で季節を通じたモニタリングを行

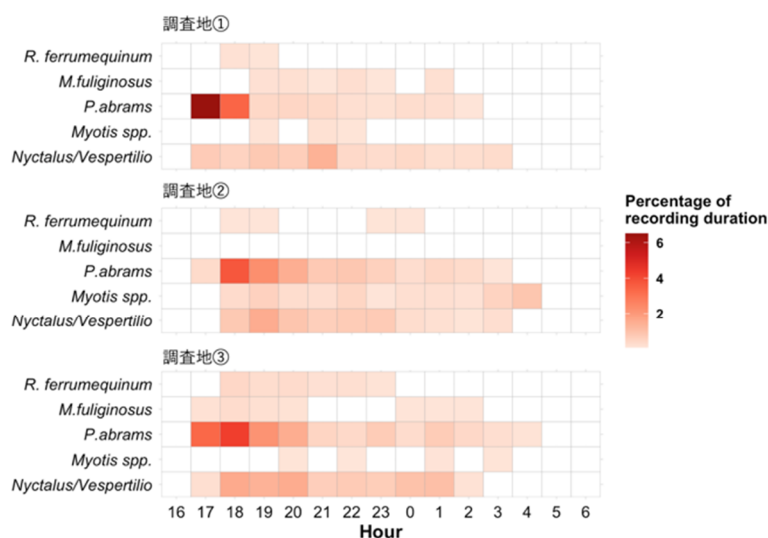


図2-17. 音声調査によって同定された出現種と活動時間

各セルの色は、音声データが録音されていた時間の占める割合（1時間あたり）を表す。

っていく必要性は高いといえる。併せて、音声データから高精度な種判別を可能とする技術（例えば Kobayashi et al., 2021）の普及と、日本産コウモリ類の音声データベース拡充についても同時に進めていく必要がある。

4-3-2. 音声活動量と飛翔数の関係

バットディテクターの録音設定に最大録音時間が設けられている場合、デフォルトでは15秒を上限として1つの音声ファイルが生成される。この設定では、単位時間あたりの飛翔数が多い状況下でも記録される音声ファイル数は一定となり、飛翔数を指標することができなかった（図2-18A）。一方、最大録音時間を設けずに、録音データの中から一連のbat passを確認して計数した場合は、飛翔数の増加に伴ってbat pass数も多くなる傾向を示した（ $r = 0.79, p < 0.0001$ 、図2-18B）。1分あたりの通過数が10頭を超える場合は、観察範囲内に複数頭が同時出現し、音声データ上でも複数のbat passが重なり合う事例が多くみられた。このことから、bat pass数から概ねバットディテクター検出域内を通過した飛翔数を推定できるものの、結果の解釈においては注意を要する。また、現状では、bat passの抽出を手動で行う必要があるため、長期間の調査で取得される膨大なデータセットに対して適用するには、そのプロセスを効率的に行う手法確立が必要となる。あるいは、国内産コウモリ類について、種ごとに平均的なbat pass長を求めることができれば、対象種に応じた最大録音時間を定義できるかもしれない。

バットディテクターで得られた音声データから飛翔数を推定する研究はこれまでも行われてきたが（例えば Milchram et al., 2020）、その予測性や汎用性の検証は、正解データを得る難しさも相まってほとんど進んでいない。本研究では、高感度赤外線サーモグラフィーを用いたことで、少なくとも画角内を通過する飛翔数を定量化し、音声活動量との関係を解析することができたが、今後、異なる環境条件の下でも同様の結果が得られるかどうかについて更なる検証が必要となる。

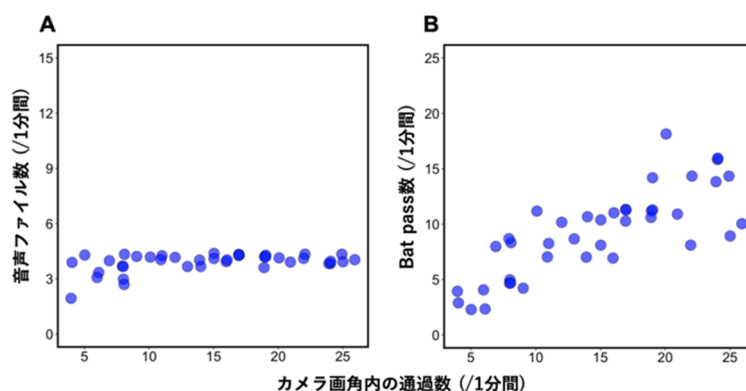


図2-18. 音声活動量と直接観察された飛翔数の関係

(A)は、従来の音声調査で多用されている活動量の集計方法で得た音声ファイル数と通過数の関係を、(B)は、連続録音された音声データから計数したbat passと通過数の関係を、それぞれ表す。

4-3-3. コウモリ類の判別精度

サブテーマ2が提供したコウモリ類2種の飛翔軌跡データを用いて、サブテーマ3によりその判別精度の検証が行われた（表2-2）。教師データとしてすべての分類群を用いた解析では、測距器データのみで学習・検証を行った場合と、測距器データで学習し、BbTracker（サブテーマ3新規開発）で追跡された軌跡（ヒナコウモリ）で検証した場合の2通り行われた。その結果、測距器データのみによる学習・検証では、グループレベル（コウモリ類）で0.40、種レベルでヒナコウモリが0.57であったが、ヤマコウモリについては0.27と低かった。また、測距器データで学習してBbTrackerにより検証した場合は全体的に判別精度が低く、ヒナコウモリでも

表2-2. コウモリ類に対するAI判別精度の検証

検証データ	分類群	Accuracy	T	N
全ての分類群を使用				
測距→測距	コウモリ類	0.40	12	30
	ヒナコウモリ科	0.24	9	37
	ヤマコウモリ	0.27	4	15
	ヒナコウモリ	0.57	16	28
測距→BbTracker	コウモリ類	0.04	13	296
	ヒナコウモリ科	0.04	12	296
	ヤマコウモリ	na	na	na
	ヒナコウモリ	0.05	15	296
現地情報をもとに分類群選定				
測距→測距	ヒナコウモリ科	0.91	30	33
	カモ科	0.99	214	216
	ヒヨドリ科	0.0	0.0	1.0

na, ヤマコウモリではレーダデータを得られていないため解析対象外

0.05であった。このことは、分類器を構築する教師データとして、測距器で取得された軌跡データのみでは判別に限界がある可能性を示唆している。今後、レーダ調査時に測距器等を併用することにより、分類群情報の紐づいた、正解付きレーダ軌跡を教師データとして蓄積していく必要があるだろう。

本プロジェクトでは、レーダ調査地で得られた現地情報に基づき、分類器に含める対象種を絞り込むことで、判別精度を高めることができると考えられた。そこで、新潟市のレーダ調査地で観察された鳥類のうち、夜間も飛翔するカモ類と小鳥類を分類対象として、コウモリ類の判別精度を再度解析した（解析はサブテーマ3により実施された）。その結果、科レベルの分類で、ヒナコウモリ科は0.91、カモ科も0.99と高い値を示した。小鳥類については解析用データが少なく、十分な検証を行うことができなかった。今回対象とした鳥類のほかに、サギ類も夜間に飛翔する種を含むため、引き続き教師データの拡充を図っていくことが必要不可欠であるといえる。本研究で対象とした分類群数はまだ限られているものの、今回の解析結果は、レーダ軌跡のAI分類精度を高めるうえで、現地の生息種情報を事前に整備していくことの有用性を示唆している。

4-3-4. 飛翔軌跡図・衝突リスク評価

上記4-3-3で行なった精度検証を踏まえ、サブテーマ3から提供された結果を用いてコウモリ類の飛翔軌跡図（図2-19A）を作成するとともに、対象エリアを50mメッシュで区切ってメッシュごとの軌跡長を算出した（図2-19B）。これにより、得られた結果から総軌跡延長を算出し、4-2-2で述べたコウモリ類2種のMゾーン飛翔率を乗じることで、衝突確率計算に活用することができる。以上のプロセスを通じて、コウモリ類に対する従来の環境アセスメント手法では実現できなかった飛翔軌跡数の定量化と、衝突リスクの可視化が可能となった意義は大きい。また、今後コウモリ類の集団繁殖地が事業実施区域の近くで発見された場合には、そこを拠点にレーダ観測・追跡を行うことで、効率的に局所個体群の動態をモニタリングすることができるだろう。これが可能となれば、風車建設前後の比較や累積的影響評価においても、有用な知見を提供することができると考えられる。

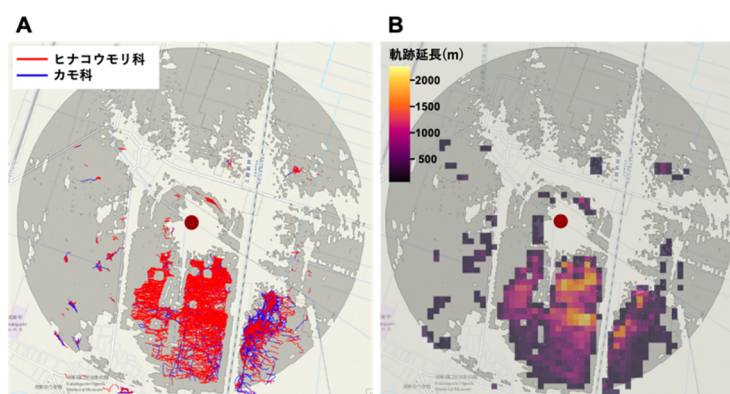


図2-19. トラッキングおよびAI判別によって得られたコウモリ類の飛翔軌跡(A)とその密度図(B)
図中の赤丸は、レーダ設置地点を表す。

- Barré, K., Spoelstra, K., Bas, Y., Challéat, S., Kiri Ing, R., Azam, C., ... & Le Viol, I. (2021). Artificial light may change flight patterns of bats near bridges along urban waterways. *Animal Conservation*, 24, 259-267.
- Beason, R. C., Nohara, T. J., & Weber, P. (2013). Beware the Boojum: caveats and strengths of avian radar. *Human-Wildlife Interactions*, 7, 16-46.
- Britton, A. R. C., Jones, G., Rayner, J. M. V., Boonman, A. M., & Verboom, B. (1997). Flight performance, echolocation and foraging behaviour in pond bats, *Myotis dasycneme* (Chiroptera: Vespertilionidae). *Journal of Zoology*, 241, 503-522.
- Bullen, R. D., & McKenzie, N. L. (2002). Scaling bat wingbeat frequency and amplitude. *Journal of experimental biology*, 205, 2615-2626.
- Fukui, D., Dewa, H., Katsuta, S., & Sato, A. (2013). Bird predation by the birdlike noctule in Japan. *Journal of Mammalogy*, 94, 657-661.
- Gilmour, L. R., Holderied, M. W., Pickering, S. P., & Jones, G. (2021). Acoustic deterrents influence foraging activity, flight and echolocation behaviour of free-flying bats. *Journal of Experimental Biology*, 224, jeb242715.

- Grodzinski, U., Spiegel, O., Korine, C., & Holderied, M. W. (2009). Context - dependent flight speed: evidence for energetically optimal flight speed in the bat *Pipistrellus kuhlii*. *Journal of Animal Ecology*, 78, 540-548.
- Holderied, M. W., & Jones, G. (2009). Flight dynamics. In *Ecological and behavioral methods for the study of bats* (pp. 459-475). Johns Hopkins University Press.
- Kunz, T. H., Arnett, E. B., Cooper, B. M., Erickson, W. P., Larkin, R. P., Mabee, T., ... & Szewczak, J. M. (2007). Assessing impacts of wind - energy development on nocturnally active birds and bats: a guidance document. *The Journal of Wildlife Management*, 71, 2449-2486.
- Milchram, M., Suarez - Rubio, M., Schröder, A., & Bruckner, A. (2020). Estimating population density of insectivorous bats based on stationary acoustic detectors: A case study. *Ecology and evolution*, 10, 1135-1144.
- Roeleke, M., Blohm, T., Kramer-Schadt, S., Yovel, Y., & Voigt, C. C. (2016). Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Scientific Reports*, 6, 28961.
- Roeleke, M., Bumrungsri, S., & Voigt, C. C. (2018). Bats probe the aerosphere during landscape - guided altitudinal flights. *Mammal Review*, 48, 7-11.

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

5-1. 研究目標④

【目標】 ハイリスク種の中でも特に高空域を飛翔する傾向が強く、風車との衝突事例もあるヤマコウモリやヒナコウモリ等について、Xバンドレーダによる観測可能距離を明らかにする。

【達成状況】 国内で風車衝突事故が多いヒナコウモリを対象に、レーダにより捕捉された物標検出率と観測距離の関係を解析した。その結果、検出率50%となる観測距離は、レーダから半径1.5kmの範囲であることが明らかとなった。さらに、レーダ設置方法と物標色設定を調整し、その効果を検証した結果、地表クラッタを低減しながらコウモリ類の物標を定量的に観測できることがわかった。これらのことから、④については目標を上回る成果をあげることができた。

5-2. 研究目標⑤

【目標】 目標④の対象種に関してレーダ観測可能域で数十頭を放獣し、各種の飛翔軌跡取得を試みるとともに、環境省により絶滅危惧Ⅱ類に指定されているヤマコウモリ等については、GPSロガーを用いて毎秒～数秒間隔の詳細な飛翔軌跡を取得する。これらを基に画像解析用の教師データ数十～百個程度の作成を目指す。

【達成状況】 1～2年目については、新型コロナウイルス感染拡大期に該当したことから、コウモリ類の捕獲行為についてはIUCNの勧告もあり規模を縮小せざるを得なかった。その代替措置として、捕獲を伴わずにレーダ調査が可能な場所を選定し、軌跡データを取得するとともに、測距器を用いて行動追跡を試みた。GPS発信機ではデータ回収にいたらなかったが、測距器によりヤマコウモリ74軌跡、ヒナコウモリ124軌跡の計198軌跡の教師データ取得に成功した。また、レーダ画像から飛翔軌跡データを作成する手法を確立し、ヒナコウモリについては355軌跡を作成した。これらのデータはサブテーマ3に提供され、AI判別プログラムの開発に活用されたことから、目標通りの成果を達成できたと判断した。

5-3. 研究目標⑥

【目標】 サブテーマ3のAI学習で得られた移動軌跡からハイリスク種を判別して飛翔個体数を定量化するとともに、従来のコウモリ調査で多用されてきた音声波形による活動量データを個体数情報に補正する手法を検討する。

【達成状況】 サブテーマ3と共同で、事前にレーダ調査地に出現する候補種を整理することにより、コウモリ類の判別精度を高められることが明らかとなった。そのうえで、サブテーマ3による解析結果

を受けてコウモリ類の飛翔個体数を定量化し、観測範囲内における飛翔軌跡長を算出した。また、測距器で得た高度データからMゾーン飛翔率を求めたことで、風車ブレード衝突確率の推定も可能となった。また、音声データから、飛翔個体数を反映し得る活動量の集計方法を新たに確立した。これらの成果から、⑥についても目標通りの成果をあげることができた。

Ⅱ－３ サブテーマ３「レーダ画像から飛翔軌跡を AI 識別する画像解析手法の確立」

[サブテーマ３の要旨]

サブテーマ３では、取得されたレーダ画像に画像処理技術を施し、新たな動体軌跡を抽出する手法を開発し、追跡プログラム（BbTracker）を開発した。また、教師データに基づく AI 学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛翔であることを分別する手法を開発し、それぞれ訓練プログラム（BbTrainer）、識別プログラム（BbClassifier）を開発した。当該プログラムで、AI 学習を進展させ、種グループ（カモメ類、猛禽類など）や科レベルで飛翔軌跡を分別することを試みた。その結果、水禽類で70.7%、海鳥類で57.4%、猛禽類で50%の精度で種グループでの分類が可能となり、科レベルでは、カモメ科61.7%、カモ科66.9%、タカ科51.1%、ヒナコウモリ科79.3%の精度で分類が可能となった。

１．サブテーマ３研究開発目的

これまで船舶レーダ画像から鳥類（動体）を抽出、追跡するプログラムは、国内では環境省による「風力発電施設バードストライク防止策実証業務」（環境省、2007-2009）において、BirdStrike という Windows 版ソフトウェアとして開発されたのが最初である（以下、旧アルゴリズムまたは BirdStrike と呼ぶ）。それ以降、現在（2024年）まで10年以上が経過したが、アップデートは行われず、OS や PC の処理速度の進歩に対応しきれていないという課題がある。

サブテーマ３では、船舶レーダ観測により得られたレーダ画像群を解析し、画像中の動体を軌跡として抽出し、得られた軌跡の形状特性に基づく AI 識別を実施するプログラムの開発を行う（以下、新アルゴリズムと呼ぶ）。このうち前半（画像群の解析～軌跡の抽出）は、旧アルゴリズムの諸課題の解決も意味する。

新アルゴリズムと旧アルゴリズムの新旧対比表を表3-1に示す。

表 3-1 新アルゴリズムと旧アルゴリズムの新旧対比表（主な機能）

項目	旧アルゴリズム BirdStrike	新アルゴリズム BbTracker
レーダ画像のタイプ	特定の製造会社（1社）に依存	依存しない
二値化の方法	グレースケール画像から基準値で一括変換	前景色群と背景色群を与え、1ピクセル毎に両群の距離を比較する
メディアンフィルタ	なし	実装
静止エコー処理	静的処理（開始から終了画像まで一括）	静的処理だけでなく、動的処理も可とした
膨張処理	なし	実装
密集削除※	実装	なし
探査方法	範囲円	範囲円または確率楕円
追跡方法	トラッキング	トラッキング（コスト計算あり）
解像度の設定	マニュアル設定	自動
レンジの設定	マニュアル設定	自動

※密集削除は、（後述する）3点軌跡群を決めた時点でしばしばメモリ不足（当時）となるので、それを回避するため二値化画像のエコー密度を薄める作業を行っている

２．サブテーマ３研究目標

サブテーマ３	「レーダ画像から飛翔軌跡を AI 識別する画像解析手法の確立」
サブテーマ３実施機関	一般財団法人日本気象協会
サブテーマ３目標	サブテーマ３では、取得されたレーダ画像に画像処理技術を施し、新たな動体軌跡を抽出する手法を開発する。また、教師データに基づく AI 学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛翔であることを分別する手法を開発する。さらに、AI 学習を進展させ、種レベルもしくは目レベル（カモメ類、猛禽類など）で飛翔軌跡を分別する手法を開発する。 目標とする識別率は以下の通りである。 ① 鳥類識別率として精度80%以上を、コウモリ類の識別率として精度70%以上とする。 ② 次に、鳥類もしくはコウモリ類と識別された動体軌跡を、さらに60%～70%の識別率で特定分類群まで識別する。

3. サブテーマ3の研究開発内容

3-1 レーダ観測によるレーダ画像の取得

Sバンドレーダ観測では、古野社製Sバンドレーダ（FAR-2167DS、60kW）を使用した。照射半径は8km、GAIN感度50、STC海面反射抑制50、FTC雨雪除去0とした。Xバンドレーダ観測では、古野電気株式会社製Xバンドレーダ（パードレーダ、DRS25A-NXT、25kW）と、株式会社光電製作所製Xバンドレーダ（MDC7920、25kW）を用いた。DRS25A-NXTは、照射半径1kmないし2km、パードモードの「中」を原則とした。MDC7920は、現在エコーを黄色（濃淡なし）、エコートレイル等の過去のエコーを青（濃淡なし）、照射半径4km、GAIN感度7.5、STC海面反射抑制0、FTC雨雪除去0とした。

観測地点と出現種に応じ、これらのレーダを使い分けることとした。

3-2 取得したレーダ画像からノイズ処理等を行う前処理アルゴリズムの開発

ノイズ処理等の前処理として、(a) 画像の二値化、(b) ノイズ除去、(c) 静止エコー除去等があり、以下(a)～(c)に示すアルゴリズムを開発した。

(a) 画像の二値化について、レーダ画像中の色情報をもとに、抽出すべき鳥などが映り込んでいる前景色と、抽出すべきではない背景色をあらかじめ設定し、それらの色を基準色として、レーダ画像の各ピクセルに対して、最も近い基準色を調べることにより、前景と背景を分け、二値化処理を行うこととした（図3-1A）。

(b) ノイズ除去については、二値化画像に対してメディアンフィルタを適用することにより、ノイズ除去を行うこととした。メディアンフィルタは、処理対象の画素の周辺を含む $n \times n$ （ 3×3 ）のエリアに対し、最も頻度の高いピクセルを、中央のピクセルとするフィルタである。この例では、対象エリア内のピクセルのうち、白いピクセルが6つ、黒いピクセルが3つであるため、数の多い白いピクセルを、中央のピクセルの色として採用する（図3-1B）

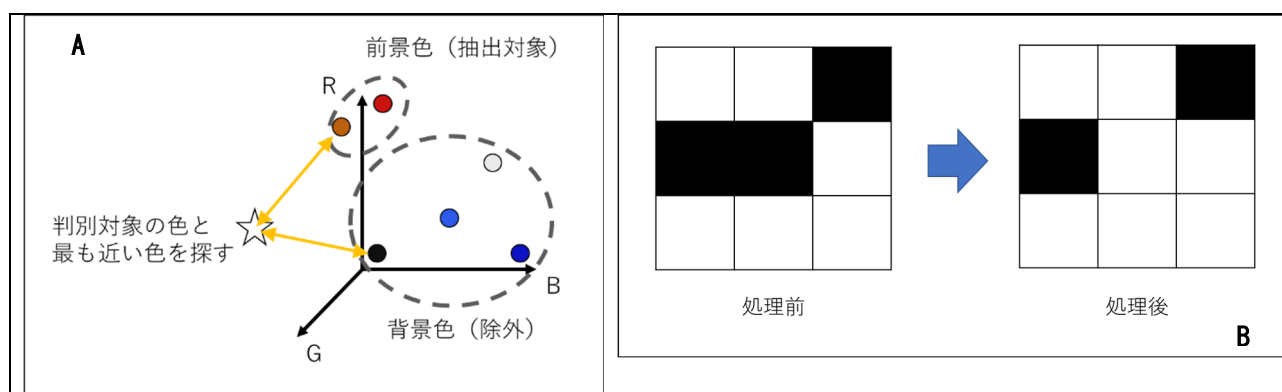


図 3-1 二値化のイメージ (A) とメディアンフィルタの一例 (B)

(c) 静止エコー除去とは、静止していると考えられる物標エコーの除去を行うことである。除去の手法は、「過去 n フレームの画像を使用」する手法と、「指定範囲の画像を使用」する手法を選択できるようにした。前者は、時間的に連続した複数の画像から、処理対象の時点以前の過去 n 枚分の画像を用いて、静止状態にあると考えられるエコーを除去するものである。後者は、時系列順に連続したファイル名の画像から、開始ファイルと終了ファイルを選択することにより、その範囲に含まれる時間のファイルを用いて、移動しないエコー（静止エコー）を特定する。

なお両者には、「静止エコー判定方法」と「膨張静止」の機能を付加した。静止エコー判定方法とは、過去 n 枚分の画像から、同ピクセルにおいて一定の割合で前景エリアとなっているピクセルを静止エコーが映っているピクセルとするが、その割合を指定できるようにした。さらに、静止エコーと判定されたエリアについて、エリアの境界付近のエコーを除去可能とするため、静止エコーのエリアを膨張させる機能を付加した。

これらの効果を検証するため、新アルゴリズムと旧アルゴリズム（BirdStrike）に、同じレーダ画像群を与えて、ノイズ除去の程度を比較した。

3-3 前処理済みのレーダ画像から軌跡を得るトラッキング手法の開発

オブティカルフローとトラッキングの二つのアルゴリズムにおいて、レーダ画像群の追跡の課題を検討した結果、以下の理由により課題に対する対策を考案しやすいトラッキングを採用し、アルゴリズムを開発することとした。

はじめに、物体追跡のアルゴリズムのひとつであるオブティカルフローについて、レーダ画像に適用し、鳥追跡処理の実現性や課題などを検討した。その結果、オブティカルフローは、レーダ画像でしばしば発生する、（鳥類等の）一時的に消失する点の追跡が困難なことが判明した。単純なオブティカルフローでは、一時的に障害物に隠れてしまう物体や、一時的に消失する特徴点を連続的に追跡することができないことが明らかとなった。交通映像にオブティカルフローを適用した事例を、図3-2A に示す。電信柱の存在により、物体追跡が遮られていることが分かる。次に、オブティカルフローは、追跡対象のエコーと特徴点が1対1に対応しない可能性が示唆された。一般に、オブティカルフローは、追跡対象の特徴点として、物体のエッジ部分を抽出する。レーダ画像の単一エコーであっても、ある程度の大きさを持つと、オブティカルフローでは、単一エコーに対しても複数の特徴点が抽出されるため、追跡対象の単一エコーと特徴点が複数となり、1対1として対応しない。図3-2B に示したとおり、赤で示した単一エコーに複数の特徴点が抽出され追跡していた。特徴点を間引くなどの調節は可能であるが、多数の点が出現する場合に、それらを追跡できなくなる可能性が示唆された。

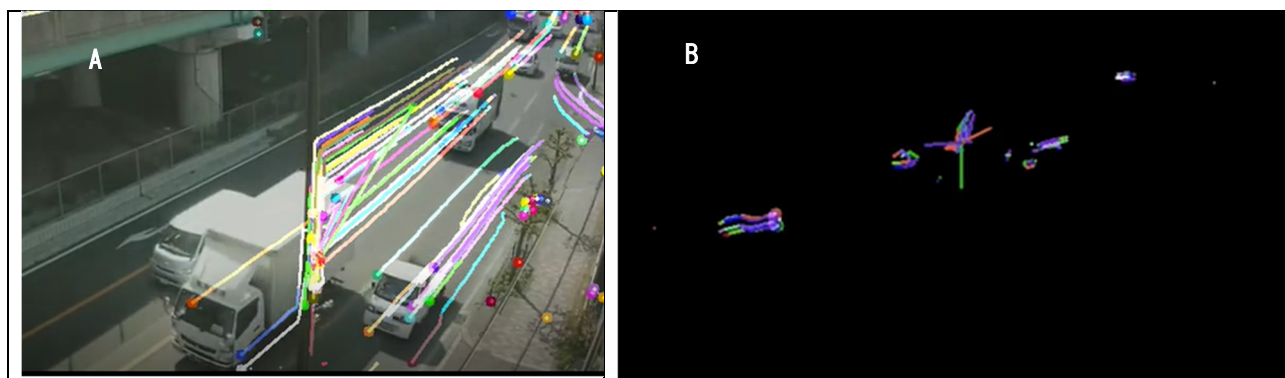


図 3-2 交通映像にオブティカルフローを適用した事例 (A) とレーダ画像の鳥類エコーにオブティカルフローの適用例 (B)

一方のトラッキングについてみると、これまで述べてきた点の消失や一定の大きさを持つ単一エコーの追跡の課題は、アルゴリズムを工夫することで解決可能と考えられた。このことから、トラッキングを基礎とし、追跡アルゴリズムを開発することとした。最終的に、従来の鳥類追跡プログラム

(BirdStrike) のアルゴリズムを参考としつつ、以下の (ア) から (ケ) に示したレーダ画像処理・動体の追跡アルゴリズムのプログラム (BbTracker) を開発した。

【追跡の概要】

(ア) 前処理で得られた二値画像についてクラスタリングを行い、各クラスタの重心を動体の中心とする。

(イ) 動体の追跡には「探査円による追跡」と「確率楕円による追跡」の2つの手法を利用可能とした。

ここで、「探査円による追跡」は以下の通りとした。

(ウ) 追跡する点の組み合わせについては、コスト値を計算し、最も妥当と思われる点の組み合わせを、優先的に軌跡として連結することとした。

(エ) レーダ画像の時系列が続く間、時刻を進めながら、(イ)と(ウ)の操作を繰り返す。

【範囲円による追跡】

「範囲円による追跡」は、「最初の3点から構成される軌跡」として、時刻 $t-2$, $t-1$, t の未追跡の点 P_{t-2} , P_{t-1} , P_t のすべての組み合わせについて、次のように軌跡となりうるものを調べる (図3-3)。

- ・未確定の点 P_{t-2} と P_{t-1} との距離 d が、最大速度とフレーム周期から求めた距離以下である。
- ・ P_{t-1} からベクトル V を伸ばして推定した、時刻 t の推定位置 Q から、追跡範囲内に未確定の点 P_t 点がある。

最大速度以下となる未確定の2点 P_{t-2} と P_{t-1} のすべての組み合わせについて、推定位置 Q を求める。さらに、 Q を中心とした追跡範囲内にある未確定の点を P_t とし、それら3点のすべての組み合わせを、新たな軌跡の候補とする。

以上の条件を満たさない点については、新たな軌跡の候補とはならない。また、以上の条件を満たす未確定の3点の組み合わせについて、 Q と P_t 間の距離をコスト C とする。

「過去に3点以上からなる追跡済みの点がある軌跡」については、以下のように次の時刻の点 P_t を求める（図3-4）。

(カ) 時刻 t より過去の最大5周期前までの軌跡の構成点（確定済みの点もしくは仮想点） $P_{t-5} \sim P_{t-1}$ を用いて、各点間のベクトル $V_1 \sim V_5$ を求める。

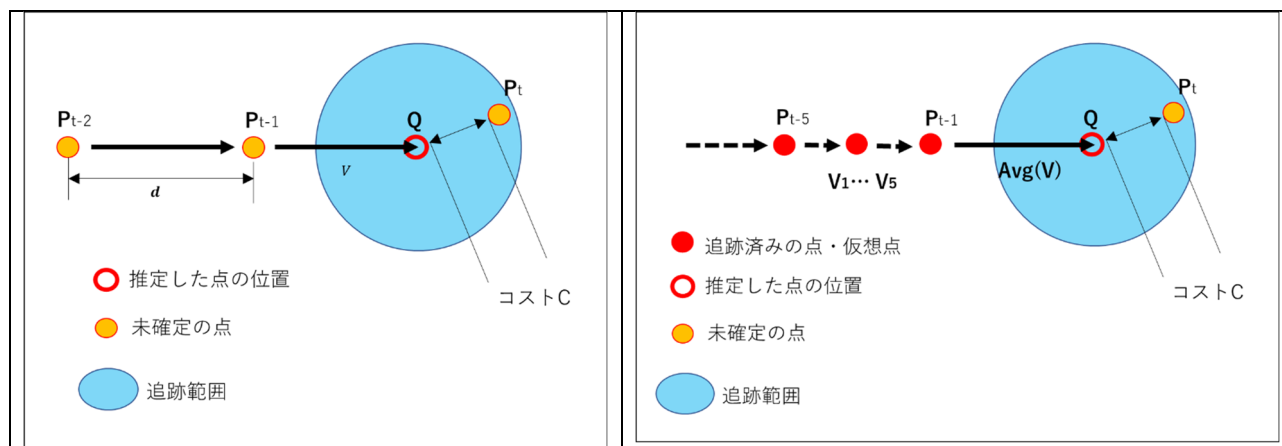


図 3-3 最初の 3 点から構成される軌跡

図 3-4 過去に 3 点以上からなる追跡済みの点がある軌跡

(キ) $V_1 \sim V_5$ から平均速度と平均的な進行方向を求め、ベクトル $Avg(V)$ とする。

(ク) P_{t-1} と $Avg(V)$ から、時刻 t の推定位置 Q を求める。

(ケ) Q から追跡範囲内にある、未追跡のすべて点 P_t に対し、それらの距離を求め、コスト C とする。

【確率楕円による追跡】

サブテーマ 1 の「4-3. レーダ画像解析のための教師データの収集」の（1）鳥類の移動パターンにおいて「測距器データを用いて鳥の移動パターンを猛禽類、水禽類、および海鳥類を対象に再現し…（中略）…散布図から確率楕円を発生させることで、エコートラッキングの探査領域とした」結果をうけて、「確率楕円による追跡」は以下の通りとした。

まず、3点からなる軌跡の追跡は、時刻 $t-2$, $t-1$, t の未追跡の点 P_{t-2} , P_{t-1} , P_t のすべての組み合わせについて、次のように軌跡となりうるものを調べる。

確率楕円による追跡範囲のイメージを図3-5に示す。点 P_{t-1} を起点とした、パス0の確率楕円を組み合わせた形状となること以外は、範囲円による追跡による処理と同様である。追跡範囲の決定方法、および点 Q の位置以外は、範囲円による4点以上からなる軌跡の追跡手順と同様である。

なお、過去に3点以上からなる追跡済みの点があり、最後の点が仮想点でない軌跡については、以下のように次の時刻の点 P_t を求める（図3-6）。

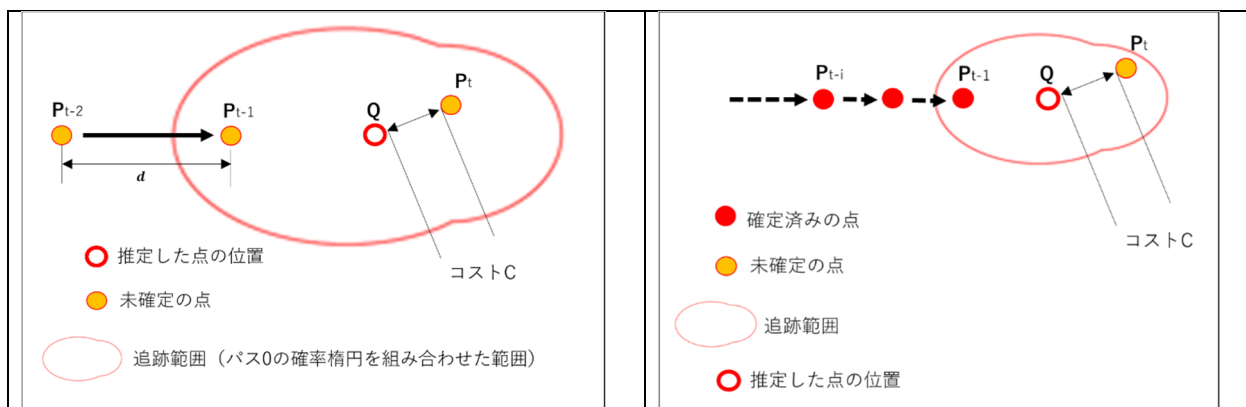


図3-5 確率楕円による追跡範囲のイメージ

図3-6 次の時刻 P_t の求め方

追跡範囲の決定方法、および点 Q の位置以外は、範囲円による4点以上からなる軌跡の追跡手順と同様である。

追跡範囲の決定方法は、図3-7のとおり、点 P_{t-1} を原点とし、確率楕円パラメーターファイルで指定された、pass 0のパラメーターcenter y (同図 C_y), width (同図 W), height (同図 H) により指定される楕円を組み合わせた形状を追跡範囲とする。

点 Q の位置は、複数の楕円のうち最も遠い位置からの中央となるように、点 Q を定める (図3-8)。

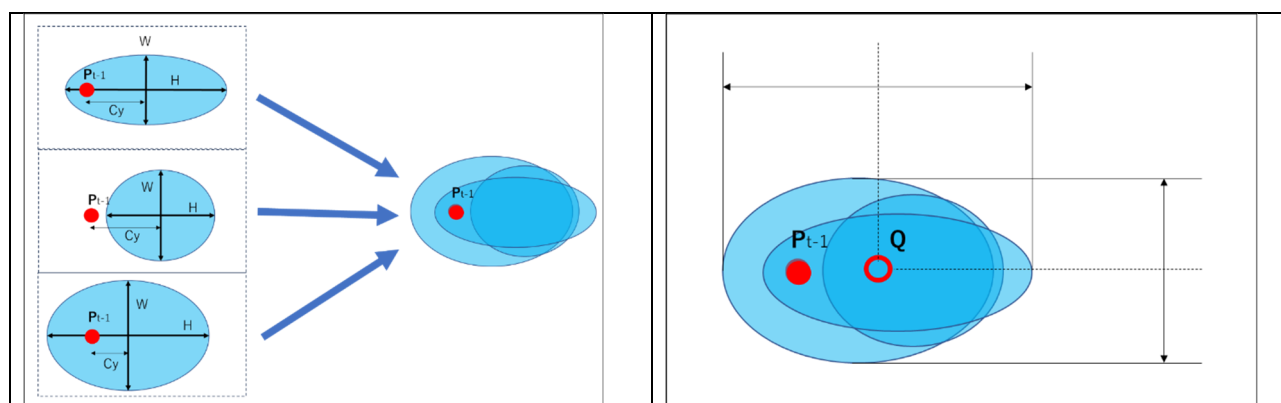


図3-7 確率楕円による追跡範囲の設定 (説明は本文)

図3-8 点 Q の位置 (説明は本文)

追跡対象の最後の点が仮想点である場合、最後の仮想点の連続回数 n (以降「pass n 」という) に応じて、確率楕円の追跡のファイルで指定された、pass n の楕円のパラメーターから、追跡範囲および点 Q を決定する。なお、pass n の数が、同ファイルで指定された回数を超える場合、追跡を打ち切ることとした。それ以外の処理については、4点以上からなる、最後の点が仮想点でない軌跡の追跡と同様である (図3-9)。

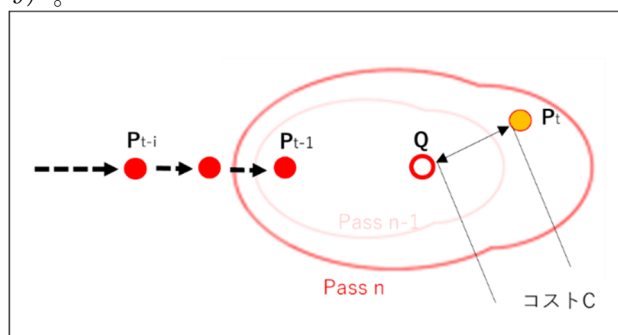


図 3-9 最後の点が仮想点である場合のイメージ

範囲円も確率楕円についても、以降は同様の処理である

- (1) 「最初の3点からなる軌跡の追跡」と「4点以上からなる軌跡の追跡」の処理で求めたすべての軌跡候補の組み合わせについて、 P_t が Q に最も近い (コストが最小) となる組み合わせから順に、優先的に軌跡を確定する。

- (2)すでに他の軌跡として優先的に確定している点を使用した軌跡の組み合わせは、候補から除外する。
- (3)すでに3点以上からなる追跡済みの点がある軌跡について、以上の処理で、時刻 t の点 P_t が決まらなかった場合、過去の最大5フレームの、仮想点を含めた追跡済みの点 ($P_{t-5} \sim P_{t-1}$) から、平均速度と平均的な進行方向を求め、ベクトル $Avg(V)$ とする。
- (4)点 P_{t-1} の位置からベクトル $Avg(V)$ を伸ばすことで、時刻 t の仮想点の位置 P_t を求め、軌跡の列に追加する。
- (5)ただし、画像解析ダイアログの「連続仮想点の上限」で指定したフレーム数の間、一度も画像上の動体が見つかっていない軌跡については、それ以上の仮想点は追加せず、動体の追跡は打ち切る。

最終的に開発したトラッキング法の特徴について、従来アルゴリズム (BirdStrike) と比較し、考察した。

3-4 抽出した軌跡群を用いた識別アルゴリズムの開発

3-4-1 鳥類

サブテーマ1から提供された鳥類の測距器データを用いて PoC (概念実証) を行った。(条件1) ノードが10以上の軌跡であり、(条件2) その条件1を満たす軌跡が50以上得られた種を用いた。その結果、ウミウ79事例、ウミネコ77事例、オオナギ51事例、オオハクチョウ70事例、オオワシ260事例、オジロワシ95事例、トビ113事例、ハチクマ91事例、そしてマガン394事例であった。特徴量は、平均速度とその標準偏差、平均加速度とその標準偏差、平均移動方向とその標準偏差、移動角度量とその標準偏差、および直線度とした。直線度とは、始点と終点の距離を軌跡長で除したもので、直線の場合は1となり、円のように始点と終点が一致すると0になる。R の caret ライブラリを用い、2次の交互作用までとした。全軌跡数のうち80%で訓練(分類器を作成)を行い、残りの20%でテストした。アルゴリズムは、ニューラルネット (NN)、ランダムフォレスト (RF)、およびサポートベクターマシン (SVM) を用いた。正解率 Accuracy は、NN で0.5572、RF で0.6016、SVM で0.6057であったので、実現可能性は高いと判断した。なお、プログラム構築に際して、SVM はデータ量が増えると計算量が膨大になる欠点があるため、RF を採用することとした。

識別の手順として、「軌跡の抽出」を行い、「(軌跡の) 特徴量に基づいた分類器の作成」を実施してから、「作成した分類器による軌跡の識別」を行うこととした。そのため「軌跡を抽出」するトラッキング・プログラム (BbTracker)、「分類器の作成」を行う訓練プログラム (BbTrainer)、「作成した分類器による軌跡の識別」を行う識別プログラム BbClassifier の3つを開発した(これらを総称して Bb シリーズとよぶ)。分類器を作成する訓練プログラムは、国内の様々な環境でレーダ観測が行われることを想定すると、国内に出現しうる全種群をカバーする分類器を用意することは非現実的で、むしろレーダ観測時に目視で観測された種群を中心に分類器を作成したほうが効率的、現実的だと考えたためである。BbTrainer と BbClassifier については、特徴量は、前述と同一(平均速度と標準偏差、平均加速度と標準偏差、平均移動方向と標準偏差、移動角度量とその標準偏差そして直線度)とした。なお、訓練データは、前述の測距データ基準(ノード10以上かつ軌跡数50以上の種群)をやや緩め、ノード10かつ軌跡数10以上の種群として29種群、2958軌跡を用いた。

以上を実装した Bb シリーズを用いて、実際のレーダ画像に適用し、その結果を整理および考察を行った。レーダ画像は、能代で観測した X バンドのもので、波浪がほぼなく2023年3月6日05:58-06:07のものを用いた。サブテーマ3の目的は、レーダ画像をトラッキングした軌跡の識別であることから、トラッキングした軌跡の種別等が判明(ラベリング)している必要がある。そこで、測距器データ(時刻、場所)に対応したレーダ画像群を選定し、トラッキング (BbTracker を使用) により軌跡を抽出し、測距器データとの一致性を確認したところ、比較的良好な対応関係が認められた事例が多数あった(図3-10A-D)。これまでの観測地、使用した3タイプの船舶レーダ (S バンド、X バンド及び固体化 X バンド)、観測条件等を検討した結果、2023年3月上中旬に秋田県能代市沿岸で行った X バンドレーダ (マグネトロン) が、北帰のガンカモ類、ハクチョウ類を多数とらえていたこと、波浪がほとんどない風の日もあり、洋上での飛翔も得られたことなど高質なデータが得られていると判断した。能代の X バンドレーダ (25kW、15kW) のデータに関し、BbTracker によるトラッキングと測距器データの対応関係を確認した結果、測距器データと概ね一致した事例は、能代(鳥類)の X バンドレーダ (25kW) で843事例、出力の異なる X バンドレーダ (15kW) で295事例が確認されたので、これらをラベリング済みの軌跡データとした。

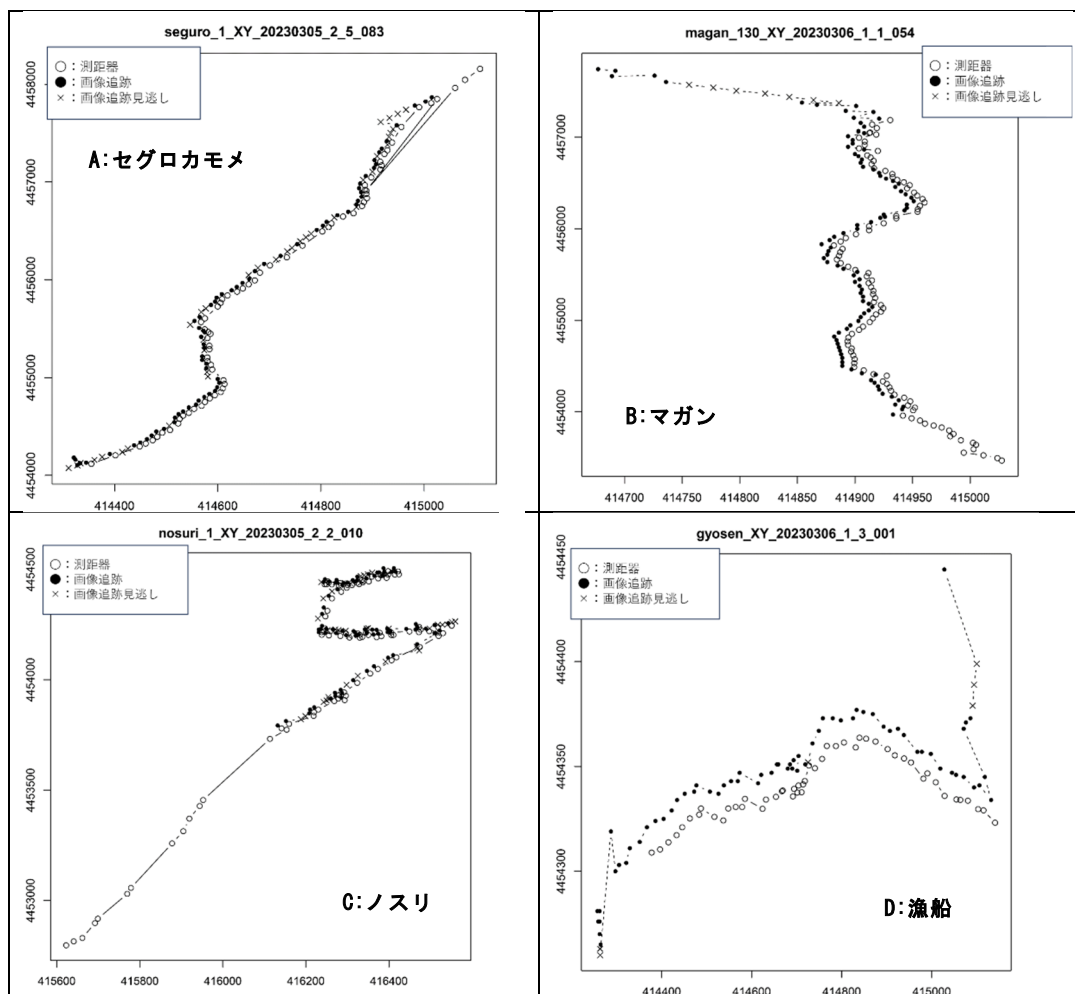


図 3-10 測距器による追跡軌跡 (○) とレーダ画像のトラッキング軌跡 (●) との比較事例
(A: セグロカモメ、B: マガン、C: ノスリ、D: 漁船)

識別の精度検証は以下の通りとした。

- (1) 測距器データだけで分類器を作成し、能代のラベリング済み軌跡データを識別した
- (2) 高精度に識別できた分類群、精度が良くなかった分類群を整理した
- (3) 精度が良くなかった分類群については、後述する二つの原因を考慮して、ラベリング済み軌跡データの一部を用いて分類器を作成して精度を確認した
- (4) 最後に、識別プログラムのロバスト性を把握するため、測距器で得た軌跡をBbTrainerで識別させたのち、軌跡のノードを徐々に減じて、どこまで正答を維持できるかを確認した。

(3) については、レーダ画像をトラッキングした軌跡の識別率は、測距器のような精度が見込めない可能性もある。このとき、ふたつの原因が考えられる。1点目は、解像度の違いである。測距器の誤差は12kmまで5m以下であるのに対して、レーダ軌跡はモニタの解像度に依存する。たとえば、半径4kmレンジで、縦横1000ピクセルのモニタに表示した場合、1ピクセル8mである。また1ピクセルが光るのではなく、(おそらく)視認性を上げるため、周辺数ピクセルをエコーの塊として表示することから、トラッキングで追跡する「エコー塊の重心」はさらに誤差を大きくすることが考えられる。2点目は、対象鳥類の飛翔パターンが環境(観測範囲)に依存する場合である。たとえば、対象鳥類が休息場と餌場を行き来するとき、途中で障害物がなければ直線的な移動となるのに対して、途中で岩礁や防波堤があり、方向転換を余儀なくされる場合は曲線となるだろう。両者の違いは環境依存となるから、前者で訓練をして、後方でテストしても精度は低いことが考えられる。

3-4-2 コウモリ類

コウモリ類のうち、ヤマコウモリについては、GPSは装着したもののデータ回収ができず、レーダ観測は市街地のため実施を見送ったことから、当該種の識別は不可とした。ヒナコウモリについては、

- (1) 前述した鳥類と同様、測距器データだけで分類器を作成、精度を確認した
- (2) ラベリング済みの軌跡データを用いて、精度を確認した

4. サブテーマ3の結果及び考察

4-1 レーダ観測によるレーダ画像の取得

2021年10月26～29日に北海道猿払村知来別の株式会社宗谷岬牧場において、Sバンドレーダによる観測を実施した。対象種は、秋季にサハリンから宗谷海峡をへて渡来する海ワシ類をはじめとする猛禽類とした。2022年1月11～14日に宮城県栗原市の旧大目小学校跡地において、Sバンドレーダ観測を実施した。対象種は、観測地点から約5km 離隔した伊豆沼に越冬するガンカモ類であり、主に早朝の湖岸からの一斉飛翔を対象とした。2022年5月31～6月3日に暑寒別天売焼尻国定公園天売島の千鳥ヶ浦園地駐車場において、Xバンド（バード）レーダ観測を実施した。対象種は、繁殖期にあたるウトウ、ケイマフリ等の海鳥類とした。また、同時期の2022年5月30日～6月3日に天売島の対岸にあたる苫前町の旧風力発電施設跡地において、Sバンドレーダ観測を実施した。2022年9月9日～12日に南房総市市営白浜運動広場専用駐車場において、SバンドレーダとXバンド（バード）レーダ観測を実施した。対象種は、当該地の沖合を飛翔するオオミズナギドリとした。2022年9月23～26日に愛媛県西宇和郡伊方町川之浜せと風の丘パークにおいて、SバンドレーダとXバンド（バード）レーダ観測を実施した。対象種は、ハチクマ、サシバ等、猛禽類の渡りとした。2023年3月2～8日に秋田県能代市落合海岸（以下、能代）において、Sバンドレーダと光電社製Xバンドレーダ観測を実施した。対象種は、ガンカモ類、ハクチョウ類等の早春の渡り（北帰）とした。

4-2 取得したレーダ画像からノイズ処理等の前処理アルゴリズムの開発

新アルゴリズムの効果を検証するため、旧アルゴリズム（BirdStrike）と新アルゴリズムに、同じレーダ画像群を与えて、エコー数の検出能力すなわちノイズ除去の程度を比較した。検出率は表3-1と表3-2に示すとおり、新アルゴリズムが高かった。

表 3-2 画像前処理の比較（鳥類のレーダ画像群）

	教師エコー（数）	検出エコー（数）	検出率%
旧アルゴリズム	13	8	62
新アルゴリズム	13	13	100

表 3-3 画像前処理の比較（コウモリ類のレーダ画像群）

	教師エコー（数）	検出エコー（数）	検出率%
旧アルゴリズム	8	3	38
新アルゴリズム	8	5	63

4-3 前処理後のレーダ画像から軌跡を得るトラッキング手法の開発

「抽出点の総数」についてみると、新アルゴリズムが旧アルゴリズムよりも多く、新アルゴリズムが23205、旧アルゴリズムが14087であった（図3-11A）。ノード数（ID別の点数）の頻度分布（ヒストグラム）についてみると（図3-11B）、新・旧のアルゴリズムは3点の軌跡から追跡を開始するので、3点（ノード3）の軌跡数が最多であり、それ以降、ノード数が増えるに従って軌跡の数は低下する傾向があった。この減少パターンをポアソン回帰してみると、新アルゴリズムは旧アルゴリズムよりも減少の程度は緩やかであった。これはレーダ画像の前処理を含めた追跡アルゴリズムが「より自然に」追跡を行うことができた結果と推察された。追跡軌跡についてみると、旧アルゴリズムは取りこぼした軌跡が多数あると判断できる（図3-12A）。また、最小3点の軌跡群は、旧アルゴリズムでみると、背景画像領域の周辺に多数分布していた（図3-12B）。これに対して、新アルゴリズムのそれは少なかった。このことから、背景画像領域の膨張処理の重要性が示唆された。

探査範囲における次点の決定について、同一レーダ画像群を用い、新アルゴリズムで（従来の）「探査円方式」と「確率楕円方式」を比較した。その結果、得られた軌跡数は確率楕円方式が少なかった（図3-13A）。軌跡が少ないことは、軌跡のノード数が多いことを意味するから、特徴量（平均値や標準偏差）の信頼性が増し、より正解に近い軌跡を絞り込める可能性がある。また、従来の探査円方式では追跡できなかった動体も、確率楕円方式で追跡できた事例があった（図3-13B）ことから、より実態に則した現実的なアルゴリズムの可能性が高い。

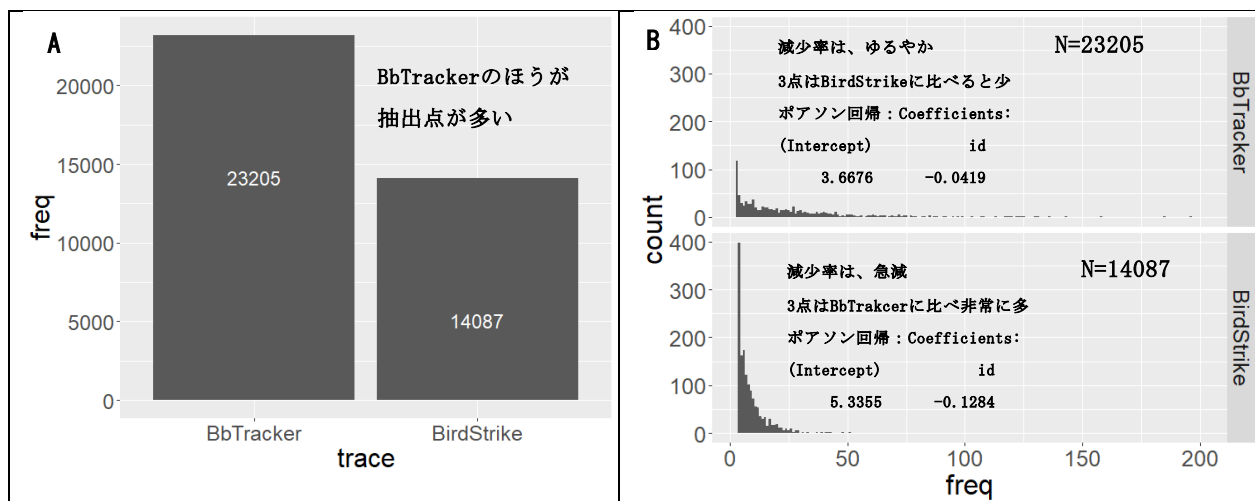


図 3-11 抽出点の総数 (A) とノード数 (ID 別の点数) の頻度分布 (B)

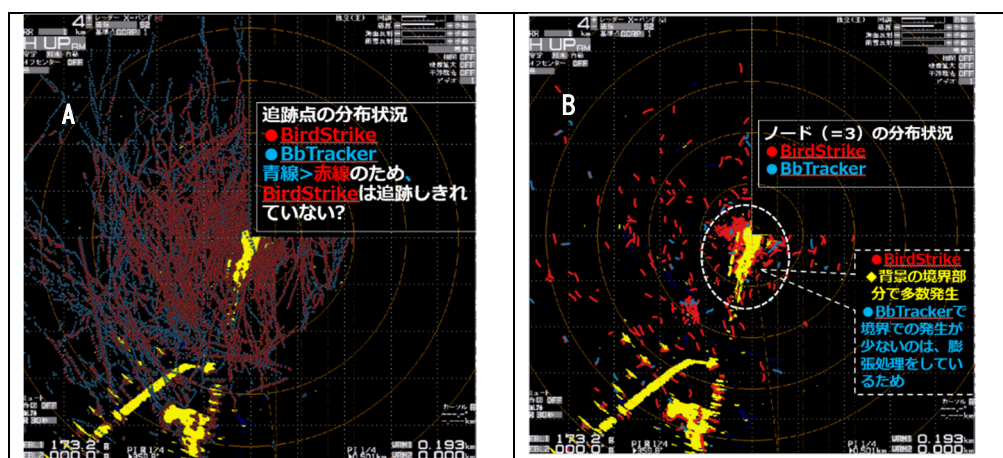


図 3-12 新アルゴリズムと旧 BirdStrike による軌跡の追跡状況の比較 (A: 全ノード、B: ノード 3)

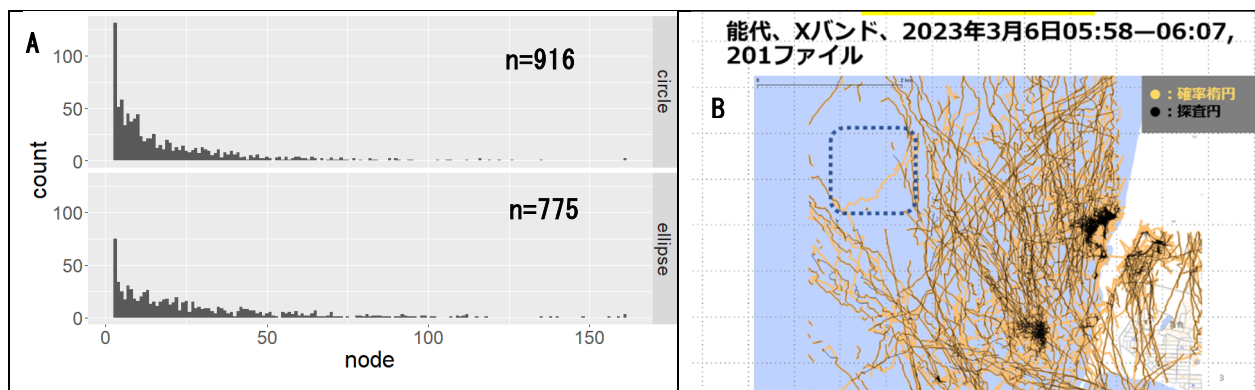


図 3-13 新アルゴリズムにおける探査円と確率楕円のノード数のヒストグラム (A) と追跡状況 (B) (B) の点線枠は確率楕円で追跡した軌跡 (探査円では追跡しなかった)

4-4 得られた軌跡群を用いた識別アルゴリズムの開発

4-4-1 鳥類

BbTrainer を用いて、測距器データだけで分類器を作成し、前述の (種名等が判明した) レーダ画像から抽出した軌跡群を用いて検証したところ、再現率は鳥群 (グループ) で水禽類 0.675、猛禽類 0.837 であったのに対し、海鳥類は 0.037 と極めて低かった (表 3-3)。これは科でも同様であり、カモ科 0.654、タカ科 0.798 に対して、カモメ科は 0.011 と極めて低かった。

表 3-4 訓練を測距器データ、検証をレーダ画像からの
トラッキング軌跡とし、識別単位を群と科とした時の再現率

分類群	名称	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
科	サギ科	0.000	0	11
	アマツバメ科	NaN	0	0
	ウミスズメ科	NaN	0	0
	ウ科	0.040	1	25
	カモメ科	0.011	5	454
	カモ科	0.654	225	344
	カラス科	0	0	119
	サギ科	NaN	0	0
	タカ科	0.798	75	94
	ツバメ科	NaN	0	0
	ハト科	NaN	0	0
	ハヤブサ科	NaN	0	0
	ヒヨドリ科	NaN	0	0
	ミサゴ科	0.000	0	4
	ミズナギドリ科	NaN	0	0
	不明	NaN	0	0
	船舶	0.429	6	14
	飛行機	NaN	0	0
群(グループ)	アマツバメ類	NaN	0	0
	カラス類	0.000	0	119
	サギ類	0.000	0	11
	ツバメ類	NaN	0	0
	ハト類	NaN	0	0
	不明	NaN	0	0
	人工物	0.429	6	14
	水禽類	0.675	249	369
	海鳥類	0.037	17	454
	猛禽類	0.837	82	98
	陸鳥留鳥	NaN	0	0

注：NaN は、N が0の場合で、0除算になるため

海鳥類の再現率の低さは、前述した測距器とレーダ画像の解像度の違い、または環境依存性に起因するものと考えられた。そこでラベリング済みの軌跡データのうち1/2を分類器の作成に用い、残り1/2を検証用とした。その結果を科について表3-4、群について表3-5に示す。カモメ科は0.617、海鳥類についても0.574と精度向上が確認された。

表3-5 識別単位を科としたときの再現率

科	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
サギ科	0.000	0	5
アマツバメ科	NaN	0	0
ウミスズメ科	NaN	0	0
ウ科	0.125	1	8
カモメ科	0.617	116	188
カモ科	0.669	93	139
カラス科	0.030	1	33
サギ科	NaN	0	0
タカ科	0.511	23	45
ツバメ科	NaN	0	0
ハト科	NaN	0	0
ハヤブサ科	NaN	0	0
ヒヨドリ科	NaN	0	0
ミサゴ科	0.000	0	1
ミズナギドリ科	NaN	0	0
不明	NaN	0	0

船舶	0.500	3	6
飛行機	NaN	0	0

注：NaN は、N が0の場合で、0除算になるため

表3-6 識別単位をグループとしたときの再現率

群 (グループ)	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
アマツバメ類	NaN	0	0
カラス類	0.0303	1	33
サギ類	0.000	0	5
ツバメ類	NaN	0	0
ハト類	NaN	0	0
不明	NaN	0	0
人工物	0.167	1	6
水禽類	0.707	104	147
海鳥類	0.574	108	188
猛禽類	0.500	23	46
陸鳥留鳥	NaN	0	0

注：NaN は、N が0の場合で、0除算になるため

最後に、識別プログラムのロバスト性について、例としてマガン（図3-14A）とノスリ（図3-14B）の軌跡を示す。両端から徐々にノードを減じた結果、マガンはノード5、ノスリはノード4でも正答は維持された。別のノスリでもノード4、漁船（一例）ではノード5まで減じてでも正答は維持された。このことから、識別プログラムは頑健であることが示唆された。

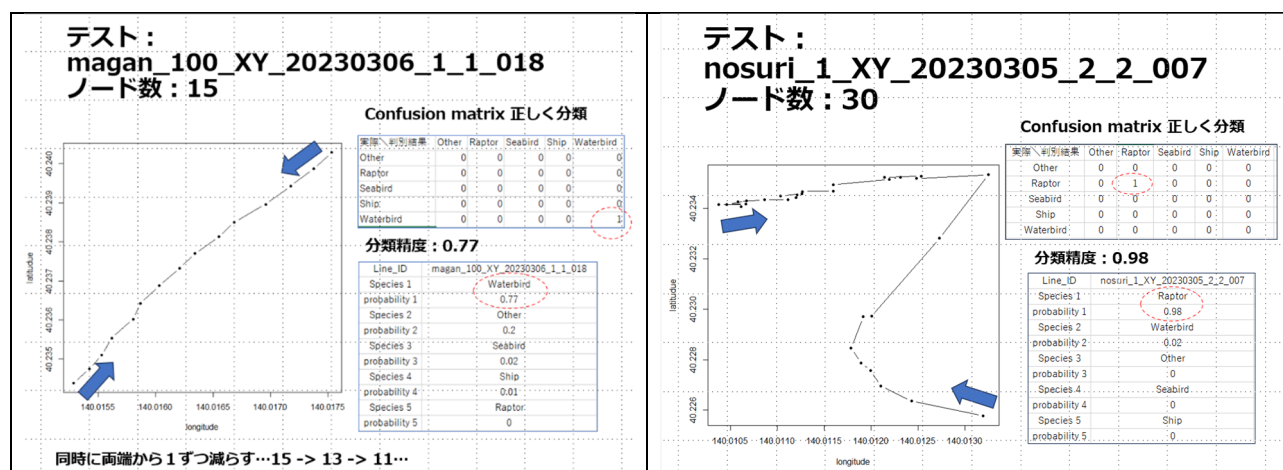


図3-14 識別プログラムのロバスト性を確認するための作業概念図（マガン：A、ノスリ：B）

4-4-2 コウモリ類

コウモリ類のうち、ヤマコウモリについては、GPSは装着したもののデータ回収ができず、レーダ観測は市街地のため実施を見送ったことから、当該種を識別することはできなかった。ヒナコウモリについては、前述した鳥類と同様、BbTrainerにより測距器データだけで分類器を作成し、残りの測距器データでテストしたところ、ヒナコウモリ科について0.909という高い精度を得た（表3-7）。

表3-7 識別単位を科としたときの、ヒナコウモリ科の再現率

科名	再現率 Recall=n/N	予測数 n	真数 N
カモ科	0.990	214	216
ヒナコウモリ科	0.909	30	33
ヒヨドリ科	0.000	0	1

しかしながら、レーダで得られた軌跡が、測距器で得た軌跡のような高い解像度を持たないことは、前述した鳥類同様、コウモリ類でも懸念された。そこで測距器データ（時刻、場所）に対応したレーダ画像群を選定し、トラッキング法により軌跡を抽出し、測距器データとの一致性を検討することとし

た。新潟市高架下でヒナコウモリを対象にした X バンドレーダ（15kW）画像での対応関係を確認したところ、測距器データと概ね一致した事例は303事例が確認された。これらをラベリング済み軌跡データとし、BbTrainer を用いて、このうちの1/2を訓練して分類器を作成し、残りの1/2でテストしたところ、識別率0.793の高い精度を得た（表3-8）。

表3-8 識別単位を科としたときの、ヒナコウモリ科の再現率 1

科名	再現率 Recall=n/N	予測数	真数
		n	N
アマツバメ科	NaN	0	0
カモ科	NaN	0	0
サギ科	NaN	0	0
ツバメ科	NaN	0	0
ヒナコウモリ科	0.793	23	29
ヒヨドリ科	NaN	0	0

注：NaN は、N が0の場合で、0除算になるため

以上を踏まえ、軌跡の抽出プログラム（BbTracker）、訓練（分類器作成）プログラム（BbTrainer）、および分類器を用いて軌跡を識別するプログラム（BbClassifier）を、Bb（Bird&bat）シリーズとして開発することに成功した（図3-15）。

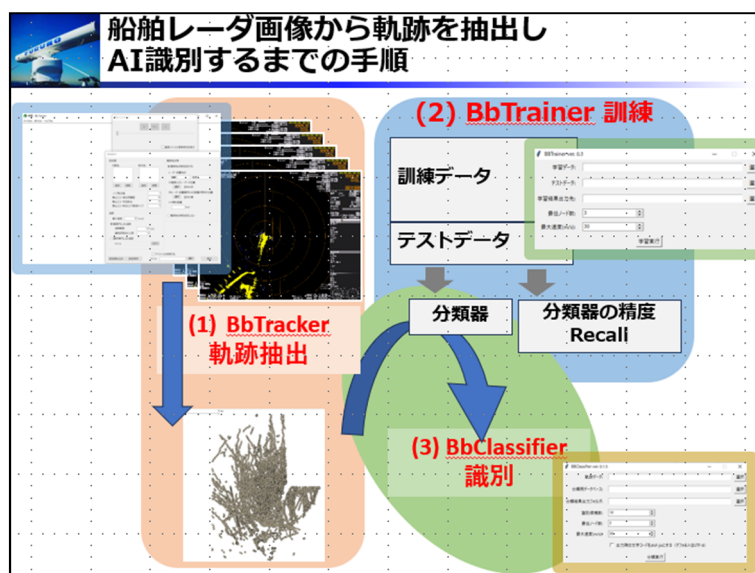


図 3- 15 Bb シリーズ（Tracker, Trainer, Classifier）と処理の概念図

5. サブテーマ 3 研究目標の達成状況

サブテーマ3では、取得されたレーダ画像に画像処理技術を施し、新たな動体軌跡を抽出する手法を開発し、追跡プログラム（BbTracker）を開発した。また、教師データに基づくAI学習を行い、鳥類あるいはコウモリ類の飛翔であることを分別する手法を開発し、それぞれ訓練プログラム（BbTrainer）、識別プログラム（BbClassifier）を開発した。当該のプログラムで、AI学習を進展させ、種グループレベル（カモメ類、猛禽類など）や科レベルで飛翔軌跡を分別することを検証した。

(1) 水禽類70.7%、海鳥類57.4%、猛禽類50%の精度を得た。

(2) 科レベルでは、カモメ科61.7%、カモ科66.9%、タカ科51.1%、ヒナコウモリ科79.3%の精度を得た。

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	6
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	18
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	4
マスコミ等への公表・報道等：	0
研究成果による受賞：	0
その他の成果発表：	0

(2) 誌上発表

< 査読付き論文 >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Mikami K, Kazama K, Kazama M.T, Watanuki Y (2022) Mapping the collision risk between two gull species and offshore wind turbines: Modelling and validation. Journal of Environmental Management 316: 115220. Epub (IF 8.6)
2	Kumagai A, Kazama K, Mikami K, Watanuki Y (2023) Black-tailed gulls alter their flight height and airspeed according to wind conditions during their coastal commuting trips. Mar Ecol Prog Ser 723: 201-212, doi.org/10.3354/meps14431
3	Kamata T, Sato H, Mukai H, Sato T, Yamada S, & Sekijima T (2023) Sensitivity analysis of collision risk at wind turbines based on flight altitude of migratory waterbirds. Ecological Solutions and Evidence, 4(2), e12222.
4	Kamata T, Sato T, Sekijima T (under review) Field validation of avian radar surveys: effects of differences in species and flock sizes on echoes. Scientific reports
5	関島恒夫、望月翔太、綿貫豊、河口洋一（2023）特集：鳥衝突を未然に防ぐセンシティブティマップの普及に向けて 巻頭言：鳥衝突を未然に防ぐ脆弱性マップ（sensitivity map）の普及に向けて．保全生態学研究（Japanese Journal of Conservation Ecology） 28：229-232

6	関島恒夫、浦達也、赤坂卓美、風間健太郎、河口洋一、綿貫豊（2023）総説 鳥類に対する風力発電施設の影響を未然に防ぐセンシビリティマップとその活用方法. 保全生態学研究 (Japanese Journal of Conservation Ecology) 28 : 233-250
---	--

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
	特に記載すべき事項はない。

< 査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野） >

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

< その他誌上発表（査読なし） >

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
7	関島恒夫、生物多様性および生態系サービスに及ぼす風力発電の影響。第69回日本生態学会（2022年3月14日、オンライン開催）
8	鎌田泰斗、富田健斗、早坂圭司、山本麻希、小山偲歩、依田憲、関島恒夫、洋上風力発電のリスク評価にむけた機械学習によるオオミズナギドリの飛行経路予測。第69回日本生態学会（2022年3月14日、オンライン開催）
9	鎌田泰斗、オオミズナギドリの感度マップについて。Dr. Aonghais Cook wind farm seminar（2022年7月6日、オンライン開催）
10	三上かつら、カモメ2種の衝突感度マッピングについて。Dr. Aonghais Cook wind farm seminar（2022年7月6日、オンライン開催）
11	三上かつら、風間健太郎、風間麻未、綿貫豊、ウミネコは防波堤の上をなぞるように飛ぶ。日本鳥学会2022年度大会（2022年11月、網走市）
12	酒井理佐、大門純平、綿貫豊、ウトウは魚種に合わせ広い範囲で柔軟に採食する。日本鳥学会2022年度大会（2022年11月、網走市）
13	馬鋭、熊谷文、綿貫豊、東京農大網走ドローンで採餌集群タイプとウミネコの採食行動を調べる。日本鳥学会2022年度大会（2022年11月、網走市）
14	鎌田泰斗、佐藤雄大、河口洋一、島田泰夫、黒田幸夫、三上かつら、綿貫豊、関島恒夫、船舶用レーダーによる鳥類の種分類を目的とした飛翔軌跡の特徴量比較。日本鳥学会2022年度大会（2022年11月、網走市）
15	富田健斗、鎌田泰斗、早坂圭司、小山偲歩、依田憲、山本麻希、関島恒夫、洋上風車建設リスク評価に向けた東日本の主要な繁殖地におけるオオミズナギドリの飛翔経路予測。日本鳥学会2022年度大会（2022年11月、網走市）
16	三上かつら、風間健太郎、綿貫豊、ウミネコは情報探索のためすこしだけゆっくり飛ぶか？日本鳥学会2023年度大会（2023年9月16～17日、金沢）
17	河村佳世、鎌田泰斗、佐藤雄大、島田泰夫、河口洋一、関島恒夫、風力発電の環境アセスメントへの利用にむけたレーダー鳥調査手法の開発。第26回応用生態工学会（2023年9月21日、京都大学）
18	河村佳世、鎌田泰斗、佐藤雄大、島田泰夫、河口洋一、関島恒夫、レーダーによる鳥調査の野外検証 -鳥の物標検出に影響を及ぼす要因分析-。第26回応用生態工学会（2023年9月21日、京都大学）

19	三上かつら、ウミネコの飛行行動は海岸線からの距離および昼夜で異なるか？海鳥研究集会（2024年3月10日、東京大学・大気海洋研究所）
20	関島恒夫、河口洋一、綿貫豊、レーダデータを用いて鳥類の環境影響評価を試行する．一般公開シンポジウム「レーダデータを用いた鳥類&コウモリ類の環境影響評価手法を考える」（2024年3月17日、オンライン開催）

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
21	佐藤雄大、河口洋一、赤坂卓美、船舶レーダーはコウモリの飛翔個体数を捉えることができるのか？第26回応用生態工学会（2023年9月21日、京都大学）
22	佐藤雄大、鎌田泰斗、レーダによる鳥とコウモリの観測手法．一般公開シンポジウム「レーダデータを用いた鳥類&コウモリ類の環境影響評価手法を考える」（2024年3月17日、オンライン開催）

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（学会等・査読なし）
23	工藤嘉晃、環境アセスメントにおけるレーダ調査の現状と課題．一般公開シンポジウム「レーダデータを用いた鳥類&コウモリ類の環境影響評価手法を考える」（2024年3月17日、オンライン開催）
24	島田泰夫、レーダ画像のトラッキングとAI分類．一般公開シンポジウム「レーダデータを用いた鳥類&コウモリ類の環境影響評価手法を考える」（2024年3月17日、オンライン開催）

(4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
	特に記載すべき事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
25	2022	イヌワシフォーラム「猛禽類の頂点“イヌワシ”について」（注；講演の中で風力発電に対する鳥類の影響について紹介）（2022年7月23日、岩手県石巻地区森林組合研修センター）
26	2022	綿貫 豊、北海道SDGs推進プラットフォーム第8回研究会（2023）海鳥をとおして見えてくる海と人間の関係
27	2023	一般公開シンポジウム「レーダデータを用いた鳥類&コウモリ類の環境影響評価手法を考える」（2024年3月17日、ウェビナーによるオンライン開催、視聴者約250名）

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ2】の実施状況
28	2022	徳島大学理工学部における学生授業「環境生態学」において研究内容を紹介（2022年7月6日、聴講人数 59名）

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ3】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 3】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

Abstract

[Research Title]

Development of the Radar Image Analysis System for Distinguishing a Flight of Birds and Bats Aiming at an Application to Environmental Impact Assessment

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Sekijima Tsuneo
(PI ORCID) :	ORCID0000-0002-6911-3957
Principal Institution :	Niigata University 8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181 JAPAN Tel: +81-25-262-6623 E-mail: sekijima@gs.niigata-u.ac.jp
Cooperated by :	Hokkaidou University, Tokushima University, Japan Weather Association
Keywords :	AI classification, Flying animal, S-band radar, Collision risk assessment, X-band radar

[Abstract]

In order to achieve carbon neutrality by 2050, Japan needs to rapidly deploy many renewable-energy facilities. Because of its location, surrounded by the sea, Japan has many suitable areas for the development of offshore wind farms. Offshore power generation is expected to play a major role in Japan's future electricity supply. As offshore environmental impact assessment surveys are far more difficult to conduct than those onshore, the development of a methodology suitable for potential offshore wind farms is both urgent and essential.

Our aim was to develop an image analysis system capable of identifying the flight patterns of birds and bats based on echo information obtained from a radar capable of capturing signals from objects over a wide area of open water. Such a system (without using visual observations) offers a new survey technique and will establish a method for evaluating environmental impact using flight trajectories of flying animals.

As a first step, rangefinders were used to acquire multiple flight trajectories of various bird and bat species. This information provided the training data for the development of an AI discrimination system. Then, as a second step, a tracking program (BbTracker) was developed to extract motion trajectories by applying special image-processing techniques to radar images acquired at radar survey sites. Two further programs (BbTrainer and BbClassifier) were developed to discriminate and identify the flight patterns of birds and bats. These programs used AI learning, based on the training data obtained from the first step, to recognise the echo trails drawn by BbTracker. Using these three programs, we attempted to identify the species of flying animals in radar images taken off the coast of Noshiro, Akita Prefecture.

The discrimination rates for various species groups were: 70.7% for waterfowl, 57.4% for seabirds, 50% for raptors, and 79.3% for bats. At the family level discrimination rates were 61.7% for Laridae, 66.9% for Anatidae, 51.1% for Accipitridae, and 79.3% for Vespertilionidae. The results indicate that

species groups can be identified relatively accurately.

As a final step, the annual number of collisions between flying organisms and potential wind farm turbines was predicted (based on the trajectory lengths determined for the various species groups in the second step) in order to attempt a hypothetical environmental impact assessment using automated radar data.

The radar-image-analysis system developed in this study offers an effective tool for environmental impact assessment for offshore wind farms.

[References]

Kamata T, Sato T, Sekijima T (under review) 'Field validation of avian radar surveys: effects of differences in species and flock sizes on echoes' Scientific reports

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
採択時コメント「風力発電のバードストライクのアセスメントツールの確立という点で評価できる。またこれまでによくわからなかった渡り鳥の種の特定と渡り特性が把握でき、保全上も、生態学的にも興味深い。前テーマのテレメトリーの成果をどのように利用するのか、関連性やこの研究の位置づけを明らかにしてほしい。レーダーは日進月歩なので、最新の情報サポートが必要と思われる。」	前テーマでは、取得したGPSロガーのデータを活用し、予め衝突リスクの高いエリアを見える化するセンシティビティマップの開発を行いました。本研究では、レーダ画像から軌跡をトラッキングするシステムの開発と、その軌跡をAIにより種分類するシステムの開発を目指しています。AI分類する際の教師データは、測距器あるいはGPSロガーを用い、予め種名が分かっている飛翔軌跡を取得する必要があります。測距器で飛翔軌跡が取得できないオオミズナギドリなどの海鳥に対し、前テーマで取得したGPSロガーのデータを活用しました。
採択時コメント「スライドでは、生物情報と一括りで論じておられるが、具体的な内容がわからなかった。コウモリの物体認識能は、種にかかわらず捕らえることができるのか、特定種のみ、と主張されているが、アセスメントとしての実証に関連して、全体への拡張が可能なかどうか、検討してほしい。」	AI分類では軌跡から抽出される特徴量のみを変数としてもちいるため、それ以外の情報も加えることで種分類精度を向上させようと考えます。プロジェクトではデータとしての外挿性や利便性を考慮して、地域特有の種組成比を現地調査から取得し、条件付き確率としてAI種分類結果を補正することで高精度化を図りました。本研究では、ヒナコウモリとヤマコウモリの2種に絞りましたが、理由は、この2種が風力発電のハイリスク種として位置づけられていること、加えて、多くのコウモリ類に対し飛翔軌跡情報を取得することは困難と考えたことから、鳥類との分類方法を確立することを目的として、コウモリ類を代表する種として上記2種を選択しました。
採択時コメント「教師データの作成が AI 判別の成否に繋がりそうに思うので、STEP 2 を重視していただけたらと思う。」	教師データの質的向上を図るために、汎用性および地域性を考慮したデータ取得を試みました。
採択時コメント「我が国の風力発電においてコウモリ類が大きな問題となっているのかどうか、希少コウモリ類の被害状況に関する証憑資料や学術文献の提示が必要であると思う。鳥類に関しては、これまでも同様の研究が行われてきたが、それらと本研究との違いをより明確にするべきだと思った。」	レーダーを用いて鳥類調査をする研究は古くからあり、手法確立が進められてきました。近年では、AIを用いた分類等も行われるようになってきています。しかしながら、2000年代をピークにその普及率は低下しています。原因はさまざま考えられますが、主に、調査の根幹となる鳥検出の定量性や、オペレータ依存の調査手法、再現性のある調査手順が公開されていないなどが考えられます。本課題では、レーダーの設置方法、システム設定、定量基

	準、分類と環境アセスに必要な要素をパッケージしたものとなっており、その製品化も含めレーダー技術の汎用化のための技術開発とその普及に重きを置いたものになっています。 コウモリについては、国内では衝突事故の実態がほとんど公表されておらず、学術文献として報告されているものは少ないのが現状である。平成26-28年度に実施された「環境アセスメント迅速化研究開発事業・順応的管理手法の開発」（NEDO）の調査・報告によりますと、東北地方の10事業地において、計7種のコウモリ類の衝突事例が報告され、その中には国・地方自治体のレッドリストに掲載されている種も含まれています。また、衝突事例数も多く、今後も風力発電施設が増設されていくことを考慮すると、その影響はさらに大きくなることが懸念されています。
採択時コメント「船舶レーダーを用いた調査研究に焦点を絞り、対象として成果が積み重なってきた海鳥を対象とした研究にした方が理解され易いと考え。」	本研究では、海域および陸域の両方の飛翔動物を対象にしましたが、その理由として、多様な飛翔動物の飛翔パターンを教師データとして活用することにより、分類精度を高めることができると判断しました。さらに、どのような種群で種判別ができやすく、どのような種群では難しいのかを明らかにすることも、本研究の目的であると考えて、陸域も含めた多様な環境を調査対象としました。
採択時コメント「近年の AI を万能とするの風潮には危ういものがある。AI の有効性とその限界（どこまでなら使えるか）も示してもらえるとありがたい。」	ご指摘のように、AI万能的な風潮が社会に漂っていることは否めません。本研究で取り組むレーダ画像の解析に対しても、AI学習により、どの程度まで種の分別率を向上させることができるのか検証していくことになります。一連の取り組みを通して、AI分類の有用性や限界が見えてくると考えています。
採択時コメント「行政ニーズが高いことは理解するが、研究成果物がきちんと出されていないのではないかと、というのが大変気になった。」	本研究で開発したトラッキングシステムおよびAI分類システムについては商品化を行い、今後の風力アセスの手法に適用いただくことを期待しています。また、研究論文としての成果は現在受理が6報であり、その他に関しても取りまとめができるところから、鋭意投稿準備を進めています。
中間評価コメント「レーダ画像解析という新たなアセスメント手法の開発をめざすチャレンジングな課題である。これまでの研究成果をふまえて、研究期間内に達成が見込まれる具体的な目標を定めて、研究のロードマップを提示することを期待する。」	ご意見を踏まえ、各サブテーマで明確なロードマップを作成しました。最終的に、データ画像から飛翔動物の分別を行い、環境アセスメントに活かすというチャレンジングな目標に対し、総じて目標を上回る成果を達成できたと考えています。

中間評価コメント「レーダーの利用という技術的にも難しい手法しかない中で、特徴ある飛翔パターンとあるが、同じような行動をする鳥が入る可能性はないのだろうか。半導体不足は、解消できるのだろうか。重要であり、実用化が必要であるが、目標をどこに据えるか。AI が利用できるまでの基礎資料の収集と活用など、研究目標を定める必要を感じる。」	ご意見を踏まえ、各サブテーマの研究目標を改めて確認しました。目標の達成に向け本研究を進めた結果、測距器を用いた高精度な飛翔動物の膨大な飛翔軌跡を取得することができ、それを教師データにしたAI分類器を開発することができました。最終的に当初定めた目標を達成できたと考えています。
中間評価コメント「そもそもレーダーを使ったアプローチがどこまで種判別あるいは飛翔の解析に有効なのかが十分見えない。つまり、この方向性でどこまで進みうるのかやや危惧する。」	ご意見のとおり、レーダ画像から種判別する取り組みは国内外を通して初めての試みであり、チャレンジングな課題と考えています。最終的に、本研究を通して、比較的高い精度で種グループの判別が可能な分類器を開発することができたことから、今後の洋上風力の環境アセスメントの手法として、レーダ技術は活用できると判断しています。
中間評価コメント「困難な課題に挑戦しているところだが、今のところ、目に見える成果が十分には出てきていない印象である。しかし、今後の洋上風力発電を推進するためには必要な研究課題だと考える。ただし、コウモリ類と鳥類では、ニーズは海上では違うのではないかと考える。つまり、コウモリと洋上風力との関係は薄いのではないだろうか。」	試行錯誤しながらの研究展開でしたので、中間評価の段階では、十分な成果が出ていないという印象を与えたかもしれません。しかし、プロジェクト1・2年目において、測距器で取得した膨大かつ高精度な飛翔軌跡情報が取得できたことから、それをもとにレーダ画像から飛翔動物の軌跡を抽出するプログラムや、それを教師データに活用した分類プログラムの開発に展開することができ、当初目標を達成できたと判断しています。なお、コウモリ類と洋上風力との関係は薄いのではないかという指摘に関し、既往の報告でも、コウモリ類が洋上を渡りルートして利用していたり、採餌環境として利用することが報告されており、風力発電建設の影響は少なからずあると考えています。また、本技術が確立されることで、洋上におけるコウモリ類の定量的な観測が可能となりますので、洋上風力でコウモリ類をどの程度重要視すべきかという議論が可能になると考えます。
中間評価コメント「今後、予定されている目標は、より困難な課題への挑戦となりそうである。政策上、必要なので、是非、頑張ってください。」	プロジェクトを進める上で、励ましとなるご意見ありがとうございました。今後、着床式だけでなく、沖合の浮体式風力発電が導入されていく見通しの中で、広域の海洋をどのように評価するかが課題となっています。数キロ先までを瞬時に把握できるレーダ技術は、洋上風力アセスに不可欠な技術であり、それをどこまで社会実装できるレベルまで引き上げることができるかがポイントになります。今回の研究プロジェクトを通して得られた成果が、今後の洋上風力アセスの手法に活かせることを期待しています。
中間評価コメント「レーダ画像の解析だけからでは、鳥類の種の判別までおこなうのは、まだまだ困難であるように見える。レーダ情報と他の手法を組み合わせて、環境アセスに利用できるような手法が開発されることを期	中間評価における成果の中でも紹介いたしましたが、飛翔動物を分別する手段として、レーダ画像のみから実施するわけではなく、鳥類あるいはコウモリ類であることが予め分かっている飛翔データを、測距器およびGPSログ

待する。また、洋上風力発電の環境アセスが目的ではあるが、他の目的にも利用できるような基本情報が蓄積できれば最終的に成果として評価できるのではないかと思います。」	ーを用いて取得した上で、それを教師データとして種分類を行う手順を採用しました。本研究で開発したレーダ画像解析システムは環境アセスのみならず、広域に飛翔動物の空間利用を把握できるため、景観や地形に応答する鳥類やコウモリ類の飛翔行動に関わる生態特性の理解にも繋がると考えています。
中間評価コメント「使えないレーダーデータもアセスメントで提示しているのがまずいのではないか。機器の革命的な開発が必要ではないか。レーダーにこだわりすぎるのはいかがだろうか。」	カーボンニュートラル2050の実現に向け、今後、洋上風力は大量導入が見込める浮体式にシフトしていくと推察されます。広域の海域をモニタリングする手法として、船舶を利用した観察は技術的な限界がある中、レーダ技術は現在考えられる数少ない（唯一といってもよい）、洋上を広域かつ効率的にモニタリングする手法と考えられます。課題は、レーダで捕捉されたエコーの正体が不明なところであり、この点を解決することができれば、モニタリング技術としてのブレイクスルーとなると考えています。本研究を通して開発された移動軌跡のトラッキングシステムおよびAIを用いた種分類システムは、今後の洋上風力アセスに有用な手法になると考えています。
中間評価コメント「レーダーデータを利用して鳥類・コウモリ類を識別するというチャレンジングな課題である。新型コロナウイルス感染拡大の影響もあり、一部進捗が遅れているようだが、残る期間内にレーダーデータでどこまで鳥類・コウモリ類の飛翔を識別できるかを提示できるよう研究を進めていただきたい。」	プロジェクトを進める上で、励ましとなるご意見ありがとうございました。最終的な成果として、種グループの判別までは高精度に分類するシステムを開発することができました。
中間評価コメント「飛行生物と舟の区別をステップ1、生物を3種類程度に分けるのをステップ2と考えて、ステップ1まで行くだけでも大きな成果だと思える。」	プロジェクトを進める上で、励ましとなるご意見ありがとうございました。最終的な成果として、種グループの判別までは高精度に分類するシステムを開発することができました。
中間評価コメント「本研究は、所期の成果をあげており、洋上風力発電所の環境影響評価に有用な解析技術を提供できるものと期待できる。」	プロジェクトを進める上で、励ましとなるご意見ありがとうございました。最終的な成果として、種グループの判別までは高精度に分類するシステムを開発することができました。本研究の成果は、洋上風力発電所の環境影響評価に有用な解析技術を提供できると考えています。
中間評価コメント「チャレンジングであるが、レーダーによる判別精度には限界点もある気がする。対象になっているのはいずれも大型鳥類で、ツグミやアトリは検出できないのではないか。その限界を把握する意義はあるかもしれない。」	レーダ画像による種の判別には限界があることもわかりました。今回の研究では、風力発電の影響評価でしばしば影響が懸念される中型・大型鳥類の個体追跡とその分別に焦点をおきました。ツグミやアトリなどの小型鳥類に対する風力発電の影響も懸念されるところですが、レーダ技術を用いた評価の可能性については、今後の課題と考えます。

中間評価コメント「挑戦的な課題であることが、今回のヒアリングでより明確になってきたと感じる。当初の目標達成に努めるよう、一層注力して頂きたい。」	プロジェクトを進める上で、励ましとなるご意見ありがとうございました。最終的な成果として、種グループの判別までは高精度に分類するシステムを開発することができました。
中間評価コメント「技術的に難しい目標を設定し、実用化のために解決すべき課題が多い研究に挑戦していることを評価する。可能ならレーダ画像だけにこだわらず、他の技術（カメラなど）で得られる画像の利用可能性も改めて検討してほしい。」	プロジェクトを進める上で、励ましとなるご意見ありがとうございました。最終的な成果として、種グループの判別までは高精度に分類するシステムを開発することができました。カメラを用いた画像解析も風車に対する衝突確認の手法として重要であり、各所で行われているところですが、本研究ではレーダ画像による種判別システムの開発で手一杯であり、そこまで及ぶことができませんでした。ご理解いただければ幸いです。