

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

4-1803

洋上風力発電所の建設から主要な海鳥繁殖地を守るセンシティブティマップの開発
(JPMERF20184003)
平成30年度～令和3年度

Development of Bird Sensitivity Mapping for Protecting Main Colonies of Seabirds from Offshore
Wind Farm

〈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

〈研究協力機関〉
長岡技術科学大学
帯広畜産大学
名古屋大学
福島大学
千葉県立中央博物館
(一財)電力中央研究所

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ. 成果の概要」の図表番号は「0. 通し番号」としております。なお、「Ⅱ. 成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ. 成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号. 通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和3年7月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	2
2. 研究開発目的	2
3. 研究目標	3
4. 研究開発内容	4
5. 研究成果	9
5-1. 成果の概要	9
5-2. 環境政策等への貢献	16
5-3. 研究目標の達成状況	17
6. 研究成果の発表状況	17
6-1. 査読付き論文	17
6-2. 知的財産権	18
6-3. その他発表件数	18
7. 国際共同研究等の状況	18
8. 研究者略歴	18
II. 成果の詳細	
II-1 本州沿岸域におけるオオミズナギドリ等海鳥3種のセンシティブティマップ開発と 汎用性の検証（国立大学法人新潟大学）	19
要旨	
1. 研究開発目的	20
2. 研究目標	20
3. 研究開発内容	21
4. 結果及び考察	29
5. 研究目標の達成状況	49
6. 引用文献	49
II-2 道北海域におけるカモメ類など海鳥3種のセンシティブティマップ汎用性の検証 （国立大学法人北海道大学）	51
要旨	
1. 研究開発目的	51
2. 研究目標	51
3. 研究開発内容	52
4. 結果及び考察	55
5. 研究目標の達成状況	64
6. 引用文献	65

Ⅱ－3 道東沿岸域におけるウトウ等の海鳥センシティブティマップの開発と汎用性の検証 (国立大学法人徳島大学)	67
要旨	
1. 研究開発目的	67
2. 研究目標	68
3. 研究開発内容	69
4. 結果及び考察	74
5. 研究目標の達成状況	81
6. 引用文献	81
Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細	83
Ⅳ. 英文Abstract	87

I. 成果の概要

課題名 4-1803 洋上風力発電所の建設から主要な海鳥繁殖地を守る
センシティブティマップの開発

課題代表者名 関島 恒夫 (国立大学法人新潟大学 自然科学系 教授)

重点課題 主: 【重点課題⑫】 生物多様性の保全とそれに資する科学的知見の充実に向けた研究・
技術開発

副: 【重点課題】 なし

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) (4-1) 洋上風力発電所等における海生生物及び海鳥類等の
環境影響評価に係る環境調査手法の開発

研究実施期間 平成30年度～令和2年度
但し、新型コロナウイルスの影響のため、令和3年5月まで延長

研究経費 (円)

	契約額	実績額 (前事業年度繰越分支出額含む)
平成30年度	36,000,000	34,665,710
令和1年度	40,000,000	39,743,833
令和2年度	37,780,762	39,371,219
令和3年度	2,219,238	2,075,573
合計額	116,000,000	115,856,335

本研究のキーワード 風力発電、環境アセスメント、機械学習、センシティブティマップ、鳥衝突、
空間統計モデリング、海鳥

研究体制

(サブテーマ1) 本州沿岸域におけるオオミズナギドリ等海鳥3種のセンシティブティマップ開発と
汎用性の検証 (新潟大学)

(サブテーマ2) 道北海域におけるカモメ類など海鳥3種のセンシティブティマップ汎用性の検証
(北海道大学)

(サブテーマ3) 道東沿岸域におけるウトウ等の海鳥センシティブティマップの開発と
汎用性の検証 (徳島大学)

研究協力機関

長岡技術科学大学

帯広畜産大学

名古屋大学

福島大学

千葉県立中央博物館

(一財) 電力中央研究所

1. はじめに（研究背景等）

福島第一原子力発電所の事故以来、脱原発の機運の高まりや固定買い取り制度の導入により、わが国では太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー事業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道北地方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、海岸線や尾根沿いを中心に多数の風力発電事業が計画されてきたが、系統容量を大幅に改善するなどの措置を取らない限り、将来的に発電所立地が確保できないなどの弊害も浮かび上がってきている。一方、海に囲まれた日本では、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、洋上風力の普及に向けた新法「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律」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、今後、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。一方で、風力発電の推進とともに、国内外で周辺環境に及ぼす風車の影響が顕在化している。特に鳥類については、風力発電に適した地点が渡り鳥の移動ルートや稀少鳥類の生息地と重なることから、風車ブレードに鳥が衝突する事故が世界的に多発している。このような環境に対する影響の懸念から、平成23年11月に風力発電が法対象事業に追加され、翌年10月から環境影響評価が義務づけられるようになった。風力発電に関する環境影響評価の審査手続きは今のところ陸上風力発電が大半を占めているが、鳥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ともなっており、影響予測の精度向上を求める声があがっている。洋上風力については、環境影響評価が陸上風力に比べ一層困難という見方が大きく、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。それを受けて環境省では、平成28年度に「洋上風力発電所等に係わる環境影響評価の基本的な考え方に関する検討会」を立ち上げ、環境影響評価の技術手法の検討を行ったが、環境影響評価に活用できる体系だった手法の提案はしばらく後になる見通しである。その間、洋上風力が大きく推進される可能性も高く、予測精度の低い環境影響評価により、海鳥の重要な生息域に風車建設を認可してしまう可能性も否めない。その対策として、発電所建設にあたっては影響が想定される海鳥の生息にとって重要な生息地を予めゾーニングし、極力その海域での事業推進を避けることが予防措置として有効である。好風況のため洋上風力の立地ポテンシャルが高いとされる海域において、集団繁殖地（以下、コロニー）を形成する海鳥を対象に、鳥衝突や生息地放棄のリスクを表現した脆弱性マップ（以下、センシティブティマップ）を開発できれば、海鳥との軋轢を大幅に低減できる。

2. 研究開発目的

本研究では、NEDOが提供する洋上の風況ポテンシャルマップ^{*}をもとに風況の良好な海域を選定した上で、その海域を主な繁殖地とする主要な海鳥5種を対象に、1) GPSロガー装着により飛翔軌跡・高度情報を取得し、2) 利用空間を予測するモデル作成と汎用性検証を行った上で、3) 2) で作成した空間利用モデルにより鳥種ごとのセンシティブティマップを作成することを目的とする。

^{*}https://appwdc1.infoc.nedo.go.jp/Nedo_Webgis/index.html

3. 研究目標

全体目標	洋上風力ポテンシャルの高い海域においてコロニーを形成する海鳥5種を対象に、潜在的な飛翔空間に基づくセンシティブティマップの手法開発、および広域網羅的なセンシティブティマップ作成を目標とする。サブテーマ1では、本州沿岸域を対象にオオミズナギドリ、ウミネコ、コアジサシの3種を、サブテーマ2では、道北海域を対象にオオセグロカモメ、ウミネコ、ウトウの3種を、サブテーマ3では、道東海域を対象にウトウとオオセグロカモメの2種を研究対象とする。サブテーマ間で共通の鳥種を対象とすることで、各グループが作成した空間利用モデルの汎用性を検証する。アウトカム目標として、作成されたセンシティブティマップを、環境省の「環境アセスメントデータベース（EADAS）」に実装することを目指す。
サブテーマ1	本州沿岸域におけるオオミズナギドリ等海鳥3種のセンシティブティマップ開発と汎用性の検証
サブテーマリーダー/所属機関	関島恒夫/新潟大学自然科学系
目標	本州沿岸域で繁殖するオオミズナギドリ、ウミネコ、コアジサシの移動をGPSデータロガーにより追跡し、高精度な移動軌跡を明らかにする。取得されたデータに基づき、利用海域を明らかにするとともに、海水温・クロロフィル濃度等の海洋特性を用いた空間利用モデルを作成する。空間利用モデルを他の海域に外挿することによりモデルの汎用性を検証し、それを用いて広域網羅的なセンシティブティマップを作成する。
サブテーマ2	道北海域におけるカモメ類など海鳥3種のセンシティブティマップ汎用性の検証
サブテーマリーダー/所属機関	綿貫豊/北海道大学大学院水産科学研究院
目標	北海道北部の複数の繁殖地でオオセグロカモメ、ウミネコ、ウトウの移動をGPSデータロガーで追跡し、感受性マップの基礎となるハビタットモデルを作り、モデルの他の海域への外挿性を検証し汎用性を高めるとともに、分析のスケールとセンシティブティの数値化を検討する。種ごとに効果的なサンプリング手法と広域網羅的なセンシティブティマップ作成手法をまとめる。
サブテーマ3	道東沿岸域におけるウトウ等の海鳥センシティブティマップの開発と汎用性の検証
サブテーマリーダー/所属機関	河口洋一/徳島大学
目標	北海道東部の海岸地域でオオセグロカモメ、大黒島でウトウをそれぞれ捕獲し、GPSロガーを装着して海鳥の移動軌跡を明らかにする。得られたデータから利用海域を特定し、海水温や海底地形等との関係から海鳥の空間利用モデルを作成する。複数年にわたる海鳥の移動軌跡、利用海域の情報を基に作成した空間利用モデルを使い、北海道東部海域における洋上風力発電センシティブティマップの作成手法を確立し、活用方法について検討を行う。

4. 研究開発内容

本研究では、本州沿岸域に生息するオオミズナギドリ等の主要海鳥3種を対象にしたセンシティブティマップの開発をサブテーマ1において、北海道道北海域に生息するカモメ類など主要海鳥3種を対象にしたセンシティブティマップの開発をサブテーマ2において、北海道道東海域に生息するウトウ等の主要海鳥2種を対象にしたセンシティブティマップの開発をサブテーマ3において実施する。サブテーマ2と3では、共通する2種（ウトウ・オオセグロカモメ）のセンシティブティマップを作成するため、現地調査、統計解析およびマップ作成を分担して行った上で、得られた成果を統合することで北海道の広域マップを整備する（図0.1）。

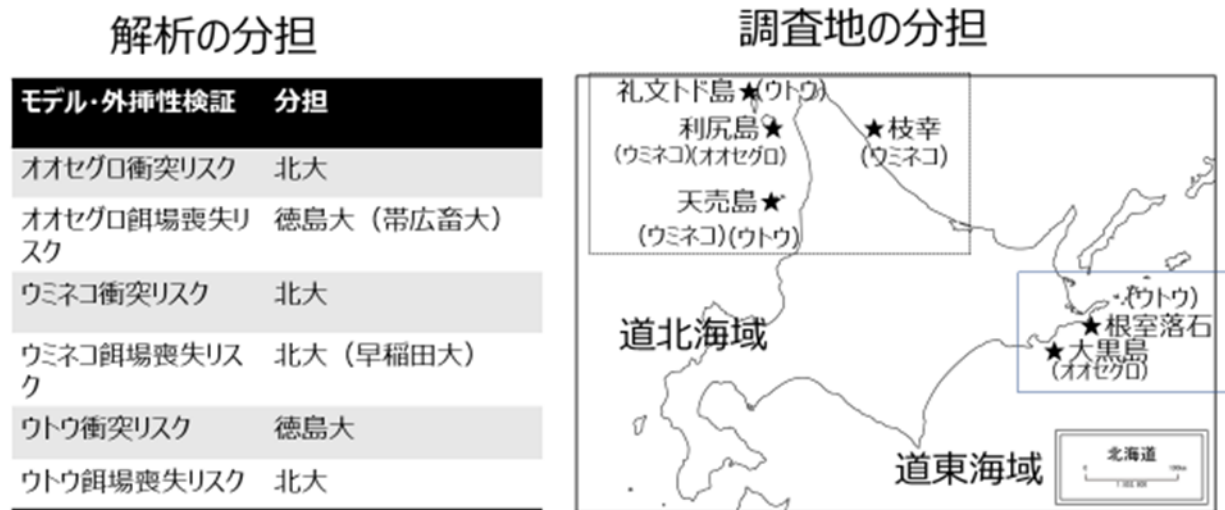


図0.1. 北海道3種センシティブティマップ作成に向けての役割分担。

ウミネコ、オオセグロカモメ、ウトウを対象とし、複数地域の複数種について、データ収集と解析を効率的に行うため北大と研究協力の早稲田大が道北海域の利尻島（オオセグロカモメ、ウミネコ）、礼文島トド島（ウトウ）、枝幸（ウミネコ）と天売島（ウミネコ、ウトウ）を、徳島大と研究協力の帯広畜産大が道東海域の根室落石のオオセグロカモメと大黒島のウトウのデータ収集を担当した。

サブテーマ1 本州沿岸域におけるオオミズナギドリ等海鳥3種のセンシティブティマップ開発と汎用性の検証

1-1 オオミズナギドリのセンシティブティマップの開発

捕獲およびGPSロガーによる追跡

東京都利島村の南端に位置するオオミズナギドリ繁殖地を調査対象とし、繁殖個体に対しGPSロガーの装着が行われた。GPSロガーは、詳細な追跡をするために電池式で再回収型と、長期的な追跡をするためにソーラー発電式で遠隔回収型の2タイプを用いた。装着個体数は、2018年に31個体（雄15個体、雌16個体）、2019年に30個体（雄15個体、雌15個体）、2020年に58個体（雄34個体、雌24個体）であった。装着個体を再捕獲しGPSロガーを回収した後、体重、跗蹠長、嘴峰長、嘴峰高、全頭長、および翼長の計測を行った。装着した個体のうち、2018年は20個体（雄10個体、雌10個体）、2019年は19個体（雄10個体、雌9個体）、2020年は36個体（雄20個体、雌16個体）からロガーが回収された。本研究期間を通じた回収率は63%であった。遠隔回収型のGPSロガーについては、2018年に7個体に装着した。2019年および2020年にデータ回収を試み、2個体について、年を通じたトラッキングデータを取得した。

センシティブティマップ作成

本研究を通して明らかとなったオオミズナギドリの利用海域と飛行高度から鑑み、衝突死、餌場喪失、および経路障害の風車リスクが想定された。それぞれのリスクごとにセンシティブティマップを作成した。

衝突死リスクについては、採餌トリップ中に風車ブレード高であるMゾーン(30m~150m)の飛行が認められたエリアがコロニー周辺であったことから、1sec/1minの高頻度に測位設定されたGPSトラッキングを行うことで、高精度な飛行高度データを取得し、Mゾーン飛行確率の高い環境特徴を抽出することで、マップとして可視化した。

餌場喪失リスクについては、行動解析に関する機械学習法である逆強化学習を適用し、移動経路のルール設計の可視化(以下、報酬マップ)を行い、好適な餌場をマップとして示した。逆強化学習とは、熟練者の行動パターンから、状態に応じて得られる報酬を推定する機械学習法である。逆強化学習には、2018年、2019年、2020年それぞれについて、12回、14回、28回分のロングトリップデータを用いた。トリップの最北端に到達するまでの飛行軌跡を解析対象とした。解析対象範囲を緯度34.056から44.005、経度136.650から152.19とし、解析単位を、当該範囲を32×32分割したメッシュとした。逆強化学習により推定された報酬値を応答変数とし、海洋環境要因として水温、クロロフィル濃度、水深、陸地からの距離、海流の強さ、および海面高度を説明変数として、ElasticNet回帰モデルを適用し、報酬の規定メカニズムを明らかにした。2018年、2019年、および2020年それぞれにおいてモデルを作成し、逆強化学習による報酬値と予測報酬値の関係性を比較することで精度検証を行った。最も予測精度が高かった2020年モデルを最終的なモデルとし、報酬値を予測した。本種の育雛期である8月中旬から9月下旬における海洋環境の変化を報酬マップに反映させるために、2018年から2020年における8月21日、8月31日、9月10日、9月20日の報酬マップをそれぞれ作成した。次項で記述する強化学習のために、マップ内の最小報酬値を全体から引き、最小値が0になるように基準化した。基準化した後の報酬値の最小値は0、最大値は0.107-0.134となった。さらに、得られる報酬値の時期に対する変動係数を算出した。長期的な餌場の安定性の喪失を風車建設によるリスクとして捉え、報酬値の変動係数を尺度としたセンシティブティマップを作成した

経路障害リスクについては、強化学習による移動シミュレーションで経路予測をし、高密度エリアを可視化したマップを作成した。強化学習とは、行動によって変化した状態と報酬から、累積報酬を最大化する行動パターンを学習する機械学習である。予測報酬マップと実際の飛行軌跡に鑑み、高報酬値0.07以上(以下、ゴールとする)のメッシュに至るまでの経路を学習した。0.025度グリッドで作成された報酬マップを0.05度、0.1度、0.2度、および0.4度グリッドにリサイジングし、はじめに0.4度グリッドで学習させた後、より小さいグリッドで転移学習させることで学習の効率化を図った。各時期の報酬マップで10回以上のゴールが確認されたグリッドサイズを採用し、4期合計した飛行軌跡のカーネル密度を算出、経路障害のセンシティブティマップとした。シミュレーションによる飛行密度と実際の飛行密度の関係性を比較することで精度検証を行った。外挿性の検証として、日本海側コロニーである栗島を出発地としたシミュレーション結果と、研究協力者から提供された栗島個体の飛行軌跡との比較を行った。

1-2 コアジサシのセンシティブティマップの開発

採餌距離推定式の作成

コアジサシの利用海域予測モデルを作成するためには、本種の採餌場所となる海洋環境を説明変数として抽出する必要がある。しかしながら、水温やクロロフィルa濃度といった海洋環境データの多くは、最小解像度が約2km(局所的には500m)とされていることや沿岸部でのデータ精度は低いことから、採餌範囲が海岸線から数kmにとどまる本種において、上記のような変数を用いた統計モデル解析を適用することは、困難であると考えられた。また、本研究ではGPS追跡を試みたが、天候や天敵による攪乱の影響から再捕獲が困難であり、本種において解析に十分な位置情報を取得することができなかった。これらのことを鑑み、本研究では、新たに、ベネフィット:コスト比に基づく中心点採餌モデル(Central Place Foraging Model)を作成し、取得可能な餌エネルギー量および消費エネルギー量を推定することで、繁殖を保証する採餌距離を推定し、本種の育雛期間中のコロニーを中心とした利用海域を推定した。

取得可能な餌エネルギー量および消費エネルギー量の推定式作成のために新潟県および千葉県においてコアジサシの行動観察調査を行い、1日あたりの活動時間、餌場までの飛行速度、帰巢時の飛行速度、採餌1回あたりの餌捕獲のための潜水時間、餌の捕獲成功率、採餌1回あたりの雛への給餌時間、餌種、

餌体長が、式に組み込むパラメータとして取得された。文献情報から、餌エネルギー量変換式と親鳥の行動別コストおよび雛鳥の要求エネルギー量に関するパラメータを取得し、採餌距離を変数とした取得可能な餌エネルギー量推定式と消費エネルギー量推定式が作成された。

採餌距離を変数とする取得可能な餌エネルギー量と要求エネルギー量の交点を、コアジサシの繁殖を保障する採餌距離とし、採餌範囲を推定した。なお、本調査中において、コロニー内および海上どちらにおいても、親鳥自身の餌の嚙下を確認したことから、採食をコロニーに戻っておこなうシナリオⅠと、親鳥自身の採食はすべて海上で行うシナリオⅡを作成した。したがって、親鳥自身の採食のための要求エネルギー量を考慮するシナリオⅠと、考慮しないシナリオⅡを想定した。シナリオⅠの要求エネルギー量については親鳥と雛鳥の値を合算して用い、シナリオⅡの要求エネルギー量については雛鳥のみの値を用いた。

コロニー適地マップの作成

コアジサシのコロニーの多くは攪乱環境に形成されるため、年により、そのコロニー形成場所は異なることが多い。コアジサシの全国的な利用海域を推定するために、コロニー形成に係る環境要因を解明し、営巣適地を予測した上で、前述した採餌距離に基づくバッファゾーンを作成することとした。

2005年から2011年にかけて取得された全国255ヶ所の飛来・営巣データから、本種のコロニー位置座標を抽出した。本州において営巣が認められた範囲内における海岸線に0.005度(約500m)グリッドを作成し、解析対象メッシュとした。営巣ポイントが認められたメッシュを在とし、認められなかったメッシュを不在とし、応答変数として用いた。

説明変数としては、地形環境と景観環境が考慮された。地形環境としては、メッシュ内の平均標高、およびバッファ500m、1km、2km、4km、8km、および16km内における標高のばらつき、流域面積500km²以上、1000km²以上、1500km²以上、2000km²以上、2500km²以上、3000km²以上、4000km²以上、5000km²以上、およびすべての1級水系河川の河口からの距離が抽出された。景観環境としては、都市面積、森林面積、草地面積、裸地面積、および裸地周縁長が抽出された。ハビタットモデル作成には、虚偽の不在データが含まれるデータセットに対して比較的精度良く予測が可能であるとされるMaxEnt法を採用し、より多くの変数削減や外挿性の精度向上に重きをおいて開発されたR package MIAMaxentを用いた。本解析では、在データの75%を学習用に、25%を検証用に用いた。

MaxEntにより推定された生息適地指数から在メッシュとバックグラウンドデータを分けるカットオフ値を算出し、在メッシュを抽出した。在メッシュから、採餌距離バッファゾーンを発生させることで利用海域を示し、コアジサシのセンシティブティマップとした。

1-3 ウミネコセンシティブティマップの開発

新潟県村上市の笹川流れと、粟島浦村のエビスヶ鼻に営巣するウミネコの成鳥を対象に捕獲を行った。背面にソーラー発電式GPSロガーをハーネス方式で装着した。外部計測とデータロガーの装着を終えたウミネコは、それぞれの巣に放逐された。放鳥後、ロガーに蓄積されたデータは専用の受信機を用いた遠隔ダウンロードによって取得された。データの取得は、週に約2回の頻度で、本種が繁殖期を終える7月中旬まで行われた。

サブテーマ2 道北海域におけるカモメ類など海鳥3種のセンシティブティマップ開汎用性の検証 データ取得

サブテーマ2は、洋上風力立地ポテンシャルの高い道北海域の利尻島地域(オオセグロカモメ、ウミネコ)、礼文島トド島地域(無人島)(ウトウ)、枝幸地域(ウミネコ)と天売島地域(ウミネコ、ウトウ)で、抱卵あるいは育雛中の親鳥を捕獲してGPSデータロガーを装着し、数日後に再捕獲、ロガー回収し、あるいはリモートでダウンロードしてデータを得た(図0.2)。風車ブレード回転高度を飛行する確率(衝突リスク)の高い場所と採食を行う確率(餌場喪失)の高い場所を分離してセンシティブティマップを作製するため、GPS位置で計算した移動速度をつかって飛行と着水(採食)行動を分離し、十分な精度の高度が得られる条件を満たすGPSデータを使って、風車ブレード高度を飛行する場所、すなわち衝

突リスクが高い場所を特定した（図0.2）。その際、GPSデータロガーによる高度測定誤差最大値を考慮し、風車ブレード回転高度を20m-140mの範囲とした（成果の詳細ではMゾーンとして定義している）。こうした手法はサブテーマ3と共通する。

モデルの精度と外挿性

これらサンプルの3次元空間利用の実データから、個体群全体での予測とほかの海域での予測（外挿）を目的として、空間統計モデル（General Additive Model）の手法を使って、1km解像度での風車ブレード回転高度を飛行する確率（衝突リスク）と採食を行う確率（餌場喪失）それぞれを、環境要因（営巣地からの距離や水温など）から予測するハビタットモデルを作り、利用場所を最もよく説明する最適モデルを選択した。それぞれのリスクは各グリッドのブレード回転高度飛行時間と採食時間からカーネル密度を求め、最大値を1とした相対値をつかった。精度検証には、あらかじめ全データをランダムに7:3の割合で分割し、はじめに7割のデータ（トレインデータ）でモデルを構築し、次に残り3割のデータ（テストデータ）の環境要因をモデルに代入して、予測値を得てテストデータの実測値との相関係数を使った。同様に、これら各地域モデルの他の地域への応用可能性（外挿精度）も検証した。さらに、モデルの汎用性を高めるため、道北海域の2地域のオオセグロカモメとウミネコのデータを統合し、説明変数としてサンプルの属性（種や地域など）も加え、こうした解析に適した空間統計モデル（Random Forest Model）により、一つの衝突リスク汎用モデルを構築し、その精度を検証した。ついで、この汎用モデルの道北海域とは別の海域、すなわち、サブテーマ2が得た根室落石地域のオオセグロカモメ、サブテーマ2が得た天売島地域、青森弁天島地域のウミネコ、サブテーマ1が得た新潟粟島地域、新潟沿岸笹流れ地域のウミネコにあてはめて外挿精度を検証した。また、汎用性を高める別の手法として、年を合成したモデル、解像度を変えたモデルも検討した。一方で、風車のブレード高を飛ぶ時間割合（衝突確率の指標）の種間の違いを補正するため、センシティブリティのスコア化と標準化を行った。最後に、種ごとのサンプリング方法、特に個体数、空間解析手法、マップ化手順について整理し、衝突リスクと餌場喪失をわけて、道北海域のセンシティブリティマップを作成した。

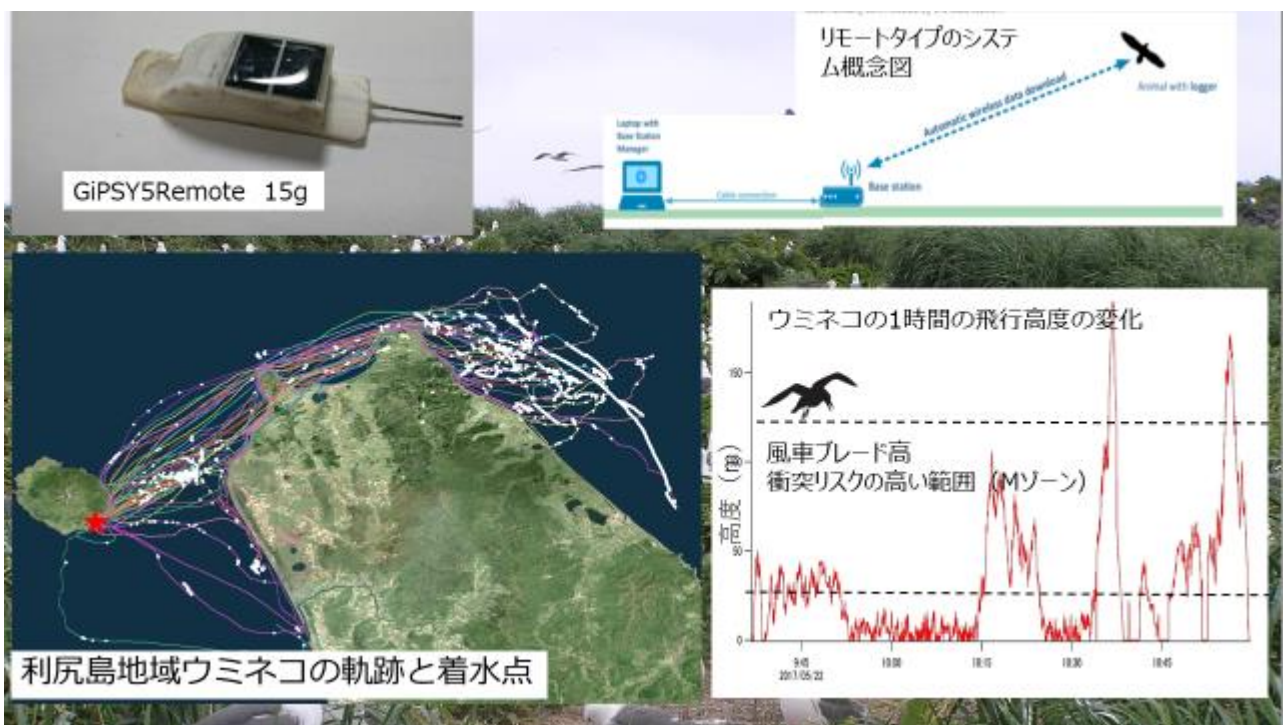


図0.2. GPS データロガー：移動軌跡、行動（飛行と着水）、飛行高度の測定。

繁殖中の親鳥を捕獲してGPSデータロガーを装着し、数日後に再捕獲、ロガーを回収して、あるいはリモートでデータをダウンロードした

サブテーマ3 道東沿岸域におけるウトウ等の海鳥センシティブティマップの開発と汎用性の検証

サブテーマ3は、洋上風力発電の立地適地が広く分布する道東海域の大黒島（無人島、ウトウ）と根室落石地域（オオセグロカモメ）を調査地とした。それぞれの調査地で、営巣中の親鳥を捕獲し、再回収型または自動遠隔ダウンロード式のGPSロガーを装着することで個体の移動軌跡データの取得を試みた。上記2種にとって衝突リスクおよび餌場喪失リスクの高い海域を抽出し、それぞれについてセンシティブティマップを作成するため、サブテーマ3では、ウトウの衝突リスクおよびオオセグロカモメの餌場喪失を予測する手法の開発を担当した。実施内容の流れを図0.3に示す。この流れはサブテーマ2とおおよそ共通する。取得されたトラッキングデータは、サブテーマ2と同様に、ロガーに記録された移動速度の頻度分布から飛行と着水（採食）に分類した。飛行と判断されたデータについては、風車ブレードの回転域とロガーの測定誤差を考慮して、20-140mの高度（Mゾーン）を飛行したデータを抽出した。

続いて、Mゾーン飛行または採食と判断されたそれぞれの位置情報データに対してカーネル密度推定法を適用し、利用密度を推定した。推定されたカーネル密度推定値は、最大値を1として標準化した。これを目的変数とし、営巣地周辺の環境要因から、Mゾーン飛行する確率（衝突リスク）の高い場所（ウトウ）、および採食のために利用する確率（餌場喪失リスク）の高い場所（オオセグロカモメ）を予測するハビタットモデルを構築した。構築したフルモデルをもとに、赤池情報量規準（AIC）を指標としたモデル選択によりベストモデルを得た。作成されたモデルの予測精度を検証するため、ベストモデルのデータセットをトレインデータとテストデータに分割し（トレイン：テスト = 7 : 3）、トレインデータで構築したモデルにテストデータの環境要因を代入することで予測値を得た。この予測値とテストデータの目的変数（実測値）との相関係数を求めることで予測精度の指標とした。また、1つの営巣地で構築されたモデルを用いて、他海域における利用場所の予測可能性（汎用性）を探るため、モデルの外挿による予測精度の検証を行なった。外挿による予測精度は、以下に記載する3つの手順で検証した。①構築されたベストモデルに、外挿先の海域から抽出した環境要因を代入して予測値を得た上で、②外挿先の営巣地で取得されたトラッキングデータから利用場所のカーネル密度を推定し（実測値）、③モデルによる予測値と実測値の相関係数を算出することで予測精度の指標とする。このとき、対象とする空間範囲は、営巣地を中心にウトウまたはオオセグロカモメの潜在採食距離を半径とする海域とし（ウトウ：164km、オオセグロカモメ：150km）、空間解像度は1 km×1 kmとした。ウトウの衝突リスク予測モデルでは、日本海側の天売島地域および礼文島トド島地域の営巣地で取得されたデータをサブテーマ2から借用し、大黒島で構築したモデルの外挿による予測精度の検証を行なった。その後、サブテーマ2から提供を受けたデータを用いて、日本海側の2つの営巣地についても、大黒島と同様に衝突リスクの高い海域を予測するハビタットモデルを構築し、予測精度を検証した。また、これらのモデルについても外挿による予測精度の検証を行なった。一方、オオセグロカモメの餌場喪失予測モデルでは、根室落石地域で作成されたモデルの外挿精度を、日本海側の利尻島地域で取得されたトラッキングデータを借用し、検証した。以上の予測精度の検証結果を踏まえ、最終的なセンシティブティマップの作成方針を決定した。

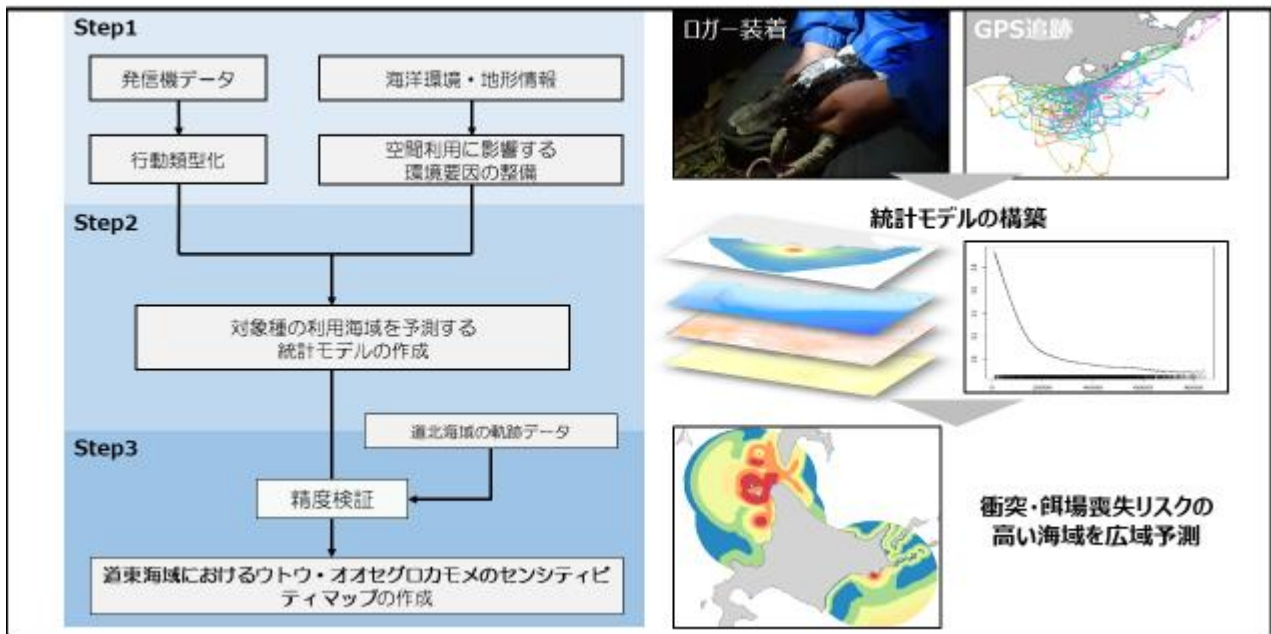


図0.3. センシティブティマップの作成手順.

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

① オオミズナギドリのセンシティブティマップの開発

オオミズナギドリの利用海域および風車設置リスク

再回収型のGPSロガーについて、2018年は雄10個体、雌8個体、2019年には雄10個体、雌8個体、2020年には雄18個体、雌15個体から飛翔軌跡を取得した。採餌トリップの特徴として、北海道・東北沖を利用するロングトリップと、千葉・神奈川・静岡沖の沿岸部を利用するショートトリップの2タイプのトリップパターンが認められた。また、採餌トリップ中に風車ブレード高（30mから150m）での飛行が認められたのはコロニー周辺のみで、殆どが風車ブレード下の30m未満であった。利用海域と飛行高度から、風車設置による繁殖地周辺における衝突死リスク、餌場喪失リスク、および経路障害リスクが想定されたことを受け、それぞれに関するセンシティブティマップを作成した。

餌場喪失および経路障害のセンシティブティマップ

逆強化学習により推定された報酬値は、2018年から2020年いずれの年も同様の傾向を示しており、東関東沖は低報酬となっており、東北沖から北海道沖にかけては高報酬であった。得られた報酬値を予測する統計モデリングを行った結果、いずれの年においても表面水温の影響が最も強かった。作成された統計モデルを用い、2018年～2020年の8月中旬から9月中旬までの報酬値を予測した結果、高報酬エリアが北海道沖に分布する報酬マップが作成された。季節や年を通じての安定した漁場はオオミズナギドリにおいても重要な餌場となると考えられる。したがって、2018年度から2020年度にかけての高報酬エリアにおける報酬値の変動係数を算出し、高報酬であることに加え、その安定性を反映させた餌場喪失のセンシティブティマップを作成した(図0.4)。

予測された報酬マップを用いて軌跡の再現を行った結果、利島個体の実データに類似した傾向を有する飛翔軌跡が得られた。得られた飛翔軌跡の高密度エリアとして予測されたのは千葉県沿岸部であり、再現結果と実データ間には有意な正の相関が認められた。また、外挿性の検証として、日本海の粟島個体を対象とした経路の予測を行った結果、予測結果と実データの間に有意な正の相関が認められた。高い予測性が認められたことから、飛翔軌跡の密度マップを経路障害のセンシティブティマップとした(図0.5)。

衝突死のセンシティブリティマップ

コロニー周辺での飛行パターンの詳細を捉えるために1秒間隔で測位設定されたGPS追跡を行った。結果として、風車ブレード高であるMゾーン（30m-150m）飛行が見られたのは出巢および帰巢時であり、Mゾーンが認められる範囲を明らかにしたところ、繁殖地から最大700m沖合までの海域が高リスクエリアであることが示された（図0.6）。

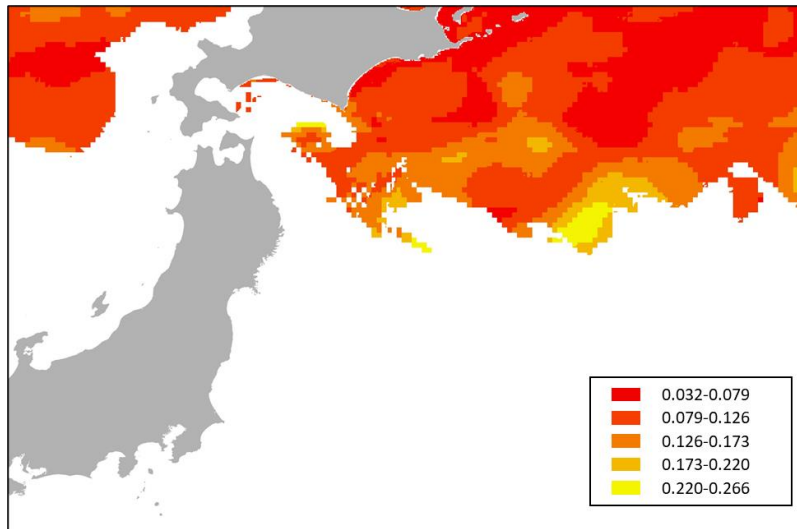


図0.4. 餌場喪失のセンシティブリティマップ.

2018年から2020年にかけて予測された報酬マップから高報酬エリアを抽出し、報酬値の変動係数を算出し、餌場としての安定性を評価した。

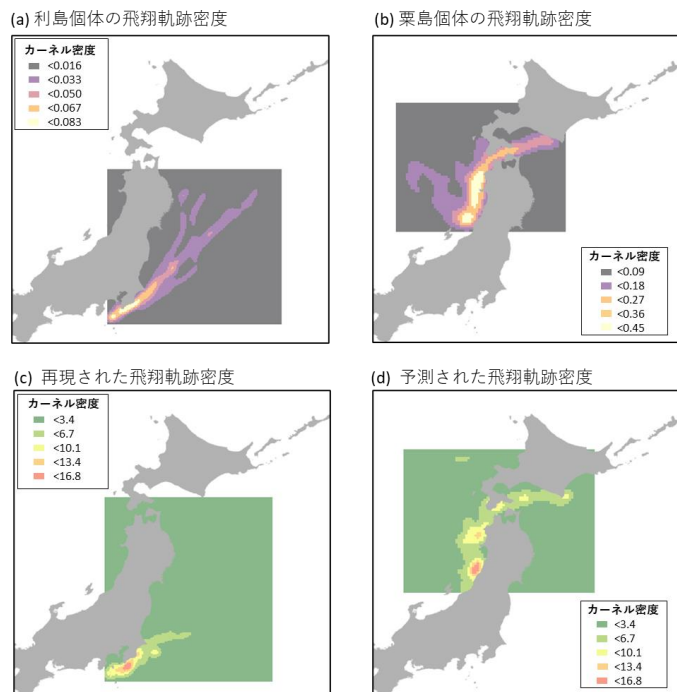


図0.5. 強化学習による餌場までの移動シミュレーションに基づく飛行軌跡密度. 2018年8月中旬、下旬、9月上旬、中旬の環境情報から予測された報酬マップを用い強化学習を行い、各時期から10本の飛行軌跡を抽出した。(a)は利島個体、(b)は粟島個体の実際の飛行軌跡密度を、(c)は利島、(d)は粟島における強化学習により再現された飛行軌跡の密度を示す。

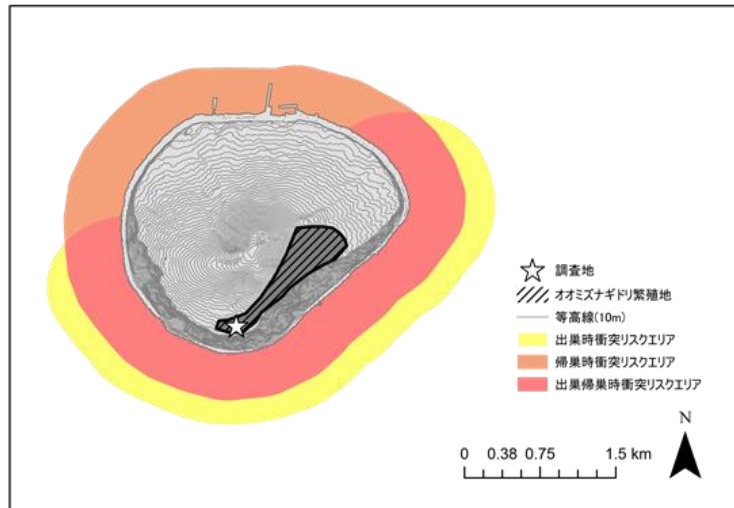


図0.6. 衝突死のセンシティブリティマップ.

② コアジサシのセンシティブリティマップの開発

繁殖を保証する採餌距離の推定

取得された行動パラメータとして、日あたりの活動時間は15時間4分、餌場までの飛行速度、餌を持った帰巢時の飛行速度、および餌を持っていない帰巢時の飛行速度は、それぞれ、 $29.61 \pm 0.66 \text{ km/h}$ 、 $33.75 \pm 0.73 \text{ km/h}$ 、および $34.87 \pm 2.21 \text{ km/h}$ であった。餌場に到着した個体の捕獲に費やす時間は、捕獲成功個体および失敗個体それぞれで $54.70 \pm 8.76 \text{ 秒}$ および $64.17 \pm 23.53 \text{ 秒}$ 、捕獲成功率を87%、給餌時間は、 $33.77 \pm 2.49 \text{ 秒}$ であった。

コアジサシの餌種の構成比率は、カタクチイワシが84.7%、サツパが10.0%、その他(カマス類、ハゼ類等)は5.3%であった。コアジサシの主要な餌種であったカタクチイワシとサツパの2種の体長をエネルギー量の推定に用いた結果、それぞれ $1.45 \pm 0.09 \text{ g}$ および $2.38 \pm 0.15 \text{ kcal}$ となった。両種のカロリー量に餌構成比率を乗じた結果、1回の採餌で取得できるカロリー量は 1.50 kcal となった。

作成された推定式から繁殖を保証する採餌距離を推定した結果、シナリオ I および II それぞれで 2.54 km および 4.51 km であった。本推定値の妥当性を評価するために、コアジサシの最大採餌距離についてのメタ解析結果と比較した結果、推定値は本種の最大採餌距離の範囲内であることが示された。

コロニー適地の推定

最適モデルに用いられた変数は、500mバッファ内裸地面積、300mバッファ内における裸地面積/裸地周縁長、1kmバッファ内の標高のばらつき、流域面積 5000 km^2 以上の1級水系河川の河口からの距離の4つであった。モデルの精度については、Learning AUC =0.971、Test AUC =0.963であり、高精度なモデルが作成できた。本種の営巣適地は、新潟県、茨城県、千葉県、愛知県の海浜部のような大規模な砂浜や、東京、名古屋、大阪といった主要都市部にある大規模な埋め立て地に分布していた。検証用データの在と不在をわけるカットオフ値は0.289と推定され、本閾値より高いスコアを有したメッシュから、推定された採餌距離バッファを発生させ、センシティブリティマップとした(図0.7)。

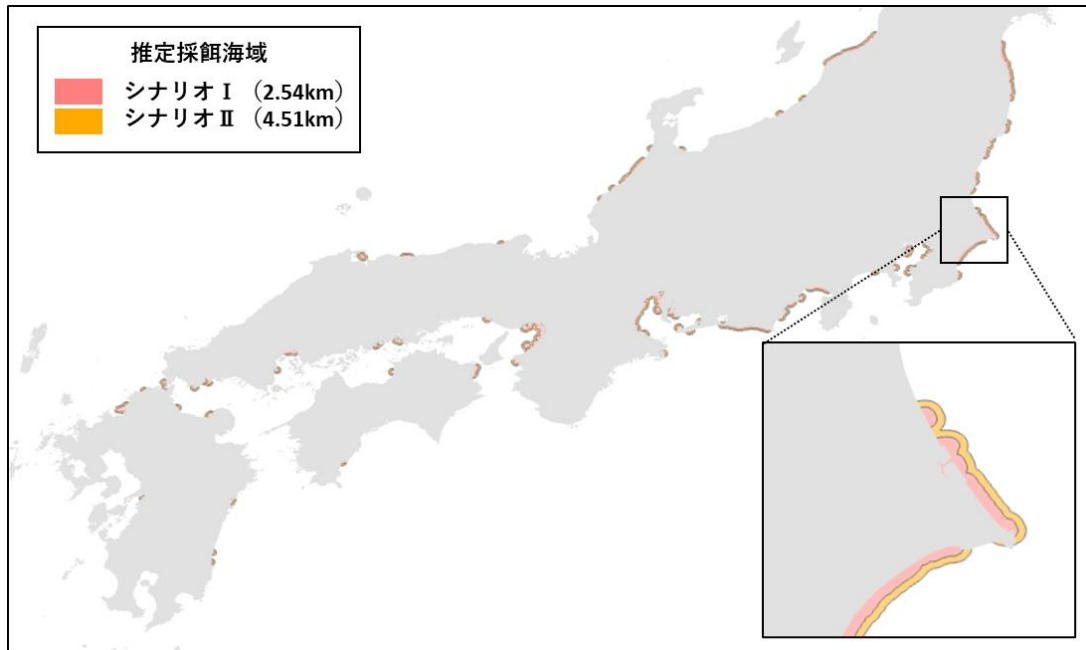


図0.7. 営巣地を中心とした利用海域推定.

MaxEnt法により推定された営巣ポテンシャルスコアにカットオフ値を設け(cutoff value =0.289)、高ポテンシャルエリアを抽出した。抽出されたエリアから本研究で推定されたコアジサシの採餌距離バッファ(シナリオ I : 2.54km、シナリオ II : 4.51km)を発生させた。

③ ウミネコのセンシティブティマップの開発

GPS位置から飛行・着水を分離する速度を求め、高度データの精度を実験的に検証した結果、ウミネコでは時速15km(秒速4.2m)にギャップが見られたので、カモメ類については、時速15km以上で飛行、以下で着水と判断した。高度検証の結果、機種により精度は異なるが、GPS受信衛星数3~6以上で測位間隔1秒から15分で平均誤差は機種ごとにマイナス3m~プラス4mであり、信頼できる高度が得られたと判断した。道北海域では4地域・3種の海鳥計193個体に、道東海域では2地域2種類の海鳥計33個体に各種GPSデータロガーを装着して、移動データに、先に明らかにした飛行・着水の分離と高度情報も取り入れ、それぞれの種と地域で衝突リスク・餌場喪失を説明する地域モデルを1kmの高解像度で構築した。地域モデルの北海道内の他の地域への当てはまり(外挿精度)は、ウミネコ餌場喪失リスクモデルではおよそ0.4以下と悪かった。汎用性向上のため、2地域・2種のカモメ類のデータを統合して衝突リスク汎用モデルを構築した結果、この衝突リスク汎用モデルも精度は0.6~0.9高かったが、青森など他の海域への外挿精度は0.4以下とやはり低い場合があった。また、解像度を10kmとあげた場合外挿性が高まる例があったが常にではなく、年を合算したモデルでも外挿性は向上しなかった。そのため、地域毎に実データを得て地域モデルで各個体群全体のリスクを予測し、全個体群のマップを合算して広域のセンシティブティマップを作成するのが妥当と判断された。さらに、風車ブレード高度を飛行する時間割合はウミネコで高く、ウトウで最小であり、種により1~11%と異なっていたため、衝突リスクについてはスコア化したのち、最大値を示すウミネコの値に対する相対値としてこれを補正したスコアを用いた。また、サンプル個体数を減らした場合、最外郭利用面積とモデル精度がどう低下するかを分析し、10~15個体以上のサンプルを得るのが適切であると判断した。

これらにより、海鳥種の特性に応じた効率的な現場手法、空間モデリングと精度検証の手法、広域網羅的なセンシティブティマップを作成するための手順を、1)各地域で10個体以上にGPSデータロガーを装着し、必要十分な精度の高度を得る測位間隔でデータを得て、2)その種の最大飛行範囲を対象に、1km単位で羽根の回転高度を飛行する確率(衝突リスク)と採食する確率(餌場喪失)の空間分布

を、営巣地からの距離や水温など環境要因から説明する地域モデルを構築し、3) モデルにより各地域個体群のリスクの空間分布を予測、合計してスコア化して広域網羅的なマップを作成する、と整理した。この手順にしたがい作業し、対象とする3種の海鳥の全地域個体群のマップを合算し、高解像度(1 km)で衝突リスク・餌場喪失センシティブリティマップを作成した。

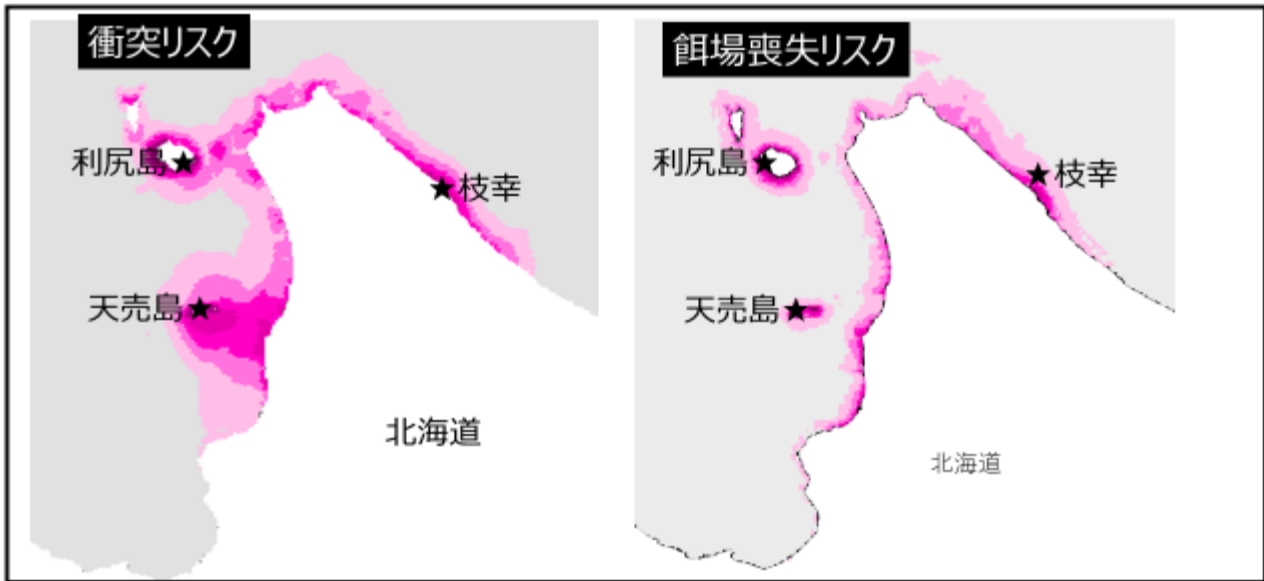


図 0.8. ウミネコのセンシティブリティマップ。各調査地域(★)のデータで作ったモデルに全グリッドの環境データを代入した予測値。衝突リスクは風車ブレードの回転する高さを飛行する確率の分布、餌場喪失は着水で判定した採食確率の分布。モデルによる予測値は Jenks 自然分類で 6 段階にスコア化し、図中の色が濃いほど高リスクであることを表す。灰色部分が解析対象範囲である。

ウミネコの衝突リスク説明モデルは、どの地域でも、営巣地からの距離、海岸線からの距離、水深、海底斜度、港からの距離のすべてが重要であり、営巣地の近く、海岸線の近く、漁港の近くで衝突リスクが高い傾向があり、モデル精度(相関係数)は0.60~0.91と高いことがわかった。一方、ウミネコの餌場喪失説明モデルは、どの地域でも、営巣地距離、港距離、水深や海底斜度、SST勾配(フロント)が重要であり、営巣地周辺で、また主要な餌であるイカナゴの好適生息海域を示すフロントや漁港周辺で採食確率が高い傾向があり、モデルの精度は0.45~0.85と比較的高かった。そのため、地域モデルでセンシティブリティマップを作製した。ウミネコでは衝突リスクと餌場喪失の高い場所がかなり異なっており、衝突リスクは各営巣地の周辺海域、営巣地から採食場所の沿岸域への広い範囲、海岸線、営巣地と採食地との往来の際通過する岬などの海岸線で高く、餌場喪失は島周辺と北海道沿岸にそった浅い海域で高かった(図0.8)。これはウミネコが3種の中では最も長時間風車のブレードの高さを飛ぶこと、島から離れた北海道本土沿岸域ややや沖合のフロント域でもよく採食しそことの往来を頻繁に行うことによると考えられる。

④ オオセグロカモメのセンシティブリティマップの開発

ウミネコと同様にオオセグロカモメのセンシティブリティマップの開発をおこなった。オオセグロカモメの衝突リスク説明モデルは、どの地域でも、営巣地からの距離、海岸線からの距離、水深、海底斜度、港からの距離のすべてが重要であり、営巣地の近く、海岸線の近く、漁港の近くで衝突リスクが高い傾向があり、モデル精度は0.72~0.93と高かった。風車のブレード回転高度を飛行する時間割合はウミネコよりも小さく、そのため、補正したスコアはかなり低く、営巣地のごく周辺でだけセンシティブリティが高かった。また、オオセグロカモメの餌場喪失説明モデルでの重要な環境要因は、地域により異なっていたものの、営巣地距離と海岸距離は共通して重要で、いずれの地域でも餌場喪失は営巣地や海岸からの距離が

近いほど高かった。根室落石では海水面温度やクロロフィル濃度も重要な環境要因だった。オオセグロカモメでは衝突リスク（図0.9）も餌場喪失も島周囲でだけ高く、これは、ウミネコよりも港で出る投棄魚や潮間帯の未脊椎動物に強く依存していることと関係しているだろう。

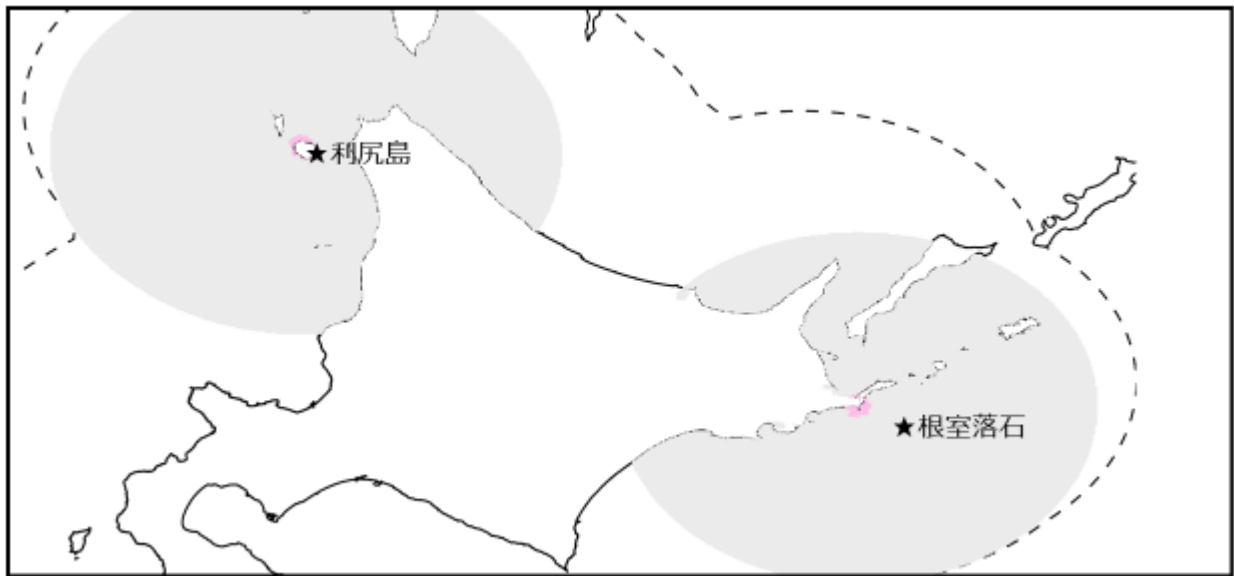


図0.9. オオセグロカモメのセンシティブティマップ。各調査地（★）のデータで作ったモデルに全グリッドの環境データを代入した予測値。衝突リスクは風車ブレードの回転する高さを飛行する確率の分布。モデルによる予測値はJenks自然分類で6段階にスコア化し、図中の色が濃いほど高リスクであることを表す。灰色部分が解析対象範囲である。リスクを示すスコアは、ウミネコのリスクを1としたときの相対値で示す。

⑤ ウトウのセンシティブティマップの開発

GPS位置から飛行・着水を分離する速度を求め、高度データの精度を実験的に検証した結果、ウトウでは秒速5m～8mにギャップが認められたので、時速21.6km（秒速6m）以上を飛行、以下を着水とした。地域モデルの北海道内の他の地域への当てはまり（外挿精度）はウトウ餌場喪失モデルではおよそ0.4以下と悪かった。ウトウ衝突リスク説明モデルにおいては、営巣地距離と海岸距離が重要で、営巣地の近く、海岸線の近くで衝突リスクが高い傾向があった。また、大黒島の個体は営巣地の周囲で、天売島の個体は営巣地の南側海域で、陸棚を離れた場所にある礼文トド島の個体は島から約50km離れた沖合でも衝突確率が高い傾向があり、モデルの精度は0.63～0.97だった。風車のブレード回転高度を飛行する時間割合はウミネコよりもかなり小さく、そのため、補正したスコアはかなり低く、島周辺でリスクが高かった。一方、ウトウ餌場喪失説明モデルはどの地域でも、営巣地距離や水深に加えSST勾配も重要であった。ウトウの餌場喪失説明モデルでは、地域ごとにこれらの要因の効果が大きく異なっていたので、各々を図示すると、陸棚縁にある天売島の個体は対岸の広い陸棚沿岸部で、陸棚を離れた場所にある礼文トド島の個体はフロントが強い場所で採食する傾向があり（図0.10）、その精度は0.50～0.81と比較的高いことがわかった。ウトウではサハリン海峡、礼文島周辺、天売島から北海道本土沿岸域の広い範囲で餌場喪失センシティブティが高かった（図0.11）。

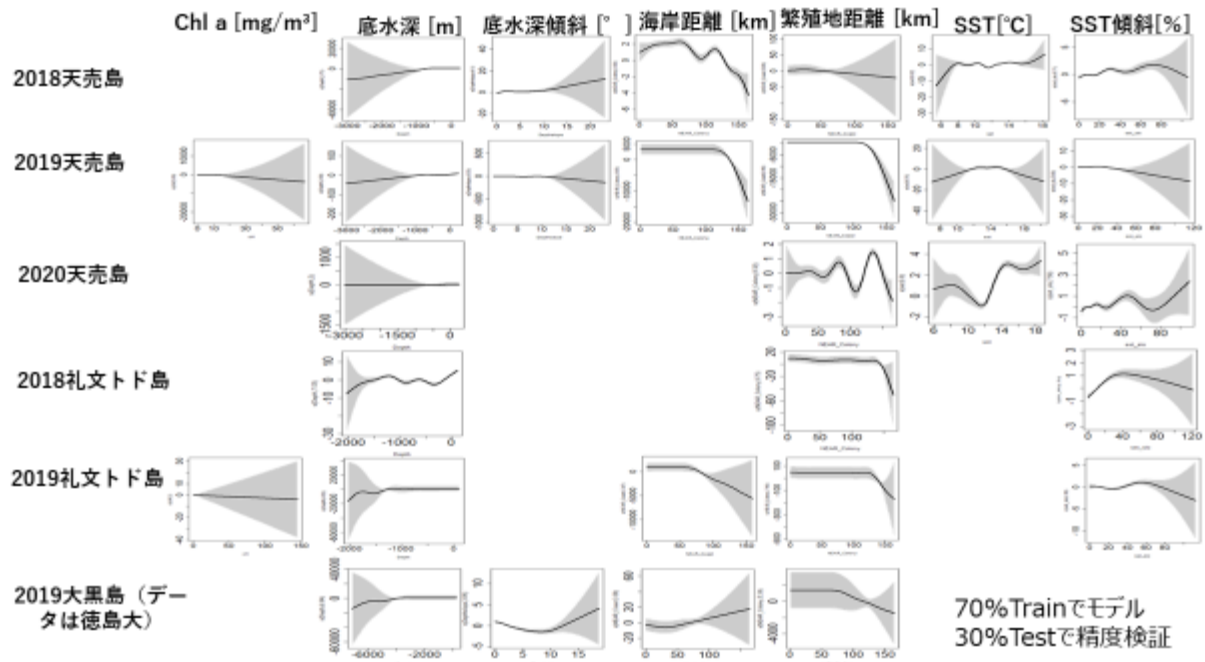


図0.10. ウトウの餌場喪失モデル (GAM、ベストモデル) における各説明変数の効果。

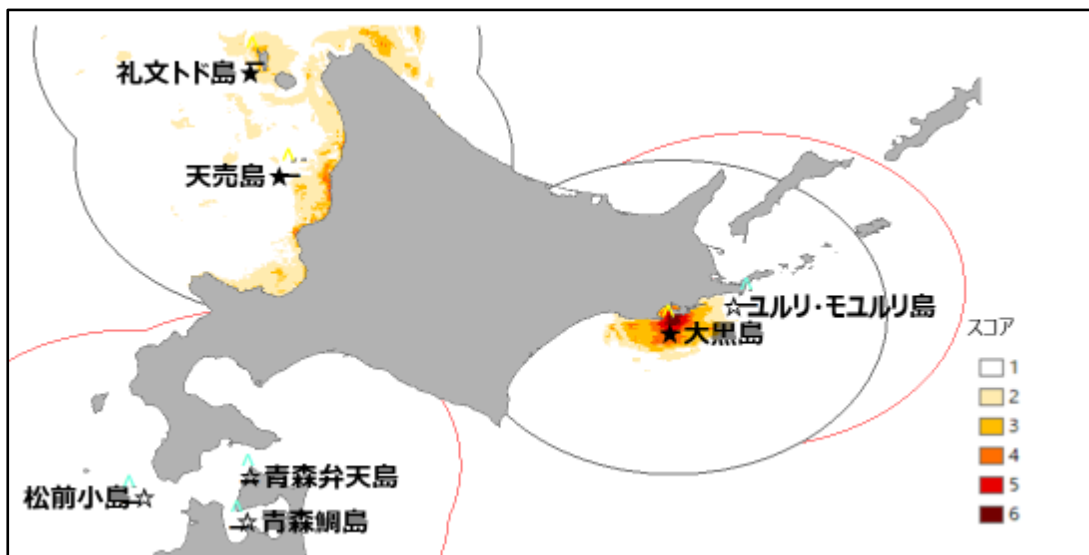


図0.11. ウトウのセンシティブリティマップ。各地域の70%のデータで作ったモデルに全グリッドの環境データを代入した予測値を全地域で示す。図中の黒の星印は調査した地域を、黒の円はモデルによる予測の対象とした本種の潜在移動距離 (164km) を半径とする範囲を、それぞれ表す。モデルによる予測値はJenks自然分類で6段階にスコア化し、図中の色が濃いほど高リスクであることを表す。白の星印は実測値がなく、マップを作成できなかった地域。

5-2. 環境政策等への貢献

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、今後、国内における再生可能エネルギー源の主力になると位置づけられている洋上風力発電に関し、海洋を主に利用する海鳥類に対する環境影響評価の手法は確立されているとは言い難い。多くの海鳥類は集団繁殖するため、コロニー周辺の海域に風車群が建設された場合、個体群絶滅などの甚大なリスクをもたらす恐れがあり、繁殖地と採食場所を往復する移動ルートと風車との配置関係が事業推進の適正を判断する重要な検討ポイントになると想定される。本研究を通して開発された主要海鳥5種のセンシティブティマップは、洋上風力の立地適否の判断に資することができるため、環境影響評価書作成の配慮書段階において環境負荷の少ない立地計画に向けて有用な情報を提供し、環境影響評価手続きにおける手戻りリスクを低減するとともに、海鳥類に配慮した洋上風力発電の推進に大きく貢献できる。

<行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政等が活用することが見込まれる成果>

① 環境アセスメントデータベース（EADAS）の充実化

環境省は、環境影響評価を実施する上で参考となる基礎的情報を国民に広く提供するためのプラットフォームとして、環境アセスメントデータベース(EADAS)を作成し、その充実化を図っている。すでに環境省の事業として、鳥類の生息情報等の実データを用いて作成された陸域と海域のセンシティブティマップがEADASにアップロードされ、環境省ホームページ上で公開されている。本研究で開発された衝突リスクのポテンシャルを評価した主要海鳥5種のセンシティブティマップおよびその作成手法がEADASに実装されることになれば、当該データベースの充実化に大きく寄与する。それにより、風力発電事業者は海鳥との軋轢を予め回避できる事業計画を立案することができ、環境影響評価の手戻りリスクを大幅に低減できるとともに、海洋生態系に配慮した洋上風力の計画推進に大きく貢献できる。なお、本研究の成果をEADASに実装することに対し、行政推薦課（環境影響評価課）との間で、これまでに実施してきたAD会合においてすでに合意はできており、現在、公開方法について検討中である。

② 温暖化対策推進法一部改正に基づく風力発電促進地域の抽出に向けての貢献

わが国は、パリ協定に定める目標等を踏まえ、2010年10月に「2050年カーボンニュートラル」を宣言した。それを実現するため、地域の脱炭素化に貢献する事業を促進する等を目的として、2021年3月に地球温暖化対策推進法を一部改正し、その中で、地域の脱炭素化に貢献する事業を促進するための計画・認定制度を新たに創設した。具体的には、都道府県の実行計画において、地域の自然的社会的条件に応じた環境の保全に配慮し、省令で定めるところにより、（再生可能エネルギー等の）促進区域の設定に関する基準を定めることができるようになった。上述した促進地域のソーニング手続きを進める際に、衝突リスクの低い場所を予め洗い出し、環境負荷の小さい適切なエリアに風力発電施設を誘導するための情報源として、本研究で開発したセンシティブティマップは大いに役立つと考えられる。

5-3. 研究目標の達成状況

全体目標の達成度；十分に達成できた

- ・サブテーマ1の目標の達成度；十分に達成できた
- ・サブテーマ2の目標の達成度；十分に達成できた
- ・サブテーマ3の目標の達成度；十分に達成できた

＜研究体制に関して効率的に実施した点、工夫した点＞

洋上風力発電が全国的に展開することを考えた場合、センシティブティマップも広域に整備されることが望ましい。本研究では、特定の生息地における個体にGPSロガーを装着し高密度な位置情報を取得した上で、そのデータを用い作成した生息空間予測モデルを他地域に外挿することにより、マップの広域整備を目指した。一方、予測モデルの汎用性をチェックするためには、他地域での飛翔軌跡情報が必要になるが、複数地域でのGPS追跡のデータ取得は容易ではない。本研究では、データ取得および解析の効率化を図るために、サブテーマ間でデータの共有化を行い、作業を効率的に進めるように配慮した。

＜課題管理に関して効率的に実施した点、工夫した点＞

本研究実施期間中に、わが国も含め世界的なコロナ禍におかれることとなった。調査の実施等で、計画の再調整等を余儀なくされたものの、大幅な計画変更なく、概ね予定していた調査は実施できた。その一方、国民との科学・技術対話など、研究成果を公開する催しに関しては、コロナ対策の影響を受け、会場・発表様式など、直前に変更を余儀なくされた。大人数による対話式とオンラインによるハイブリッド形式の集会をトラブルなく進めるために、応用生態工学会の協力を得て、ウェビナーシステムを借用した。その結果、画面の切り替えなど、速やかに会を進めることができ、集会は成功裏に終えることができた。

＜研究資金に関して効率的に実施した点、工夫した点＞

「国民との科学・技術対話」において、東京で開催予定のシンポジウムを対話式で実施する予定であったが、コロナ対策として、対話式の会場を新潟に変更し、対話式とオンライン式のハイブリッド型に切り替えた。会場の変更とウェビナーシステムを応用生態工学会から借用したことにより、資金運用面で大幅な効率化を図ることができたことに加え、第2回のシンポジウムでは全国から360名、第3回のシンポジウムでは290名の方々に参加いただき、研究成果を広く国民に周知することができた。

6. 研究成果の発表状況

6-1. 査読付き論文

＜件数＞

10件（内5件は投稿中）

＜主な査読付き論文＞

- 1) 関島恒夫、森口紗千子、向井喜果、佐藤一海、鎌田泰斗、佐藤雄大、望月翔太、尾崎清明、仲村昇：保全生態学研究、(2021)、飛行高度を考慮した大型水禽類オオヒシクイの越冬地と渡りに関する陸上風力発電センシティブティマップ（印刷中）
- 2) 鎌田泰斗、富田健斗、伊藤玲駆、平田和彦、関島恒夫：千葉県立中央博物館研究報告、15, 2, 77-80 (2021)、千葉県東京湾奥部におけるクロアジサシ *Anous stolidus* の記録
- 3) Moriguchi S, Mukai H, Komachi R, Sekijima T: Wind Energy and Wildlife Impacts, 125-133 (2019), Wind Farm Effects on Migratory Flight of Swans and Foraging Distribution at Their

Stopover Site.

- 4) 風間健太郎、綿貫豊：保全生態学研究、(2021), 洋上風力発電の海鳥への影響を軽減するためのセンシティブティマップ作成手法とその課題 (印刷中)
- 5) 佐藤夕夏、赤坂卓美、藪原佑樹、風間健太郎、河口洋一：保全生態学研究、25, 2 (2020), 北海道根室落石で繁殖するオオセグロカモメを対象とした洋上風力発電センシティブティマップ

6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表(査読なし)	4件
口頭発表(学会等)	22件
「国民との科学・技術対話」の実施	4件
マスコミ等への公表・報道等	3件
本研究に関連する受賞	1件

7. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

8. 研究者略歴

研究代表者

関島 恒夫

東京大学大学院農学系研究科博士課程修了、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助手、同研究科准教授、現在、新潟大学自然科学系教授

研究分担者

1) 綿貫 豊

北海道大学大学院農学研究科博士課程修了、農学博士、国立極地研究所助手、北海道大学大学院農学研究科准教授、現在、北海道大学水産科学研究院・海洋生物資源科学部門教授

2) 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)、科学技術振興事業団科学技術特別研究員、日本学術振興会科学技術特別研究員、九州大学大学院工学研究院環境都市部門助手、現在、徳島大学大学院社会産業理工学研究部准教授

II. 成果の詳細

II-1 本州沿岸域におけるオオミズナギドリ等海鳥3種のセンシティブティマップ開発と汎用性の検証

新潟大学

自然科学系

教授 関島 恒夫

<再委託先>

長岡技術科学大学 工学研究科

准教授 山本 麻希

<研究協力者>

名古屋大学大学院 環境学研究科

教授 依田 憲

福島大学 農学系

准教授 望月 翔太

千葉県立中央博物館 生態学・環境研究課

研究員 平田 和彦

(一財)電力中央研究所 環境科学研究所 生物環境領域

主任研究員 白井 正樹

新潟大学

理学部 准教授 早坂 圭司

農学部 特任助教 森口 紗千子 (H30.4)

科学技術振興研究員 佐藤 雄大 (R1.4-R2.3)

科学技術振興研究員 鎌田 泰斗 (R2.4-R3.5)

[要旨]

本州沿岸域に繁殖地を有する海鳥3種オオミズナギドリ、コアジサシ、およびウミネコを対象に、それぞれの空間利用を明らかにし、センシティブティマップの作成を行った。オオミズナギドリについては、東京都伊豆諸島の利島を調査地とし、2018年から2020年の8月下旬から9月下旬にかけて、育雛期間中の個体126羽にGPSロガーを装着した。うち77個体からデータ回収に成功し、採餌トリップの追跡データを取得した。利島個体のトリップの特徴として、移動距離が短く、静岡、神奈川、千葉県沖を利用するショートトリップと、移動距離が長く東北および北海道沖を利用するロングトリップが認められた。利用海域と飛行高度から、繁殖地周辺における衝突死リスク、餌場喪失リスク、および経路障害リスクの存在が想定されたことを受け、それぞれに関するセンシティブティマップを作成した。衝突死センシティブティマップについては、高精度および高頻度に測位設定されたGPS追跡データから、風車ブレード高であるMゾーン(30m-150m)飛行が見られる環境特徴を抽出し、繁殖地から700m沖合までの海域が高リスクエリアであることが示された。餌場喪失センシティブティマップについては、得られた採餌トリップを行動解析のための機械学習の1種である逆強化学習を適用することで、行動ルールの可視化(以下、報酬マップ)を行い、報酬値を、海洋環境要因を説明変数とした統計モデルで予測することにより作成した。年度ごとに作成された報酬値予測の統計モデルは、いずれの年度間においても高い予測性を有しており、北海道東沖や日本海北西部が餌場喪失の高リスクエリアであることが示された。さらに、経路障害センシティブティマップについては、得られた予測報酬マップに強化学習を適用し、再現された飛翔軌跡の高密度エリアを抽出することで作成した。利島個体の実際の追跡データの軌跡密度と比較したところ、有意な正の相関が認められ、結果として、千葉県沿岸域が経路障害の高リスクエリアであることが示された。また、外挿性を検証するために、研究協力者から提供いただいた日本海側の粟島個体の追跡データと比較したところ、予測された飛翔軌跡の密度と実データの間に有意な正の相関が認められ、本手法による利用海域予測手法には、高い予測性と汎用性があることが示された。コアジサシについては、コスト/ベネフィット比による中心点採餌モデルを作成し、繁殖を保证する採餌距離を推定した。新潟県および千葉県の繁殖地で実施された行動観察により、採餌行動に関するパラメータおよび餌情報が取得された。得られた情報と文献情報から、採餌距離を変数とした餌エネルギー量および消費エネルギー量の推定式が作成された。結果として、4.51kmが本種の繁殖を保证する採餌距離として推定された。また、コアジサシの全国的な利用海域を推定するために、既存のコロニー分布データを

用いて、MaxEnt法によりコロニー形成ポテンシャルが評価された。コロニー形成に係る環境要因として、裸地面積、大河川河口からの距離、標高のばらつき等が挙げられた。作成された営巣適地予測モデルを全国の沿岸部に外挿し、営巣適地を抽出したところ、営巣適地は大規模な砂浜や主要都市部にある大規模な埋め立て地に集中して分布していた。適地指数のカットオフ値を設け、高スコアエリアから前述した採餌距離に基づくバッファゾーンを作成することにより、センシティブティマップを作成した。ウミネコについては、2019年および2020年に新潟県村上市および粟島で、繁殖個体に対しGPSロガーの装着を行った。得られた飛翔軌跡データをサブテーマⅡに提供し、サブテーマⅡで作成した本種の空間利用モデルによる他地域への外挿性の精度検証に用いられた。なお、本種のセンシティブティマップはサブテーマⅡで紹介する。以上から、予定していた項目は目標どおり、あるいは目標を上回る成果をあげることができた。

1. 研究開発目的

洋上風力発電の急速な導入が進む中、影響が想定される海鳥類の利用空間を予測し、重要エリアとしてマップで明示することは、予防措置として、そのエリア内における発電所建設を可能な限り回避する上で喫緊の課題といえる。本サブテーマでは、本州沿岸域で繁殖するオオミズナギドリ、コアシサシ、ウミネコの3種を対象として、利用空間を予測するモデルの開発と、それを用いたセンシティブティマップの作成を目的とする。それを達成するため、GPS トラッキングによりそれぞれの種の飛翔軌跡および高度情報を取得し、利用空間を明らかにする。続いて、鳥種ごとに利用空間を予測するモデルを作成し、異なる海域への外挿を通じて予測精度を検証する。それらの結果に基づき、重要海域を明示するセンシティブティマップを作成するとともに、広域的なマップ整備に向けた解析プロトコルを提案する。

2. 研究目標

本州沿岸域で繁殖するオオミズナギドリ、ウミネコ、コアシサシの移動をGPSデータロガーにより追跡し、高精度な移動軌跡を明らかにする。取得されたデータに基づき、利用海域を明らかにするとともに、海水温・クロロフィル濃度等の海洋特性を用いた空間利用モデルを作成する。空間利用モデルを他の海域に外挿することによりモデルの汎用性を検証し、それを用いて広域網羅的なセンシティブティマップを作成する。

3. 研究開発内容

3-1. オオミズナギドリの研究開発内容

① 調査・解析の流れ

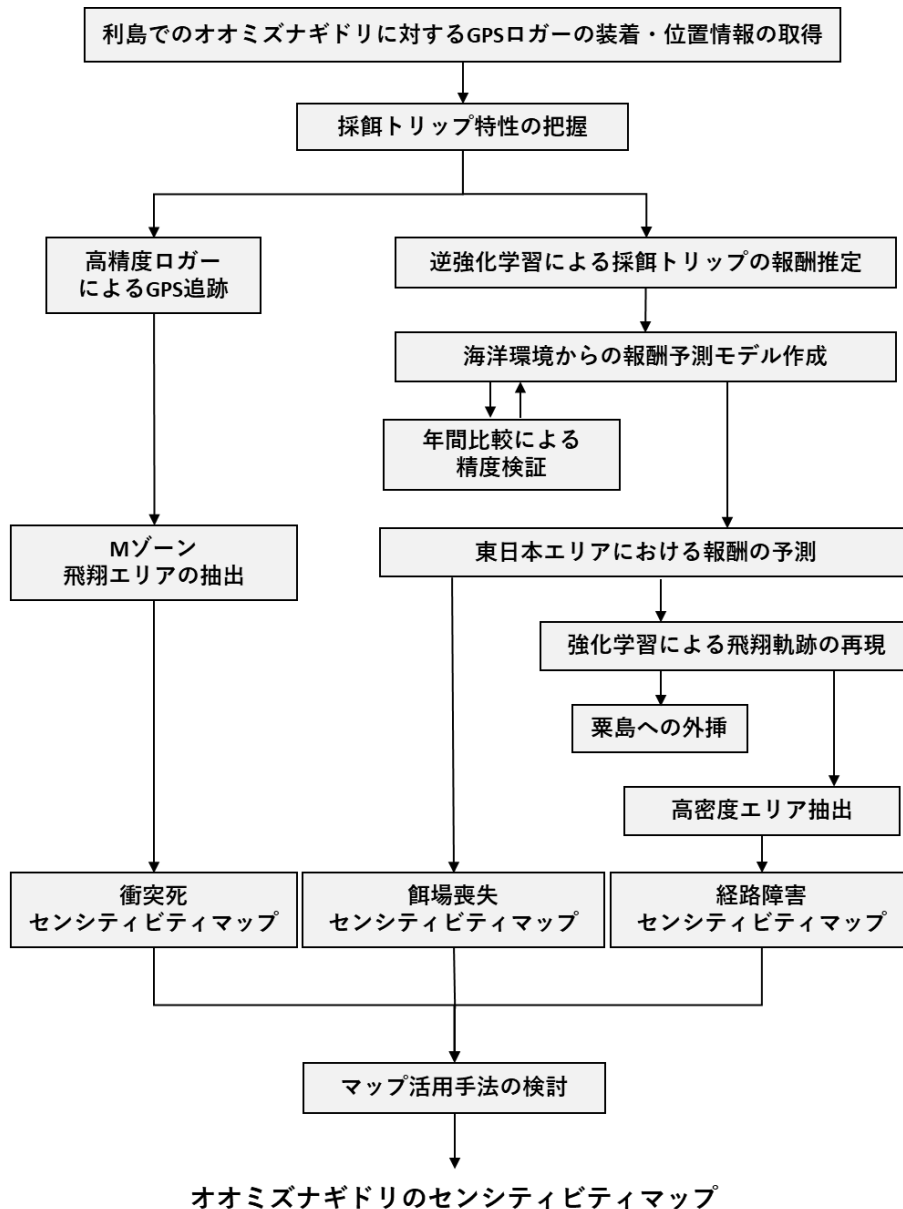


図1.1. オオミズナギドリのセンシティブリティマップ作成のフロー.

オオミズナギドリのセンシティブリティマップ作成に向けた調査・解析の流れを図1.1に示す。本研究では、はじめに、オオミズナギドリにGPSロガーを装着して飛行軌跡を取得し、採餌トリップ特性を把握することで、本種の生態特性を考慮した風車リスクを明らかにした。次に、本研究を通し、本種には衝突死、餌場喪失、および経路障害の風車リスクが想定されたことから、それぞれについてのマップを作成した。

餌場喪失および経路障害のセンシティブリティマップについては新規手法を開発した。生物の環境選択性や分布予測を行う場合、点の位置データを応答変数に用いたハビタットモデルを作成することが一般的であり、その位置データはルートセンサスやラインセンサスといった空間網羅的な調査によって得られた独立データであることが求められる。しかしながら、GPSなどによる追跡データは、同個体の移動による連続的な位置データであることから、その独立性が低く、強い空間的自己相関性を有しており、従来のハビタットモデルを適用するのは難しい。したがって、本研究では、近年、行動原理の解析や移動シミュレーションにおいて普及しつつある機械学習の1種の逆強化学習および強化学習を適用し、移動

ルールの解明および汎用的な飛翔軌跡予測手法を開発することで、餌場および経路の予測を行い、センシティブティマップを作成した。

衝突死センシティブティマップについては、高精度設定されたGPSロガーを装着し、Mゾーン飛翔にかかわる環境特徴を抽出することでマップを作成した。

② 調査地

東京都利島村(北緯34度31分、東経139度19分)の南端に位置するオオミズナギドリ繁殖地を調査対象区域とした(図1.2)。捕獲及びデータロガーの装着は2018~2020年の3年間にわたり、本種の育雛期である8~10月に行われた。

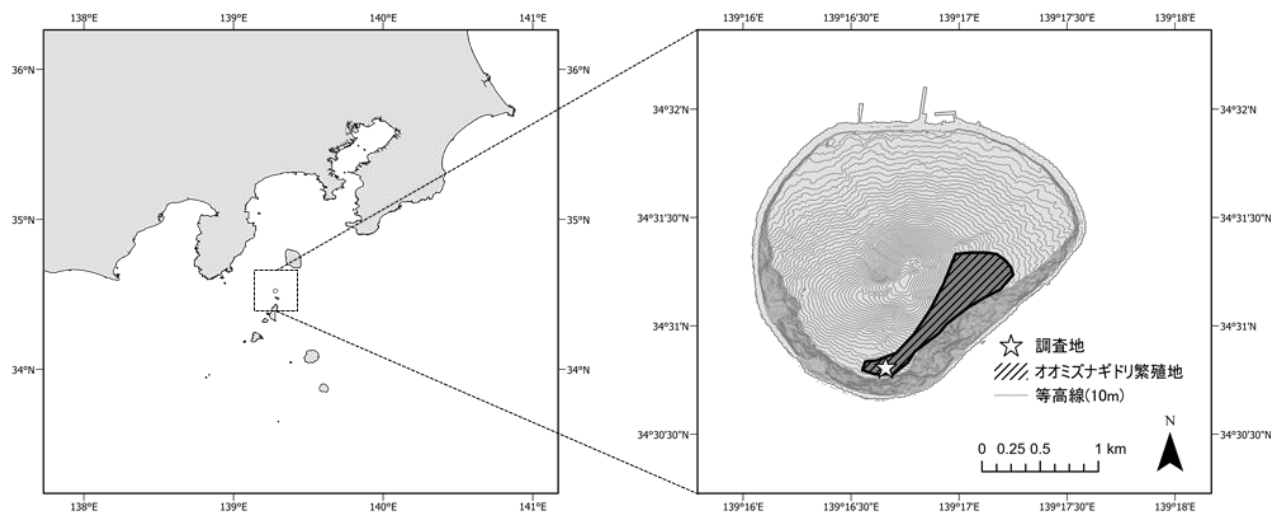


図1.2. オオミズナギドリの調査地。

東京都利島村の位置を示す。南端に位置するオオミズナギドリ繁殖地を調査地とした。

③ GPSデータロガーの装着

本研究には、再回収型のロガー(Axy Trek; Technosmart, Roma, Italy)と遠隔受信型のロガー(Gipsy Remote; Technosmart, Roma, Italy)の2タイプを用いた。成鳥個体を捕獲後、体重計測、鳴き声による雌雄の判別¹⁾を行った。再回収型のロガーは、背中羽毛にテサテープ(Beiersdorf AG; GmbH, Hamburg, Germany)を用いて固定された。ロガーとテサテープの合計重量は約25gであり、飛翔する海鳥で推奨される負荷重量である体重の5%未満を満たしている(捕獲個体の体重の平均値 ± 標準偏差: $528 \pm 51\text{g}$, $N = 119$)²⁾。装着個体数は、2018年に31個体(雄15個体、雌16個体)、2019年に30個体(雄15個体、雌15個体)、2020年に58個体(雄34個体、雌24個体)であり、それぞれの測位日数は1~21日間であった。測位間隔について、本研究では、長期的な飛翔軌跡をトラッキングするために1分もしくは5分間隔のlong periodモードを、詳細な飛翔パターンを高精度にトラッキングするために1秒間隔のcontinuousモードを用いた。long periodモードによる追跡個体は装着3日以降に、continuousモードによる追跡個体は、データロガーの電池寿命が1日以内であるため、装着翌日以降に再捕獲を行った。装着個体を再捕獲し、データロガーを回収した後、体重、跗蹠長、嘴峰長、嘴峰高、全頭長、および翼長の計測を行った。装着した個体のうち、2018年は20個体(雄10個体、雌10個体)、2019年は19個体(雄10個体、雌9個体)、2020年は36個体(雄20個体、雌16個体)からロガーが回収された。本研究期間を通じた回収率は63%であった。遠隔回収型のロガーについては、2018年に7個体を対象にハーネスによって背中部に固定され、放逐された。2019年および2020年にデータ回収を試み、2個体について、年を通じたトラッキングデータを取得した。

捕獲、GPSロガー装着、および再捕獲については、新潟大学動物実験倫理委員会により審査され、新潟大学長より承認された動物実験計画に沿って実施された(承認番号「SA00736」)。

④ トラッキングデータの処理

すべてのトラッキングデータの解析には、ArcGIS Pro 2.6 (ESRI, Redlands, CA, USA) が用いられ、データロガーに記録された緯度・経度情報のポイントデータをラインデータに変換し、飛翔軌跡として示した。コロニーから海に向けて出発し、再び海から島に戻ってくるまでを1回の採餌トリップとみなし、各採餌トリップのトリップ日数およびコロニーからの最遠到達点までの距離が算出された。

⑤ 統計解析

利島コロニーで繁殖するオオミズナギドリの採餌トリップには、短距離かつ短期間のショートトリップと、長距離かつ長期間のロングトリップの2つのトリップタイプが存在することが明らかになったため(詳細は4-1①で後述)、線形判別分析を行いトリップタイプの判別式を求めた。また、トリップの意思決定に係る要因として、トリップタイプと体重の関係を明らかにするために、ロングトリップとショートトリップを行う前の体重間、およびロングトリップとショートトリップを行った後の体重間に差があるかを検証した。はじめに、形態計測データ(跗蹠長、嘴峰長、嘴峰高、全頭長、尾長、翼長)を用いて主成分分析を行い、得られた第一主成分を体格指数とした。次に、体格指数を共変量とした共分散分析を行うことで、ロングトリップとショートトリップ間における体重の比較を行った。

オオミズナギドリの移動経路を推定するために、はじめに、ロングトリップ(詳細は4-1①で後述)を対象に逆強化学習による移動経路のルール設計の可視化(以下、報酬マップ)を行った。次に、報酬マップの規定メカニズムを、海洋環境要因を説明変数とした統計モデルを作成することで明らかにし、報酬マップを予測した。最後に、予測報酬マップに強化学習を適用し、移動経路の再現を行った。

逆強化学習とは、熟練者の行動パターンから、状態に応じて得られる報酬を推定する機械学習法である。2018年、2019年、2020年それぞれについて、12回、14回、28回分のロングトリップデータを用いた。トリップの最北端に到達するまでの飛翔軌跡を解析対象とした。解析対象範囲を緯度34.056から44.005、経度136.650から152.19とし、解析単位を、当該範囲を32×32分割したメッシュとした。逆強化学習法を実施するあたり、最適な行動パターンのインプットを必要とせず、熟練者の行動パターンから報酬推定が可能であるMaximum Entropy Deep IRLが用いられた。

応答変数を逆強化学習により推定された報酬値とし、海洋環境要因として水温、クロロフィル濃度、水深、陸地からの距離、海流の強さ、および海面高度を説明変数として、ElasticNet回帰モデルを適用した。ElasticNet回帰モデルは、係数値の調整によるモデルの正則化が可能であり、過適合を防ぎつつも、比較的解釈のしやすい統計モデルを作成することができる³⁾。2018年、2019年、および2020年それぞれにおいてモデルを作成し、逆強化学習による報酬値とモデル予測による報酬値の関係をPearsonの相関係数を用いて明らかにすることで、精度検証を行った。最も予測精度が高く、過適合が認められなかった2020年モデルを最終的なモデルとし、0.025度グリッドで抽出された変数を用いて報酬値を予測した。本種の育雛期である8月中旬から9月下旬にかけては海洋環境の変化がみられたことから、当該期間における環境変化を報酬マップに反映させるために時期ごとに報酬マップを予測した。報酬に対して最も影響力が高かった変数は水温であったことから、日間隔(1日、3日、5日および10日間隔)と水温変動係数の関係性を調べた。結果として、日間隔に応じて変動係数が増加し、小さい時間スケールにおいて大きな水温変動は認められなかった。これにより、当該期間内を約10日ごと4期に分けて(8月21日、8月31日、9月10日、9月20日)報酬マップを作成し、次項で記述する強化学習のために、マップ内の最小報酬値を全体から引き、最小値が0になるように基準化した。基準化した後の報酬値の最小値は0、最大値は0.107-0.134となった。さらに、得られた報酬値の時期に対する変動係数を算出した。

強化学習とは、行動によって変化した状態と報酬から、累積報酬を最大化する行動パターンを学習する機械学習である。強化学習法として、畳み込みニューラルネットワークを用いた深層学習であるDeep Q-Networkを適用した。予測報酬マップと実際の飛翔軌跡に鑑み、高報酬値0.07以上(以下、ゴールとする)のメッシュに至るまでの経路を学習した。0.025度グリッドで作成された報酬マップを0.05度、0.1度、0.2度、および0.4度グリッドにリサイジングし、はじめに0.4度グリッドで学習させた後、より小さいグリッドで転移学習させることで学習の効率化を図った。さらに、30%の確率でランダム

行動をとらせることで経路探索の効率化を図った。行動ごとに得られる報酬量はメッシュごとの報酬値-0.1とし、陸地への侵入は-1、ゴールは0.4度、0.2度、0.1度、0.05度、0.025度グリッドそれぞれで10、20、40、80とした。それぞれの報酬マップで10回以上のゴールが確認されたグリッドサイズを採用し、4期合計した飛翔軌跡のカーネル密度を算出した。シミュレーションによる飛翔密度と実際の飛翔密度の関係性を、Pearsonの相関係数を用いて調べることで精度検証を行った。

逆強化学習および強化学習にはPython3.7を、判別式解析、共分散分析、統計モデリング、および相関解析にはR ver3.6.3を用いた。

3-2. コアジサシの研究開発内容

① 調査・解析の流れ

カモメ類やミズナギドリ類が繁殖地から数十kmから数百km離れた海域を採餌場所として利用するのに対し、コアジサシの採餌場所は繁殖地から数km範囲内に留まることが報告されている⁴⁾。コアジサシの利用海域予測モデルを作成するためには、採餌場所となる海洋環境を説明変数として抽出する必要がある。しかしながら、水温やクロロフィルa濃度といった海洋環境データの最小解像度は約2km(局所的には500m)とされていることや沿岸部でのデータ精度は低いことから、上記のような変数を用いた統計モデル解析ではコアジサシの利用海域を説明および予測することは困難であると考えられる。このことを鑑み、本研究では、ベネフィット:コスト比に基づく採餌モデルを作成し、繁殖を保証するコロニーからの採餌距離を推定することとした。育雛期のコアジサシは採餌海域とコロニーを往復し、ほとんどの場合において餌を1匹のみ啜え、つがいや雛へ給餌を行う中心点採食者(Central Place Forager)である。なお、本研究において、餌2匹以上を加えた状態での飛翔が観察されたのは、撮影された写真1134例中1例のみであった。したがって、飛行速度などの行動パラメータ、餌エネルギー量、消費エネルギー量を推定することで、ベネフィット:コスト比 ≥ 1 を満たす採餌距離を推定し、本種の育雛期間中のコロニーを中心とした利用海域を推定した。

また、特定の島嶼や地域にコロニー形成を依存する多くの海鳥類に反して、コアジサシのコロニーの多くは砂州や中洲、埋め立て地、河口部、砂浜などの攪乱環境に形成されるため、年により、そのコロニー形成場所は異なることが多い。コアジサシの全国的な利用海域を推定するために、コロニー形成に係る環境要因を解明し、作成された営巣適地予測モデルを全国の沿岸部に外挿することにより営巣適地を予測した上で、前述した採餌距離に基づくバッファゾーンを作成することとした。本研究の調査および解析の流れを図1.3に示す。

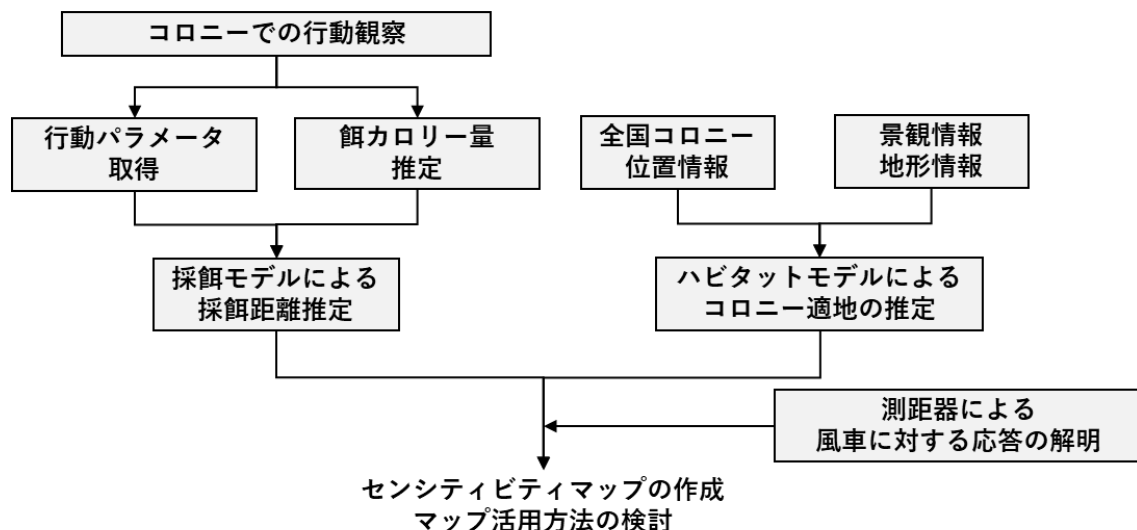


図1.3. コアジサシのセンシティブティマップ作成のフロー。

② 調査地

本研究の調査地を図1.4に示す。タイムバジェット作成および餌エネルギー量算出のための調査として、新潟県新潟市中央区新潟西港および千葉県千葉市美浜区の検見川の浜でコアジサシの行動観察を行った。推定された採餌距離の妥当性検証のために、茨城県神栖市波崎新港でGPSロガーの装着を行い、採餌行動の追跡を試みた。さらに、同調査地においては測距器を用いた行動追跡から、風車に対する応答を明らかにし、本種の風車リスクを評価した。

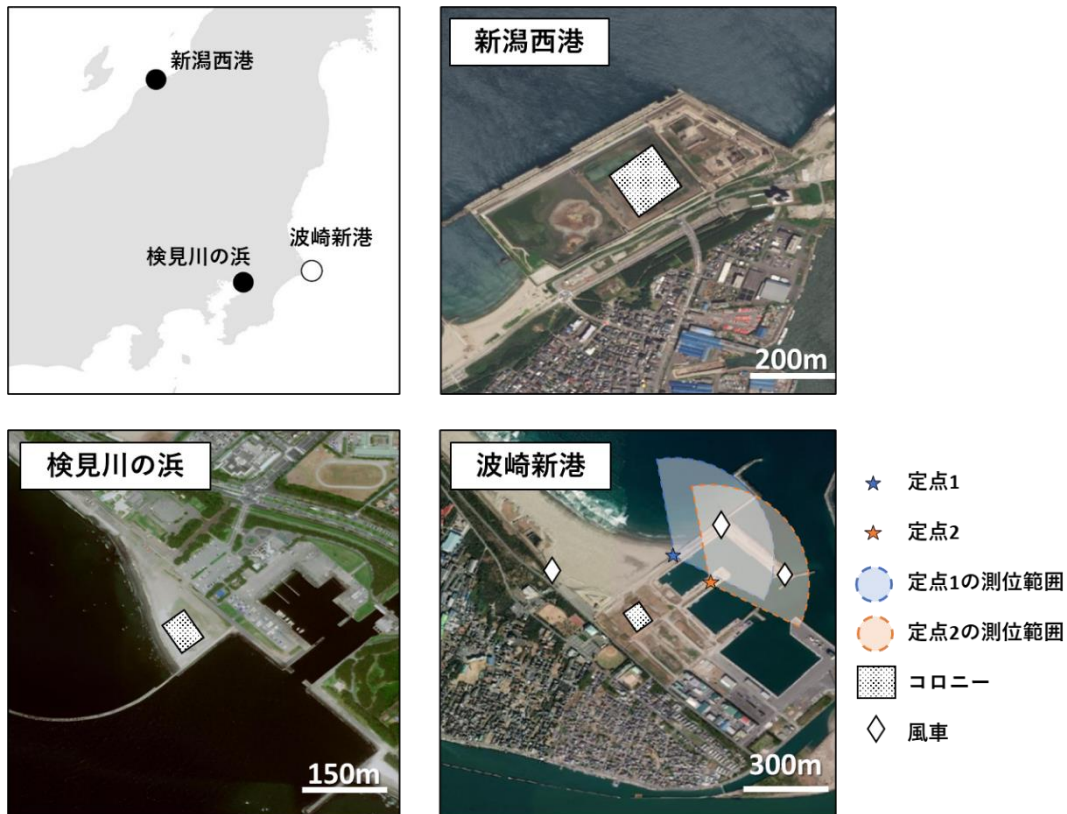


図1.4. コアジサシの調査地.

採餌行動観察を新潟県新潟市西区新潟西港と千葉県千葉市美浜区検見川の浜で行い、GPSロガーの装着および風車に対する行動応答に関する調査を茨城県神栖市波崎新港で行った。風車に対する行動応答については、測距器による追跡を行った。

③ 採餌距離推定式の作成

コアジサシの採餌に関するタイムバジェットを作成し、採餌距離 R を変量とした取得可能な餌エネルギー量 AE (kcal/日)および要求エネルギー量 RE (kcal/日)を推定する式を作成し、式(1)を満たす採餌距離を算出することで、本種の採餌範囲を推定した。

$$AE \geq RE \quad (1)$$

図1.5にコアジサシの典型的な採餌行動を示す。コアジサシの採餌時間は、餌場までの移動時間(A)、餌捕獲のための潜水時間(B)、帰巢時間(C)、雛への給餌時間(D)に大きく分けられることから、それぞれを算出および推定することでタイムバジェットを作成した。本研究では、採餌場所に着いたコアジサシが潜水し餌を啜る行為を、捕獲とする。なお、捕獲に失敗し帰巢する例が観察されたことから、タイムバジェットには、捕獲成功率 SR (%)を反映させ、捕獲に失敗した時の潜水時間(B')と餌を持たない時の帰巢時間(C')を組み込んだ。

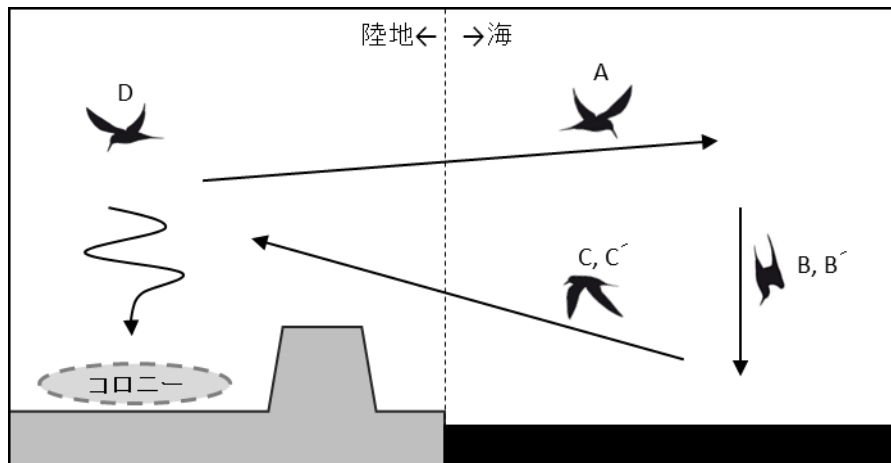


図1.5. コアジサシの採餌行動時間の定義.

コアジサシの採餌時間は、餌場までの移動時間(A)、餌捕獲のための潜水時間(B)、帰巣時間(C)、雛への給餌時間(D)に分けられることから、それぞれを算出および推定することでタイムバジェットを作成した。なお、餌捕獲に失敗し帰巣する例が観察されたことから、タイムバジェット作成においては、捕獲に失敗した時の潜水時間B'と餌を持たない時の帰巣時間(C')を考慮した。

AEの推定式は、1回の採餌で獲得できる餌エネルギー量FEW(kcal)に採餌距離を変数とした採餌可能回数MT(回/日)と捕獲成功率SR(%)を乗じた式(2)により作成された。

$$AE = FEW \times MT \times SR \quad (2)$$

MTは、親鳥の活動可能な時間AT(時/日)から1回の採餌に費やす時間TT(時)で除した式(3)により算出された。なお、本研究においては、活動可能な時間は親鳥2羽分とした。

$$MT = 2AT/TT \quad (3)$$

TTは、捕獲に成功した場合と失敗した場合を仮定して式(4)により算出された。捕獲に成功した場合は、餌場までの移動時間R/S1と、捕獲に成功し餌を咥えている時の帰巣時間R/S2に、潜水時間F1と給餌時間Lを足すことで算出した。捕獲に失敗した場合は、R/S1と、捕獲に失敗し餌を咥えていない時の帰巣時間R/S3に、失敗した場合の潜水時間F2を足すことで算出した。捕獲成功率(SR)および捕獲失敗率(1-SR)をそれぞれに補正し、TTを算出した。

$$TT = SR \times (R/S1 + R/S2 + F1 + L) + (1 - SR) \times (R/S1 + R/S2 + F2) \quad (4)$$

本調査期間中においては、コアジサシの餌魚種として同定および体長が計測されたのはカタクチイワシ *Engraulis japonicus* と サップ *Sardinella zunasi* であったため(詳細は4-2②で後述)、両種それぞれについてエネルギー量(kcal)を推定した。カタクチイワシについては、体長40 mm未満は式(5)で、体長40mm以上は式(6)で重量に変換し⁵⁾、推定重量を式(7)によりエネルギー量に変換した⁶⁾。サップについては、式(8)で重量に変換し(Elahi et al. 2017)⁷⁾、式(9)によりエネルギー量に変換した⁸⁾。

$$\text{体長40mm未満のカタクチイワシの重量} = (1.013 \times 10^{-6}) \times \text{Size}^{3.396} \quad (5)$$

$$\text{体長40mm以上のカタクチイワシの重量} = (5.811 \times 10^{-7}) \times \text{Size}^{3.523} \quad (6)$$

$$\text{カタクチイワシのエネルギー量} = 6.29 \times 0.239 \times \text{カタクチイワシの重量} \quad (7)$$

$$\text{サッパの重量} = 0.0136 \times \text{Size} / 10^{2.823} \quad (8)$$

$$\text{サッパのエネルギー量} = 6.86598 \times 0.239 \times \text{サッパの重量} \quad (9)$$

式(1)に含まれるREの推定式を作成するにあたり、はじめに、REを親鳥の行動別消費エネルギー量ACE(kcal/日)と雛鳥の要求エネルギー量MEI(kcal/日)を足すことで算出する式(10)と、REをFEWに対し採餌回数T(回/日)とSRを乗ずることで算出する式(11)を作成した。

$$\text{RE} = \text{ACE} + \text{MEI} \quad (10)$$

$$\text{RE} = \text{FEW} \times \text{T} \times \text{SR} \quad (11)$$

ACEは、行動別コストに各行動時間を乗ずる式(12)により算出された。コアジサシ成鳥の平均体重を51gとし⁹⁾、コロニーと餌場間の飛行、ダイビング、給餌では飛行時のコストFC(kcal/時間)を、それ以外の時間には休息時のコストRC(kcal/時間)を当てはめた¹⁰⁾。

$$\text{ACE} = \text{FC}(\text{TT} \times \text{T} + \text{D}) + \text{RC}(2\text{AT} - \text{TT}) \quad (12)$$

雛鳥1羽あたりの要求エネルギー量TME(kcal)は、既往の研究より明らかとなっているカモメ科10種のヒナから推定されたアロメトリー式(13)¹⁰⁾により算出された。このとき、雛の体重CWは48.5gとした¹¹⁾。日当たりの雛鳥の要求エネルギー量MEI(kcal/日)はTMEにクラッチサイズCSを乗じ、育雛期間BDで除する式(14)で算出された。このとき、CSは2.4、BDは20とした¹²⁾。

$$\text{TME} = 539.5 + (37.3 \times \text{CW}) \quad (13)$$

$$\text{MEI} = \text{CS} \cdot \text{TME} / \text{BD} \quad (14)$$

式(10)に式(11)を代入し、REの推定式を作成した。

採餌距離を変数とする取得可能な餌エネルギー量と要求エネルギー量の交点を、コアジサシの繁殖を保証する採餌距離とし、採餌範囲を推定した。なお、本調査中において、コロニー内および海上どちらにおいても、親鳥自身の餌の嚙下を確認したことから、すべての採食をコロニーに戻っておこなうシナリオIと、親鳥自身の採食はすべて海上で行うシナリオIIを作成した。シナリオIのREについては親鳥と雛鳥の値を合算して用い、シナリオIIについてのREは雛鳥のみの値を用いた。

④ 採餌行動の観察

タイムバジェット作成のための行動パラメータとしては、1日あたりの活動時間(h)、餌場までの飛行速度(km/h)、捕獲に成功したときの帰巣時の飛行速度(km/h)、捕獲に失敗したときの帰巣時の飛行速度(km/h)、採餌1回あたりの給餌時間(h)、捕獲に成功したときの採餌1回あたりの潜水時間(h)、捕獲に失敗したときの採餌1回あたりの潜水時間(h)、および捕獲成功率(%)が取得された。1日あたりの活動時間(h)は、夜明け前後の最初に採餌行動認められる時間から、日没前後の最後の採餌行動が認められる時間までとした。夜明け前の午前3時30分から夜明け後の午後8時00分までの終日観察を検見川の浜で2日間実施し、個体が餌をもって帰巣する時刻を記録した。餌場までの飛行速度(km/h)は、コロニーで雛に給餌をし、再び海へ出巣する個体を対象とした。帰巣時の飛行速度(km/h)は、コロニー周辺海域で潜水している個体を対象とした。それぞれの対象個体について、測距器(VECTOR21 AERO, SAFRAN)により2~4秒間隔で位置座標を測位し、測位点差と測位間隔から飛行速度を算出した。測位と同時に個体を観察し、餌の有無を記録することで、捕獲成功の有無を明らかにした。採餌1回あたりの潜水時間(h)については、餌場に到着した個体が潜水開始した時点から、餌を捕まえ、帰巣行動をとるまでの間の時間を

計測した。捕獲成功率(%)については、潜水後に餌を啜っているかどうかを記録し、その割合を算出した。採餌1回あたりの給餌時間(h)については、餌を啜って帰巢した個体がコロニー上空を通過した時点から、雛を探し、給餌を終え、再び餌場への移動を開始するまでの間を計測した。

餌エネルギー量(kcal)のための餌情報は、給餌のために餌を啜っている個体を対象に、一眼レフカメラによる撮影を行い、写真により餌魚種の同定および餌サイズの計測することにより取得された。計測の際は、コアジサシの嘴峰長を30mmとし、写真上の嘴峰長と体長の比から、実際の体長を推定した。

⑤ 捕獲およびGPSロガーの装着

推定される採餌距離の妥当性を検証するために、捕獲およびGPSロガーによる追跡を試みた。捕獲は2020年6月1日に茨城県神栖市波崎新港で行われた。遠隔操作式のボウネットと足くくり罠を併用し、抱卵中の成鳥14羽を捕獲した。体重および形態を計測した後、個体識別用の足環およびGPS発信機(nanoFix GEO-Mini, PathTrack, West Yorkshire, UK)を装着した。なお、放鳥後、抱卵の継続が認められたものの、6月7日に局所的な豪雨が起き、コロニー全体での営巣放棄が認められ、GPSロガーの再回収には至らなかった。翌年2021年において、茨城県神栖市でGPSロガー装着個体を発見したが、繁殖は認められず、再回収はできなかった。したがって、本研究で推定される採餌距離の妥当性は、既往の文献情報をもとに検証した。

⑥ 風車に対するコアジサシの応答

コアジサシに対しての風車リスクを明らかにするために、風車周辺におけるコアジサシの採餌行動を観察した。2020年6月に茨城県神栖市波崎新港内埋め立て地に形成されたコロニーを対象とし、コロニーと採餌海域の間に、2ヶ所の定点を設け、それぞれの定点から2日間測距器による採餌行動の追跡を行った(図1.4)。

⑦ コロニー適地マップの作成

2005年から2011年にかけて取得された全国255ヶ所の飛来・営巣データ(平成23年度コアジサシ保全方策検討調査委託業務報告書)から、本種のコロニー位置座標を抽出した。本州において営巣が認められた範囲を対象とし、北緯38.171-30.991、東経129.331-141.046を解析範囲とした。解析範囲内における海岸線から内陸方向へ1kmのバッファを発生させ、そのバッファ内に0.005度(約500m)グリッドを作成し、解析対象メッシュとした。営巣ポイントが認められたメッシュを在とし、認められなかったメッシュを不在とし、在、不在データをそれぞれ1、0データに変換し、応答変数とした。

コアジサシ営巣場所の分散範囲は40km程度であると考えられており¹³⁾、実際に東京湾や大阪湾、伊勢湾、利根川などの大河川河口部といった数十kmスケールでの集中分布が認められている。一方、形成されるコロニーは、砂浜や中洲といった自然環境や都市部におけるビル街屋上や埋め立て地といった人工環境など、さまざまな土地利用景観で報告されている。このことから、本種は、数十kmスケールでの地形環境に対する選択性を有しながら、よりファインなスケールでの土地利用景観に対する選択性を有していると考えた。したがって、まず地形環境について、メッシュ内の平均標高、およびバッファ500m、1km、2km、4km、8km、および16km内における標高のばらつき(国土数値情報 国土交通省)¹⁴⁾、流域面積500km²以上、1000km²以上、1500km²以上、2000km²以上、2500km²以上、3000km²以上、4000km²以上、5000km²以上、およびすべての1級水系河川の河口からの距離(国土数値情報 国土交通省)¹⁴⁾が説明変数として抽出された。次に、解析メッシュの大部分を満たすバッファ300mをもっとも小さいサイズとし、1段階大きいスケールであるバッファ500mをもって、都市面積、森林面積、草地面積、裸地面積および裸地周縁長(土地利用土地被覆図 JAXA)¹⁵⁾が説明変数として抽出された。ハビタットモデル作成には、MaxEnt^{16), 17)}を用いた。MaxEntは、虚偽の不在データが多いデータセットに対しても比較的高精度でもモデリングが可能であるとされている。本解析においては、より多くの変数削減や外挿性の精度向上に重きをおいて開発されたR package MIAMaxent¹⁸⁾を用いた。MIAMaxentはモデルの説明力を最も向上させる変数を追加する貪

欲的アルゴリズムを採用し、尤度比検定によって、追加後におけるモデルの説明力向上が有意であったかどうかを検証し、最適モデルを探索する手法がとられている。本解析では、尤度比検定の有意水準は0.1%とした。在データの75%を学習用データとし、25%を検証用データとした。

MaxEntにより推定された生息適地指数から在メッシュと不在メッシュ(バックグラウンドデータ)を分けるカットオフ値をYoden Indexに基づき算出し、在メッシュを抽出した。在メッシュから、採餌距離バッファを発生させることで利用海域を示した。解析にはR ver3.6.3が用いられた。

3-3. ウミネコの研究開発内容

2019年から2020年の2年間にわたり、新潟県村上市の笹川流れ(北緯38度23分、東経139度27分)と、粟島浦村のエビスヶ鼻(北緯38度27分、東経139度14分E)に営巣するウミネコの成鳥を対象に捕獲を行った。本種の繁殖期のうち、抱卵期にあたる4月末から5月初旬に、くくり罠または箱型の罠を用いて抱卵中の成鳥が捕獲された。捕獲個体は体重、嘴峰高、嘴峰長、頭長、ふしよ長、および自然翼長を測定した後、雌雄判別のために羽毛の採取を行った。その後、背面にソーラー発電式GPSロガー(2019年度:Gipsy Remote, Techno smart, Italy、2020年度:Axy Trek Remote, Techno smart, Italy)をハーネス方式で装着した。外部計測とデータロガーの装着を終えたウミネコは、それぞれの巣に放逐された。放鳥後、ロガーに蓄積されたデータは専用の受信機を用いた遠隔ダウンロードによって取得された。データの取得は、週に約2回の頻度で、本種が繁殖期を終える7月中旬まで行われた。

4. 結果及び考察

4-1. オオミズナギドリの結果および考察

① 利島で繁殖するオオミズナギドリの飛翔海域

図1.6に、GPSロガーにより追跡された2018年から2020年にかけての雌雄それぞれの飛翔軌跡を示す。2018年は雄10個体、雌8個体、2019年には雄10個体、雌8個体、2020年には雄18個体、雌15個体から飛翔軌跡を取得した。3年間で計69個体から得られた採餌トリップの総数は154回であった。各採餌トリップの調査地から最遠到達点までの直線距離は、最大値が1,412km、最小値が26kmであった。採餌トリップの日数は最大値が12.6日、最小値が0.6日であった。採餌トリップの特徴として、26km~250kmの距離を0.6日から約3日で行うショートトリップと、約800km~約1,400kmの距離を約5日から約13日間かけて行うロングトリップの2つのトリップタイプが見られた。それぞれのトリップタイプの採餌海域として、ロングトリップでは北海道・東北沖を、ショートトリップでは利島周辺の千葉・神奈川・静岡沖の沿岸部が利用されていた。

オオミズナギドリの体格指数を作成するために、跗蹠長、嘴峰長、嘴峰高、全頭長、尾長、および翼長の5つの因子を用いて主成分分析を行った。第一主成分軸(PC1)の寄与率は51.1%であった。PC1の主成分係数は、跗蹠長、嘴峰長、嘴峰高、全頭長、尾長、および翼長のそれぞれにおいて、0.44、0.49、0.41、0.53、-0.05、および0.3であった。トリップ前の体重とトリップタイプの間には有意差が認められ(ANCOVA, $p < 0.01$)、ロングトリップ前の体重はショートトリップトリップ前の体重よりも小さかった。トリップ後の体重については、トリップタイプ間に有意差は認められなかった(ANCOVA, $p = 0.54$)。

遠隔受信型のGPSロガーで追跡された飛翔軌跡を図1.7に示す。春季から夏季へ進むにつれてロングトリップの採餌海域が北上する傾向が認められた。この背景には餌魚種の回遊が関わっていると考えられる。2019年6月~10月にかけて、利島および粟島に生息するオオミズナギドリの糞を採取し、次世代シーケンサーによるDNAバーコーディングを起こった結果、いずれの島においても、カタクチイワシの構成比率75%以上を占めており、主要な餌種がカタクチイワシであることが明らかとなった。オオミズナギドリは、カタクチイワシ適水温帯(約20度)の北上に伴い採餌海域を変化させていると考えられる。

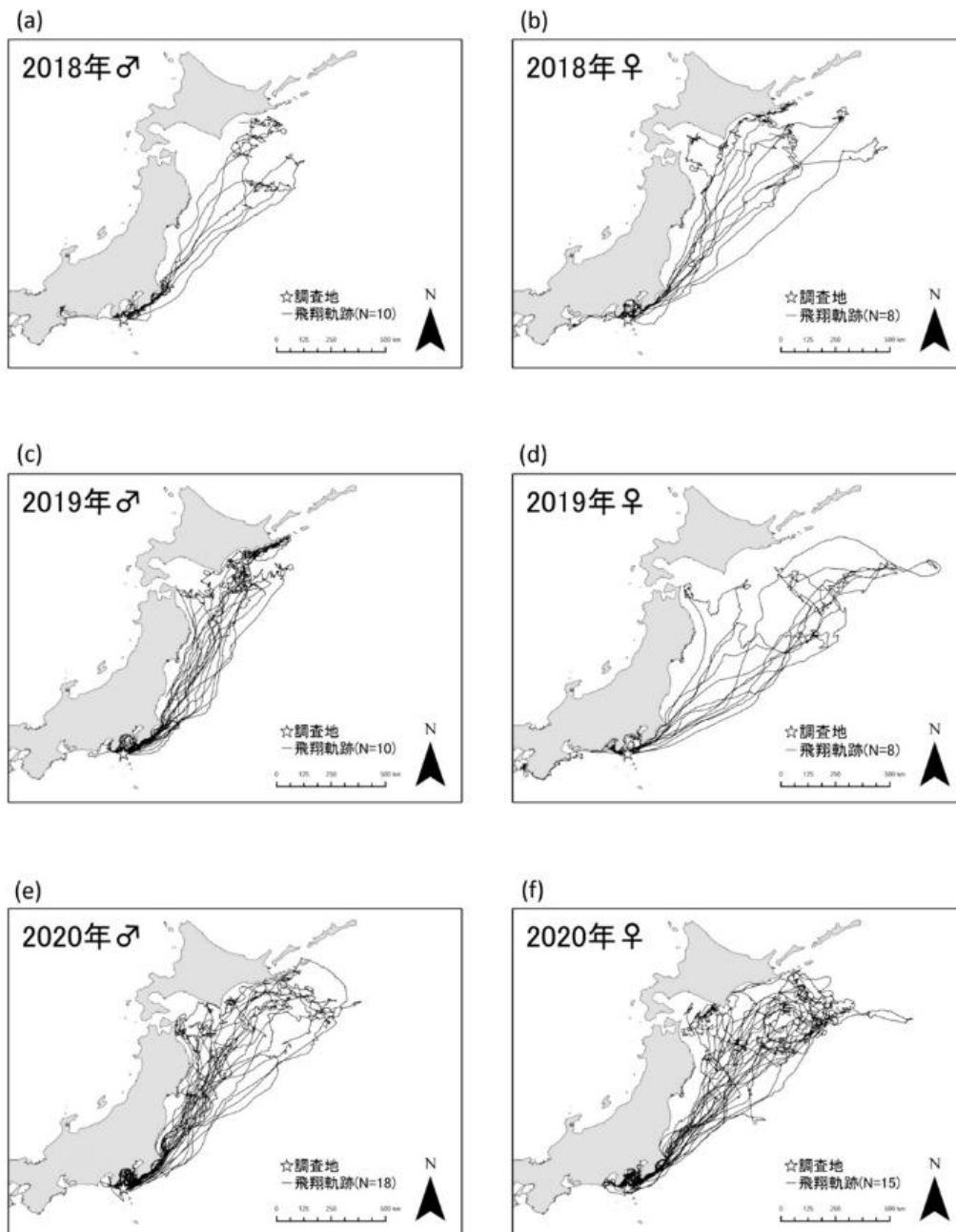


図1.6. 利島個体の飛翔軌跡.

GPSロガーに記録されたポイントデータをラインデータに変換し、飛翔軌跡として表す。(a)および(b)は2018年におけるオスとメスの飛翔軌跡を、(c)および(d)は2019年におけるオスとメスの飛翔軌跡を、(e)および(f)は2020年におけるオスとメスの飛翔軌跡を示す。

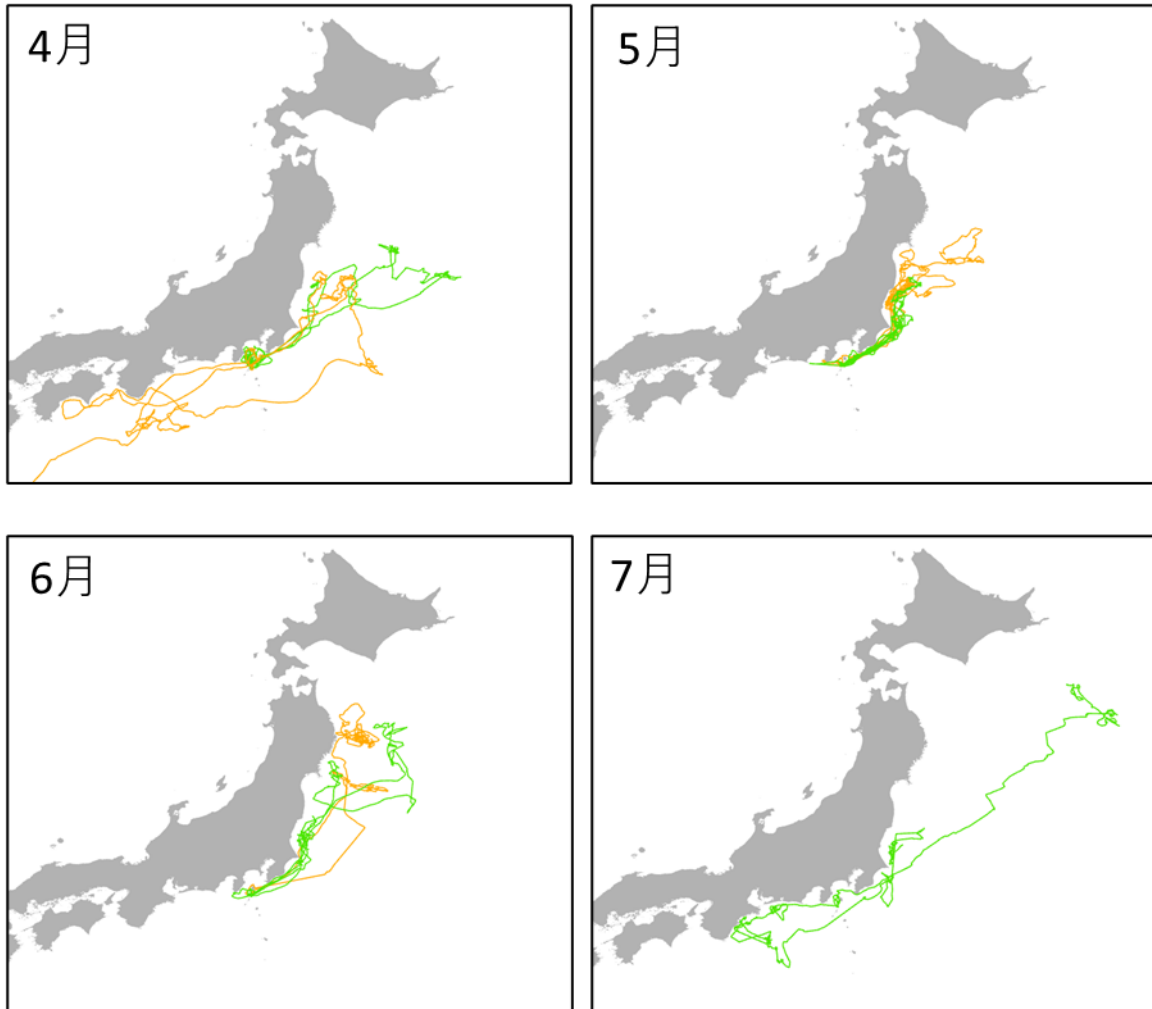


図1.7. 採餌海域の季節的变化。

2019年4月から7月にかけて遠隔受信型のGPSロガーにより追跡された2個体の飛翔軌跡を示す。

② オオミズナギドリにおける風車設置リスクの評価

本研究において、ロングトリップを行った個体はショートトリップを行った個体より有意に体重が小さいことが明らかになった。既往の研究では、親のコンディションや雛の状態がトリップ長に影響を及ぼし、ショートトリップ後は体重が減少し、ロングトリップ後は体重が増加することが知られている¹⁹⁾。また、ロングトリップで利用する東北・北海道沖の海域は親潮域から親潮・黒潮移行領域にあたり、黒潮域にあたる繁殖地周辺の海域と比較して、一次生産性が高いことが知られている²⁰⁾。したがって、短期間で繰り返し雛へ給餌することが可能な繁殖地周辺の餌場餌場を育雛のために利用し、それにより悪化した自身のコンディションを回復するために繁殖地から遠く離れた一次生産性の高い好適な餌場を利用していると考えられ、それぞれの海域が繁殖において異なる役割を担っていることが示唆された。特に、当該繁殖地におけるロングトリップの移動距離は、全国の繁殖地と比べても著しく長く²¹⁾、採餌にかかる移動コストが極めて大きいと推察される。これらの結果を整理すると、本種にとって、雛への給餌および親個体のための餌場と、ロングトリップにおける餌場までの移動経路が、繁殖を全うするために特に重要な海域であると考えられる。以降の記述では、これらの海域において風車が建設された場合に、オオミズナギドリが被るリスクを想定し、それぞれのリスクに対応したセンシティブティマップ作成の必要性について述べる。

まず、1つ目としては、飛行中における衝突死のリスクが挙げられる。一般的に風車に対する衝突死リスクは、30mから150mほどの風車ブレード高の高さ(以下、Mゾーンとする)での飛翔率が考慮される。本

研究におけるLong periodモード(1fix/1min)を用いたGPSトラッキングで、Mゾーンでの飛翔が認められたのは、コロニー周辺のみであった(図1.8)。衝突死のセンシティブティマップを作成するためには、コロニー周辺エリアでのより高頻度、高精度なGPSトラッキングデータに基づいて、Mゾーン飛行率の高い環境を抽出することが必要になると考えられる。

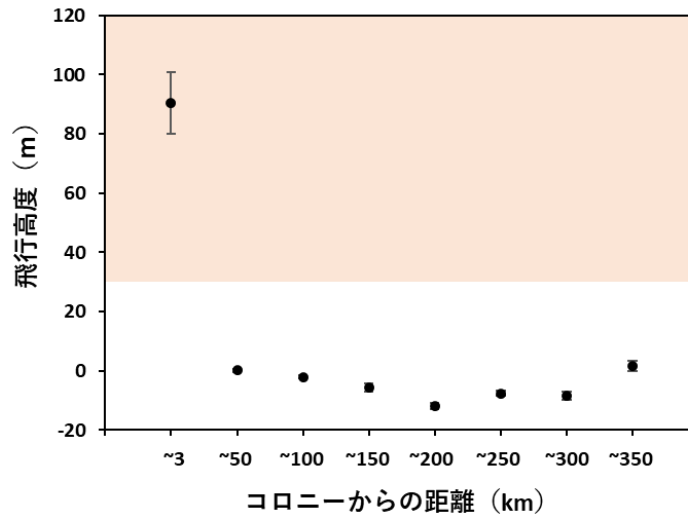


図1.8. コロニーからの距離と飛行高度の関係。

採餌トリップ中における飛行高度を、コロニーからの距離ごとに示す。風車ブレード回転域であるMゾーン(30mから150m)を橙色で示す。

次に、2つ目として繁殖地周辺および東北・北海道沖の餌場海域に風車が建設される場合に引き起こされる餌場劣化による餌場放棄のリスクが挙げられる。繁殖地周辺の餌場が放棄された場合、雛への給餌量の低下や、繁殖成功に負の影響を及ぼす可能性がある。また、東北・北海道沖の餌場が放棄された場合、親個体のコンディション調整ができなくなり、育雛放棄や親個体の生存率が低下する可能性がある。洋上風車建設による餌場放棄リスクを低減するためには、トリップの目的地となるような餌場ポテンシャルの高い海域を可視化したセンシティブティマップが必要になると考えられる。

3つ目として、利島から東北・北海道沖にかけての海域に風車が建設される場合に引き起こされる移動障害のリスクが挙げられる。洋上風車が餌場までの移動の障害になった場合、迂回による移動コストが増加し、採餌効率の低下を招くおそれがある。ロングトリップにおける餌の摂取量が少なかった場合、トリップの長期化ひいては繁殖放棄につながる可能性がある。洋上風車建設による経路障害リスクを低減させるためには、オオミズナギドリのロングトリップ上の移動経路として高密度に利用される海域を抽出したセンシティブティマップが必要になると考えられる。

なお、餌場および経路のセンシティブティマップについては、より広い海域をセンシティブティマップに組み込むこと、環境変動に沿った行動の変化が認められたことを鑑みて、本研究ではロングトリップのみを対象とした。

③ 餌場喪失および経路障害のセンシティブリティマップ

(1) 報酬推定および報酬に影響を及ぼす環境要因

逆強化学習により推定された報酬値を図1.9に示す。なお、本解析において推定された数値は相対値であり、数値の大きさが報酬値としての大きさを直接的に表しているものではない。2018年、2019年、2020年いずれにおいても、東京湾から関東沖にかけては低報酬となっており、東北沖から北海道沖にかけては高報酬と予測された。

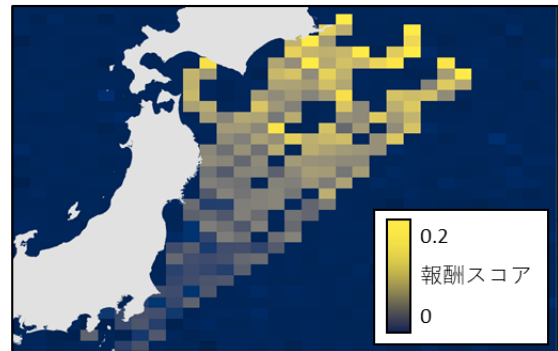
得られた報酬値を応答変数とし、海洋環境を説明変数とした統計モデリングの結果を表1.1に示す。2018年、2019年、2020年のいずれにおいても表面水温の影響が最も強く、負の効果を示していた。次点として陸からの距離の影響が強く、正の効果を示していた。クロロフィル濃度、水深、海面高度、および海流の強さには一貫した傾向は認められなかった。

年度ごとに作成されたモデルを他年度に外挿し、予測精度の検証を行った結果を表1.2に示す。いずれの年においても相関係数は0.79以上と高い値を示しており、逆強化学習によって推定された報酬が、環境要因を説明変数とした統計モデルによる予測が可能であることが示された。なお、以降の解析においては、3つの中で最も過学習されなかった2020年度モデルを用いた。

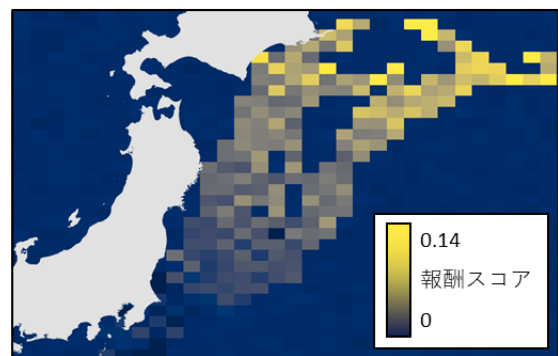
(2) 報酬予測および餌場喪失センシティブリティマップ

2018年の8月中旬から9月中旬までの予測報酬マップを図1.10に示す。高報酬エリアは太平洋の北海道沖および日本海北西側に認められた。季節が進むにつれて、沿岸部での報酬値の増加が認められ、9月20日の報酬マップではより高報酬エリアの拡大が認められた。その理由としては、表面水温の季節的推移が影響していると考えられた。季節や年を通じての安定した漁場はオオミズナギドリにおいても重要な餌場となると考えられる。したがって、2018年度から2020年度にかけての高報酬エリアを抽出し、そのエリアにおける報酬値の変動係数を算出した(図1.11)。太平洋側については、北海道沖の沿岸部で安定した高報酬エリアが認められ、北海道沖合南東部の高報酬エリアの安定性は低かった。報酬値の変動の背景には、季節的な水温変化のしやすさに加えて、暖水渦の有無が関連していると考えられた。暖水渦の発生には、海底地形や黒潮の蛇行が影響していると考えられている。サンマ類をはじめとした低水温帯を好む魚種は、暖水渦の高水温帯を忌避することが知られており、暖水渦周辺海域は、オオミズナギドリの餌場としても適していないと推察される。したがって、長期的な餌場の安定性の喪失を風車建設によるリスクとして捉え、報酬値の変動係数を尺度とした餌場喪失のセンシティブリティマップを作成した(図1.11)。

(a) 2018年



(b) 2019年



(c) 2020年

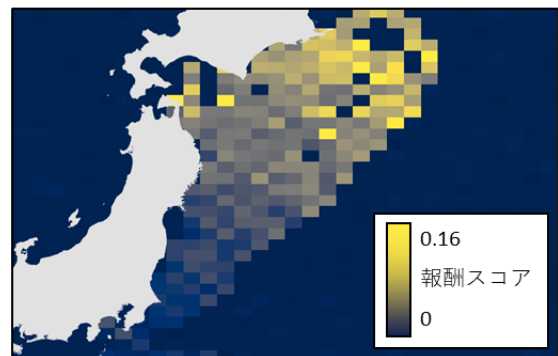


図1.9. 逆強化学習による報酬値の推定。
(a)2018年では12回の、(b)2019年では14回の、(c)2020年では28回ぶんのロングトリップを用い、逆強化学習により報酬値を推定した。

表1.1. 報酬値に影響を及ぼす海洋環境要因.

ElasticNet回帰モデルを作成し、報酬値に影響を及ぼす海況環境要因を年ごとに明らかにした。

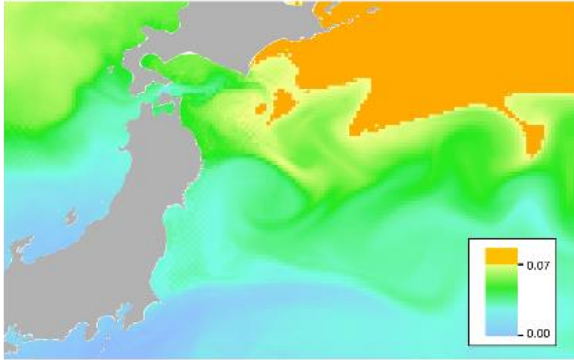
説明変数	2018年	2019年	2020年
クロロフィル濃度	-	-0.0007	0.0002
陸からの距離	0.0044	0.0079	0.0036
水深	-0.0013	-0.0029	-
海面高度	0.0038	0.0024	-0.0014
表面水温	-0.0294	-0.0261	-0.0277
海流の強さ	0.0019	-0.003	-

表1.2. 報酬予測モデルの精度検証.

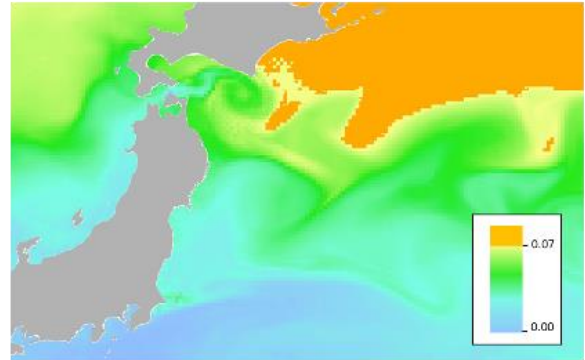
年ごとに作成されたElasticNet回帰モデルを別の年に外挿し、逆強化学習による推定値とモデルによる推定値の比較を、Pearsonの相関係数により行った。

検証年度	報酬スコアと予測報酬スコア間の相関係数		
	2018年モデル	2019年モデル	2020年モデル
2018年報酬スコア	0.861	0.836	0.854
2019年報酬スコア	0.852	0.878	0.857
2020年報酬スコア	0.804	0.797	0.811

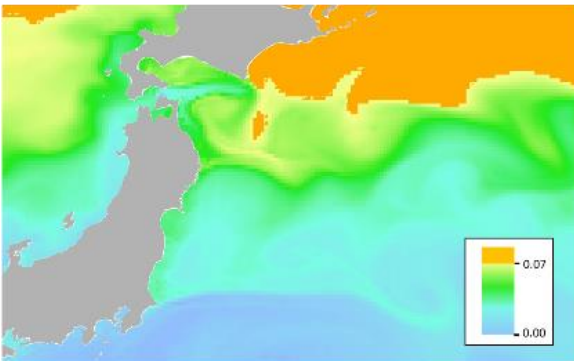
2018年8月21日



2018年8月31日



2018年9月10日



2018年9月20日

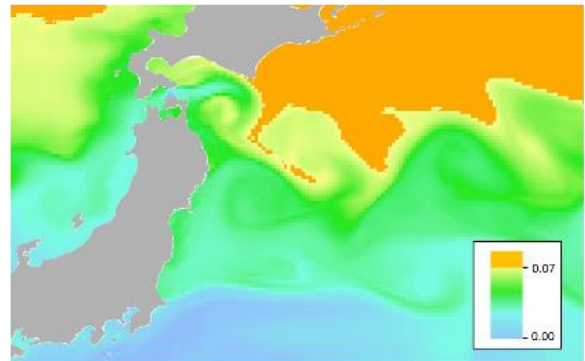


図1.10. 環境要因を用いた報酬マップの予測

海洋環境を説明変数に用いたElastic Net回帰モデルにより予測された報酬マップを示す。2018年から2020年の8月21日、8月31日、9月10日、9月20日の予測報酬マップが作成された。本図においては2018年の結果を示す。

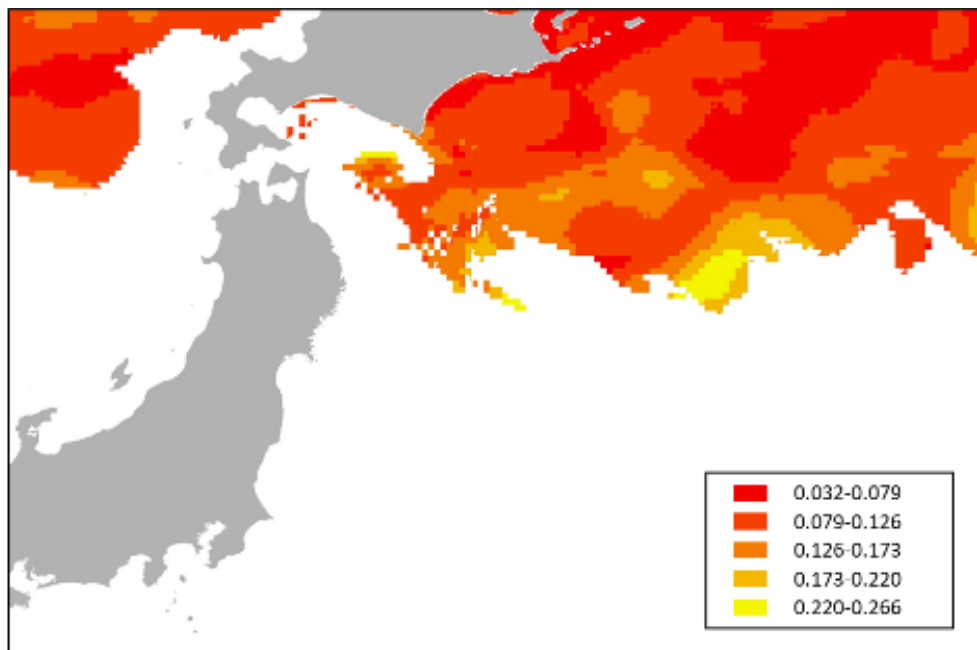


図1.11. 高報酬エリアの変動係数.

2018年から2020年にかけて予測された報酬マップから高報酬エリア(>0.07)を抽出し、報酬値の変動係数を算出し、餌場としての安定性を評価した。

(3) 移動再現および経路障害センシティブティマップ

作成された報酬マップを用いて軌跡の再現を行った。なお、本解析の高解像度化には、相当な時間を要することが解析を通して明らかになったことから、本報告書では2018年度のみ解析結果を示す。なお、環境アセスメントデータベース (EADAS) に実装を予定するセンシティブティマップについては、過去5年間を通じた解析結果を提出する予定である。

利島を対象にして、再現された飛翔軌跡とその密度マップ、および解析に用いられた実データとしての飛翔軌跡とその密度マップを図1.12に示す。強化学習の結果、千葉県沿岸部、東北沖合を通り、北海道沖へ移動する飛翔軌跡が得られ、利島個体の実データに類似した傾向を有する飛翔軌跡図となった。得られた飛翔軌跡図をカーネル密度変換したところ、高密度エリアとして予測されたのは千葉県沿岸部であり、再現結果と実データ間における飛翔密度の間には有意な正の相関が認められた (図1.14a, $r=0.64$, $p < 0.001$)。本海域が高密度になった要因としては、本種が利島から北海道沖の高報酬エリアまでの移動距離がより短くなるようなルートを選択していることが影響し、本エリアに飛翔軌跡が収束したことが挙げられる。

さらに、外挿性の検証として、日本海粟島コロニーを対象とした経路予測を行った。その結果、北海道沖や日本海北西部への飛翔軌跡が描かれ、東北沖および津軽海峡において、高密度エリアが示された (図1.13)。粟島個体のGPS追跡データを、研究協力者の名古屋大・依田憲教授から提供いただき、精度検証を行った結果、再現結果と実データ間における飛翔密度の間には有意な正の相関が認められた (図1.14b, $r=0.73$, $p < 0.001$)。内挿および外挿どちらにおいても高い予測性が認められたことから、再現結果による密度マップを経路障害のセンシティブティマップとした (図1.12d, 13d)。

本解析は、強化学習と統計モデリングを融合した全く新規の解析手法であり、高い予測性とその汎用性が示された。本解析による移動再現に最低限要するデータは、海洋環境から予測される報酬値と出発地となるコロニー位置情報のみであり、将来的な環境変化や他コロニーにおいても適用可能である。しかしながら、より離れた海域 (例えば、東シナ海が餌場として想定される場合など) を対象とする場合は、餌種や餌分布規定要因が異なる可能性が想定されるため、餌分布と予測報酬マップの適合性を事前に確認することが、軌跡再現の高精度化において重要となると考えられる。

④ 衝突死のセンシティブティマップ

1秒間隔での高精度トラッキングの結果、採餌トリップ中においてMゾーン飛行が認められたのはコロニー周辺であり、帰巢時 (図1.15a) と出巢時 (図1.15b) であった。帰巢時については、3個体から高度データを取得することができ、それぞれ最大で430m、470m、425m離れた地点からMゾーンを飛翔していた。出巢時は陸域から最大で700m離れた海域までMゾーンを飛翔していた。

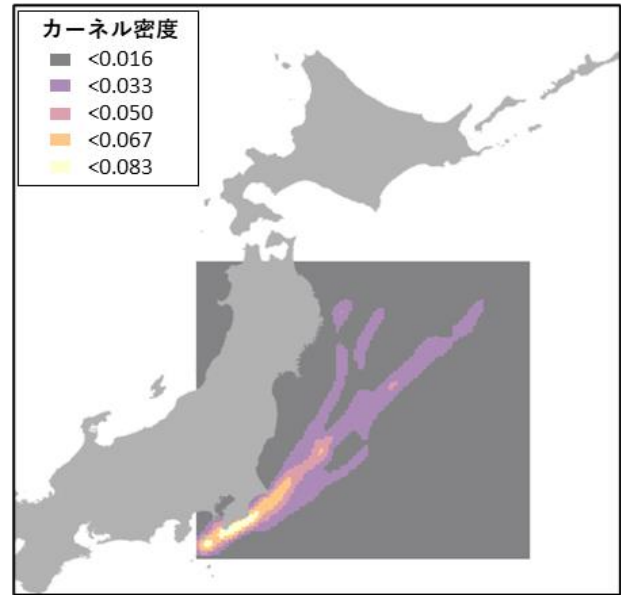
そこで以降の解析では、帰巢時は海岸線から470m離れた海域を、出巢時は海岸線から700m離れた海域までを衝突リスクエリアとした。次に、より多くの個体からデータが取得されている1分間隔で追跡されたトラッキングデータから、帰巢直前の位置情報 ($N = 100$) と出巢直後の位置情報 ($N = 45$) をプロットした (図1.16a, b)。帰巢時は出巢時と比べ、より広い範囲の海岸線を通過しているのに対し、出巢時はより狭い範囲の海岸線を通過していた。帰巢直前に通過する海岸は、巣に最寄りの海岸から最大2.3km離れており、出巢直後に通過する海岸は、巣に最寄りの海岸から最大850m離れていた。算出された距離を、利島個体が通過し得る海岸の範囲と仮定し、利島において繁殖が認められるエリア全体に当てはめ、利島個体群が出巢時および帰巢時に通過する海岸をそれぞれについて推定した。それぞれの海岸から、帰巢時と出巢時それぞれの衝突リスクエリアを示す700mおよび470mのバッファを発生させ、衝突死のセンシティブティマップとした (図1.16c)。本センシティブティマップは、より高精度な高度情報を反映させることを目的に追加調査で取得したトラッキングデータを用いたことから、現時点では例数が少なく、バッファ距離の確度が低い状況にある。今後、サンプル数を増やし、バッファ距離の妥当性を向上させる必要がある。また、Mゾーンエリアは、島の形状やコロニーの位置や標高によって変化することが考えられる。国内のオオミズナギドリのコロニーの多くは、標高数十mから数百mに位置していることから、いずれのコロニーにおいても周辺海域の衝突死リスクが高いことが想定される。しかしながら、より詳

細なマッピングのためには、コロニーごとに高精度な位置・高度情報を取得することに加え、出巢時や帰巢時での環境選択および高度変化に係る地形要因を明らかにしていく必要があるだろう。

(a) 利島個体の飛翔軌跡



(b) 利島個体の飛翔軌跡のカーネル密度



(c) 再現された飛翔



(d) 再現された軌跡のカーネル密度

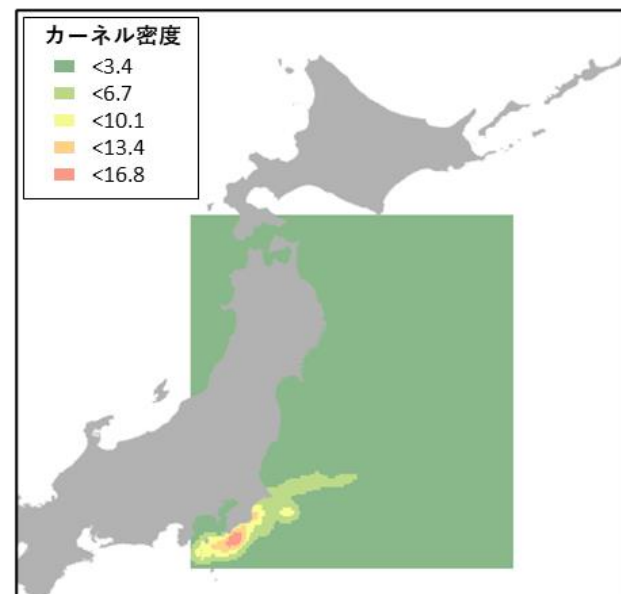


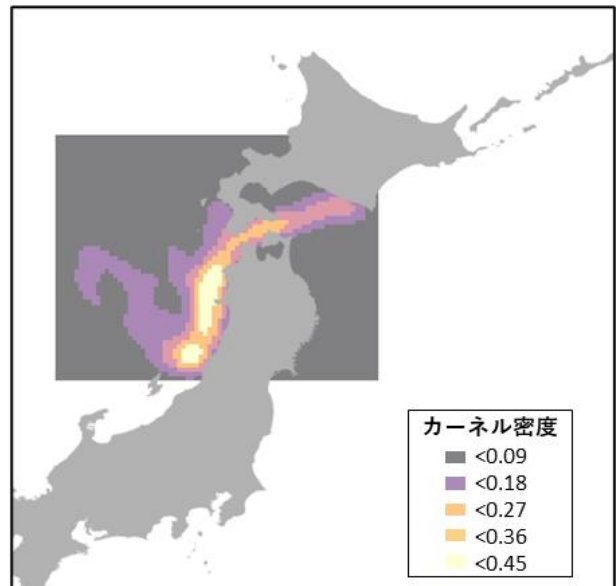
図1.12. 利島を対象にした強化学習による餌場までの移動シミュレーション。

2018年8月中旬、下旬、9月上旬、中旬の環境情報から予測された報酬マップを用い強化学習を行い、各時期から10本の飛翔軌跡を抽出した。(a)は解析にもちいた利島個体の実際の飛翔軌跡を、(b)はゴール設定された0.07未満の報酬値エリアにおける実際の飛翔軌跡のカーネル密度を、(c)は強化学習により再現された飛翔軌跡を、(d)は再現された飛翔軌跡のカーネル密度を示す。

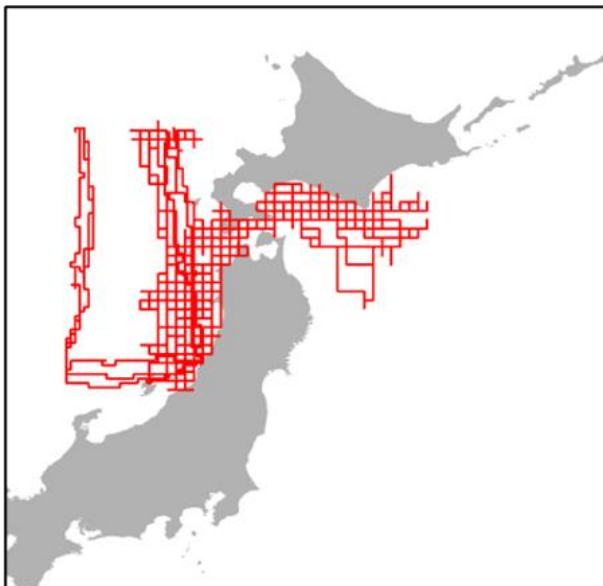
(a) 栗島個体の飛翔軌跡



(b) 栗島個体の飛翔軌跡のカーネル密度



(c) 再現された飛翔軌跡



(d) 再現された軌跡のカーネル密度

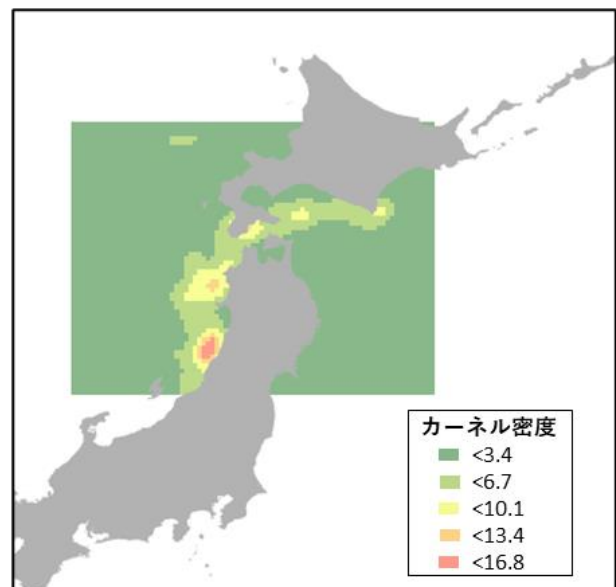
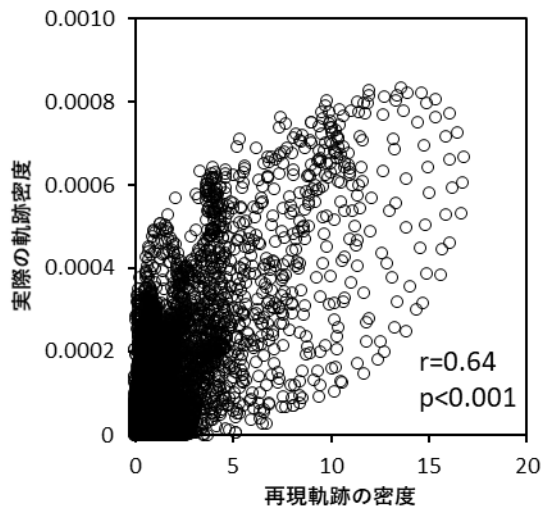


図1.13. 栗島を対象にした強化学習による餌場までの移動シミュレーション.

2018年8月中旬、下旬、9月上旬、中旬の環境情報から予測された報酬マップを用い強化学習を行い、各時期から10本の飛翔軌跡を抽出した。(a)は研究協力者から提供いただいた栗島個体の実際の飛翔軌跡を、(b)はゴール設定された0.07未満の報酬値エリアにおける実際の飛翔軌跡のカーネル密度を、(c)は強化学習により再現された飛翔軌跡を、(d)は再現された飛翔軌跡のカーネル密度を示す。

(a) 利島における精度検証



(b) 粟島における精度検証

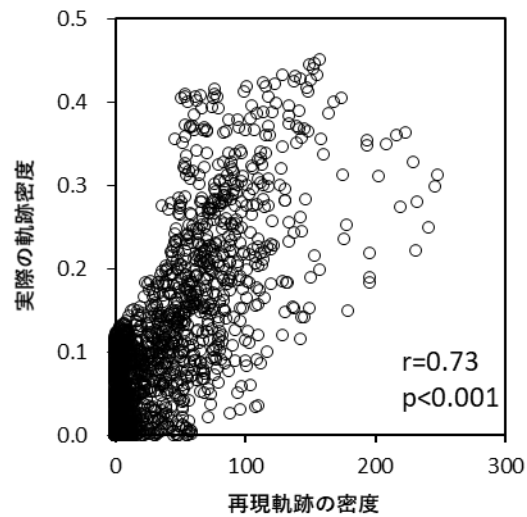
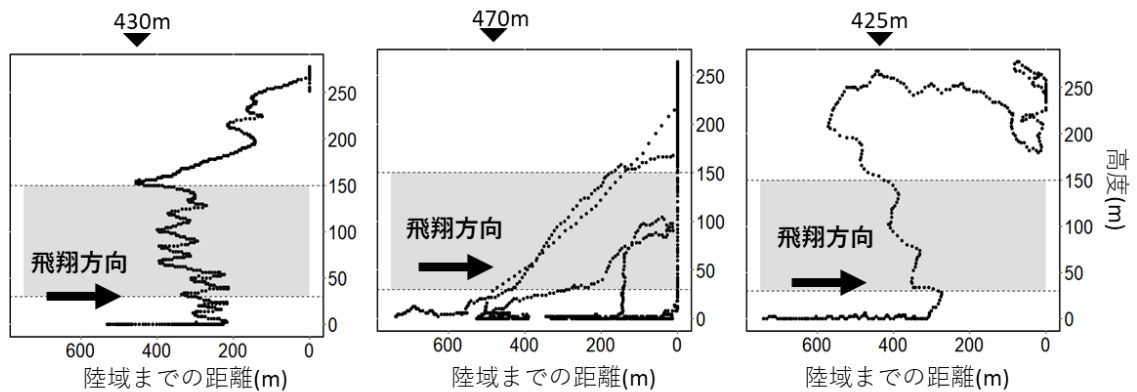


図1. 14. 強化学習による再現された飛翔軌跡の精度検証.

利島および粟島それぞれについては、実際の飛翔軌跡と再現された飛翔軌跡のカーネル密度をPearsonの相関係数により比較した。

(a) 帰巣時の飛行高度



(b) 出巣時の飛行高度

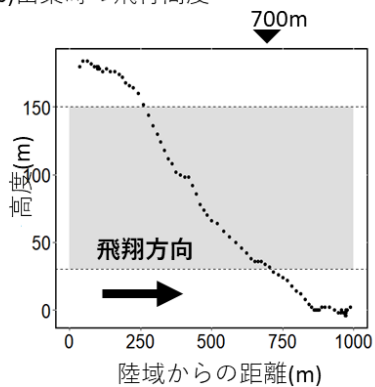
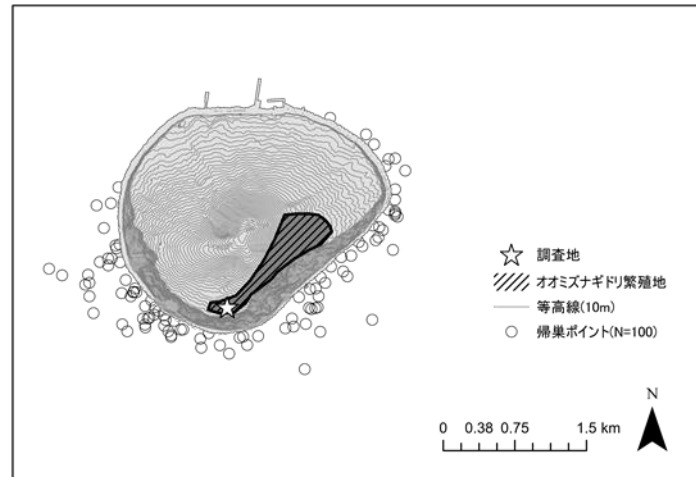


図1. 15. 帰巣時と出巣時における飛行高度と陸域までの距離.

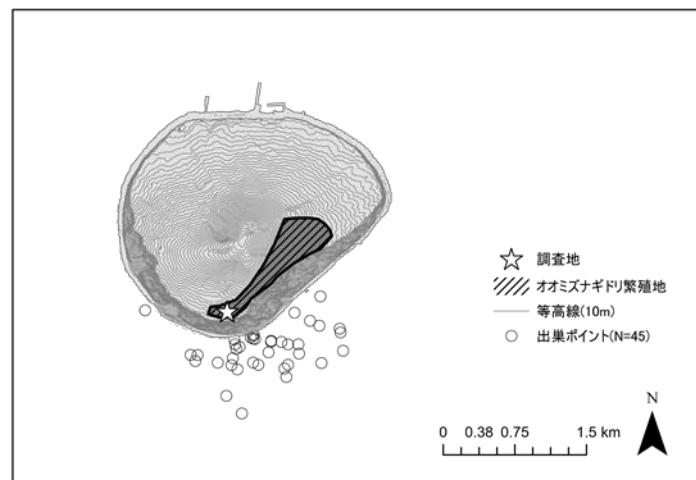
(a)は帰巣時の (b)は出巣時の高度と陸域までの距離を示す。灰域はMゾーン(30m-150m)を示す。

▼は各個体のMゾーン飛翔を飛翔していた陸域まで距離を示す。

(a) 帰巢直前の位置情報



(b) 出巢直後の位置情報



(c) 衝突死のセンシティブリティマップ

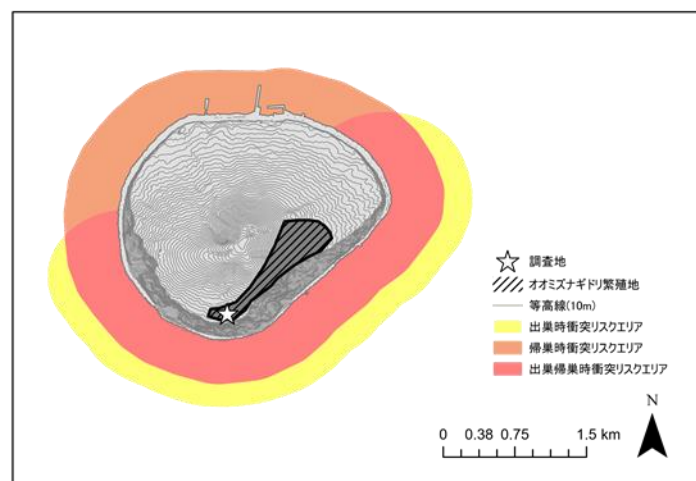


図1.16. 衝突死のセンシティブリティマップ.

long period モードの1分間隔測位で得られた(a)帰巢直後の位置情報と(b)出巢直前の位置情報を示す。(c)は利島コロニー全体を想定した衝突リスクエリアから作成された衝突死のセンシティブリティマップを示す。

⑤ センシティブティマップの活用方法の提案

本研究では、オオミズナギドリの生態特性に応じて、衝突死、餌場喪失、および経路障害の3つの風車建設リスクを想定し、それぞれに関するセンシティブティマップの開発を行った。以降では、それらの活用方法を提案する(図1.17)。まず、3つのリスクのうち最も懸念すべきリスクは個体の直接的な死につながる衝突死リスクである。したがって、はじめの段階では、衝突死マップを活用し、予定地がマップ内かどうかを検討する。予定地がマップ内であれば立地を再検討し、マップ外であれば、次の段階へ進む。本段階では、経路障害マップおよび餌場喪失マップを活用する。経路障害マップと餌場喪失マップの対象としている海域は異なる(マップ上における報酬値：経路障害マップ < 0.07、餌場喪失マップ > 0.07)ことから、併用することは現段階では想定していない。経路障害マップおよび餌場喪失マップいずれにおいても、高スコアエリアでは立地を再検討し、より低スコアエリアへの変更をすることが望ましい。

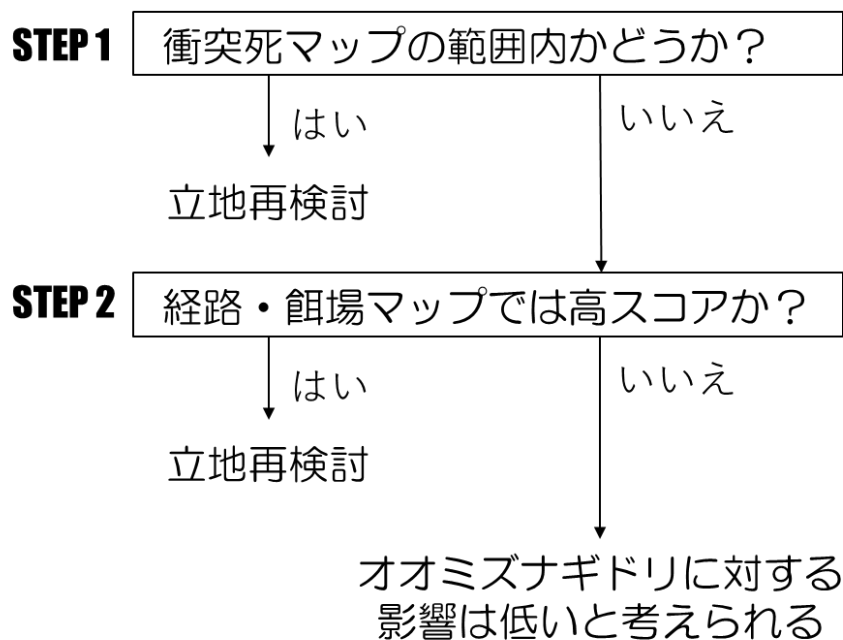


図1.17. センシティブティマップの活用例.

4-2. コアジサシの結果および考察

① 既設風車に対する応答

風車が隣接する茨城県神栖市波崎新港に形成されたコロニーで繁殖していた個体の採餌行動を追跡した結果を、図1.18に示す。採餌個体の多くは、コロニーの北部から北東部に位置する海域を採餌場所としていた。港堤防上に立地している風車(高さ80m)に対して、ほとんどの個体が回避行動を示しており、風車から半径50m以内における飛翔はほとんど確認できなかった。また、飛翔高度は 24.7 ± 2.4 m(平均値 \pm SE)であり、風車ブレード高以下のLゾーン飛翔であったにも拘わらず、回避行動を示すことが明らかとなった。

コアジサシに対する洋上風車の影響は、Perrowらが報告しており、風車建設による餌量の減少や採餌量の低下、繁殖率の低下が認められている²²⁾。本研究で、風車に対する回避行動が示されたことは、風車建設海域を個体が利用できなくなる可能性を示すものであり、採餌量の低下の一要因になっていることを示唆している。したがって、以降に記述するセンシティブティマップに関して、個体の利用ポテンシャルのある海域は、飛翔高度に関係なく餌場喪失のリスクを内在していると考えられることができる。

② 繁殖を保証する採餌距離の推定

観察により取得された行動パラメータを表1.3に示す。コアジサシの日あたり活動時間を明らかにするために、終日観察が2日間行われた。その結果、餌を持って帰巢する個体が観察された時刻は、観察1日目では午前4時13分から午後7時14分まで、観察2日目では午前4時9分から午後7時15分までであった。2日間の平均値として、15時間4分を日当たり活動時間とした。以降に記述する変数は、平均値 \pm SEとして示す。採餌時間を推定するためのパラメータとして、飛行速度、1回の採餌あたりの給餌時間、1回の採餌あたりの捕獲時間、捕獲成功率が取得された。餌場までの飛行速度、餌を持った帰巢時の飛行速度、および餌を持っていない帰巢時の飛行速度は、それぞれ、 29.61 ± 0.66 km/h、 33.75 ± 0.73 km/h、および 34.87 ± 2.21 km/hであった。餌場に到着した個体の捕獲に費やす時間は、捕獲成功個体および失敗個体それぞれで 54.70 ± 8.76 秒および 64.17 ± 23.53 秒であった。捕獲成功個体と失敗個体の比率から捕獲成功率を87%とした。コロニーに帰巢した個体が雛を発見し、給餌するまでの時間は、 33.77 ± 2.49 秒であった。

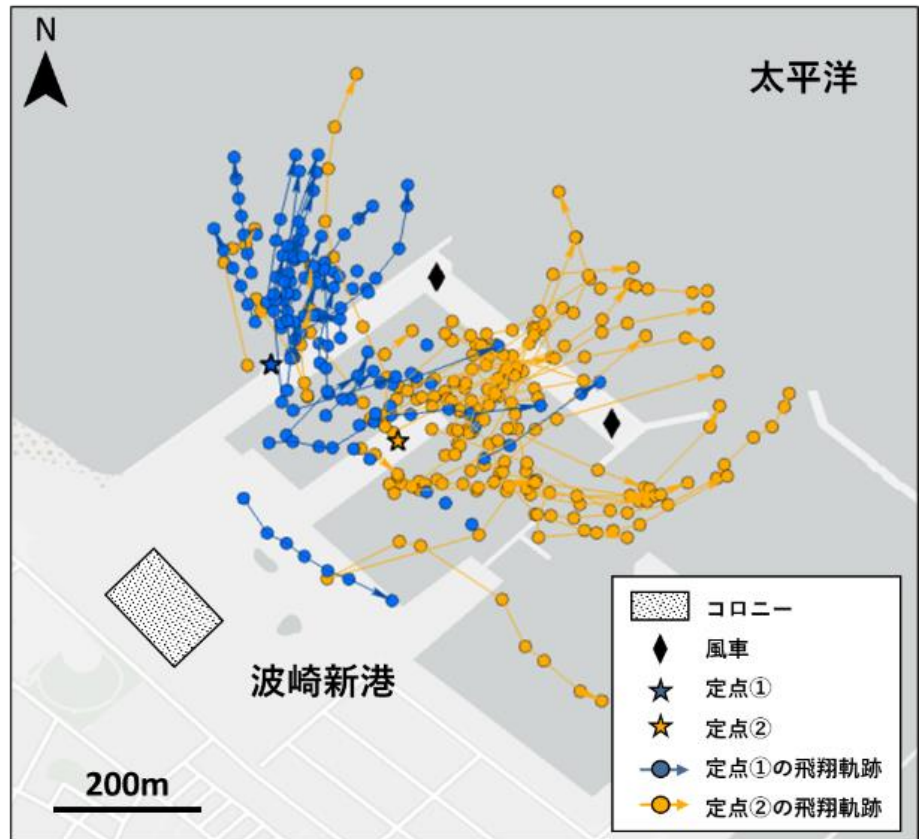


図1.18. 既設風車に対するコアジサシの応答.

茨城県神栖市波崎新港で形成されたコロニーで繁殖する個体を対象に、既設風車に対する応答を測距器により追跡した。

表1.3. コアジサシの行動パラメータ.

採餌行動を観察し、タイムバジェット作成のための行動パラメータを取得した。

パラメータ	略称	平均値	標準誤差	サンプル数	調査方法
1日あたりの活動時間(h)	AT	15.04		2	直接観察
餌場までの飛行速度(km/h)	S1	29.61	0.66	157	測距器
帰巣時の飛行速度 [餌あり](km/h)	S2	33.75	0.73	67	測距器
帰巣時の飛行速度[餌なし] (km/h)	S3	34.87	2.21	12	測距器
採餌1回あたりの給餌時間 (h)	L	0.009	0.001	95	直接観察
採餌1回あたりの捕食時間[成功] (h)	F1	0.015	0.002	88	直接観察
採餌1回あたりの捕食時間[失敗] (h)	F2	0.018	0.007	13	直接観察
採餌成功率	SR	0.87		101	直接観察

一眼レフカメラにより撮影された採餌個体のうち、種同定および体長計測が可能であったのは1,133個体であった。餌種の構成比率はカタクチイワシが84.7%、サツパが10.0%、その他(カマス類、ハゼ類等)は5.3%であった。コアジサシの主要な餌種であったカタクチイワシとサツパの2種の体長をエネルギー量の推定に用いた。カタクチイワシの体長は $52.62 \pm 0.44\text{mm}$ (図1.19a, c)であり、式(5), (6), (7)によって推定された体重およびエネルギー量は、それぞれ $0.93 \pm 0.030\text{g}$ および $1.40 \pm 0.05\text{kcal}$ であった。サツパの体長は $49.57 \pm 1.12\text{mm}$ で(図1.19b, c)であり、式(8)と(9)によって推定された体重およびエネルギー量は、それぞれ $1.45 \pm 0.09\text{g}$ および $2.38 \pm 0.15\text{kcal}$ であった。両種のカロリー量に餌構成比率を乗じ、合計した結果、1回の採餌で取得できるカロリー量は 1.50kcal となった。

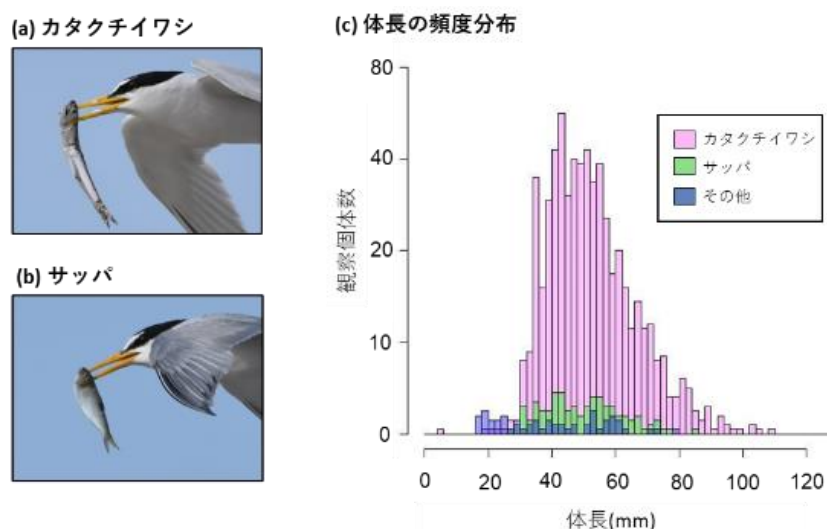


図1.19. コアジサシの餌種と体長ごとの頻度分布.

一眼レフカメラにより採餌個体を撮影した。主要な餌種であった(a)カタクチイワシおよび(b)サツパを示す。(c)写真内における嘴峰長(30mm)との比率により体長を計測し、その頻度分布を示す。

式(2)から推定されるAE、および式(10)と式(11)から推定されるREを、図1.20に示す。AEは採餌距離に応じて指数的に減少した。REについては、シナリオIでは採餌距離に応じて指数的に増加しており、シ

ナリオⅡにおいてREは63.67kcalで一定であった。繁殖を保證する採餌距離として、シナリオⅠおよびⅡそれぞれの交点は、2.54kmおよび4.51kmであった。本推定値の妥当性を評価するために、コアジサシの最大採餌距離についてのメタ解析結果と比較した。Thaxterらは、陸上もしくは海上センサスによって計測された採餌距離の最大値の平均は、 6.3 ± 2.4 km(n=6)であることを報告している⁴⁾。本推定値は最大採餌距離の範囲内であることが示された。

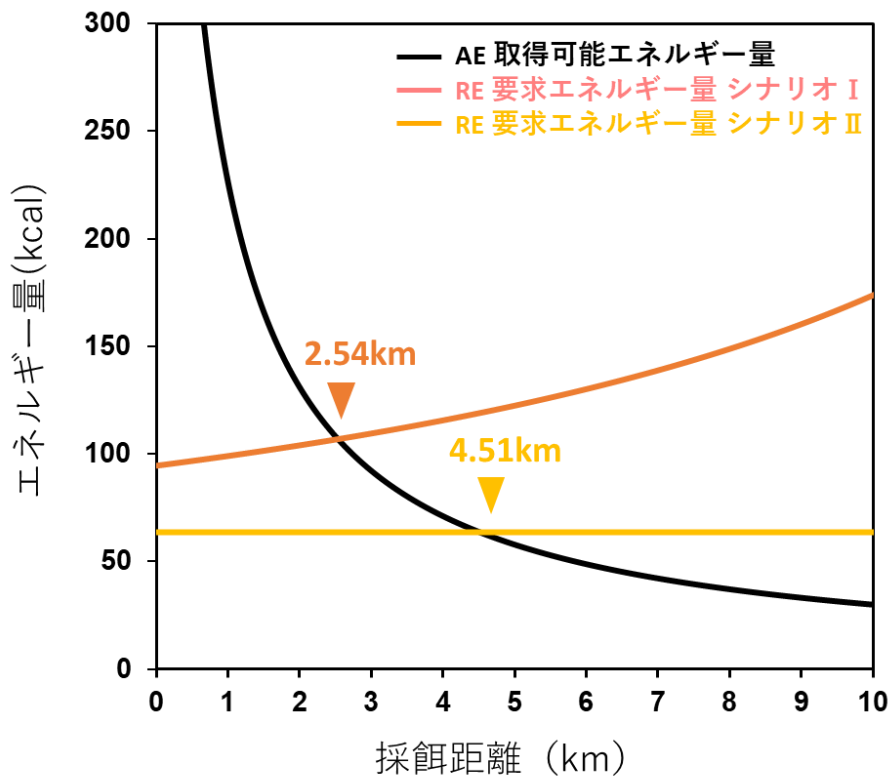


図1.20. 繁殖を保證する採餌距離の推定。

観察によって得られた行動パラメータおよび餌エネルギー量と行動別消費エネルギー量から、採餌距離を変量とした取得可能な餌エネルギー量と要求エネルギー量それぞれの推定式が作成された。要求エネルギー量は、親鳥自身の採食場に応じ2つのシナリオが作成された。2つの交点を、繁殖を保證する採餌距離とした。

③ コロニー適地の推定

最適モデルに用いられた変数は、500mバッファ内裸地面積、300mバッファ内における裸地面積/裸地周縁長、1kmバッファ内の標高のばらつき、流域面積5000km²以上の1級水系河川の河口からの距離の4つであった(図1.21)。

これまでに報告されているコアジサシの営巣例の多くは、砂浜や埋め立て地を含む植生が発達していない裸地環境であり、草地などの植生が発達している環境では営巣例はほとんど報告されていない。裸地面積および周縁長に対する面積が正の効果を示していたことは、本種の営巣環境の広がり大きいほど、繁殖地として適地になることを意味している。また、標高のばらつきおよび河口からの距離が負の効果を示していた。大河川河口部周辺の平野部には、砂州や中州、砂浜といった本種の営巣環境として選好性の高い裸地環境が形成されやすいことが影響していると考えられた。

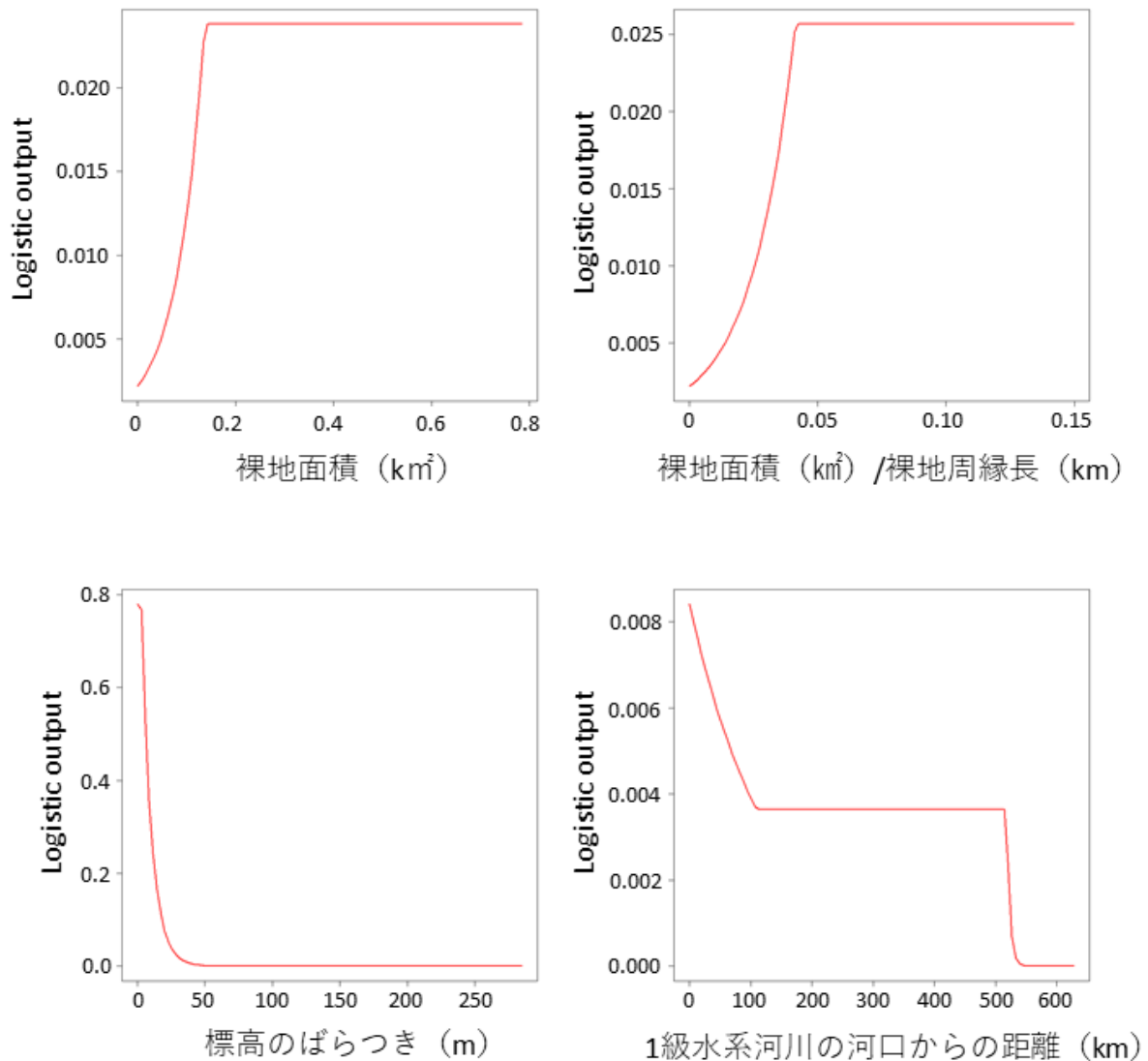


図1.21. コアジサシの営巣ポテンシャルに影響を及ぼす環境要因。

MaxEnt推定により最適モデルとして選択された環境変数それぞれの応答曲線を示す。500mバッファ内裸地面積、300mバッファ内における裸地面積/裸地周縁長、1kmバッファ内の標高のばらつき、流域面積5000km²以上の1級水系河川の河口からの距離の4つであった。

MaxEntモデルにより推定された営巣ポテンシャルを図1.22に示す。モデルの精度については、Learning AUC =0.971、Test AUC =0.963であり、高精度なモデルが作成された。本種の営巣適地は、新潟県、茨城県、千葉県、愛知県の海浜部のような大規模な砂浜や、東京、名古屋、大阪といった主要都市部にある大規模な埋め立て地に分布していた。小規模な砂浜や山間部が海岸に近接した沿岸域は不適地として推定された。

検証用データの在と不在をわけるカットオフ値は0.289と推定され、本閾値より高いスコアを有したメッシュから、4-2②で推定された採餌距離バッファを発生させ、センシティブティマップとした(図1.23)。

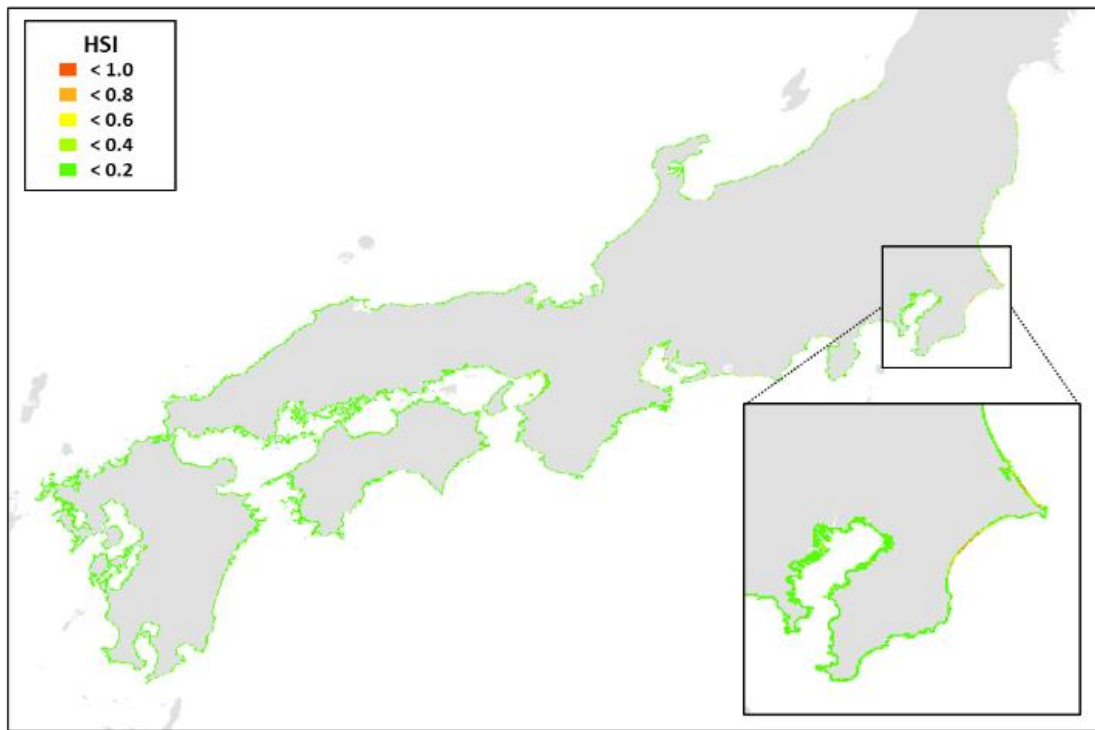


図1.22. MaxEnt推定された営巣ポテンシャルマップ。
MaxEntモデルにより推定された生息適地指数を示す。学習用データおよび検証用データそれぞれの予測精度は、Learning AUC=0.971 およびAUC=0.963であった。

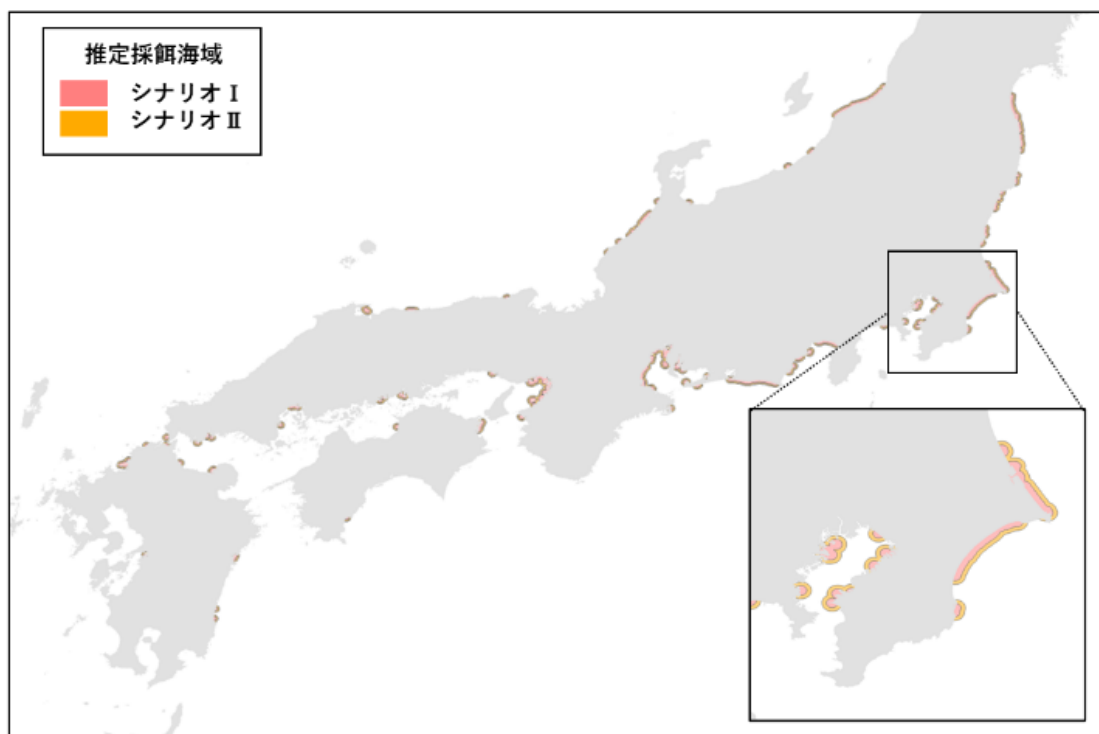


図1.23. 営巣地を中心とした利用海域推定。
Youden Indexを用いて営巣ポテンシャルスコアのカットオフ値を設け(cutoff value =0.289)、高ポテンシャルエリアを抽出した。抽出されたエリアから本研究で推定されたコアジサシの採餌距離バッファ(シナリオ I : 2.54km、シナリオ II : 4.51km)を発生させた。

④ センシティブティマップの活用方法の提案

本研究では、コアジサシの採餌行動特性と営巣特性を考慮し、コスト:ベネフィット比に基づく採餌距離推定と環境要因による営巣ポテンシャル評価の二つのアプローチから、本種のセンシティブティマップを作成した。以降では、本マップの活用方法を提案する(図1.24)。まず、はじめの段階では、事業予定地がコロニーにより近い利用海域を示すシナリオⅠの範囲内かどうかを検討する。もし、予定地がマップ内であれば立地を再検討し、範囲外であれば、次の段階へ進み、シナリオⅡの範囲内か否かを検討する。範囲内であれば、実際にコアジサシが利用しているか否かや、その利用頻度を海上センサスなどにより確認し、環境影響評価を経て立地を検討する。範囲外であれば、コアジサシに対する影響は低いと評価する。

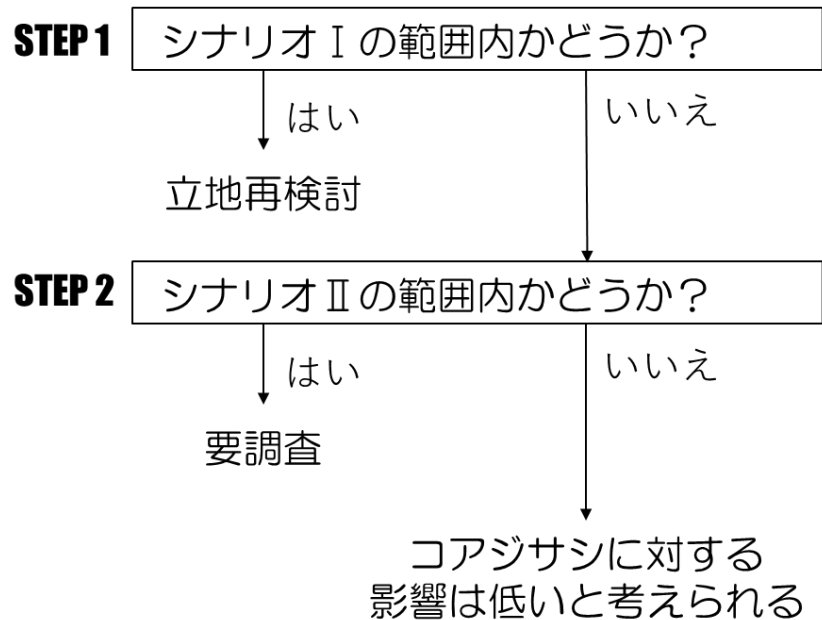


図1.24. コアジサシのセンシティブティマップ活用例.

4-3. ウミネコの結果及び考察

捕獲した個体のうち位置情報を取得することができた個体数は、2019年は17個体中11個体、2020年は11個体中8個体であった。

GPSトラッキングの結果から、粟島コロニーの個体は島の北側ルートを主に利用しており、本州沿岸も利用していることが明らかとなった(図1.25a)。村上コロニーの個体は村上-粟島間、特に桑川地区沿岸から約15 km圏内の海域を主に利用していた。データを取得できた個体の中には、コロニーから30 km以上離れた山形県南部の沖合や粟島の北西まで移動している個体もあり、中継地点として粟島浦村のエビスヶ鼻や山形県南部にある漁港が利用されていることが分かった(図1.25b)。また、三面川や荒川に沿って内陸まで移動している個体もあり、海域だけでなく内陸の川沿いや水田を餌場として利用していることが考えられた(図1.25c)

なお、新潟エリアにおける追跡データは、北海道で作成したウミネコ利用海域予測モデルの外挿結果の予測精度検証のために、サブテーマⅡの北海道大学と共有した。新潟エリアへの外挿結果については、サブテーマⅡの成果で紹介する。

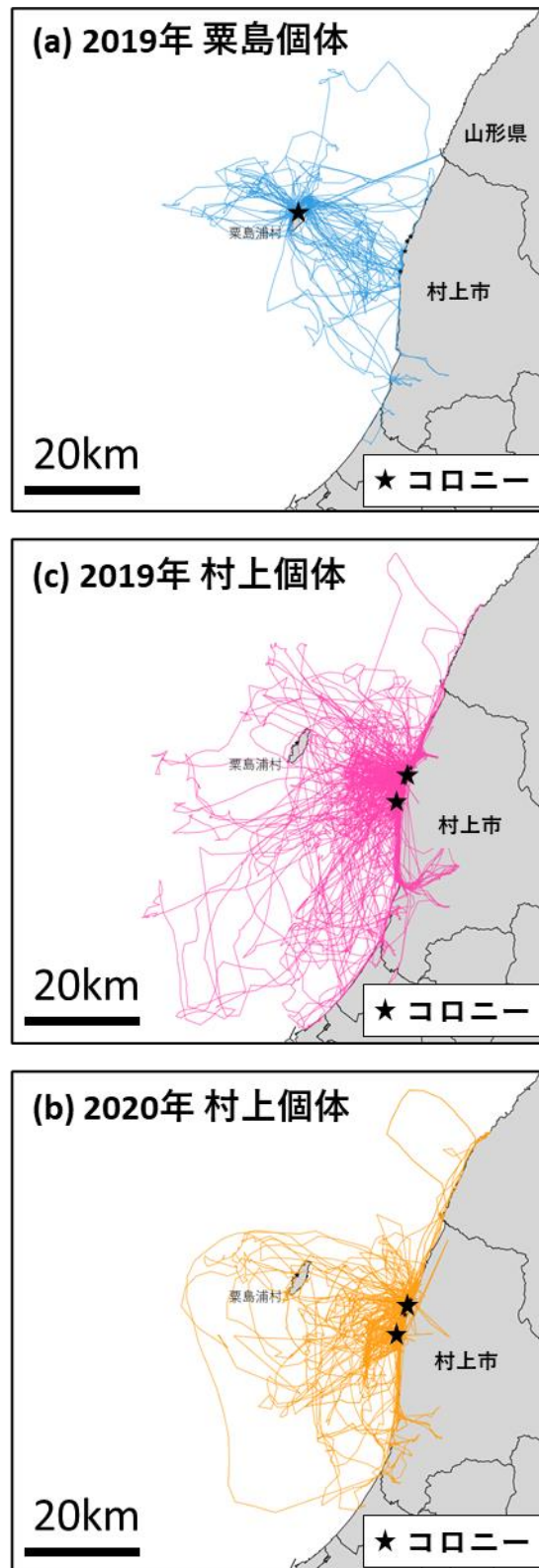


図1.25. 新潟県で営巣するウミネ行動圏.
 (a) 2019年粟島個体、(b) 2020年村上個体、(c) 2019年村上個体のGPS追跡データを示す。

5. 研究目標の達成状況

オオミズナギドリについては、伊豆諸島の利島で繁殖する77個体から採餌トリップのGPS追跡に成功し、空間利用解析に十分な高精度な飛翔軌跡データを得ることができた。本種の餌場までの採餌トリップを予測する手法として、近年普及しつつある逆強化学習と強化学習を導入した。採餌トリップの移動ルールとなる報酬値の分布には、海水温に重要な要因になっていることが明らかとなり、海洋環境による報酬値予測を可能とする高精度な統計モデルが作成できた。さらに、予測された報酬値に基づき移動シミュレーションされた飛翔軌跡においては、実際の飛翔軌跡に対して高い再現性があり、未知エリアである日本海側コロニー個体の飛翔軌跡に対しても高い予測性を示したことから、空間利用予測のための汎用的な手法としての開発に成功し、東日本の主要な繁殖コロニーを対象とした広域網羅的なセンシティブティマップが作成できた。

コアジサシについては、本研究を通して、捕獲によるGPS追跡の難しさや、本種の空間利用を説明するためには海洋環境変数の解像度が適していないことが明らかとなった。このことをうけ、新たにコスト/ベネフィット比に基づく採餌モデルを作成し、取得可能な餌エネルギー量および要求エネルギー量といった生理的な律速条件を反映させた繁殖を保証する採餌距離を推定した。その推定値は、既往の研究で報告された最大採餌距離の範囲内であり、本種がより集中的に利用すると考えられる採餌海域を示すことができた。さらに、さまざまな空間スケールを考慮した地形要因と景観要因から高精度なコロニー適地予測モデルの作成ができ、予測された好適地から繁殖を保証する採餌距離バッファを発生させることで、全国的な利用海域を示すセンシティブティマップの作成をした。

ウミネコについては、新潟県で繁殖する19個体から採餌トリップのGPS追跡に成功した。得られたデータはサブテーマIIと共有することで、精度検証にもちいられ、広域網羅的なセンシティブティマップ作成手法の提案に活用された。

いずれの種においても、広域網羅的なセンシティブティマップが作成され、目標どおりの成果をあげた。

6. 引用文献

- 1) Arima H, Oka N, Baba Y, Sugawa H, Ota T (2014) Gender identification by calls and body size of the Streaked Shearwater examined by CHD genes. *Ornithol Sci* 13(1): 9-17
- 2) Phillips RA, Xavier JC, Croxall JP (2003) Effects of satellite transmitters on albatrosses and petrels. *Auk* 120: 1082-1090
- 3) Ranstam J, Cook JA (2018) Lasso Regression. *British Journal of Surgery* 105(10)
- 4) Thaxter CB, Lascelles B, Sugar K, Cook ASCP, Roos S, Bolton M, Langston RHW, Burton NHK. (2012) Seabird foraging ranges as a preliminary tool for identifying candidate Marine Protected Areas. *Biological Conservation* 156: 53-61
- 5) 河野梯昌, 高橋正知 (2017) 平成 29 (2017) 年度カタクチイワシ瀬戸内海系群の資源評価. <http://abchan.fra.go.jp/digests2017/details/201725.pdf> (2018年9月確認)
- 6) Takahashi A, Kuroki M, Niizuma Y, Kato A, Saitoh S, Watanuki Y (2001) Importance of Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) to breeding rhinoceros auklets (*Cerorhinca monocerata*) on Teuri Island, Sea of Japan. *Mar Biol* 139 :361-371
- 7) Elahi N, Yousuf F, Tabassum S, Hossain M, Hossen M, Nawer F, Bahkali A, El-Shikh M, Elgorban A, Rahman M, (2017) Life-history Traits of the Blacktrip sardinella, *Sardinella melanura* (Clupeidae) in the Gwadar, Balochistan Coast, Pakistan. *Indian J Geo-Marine Sci* 46: 397-404
- 8) Niizuma Y, Tsuchiya K, Kume H, Bessyo T, Kazama K (2014) Nutritional composition and energetic values of prey species in Great Cormorant. *J Yamashina Inst Ornithol* 45: 93-97
- 9) Higgins PJ. Davies SJJF (1996) *Handbook of Australian, New Zealand and Antarctic Birds* Vol 3 Snipe to pigeons. Oxford University Press

- 10) Gaglio D, Sherley RB, Ryan PG, Cook TR (2018) A non-invasive approach to estimate the energetic requirements of an increasing seabird population in a perturbed marine ecosystem. *Scientific Reports* 8: article 8343
- 11) O'Connell DP, Macey C, Power A, Wray J, Newton SF (2014) Kilcoole Little Tern Report 2014. Bird Watch Ireland Conservation Report
- 12) Hong B, Woo T, Higashi S (1998) Effects of clutch size and egg-laying order on the breeding success in the little tern (*Sterna albifrons*) on the Nakdong Estuary, Republic of Korea. *Ibis* 140: 408-414
- 13) Fujita G, Totsu K, Shibata E, Matsuoka Y, Morita H, Kitamura W, Kuramoto N, Masuda N, Higuchi H (2009) Habitat management of little terns in Japan's highly developed landscape. *Biol Conserv* 142: 1891-1898.
- 14) 国土交通省 国土数値情報ダウンロード <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2018年9月確認)
- 15) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 地球観測研究センター 高解像度土地利用土地被覆図ホームページ https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex.htm (2018年9月確認)
- 16) Phillips SJ, Anderson RP, Schapire RE (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190: 231-259
- 17) Phillips SJ, Dudík M (2008) Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161-175.
- 18) Vollerling J, Halvorsen R, Mazzoni S (2019) The MIAMaxent R package: variable transformation and model selection for species distribution models. *Ecol. Evol* 9 (21): 12051-12068
- 19) Ochi D, Oka N, Watanuki Y (2010) Foraging trip decisions by the streaked shearwater *Calonectris leucomelas* depend on both parental and chick state. *Journal of Ethology* 28(2): 313-321
- 20) Kameda, T (2003) Studies on oceanic production using ocean color remote sensing data. *Bull Fish Res Agen* 9: 118-148
- 21) Matsumoto S, Yamamoto T, Yamamoto M, Zavalaga CB, Yoda K (2017) Sex-related differences in the foraging movement of Streaked Shearwaters *Calonectris leucomelas* breeding on Awashima Island in the Sea of Japan. *Ornithol Sci* 16: 23-32
- 22) Perrow MR, Gilroy JJ, Skeate ER, Tomlinson ML (2011) Effects of construction of Scroby Sands offshore wind farm on the prey base of little tern *Sterna albifrons* at its most important UK colony. *Mar Pollut Bull* 62: 1661-1670

Ⅱ-2 道北海域におけるカモメ類など海鳥3種のセンシティブティマップ汎用性の検証

北海道大学大学院水産科学研究院

海洋生物資源科学部門

教授 綿貫豊

<研究協力者>

早稲田大学

准教授 風間健太郎 (H30.4-R1.3)

風間麻未 (H30.4-R1.3)

北海道大学水産科学研究院

学術研究員 三上かつら (R1.4-R3.3)

[要旨]

洋上風力立地ポテンシャルの高い北海道北部海域で繁殖する海鳥が利用する空間を説明・予測するモデルを開発し、それを用いてセンシティブティマップを作成することをねらいとした。そのため、同海域の複数地域で繁殖する主たる海鳥種であるオオセグロカモメ、ウミネコ、ウトウ3種の移動をGPSデータロガーで追跡し、感受性マップの基礎となるハビタットモデルを作り、モデルの他の海域への外挿性を検証し汎用性を高めるとともに、分析の空間スケールとセンシティブティの数値化を検討し、種ごとに効果的な現場手法とセンシティブティマップ作成のための手順をまとめることを目標とした。ハビタットモデルとしては、風車ブレードの高さを飛行（衝突リスク）する場所と採食する場所（餌場喪失リスク）を説明・予測する空間統計モデルを開発した。そのため、まず、GPSの高度データの精度を検証したうえで、4地域・3種の海鳥計193個体にGPSデータロガーを装着して3次元での移動を追跡し、そのデータから、それぞれの種と地域で衝突リスク・餌場喪失リスクを説明する地域モデルを構築し、その精度が高いことを確認した。こうした地域モデルの北海道内の他の地域への当てはまり（外挿精度）は悪かったので、次に、汎用性向上のため、分析の空間スケールの検討に加え、2地域・2種のカモメ類のデータを統合して衝突リスク汎用モデルを構築した。この衝突リスク汎用モデルも精度は高かったが、青森など他の海域への外挿精度に低い場合があったので、地域毎に実データを得て地域モデルで各個体群全体のリスクを予測し、全個体群のマップを合算して広域のセンシティブティマップを作成するアプローチが妥当と判断された。風車ブレード高度を飛行する時間割合が種により異なっていたため、続いて、衝突リスクについてはこれを補正して数値化するとともに、適切なサンプル数を検討したうえで、海鳥種の特性に応じた効率的な現場手法、空間モデリングと精度検証の手法、広域網羅的なセンシティブティマップを作成するための手順を整理した。最後に、これらをもとに、道北海域において対象とする海鳥3種の全地域個体群のマップを合算し、高解像度（1 kmメッシュ）で衝突リスク・餌場喪失リスクセンシティブティマップを作成した。このように、ほとんどの項目で目標どおり、あるいは目標を上回る成果をあげることができた。

1. 研究開発目的

洋上風力発電施設の建設は、風車ブレードへの衝突と好適な採食地の回避をとおして、海鳥個体群にインパクトを与える可能性がある。洋上風力立地ポテンシャルの高い海域に位置する集団繁殖地に対し、こうした影響を極力抑えることを目的に、海鳥による利用海域を予め明らかにする手法を開発する。本サブテーマでは、北海道北部海域において、海域内で繁殖するウミネコ、オオセグロカモメ、ウトウを対象に、利用空間を予測するモデルの開発と、それを用いたセンシティブティマップの作成を目的とする。そのため、1) GPS ロガー装着により飛翔軌跡・高度情報を取得し、2) 環境要因（説明変数）から利用空間（目的変数）を予測する空間統計モデルを作成し、その汎用性検証を行った上で、3) こうしたモデルにより鳥種ごとのセンシティブティマップを作成する。

2. 研究目標

北海道北部の複数の繁殖地でオオセグロカモメ、ウミネコ、ウトウの移動をGPSデータロガーで追跡

動速度を用い、飛行と着水（採食）行動を分離し、さらに3次元GPS情報から飛行高度を得た（②）。高度検証実験により、必要十分な精度の飛行高度が得られる条件を明らかにし、それを使って、風車ブレード高度（Mゾーン）を飛行する場所、すなわち衝突リスクが高い場所を特定した（②）。その際、本研究では高度測定誤差最大値（前課題である環境総合研究推進費課題4-1603により20mと推定）を考慮し、Mゾーンを高度20m-140mとした²⁾。これにより衝突リスクと餌場喪失リスクをわけて、それらのセンシティブティマップを作成することとする。海上でのマップ作成が目的であり、陸上は除いた。

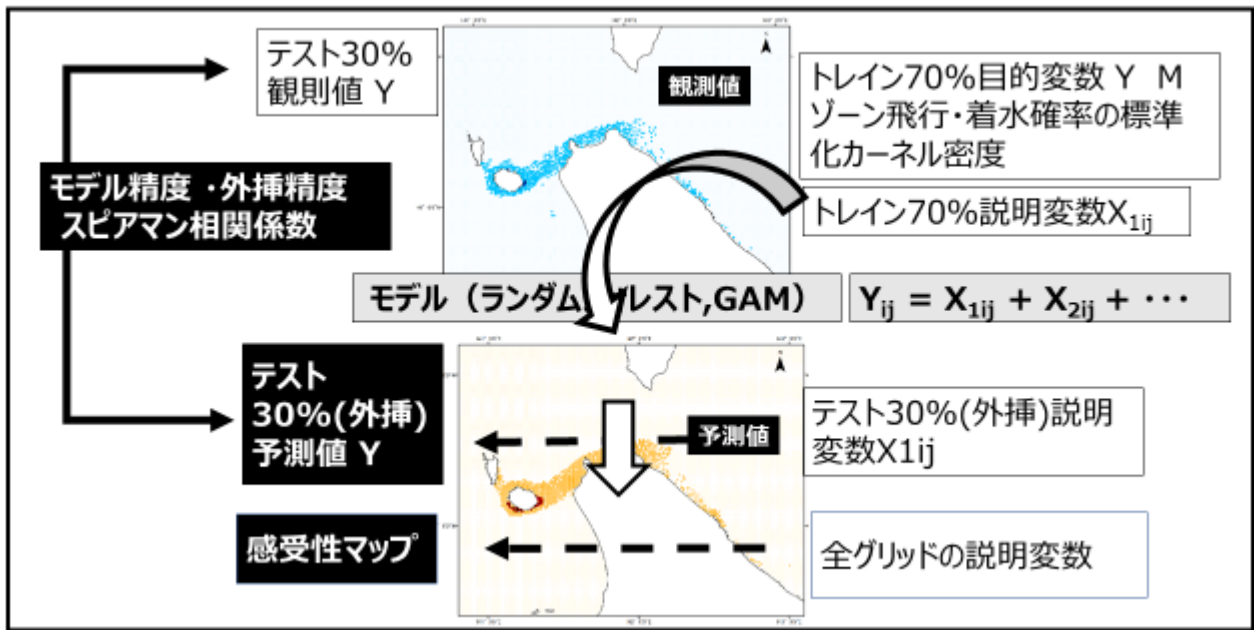


図2.2. モデルの構築と検証. データの70%（トレインデータ）でモデル構築し、30%（テストデータ）でモデル精度と外挿精度を検証した。

○ステップ2；地域空間モデル（③、④）

地域個体群（各繁殖地の全個体）は、ステップ1で得た限定的な数のサンプル個体よりは広範囲を利用していることが想定されたので、地域個体群の利用場所の推定のため、サンプルを使ってハビタットモデル、すなわちサンプル個体が利用した場所を様々な環境要因（水温や陸からの距離など）から説明する空間統計モデルを構築し（図2.2）、利用場所を最もよく説明する最適モデルを選択した（③）。空間統計モデルのタイプとしては、目的変数にさまざまな効果を与えることが想定される多数の説明変数を扱うのに優れた一般化加法モデル（General Additive Model：GAM）を使用した。こうしたモデル作成および予測のためには、対象範囲を種ごとに決定しておく必要があり、先行研究により、カモメ類では営巣地から150km以内³⁾、ウトウでは164km以内⁴⁾が潜在飛行範囲であることが分かっているので、これをモデリングの範囲とした。また、解析の解像度は、GPS精度は～10mであるが、衛星画像などから得られる環境要因のおよその最小解像度にあわせ1kmグリッドとした。地域個体群として利用した場所を最適モデルで推定し、実測値と合っているか（モデル精度）を相関係数により検証した。その際、一般的に行われているように、あらかじめ全データをランダムに7：3の割合で分割し、はじめに7割のデータ（トレインデータ）でモデルを構築し、次に残り3割のデータ（テストデータ）の環境要因をモデルに代入して、予測値を得て、テストデータの実測値と比べモデル精度を確かめた。さらに、多くの地域で効率的にマップを作ることをねらい、ある地域のデータで作成したモデル（地域モデル）が道北海域内の他の地域に当てはまるか（外挿精度）を検討した（④）。外挿精度は、最適地域モデルに別の地域での環境要因を代入して利用場所を予測し、予め得ていた当該地域の実測値との相関係数で検証した。

○ステップ3；汎用性の向上（⑤～⑦）

ステップ2で得た地域モデルは他地域への外挿精度が低いことが予測されたので、外挿精度向上のため

め、複数の地域および複数の種に応用できるモデル（汎用モデル）の構築を行った。予備解析で、ウミネコのMゾーン飛行確率モデルの利尻島と枝幸相互の外挿性が良さそうだったので、利尻島地域と枝幸地域（道北エリア）のウミネコとオオセグロカモメを統合して、Mゾーン飛行確率を説明する汎用性の高いモデルを構築した。道北エリアのオオセグロカモメとウミネコの各種・各地域（営巣地）・各年のデータセット（以下データフレーム）を使い、データフレームごとに7割をトレイン、3割をテストとし、それぞれのフレームのトレインを合算したトレインデータをつかって最適モデルを構築し、それぞれのデータフレームのテストデータを合算したテストデータでモデルの精度を検証した（⑤）。各データフレームの属性も要因として汎用モデルを作るため、モデルとしては、これらを扱いやすいランダムフォレスト^{5),6)}を使い統計ソフトR⁷⁾により構築した。この道北エリアのオオセグロカモメとウミネコのデータフレームで構築されたMゾーン飛行確率汎用モデルを、他海域、根室落石地域のオオセグロカモメ、天売島地域、青森弁天島地域、新潟粟島地域、新潟沿岸笹流れ地域のウミネコに当てはめて外挿精度を検証した（⑥）。さらに、サンプル個体数が多かった利尻島地域のウミネコのデータを使い、空間スケール（解像度）を10kmと粗くした場合に外挿精度が向上するのか、また、サンプル個体数を減らした際に、海鳥のGPS点分布の最外郭範囲とモデルの予測精度がどのように落ちるかを検討した（⑦）。採食確率地域モデルの海域内外挿性は悪かったため、汎用モデル化は試みないこととした。

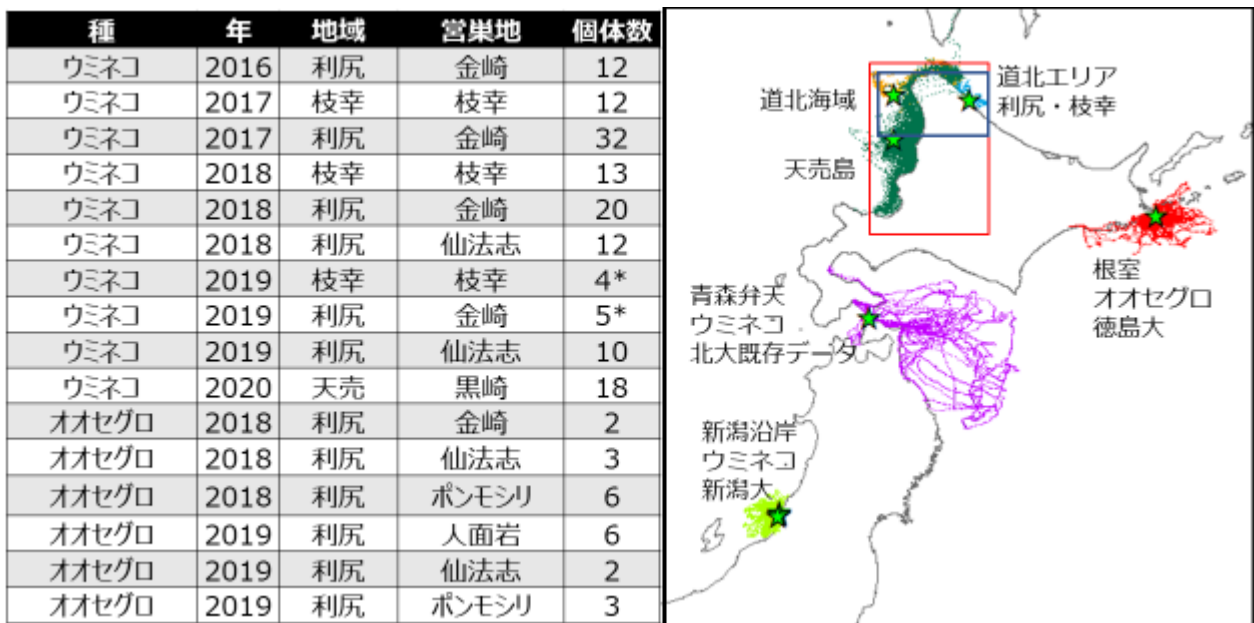


図2.3. ウミネコおよびオオセグロカモメのデータ。

地域(★)と移動軌跡を図中に示す。利尻島には複数の営巣地が見られた。*は個体数が少なくデータ不備のためデータフレームから除かれたもの。

○ステップ4；作業分担と統合（⑧、⑨）

データを効率的に収集するため、現場調査については、サブテーマ2と3のチームで協働して実施し、それぞれ道北海域（サブテーマ2；ウミネコ、オオセグロカモメ、ウトウ）と道東海域（サブテーマ3；オオセグロカモメ、ウトウ）を担当した（図2.1）。環境総合研究推進費4-1603での経験を踏まえ、ウミネコとオオセグロカモメのMゾーン飛行確率空間モデル（衝突リスクセンシティブティマップ）、ウミネコの採食確率空間モデル（餌場喪失リスクセンシティブティマップ）とウトウの採食確率空間モデル（餌場喪失リスクセンシティブティマップ）の構築と精度検証、および外挿性検証をサブテーマ2が担当し、この作業をもとに種ごとに効率的なサンプリング手法と広域網羅的なセンシティブティマップ作成手法をまとめた（⑧）。最終的なセンシティブティマップ作成は道北海域についてはサブテーマ2が、道東海域はサブテーマ3が担当してまとめた（⑨）。

結果と考察でこれら①～⑨の9項目について述べる。

4. 結果及び考察

①道北海域でのデータの取得

道北海域の複数の繁殖地でオオセグロカモメ（22個体）、ウミネコ（138個体、環境総合研究推進費4-1603での56個体を含む）、ウトウ（33個体）をくくりわな、はこわな、あるいは手取りにて捕獲し⁸⁾、GPSデータロガーを装着、それぞれ再捕獲・回収し、その移動と高度情報を連続的に得た（図2.3、図2.4）。GPSデータロガーは、TechnoSmart社のGiPSY5（11g）、GiPSYRemote（13～22g）、AxyTreckMini（12g）、AxyRermote（12g）とPerthold Engeneering社のCatLogGen2（12g）を使った。なお、リモート(Remote)型は装着個体が巣に戻った時に巣の近くの基地局で自動的にデータをダウンロードするので再捕獲の必要はない。回収型はテッサテープで、リモート型はハーネスで装着した⁸⁾。リモート型は太陽電池を備えており、そのため、テープの耐用期間（最大1か月）より長期のデータ取得が可能のためである。ウトウは潜水するため、ハーネスの影響が大きいと予想されたのでリモート型であってもテープで装着した。ウミネコとウトウは再捕獲が比較的容易なので回収型とリモート型を、再捕獲が困難なオオセグロカモメに対してはリモート型を使った。回収型は小型で安価であり、1秒間隔でGPS位置を取得できるが回収の必要があり、1週間程度のデータ取得に適しているのに対し、リモート型はやや大きく高価で、1分以上、場合によっては15分間隔でしかGPS位置を取得できないものの、回収の必要はなく1か月以上の長期データ取得ができた。

装着個体数に対するデータ回収率は礼文トド島のウトウで2割と低かったものの、他の地域では、回収型では8割程度、リモート型では10割と高かった。CatLogはAxyTreckなどに比し価格は10分の1程度で小型であるが、GPS測定間隔5分以上の場合計測期間は3～5日以下であった。TechnoSmart社製データロガーでは、1秒から15分間隔のGPS位置データを連続で、各個体、平均3.5日から48.5日間の軌跡を得ることができた。サンプリング間隔は1秒から15分とばらつきがあったものの、予備解析の結果、サンプリング間隔の違いによる利用場所の違いは小さかったため、すべてのデータを利用した。外挿精度検証のためのデータとして、新潟県粟島と新潟県沿岸域（笹流れ）のウミネコデータをサブテーマ1から、根室落石のオオセグロカモメ、大黒島のウトウデータをサブテーマ3から提供を受けた（成果論文2）。青森県弁天島のウミネコのデータは、北海道大学水産科学研究院の修士課程研究から提供された。

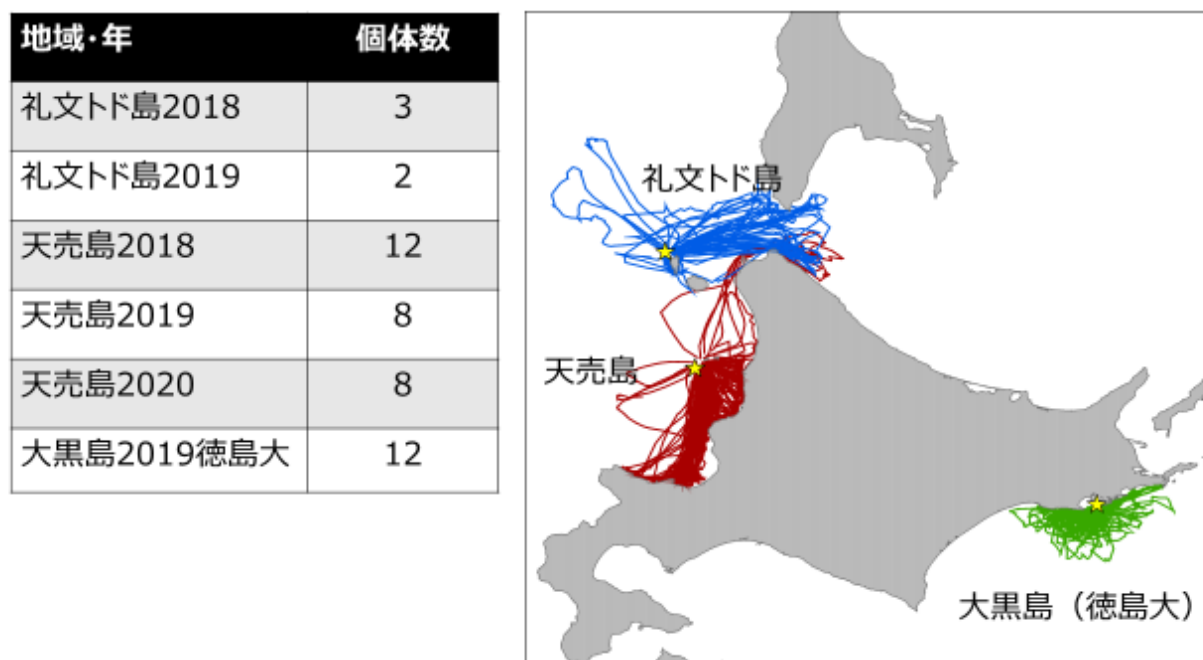


図2.4. ウトウデータ. 礼文トド島と天売島で調査が行われた。大黒島のデータは徳島大より提供された。★は各集団営巣地を示す。図中に移動軌跡を示す。

②飛行・着水の識別と飛行高度検証

海鳥個体が飛行していたのか、あるいは着水していたのかの判断は移動速度で行った。ウミネコについては、1秒間隔で測定した飛行速度は二山形を示し、およそ時速15kmに明瞭なギャップが見られた。本研究において、GPSデータロガーと同時に体軸加速度を高速測定する加速度計を装着した個体の加速度から羽ばたき飛行を確認できた例では、羽ばたき飛行した場合、すべて時速15km以上であったので、この速度による判定は正しいことが確認できた（成果論文3）。ウミネコに関する先行研究⁹⁾でも時速15km（秒速4.2m）以上で飛行、以下で着水と判断している。ウトウの速度分布は秒速5m～8mにギャップが認められたので、秒速6m以上（時速21.6km）を飛行とした（成果論文2）。

表2.1. オオセグロカモメ・ウミネコMゾーン飛行確率地域GAMモデルの精度.

営巣地距離、海岸距離、水深、海底斜度、港からの距離の5変数をすべてふくむモデルを使った。トレインでモデル構築し、テストで精度検証した。精度はピアソン相関係数で判定した。

データフレーム	相関係数	データフレーム	相関係数
ウミネコ2016利尻金崎	0.60	オオセグロカモメ2018 利尻金崎	0.79
ウミネコ2017利尻金崎	0.60	オオセグロカモメ2018 利尻仙法志	0.81
ウミネコ2018利尻金崎	0.62	オオセグロカモメ2019 利尻仙法志	0.87
ウミネコ2017 枝幸	0.84	オオセグロカモメ2018 利尻ポンモシリ	0.72
ウミネコ2018 枝幸	0.65	オオセグロカモメ2019 利尻ポンモシリ	0.88
ウミネコ2018 利尻仙法志	0.91	オオセグロカモメ2019 利尻人面岩	0.84
ウミネコ2019 利尻仙法志	0.61	オオセグロカモメ2018 根室落石	0.93
ウミネコ2020 天売	0.78	オオセグロカモメ2019 根室落石	0.92

GPS データロガーの高度検証を実験的に行った。標高2m～334mの範囲を車で時速0km～60kmで3～4時間移動しながら、各種GPSデータロガーで1秒～15分間隔で計測・記録するとともに、気圧高度計つきハンディGPS（GPSMAP 64scJ. GARMIN. USA）で正確な高度を測定した（成果論文3）。その結果、測定誤差は、受信した衛星数が少ないと大きく、CatLogGen2とGipsyRemoteでは衛星数が5から3に減ると誤差が急に増えた。AxyTrek は衛星数が少なくても比較的誤差が小さかった。また、同じ衛星数で測位しても、測位間隔が短いほど誤差が小さい傾向があった。誤差の平均値は、CatLogGen2では測位間隔10秒～5分で衛星数6以上の場合+2.5m、GiPSY5では測位間隔1秒で衛星数3以上の場合+3.5m、GiPSYRemote（マイナス値を0と読み取る）では測位間隔5～15分で衛星数6以上の場合（-）2.6m、AxyTrekとAxyRemoteでは 測位間隔1秒～15分で衛星数3以上の場合+0.4mであった（成果論文4）。海鳥の追跡においては、これらの条件でデータを取得したので、平均誤差は小さく、機種による補正はしなかった。

③地域空間統計モデルの構築と精度検証

ウミネコおよびオオセグロカモメのMゾーン飛行確率（衝突リスク）、ウミネコ採食確率（餌場喪失リスク）、ウトウ採食確率（餌場喪失リスク）の各モデルを、各データフレームを用い1kmグリッドで作成した。説明変数として、営巣地からの距離^{10),11)}、最も近い海岸線からの距離、水深、海底斜度¹²⁾、海表面水温（SST）、SST勾配、最も近い漁港からの距離^{13),14)}などを用いた。海底地形や水温データはNOAAのBloom Watch 360データベース

（http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/browsers/cwbrowser_global360.html）により、GISソフトArcMapのSpatial Analysisツールで海底斜度とSST勾配（海洋フロントの指標）を算出した。目的変数には、各1kmグリッドのMゾーン飛行頻度と着水頻度それぞれについて最大飛行範囲内でカーネル密度を計算

し、最大値を1として標準化した値を用いた。モデルの種類としてはGAMを用いた。最適モデルの選択にはAICを用い、AICが最も小さいあるいはAICの差が最小のモデルから2以内である複数のモデルを最適モデルとし、複数のモデルが選択された場合、それらのモデルに含まれるすべての説明変数を採択した。

表2.2. ウミネコ採食確率地域GAMモデルと精度.

営巣地距離、海岸線からの距離、水深、海底斜度、港からの距離、SST（表面水温）、SST勾配、クロロフィル濃度の8変数とし、このうち Δ AICが2未満だったモデル群に含まれた変数を取り入れた。

データフレーム	ベストモデルの環境変数	相関係数
2016利尻	営巣地距離+海岸距離+水深+海底斜度+港距離+SST+SST勾配+クロロフィル濃度	0.73
2017利尻	営巣地距離+海岸線からの距離+水深+海底斜度+港距離+SST+SST勾配	0.71
2018利尻	営巣地距離+水深+海底斜度+SST勾配+クロロフィル濃度	0.85
2017枝幸	営巣地距離+水深+海底斜度+港距離+SST	0.65
2018枝幸	営巣地距離+海岸線からの距離+水深+海底斜度+SST	0.85
2018仙法志	営巣地距離+海岸線からの距離+海底斜度+港距離+SST+SST勾配+クロロフィル濃度	0.47
2019仙法志	営巣地距離+海岸線からの距離+水深+港距離	0.67
2020天売	営巣地距離+海岸線からの距離+水深+海底斜度+港距離+SST勾配	0.49

表2.3. (a)ウトウ採食確率地域GAMモデルと精度. 営巣地距離、海岸線からの距離、水深+海底斜度、SST（表面水温）、SST勾配、クロロフィル濃度のうち Δ AICが2未満のモデルに含まれた全変数でモデル作成された。(b)ベストモデルを別コロニー、別年、別コロニー・別年の環境に代入した際の外挿精度を示す。

a)地域モデルと精度

データフレーム	ベストモデルの環境変数	相関係数
2018天売	営巣地距離+海岸距離+水深+海底斜度+SST+SST勾配	0.57
2019天売	営巣地距離+海岸距離+水深+海底斜度+SST+SST勾配+クロロフィル濃度	0.63
2020天売	営巣地距離+水深+海底斜度+SST+SST勾配	0.67
2018トド	営巣地距離+水深+SST勾配	0.53
2019トド	営巣地距離+海岸距離+水深+SST勾配+クロロフィル濃度	0.50
2019大黒	営巣地距離+海岸距離+水深+海底斜度	0.81

b)外挿精度

同じ年の地域外挿			同じ地域の年外挿			地域・年外挿		
モデル	外挿データ	相関係数	モデル	外挿データ	相関係数	モデル	外挿データ	相関係数
2018天売	2018トド	0.14	2018天売	2019天売	0.18	2018天売	2019トド	0.07
2019天売	2019トド	-0.01	2019天売	2020天売	0.20	2019天売	2019大黒	0.05
	2019大黒	0.39	2019天売	2020天売	0.18	2020天売	2018トド	0.03
			2018トド	2019トド	0.03	2020天売	2018トド	0.09
							2019トド	0.00
							2019大黒	-0.06

ウミネコとオオセグロカモメのMゾーン飛行確率を説明する地域モデルにおいては、営巣地からの距離、海岸線からの距離、水深、海底斜度、港からの距離のすべてを要因とした。その結果、営巣地の近く、海岸線の近く、漁港の近くでMゾーン飛行確率が高い傾向があり、モデル精度は0.60~0.93と高かった(表2.1)。ウミネコの採食確率を説明する地域モデルにおいては、営巣地距離に加え、港距離、水深や海底斜度、SST勾配(フロント)も重要であり、営巣地周辺で、また主要な餌であるイカナゴの

好適生息海域を示すフロントや漁港周辺で採食確率が高い傾向があり、モデルの精度は0.47～0.85と比較的高かった（表2.2）。ウトウ採食確率を説明する地域モデルにおいては、営巣地距離や水深に加えSST勾配も重要であり、大黒島の個体は営巣地周辺の陸棚域で、陸棚縁にある天売島の個体は対岸の広い陸棚沿岸部で、陸棚を離れた場所にある礼文トド島の個体はフロントが強い場所で採食する傾向があり、その精度は0.50～0.81と比較的高かった（表2.3a）。

表2.4. (a)ウミネコ利尻島と枝幸の採食確率地域GAMモデルの地域・年間外挿精度、(b)利尻複数年データ合成モデルの外挿精度。精度はピアソン相関係数。

a)道北エリア内の地域間、年間の外挿精度			b)利尻年合成モデルの外挿精度			
同年他地域へ外挿						
モデル	外挿データ	外挿精度				
2017利尻	2017枝幸	0.923				
2018利尻	2018枝幸	0.488				
同地域他年への外挿						
モデル	外挿データ	外挿精度				
2016利尻	2017利尻	0.474				
	2018利尻	0.252				
2017利尻	2018利尻	0.244				
2017枝幸	2018枝幸	0.658				
他地域・年への外挿						
モデル	外挿データ	外挿精度				
2016利尻	2017枝幸	0.255				
	2018枝幸	0.440				
2017利尻	2018枝幸	0.243				
			外挿データ		利尻単年モデル外挿	利尻合成モデル外挿
			2016	2017	2016 2017	2016 2017 2018
2018利尻			0.252	0.244	0.192	—
2017枝幸			0.255	0.923	0.629	0.609
2018枝幸			0.440	0.243	0.137	0.612

④地域採食モデルの海域内の他地域への外挿精度

これら地域モデルに、主に道北海域内の他の年や繁殖地の環境データを代入して1kmグリッドの採食確率を予測し、外挿精度を調べた。カモメ類のMゾーン飛行確率地域モデルの道北エリア内の外挿精度については、地域も説明変数に加えて、ウミネコ・オオセグロカモメの汎用モデルが各種データフレームにあてはまるかを調べることで代用し、これについては⑤で詳しく述べる。

まず、ウミネコ採食確率地域モデルについては、2016年～2018年の利尻島地域、枝幸地域のデータフレーム相互の外挿精度の指標である相関係数は0.93、0.66と高かった2例を除き、全体的に0.25～0.49と低かった（表2.4a）。次に、ウミネコ採食確率地域モデルの外挿精度の向上を目的に、矩形最外郭を対象範囲とし、利尻島地域の複数年のウミネコ採食確率データフレームを合算したうえで年も説明変数に加えて、地域年合成モデルを構築し、それに利尻地域、枝幸地域の単年の環境データを代入して予測値を求め実測値との相関係数（外挿精度）をもとめたが、これらの合成モデルの外挿精度（0.14～0.61）が単年のデータから構築された地域モデルの外挿精度（0.25～0.93）より高いとは言えなかった（表2.4b）。最後に、ウトウ採食確率地域モデルの外挿精度を、天売島および大黒島も含めて確認したところ、やはり、-0.06～0.39と低かった（表2.3b）。採食場所の決定には、③で述べた通り、水温など年変化が大きい環境要因も重要であったため、水温などとの関係性が年や場所で異なることが原因だと考えられた。また、営巣地と陸棚や斜面域といった海底地形、主要なフロントとの相対位置により採食パターンが大きく異なるのも理由かもしれない。

⑤道北エリア2種汎用モデルとその精度

道北エリアの二つの地域（利尻島と枝幸）のウミネコとオオセグロカモメのデータを統合し、Mゾーン飛行確率を説明するために、汎用性が高いとされるランダムフォレストモデルを作った。説明変数のうち、環境要因としては、営巣地距離、海岸距離、最も近い漁港からの距離（港距離）、一般的

な地形要因として、海底深度、海底傾斜とし(図2.5a)、これにサンプル属性(種、地域(利尻と枝幸)、営巣地、年)も要因として加えた。サンプル属性と環境変数を要因として構築したサンプル・環境モデルにおいて、説明変数の重要性をIncNodePurityで判定したところ、営巣地距離が最も重要であり、サンプル属性の重要度は小さかった(図2.5b)。Mゾーン飛行確率は営巣地周辺、海岸線近く、港の近くで高かった(図2.5c)。説明変数として、種と環境変数を組み込んだ種・環境モデルおよび環境変数だけを組み込んだ環境モデルでも、営巣地距離が最も重要であった。

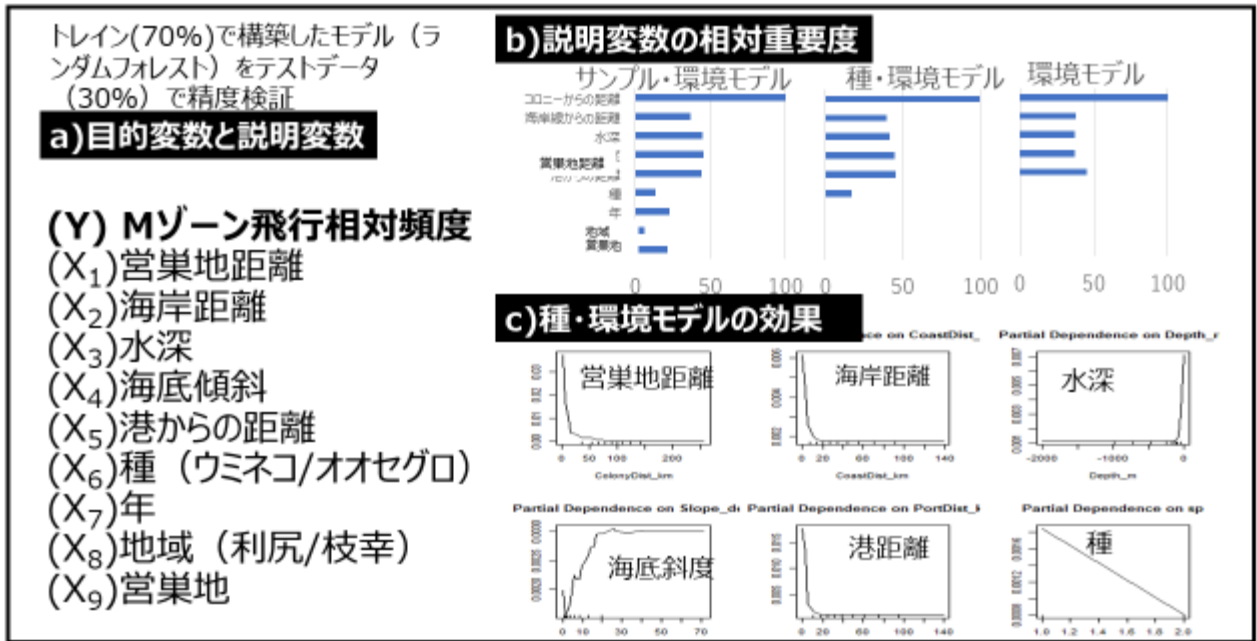


図2.5. 道北カモメ類Mゾーン飛行確率汎用モデルの構築と説明変数の重要性.

モデル	テストデータ	相関係数
サンプル・環境	13データフレーム	0.85
種・環境	13データフレーム	0.57
環境	13データフレーム平均	0.68
種・環境	ウミネコ7データフレーム最大	0.91
種・環境	ウミネコ7データフレーム平均	0.92
種・環境	オオセグロ6データフレーム最大	0.94
種・環境	オオセグロ6データフレーム平均	0.95

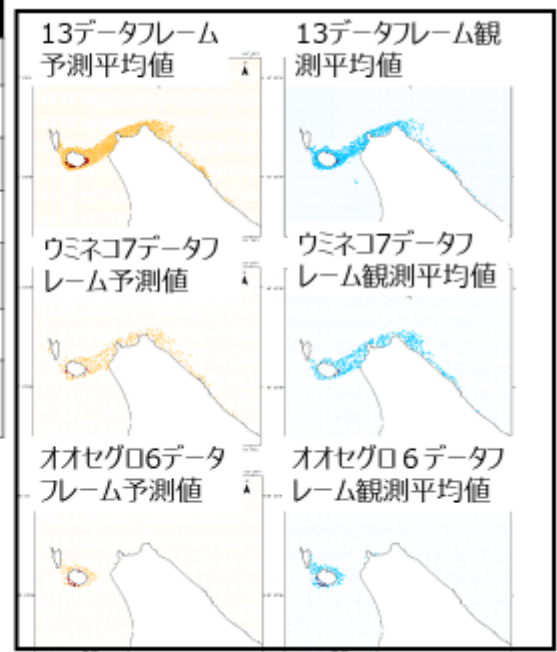


図2.6. 道北エリアカモメ類Mゾーン飛行確率汎用モデルの精度.

オオセグロ・ウミネコ13のトレインデータフレームで、ランダムフォレストでモデル構築した。複数のテストデータフレームそれぞれの値あるいは平均・最大値を用いた。

トレインデータで作った道北エリアのウミネコ・オオセグロカモメMゾーン飛行確率汎用モデルに、複数のセットのテストデータフレームの説明変数を代入して得られた予測値と実測値との相関係数をもとめ、モデル精度を判定した。サンプル・環境モデルの精度は0.85と高く、種・環境モデルは両種を含めたテストデータフレームで検証した場合の精度は0.57~0.68と比較的高く、種ごとの複数のテストデータフレームにおける観測地の平均値、最大値と予測値におけるこれらの値との相関係数から見た精度は0.91~0.95と極めて高かった（図2.6a）。これは、エリアを限定して複数の地域で2種を合わせて作った一つのMゾーン飛行確率汎用モデルは、当該エリアに限れば、各種で各地域の値をよく説明できる、すなわち、エリア内での種・地域間での外挿性も高いことを示している。採食場所と異なり、Mゾーンの高さを飛ぶ頻度は、営巣地距離や地形が大きく関わっており、そのため同一のモデルで、複数の地域において、似た飛行特性を持つ2種のリスクが高い場所をよく説明できると考えられた。

⑥汎用モデルの他の海域への外挿精度

上述したウミネコ・オオセグロカモメ道北エリアのMゾーン飛行確率汎用モデルが他の海域にも当てはまるか調べた。この汎用モデルのウミネコ新潟県粟島地域2019年、新潟県沿岸笹流れ地域2019年とオオセグロカモメ根室地域2018年2019年への外挿精度は0.62~0.84と高かったが、天売島地域2020年と青森弁天島地域2014年のウミネコへの外挿精度は0.37~0.43と低かった（図2.7）。天売島地域のウミネコは島の北と南両方の北海道沿岸に広く採食に出かけており、青森県弁天島地域のウミネコは中深層性のハダカイワシ類も食べ（伊藤元裕私信）そのため海盆域にも採食に出かけていた（図2.3、図2.7）。営巣地と採食場所の位置関係や餌のタイプが地域で大きく異なる場合、特性の異なる採食場所と往来する過程でMゾーンを飛ぶため、地形と飛行方向の関係が大きく異なっており、道北エリアで作った汎用モデルが当てはまらないのではないかと考えられた。

モデルの外挿に関する結論として、地域モデルは、特に採食場所説明モデルは、道北海域内でも外挿精度は低く、年合成モデルでも外挿精度は向上しなかった。さらに、道北エリアで作成したウミネコ・オオセグロカモメMゾーン飛行確率汎用モデルを使っても、道北エリア内の別地域への当てはまりは良いが、他の海域への外挿精度は低い場合があった。そのため、現段階では地域ごとにモデルを作り、それらの予測結果として得られるマップを広域においてまとめて表示するのが良いと判断された。

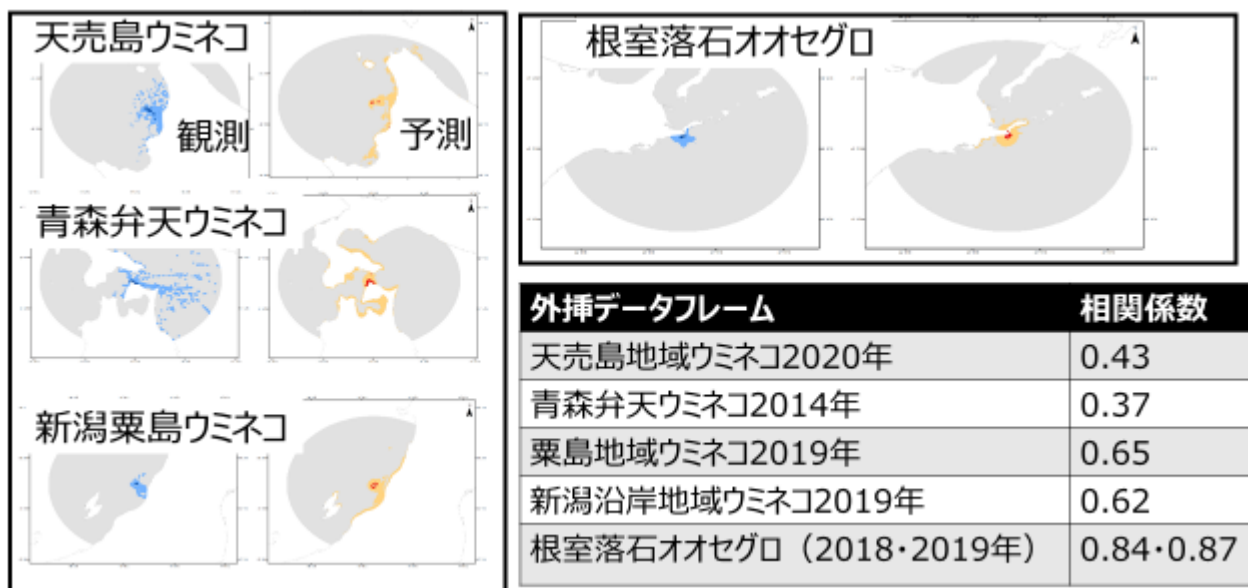


図2.7. 道北カモメ類Mゾーン飛行確率汎用モデルの他地域への外挿精度。

種・環境モデルに他海域の種と環境を代入（外挿）したときの観測値と予測値を示す。外挿精度は粟島と新潟のウミネコ、根室のオオセグロカモメでは高く、天売島と青森弁天島のウミネコでは低かった。

⑦スケールと数値化

外挿精度が特に低かったウミネコの採食確率モデルについて、利尻地域2018年のデータを用い、別の手法として、10kmグリッドでGAMモデルを構築し、1kmグリッドに比し外挿精度が向上するかも、矩形最外郭を対象範囲として検討した。グリッドを10kmにすると、年間や年・営巣地間での外挿9パターンのうち、4パターンでは外挿精度が向上しないかあるいは低下したが、5パターンでは向上した(図2.8)。解析スケールを粗くすることで、常にではないが、汎用性が上がる場合があった。本手法開発は、洋上風発の建設にあたって、具体的にセンシティブティの高い場所を特定することが目的であり、そのためには1km程度の高分解能での予測が強く求められる。本報告書では実データをつかい、1kmの分解能の地域モデルを使いセンシティブティマップを作成するのが妥当であると判断することとする。ただし、洋上風発建設候補海域を絞る際、環境省EADAS風力発電における鳥類のセンシティブティマップ(海域版)に加え、さらに繁殖している海鳥のセンシティブティを使うため、汎用モデルを全国に拡張した10km解像度のマップを作るという選択肢は残される。外挿精度の低さは、海域特有の餌や採食場所が原因と考えられ、より多くの地域での研究により海域の特徴を使った一般化ができるかもしれない。

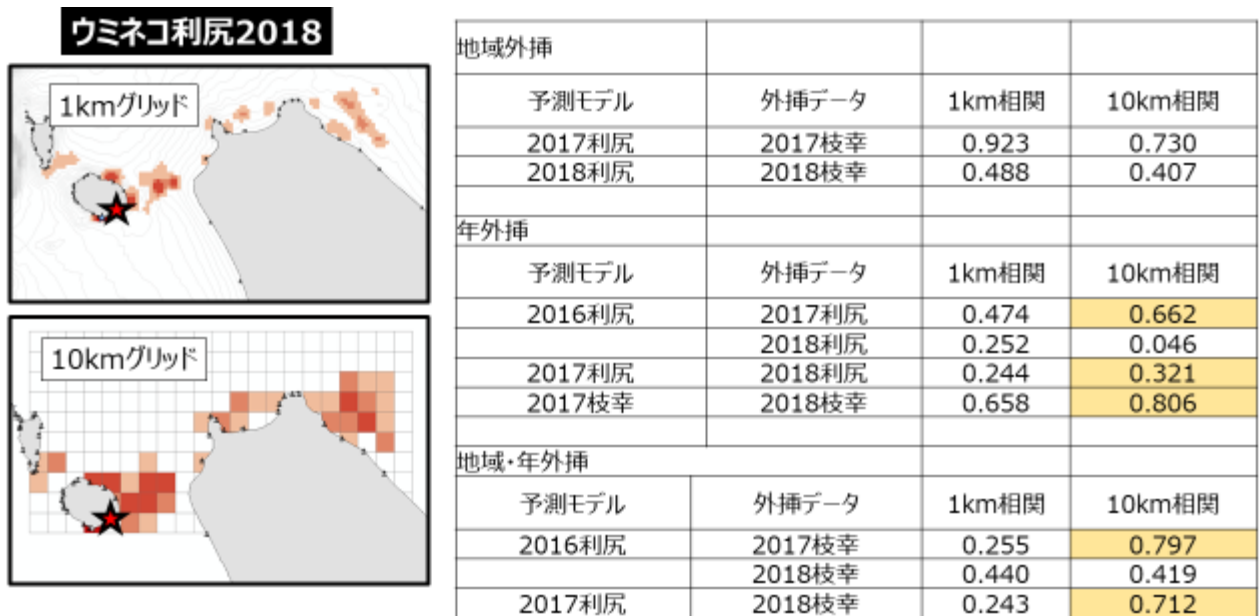


図2.8. スケールを粗くしたことによるウミネコ採食確率モデルの外挿精度向上。1kmグリッドと10kmグリッドでGAMモデルを作成し、比較した。年間外挿では向上し(ハイライト)、地域間外挿では向上しなかった。

海上にいた時間に対する割合%

データフレーム年合計	飛行	Mゾーン	係数
ウミネコ利尻金崎	36	11	1
ウミネコ枝幸	34	6	0.54
ウミネコ利尻仙法志	30	8	0.72
ウミネコ天売島	30	11	1
オオセ利尻金崎	7	3	0.27
オオセ利尻仙法志	5	2	0.18
オオセ利尻ポンモシリ	9	4	0.36
オオセ利尻人面岩	7	3	0.27
オオセ根室落石	8	3	0.27
ウトウ天売島	11	1	0.09
ウトウ礼文トド島	17	3	0.27

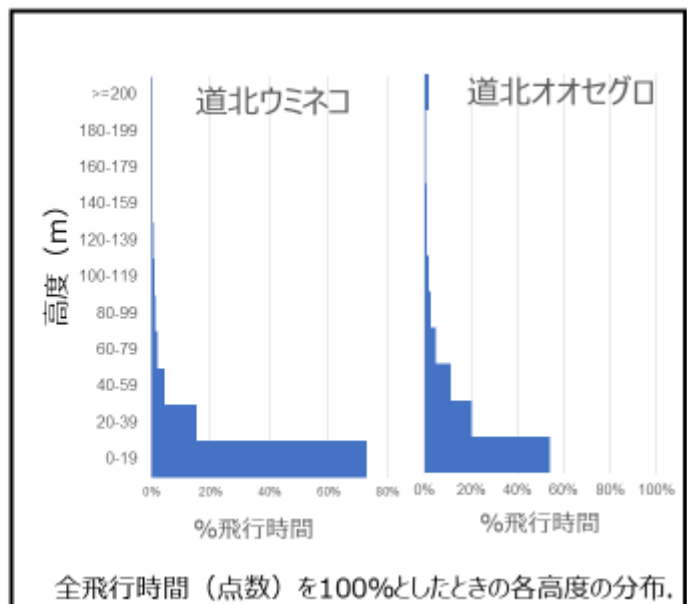


図2.9. 海上での飛行時間割合およびMゾーン飛行時間割合の種およびコロニー間差異。利尻島のウミネコを1としたときの相対値として示す。

さらに本研究では、使いやすいセンシティブティマップを作るための感受性の数値化を検討した。Mゾーン飛行確率と採食確率を示す目的変数（実測値）として、本研究ではグリッドの最大値を1として標準化したカーネル密度を使っており、予測値も同様である。そのため、予測は、Mゾーン飛行確率の相対値の空間分布などである。こうした相対値を視覚的にわかりやすくし、実用化するため、Jenkinsの自然分類によりスコア化をおこない、6段階に分けた。また、本研究により海上にいる時間のうちMゾーンを飛行した時間割合が、種・営巣地で1～11%と大きく違うことがわかった（図2.9）。そのため、種間や海域間で比較する際のバイアスを除くことをねらって、本研究で提案するセンシティブティマップでは海上でのMゾーン飛行時間比が最大の利尻島のウミネコの値を1とした標準化を行うこととした。着水時間比率（図2.9の飛行割合%を100%から差し引いた値）は64%～95%と高かったため、6段階の数値化においてこうした係数を乗じる必要はないと考えた。

⑧センシティブティマップ作成手順

①～⑦までの結果をもとに、以下に、繁殖する海鳥のセンシティブティマップ作成のための、種ごとのサンプリング方法、特に個体数、空間解析手法、マップ化手順について整理した。センシティブティマップとするにあたり、理解しやすさを考えて、Mゾーン飛行確率を衝突リスク、採食確率を餌場喪失リスクと読み替えることとする。全体としては、他地域への外挿精度が悪い場合があることがわかったため、洋上風発建設計画海域から200km以内に海鳥の営巣地がある場合（海鳥コロニーデータベース環境省生物多様性センターで確認）、そこで繁殖する海鳥種のGPS追跡の実データを得て、空間統計モデルを用いてセンシティブティマップを作成することを提案する

第1に、信頼できる精度で高度を得て、十分なデータを得るため、再捕獲が困難な種類（オオセグロカモメなど）ではAxyRemoteで1分～5分、再捕獲が容易な種類（ウミネコ、ウトウなど）ではCatLog Gen2かAxyTrekで1秒～1分間隔でサンプリングすることを基本とし、長期データを得る場合はAxyRemoteで1分～5分間隔でサンプリングすることを提案する。鳥への負担軽減のため、テープによる装着が望ましく、AxyRemoteの場合もできるだけ再捕獲を試みるのが望ましい。

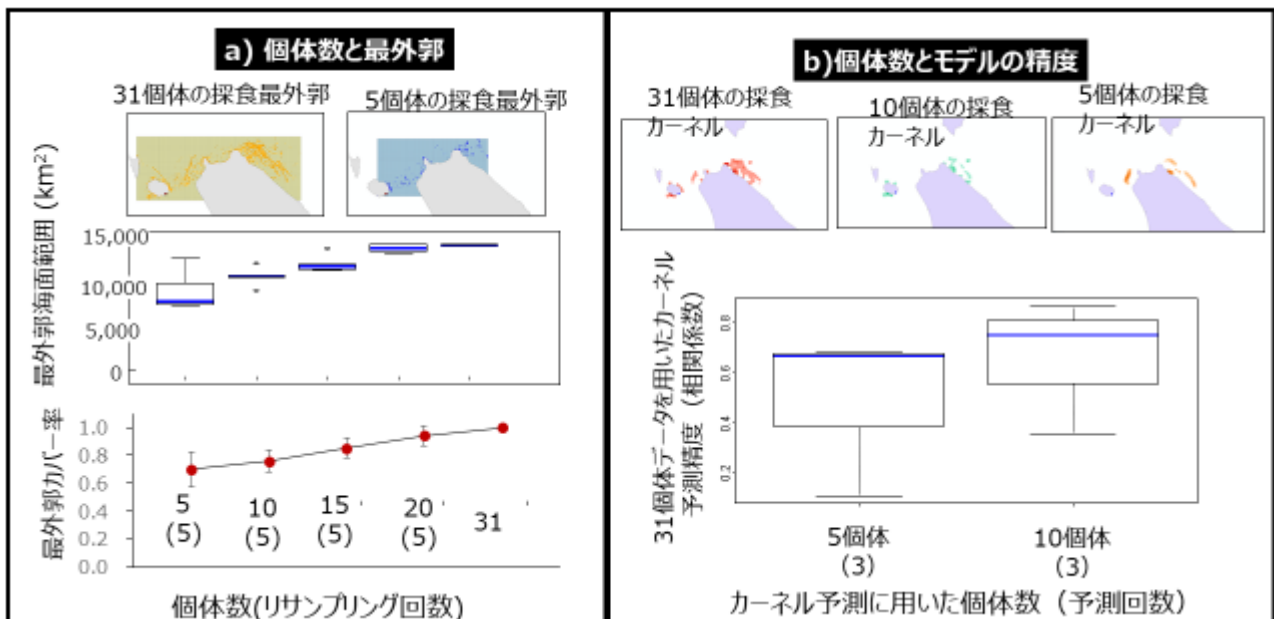


図2.10. サンプル個体数による (a) 最外郭面積および (b) モデルの精度の変化。

2017年利尻ウミネコ31個体から個体数を減らした時の値を示す。再サンプリング回数を示す。

第2に、サンプリング個体数について提案する。2017年の利尻島ウミネコデータフレームを用いて、

31個体からランダムに20、15、10、5個体を選択することを5回ずつ行ったところ、31個体で得られた矩形最外郭面積に対して、20個体では90%、15個体では85%で、5個体になると65%と急に縮小した(図2.10a)。一定の矩形最外郭面積を得るためには15~20個体程度のサンプルが必要と推定された。また、サンプル個体数を減らすとモデルの予測精度がどのように変わるかも調べた。2017年利尻データを使い、全31個体からランダムに選択した10個体と5個体のトラッキングデータをもとに採食場所を予測するモデルを作り、全31個体で作ったモデルの予測値との一致度を検証した。ランダムな個体選択はそれぞれ3回ずつ行った。この検証では対象範囲を営巣地から半径150kmとした。その結果、全31個体での予測値との一致を相関係数で見ると、5個体からの予測(0.49)よりも10個体からの予測(0.66)の方が高かった(図2.10b)。以上より、効率的にしかも必要十分なデータを得るため、各種各年各地域で最低でも10個体のサンプルを得ることを提案する。

第3に、データ取得後の手順として、衝突リスクを示すMゾーン飛行確率、餌場喪失リスクを示す採食確率、それぞれで地域GAMモデルをつくり、モデル精度を確認後、環境要因を代入して予測値を求め、スコア化(1~6の6段階、Jenksの自然分類)し、その地域個体群に複数データフレームがある場合はスコアを平均する。衝突リスクセンシティブティマップ作成においては、⑦の結果よりMゾーン飛行時間割合に応じて種ごとに標準化した。本研究では利尻島のウミネコのMゾーン飛行時間割合が最大であったので、これを1とし、オオセグロカモメは0.2~0.4、ウトウは0.1~0.3を乗じた値とした(図2.9)。そのため、オオセグロカモメとウトウでは、最後に得られた値を四捨五入してスコア化する際に、0.49以下はJenksの自然分類にはないスコア0となるが、本研究ではすべての種で揃えるため、このスコア0はスコア1と同等として扱った。これら地域モデルによるマップを合わせて、複数の地域個体群の重複グリッドがある場合は最大スコアを使い、広域の衝突リスク・餌場喪失リスクセンシティブティマップを作成する。

第4に、衝突リスクは親の死亡率に、餌場喪失リスクは繁殖成績などに影響すると考えられ、これら二つのリスクは質が異なる(成果論文1)。両者は増加率に影響すると考えられるが、その影響の仕方は種や地域によって異なり、わが国ではそれに関する情報がない。そのため、現時点で、本研究が提案する1km高解像度マップを利用する場合、これらを統合しないで使用することが適切であると考えられる。もし統合するとすれば、両者の最大値を使うことが考えられるが、その場合には、注意深い解釈が必要である。環境影響評価としては、洋上風発施設が地域個体群の増加率へ与えるインパクトを評価するのが課題である。そのため、個体へのリスクとしてとらえるのが適切であり、地域個体群の個体数は乗じないことを本報告では提案する。ただし、EADASの風力発電における鳥類のセンシティブティマップ(海域版)と比較したい場合は、衝突リスクと餌場喪失リスクの最大値を使い地域個体群の個体数を乗じてこれを修正することは技術的には容易である。

⑨3種のセンシティブティマップ

最後に、⑧にしたがい、道北海域のオオセグロカモメ、ウミネコ、ウトウの衝突リスク・餌場喪失リスクのセンシティブティマップを作成した。⑧で述べた理由から個体数は考慮していない。各データフレームではサンプル数が10個体以下の場合もあり、⑧で考察した点からはやや問題が残るが、複数年のサンプルを合計すると、各種・地域ごとにみれば、10個体以上のサンプルがある(図2.3、図2.4)。ただし、礼文トド島のウトウだけ2年合わせても5個体であり(図2.4)、やや信頼性に欠ける。先に述べた通り、ウミネコの値を最大値として標準化しているので、種間での比較が可能である。衝突リスクに関しては、オオセグロカモメでは営巣地周辺でのみ中程度のリスクが、ウミネコでは各営巣地の周辺海域、営巣地から採食場所の沿岸域への広い範囲、海岸線、営巣地と採食地との往来の際通過する岬などの海岸線で高いリスクが、ウトウでは島周辺の比較的広い範囲で中程度のリスクがあった(図2.11)餌場喪失リスクに関しては、オオセグロカモメでは島周辺において、ウミネコでは島周辺と北海道沿岸にそった浅い海域において、ウトウではサハリン海峡、礼文島周辺、天売島から北海道本土沿岸域の広い範囲で中~高いリスクがあった(図2.12)。なお、本研究の対象範囲外ではあるが、広範囲を移動するウトウでは、複数の大規模洋上風発の建設計画が出されている石狩湾を重要な採食場所とする場合が

あった。また、ここに示したマップは、実データがある地域個体群についてだけである。オオセグロカモメとウミネコについては、範囲外の小樽から積丹にかけても営巣地が点在しており、これらの地域個体群のリスクはこのマップには含まれていない。

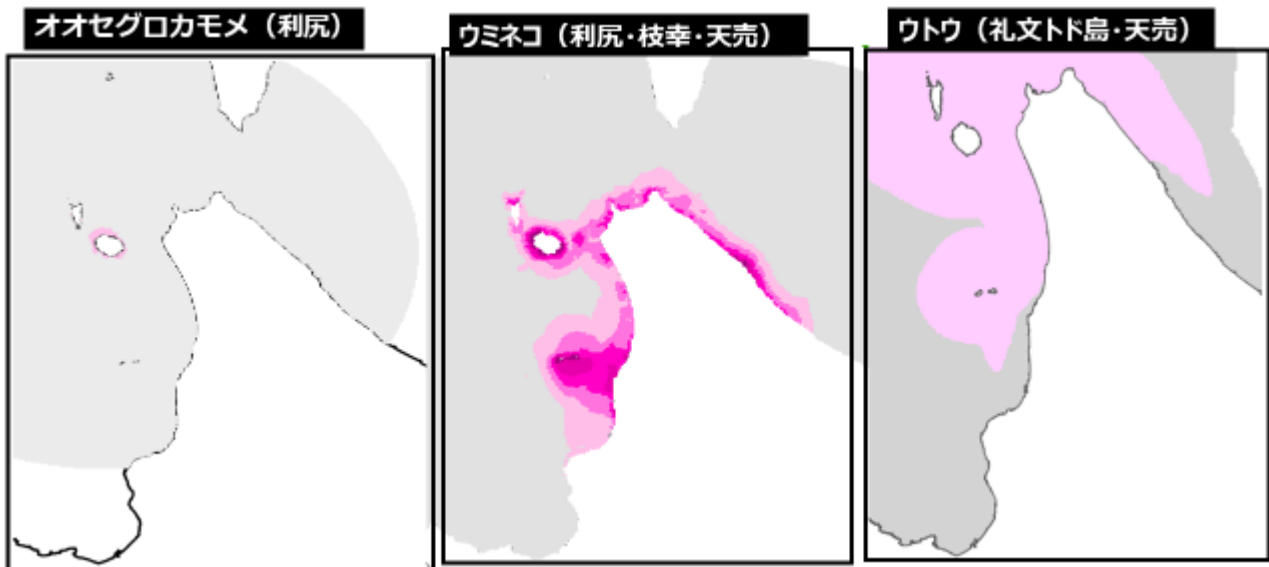


図2.11. 衝突リスクセンシティブティマップ。

地域GAMモデルに予測範囲内の環境要因を代入して予測し、スコア化した（1～6の6段階、Jenksの自然分類）。ウミネコに対する相対値で示す。

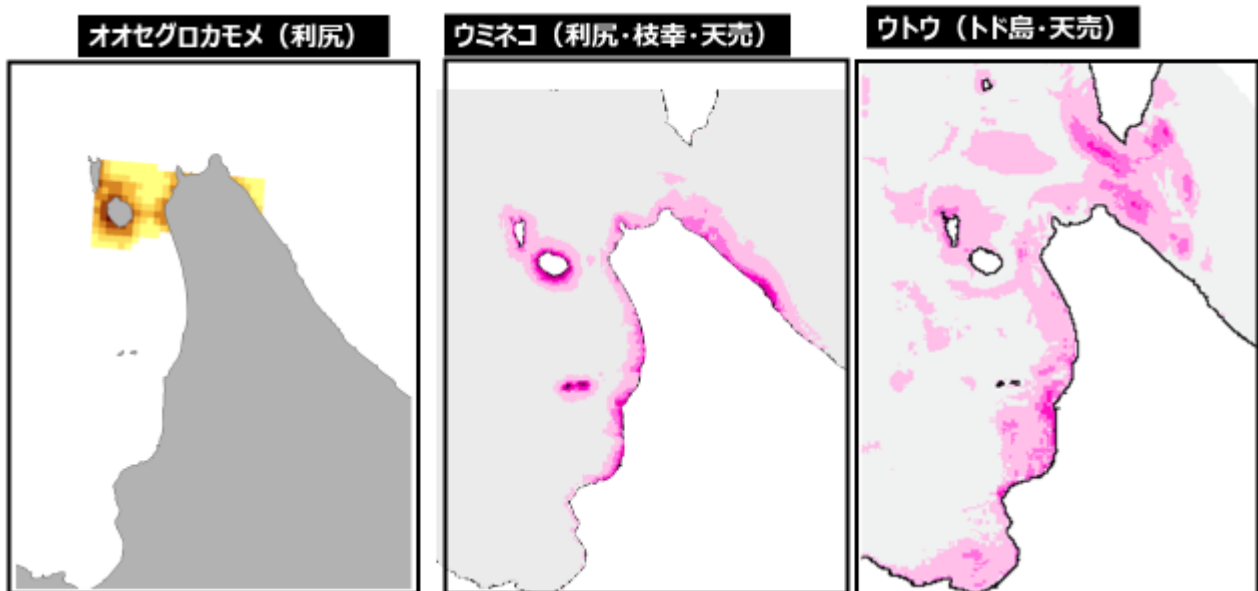


図2.12. 餌場喪失リスクセンシティブティマップ。

地域GAMモデルに予測範囲の環境要因を代入して予測し、スコア化した（1～6の6段階、Jenksの自然分類を改良）。

5. 研究目標の達成状況

道北海域の4地域において、オオセグロカモメ、ウミネコ、ウトウの計193個体の移動をGPSデータロガーで3次元追跡し、センシティブティマップ作成のためのモデル構築に十分なデータを得ることに加え、高度検証を初めて実験的におこなって信頼できる高度を得る手法も示せたので、道北海域の複数の繁殖地でオオセグロカモメ、ウミネコ、ウトウの移動をGPSデータロガーで追跡することにつき、目標を大きくうわまわる成果をあげた。これらのデータを使って、それぞれの種と地域において、営巣地距離や水温などの環境変数を組み合わせて、目的変数（利用度＝リスク）をよく説明する最適な空間統計

モデル（地域モデル）を構築し、その精度も検証したので、感受性マップの基礎となるハビタットモデルを作ることについては目標どおりの成果をあげた。地域モデルの他の地域への外挿精度は概して低いことを確認でき、モデルの他の海域への外挿性を検証することについては目標どおりの成果をあげた。汎用性向上のためカモメ類の2地域でのデータを統合するという新しい手法で、精度の高い汎用モデルが構築できたが、この汎用モデルも他の海域への当てはまりの点からは、やはり高い場合と低い場合があることが明らかとなり、汎用性を高める手法開発については、その限界を明らかにした点で、目標にはやや及ばないが一定の成果をあげた。また、解像度を1kmから10kmと粗くすることで外挿精度が上がる場合もあることを明らかにするとともに、種ごとに異なる風車ブレードの高さを飛行する時間割合を補正するよう数値化する手法を開発できたので、分析のスケールとセンシティブリティの数値化を検討するという点については目標どおりの成果をあげた。さらに、データロガーの機種や海鳥種ごとの特性に応じた効果的な現場での手法について細部にわたり確定し、空間統計モデリングとマップ化の手法を提案するとともに、加えて、効率的なサンプル数の検討もおこなったので、種ごとに効果的なサンプリング手法を提案することについては目標をうまわる成果をあげた。最後に、地域モデルによる予測値をスコア化し、広域でのセンシティブリティマップを作成する手順を整理し、対象とする3種類の海鳥の道北海域すべての地域個体群について、1kmという高解像度でのセンシティブリティマップを提出できたので、広域網羅的なセンシティブリティマップ 作成手法提案については目標どおりの成果をあげた。

6. 引用文献

- 1) Furness RW, Wade HM, Masden EA (2013) Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. *J Environ Manag* 119: 56-66
- 2) Cook ASCP, Ward RM, Hansen WS, Larsen L (2018) Estimating seabird flight height using LiDAR. *Scottish Marine and Freshwater Science* 9: 14-66
- 3) Kazama K, Nishizawa B, Tsukamoto S, Gonzalez JE, Kazama MT, Watanuki Y (2018) Male and female Black-tailed Gulls feed on the same prey species but use different feeding habitats. *J Ornithol* 159: 923-934
- 4) Kato A, Watanuki Y, and Naito Y (2003) Foraging behaviour of chick-rearing rhinoceros auklets at Teuri Island, Japan, determined by acceleration-depth recording micro data loggers. *J Avian Biol* 34: 282-287
- 5) Breiman (2001) Random Forests. *Machine Learning* 45: 5-32
- 6) Liaw A, Wiener M (2002) Classification and regression by Random Forest. *R News* 2: 18-22
https://www.r-project.org/doc/Rnews/Rnews_2002-3.pdf
- 7) R Development Core Team 2018, A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- 8) 綿貫豊・高橋晃周 (2016) 海鳥のモニタリング法 生態学フィールド調査法シリーズ 占部城太郎・日浦 勉・辻 和希 (編) 共立出版, 東京, pp136
- 9) Yoda K, Tomita N, Mizutani Y, Narita A, Niizuma Y (2012) Spatio-temporal responses of black-tailed gulls to natural and anthropogenic food resources. *Marine Ecology Progress Series* 466: 249-259
- 10) Kinder TH, Hunt GL Jr, Schneider DC, Schumacher JD (1983) Correlation between seabird and oceanic fronts around the Pribilof Island. *Alaska Estuar Coast Shelf Sci* 16: 309-319
- 11) Decker MB, Hunt GL Jr (1996) Foraging by murrets (*Uria* spp.) at tidal fronts surrounding the Pribilof Islands, Alaska, USA. *Mar Ecol Progr Ser* 139: 1-10
- 12) Bradbury G, Trinder M, Furness B, Banks AN, Caldow RWG, Duncan Hume D (2014) Mapping seabird sensitivity to offshore wind farms. *PLoS ONE* 9(9): e106366
- 13) Villablanca R, Luna-Jorquera G, Marín VH, Garthe S, Simeone A (2007) How does a generalist seabird species use its marine habitat? The case of the kelp gull in a coastal upwelling area of the Humboldt Current. *ICES J Mar Sci* 64(7): 1348-1355
- 14) Calado JG, Matos DM, Ramos JA, Moniz F, Ceia FR, Granadeiro JP, Paiva VH (2018)

Seasonal and annual differences in the foraging ecology of two gull species breeding in sympatry and their use of fishery discards. *J Avian Biol* 49(1): 1-12

II-3 道東沿岸域におけるウトウ等の海鳥センシティブリティマップの開発と汎用性の検証

国立大学法人徳島大学

大学院社会産業理工学研究部 生態系管理工学研究室 准教授 河口 洋一

<研究協力者>

国立大学法人帯広畜産大学 助教 赤坂 卓美

国立大学法人徳島大学 学術研究員 藪原 佑樹 (H30.4-R1.3)

学術研究員 佐藤 雄大 (R2.4-R3.5)

[要旨]

洋上風力発電の立地適地が広範囲に分布する北海道東部の海域において、同海域で繁殖するウトウおよびオオセグロカモメの利用空間を予測したセンシティブリティマップの作成を目指した。本研究では、大黒島でウトウを、根室落石でオオセグロカモメを対象に、GPSロガーを用いて行動を追跡し、その利用海域を環境要因から説明・予測する統計モデルを作成した。なお、サブテーマⅢでは、ウトウについては風車ブレードの高さを飛行する場所（衝突リスク）を、オオセグロカモメについては採食する場所（回避リスク）の予測を、それぞれ担当した。構築されたモデルの汎用性を検証するため、日本海側の営巣地（ウトウ：天売島・トド島、オオセグロカモメ：利尻島）で取得されたトラッキングデータをサブテーマⅡから借用し、外挿による予測精度を検証した。予測精度の検証結果を踏まえ、道東海域における2種のセンシティブリティマップを作成した。

3つの営巣地で取得されたウトウのトラッキングデータから、大黒島と天売島の個体は営巣地の周囲で、トド島の個体は島から離れたサハリン海峡の沖合でも風車ブレード回転高度を飛行していたことがわかった。風車ブレードへの衝突リスクを予測する統計モデルでは、営巣地に近く、海岸線の近くで衝突リスクが高い傾向があった。また、外挿によるモデルの汎用性検証の結果、特にトド島への予測精度が低かったことから、現時点では地域ごとに取得されたデータでリスクを予測し、センシティブリティマップを作成するのが妥当であると判断された。オオセグロカモメの採食場所は、いずれの海域も営巣地の周辺に集中しており、餌場の喪失リスクを予測する統計モデルでは、営巣地や海岸線に近いほど利用率が高く、海水面温度などの海洋環境については、比較的温暖な根室海域でのみ関係している傾向があった。また、外挿による予測精度は一貫して低かったことから、オオセグロカモメについてもそれぞれの海域でセンシティブリティマップを作成していく必要があると判断した。これらの結果を踏まえ、それぞれの営巣地で作成されたモデルに、各営巣地からウトウまたはオオセグロカモメの潜在採食距離を半径とする範囲の環境要因を代入し、1 kmメッシュの空間解像度で予測値を得た。得られた予測値は、Jenksの自然分類により6段階のスコアに区分し、マップとして可視化した。ウトウの衝突リスクセンシティブリティマップでは、種によって風車ブレード高度の飛行頻度が異なることを考慮し、これを補正した上で作成した。最終的に得られたマップのうち、道東海域ではウトウおよびオオセグロカモメともに営巣地の周辺で衝突リスクが高くなる傾向があることが明らかとなった。以上のことから、本研究では道東海域で繁殖する2種について、高解像度で衝突・餌場喪失リスクを予測したセンシティブリティマップを作成しており、目標通りの成果をあげることができた。

1. 研究開発目的

北海道周辺の海域は多くの好風況エリアを有し、洋上風力発電の立地適地が広く存在する¹⁾。一方、特に北海道東部の沿岸域や離島には、多くの海鳥繁殖コロニーが点在しており、国内でも有数の海鳥生息地を形成している²⁾。近年、複数の先行研究により、洋上風力発電施設の建設・稼働は、海鳥の飛行中における風車ブレード衝突リスクに加え、採食場所の喪失リスクを増大させることが指摘されている

3), 4), 5)。したがって、洋上風力発電所の建設地が海鳥の重要生息地と重複することを避けるためには、当該地域で繁殖する海鳥の高頻度利用域を明らかにするとともに、その規定要因を解明し、潜在的に衝突リスクおよび餌場喪失リスクの高い海域を広域に推定したセンシティブティマップの開発が必要である。

そこでサブテーマⅢでは、道東海域で繁殖するウトウおよびオオセグロカモメの2種を対象に、その利用海域を予測する手法の開発とセンシティブティマップの作成を目的として、1) GPSロガーの装着により移動軌跡データを取得し、2) その高頻度利用海域を予測する統計モデルを作成するとともに、3) 得られたモデルを他の海域へ外挿して汎用性を検証した上で、4) 鳥種ごとのセンシティブティマップを作成する。

2. 研究目標

北海道東部の海岸地域でオオセグロカモメ、大黒島でウトウをそれぞれ捕獲し、GPSロガーを装着して海鳥の移動軌跡を明らかにする。得られたデータから利用海域を特定し、海水温や海底地形等との関係から海鳥の空間利用モデルを作成する。複数年にわたる海鳥の移動軌跡、利用海域の情報を基に作成した空間利用モデルを使い、北海道東部海域における洋上風力発電センシティブティマップの作成手法を確立し、活用方法について検討を行う。

3. 研究開発内容

本研究では、サブテーマⅡとⅢが、ウトウおよびオオセグロカモメを共通の対象種とし、2種の風車ブレードへの衝突リスクおよび餌場喪失リスクについて予測したセンシティブティマップを作成する。研究開発を効率的に進めるため、上記2種について、サブテーマⅡが道北海域（ウトウ：天売島、トド島、オオセグロカモメ：利尻島）を、サブテーマⅢが道東海域（ウトウ：大黒島、オオセグロカモメ：根室落石）をそれぞれ担当し、行動データを取得することとした。取得された行動データはサブテーマ間で共有し、それぞれが作成した空間統計モデルの外挿精度の検証に用いた。また、モデルの作成および外挿精度の検証においては、先行の環境研究総合推進費（4-1603）での経験と、サブテーマⅡの有する海鳥研究の経験を考慮し、サブテーマⅡがウトウの餌場喪失リスクとオオセグロカモメの風車ブレード衝突リスクの予測を、サブテーマⅢがウトウの衝突リスクとオオセグロカモメの餌場喪失リスクの予測を実施した。最終的に、各サブテーマで得られた成果を統合し、2種のセンシティブティマップを作成した上で、成果報告ではそれぞれの研究開発目標に合わせ、サブテーマⅡが道北海域を、サブテーマⅢが道東海域を担当した。本研究におけるセンシティブティマップ作成の流れを図3.1に示す。なお、作成の手順はサブテーマⅡとⅢで概ね同様である。

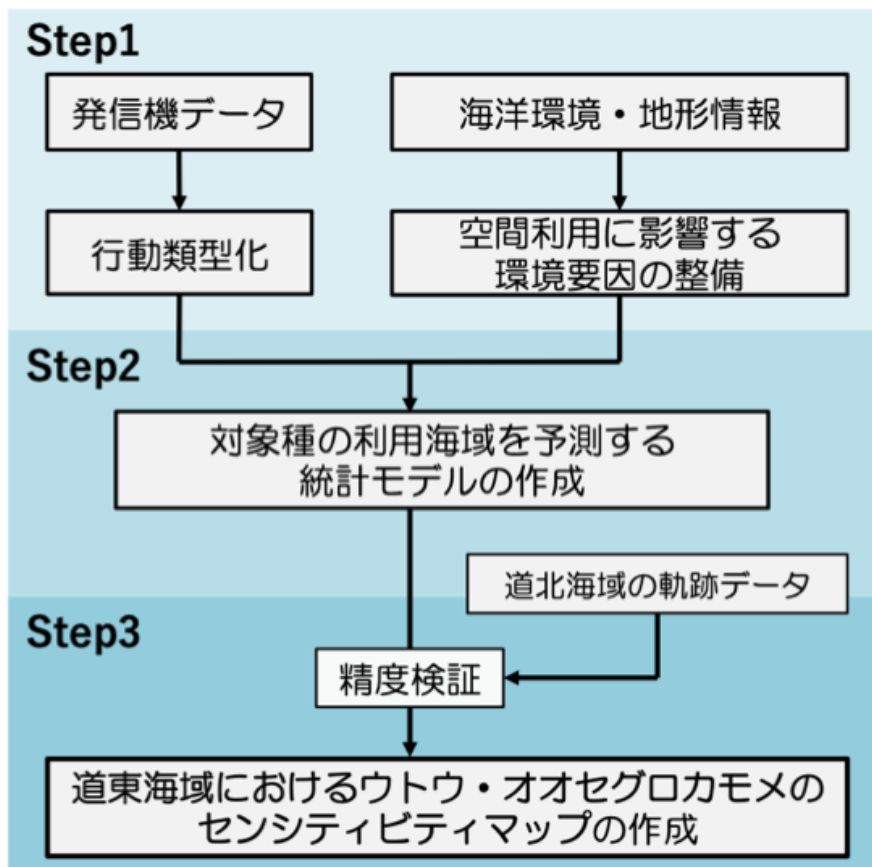


図3.1. サブテーマⅢにおけるセンシティブティマップ作成の流れ.

3-1. 個体の捕獲とGPSロガーの装着・行動追跡

① ウトウ

道東海域におけるウトウの捕獲とGPSロガーの装着は、北海道厚岸町の沖合約4kmに位置する大黒島で行なった。大黒島は面積約1 km²の無人島であり、77,734巣、46,640つがいからなるウトウの繁殖コロニーが形成される⁶⁾。道東海域では、3箇所の離島でウトウの繁殖が確認されているが、大黒島は其中でもっとも大規模な集団営巣地である。

野外調査は、2019年7月3-17日と同年7月26-29日の計2回行なった。1回目の滞在（7月3-17日）では、ウトウの捕獲ならびにGPSロガーの装着を実施した。日中に営巣地内を踏査して巣穴を観察し、ヒナが

確認された巣穴を記録した。夜間に再びそれらの巣穴を確認し、親鳥を手捕りで捕獲した。捕獲された個体は体重を計測した上で、再回収型のGPSロガーまたは自動遠隔ダウンロード式のGPSロガーのいずれかを、テサテープを用いて背中に装着された（図3.2）。再回収型のGPSロガーは、Axy-Trek（約8g, Technosmart社製, イタリア）を計18台使用した。これはバッテリー式のため、高頻度で短期集中的に個体の行動データを取得することができる。ロガーの位置情報（緯度・経度）の測位間隔は、毎分（12/18台）または毎秒（6/18台）に設定した。測位時刻は、ウトウの出巣・帰巣時刻を考慮して3:00-21:00とした。ロガーの装着から数日後に、巣穴を再訪して個体の再捕獲およびロガーの回収を試みた。一方、自動遠隔ダウンロード式のGPSロガーは、Gipsy-Remote（約12g, Technosmart社製, イタリア）を計6台使用した。このロガーは、ソーラーパネルによる自動充電が可能のため、長期間継続してデータを取得することが可能である。ロガーの位置情報（緯度・経度）および高度の測位間隔は15分とし、測位時刻は上記の再回収型ロガーと同様に設定した。記録されたデータは、基地局（Base Station, Technosmart社製, イタリア）をコロニー近傍に設置することで、ロガー装着個体が帰巣した際に自動でダウンロードできるようにした。2回目の滞在時（同年7月26-29日）には、データ受信用の基地局を回収するとともに、再度ロガーの回収を試みた（図3.2）。

なお、日本海側のウトウ営巣地（天売島・トド島）の現地調査はサブテーマⅡにより実施された。以降に記載する方法（カーネル密度の推定・統計モデルの構築・予測精度の検証）は、サブテーマⅡによって取得されたトラッキングデータも借用し、同様に適用した。また、サブテーマⅢが現地調査により取得した大黒島のトラッキングデータはサブテーマⅡに提供し、ウトウの餌場喪失リスクの予測モデル作成に用いられた。



図3.2. 大黒島でのウトウへのGPSロガー装着（写真左）とデータ回収（写真右）の様子。

② オオセグロカモメ

道東海域におけるオオセグロカモメの捕獲とGPSロガーの装着は、2018年から2020年にかけて、北海道根室市の落石漁港で行なわれた。落石漁港とその周辺では、調査期間中に300巣以上の営巣を確認しており（図3.3）、同じ道東海域に位置する釧路港周辺の営巣数が160であることを考慮すると、本調査地は道東地方でも最大規模の営巣地の一つであると考えられる。

GPSロガーを装着する個体は、繁殖期に、営巣地内にかご罾を設置することにより捕獲された。捕獲個体は体重を計測した上で、2種類の自動遠隔ダウンロード式GPSロガー（Remote GPS（12g）またはGipsy GSM（9g）、Technosmart社製、イタリア）のいずれかを、テサテープを用いて背中に装着された。ロガーの測位間隔は5分とし、緯度・経度および高度を取得した。ロガー装着個体の追跡データは、営巣地近傍に設置した基地局（Base Station, Technosmart社製、イタリア）により自動で収集し、月に一度回収した。

なお、日本海側のオオセグロカモメ営巣地（利尻島）については、サブテーマⅡにより実施された。以降に記載する方法（カーネル密度の推定・統計モデルの構築・予測精度の検証）は、サブテーマⅡに

よって取得された利尻島のトラッキングデータも借用し、同様に適用した。また、サブテーマⅢが現地調査により取得した根室落石のトラッキングデータはサブテーマⅡに提供し、オオセグロカモメの風車ブレード衝突リスクの予測モデル作成に用いられた。



図3.3. 根室市の落石漁港に形成されたオオセグロカモメの集団繁殖地。

3-2. 行動の類型化と利用密度の推定

① ウトウのMゾーン飛行場所

取得されたウトウのトラッキングデータからMゾーンを飛行したデータを抽出するため、以下に記述する2つのステップにより行動を類型化した。行動の類型化は、大黒島で取得されたGPSデータのみを用いて行なった。はじめに、GPSロガーに記録された移動速度の頻度分布を求めた。その結果を、図3.4に示す。得られた移動速度の頻度分布は明瞭な二山型を示したことから、サブテーマⅡと同様に、高速時（10-20 m/s）を飛行、低速時（0-2 m/s）を着水と判断し、その閾値を6 m/sと定義した。次に、飛行と判断されたデータのうち、Mゾーン（高度：20-140 m）に相当する高度を飛翔していたデータを抽出した（以下、Mゾーン飛行ポイント）。

続いて、上述の方法で得られたMゾーン飛行ポイントを対象に、カーネル密度推定法により位置情報から利用密度を推定した。カーネル密度推定法は、野生動物の行動圏推定に用いられる手法であり、本研究では、ウトウがMゾーンを飛行する確率の高い海域を推定するために用いた。カーネル密度は、任意の空間範囲および解像度で推定することが可能であり、本研究ではそれぞれの営巣地で取得されたトラッキングデータの最外郭を求め、その範囲内を1 kmメッシュの解像度で推定した。得られたカーネル密度推定値は、最大値を1として標準化した。以下、Mゾーン飛行ポイントを用いて推定されたカーネル密度を、Mゾーン飛行カーネル密度と呼ぶ。推定には、統計ソフトR version 3.6.3の“adehabitatHR”を用いた。

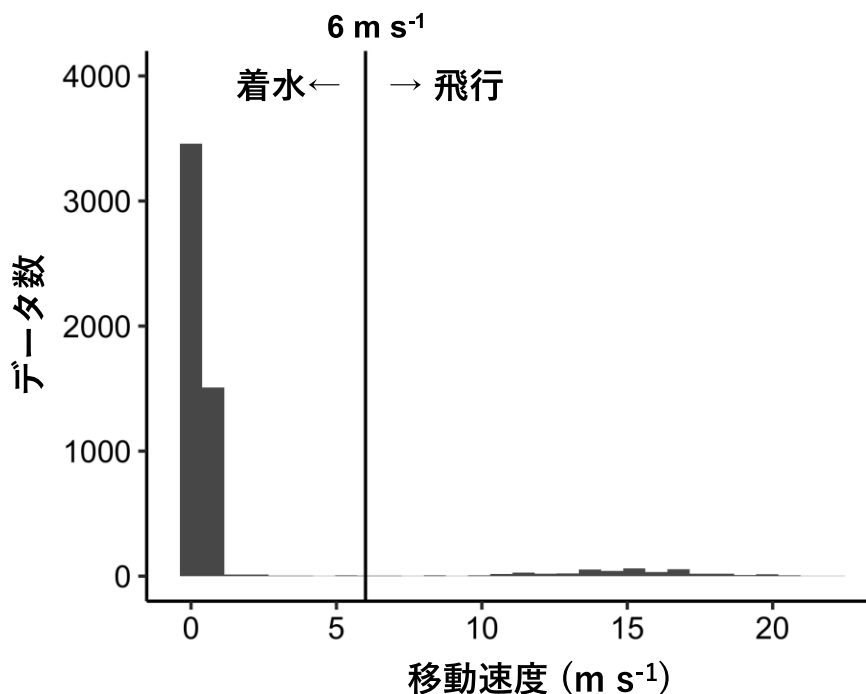


図3.4. 大黒島の個体にGPSロガーを装着して取得された移動速度の頻度分布.

② オオセグロカモメの採食場所

取得されたトラッキングデータについて、サブテーマⅡと同様に、GPSロガーに記録された移動速度の頻度分布から飛行と着水（採食）を区分した。その上で、採食と判断された低速度のポイントデータに対し、年ごとに、カーネル密度推定法を適用して利用密度を推定した。海水面温度やクロロフィルa濃度など本種の餌資源である魚類の分布を左右する海洋環境は、月間等、短い時間間隔で変化する。このため、本種の餌場選択も月単位等の時間的解像度での評価を検討する必要がある。しかし、本研究では月単位で解析を実施するにはデータが十分ではなかったため、年単位で評価することとした。カーネル密度を算出する対象エリアは、各営巣地から本種の潜在採食距離（150km）を半径とする海域とし、空間解像度は1 kmメッシュとした。以下、採食ポイントを用いて推定されたカーネル密度を、採食カーネル密度と表記する。推定には、統計ソフトR version 3.6.3の“adehabitatHR”を用いた。

3-3. 利用空間を予測する統計モデルの構築と予測精度の検証

① ウトウのMゾーン飛行場所予測モデル

モデルの構築

ウトウは海上では低空を飛行するが、営巣地が崖の上などある程度標高の高い場所にある場合、特に出巣時や帰巣時には、営巣地の周辺海域でMゾーンを飛行するリスクが高まると予測された。また、海岸付近では、海岸崖などの地形的な要因により上昇気流が生じやすいため、海岸近くを飛行する際もMゾーンに達するリスクが高いと予想される。そこで、ウトウのMゾーン飛行確率が高い海域を予測するため、目的変数を各メッシュ（1 km×1 km）のMゾーン飛行カーネル密度、説明変数を営巣地からの距離（m）、海岸からの距離（m）としたモデルを、一般化加法モデル（GAM）により構築した。得られたフルモデルをもとに赤池情報量規準（AIC）を用いた総当たり法によりモデル選択を行い、AICの最も低いモデルをベストモデルとした。なお、解析に用いた2つの説明変数間に強い相関関係は認められなかった（ $r < |0.7|$ ）。モデルの構築およびモデル選択には、統計ソフトR version 3.6.3の“mgcv”および“MuMIn”を用いた。

予測精度の検証

上記で構築されたベストモデルの妥当性を評価するため、交差検証法により予測精度を調べた。それぞれの営巣地で取得されたトラッキングデータは、いずれも全取得データに占めるMゾーン飛行ポイント数が少なかったため、カーネル密度の推定値は0付近に偏った分布となった。このようなデータ特性を持つ場合、モデルの妥当性評価の手法として交差検証法 (*k*-fold法) が有効となる。まず、ベストモデルの構築に使用したデータセットを、7:3の比率でランダムに学習用データと検証用データに分割した。その後、学習用データを、さらにランダムに10個に分割し、そのうちの1個をテストデータ、残り9個を学習データとしてモデルを構築した。9個の学習データで作成されたモデルの予測精度を、除いておいた1個のテストデータで検証し、この作業を分割したデータセット分繰り返すことで予測精度の平均を得た(本研究では10回)。予測精度を踏まえた上で、学習用データで作成したモデルに、検証用データの説明変数を代入し、Mゾーン飛行カーネル密度の予測値を得た。この予測値と、検証用データのカーネル密度の値との相関係数(ピアソンの相関係数)を算出し、モデルの妥当性を評価した。上記のモデルの妥当性検証は、統計ソフトR version 3.6.3の“caret”を用いて行った。

また、各営巣地で構築されたモデルの汎用性を評価するため、それぞれ異なる海域へモデルを外挿し、予測精度の検証を行なった。精度検証は、3つの営巣地間で総当たり方式により行なった。例えば、大黒島で作成されたモデルについては、天売島またはトド島の営巣地から半径164km(ウトウの潜在採食距離)の範囲で抽出した物理環境データ(説明変数)をそれぞれ代入し、カーネル密度の予測値を得た。この予測値と、各外挿先(天売島・トド島)で算出されたカーネル密度の実測値との相関係数(ピアソンの相関係数)を求めることで、予測精度の指標とした。天売島およびトド島で作成されたモデルも同様の手順で予測精度を検証した。なお、物理環境データは、1 kmメッシュの空間解像度で抽出した。

② オオセグロカモメの採食場所予測モデル

モデルの構築

オオセグロカモメにとって潜在的に最適な採食場所を予測するため、目的変数を各メッシュの採食カーネル密度とし、説明変数を海水温度(°C)、クロロフィルa濃度(mg/m³)、水深(m)、営巣地からの距離(m)、海岸および漁港からの距離(m)としたフルモデルを、一般化加法モデル(GAM)を用いて構築した。事前解析の結果、環境選択性について個体間の違いは顕著でなかったため、過剰適合を防ぐため、本研究では個体差に関する変数は用いなかった。得られたフルモデルをもとに赤池情報量規準(AIC)を用いた総当たり法によりモデル選択を行い、AICが最も低いモデルをベストモデルとした。オオセグロカモメの解析では複数年のデータがあることから、それぞれの年ごとに解析を行なった。海水温度とクロロフィルa濃度のデータは、Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center, <https://podaac.jpl.nasa.gov/>) から得た。また、水深データは、日本海洋データセンター(海上保安庁情報部, http://www.jodc.go.jp/jodcweb/JDOSS/infoJEGG_j.html) から取得した。ただし、海水温度とクロロフィルa濃度については、海霧により日毎の分布変化を衛星データからとらえることはできなかったため、GPS追跡が実施された期間である7-8月の月別平均値を求め、解析に用いた。なお、漁港および海岸からの距離は、それぞれ水深と営巣地からの距離と強い相関関係を示したことから($r > |0.7|$)、多重共線性を考慮して解析から除外した。モデルの構築およびモデル選択には、統計ソフトR version 3.6.3の“mgcv”と“MuMIn”を用いた。

尚、分布推定モデルを用いる場合、得られる結果は空間解像度によっても変化する。このため、対象種にとって適した空間解像度が未知の場合、複数の空間解像度を用いて検討することが望ましい。本研究では、事前解析として250m、1km、そして4kmの解像度にて同様にモデルを構築したところ、最も4km解像度が適していたため、すべての解析は4km解像度で実施した。

予測精度の検証

得られたベストモデルの妥当性を評価するため、ウトウと同様の手法で予測精度を検証した。ベストモデルの構築に使用したデータセットを、7:3の比率でランダムに学習データとテストデータに分割した後、学習データを用いてモデルを構築した。続いて、構築されたモデルをテストデータの説明変数に当てはめ、カーネル密度の予測値を得るとともに、モデルによる説明力の指標として決定係数を算出した。これらのモデルの妥当性検証は、統計ソフトR version 3.6.3の“caret”を用いて行われた。

また、モデルの汎用性を評価するため、異なる海域への外挿ならびに予測精度の検証を行なった。道東海域の営巣地で作成したモデルの外挿先は、日本海側の利尻島とした。利尻島のオオセグロカモメ営巣地では、サブテーマⅡによってGPS追跡が行われており、実際のトラッキングデータからカーネル密度を推定し、モデルによって予測されたカーネル密度との整合性を確かめることができる。外挿精度の検証手順は、ウトウのモデルと同様に行い、決定係数を指標にモデルの予測精度を評価した。

4. 結果及び考察

4-1. ウトウのMゾーン飛行場所

① Mゾーン飛行ポイントの出現海域

サブテーマⅢが現地調査を行なった大黒島では、調査期間中に計24羽のウトウを捕獲し、18羽にAxy-Trekを、6羽にGipsy-Remoteを装着した。Axy-Trekを装着した18羽のうち6羽を、装着日から2-6日後に再捕獲し、ロガーを回収した（回収率33%）。Gipsy-Remoteでは、装着したすべての個体（6羽）から移動軌跡データを取得することに成功した。Gipsy-Remoteによるデータの取得期間は個体によって7-20日間と異なったが、総数81回、平均13.5回の採餌トリップ（営巣地を出てから戻るまでの一連の行動）を記録した。天売島では2018年と2019年に取得された計20個体分のデータを、トド島では同年に取得された計5個体分のデータをサブテーマⅡから借用し、解析に用いた。なお、大黒島と、日本海側の2つの営巣地ではデータの取得されている年数が異なるが、モデル解析で使用した環境要因は年によって変動しないため、2年分のデータを合わせて解析することとした。

大黒島の個体は、その多くが営巣地から40km圏内の陸棚上を集中的に利用していた。また、取得された全GPSデータに占めるMゾーン飛行ポイントの割合は2.0%であり、その大部分が営巣地周辺の海域に集中していた（図3.5）。天売島の個体は営巣地南側の沿岸域を集中的に利用しており、Mゾーン飛行ポイントもこれらの海域に集中していた。一方、トド島の個体のMゾーン飛行ポイントは、営巣地周辺だけでなく、島から離れた沖合（サハリン海峡）にも分布していた（図3.5）。

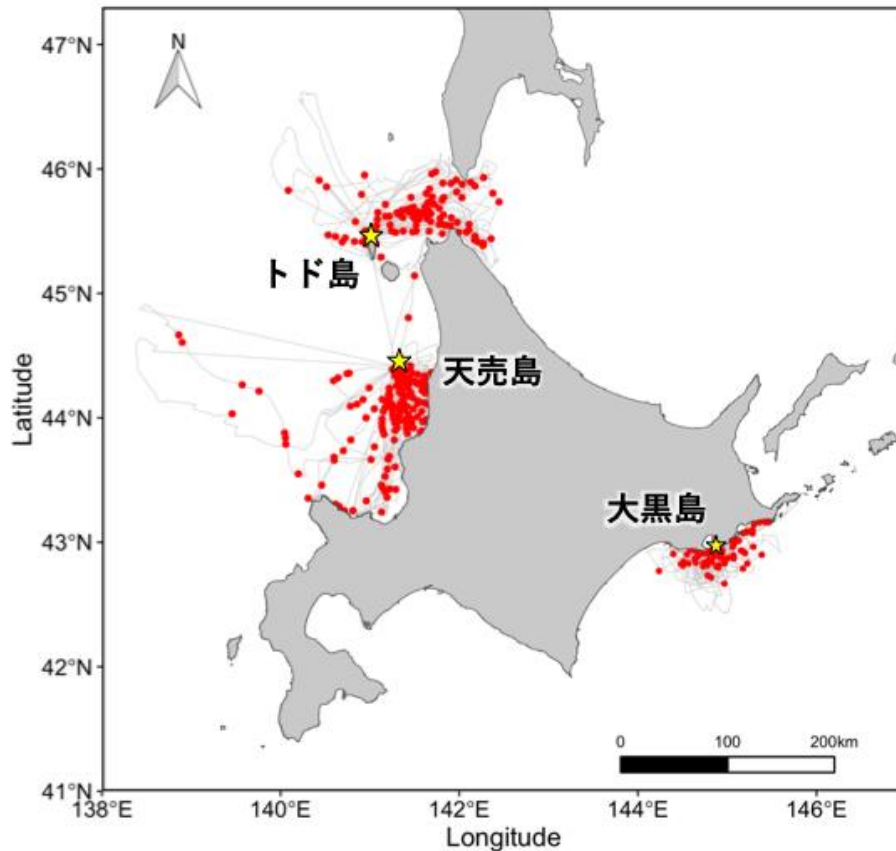


図3.5. 北海道周辺海域におけるウトウのMゾーン飛行場所.

図中の赤丸はMゾーンを飛行したポイントを表す。各営巣地を黄色の星印で示した。

② Mゾーン飛行に関する要因とモデルの予測精度

GAMによる解析の結果、大黒島のウトウのMゾーン飛行確率は、営巣地に近い海域ほど高い傾向があった（図3.6）。交差検証によって得られたモデルの予測精度（相関係数）は、0.97であった（表3.1）。また、日本海側の天売島とトド島への外挿による予測精度（相関係数）は、それぞれ0.62と0.31だった（表3.1）。天売島も、大黒島と同様の傾向を示し、営巣地に近い海域ほどMゾーン飛行確率が高かった（図3.6）。天売島で作成したモデルの予測精度は0.79、他の海域への外挿による予測精度は0.82（大黒島）と0.59（トド島）であった（表3.1）。一方、トド島では、営巣地周辺に加えて、島から約50km沖合の海域でもMゾーン飛行確率が高くなる傾向がみられた（図3.6）。モデルの予測精度は0.63であり、外挿による予測精度は0.44（大黒島）および0.57（天売島）となり、他の営巣地で作成されたモデルに比べて低かった（表3.1）。

このように、モデルの外挿による予測精度は、営巣地間で大きく異なった。その理由として、営巣地によってウトウの利用海域が異なることが挙げられる。道東海域の大黒島では、ほとんどの個体が島の周辺を集中的に利用するのに対し、日本海側の天売島における採餌トリップは、島から100km以上離れた海域にも到達しており、その行動圏は3つの営巣地の中で最も広い。また、トド島の個体は、島の東側の沖合（サハリン海峡）を頻繁に利用しており、他の2つの営巣地とは行動パターンが異なる。これらのことは、採餌のために訪れる海域や食べている餌組成、あるいは営巣地と主たる餌場の位置関係が地域によって違うことに起因するものと考えられた。同じ日本海側に位置する天売島とトド島の間であっても、外挿による予測精度は低い場合もあることから（表3.1）、現時点では未調査の海域を含む北海道全域を対象としたモデルの外挿は行わず、各営巣地で取得したデータでモデルを作成し、それらの予測結果から得たマップを統合することで提示するのが望ましいと判断した。

今後、本研究では調査対象としていない地域でもデータを取得していくことで、営巣地ごとの特徴を

踏まえた、より汎用性の高いモデルの構築が可能になるかもしれない。また、サブテーマⅡの研究成果により、サンプリング個体数が10個体未満になると、得られるトラッキングデータの最外郭面積が縮小し、モデルによる予測精度も低下することが明らかにされている（サブテーマⅡ：図2.10）。本研究では、トド島の追跡個体数が5個体であることから、解析の信頼性を高める上でも、今後さらに調査を重ね、サンプリング個体数を追加した場合のモデル予測精度について検討する必要があるだろう。

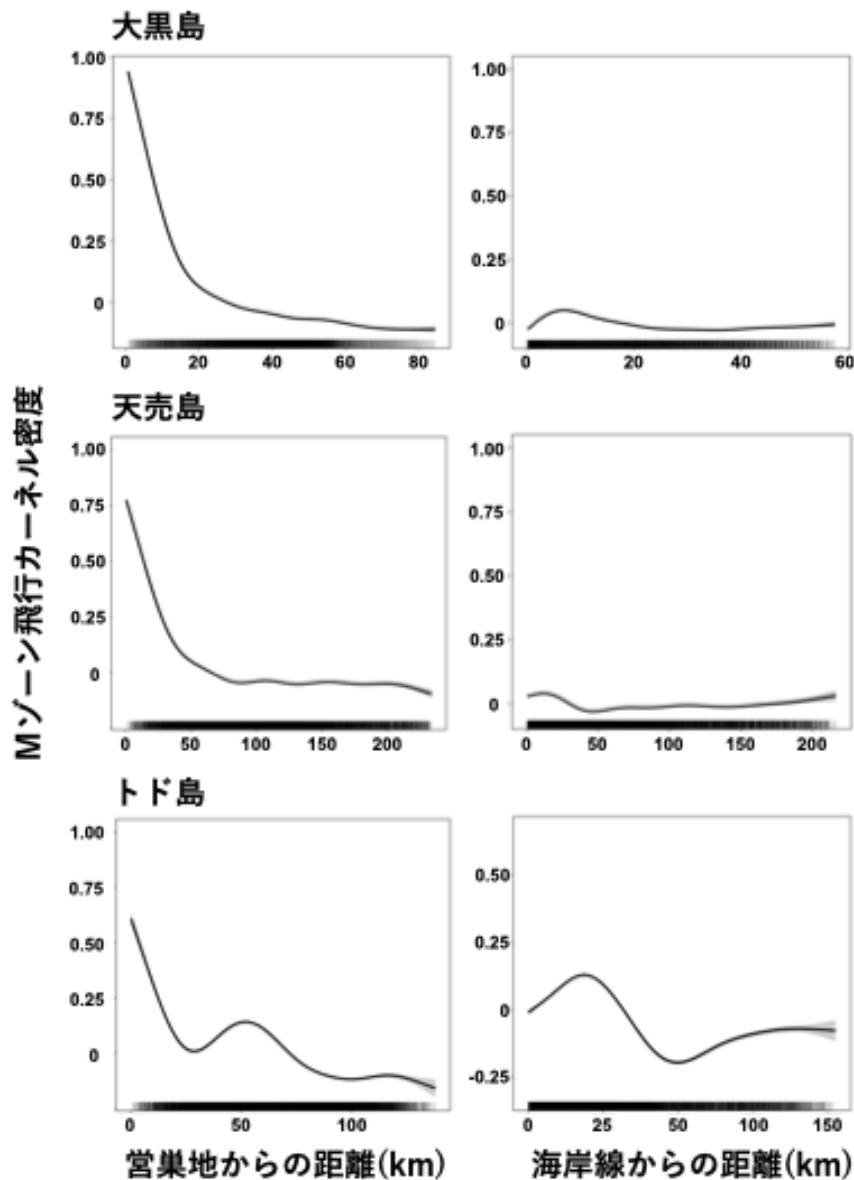


図3.6. GAMによって得られた各説明変数の応答曲線.

表3.1. モデルの外挿による予測精度の検証.

数値は全て予測値と実測値の相関係数（ピアソンの相関係数）で示した。対角線にある同じ島の組み合わせは、学習・テストデータによる予測精度の検証結果を、異なる島の組み合わせは外挿による予測精度の検証結果を、それぞれ表す。

モデル作成	外挿先		
	大黒島	天売島	トド島
大黒島	0.97	0.62	0.31
天売島	0.82	0.79	0.59
トド島	0.44	0.57	0.63

4-2. オオセグロカモメの好適な採食場所

① 採食場所の分布

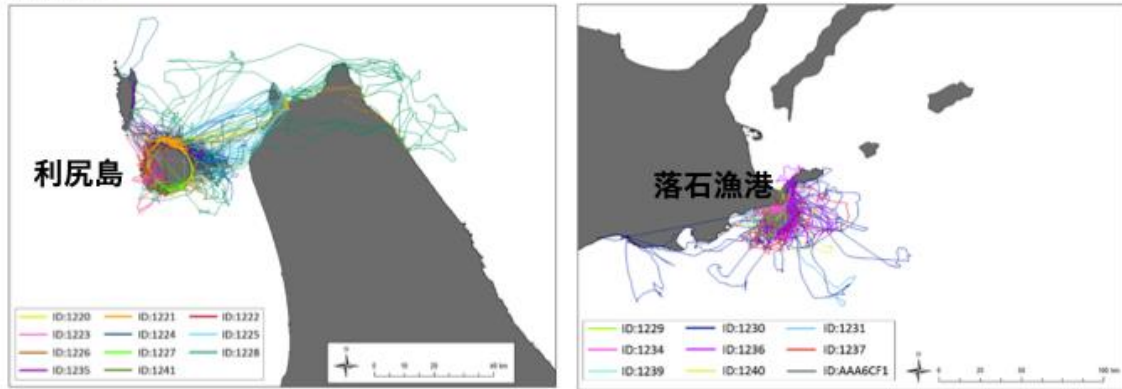
根室落石地域と利尻島の営巣地でそれぞれ取得されたオオセグロカモメの移動軌跡を図7に示す。現地調査を行なった落石漁港では、6月下旬から8月下旬にかけてデータを取得することに成功し、いずれの個体も営巣地の周囲30 km圏内の陸棚上を集中的に利用していた（図3.7）。一方で、利尻島の個体は、島の周辺に加えて、営巣地から50km以上離れた宗谷岬の東部沿岸域まで到達した個体もみられた（図3.7）。

② 採食場所の選択に関する要因とモデルの予測精度

GAMによる解析の結果、オオセグロカモメの採食場所選択は、年や地域で関係する要因が異なっていたものの、営巣地からの距離や海岸線からの距離は共通して重要であり（表3.2）、営巣地や海岸線に近いほど採食場所として利用する確率は高い傾向があった。根室落石では、海水面温度やクロロフィルa濃度といった、餌となる魚の分布を規定する海洋環境も関係していたが、利尻島では、その関係性は弱かった。

続いて、それぞれの地域・年で作成されたベストモデルについて、その予測精度を検証した結果、根室落石では、それぞれ43.5（2018年）および34.1（2019年）であったのに対し、利尻島では、18.3（2018年）および13.3（2019年）と両年とも極めて低かった（数値は決定係数）。また、他海域へのモデルの外挿によって得られた決定係数も、34.1であったことから、現時点ではウトウと同様、それぞれの営巣地で作成されたモデルによりセンシティブティマップを作成することが望ましいと判断した。

2018年



2019年

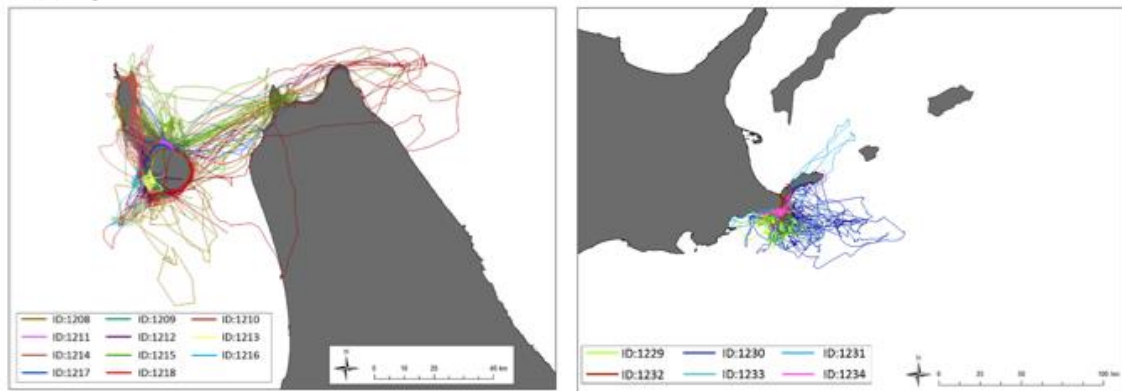


図3.7. オオセグロカモメの移動軌跡。

軌跡の色の違いは個体を表す。利尻島の移動軌跡データは、サブテーマⅡによって取得されたものを解析のために借用した。

表3.2. オオセグロカモメの餌場喪失リスク予測モデル。

5つの環境要因からなるフルモデルについて、赤池情報量規準（AIC）を指標としたモデル選択の結果を示す（上位5モデル）。

営巣地	年	モデル	海岸線からの距離	営巣地からの距離	水深	海水面温度	クロロフィルa濃度	ΔAIC
根室落石	2018年	1		+	+	+	+	0
		2	+	+	+	+	+	2.11
		3	+	+		+	+	2.97
		4		+		+	+	4.57
		5	+	+		+	+	7.19
	2019年	1	+	+	+		+	0
		2	+	+	+	+	+	1.06
		3		+	+	+	+	1.99
		4		+	+	+	+	2.01
		5	+	+		+	+	2.14
利尻島	2018年	1	+	+			+	0
		2	+	+				1.84
		3	+	+		+	+	2.01
		4	+	+	+		+	2.59
		5	+	+		+		2.14
	2019年	1	+	+				0
		2	+	+		+		1.06
		3	+	+	+			1.99
		4	+	+			+	2.01
		5		+	+	+		2.14

4-3. センシティブリティマップの作成

① ウトウの風車ブレード衝突リスク

予測値のスコア化とMゾーン飛翔率による補正

外挿による予測精度の検証結果を踏まえ、ベストモデルを用いて、物理環境データから各メッシュ（1 km×1 km）のMゾーン飛行カーネル密度を推定した。このとき、マップを作成する範囲は、調査を実施した各営巣地からウトウの潜在採食距離（164km）を半径とする海域とした。推定された各メッシュのカーネル密度予測値は、Jenksの自然分類法により6段階に区分し、1-6にスコア化した上で、マップとして可視化した。本研究では、スコアの高い海域ほどMゾーンを飛行する確率が高く、したがって、風車ブレードへの衝突リスクが懸念される場所と定義した。

また、サブテーマⅡおよびⅢでは、GPS追跡を実施したすべての種および営巣地を対象に、ロガーで取得された全ポイントデータに占める、Mゾーンを飛翔したデータの割合（以下、Mゾーン飛翔率）を算出した。その結果、Mゾーン飛翔率は種および営巣地によって1%-11%と大きく異なることがわかった（サブテーマⅡ：図2.9）。そこで、衝突リスクのセンシティブリティマップを作成するにあたり、種間や海域間で比較する必要性が生じる可能性を考慮し、Mゾーン飛翔率が最大のウミネコ（利尻島）の値を1として、各種・営巣地の相対値を求めた。最終的に、ウトウの衝突リスクの予測マップについては、1-6の各スコアに、Mゾーン飛翔率の相対値を乗じて作成した。

道東海域におけるセンシティブリティマップ

上記の手順で作成された道東海域の予測結果を図3.8に示す。モデルによって得られた予測値を、Jenksの自然分類でスコア化したマップでは、営巣地に近いほどセンシティブリティが高く（図3.8A）、また、海岸部と一部沖合でも中程度のセンシティブリティを示した。このマップに対し、Mゾーン飛翔率の相対値を用いてスコアを補正した場合、営巣地の直近でのみセンシティブリティが高いことが明らかとなった（図3.8B）。繁殖期のウトウは、1日に1回の頻度で営巣地と餌場を往復するため、島からの出入りの際に通過する海域では特に衝突リスクが高くなると考えられる。

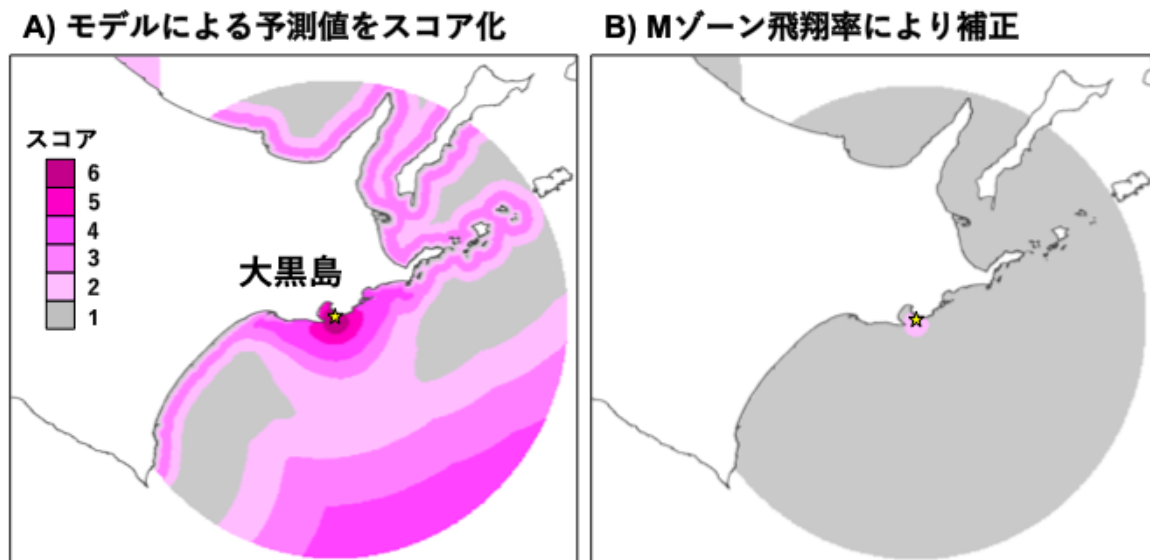


図3.8. 道東海域の営巣地（大黒島）を中心としたウトウの衝突リスクセンシティブリティマップ。図中の星印は大黒島の位置を表す。(A)は、大黒島で作成されたモデルに環境要因を代入し、予測値を得た上で、Jenksの自然分類で6段階のスコアに区分した結果を表す。(B)は、Mゾーン飛翔率が最も高かったウミネコを1とした時のウトウの相対値を求め、それを(A)のスコアに乗じて作成した。マップの空間解像度はいずれも1 km×1 kmである。

② オオセグロカモメの餌場喪失リスク

予測値のスコア化

予測精度の検証結果を踏まえ、得られたベストモデルを用いて、各営巣地（落石漁港・利尻島）からオオセグロカモメの潜在採餌距離（150km）を半径とする範囲を対象に、物理環境データを用いて各メッシュ（1 km×1 km）のカーネル密度を推定した。なお、モデル解析は4 km×4 kmの空間解像度で実施したが、センシティブリティマップを作成する際には、これを1 kmにダウンスケーリングして提示する。推定された各メッシュのカーネル密度推定値は、Jenksの自然分類法により6段階に区分し、1-6のスコアとした上でマップとして可視化した。2018年と2019年のそれぞれについてマップを作成した後、2年分の結果を平均することで一つのマップに集約した。得られたスコアの高い海域ほど、オオセグロカモメにとって好適な採食場所である可能性が高い、すなわち餌場の喪失リスクが高い場所と判断された。

道東海域におけるセンシティブリティマップ

上述した予測値のスコア化により得られた道東海域のオオセグロカモメにおける餌場喪失リスクセンシティブリティマップを図3.9に示す。スコアの高い海域は、営巣地の周辺に加えて、約40km沖合の海域にも分布していた。GAMによる解析の結果、根室落石の個体の採食場所選択は、営巣地からの近さだけでなく、植物プランクトン量を指標するクロロフィルa濃度や海面温度といった海洋環境要因にも影響を受けることが示唆された。道東の沿岸海域では、栄養塩に富む沿岸親潮や陸水の流入によってプランクトンが発生し、豊かな漁場を形成することから⁷⁾、オオセグロカモメにとって好適な採食場所となっているのかもしれない。一方で本種の高リスク海域は、沖合にも存在していた。大陸棚が広がる沿岸と比べ、沖合の生産力は主に暖水塊によって維持される。暖水塊は、非規則的に発生するため、比較的短い時間解像度でも変化し得る。このため、本研究が実施された期間のデータのみから普遍的な餌場を特定することは困難である可能性がある。このため、沖合におけるリスク評価には長期間のモニタリングが欠かせないだろう。

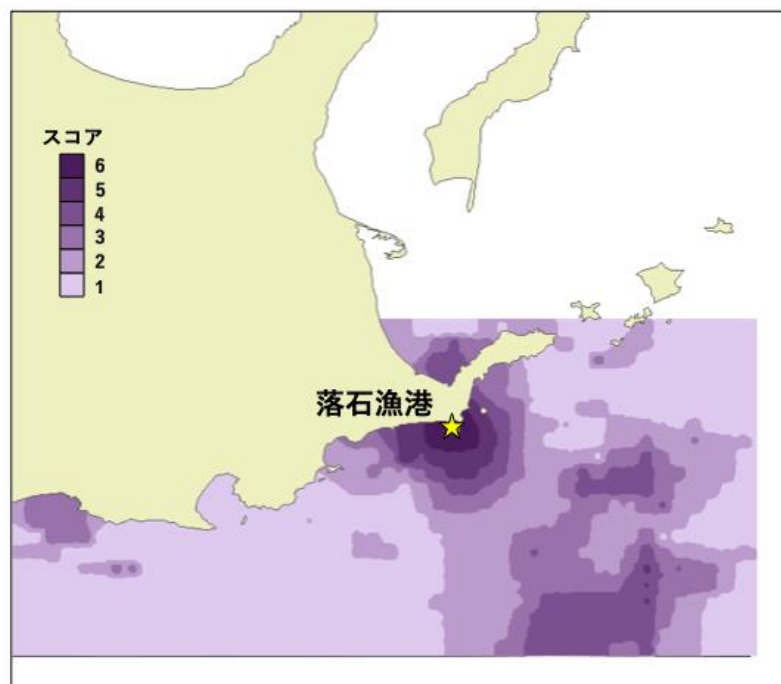


図3.9. 道東海域の営巣地（落石漁港）を中心としたオオセグロカモメの回避リスクセンシティブリティマップ。

図中の星印は営巣地の位置を示す。図は、落石漁港で作成されたモデルに環境要因を代入し、予測値を得た上で、Jenksの自然分類で6段階のスコアに区分した結果を表す。

4-4. センシティブリティマップの活用に向けて

現在、国内の海域における鳥類のセンシティブリティマップとしては、環境省によって環境アセスメントデータベース（EADAS）が公開されている⁸⁾。本研究で対象とした道東海域は、EADASでも海鳥生息密度が高く、洋上風力発電施設の建設に対する注意喚起レベルの高い海域と位置付けられている。今後、国内各地で急速に洋上風力発電事業が立ち上がっていくと予想され、道東海域もその対象になる可能性は十分に考えられる。本研究が提供する成果は、GPSロガーによる詳細な3次元行動追跡の結果に基づき、広域かつ高解像度（1 kmメッシュ）にウトウとオオセグロカモメの利用海域を予測したものである。サブテーマⅡによって得られた成果と統合することにより、複数種の海鳥について衝突リスク・餌場喪失リスクを提示し、環境影響評価において効率的な立地選定の実現に貢献できるだろう。例えば今後、EADASへの実装が可能になれば、洋上風力発電事業に対し、環境省の海域版鳥類センシティブリティマップ（解像度は10 km）で注意喚起を促した後、より細かい空間スケールでの立地選定に、本課題の成果を用いて高リスク海域を回避することが可能になると期待される。

洋上風力発電が今後も急速に普及することを考慮すると、海鳥におけるセンシティブリティマップは、多くの地域および種を対象に作成していくことが急務となる。しかし、得られるデータは多様であるため必ずしも本研究で実施した方法が適切ではないかもしれない。本研究のように分布推定モデルを活用したセンシティブリティマップを作成する場合、データの質や量、精度によって用いる統計手法や時空間的解像度も多様化する。どのようなデータの際にはどのような手法を用いた評価が適切かについての区別が今後求められてくるだろう。

5. 研究目標の達成状況

道東海域の2つの地域において、ウトウ、オオセグロカモメの2種を対象に、計33個体にGPSロガーを装着して複数年にわたる繁殖期の移動軌跡データを明らかにすることに成功した。これらのデータを用いて、それぞれの種・地域で環境要因から利用海域を説明・予測する空間利用モデルを作成し、その予測精度についても検討した。この点において、センシティブリティマップの作成に必要な過程を、目標通り達成できたと言える。また、作成した空間利用モデルの汎用性についても評価を試み、サブテーマⅡと協力することで、北海道内の主要な営巣地間でモデルの外挿による予測精度の検証も行なった。他の地域へ外挿した際のモデルの予測精度は常に高いわけではなかったが、その原因となっている課題を整理・考察することができた。さらに、外挿による予測精度の検証結果を踏まえ、作成した空間利用モデルを使って得られた予測値をスコア化し、種によって異なる特徴（風車ブレードの高さを飛行する時間割合）も考慮した上で、マップとして可視化する手順も示した。最終的に、1 kmの高解像度で、対象とする2種の道東海域における洋上風力発電センシティブリティマップを作成し、その活用方法についても考察した。以上のことから、本課題は目標通りの成果をあげた。

6. 引用文献

- 1) 環境省（2011）平成22年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書。環境省、東京
- 2) Osa Y, Watanuki Y (2002) Status of seabirds breeding in Hokkaido. J Yamashina Inst Ornithol 33: 107-141
- 3) Dierschke V, Furness RW, Garthe S (2016) Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. Biol Conserv 202: 59-68
- 4) Green RE, Langston RHW, McCluskie A, Sutherland R, Wilson JD (2016) Lack of sound science in assessing wind farm impacts on seabirds. J Appl Ecol 53: 1635-1641
- 5) Kelsey EC, Felis JJ, Czapanskiy M, Pereksta DM, Adams J (2018) Collision and displacement vulnerability to offshore wind energy infrastructure among marine birds of the Pacific Outer Continental Shelf. J Environ Manage 227: 229-247
- 6) 大門純平・伊藤元裕・綿貫 豊（2019）北海道大黒島における海鳥の現状. 山階鳥学誌 51: 95-104
- 7) Sakurai Y (2007) An overview of the Oyashio ecosystem. Deep Sea Res Part II 54: 2526-2542

- 8) 環境省（2020）風力発電における鳥類のセンシティブティマップ（海域版） .
<https://www2.env.go.jp/eiadb/ebidbs/> （最終確認日：2021年7月5日）

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 誌上発表

<査読付き論文>

【サブテーマ1】

- 1) 関島恒夫、森口紗千子、向井喜果、佐藤一海、鎌田泰斗、佐藤雄大、望月翔太、尾崎清明、仲村昇：保全生態学研究、(2021)、飛行高度を考慮した大型水禽類オオヒシクイの越冬地と渡りにおける陸上風力発電センシティブティマップ (印刷中)
- 2) 鎌田泰斗、富田健斗、伊藤玲駆、平田和彦、関島恒夫：千葉県立中央博物館研究報告、15, 2, 77-80 (2021)、千葉県東京湾奥部におけるクロアジサシ *Anous stolidus* の記録
- 3) Moriguchi S, Mukai H, Komachi R, Sekijima T: Wind Energy and Wildlife Impacts, 125-133 (2019), Wind Farm Effects on Migratory Flight of Swans and Foraging Distribution at Their Stopover Site.
- 4) 関島 恒夫、浦達也、赤坂卓美、風間健太郎、河口洋一、綿貫豊：保全生態学研究、(under review)、風力発電施設に対する影響を未然に防ぐセンシティブティマップとその活用方法
- 5) Kamata T, Sato H, Mukai H, Sato T, Shintaro Y, Sekijima T: Journal of Applied Ecology, (under revision), Sensitivity analysis for reduction of bird collision risk at wind turbines based on flight altitude on spring migration routes of Geese and Swans.

【サブテーマ2】

- 1) 風間健太郎、綿貫豊：保全生態学研究、(2021)、洋上風力発電の海鳥への影響を軽減するためのセンシティブティマップ作成手法とその課題 (印刷中)
- 2) Ma R, Kazama K, Yasutake YC, Kazama MT, Tsukamoto S, Watanuki Y: Journal of Avian Biology, (submitted), Dynamic body movement informs at-sea foraging behavior of black-tailed gulls (*Larus crassirostris*).
- 3) Okado J, Watanuki Y: Marine Ornithology (under revision), Flight altitude of Rhinoceros Auklets rearing chicks measured by GPS logger.

【サブテーマ3】

- 1) 佐藤夕夏、赤坂卓美、藪原佑樹、風間健太郎、河口洋一：保全生態学研究、25, 2 (2020)、北海道根室落石で繁殖するオオセグロカモメを対象とした洋上風力発電センシティブティマップ
- 2) Sato T, Yabuhara Y, Okado J, Watanuki Y, Yamauchi A, Kawaguchi Y: Zool, Sci (under revision), At-sea habitat use of rhinoceros auklets breeding in the shelf region of eastern Hokkaido.

<査読付論文に準ずる成果発表>

【サブテーマ1】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

【サブテーマ1】

- 1) 山本麻希：日本バイオリギング研究会会報、145, 2-3 (2018) 伊豆諸島利島
- 2) 清水澄玲：日本バイオリギング研究会会報、157, p. 2, (2019) 「新潟県北部地域におけるウミネコのGPS調査」
- 3) 関島恒夫：日本バイオリギング研究会会報、169, 2-3 (2020) 「農学部風力発電施設に対する鳥衝突リスクを低減するために」

【サブテーマ2】

- 1) 風間健太郎：日本鳥学会2018年度大会自由集会報告、海鳥に対する洋上風力発電の影響評価：課題と展望

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表（学会等）

【サブテーマ1】

- 1) 関島恒夫、河口洋一、風間健太郎、綿貫豊：日本鳥学会2018年度大会（2018）「海鳥に対する洋上風力発電の影響評価：課題と展望」
- 2) 風間健太郎：日本鳥学会2018年度大会（2018）「洋上風力発電が海鳥に与える影響とその評価海外の事例から」
- 3) 河口洋一：日本鳥学会2018年度大会（2018）「海鳥に対する洋上風力発電影響評価：課題と展望、繁殖海鳥の洋上風力発電センシティブティマップ作成の試み」
- 4) 佐藤一海、向井喜果、鎌田泰斗、森口紗千子、関島恒夫：日本鳥学会2018年度大会（2018）「風車への衝突リスク低減を目指したオオヒシクイの三次元的センシティブティマップの提案」（ポスター）
- 5) 鎌田泰斗、向井喜果、望月翔太、佐藤一海、佐藤雄大、関島恒夫：日本鳥学会2019年度大会（2019）「採餌モデルによるコアジサシの利用海域推定とセンシティブティマップへの展開」（ポスター）
- 6) 佐藤一海、向井喜果、鎌田泰斗、佐藤雄大、山田親太郎、関島恒夫：日本鳥学会2019年度大会（2019）「飛行特性を反映させた大型水禽類4種のセンシティブティマップ」（ポスター）
- 7) 鎌田泰斗、向井喜果、望月翔太、佐藤一海、佐藤雄大、関島恒夫：第67回日本生態学会（2020）「洋上風車への鳥衝突を防ぐためのコアジサシのセンシティブティマップ」（ポスター）
- 8) 佐藤一海、向井喜果、鎌田泰斗、佐藤雄大、山田新太郎、関島恒夫：第67回日本生態学会（2020）「風車への衝突リスク低減を目指したガン・ハクチョウ類のセンシティブティマップ」（ポスター）
- 9) 鎌田泰斗、富田健斗、早坂圭司、鳥井賢一、向井喜果、佐藤雄大、白井正樹、平田和彦、山本麻希、関島恒夫：バイオリギングシンポジウムワークショップ(2020)「洋上風力発電施設による影響の低減を目指したオオミズナギドリのセンシティブティマップ」
- 10) 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：日本鳥学会2020年度大会（オンライン）(2021)「風車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」（ポスター）
- 11) 清水澄玲、白井正樹、山本麻希、関島恒夫：バイオリギングシンポジウムワークショップ（2020）「新潟県北部地域で繁殖するウミネコの行動追跡」
- 12) 清水澄玲、白井正樹、山本麻希、関島恒夫：海鳥研究集会（2021）「行動経路から見る、日本海のウミネコの1年」

【サブテーマ2】

- 1) 大門純平、庄子晶子、伊藤元裕、綿貫豊：日本鳥学会2019年度大会（2019）「北海道天売島で繁殖するウトウの採餌場所」
- 2) 綿貫豊、関島恒夫、河口洋一：バイオロギングシンポジウムワークショップ(2020)「GPS追跡による海鳥に対する洋上風発リスクマッピング」
- 3) Kumagai A, Kazama K, Mikami K, Watanuki Y.: Waterbird Society 44th Annual Meeting (Oral Virtual), 5 Dec 2020 “Effects of wind speed and direction on Black-tailed Gull flight height. “
- 4) Mikami K, Kazama K, Kazama MT, Watanuki Y. : PSG Annual Meeting (Poster Virtual) 2021 Feb “Spatial model to predict windmill collision risk for two gull species.”
- 5) Ma R, Kazama K, Watanuki Y.: PSG Annual Meeting (Poster Virtual) 2021 Feb “Foraging of Black-tailed Gulls determined by GPS position and body acceleration.”
- 6) Okado J, Kazama K, Shoji A, Ito M, Watanuki Y.: PSG Annual Meeting (Oral Virtual) 2021 Feb “Foraging, diet and breeding of Rhinoceros Auklets at two colonies in the different current system.”
- 7) Watanuki Y, Mikami K, Kazama K, Kazama MT, Ma R.: JpGU 2021 Meeting Virtual Poster 6 June 2021 “Fine scale sensitivity map of seabirds for offshore wind farm.”

【サブテーマ3】

- 1) 佐藤雄大、藪原佑樹、佐藤夕夏、赤坂卓美、風間健太郎、山内彬弘、大門純平、綿貫 豊、河口洋一：バイオロギングシンポジウムワークショップ（2020）「GPS追跡による海鳥に対する洋上風発リスクマッピング北海道道東部で繁殖するウトウおよびオオセグロカモメの育雛期におけるハビタット利用」
- 2) 佐藤夕夏、赤坂卓美、藪原佑樹、風間健太郎、河口洋一：応用生態工学会2020年度Web研究発表会（2020）「北海道で繁殖するオオセグロカモメを対象とした洋上風力発電センシティブティマップ」
- 3) 佐藤雄大、藪原佑樹、大門純平、綿貫 豊、山内彬弘、河口洋一：第68回日本生態学会（2021）「北海道大黒島で繁殖するウトウの利用海域選択」

(3) 「国民との科学・技術対話」の実施

【サブテーマ1・2・3】

- 1) 一般公開シンポジウム「風車と鳥を考える～風力発電と鳥の共存を目指して～」
（主催：新潟大学、2019年6月23日、新潟大学駅南キャンパス「ときめいと」にて成果紹介、参加者約70名）
- 2) 新潟市民シンポジウム「他人事じゃない風車のはなし～洋上風力発電について一緒に考えてみませんか？～」主催：新潟大学・応用生態工学会新潟、2021年1月11日、朱鷺メッセ国際会議室（新潟市）とオンラインにて参加者・観客との対話を行う。会場参加者約50名、オンライン参加者約310名
- 3) 一般公開シンポジウム「鳥衝突を未然に防ぐ～鳥と風車の共存を目指して～」
主催：新潟大学・応用生態工学会新潟、2021年5月22日、朱鷺メッセ国際会議室（新潟市）とオンラインにて成果紹介。会場参加者約10名、オンライン参加者約280名

【サブテーマ2】

- 1) 綿貫豊 洋上風力発電と海鳥 北海道大学大学院水産科学研究院マリン・ラーニング（コンテンツ。レクチャー）<https://www.umicon.jp/movie/>（動画非公開）

(4) <マスコミ等への公表・報道等>

【サブテーマ1】

- 1) 新潟日報（2019年6月24日、25頁、「リスクマップ活用を～“共生へ”新大教授ら議論～」）
- 2) 日経新聞（2021年1月11日、「新潟の市民を対象とした洋上風力発電のシンポジウムが開催」）
- 3) 新潟日報（2021年5月23日、18頁、「『風力』と鳥 共生策探る～新潟でシンポ・新たな評価手法提示」）

【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

【サブテーマ3】

特に記載すべき事項はない。

(5) 本研究費の研究成果による受賞

応用生態工学会 2020年度Web研究発表会 優秀発表賞

0I-7 北海道で繁殖するオオセグロカモメを対象とした洋上風力発電センシティブティマップ

佐藤夕夏（帯広畜産大学）・赤坂卓美（同）・藪原佑樹（徳島大学）・風間健太郎（早稲田大学）・
河口洋一（徳島大学）

<日時>令和2年12月5日（土曜日）9:00～17:30【ウェビナー開催】

<会場>オンライン特設会場（ZOOMウェビナー2会場，YouTubeでのLive配信も併用）

IV. 英文Abstract

[Abstract]

Key Words: bird collision risk, environmental assessment, machine learning, seabird, sensitivity map, statistical spatial model, wind power generation

Sensitivity map is an effective information to identify and avoid possible bird collision risks in advance. In this study, we developed a model for predicting the space of use based on highly accurate flight trajectory and altitude data obtained by GPS tracking techniques, and then used it to create a sensitivities map considering species-specific environmental selectivity on five major seabird species with domestic breeding populations: Streaked Shearwaters(STSH), Little Terns(LITE), Black-tailed Gulls(BTGU), Slaty-backed Gulls(SBGU), and Rhinoceros Auklets(RHAU). Flight trajectories of STSH were obtained for 69 individuals from the Toshima island colony in Izu Islands. Given the characteristics of the flight trajectories, three sensitivity maps were made: collision mortality, loss of feeding sites, and path obstacle. As for collision mortality map, the area around the colony where M-zone flight could occur was highly vulnerable. For the two maps of feeding sites loss and path obstacle, we developed a statistical model for predicting feeding sites and a simulation method for predicting migration routes to feeding sites by applying machine learning, which provided high predictability of sensitivity. Sensitivity map of LITE was made based on both of the foraging distance estimated by central place foraging model and the potential map of suitable nesting sites nationwide predicted by MaxEnt analysis. Sensitivity maps of BTGU, SBGU and RHAU were made based on GPS track data of 226 individuals from breeding colonies of six locations in northern and eastern Hokkaido. Collision risk (probability of flying in a range of blade of windfarm) and displacement risk (probability of feeding on the sea surface) of each species -location were modelled separately using statistical spatial model. Accuracy of the model for each species - location evaluated by correlation coefficient was generally high (0.5-0.9) but each model could not be applicable to the other regions. Overall, collision risk was high for BTGU than SBGU and RHAU. Reflecting species difference of flying and feeding behavior, modelled collision risk was high near the colonies, along the coast line and on the shelf area of main land for BTGU, just around the colonies for SBGU and RHAU, while modelled displacement risk was high near the colonies and along the coastal area of mainland for BTGU, just around the colonies for SBGU but on larger shelf area of mainland and slope for RHAU. These sensitivity maps are expected to be a powerful tool in promoting wind power generation with reduced risk of bird collision.