

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

風力発電施設の建設による鳥衝突のリスク低減を目指した  
高精度鳥感度Mapの開発  
(4-1603)

平成28年度~ 平成29年度

Development of Bird Sensitivity Mapping for Reducing Bird Collision Risk  
Caused by Wind Power Mills

〈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〉  
山階鳥類研究所  
帯広畜産大学

平成30年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発目的	1
3. 研究開発の方法	1
4. 結果及び考察	2
5. 本研究により得られた主な成果	3
6. 研究成果の主な発表状況	4
7. 研究者略歴	6
II. 成果の詳細	
II- 1 大型水禽類の国内渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発 （新潟大学）	7
要旨	7
1. はじめに	8
2. 研究開発目的	8
3. 研究開発方法	8
4. 結果及び考察	17
5. 本研究により得られた成果	30
6. 国際共同研究等の状況	31
7. 研究成果の発表状況	31
8. 引用文献	32
II- 2 道北海岸地域における海鳥の高精度鳥感度Map作成手法の開発 ウミネコを材料として（北海道大学）	34
要旨	34
1. はじめに	35
2. 研究開発目的	35
3. 研究開発方法	36
4. 結果及び考察	38
5. 本研究により得られた成果	59
6. 国際共同研究等の状況	61
7. 研究成果の発表状況	61
8. 引用文献	62

II- 3 希少猛禽類オジロワシの渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発・・・	63
(徳島大学)	
要旨	・・・ 63
1. はじめに	・・・ 63
2. 研究開発目的	・・・ 64
3. 研究開発方法	・・・ 64
4. 結果及び考察	・・・ 66
5. 本研究により得られた成果	・・・ 76
6. 国際共同研究等の状況	・・・ 77
7. 研究成果の発表状況	・・・ 77
8. 引用文献	・・・ 78
III. 英文Abstract	・・・ 79

## 1. 成果の概要

課題名 4-1603 風力発電施設の建設による鳥衝突のリスク低減を目指した  
高精度鳥感度Mapの開発  
課題代表者名 関島 恒夫 (新潟大学 自然科学系 教授)  
研究実施期間 平成28~ 29年度  
累計予算額 85,138千円 (うち平成29年度 :43,055千円)  
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード:鳥感度Map、オオヒシクイ、ウミネコ、オジロワシ、ハビタットモデル、バイオリギング、  
飛行高度、渡りルート、繁殖リスク、風況解析

### 研究体制

- (1) 大型水禽類の国内渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発 (新潟大学)
- (2) 道北海岸地域における海鳥の高精度鳥感度Map作成手法の開発 (北海道大学)
- (3) 希少猛禽類オジロワシの渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発 (徳島大学)

### 研究協力機関

山階鳥類研究所  
帯広畜産大学

### 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の事業計画が大幅に増加した。しかし、風力発電は温暖化の抑制効果が期待される一方で、鳥衝突事故による地域生態系への悪影響が強く懸念されている。全国の中でもとりわけ北海道道北地方は、希少鳥類の国内有数の生息地域であるにもかかわらず、発電に適した風況状況にあることから多数の事業計画が進められているが、必ずしも希少鳥類に配慮した計画とはなっていない。このことから、風力発電施設の立地選定の段階で鳥衝突リスクを低減する配慮が不可欠であり、潜在的な鳥衝突の発生を予測する鳥感度マップ(センシティブティマップ)の整備が早急に求められている。欧州では、自然エネルギーの導入意識が高く、欧州全域で再生可能エネルギーの導入と環境配慮の取り組みが進んでいる。中でも、風力発電の効率的な導入に向けては、鳥感度マップが有効という認識がもたれており、Bird Life InternationalやRoyal Society for the Protection of Birdsを中心にマップ整備が進められているものの、一方で予測精度が課題となっている。

### 2. 研究開発目的

本研究では、風力発電の建設による甚大な影響が懸念される北海道道北地方を対象として、既往の鳥類分布データ等を活用して希少鳥類の感度マップを作成するとともに、現地調査やGPS発信機(もしくはGPSロガー)のデータをもとに、生態および生息地特性の異なる3つの鳥種、オオヒシクイ、ウミネコ、およびオジロワシを対象として、それぞれの種特性を考慮した汎用的かつ予測精度の高い鳥感度マップ作りに向けた手法を開発した。得られた解析手法を用い、北海道道北地方を対象に、風車プレート回転域の飛行確率を考慮した3種の鳥感度マップを作成した。さらに、道北地方を越えてより広域なマップを作成する際の課題を整理するとともに、環境影響評価の手続きにおいて鳥感度マップを活用するための手順について検討した。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) 大型水禽類の国内渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発

渡り時の中継地・越冬地として利用される集団飛来地における鳥感度マップは、ねぐら周辺における採食分布

から作成された環境選択モデルで生息適地を推定し、採食域における風車高（Mゾーン）飛行率で補正することにより作成された。調査対象地は北海道および東北地方日本海沿岸域に位置する16ヶ所の主要集団飛来地で、ルートセンサスにより採餌群の位置情報が取得された。統計モデルにはMaxEntおよびCARモデルが適用され、全国の中継地・越冬地に外挿された。採食域における飛行高度は、各地の採食分布をもとに配置された定点からレーザー距離計によって測定された。集団飛来地を繋ぐ渡りルートにおける鳥感度マップは、3G送信機の追跡により取得された位置情報と既知の生息情報を統合することにより推定された渡りルート上に、渡り中の飛行高度を説明する統計モデルを外挿することによって作成された。渡り中の飛行高度は、3G送信機に加え、青森県津軽平野と北海道ウトナイ湖周辺で実施された測距機を用いた定点観察により取得された。

## ② 道北海岸地域における海鳥の高精度鳥感度Map作成手法の開発

沿岸に建設される洋上風力発電施設は、近傍に繁殖する海鳥に対し、採食場所の消失と風車への衝突の二つのリスクをもたらす可能性がある。そのため、これらのリスクが潜在的に高い範囲を事前に知る必要がある。動物の位置を高い精度で連続的に記録するGPSデータロガーを繁殖中の海鳥に装着し、その移動軌跡を詳細に得ることで、採食場所と風車に衝突する恐れのある高度を飛行する場所を知る新しい手法を開発した。そのため、道北地方で繁殖するウミネコを材料として、繁殖中の個体にGPSデータロガーを装着して、数日後に再捕獲して回収し、データをダウンロードして移動を追跡した。

## ③ 希少猛禽類オジロワシの渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発

越冬分布モニタリングや営巣調査の結果を基に広域での分布、営巣情報を収集した。また、6個体の幼鳥にGPS発信機を装着して移動を追跡し、詳細な空間利用や飛翔高度に関するデータを収集した。これらの生息・利用地点と気候、地形、土地利用等の環境要因との関係を、Maxent等を用いて解析し、(1) モニタリングデータから推定した越冬期の生息適地図、(2) 50か所以上の営巣地情報から推定した営巣適地図、(3) GPSの利用地点情報を基に推定した分散期の利用適地図を作成した。さらに、(4) GPSの高度情報と風況シミュレーションの結果を用いて飛翔リスクモデルを開発した。これは、オジロワシの飛翔高度が風車プレート回転域（Mゾーン）と重なる場合を飛翔リスクとみなし、どのような風況のときにMゾーンを飛翔するかを予測するモデルである。最後に、オジロワシの感度マップを、上記3種類の生息適地図を統合して作成した。それぞれの生息適地図で基準となる閾値を決め、対象地域の中で相対的にリスクが高い場所を区分した上で、それらをオーバーレイした。

## 4. 結果及び考察

### (1) 大型水禽類の国内渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発

オオヒシクイの採餌群は、ねぐらに近い環境を選択しており、本州・道央エリアでは水田を、道北・道東エリアでは牧草地および畑地を選好していた。生息適地は、ねぐら水域を中心とした平野部に広がっていた。採食域での飛行高度は、いずれの生息地においても98%以上の群れが風車高以下を飛行していることが明らかとなり、中継地・越冬地周辺の採食域は風車衝突リスクが高いことが明らかとなった。また、環境選択モデルにより推定された生息適地指数と飛翔個体数の間には強い相関が認められており、本種における2次元分布をもとに作成された生息適地マップが、鳥感度マップで求められる3次元的な利用を表す指標として適用できることが示された。本研究で新規に明らかとなった中継地を既知の情報に組み込み、日本海側沿岸域の渡りルートを推定した。渡り中は、標高差が大きい環境やねぐらから遠い環境で高度を上昇させていることが明らかとなり、風車高飛行率を推定する統計モデルを渡りルートに外挿した結果、風車衝突リスクはねぐら周辺や平野部で高く推定され、山間部では低く推定された。

集団飛来地は、オオヒシクイに限らず、日本で越冬する大型水禽類の核心的保全地域と位置づけられる。それ故、第1段階として、集団飛来地地鳥感度マップを用いて、ねぐらを中心とした高い鳥感度スコアを示す地域を可能な限り回避する配慮を施す。次に、第1段階で低スコアもしくは範囲外と判定された地域に対して、第2段階に進み、渡りルート鳥感度マップを用いて事業対象実施予定区域の鳥感度スコアを確認する。事業対象実施予定区域が高い鳥感度スコアを示しているようであれば、立地計画もしくは風車配置を再検討することが望ましい。

## ②道北海岸地域における海鳥の高精度鳥感度Map作成手法の開発

ウミネコの1秒間隔の位置から、①採食場所を判別できるとともに飛行高度を推定することができた。②15~20個体のデータがあれば集団の採食範囲をおよそ推定できることがわかった。③移動軌跡データを用いて採食場所を特定するとともに、衝突リスクが高まる高度(Mゾーン)を飛行するMゾーン飛行場所を特定できた。④ハビタットモデルの手法をもちいて、採食場所とMゾーン飛行場所に影響する環境要因を抽出したところ、水深が50mより浅く、海底斜度が小さく、海面水温勾配が大きく、漁港のあるグリッドでよく採食すること、海岸線に近く、標高が30m程度または80m以上、土地傾斜が大きく、漁港のあるグリッドでMゾーン飛行確率が高かった。⑤2kmグリッドを覆う範囲で風車ができた場合、1回の繁殖期間中における各個体の衝突確率をグリッド毎に計算する手法が開発できた。

結論として、GPS位置追跡により、繁殖中の海鳥については採食場所とMゾーン飛行場所について2km解像度で鳥感度マップを作ることができる。一方で、ある場所で得られたハビタットモデルを他の年や場所に適応する場合注意が必要であることもわかった。2016年利尻抱卵期のデータで構築された採食場所ハビタットモデルを2017年に利尻島と2017年枝幸に当てはめたところ、その予測精度(相関係数)は利尻2017年では0.3程度だったが、枝幸2017年では0.2以下と悪かった。複数のモデリング手法の検討、取り込む環境要因の検討(例えば、ローカルな再現性よりもグローバルな再現性が高い要因の抽出など)、別の年や場所で実データを得るとした場合にどの程度のサンプルを得てこれらを投入したら効率的なのかなどの検討が必要である。

## ③希少猛禽類オジロワシの渡りルートと高精度鳥感度Map作成手法の開発

オジロワシの営巣適地、越冬期の生息適地は、森林面積や河川、海岸との距離等の環境要因に規定され、海岸の漂着アザラシや魚類、水鳥類等の餌生物の利用可能性を反映していると考えられた。オジロワシ幼鳥の分散時の利用適地は、森林面積や標高の他、サケ遡上河川との近接性が影響していた。これらの生息適地図からは、オジロワシの生息適地が海岸部と天塩川沿いに多いことがわかる。さらに、水平方向の風が強く、鉛直方向上向きの風が強くなるほど、オジロワシの飛行時のMゾーン利用確率が高くなることが明らかになった。従って、上向きの風が発生しやすい海岸崖や急斜面の上空は、オジロワシの風車衝突リスクが高い場所であると予想される。3種類の生息適地図(営巣適地、越冬期の生息適地、分散時の利用適地)を統合した感度マップでは、閾値を上位20%の値とした場合、地域全体に占める高リスクのメッシュ割合は約25%であり、年平均風速が6.0m/sを超える風況適地と重なるメッシュは約16%を占めた。感度マップを環境影響評価の手続きで活用する際は、オジロワシの高頻度利用域を避けて風力発電の事業地を選定する場合に、感度マップで低リスクとされたエリアが候補となる。一方、事業地が感度マップで高リスクに該当する場合、3種類の生息適地図のどれが高リスクに該当するかを確認し、営巣適地図が高リスクとなる場合は営巣調査を精力的に行って風車の設置場所を営巣地から一定距離以上離す、越冬期や分散期の生息適地図が高リスクとなる場合は風況に注目した飛行リスクモデルを活用し、より細かい空間解像度でオジロワシが高頻度でMゾーンを飛行する場所を予測した上で風車配置を決める、といった対策が求められる。

## 5. 本研究により得られた主な成果

### (1) 科学的意義

本研究では、生態および生息地特性の異なる3つの鳥種、オオヒシクイ、ウミネコ、およびオジロワシを対象として、それぞれの種特性を考慮した汎用的かつ予測精度の高い鳥感度マップの作成手法を開発するとともに、風車建設の進む北海道道北地方におけるマップ作成を試みた。

成果の1つとして、北海道道北地方から本州日本海沿岸域にかけて集団飛来地と渡りルートがあるガン類の一種オオヒシクイについて、行動観察、GPS発信機の装着、および測距計等を用い生息場所利用を明らかにし、本種の鳥感度マップを作成する方法を開発した。日本における本種の生息地利用は、長距離移動する渡り期と、集団飛来地においてねぐらを中心に休息・採食を行う越冬期で大きく異なることから、行動特性に合わせ、集団飛来地と渡りルートに関する2つのマップ作成手法をハビタットモデルにより開発し、国内最大の越冬地である新潟県福島潟から北海道稚内までの渡りルート上における鳥感度マップを作成した。

2つめの成果として、洋上風力発電に最適な風況である北海道北部沿岸域に多数の繁殖地があるウミネコについて、GPSロガーを個体に装着し採食と飛行を追跡することにより、本種の鳥感度マップをつくる手法を開発した。手法としては、環境データから鳥の生息地を予測するハビタットモデルを用いた。この手法で構築されたモデルに環境データを投入することで、潜在的な好適生息地を予測した。また、海鳥の生息場所をすべての繁殖地あるいは年において測定するのは困難なので、別の繁殖地や年の環境データから海鳥の生息場所を予測し、その精度がどの程度であるかを検証した。

3つめの成果として、国の天然記念物であり、国内希少野生動物種に指定されている希少猛禽類オジロワシについて、①広域モニタリングデータの活用による広域分布情報と、GPS発信機を装着したオジロワシ幼鳥の移動追跡による利用地点情報をもとに、繁殖期（営巣適地）、越冬期、分散期のオジロワシ潜在生息適地図を作成したこと、さらに、②GPS発信機を装着したオジロワシ幼鳥の詳細な飛行経路と高度を明らかにし、風況との関係を解析することで、オジロワシ幼鳥が風車と衝突しやすい高度を高頻度で飛翔する場所を風況から予測する飛翔リスクモデルを開発した。最終的に、3種類の生息適地図と飛翔リスクモデルを用いた鳥感度マップの作成手法を提案した。

## ② 環境政策への貢献

今回作成できた鳥感度マップにより、風車建設が進む北海道道北地方がいずれの鳥種に対しても風車の衝突に対し高いリスクを有する地域であることが判明したことは、環境省が当該地域における今後の風力事業の立地適正を判断する上で大いに参考になる。さらに、得られた鳥感度マップを具体的に立地検討に使用する手続きを示したことは、マップ情報を活用し環境に配慮した適正な立地選定を進める事業者に対してだけでなく、環境影響評価手続きにおいて配慮書を審査する経済産業省省にとって判断基準が一つ増えたことになり、風力アセスを戦略アセスとして実質化する上で大きな価値がある。

### <行政が既に活用した成果>

経済産業省環境審査顧問会風力部会において、現在、準備書段階にある北海道道北地方の案件に関し、事業者の提出した環境影響調査の解析結果に問題があることが分かり、環境省環境影響評価課が環境大臣意見を作成するにあたり、本研究課題の「希少猛禽類オジロワシの渡りルートと高精度鳥感度Map作成手法の開発」(徳島大)で作成した当該地域におけるオジロワシの営巣環境鳥感度マップを参考資料として提供した。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

平成30年3月、環境省野生生物課は、風力発電施設を設置する際に鳥類に与える影響が大きい区域を予め把握し、事業者が適正に立地選定を進めるための情報ソースとして、陸上鳥類や集団飛来地を中心とした鳥感度マップを作成し、環境省が管理する環境アセスメントデータベース(EADAS)にマップ情報を実装した。本研究で作成した3種の鳥の感度マップはいずれも、生息可能性が高いエリアに対し、風車ブレード回転域の飛翔を反映させた3次元鳥感度マップであり、鳥衝突リスクを予測する上で非常に参考になる。これらをEADASに実装(あるいはリンク)することで、事業者に加え、環境影響評価書を審査する行政機関にとって、活用度が高い情報ソースになることが見込まれる。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) Kazama K, Nishizawa B, Tsukamoto S, Gonzalez JE, Kazama MT, Watanuki Y. J Ornithol Male and female Black-tailed Gulls feed on the same prey species but use different feeding habitats (accepted)

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 風間健太郎:海洋と生物、39、430-435 (2017)  
洋上風力発電の海鳥への影響 (特集:洋上風力発電と環境影響調査)

- 2) Sachiko Moriguchi, Haruka Mukai, Ryosuke Komachi, Tsuneo Sekijima :Conference on Wind energy and Wildlife impacts 2017<sup>th</sup>  
Wind farm effects on migratory flight of swans and foraging distribution at their stopover site (under review)

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) Moriguchi S, Mukai H, Komachi R & Sekijima T :Conference on Wind energy and Wildlife impacts 2018, Estril, Portugal, 2017  
Wind farm effects on migration flight of swans and foraging distribution at their stopover site”
- 2) 森口紗千子、向井喜果、尾崎清明、仲村昇、関島恒夫 :日本鳥学会 (2017)  
携帯電話回線を利用した送信機の精度検証とオオヒシクイの春の国内渡り経路の解明」  
自由集会 :ガンカモ類の生態研究における新しい調査・解析手法の提案, 企画者 :向井喜果、安藤温子、森口紗千子)
- 3) 関島恒夫、森口紗千子、向井喜果、望月翔太、尾崎清明、仲村昇 :日本生態学会 (2018)  
大型水禽類のセンシティブティマップをつくる ―有用性とその課題―  
シンポジウム :鳥衝突を未然に防ぐセンシティブティマップの普及に向けて)
- 4) 森口紗千子、向井喜果、佐藤一海、望月翔太、仲村昇、尾崎清明、関島恒夫 :日本生態学会 (2018)  
ヒシクイ生息地における風車センシティブティマップ作成」
- 5) 綿貫豊、風間健太郎 :日本生態学会大会 (2018)  
トラッキングデータによる風発リスクマップの可能性とその課題」
- 6) Kazama K, Nishizawa B, Senzaki H, Kazama M T, Watanuki Y :Pacific Seabird Group Annual Meeting, La Paz, Mexico, 2018  
Habitat use of two Slaty-backed Gulls during non-breeding and breeding seasons revealed by GPS tracking: high dependency on anthropogenic habitats”
- 7) Kazama K, Nishizawa B, Tsukamoto S, Gonzalez JE, Kazama M T, Watanuki Y :Pacific Seabird Group Annual Meeting, La Paz, Mexico, 2018  
Male and female Black-tailed Gulls feed on the same prey species but use different feeding habitats”
- 8) 風間健太郎、西沢文吾、塚本祥太、Jordi E. Gonzalez、風間麻未、綿貫豊 :日本鳥学会 (2017)  
抱卵期のウミネコの採餌環境利用の性差」
- 9) 風間健太郎、綿貫豊 :日本鳥学会 (2017)  
洋上風力発電が海鳥の繁殖個体群に及ぼす影響」  
自由集会 :最新の知見から考える風力発電と鳥類の問題)
- 10) 風間健太郎、綿貫豊 :日本生態学会 (2017)  
ウミネコのGPSトラッキングによる洋上風力発電リスクマップの作成」  
企画集会 :風力発電の鳥衝突と希少猛禽類の絶滅リスク)
- 11) Kazama K, Watanuki Y :Pacific Seabird Group Annual Meeting, Tacoma, WA, 2017  
GPS tracking survey for habitat use of breeding Black-tailed gulls: assessing potential risks to marine and coast wind farm in northern Hokkaido, Japan”
- 12) Y. Yabuhara, T. Akasaka, H. Nakagawa, H. Yusuke, Y. Kawaguchi :Conference on Wind energy and Wildlife impacts 2018, Estril, Portugal, 2017  
Predicting regional distribution of white tailed eagle in winter to inform wind farm placement in Hokkaido, Northern Japan”
- 13) 河口洋一 :生態学会第65回全国大会 (2018)  
オジロワシのセンシティブティマップの可能性と課題 ―環境アセスメントにおける利用を目指して―



## 7. 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

#### 3) 望月 翔太

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了、農学(博士)、現在、新潟大学自然科学系助教

## II. 成果の詳細

### II- 1 大型水禽類の国内渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発

新潟大学

自然科学系 教授	関島恒夫
自然科学系 助教	望月翔太

<研究協力者>

新潟大学自然科学系 特任助教	森口紗千子
山階鳥類研究所	尾崎清明
山階鳥類研究所	仲村昇

平成28~ 29年度累計予算額：28,620千円（うち平成29年度：14,494千円）

予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

オオヒシクイが集団飛来地あるいは渡りルートとして利用する北海道道北地方から本州にかけての日本海沿岸域は、良好な風況が見込まれることから、現在、多数の風力発電施設の建設が進んでいる。大型風車の設置は風車への衝突のみならず、風車群を回避することによる迂回コストの増大などにより、中継地や越冬地利用の放棄など生息地の消失に繋がる可能性があり、地域個体群に対する影響が計り知れない。オオヒシクイなど大型水禽類の集団飛来地および渡りルートを保全しつつ、再生可能エネルギーの拡大を目指して風力事業を推進するには、鳥衝突リスクを低減するための鳥感度マップの整備が不可欠である。本研究では、オオヒシクイを対象として、全国の主要な集団飛来地における利用場所および飛行高度、GPS送信機により追跡した渡りルート、GPS送信機と測距計等を用いた渡りルートにおける飛行高度等の生態情報を収集する。これらにより、全国の主要な集団飛来地における風車回転域飛行確率を考慮した鳥感度マップと、北海道道北地方から本州日本海沿岸域にかけての主要な渡りルートにおいて渡り中の飛行高度規定要因を考慮した鳥感度マップ、の2つのマップ情報を作成した。

中継地・越冬地においてオオヒシクイは、ねぐらに近い環境を選択しており、各地の農地景観に応じて本州・道央エリアでは水田を、道北・道東エリアでは草地を選好していた。採食域での飛行高度は、いずれの生息地においても98%以上の群れが風車高以下を飛行していることが明らかとなり、中継地・越冬地周辺の採食域は風車衝突リスクが高いことが明らかとなった。渡りルートにおける鳥感度マップは、3G送信機により取得された位置情報と既知の生息地情報を統合することにより推定された渡りルートに、3G送信機と測距機により取得された渡り時の飛行高度を応答変数とした統計モデルを外挿することにより作成された。オオヒシクイは、標高差が大きい環境やねぐらから遠い環境において飛行高度を上昇させていることが明らかとなり、風車衝突リスクは、ねぐら周辺や平野部で高く推定され、山間部では低く推定されていた。

集団飛来地は、オオヒシクイに限らず、日本で越冬する大型水禽類の核心的保全地域と位置づけられる。それ故、第1段階として、集団生息地鳥感度マップを用いて、高い鳥感度スコアを示す地域を可能な限り回避する配慮を施す。次に、第1段階で低スコアもしくは範囲外と判定された地域に対して、第2段階に進み、渡りルート鳥感度マップを用いて事業対象実施予定区域の鳥感度スコアを確認する。事業対象実施予定区域が高い鳥感度スコアを示しているようであれば、立地計画もしくは風車配置を再検討することが望ましい。

#### [キーワード]

オオヒシクイ、鳥感度マップ、ハビタットモデル、渡りルート、飛行高度

## 1. はじめに

オオヒシクイはマガン属に分類される大型水禽類の1種であり、日本に冬季飛来する個体群は、夏季にカムチャッカ半島北部で繁殖し、冬季に北海道を經由し、本州日本海側の湖沼で越冬する。湖沼の開発や乱獲でその生息数は減少し、日本では天然記念物に指定されるとともに、環境省レッドリストでは準絶滅危惧種に指定されている。本種が集団飛来地あるいは渡りルートとして利用する北海道道北地方から本州にかけての日本海沿岸域は、世界的に見ても良好な風況が見込まれることから、現在、多数の陸上風力発電施設の建設が進んでおり、今後は洋上にも拡大し、引き続き建設ラッシュが続くことが予想されている。大型風車の設置は風車ブレードへの衝突のみならず、風車群を回避することによる迂回コストの増大などにより、中継地や越冬地利用の放棄など集団飛来地の消失に繋がる可能性があり、地域個体群に対する影響が計り知れない。オオヒシクイを含め希少なガン類やハクチョウ類など大型水禽類の集団飛来地および渡りルートを保全しつつ、再生可能エネルギーの拡大を目指して風力事業を推進するには、鳥衝突リスクを低減するための鳥感度マップの整備が不可欠である。オオヒシクイの鳥感度マップを作成する上で、本種の渡りから越冬にかけての一連の行動特性を考慮する必要がある。中継地や越冬地では、ねぐらを中心として、周辺の農地を休息場や採餌環境として利用し、その間の移動は比較的低空を飛翔する。一方、長距離を移動する渡りルートでは、海域から平地、さらには山地までも利用し、既往の調査では地域によっては高高度を飛翔する行動も観察されている。これらを踏まえ、本種の鳥感度マップ作成において配慮すべき点として、長距離を移動する渡り期と集団飛来地を中心に活動する休息・越冬期を分ける必要があること、さらに土地利用に応じた飛行高度を反映させることが、本種の生態的特性を反映した鳥感度マップを作る上で重要であるといえる。

## 2. 研究開発目的

本研究では、希少大型水禽類オオヒシクイを対象として、全国の主要な集団飛来地における利用場所および飛行高度、GPS送信機により追跡した渡りルート、GPS送信機と測距計等を用いた渡りルートにおける飛行高度等の生態情報を収集する。これらにより、(1) 全国の主要な集団飛来地における風車回転域飛翔確率を考慮した鳥感度マップと、(2) 北海道道北地方から本州日本海沿岸域にかけての主要な渡りルートにおいて渡り中の飛行高度規定要因を考慮した鳥感度マップ、の2つのマップ情報を作成する。最後に、作成した2種類の鳥感度マップを用いた、段階的な風車立地検討の手続きについて提案する。

## 3. 研究開発方法

### 3-1. 全国の中継地および越冬地における汎用的環境選択モデルの開発

#### 3-1-1. 大型水禽類の分布調査

オオヒシクイの主要な集団飛来地である北海道道北地方（2017年3～4月、2回）、十勝地方（2017年4月、1回）、石狩川流域（2017年3～4月、2回）、秋田県大潟村（2017年2月・11月、2回）、宮城県北部（2017年11月、1回）、新潟県福島潟周辺（2016年11月～2017年3月、8回）の6地域16ヶ所のねぐらとなる水域の周辺を中心に自動車ルートセンサスを行なった（図(1)-1）。観察されたガン・ハクチョウ類の採食地での土地利用、群れの構成種、個体数、および地図上での群れの位置を記録した。走行した経路はGPS発信機で記録された。

#### 3-1-2. 汎用的環境選択モデルの開発

オオヒシクイが利用する採食地としての農地景観は地域によって大きく異なっており、本州や道南地方、石狩平野などの比較的暖かい地域では水田が多くみられ、道東地方や道北地方では草地や畑地が多く、水田の面積は少ない（農林水産省 2017）。本研究では、このような農地景観の違いがオオヒシクイの環境選択性に及ぼす影響を予め考慮し、道東から道北を草地モデル、本州から石狩平野までを水田モデルとして2つの統計モデルを作成した。生息適地を推定する範囲は、環境省の重要生態系監視地域モニタリング推進事業（モニタリングサイト1000）のガンカモ類調査（環境省 2015a）、北海道マガン合同

羽数調査（牛山ら 未発表）においてヒシクイ類の生息が確認されたねぐら、および本研究で送信機を装着した追跡個体が2日以上滞りが認められたねぐらから半径20km バッファを発生させた範囲内とした。統計モデルとして、MaxEnt (Phillips et al. 2006) とCARモデル (Keitt et al. 2002) が適用され、得られた分布予測モデルから生息適地マップを作成した。メッシュの解像度は、各生息地内のオオヒシクイ分布地点と個体数よりバリオグラム (Turner et al. 2000) を作成し、空間的自己相関が飽和状態になることが多かった2km四方とした。

応答変数となるオオヒシクイの分布情報として、ルートセンサスで取得した在地点を利用した。解析範囲はルートセンサスの経路に半径250mバッファを発生させ、少しでもそのバッファが含まれるメッシュに限定した。CARモデルの不在地点については、モデルの解析範囲であり、かつ在地点でないメッシュとした。環境選択モデルで推定するメッシュ数は、外挿範囲を含め、草地モデルで4190メッシュ、水田モデルで8,798メッシュである。

説明変数は、ガン類の生息を規定する要因として知られている項目で、全国規模のGISデータが入手できるものに限定した。草地面積、畑地面積、水田面積、市街地面積、森林面積、平均標高、最低標高、最高標高、ねぐら水域からの距離、1級および2級河川からの距離をメッシュサイズに加工した。各メッシュの土地利用面積は、日本域高解像度土地利用土地被覆図（バージョン16.09）（JAXA 2016）より算出した。標高に関するデータは国土数値情報標高・傾斜度3次メッシュ（国土交通省 2012）を用いた。ねぐら水域からの距離は、環境省の重要生態系監視地域モニタリング推進事業（モニタリングサイト1000）のガンカモ類調査（環境省 2015a）、北海道マガン・ヒシクイ合同調査（牛山ら 未発表）および観察者からの聞き取りでヒシクイ類の生息が確認されたねぐら、および本研究で送信機を装着した追跡個体が2日以上滞りが確認されたねぐらを用いて算出した。河川からの距離は、国土数値情報（河川）データ2009年度水系（国土交通省 2012）の1級および2級河川のみを用いて算出した。推定範囲内のメッシュの各変数の数値を用いて説明変数間の相関を求め、相関係数の高かった ( $|r| > 0.5$ ) 変数がある場合にはどちらかを除き、残った変数をその後の解析に利用した。

モデルの精度検証には、2005年～2016年までのガンカモ類の生息調査（環境省 2017b）、重要生態系監視地域モニタリング推進事業（モニタリングサイト1000）ガンカモ類調査（環境省 2015a、2015b、2017a）、および渡り鳥の飛来状況調査（環境省 2017c）でヒシクイ類が観察されたメッシュを在データ、5回以上調査しているがヒシクイが観察されなかったメッシュを不在データとして両モデルの推定値でArea Under Curve (AUC) を推定した。また、送信機を装着した追跡個体（3-5, 4-4参照）の在地点と推定範囲全体の推定値の頻度分布を比較することで、モデルの有用性を検証した。

GISの解析にはArcMap 10.4.1を、MaxEntの解析にはMaxEnt version 3.4.1、CARモデルはWinBUGS14、その他全ての統計解析はR3.2.3を使用した。

### 3-2. 高度測定機器の精度検証

首環型送信機とレーザー距離計の測定誤差を検証するため、送信機をくくりつけた小型ドローン（PAHNTOM4, DJI社製）を送信機の測定時刻に合わせて地上から50mと100mの高度で空中停止させ、ドローンの高さをレーザー距離計（LASER1000AS, COOLSHOT 80iVR, Nikon社製）で測定した。いずれの測定機器についても、新潟大学内農学部圃場で精度検証が実施された。送信機は6基で計87回、レーザー距離計は調査に使用されたレーザー距離計2種各1台で計60回検証した。

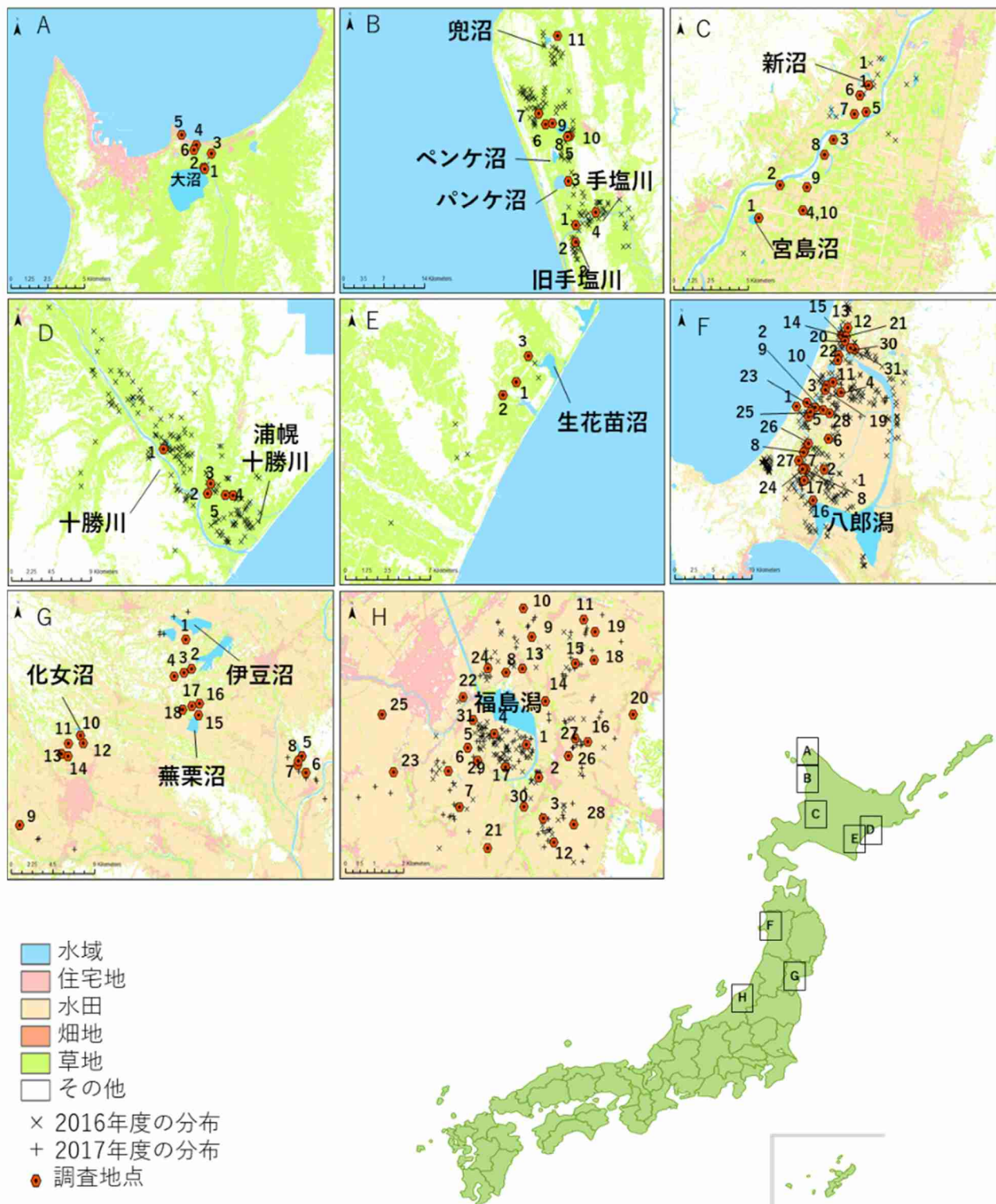
### 3-3. 中継地と越冬地周辺におけるオオヒシクイの飛行高度の取得

#### 3-3-1. 調査地

環境省モニタリングサイト1000（環境省 2017）により、オオヒシクイが利用していることが確認されている国内の主要集団飛来地である、北海道道北地方稚内市にある大沼、天塩郡にある兜沼、ペンケ沼、パンケ沼、手塩川、旧手塩川、道央地方美唄市にある宮島沼、新沼、道東地方十勝郡にある十勝川、浦幌十勝川、広尾郡にある生花苗沼、秋田県男鹿市にある八郎潟、宮城県登米市にある伊豆沼、大崎市にある蕪栗沼、古川市にある化女沼、新潟県新潟市にある福島潟の計16カ所の湖沼および河川の周辺域を

調査地として設定した(図(1)-1)。各湖沼および河川周辺において、農地を網羅するルートを設定した上で自動車を用いたルートセンサスを行い、オオヒシクイの採餌群の位置情報を取得し、その分布最外郭を結んだエリアを各中継地・越冬地における調査範囲とした。

10年間のオオヒシクイ採餌群の分布情報の蓄積がある福島潟では、より詳細な飛行高度の傾向を明らかにするために、福島潟周辺の調査範囲網羅的に調査定点を設け、飛行高度の計測を行った。さらに、地上における本種の採食分布を応答変数としたハビタット解析によって算出される2次元的な利用を表す生息適地指数が、3次元的な利用情報を組み込まなければならない風車衝突センシティブティを表す指標として適用できるかどうか明らかにするために、生息適地指数と飛行個体数の相関関係を明らかにした。ハビタット解析のための分布情報は、新潟県新潟市北区に位置する福島潟（北緯37度54分35秒、東経139度14分57秒）を中心とした半径約7kmの水田帯においてルートセンサスが行われた。調査期間は2017年11月～翌年3月で、毎月2回の頻度で調査が実施された。



図(1)-1 調査地. オオヒシクイの主要集団飛来地である北海道道北地方にある大沼(A)、兜沼・ペンケ沼・パンケ沼・手塩川・旧手塩川(B)、道央地方にある宮島沼・新沼(C)、道東地方にある十勝川・浦幌十勝川(D)、生花苗沼(E)、秋田県男鹿市にある八郎潟(F)、宮城県の登米市にある伊豆沼・大崎市にある蕪栗沼・古川市にある化女沼(G)、新潟県の新潟市にある福島潟(H)の16の湖沼および河川の周辺域で調査を行った. 赤丸は定点調査地点、×および+は、2016年と2017年のオオヒシクイの採餌群の分布を示している.

### 3-3-2. 飛行高度の測定

飛行高度は定点観察によって取得された。各湖沼および河川周辺の調査区域内の農地において、事前に行われたルートセンサスによって得られたオオヒシクイの採餌群の位置情報を基にねぐらと採食地の間に定点が設けられた。定点の位置や調査範囲の基準として600m×600mのメッシュを調査区域に設けた。メッシュサイズは、レーザー距離計の計測可能範囲である300mを基準にした。採食地広域に飛行高度が取得された福島潟では、全276メッシュ中31メッシュで調査が実施された。オオヒシクイは、日の出の時間帯にねぐらから採食地へ飛び立ち、日の入りの時間帯にねぐらに戻ってくるため、各ねぐら周辺での定点調査は、日の出から9時までと16時から日の入りまでの2つの時間帯に実施された。さらに、日中における採食パッチ間移動では、ねぐら採食地間の移動である朝夕の飛行特性が異なり、飛行高度の傾向が異なることが考えられたため、福島潟では10～15時にも定点調査を実施した。上空を通過した全てのオオヒシクイの群れに対して、その飛行高度および個体数を記録した。定点調査は、2016年12月、2017年2月および11月～12月に新潟県福島潟で14回、2017年2月および11月に秋田県八郎潟で13回、2017年3月に北海道新沼で7回、2017年4月に同十勝川流域で4回、同浦幌十勝川で3回、同生花苗沼で3回、同宮島沼で5回、同天塩川で1回、同旧天塩川で3回、同ペンケ沼で6回、同兜沼で1回、同パンケ沼で1回、同大沼で5回実施された。得られた飛行高度は、風車回転域を地上高30～130mと想定し、風車回転域以下の地上高0～29mを高度Lゾーン、風車回転域の地上高30～130mを高度Mゾーン、風車回転域以上の地上高130m以上を高度Hゾーンとして解析に用いられた。

### 3-3-3. 環境要因の抽出

飛行高度の解析に用いられた変数を表(1)-1に示す。オオヒシクイの飛行高度に関わる要因として、気象に関する変数、構造物に関する変数、飛行経路下の環境に関する変数、その他の変数の3つのカテゴリーを選定した。気象に関する変数として、①気温と②風速の計2つの変数が選定された。構造物に関する変数として、定点から調査範囲である半径300mバッファを発生させたときの③バッファ内における水田面積、④バッファ内における住宅地面積、⑤バッファ内における送電鉄塔の本数、⑥バッファ内における送電線の総延長、⑦バッファ内における5m以上の幅員をもつ道路の総延長、の計5つの変数が選定された。飛行経路下の環境に関する変数として、⑧各定点からねぐらである福島潟までの直線距離、各定点からねぐらまでの直線ラインに半径18mのバッファを発生させたときの⑨バッファ内における水田面積（以下、累積水田面積）、⑩バッファ内における住宅地面積（以下、累積住宅面積）、⑪バッファ内における送電鉄塔の本数（以下、累積送電鉄塔の本数）、⑫バッファ内における送電線の総延長（以下、累積送電線総延長）、⑬バッファ内における5m以上の幅員をもつ道路の総延長（累積道路総延長）、の計4つの変数が選定された。その他の変数として、⑭飛行高度を測定した群れの個体数を加えた計14変数が解析に用いられた。気温および風速は、福島潟に最も近いアメダス新津観測所(北緯37度47分5秒、東経139度05分2秒)から取得した。構造物に関する変数について、福島潟内のオオヒシクイの行動圏内には住宅地や送電鉄塔、交通量の多い道路などの人工構造物が位置していたことから、オオヒシクイが飛行の際に構造物に対して高度を上昇させる忌避行動を取ると想定した。そのため、構造物に対する飛行高度の変化の傾向を見るために、各定点から調査範囲である半径300mのバッファを発生させ、バッファ内における住宅地の面積、送電鉄塔の数および送電線の総延長、幅員5m以上の道路の総延長の3つの景観情報を取得した。また、採餌環境となる水田帯においては、オオヒシクイは着陸のために下降もしくは低高度を飛行することが想定されたため、水田帯の広がりに対する飛行高度の変化の傾向を見るためにバッファ内の水田面積を算出した。住宅地、水田情報は、JAXAの10m相当解像度の土地被覆データをGeoTIFF形式のデータとして取得し、Arc GIS上でポリゴンデータに変換して面積を算出した。送電鉄塔について、観察から送電線を支える鉄塔基部と送電線に対するオオヒシクイの忌避反応が異なることが考えられたため、送電鉄塔基部（以下送電鉄塔）と送電線に分けて解析した。ArcGISで調査地内における送電鉄塔の位置をポイントデータ、送電鉄塔を繋ぐ送電線をラインデータに変換し、総延長を算出した。道路情報は、国土院の数値地図25000(空間データ基盤)から取得し、幅5m以上の道路のみArcGIS上に取り込み、バッファ内の総延長を算出した。距離に関する変数について、生息地内における飛行高

度が飛行距離により変化するのかを明らかにするために、ねぐらである福島潟から定点までの直線距離をGoogle Earth上で計測し、解析の変数に取り込んだ。また、飛び立ち地点から高度を観測した地点までの飛行ルート上に存在する構造物によって飛行高度が変化することが考えられたため、朝のねぐら立ちの飛行高度について、ねぐらである福島潟から各定点まで直線的に飛行したと想定し、ねぐらから定点に到達するまでの間の構造物の面積および総延長を算出した。ねぐらから定点まで直線で結び、観察された飛行している群れの平均個体数×(翼開長+1m)である半径9mのバッファを発生させ、バッファ内の各構造物について、構造物に関する変数と同様に面積と総延長が算出された。

ハビタット解析に用いられた変数を表(1)-2に示す。オオヒシクイの採餌環境選択に関する環境要因として、距離に関する変数、水田特性に関する変数、構造物に関する変数、および、その他の変数の4つのカテゴリを設け、距離に関する変数としては、水田からねぐらである福島潟までの距離、3m以上の幅員をもつ道路までの距離(以下、道路までの距離)、高速道路・バイパス道までの距離、市街地(面積が1.5ha以上の住宅地、工場あるいは商業地)までの距離(以下、市街地までの距離)、および、福島潟から市街地を回避した際の距離、の計5変数が選定された。水田特性に関する変数として、調査範囲内における全ての水田の1区画の面積、水田の連続性(高速道路やバイパス道で分断されていない水田帯の面積)、採餌群を中心として半径100mから200mごとに1900mまでのバッファを発生させた際のバッファ内における水田の総面積、バッファ内における水田1枚あたりの面積が10a以上となる水田の総面積、バッファ内における畦の総距離、時間当たりの水田の排水性を表す7段階の評価点(1~6、18)、の計6変数が選定された。構造物に関わる変数として、バッファ内を通る送電線の総距離と福島潟からオオヒシクイが利用した水田までの間に存在する送電線の本数(以下、送電線の本数)の2変数とした。以上の他に、その他の景観に関わる変数として、水田の標高、バッファ内に存在する森林の総面積、バッファ内に存在する森林の林縁長(以下、森林エッジ)、の3変数を加えた計16変数が解析に用いられた。

表(1)-1 飛行高度の解析に用いた環境要因およびその概要. 各変数のデータを取得した引用元を示した.

説明変数	変数の概要	引用元
ねぐらからの距離(km)	ねぐらである福島潟の中心点から定点までの直線距離	
気温(°C)	飛行高度を取得した時間の気温	アメダス新津観測所
風速(m/s)	飛行高度を取得した時間の風速	アメダス新津観測所
群れの個体数	高度を取得出来た群れの個体数	
水田面積(m <sup>2</sup> )	定点から600mバッファ内の水田面積	JAXAの土地被覆データ(10m相当解像度)
住宅地面積(m <sup>2</sup> )	定点から600mバッファ内の住宅地面積	JAXAの土地被覆データ(10m相当解像度)
道路総延長(m)	定点から600mバッファ内の幅5m以上の道路総延長	国土地理院数値地図25000(空間データ)
送電線鉄塔の本数	定点から600mバッファ内の送電線鉄塔の本数	ArcGIS
送電線総延長(m)	定点から600mバッファ内の送電線総延長	ArcGIS
累積水田面積(m <sup>2</sup> )	ねぐらの中心から定点までの直線上に発生させた18mバッファ内の水田面積	JAXAの土地被覆データ(10m相当解像度)
累積住宅地面積(m <sup>2</sup> )	ねぐらの中心から定点までの直線上に発生させた18mバッファ内の住宅地面積	JAXAの土地被覆データ(10m相当解像度)
累積道路総延長(m)	ねぐらの中心から定点までの直線上に発生させた18mバッファ内の道路総延長	国土地理院数値地図25000(空間データ)
累積送電線鉄塔の本数	ねぐらの中心から定点までの直線上に発生させた18mバッファ内の送電線鉄塔の本数	ArcGIS
累積送電線総延長(m)	ねぐらの中心から定点までの直線上に発生させた18mバッファ内の送電線総延長	ArcGIS



表(1)-2 ハビタット解析に用いられた環境変数. カッコ内は単位を表す。アルファベットはデータ参照元を示している (a: 生物多様性システム (環境省 2009)、b: 国土数値情報 (国土交通省HP 2011)、c: 水土里ネット (新潟県土地改良連合会 2014) および新潟県 (2013)、d: 北陸農政局 (2013)、e: 東北電力 (2003) . 最終的なMaxEnt解析に用いられた変数を太字で示している。

変数	変数の説明	データ参照元
<b>距離に関する変数</b>		
1 <b>福島潟までの距離 (km)</b>	調査範囲内における水田(以下水田)から福島潟までの距離を抽出。福島潟までどの程度の距離の水田が好適か。	a
2 道路までの距離(m)	水田から高速道路・バイパス道路を除いた幅員が2.5m以上の道路までの距離を抽出。道路までどの程度の距離の水田が好適か。	b
3 高速道路、バイパス道までの距離 (m)	水田から高速道路・バイパス道までの距離を抽出。両道路までどの程度の水田が好適か。	b
4 市街地までの距離 (m)	水田から市街地 (1.5ha以上の住宅地・工場・商業地など) 距離を抽出。市街地までどの程度の距離の水田が好適か。	a
5 市街地の回避 (m)	福島潟から利用水田を直線距離で結んだ際の市街地を回避した距離。オオヒシクイが市街地を回避しているかどうか。	a
<b>水田に関する変数</b>		
6 <b>水田1区画の面積 (a)</b>	水田のポイントに含まれる水田一枚の面積を抽出。オオヒシクイにとってどの程度の水田面積が好適か。	c
7 水田の連続性 (a)	高速道路・バイパス道で水田全体を分断した際の水田の広がり。水田が連続している環境が好適かどうか。	a,b
8 バッファ内の水田総面積 (a)	水田からバッファを発生させ、バッファ内の水田の総面積を抽出。バッファ内においてオオヒシクイにとってどの程度の水田面積が好適か。	c
9 <b>バッファ内の10a以上の水田総面積 (a)</b>	水田からバッファを発生させ、バッファ内10a以上の水田面積を抽出。バッファ内においてオオヒシクイがどの程度の大きさの水田が好適か。	c
10 バッファ内の畦総距離 (m)	水田からバッファを発生させ、バッファ内の畦総距離を抽出。どの程度の畦総距離が好適か。	c
11 <b>水田の排水性 (7段階)</b>	ある時間ごとに70cmの排水があったかどうか。圃場整備水田としての指標。 1: 4時間排除水位70cm深, 2: 4時間排除水位70cm浅, 3: 日排除水位70cm深, 4: 日排除水位70cm浅, 5: 排水不良水位70cm深, 6: 排水不良水位70cm浅, 18: その他地域	d
<b>構造物に関する変数</b>		
12 <b>バッファ内の送電線総密度 (km)</b>	水田からバッファを発生させ、バッファ内の送電線総距離を抽出。バッファ内においてオオヒシクイが送電線を忌避しているかどうか。	e
13 送電線の回避 (本)	福島潟から水田を往復した際に通過する送電線の本数。オオヒシクイが送電線を回避しているかどうか。	e
<b>その他の変数</b>		
14 <b>標高 (海拔) (m)</b>	利用水田のポイントデータで10mメッシュのデータを使用し抽出。湿田の評価としての変数。オオヒシクイがどの高さの標高を好適するか。	a
15 <b>バッファ内の森林総面積 (a)</b>	水田からバッファを発生させた際の森林総面積。オオヒシクイが森林を忌避するか。	a
16 <b>森林エッジ (m)</b>	山際の谷津田的環境を好適するための変数。オオヒシクイが谷津田的環境を忌避するか。	a

### 3-3-4. 統計解析

各調査地において取得された飛行高度情報から、高度Mゾーンおよび高度Lゾーンでの飛行率をフィッシャーの正確確率検定により比較した。福島潟周辺における定点調査から得られた飛行高度に関し、調査メッシュ内と調査メッシュ間においての分散を比較するため一元配置分散分析を行った。解析の結果、分散は定点内よりも定点間で分散が大きかったため(表(1)-3)、各定点で得られた飛行高度の平均値と各メッシュで算出された説明変数を用いて重回帰分析を行った。

表(1)-3 福島潟周辺域の18地点の飛行高度調査定点で得られた飛行高度に関する分散分析の結果。

変動要因	変動	自由度	分散	分散比	P-値	F境界値
メッシュ間	19.8	17	1.2	10.4	2.4E-22	1.7
メッシュ内	37.1	331	0.1			
合計	56.9	348				

重回帰分析に用いた説明変数は、多重共線性を避けるためにスピアマンの順位相関係数により解析し、 $|\rho| \geq 0.7$ となった説明変数の組み合わせについては、どちらか一方の変数が削除された。本研究で使用された変数のうち、ねぐらから定点までの直線距離と累積水田面積もしくは累積道路面積、バッファ内における送電鉄塔の本数とバッファ内における送電線の総延長、累積送電線の総延長と累積送電鉄塔の

本数、バッファ内の水田面積とバッファ内の住宅地面積の間に高い相関関係が認められたため、累積水田面積、累積道路総延長、バッファ内における送電鉄塔の本数、累積送電鉄塔の本数、およびバッファ内の住宅地面積を解析から除外した。各メッシュにおける飛行高度の平均値は正規分布を示していたため (Shapiro-Wilk test:  $W = 0.94559$ ,  $p = 0.2576$ )、各定点で得られた飛行高度の平均値を応答変数として、表(1)-1 に示した14変数のうち、気象に関する2変数とその他の変数、上記5変数を除外した6変数を説明変数として重回帰分析を行った。

採餌群の分布を応答変数としたハビタット解析から得られる生息適地指数と飛行個体数の関係を明らかにするために、はじめに、MaxEntによる生息適地推定が行われた。オオヒシクイの分布を最もよく説明できるバッファサイズを決定するため、バッファサイズがかかわる4変数(表(1)-2:変数番号9~11)とそれ以外の12変数を用い、100mから1900mの10段階のバッファサイズそれぞれについてモデルを作成し、最もAUC値が高かったバッファサイズが採用された。本解析においては、バッファサイズ1900mにおいて元tもAUC値が高かった。多重共線性を避けるために、説明変数間の相関関係をKendallの順位相関係数により明らかにし、 $|\tau| \geq 0.7$ となった説明変数の組み合わせについては、どちらか一方の変数が削除した。本研究で使用された変数のうち、福島潟までの距離と福島潟から市街地を回避したコスト距離、バッファ内における森林の総面積と森林エッジの間に高い相関関係が認められたため、市街地を回避したコスト距離と森林エッジを解析から除外した。オオヒシクイの利用水田のデータ数に対して説明変数が多かったため、MaxEntによる解析後に傾きが小さかった変数を削除し、再度推定した。最終的に選択された環境要因は、福島潟までの距離、水田の標高、水田の排水性、オオヒシクイが利用した水田の1区画の面積、バッファ内における面積が10a以上となる水田の総面積、バッファ内における森林の総面積、およびバッファ内における送電線の総距離の計7変数であった。MaxEntにより生息適地指数が推定された後、飛行高度調査に用いられた定点調査メッシュ内における生息適地指数の最大値とlog変換された時間当たりの飛行個体数の関係をピアソンの相関係数により明らかにした。統計解析にはR(Ver. 3.3.3)が用いられた。

#### 3-4. GPS送信機を用いたオオヒシクイの国内渡りルートの解明

2016年12月、2017年1月、同年12月、および2018年1月の計4回にわたり、新潟県の福島潟周辺において、キャノンネットによるオオヒシクイの捕獲を試みた。2017年1月に3羽のオオヒシクイを捕獲することに成功し、捕獲した全ての個体に携帯電話回線を利用して送受信を行なう首環型送信機

(Wild tracker W300s (Goose), KoEco社製) を装着した(図(1)-2)。送信機は緯度経度と高度を約1時間間隔で取得できるよう設定された。



図(1)-2 オオヒシクイへの首環型送信機の装着。

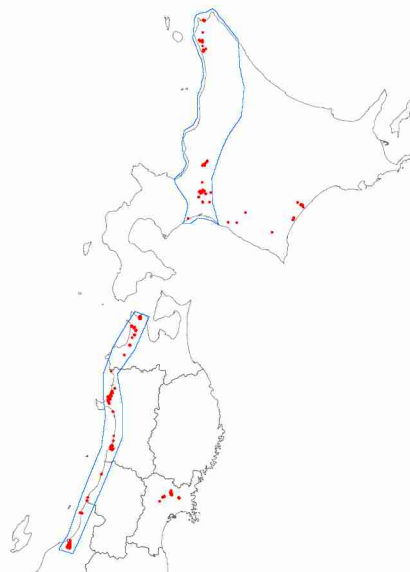
#### 3-5. 測距機を用いた渡りルート上におけるオオヒシクイの飛行高度の取得

渡り時の飛行高度を説明する統計モデルを作成するにあたり、GPS送信機から得られた飛行高度データのみではサンプル数が不十分であったため、測距機を用いた定点調査を青森県の津軽平野および北海道のウトナイ湖、長都沼周辺において実施した。定点は、各調査地域におけるガン・ハクチョウ類の観察者から提供されたオオヒシクイ採餌群の分布情報に基づき、採食域外の農地、海岸線、山間部に配置され、観察範囲が重複しないように津軽平野で12カ所、ウトナイ湖および長都沼周辺で12カ所の定点が設けられた。調査は、オオヒシクイがロシアの繁殖地に飛去するために日本国内を北上する2018年3月に行われた。3-4-2と同様に、オオヒシクイの飛行が頻繁に観察される日の出前~10時、16時~日の入りまでの2つの時間帯に調査が実施された。オオヒシクイの飛び立ち地点から距離が離れている定点では、定点上空に群れが到達するまでに時間がかかることが想定されたため、津軽平野の北部における定点調査で

は上記時間外においても調査が行われた。定点調査後、観察した群れが近傍の農地に降りていないか確認するため、採餌群の探索が日中に行われた。群れの位置情報および飛行高度は、測距機(VECTOR21またはVECTOR21AREO, SAFRAN社製)を用いて、定点上空を通過する全てのガン・ハクチョウ類に対して測位され、同時に群れの鳥種、個体数および飛去する方向が記録された。測距機の赤外線レーザーは約6秒毎の射出が可能となっているため、計測可能範囲である半径2-3km内において、可能な限り群れの飛行高度を連続的に記録した。

### 3-6. 渡りルートにおける鳥感度マップの開発

渡りルートの鳥感度マップを作成するため、渡り時の飛行高度を応答変数とし、地形や土地利用を説明変数とする飛行高度予測モデルを作成した。利用した飛行高度データは、本研究で取得されたGPS送信機と測距機によるものに加え、これまでに研究室で実施された福島潟および秋田県を中心とした定点観察から取得された飛行高度データである。飛行高度データ取得地点を図(1)-3に示す。メッシュサイズは、メッシュ内で算出される変数の中で最も飛行高度を説明していた変数である標高差(4-5参照)に着目して、標高差のばらつきが最も大きくなるメッシュサイズである250mに設定した。



図(1)-3 渡りルートにおける鳥感度マップ作成に利用したヒシクイ類の飛行高度取得地点。赤色がヒシクイの飛行高度情報を取得した調査地点を、青枠内が推定値を外挿する渡りルートを示している。

説明変数には、水田、畑地、草地、裸地を合計した草本植生面積、森林面積、市街地面積、水域面積、平均標高、最高標高、最低標高、標高差、標高の標準偏差、ヒシクイ類が利用するねぐらからの距離、1級及び2級河川からの距離を用いた。前者の土地利用面積に関する4変数は、約10mメッシュで整備された日本域高解像度土地利用土地被覆図(バージョン16.09)(JAXA 2016)より算出した。標高に関するデータは、約30mメッシュで整備されたALOS全球数値地表モデル(DSM)第1.1版(JAXA 2017)の値より、各メッシュ内で平均標高、最高標高、最低標高、標高の標準偏差、標高差(最高標高-最低標高)を計算した。ねぐら水域からの距離は、環境省の重要生態系監視地域モニタリング推進事業(モニタリングサイト1000)のガンカモ類調査(環境省 2015a)、北海道マガン・ヒシクイ合同調査(牛山ら 未発表)および観察者からの聞き取りでヒシクイ類の生息が確認されたねぐら、および本研究で送信機を装着した追跡個体が2日以上滞在したねぐら105地点を用いて算出した。河川からの距離は、国土数値情報(河川)データ2009年度水系(国土交通省 2012)の1級および2級河川区間のみを用いて算出した。説明変数間の相関を求め、相関の強い( $|r| > 0.5$ )変数がある場合にはどちらかを除き、残った変数をその後の解析に利用した。

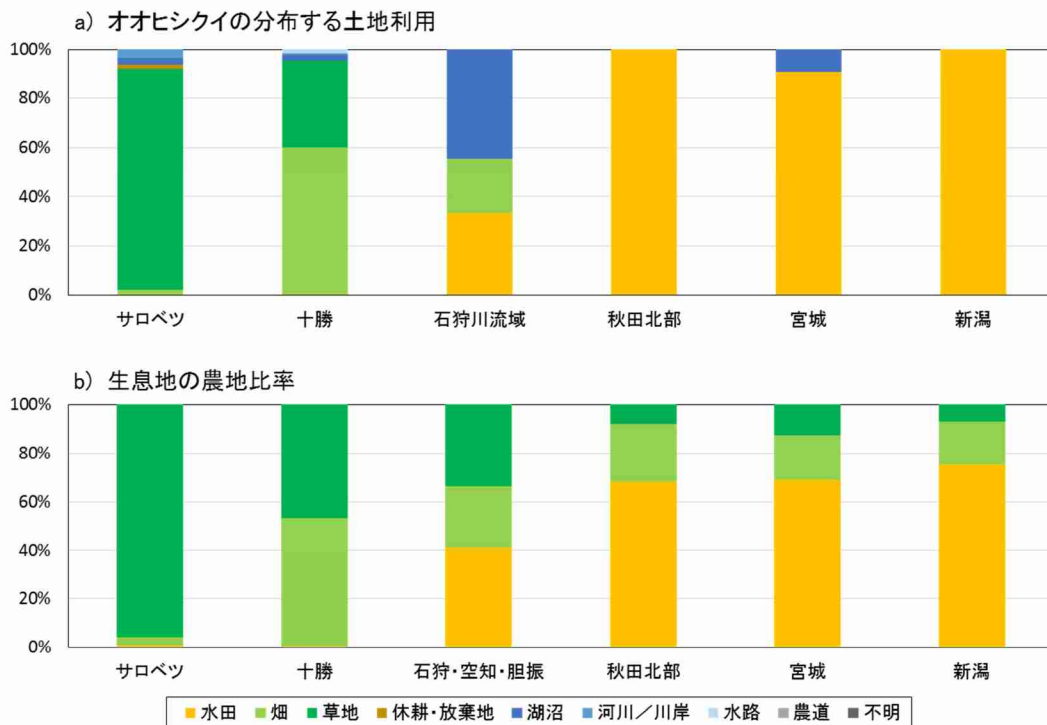
250mメッシュごとに飛行高度を平均化し、現在国内で運用されている最大の風車高(130m)よりも低かつ

たメッシュには1を、高かったメッシュには0を代入し、応答変数として用いた。飛行高度情報のあるメッシュのうち、80%をモデル推定に利用するトレーニングデータ、20%を精度検証に利用するテストデータにランダムに振り分けた。トレーニングデータを用いて一般化線形モデル (GLM) と一般化加法モデル (GAM) のロジスティック回帰分析の総当たりのモデル選択を行ない、各モデルで赤池情報量基準 (AIC) が最小となったベストモデルを採用し、風車高以下の高度を飛行する際に影響する要因とその予測式を特定した。テストデータを用いてAUCを算出し、モデルの精度検証を行った。作成された予測式を、青森から新潟までの日本海側、および北海道の道南から道北にかけての渡りルートに外挿した。両地域の外挿範囲は、本研究で解明された渡り経路、分布調査による採食利用地点、および既存情報や未発表情報によりヒシクイが観察されている生息地を含む範囲を包含する最外郭地域として設定した。すべてのGIS解析にはArcMap 10.4.1を、その他全ての統計解析はR3.4.4を使用した。

#### 4. 結果及び考察

##### 4-1. 全国の中継地および越冬地における汎用的環境選択モデルの開発

オオヒシクイの分布する土地利用と生息地における農地比率を図(1)-4に示した。中継地および越冬地周辺の景観要素は、サロベツや十勝では主に畑と草地であり、石狩川流域から本州にかけては畑と草地に、水田が主要な景観要素として加わった。オオヒシクイの土地利用は生息地の農地比率に依存しており、両者に構成比の間に著しい差異は見られなかった。また、サロベツ・十勝地方と石狩～本州の間に明らかな農地景観違いが存在していたことから、解析にあたっては大きく2つの地域に分け、サロベツ地域と十勝地方を草地モデル、それ以外の地域を水田モデルとして生息適地を推定した。



図(1)-4 オオヒシクイの分布する土地利用 (a) と生息地内における農地比率 (b) .

全国の主要集団飛来地における分布調査により、草地モデルの推定範囲では103メッシュ、水田モデルの推定範囲では41メッシュの在地点をそれぞれ積雪のない時期に取得し、解析に利用した。CARモデルで不在地点とみなすメッシュ数は、草地モデルで30メッシュ、水田モデルで36メッシュであった。

多重共線性を考慮した結果、草地モデルでは草地面積、畑地面積、ねぐら水域からの距離、市街地からの距離、河川からの距離、および最高標高の計6変数を、水田モデルでは水田面積、市街地面積、ねぐら湖沼からの距離、河川からの距離、および最高標高の計5変数を利用して、モデルを構築した。MaxEntで推定した草地モデルでは、草地面積、ねぐら水域からの距離、畑地面積、最高標高の順に寄与率が高

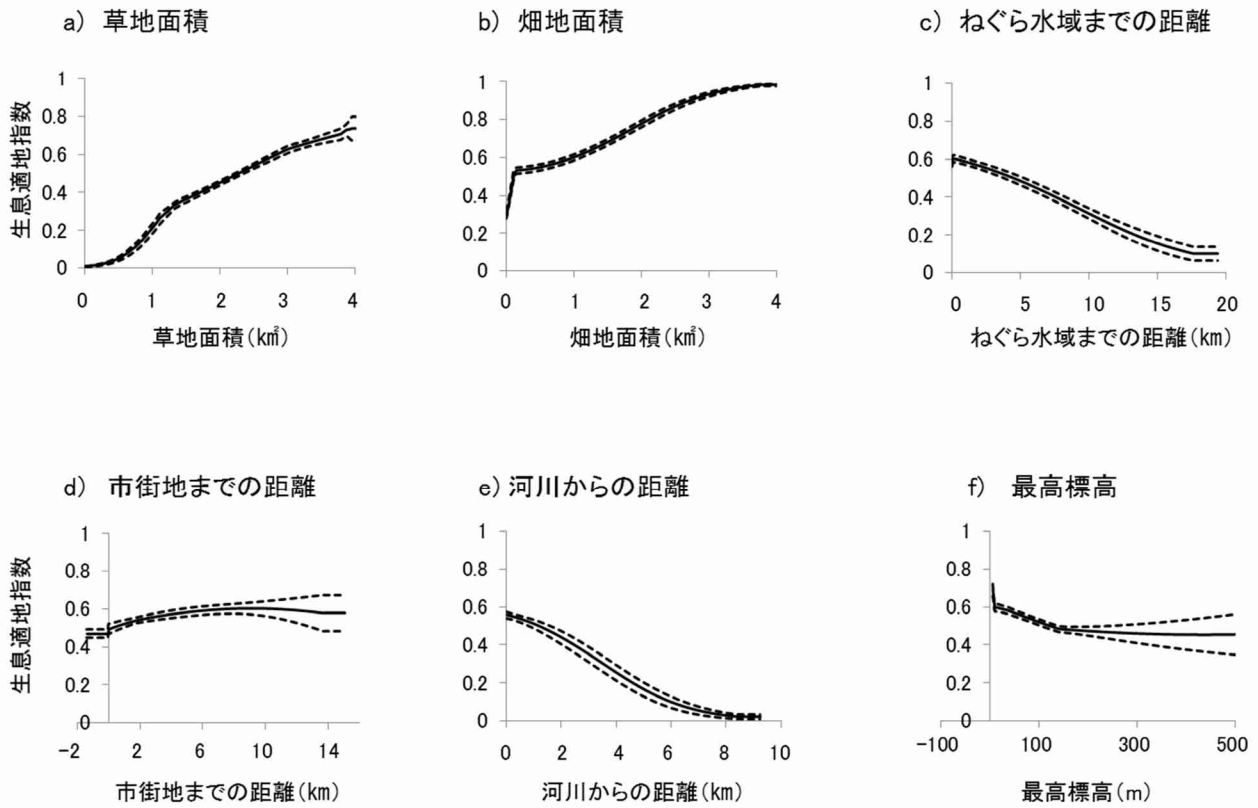
く、草地面積、畑地面積、市街地からの距離とは正の効果、ねぐら水域までの距離、河川までの距離、最高標高は負の効果が見られた（表(1)-4、図(1)-5a）。CARで推定した草地モデルでは、6変数全てにおいて有意性が見られ、草地面積、畑地面積、市街地からの距離では正の効果、ねぐら水域からの距離、河川からの距離、および最高標高では負の効果が見られた（表(1)-4、図(1)-5b）。MaxEntで推定した水田モデルでは、水田面積、ねぐら水域からの距離、市街地面積、最高標高の順に寄与率が高く、水田面積は正の効果、市街地面積、ねぐら水域までの距離、および最高標高は負の効果が見られた（表(1)-4、図(1)-6a）。CARで推定した水田モデルでは、水田面積との間に有意な正の効果が見られたが、市街地面積、ねぐらからの距離、河川からの距離、および最高標高とは負の効果が見られた（表(1)-4、図(1)-6b）。

モデルの精度を示すAUCの値はMaxEntよりもCARモデルで高かったため（表(1)-4）、生息適地マップはCARモデルで作成した。CARモデルの推定値とMaxEntモデルの推定値をランク化した際の相関は草地モデル（ $r = 0.91$ ）および水田モデル（ $r = 0.93$ ）ともに高かったため、MaxEntモデルでも十分代用できることが示された（図(1)-7）。

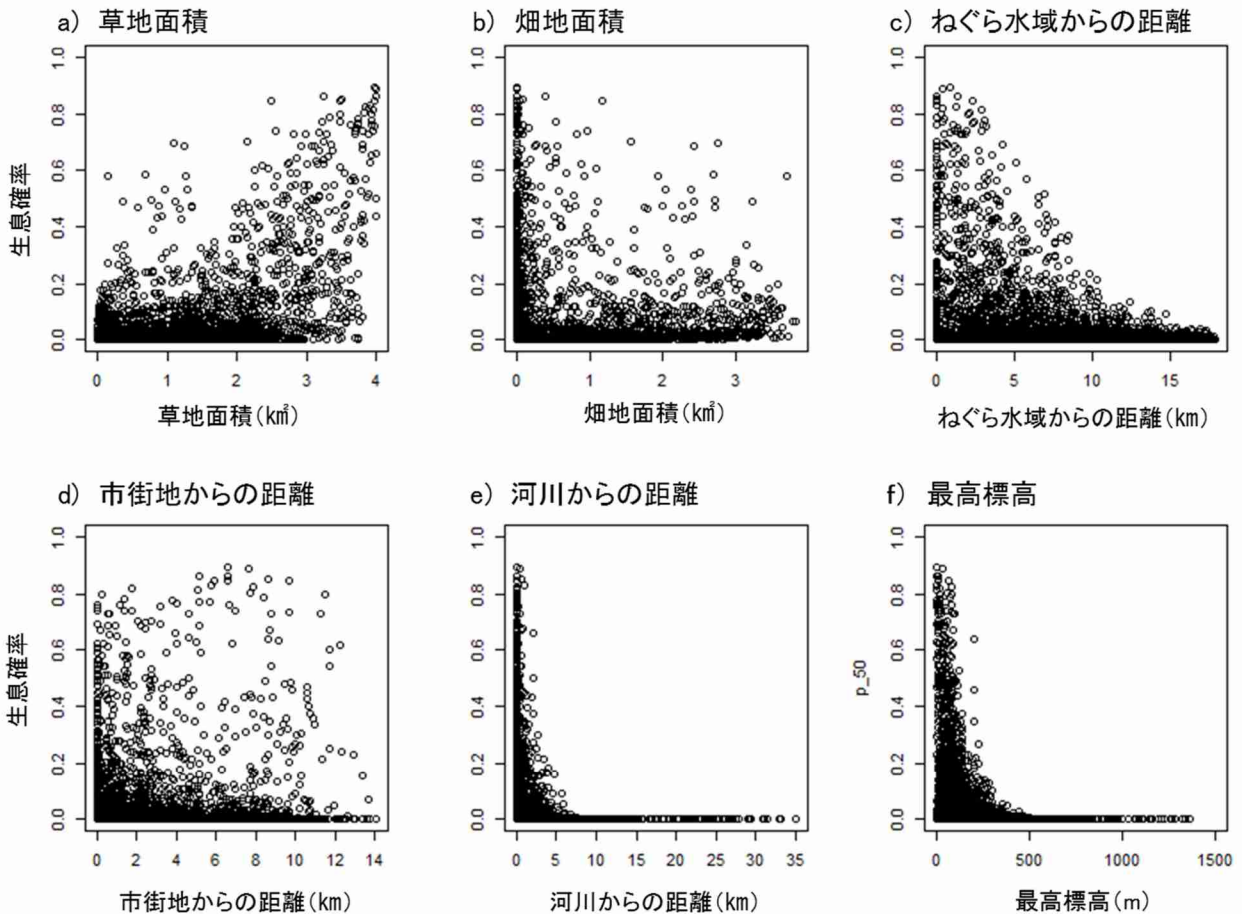
送信機を装着したオオヒシクイが滞在したメッシュにおけるCARモデルで推定された生息確率は、全体の推定範囲メッシュの生息確率よりも高い値を示していた（図(1)-8）。道東・道北地域の草地モデルでは、調査した十勝地方やサロベツ・稚内地域のほか、釧路地域も生息確率が高く予測された（図(1)-9a）。道央・本州地域の水田モデルでは、青森県津軽地方、茨城県の霞ヶ浦周辺、山形県、新潟県、富山県、石川県の日本海側の沿岸地域、島根県の宍道湖周辺などで生息確率が高くなった（図(1)-9b）。在地点の生息確率は、草地モデルでは0.01~0.86、水田モデルでは0.02~0.30の範囲に含まれていた。本種の分布域を定義する際に生息確率の閾値を設定する場合は、在地点の最小値である0.01（草地モデル範囲）、0.02（水田モデル範囲）が現時点では推奨されるだろう。

表(1)-4 MaxEntおよびCARで作成されたオオヒシクイの汎用的環境選択モデル。草地モデルは道東・道北地域、水田モデルは道央・本州地域の在地点を利用して推定した。AUCはモデルの精度を示し、1に近いほど精度が高い。CARモデルの\*は有意差のある変数を示す。R-hatはモデルの収束の良さを示し、1~1.1以下だと許容範囲内とされる（Gelman et al. 2004）。

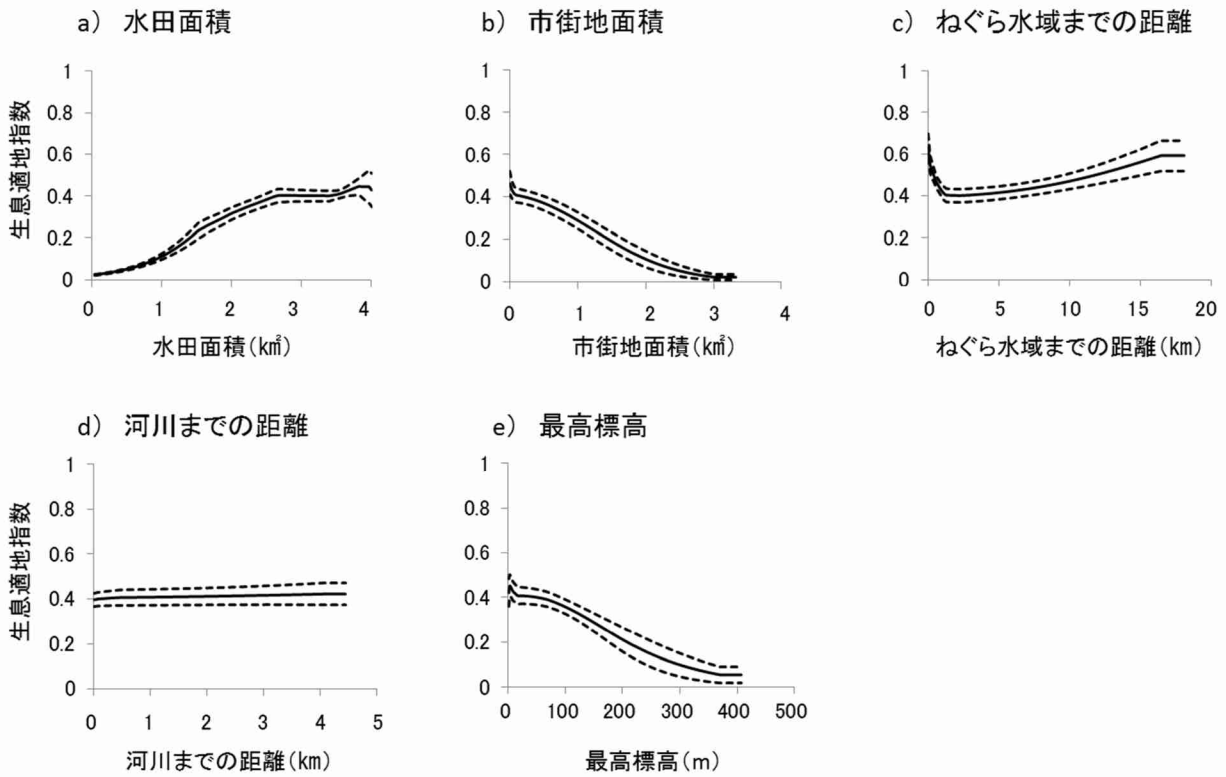
変数	草地モデル			水田モデル		
	MaxEnt (AUC=0.709)	CAR (AUC= 0.742)		MaxEnt (AUC=0.722)	CAR (AUC= 0.744)	
	寄与率(%)	係数 中央値[95%CI]	R-hat	寄与率(%)	係数 中央値[95%CI]	R-hat
切片	-	-5.7 [-6.9,-4.7]	1.00	-	-5.1 [-7.2,-3.3]	1.00
草地面積	41.8	1.2 [0.9,1.6]*	1.00	-	-	-
畑地面積	16.7	0.9 [0.6,1.3]*	1.01	-	-	-
水田面積	-	-	-	53.1	0.5 [0.2,1.0]*	1.01
市街地面積	-	-	-	7.9	-0.6 [-1.6,0.2]	1.02
ねぐら水域からの距離	20.4	-1.1 [-1.6,-0.2]*	1.00	31.2	-0.4 [-1.0,0.2]	1.03
市街地からの距離 (1.5ha以上)	3.8	0.4 [0.1,0.6]*	1.03	-	-	-
河川からの距離 (2級河川以上)	7.2	-2.1 [-3.8,-0.8]*	1.01	0.8	-0.1 [-0.8,0.5]	1.02
最高標高	10.1	-1.3 [-2.3,-0.8]*	1.00	7.0	-1.5 [-4.0,0.9]	1.00



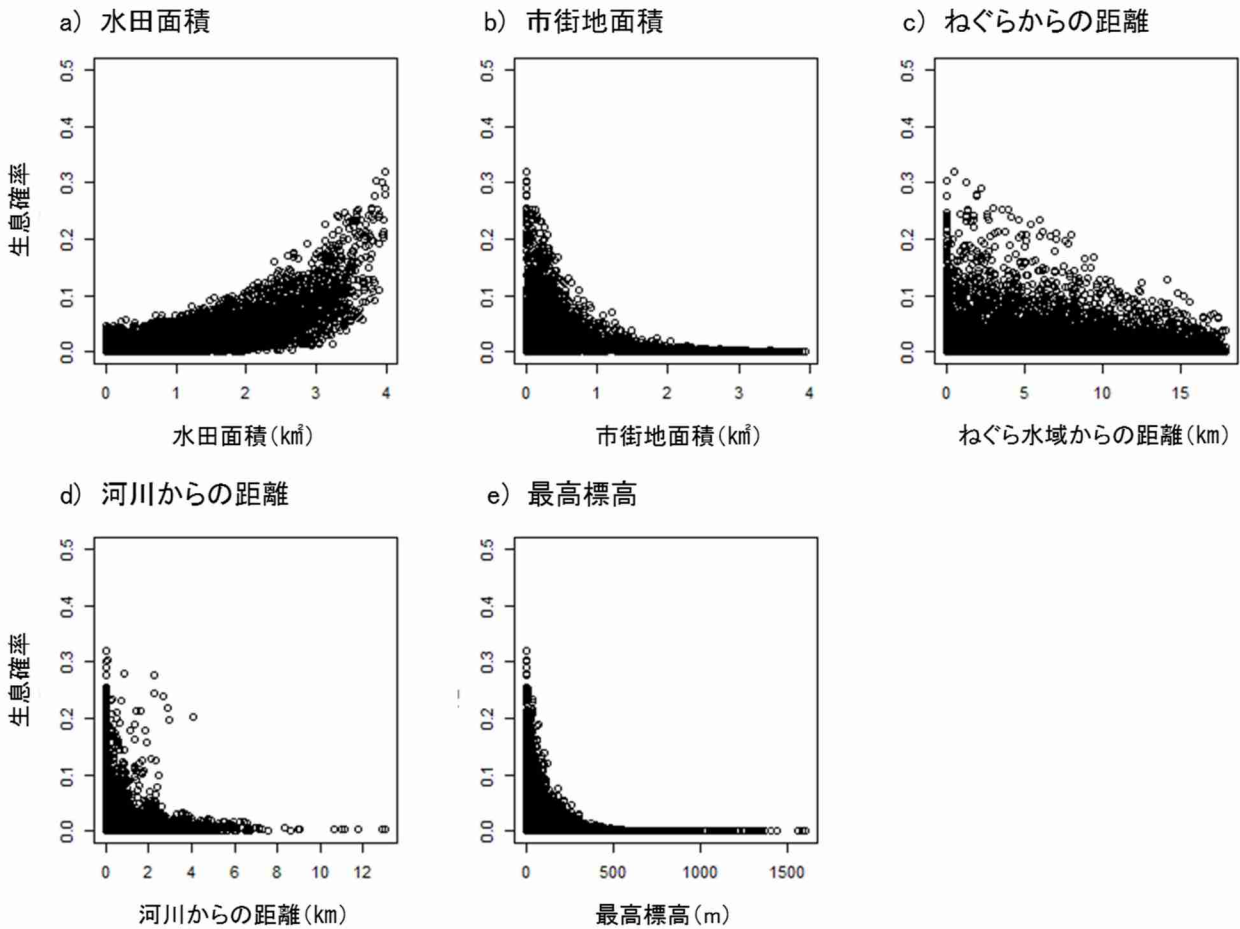
図(1)-5a 道東・道北地域を対象としたMaxEntモデルで推定した生息適地指数と説明変数との関係.



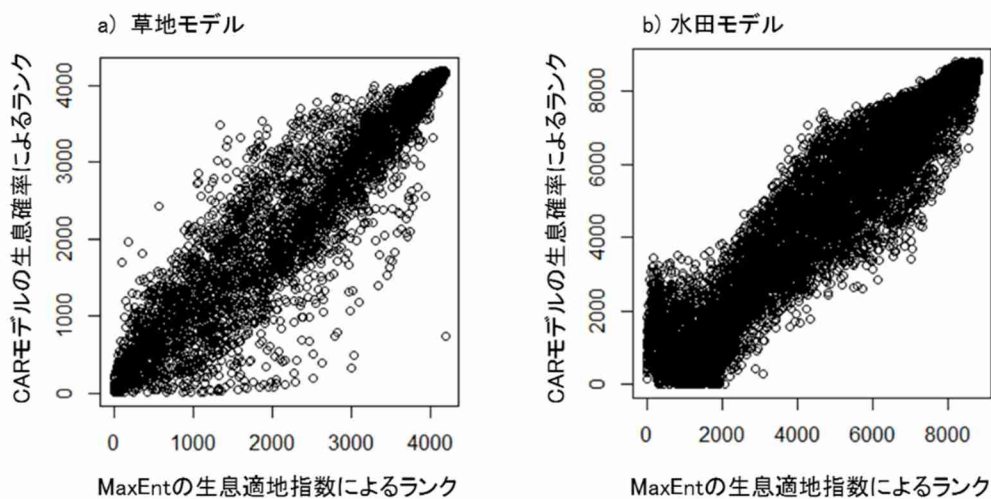
図(1)-5b 道東・道北地域を対象としたCARモデルで推定した生息確率と説明変数との関係.



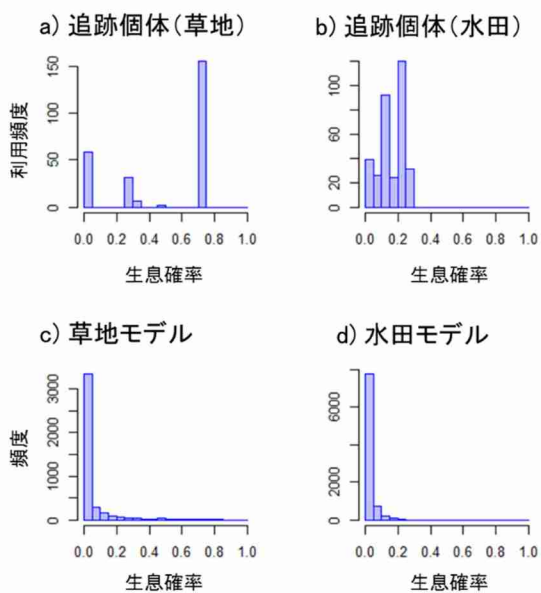
図(1)-6a 道央・本州地域を対象としたMaxEntモデルで推定した生息適地指数と説明変数との関係。



図(1)-6b 道央・本州地域を対象としたCARモデルで推定した生息確率と説明変数との関係。

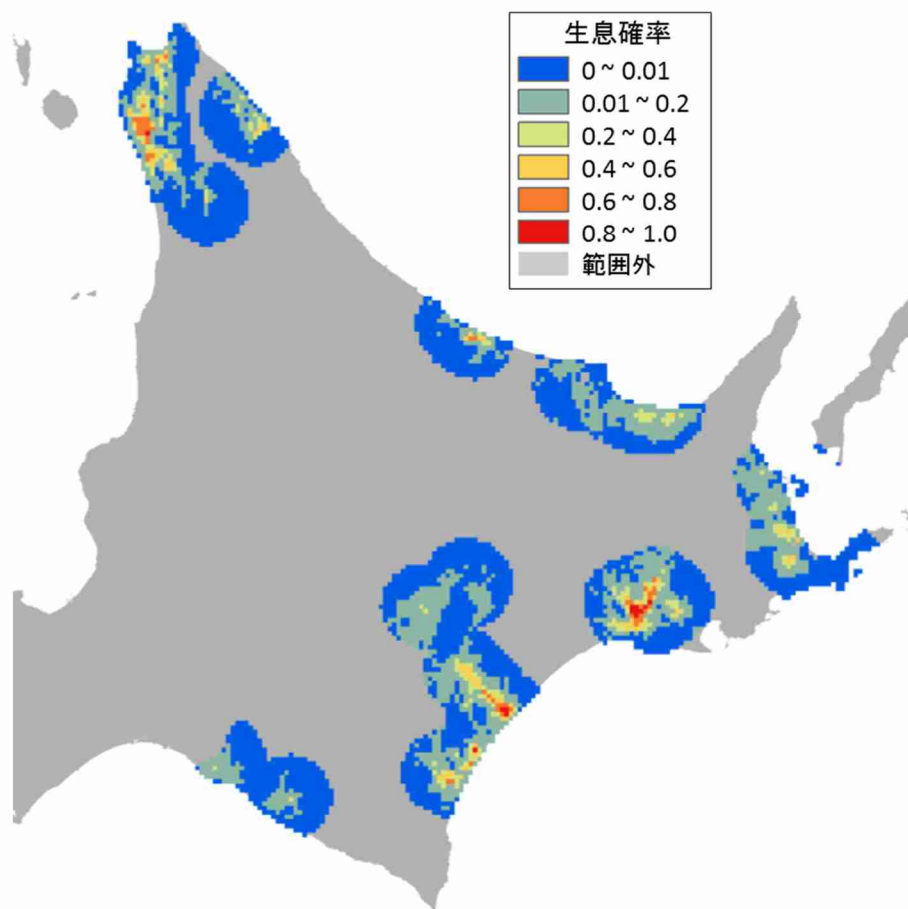


図(1)-7 MaxEntとCARモデルによる推定値の関係. (a)は道東・道北地域を対象とした草地モデルを、(b)は道央・本州地域を対象とした水田モデルを示す.

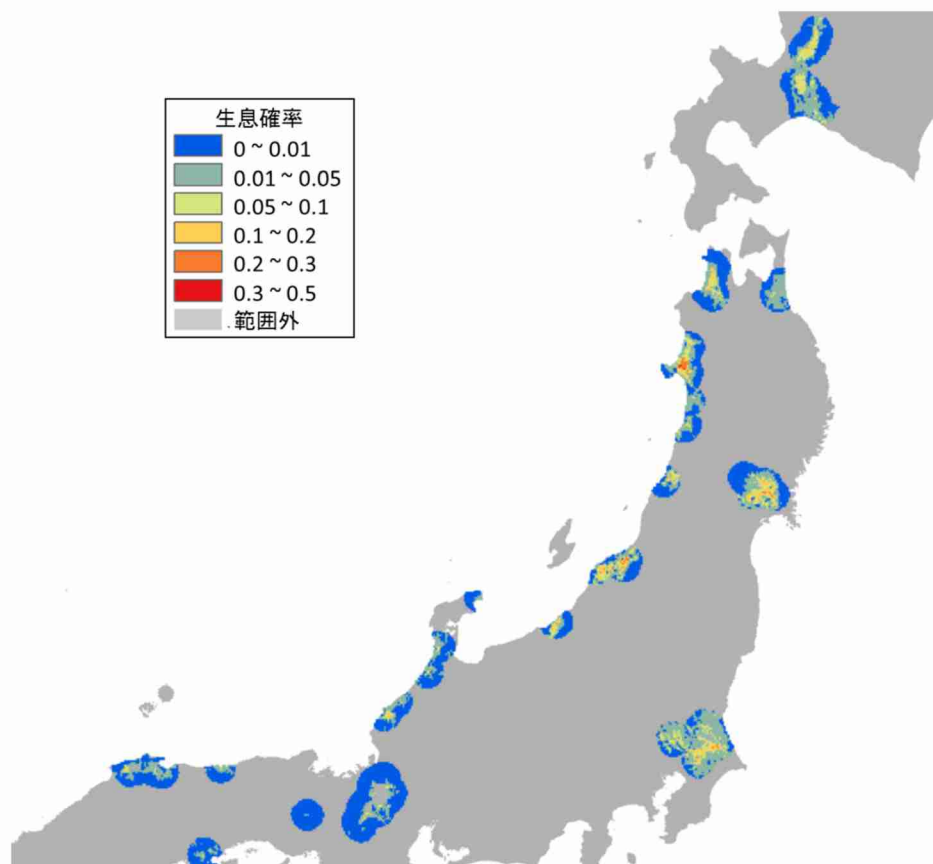


図(1)-8 送信機を装着したオオヒシクイ追跡個体の在地点における生息確率 (a;草地モデル、b ; 水田モデル) と、推定範囲全体のメッシュの生息確率の頻度分布 (c;草地モデルが、d ; 水田モデル) .





図(1)-9a CARモデルで推定した道北・道東地域におけるオオヒクイの潜在的生息適地.



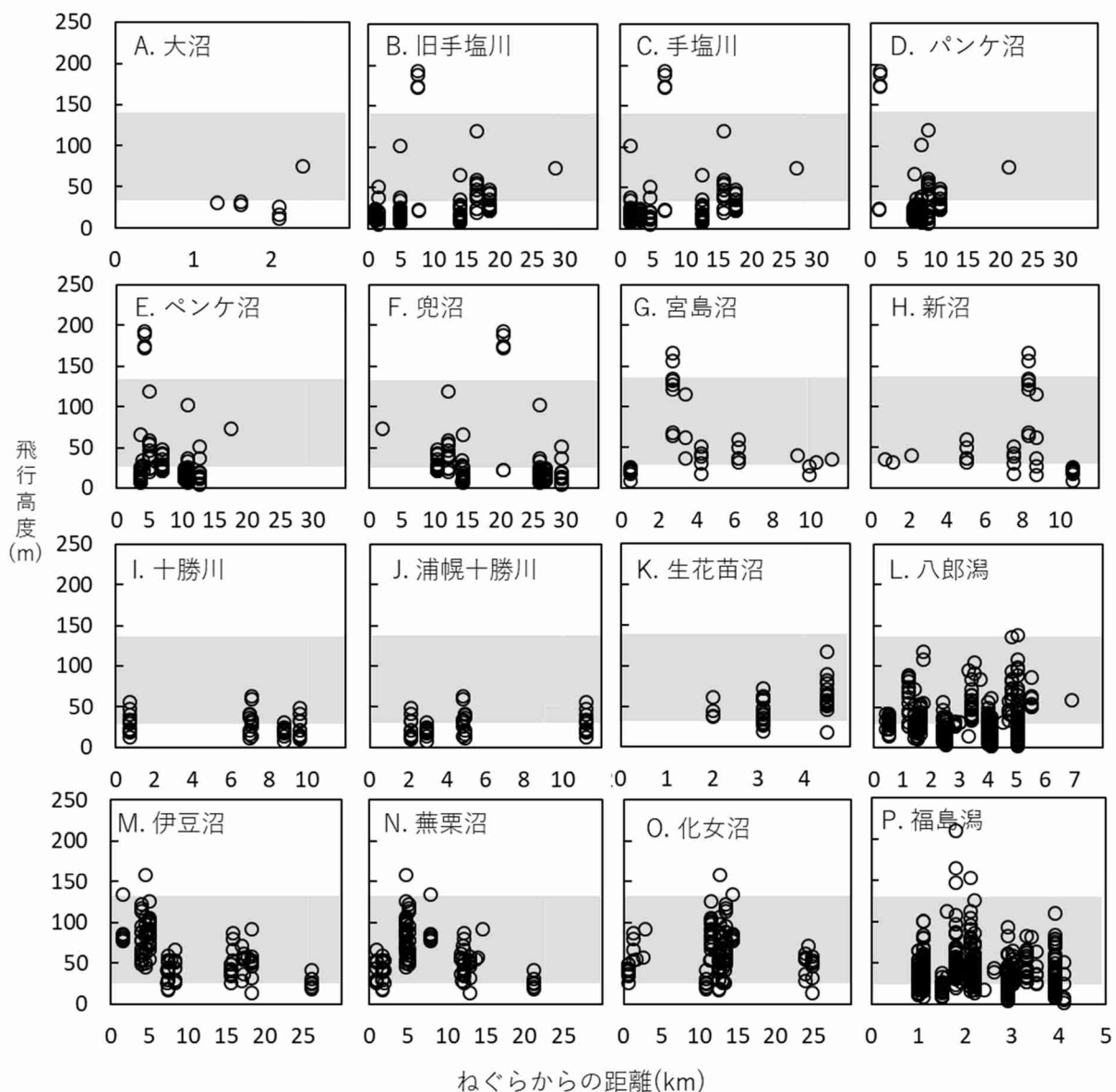
図(1)-9b CARモデルで推定した道央・本州地域におけるオオヒクイの潜在的生息適地.

#### 4-2. 高度測定機器の精度検証

GPS送信機で測定した高度とドローンが示した高度では、平均9.8m、最大41mの誤差があり、レーザー距離計では平均1.4m、最大6.4mの誤差がみられた。

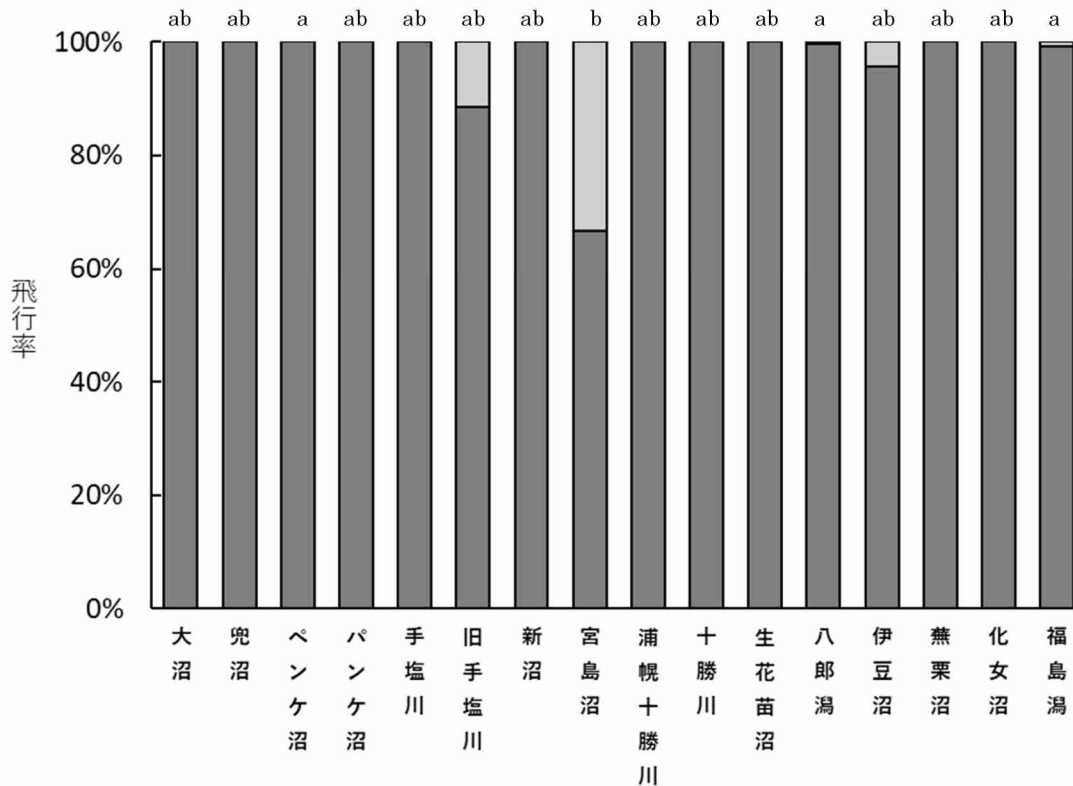
#### 4-3. 中継地と越冬地における飛行高度

16ヶ所の湖沼および河川周辺域において、それぞれの累計として、大沼7、兜沼1、ペンケ沼42、ペンケ沼2、手塩川50、旧手塩川35、新沼16、宮島沼18、浦幌十勝川26、十勝川21、生花苗沼38、八郎潟345、伊豆沼47、蕪栗沼21、化女沼25、および福島潟566、計1,260のオオヒシクイの群れの飛行高度を取得した。図(1)-1で示した調査エリアA~HのうちB、C、D、およびGは、一つの生息地内にオオヒシクイがねぐらとして利用している湖沼および河川が複数箇所確認された。これらの湖沼については、飛行高度を測定したオオヒシクイが、いずれかのねぐらに帰属している個体なのかを判断できないため、それぞれの湖沼をねぐらとして利用している場合を想定し、それぞれについて生息地内におけるねぐらからの距離と飛行高度の関係を示した。すべての生息地およびねぐらに共通して、ねぐらからの距離と飛行高度に明瞭な関係は認められず、また、ねぐら周辺の採食地だけでなく、外郭付近においてもLゾーンおよびMゾーンを飛行している群れが多く認められた(図(1)-10A~P)。



図(1)-10 16ヶ所の中継地および越冬地におけるオオヒシクイの飛行高度。一つの白丸が一群れの飛行高度を示す。灰色の領域は風車回転域である地上高30~130mの範囲を示す。

図(1)-11に、それぞれの生息地ごとの高度L・Mゾーンと高度Hゾーンの利用内訳を示す。すべての生息地において、高度L・Mゾーンを飛行している個体が多く見受けられ、高度Hゾーンでの飛翔が確認されたのは、旧手塩川で11.4%、宮島沼で33.3%、八郎潟で0.3%、伊豆沼で4.3%、および福島潟で0.7%であった。生息地間における高度L・M飛翔率と高度H飛翔率を比較したところ有意差がみとめられ (Fisher's Exact Test:  $p < 0.001$ )、特に宮島沼とペンケ沼間 (Pairwise Fisher's test:  $p < 0.04$ )、宮島沼と八郎潟間 (Pairwise Fisher's test:  $p < 0.01$ )、宮島沼と福島潟間 (Pairwise Fisher's test:  $p < 0.01$ ) で高度L・Mと高度Hの飛翔率に有意差が認められた。



図(1)-11 16ヶ所の中継地・越冬地におけるオオヒシクイの高度L・M飛翔率. ねぐら周辺域で取得した飛行高度の内訳を高度L・Mゾーン (<130m)、高度Hゾーン ( $\geq 130$ m) で示した. 濃灰色は高度L・Mゾーン飛翔率を、薄灰色は高度Hゾーン飛翔率を示しており、比率差の有意性をアルファベットで示した (Pairwise Fisher's exact test  $p < 0.05$ ) .

宮島沼を除く全ての生息地で90%以上のオオヒシクイが高度L・Mゾーンで飛行しており、ねぐらおよび周辺の採食地においては、ねぐらからの距離に関係なく風車への衝突リスクが高い高度帯を飛行していることが明らかとなった。宮島沼では、先述したように高度Hゾーンの飛翔率が約30%にも上り、ほかの生息地における高度Hゾーン飛翔率よりも高かった。これは、宮島沼付近 (図(1)-1C. 調査地点2) で行った飛行高度調査に渡りの時期が重なっていたことが影響している可能性がある。

次に、飛行高度と環境要因の関係を検証した福島潟において、朝の時間帯におけるねぐら立ちの飛行高度が取得できた18地点における飛行高度の分散を地点間と地点内で比較すると、地点間の分散の方が大きく、地点間に有意差が認められた (表(1)-5)。地点ごとの飛行高度の平均値を応答変数とし、表(1)-1に示した環境変数を説明変数とした重回帰分析をしたところ、モデルおよび各変数に有意性は認められなかった (F検定:  $p=0.3946$ ,  $R^2=0.365$ ; 表(1)-5)。

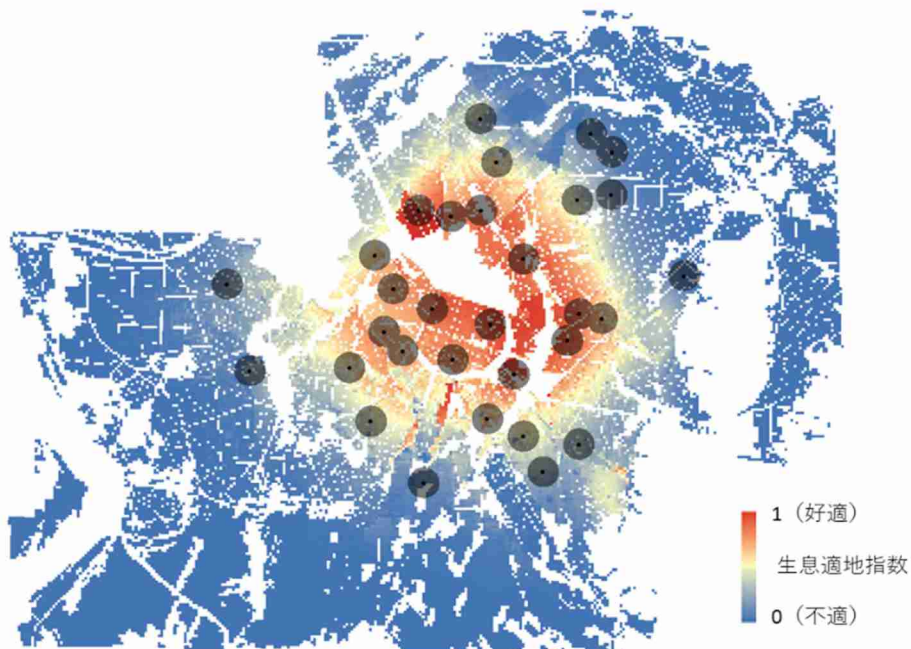
飛行高度の取得は調査地を600mメッシュで区切った276メッシュのうちの31メッシュで行っているが環境要因と飛行高度の関係を明らかにするには、より多くのメッシュを対象に環境網羅的に調査をする必要があると考えられる。また、福島潟において得られた飛行高度のほとんどが50mほどであり、渡りルート上における飛行高度 (4-5参照) と比べて高度差はほとんど認められなかった。モデルを構築できな

かった原因としては、採食地内における飛行高度のばらつきがほとんど認められなかったことが影響している可能性がある。さらに、解析上の問題点として、飛行高度はメッシュに含まれる環境に対して独立に決定されるものではなく、出発地および目的地との位置関係や、飛行経路上における環境要因の履歴、学習行動に強く影響をうけて意思決定される行動特性であると考えられる。飛行高度を高精度予測するためにはメッシュデータとして扱われる従来の解析方法ではなく、より飛行行動の実態に則した新たな解析手法の開発が必要となるだろう。

表(1)-5 福島潟における飛行高度を説明する重回帰モデル。  $\beta$  は説明変数の偏回帰係数を、 $p$  は係数の有意確率を示す。

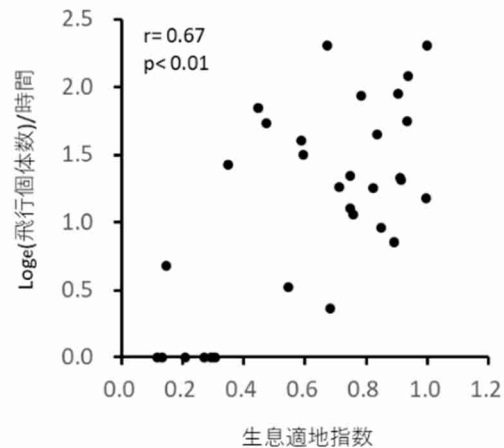
説明変数	$\beta$	$p$
ねぐらからの距離(km)	5.605	0.338
水田面積(m <sup>2</sup> )	-0.000	0.321
送電線総延長(m)	0.031	0.127
道路総延長(m)	-0.001	0.962
累積住宅地面積(m <sup>2</sup> )	-0.002	0.611
累積送電線総延長(m)	-0.688	0.155

福島潟におけるオオヒシクイの生息適地指数を算出するために、MaxEntにより生息適地モデルが作成され、得られた生息適地指数と飛行個体数の関係を明らかにした。モデルでの重要度の高かった変数は、福島潟までの距離および標高であり、福島潟までの距離が近く、標高が低い水田においてオオヒシクイの存在確率は増加していた。福島潟周辺域の採餌適地を推定したところ、福島潟を中心とした水田帯に好適地が広がっていた(図(1)-12)。



図(1)-12 福島潟周辺域におけるオオヒシクイの潜在的な生息適地分布。MaxEnt解析によって得られた潜在的な採餌環境の分布を示しており、黒丸が飛行高度調査地点を、黒域は飛行高度調査範囲を示している。

飛行個体数をカウントした定点ポイントは、生息適地指数0.12~ 1.00の範囲であり、飛翔個体数と生息適地指数との間には、有意に強い正の相関が認められた（Pearsonの相関係数： $r=0.67$ ,  $p<0.01$ ）（図(1)-12, 13）。一般的に、大型水禽類のハビタット解析は地上に降りている採餌群の分布データを用いることから、飛行時の分布は解析に反映されていない。しかしながら、本研究で対象としたオオヒシクイ採餌群の生息適地指数と飛行個体数の間には密接な関連性が認められた。これは、集団飛来地周辺での飛行のほとんどが、ねぐらと採餌好適地もしくは採餌好適地内でのパッチ間の移動であることに起因していると考えられる。少なくとも本種においては、2次元的な分布情報を利用した生息適地指数を用いて、3次元的な衝突リスクを表現することが可能であることが明らかとなった。

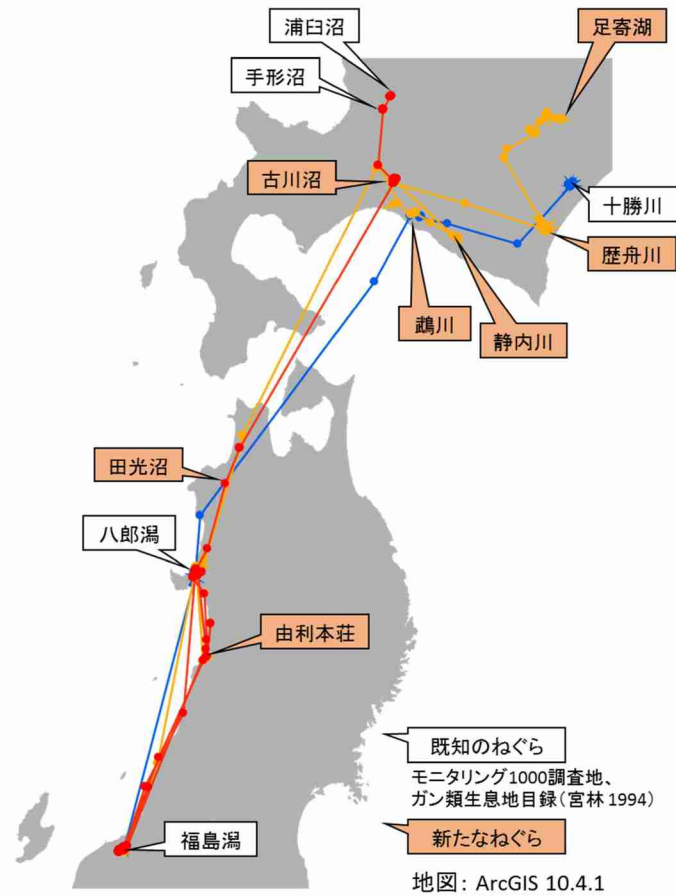


図(1)-13 生息適地指数と飛行個体数の関係。  
MaxEntで得られた生息適地指数と時間当たりの飛行個体数の関係性をPearsonの相関係数を用いて調べたところ有意に強い正の相関が認められた。

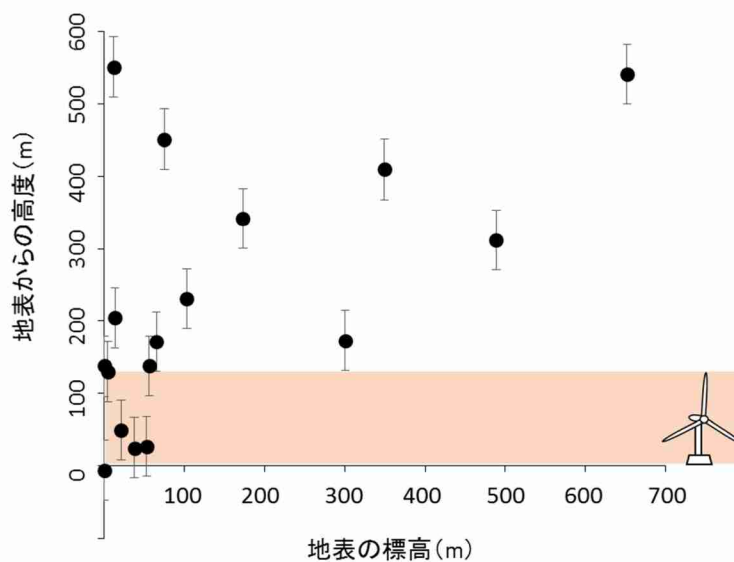
#### 4-4. オオヒシクイの国内渡りルートと飛行高度

福島潟において2017年1月31日に3羽のオオヒシクイを捕獲し、首環型送信機を装着した。送信機を付けた個体は2月上・中旬に秋田県北部の大潟村へ、3月中旬にはすべての個体が北海道の中継地に移動し、四月中旬まで国内の渡りが追跡できた。2日以上滞在した場所をねぐらと定義すると、環境省の重要生態系監視地域モニタリング推進事業(モニタリングサイト1000)のガンカモ類調査(環境省 2015a, 2015b, 2017)とガン類生息地目録(宮林 1994)で記載されている5カ所に加え、7カ所の新たなねぐらの中継地として利用していることが明らかになった(図(1)-14)。

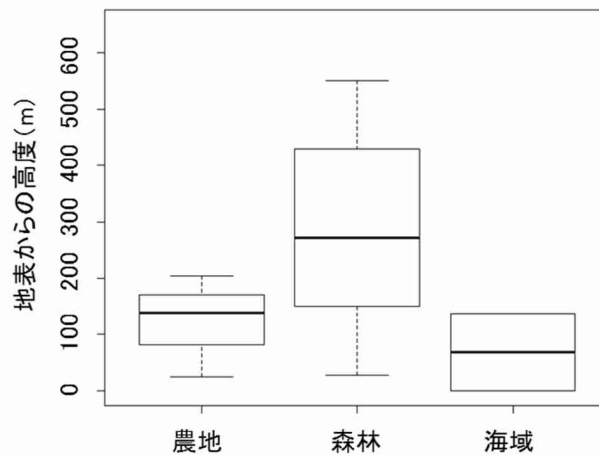
追跡個体では17地点で渡り時の飛行高度が取得でき、最大で地表から592.3mの高度で飛行していた(図(1)-15)。また、土地利用別の高度を比較すると、森林で比較的高高度を飛行しており、農地などの平野部で低高度を飛行する傾向がみられた(図(1)-16)。森林は高低差の大きい山地を含むため、計測された地点の前後でさらに高標高の地域を飛行し、より高高度になっていた可能性が考えられる。



図(1)-14 送信機を装着したオオヒシクイの渡りルート. 点は位置情報が取得できた場所で、時系列順に点を線をつないだ. 同色の点と線は同個体を表す. 吹き出しは同個体が2日以上滞在したねぐらを示す. 白が重要生態系監視地域モニタリング推進事業(モニタリングサイト1000)ガンカモ類調査の調査地もしくはガン類生息地目録に記載されている既知のねぐらを、オレンジは追跡個体により利用が確認された新たなねぐらを示す.



図(1)-15 オオヒシクイの送信機装着個体の渡り時の飛行高度. オレンジ部分は風車の高さを示す. エラーバーは送信機の測定誤差の最大値である $\pm 41\text{m}$ である.

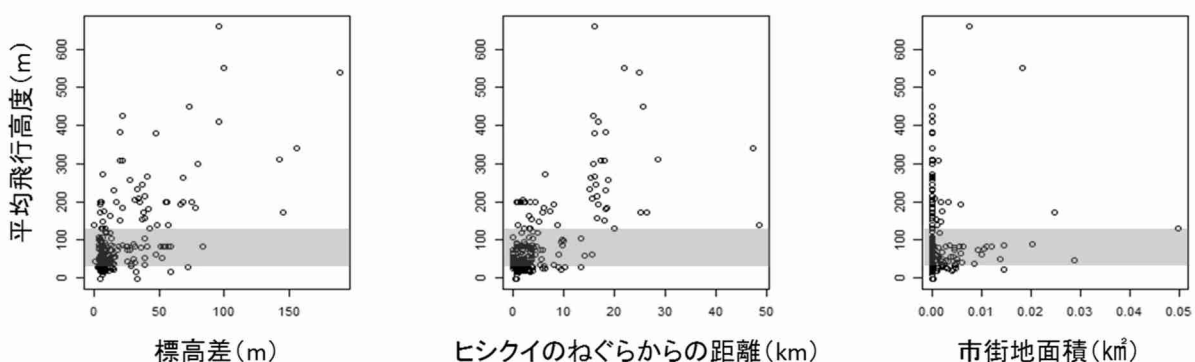


図(1)-16 オオヒシクイの送信機装着個体の渡り時の土地利用別飛行高度.

#### 4-5. 渡りルートにおける鳥感度マップの作成

解析に利用した250mメッシュは224メッシュあり、そのうち風車高以下が174メッシュ、風車高以上が50メッシュ存在した。トレーニングデータは風車高以下が139メッシュ、風車高以上が40メッシュからなり、検証用のテストデータは風車高以下を35メッシュ、風車高以上を10メッシュ利用した。

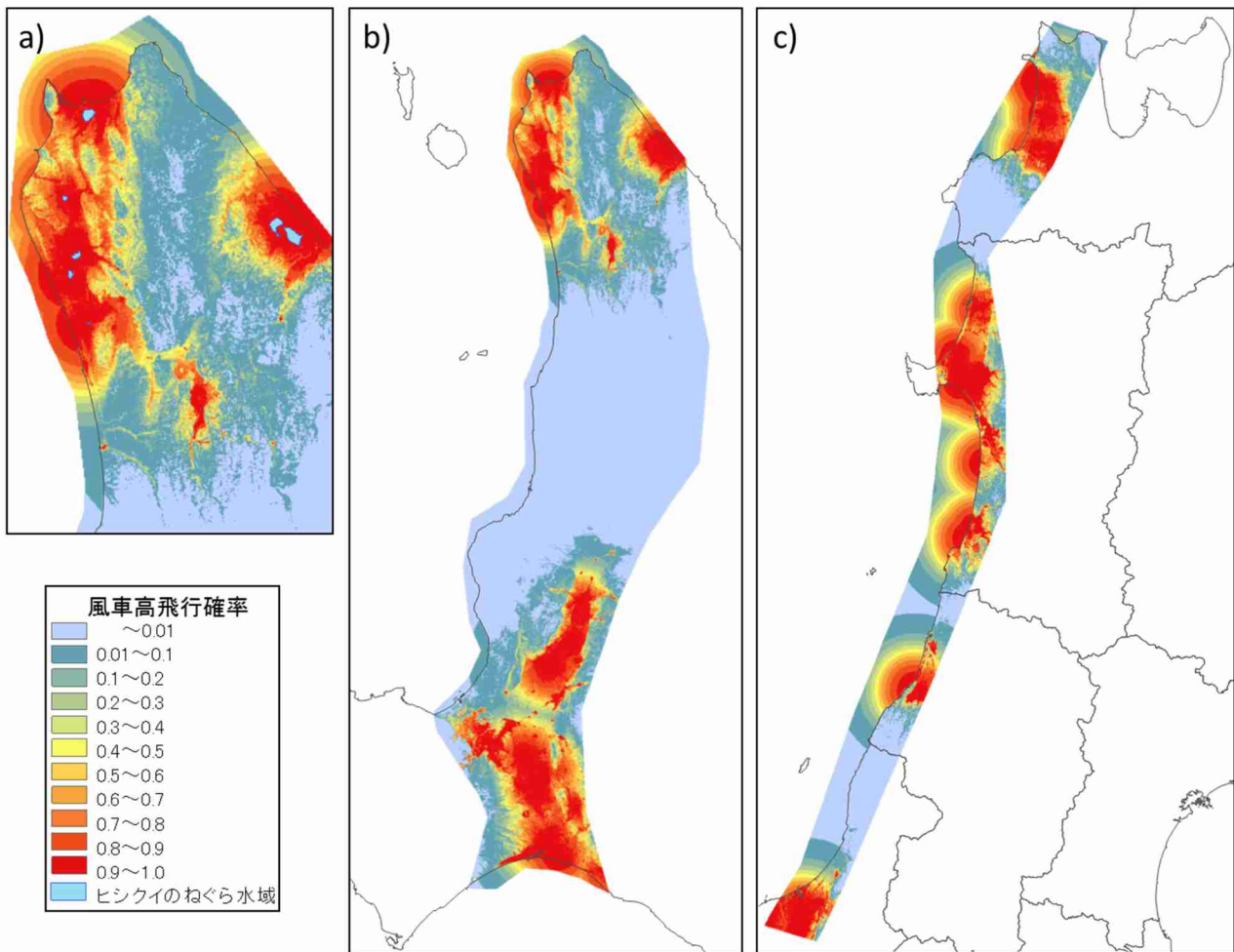
説明変数間の相関関係としては、標高に関連する変数同士で全て相関係数が0.5以上と高い値を示したため、標高の各変数とペアワイズの相関係数が0.5以下の説明変数を用いて、GLMとGAMのモデル選択を行った。AICの値が最も低くなった変数の組み合わせは、標高差、ヒシクイのねぐらからの距離、市街地面積を説明変数とするGLMモデルで、AUCは0.85であった。標高差 ( $P < 0.001$ )、ヒシクイのねぐらからの距離 ( $P < 0.001$ )には有意な正の関係があるが(図(1)-17)、市街地面積には有意な関係はみられなかった ( $P = 0.15$ )。標高差がある環境で高高度を飛行していたことについては、高地から低地に飛行する場合、高地での飛行高度が低地まで維持されるためであると考えられ、低地でも標高差のある山間部付近では高高度を利用していると考えられる。また、ねぐら周辺で高高度を利用していなかった理由としては、ねぐらを飛び立ち地点とした場合、ねぐらから近い環境では高度を上昇させるために必要な飛行距離が短いことが関わっている推察される。



図(1)-17 ヒシクイの平均飛行高度と説明変数の関係。風車回転域(30~130m)が灰色部分にあたる。外挿モデルに採用したGLMモデルでは、標高差(a)とヒシクイのねぐらからの距離(b)にのみ有意な正の関係がみられた。

それぞれの渡りルートに外挿すると、ヒシクイのねぐらから近い平野部でMゾーン飛行率が高くなり、ねぐらから離れた地域においてはMゾーン飛行率が低くなった(図(1)-18)。マガンの渡り時の飛行高度を調べた研究でも、ねぐらからの距離が離れるほど高高度を飛行しがちであることが示されており(植田・嶋田)、ヒシクイ類でも同様の傾向が見られた。

飛行高度は、風況などの気象条件によっても変わる可能性がある (Hüppop et al. 2006)。本研究では、1群れでも飛行高度の情報があるメッシュであればモデル予測のためのデータとして利用したが、理想的には複数回の飛行高度を異なる風況および気象条件下で記録し蓄積する必要があるだろう。また、本研究では、本州日本海沿岸地域、石狩平野から道北までの地域をオオヒシクイの渡りルートとしたが、十勝や釧路、網走などの道東地域もオオヒシクイの主要な渡りルートとなっており、保全上重要な地域と考えられるが、生息地が点在しており、それらの連結性が把握できていないため、本研究および既存情報では、十勝以北の渡りルートを描くことができなかった。今後、道東地域のみならず本州の太平洋沿岸地域を含めた渡りルート情報を蓄積して、より高精度な鳥感度マップを更新していくことが望まれる。



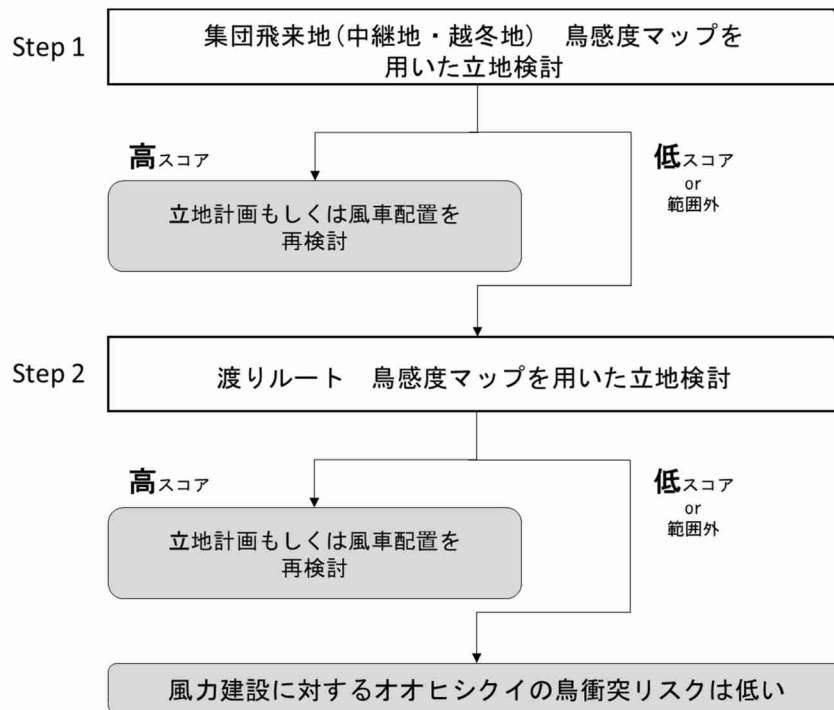
図(1)-18 渡りルートにおける鳥感度マップ。道北(a)、道南~ 道北の渡りルート(b)、新潟~ 津軽の渡りルート(c)に外挿した. 1に近いほど風車高以下を飛行する可能性が高く、ヒシクイのねぐら水域 (水色) に近い地域および平野部は風車高以下を飛行する確率が高く推定されている。

#### 4-6. 2つの鳥感度マップを用いた風力発電施設立地検討の手続き

図(1)-19に、集団飛来地と渡りルートの2つの鳥感度マップを用いた風車の立地検討の流れを示した。中継地や越冬地などの集団飛来地は、冬季に日本で越冬するガン類やハクチョウ類など大型水禽類の核心的保全地域と位置づけられるため、第1の手続きとして、集団飛来地鳥感度マップを用いて、ねぐらを中心とした高い鳥感度スコアを示す地域を可能な限り回避する配慮を施す。次に、第1段階で低スコアもしくは範囲外と判定された地域に対して、第2の手続きに進み、渡りルート鳥感度マップを用いて、事業対象実施予定区域の鳥感度スコアを確認する。事業対象実施予定区域が高い鳥感度スコアを示しているようであれば、立地計画もしくは風車配置を再検討することが望ましい。オオヒシクイの行動特性を考



慮した2つの鳥感度マップを用いた立地検討の手続きが、風力アセスメントの配慮書段階で実施されることにより、鳥衝突リスクの低減を大きく図ることができると思う。



図(1)-19 集団飛来地（中継地・越冬地）と渡りルート鳥感度マップを用いた段階的な風力発電施設立地検討の手順。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

希少な大型水禽類オオヒシクイを対象として、はじめに、全国の主要な集団飛来地における生息場所利用および飛行高度の情報を取得し、環境要因との関係を解析することにより、生息場所利用の規定要因、およびねぐらと採餌場所を行き来する際の飛行高度を規定する要因について明らかにした。その結果、集団飛来地では、ねぐらに近接した農地が採餌場所として選好され、しかもねぐらと採餌場所の間では風車ブレードの回転域とされるMゾーン以下の低空をほぼ飛行することが明らかになった。これまで、ねぐらから採餌場所までの距離と飛行高度の関係が不明であったため、ねぐらから一定の距離離れていれば風車の影響は小さいとされ、実際に、いくつかの集団飛来地周辺では生息場所内に風車が建設されたケースもある。今回の結果から判断すると、集団飛来地において生息適地と判断された地域はMゾーン以下の低空域を飛行する確度が高く、衝突リスクが高いことが示された。L・Mゾーン飛行確率という3次元情報が集団飛来地鳥感度マップに組み込まれたことにより、衝突リスクを適正に判断できるマップ情報を提供することができた。

次に、北海道道北地方から国内最大の越冬地である新潟県福島潟までの主要な渡りルートにおいて、既往の調査結果、GPS送信機の装着による個体追跡、測距機を使用した飛行高度等の情報を収集・取得し、飛行地点と環境要因との関係を解析することにより、渡り中の飛行高度を規定する要因について明らかにした。国内では、モニタリング1000やガンカモ類の全国一斉調査などを通し、集団飛来地の生息数などの情報は長年にわたりモニタリングされているものの、渡りルートの詳細および飛行高度の情報は皆無に近い。本研究では、GPS送信機による個体追跡では十分なサンプル数を得ることができなかったものの、定点調査による飛行高度データの取得を渡りルート上で広く行うことで補い、渡り中の飛行高度を説明するモデルを作成することができた。これを渡りルート最外郭内に外挿することにより、広域にMゾーン以下を飛行する可能性が高いエリアを抽出でき、渡りルート鳥感度マップとして提供できた。

## (2) 環境政策への貢献

本研究において、日本で越冬するオオヒシクイの中継地および越冬地といった集団飛来地に関する鳥感度マップを、空間的自己相関を考慮して2kmメッシュ解像度で、北海道稚内から国内有数の越冬地である新潟県福島潟までの渡りルートに関する鳥感度マップを250m解像度で作ることができた。今回作成できた鳥感度マップにより、風車建設による渡り鳥への著しい影響が懸念される北海道道北地方が、風車への衝突に対し高い感度を有する地域であることを“見える化”したことは、環境省や経済産業省など環境影響評価に関わる機関が、当該地域における風力発電事業の立地適正を判断する上で大いに役立つ。

また、ここではオオヒシクイが越冬期間中に利用する集団飛来地および渡りルートにおける鳥感度マップを道北地方に限らず広範囲にわたり提供できたことから、北海道から本州にかけての日本海沿岸域で建設が進む風力発電事業の立地判断にも活用できる。

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

環境省が整備を進める環境アセスメント環境基礎情報データベース（EADAS）に、本研究で得られたオオヒシクイの鳥感度マップを将来的に組み込むことができれば、風力発電事業に対する環境影響評価の配慮書段階で立地選定の適正を判断することができる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) Sachiko Moriguchi, Haruka Mukai, Ryosuke Komachi, Tsuneo Sekijima : Wind farm effects on migratory flight of swans and foraging distribution at their stopover site Conference on Wind energy and Wildlife impacts 2017<sup>th</sup> (under review)

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) Moriguchi S, Mukai H, Komachi R & Sekijima T : Conference on Wind energy and Wildlife impacts 2018, Estril, Portugal, 2017  
“Wind farm effects on migration flight of swans and foraging distribution at their stopover site”
- 2) 森口紗千子、向井喜果、尾崎清明、仲村昇、関島恒夫：日本鳥学会（2017）  
「携帯電話回線を利用した送信機の精度検証とオオヒシクイの春の国内渡り経路の解明」  
（自由集会：ガンカモ類の生態研究における新しい調査・解析手法の提案，企画者：向井喜果、安藤温子、森口紗千子）

- 3) 関島恒夫、森口紗千子、向井喜果、望月翔太、尾崎清明、仲村昇：日本生態学会（2018）  
「大型水禽類のセンシティブティマップをつくる ー有用性とその課題ー」  
（シンポジウム：鳥衝突を未然に防ぐセンシティブティマップの普及に向けて）
- 4) 森口紗千子、向井喜果、佐藤一海、望月翔太、仲村昇、尾崎清明、関島恒夫：日本生態学会（2018）  
「ヒシクイ生息地における風車センシティブティマップ作成」

### （3）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「鳥の衝突を避けるためにできること」（主催：新潟大学、2017年6月3日、サロベツエコネットワーク、観客約50名）にて講演  
関島恒夫：「大型水禽類のフライウェイを守るー衝突リスクを低減させるSensitivity mapの作成を目指して」
- 2) 一般公開シンポジウム「鳥衝突を未然に防ぐセンシティブティマップの整備を目指して」（主催：新潟大学、2018年3月21日、東京工業大学キャンパスイノベーション、観客約30名）にて講演  
関島恒夫：「大型水禽類のセンシティブティマップをつくる」

### （5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

### （6）その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Gelman, A., Carlin, J. B., Stern, H. S., Dunson, D. B., Vehtari, A. & Rubin, D. B. (2014) Bayesian data analysis. CRC press Boca Raton, FL.
- 2) Hüppop, O., Dierschke, J., EXO, K. M., Fredrich, E., & Hill, R. (2006) Bird migration studies and potential collision risk with offshore wind turbines. *Ibis*, 148, 90-109.
- 3) JAXA (2016) 高解像度土地利用土地被覆図バージョン16.09.  
[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/jlulc\\_jpn.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/jlulc_jpn.htm)
- 4) JAXA (2017) ALOS全球数値地表モデル (DSM) 第1.1版.  
[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d30/index\\_j.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/aw3d30/index_j.htm)
- 5) 環境省 (2015a) 重要生態系監視地域モニタリング推進事業 (モニタリングサイト1000) ガンカモ類調査業務第2期とりまとめ報告書  
[http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/second\\_term\\_anatidae.pdf](http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/second_term_anatidae.pdf)
- 6) 環境省 (2015b) 平成27年度重要生態系監視地域モニタリング推進事業 (モニタリングサイト1000) ガンカモ類調査業務2014/15年 調査報告書.  
[http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/h27\\_anatidae.pdf](http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/h27_anatidae.pdf)
- 7) 環境省 (2017a) 平成28年度重要生態系監視地域モニタリング推進事業 (モニタリングサイト1000) ガンカモ類調査業務2015/16年 調査報告書.  
[http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/h28\\_anatidae.pdf](http://www.biodic.go.jp/moni1000/findings/reports/pdf/h28_anatidae.pdf)
- 8) 環境省 (2017b) ガンカモ類の生息調査. <http://www.biodic.go.jp/gankamo/seikabutu/index.html>
- 9) 環境省 (2017c) 渡り鳥関連情報.  
[http://www.env.go.jp/nature/dobutsu/bird\\_flu/migratory/index.html](http://www.env.go.jp/nature/dobutsu/bird_flu/migratory/index.html)

- 10) Keitt, T.H., Bjørnstad, O.N., Dixon, P.M. & Citron-Pousty, S. (2002) Accounting for spatial pattern when modeling organism-environment interactions. *Ecography*, 25, 616-625.
- 11) 国土交通省 (2012) 国土数値情報河川データ.  
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-W05.html>
- 12) 宮林泰彦 (1994) ガン類渡来地目録第1版, 雁を保護する会, 若林.
- 13) 農林水産省 (2017) 北海道農林水産統計年報 (総合編) 平成27年~ 28年.  
<http://www.maff.go.jp/hokkaido/toukei/kikaku/nenpou/27-28sougou/27-28sougou.html#3>
- 14) Phillips, S.J., Anderson, R.P. & Schapire, R.E. (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259.
- 15) Turner, M.G., Gardner, R.H. & O'Neill, R.V. (2004) 景観生態学 生態学からの新しい景観理論とその応用. 中越信和・原慶太郎(監訳), 文一総合出版, 東京.
- 16) 植田睦之・嶋田哲郎 (2009) 長距離移動するマガンの飛び立ち地点からの距離と飛行高度との関係. *Bird Research*, 5, S17-S21. Gelman, A., Carlin, J.B., Stern, H.S., Dunson, D.B., Vehtari, A. & Rubin, D.B. (2014) *Bayesian data analysis*. CRC press Boca Raton, FL.

## II-2 道北海岸地域における海鳥の高精度鳥感度Map作成手法の開発

北海道大学水産科学研究院・海洋生物資源科学部門 教授 綿貫豊  
 <研究協力者>

北海道大学水産科学研究院・海洋生物資源科学部門 風間健太郎

平成28~29年度累計予算額：26,756千円（うち平成29年度：13,702千円）

### [要旨]

洋上風力発電に適した多くの場所は海鳥営巣地に近接している。公開されている海鳥営巣地（コロニー）データベース（環境省生物多様性センター）を利用すれば、海鳥の採食距離半径の中を海鳥にとっての重要海域、逆に言えば潜在的にリスクの高い海域とすることが可能である。しかし、採食場所がコロニー周辺に均一に分布することはなく、この粗いスケールでは施設単位でのリスク判定には役に立たない。そのため、施設単位で、つまり実際に利用できる空間精度で、鳥感度マップの作成手法を開発する必要がある。

本研究は、繁殖中の海鳥を対象に、<10km以下の空間精度で採食場所や風車に衝突する恐れのある高度を飛行する場所を、動物装着型GPSデータロガーで海鳥の移動軌跡を詳細に得ることで効率的に知る新しい手法を開発することを目的とした。また、こうした場所は、海水温などの環境変化によって、年や海域により大きく変わると予想される。衛星画像などから得ることができる環境情報から、こうした場所を推定するハビタットモデリングの手法を用いることで汎用性を高める必要がある。そのため、ハビタットモデル構築を行いその精度なども吟味した。

本研究では、日本全国の沿岸や離島に広く繁殖し、その数が2番目に多いため、各海域で問題となる可能性が高いウミネコを材料とした。調査地は、洋上も含め海岸線近くに複数の風力発電施設の建設計画がある北海道北部とした。GPSデータロガーを使って2016年と2017年、利尻島と枝幸の二つのコロニーで繁殖する親鳥の採食トリップ中の移動軌跡を得た。まず、移動軌跡から移動速度によって採食場所を求める手法とGPS記録による飛行高度の推定手法を開発した。その結果、稚内の東側の生産性の高い海域で採食すること、風車ブレードの回転する高度（Mゾーン）を飛行するのは、コロニー周辺と稚内近辺の沿岸部であることがわかった。

次に、水温、地形、漁港などの環境要因から採食場所とMゾーン飛行場所の分布を説明するモデルを2kmグリッドで各年・コロニーごとに作って、潜在的採食場所とMゾーン飛行場所を求めた。求めた潜在的採食場所とMゾーン飛行場所を実データと比較したところ、その再現性は比較的高かった。クロスバリデーションによるモデルの評価を行ったところ、採食場所予測モデルの予測精度も高かった。さらに、効率的なサンプル数を求めるため2017年利尻抱卵期のデータで、様々な個体数のサブサンプリングを行い、それぞれの利用海域面積を計算したところ、15~20個体それぞれ3~4トリップのデータを得れば、その集団の利用海域がおおよそ推定できることがわかった。さらに、事前予測精度を検討するため、2016年利尻抱卵期の採食場所説明モデルが別の年・コロニーにどの程度外挿できるか検証した。その結果、利尻島の2017年を予測することはある程度可能だったが、2017年の枝幸個体の空間分布の説明力は低かった。別のコロニーでの事前予測精度を上げる手法を開発する必要がある。

最後に、各グリッドでの風車建設が、繁殖中に親鳥の死亡率をどの程度上昇させるか、採食場所の消失を通じて飛行距離を伸ばし繁殖成績をどの程度低下させるか、の2点を評価する手法を検討した。理論的にはこれら2点を精度よく推定し個体群影響を評価する手法の開発が必要とされる。しかし、実測しがたいパラメーターが多いので、並行して、採食場所とMゾーン飛行場所の二つの感度マップを重みづけや順位付けなどにより統合する手法の開発も必要である。

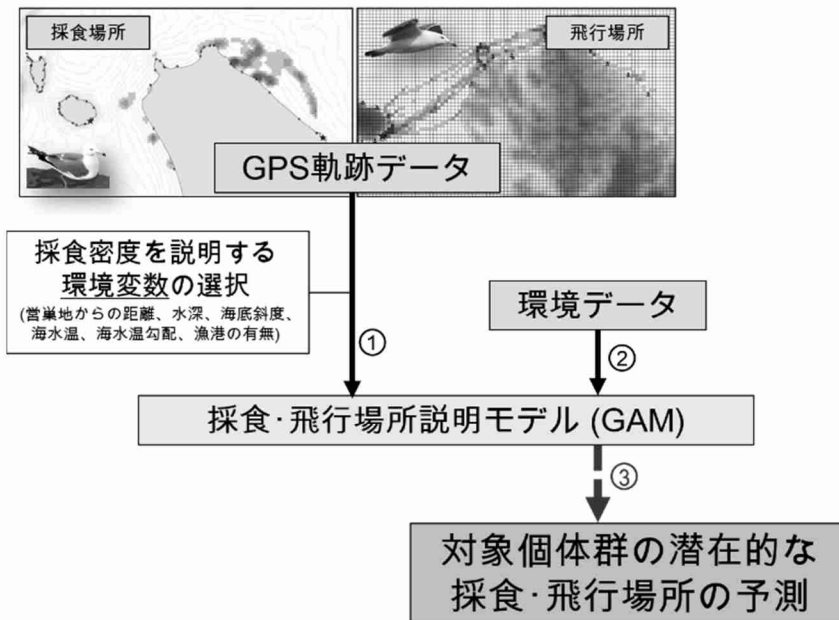
### [キーワード]

海鳥、バイオロギング、ハビタットモデル、Mゾーン衝突リスク、繁殖リスク

## 1. はじめに

北海道北部沿岸域は洋上風力発電に最適な風況であるため、建設計画が多く立てられている。その一方で、同海域には多数の海鳥営巣地があるため（Osa & Watanuki 2002）、海鳥に対する洋上風力発電のリスクを軽減するため、計画の前に高リスクな場所を予測する、鳥感度マップが必要である。本研究では、同海域に複数の営巣地があるウミネコを材料として、繁殖中の個体に動物装着型GPS記録装置を装着し、一定期間後に回収すること（バイオロギング手法）によって、繁殖中の個体の採食場所と飛行経路を得て、これによって鳥感度マップを作る手法を開発することを目的とした。

その際、ウミネコの飛行経路を決めるだろう地形は場所により大きく異り、その採食場所に影響するだろう海水温、塩分濃度、海流や一次生産量などの海洋環境は年や季節によっても変化する。こうした変動性を考えると、日本各地に分布するウミネコのコロニーのすべてにおいて、実データのみによって鳥感度マップをつくるのは現実的ではない。本研究では環境データから鳥の生息場所を予測するハビタットモデル（図(2)-1）を構築することで、いかに効率的に鳥感度マップが作れるかも検討した。この手法は、ある空間スケールのグリッドで示された鳥の分布密度を地形、水温などの環境データから説明する空間モデルを構築するものである。こうして構築されたモデルに、別の年や営巣地周辺の環境データを入れることで、潜在的採食場所や風車ブレードに衝突する高度を飛行する場所を予測することが可能となる。



図(2)-1 海鳥のハビタットモデルの構築と海鳥が高頻度に利用する採食場所と飛行場所の予測手順。

①ある営巣地における海鳥のGPS追跡により明らかとなる高頻度採食利用場や飛行場所に影響する環境変数を抽出し、少数の環境要因からそれらの場所を説明するモデルを構築する。②構築された説明モデルに同じ営巣地の別の年、あるいは別の営巣地の環境データを入力することで、③対象個体群がその年に潜在的に高頻度で利用する採食場所または飛行場所を予測する。

## 2. 研究開発目的

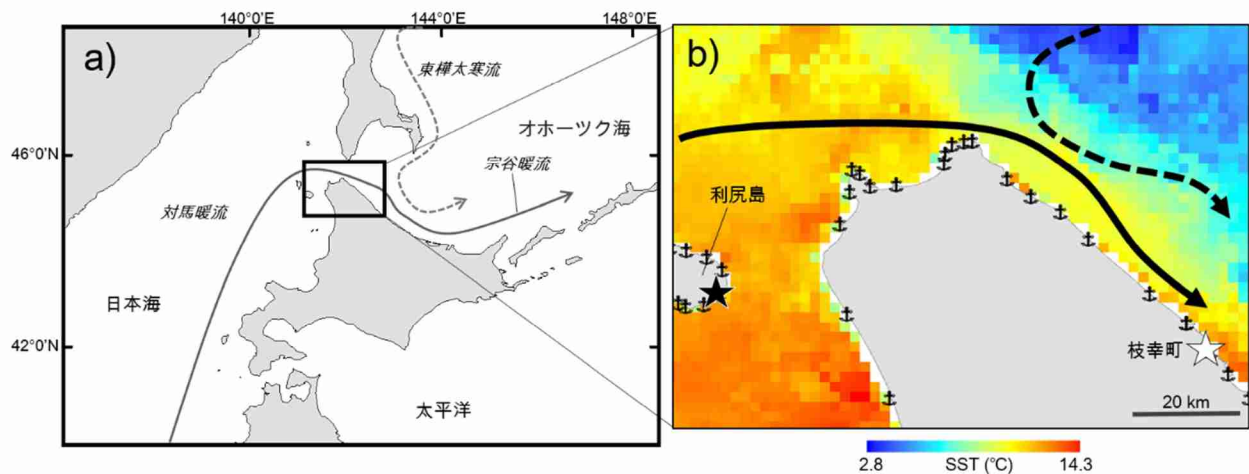
繁殖中の海鳥は、営巣地を基点として周辺の海域を採食のために数か月間にわたって利用する。洋上風発の建設は、海鳥の採食環境を喪失させたり、その質を低下させたりする可能性がある。この影響により、海鳥の給餌頻度や餌の質が低下し、繁殖成績が低下する可能性がある。また、繁殖地から遠く離れた海上の採食場所までの往復（採食トリップ）の際に風車ブレードと海鳥が衝突する可能性もある。繁殖成績の低下や衝突による親鳥の死亡リスクの上昇は、海鳥の繁殖個体群の存続に影響しうる。本研究では、これらのリスクを場所ごとに予測した鳥感度マップを作成するため、ウミネコを材料として、繁殖中の個体にGPSデータロガーを装着してその移動を追跡（トラッキング）した。

まず第1に、得られた追跡データをもとに、繁殖している海鳥の採食場所と、衝突リスクが高まる高度（Mゾーン、一般的な風車ブレード高である40~120m）を飛行しやすい「Mゾーン飛行場所」を求めることを目的とした。そのため、移動軌跡から採食場所と飛行高度を推定する手法を検証した。第2に、表面海水温や地形などの環境データから採食場所とリスクの高い高度を飛行する場所を説明するハビタットモデルを構築した。その適切な空間スケール、モデル精度と必要なサンプル数の検証を行った。第3に、利尻島で2年間、枝幸で1年のデータを得て、2016年の利尻島の抱卵期のデータで構築した採食場所を説明するハビタットモデルを、2017年利尻抱卵期と2017年枝幸に外挿した場合、どの程度の予測精度があるか検討した。4つ目として、具体的なリスクを予測するために、営巣地周辺に風車発電施設が建設されてさらに遠方の別の場所まで採食に行く必要が生じた場合、採食距離が伸びて採食成績がどう低下するかを推定するとともに、あるグリッドを覆う範囲で風車が建設された場合、繁殖期における各個体の衝突確率をこれらのグリッド毎に推定する手法を検討した。

### 3. 研究開発方法

#### 3-1. 調査地と期間

北海道利尻島と枝幸町で野外調査を行った。利尻島では20,000つがい以上、枝幸町には3,000つがい以上のウミネコが繁殖していた。調査地周囲には対馬暖流と東樺太寒流が流れており、両者の間に5月~8月頃までオホーツク海沿岸には海洋フロントが形成される（図(2)-2）。調査は、2016年には利尻島の抱卵期に、2017年には利尻島の抱卵期および育雛期、枝幸町の抱卵期に実施した（表(2)-1）。



図(2)-2 a) 調査地周辺を流れる海流. b) 2016年6月の調査値周辺の月平均海表面水温（SST）. ♪は漁港を示す。

#### 3-2. 調査方法

捕獲が容易な抱卵期において、くくり罠あるいは箱罠（図(2)-3）を用いて、親鳥が卵を抱くために巣に座った時に遠隔操作でトリガーを外して、足をくくるか箱に閉じ込めることで捕獲した。捕獲後直ちに、1~2名が鳥を捕定し、別の1名がGPSデータロガーをテッサテープまたはテフロン布ヒモ製ハーネスで装着した（図(2)-4）。抱卵期においては、回収型小型GPSロガー（GipSy-5, TechnoSmart, Italy, 40mm×20mm×7mm, 11g）を装着し、緯度経度と高度を1秒間隔で記録して、5日後に再捕獲し、テープをはがして回収した。回収後パソコンでデータをダウンロードした。なお、7個体については、GPS記録で得られるウミネコの移動速度から着水を判定するとした場合の精度を求めることを目的に、より詳しく行動を記録するため加速度計（Axy3, TechnoSmart, Italy, 13mm×6mm×3mm, 2g）をテープによって背中に装着し、3軸の加速度を25ヘルツで測定した。育雛期においては再捕獲が困難であったため、自動遠隔ダウンロード式のデータロガー（GipSy-Remote, TechnoSmart, Italy, 50mm×20mm×12mm, 19g）を使い、緯度経度を5分間隔で記録した。巣の300m以内に基地局を設置し、その個体が縄張りに戻ると、VHF電波を

使って自動的にデータをダウンロードした。各年・各時期の捕獲個体数は表(2)-1のとおりである。本研究では、巣を出発してから戻って来るまでを採食トリップと定義した。得られた採食トリップの数も表(2)-1に示す。

表(2)-1 各調査地、各年における調査期間、使用機器、および調査個体数

コロニー	年	期間	繁殖ステージ	使用機器	個体数	採食トリップ数
利尻	2016	5/15-6/9	抱卵期	GipSy5	12	33
	2017	5/15-6/15	抱卵期	GipSy5	31	62
	2017	6/10-7/31	育雛期	GipSy-Remote	7	166
枝幸	2017	5/15-6/5	抱卵期	GipSy5	11	30



図(2)-3 箱罠によりウミネコを捕獲する様子。

遠隔操作でトリガーを外すと、入り口のネットが閉じてウミネコが箱に閉じ込められる。



図(2)-4 ウミネコの背中に装着されたGPSデータロガー。

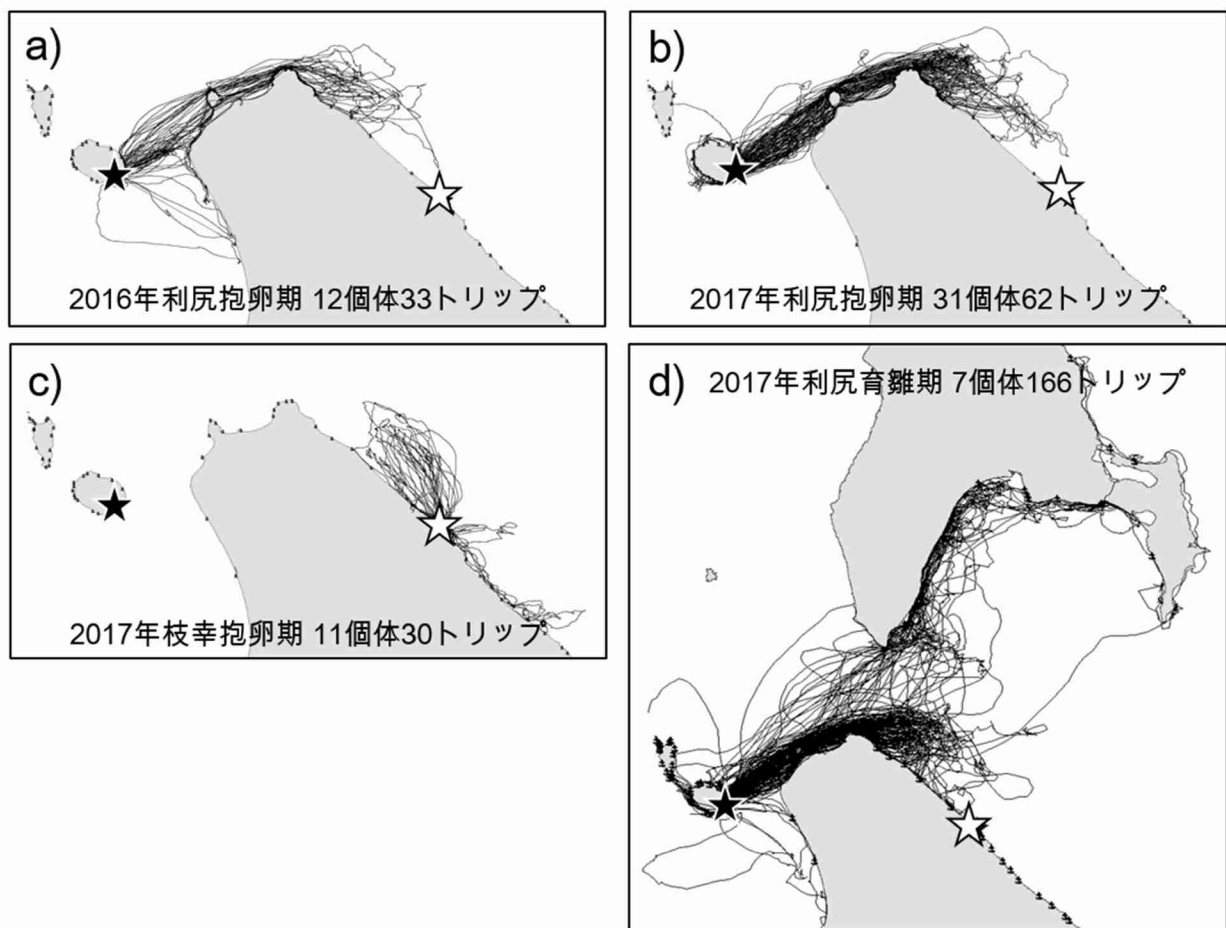
a) 抱卵期にはGipSy5ロガーをテープにより装着した。b) 育雛期にはGipSy-Remoteロガーをハーネスにより装着した。



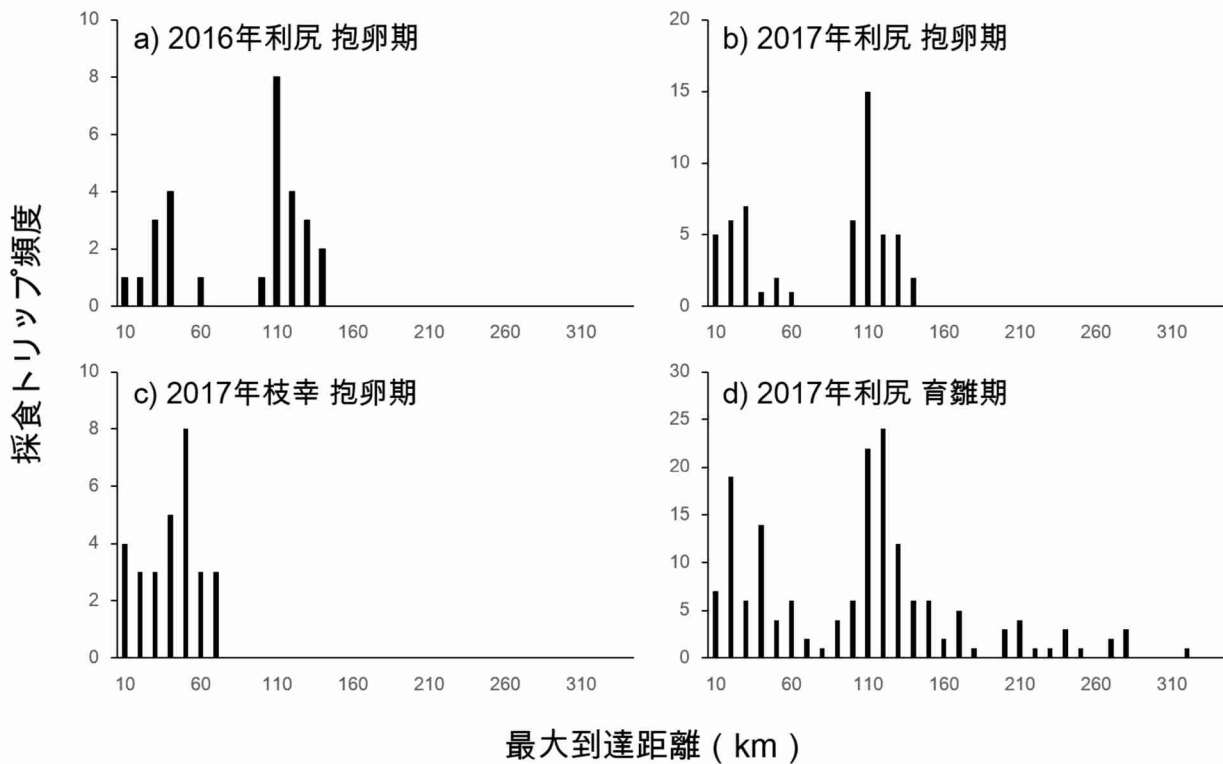
## 4. 結果及び考察

### 4-1. 移動軌跡とトリップ長

各調査地・各年で得られたウミネコのGPS軌跡を図(2)-5に、トリップ長（1回に巣を離れて採食に出発した時間）の分布を図(2)-6に示した。2016年の抱卵期においては、コロニーの東側もしくは南側海域に飛行するウミネコの採食トリップが得られた。トリップの最大到達距離は、70km未満の近距離と90km以上の長距離に分かれ、長距離のトリップではオホーツク海に到達した。2017年の利尻抱卵期におけるウミネコの採食トリップが、営巣地の東側だけでなく、西側の礼文島周辺海域でも得られた。2016年と同様に、トリップの最大到達距離は70km未満の近距離と90km以上の長距離に分かれた。2017年の枝幸抱卵期においては、営巣地の南北両方向の海域で採食トリップが得られた。全てのトリップの最大到達距離は、70km以下であった。2017年利尻の育雛期では、ウミネコは抱卵期と同様、主にオホーツク海や礼文島周辺海域で採食したが、加えてサハリン周辺海域でも採食トリップが得られた。トリップの最大到達距離は、70km未満の近距離と90km以上の長距離に分かれ、最大は320kmに及んだ。



図(2)-5 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、c) 2017年枝幸抱卵期、d) 2017年利尻育雛期におけるウミネコの採食トリップのGPS追跡軌跡。黒線はウミネコの移動軌跡、黒星は利尻営巣地、白星は枝幸営巣地を表す。



図(2)-6 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、c) 2017年枝幸抱卵期、d) 2017年利尻育雛期におけるウミネコの採食トリップの最大到達距離（各トリップにおいて営巣地から最も離れた追跡点までの距離）の頻度分布。

利尻抱卵期においてはいずれの年も60km以下の短距離トリップと100km以上の長距離トリップの二峰型の頻度分布であったが、枝幸では全てのトリップが70km以下の短距離であった。利尻の育雛期においては、80km付近を境に二峰型の頻度分布であったが、最も長距離のトリップの到達距離は320kmに及んだ。

## 4-2. 高頻度採食場所

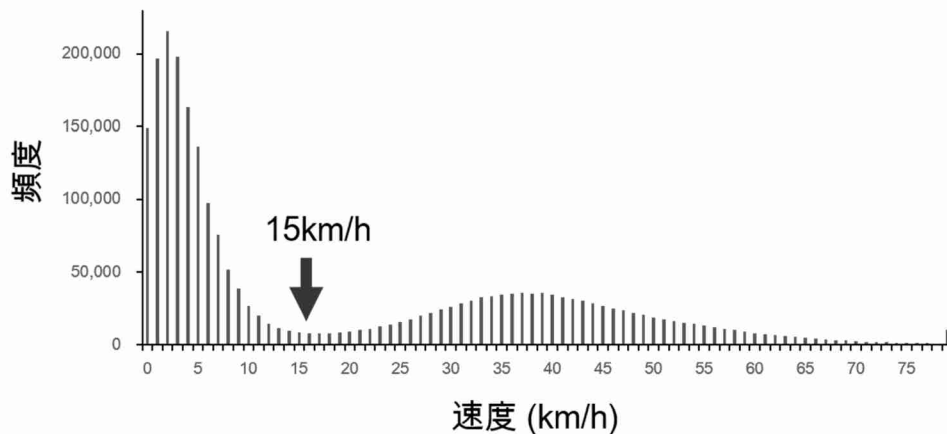
### 行動の分離

はじめに、1秒ごとに得られたGPS測位点におけるウミネコ行動を滞在と飛行に分類する手法を検討した。この検討は、最もサンプル数の多い2017年利尻抱卵期データを用いて行った。1秒ごとに得られた位置情報から、その測位点における個体の移動速度を算出した。移動速度の頻度分布は、15km/hを境として二山に分かれた（図(2)-7）。そのため、本研究では、15km/h以下を「着水」（陸での休息も含む）、15km/h以上を「飛行」とした。

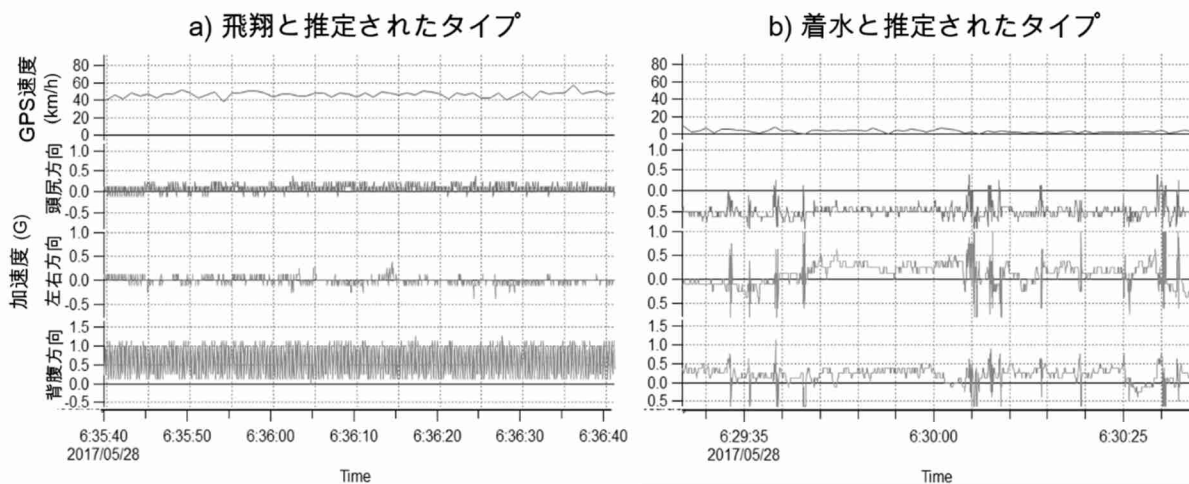
次に、この行動分類の妥当性を、加速度も同時に得た7個体から検証した。記録された3軸（頭尻方向、左右方向、背腹方向）の加速度を合成して1秒ごとの振幅を求め、その振幅とGPSから計算された速度から行動を推定した。この振幅のタイプは主に二つに分けられ、そのうち一つのタイプにおける加速度は図(2)-8aのような波形を示した。このタイプでは、頭尻方向や左右方向に加速度はほとんど生じておらず、一方で背腹方向には一定周期の加速度の大きな振幅が記録された。これは、鳥が一定の周期で上下動を繰り返していることを示す。この時、GPSから計算された速度は40km/h以上を保っており、鳥は羽ばたきによる飛行を行っていたと推定できた。もう一つのタイプでは、加速度は図(2)-8bのような波形を示した。このタイプでは、加速度は全ての軸方向において一定の振幅は示さず、大きな振幅と小さな振幅が断続的に記録された。これらの振幅は、鳥の動きが一定でなく全方向に不規則に、細かく動いていたことを示していた。この時、GPSから計算された速度はほぼ0km/hであり、鳥は水上で静止したまま体を動かしていた（採食や水浴びなど）と推定できた。このように、加速度計を装着した7個体の全GPS測位点における行動を、加速度と速度から飛行と着水に分類することができた。

この7個体の合計480,028の測位点において、速度のみから283,875点が「着水」と判定され、うち

270,733点 (95.4%) が加速度からも「着水」と判定された。したがって、速度のみを用いた「着水」判定は妥当であると判断された。また、「着水」と判定された1秒毎測位点は餌の潜在的獲得可能性の高い時間や場所（例えば昼の漁港など）に集中していたため、本研究における滞在は、休息や水浴びを含んではいるものの、採食に関連する行動の指標として使用可能と考えられた。これらを考慮し、本研究では「着水」の集中していた場所を、「採食場所」とみなした。「着水」測位点は海上と陸に存在したが、陸の「着水」測位点は全体の5%未満であったことに加え、今回はおもに洋上風発のリスクを検証することから、ハビタットモデルには洋上の「着水」測位点のみを用いた。



図(2)-7 2017年利尻抱卵期の各GPS測位点における個体の移動速度の頻度分布。15km/hを境とした二峰型の頻度分布であった。

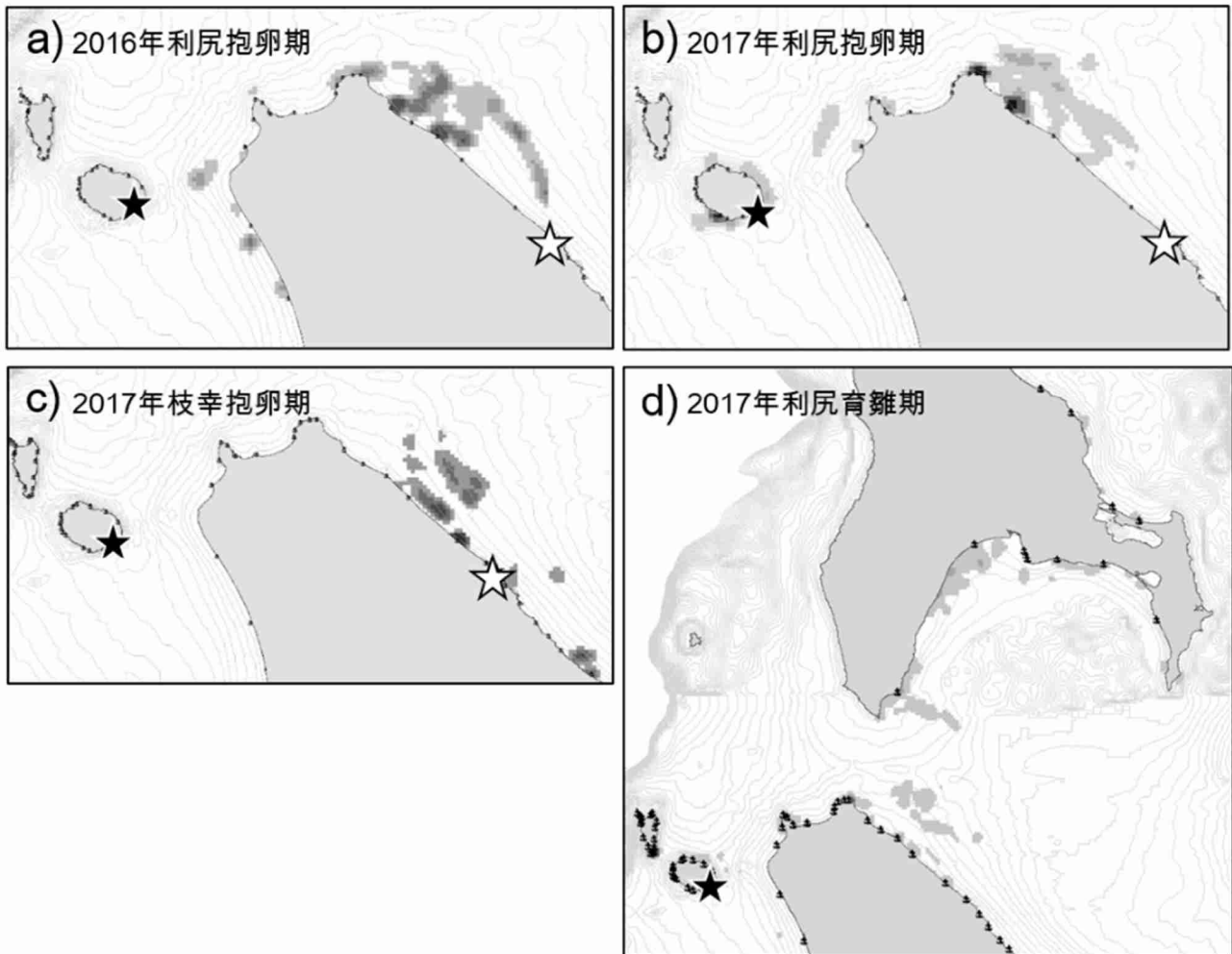


図(2)-8 a) 飛行と推定された時およびb) 着水と推定された時のGPSから計算された速度、および3軸(頭尻方向、左右方向、背腹方向)の加速度の振幅。どちらも約1分間のデータを示す。

### 採食場所

次に、潜在的な高頻度採食場所を環境データから予測するハビタットモデルを構築した。後述のように、着水測位点自体の分布データを従属変数とした場合解析しづらいので、本研究では、洋上の着水測位点(本研究では採食場所と仮定した)からカーネル密度を算出し(図(2)-9)、この採食場所カーネル密度を従属変数とした。採食場所カーネル密度は、環境変数の空間解像度(詳細後述)に合わせてまず2kmグリッドサイズで算出した。算出にはGISソフトArcMapのSpatial Analysisツールを用いた。2016年の利尻では、採食カーネルは営巣地から30kmほど離れた利尻水道の陸棚上とオホーツク海の海洋フロント上、あるいは漁港周辺に集中した。2017年の利尻では、採食カーネルはオホーツク海の海洋フロン

ト、漁港に加え、利尻島周囲にも集中した。2017年枝幸では、採食カーネルはオホーツク海の海洋フロント付近と漁港に集中した。



図(2)-9 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、c) 2017年枝幸抱卵期、およびd) 2017年利尻育雛期における採食カーネル密度。

色の濃度は薄い順に、全体の95%、50%、および25%の採食点が含まれる範囲を示しており、色の濃い場所ほどウミネコが高頻度に採食に利用した場所とみなせる。黒星は利尻営巣地、白星は枝幸営巣地、薄い灰色の実線は10mごとの等水深線を表す。

#### 分布データの検証とバックグラウンド

ハビタットモデルは、定点、定線、あるいは一定の範囲を対象として行われたセンサス調査あるいは画像撮影などにより得られた動物などの分布データ（グリッドごとの密度あるいは存在/不在データ）とその観測場所の環境特性との関連性をモデリングすることで、環境データから動物の分布予測を行う手法である。ハビタットモデルでは、多くの場合、一定範囲において均等な調査努力をかけて調査することで得られた対象動物の存在/不在（または生息密度）のデータが用いられる。この場合、モデルは存在データが得られた場所と不在データが得られた場所の環境特性の両方を含むことで、分布の予測精度が確保される。

動物の移動追跡（トラッキング）データは、ハビタットモデルにおいて原理的には存在データとして扱うことができる。しかしながら、トラッキング調査では、普通少数個体の分布データしか得られないため、調査個体がいかなかった場所を、当該個体群の別の個体が見つからなかったとは言い切れない。言い換えると、トラッキング調査では不在データを得ることができない。トラッキングで得られる移動軌跡

データを在データとしてあつかつてハビタットモデルを構築する標準的な手法はまだ確立されていない (Torres et al. 2015)。暫定的に、ハビタットモデルにおける不在データ欠如の問題をクリアするために、二つの方法が用いられている (Senay et al. 2013) ようだ。一つは、在データが得られた場所の環境データから、その対象動物が分布しうる範囲 (“バックグラウンド”) の存在確率を最大エントロピー法により予測するMaxEntモデルである。もう一つは、疑似不在点選択法である。この方法では、バックグラウンドから無作為に「疑似不在点」を選び、これを不在データとしてあつかう。

これら二つの方法により、在データのみからバックグラウンドにおける対象動物の分布を予測することができるが、問題点もある。MaxEntと疑似不在点選択法の両方において、バックグラウンドの定め方 (面積や含まれるハビタットの種類) によってモデルの予測精度は大きく変化する。しかし、これらの手法を用いた多くの研究において、バックグラウンドは種の最大採食範囲など既存情報のみに基づいて、任意に、簡便に、時には恣意的に設定される。動物の最大採食範囲は、対象個体群の生息場所 (営巣地など) や年によっても大きく変わると考えられ、既存情報を利用するだけでは十分でない可能性が高い。このようなバックグラウンド設定プロセスの曖昧さは、在データのみを用いてハビタットモデルを構築する標準的な手法が確立されていない理由の一つとなっている。

もう一つの問題点として、MaxEntと疑似不在点選択法ではどちらも動物の在/不在しか予測できず、動物の生息密度を予測できないことがあげられる。両手法において、動物の分布データは存在=1として変換され、モデルの従属変数は常に二値 (存在=1、不在=0) として扱われる。そのため、分布データがたとえ密度として記録されていた場合でも、モデルにおいてはその情報量は失われてしまう。動物の分布を高精度で連続的に記録したGPSトラッキングデータは、詳細な生息密度情報である。この情報量を失わずにモデリングを行うには、MaxEntと疑似不在点選択法は適切とは言えない。

本研究においては、ハビタットモデルによる予測グリッドの大きさを、海水温など一部の環境データの最小空間解像度であり、かつ風力発電事業の建設地選定の上でも有用となるように、2km四方と定めた。本研究においては、GPS記録間隔が1秒ごとときわめて短いため、2kmグリッドごとの滞在頻度には0~10,000程度まで大きなばらつきがあった。本研究では、このばらつきの大きな頻度データを空間的に平滑化するため、カーネル密度推定手法を用いた。カーネル密度手法は、滞在頻度データから特定の範囲内におけるエリアごとの滞在確率を空間的に滑らかな連続密度勾配として算出できる。

本研究では、各調査地・各年におけるウミネコの採食最外郭範囲 (採食地点の最大・最小緯度経度を辺とする四角形) をバックグラウンド範囲と定めた。このバックグラウンドは、調査期間において少なくとも一個体以上が採食に利用した範囲であるため、対象個体群の個体が潜在的に利用可能であった範囲とみなせると判断した。また、本研究ではバックグラウンド範囲を調査地・年ごとのGPSデータに基づいて定めた。こうすることで、本研究では潜在的利用可能範囲の地域変動や年変動も考慮することができた。カーネル密度は、定められたバックグラウンド範囲を対象として算出した。こうして算出されたカーネル密度を、各調査地・各年におけるウミネコの潜在的利用可能範囲における相対的な採食利用頻度とみなした。

#### 従属変数の空間的独立性の検証

動物の分布している場所としていない場所がそれぞれ空間的に集中しているなど、ある変数の値がお互いの距離に応じて連関をもっていることを「空間自己相関」と呼ぶ。空間自己相関を考慮しない分布予測モデルでは、第一種の過誤 (環境要因の効果がないのに、あると判定してしまう) が起きやすい。そのため、ハビタットモデルにおいて分布予測を行う前に、分布データの空間的自己相関を確認する必要がある。空間自己相関があるかどうかの検出には、Moran's Iなどの指標が通常用いられる。最もデータの多い2017年利尻の2kmグリッドごとの採食滞在頻度のMoran's Iは0.016と小さく、空間的な自己相関は確認されなかった。

## 変数とモデル選択

ハビタットモデルの独立変数には、カーネル密度を推定した範囲内の2kmグリッドごとの営巣地からの距離、水深、海底斜度、海表面水温（SST）、SST勾配、漁港の有無を用いた。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\\_global1360.html](http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/browsers/cwbrowser_global1360.html)) から取得した。海底斜度とSST勾配の算出には、GISソフトArcMapのSpatial Analysisツールを用いた。SST勾配は、海洋フロントの指標として用い、勾配が大きい場所ほど強い。これら独立変数のVariance Inflation Index (VIF)は1.0から1.2の間だったので、これら独立変数間には多重共線性をもたらすほどの強い関係はないと考えた。モデルの種類としては一般化加法モデルを用いた。一般化加法モデルは、環境変数に対する生物の非線形な応答を説明するうえで広く用いられている (Murase et al. 2009)。最適モデルの選択にはAICを用いた。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た。最適モデルが複数選択された場合は、それらのモデルに含まれるすべての変数を、ハビタットモデルの変数として採択した。

## 構築された採食ハビタットモデル

モデル選択の結果を表(2)-2に示した。2016年利尻では、ウミネコの採食カーネル密度は営巣地から30km程度と100km程度離れた場所で高まった (図(2)-10a)。これは、採食トリップの到達点が利尻と北海道本土の間の利尻水道とオホーツク海の2か所に集中していたことと整合した。カーネル密度は、水深が50mより浅く、海底斜度が小さく、SST勾配が大きい場所で高まり、また漁港のあるグリッドで高かった。繁殖地でのウミネコの吐き戻しを採集したところ、この年のウミネコはイカナゴを主に採食していた (Kazama et al. accepted)。採食カーネル密度が高い環境は、イカナゴの好適生息環境とおよそ一致し、また漁港周辺でも採食カーネル密度が高かったことは、この時期水揚げされたイカナゴのおこぼれも採食していたことも示唆する。また、オスとメスで採食場所が若干違うことがわかり、鳥感度マップ作成の際注意する必要がある (Kazama et al. In Press, 7 研究成果)。

2017年の利尻では、ウミネコの採食カーネル密度は営巣地から30km以内の場所と、100km程度離れた場所で高まった (図(2)-10b)。これは、この年の採食トリップの到達点が利尻周辺や礼文などの近場と、遠く離れたオホーツク海の2か所に集中していたことと整合した。カーネル密度は、海底斜度が大きく、SST勾配が大きい場所で高く、また漁港のあるグリッドで高かった。吐き戻し採集によれば、この年のウミネコもイカナゴを主に採食していた。この年もウミネコは海洋フロントや漁港でイカナゴを採食していたと考えられた。

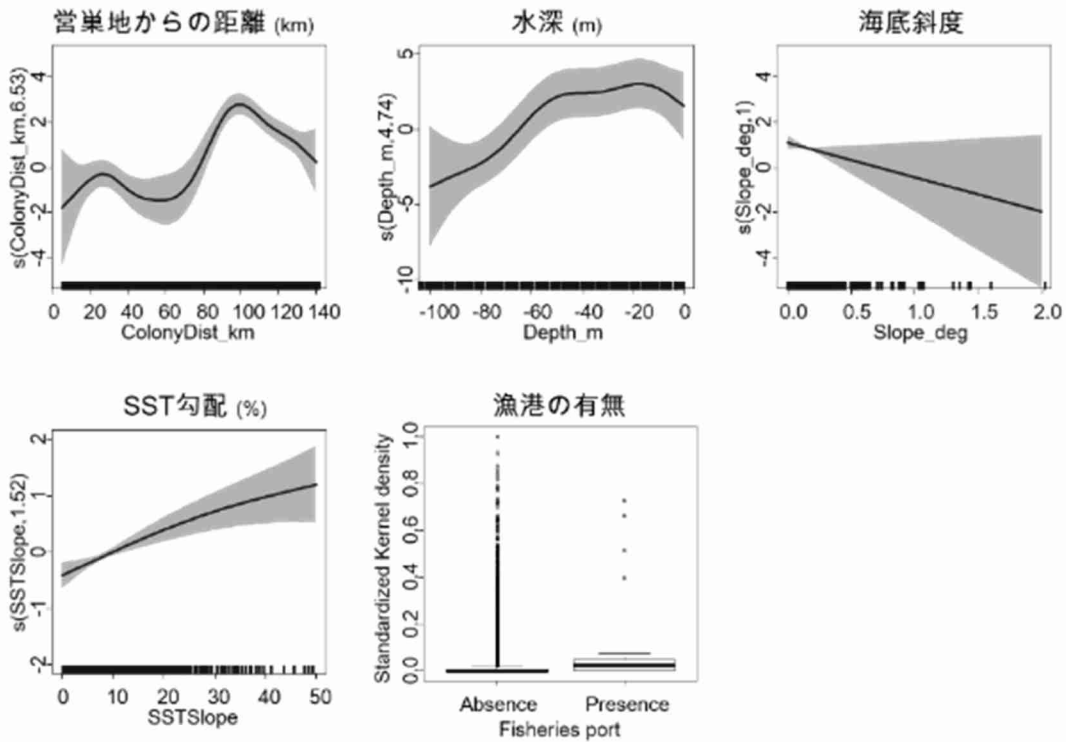
2017年の枝幸では、ウミネコの採食カーネル密度は営巣地から40km以内の場所で高まった (図(2)-10c)。これは、枝幸の採食トリップの到達点がほとんどすべて40km以内であったことと整合した。カーネル密度は、海底斜度が大きく、SST勾配が大きい場所で高く、また漁港のあるグリッドで高かった。枝幸のコロニーでの吐き戻し採集によれば、枝幸においてもウミネコはイカナゴを主に採食していたが、ホタテガイも出現した。枝幸のウミネコも、海洋フロントや漁港で主にイカナゴを採食していたと考えられた。また、漁港ではホタテガイも採食していたと思われた。海底斜度が大きいほどカーネル密度が高まった理由は定かではないが、2017年の利尻においても海底斜度が大きいほどカーネル密度が高まったことから、この年のイカナゴは2016年とは異なり、海底斜面に分布していたのかもしれない。

2017年利尻の育雛期では、カーネル密度は水深が浅いほど、および漁港のあるグリッドで高まった (図(2)-10d)。育雛期においてもウミネコは漁港を利用したが、本研究ではこの時期の餌を調べていない。また、育雛期のウミネコは抱卵期同様に海洋フロント付近でも採食していたが (図(2)-9d)、ハビタットモデルで選択された変数は水深のみであった。この時期はウミネコの採食範囲がサハリン周辺まで広域に拡大したため、抱卵期と同様のハビタットモデル手法ではカーネル密度を上手く説明しきれていない可能性がある。

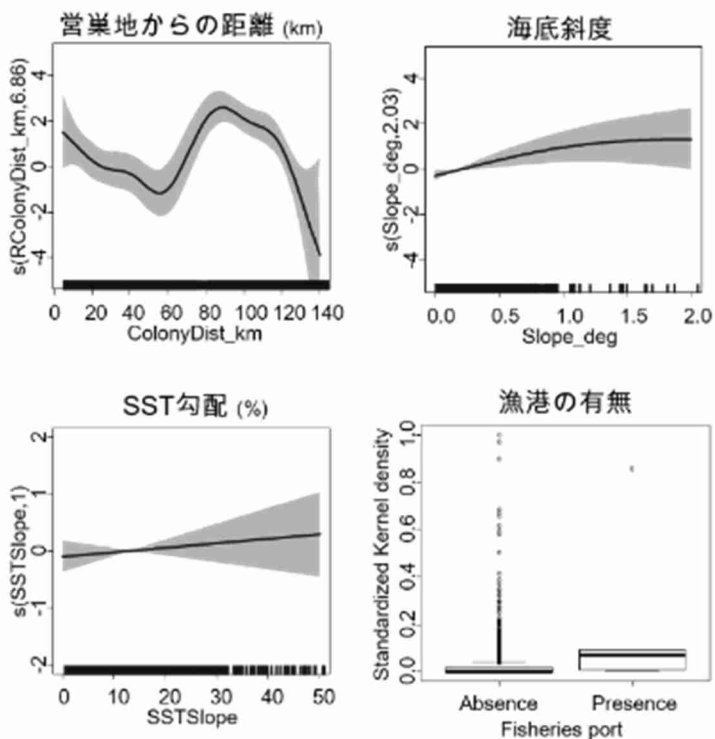
表(2)-2 各年・各営巣地・各時期における採食ハビタットモデルのAICによる変数選択結果。  
+はその変数がモデルに含まれていることを示す。太字は選択されたモデルを表す。

モデル	順位	環境変数					AIC	ΔAIC
		営巣地からの距離	水深	海底斜度	SST	SST勾配		
2016年利尻 抱卵期	1	+	+	+			422.5	0
	2	+	+	+			422.7	0.17
	3	+	+	+		+	423.3	0.81
	4	+	+	+		+	423.9	1.34
	5	+	+	+	+	+	425.4	2.89
	6	+	+	+	+	+	425.9	3.39
	7	+			+	+	429.4	6.91
	8	+	+				429.7	7.16
2017年利尻 抱卵期	1	+		+			202.4	0
	2	+		+			204	1.57
	3	+		+		+	204.3	1.88
	4	+		+	+		204.6	2.16
	5	+		+		+	205.8	3.44
	6	+		+	+		206.1	3.72
	7	+		+	+	+	206.4	4.03
	8	+		+	+	+	208	5.59
2017年枝幸 抱卵期	1			+			24.8	0
	2	+		+			26.4	1.69
	3			+			26.5	1.8
	4			+		+	26.7	1.91
	5	+		+			27.7	2.92
	6	+		+		+	28.2	3.46
	7			+		+	28.4	3.67
	8			+	+		29.3	4.56
2017年利尻 育雛期	1		+				354.4	0
	2		+				356	1.64
	3		+			+	356.9	2.46
	4		+		+		357.7	3.24
	5		+			+	358.6	4.23
	6	+	+		+	+	359.1	4.71
	7		+		+		359.4	4.95
	8		+		+	+	359.9	5.5

a) 2016年利尻抱卵期



b) 2017年利尻抱卵期

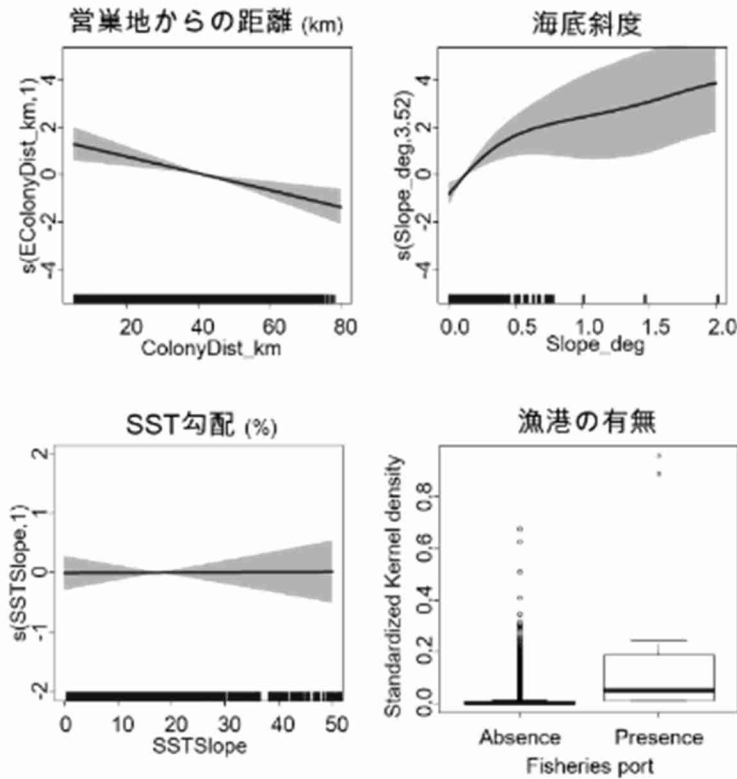


図(2)-10 a) 2016年利尻抱卵期、およびb) 2017年利尻抱卵期のウミネコの採食場所を説明するハビタットモデルにおける環境変数（営巣地からの距離、水深、海底斜度、SST、SST勾配、および漁港の有無）に対するGAMの応答曲線。

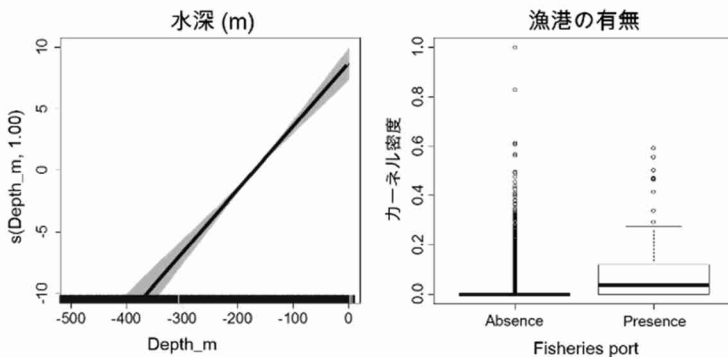
モデル選択により選択された変数に対する応答のみを示す。y軸の値が大きいほど採食場所として利用する確率が高いことを示す。灰色の塗り潰しは95%信頼区間を表す。漁港の有無はカテゴリカル変数であるため、応答カーブではなく漁港のあるグリッドと無いグリッドのカーネル密度を箱ひげ図により比較している。



c) 2017年枝幸抱卵期



d) 2017年利尻育雛期



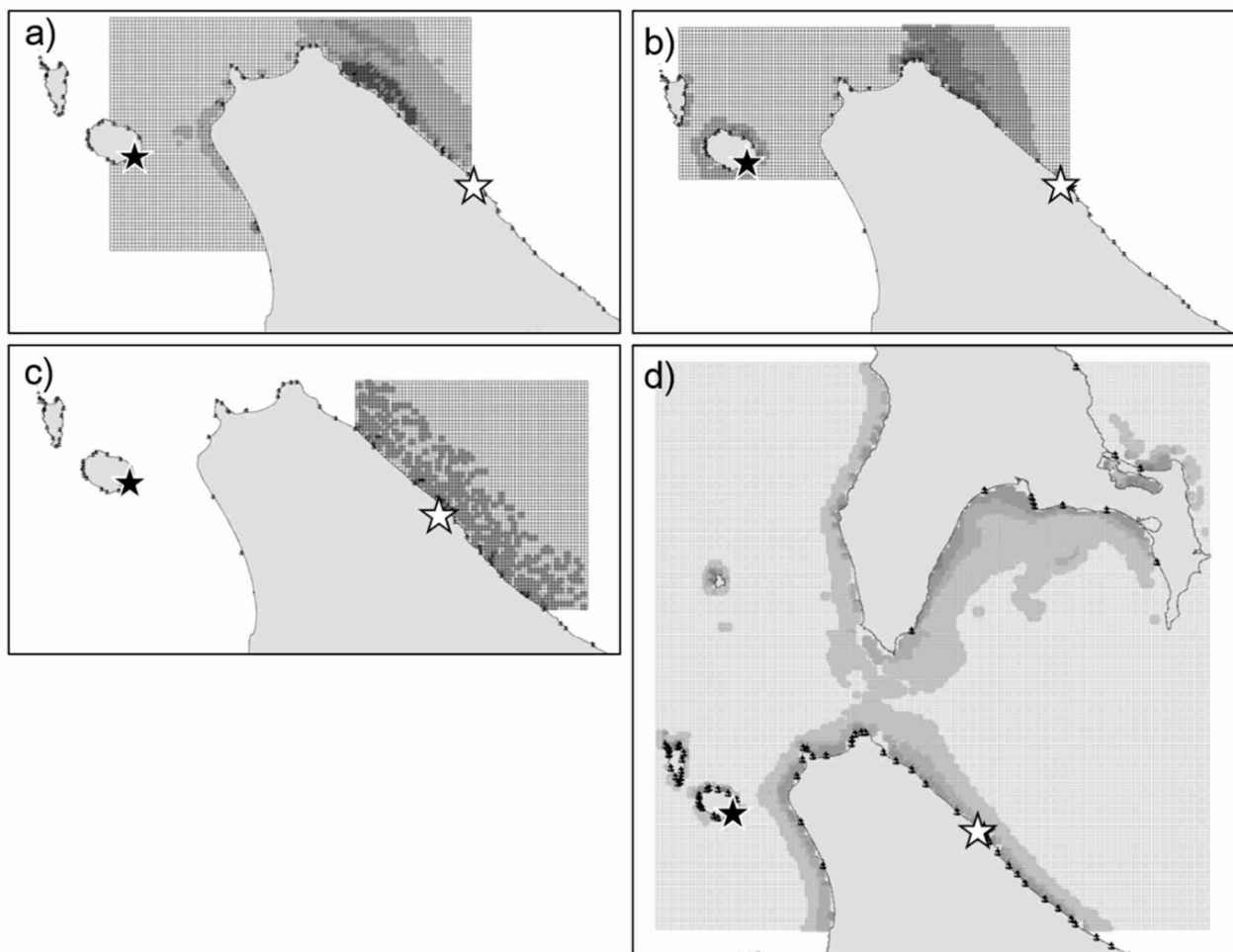
図(2)-10 c) 2017年枝幸抱卵期、およびd) 2017年利尻育雛期のウミネコの採食場所を説明するハビタットモデルにおける環境変数（営巣地からの距離、水深、海底斜度、SST、SST勾配、および漁港の有無）に対するGAMの応答曲線。

図の表記方法は上記図(2)-10aおよびbと同じ。

#### 採食ハビタットモデルを用いた採食場所の再現

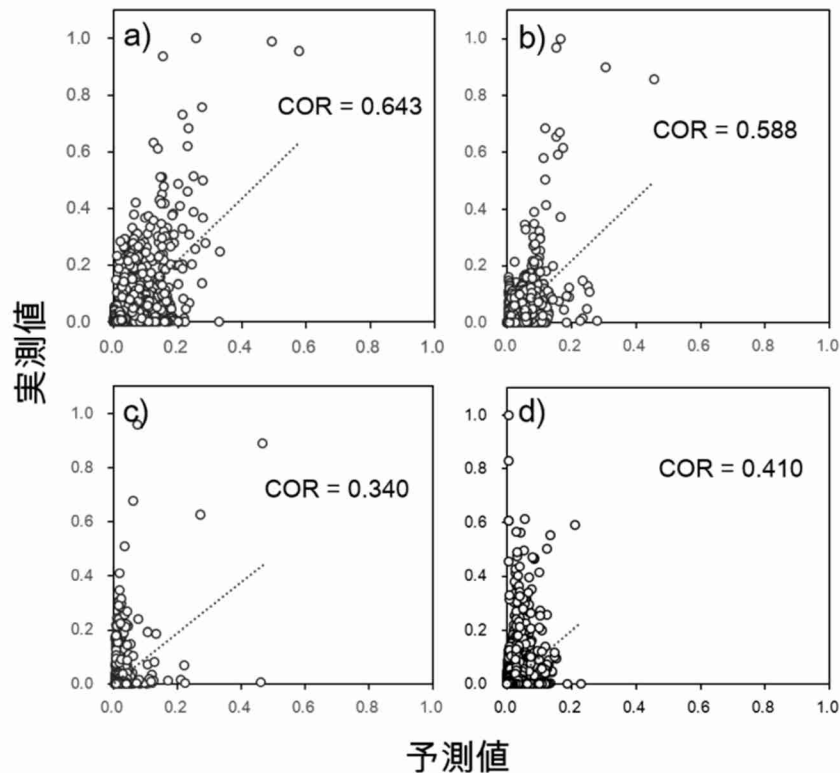
上記より、ウミネコの採食カーネル密度は、4~5個の少数の環境変数により説明可能であった。これら構築されたモデルを用いて、対象範囲の潜在的な高頻度採食場所を予測して採食鳥感度マップを作成するため、まず、各年・各営巣地で構築されたモデルにその場所・その年の環境変数を投入し、潜在的な高頻度採食場所を予測し採食鳥感度マップを作成した（図(2)-11）。次に、これら予測された採食場所が実際の採食場所をどの程度再現できているかを検証するため、グリッドごとの予測カーネル密度と実測カーネル密度の相関係数を調べた（図(2)-12）。これら再現性の検証の結果、利尻抱卵期においてはいずれの年においても相関係数は0.5以上と比較的高く、ハビタットモデルによる採食場所の予測再現性は高いと判定できた。それらに比して枝幸の予測再現性は低かった。この理由ははっきりしないが、枝幸では利尻に比べてウミネコの採食範囲が狭く、環境変数の変異の幅が小さいためにモデルにおける予測力が低くなったことが可能性としてあげられる。また、利尻の育雛期においても、予測再現性は利尻の抱

卵期よりも低かった。この理由もはっきりとはしないが、先述の通り育雛期には採食範囲が広域となったため、モデルによる予測精度が低下したのかもしれない。



図(2)-11 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、c) 2017年枝幸抱卵期、およびd) 2017年利尻育雛期における「採食場所マップ」(採食に関する鳥感度マップ)。

色の濃淡は2kmグリッドごとに予測された採食カーネル密度を表し、色の濃度は薄い順に、全体の95%、50%、および25%の採食点が含まれる範囲を示している。このマップにおいては、色の濃い場所ほどウミネコが高頻度に採食に利用するため風力発電の影響感度が高い場所とみなせる。黒星は利尻営巣地、白星は枝幸営巣地を表す。網掛けの範囲はバックグラウンドを示す。



図(2)-12 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、c) 2017年枝幸抱卵期、およびd) 2017年利尻育雛期における予測採食カーネルと実測採食カーネルの相関関係。CORはピアソンの相関係数。破線は回帰直線を示す。

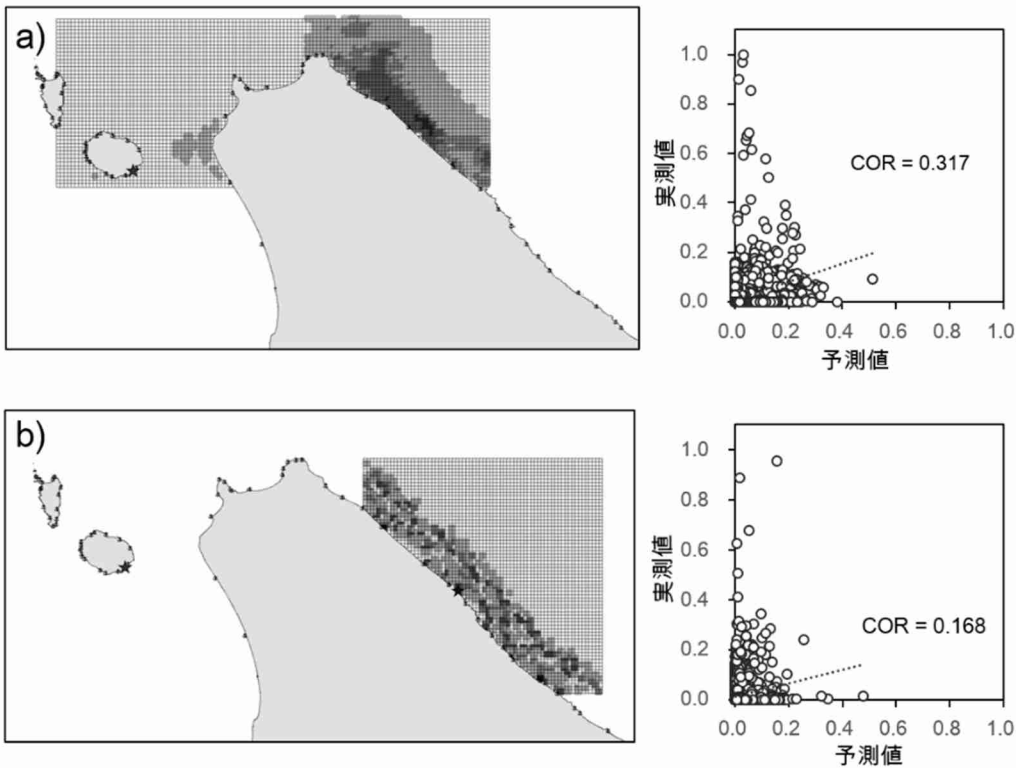
#### モデルの評価

本研究において構築された採食ハビタットモデルの評価を行うため、交差検証（クロスバリデーション）を行った。全GPSデータをランダムに7：3の割合で分割し、前者（トレーニングデータ）を使って構築したモデルの予測値と後者（テストデータ）の値を比較した。この検証は数が最も多かった2017年利尻抱卵期のデータを用いて行った。モデルの評価を行うため、トレーニングデータから構築された採食ハビタットモデルに環境データを代入して得られた予測カーネル密度とテストデータから計算されたカーネル密度との相関関係を見た。後述するように、データ数が減少するとバックグラウンドの面積は減少する。クロスバリデーションにおいては、トレーニングデータのバックグラウンドの方がテストデータのそれよりも大きくなるが、予測値と実測値との比較はテストデータのバックグラウンドを対象として実施した。検証の結果、予測値と実測値のピアソンの相関係数（COR）は0.575と高く、採食ハビタットモデルの予測精度は高いことがわかった。

#### 高頻度採食場所モデルの外挿性

採食ハビタットモデルの外挿性を検証するため、2016年利尻島のモデルをベースモデルとし、これに2017利尻、あるいは2017年枝幸の環境データを投入し、2kmごとの予測カーネル密度と実測カーネル密度の相関関係を調べた。モデルを外挿する際、対象範囲（最外郭）は外挿先のもの（2017年利尻あるいは枝幸）とした（図(2)-13）。2016年利尻モデルを外挿した時の相関係数は、2017利尻はある程度は高かったが、いずれも再現性を検証した場合よりも低く、ウミネコの採食ハビタットモデルの外挿性は低いと判断された。外挿性が低い理由ははっきりしないが、利尻では、上述のように2016年と2017年ではウミネコの採食エリアがわずかに変化していたことがあげられる。枝幸では利尻に比べて採食範囲が狭いため、より広域を予測対象範囲として構築された2016年利尻モデルの当てはまりが悪かったのかもしれない。2017年の利尻育雛期に関しては、採食範囲およびバックグラウンドが2016年抱卵期と大きく異なっ

たため、モデルの外挿は行わなかった。バックグラウンドが大きく異なる営巣地あるいは時期間のモデルの外挿性検証は、今後の課題である。

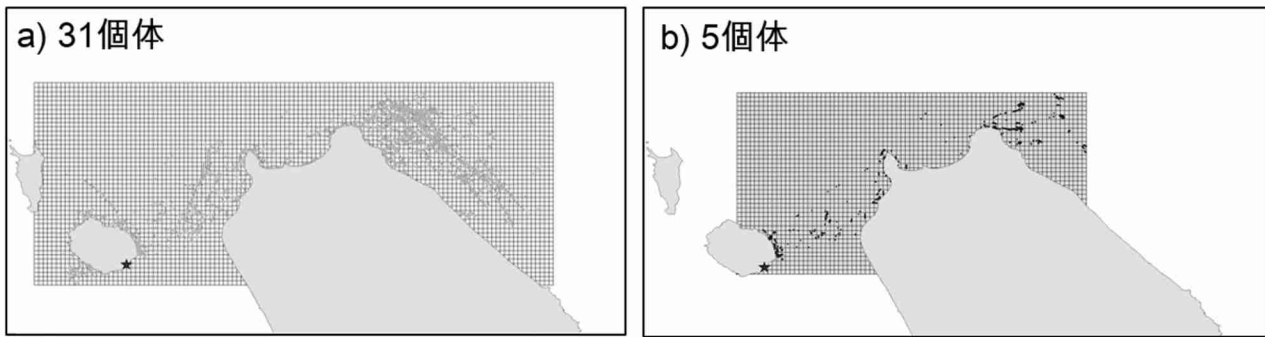


図(2)-13 a) 2016年利尻モデルを2017年利尻に外挿して予測された採食カーネル密度、およびその予測カーネル密度と実測カーネル密度の相関関係。b) 2016年利尻モデルを2017年枝幸に外挿して予測された採食カーネル密度、およびその予測カーネル密度と実測カーネル密度の相関関係。CORはピアソンの相関係数を表す。

次に、外挿性を高めるための手法を検討した。採食場所を予測する上で営巣地からの距離の影響（GAMレスポンスカーブの形）はコロニーや年ごとに異なったので、営巣地からの距離を変数から除外したモデルの外挿性を検証した。その結果、営巣地距離を外した2016年利尻モデルを2017年利尻に外挿した際のピアソンの相関係数は0.304、2017年枝幸に外挿した時は0.168であり、いずれも外挿性は向上しなかった。外挿性を向上させるため今後検討すべき手法としては、バックグラウンドを狭める、あるいは広げる、バックグラウンドは年や場所により変化させず一定の範囲とする、環境変数を増やす、あるいは減らす（たとえばSSTのみからの予測を試す）、ベースモデルに外挿先のトラッキングデータを順次投入し、ベースモデルを改善していく、などがあげられる。

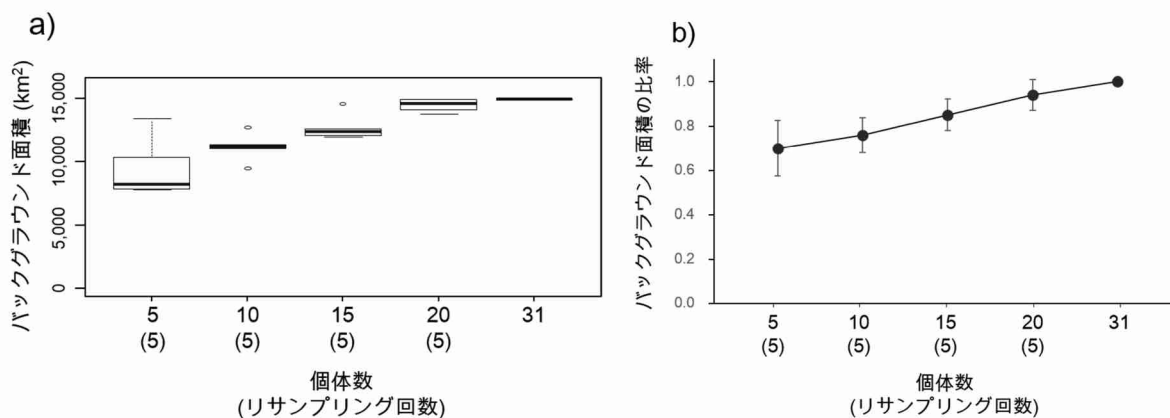
#### 必要なサンプル数の検討

トラッキング手法は資金・労力がそれなりにかかるため、これらの軽減を図る必要がある。本研究では、適切なハビタットモデルを構築するために必要なサンプル個体数を検討した。海鳥の場合、一般的にサンプル個体数が少ないと採食利用範囲の外郭が縮小し、個体群の生息地利用範囲を過小評価してしまう（Soanes et al. 2013）。2017年の利尻データを用いて、最大31個体から個体数を減らしていった際に、バックグラウンドがどの程度減少してしまうかを調べた。31個体からランダムに20、15、10、5個体を選択し、バックグラウンド面積を調べた。ランダムな個体選択は5回ずつ行った。個体数を減らすとバックグラウンド面積は縮小した（図(2)-14、15）。31個体から得られたバックグラウンド面積に対して、20個体から得られたバックグラウンド面積は90%、15個体では85%に匹敵したが、5個体では65%程度にまで縮小した（図(2)-15）。費用や労力をあまり増やさずに、満足のいくバックグラウンドを得るためのサンプル数は15~20個体程度と推定された。



図(2)-14 a) 31個体を用いた時のバックグラウンド（灰色の網掛け範囲）とb) 5個体を用いた時のバックグラウンド。

5個体のバックグラウンドは5回の個体選択のうちの一回を例示している。濃い部分は採食場所。個体数が少ないと、個体群の生息地利用範囲を過小評価してしまう可能性が高い。



図(2)-15. 最大31個体から個体数をランダムに減らしたときのa) バックグラウンド面積とb) 31個体のバックグラウンドを基準とした場合のバックグラウンド面積の比率。

#### 4-3. Mゾーン高頻度飛行場所

4-2 で実施した高頻度採食場所の予測と同様に、衝突リスクが高い高度（Mゾーン）を飛行しやすい場所をハビタットモデルによって予測する手法を検討した。

#### GPS高度の精度検証

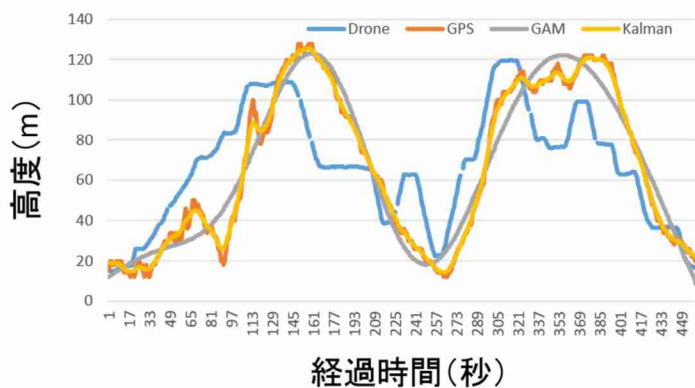
GPSでは高度も記録されるが、その測定精度は一般に高くはないと言われている。GPS記録高度の精度検証のため、GipSy-5を気圧高度計搭載のドローンに装着して飛行実験を行った。はじめに、直上に上昇させたドローンの高度を直下の地上からレーザー距離計で計測し、ドローン高度の精度を検証した。その結果、ドローン高度とレーザー距離計による測定された高度はきわめて高く相関したため（ $r=0.9$ ）、ドローン高度の精度は高いことがわかった。地上にある時、ドローンの高度（土地標高）とGipSy-5が記録したGPS高度のズレは2mほどであった。それぞれ3~10分間にドローンの高度を最高120mまで上下させた7回の飛行実験を行った。その結果、GPS記録高度とドローン高度とのズレは平均±20.2mであり（図(2)-16）、GPS記録高度の精度は±20mであることが明らかとなった。飛行開始時のGPS高度と終了時のGPS高度のズレは約2~4mと小さかったため、本研究ではとくにこれを補正しなかった。

さらにもっともらしさを高めるために、時間経過を独立変数としたGAM、およびベイズモデリングを用いたカルマンフィルタリング法によるスムージングを行った。結果、どちらのスムージング手法を用いても、GPS記録高度とドローン高度とのズレはほとんど減少しなかった（GAMスムージング後のズレ：平均20.0m、カルマンスムージング後のズレ：平均19.9m、図(2)-16）。

また、GPS高度には衛星との通信時間に起因する観測タイムラグが生じる可能性があったため、GPS高

度を20~30秒前にずらしてドローン高度との相関関係を調べた。その結果、ピアソンの相関係数は、時間をずらさない場合 ( $r=0.82\sim 0.88$ ) に比べ、ずらした場合 ( $r=0.75\sim 0.88$ ) に上昇するわけではなかった。したがって、本研究ではGPS高度データに余計な誤差を内包させないために、スムージングやタイムラグの補正は行わず、GPS記録高度データをそのまま解析に用いた。

GPS記録高度の精度については、以下の理由から今後さらなる検証が必要かもしれない。1) ドローンは法令により飛行可能な高度が120mと定められているため、精度検証実験においてもこの高度を上限としたが、ウミネコはこれよりも高い高度を飛ぶことがある。2) ドローンはバッテリーの制約から一度の飛行が10分程度に限定されるが、ウミネコの連続飛行時間はこれよりずっと長い。とくに長時間水平飛行を行った時の精度検証は必要かもしれない。3) ドローンではウミネコが見せる多様な飛行様式（羽ばたき飛翔、ホバリング、急降下・上昇など）を再現できていない可能性が高い。これらの問題を解決するためには、より大型の鳥に気圧高度計とGPSの両方を装着して、GPS記録高度の精度検証を行うことが有効かもしれない。



図(2)-16 約7分30秒間の飛行高度精度検証実験においてドローン（青）およびGPS（オレンジ）により記録された高度。

GPSで得られた高度をGAM（灰色）とカルマンフィルタリング（黄色）によりスムージングした場合の値も示す。

### Mゾーン飛行頻度モデル

飛行高度は、GPS高度と土地標高の差とした。GPSの高度精度を考慮し、飛行経路において風車と衝突しやすい高度（Mゾーン）は、風車ブレード高 $\pm 20\text{m}$ すなわち40~120mとした。2kmグリッドごとのMゾーンの飛行頻度を、下記の2つの手順で説明するモデルを構築した。飛行範囲は陸と海の広域におよぶため、採食モデルと同様に分布範囲の最外郭をバックグラウンドに設定した場合、そこには多くの不在グリッドが存在する。そのため、採食モデルと同じバックグラウンドの決め方では、モデルの予測精度が低下することが懸念された。そこで、本研究ではMゾーンを1回でも飛行したグリッドをバックグラウンドとし、この範囲を対象として「Mゾーン飛行頻度モデル」を構築した。従属変数はMゾーンの飛行頻度、独立変数は営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無とした。海面の標高は0m、土地斜度も0とした。モデルはポアソン分布を仮定した一般化加法モデル（GAM）を用いた。AICにより最適モデルを選択した（表(2)-3）。

2016年利尻抱卵期におけるMゾーン飛行頻度は、営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無により説明された（図(2)-17a）。営巣地からの距離は複雑に影響しており、飛行頻度は営巣地から10km以内、および90km程度の場所で高まった。Mゾーン飛行頻度は、海岸線に近く、標高が20mまたは50m程度、あるいは土地傾斜が大きい場所で高まり、漁港のあるグリッドで高まった。これらは、海岸線の段丘斜面でMゾーン飛行頻度が高まることを示している。

2017年利尻抱卵期におけるMゾーン飛行頻度も、営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無により説明された（図(2)-17b）。2016年と同様に、営巣地からの距離は複雑に影響しており、飛行頻度は営巣地から10km以内、50kmおよび90km程度の場所で高まった。頻度は、

海岸線に近く、標高が10m、40m、70mまたは100m程度、あるいは土地傾斜が大きい場所で高まり、漁港のあるグリッドで高まった。これらは、海岸線の段丘斜面、あるいは丘陵地など標高の高い場所でMゾーン飛行頻度が高まることを示している。

2017年枝幸抱卵期におけるMゾーン飛行頻度も、営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無により説明された(図(2)-17c)。利尻とは異なり、飛行頻度は営巣地から10km以内の場所で高まった。頻度は、海岸線に近く、標高が10mまたは40m程度、あるいは土地傾斜が大きい場所で高まり、漁港のあるグリッドで高まった。これらは、2016年利尻抱卵期と同様に、海岸線の段丘斜面でMゾーン飛行頻度が高まることを示している。

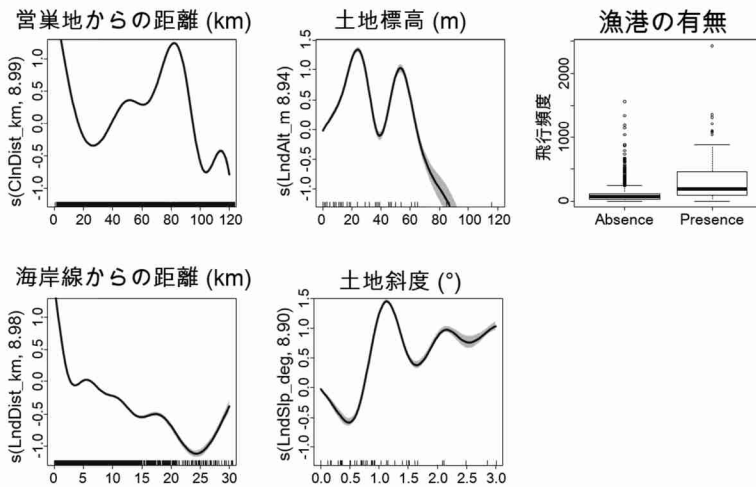
2017年利尻育雛期については、使用したリモート式のGPSデータロガーの記録高度の精度が不明であったことから、飛行場所モデルは構築しなかった。

表(2)-3 各年・各営巣地における抱卵期のMゾーン飛行頻度モデルのAICによる変数選択結果。

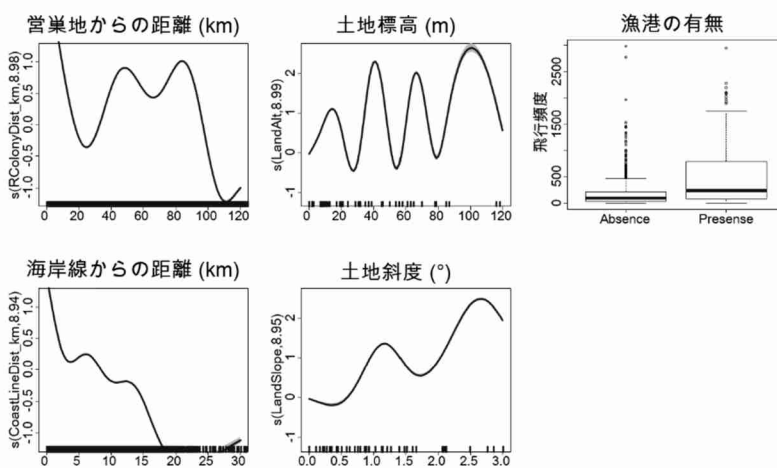
+はその変数がモデルに含まれていることを示す。太字は最適モデルを表す。

モデル	順位	環境変数					AIC	ΔAIC
		営巣地 距離	海岸線 距離	土地 標高	土地 傾斜	漁港の 有無		
2016年利尻 抱卵期	1	+	+	+	+	+	<b>106927.7</b>	<b>0</b>
	2	+	+	+	+		107881.6	953.9
	3	+	+		+	+	107900.9	973.21
	4	+	+		+		108831.5	1903.78
	5	+	+	+		+	109448.1	2520.31
	6	+	+	+			110267.7	3339.97
	7	+	+			+	114412.4	7484.62
	8	+	+				115068.8	8141.05
2017年利尻 抱卵期	1	+	+	+	+	+	<b>188587.5</b>	<b>0</b>
	2	+	+	+	+		189179.6	592.15
	3	+	+		+	+	195274.6	6687.09
	4	+	+	+		+	195472.8	6885.29
	5	+	+	+			195590.5	7003.05
	6	+	+		+		195799.1	7211.57
	7	+		+	+	+	201377	12789.53
	8	+	+			+	203580.9	14993.43
2018年枝幸 抱卵期	1	+	+	+	+	+	<b>40258.4</b>	<b>0</b>
	2	+	+	+	+		40742.8	484.43
	3	+	+		+	+	41395	1136.65
	4	+	+		+		41667.7	1409.31
	5	+	+	+		+	42080.4	1821.99
	6	+	+	+			42541	2282.59
	7	+	+			+	47572.3	7313.9
	8	+	+				47784.5	7526.12

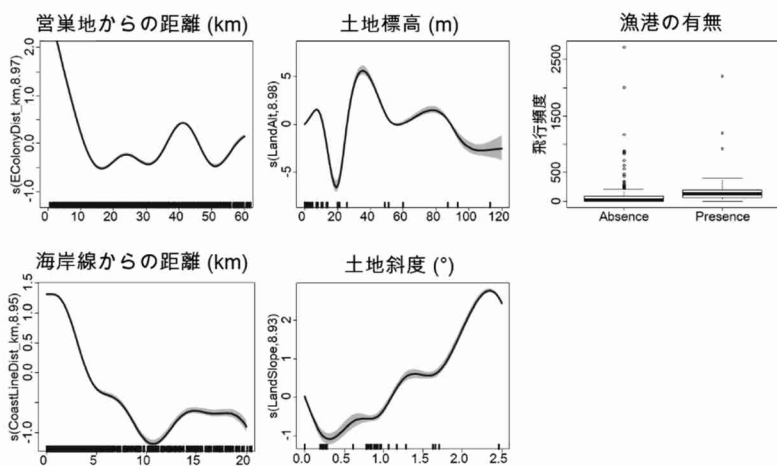
## a) 2016年利尻抱卵期



## b) 2017年利尻抱卵期



## c) 2017年枝幸抱卵期



図(2)-17 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、およびc) 2017年枝幸抱卵期のウミネコのMゾーン飛行頻度を説明するハビタットモデル (Mゾーン飛行頻度モデル) における環境変数 (営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無) に対するGAMの応答曲線。

モデル選択により選択された変数に対する応答のみを示す。y軸の値が大きいほどMゾーンを飛行する確率が高いことを示す。灰色の塗り潰しは95%信頼区間を表す。漁港の有無はカテゴリカル変数であるため、応答カーブではなく漁港のあるグリッドと無いグリッドの飛行頻度を箱ひげ図により比較している。



### Mゾーン飛行頻度の再現性

ウミネコのMゾーン飛行頻度は、5個の環境変数により説明可能であった。次に、構築された「Mゾーン飛行頻度モデル」を用いて、対象範囲の潜在的な高頻度Mゾーン飛行場所を予測して衝突鳥感度マップを作成した。その際、予測はどの程度データを再現しているか検証した。そのため、まず、予測する際の対象範囲（バックグラウンド）を以下の方法でもとめた。Mゾーン飛行場所はごく限られた狭い範囲であったので、矩形を外郭としてバックグラウンドとした場合予測力が大きく減少すると考えられた。そのため、潜在的にMゾーンを飛行するグリッドをバックグラウンドとすることにした。潜在的にMゾーンを飛行するグリッドは、Mゾーンを一度以上飛行したか（1）しないか（0）に影響する環境要因を求める「Mゾーン飛行グリッド説明モデル」を構築し、その予測範囲とした。Mゾーン飛行グリッド説明モデル構築のための環境要因としては営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無とした。海面の標高および斜度は0とした。このMゾーン飛行グリッド説明モデルを構築するための対象範囲は、各調査地・各年におけるウミネコの飛行最外郭範囲（飛行地点の最大・最小緯度経度を辺とする四角形）とした。採食ハビタットモデルと同様、この最外郭範囲は、調査期間において少なくとも一頭以上が飛行した範囲であるため、対象個体群の個体が潜在的に飛行可能であった範囲とみなせた。次に、この範囲からMゾーンを一度以上飛行する確率が高いグリッドを抽出するためにMゾーン飛行グリッド説明モデルを構築した。モデルはbinomial分布を仮定した一般化加法モデル（GAM）を用いた。採食モデルと同様に、AICにより最適モデルを選択した（表(2)-4）。

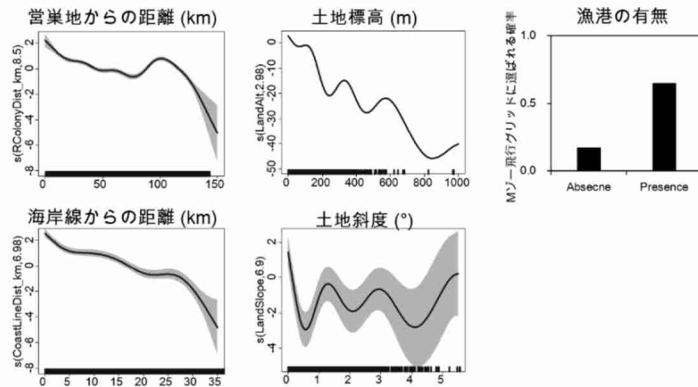
表(2)-4 各年・各営巣地における抱卵期のMゾーン飛行グリッド説明モデルのAICによる変数選択結果。  
+はその変数がモデルに含まれていることを示す。太字は最適モデルを表す。

モデル	順位	環境変数					AIC	ΔAIC
		営巣地 距離	海岸線 距離	土地 標高	土地 傾斜	漁港の 有無		
2016 年利尻 抱卵期	1	+	+	+	+	+	<b>4022.4</b>	<b>0</b>
	2	+	+	+	+		4030.5	8.03
	3	+	+		+	+	4097.9	75.46
	4	+	+		+		4112.1	89.66
	5	+	+	+		+	4213.9	191.48
	6	+	+	+			4216.9	194.5
	7	+		+	+	+	4230.5	208.05
	8	+		+	+		4237.1	214.68
2017 年利尻 抱卵期	1	+	+	+	+	+	<b>4439.1</b>	<b>0</b>
	2	+	+	+	+		4482.7	43.56
	3	+	+		+	+	4544.2	105.06
	4	+	+		+		4565	125.91
	5	+	+	+			4618.4	179.27
	6	+	+	+		+	4623.1	183.97
	7	+		+	+	+	4715.2	276.09
	8	+		+	+		4729.4	290.3
2018 年枝幸 抱卵期	1	+	+	+	+	+	<b>1822.3</b>	<b>0</b>
	2	+	+	+	+		1826.1	3.82
	3	+	+		+	+	1828.4	6.05
	4	+	+		+		1832.3	10.02
	5	+		+	+	+	1858.6	36.29
	6	+		+	+		1865.9	43.55
	7	+			+	+	1876.9	54.56
	8	+			+		1884.6	62.25

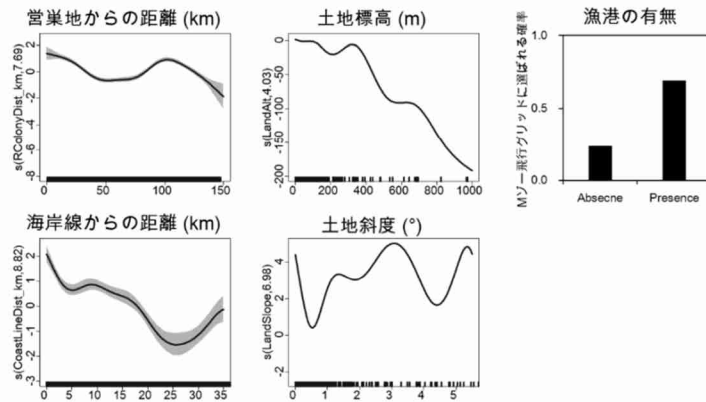
全ての年・営巣地において、ウミネコが一度以上Mゾーンを飛行するかどうかは営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無により説明された（図(2)-18a、b、c）。全

てにおいて、営巣地に近いほど、海岸線に近いほど、標高が低いほど、また漁港のあるグリッドでMゾーンを一度以上飛行する確率が高まった。土地傾斜はその確率に複雑に影響を及ぼしており、明確なパターンは見られなかった。

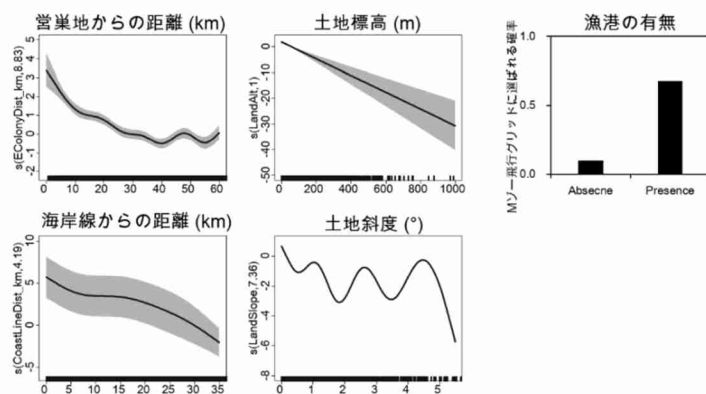
a) 2016年利尻抱卵期



b) 2017年利尻抱卵期



c) 2017年枝幸抱卵期



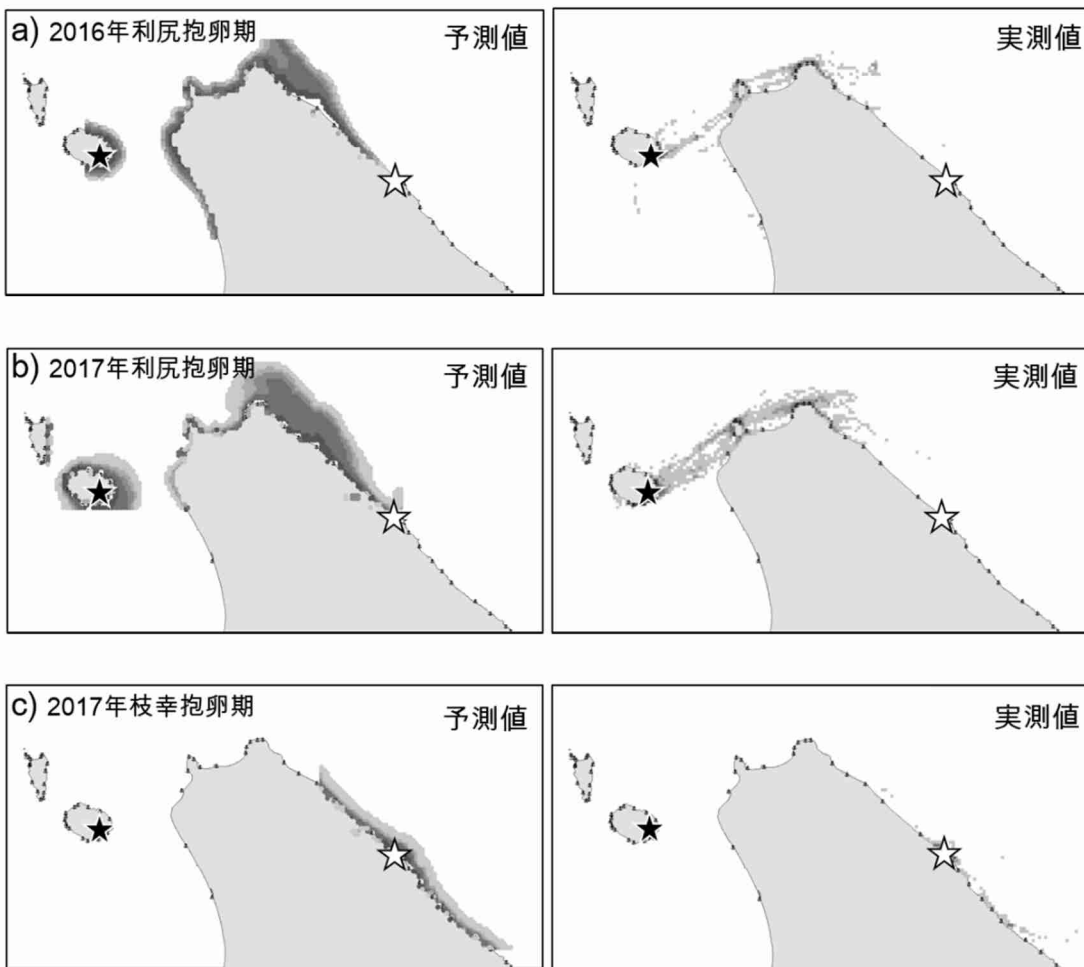
図(2)-18 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、およびc) 2017年枝幸抱卵期のウミネコのMゾーン飛行グリッド説明モデルにおける環境変数（営巣地からの距離、海岸線からの距離、土地標高、土地斜度、および漁港の有無）に対するGAMの応答曲線。

モデル選択により選択された変数に対する応答のみを示す。y軸の値が大きいほどウミネコがそのグリッドのMゾーンを一度以上飛行する確率が高いことを示す。灰色の塗り潰しは95%信頼区間を表す。漁港の有無はカテゴリカル変数であるため、応答カーブではなく漁港のあるグリッドと無いグリッドの全数のうちウミネコがMゾーンを一度以上飛行したグリッドの割合を示している。

このMゾーン飛行グリッド説明モデルに環境変数を入れて得た各グリッドの予測値（0から1の間の値をとる）がlogistic回帰変曲点よりも大きいグリッドを「予測飛行グリッド」とした。予測飛行グリッ

ドと実際のMゾーン飛行グリッドには不一致が生じ、その程度は営巣地により異なった。Mゾーン飛行グリッドモデルにより得られた「予測飛行グリッド」のうち、実際にMゾーン飛行が見られた割合は、2016年利尻抱卵期においては69%、2017年利尻抱卵期においては65%であったが、2017年枝幸においてはわずか7%であった。逆に、Mゾーン飛行グリッドモデルにより飛行グリッドと予測されなかったグリッドで、実際のMゾーン飛行があった割合は、2016年利尻抱卵期においては11%、2017年利尻抱卵期においては16%、2017年枝幸においては5%であった。枝幸においては、飛行範囲が狭く、その範囲内の環境の変異が小さかったため、Mゾーン飛行グリッドモデルの予測精度がとくに低かったと考えられた。

飛行グリッドモデルの予測精度はそれほど高くはないようであったが、このモデルで得られた「予測飛行グリッド」をバックグラウンドとし、環境変数を「Mゾーン飛行場所モデル」に投入することで、予測されたバックグラウンドにおけるMゾーン飛行頻度を予測した(図(2)-19)。この予測マップがウミネコの洋上風車衝突感度マップである。

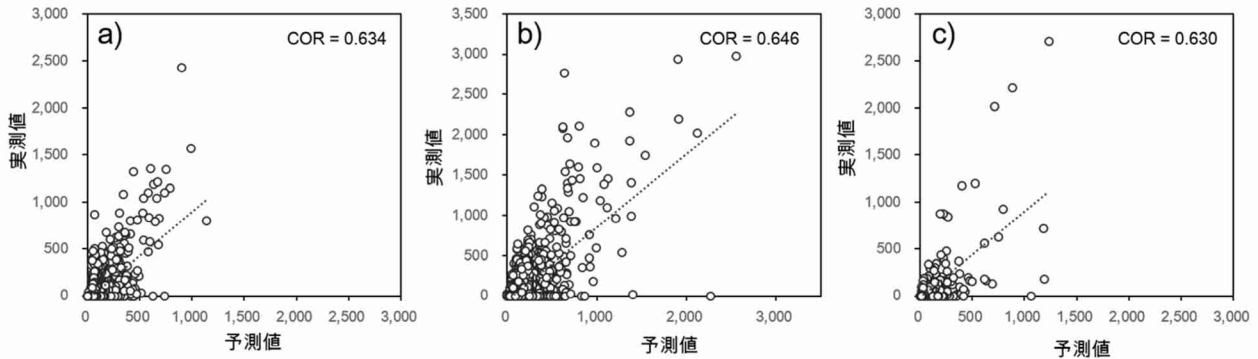


図(2)-19 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、およびc) 2017年枝幸抱卵期における潜在的採食鳥感度マップ(左)およびMゾーン飛行頻度の実測値(右)。

色の濃淡は2kmグリッドごとに予測されたMゾーン飛行頻度の相対値を表し、色の濃度は薄い順に、頻度上位5%、25%、50%、および75%のグリッドを示している。このマップにおいては、色の濃い場所ほどウミネコがMゾーンを高頻度に飛行するため風車との衝突リスクが高い場所とみなせる。黒星は利尻営巣地、白星は枝幸営巣地を表す。予測値のカーネルが「Mゾーン飛行場所マップ」(衝突に関する鳥感度マップ)である。

次に、予測された高頻度Mゾーン飛行場所が実際の高頻度飛行場所をどの程度再現できているかを検証するため、グリッドごとの予測飛行頻度と実測飛行頻度の相関係数を調べた(図(2)-20)。上述のように、予測飛行グリッドと実際のMゾーン飛行グリッドの不一致が相当数ある。この予測再現精度の検証は

両者が一致したグリッドについてのみ実行可能となる。そうしたグリッドのみで再現性を検証した結果、すべての調査地および年において、相関係数は0.6以上と高く、予測飛行グリッドと実際のMゾーン飛行グリッドが一致した場合においてはMゾーン飛行頻度モデルの予測再現性は高いと言えた。



図(2)-20 a) 2016年利尻抱卵期、b) 2017年利尻抱卵期、およびc) 2017年枝幸抱卵期における予測Mゾーン飛行頻度と実測Mゾーン飛行頻度の相関関係。

CORはピアソンの相関係数。破線は回帰直線を表す。予測飛行グリッドと実際のMゾーン飛行グリッドが一致した場合のみ検証に用いている。

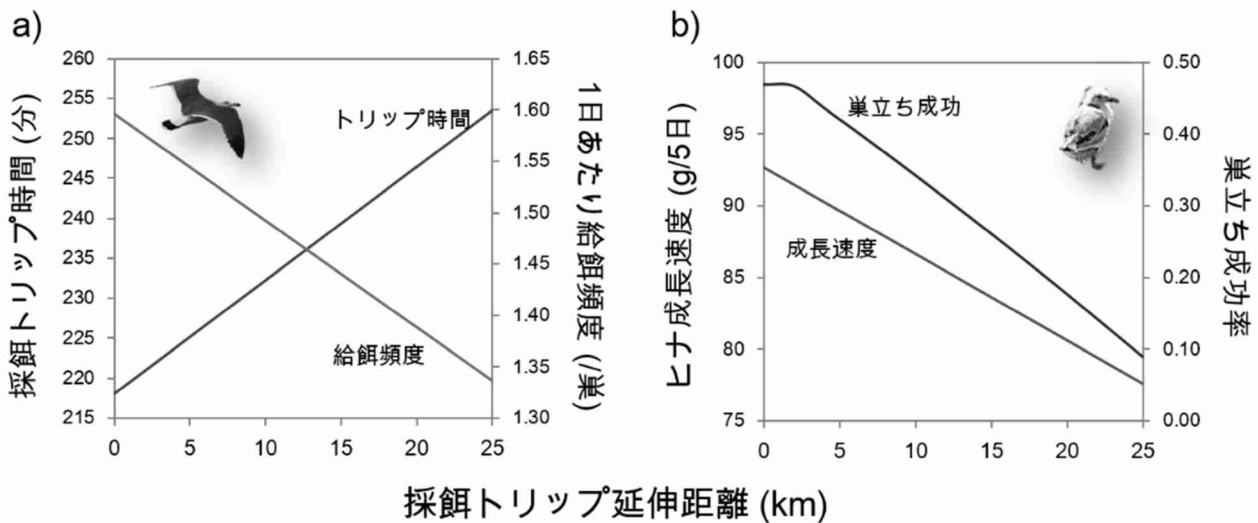
このように、Mゾーン飛行頻度の予測においては、潜在的にMゾーンを一度以上飛行するグリッドの予測すなわちバックグラウンドの設定が課題である。とくに、リスク予測の点から見れば、リスク予測対象範囲が実際の飛行範囲よりも狭くなってしまふことはリスクの過小評価につながる可能性があるため問題である。本研究では、飛行グリッドモデル予測値におけるlogistic回帰変曲点よりも大きいグリッドを「予測飛行グリッド」と定義した。リスクの過小評価を避けるためには、予測飛行グリッドが広めに設定されるよう、グリッドの選定基準を緩和する必要があるかもしれない。

#### 4-4. リスクの推定

これまでウミネコの高頻度採食利用海域や高頻度Mゾーン飛行エリアをハビタットモデルにより予測してきたが、これらモデルで予測された値は相対的なリスクであり、それらが繁殖成功率や個体の生残率を実際にどの程度低下させるかは推定できていない。ウミネコの生態情報（例えば一日当たりのトリップ数など）を加味することで、モデルにより予測された相対リスクがウミネコの個体あたり・時間当たりのリスクとして推定可能となる。

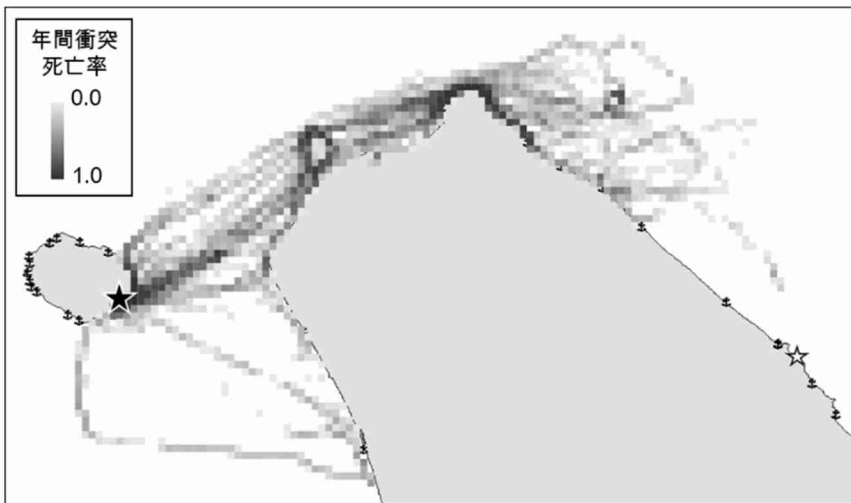
##### 飛行距離延長による繁殖率の低下

風車建設にともなう採食トリップ長延伸による給餌頻度の低下、それにとまなうヒナの成長速度低下とそれによるヒナの巣立ち成功率の低下を予測する手法を開発した。これまでの観察および繁殖モニタリングデータ（主に風間 2010および未発表）を用いて、採餌トリップ距離の延伸にとまなう、①採餌トリップ時間の延長、②給餌頻度の低下、③ヒナ成長速度の低下、④巣立ち成功率の低下を予測した。その際、本研究2016年データよりウミネコ飛行速度は42.2km/h、2007年調査データより、平均給餌トリップ長は 218分、1日あたり平均帰巣頻度は 1.05回、給餌成功率（帰巣当たり給餌割合）は0.76、ヒナ成長速度は 92.7g/5daysと仮定し、さらに2003年から2009年の繁殖モニタリングデータより巣立ち率 =  $2.28 \cdot \ln(\text{成長速度}) - 9.85$ と仮定した。この推定では、トリップの延伸距離とトリップ時間には正の相関関係を、またトリップ時間と給餌頻度には負の相関関係を仮定した。この仮定にもとづくと、一回あたりの採餌トリップ長が25km延びれば、トリップ時間は30分ほど長くなり、それにより一日当たりの給餌頻度は0.3回程度減少すると推定された（図(2)-21a）。この給餌頻度の低下により、ヒナの成長速度は15g/5日程度減少し、その結果利尻島の自然状態では45%程度である平均巣立ち率は、10%程度にまで低下すると推定された（図(2)-21b）。今後、個々の風車建設によるトリップ長の延長の関係を知らることができれば、繁殖リスクを推定できる。



図(2)-21 a) 育雛期の採食トリップが延伸した時のトリップ時間の延長と給餌頻度の低下、それにとまなう b) ヒナの成長速度および巣立ち成功率低下度合いの推定。

個体あたり衝突確率の推定 海鳥の個体群絶滅リスクを推定するには、個体あたり、繁殖期あたりの死亡率の推定が不可欠である。Mゾーン飛行頻度モデルと過去のウミネコの採食トリップ回数データから、ウミネコの個体あたり、繁殖期あたりの衝突確率をグリッドごとに予測する手法を開発した。あるグリッドの繁殖期あたり個体あたり衝突確率は、①各個体1トリップあたり各グリッドの飛行確率、②各グリッドを飛行した時のMゾーン飛行確率、③繁殖期あたり個体あたりのトリップ回数、④風車の回避率を乗じて計算できる。①と②は本研究2016年利尻抱卵期のデータから求めた。まず、①は実測値からグリッドごとの飛行頻度を求め、それを標準化して0~1までの値をとる確率として算出した。次に、②は全飛行頻度のうちMゾーンを飛行した頻度の割合をグリッドごとに算出した。各トリップは等質であると仮定すると、①と②をかけ合わせることで、ウミネコが一度トリップに出発した時に各グリッドのMゾーンを飛行する確率が求められる。③については、抱卵期(30日間)のトリップ回数は本研究の2016年GPSデータより、育雛期(40日間)は2007年の利尻の観察データ(風間 2010および未発表)から求めた。それによれば、利尻島では抱卵期にはウミネコは1日あたり0.92回、育雛期では1.05回のトリップに出発する。④は先行研究(Cook et al. 2012)から、回避率95%と仮定した。こうした仮定のもと、繁殖期あたり個体あたりの衝突死亡率をグリッドごとに計算し、利尻島で繁殖するウミネコの風車衝突リスクマップを作成した(図(2)-22)。ただし、育雛期については本研究では飛行高度を求められなかったため、抱卵期のMゾーン飛行頻度モデルの予測と同じとして計算した。



図(2)-22 利尻島のウミネコの繁殖期あたり・個体あたりの風車との衝突死亡リスクマップ。  
色が濃いほど衝突死亡リスクが高いと推定された場所である。本研究のGPSデータよりウミネコは抱卵期には一日に0.92回のトリップ、過去の観察データより育雛期には1.05回のトリップに出発し、先行研究 (Cook et al. 2012) より風車の回避率は95%と仮定した。黒星は利尻営巣地。

この手法における最大の問題はウミネコの風車回避率である。グリッドサイズは2kmあるので、実際はグリッドを通過したとしても個体が必ず風車と遭遇するとは限らない。上記推定で用いた衝突回避率は「マイクロアボイダンス」呼ばれる風車と遭遇してからの回避率である。また、海鳥は風車を数キロ～十数キロ手前から回避するとも言われている（マクロアボイダンス）。グリッドに風車が建設された場合、そもそもそのグリッドを通過する確率が下がるかもしれない、衝突リスクの推定にはマクロアボイダンスも考慮しなければならない。また、このモデルでは、飛行経路が抱卵期と育雛期で変わらないと仮定している。

#### 4-5. 「採食場所マップ」と「Mゾーン飛行場所」マップの合成

本研究においては、採食環境の悪化と風車との衝突の二つのリスクを個別に予測し、別々の鳥感度マップ、すなわち採食場所マップとMゾーン飛行場所マップとして示した。しかし、マップの使い手である事業者等にとっては、マップが一元化されていることが望ましい。そのため、これら2つのマップを統合する必要がある。統合手法としては、各マップの予測値（それぞれカーネル密度、飛行頻度）をランク分けし、順位を割り当て、両マップのグリッドごとの順位を加算し、一枚のマップに統合する方法がある。この手法では、簡便な手法でマップを統合でき利用者にとっても有用であるかもしれないが、採食環境の悪化（主に繁殖成功率の低下に寄与）と衝突リスク（親鳥の死亡）という大きさも質も異なるリスクを同等とみなして加算することは最適でないかもしれない。もう一つの方法としては、各グリッドに風車が建設されるとした場合、4-4で示したように、年間繁殖成績の低下および成鳥年間生存率の低下にどの程度寄与するか予測し、結果としてウミネコの個体群増殖率の低下度合いにどう寄与するか換算して、統合する方法がある。仮定を多く設ければ、グリッドごとの採食環境の悪化と衝突リスクがウミネコの個体群増殖率をどれほど低下させるかを推定することは可能かもしれない。今後検討すべき事項である。

### 5. 本研究により得られた成果

#### (1) 科学的意義

道北地方で繁殖するウミネコを材料として、繁殖中の個体にGPSデータロガーを装着してその移動を追跡した。まず第1に、1秒間隔のGPS追跡によって得られた移動データから、採食場所と飛行高度が推定できた。次に、移動データを用いて、高頻度採食場所と衝突リスクが高まる高度（Mゾーン）を飛行するMゾーン飛行場所を特定できた。その際、15～20個体のデータがあれば集団の採食範囲をおよそ推定で

きることもわかった。また、環境データからハビタットモデルの手法をもちいてこれらの場所を予測し、実データの再現性を見たところ、相関係数0.6前後と比較的良好な再現性があることが確かめられた。さらに、採食場所については2017年に利尻島と枝幸データを得て、2016年利尻抱卵期のデータで構築されたハビタットモデルを他の年や場所に外挿した場合、どの程度の予測精度があるか、実データとの相関係数で検討した結果、利尻2017年は相関係数0.3程度とある程度の予測精度があったが、枝幸2017では0.2以下と予測精度は悪かいことがわかった。最後に、採食距離が伸びた場合の採食成績の低下を推定し、あるグリッド2kmを覆う範囲で風車ができた場合の1繁殖期における各個体の衝突確率をグリッド毎に計算する手法が開発できた。

本研究の中で、いくつかの課題も明確になった。今後の課題としては、トラッキングデータを使ったハビタットモデリング手法の改良、適切な空間スケールの選択、採食場所マップとMゾーン飛行場所マップの統合の3つがあげられる。モデリングにおいては、まず、トラッキングデータでハビタットモデリングをする際の密度データの取り扱いとバックグラウンドの決め方をさらに検討する必要がある。本研究では、バックグラウンドをGPS実測値にもとづいて決定したため、営巣地ごと年ごとの海鳥分布の変動性に応じたリスク推定範囲を設定することができた。実際の生物分布データに応じた範囲設定を行うことで、本研究では生態学的には妥当なリスク推定が可能であったと思われる。その一方で、バックグラウンドが一定でないことから、外挿の際にはバックグラウンドのサイズがまったく異なるモデルを当てはめる場合（たとえば利尻を枝幸に外挿する場合）も生じる。これは外挿したモデルの予測精度に大きく影響する可能性がある。さらに、本研究のように営巣地ごと年ごとの海鳥分布の実測データを得るには、少なくとも各地・各年において少なくとも数個体のGPSデータが必要となるが、これが容易に実施できない場合もあるだろう。今後、さらに汎用性の高いモデルの構築手法を検討するために、営巣地を中心とした同心円をバックグラウンドとするなど、範囲を固定した場合のモデル予測精度の検証が必要かもしれない。

また、労力をかけずに外挿性を上げる手法の開発も重要である。複数のモデリング手法の検討、取り込む環境要因の検討（ローカルには再現性よりもグローバルな再現性が高い要因の抽出など）、別の年や場所で実データを得るとした場合にどの程度のサンプルを得たら効率的なのかなどの検討、が考えられる。

さらに、空間的自己相関、環境データが利用できるか、事業者の使いやすさを配慮して汎用性のある空間スケールをある程度決定する必要がある。本研究においては年や場所間の違いは未検証であるが、2017年の抱卵期においては2kmのグリッドで採食密度の自己相関は確認されなかった。この分解能は衛星情報による多くの環境データが利用できるスケールであり便利である。さらに風車の建設計画にとって使いやすいかどうか検証する必要がある。

最後にマップの統合は大きな課題である。原理的には個体群増加率への寄与から各グリッドのリスクを統合できるが、ベースとなる繁殖成績や成鳥生存率データがない場合が多いのであまり現実的ではない。トラッキングでは、それぞれに対応する採食場所マップとMゾーン飛行マップができるので、これら個体群動態にかかわる要素に直接関係する二つのマップを加算するのは理にかなっている。加算する際の重みづけは検討する必要がある。一方で、別の手法で得られた質的には同じ分布図から得られた鳥感度マップを加算する際には2重加算にならないよう注意する必要があるだろう。単純な加算ではなく、それぞれのマップのうちリスクの最大なものだけをピックアップする手法の検討も必要だ。

今後、繁殖海鳥感度マップを作る際には、多くの種のマップを得ること、それらをさらに統合することが必要となる。我が国周辺に多数繁殖する普通種、オオミズナギドリ、ウトウ、オオセグロカモメ、ウミウなどについては同様の手法で採食場所マップ、Mゾーン飛行場所マップを作ることが可能である。一方、ケイマフリ、ウミスズメなど希少種においては、トラッキング手法は使えないと思われる。どういった手法で補完し、これら希少種も含めた感度マップを作成する手法の検討が必要である。その際、希少性によって同重みづけするかも検討する必要がある。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

繁殖中の海鳥個体に、超小型GPS位置記録データロガーを装着・回収して、移動データを得ることにより、採食場所とMゾーン飛行場所について2km解像度で鳥感度マップを作ることができた。これにより、事前に、風力発電施設、特に沿岸域の洋上風力発電施設が、繁殖中の海鳥に与える影響が大きいと見込まれる海域を示すことが可能となる。一方で、この手法を広範囲にしかも多くの種類において利用するためには、コストパフォーマンスの良い、しかも合理的なリスクをもとめる手法開発が必要であることも分かった。特に、移動追跡データを使ったハビタットモデリング手法において、①解析する範囲や適切な空間スケールの選択、②他の年や繁殖地への応用を可能にするための外挿力上昇、③採食場所マップとMゾーン飛行場所マップの統合が課題である。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) Kazama K, Nishizawa B, Tsukamoto S, Gonzalez JE, Kazama MT, Watanuki Y: J Ornithol  
Male and female Black-tailed Gulls feed on the same prey species but use different feeding habitats (accepted)

#### <その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 風間健太郎: 海洋と生物、39, 430-435 (2017)  
洋上風力発電の海鳥への影響 (特集: 洋上風力発電と環境影響調査)

### (2) 口頭発表(学会等)ポスター発表

- 1) 綿貫豊、風間健太郎: 日本生態学会大会 (2018)  
「トラッキングデータによる風発リスクマップの可能性とその課題」
- 2) Kazama K, Nishizawa B, Senzaki H, Kazama MT, Watanuki Y: Pacific Seabird Group Annual Meeting, La Paz, Mexico, 2018  
“Habitat use of two Slaty-backed Gulls during non-breeding and breeding seasons revealed by GPS tracking: high dependency on anthropogenic habitats”
- 3) Kazama K, Nishizawa B, Tsukamoto S, Gonzalez JE, Kazama MT, Watanuki Y: Pacific Seabird Group Annual Meeting, La Paz, Mexico, 2018  
“Male and female Black-tailed Gulls feed on the same prey species but use different feeding habitats”
- 4) 風間健太郎、西沢文吾、塚本祥太、Jordi E. Gonzalez、風間麻未、綿貫豊: 日本鳥学会 (2017)  
「抱卵期のウミネコの採餌環境利用の性差」
- 5) 風間健太郎、綿貫豊: 日本鳥学会 (2017)  
「洋上風力発電が海鳥の繁殖個体群に及ぼす影響」  
(自由集会: 最新の知見から考える風力発電と鳥類の問題)



- 6) 風間健太郎、綿貫豊：日本生態学会（2017）  
「ウミネコのGPSトラッキングによる洋上風力発電リスクマップの作成」  
（企画集会：風力発電の鳥衝突と希少猛禽類の絶滅リスク）
- 7) Kazama K, Watanuki Y: Pacific Seabird Group Annual Meeting, Tacoma, WA, 2017  
“GPS tracking survey for habitat use of breeding Black-tailed gulls: assessing potential risks to marine and coast wind farm in northern Hokkaido, Japan”

### （3）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### （4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開国際シンポジウム「野鳥と風力発電のセンシティブティマップー その作成と活用方法ー」  
（主催：日本野鳥の会、2018年2月17日、東京都市大学、観客約100名）にて講演  
風間健太郎、綿貫豊：「北海道北部における繁殖海鳥の洋上風力発電センシティブティマップ作成事例」
- 2) 一般公開シンポジウム「鳥の衝突を避けるためにできること」（主催：新潟大学、2017年6月3日、サロベツエコネットワーク、観客約50名）にて講演  
綿貫豊：「風発影響評価に向けたウミネコの飛行3Dマップ」
- 3) 一般公開シンポジウム「鳥衝突を未然に防ぐセンシティブティマップの整備を目指して」（主催：新潟大学、2018年3月21日、東京工業大学キャンパスイノベーション、観客約30名）にて講演  
綿貫豊：「ウミネコの風発センシティブティマップ」

### （5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 北海道新聞 2018年2月5日 道南版夕刊、11頁、「カモメ追跡 洋上風車と衝突回避期待」

## 8. 引用文献

- 1) Cook, A. S. C. P., Johnston, A., Wright, L. J. & Burton, N. H. K. (2012) A review of flight heights and avoidance rates of birds in relation to offshore wind farms. Strategic Ornithological Support Services Project SOSS-02. BTO Research Report No. 618. BTO, Thetford.
- 2) 風間健太郎. (2010). ウミネコの攻撃性の個体変異と集団繁殖における機能. 北海道大学水産科学院博士論文.
- 3) Murase, H., Nagashima, H., Yonezaki, S., Matsukura, R., & Kitakado, T. (2009). Application of a generalized additive model (GAM) to reveal relationships between environmental factors and distributions of pelagic fish and krill: a case study in Sendai Bay, Japan. *ICES Journal of Marine Science*, 66, 1417-1424.
- 4) Osa Y. & Watanuki Y. (2002). Status of Seabirds Breeding in Hokkaido. *Journal of the Yamashina Institute for Ornithology*, 33, 107-141.
- 5) Senay S. D., Worner S. P. & Ikeda T. (2013). Novel Three-Step Pseudo-Absence Selection Technique for Improved Species Distribution Modelling. *PLoS One*, 8, e71218.
- 6) Soanes, L. M., Atkinson, P. W., Gauvain, R. D., & Green, J. A. (2013). Individual consistency in the foraging behaviour of Northern Gannets: Implications for interactions with offshore renewable energy developments. *Marine Policy*, 38, 507-514.
- 7) Torres LG, Sutton PJH, Thompson DR, Delord K, Weimerskirch H, Sagar PM, et al. (2015) Poor Transferability of Species Distribution Models for a Pelagic Predator, the Grey Petrel, Indicates Contrasting Habitat Preferences

## II-3 希少猛禽類オジロワシの渡りルートの解明と高精度鳥感度Map作成手法の開発

徳島大学大学院社会産業理工学研究部 准教授 河口洋一

<研究協力者>

徳島大学大学院社会産業理工学研究部 学術研究員 藪原佑樹

平成28年度~ 29年度累計予算額：29,763千円（うち平成29年度：14,859千円）

予算額は、間接経費を含む。

### [要旨]

陸上風力発電の立地に適した風況好適地は希少猛禽類オジロワシの生息域と重なり、これまでにオジロワシの風車への衝突事故が数十件報告されるなど、オジロワシ個体群に対する風力発電の負の影響が懸念される。そのため、オジロワシの生息環境や空間利用を定量的に把握した上で、本種に対する風力発電のリスク地域を示す鳥感度マップの作成が求められている。本研究ではまず、過去に行われた広域モニタリングや営巣調査の結果から広域分布情報、営巣地情報を収集した。また、6個体の幼鳥にGPS発信機を装着して移動を追跡し、詳細な空間利用や飛翔高度に関するデータを収集した。続いて、これらの地点情報と森林面積や河川との距離、気候、地形等の環境要因との関係性をMaxEntやGLMMにより解析し、(1) 越冬期のモニタリングデータから推定した越冬期の生息適地図、(2) 50か所以上の営巣地情報から推定した営巣適地図、(3) GPSの利用地点情報を基に推定した分散期の利用適地図、という3種類の生息適地図を作成した。さらに、(4) GPSの高度情報と風況シミュレーションの予測結果を用いて飛翔リスクモデルを開発した。これは、オジロワシの飛翔高度が風車ブレードの回転域(Mゾーン)と重なる場合を飛翔リスクとみなし、どのような風況の場合にMゾーンを飛翔するかを予測するモデルである。最後に、作成した3種類の地図を統合して鳥感度マップを作成し、詳細スケールでの飛翔リスクモデルと併せて、環境影響評価における活用方法を提案した。

### [キーワード]

オジロワシ、生息適地推定、GPS発信機、高解像度風況データ、鳥感度マップ

### 1. はじめに

北海道の道北地域は、風況好適地が多いことから既に多数の陸上風力発電が建設されており、今後も多くの風力発電施設の設置計画が進められている。その一方で、同地域は希少猛禽類オジロワシの主要な繁殖地、越冬地でもあることから、オジロワシの個体群に対する風力発電の負の影響が懸念される。環境省(2016)によれば、既設風車におけるオジロワシの衝突事故件数は12年間で43件に上り、オジロワシの人為的な死亡要因の上位となっている。そのため、風力発電の設置、運用に際しては、オジロワシの生息に対する配慮が求められるが、オジロワシの潜在的な生息適地に関する面的な情報は不足している。そこで、オジロワシの生息情報を広く収集し、生息環境や空間利用を定量的に把握した上で、風力発電が本種に対してリスクとなりうる地域を示す鳥感度マップ作成が求められている。

これまで、対象種の広域分布情報を基に鳥感度マップが作成されてきた。特に、既存のモニタリング調査等の分布情報を活用することで、効率的な地図作成を図ることが出来る。オジロワシについては、風車との衝突事故が多く発生する冬期に個体数モニタリングが行われており、越冬期の広域分布情報を収集することが可能である。さらに、繁殖は対象種の生活史の中で最も重要なイベントであり、営巣地周辺は可能な限り避けるべき地域とされることから、営巣地情報も収集する必要がある。本研究では、調査範囲が必ずしも対象地域全体を網羅していないことを踏まえ、ハビタットモデリングの手法を用いて対象地域全体における潜在生息適地図を推定した。

さらに、風力発電のリスク地域を詳細なスケールで特定する手法として、対象種の空間利用モデルが

注目されている。これは、対象種へのGPS発信機装着などにより詳細な飛行経路や飛翔高度に関する情報を収集し、環境要因や風況との関係をモデル化することで、対象地の環境や風況から飛翔リスクを予測するモデルである。特にオジロワシ等の大型猛禽類は風を利用して飛翔することが指摘されており、風車との衝突リスクは風況と大きく関係する可能性がある。そこで、GPS情報から取得した飛翔リスクに関する指標と、シミュレーションにより得られた風況の関係をモデル化することで、風力発電のリスクを高精度に予測する手法を開発する。

作成した鳥感度マップは実際の環境影響評価の中で活用されることが重要である。例えば配慮書の段階などで、事業予定地における風力発電のリスクを事前に把握することが出来れば、リスクの高い地域を避けることも可能となると考えられる。そこで最後に、複数の潜在生息適地図を統合した鳥感度マップ作成過程について議論し、高精度飛翔リスク予測モデルも含めた結果の解釈について議論する。さらに、環境影響評価の手続きにおける鳥感度マップの活用方法を提案する。

## 2. 研究開発目的

本研究では、希少猛禽類オジロワシを対象として、過去に行われた広域モニタリングや営巣調査の結果から本種の生息情報を収集する。また、捕獲した個体にGPS発信機を装着して移動を追跡し、詳細な空間利用や飛翔高度に関するデータを収集する。これにより、(1) 越冬期のモニタリングデータから推定した越冬期の生息適地図、(2) 50か所以上の営巣地情報から推定した営巣適地図、(3) GPSの利用地点情報を基に推定した分散期の利用適地図、という3種類の生息適地図を作成する。さらに、(4) GPSの高度情報と風況シミュレーションの予測結果を用いて飛翔リスクモデルを開発する。最後に、作成した3種類の地図を統合して鳥感度マップを作成し、詳細スケールでの飛翔リスクモデルと併せて、環境影響評価における活用方法を提案する。

## 3. 研究開発方法

### 3-1. オジロワシの広域分布情報に基づく潜在生息適地推定

#### 越冬期におけるオジロワシ生息適地推定

オジロワシの分布に関する広域情報として、環境省事業で越冬期に行われた「オオワシ・オジロワシ一斉調査」における視認情報を1 kmメッシュ単位で集計した。この一斉調査は、1980年から2006年の2月または3月にオオワシ・オジロワシ合同調査グループによって実施されたもので、北海道内の複数地域で市民ボランティア調査員によりオオワシとオジロワシの個体数がカウントされている。同一個体の重複カウントを防ぐため、それぞれの年の同一日に全ての地域で一斉に調査が実施されている。本研究では過去すべての一斉調査の結果を統合し、本種の観察情報が少なくとも一点以上含まれるメッシュを在地点として扱った。このとき、在地点とされたメッシュは全79,069メッシュのうち525メッシュであった。オジロワシの生息適地を推定するため、生息環境や餌資源の利用可能性に関する環境指標を1 kmメッシュ単位で集計した。生物分布の主要な規定要因である気候や地形、土地利用に関しては、「積雪量」、「比高（標高差）」、「樹林地面積」を集計し、本種の主な餌場である海岸や河川との近接性を評価するため、「海岸までの距離」、「大河川までの距離」を集計した。「積雪量」は国土数値情報の平年値メッシュデータを基に、一斉調査が行われた2月および3月の最深積雪の平均値を算出した。「比高（標高差）」は国土地理院の基盤地図情報数値標高モデル（DEM 10 mメッシュ）から、メッシュ毎に最高標高と最低標高の差を算出した。「樹林地面積」はJAXAが提供する日本域高解像度土地利用土地被覆図を用いて各メッシュ内に含まれる樹林地の合計面積を算出した。「海岸までの距離」は、環境省による自然環境保全基礎調査の海岸調査の結果から砂浜海岸のみを抽出し、各メッシュの中心点から最短距離を算出した。最後に、解像度10 mのDEMを基に水文解析を行って累積流量を計算し、累積流量が100,000グリッド（10 km<sup>2</sup>）以上の地点を河川ラインとして抽出した。この河川ラインに国土数値情報の湖沼データを結合し、ラスターデータに変換して、各地点からの「大河川までの距離」を示すラスターを作成した。これらの環境指標は解析にはGIS (ESRI社 ArcGIS ver. 10)、R (R version 3.4.2) およびRの”raster”、”rgdal”、”rgeos” パッケージを使用した。

オジロワシの分布地点を在地点として、MaxEnt (MaxEnt ver. 3.4.0) を用いて本種の越冬期の潜在生息適地を解析した。MaxEntは在データのみを用いて生物の潜在生息適地を推定する際によく用いられる解析手法である (Phillips et al. 2017)。本種の分布に影響を及ぼす変数の相対的な重要度は、生息適地推定モデルに対する各変数の寄与率を基に判断した。また、モデルの予測精度についてはAUCの指標を用いて評価した。AUCは0.5から1の値をとり、1に近いほどモデルの精度が良いことをあらわす。生息適地指数の算出には補対数-対数変換 (complementary log-log) を使用し、この値を用いて潜在生息地図を作成した。

#### オジロワシの営巣適地推定

対象地域の日本海側におけるオジロワシの既知の営巣地情報を収集し、過去に営巣が確認された地域、あるいは繁殖の可能性が高い場所を抽出した上で、2016年5-6月と2017年3-4月にかけて道北地域の日本海側で営巣木の確認および新規発見のための調査を行った。また、環境省が2017年10-11月に道北地域オホーツク海側で収集した営巣地情報についても使用した。

ここでは、上述の生息適地推定と同様の環境指標を50 mメッシュ単位で集計した。営巣適地推定に際しては、「最高気温」、「斜面位置」、「樹林地面積」、「大河川までの距離」を用いた。「最高気温」は、2月または3月の最高気温の値を国土数値情報の平年値メッシュデータから算出した。「斜面位置」は、Topographic position index (TPI) を用いて地形区分を行い、斜面上の位置を計算した (Weiss 2001)。大まかな地形的特徴を掴むためにTPIの集計範囲は2 kmとした。TPIは、該地点の標高値と周辺セルの標高の平均値との差により求められ、Weiss (2001) の基準を基に6種類の地形 (尾根、斜面上方、斜面中腹、平坦地、斜面下方、谷) に区分した。「樹林地面積」、「大河川との距離」は、越冬期の生息適地推定と同様の手続きで50 m解像度で集計した。

先ほどと同様に、オジロワシの営巣地点を在地点としてMaxEntを用いて本種の営巣適地を解析した。変数の相対的な重要度、モデルの予測精度、生息適地指数を同様の手法で算出し、潜在営巣適地図を作成した。最終的には、潜在営巣適地図を2 km解像度に再集計した。

#### 3-2. GPS発信機によるオジロワシ幼鳥の分散時の利用環境の推定

2017年の繁殖期に巣立ち直前のオジロワシ幼鳥を合計6個体捕獲し、GPS発信機 (Wildtracker WT-300, Koeco社, 韓国) を装着して、幼鳥の分散時におけるハビタット利用を解明した。このGPS発信機の重量はおよそ60 gであり、オジロワシの平均体重の約2.6%にあたることから、体重の5%以下とされる鳥類の推奨積載量の基準に準拠する。追跡個体の位置情報は、深夜0時と6時から18時までの1時間毎に1点を取得し、一日最大14点が得られる設定とした。幼鳥が巣外育雛期を終えて出生地から分散した秋期 (2017年9月1日から2017年10月30日) の位置情報を解析に用いた。

GPSから取得したオジロワシの利用地点とオジロワシが利用可能な地点の環境条件を比較して、オジロワシの環境選好性を明らかにした (Manly 2002)。オジロワシの利用可能な地点は、オジロワシ幼鳥の一日当たりの行動範囲を参考に、オジロワシの各利用地点から半径5 kmの範囲内にランダムに10点ずつ作成した。さらに、土地利用、地形、サケの遡上河川に関する環境情報をGIS上で集計した。サケの遡上河川は、自然産卵が報告されているサケ自然遡上河川データ (宮腰ら 2011) と、さけます人工ふ化放流が行われているサケ放流水系の本線を統合した。さらに、ト部ら (2013) を参考に、サクラマスの上限界標高とされる200 m以下を流れる河川のみを抽出した。

統計解析は二項分布を仮定した一般化線形混合モデルを使用し、個体IDと利用地点IDをランダム切片とした。説明要因は、標高、傾斜角、周囲100 m以内の森林面積、森林面積の二乗項、都市面積、サケ河川との距離とした。相関分析の結果、開放地面積 (畑地、裸地、水田、牧草地の総面積) は森林面積と高い相関を示したため除外した。すべての変数を用いてモデルを構築し、各変数の係数の95%信頼区間を算出した。信頼区間が0を含まない係数のみを用いて最終モデルを構築し、このモデルを用いて道北地域におけるオジロワシの潜在利用適地を1 kmメッシュ単位で推定した。

### 3-3. 飛翔高度と風況の関係に基づく高解像度の飛翔時リスク評価

GPS発信機の測位データを用いて、オジロワシの飛翔リスクを風況から予測するモデルを作成した。ここではGPSの移動速度が5.0 km/時を超えるデータをオジロワシが移動（飛翔）している時のデータとし、この条件に当てはまるデータのみを解析に使用した。GPSで取得されたオジロワシの高度から、数値標高モデル（DEM）により求めた当該地点直下の標高を差し引くことで、オジロワシの地表面からの高度を算出した。風車のブレード回転域（Mゾーン）を地上高40 mから120 mとし、飛翔高度がMゾーンと重なる場合を「飛翔リスクあり」、それ以外を「飛翔リスクなし」とした。

オジロワシの観測地点に対して風況予測を行った。気象庁の数値予報データ（GPVデータ）から観測日時の風速、風向を抽出し、風況シミュレーションソフトRIAM-COMPACT（株式会社リアムコンパクト <http://www.riam-compact.com/>）に予測風向・風速の条件を入力して、より詳細な風の流れを分析した。RIAM-COMPACTは時々刻々と変化する風に対する建物や地形の効果を高精度に予測可能であり、主に風力発電の適地選定に活用されている非定常・非線形風況シミュレータである。本解析においては、発信機の観測誤差が水平方向では±15 mであることを考慮して、x、y軸方向が30 mのメッシュとなるように作成した。風速は、オジロワシ観測地点の高度80 mの風速値（U、V、Wの各成分の風速値）を計算した。シミュレーションで予測される風速値U、V、Wは10 m/sの仮想風速に対する相対値であるため、GPVデータから観測時間帯の予測風速値を求め、10で除した値をU、V、Wの各成分に乗じた。また、U、V成分の風速値を合成して水平方向の風速値とし、W成分はそのまま垂直方向の風速値とした。

これらのデータから飛翔リスクと風況の関係について明らかにするために、飛翔リスクの有無を目的変数とし、水平方向、垂直方向のそれぞれの風速値を説明変数として、二項分布を仮定した一般化加法モデル（GAM）を用いて解析した。

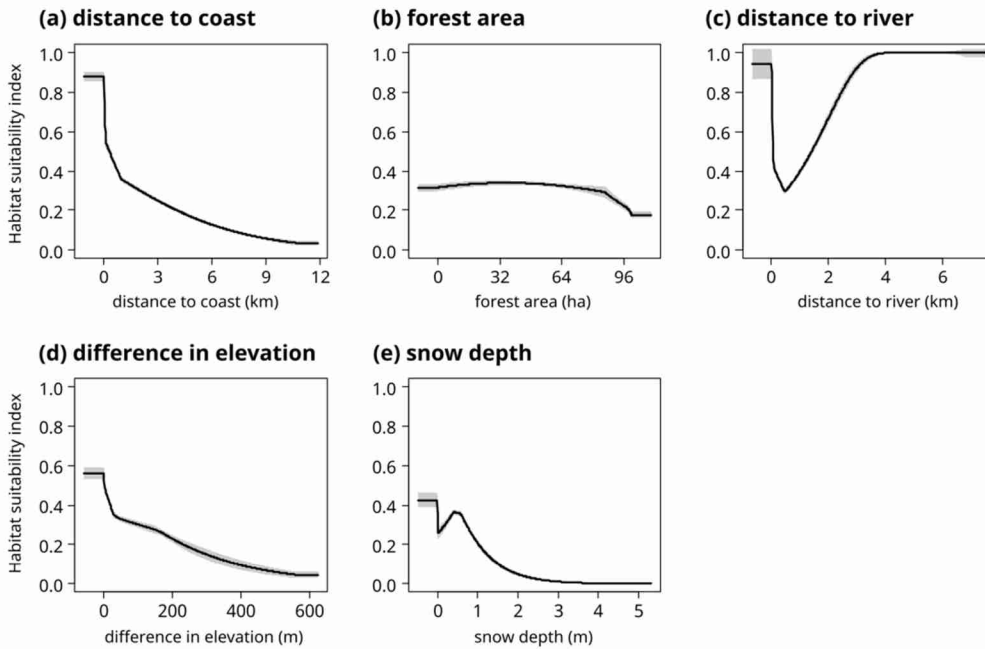
## 4. 結果及び考察

本研究では、希少猛禽類オジロワシを対象とした、(1) 2種類の広域分布情報に基づくハビタットモデリングおよび潜在生息適地図の作成、(2) GPS発信機情報に基づく幼鳥の分散時の利用環境の解明、(3) 飛翔高度と風況の関係に基づく高解像度の飛翔時リスク評価、の三点を成果として挙げる。以下に、それぞれの実施項目ごとに結果および考察について述べる。さらに、それらの成果を活用した、(4) 感度マップの作成と環境アセスメントに即したマップ活用方法の提案について詳述する。

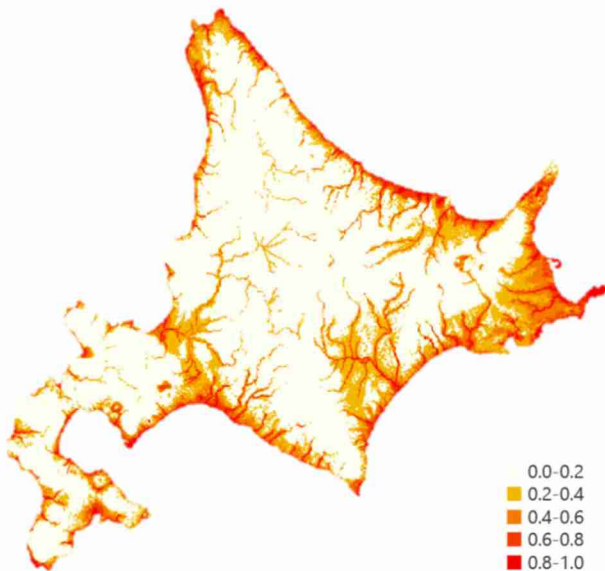
### 4-1. オジロワシの広域分布情報に基づく潜在生息適地推定

#### 越冬期におけるオジロワシ生息適地推定

越冬期のオジロワシ分布確認地点数は全99,700メッシュのうち525メッシュであった。MaxEntを用いた生息適地解析の結果、モデルのAUCは0.87を示し、モデルに対する寄与率は海岸までの距離、森林面積、大河川までの距離の順に高くなっていた。最も寄与率の高かった海岸までの距離は（寄与率:35.5%）、海岸に近い場所ほどオジロワシの生息適地指数が高くなることを示していた（図(3)-1a）。次いで寄与率が高かった森林面積の指標では（28.6%）、森林面積が中程度となるメッシュで生息適地指数が高く、森林が大部分を占めるようになると生息適地指数が低くなる傾向を示していた（図(3)-1b）。大河川までの距離に関しては、大河川の直近か、あるいは数 km程度離れた場所で生息適地指数が高くなっていた（図(3)-1c）。また、標高差（7.9%）と積雪深（7.8%）の値が高くなるにつれて本種の生息適地指数は低くなった（図(3)-1d, e）。生息適地推定モデルを用いて予測した潜在生息地図は図(3)-2に示した。この図からは、北海道の海岸線の大部分が越冬期における本種の生息適地となっていることがわかる。



図(3)-1 越冬期のオジロワシ生息適地指数と各説明変数の関係

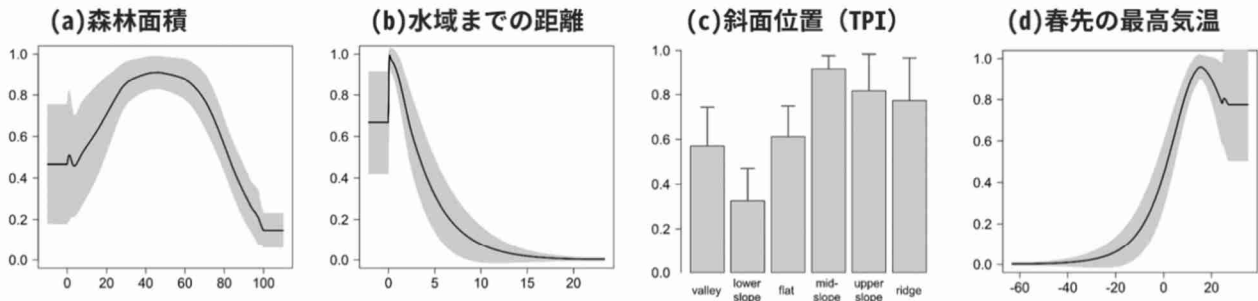


図(3)-2 越冬期のオジロワシ潜在生息適地

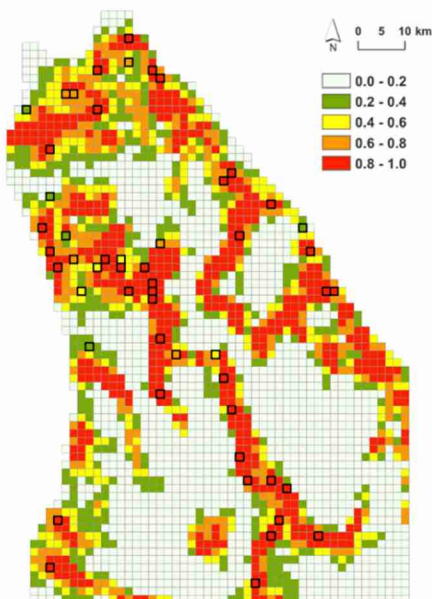
#### オジロワシの営巣適地推定

現地で2年間の営巣地調査を行い、さらには環境省野生生物課から営巣地情報の提供を受けた結果、対象地域内の52か所でオジロワシの営巣木を確認することができた。MaxEntを用いたオジロワシ営巣適地解析の結果、モデルのAUCは0.92となり、モデルに対する寄与率は森林面積、水域までの距離、斜面位置、最高気温の順に高くなっていった。最も寄与率の高かった森林面積は（寄与率:40.4%）、森林面積が中程度となる場所でオジロワシの営巣適地指数が高く、森林が大部分を占めるようになると営巣適地指数が低くなる傾向を示していた（図(3)-3a）。次いで寄与率が高かった水域までの距離の指標では（35.3%）、水域に近づくほど営巣適地指数が高くなることを示していた（図(3)-3b）。また、斜面の上方に位置し、春先の最高気温が高いほど営巣適地指数が高くなることを示していた（図(3)-3c, d）。それぞれの環境

要因の寄与率は13.6%と10.8%であった。営巣適地推定モデルを用いて予測した営巣適地指数の分布は図(3)-4に示した。



図(3)-3 オジロワシ営巣適地指数と各説明変数の関係



図(3)-4 オジロワシ潜在営巣適地

#### オジロワシの潜在生息適地の解釈

オジロワシの越冬期の生息適地は海岸や水域に近い場所を中心としていた。オジロワシの越冬期の主要な餌は海岸に漂着するアザラシや結氷しない河川の魚類、水鳥類などであり、氷下待ち網漁が行われる湖沼ではその残滓も利用することが知られる。越冬期の本種の生息適地は、これらの餌が利用可能性を反映している可能性が高い。一方で本種の営巣適地は、森林面積が中程度で、水域に近く、春先の気温が高い場所で、斜面上部に多いと推定された。オジロワシは繁殖期も魚類や水鳥類を多く捕食しており、餌場となる水域に近接した地域が営巣地として好適であるとされる。また、巣への出入りしやすさなどから営巣木周辺の開けた空間が重要であると指摘されており、そのことが森林と開放地が半々となるような場所で、かつ斜面上部という立地と関連していたと考えられる。

#### 4-2. GPS発信機によるオジロワシ幼鳥の分散時の利用環境の推定

##### GPS発信機の測位期間ならびに総取得点数

2017年7月から10月31日までの間、オジロワシ幼鳥6個体の出生地の巣立ちから分散後の移動を観測で

きた。この期間中は、全てのGPS発信機が個体から剥落することなく機能していた。全調査対象期間において発信機の総測位点数は6,386点であった。これは予定された発信機の総測位点数に対して取得率62%にあたる。この期間中に各個体が利用した地点および移動軌跡を地図に示す（図(3)-5）。オジロワシ幼鳥は8月下旬頃から巣の周辺を離れて分散する個体が見られ、巣立ちから2か月後には数百km離れた知床半島まで移動した個体が確認された。移動の距離や方角は個体間で大きく異なっていた。



図(3)-5 オジロワシ幼鳥6個体の8-10月の移動軌跡

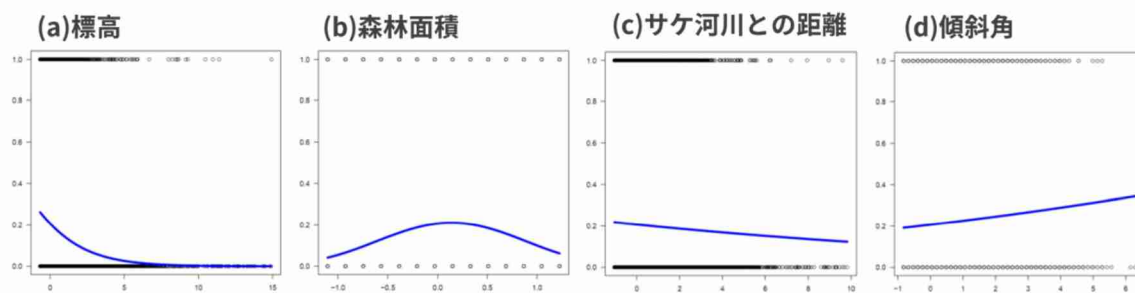
#### オジロワシ幼鳥の生息場利用推定

全ての説明変数を用いて一般化線形混合モデルを構築し、得られたモデルの各係数に関して95%信頼区間を求めた（表(3)-1）。このとき、標高、森林面積、サケ河川との距離、傾斜角については、係数の推定値の95%信頼区間が0を含んでおらず、これらの変数の効果が示された。それぞれの変数の応答曲線を図(3)-6に示す。オジロワシ幼鳥の利用確率に対して、標高、サケ河川との距離は負の相関がみられたが、傾斜角では正の相関がみられた。森林面積では、中程度のときに利用確率が最大となるような単峰型になった。これらの結果は、オジロワシ幼鳥が分散時に頻繁に利用する場所が、森林面積が中程度で、サケ河川と近い、低標高の傾斜地であることを示している。オジロワシの秋季の生息場利用を規定する重要な要因として秋季に遡上するサケの存在が挙げられるが、サケの遡上可能な範囲はおおむね標高200m以下となっており、オジロワシが低標高でサケ河川に近い場所を頻繁に利用するという今回の結果と合致する。構築したモデルを用いて道北地域における潜在利用確率を推定して地図化した（図(3)-7）。

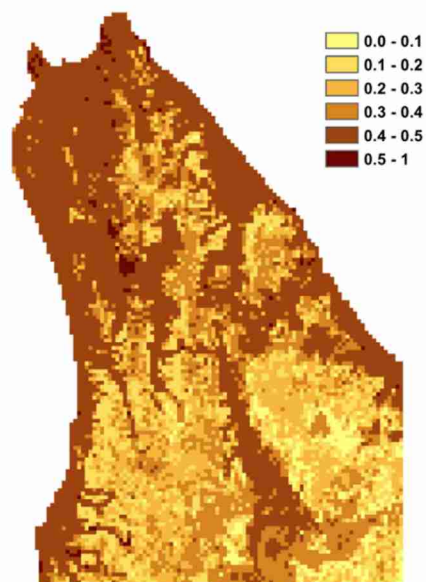


表(3)-1 一般化線形混合モデルの結果

変数	係数	標準誤差	95% 信頼区間
切片	-1.304	0.034	(-1.407, -1.273)
標高	-0.454	0.031	(-0.516, -0.393)
森林面積	0.326	0.021	(0.284, 0.367)
森林面積 <sup>2</sup>	-1.174	0.027	(-1.226, -1.121)
サケ河川 との距離	-0.062	0.016	(-0.094, -0.030)
傾斜角	0.112	0.021	(0.070, 0.154)
都市面積	0.018	0.015	(-0.011, 0.048)



図(3)-6 分散時のオジロワシ幼鳥の利用確率と各説明変数の関係



図(3)-7 分散時のオジロワシ幼鳥の潜在利用場所

国内では、これまでオジロワシ幼鳥の出生後の分散過程をラジオトラッキング法により追跡した例はあるが (Shiraki 1994)、数百kmスケールでの移動を追跡した例はない。今回の研究から、オジロワシは出生後にかなりの長距離を移動することがわかり、オジロワシの主要な繁殖地だけでなく、分散後の定着先や中継地も含めた広域スケールでの保全が必要と考えられる。分散時の利用場所としては、森林面積が中程度で、サケ河川と近く、低標高の傾斜地が推定された。これは、オジロワシが秋季に遡上するサケの死骸を頻繁に利用することをよくあらわしていると考えられる。しかしながら、モデルのあてはまりをあらわす決定係数は0.14と低かったことから、今後のモデルの改良が必要とされる。

#### 4-3. 飛翔高度と風況の関係に基づく高解像度の飛翔時リスク評価

##### 飛翔情報の抽出

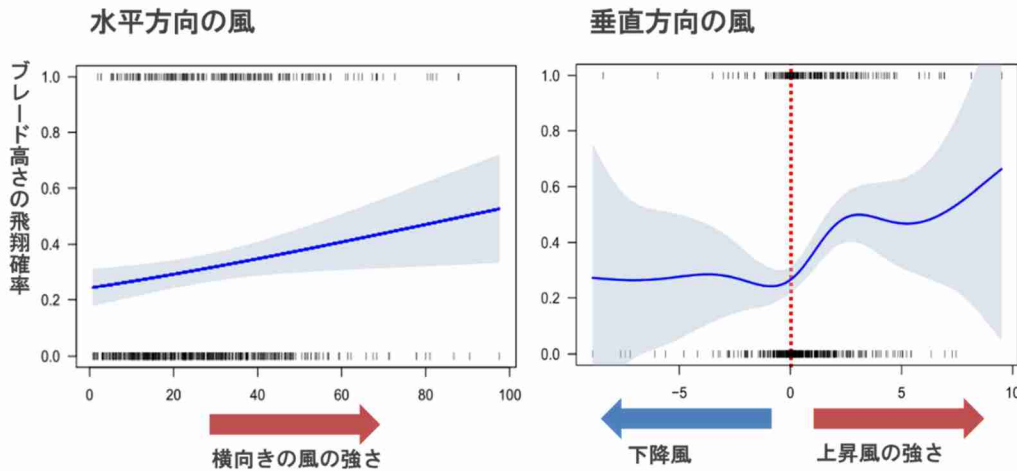
2017年7月から10月31日までの間、オジロワシ幼鳥6個体からGPS発信機により取得できた6,386件の情報のうち、GPSの移動速度を基準として飛翔時の情報のみを抽出した。ここでは、5.0 km/時以上の速度で移動していた情報のみを飛翔時の情報として扱った。その結果、飛翔時の情報はデータ全体の10.2%にあたる合計651件であった。該当する情報について、GPSで取得された高度情報とDEMから得られた地上高度の差を求め、その値が風車ブレード高さの範囲内に含まれるか否かを集計した。その結果、解析に使用したオジロワシ飛翔データのうち、風車ブレード高さを利用した場合と利用しなかった場合はそれぞれ215回、436回であった。

##### 飛翔リスクと風況の関係性解析

一般化加法モデルを用いて、オジロワシが飛翔時に風車ブレード高さを利用する確率と風況の関係を明らかにした。モデル選択の結果は、水平方向と垂直方向の両方の風速値を用いたモデルが最も儉約であることを示していた (表(3)-2)。このベストモデルを用いて、水平方向と垂直方向の風速値から風車ブレード高さ利用確率を予測した結果を図(3)-8に示す。今回の結果は、水平方向の風が強く、鉛直方向上向きの風が強くなるほど、オジロワシが風車ブレード高さを利用する確率が高くなることを示している。

表(3)-2 一般化加法モデルの結果

Rank	切片	風速 (水平)	風速 (垂直)	AICc	$\Delta$ AICc
1	-0.744	+	+	797.4	0.00
2	-0.738		+	800.6	3.24
3	-0.725	+		811.7	14.27
4	-0.707			827.9	30.56



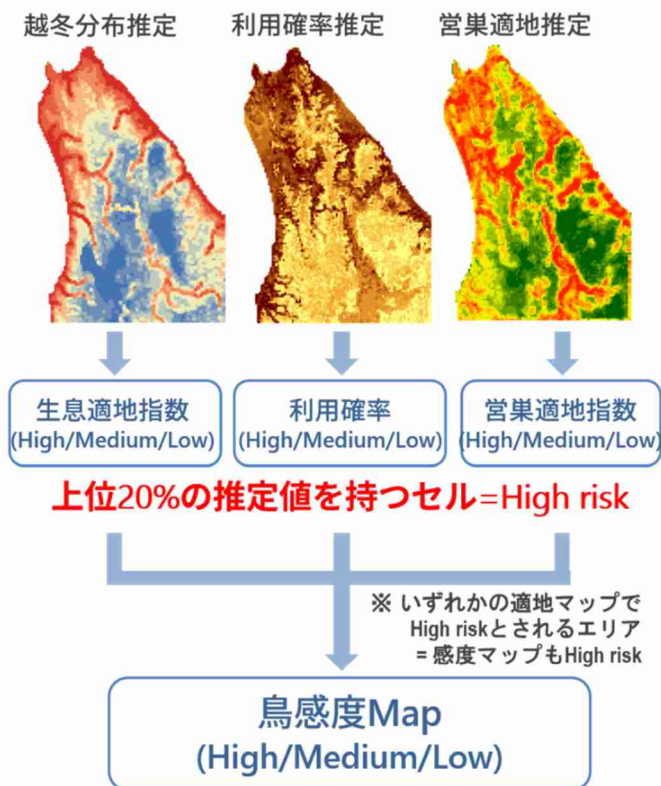
図(3)-8 オジロワシの飛翔時リスクと風況の関係

オジロワシは横向き風の強い場所と上向きの風が強い場所で風車ブレード高さを頻りに飛翔する傾向があることが明らかになった。特に、鉛直方向上向きの風速が発生する場合、その風速がわずかに高くなるだけで、オジロワシが風車ブレード高さを利用する確率が急激に高くなることが予測された。風が強い地域の海岸崖や急斜面の上空では、吹きつける風によって上昇気流が発生しやすく、オジロワシが頻りに利用することが経験的に知られている(白木 2012)。今回構築したモデルは、このような場所がオジロワシにとって衝突リスクが高い場所であることを風況との関係から明確に示しており、実用上の価値は高いと考えられる。今後は、より多くの個体にGPS発信機を装着してデータの蓄積を図るとともに、構築したモデルの精度を検証していくことが重要だと考えられる。

#### 4-4. 感度マップの作成と環境アセスメントに即したマップ活用方法の提案

##### 感度マップの作成手順

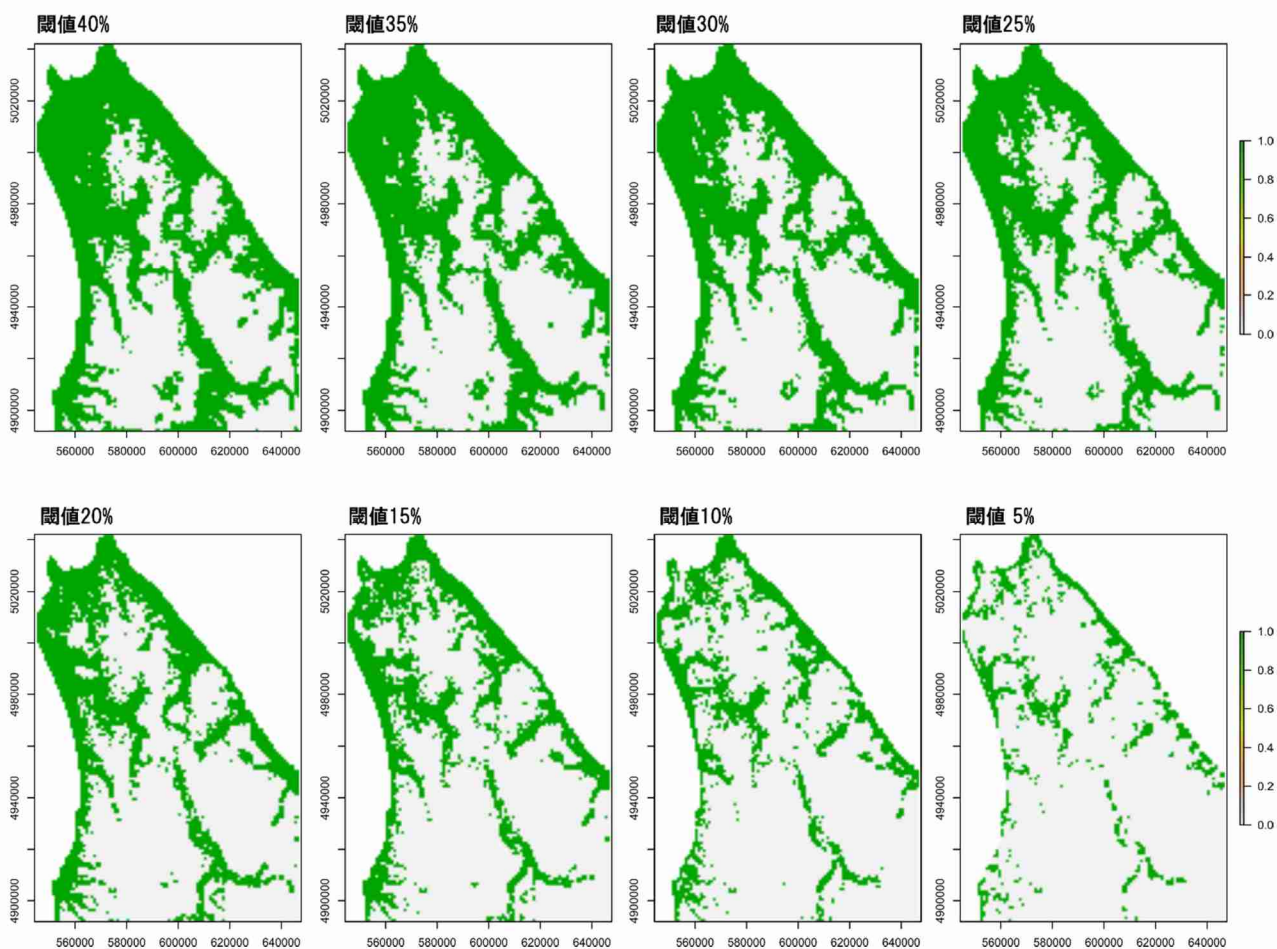
オジロワシの感度マップを、上記の3種類の生息適地図(営巣適地、越冬期の生息適地、分散時の利用適地)を統合することで作成した。まず、それぞれの生息適地図において基準となる閾値を決めた。これは、対象地域の中で上位何%分の場所を相対的にリスクが高い場所として選定するかを決めるためである。例えば、閾値を上位5%の値とした場合、対象地域全体の5%が高リスク地域として抽出されることになる。続いて、3種類の生息適地図をそれぞれ上記の閾値で区分した後に、これらをオーバーレイして感度マップを作成した。このとき、あるメッシュが少なくとも一つ以上の生息適地図で高リスクに該当していれば、感度マップにおける当該メッシュは高リスクとして区分することとした。ここでは、リスクとは風車の立地がオジロワシ高頻度利用域と重なる可能性が高いことを指す。各生息適地図の閾値を選定するにあたり、上位5%から40%まで、5%刻みで高リスクのメッシュを増加させ、それぞれの閾値の条件下で3種類の生息適地図を重ねた時に、感度マップの高リスク場所が全体の何割を占めるかを確認した(図(3)-10、図(3)-11)。今回は、便宜的に上位20%の値を閾値として感度マップを作成した(図(3)-9、図(3)-12)。



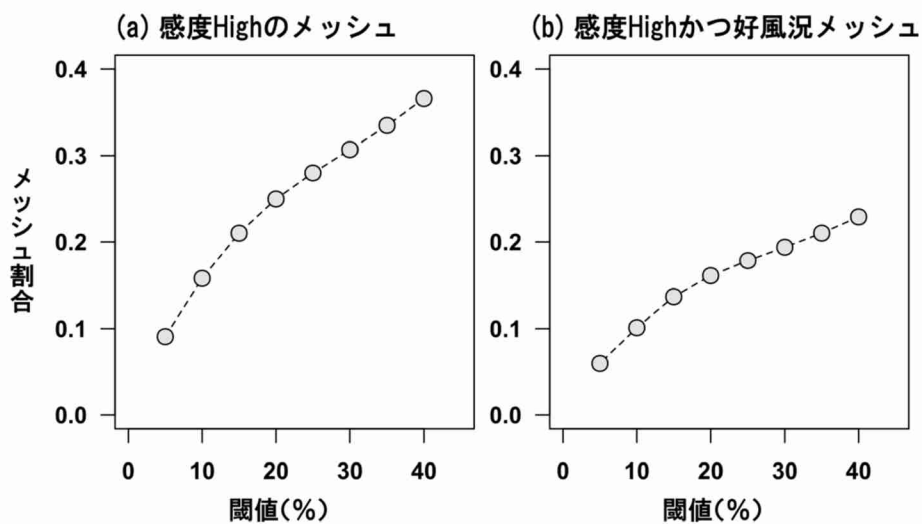
図(3)-9 生息適地マップの統合による鳥感度マップの作成フロー

#### 閾値の選択

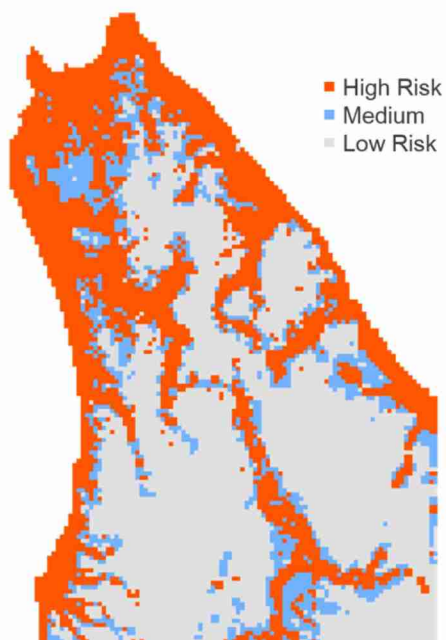
3種類の生息適地図を統合して広域の鳥感度マップを作成した。3種類の生息適地図を統合する際に、上位5~40%まで、5%刻みで感度Highエリアを区分した地図を作成し、それぞれの閾値の条件下で3種類の生息適地図を重ねた時に、感度マップの高リスク場所が全体の何割を占めるかを計算した(図(3)-10、図(3)-11)。統合した感度マップで高リスクとされるメッシュの割合は、各生息適地図で閾値を高くすることで増加し、閾値20%時点までは増加率が大きくなる傾向にあるが、閾値20%を超えると、高リスクのメッシュ割合は一定の増加率となる。そこで今回は、各生息適地図の上位20%の値を高リスクとする閾値を採用した。ただし、図(3)-10からは、いずれの閾値を採用した場合でも、海岸部と天塩川沿いについては高リスクの場所として選ばれることがわかる。閾値が上位20%の時は、地域全体に占める高リスクのメッシュ割合は約25%であり、年間平均風速が6.0 m/sを超える風況好適地と重なるメッシュは約16%を占めていた。この閾値を基準として、3種類の適地マップを統合して作成した感度マップを図(3)-12に示す。



図(3)-10 生息適地図の閾値と鳥感度マップで感度Highと区分されるエリア



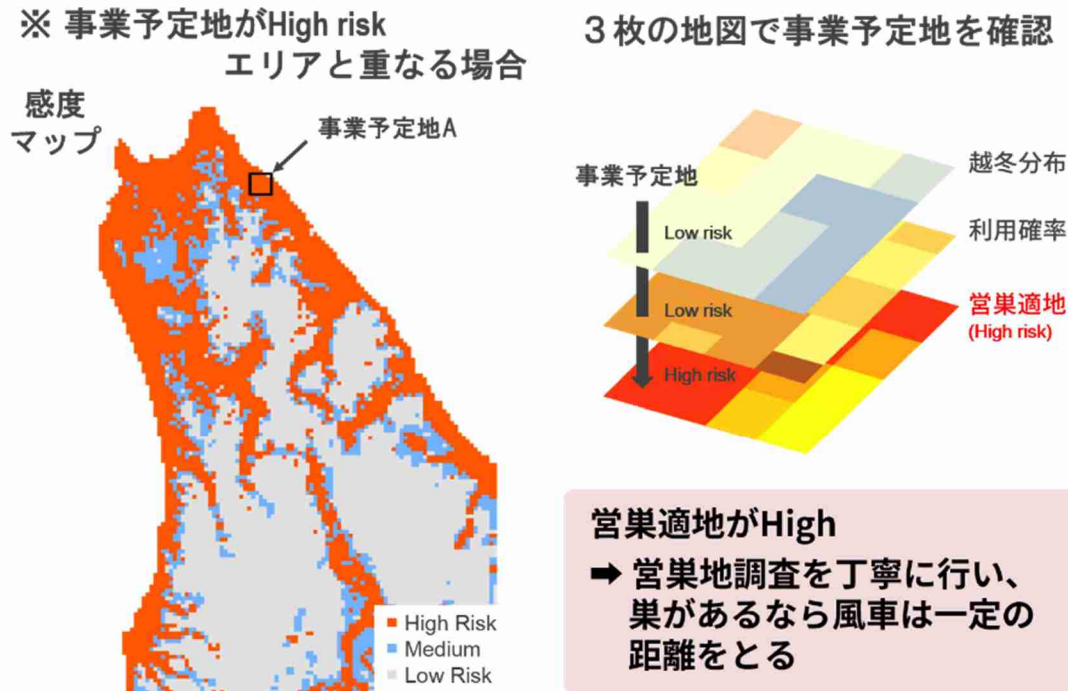
図(3)-11 生息適地図の閾値と感度Highメッシュの割合



図(3)-12 作成した鳥感度マップ。生息適地図の閾値は上位20%の値とした。

#### 感度マップを活用した環境アセスメント手続きの提案

最後に、環境影響評価を踏まえて、作成した鳥感度マップの活用方法について提案する。オジロワシの高頻度利用域を避けて風力発電の事業地を選定する場合、感度マップで低リスクとされたエリアが候補となる。一方、事業地が感度マップで高リスクの場所と重なる場合は、3種類の生息適地図のどれが高リスクに該当するかを確認する必要がある（図(3)-13）。このとき、営巣適地図が高リスクの場合は、事業地周辺にオジロワシの営巣地が見つかる可能性があるため、繁殖期の営巣調査に労力を投入し、風車の設置場所を営巣地から一定距離（数百メートル）以上離すことが望ましい。また、越冬期の生息適地図や分散時の利用適地図が高リスクに該当する場合は、本研究で開発した風況に注目した飛翔リスクモデルを活用して、より細かい空間解像度でオジロワシがMゾーンを高頻度で飛翔する場所を予測した上で、風車配置を決めることが望ましい。このモデルは、事業地スケールで推定した風況値を基に、数十メートルの解像度で飛翔リスクを予測することが出来るため、リスクの高い場所を避けるように風車配置を検討することが可能となる。



図(3)-13 鳥感度マップの活用（事業予定地が営巣適地図で高リスクとなるケース）

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

希少猛禽類オジロワシを対象として、過去に行われた広域モニタリングや営巣調査の結果から本種の生息情報を収集し、環境要因との関係を解析することで、本種の冬場の生息適地や繁殖に適した営巣適地の規定要因を解明した。国内のオジロワシについては、幼鳥の出生後の分散過程をラジオトラッキング法により追跡した例はあるが、数百kmスケールでの移動を追跡した例はなかった。今回、オジロワシ幼鳥を捕獲してGPS発信機を装着することで、オジロワシ幼鳥の長距離の分散過程や利用環境に関する詳細な情報を収集でき、幼鳥の分散時における生息場利用を解明した。これにより、希少猛禽類オジロワシの様々な生活史段階（繁殖、越冬、出生分散）における生息適地を広域スケールで推定することができた。さらに、GPSにより得られた飛翔高度に注目し、高解像度の風況シミュレーション手法を組み合わせることで、オジロワシの飛翔時における風車衝突リスクを風況との関係から高精細に予測する手法を開発することができた。

### (2) 環境政策への貢献

環境省の保護増殖事業の対象種でもあるオジロワシについて、広域スケールで推定した潜在生息適地図は、本種に対する開発事業のリスク評価や保護対象地域の選定における有用な知見となる。感度Mapや風況に応じた高解像度の衝突リスク評価の枠組みをうまく活用することで、風力発電施設の建設に際して、事業者が衝突リスクの高い場所を事前に避けることが可能となり、環境への影響を低減する形で風力発電の導入につながると考えられる。

### <行政が既に活用した成果>

平成30年3月に新潟で行われた「報告書作成に向けた会議」において、環境省野生生物課より、上勇知風力発電の審査会の中で本研究の潜在営巣適地図を使用したい旨の申し出があり、営巣適地図を貸与した。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で作成したオジロワシの3種類の生息適地図（越冬期の生息適地図、営巣適地図、幼鳥分散時の利用適地図）は環境アセスメント環境基礎情報データベースシステム（EADAS）に組み込まれ、環境アセスメントにおいて地域特性を把握するために必要となる、自然環境に関する基盤情報として提供される。さらに、本研究で提案した、環境影響評価の手続きにおける鳥感度マップの活用方法を参考にして、今後の環境影響評価の手続きでは、配慮書段階でオジロワシの生息適地図を基にした感度マップが活用され、その後の必要なアセスメント内容が決定されることや、風況に基づく飛翔リスクモデルが活用されて、オジロワシの衝突リスクを低減させる風車配置が実現されるものと見込まれる。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

#### <査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

#### <その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) Y. Yabuhara, T. Akasaka, H. Nakagawa, H. Yusuke, Y. Kawaguchi : Conference on Wind energy and Wildlife impacts 2018, Estril, Portugal, 2017  
 “Predicting regional distribution of white tailed eagle in winter to inform wind farm placement in Hokkaido, Northern Japan”
- 2) 河口洋一：生態学会第65回全国大会（2018）  
 「オジロワシのセンシティブティマップの可能性と課題 -環境アセスメントにおける利用を目指して-」

### (3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### (4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 一般公開シンポジウム「鳥の衝突を避けるためにできること」（主催：新潟大学、2017年6月3日、サロベツエコネットワーク、観客約50名）にて講演  
 河口洋一：「天然記念物オジロワシの風車衝突事故を低減させる高精度 sensitivity map の作成を目指して」
- 2) 一般公開シンポジウム「鳥衝突を未然に防ぐセンシティブティマップの整備を目指して」（主催：新潟大学、2018年3月21日、東京工業大学キャンパスイノベーション、観客約30名）にて講演  
 河口洋一：「オジロワシのセンシティブティマップの可能性と課題」

### (5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。



## (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) 環境省 (2016) 海ワシ類の風力発電施設バードストライク防止策の検討・実施手引き.
- 2) Manly (2002) Resource Selection by Animals. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- 3) 宮腰ら (2011) 北海道におけるサケ自然産卵個体群の分布 (資料). 北水試験報 80: 51-64
- 4) Phillips et al. (2017) Opening the black box: an open-source release of Maxent. Ecography 40: 887-893
- 5) Shiraki (1994) Characteristics of white-tailed sea eagle nest sites in Hokkaido, Japan. Condor 96: 1003-1008
- 6) 白木 (2012) 北海道におけるオジロワシ *Haliaeetus albicilla* の風力発電用風車への衝突事故の現状. 保全生態学研究 17: 85-96
- 7) ト部ら (2013) 十勝川水系におけるサケ・サクラマス産卵環境評価 (資料). 北水試験報 84: 47-56
- 8) Weiss (2001) Topographic position and landforms analysis. Poster Presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.

### III. 英文Abstract

#### Development of Bird Sensitivity Mapping for Reducing Bird Collision Risk Caused by Wind Power Mills

Principal Investigator: Stuneco SEKIJIMA

Institution: Niigata University  
 8050 Ikarashi 2-no-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181, JAPAN  
 Tel: +81-25-262-6623 / Fax: +81-262-6623  
 E-mail: sekijima@gs.niigata-u.ac.jp

Cooperated by: Hokkaido University, Tokushima University

[Abstract]

Key Words: Sensitivity Map, *Anser fabalis middendorffii*, *Larus crassirostris*, *Haliaeetus albicilla*, Habitat model, Bio-Logging, Flight altitude, Flyway, Reproductive risk, Wind-condition analysis

Using data from habitat distribution field surveys and tracking data by GPS transmitter (or GPS data logger), the methods for creating a general and highly predictable sensitivity map for three kinds of bird species, i.e., been goose, black-tailed gull, and white-tailed eagle, were developed and then applied in northern Hokkaido to evaluate the adverse effects of wind power plant construction on the above-mentioned bird species.

Been goose is a large waterbird that breeds in northern Kamchatka and overwinter in Japan. Their habitat utilization in Japan varies greatly between the migration and the overwintering period. Considering their behavioral characteristics, the two kinds of sensitivity map, i.e., the map reflecting on collision risk to windmill in stopover and wintering sites and the map reflecting on collision risk to windmill in flyway were created by habitat modeling technique. A procedure for reducing the risk of bird strike using the two kinds of sensitivity maps was proposed here.

Sensitivity map for black-tailed gull having many breeding sites in the Northern Hokkaido coastal area were developed by tracking foraging behavior and navigation. Habitat modeling technique was used as a method for predicting bird habitats based on environmental data. The potentially optimal habitat was predicted by incorporating environmental data to the habitat model. Because of difficulties in identifying habitat uses of black-tailed gulls in all breeding sites every year, their habitat suitability was predicted from the environmental data obtained at other breeding sites and different years, and then its accuracy was tested.

For an endangered species, white-tailed eagle, the maps predicting their potentially optimal habitats in breeding, wintering and dispersal period were created using the previous wide-area monitoring information and tracking data of young eagles by GPS transmitter. By measuring the detailed flight pathway and altitudes of young eagles and analyzing the relationships them with wind conditions, a collision risk model to predict wind conditions where young eagles frequently fly at altitudes at which they are susceptible to windmill collisions was developed. Then a method for creating eagle's sensitivity map by integrating three different kinds of habitat suitability maps and flight risk model was proposed here.

A careful analytic approach reflecting on each bird species characteristics and their habitat is necessary for creating sensitivity map. Our sensitivity maps suggested that three bird species inhabiting northern Hokkaido, where windmill construction is underway, face at high risk of windmill collisions.