



— 原著論文 —

レーダーを用いた夜間の渡り鳥の飛跡数，飛翔高度，渡り経路の追跡

田悟和巳^{1,*}・高橋明寛¹・萩原陽二郎¹・益子 理¹・横山陽子¹・近藤弘章¹・
有山義昭^{2,**}・樋口広芳³

¹ いであ株式会社国土環境研究所 〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早渕 2-2-2

² 環境省自然環境局野生生物課 〒100-8975 東京都千代田区霞が関 1-2-2

³ 慶應義塾大学自然科学研究教育センター 〒223-8521 横浜市港北区日吉 4-1-1

(2019年1月9日受付；2019年10月24日受理)

キーワード：夜間の渡り，レーダー，飛跡数，飛翔高度，渡り経路。

日本鳥学会誌
*Japanese Journal of
Ornithology*
© The Ornithological Society
of Japan 2020

Kazumi TAGO^{1,*}, Hiroaki TAKAHASHI¹, Yojiro HAGIWARA¹, Osamu MASUKO¹,
Yoko YOKOYAMA¹, Hiroaki KONDO¹, Yoshiaki ARIYAMA^{2,**}, Hiroyoshi HIGUCHI³.
Flying tracks, flight altitude and directions of movement of nocturnal migrant birds, as
shown by marine radar. *Jpn J Ornithol* 69: 41–61. (2020)

Abstract. Many birds migrate at night, but little is known about their nocturnal ecology because it is difficult to study. We used marine radar to investigate the ecology and behaviour of nocturnal migrants at 140 sites from Hokkaido to Kyushu. Although species identification was not possible, marine radar reveals the flight tracks of nocturnal migrants, and can be used to clarify their abundance and directions. By placing the radar in a vertical position, we were able to count the number of flight tracks up to a height of two km at each site twice during both spring and autumn migrations, from sunset to three hours after sunrise. The mean number of flight tracks at a total of 560 locations was 14,415 in autumn and 4,388 in spring. We tested a GLMM model with the number of tracks as a response variable and seven explanatory variables of latitude, longitude, survey season, site altitude, terrain, percentage of radar shooting time, and cloud cover. The most important variable affecting the number of tracks was the cloud cover at the beginning of the survey. Flight altitude had a single peak at ca. 300–400 m. Flight time peaked around 80–140 minutes after sunset then gradually decreased. This study confirmed many of the migratory routes already known from previous satellite-tracking and other types of studies. Thus, it confirmed that marine radar research is a useful way to study the migration of nocturnal birds.

Key words: Nocturnal migration, Radar, Flight tracks, Flight altitude, Migration route.

¹ *Institute of Environmental Informatics IDEA Consultants, Inc., 2-2-2 Hayabuchi, Tsuzuki-ku, Yokohama, Kanagawa 224-0025, Japan.*

² *Wildlife Division, Nature Conservation Bureau, Ministry of the Environment Japan, 1-2-2 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8975 Japan.*

³ *Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University, 4-1-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, Kanagawa 223-8521, Japan.*

はじめに

* E-mail: tago@ideacon.co.jp

** 現所属：環境省北海道地方環境事務所
〒097-8527 北海道稚内市末広 5-6-1 稚内地方合同庁舎
doi:10.3838/jjo.69.41

鳥類が行う渡りは、鳥類の生態や行動を研究するにあたり興味深く、重要なテーマのひとつである (Kerlinger 1995; Newton 2008)。渡りの研究が

開始された初期のテーマは、渡り鳥による方向定位、渡りを開始するきっかけとなる生理的要因、渡りを可能とするためのエネルギー補給といった研究が中心であった (Baker 1984; Kerlinger 1995; Gill 2007; 中村 2012)。その後、アルゴシステムや GPS (全球測位システム) を利用した追跡、ジオロケータの開発により、個体の渡り経路を直接調査できるようになった (樋口 2005; Higuchi 2012; Bridge et al. 2013)。この結果、日本ではツル類 (Higuchi et al. 1992, 1996; 鄭ら 1992)、タカ類 (Ueta et al. 1998; Higuchi et al. 2005; Shiu et al. 2006; Higuchi 2012)、ハクチョウ類 (Higuchi et al. 1991; Shimada et al. 2014; Chen et al. 2016)、ガンカモ類 (Tajiri et al. 2015; Shimada et al. 2016) といった大型鳥類から、カムリウミスズメ *Synthliboramphus wumizusume* (Yamaguchi et al. 2016) やコムクドリ *Agropsar philippensis* (Koike et al. 2016)、ノビタキ *Saxicola torquatus* (Yamaura et al. 2017) といった中-小型鳥類まで、特定の種を対象とした渡り経路についての知見が蓄積されている。

また、特定の種ではなく渡り鳥を群れとしてとらえ、どの場所でどのくらいの渡り鳥がどのように通過しているといった観察結果を蓄積することも重要なテーマである。日本ではカモ類、チドリ類、シギ類などの水鳥類について、環境省が定期的にモニタリングを実施しているほか (環境省生物多様性センター 2009a, 2009b, 2015a, 2015b)、タカ類などで多くの観察や研究が行われている (武田 1989; 日本野鳥の会愛媛県支部 1989; 吉居・吉居 1992; 井上 1993, 1998; 黒岩ら 1999; 伊関 2004; 池野ら 2004; Hawk Migration Network of Japan <http://www.gix.or.jp/~norik/hawknet/hawknet0.html>)。これらの調査により、カモ類、シギ・チドリ類の長期的な渡り個体数の変動やタカ類の渡りルートなどが明らかとなっている。しかし、調査の対象が一部の分類群に偏っており、小鳥類をはじめとする渡りの全体的な動向はほとんどわかっていない。その理由は小鳥類を含めた鳥類の多くが夜間に渡りをするにありと考えられる (Kerlinger 1995; Harmata et al. 1999)。夜間の渡りを調査する方法としては、月を横切る鳥を目視観察する方法や強力なライトを上空に向けて目視観察する方法、上空を通過する鳴き声を調査する方法などがあるが (Kerlinger 1995; 植田ら 2009)、観察条件や観察範囲が限られるため、渡りの大部分はその観察から漏れてしまう (Kerlinger 1995)。

そこで、夜間の渡りの状況を調査する方法とし

て、海外ではレーダーを用いた調査が行われている。レーダーを使うと、種の判別はできないものの、夜間のような目視観察ができない状況下においても渡りの動向が調査できるという利点がある (Harmata et al. 1999; Mabee & Cooper 2004; Mabee et al. 2006)。使用するレーダーは目的により使い分けられており、大型の気象観測レーダーは最大観測距離が 100–240 km と広域なため、広範囲での渡りの動向を調査する場合に用いられる (Gauthreaux & Belser 1998, 1999, 2005; Buler & Dawson 2014)。船舶レーダーは調査範囲が数 km–10 km 程度と狭いものの、渡りの規模の測定精度は大型の気象観測レーダーよりも高く、飛翔高度が測定でき、調査機材は相対的に安価であるなどの利点がある。そのため、狭い範囲で詳細な情報を得る場合に用いられる (Harmata et al. 1999; Mabee & Cooper 2004; Blew et al. 2005; Mabee et al. 2006; Rosa et al. 2016)。船舶レーダーの代わりに小型のパラボラ式追尾レーダーが使われることもある (Bruderer 1994; Gauthreaux & Belser 1999, 2005)。日本では、大型の気象観測レーダーを使って垂直方向のデータを収集するウィンドプロファイラのデータを使い、渡りの時期や時間などについて解析した報告があるものの (植田ら 2009)、それ以外の情報はほとんどなく、夜間の渡りの状況については不明な点が多い。

そこで本研究では、北海道から九州の各地において、船舶レーダーを用いた夜間の渡り調査を実施した。これにより夜間の渡りの規模の定量化と飛跡数に影響を与える要因、飛翔時間と日没や日の出時刻との関係、飛翔高度の特徴、飛翔方向から推定された渡り経路などについて新しい知見が数多く得られた。本論文ではそれらの詳細を報告するとともに、そこで得られた知見をもとに船舶レーダーによる鳥の渡り研究の有効性と今後の課題について議論する。

調査方法

1) 利用したレーダーの種類と利用法

利用した船舶レーダーは、株式会社光電製作所の MDC-2920 および MDC-7920 であり、出力 25kW、レンジ 96 nm のオープンアンテナタイプで、アンテナの長さは 195 cm である。船舶レーダーを陸上で用いたため、総務省の許可を得て調査を実施した (関実第 33452 号、関実第 35383 号、関実第 37646 号、関実第 37647 号、関実第 37750

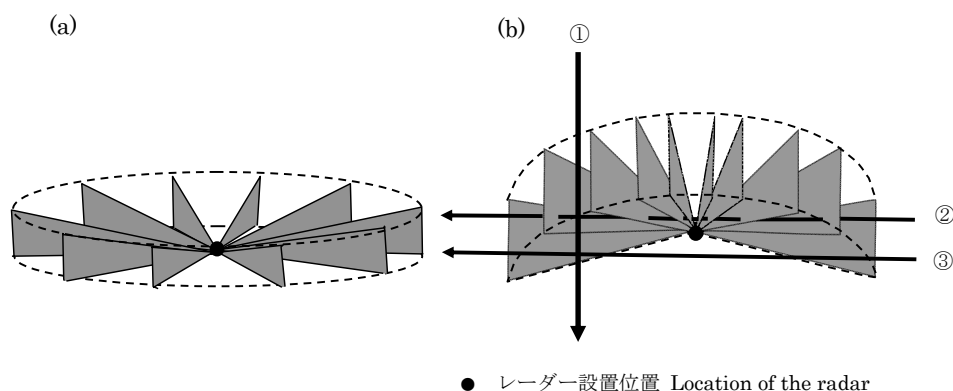


図 1. レーダーの撮影範囲と配置. レーダーの照射範囲を灰色の二等辺三角形で示した. 通常, 船舶レーダーはレーダーを水平方向に 1.25 秒に 1 回転させることで 360° 方向を撮影範囲とするが (a), 本調査ではレーダーを縦回しにすることで, 上空方向について撮影した (b). 右図の矢印は渡り鳥の飛翔方向を示す. ①のようにレーダー撮影範囲を鳥の飛翔方向に対し断面方向にした場合は, 鳥がどこを通過してもレーダーに映るのは 1 回のみとなる. これに対し②と③のようにレーダー撮影範囲を鳥の飛翔方向に対し平行方向にした場合, 撮影範囲の中央を飛翔する場合 (②) では鳥が映るのは 1 回であるが, 撮影範囲の端を通過する場合はダブルカウントされてしまう (③).

Fig. 1. Scanning area and orientation of the radar. The scanning area of the radar is shown by grey isosceles triangles. Marine radar usually scans over 360° by rotating the radar horizontally once every 1.25 seconds (a), but in this survey, our radar scanned longitudinally by placing it in a vertical orientation (b). The arrows show the flight directions of migratory birds. In ① where the radar scanning area is set to the cross-section to the flight direction, a bird will appear on the radar only once no matter where the bird passes. In ② and ③, where the radar scanning area is parallel to the flight direction, a bird will appear only once if flying at the center of the scanning area (②), but will be double counted if flying at the end (③).

号, 関実第 37751 号, 北実第 3375 号, 北実第 3919 号). 船舶レーダーは, 自ら発射したレーダーの反射波をとらえ, 画像として対象物の位置を映し出す. 通常, 船舶レーダーはレーダーを水平方向に回転させることにより, 360 度方向の障害物を感知するが, 本調査ではアンテナを垂直方向に回転させることにより, 上空を飛翔する鳥類の反射波をとらえ画像化した (図 1: Harmata et al. 1999; Mabee & Cooper 2004; Blew et al. 2005; Mabee et al. 2006; Rosa et al. 2016). 以後, これをレーダー調査とする.

なお, 事前に実施した本機種の性能調査では, レーダーを水平方向に回転させた調査と複数地点からの目視調査を日中に実施し, レーダー撮影範囲 (幅約 3 km) の端から端までを飛翔していく 1 羽のヒヨドリ *Hypsipetes amaurotis* の飛跡を連続的に撮影することができている. このことから, 本機種は小鳥類を対象とした調査に十分対応できることを確認している.

2) 調査の時期と時間

調査は秋季と春季の渡り期に行った. 各調査地

点とも秋季と春季のそれぞれの渡り期間中の前半 (以後, 前期調査) と後半 (以後, 後期調査) の 2 回ずつ合計 4 回行った (電子付録 1). これは種により渡りの時期が異なることを考慮したためである. このように本論文での調査時期は, 秋季の前期調査, 後期調査, 春季の前期調査, 後期調査の 4 回であるが, 単に秋季調査, 春季調査と記載している場合は, 前期調査と後期調査の結果を合わせて解析したことを示す. 具体的な調査時期は全国の地域別の渡り時期のデータ (植田ら 2009) をもとに, 地域ごとの渡りの最盛期をとらえるようにした. 基本的には秋季の調査は高緯度地域から開始し, 春季の調査は低緯度地域から開始した. 秋季の調査のうち, 北海道から東北までの 70 か所については前期調査を 2016 年 9 月 19 日から 10 月 10 日, 後期調査を 10 月 15 日から 11 月 5 日に行い, 関東から九州までの 70 か所については前期調査を 2017 年 9 月 4 日から 10 月 9 日, 後期調査を 9 月 26 日から 11 月 7 日に行った. 春季の調査は前期調査を 2017 年 2 月 20 日から 4 月 22 日, 後期調査を 4 月 15 日から 5 月 29 日に行った.

渡りの多くは夜間に行われるが, 渡りを行う時

間は日没後 30 分から 1 時間の間に開始され、渡りを終える時刻は飛び立つ時刻よりもずっと広い時間帯に及んでいるとされる (Kerlinger 1995)。そのため、レーダー調査は日没時刻から開始し、翌日の日の出時刻後 3 時間までの間に行った。実際の調査では、調査準備が遅れたため調査開始時刻が日没時刻に間に合わない場合や朝方に雨が降ったため終了時刻が日の出時刻後 3 時間よりも早く終了したことがある。また、雨の場合はレーダーのデータが十分に取得できない場合があった。そこで、日没時刻から翌日の日の出時刻後 3 時間のうち、取得できたレーダー画像が 5 時間未満の場合は、その日のデータは採用せず、翌日に調査をやり直した。本論文では 1 地点の日没時刻から翌日の日の出時刻後 3 時間までの調査を 1 回の調査とした。レーダー調査時間内から雨もしくは調査時間の不足によりレーダー画像が得られなかった時間を除いた実質の撮影時間をレーダー画像取得時間とした。

日の出時刻、日没時刻は、国立天文台のホームページ (<http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/>) から各都道府県の県庁所在地での時刻 (北海道のみ札幌と根室の 2 か所) を得た。

3) 調査地点の選定

調査は北海道から九州までの 140 か所で行った (図 2)。その内訳は海岸が 73 か所 (日本海の島 2 か所を含む)、内陸が 67 か所であった。調査地点の配置に関しては次の点に考慮したうえで、できるだけ均等になるように分配した。日本における渡り経路を地球規模の広い目を見た場合、その移動方向は南北方向となる。これを日本列島で見ただけの場合、最も主要な渡り経路は北海道から本州・四国、九州を日本列島沿いに移動する経路になるが、このほか宗谷岬とサハリン間の経路、知床半島や根室半島と北方四島間の経路、佐賀県や長崎県と朝鮮半島間の経路、日本海と大陸を直接移動する経路が想定された。そこで調査地点はこれら複数



図 2. レーダーの設置地点. 数値は調査地点番号を示す.

Fig. 2. Map showing the location of the radar stations in this study. The numbers in the figure indicate the site numbers.

の移動経路のいずれの経路についても調査地点が渡り方向に対し、断面方向に並ぶように配置した。また、渡り鳥は半島部分でよく観察されるため、半島部分にはできるだけ調査地点を設定した。4回の調査は基本的に同一地点で行ったが、アクセスルートが積雪などにより閉鎖されるなどの理由から同一地点で実施できなかった場合は、近隣の類似環境に調査地点を移動した。

4) 撮影範囲の設定

レーダーの撮影範囲は渡り鳥の飛翔高度を考慮して決定した。Kerlinger (1995) は小鳥類の75%が600 m以下を、シギ・チドリ類やカモ類はもう少し高いところを飛翔するとし、Gill (2007) も夜間に渡るスズメ目は700–800 m以下の高度を飛ぶのが普通であり、数km上空を飛翔することもあるが、多くの個体が2 km程度の高さまでとしている。そのため、撮影範囲は高さ方向が2,000 m程度撮影できる範囲とした。具体的には高さ方向が約2,500 m、幅は片側約1,500 m (両側約3,000 m) とした。ただし、レーダーにより得られるデータは距離により減衰する。Blew et al. (2005) は、撮影範囲を半径1,500 mで設定した場合の精度検証を行い、小さな鳥の探知は1,000 mを越えると相当減少することを指摘している。そのため、解析に利用する範囲は片側1,000 m (両側2,000 m) とした。ただし、高さ方向については1,000 mを超える範囲での飛翔の状況についても解析する必要があったため、そのままのデータを用いた。

レーダーの回転方向は渡りの方向を考慮して決定した。渡り鳥の通過個体を記録するためには、鳥がレーダーの撮影範囲を1回だけ横切るようにしなければならない。レーダーの照射範囲はレーダーの設置場所を基点に44°の角度で二等辺三角形の形状で広がっていく (図1)。そのため、レーダーを渡りの方向と平行に回転させた場合、撮影範囲の端を通過する個体はダブルカウントされてしまう。一方、渡りの方向に対し断面方向に回転させれば、撮影範囲を通過する回数は1回となり、しかも撮影範囲を広くできる。そのため、レーダーの回転方向は渡りの方向に対して断面方向となるように回転させた。具体的には、東北地方のように渡りの飛翔が南北方向の地点ではレーダーは東西方向に回転させ、中国地方や四国のように渡りの飛翔方向が東西の場合は南北方向に回転させた。この場合、得られた撮影画像は、Y座標は常に飛翔高度を示すが、X座標は東北地方では右

が東、左が西、中国地方や四国では右が南、左が北となる。撮影画像の奥側は、東北地方では北、中国地方や四国では東となり、手前側は東北地方では南、中国地方や四国では西となる。いずれの場合でも、鳥の飛翔方向は、秋季は撮影画像の奥から手前に移動し、春季は手前から奥に移動するように設定した。

5) 撮影方法

レーダーは1.25秒に1回撮影し、1枚の画像データとして保存した (図3)。画像には、レーダーから放射された電磁波が反射により戻ってきたものが映し出され、これをエコーと言う。エコーには飛翔する鳥のエコー、地形、樹林、人工物等の位置を示すエコーのほか、障害物により発生するノイズや空気中の水蒸気によるノイズ等がある。現地調査では空気中の水蒸気等によるノイズ発生を防ぐため、雨雪除去フィルターを使い、できる限りノイズが画像に撮影されないようにした。次に画像解析に当たっては、まず鳥以外のエコーを取り除いた。飛翔する鳥のエコーは常に移動しているが、地形、樹林、人工物等の位置を示すエコーやノイズは基本的には移動することなく同じ場所に映る。そこですべての画像データについて毎正時から10分間ごとにデータに区分し、その時間内に移動せずに映っていたエコーを取り除いた。移動するエコーには、鳥以外ではコウモリと昆虫がいる。レーダー画像からは、渡りを行っているコウモリと鳥の両者を区別することはできないため (Mabee & Cooper 2004; Mabee et al. 2006; Rosa et al. 2016)、鳥のエコーとしたものの中にはコウモリの渡りのデータも含まれている可能性がある。昆虫と鳥を区別する場合は、両者の飛翔速度の違いを利用し、6 m/秒より遅いものを昆虫としてデータから削除することが多いが (Mabee et al. 2006)、本調査では飛翔速度を利用して飛翔方向を推定しているため、調査方法の性質上飛翔速度をもとに昆虫を削除することはできない。そのため昆虫についても鳥のエコーに含まれている可能性がある。

次に1.25秒ごとに撮影された画像に写る鳥のエコーを、連続的な線データとして認識させるプログラムを作成した。鳥のエコーを線データにする方法は、まず1枚目の画像上の鳥のエコーの重心を飛跡の始点とし、2枚目の画像上の各エコーの重心をその始点が最も近い飛跡の2番目の点として結んだ。3枚目以降の画像上の各エコーの重心

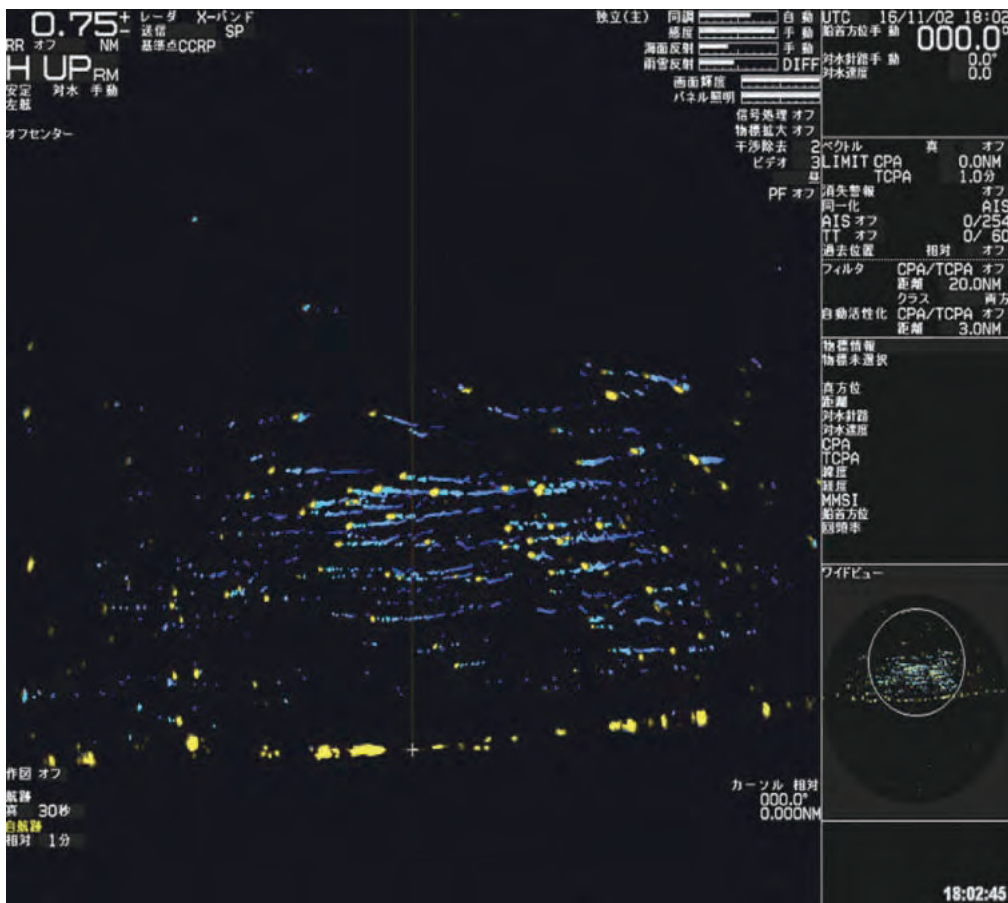


図3. 1枚の画像データの例. St. 59での秋季の後期調査. 時刻18:02:45. 東北地方のため渡り方向は北から南へ移動すると想定し, 画面の左が西, 右が東, 奥が北, 手前が南となっている. 画面下側約5分の1に, 黄色の点が横一列に並んでいるが, これが地面の位置を示す. これよりも上空にある黄色が撮影時の鳥の位置, 水色が数秒前の軌跡. 多くの鳥が北(画面奥)からやや南西方向に飛翔している.

Fig. 3. Example of a radar image. The image of late-term autumn investigation at Station 59 at 18:02:45. This is in the Tohoku region, and the direction of migration is assumed to move from north to south. It is recognized that the left side of the screen is west, the right side is east, the back is north, and the front is south. Approximately one-fifth of the lower side of the screen, yellow points in a row indicates the position of features on the ground. The yellow points above this are the position of birds as they are detected by the radar beam. The light blue colours indicate the movement tracks a few seconds earlier. Many birds are flying south-west from north.

は, 近隣の飛跡の中から最も滑らかにつながる飛跡に結んだ. 滑らかさの評価にはパスコヒーレンス関数 (Sethi & Jain 1987) を用いた. また, N枚目でエコーが現れず途切れる可能性がある飛跡については, N-1枚目までの飛跡状況から推定したエコーの重心位置で仮補完した上で, N+1枚目でのエコーの重心と滑らかにつながる場合のみ本補完, それ以外は棄却とし, エコーの一時的な消失によって飛跡が途絶えることの抑制を図った (特許第6228099号). 本論文では, この1回の連続的な線データを1飛跡とした. この飛跡には小型から大型までのすべての種が含まれており, 1個体

の場合もあれば群れの場合もある. 飛跡数は10分単位で計測し, 日没時刻から日の出時刻までの10分ごとの飛跡数を合計し, これを1回の調査の飛跡数とした.

また, レーダーは44°の角度の二等辺三角形の形状で広がっていくため, レーダーに近い範囲ほど撮影範囲は狭くなる. 低い高度を飛ぶことが多い小鳥類の飛翔時速16-50 km/hを例にすると (Kerlinger 1995), 高度約6.8-21.5 m以下については, 撮影幅と飛翔速度の関係から, 飛跡をとらえていない場合がある.

6) 飛跡数の誤差の検証

飛跡数の誤差については、次のように検証した。まず、すべてのデータから10分間を1セットとしたサンプルを任意に35セット抽出し、10分ごとの飛跡数をプログラムにより計測した。次に同じサンプルについて、10分間に記録された飛跡を1枚の紙に打ち出して人の目で飛跡数を数えた。この際、飛跡数が重なるなどわかりづらい場合は、1.25秒ごとに得られた画像をパソコン画面に連続的に映し出し、一つ一つの飛跡の動きを確認しながら数えた。人の目で飛跡数を数える方法を正と仮定し、プログラムによる飛跡数との誤差を検討した。この際、飛跡数が極端に少ないと誤差が大きくなるため、35サンプルのうち紙に打ち出し数えた飛跡数の多いものから10サンプルを用いて検証した。

7) 統計解析

はじめに調査時期ごとに飛跡数の比較を行った。調査時期を秋季の前期調査、後期調査、春季の前期調査、後期調査に区分し、それぞれの区分に該当する調査の飛跡数を集計し、Mann-WhitneyのU検定により検定し、多重比較となるためBonferroni法により有意水準を補正した。4群総当たりの6パターンのため、補正值は $0.05/6=0.008333$ となることから、有意水準は0.01とした(両側検定)。

次に飛跡数と環境条件との関係について一般化線形混合モデル(GLMM)により解析した。確率分布は負の二項分布に従うと仮定し、リンク関数にはlogを用いた。可能な組み合わせのすべてのモデルについて赤池の情報量基準(AIC)によるモデル選択を行い、ベストモデルからの差が2未満($\Delta AIC < 2$)のモデルを採用した(Burnham & Anderson 2002)。解析は季節別に行い、応答変数は飛跡数、説明変数は調査地点の緯度、経度、調査時期、標高、地形、レーダー画像取得時間の割合、調査開始時の雲量とした。調査時期については、季節ごとに最も早く調査を行った日を1とし、この日から調査日までの日数に1をプラスした数を数値として当てはめた。地形については、海から数100m以内の地点を海岸、それ以外を内陸とした。調査開始時の雲量については、調査開始時に目測により空にかかる雲の割合を1-10割で記録した数値を用いた。レーダー画像取得時間の割合については、日没時刻から日の出時刻後3時間までの時間を100とした場合に対する各調査の

レーダー画像取得時間の割合を用いた。ただし、説明変数の相関による多重共線性を回避するため、ピアソンの積率相関分析により、相関係数の絶対値が0.4以上である変数の組み合わせについては、片方の説明変数だけを採用した。解析には統計ソフトR(version3.5.1)(R Core Team 2018)を利用し、GLMMの分析はパッケージMASS(Venables & Ripley 2002)を用いた。AICによるモデル選択はパッケージMuMIn(Bartoń 2018)を用いて行った。

渡り時間を解析するに当たっては、日没時刻や日の出時刻は調査地点・調査日により異なることを考慮し、調査ごとの日没時刻と日の出時刻を基準に、日没時刻から6時間後までと、日の出時刻の6時間前から3時間後までについて、10分単位で飛跡数を集計した。これをもとに渡りの時間について解析した。

飛翔高度は、調査地点からの対地高度を解析した。高度を50mごとに区分し、その範囲を飛翔していた飛跡数を集計した。

渡りの方向については、画面上のX座標方向の移動距離と撮影範囲と飛翔する鳥の時速から推定した。渡り鳥の飛翔は、日没後の地上からの飛び立ちや、日没前後の地上への降り立ちを除けば、そのほとんどが同じ高度で飛翔していたため、移動距離の算出に関してはY座標方向への変化は無視できる程度であった。レーダー画像は1.25秒ごとに撮影されるため、例えば1回の飛跡データが10枚の画像により記録されていれば、このときの飛翔時間は12.5秒となる。これに渡り鳥の平均飛翔速度を用いると、12.5秒間に移動した距離がわかり、また、そのときのX座標方向の移動距離もわかる。この2つの移動距離から飛翔した角度を算出し、これを飛翔方向とした。ただし、この方法では、例えば東北地方でレーダーを東西方向に回転させた場合に、北東から南西方向に移動する飛跡と南東から北西方向に移動する飛跡の区別はできない。しかし、東北地方での渡り方向は基本的には秋は南下し春は北上する方向に移動するものが多いと考えられるため、本解析では季節ごとの基本的な渡り方向に基づき解析した。

飛翔速度については、次のように処理した。夜間に渡る小鳥類の群れの多くは高度600m未満で飛翔しており、シギ・チドリ類やカモ類は600m未満のこともあるがより高いところを飛ぶ方が多い(Kerlinger 1995)。そこで、高度600m未満の飛翔速度は、小鳥類の飛翔速度を参考に9.17 m/s

(16–50 km/hの秒速換算の中央値)とし、高度 600 m 以上では、シギ・チドリ類 (35–67 km/h) やカモ類 (45–80 km/h) の飛翔速度の中央値 15.76 m/s とした (Kerlinger 1995)。

これをもとに渡りの方向を 16 分割し、各方向に移動する飛跡数の割合を算出した。次に調査地点における 16 方位の飛跡数を、合成ベクトル W_n ($n=1, \dots, 16$) とし、渡り方向を平均化した。 W_n の飛翔方向は、渡りの移動方向を 0 度として時計回りに θ_n ($n=1, \dots, 16$) とし、 W_n を x 成分および y 成分のベクトルに分解した (式 (1) および (2))。

$$X_n = W_n \sin(\theta_n) \quad (1)$$

$$Y_n = W_n \cos(\theta_n) \quad (2)$$

式 (1), (2) で計算された値を式 (3), (4) のように x, y 成分ごとに平均した。

$$\hat{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{16} X_n, \quad \hat{Y} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{16} Y_n \quad (3),$$

$$(4)$$

ここで、 N は 0 以外の方位の数を表す。

最後に、 \hat{X} , \hat{Y} を式 (5) のようにして、飛翔方向の平均ベクトル \hat{W} を計算し、この \hat{W} を各調査地点の渡り方向とした。

$$\hat{W} = \sqrt{\hat{X}^2 + \hat{Y}^2} \quad (5)$$

これにより求められた飛翔方向を矢印の向きとした。矢印の長さは、調査ごとの飛跡数を表し、この矢印を日本地図上の調査位置に記載した。これをもとに渡りの経路について解析した。

結 果

1) 飛跡数の誤差の検証

プログラムで飛跡数を計測する方法のほうが紙に打ち出して人の目で飛跡数を数える方法よりも、平均で 1.2 倍多かった (1.0 倍が 1 回, 1.1 倍が 4 回, 1.2 倍が 2 回, 1.4 倍が 1 回, 1.5 倍が 1 回, 1.6 倍が 1 回)。そのため、本論文で扱う飛跡数は、実際の飛跡数と比較して平均で 1.2 倍程度多く算出されている可能性を含んでいる。

2) 飛跡数

140 か所の調査地点について、それぞれ 4 回ずつ、合計 560 回の調査を実施した。これにより得られたレーダー画像取得時間は、最低が 6 時間 46 分で最高が 16 時間 32 分であった。

日没時刻から日の出時刻後 3 時間までの時間を 100 とした場合に対する各調査のレーダー画像取得時間の割合ごとに調査数を整理すると、秋季では 70% 未満が 10 回, 70–80% 未満が 10 回, 80–90% 未満が 38 回, 90–100% 未満が 89 回, 100% が 133 回で、春季では 70–80% 未満が 1 回, 80–90% 未満が 4 回, 90–100% 未満が 51 回, 100% が 224 回であった。

秋季の前期調査の飛跡数の平均値は 12,804 (165–61,783)、秋季の後期調査は 16,026 (92–109,693)、前期・後期をあわせた秋季調査の平均値は 14,415 であった。春季の前期調査は 1,501 (2–210,071)、春季の後期調査は 7,276 (47–72,329) で、前期・後期をあわせると春季調査の平均値は 4,388 であった (図 4)。飛跡数は秋季の方が春季よりも有意に多かった (秋 1 回目と春 1 回目; $U=17,195$, $z=10.916$, $P=0.0001$, 秋 1 回目と春 2 回目; $U=12,567$, $z=4.0843$, $P=0.0001$, 秋 2 回目と春 1 回目; $U=17,160$, $z=10.863$, $P=0.0001$, 秋 2 回目と春 2 回目; $U=12,954$, $z=4.656$, $P=0.0001$)。また、秋季では前期調査と後期調査とでは有意な差は見られなかったが ($U=9,268$, $z=-0.786$, $P=0.4312$)、春季では前期調査の方が有意に少なかった ($U=3,929$, $z=8.667$, $P=0.0001$)。

各調査の飛跡数にはばらつきがあり、飛跡数が少ない例に注目すると、各調査の飛跡数が調査時期別の平均飛跡数の 10% に満たない場合が、秋期の前期調査で 20 か所 (14.3%)、後期で 23 か所 (16.4%)、春季の前期で 30 か所 (21.4%)、後期で 25 か所 (17.9%)、1% に満たない場合が、秋期調査の後期で 3 か所 (2.1%)、春季の前期で 5 か所 (3.6%)、後期で 3 か所 (2.1%) であった。このうち、春季の前期調査の 5 か所については調査日が 2 月 20 日–25 日までと調査の初期に集中していた。逆に飛跡数が多い例に注目すると、各調査の飛跡数が調査時期別の平均飛跡数の 10 倍以上の場合が、春季の前期調査で 1 か所 (0.7%) あるだけで、100 倍以上の例はなかった。

3) 飛跡数に影響を与える要因

ピアソンの積率相関分析により、相関係数の絶対値が 0.4 以上となる説明変数の組み合わせは、秋季は緯度と経度、標高と地形、春季は緯度と経度、緯度と調査時期、標高と地形であった (表 1)。そこで、緯度と標高については説明変数から除去した。緯度を除去した理由は、緯度は経度と調査時期の 2 つの項目で相関があったためであり、

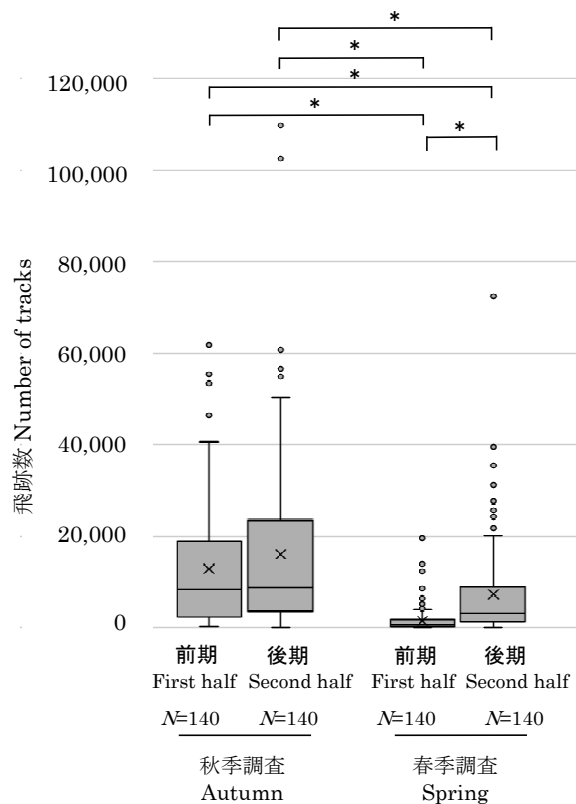


図4. 調査時期別に記録された飛跡数。箱の上下端は上方と下方の四分位値、中央の線は中央値、バツ印は平均値、ひげは上方と下方の四分位値範囲の1.5倍以内における最大値と最小値、小さい丸は外れ値を示す。U検定を行い、ボンフェローニ法により有意水準を補正し ($P < 0.01$)、有意差が認められたものをアスタリクスで示す。春季と秋季がそれぞれどの時期を具体的に示すかは本文を参照。

Fig. 4. Number of tracks recorded during different investigation periods. The upper and lower ends of the box are quartiles, the middle line is the median value, × is the mean, the error bars are the maximum and minimum values within 1.5 times the upper and lower interquartile ranges, and small circles indicate outliers. We performed a U test with the significance level corrected by the Bonferroni correction ($P < 0.001$). Significantly different values are indicated by*. Refer to the text for an explanation of what each of the spring and autumn periods means.

標高を除去した理由は、標高は調査地点の位置が数百 m 離れただけで、山岳地帯や海岸の崖地などでは数値に大きな誤差が出てしまう場合があるのに対し、地形については明確に内陸と海岸を区分できるためである。

AIC のベストモデルの説明変数として、秋季は経度、調査時期、地形、調査開始時の雲量が、春季は調査時期、調査開始時の雲量が選択された (表 2)。ベストモデルでは、経度は西に行くほど、調査時期は遅いほど、調査開始時の雲量は少ない

ほど飛跡数は多くなり、内陸の方が海岸よりも飛跡数は多かった。 $\Delta AIC < 2$ のモデルの数は秋季 4、春季 7 であり、すべてのモデルで選択された説明変数は、秋季は経度、地形および調査開始時の雲量、春季は調査時期および調査開始時の雲量であった。

4) 渡りを行う時間

日没時刻や日の出時刻は調査地点・調査日により異なり、日没時刻から日の出時刻までの時間が

表 1. 説明変数間の相関係数 (Pearson の積率相関係数). 太字は相関係数の絶対値が 0.4 以上であることを示す.
 Table 1. Correlations between explanatory variables (Pearson's correlation coefficient). Bold numerals indicate that absolute correlations are 0.4 or more.

| 説明変数 Explanatory variables | | a | b | c | d | e | f | g |
|-------------------------------|--|---|-------------|-------------|-------|--------------|-------|-------|
| 秋季 Autumn | a 緯度 Latitude | × | 0.91 | 0.04 | -0.09 | -0.10 | 0.25 | 0.00 |
| | b 経度 Longitude | | × | 0.02 | -0.05 | -0.20 | 0.22 | 0.04 |
| | c 調査時期 Survey season | | | × | 0.02 | -0.03 | 0.02 | -0.11 |
| | d 標高 Site altitude | | | | × | -0.47 | 0.07 | 0.03 |
| | e 地形 Terrain | | | | | × | -0.10 | -0.09 |
| | f レーダー画像取得時間の割合 Percentage of radar shooting time | | | | | | × | 0.04 |
| | g 雲量 Cloud cover | | | | | | | × |
| 春季 Spring | a 緯度 Latitude | × | 0.91 | 0.42 | -0.10 | -0.10 | -0.10 | 0.08 |
| | b 経度 Longitude | | × | 0.36 | -0.06 | -0.20 | -0.15 | 0.06 |
| | c 調査時期 Survey season | | | × | -0.06 | -0.02 | -0.06 | 0.07 |
| | d 標高 Site altitude | | | | × | -0.48 | 0.09 | 0.12 |
| | e 地形 Terrain | | | | | × | 0.00 | -0.07 |
| | f レーダー画像取得時間の割合 Percentage of radar shooting time | | | | | | × | 0.05 |
| | g 雲量 Cloud cover | | | | | | | × |

最も短かったのは 8 時間 48 分 (春季の後期調査の 13 地点), 最も長かったのは 13 時間 37 分 (秋季の後期調査の 41 地点) であった. 日没時刻から 6 時間までと, 日の出時刻 6 時間前から日の出時刻後 3 時間までの飛跡数を 10 分単位で分析したところ (図 5), 渡りを行う時間は調査ごとにばらばらであったが, すべてのデータを統合すると渡り時間には特徴が見られた.

渡りは日没時刻にはほとんど観測されず, 日没後 20 分を過ぎた頃から始まった. その後, 飛跡数は増加し, 80 分後から 140 分後頃までが最大となった. その時の 10 分当たりの飛跡数は約 170 であった. 150 分を過ぎた頃から徐々に減少していき, 360 分後の飛跡数は約 140 まで減少した.

一方, 日の出前の飛跡数は, 日の出時刻の 360 分前が約 140 であり, 日の出時刻に向けて徐々に

減少し, 日の出時刻 80 分前には約 80 まで減少した. その後, 飛跡数は一時的に増加し, 日の出時刻 40 分前に約 100 まで回復したのち, 急激に減少し, 日の出時刻には約 50 となった. 日の出時刻後も飛跡数は減少し続け, 日の出時刻後 30 分には 35 となり, その後, 日の出時刻後 180 分まではほとんど変わらなかった.

5) 飛翔高度

対地高度を 50 m ごとに区分し, その範囲を飛翔していた飛跡数を 1 回の調査あたりの平均飛跡数として整理した (図 6). 調査ごとのデータでは飛翔高度はばらばらであったが, すべてのデータを統合すると, 渡りを行う対地高度は 300–400 m を頂点とする一山型を示した. 対地高度 350 m までに全飛跡の約 30% が含まれ, 500 m までに約

表 2. 飛跡数を説明する一般化線形混合モデルにおけるモデル選択の結果. ΔAIC が 2 未満のモデルのみを示した.Table 2. Model selection results for models of variables that explain the number of tracks (generalized linear mixed models). Only models with $\Delta AIC < 2$ are shown.

| 季節 Season | ランク Rank | 係数 Coefficient | | | | | AIC | ΔAIC |
|--------------|-------------|-----------------|-----------------------|---------------|--|-------------------|--------|--------------|
| | | 経度 Longitude | 調査時期 Survey season | 地形 Terrain | レーダー画像取得時間の割合 Percentage of radar shooting time | 雲量 Cloud cover | | |
| 秋季 Autumn | 1 | - | + | - | | | 5883.9 | 0.00 |
| | 2 | - | | - | - | | 5885.6 | 1.73 |
| | 3 | - | + | - | - | | 5885.7 | 1.83 |
| | 4 | - | | - | | | 5885.8 | 1.88 |
| 春季 Spring | 1 | | + | | | | 5051.4 | 0.00 |
| | 2 | | + | | | | 5051.9 | 0.45 |
| | 3 | - | + | | | | 5052.0 | 0.61 |
| | 4 | - | + | + | | | 5052.1 | 0.72 |
| | 5 | | + | + | - | | 5052.4 | 0.99 |
| | 6 | - | + | | - | | 5052.7 | 1.33 |
| | 7 | | + | - | | | 5053.4 | 1.99 |

50%, 850 m までに約 80%, 1,100 m までに約 90% が含まれた. 高度 2,000 m 以上でも飛跡が確認された.

6) 渡り経路

渡り経路を検討するに当たっては, レーダーのノイズ量が多く, 方向を算出するには十分でないと判断した春季の前期調査の 5 地点 (St.1, St.2, St.4, St.5, St.90) および後期調査の 12 地点 (St.1, St.2, St.3, St.4, St.5, St.6, St.7, St.8, St.9, St.38, St.41, St.45) を除く, 543 地点にもとづいて解析した.

秋季調査の飛翔方向とそこから生成された飛翔経路は次のとおりである (図 7, 8). 北海道では, 南北を縦断するように位置する北見山地・日高山脈の西側と東側で, 渡り鳥の飛翔方向は大きく分かれていた. 北見山地・日高山脈の西側では, 道北の調査地点 (St.2, St.4, St.5) では南側に向かって飛翔し, その先の調査地点からは, 渡島半島の地形に沿うように南西方向に飛翔した. 北見山地・日高山脈の東側では, オホーツク海沿いの地点 (St.3, St.6, St.7) の飛翔方向は, 海岸沿いに南東方向を示した. 知床半島 (St.13), 根室半島 (St.27) を含む道東の調査地点は, 襟裳岬 (St.36) を目指すように南から南西方向に飛翔し, 襟裳岬 (St.36) では南の海上方向に飛翔していった. 北見山地・日高山脈の東側から西側へ横断するよう

な方向への飛翔を示す調査地点は確認されなかった. 石狩平野の海岸沿いの地点 (St.32) や地球岬 (St.34) でも, 南西から西南西の海上方向に飛翔したが, その方向の先には湾を挟んで渡島半島がある.

渡島半島の先端にある調査地点 (St.35, St.37) では, 下北半島や津軽半島がある南側の海上方向に飛翔した. 東北から関東, 近畿, 中国, 四国の調査地点の多くは, 日本列島に平行するような方向に飛翔した. ただし, 本州は弓なりに曲がっているため, 日本海側の海岸では, あたかも最短距離を進むかのように海上方向に飛翔した地点もあった (St.68, St.72, St.89). さらに, 島根県や山口県の日本海側の調査地点 (St.110, St.115) では, 朝鮮半島のある海上方向に向かい飛翔した.

九州東部から南部では, 南西から南方面に飛翔する地点が多かった. 一方, 九州北部から西部では, 五島列島や東シナ海のある西側に向かって飛翔する地点 (St.132, St.137) と, 南から南東側に向かって飛翔する地点があった (St.128, St.133, St.136). このうち St.128 と St.136 は海岸に位置するが, 南から南東方向を示す矢印の起点方向には朝鮮半島がある.

春季調査の飛跡方向とそこから生成された飛翔経路は概ね秋の逆方向であった (図 9, 10). ただし, 春季調査では道北の地点のデータが十分に取

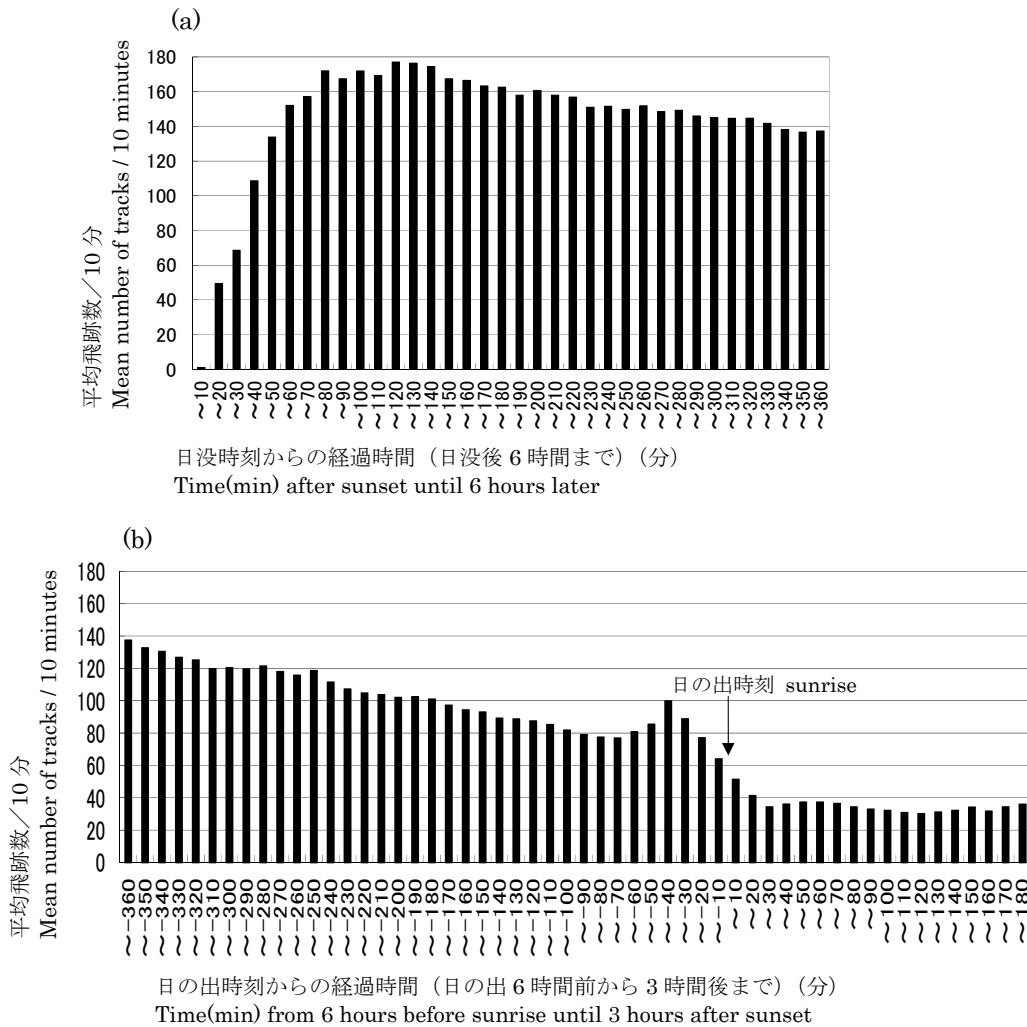


図 5. 日没時刻 (a) と日の出時刻 (b) からの時間経過にともなう飛跡数の変化。(a) は日没時間から 6 時間後までの平均飛跡数を 10 分単位で示し、(b) は日の出の 6 時間前から 3 時間後までの平均飛跡数を 10 分単位で示した。

Fig. 5. Changes in the number of tracks over time from sunset (a) and sunrise (b). (a) The mean number of tracks from sunset to three hours later with every 10-minutes unit. (b) The mean number of tracks from six hours before sunrise to three hours after sunrise with every 10-minutes unit.

得できなかったため、道北の飛翔方向は不明である。また、秋季には北見山地・日高山脈の東側から西側へ横断するような方向への飛翔を示す調査地点は確認されなかったが、春季には日高山脈の北側を回り込むような飛翔方向が確認された。渡島半島先端 (St.37) では、西の海上方向に飛翔した。渥美半島 (St.92) では、通常の渡り方向とは異なる南側の海上方向に飛翔したが、レーダー調査に合わせて行った目視観察では、多くのカモ類が海上に飛び立つ行動が確認されており、渡り行動以外のデータが混入していた可能性がある。

一方、日本海の海上方向に飛翔している地点が、

前述した調査地点以外にも複数確認された。これは秋季と春季の両方で見られた (図 7, 9)。日本海の離島である隠岐の島 (St.103) では、秋季は本州本土方面の南から南西の海上に向かう飛跡が 3,583 (全体の 74.8%)、春季は大陸のある北から北西の海上に向かう飛跡が 1,764 (全体の 66.9%) 確認された。秋季には、St.68 (山形県の酒田) で西に位置する日本海に向かう飛跡が 14,994 (全体の 34.5%)、St.98 (丹後半島) では北北西に位置する日本海に向かう飛跡が 231 (全体の 16.0%) 確認された。春季には、St.37 (白神岬) で西に位置する日本海に向かう飛跡が 661 (全体の

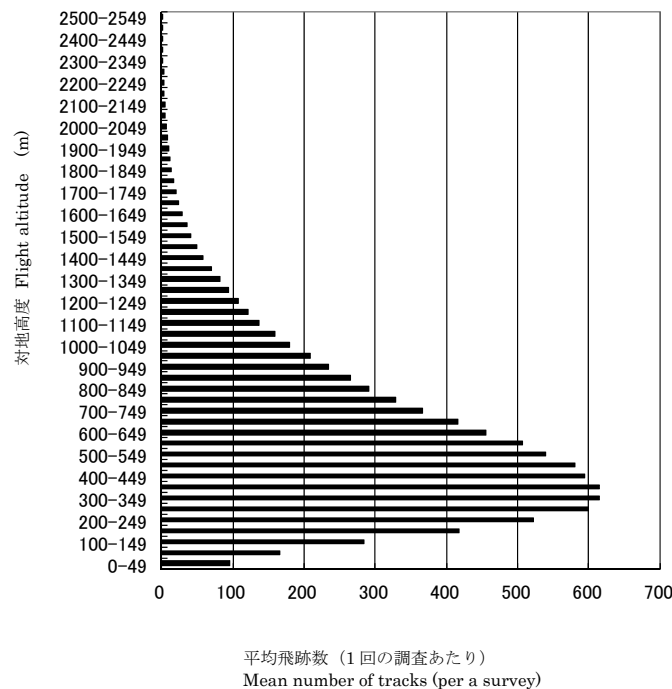


図 6. 飛翔高度の推移にともなう飛跡数の変化. 渡り鳥の飛翔高度を 50 m 区分で示した. 横軸は 1 地点, 日の入り時刻から日の出時刻後 3 時間までの平均飛跡数とした.

Fig. 6. Changes in the number of tracks at different flight altitudes. Flight altitudes are shown at 50 m intervals. The horizontal axis represents the mean number of tracks recorded from sunset to three hours after sunrise.

84.55%), St.110 (山口県) で北に位置する日本海に向かう飛跡が 2,346 (全体の 35.6%) 確認された.

考 察

1) 飛跡数

本調査における飛跡数はレーダー画像に映った鳥のエコーに基づいている. レーダー画像に写る鳥のエコーはノイズの発生を防ぐフィルターの設定により変化するものの, 特定の地域や環境により大きく設定を変えることはないため, 飛跡数の算出結果に対し大きな影響を及ぼすことはなかったと考えている.

日没時刻から日の出時刻後 3 時間までの間に, 幅 2 km の範囲を通過する渡り鳥の飛跡数の全国の平均値は, 秋季調査では 14,415 飛跡, 春季調査では 4,388 飛跡であった. 本調査での解析手法ではこの数値は 1.2 倍多く算出されている可能性があることから, この誤差を補正すると, 秋季調査の飛跡数は 12,013 飛跡, 春季調査の飛跡数は

3,657 飛跡となる. この数値は, 夜間を含め日本の渡り鳥の規模を全国レベルで推定した初めてのものである. 秋季の方が春季よりも 3 倍ほど多いことがわかる.

本調査では, 調査時期はできるだけ渡りの最盛期となるように設定しているため, ここで示した飛跡数は渡り期間の平均飛跡数ではなく, 渡りの最盛期の平均飛跡数を示したものと考えられる. ただし, 春季の前期調査では飛跡数が調査時期別の平均飛跡数の 1% に満たない例が 5 回確認され, そのいずれのデータも調査初期の 2 月 20 日-25 日に集中していた. 春季の前期調査の飛跡数の平均が 1,501 であるのに対し, この 6 日間に調査した 18 地点の平均は 469 であり, 1,000 を越えた地点は 3 地点であった. このことから, 春季の前期調査の一部については, 渡りの最盛期よりも早いデータが含まれている可能性がある.

2) 飛跡数に影響を与える要因

AIC によるモデル選択の結果, 経度, 調査時期, 地形, レーダー画像取得時間の割合および調査開

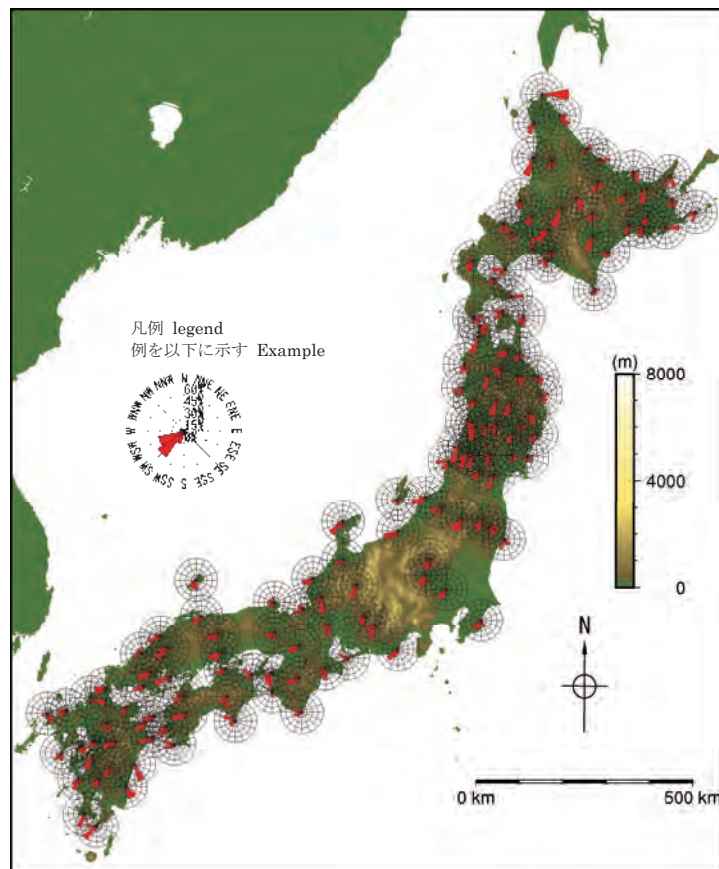


図7. 夜間移動性鳥類の秋季の飛翔方向の割合. 方位を16分割し, 飛跡数の飛翔方向の割合を各方位に割り当てた.

Fig. 7. Percentage of different flight directions at individual radar stations for nocturnal autumn migrants. The azimuth was divided into 16, and the percentage of the number of tracks in each azimuth is shown.

始時の雲量のうち, 秋季および春季とも飛跡数との関連が比較的強かったのは, 調査開始時の雲量であった. 調査開始時の雲量は, 秋季および春季とも $\Delta AIC < 2$ のモデルのすべてで説明変数として選択されており, 最も飛跡数に影響していたと考えられる. 本研究では基本的には雨天の時は調査を実施しておらず, 風の情報もないため, 雨や風など天候との関係は定量化できていないが, 調査開始時の雲量は, 調査日の天候の状況, つまり天候が悪いと飛跡数が減少するという現象を反映した結果ではないかと考えられる. 鳥類の渡りと天候との関係については, 小林ら (2005) も, 渡り鳥の飛跡は降水時には発生しないこと, 晴れた日に多く, 中でも風が弱い場合や鳥の移動に対し追い風の時に多く発生することなどを指摘しており, 本調査の結果とも一致している. また, 経度は秋季調査で, 調査時期は春季調査で $\Delta AIC < 2$ のモデルのすべてで説明変数として選択されたが, これ

は秋季の調査は北海道から, 春季は九州から順次渡りの方向に合わせるように移動しながら調査を進めるといった調査手法により, ランダムなデータ取得ができていなかったという影響を受けた可能性がある.

地形は秋季のみ $\Delta AIC < 2$ のモデルのすべてで説明変数として選択され, 内陸の方が飛跡数は多い結果となったが, 春季では海岸の方が多い場合があるなど, その傾向にはバラツキがあった. この理由については, 本調査からは解明できておらず, 今後の研究に期待したい.

3) 飛翔高度

飛翔高度については, 対地高度 300–400 m を頂点とする一山型を示し, 中央値は約 500 m, 飛跡数の 90% が 1,100 m 以下で確認された. 本調査と同様に船舶レーダーにより渡り鳥の飛翔高度 (対地高度) を測定した結果でも, 中央値は 275–500

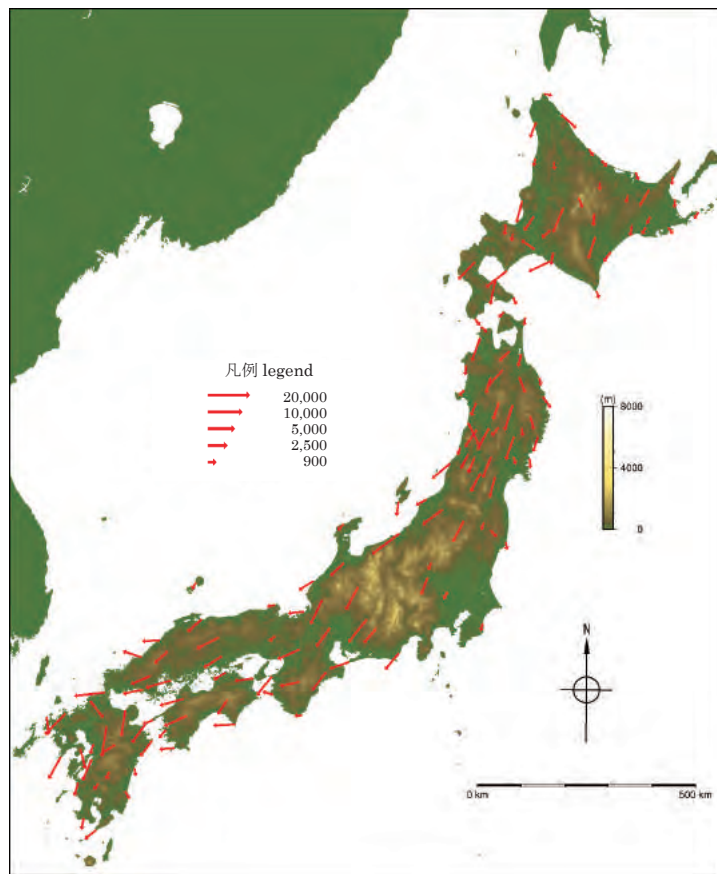


図 8. レーダー調査によって明らかになった夜間移動性鳥類の秋季の飛翔経路。矢印の向きが進行方向を示し、長さが飛跡数を示す。矢印の長さは実際には得られた飛跡数に従い対数的に表示されるが、この図では簡便のため代表的な飛跡数の長さにもとづいて表示した。

Fig. 8. Flight routes of nocturnal autumn migrants revealed by radar surveys. The direction of an arrow indicates the direction of movement, and the length represents the number of tracks. The length of the arrow is actually displayed logarithmically according to the number of tracks obtained, but in this figure it is shown based on the representative numbers of tracks (20,000, 10,000, 5,000, 2,500, and 900).

m 程度、1,000 m よりも高い高度を飛ぶ割合は 4–15% であり (Harmata et al. 1999; Mabee & Cooper 2004; Mabee et al. 2006)、本調査と類似した結果となっている。一方、Blew et al. (2005) は、小さな鳥の探知は 1,000 m を越えると相当減少することを指摘している。そのため、本研究による飛翔高度の結果が渡り鳥の飛翔高度をとらえた結果なのか、レーダーの性能自体に依存している結果なのかを検証する必要がある。植田ら (2008) は船舶レーダーによる渡りの飛翔高度を分析した結果、高さ方向ではなく、水平方向では 1.5 km 以上離れても鳥が映ること、また、いつも高高度の飛跡が撮影できないのではなく、撮影できる時間もあることから、レーダーの性能による影響ではなく、

実際に高高度を飛翔する個体が少ないと考えるべきであるとしている。今回の調査でも、高度 1,000 m 未満の飛跡数よりも、高度 1,000 m 以上の飛跡数の方が多かったことが 18 回あった。一方、船舶レーダーよりも出力が強い小型のパラボラ式追尾レーダーを使った高度調査の事例では、対地高度 400–500 m を頂点とする一山型を示すという点は類似しているが、高度 1,000 m 周辺からの減少率は本調査よりも緩やかであった (Bruderer 1994)。これらのことから、1,000 m 以上を飛翔する飛跡数についてはレーダーの性能により過小評価となっている可能性はあるものの、本研究による飛翔高度は概ね実際の飛翔高度を反映していると考えられる。

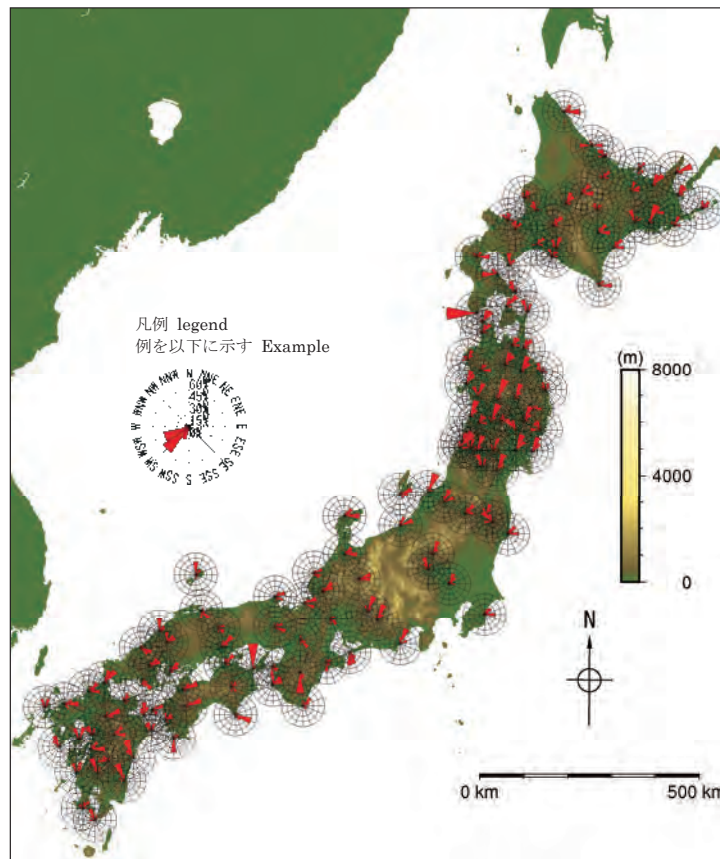


図9. 夜間移動性鳥類の春季の飛翔方向の割合. 方位を16分割し, 飛跡数の飛翔方向の割合を各方位に割り当てた.

Fig. 9. Percentage of different flight directions at individual radar stations for nocturnal spring migrants. The azimuth was divided into 16, and the percentage of the number of tracks in each azimuth was shown.

ただし, ここで示した飛翔高度はすべての調査 ($N=560$) の平均値である. 飛翔高度は, 追い風の速度に影響を受け, 追い風では高く, 向かい風では低く飛ぶとされる (Bruderer 1994; Kerlinger 1995). そのため, 飛翔高度はその日の天候条件に影響されており, 本研究の結果でも, 飛翔高度は調査ごとに大きなばらつきがあった.

4) 渡りを行う時間

渡りを行う時間は, 日没時刻後20分を過ぎた頃から始まり, 80分後から140分後頃に最大値を迎え, その後は徐々に減少し, 日の出時刻前に一時的な増加を見せた後, 日の出時刻30分前から急激に減少した. 植田ら (2009) は, 気象レーダーにより国内の渡り時間について分析した結果, 渡りは日没後1-3時間程度後から活発になる日が多く, 夜半過ぎからは徐々に少なくなると指摘している. また, 海外の事例でも, 渡りは日没後30分から1

時間の間に始まり, 最大値を日没後2-3時間後に迎えた後は, 徐々に減少している (Bruderer 1994; Kerlinger 1995; Mabee & Cooper 2004; Mabee et al. 2006). このように, 本研究の結果は既往調査の結果と概ね一致していた. ただし, 本研究では渡りを行う時間の解析は, 10分間の飛跡数を基に行った. 10分間の区切りは毎正時0分を基準としているため, 例えば日没時間が18:03分の場合, はじめの10分間の飛跡数には実質的に7分間の飛跡数しか含まれていないことになる. そのため, 本研究では日没時間の最初の10分間と日の出から3時間後の最後の10分間については, 飛跡数は過小評価されている可能性がある (図5参照). なお, 調査時間内に雨などにより10分間のデータが得られなかったこともあるが, このようなケースは最大で2-3%程度であるため, 全体の傾向には影響していないと考えられる.

日没時刻は太陽の上辺が水平線に沈む時刻であ

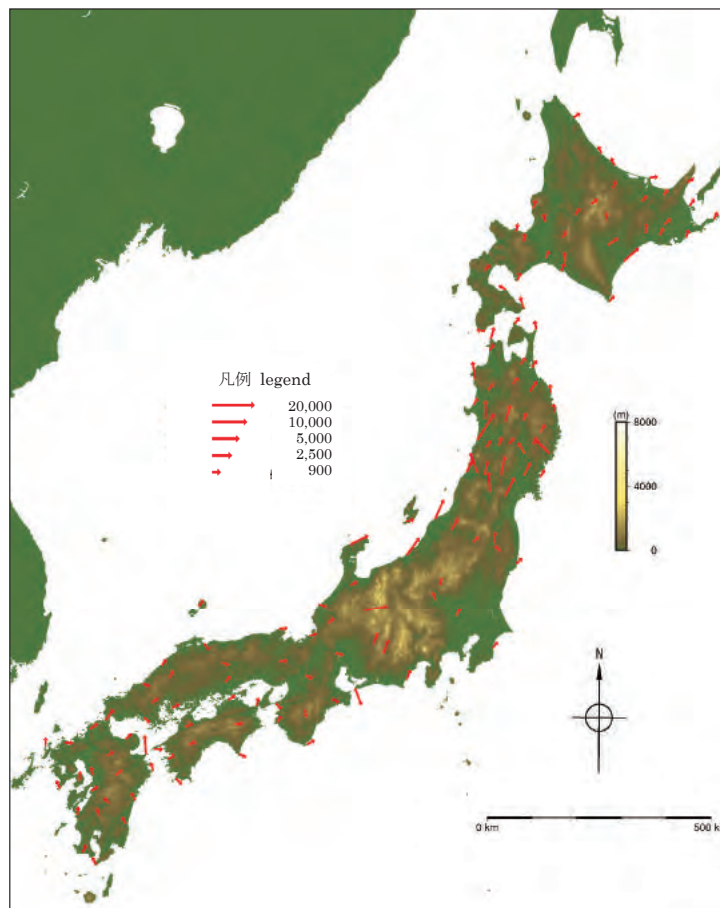


図 10. レーダー調査によって明らかになった夜間移動性鳥類の春季の飛翔経路。矢印の向きが進行方向を示し、長さが飛跡数を示す。矢印の長さは実際には得られた飛跡数に従い対数的に表示されるが、この図では簡便のため代表的な飛跡数の長さにもとづいて表示した。

Fig. 10. Flight routes of nocturnal spring migrants revealed by radar surveys. The direction of an arrow indicates the direction of movement, and the length represents the number of tracks. The length of the arrow is actually displayed logarithmically according to the number of tracks obtained, but in this figure it is shown based on the representative numbers of tracks (20,000, 10,000, 5,000, 2,500, and 900).

り、日没時刻を迎えてもすぐに暗くなるわけではない。時期や天候にもよるが、日没時間後約 30 分までの間は戸外での作業に差し支えない程度の明るさが残り（常用薄明）、日没後約 90 分を過ぎると空はほとんど完全に暗くなるとされる（国立天文台歴計算室 オンライン）。つまり、渡りは星が見える程度の暗さになると始まり、完全に暗くなる頃に最大値を迎えたことになる。これは日の出との関係でも同じであった。一方、これとは一見矛盾するよう見える結果として、日の出時刻 60 分前から渡りの飛跡が一時的に増加するという現象が見られた。同様な結果は海外でも報告されて

いる（Bruderer 1994）。この理由としては、渡り鳥には日中を中心に渡りを行う種もいるため、夜間に渡りを行うグループとは異なるグループの活動が影響している可能性が考えられる。

5) 渡り経路

本研究における渡りの経路とは、飛翔方向と飛跡数を示した矢印を、日本地図の各調査位置に図示したものである。そのため、各調査地点の矢印に連続性はない。しかし、調査地点数は 140 か所あり、北海道から九州までの範囲におおむね均等に配置されているため、日本地図に落とされた矢

印を概観することで、渡り経路の概要をある程度読み取ることができていると思われる。このように特定の種ではなく渡り鳥を群れとしてとらえ、どの場所でどのくらいの渡り鳥がどの方向に移動しているかといった渡りの動向を全国スケールで定量化できたことは、本研究の大きな成果と考えられる。

本論文では、飛翔方向を推定する際には、鳥の分類群ごとの飛翔速度の中央値を用いたが、鳥の飛翔速度は風にも影響を受けることが知られている。Kerlinger (1995) は、風の影響による鳥の飛翔速度の変化は、時速にして数 km 程度と指摘している。本研究では高度別の風のデータを得ることはできなかったため、風についての影響は考慮していないが、本研究で利用した飛翔速度の中央値が小鳥類で 33 km/h、シギ・チドリ類・カモ類で 58 km/h であることを踏まえると、本論文で推定された飛翔方向が風の影響により大きく変化することはないと考えられる。

最も主要な渡り経路は、多くの地点の飛翔方向からわかる通り、北海道から本州、四国、九州を列島沿いに移動する経路であると考えられる（経路の表記については、便宜上、特に記載のない限りは、秋季の移動方向に従い記載している）。これらについて細かく見てみると、北海道では道北から北見山地・日高山脈の西側を通過し、渡島半島に移動するルート、稚内からオホーツク海沿いに移動するルート、千島列島方面から、知床半島や根室半島を経由し道東に移動するルート、北見山地・日高山脈の東側を南下するルート、襟裳岬から太平洋に飛び立つルート、石狩平野から太平洋に飛び立つルート、地球岬から太平洋に飛び立つルートの存在が示唆された。

本州以南では、列島沿いに移動するルートのほかに、春季の小川原湖周辺から太平洋に飛び立つルート、東北の日本海側から佐渡・能登半島に移動する海上ルート、若狭湾を飛び越える海上ルート、中国地方の日本海側から朝鮮半島方向に向かい日本海に飛び立つルート、九州の西側から五島列島方向に向かう、もしくは直接東シナ海に飛び立つルート、朝鮮半島方面から対馬、北九州に入ってくるルート、日本海側から大陸方面に直接日本海を渡るルートの存在が示唆された。

本研究により存在が示唆されたルートの多くは、既に渡りのルートとして知られているものが多く、稚内からオホーツク海沿いに移動するルートはオオワシ *Haliaeetus pelagicus* の渡りルートと一致し

(植田ら 2004)、千島列島方面から、知床半島や根室半島を経由し道東に移動するルートと北見山地・日高山脈の東側を南下するルートはヒシクイ *Anser fabalis serrirostris* (呉地 2006)、襟裳岬から太平洋に飛び立つルートはコクガン *Branta bernicla* (Shimada et al. 2016)、石狩平野から太平洋に飛び立つルートはオオヒシクイ *A. f. middendorffii* (呉地 2006)、小川原湖周辺から太平洋に飛び立つルートはオオハクチョウ *Cygnus cygnus* (Shimada et al. 2014) やヒシクイ (呉地 2006)、中国地方の日本海側から朝鮮半島方向に向かい日本海に飛び立つルートは春のハチクマ *Pernis ptilorhynchus* (Higuchi 2012, 樋口 2014)、九州の西側から五島列島方向に向かうルートは秋季のハチクマ (Higuchi 2012, 樋口 2014)、朝鮮半島方面から対馬、北九州に入ってくるルートは秋季のマナヅル *Grus vipio* (Higuchi et al. 1992) や春季のハチクマ (Higuchi 2012, 樋口 2014)、日本海側から大陸方面に直接日本海を渡るルートは春季のマガモ *Anas platyrhynchos* (Yamaguchi et al. 2008) などのルートと重なっている。このことは、本研究の結果の有効性を示唆するとともに、上昇気流を利用して日中に渡りを行う種と夜間に渡りを行う種の渡りルートは類似していることを示唆している。ただし、夜間の渡りは日本全国で広く確認されるのに対し、主に昼間に渡るサシバやハチクマの渡り経路は特定の山脈沿いや岬に集中しているといった違いもある。

また、既知のルートとして知られていなかった地球岬から太平洋に飛び立つルートや、東北の日本海側から佐渡および能登半島に移動する海上ルート、若狭湾を飛び越える海上ルートは、どれも最短距離を移動するために、陸域沿いではなく海上を横断しているように見える。陸鳥は陸上沿いを移動するイメージが強いが、この規模の距離であれば、たとえ海上であっても最短距離を選択することがあることを示唆している。

6) レーダー調査の有効性

本調査では、船舶レーダーを使うことで、夜間の渡りの規模、飛翔高度、飛翔時間、飛翔方向などの情報を定量的に収集することができた。このように船舶レーダーを用いた手法は、夜間を含む渡り鳥の動向を調査する方法として、優れた手法であることがあらためて確認された。また、夜間調査だけでなく、日中に行った目視の調査と比較しても、船舶レーダーの方が渡り鳥の確認能力が

高いことが報告されている (Harmata et al. 1999). 一方、課題としては種の判別ができないことがあげられる。現状では飛翔の特徴や飛翔速度から、ガン・カモ類、タカ類、ペリカン類、ツル類などのグループ単位に分類することが限界とされる (Harmata et al. 1999). また、渡りの数についても、個体数ではなく飛跡数を用いているが、この飛跡は1個体の場合もあれば複数個体の場合もあり、区別できていない。しかし、Kerlinger (1995) は、夜間のカモ類やシギ・チドリ類は日中も夜間も群れで渡るが、夜間に渡る小鳥類は一般的に群れにならないことを指摘している。もちろん、夜間に渡る小鳥類が群れになることもあるが、その割合は場所や条件によりまちまちであり、大部分は単独であると報告している。そのため、カモ類やシギ・チドリ類が多く渡ることが予想される海岸部等を除けば、夜間の飛跡数は概ね個体数と類似していると考えられる。一方、日の出後には小鳥類も群れで飛翔するが、この場合は目視調査により群れの平均個体数を調査し、飛跡数に乗じることで個体数の概算が算出できるのではないかと考えられる。

海外ではすでに夜間の鳥類調査の方法として、船舶レーダーが広く利用されている。船舶レーダーは小型で機動性があり、精度の高い調査が可能であるという特長を生かし、風力発電事業などの環境影響調査やコロニー周辺での生態調査などに活用されている (Harmata et al. 1999; Gauthreaux & Belser 2003; Mabee & Cooper 2004; Mabee et al. 2006).

われわれは、このほかに船舶レーダーによる調査は長期的な鳥類の渡りのモニタリング調査に有効な手法になると考えている。日本は世界的に重要な渡りルートである東アジア-オーストラリアフライウェイの航路上に位置している。一方、渡り鳥は世界的な規模で減少しており、実態を探り対策を考えていくためには、広範囲にわたる情報を効率的に収集できる研究方法を考えることが重要とされる (樋口 2005)。船舶レーダーで渡りの調査を行えば、日本で繁殖もしくは越冬する個体の移動状況だけでなく、海外で繁殖もしくは越冬するために日本を通過する個体の移動状況も把握でき、東アジア-オーストラリアフライウェイを移動する個体の増減を定量化できると考えられる。しかも、調査幅 2 km の範囲のデータが、ほぼ自動で収集、解析できるため効率的に調査できるという利点がある。具体的には船舶レーダーを固定

された調査地点で、渡り時期の始まりから終わりまでの期間連続測定する。これを定期的に行うことで、数十年単位の長期的な個体数変動を定量的に把握することができると考えられる。特に稚内や根室、薩摩半島や大隅半島、南西諸島のように、日本の先端に当たる地域に設定すれば、国内外での個体数変化がより明確にできると考えられる。日本が世界的な渡りの中継地にあることを踏まえると、船舶レーダーを使った長期的なモニタリング調査は日本の鳥類に留まらず、世界的な渡り鳥を保全するための基礎データとして重要なものになると期待される。

本研究は環境省の事業で行った調査をまとめたものである。環境省には貴重なデータの発表の機会をいただいた。岩手県立大学の由井正敏名誉教授、新潟大学の関島恒夫教授、日本風力発電協会の石原茂雄氏、バードライフ・インターナショナルの澤 祐介氏、山階鳥類研究所の仲村 昇氏、日本野鳥の会の浦 達也氏には貴重なご意見をいただいた。英文は米国コネチカット大学のロバート・A・アスキンス博士に校閲していただいた。ここに感謝の意を申し上げる。

摘 要

渡り鳥の多くは夜間に渡りを行っていることが知られている。しかし、夜間における渡りの動向を調査する方法は限られているため、日本ではその実態はほとんどわかっていない。そこで、北海道から九州の 140 地点で船舶レーダーを用いた夜間の渡り鳥の調査を実施した。レーダー調査では種の同定はできないものの、夜間でも鳥類の飛跡数を定量的に調査でき、飛翔高度等が把握できるという利点がある。調査は各地点とも秋・春 2 回ずつ、日没時刻から日出時刻後 3 時間まで行い、幅 2 km の範囲の上空を飛翔する渡り鳥の飛跡数を計測した。560 地点の飛跡数の平均は秋季 14,415、春季 4,388 で、最大は 109,693 飛跡であった。飛跡数と環境条件との関係について一般化線形混合モデルにより解析した。応答変数は飛跡数、説明変数は調査地点の緯度、経度、調査時期、標高、地形、レーダー画像取得時間の割合、調査開始時の雲量とした。飛跡数に関係する要因として重要なのは、調査開始時の雲量であった。飛翔高度は対地高度 300–400 m を頂点とする一山型を示した。飛翔時間は、日の入り時刻後 80 分から 140 分後頃に最大値を迎え、その後、徐々に減少した。本調査により推定された渡りのルートの多くが、既存の調査により既に知られており、このことは、

本研究の結果の有効性を示唆するとともに、上昇気流を利用して日中に渡りを行う種と夜間に渡りを行う種の渡りルートは類似していることを示唆していた。このように船舶レーダーを用いた手法は、夜間を含む渡り鳥の動向を調査する方法として、優れた手法であることが明らかになった。

引用文献

- Baker RR (1984) *Bird Navigation: the Solution of a Mystery?* Cambridge University Press, Cambridge (ロビン・ベーカー. 網野ゆき子 (訳) (1994) 鳥の渡りの謎. 平凡社, 東京).
- Bartoń K (2018) MuMIn: Multi-Model Inference.R package version 1.42.1. (online) <https://CRAN.R-project.org/package=MuMIn>, accessed 2019-4-1.
- Blew J, Diederichs A, Grünkorn T, Hoffmann M & Nehls G (2005) *Investigations of the bird collision risk and the responses of Harbour Porpoises in the offshore wind farms Horns Rev, North Sea, and Nysted, Baltic Sea. Denmark.* Universität Hamburg and Bio Consult SH Report, Hamburg.
- Bridge ES, Kelly JF, Contina A, Gabrielson RM, MacCurdy RB & Winkler DW (2013) Advances in tracking small migratory birds: a technical review of light-level geolocation. *J Field Ornithol* 84: 121-137.
- Bruderer B (1994) Nocturnal bird migration in the Negev (Israel) –A tracking radar study. *Ostrich* 65: 204-212.
- Buler JJ & Dawson DK (2014) Radar analysis of fall bird migration stopover sites in the northeastern U.S. *Condor* 116: 357-370.
- Burnham KP & Anderson DR (2002) *Model selection and multimodel inference: A practical information-theoretic approach, 2nd ed.* Springer, New York.
- Chen W, Doko T, Fujita G, Hijikata N, Tokita K, Uchida K, Konishi K, Hiraoka E & Higuchi H (2016) Migration of Tundra Swans (*Cygnus columbianus*) wintering in Japan using satellite tracking: identification of the Eastern Palearctic flyway. *Zool Sci* 33: 63-72.
- Gauthreaux SA Jr & Belser CG (1998) Displays of bird movements on the WSR-88D: Patterns and quantification. *Weather and Forecasting* 13: 453-464.
- Gauthreaux SA Jr & Belser CG (1999) Bird migration in the region of the Gulf of Mexico. In: Adams NJ & Slotow RH (eds) *Proc the 22 Internat Ornithol Congress: 1931-1947.* BirdLife South Africa, Johannesburg.
- Gauthreaux SA Jr & Belser CG (2003) Radar ornithology and biological conservation. *Auk* 120: 266-277.
- Gauthreaux SA Jr & Belser CG (2005) Radar ornithology and the conservation of migratory birds. In: Ralph CJ & Rich TD (eds) *Bird conservation implementation and integration in the Americas: Proceedings of the Third International Partners in Flight Conference: 871-875,* Pacific Southwest Research Station, Fresno.
- Gill FB (2007) *Ornithology Third edition.* W H Freeman and Company, New York (フランク・B.ギル. 山階鳥類研究所 (訳) (2009) 鳥類学: 277-308, 新樹社, 東京).
- Harmata RA, Podruzny MK, Zelenak RJ & Morrison LM (1999) Using marine surveillance radar to study bird movements and impact assessment. *Wildl Soc Bull:* 44-52.
- 樋口広芳 (2005) 鳥たちの旅 渡り鳥の衛星追跡. NHK 出版, 東京.
- Higuchi H (2012) Bird migration and the conservation of the global environment. *J Ornith* 153 Suppl: 3-14.
- 樋口広芳 (2014) 日本の鳥の世界. 平凡社, 東京.
- Higuchi H, Sato F, Matsui S, Soma M & Kanmuri N (1991) Satellite tracking of the migration routes of Whistling Swans *Cygnus columbianus*. *Yamashina Inst Ornithol* 23: 6-12.
- Higuchi H, Ozaki K, Fujita G, Soma M, Kanmuri N & Ueta M (1992) Satellite tracking of the migration routes of cranes from southern Japan. *Strix* 11: 1-20.
- Higuchi H, Ozaki K, Fujita G, Minton J, Ueta M, Soma M & Mita N (1996) Satellite-tracking White-naped Crane *Grus vipio* migration and the importance of the Korean DMZ. *Conserv Biol* 10: 806-812.
- Higuchi H, Shiu H, Nakamura H, Uematsu A, Kuno K, Saeki M, Hotta M, Tokita K, Moriya E, Morishita E & Tamura M (2005) Migration of Honey-buzzards *Pernis apivorus* based on satellite tracking. *Ornithol Sci* 4: 109-115.
- 池野 進・岩崎忠敬・岡田正夫・大野晴一 (2004) 霞ヶ関北部におけるサシバの原初的な秋の渡り. *Strix* 22: 89-98.
- 井上勝巳 (1993) 春季に西へ渡るハイタカ属3種. *Strix* 12: 85-92.
- 井上勝巳 (1998) 長崎県五島列島福江島を秋季に渡るタカ類. *Strix* 16: 109-120.
- 伊関文隆 (2004) 春期に九州北西部を西に渡るハイタカと東へ渡るサシバ・ハチクマ. *Strix* 22: 81-88.
- 環境省自然保護局生物多様性センター (2009a) 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 第1期とりまとめ報告書. バードリサーチ, 東京.
- 環境省自然保護局生物多様性センター (2009b) 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) シギ・チドリ類調査 第1期とりまとめ報告書. バードリサーチ, 東京.
- 環境省自然保護局生物多様性センター (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 第2期とりまとめ報告書. バードリサーチ, 東京.
- 環境省自然保護局生物多様性センター (2015b) 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) シギ・チドリ類調査 第2期とりまとめ報告書. バードリサーチ, 東京.
- Kerlinger P (1995) *How Birds Migrate.* Stackpole Books, Mechanicsburg (ケリンガー, P. 丸 武志 (訳) (2000) 鳥の渡りを調べてみたら. 文一総合出版, 東京).
- 小林健二・阿保敏広・泉川安志・河原恭一・石原正仁・若山俊夫・松田知也 (2005) 気象庁のウィンドプロファイラ観測における渡り鳥のエコーの影響と対策. *天気* 52: 11-23.
- Koike S, Hijikata N & Higuchi H (2016) Migration and win-

- tering of Chestnut-cheeked Starlings *Agropsar philippensis*. *Ornithol Sci* 15: 63–74.
- 国立天文台暦計算室. 各地のこよみ. 国立天文台. (オンライン) <http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/>, 参照 2017–12–28.
- 国立天文台暦計算室. 薄明. 国立天文台. (オンライン) <http://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/topics/html/topics1992.html>, 参照 2018–9–1.
- 呉地正行 (2006) 雁よ渡れ. 精興社, 東京.
- 黒岩哲夫・橋本裕子・西村俊彦・吉本海男・和田雅典・矢野 望・佐藤重穂 (1999) 高知市におけるハチクマの渡り. *Strix* 17: 119–126.
- Mabee TJ & Cooper BA (2004) Nocturnal bird migration in Northeastern Oregon and Southeastern Washington. *Northwestern Naturalist* 85: 39–47.
- Mabee TJ, Cooper BA, Plissner JH & Young DP (2006) Nocturnal bird migration over an Appalachian ridge at a proposed wind power project. *Wildl Soc Bull* 34: 682–690.
- 中村 司 (2012) 渡り鳥の世界 渡りの科学入門. 山梨日日新聞社, 甲府.
- Newton I (2008) *The Migration Ecology of Birds*. Elsevier, London.
- 日本野鳥の会愛媛県支部 (1989) 四国から九州に渡るサシバの渡りルート. *Strix* 8: 125–131.
- R Core Team (2018) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (online) <https://www.R-project.org/>, accessed 2019–4–1
- Rosa IMD, Marques AT, Palminha G, Costa H, Mascarenhas M, Fonseca C & Bernardino J (2016) Classification success of six machine learning algorithms in radar ornithology. *Ibis* 158: 28–42.
- Sethi IK & Jain R (1987) Finding trajectories of feature points in a monocular image sequence. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 9: 56–73.
- Shimada T, Hijikata N, Tokita K, Uchida K, Kurechi M, Suginome H, Yamada Y & Higuchi H (2016) Satellite-tracking of the spring migration and habitat use of the Brent Goose *Branta berinicla* in Japan. *Ornithol Sci* 15: 37–45.
- Shimada T, Yamaguchi NM, Hijikata N, Hiraoka E, Hupp JW, Flint PL, Tokita K, Fujita G, Uchida K, Sato F, Kurechi M, Pearce JM, Ramey AM & Higuchi H (2014) Satellite tracking of migrating Whooper Swans *Cygnus cygnus* wintering in Japan. *Ornithol Sci* 13: 67–75.
- Shiu H, Tokita K, Morishita E, Hiraoka E, Wu Y, Nakamura H & Higuchi H (2006) Route and site fidelity of two migratory raptors: Grey-faced Buzzards *Butastur indicus* and Honey-buzzards *Pernis apivorus*. *Ornithol Sci* 5: 151–156.
- Tajiri H, Sakurai Y, Tagome K, Nakano Y, Yamamoto Y, Ikeda T, Yamamura Y & Ohkawara K (2015) Satellite telemetry of the annual migration of Baikal Teal *Anas formosa* wintering at Katano-kamoike, Ishikawa, Japan. *Ornithol Sci* 14: 69–77.
- 武田恵世 (1989) 日本列島におけるタカの渡り. *Strix* 8: 35–123.
- 鄭 鐘烈・樋口広芳・朴 宇日 (1992) 損朝鮮半島におけるツル類の渡りの経路と重要中継地—人工衛星による追跡調査の結果—. *Strix* 11: 1–20.
- 植田陸之・福田佳弘・松本 経・中川 元 (2004) 知床半島におけるオオワシの渡りと気象状況. *Strix* 22: 71–80.
- Ueta M, Sato F, Lobkov EG & Mita N (1998) Migration routes of White-tailed Sea Eagles *Haliaeetus albicilla* in northeastern Asia. *Ibis* 140: 684–686.
- 植田陸之・島田泰夫・有澤雄三・樋口広芳 (2009) 気象レーダー「ウィンドプロファイラ」により明らかになった全国的な渡り鳥の移動状況. *Bird Research* 5: 9–18.
- 植田陸之・島田泰夫・有澤雄三・高木憲太郎・樋口広芳 (2008) 気象レーダーウィンドプロファイラに映る「鳥エコー」の実態と渡り研究への応用. *Bird Research* 4: 9–20.
- Venables WN & Ripley BD (2002) *Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition*. Springer, New York.
- Yamaguchi N, Hiraoka E, Fujita M, Hijikata N, Ueta M, Takagi K, Konno S, Okuyama M, Watanabe Y, Osa Y, Morishita E, Tokita K, Umada K, Fujita G & Higuchi H (2008) Spring migration routes of mallards *Anas platyrhynchos* that winter in Japan, determined from satellite telemetry. *Zool Sci* 25: 875–881.
- Yamaguchi NM, Iida T, Nakamura Y, Okabe H, Oue K, Yamamoto T & Higuchi H (2016) Seasonal movements of Japanese Murrelets revealed by geolocators. *Ornithol Sci* 15: 47–54.
- Yamaura Y, Schmaljohann H, Lisovski S, Senzaki M, Kawamura K, Fujimaki Y, Nakamura F (2017) Tracking the Stejneger's stonechat *Saxicola stejnegeri* along the East Asian-Australian Flyway from Japan via China to southeast Asia. *J Avian Biol* 48: 197–202.
- 吉居瑞穂・吉居 清 (1992) 伊勢のタカ渡り. *Strix* 11: 233–243.

電子付録 1. 基礎データ.

Supplement 1. Basic data.

<http://doi.org/10.3838/jjo.69.41>