

審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 米原 善成

アホウドリ類やミズナギドリ類は、長時間飛翔により長距離移動する能力を有している。外洋を飛翔する間に経験する海上風は、これらの海鳥の移動コストに影響を及ぼすことが予想される。よって、移動に要するコストを節約するために、海鳥はさまざまな風環境に対して、適切に対応する必要がある。過去の研究により、外洋を長距離移動する際に、これらの海鳥の飛翔経路が大規模な風の分布様式に影響されることが明らかにされている。同様に、海鳥は時間や場所によって細かく変化する風に対しても飛翔行動を変化させているはずである。しかし、海鳥が実際に経験している風を細かい時空間分解能で測定するのは難しく、この問題を解明するのは困難であった。本研究では滑空を主体とする鳥の飛翔行動と風の関係に着目し、まず、バイオロギング手法で得られる鳥の飛翔軌跡から詳細な風情報を抽出する手法を考案した。そして、移動に要するコストを最小化するための飛び方を理論的に予測し、その結果を実際の鳥の飛翔と比較することで、風環境に対応して鳥がいかに飛翔行動を調節しているのかを調べている。

鳥の飛翔経路から海上風を推定するために、ミズナギドリ目鳥類 3 種から経路データを取得した。1 秒間隔で位置データを記録する GPS を、オオミズナギドリ 13 羽、コアホウドリ 2 羽、ワタリアホウドリ 4 羽に取り付けた。これらの海鳥の飛翔経路は数十メートルの規模で曲がりくねっており、対地速度は周期的に変動した。滑空する鳥の対地速度は追い風時に速く、向かい風時に遅くなると考えられる。そこで、5 分間ごとに対地速度と飛翔方向の散布図を描き、正弦曲線を当てはめることで、対地速度が最速となる方角を風向、最高速度と最低速度の差の半分を風速として推定した。推定した風向・風速の精度を検証するために、同時刻に同じ場所で観測された人工衛星由来の風データと比較した結果、これらは有意に相関した。人工衛星由来の風速に比べ、鳥由来の風速が過小評価される傾向があったが、これは前者が海面高度 10m の値であるのに対し、鳥の飛翔高度が 2~8m であるため、海面摩擦によっていくらか低下した速度を計測した結果であると考察された。この手法により、飛行経路全体にわたって高精度かつ高分解能で鳥が経験した風を推定できるようになった。

中型~大型のミズナギドリ目鳥類は羽ばたきと滑空に加えて、ダイナミックソアリング

と呼ばれる海上の風速勾配からエネルギーを獲得しながら飛ぶ方法を組み合わせることでエネルギー効率の良い飛翔を達成している。ミズナギドリ類が風を利用して飛ぶ際、風環境に対して具体的にどのように対応しているのかはよく分かっていない。そこで、2016年9月にGPSと加速度計を同時に14羽の個体に取り付けて、計166.7時間の飛翔データを取得した。前述の手法で5分毎の風向・風速を推定し、同時に飛行コストの指標として、加速度データから羽ばたきを行った時間割合を調べた。風が弱い時は、鳥はさまざまな方向に飛翔していた。一方、風速が上がるにつれ、横風ないし斜め後ろからの風を受けつつ飛翔することがわかった。オオミズナギドリは向かい風と追い風の両方の状況で、風速が強くなると対気速度を上げることが判明した。また、追い風時には対気速度の上昇とともに羽ばたきが大幅に減少していることが分かった。これは、追い風が強いほど対気速度を下げるという、羽ばたき飛翔をする鳥の定常飛行に関する対気速度調節の理論予測とは異なる結果であった。

オオミズナギドリが行うダイナミックソアリング・羽ばたき・滑空を織り交ぜた複雑な飛翔方法に対応出来るよう、最適制御問題を用いて従来の定常飛行モデルを非定常状態に拡張した。これにより、さまざまな風環境下で移動コストを最小にする理論的な飛翔方法を予測できるようになった。その結果、野外の鳥に実際見られたように、向かい風と追い風の両方で、風速の上昇と共に対気速度を上げる飛び方が移動コストを最小にするという理論解が導かれた。特に、斜め後ろからの風を受ける時は、ダイナミックソアリングによって風からエネルギーを獲得することで、低い飛行コストで対気速度を上げられることが判明した。

以上の結果から、オオミズナギドリが現場の風環境に応じて移動コストを最小とする飛び方を選択していることが強く示唆された。ミズナギドリ目鳥類の飛翔軌跡から現場の海上風を推定する手法は、将来、気象学や環境学における貢献も期待できる。バイオロギング手法によって野外調査で得られたデータを解析し、得られた結果を解釈するための理論検証により、海上風に対応した本種の飛翔特性を明らかにした本研究は、学術上寄与するところが少なくない。よって、審査委員一同は本論文が博士(農学)の学位論文として価値あるものと認めた。