

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：17301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20587

研究課題名（和文）「空のニッチ」とそれを利用する空中生活者の超感覚：空中を研究の場として

研究課題名（英文）Supersensory abilities of aerial organisms exploiting the niche in sky: studying the atmosphere as a research venue

研究代表者

山口 典之（Yamaguchi, Noriyuki）

長崎大学・水産・環境科学総合研究科（環境）・教授

研究者番号：60436764

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、脊椎動物の中でもっとも空中生活に適応し、空域の資源利用を巧みにおこなう鳥類ハリオアマツバメを対象として、空域の生態学という開拓的課題を遂行した。主に、(1) 本種が繁殖期に食物とする羽蟻などの小型飛翔昆虫資源の利用のあり方の解明、(2) 空中食物資源の定量的な把握手法の開発といった課題に取り組んだ。

(1) 本種は羽蟻を主要な食物資源として利用していた。小型陸鳥としては極めて広大な空域を行動圏とし、群飛している羽蟻を、視覚だけでなく嗅覚で広域探索していることが分かった。(2) UAV に搭載する採集ユニットを開発し、飛翔昆虫を定量的に捕獲する手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

陸域や水域とは異なり、これまでほとんど手を付けられてこなかった空域に存在するニッチがどのように利用されているのかを知ることは、新しい研究領域を開く契機となる。空域は人間が容易にアクセスすることができない困難さがあるが、遠隔追跡機器や UAVなどを駆使することにより、その困難さを打開することが可能となって来ていることを示すことができた。この成果に触発され多くの研究が進められることになること期待される。ハリオアマツバメは国際的に保護が必要な絶滅危惧種であり、そのような種についての深い知見が得られたことで、今後の国際研究が進展するだろう。基礎的な成果は図鑑やマスメディアで紹介された。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted a pioneering project on the ecology of the airspace, focusing on the bird, the white-throated needletail, which is exceptionally adapted to aerial life among vertebrates and which adeptly exploits resources in the airspace. The main issues addressed were (1) to elucidate the utilization of small aerial insects like winged ants as food resources, which this species feeds on during the breeding season, and (2) development of a method for quantitatively understanding airborne food resources.

(1) This species used winged ants as its main food resource. It was found that this species has an extremely vast airspace for a small land bird, and that it extensively searches for flying ant swarms, utilizing both visual and olfactory cues. (2) We developed a collection unit to be mounted on a UAV and established a method to quantitatively capture flying insects.

研究分野：鳥類生態学

キーワード：ハリオアマツバメ ドローン 飛翔性昆虫 空中採食 空のニッチ

1. 研究開始当初の背景

生物が利用可能な資源の分布と変化の様相を把握し、その資源をどう巧みに利用するかを理解することは、生態学研究の根本課題である。その知見は、環境変動に伴う資源の量と分布の変容が、それを利用する生物にもたらす現在・将来のインパクトを推定・予測し、対策を施す環境科学や保全生物学研究の強固な礎となる。

鳥類は、脊椎動物の中で最も幅広い環境に適応しており、陸域・水域・空域の多様な資源を利用するため、資源分布とその利用の関

係について研究対象となり続けてきた。しかし、鳥類の最大の特徴ともいえる空域での資源利用に関する研究はいまだ手つかずの状態と言える。広大な立体環境である空域に存在する資源の空間・時間分布の定量的測定、そしてその資源を利用する鳥類の空域での三次元かつ高精度での移動追跡が、技術的問題から実現しなかったからである。本研究では、(1) ドローン(マルチコプター)と船舶 X バンドレーダーを利用した fine-scale な空中食物資源の調査、(2) GPS 追跡装置を利用した鳥類の三次元移動経路の正確な計測をおこなうことで、この課題を克服し、空域の生態学という開拓的課題を遂行することを目指した。

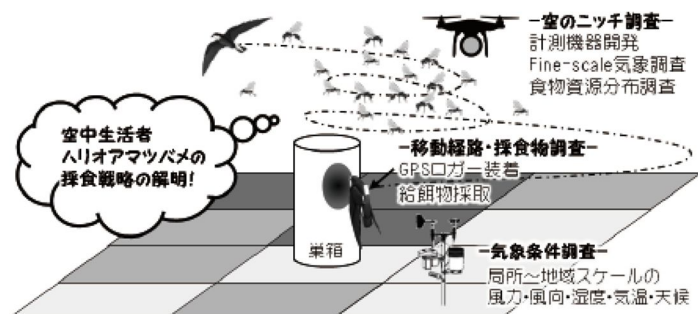


図 1. 研究のイメージ図

2. 研究の目的

研究対象は、ハリオアマツバメ *Hirundapus caudacutus* である。本種は空域の食物資源に完全依存し空中採食に高度に専門化している。本種は育雛期には羽アリを主要な食物とすることが分かっており、羽アリなどの小型飛翔昆虫資源の利用のあり方を解明することで、「空のニッチ」と定義できる資源利用を解明することを目的とした。結婚飛行をはじめとする群飛にともなう小型飛翔昆虫の発生量と発生場所は、湿度や風力、気温、天候等に左右されて時間・空間的に大きく変動すると考えられる。そのような「空のニッチ」の成因と利用者の適応性を深く理解するため、本課題では特に以下を明らかにすることを具体的な研究目的とした。(1) 空中食物資源の時間・空間分布の定量的な把握、(2) 空中食物資源を形作る環境要因の解明、(3) 空中採食専門鳥種が食資源探索で使用する超感覚の特性把握、(4) 空中採食専門鳥種の局所スケールから渡りによる地球スケールまでの移動、「空のニッチ」の全体像、それを規定する環境要因の三者の繋がり解明。

3. 研究の方法

本研究は北海道にて実施した。調査地にあたっては、大径木にできる大型の樹洞にしか営巣しない本種のために特別に設計した巣箱を架設し、調査に必要なサンプルサイズを確保した。尚、具体的な調査地に関しては本種の保護上の観点から公開を控える。

(1) 空のニッチ計測システムの実装

空中に非ランダムに三次元分布する飛翔昆虫をサンプリングするために、産業用ドローンを使用した。使用機種は最大積載重量 6kg 程度であり、飛翔昆虫採集ユニットを積載してなお、高速で安定飛行することが可能である。申請者らが開発した採集ユニットを搭載し、飛翔昆虫採集飛行を実施した。

(2) 空中採食専門鳥種の複数スケールでの移動と獲得食物の把握

育雛期間中のハリオアマツバメ親個体に局所移動追跡用の GPS ロガーを装着し、三次元測位を数分程度の測位間隔でおこない、精細な移動経路と移動パターンを把握することで、繁殖地での採食空域の三次元利用の様子を把握した。帰巣の際に捕獲し、雛に持ち帰った食物をサンプルし、どのような餌種をどの程度得たのかを把握した。これらは異なる気象条件下でおこない、資源利用が気象にどのような影響を受けるかを解析することを想定した。繁殖後期には、親個体に遠隔追跡用のジオロケータを装着し、非繁殖期(春・秋の渡りと越冬期)の移動経路と利用空域の把握を目指した。申請者らによる先行研究では、豪州南東部まで移動することがわかっているが、さらに追跡例数を増やし、経路や環境利用の詳細を明ら

かにすることを旨とした。

- (3) 空のニッチの時間・空間分布の定量的把握
ハリオアマツバメに小型の GPS ロガーを装着し、約 2 分ごとに測位することで、正確な移動経路を追跡した。X バンドレーダーを水平・垂直に回すことで、レーダー設置場所周辺に発生する飛翔昆虫の空中分布を測定した。ハリオアマツバメの GPS 追跡日の前後日に、飛翔昆虫収集ドローンをランダムに航行させ、飛翔昆虫種と個体数に関するデータを取得した。
- (4) 空中採食専門鳥種が有する超感覚の特性把握
空中にパッチ状に分布し、現れては消える空中食物資源の探知にハリオアマツバメが利用する情報を解明する実験を実施した。本種の主要食物である羽アリ（新女王）をコロニーであらかじめ採取し、それを通気袋に収納し、バルーンで空中に係留した（実験区）。何も収納しない袋を空中に係留するまたは何も係留しない対照区と実験区で、実験開始から実験地点近傍にハリオアマツバメが現れるまでの時間と個体数を記録し、比較した。

4. 研究成果

- (1) 空のニッチ計測システムの実装

ペイロード約 3kg の産業用ドローンをを用い、約 1.5kg の捕獲ユニットを搭載することで、飛翔昆虫を空中採取する捕獲器を開発した。パーツは基本的にアルミフレームからなるが、詳細は今後、技術報告論文により公表する予定である。ハリオアマツバメの繁殖地とその周辺で環境の異なる 15 箇所にて、繁殖期中に捕獲調査を実施した。2021 年の調査結果概要を一例とする。全てのフライトのうち、約 52% について、飛翔性昆虫を 1 個体以上採取した。水平飛行 (54%) の方がホバリング (32%) よりも採取率が高かった。高度ごとに比較すると、10, 50, 100, 150m の高度別で高度が低い方が、捕獲率が高かった。捕獲された飛翔昆虫の分類群や個体数に関しては学術論文として公開する予定である。業務用 UAV を用いた飛翔昆虫の捕獲はある程度の成果を得たと言える。多様な高度で空中を飛翔している昆虫を捕獲できるシステムは、基礎生態学だけでなく、農学などの応用分野でも活用できる可能性があり、今後の発展が期待できる。今後は、さらに軽量化をすることで、さらに捕獲成績が向上する可能性が高い。またアリの結婚飛行のような群飛する昆虫をねらって捕獲するなどの場合には、ライダーを搭載した UAV を用いることも試みるべきであろう。



図 2. 飛翔昆虫採集を実施した場所の一例

- (2) 空中採食専門鳥種の複数スケールでの移動と獲得食物の把握

繁殖期間中の利用空域を把握するために GPS ロガーを親鳥に装着し、その採食トリップを追跡した。その結果、育雛期には、巣の周囲数十 km 以上の広大な空域で採食をしていることが分かった。これは小型の陸鳥の中では極めて広い範囲を採食のために移動していると言える。その移動の主要な目的は、雛に持ち帰る食物を探すためであると考えられる。巣に持ち帰った餌を採集したところ、ハリオアマツバメの雛への給餌物の約 90% はハチ目からなり、巣に持ち帰ったハチ目のうちの 90% 以上がケアリ属であることが分かった。本種の雛への給餌物は、基本的には飛翔昆虫の中でも結婚飛行中のケアリ属であり、生重量の組成から特に雌の羽アリであるということが分かった。羽アリの雌は、広域で同調的、短期的に飛出することで、他のコロニー由来の雄とめぐりあい、交尾を成功させる。短期的に、大量に空中に提供される栄養価の高い食物資源を育雛に利用するという空中生活への適応が、ハリオアマツバメで確認された。



- (3) 空のニッチの時間・空間分布の定量的把握

繁殖期の親鳥を GPS ロガーにより追跡した結果、巣を中心として数十 km にもおよぶ広大な範囲を行動範囲としていることが明らかになった。そのなかで、特定のせまい範囲に集中して測位点が連続的に記録されるケースが認められた。そのようなところでは、追跡個体がとどまって採食している可能性が高く、ヒナへの主要な給餌物である羽アリの群飛が発生していることが推測された。そのような採食場所は、林縁部や河畔林上空といった環境であることが多かった。GPS 追跡でそのような測位点パターンが得られた同日に、同場所で飛翔昆虫採集 UAV を飛行させることも検討したが、飛行許可の関係で実施することができなかった。研究計画当初は、GPS 追跡と X バンドレーダーを組み合わせ、羽アリの群飛の発生頻度や場所と親鳥の飛行パターンを関連づけることを予定していたが、X バンドレーダーで得られる観測データが想定と異なり、広域での飛翔昆虫の群飛を捉えることができなかった。将来的には UAV に LiDAR を搭載し、飛翔昆虫が多く発生する環境を飛行させることで、空中の食物資源分布と量を実測することを検討していく。



(4) 空中採食専門鳥種が有する超感覚の特性把握

過去、鳥類の嗅覚は弱い、全くないとされており、キーウィ類やコンドル類など一部の例外を除き、食物の獲得はほとんど視覚や聴覚に依存していると考えられてきた。しかし近年、鳥類の採食行動における嗅覚の重要性が明らかになりつつある。ハリオアマツバメは、広大な空域に散発的に出現する羽アリの群飛を見つけていること、羽アリの女王は雄アリを誘引するために性フェロモンを放出していることから、ハリオアマツバメはフェロモンを嗅覚により認識し、視覚では捉えられない遠方から、羽アリの群飛を感知しているのではないかと考えた。そこで、実際にヒナに持ち帰っているものと同属のアリ種の羽アリを採集し、その中からメスアリのみを仕分け、羽アリの野外提示実験を実施した。提示実験ではヘリウムガスを充填したバルーンで提示物を高度約 50m に係留してハリオアマツバメの出現行動を観測した。羽アリ + 格納袋提示、格納袋のみ提示、提示物なしの 3 処理で比較したところ、羽アリ + 格納袋提示区でハリオアマツバメが有意に高頻度で出現した。出現個体数についても、羽アリ提示区で他の処理区よりも出現個体数が有意に多かった。特に、通常は 1-2 個体での出現である中で、10 個体以上の群れで出現する事例が羽アリ提示区のみで確認された。実験開始からハリオアマツバメが飛来するまでの時間については、羽アリ提示区で出現までの時間が最も短く、提示物なしとは有意差があった。以上より、ハリオアマツバメは、羽アリの性フェロモンを遠方から感知している可能性が示唆された。実際の採食行動では、羽アリが発生しやすい地形を経験的に記憶していたり、視覚で群れを捉えたりするなど、複数の手がかりを用いている可能性が高いが、そのような手がかりのひとつとして、嗅覚を利用することで、広大な空域に時間的・空間的に散在する食物資源を利用していると考えられる。



以上より、ハリオアマツバメは、羽アリの性フェロモンを遠方から感知している可能性が示唆された。実際の採食行動では、羽アリが発生しやすい地形を経験的に記憶していたり、視覚で群れを捉えたりするなど、複数の手がかりを用いている可能性が高いが、そのような手がかりのひとつとして、嗅覚を利用することで、広大な空域に時間的・空間的に散在する食物資源を利用していると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiroyoshi Higuchi, Hiroshi Yonekawa, Sayaka Mori, Satoshi Konno, Miwa Konno and Noriyuki M. Yamaguchi	4. 巻 116
2. 論文標題 Structure and possible functions of the tail needles in the White-throated Needletail.	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 British Birds	6. 最初と最後の頁 168-172
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noriyuki M. Yamaguchi, Sayaka Mori, Hiroshi Yonekawa, Daichi Waga and Hiyoroshi Higuchi.	4. 巻 75
2. 論文標題 Light-level geolocators reveal that White-throated Needletails (<i>Hirundapus caudacutus</i>) follow a figure-eight migration route between Japan and Australia.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pacific Science	6. 最初と最後の頁 75-84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noriyuki M. Yamaguchi, Sayaka Mori, Hiroshi Yonekawa, Daichi Waga and Hiroyoshi Higuchi	4. 巻 19
2. 論文標題 Nest boxes for White-throated Needletail Swift <i>Hirundapus caudacutus</i> to promote conservation and support ecological research.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ornithological Science	6. 最初と最後の頁 217-221
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Noriyuki M. Yamaguchi, Sayaka Mori, Hiroshi Yonekawa, Daichi Waga and Hiyoroshi Higuchi	4. 巻 75
2. 論文標題 Light-level geolocators reveal that White-throated Needletails (<i>Hirundapus caudacutus</i>) follow a figure-eight migration route between Japan and Australia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Pacific Science	6. 最初と最後の頁 75-84
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小嶋さくら・菊池隼人・森さやか・押田龍夫・山内健生
2. 発表標題 北海道十勝地方において動物の巣から発生した小蛾類
3. 学会等名 2022年度北海道応用動物・昆虫研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森さやか・小林和楽・津田真美加・森田暖々・米川洋・山口典之・和賀大地・今野怜・今野美和・樋口広芳
2. 発表標題 ハリオアマツバメの巣内で観察されるつがい以外の成鳥
3. 学会等名 日本鳥学会 2023 年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 徳永尚起・米川洋・山口典之・樋口広芳
2. 発表標題 LiDAR を用いたハリオアマツバメの飛翔速度の計測
3. 学会等名 日本鳥学会 2023 年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 樋口広芳・米川洋・森さやか・今野怜・今野美和・山口典之
2. 発表標題 ハリオアマツバメの「針尾」の秘密を探る
3. 学会等名 日本鳥学会 2023 年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林和崇・森さやか・津田真美加・森田暖々・吉川夏彦・和賀大地・山口典之・樋口広芳
2. 発表標題 ハリオアマツバメにおけるつがい外子の発生と繁殖成績の関係（予報）
3. 学会等名 日本鳥学会 2023 年度大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口典之, 森さやか, 米川洋, 和賀大地, 樋口広芳
2. 発表標題 ジオロケーターにより明らかになったハリオアマツバメ <i>Hirundapus caudacutus</i> の春秋の渡経路と越冬地
3. 学会等名 日本鳥学会 2021 年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森さやか, 千葉舞, 津田真美加, 田中宏武, 山口典之, 樋口広芳
2. 発表標題 ハリオアマツバメ(<i>Hirundapus caudacutus</i>)は主食である羽アリの性フェロモンを感知するか？
3. 学会等名 日本鳥学会 2021 年度大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 樋口広芳（編）	4. 発行年 2021年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 344
3. 書名 鳥の渡り生態学	

〔産業財産権〕

〔その他〕

“最速”の鳥 地球1周分の距離を渡る
<https://news.ntv.co.jp/category/economy/876599>
 酪農学園大の森准教授ら ハリオアマツバメの飛行経路を解明
https://www.hokkaido-np.co.jp/article/545660?rct=n_science
 世界最速級で飛翔し、ほぼ空中で暮らす鳥類の地球規模の渡り経路を解明
<https://www.nagasaki-u.ac.jp/ja/science/science236.html>
 【朝日小学生新聞】ハリオアマツバメ渡りルートが判明（環境共生学類 森さやか准教授）
<https://www.rakuno.ac.jp/archives/16970.html>
 世界最速級で飛翔し、ほぼ空中で暮らす鳥類の地球規模の渡り経路を解明
<https://www.nagasaki-u.ac.jp/ja/kouhou/>
 北海道とオーストラリア東部を行き来する渡り鳥：ハリオアマツバメの渡りの全経路を解明
<https://www.rakuno.ac.jp/archives/14797.html>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	森 さやか (Mori Sayaka) (70623867)	酪農学園大学・農食環境学群・准教授 (30109)	
研究分担者	樋口 広芳 (Higuchi Hiroyoshi) (10111486)	慶應義塾大学・自然科学研究教育センター(日吉)・訪問教授 (32612)	
研究分担者	島田 泰夫 (Shimada Yasuo) (70621077)	一般財団法人日本気象協会・環境影響評価室 主任技師 (82692)	
研究分担者	山内 健生 (Yamauchi Takeo) (00363036)	帯広畜産大学・畜産学部・准教授 (10105)	
研究分担者	浅利 裕伸 (Asari Yushin) (80761478)	帯広畜産大学・畜産学部・准教授 (10105)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------