

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H01769

研究課題名(和文) 移動生態学的アプローチを基盤とした生物分散問題解決のための実証的研究

研究課題名(英文) An empirical study on the animal movements by using bio-logging techniques to solve problems related to animal dispersions

研究代表者

依田 憲 (Yoda, Ken)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：10378606

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、海鳥・ヒキガエル・クロマグロ・コウモリの移動分散を最先端の動物搭載型センサを用いて追跡し、移動情報の集積、高度経路解析等を行った。また、野生動物の内的状態や経験する環境をさまざまな側面から捉えることにより、移動に及ぼす影響を調べた。さらに、統計モデルや機械学習モデルの構築や、それらに基づいた数値シミュレーション等を行い、複雑な動態を示す自然環境下での動物の移動分散を予測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、幅広い分類群に対して、自然条件下での移動追跡や生理状態の取得が可能になった。また、構築したモデル群により、バイオロギングデータがある程度あれば、野生動物の移動予測を行えるようになったため、今後、生態系保全域の設定や外来種拡散等へのさまざまな問題への適用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we recorded the movements of seabirds, cane toads, bluefin tunas, and bats using state-of-the-art animal-borne loggers. We also examined the effects of the internal states of animals and the external environments on animal movements. In addition, we developed a method for predicting the animal movements in the natural environments that change in time and space by constructing statistical and machine learning models.

研究分野：動物行動学

キーワード：バイオロギング マグロ ヒキガエル コウモリ 海鳥 移動生態学

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

動物は、空間を移動する。動物が関わる環境問題の多くは、あらゆる動物に普遍的に見られる空間移動をどのように扱うか、ということに集約される。たとえば、オーストラリアや沖縄に移入され、分布域を急速に広げている侵略的外来種オオヒキガエルの移動分散をどうやって食い止めるか。水産重要種クロマグロを持続的に利用するために、どこでどのように漁業を営むべきか。これらの要求に応えるため、生物の分布と環境の「相関」を観測し、生物分布を推定する生態ニッチモデルが使われてきた。しかしながら、信頼性の高い予測を行うためには、動物の移動分散の内部機構（生理機構や運動機構）や法則を無視した従来の手法では不十分である。その障害となっているのは、動物の移動分散パターンの多様さである。分類群、生活圏、移動様式が多岐に渡るため包括的なアプローチを取りづらく、生態系保全、持続可能な漁業、外来種問題等の異なる研究領域で、個別に対応せざるを得なかった。

動物行動学・動物生態学の分野では、新しい動物追跡法を用いた移動生態学 (Movement Ecology) という学問領域が急速に発展しつつある。これは一見まったく異なるものに見える動物の移動分散を、バイオロギング技術と統計・数理モデル・機械学習で扱うことによって、移動様式や分類群を超えた共通の移動原理を探る新しい研究分野である。さらに、野生動物の体内の生理状態を測定する手法や、移動シミュレーション手法等も用いることで、個体レベルの移動を統合的に解析することが可能になりつつある。

2. 研究の目的

本研究では、海鳥・ヒキガエル・クロマグロ・コウモリの移動分散を最先端の動物搭載型センサを用いて追跡し、移動情報の集積、高度経路解析等を行う。また、動物の内的状態や経験する環境をさまざまな側面から捉えることにより、移動に及ぼす影響を調べる。さらに、統計モデルや機械学習モデルの構築や、それらに基づいた数値シミュレーション等を行い、複雑な動態を示す自然環境下での動物の移動分散を予測することを目的とした。

3. 研究の方法

新潟県で育雛するオオミズナギドリと青森県で育雛するウミネコに対して、データロガーの取り付けを行った。親鳥が巣にいるときに捕獲し、装置を装着、放鳥、数週間後に再捕獲し、移動データを得た。環境情報の取得はビデオロガーに加え、衛星リモートセンシングによる海水温や生産力、海上風、表層流のデータを用いた。体内の情報を得るために、心電図ロガーの装着や、血液からの酸化ストレス分析を行った。

クロマグロは太平洋で単一個体群を形成するが、主に南西諸島付近や日本海で産卵し、若齢期に東部太平洋まで回遊（渡洋回遊）を行い、数年留まる。この渡洋回遊とその生理基盤について理解するため、マグロ類に照度ロガーを装着して得られたデータを解析した。また、飼育環境下において、幼魚の代謝速度および遊泳速度の計測を行い、成長に伴う遊泳筋成分の変化を調べることで、マグロの移動戦略と行動発達について明らかにした。

石垣島のオオヒキガエルと、北海道のアズマヒキガエルに GPS・加速度ロガーを装着した。加速度による運動の記録が正確にできるように、また、ロガーが長期間脱落せずに行動記録できるように、リュックサック型のハーネスを開発した。石垣島では異なる2地域で実験を行い、環境が移動分散に与える影響を調べた。得られた加速度波形を解析し、運動と行動を対応付け、加速度波形からカエルの行動を判別した。

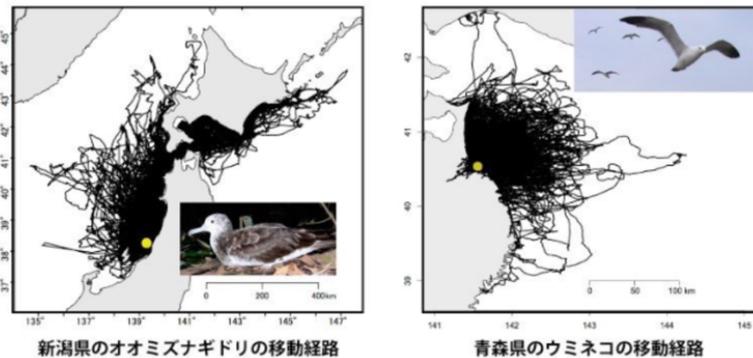
キクガシラコウモリ、ヤマコウモリ、オオコウモリに対してバイオロギング実験を実施し、GPS ロガー、音響ロガー等を装着して数日～数週間後に回収、採餌移動経路を得た。また、GPS ロガーを用いて特定した停滞地点にマイクロホンアレイを設置し、採餌場所を絞った後、現場での音響観察を集中的に行った。

得られた高精度移動経路データを Matlab (Mathworks)、ArcGIS (ESRI)、Igor Pro (WaveMetrics)、R 等のソフトウェアを用いて解析し、移動速度、方角、採餌行動の有無、休息等の基本的な挙動を確認した。また、風や海流等の流れを受けながら移動する際、対地速度ベクトルの分布が歪むことを利用して、流れと動物の頭方位を推定した。さらに、機械学習の一つである強化学習・逆強化学習を用いて、動物の移動を予測する手法の開発を行った。

4. 研究成果

海鳥類については、主にオオミズナギドリとウミネコに対して、毎年 100 羽以上に GPS・加速度ロガー等を装着し、移動データを得た。基礎的な知見として、繁殖地周辺の水温や風向状況によって移動距離等が変化すること、また、年齢によって採餌域が変化すること等が明らかになった。バイオロギングとともに、内的状態（酸化度・抗酸化力）を計測した結果、繁殖地から採餌場所までの距離が体内の酸化ストレス変化量と関係することがわかった。移動モデルについては、GPS 移動経路から、頭方位と風向を推定するモデルを作成し、津軽海峡を通過するオオミズ

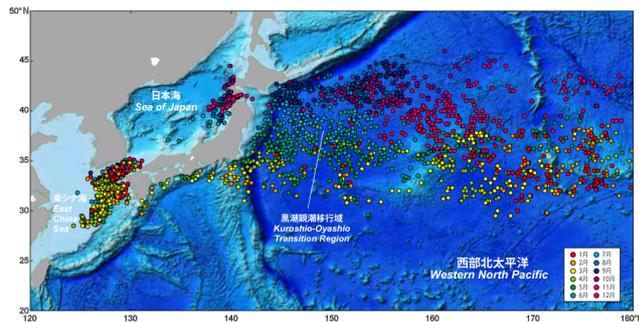
ナギドリに対して適用、その有効性を確認した。応用的には、風力発電施設の建設が予定されている地域に近いところで繁殖するオオミズナギドリの行動圏が風発施設と隣り合うことが明らかとなり、詳細な環境影響評価が必要であることが示唆された。これらのバイオロギング情報を集積し、海鳥を用いて生態学的・生物学的重要海域を特定する際の利点と課題をまとめた。



GPS・加速度データロガーで記録された海鳥類の移動経路

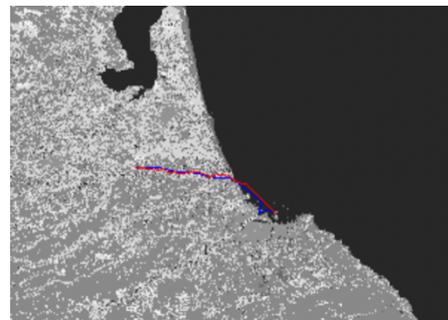
マグロ類に関しては、クロマグロ未成魚 15 個体の遊泳速度、水温、照度より推定された経緯度の解析を行い、西部から東部太平洋への渡洋回遊の契機等について検討した。その結果、渡洋回遊の時期は、それまでに個体が越冬滞留していた海域に依存していることが示された。生理学的反応については、溶存酸素計付き閉鎖型海流水槽を用いて、幼魚の遊泳時の代謝速度および遊泳速度の計測を行った。また、クロマグロの生理機能基盤の成長に伴う変化についての検討をした。その結果、幼魚（体長 19.7~23.0 cm）の標準代謝速度は $77.67 \pm 18.01 \text{ mg O}_2 \text{ h}^{-1}$ となり、他魚種と大きな違いはなかった。また、ミオグロビン含有量は血合筋で $400 \text{ mg}/100\text{g}$ 以下（体長 25cm 以下）となり、白身魚の代表格であるマダイの成魚よりも低い値を示した。これらから、幼魚期の本種の持続的遊泳能力は低いため、発生後、日本沿岸の陸棚域の高い生産海域に留まって採餌を行うことで、生理機能基盤を獲得しながら遊泳力を高めているものと推察された。最後に、体内の代謝の流れを動的に表現した Dynamic Energy Budget モデルを構築し、回遊を支えるエネルギー代謝をクロマグロ・タイセイヨウクロマグロの全生活史で推定し、近縁属のカツオと比較した。その結果、クロマグロ 2 種ではカツオに比べ、仔魚期の急激な発達に強く影響を受けることが明らかになり、それがカツオよりも大きく成長する要因の一つとして示唆された。

ヒキガエル類については、外来種オオヒキガエルに対して、世界で初めて加速度・GPS データロガーを装着することに成功した。カエル類への加速度・GPS ロガー装着は前例がなかったため、リュックサック型のハーネス等を製作し、装着方法を確立した。異なる 2 つの地域で調査を行った結果、オオヒキガエルは水辺をあまり利用しないことがわかった。また、オオヒキガエルとアズヒキガエルに装着した加速度 GPS データロガーの行動解析を行ったところ、アズマヒキガエルに比べてオオヒキガエルは跳躍での移動が多く、オオヒキガエルがオーストラリアや石垣島で生息範囲を急速に広げた一因であることが示唆された。



記録計の照度記録より推定されたクロマグロ (4 個体) の位置 (経緯度) (Kitagawa et al. (2019) を改変)

北海道と福井県の調査地においてキクガシラコウモリとヤマコウモリに対してバイオロギング実験を行い、超小型 GPS によって得られた移動経路を解析したところ、キクガシラコウモリは夜間において、河川や林道等の地形を利用した移動や帰巢、また移動と停滞を繰り返しながら移動していることがわかった。また、GPS ロガーを用いて特定した停滞地点にマイクロホンアレイを設置したところ、採餌行動中の音響データの収録にも成功した。さらに、音響 GPS データロガーを用いたデータ回収に成功し、採餌タイミングを移動軌跡と同時に初めて記録することができた。またオオコウモリに対するバイオロギング調査にも成功し、島間の移動等が確認された。



強化学習で予測された動物の移動経路。青がバイオロギングで記録された経路、赤が始点・終点・外部環境を与えられたときの予測経路

海鳥で開発された、移動経路から頭方位と、風や海流などの媒体の方向・大きさを推定する手法をコウモリ等に適用し、野生動物が自然環境下を移動中に経験する風環境とその時々頭方位を推定した。その結果、現場観測で観測された陸上風を的確に推定できていたことから、分類群を超えて本手法が適用可能であることが示された。また、機械学習の一つである強化学習・逆強化学習を用いて、野生動物の移動経路の予測を行うことが可能になった。バイオロギングデータがある程度あれば、野生動物の移動予測を行えるため、今後、生態系保全域の設定や外来種拡散等への様々な問題への適用が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件／うち国際共著 5件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Aoki Yoshinori, Jusup Marko, Nieblas Anne-Elise, Bonhommeau Sylvain, Kiyofuji Hidetada, Kitagawa Takashi	4. 巻 206
2. 論文標題 Early-life ontogenetic developments drive tuna ecology and evolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Marine Systems	6. 最初と最後の頁 103307 ~ 103307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jmarsys.2020.103307	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 該当する
1. 著者名 Yoshinori Aoki, Akiko Aoki, Itaru Ohta, Takashi Kitagawa	4. 巻 167
2. 論文標題 Physiological and behavioural thermoregulation of juvenile yellowfin tuna <i>Thunnus albacares</i> in subtropical waters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Marine Biology	6. 最初と最後の頁 71
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00227-020-03679-w	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 T. Yamamoto, K. Yoda, G. S. Blanco, F. Quintana	4. 巻 29
2. 論文標題 Female-biased stranding in Magellanic penguins	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Current Biology	6. 最初と最後の頁 R12 ~ R13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cub.2018.11.023	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 該当する
1. 著者名 A. L. Fayet, M. Shirai, S. Matsumoto, A. V. Tatenhove, K. Yoda, A. Shoji	4. 巻 18
2. 論文標題 Differences in breeding success among neighbouring subcolonies correlate with egg size and quality of parental care	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ornithological Science	6. 最初と最後の頁 189-195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2326/osj.18.189	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 該当する

1. 著者名 S. J. Yamazaki, K. Ohara, K. Ito, N. Kokubun, T. Kitanishi, D. Takaichi, Y. Yamada, Y. Ikejiri, F. Hiramatsu, K. Fujita, Y. Tanimoto, A. Yamazoe-Umemoto, K. Hashimoto, K. Sato, K. Yoda, A. Takahashi, Y. Ishikawa, A. Kamikouchi, S. Hiryu, T. Maekawa, K. D. Kimura	4. 巻 13
2. 論文標題 STEFTR: A Hybrid Versatile Method for State Estimation and Feature Extraction From the Trajectory of Animal Behavior	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Neuroscience	6. 最初と最後の頁 626
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnins.2019.00626	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 綿貫 豊、山本 裕、佐藤 真弓、山本 誉士、依田 憲、高橋 晃周	4. 巻 68
2. 論文標題 外洋表層の生態学的・生物学的重要海域特定への海鳥の利用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本生態学会誌	6. 最初と最後の頁 81~99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18960/seitai.68.2_81	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 Hirakawa Tsubasa, Yamashita Takayoshi, Tamaki Toru, Fujiyoshi Hironobu, Umezu Yuta, Takeuchi Ichiro, Matsumoto Sakiko, Yoda Ken	4. 巻 9
2. 論文標題 Can AI predict animal movements? Filling gaps in animal trajectories using inverse reinforcement learning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Ecosphere	6. 最初と最後の頁 e02447 ~ e02447
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/ecs2.2447	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Muller Martina S., Vyssotski Alexei L., Yamamoto Maki, Yoda Ken	4. 巻 221
2. 論文標題 Individual differences in heart rate reveal a broad range of autonomic phenotypes in a free-living seabird population	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Experimental Biology	6. 最初と最後の頁 jeb182758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1242/jeb.182758	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 該当する

1. 著者名 Maitani Yosuke, Hase Kazuma, Kobayasi Kohta I., Hiryu Shizuko	4. 巻 221
2. 論文標題 Adaptive frequency shifts of echolocation sounds in <i>Miniopterus fuliginosus</i> according to the frequency-modulated pattern of jamming sounds	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Journal of Experimental Biology	6. 最初と最後の頁 jeb188565
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1242/jeb.188565	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 Hino Haruhiko, Kitagawa Takashi, Matsumoto Takayuki, Aoki Yoshinori, Kimura Shingo	4. 巻 28
2. 論文標題 Changes to vertical thermoregulatory movements of juvenile bigeye tuna (<i>Thunnus obesus</i>) in the northwestern Pacific Ocean with time of day, seasonal ocean vertical thermal structure, and body size	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fisheries Oceanography	6. 最初と最後の頁 359-371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/fog.12417	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 K. Yoda, T. Shiozaki, M. Shirai, S. Matsumoto, M. Yamamoto	4. 巻 48
2. 論文標題 Preparation for flight: pre-fledging exercise time is correlated with growth and fledging age in burrow-nesting seabirds	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Avian Biology	6. 最初と最後の頁 881-886
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jav.01186	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 M. Muller, A. L. Vyssotski, M. Yamamoto, K. Yoda	4. 巻 212
2. 論文標題 Heart rate variability reveals that a decrease in parasympathetic ('rest-and-digest') activity dominates autonomic stress responses in a free-living seabird	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology	6. 最初と最後の頁 117-126
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cbpa.2017.07.007	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 該当する

1. 著者名 K. Yoda, T. Yamamoto, H. Suzuki, S. Matsumoto, M. Muller, M. Yamamoto	4. 巻 27
2. 論文標題 Compass orientation drives naive pelagic seabirds to cross mountain ranges	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Current Biology	6. 最初と最後の頁 R1152-1153
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cub.2017.09.009	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 Hase, K., Kadoya, Y., Maitani, Y., Miyamoto, T., Kobayasi, KI, Hiryu, S	4. 巻 1
2. 論文標題 Bats decrease the similarity of their calls to solve the cocktail party problem	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 39
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s42003-018-0045-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kitagawa T, Fujioka K	4. 巻 571
2. 論文標題 Rapid ontogenetic shift in juvenile Pacific bluefin tuna diet	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Marine Ecology Progress Series	6. 最初と最後の頁 253-257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3354/meps12129	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37件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 16件)

〔図書〕 計1件

1. 著者名 T. Kitagawa, N. Suzuki	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Johns Hopkins University Press	5. 総ページ数 346
3. 書名 The future of bluefin tunas: ecology, fisheries management, and conservation (Block BB ed). Chapter 7: migrations of Pacific bluefin tuna tagged in the western Pacific Ocean	

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室HP
<http://yoda-ken.sakura.ne.jp>

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	北川 貴士 (Kitagawa Takashi) (50431804)	東京大学・大気海洋研究所・准教授 (12601)	
研究分担者	原村 隆司 (Haramura Takashi) (50590197)	酪農学園大学・農食環境学群・准教授 (30109)	
研究分担者	飛龍 志津子 (Hiryu Shizuko) (70449510)	同志社大学・生命医科学部・教授 (34310)	