

階層的生物ナビ学

「サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション」



CyNav

Hierarchical Bio-Navigation
Integrating Cyber-Physical Space

文部科学省 令和3年度

科学研究費助成事業 学術変革領域研究(A)

ニュースレター VOL.3

2023年3月

目次

領域代表挨拶	p.3
研究成果紹介（依田班）	p.5
勉強会参加報告	p.10
領域関連イベント報告	p.18
国際活動報告（藤井班，飛龍班）	p.24

ニュースレター第3号

領域代表からのメッセージ



領域代表 橋本 浩一

東北大学・大学院情報科学研究科・教授

令和3年（2021年）「学術変革領域研究（A）」研究領域として【サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション（略称：階層的生物ナビ学）】が採択されました。

個体レベルの移動を「ナビゲーション」、他個体や環境との影響を「インタラクション」、個と集団が階層性を持って目的地へとたどり着く行為を「階層ナビゲーション」と呼びます。私たちは、階層ナビの本質的構成要素の連動を「行動ダイアグラム」と名付けてその解明に取り組んでいます。そのための研究プラットフォームとして「 χ （Chi: カイ）ログボット」を開発しています。行動の計測と介入を自律的に制御するロボットです。行動要素の因果関係を解明するためには、介入は重要です。

ふたつのデータに相関があるとき、それらが原因と結果の関係にあるのかどうか、気にしはじめると悩ましいことが多いようです。まったくの偶然なのか、第3の要因は存在しないか、逆の因果関係ではないのか。チョコレートの消費量が多いほどノーベル賞受賞者数が多いというという仮説はよく例にあがります。全くの偶然ではなさそうですし、逆の関係は説明が難しそ

うです。しかし、観測データに含まれないその国の裕福度（のような要因）を考え始めると、未観測な共通原因の候補がたくさん登場して話がややこしくなります。一方で、介入という手段をもてば、少なくとも「あり」と「なし」の場合を比較することができます。さらにもっと、いろいろ確信が持てます。

実世界で行われる計測から、因果関係の仮説をさまざまに設定し、コンピュータ上で分析して介入方策を決定することができれば、行動ダイアグラムの検証に大いに役立つと考えました。これは、実験計画の自動生成につながります。さらに、その介入を実世界で行うデバイスを開発することが必要となるのですが、そのような経験は新学術「ナビサイエンス」で重ねてきました。実験介入方法の自動決定方法論を「シームレス CPS（Cyber Physical System）」と名付けています。数理モデルと機械学習モデルの構築と検証を繰り返して行動ダイアグラムを洗練させる枠組みです。

毎月の勉強会（オンライン）も会を重ね、この2月で14回目となりました。また11月には、対面では2回目となるフィジカルイベントを東京大学で実施し、若手からシニアによる研究発表のほか、参加者は牧野

班によるユニークなデモンストレーションの数々も体験しました。やはり対面ならではのリアルな体験と会話は、場を大いに盛り上げてくれました。さらに本年は本領域が後援や協賛となり、領域外の研究会やシンポジウムにも積極的に参加しました。それらのレポートもこの号の Newsletter に掲載されると思います。

2022 年 6 月に公募班 16 チームが加わり、フィジカル研究の対象が広がり、CPS 手法の厚みが増しまし

た。チーム連携を強化して、計画班から公募班に積極的にアプローチして共同研究を実施しています。

第 2 回領域会議を 6 月に仙台にて開催の予定です。多様な研究対象とツールをもつ研究者がまとまって議論することが重要です。実世界で議論できることを楽しみにしています。



2022 年 11 月 7 日 第 2 回フィジカルイベント@東京大学

研究成果紹介:

台風の日に向かって飛ぶ オオミズナギドリ



依田 憲

名古屋大学大学院環境学研究科・教授



台風の日を目指すオオミズナギドリたち

(イラスト：きのしたちひろ)

オオミズナギドリ^{注1)}に小型のGPS ロガー^{注2)}を装着することで、台風^{注3)}に対するオオミズナギドリの海上での対応を調べました。その結果、オオミズナギドリが台風の日に向かって飛ぶことを発見し、この戦術によって陸地に飛ばされる危険性を低減していることが明らかになりました。さらに、風の強さや、台風や陸地との位置関係によっても台風への対応を変えることが分かりました。

研究背景

夏から秋にかけて、日本は多くの台風に襲われます。人間社会では台風の進路を予測し、災害への備えをしたり、避難所に移動したりしますが、野生動物はどのように対応しているのでしょうか？実は、台風に対する野生動物の対応については、ほとんど研究が進んでいません。これは、台風時の行動を観察することが難しいためです。

海洋で魚類や頭足類を食べて生活している海鳥類は、台風の際、陸上動物よりもはるかに強い風にさらされることとなります。海鳥のカツオドリやグンカンドリは、サイクロンなどの嵐を避けるようにして飛んだという報告が数例あります。しかし、台風によって勢力や進路が異なる上、台風と各個体との位置関係もさまざまでしょう。台風に対する海鳥の対応を明らかにするためには、多くの個体の移動データが必要です。

昔から海鳥類は、『海つばめの歌（マキシム・ゴーリキー）』や『かもめのジョナサン（リチャード・バック）』のような多くの物語の中で、苦難に立ち向かう象徴として嵐の中を飛んできました。さて、実際の海鳥はどうしているのでしょうか？

内容

本研究では、新潟県の粟島で繁殖するオオミズナギドリ^{注 4)} (図 1) に注目しました。オオミズナギドリの育雛期は 8-11 月で、日本の台風シーズンと一致するため、台風をうまく回避する方法など、何らかの行動戦略が進化している可能性があります。そこで、オオミズナギドリに位置(緯度・経度)を計測できる GPS ロガーを装着し、日本海で台風(を含む低気圧、以下簡単のため台風と呼ぶ)に遭遇した個体の移動経路を解析しました。なお、オオミズナギドリは通常は陸上を飛ぶことはありません^{注 5)}。本研究では、2008-2018 年にかけて計 401 羽から得られた緯度・経度データ(1 分に 1 回測位)から、台風にさらされた 75 羽のデータを詳細に解析しました。海上風については、気象再解析データを利用しました。



図 1 オオミズナギドリ
(撮影：後藤佑介特任助教・名古屋大学)

GAMM(一般化加法混合モデル)やエージェントシミュレーションを用いて解析した結果、オオミズナギドリが台風の目に向かって飛ぶことが分かりました(図 2)。中には 8 時間以上に渡って台風の目を追跡

した個体もありました。ただし、どんなときでも台風の目に向かうわけではなく、秒速 10m(時速 36km)以上の強風に吹かれる時には目の方向に飛びますが(風速が秒速 20m の風の中を飛ぶこともありましたが)、秒速 10m 未満の時には逆に台風から遠ざかる傾向がありました。また、台風の目に向かうことで本州に接近してしまう場合も、台風に向かいませんでした。風の強さによって海上で休む時間は左右されませんでした。また、台風を避けるように移動することもありましたが、これは左回りの台風の北西にいて、比較的簡単に迂回できるときでした。さらに、オオミズナギドリの移動戦略を模した(ただし陸地の情報を持たない)模擬鳥をコンピュータ上で移動させたところ、多くの場合、模擬鳥は陸上に吹き飛ばされずに海上に留まりました。

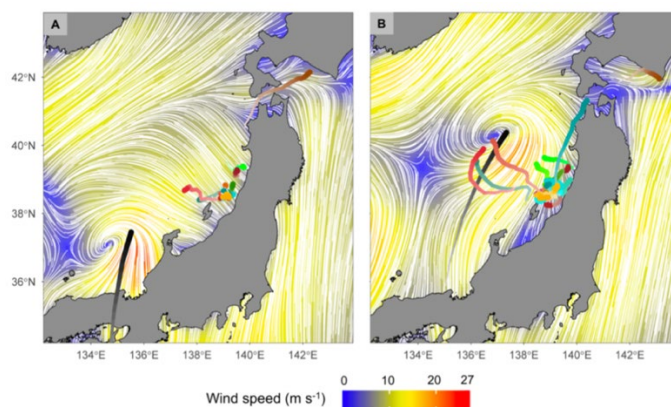


図 2 オオミズナギドリの台風に対する反応の例。
(左) 日本海に侵入した台風(黒太線。一番濃いところが最新の位置、薄く細くなるにつれて過去の経路)。オオミズナギドリは、新潟・山形県周辺や北海道襟裳岬の西で採餌していることが鳥に装着した小型 GPS ロガーによって分かる(カラフルな点と線)。(右) その後、3 羽のオオミズナギドリが台風の目に向かって飛んでいる。また、2 羽が台風に向かい始めている(明るい緑)。

これらの結果から、オオミズナギドリは風の状態や台風との位置関係に応じて柔軟に台風に対応していることが示されました。また、台風の目に向かうことで、

陸地に飛ばされるリスクを低減していることが示唆されました。ダイナミックソーリング^{注 6)} という海上風を利用した飛翔方法をとるオオミズナギドリにとって、台風による最大のリスクは、陸地に飛ばされてしまうことです。陸上では捕食者に襲われる可能性も高まる上、オオミズナギドリは平坦な土地からの離陸も苦手です。実際に、オオミズナギドリは、繁殖地の巣穴にアクセスするとき以外は、陸上を飛ぶことはありません^{注 5)}。

さて、オオミズナギドリは台風の接近をどのくらい前から感知しているのでしょうか？もしかしたら気圧の変化を利用しているのかもしれませんが。また、陸地の位置も把握している可能性があります。オオミズナギドリの移動戦術を模した（ただし陸地の情報を持たない）疑似鳥はコンピュータ上で陸上を飛ぶことを回避できていましたが、陸地に到達してしまうことが時折ありました。この結果から、実際のオオミズナギドリは方位を感知する頭方位細胞^{注 7)} に加え、地図感覚も備えていて、陸地の位置を把握した精度の高い戦術を採用していることが予想されます。さまざまな感覚を総動員して、適切なときに台風の目に向かっているのかもしれません。

成果の意義

本研究により、オオミズナギドリが台風の目に向かって飛ぶという驚くべき行動をとっていたことが分かりました。他の海鳥類でこの行動が見られるかどうかは分かりませんが、ごく最近、キバナアホウドリとワタリアホウドリで1羽ずつ同様の行動が見つかりました。もしかしたら海上を移動する海鳥の汎用的な戦術かもしれない、今後は台風への対応に関する種間比較研究が進むことが期待できます。また、台風通過の多い

九州・沖縄地方で繁殖するオオミズナギドリも興味深い比較対象です。

毎年日本に襲来する台風と、（主に）日本で繁殖するオオミズナギドリの関係を調べた、日本ならではの研究によって、鳥類の驚異的な能力に関する知見がひとつ増えました。今後は本研究に触発されて、鳥類の移動行動の裏に潜む感覚・運動能力の研究が進むことも期待できます。

気候変動に伴い、台風の発生数や強度にも変化があるそうです。野生動物たちが今後の地球環境変化にどのように対応するのか、15年間欠かさずに行ってきた粟島でのバイオロギング^{注 8)} 研究のさらなる継続によって解明できるかもしれません。

【用語説明】

注 1) オオミズナギドリ (Calonectris leucomelas) :

日本や韓国などの島々で春から秋にかけて繁殖する、体重 600g ほどの海鳥（海鳥とは、主な採餌場所が海洋である鳥類のグループ。約 9000 種の鳥類のうち 350 種ほどが海鳥）。翼開長（翼を広げたときの翼端間の長さ）120cm。数 m 潜水してカタクチイワシなどを食べる。繁殖期は、土に掘った巣穴で雛 1 羽を両親で育てる。粟島の親鳥の場合、1 回につき 1-17 日間の採餌旅行を行い、胃に魚を入れて雛に持ち帰る。粟島から津軽海峡を抜け、北海道最東端の沿岸で採餌することもある。親も雛も 11 月に繁殖地を離れ、非繁殖期はニューギニアやフィリピンの沿岸で過ごす。野生化したネコによって個体数を減らしている島もあり、繁殖・生態・行動・保全の研究が急務である。

注 2) GPS ロガー :

GPS とは、上空の衛星からの信号を受け取って位置を知る、全地球測位システムのこと。カーナビやスマホに搭載されている。野生動物に対しては、GPS モジュールや電池、メモリなどを組み合わせ、小型化・耐水化して用いる。こうした手法は、バイオロギングと呼ばれている。

注 3) 台風：

北西太平洋と南シナ海で最大風速がおおよそ秒速 17m 以上の熱帯低気圧。北西太平洋は地球上で一番多く熱帯低気圧が発生する地域である。別の地域では、ハリケーンやサイクロンと呼ばれる。台風と呼ばれるようになったのは明治時代からで、野分と呼ばれていた頃からオオミズナギドリは台風の目に向かっていったかもしれない。

注 4) 新潟県粟島で繁殖するオオミズナギドリ：

新潟県の粟島では、推定 8 万羽以上のオオミズナギドリが繁殖する。名古屋大学の研究グループは、15 年に渡って新潟県粟島でオオミズナギドリの調査研究を続けており、バイオロギング研究の世界的な拠点の一つである。最近では、世界で初めて AI を搭載したロガーを開発して注目された (Korpela, Yoda et al. Communications Biology 2020)。野生化したネコが鳥を襲う捕食被食関係を調べたり (塩崎、依田ら日本鳥学会誌 2014)、鳥の繁殖成績を毎年記録したりと、生態系保全に繋がる研究も行っている。

注 5) 陸上を飛ばない親鳥、陸上を飛ぶ巣立ち幼鳥：

成鳥は、繁殖期に雛に餌を運搬するとき以外は、陸上を飛ばない (極端な荒天の後、長野県や群馬県で目撃されることがあるが、本種の個体数を考えるとごく少数。これらの個体がなぜ内陸に吹き飛ばされたのか

は興味深い)、通常は成鳥は陸上を飛ばないことが数百羽以上の GPS 情報から確認されている)。繁殖期が終わって赤道方面に渡る際も、津軽海峡か対馬海峡を抜けて太平洋を南下し、道中で陸上を飛ばない。ただし、日本海の繁殖地で巣立ちした幼鳥は、11 月に本州上空 (ときには日本アルプス上空) を飛んで太平洋へ移動する (Yoda et al. Current Biology 2017; Yoda et al. Ecology 2021)。このため、11 月に日本各地で保護されるオオミズナギドリのほとんどは幼鳥である。巣立ち幼鳥と成鳥の比較から、幼鳥は数年間かけて地形を学習し、海上のみを飛んで南下するルートに移行すると考えられる。

注 6) ダイナミックソーリング：

海上付近の風は海面から高度が上がるほど風速が大きくなる。この風速勾配を利用することで、羽ばたかずに飛ぶ方法がダイナミックソーリングである。ミズナギドリ類やアホウドリ類がこの省エネ飛翔を利用する。これらの現生鳥類と翼竜のソーリング性能を比較した論文が最近出版された (Goto, Yoda et al. PNAS Nexus 2022) : <https://www.nagoya-u.ac.jp/researchinfo/result/2022/05/post-254.html>)。

注 7) 方位を感知する頭方位細胞：

採餌を終えて繁殖地に戻る際、目的地方向に向いて飛ぶと、風に流されて繁殖地からズレた地点に到着してしまう。そのためオオミズナギドリは、風の影響を加味して、繁殖地から少しズレた方向を向いて飛ぶことで、最短ルートで帰巢する (Goto, Yoda et al. Science Advances 2017)。つまり、繁殖地の方角が分かっている。実際、オオミズナギドリは頭方位細胞という方位に反応する神経細胞をもつことが分かっ

ている (Takahashi, Yoda et al. Science Advances 2022)。



図 3 バイオロギングによって得られるデータの例。オオミズナギドリにビデオロガーを装着して鳥の前方を撮影した一回の採餌行動 (a→e の順で時間が進む)。背中に装着しているため、撮影者の姿は映っていない。(a)水深数メートル。奥に見える魚群を目指して羽ばたいて泳ぐ。大型魚のシイラや他のオオミズナギドリが多数映っている。(b)魚群に近づく。上から他のオオミズナギドリが魚群に迫っている。(c)(d)魚群に最接近。(e)海面に浮上する。潜り始めた他個体とすれ違う。

注 8) バイオロギング：

バイオロギングとは、生物 (bio) と記録する (logging) を組み合わせた造語で、動物に小型のデータロガーをとりつけ、行動や位置、内的状態、経験する環境などを時系列データとして記録する手法である。野生動物に対しては、行動に影響を与えないよう小型化して装着する。また、ロガーを装着していない個体と行動や繁殖を比較することで、装着の影響が無いもしくは軽微であることを確認する。さらに、心電図等を計測することにより、捕獲による影響を客観的に評価し (例えばオオミズナギドリの場合、捕獲後に心拍数が平常に戻るまで 90 分かかる ; Müller, Yoda et al. Journal of Experimental Biology 2018) 、低減する工夫をこらす。ロガーは内部のメモリに情報が記録 (ログ) されるので、再度個体を捕獲して回収する。蓄積した情報を衛星や基地局に発信してデータを回収する機器もあり、再捕獲の難しい種に使われる。

論文情報

E. Lempidakis, E. L. C. Shepard, A. N. Ross, S. Matsumoto, S. Koyama, I. Takeuchi, K. Yoda (2022) Pelagic seabirds reduce risk by flying into the eye of the storm. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 119, e2212925119.

若手向け企画報告:

勉強会(8/26)に参加しました



藤岡 慧明

同志社大学・研究開発推進機構

2022年8月26日、第8回勉強会がZoomにて開催されました。発表者は井上漱太さん（名古屋大学大学院環境学研究科）で、40名強の参加が見られました。本稿ではそのご発表について簡単ではありますが報告いたします。

井上さんは動物の群れについて、特に、野生の哺乳類の群れが、どのようにして維持されているのかについて研究されています。この勉強会では、そのための機構について、野生ウマを対象とした調査を紹介して頂きました。ウマは高い社会性を持っていて、安定した群れを形成するそうです。そのような群れ行動を、ドローンを用いて計測されています。

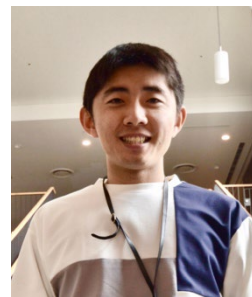
ご発表の中で私が最も興味深く感じたのは、ご発表のキーワードでもある「ハーディング行動」です。これは、あるハレム群において、雄が雌たちを後ろから近づき追尾する行動のことで、群れの維持に役立っていると考えられているそうです。井上さんは個体間距

離等の分析を通じて、このことについて検証されています。

私はコウモリの行動の研究をしていて、群行動も研究対象としておりますので、井上さんのご発表はとても興味深いものでした。ハーディング行動はまずすごく特徴的で面白いなと思ったのですが、特に個人的に興味深く思ったのは、群れにおける雄と雌で明確に行動が分かれる点です。我々の研究でも、できる限り雌雄を区別しようとはしますが、行動（特に音響行動）を見るという点においては、雌雄で行動の差が目立たないので（少なくとも私たちが扱う種では）、特に気にしないということがよくあります。ただ、コウモリも、チスイコウモリなど、ウマと同様に社会性の高い動物として知られています。ですので、群行動の観測では雌雄の区別は難しくはあるのですが、雌雄で違いが出ているかもしれないという可能性を考慮しつつ、これからはデータを見ていこうと思います。

若手向け企画報告:

勉強会(9/30)に参加しました



吉田 創志

同志社大学・生命医科学研究科・M2

2022年9月30日、学術領域変革(A)「階層的生物ナビ学」の領域勉強会が開催されました。この勉強会では「動物の行動のトラッキング」に関して、名古屋大学の伊藤真先生と兵庫県立大学の川嶋宏彰先生がご登壇くださいましたので、報告いたします。

伊藤先生には、多岐にわたるトラッキング用ソフトの違いや特性などを網羅的にお話いただきました。昨今、さまざまなソフトを用いてトラッキングが可能となっていますが、そのアルゴリズムは大きく二種類に大別され、ひとつは輪郭抽出によるもの、もうひとつは機械学習によるものです。輪郭抽出はAnimappなどが代表的なソフトとして挙げられますが、コントラストの違いなどによって背景から対象物を識別する方法であり、取り扱いが比較的容易である一方で背景色を均一にする必要があるなどの制約があります。機械学習はDeepLabCutなどに代表される方法ですが、事前に学習させた対象物の形状を元に識別することで、一度学習が完了すれば幅広く対応することができます。より適している手法は撮影環境をはじめ、対象種の大きさや数などに応じて選ぶ必要があります。

川嶋先生には、複数の対象物を同時にトラッキングする状況を念頭に、より具体的なお話いただきました。トラッキングの手法は、リアルタイムなのかオンラインなのか、あるいはオフラインなのかで求められる計算速度や利用可能なデータの制限が大きく変わります。その中で複数の対象物をスワッピングせずにトラッキングするためのアイデアのひとつが、検出のみを行うのではなく、過去のデータから位置予測を行い、これらとの差が最小になるような場所に位置推定する方法です。近年では深層学習の検出精度が飛躍的に向上し、このような処理をオンラインかつリアルタイムにできるようになってきています。

今回の勉強会の中で私が個人的に印象深かったのは、「トラッキング自体を目的にしないよう気をつけなければならない」というお話です。新たな気づきはトラッキングされた座標からではなく、研究者としての観察眼で生の対象動物を見ているときに生まれるものだからです。なるほど確かにそうだなあ、と思いました。自動化できるところは自動化して、研究対象をじっくり観察する時間を確保せねばと思いました。

若手向け企画報告:

勉強会(10/29)に参加しました



久本 峻平

明治大学・研究・知財戦略機構・研究推進員

2022 年 10 月 29 日に領域勉強会が開催されました。この勉強会では前川卓也准教授（大阪大学）には Open Pack Challenge の概要とチュートリアルの説明を、田中良弥助教（名古屋大学）にはショウジョウバエの求愛行動と群れ形成についてお話しいただきました。

まず、前川先生の Open Pack Challenge に関して報告します。近年、産業界では、製造現場にサーバーフィジカルシステムや IoT を導入する動きが盛んになっています。その一部に、製造過程をデータ化し、そのデータを用いて AI など管理を自動化する、という方法があります。今回の Open Pack Challenge では、さまざまな種類のセンサから得られたデータを用いてどの作業行動をしているかを推定するモデルに関するコンペティションです。モニターやウェアラブルデバイスを用いて得られた骨格や深度、体の各部位の加速度などのデータを使って、荷物の梱包を 10 種類の作業に認識・分類することがテーマとなっているそうです。

私自身、フィジカル（生態学）側の人間であるため、作業認識モデルの構築と聞いてやや身構えてしまいましたが、親切で丁寧なチュートリアル用のコードが既に用意されており、それに関する説明もありました。このチュートリアル用のコードは、Google Colab を通して Google のサーバーで計算できるため、機械学習用の高価な GPU マシンなしで、ブラウザ上で動かすことができます。そのため、誰でも気軽に作業認識モデルを動かすことを体験可能で、大変魅力的だと感じました。

今回のコンペのテーマは梱包に関する作業認識でしたが、フィジカル的な研究においても、様々なセンサにより得られたデータから生物の行動をラベリングする必要に駆られることは多々あります。今回のチュートリアルを足がかりにすることで、生態学者自身が行動ラベリングに機械学習を導入できるようになるのではないかとワクワクし、私もチャレンジしようと思っています。また、初学者の精神的・物理的なハードルを下げ、異分野への技術導入を促進する取り組みに対して、学術変革領域の意義を強く感じました。

次に田中先生のショウジョウバエの研究について報告します。田中先生は分子遺伝学、神経生物学、光遺伝学などのアプローチを用いて脳や神経の働きからどのようにして行動の多様性が生まれるのかを研究されています。前半は、ショウジョウバエには求愛する際に歌う種と食糧を贈る（婚姻贈呈）をする種があり、この求愛行動の差がどのような神経機序の違いで発生しているかを明らかにしたお話でした。それぞれの種の求愛行動の際に働く神経回路を同定し、神経回路を種間比較することで、婚姻贈呈をする種のみでインスリン神経が求愛行動と関連していることを明らかにされました。さらに、光遺伝学的手法を用いることで、インスリン神経が婚姻贈呈の際に働くことを確認されました。この研究の、様々な視点から実験を積み重ねて行動を生み出す神経回路の正体に迫る精緻さに圧倒されました。

後半は、現在取り組んでいる群れの形成に関連する神経回路の働きを明らかにする研究についてお話しいただきました。野外で密な群れを形成するクワズイモショウジョウバエと群れを形成しないキイロショウジョウバエの行動を種間比較し、クワズイモショウジョウバエの群れ形成に重要な要素を発見されました。今後の展望として、トラッキング技術による行動の追跡と光遺伝学的手法による介入を組み合わせることで、リアルタイムで行動を追跡して自動的に介入するシステムの開発を目指しているとのことでした。

田中先生の研究は領域内の様々な研究との相性がよく、今後さらに大きな研究として発展するのではないかと感じました。また、婚姻贈呈や群れ形成などどちらのテーマも大変ユニークで勉強になりました。自己紹介の際の見事な写真の数々から、田中先生の鋭い着

眼点は、日常生活での生物の観察により養われたのではないかと感じました。

若手向け企画報告:

勉強会(11/25)に参加しました



王 安晟

東京大学・新領域創成科学研究科・特任研究員

2022年11月25日に学術領域変革(A)「階層的生物ナビ学」、オンライン領域勉強会が開催されました。本勉強会では生物の行動追跡に関する研究を紹介して頂きました。

牧口先生（日本大学）・三好先生（北海道立総合研究機構中央水産実験）のご発表では、DeepLabCutを用いて、サクラマス・ニホンザリガニ・およびホタテの行動を追跡することにより、その生物の行動パターンを検証・解明する方法が説明されました。その中でも興味深かった研究事例として、サクラマスの行動を解明するためY字水路を設置し、その両端に、成長が悪く降海し体長が大きくなって戻ってきた雄（降海雄）と、成長が良く川に残留し育った雄（残留雄）をそれぞれ置き、Y字水路の下端に雌を置いたときの行動観察があります。DeepLabCutで雌の行動をトラッキングした結果、より体サイズの大きい、においの強い降海雄を避けて、残留雄を選択する回数が多いことが示されました。私の想定と違った結果で非常に興味深く感じました。嗅覚の阻害に関わらず、いずれの実験条件にしても、雌は残留雄を選ぶとの結果でした。

聴衆からの質問では「強い雄を避けている可能性があるか」などが寄せられていました。このようなトラッキングの際に、DeepLabCutでは水面の波紋による影響を受けやすいことも示され、非常に参考になりました。

2件目の延原先生（京都大学）は、マーカーレスモーションキャプチャーについてのお話でした。マーカーレス行動追跡における難点の一つは、複数台のカメラ間の位置や姿勢のキャリブレーションとのことで、従来は経験者が特定のチェッカーボードなどを使ってキャリブレーションをしていたのに対し、この研究では環境に常にいる人間の三次元骨格座標を用いてキャリブレーションすることが提案されていました。これにより、カメラによる動物や人間の行動追跡における計測環境の条件が緩くなるというものでした。私の研究においても移動しながら、リアルタイムで人間と盲導犬の行動を追跡・分析することが必要とされていますので、こちらの研究を紹介して頂き、非常に参考になりました。どう生かして、盲導犬の訓練に実装するか、自分でも考えて活用してみたいと思いました。

若手向け企画報告:

勉強会(12/23)に参加しました



田中 良弥

名古屋大学大学院・理学研究科・助教

2022 年 12 月 23 日に開催された学術領域変革(A)「階層的生物ナビ学」、第 12 回領域勉強会について報告します。今回の勉強会は西森先生(明治大学)がコーディネーターを務め、群れの数理モデルに関して、具体的な生物の行動を対象としたモデリングと、特定の生物種を対象とせず一般化されたモデリングの両側面から 2 人の先生による話題提供がありました。

まず、久本先生(明治大学)に「アリの協調運搬の実験とモデル」と題して、複数の個体で一つの物体を巣へと運ぶ「協調運搬」をテーマに数理モデルを構築する過程についてご説明いただきました。アリの運搬行動をモデル化するプロセスを段階ごとに解説していただくことで、数理モデルに疎い筆者でも具体的な工程を理解することができました。また後半には、一個体による運搬と集団による協調運搬のどちらが有利かをモデルにより検証する方法をお話いただきました。こうした比較は実際の生物個体を用いた実験的検証が困難な場合が多いため、数理モデルを活用する大きな利点と感じました。

次に、白石先生(明治大学)に「群れの数理モデル~Vicsek モデルを中心として~」と題して、群れの数理モデルの研究の歴史やこれまでに提案された数理モデルと対比しながら、Vicsek モデルについて紹介いただきました。Vicsek モデルは他のモデルよりも簡潔な局所ルールに基づいたものでありながら、多彩な集団現象を説明しうることを理解することができました。白石先生のご説明にあった通り、シンプルだからこそ Vicsek モデルは「行動ダイアグラムを分解して調べる」ために非常に魅力的なモデルだと感じました。階層的生物ナビ学の研究を進める上で、今後さまざまなコラボレーションが起こる予感がしました。

今回の勉強会を通して、数理モデルが生物集団や群れの研究を進める上で強力なツールになることを改めて認識することができました。今後も久本先生・白石先生をはじめとする領域のメンバーと議論することで自身の実験的なアプローチと数理モデルを融合できるように研究を展開できたらと思います。

若手向け企画報告:

勉強会(2/24)に参加しました



澤谷 郁哉

同志社大学大学院・脳科学研究科・5年一貫制 D1

2023年2月24日に開催されたた学術領域変革(A)「階層的生物ナビ学」の領域勉強会に参加しました。今回は、動物実験の倫理的配慮について、高橋先生、依田先生、西海先生、川嶋先生にご紹介いただきました。

高橋先生(同志社大学)からは、動物実験の3Rの法則についてご解説いただきました。私は研究で実験動物であるマウスやラットを扱うため、適切な配慮を改めて学び直すことができました。特に3Rの1つである使用数の減少(Reduction)については、実験内容を洗練することや、動物に行う処置の技術を高めることによってできる倫理的配慮であるため、普段から心掛けようと思いました。

依田先生(名古屋大学)からは、野生動物の、特にバイオロギング研究における倫理的問題についてご説明いただきました。野生動物の場合は、対象の動物の生態や研究の目的により、必要な、あるいは可能な倫理的配慮が異なるため、実験者それぞれが倫理的側面から適正な方法を模索する必要があるのだと知りました。例えばハーネスやロガーなどを野生動物に装着する場

合、動物によって影響の大きさは異なることが知られているため、重量や形状の工夫や、対照群との比較によって、動物への影響を評価することで対策されていることを紹介いただきました。

西海先生(基礎生物学研究所)からは、動物実験に関連する法令、研究機関やジャーナルの審査における注意点などをご解説いただきました。特に、国内の基準で審査を通過していたとしても国際誌に投稿する際の倫理チェック基準によってリジェクトされるケースがあるというお話には驚きました。これからは投稿するジャーナルが公開している倫理方針をより注意深く読み込むことを心掛けようと決意しました。さらに、エンドポイントの決定と安楽死の方法についてもお話しいただきました。動物の苦痛を軽減するためにどうすべきかという視点で考えると、エンドポイントを明確にすること、それぞれの動物に合わせた適切な措置を知ることが必要であると学びました。

川嶋先生(兵庫県立大学)からは、主に人(ヒト)を対象にした実験・調査における審査プロセスや、被験者についてのデータの取り扱いについてお話しいただき

ました。人が対象になると、匿名化や同意の確認など、動物実験にはない手続きがあり、個人情報保護の観点で配慮が必要なことを学びました。また、研究機関によっては、心理調査などアンケートや心拍など生理的なデータ計測など、実験の内容によって申請できる倫理委員会が異なる場合があることを知りました。

この勉強会で、様々な研究における実験の倫理的な配慮について学ぶことができました。共通して重要なことは、研究の意義を明確にし、それを他者に理解してもらうための努力であると感じました。なぜその研究をするべきなのか、その動物を対象とするのか、改めて考え直す機会になりました。私自身は、げっ歯類だけでなく、魚類や鳥類の実験に参加しており、普段利用する実験動物とは異なる配慮が必要であることをより意識しようと思いました。勉強会の中でも議論されていたように、倫理審査に承認されるような適正な実験計画を考え、承認を得ることは重要ですが、それ以上に、動物に十分な配慮ができているだろうかと常に自分に問いかけながら研究をすることが動物を直接扱う実験実施者に求められている態度であると感じました。

後援企画報告:

日本機械学会関西支部 2022 年度特別フォーラム 「生物の”群れ“に学ぶ衝突回避」



飛龍志津子

同志社大学 生命医科学部 教授

ある朝、前・学部長の先生（田中和人教授）が自室に突然来られて、“何かあったのかも。。。 ”と、私の一瞬凍り付いた顔を察知してか、「ちがいます、今日は研究の話です」というところから、お話が始まりました。表題の特別フォーラムの企画を担当されているということで、「それならぴったりの先生方がおられます！」と話がトントン拍子に進み、藤井班の村上久先生、計画班代表の川嶋宏彰先生と共にフォーラムに参加させていただくことになりました。さらに田中先生のご尽力で、本領域を後援という形で関わらせていただけることになり、伝統のある学会の特別企画に、本領域の研究を紹介できる機会をいただくことができました。個人的には、同じ学部とはいえ、立場も研究も遠い(?) 存在だった田中先生に、生物の研究を聞いていただける、というとても嬉しい機会になりました。

さて、このような経緯があったことから、当日はいつものとはちょっと違ったドキドキ感での参加でした。残念ながらオンライン開催でしたので、先生方と対面

でお話することができなかったのですが、オンラインということで参加者は130名ほどと、非常に多くの機械学会ご関係の方々に、講演を聞いていただくことができました。

まずお一人目の講演者、村上久先生は、皆さんご存知の通り、2021年9月にイグ・ノーベル賞を受賞されています。タイミングとしてちょうど領域が立ち上がった直後でしたので、領域内でも嬉しいニュースとしてとても盛り上がりました。村上先生のイグ・ノーベル賞に関するご研究の詳細はネットニュースなどでもたくさん紹介されていますので、ぜひご覧ください。スマホを持って歩く、という誰もが体験する日常的な状況を研究の対象とされたアイデアの面白さはもちろん、垣間見える人間の心理、そしてその背景にある科学的な分析の結果が美しく連携し、まさしくイグ・ノーベル賞！というご講演で、機械学会の先生方にもそのインパクトが大きく伝わったと思います。すべてがとても面白く、あっという間にお話を聞き入ってしま

い、今後のご研究の展開にも目が離せない気持ちになりました。

その後、飛龍からはコウモリの集団行動に関する内容を紹介させていただきました。コウモリは集団行動に関するモデル動物としては魅力的な点は多々あるものの、計測に関する技術的ハードルがなかなか高く、今のところほとんど知見が得られていません。私たちは計測だけでなく、データ分析にも苦戦するところが多く、今は計画班の川嶋先生や藤井先生に様々な点で助けていただきながら少しずつ進めているところです。

そして最後の川嶋先生のご発表は、まさに田中先生がイメージされた内容そのもの、機械学会の先生方にもぐっとささる群ロボットや、魚群の個体間のインタラクションのモデルのお話でした。そして機械とは対極的にも映る、魚たちの美しいしなやかな群れの動きは、集団行動の優れたモデル動物としてのすばらしさ（+精確に各個体の移動データがきっちり計測ができてうらやましいなあ。。という個人的な気持ちも）を、改めて思いました。川嶋先生の生物から工学、モデルまでを見事に横断されたご研究は、機械学会の先生方に階層ナビゲーションの魅力を伝えるのに、とても説得力のあるものでした。

本企画への参加を通じて、生物のナビゲーションは、本当に幅広い研究分野との親和性が高く、魅力的に感じていただけるんだな、ということを実感しました。ぜひ今後も、今回のように領域以外の場に乗り込んでいくチャンスを大切に、階層ナビゲーションの広報担当として(?)頑張りたいと思います！

協賛企画報告:

第39回センシングフォーラム 階層的生物ナビ学ミニシンポジウム



牧野 泰才

東京大学・新領域創成科学研究科

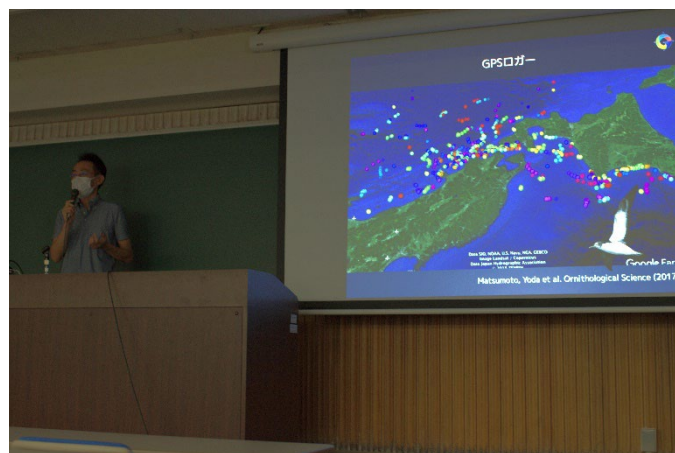
2022年9月22日、計測自動制御学会の第39回センシングフォーラム計測部門大会において、「階層的生物ナビ学ミニシンポジウム」という特別セッションが開催されました。センシングフォーラム計測部門大会は、計測自動制御学会の計測分野の研究者が会する講演会です。本年は3年ぶりに現地開催で行われ、130名程度の研究者・学生が参加しました。計測は様々な現象を科学的に理解する上での基本技術であり、その応用範囲は多岐に渡ります。一方で、これまでセンシングフォーラムにおいて、実際の生態学研究者と組んで行われた研究はほとんど見られませんでした。そこで、久しぶりの現地開催における目玉企画として、本ミニシンポジウムが設定されました。本研究領域の研究者4名にそれぞれの研究内容と、特に計測における現状の課題について発表していただき、今後の計測研究者とのコラボレーションへの発展を期待し開催したものです。参加者が一堂に会するセッションとして、ショートプレゼンと質疑の時間合わせて1時間10分のミニシンポジウムが実施されました。

登壇したのは計画班から依田先生と西森先生、公募班から森阪先生と田中先生でした。依田先生からは領域全体のコンセプトの説明と、渡り鳥などにおけるバイオリギングの現状、どのような物理量を計測し、どのように活用しているかというようなお話をいただきました。西森先生からはアリの行動研究のこれまでの概要と、アリの行動を表現する数理モデルについての概説があり、またRFIDを利用した行動計測の現状などについての紹介がありました。森阪先生はイルカの共同採餌行動についての問題意識の説明と、それを解明するために水族館でイルカの眼球運動を計測する手法などについての説明がありました。田中先生はショウジョウバエの群れとしての行動計測がいかに重要かについて解説があり、実際の画像処理等を利用したマルチトラッキングの話やその課題について紹介がありました。

各先生10分程度と短い説明ではありましたが、様々な動物種に対する多様な計測の現状が紹介され、聴衆である計測分野の研究者にとって、思ってもいなかったところに課題があるというのが明確になり、と

でも興味深く聞いていただけたようです。質疑応答のセッションにおいても非常に活発に質問がありました。いくつか質問の例を挙げると、例えば脳計測における逆問題などの研究をされている先生からは、西森先生のアリ行動の数値モデルについて、より詳しい解説を求める質問があったり、JAXA に勤務している研究者からは、GPS を計測するロガーについて、人工衛星の利活用を期待する側からの視点での質問が出たりなど、双方の専門性が噛み合った良い議論が展開されていたように思います。個人的にも、生態学に対して私（牧野）の研究内容がどのように関連するのか？という質問もあり、計測をバックグラウンドとする研究が、具体的にどのように展開され得るかについても簡単に紹介することができました。

今回は時間の都合上 4 名の先生からのご紹介となりましたが、本領域の他の動物を対象としている先生方の研究も、同様に興味を持って聞いてもらえるのではないかと思います。今後もこのような形で、領域外の研究者と情報を共有し議論できる機会が設定できればと思います。





領域イベント報告:

対面イベント(11/07)参加報告



D2 寺田 知功

三重大学大学院生物資源学研究科 海洋生物学教育研究分野

2022年11月7日に開催された第2回階層ナビ対面イベントに参加させていただきました。階層的生物ナビ学の対面での研究会に参加するのは初めてでした。遠方からの参加でしたが、7名の発表を拝聴し、参加してよかったと心から思っております。私のバックグラウンドは行動生態学にあり、特に大型哺乳類を対象としているので、神経科学に関する発表や、実験室での行動実験による研究発表は、視野を広げる意味でとても勉強になりました。発表を聞いた感想を、大きく2つに分けて以下に述べたいと思います。

生物屋と工学屋のシナジーによって、様々な研究が進められており、これからも始まろうとしていることに、ワクワクしました。例えば、バイオリギング調査で生じた、データロガーのバッテリー持続時間を延ばしたい、という課題について、巣箱に帰ってきた動物のロガーに非接触で給電する方法を模索されているというお話がありました。生物屋だけでは手が届かないところにも、別の分野の研究者の力を借りることできどり着くことができる可能性があることに、感銘を受けました。また、ご登壇されていた複数の方々が、

「この技術がないので教えてほしい」という趣旨の発言をしており、今後も他分野の研究者とのコラボが増えていくのだろうと感じました。この流れは、既存の枠組みを超えて新たなイノベーションを起こしていくことが目的の学術変革領域だからこそ生じやすいと思うので、私も自分の分野に閉じない視点を持つように意識し、積極的に他分野の方と交流しようと思いました。

昆虫の行動実験において、従来は個体差があまり考慮されていなかったということに驚きました。大型動物ではサンプル数を集めにくい点に加えて、世代交代の速度が遅いので、自然と個体差に目が行くと思うのですが、昆虫等の小型動物では真逆なので、個体群や種レベルでの考察が中心になるのかと思いました。大型動物でできないことを小型動物で実証したり、小型動物にない視点を大型動物の研究者が提供したり、視点の違いをうまく利用することで、新たな発見に繋がっていったら良いのではないかと感じました。

国際研究活動報告:

ドローン映像から 個体の視線を推定する



井上 遼太

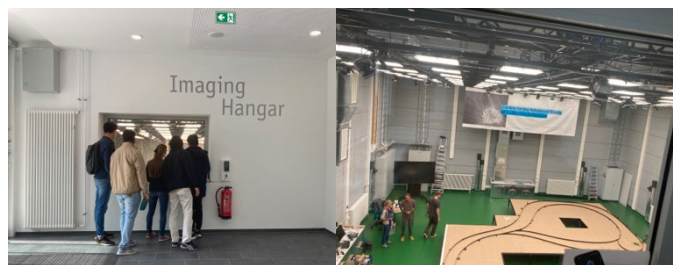
名古屋大学 学振特別研究員(PD)

私は2022年8、9月にドイツ、バーデン=ヴュルテンベルク州にある University of Konstanz の狩野研究室に2ヶ月滞在し、ドローンで撮影した野生ニホンザルの視野の再構成に取り組みました。

私は動物の群れにおける個体の移動や意思決定における社会関係の影響に興味があります。比較的社会関係がデータ化しやすいウマや霊長類の群れを対象に空撮データを用いることで、群れ全体を俯瞰しつつ、個体間レベルの影響を計測できると考えています。今回の報告では、滞在中の生活について紹介したあと、プロジェクトの成果報告をしたいと思います。

まず、University of Konstanz は Max-planck institute for Animal Behavior と提携しているため（実際の構造はよくわかりません）集団行動や動物行動の分野では世界でもトップとも言える研究者たちが在籍しています。大御所の先生が率いているような大きなラボもありますが、学生が2-3人程度の小さなラボの数が多いことも特徴だと思います。また、動物行動学者だけではなく、エンジニアも多数いるため、

コンピュータビジョンやロボティクスの研究もおこなっています。私がおこなっているようなドローンを使って大型哺乳類の行動を計測している人たちもいます。



Imaging Hangar と呼ばれる大きな実験室。建物の入り口から覗けるので、実験が行われていると、見学することができます。この日はアリの実験が行われていた。

最初の週には、ホストの狩野ラボで自分のプロジェクトを紹介しました。海外のラボで自分の研究を発表するのは、ほぼ初めての経験でした。少人数のラボなので、発表というよりスライドを使いながら会話しているといった印象でした。また、他のラボの人たちにもアポを取り、自分の研究を紹介し、情報交換をしました。2-3日に一回は新しい人に出会い、発表していた気がします。他のラボのセミナーがあれば、気軽に参加もでき、実験施設もいくつか見学しました。

大学の人の様子ですが、想像していたよりもコミュニケーションを楽しむ雰囲気がありました(想像はしていましたが、それよりもさらに)。昼ごはんは必ず誰かとおしゃべりしながら食べていたり、金曜の夕方にはラボを超えてビールを持ち寄るなど研究以外の会話も大事にしていたように思います。余談ですが、コンスタンツはスイスに歩いて行けるほどの距離にあり、休日にはアルプスにハイキングに行きました。日本の山とは全く違う光景を楽しめますので、コンスタンツを訪れた際は、アルプスにも行ってみることをお勧めします。

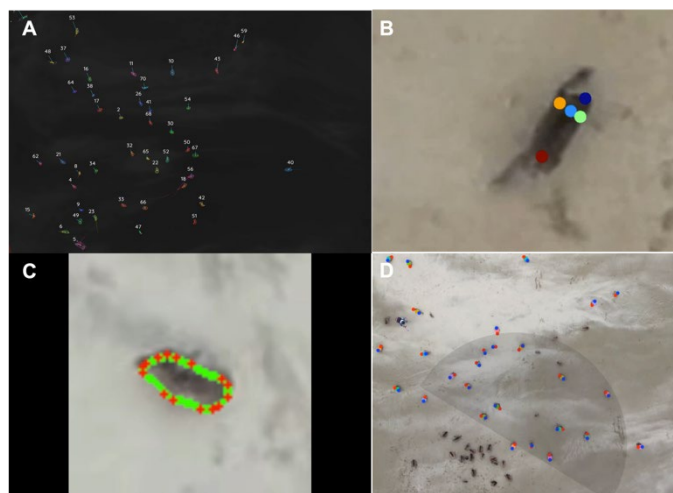


ラボメンバーの写真。研究所の屋上からはドイツ最大の湖であるボーデン湖が見えます。

さて、私の研究の進捗報告に移りたいと思います。今回のプロジェクトでは、宮崎県幸島に生息するニホンザルの群れを対象に、視線に関するいくつかの仮説を検証しようと試みています。例えば、上位個体はより注目を集める、下位個体は上位個体の視野内に入らないようにするなどです。これらの仮説は古くから提唱されていましたが、野生の霊長類の群れにおいて定量的に調べられたことはありませんでした。このプロジェクトは、霊長類の視線研究に精通している University of Konstanz の狩野文浩博士と協力して行

っています。また、University of Konstanz には Max-planc institute for Animal Behavior の研究者も多く在籍しており、最新のトラッキング技術やコンピュータビジョンについても多くの支援を得られることが期待できました。

滞在の前半では、トラッキング精度を上昇させることに取り組みました。ニホンザルのトラッキングには TRex というプログラムを使用しています。TRex は背景差分をベースにトラッキングを行うため、かなり高速で処理をおこなってくれます。TRex の製作者も University of Konstanz に在籍しているため、直接話す機会もありました。この取り組みの中で、個体の検出精度自体はかなり上昇し、99%を超える制度で検出が可能になりました。一方で、トラッキング途中に個体の ID が入れ替わってしまったり、消失し新たな ID が付与されるという問題はなかなか解決することができず、この問題は棚上げとなりました（一応、10 分程度の動画をマニュアルで直した場合、20 時間かかっていたものが、7-8 時間で直すことができる程度には改善した）。



A: TRex を使ったトラッキング。B: DeepLabCut を使ったトラッキング。C: 個体レベルの画像を二値化し、体の概形を描く。D: 首と頭の位置から視野を推定する。色がついていない個体は、他群の個体。

滞在の後半では、Ray-casting と呼ばれる個体が何を見ているかの解析に取り組みました。この Ray-casting を簡単に説明すると、個体の目の位置から、線分を放射し、衝突した物体を個体が'見ている'と考えます。放射された線分は、物体に衝突した時点で止まるため、ある物体の裏側に存在する物体については、'見えない'と考えます。この作業を正直にプログラム化すると、Ray の本数 x 個体数 x フレーム数という莫大な繰り返しが必要になります。まず、高速化など考えずにコードを書いてみたところ、10 分のデータ解析に 4 年かかるというとんでもないことになってしまいました。これを高速化するために、アルゴリズムを考え、計算のベクトル化を考えという作業を行いました。完全なコード自体はまだ完成していないので

すが、予備的な解析には十分なプログラムを組み上げることができました。

これらの解析コードをなんとか滞在最終盤に準備することができ、実際に仮説の検証を行うことができました。すると、予想通り、上位個体はより注目を集めており、下位個体が上位個体をよく見ているという結果が得られました。狩野博士と共に安堵しました。

今回の滞在では、自分の研究プロジェクトの推進だけでなく、海外の研究者と交流し、仲を深めることができたことが大きな収穫でした。滞在先自体は少人数のラボでしたが、同じ大学にたくさんの人が所属しているので、毎日が刺激的でした。その環境を生かして、共同研究の立ち上げや次のポスドク先の相談などを直接できたことは非常に貴重な経験でした。

国際活動報告:

ザンビアにおけるコウモリの生態調査

Version 2



手嶋 優風

名古屋大学 研究員

同志社大学 共同研究員

2022年10月3日から23日までの約3週間、北海道大学人獣共通感染症センターの高田先生、梶原先生らと共同で、アフリカのザンビアでのコウモリの生態調査を行いました。本調査の目的は、コウモリの行動に関する生態を解き明かし、時間的・空間的な感染症発生リスクを予想することです。前回の調査を、4月に行い（詳細は、梶原先生が8月のニュースレターにて執筆されております）、今回はその調査結果を踏まえたものとなりました。過去の調査にて、9月にマールブルグウイルスが同洞窟のコウモリから発見されており、その季節での調査をするために本日程となりました。前回、コウモリにGPSロガーを装着し、コウモリの移動経路を計測したところ、一晩で往復約100km飛行していることが明らかとなりました。加えて、Lower Zambeziというエリアで、コウモリのGPSが消え、数時間経った後GPSが復活し、コウモリがもとの洞窟に戻ってきたことから、その付近に、洞窟のようなものがあるのではないかと推察しました。今回の調査では、まず、2泊3日でLower Zambeziにお

いて新たな洞窟があるかどうか探索しました。Lower Zambeziは、所謂サファリのような場所で、道中は、野生のゾウなどと遭遇しました。山を登り、洞窟を探しましたが、残念ながら今回は発見には至りませんでした。



図1 Lower Zambeziでの洞窟調査の帰りでの写真。後ろの山を登り洞窟を探した。

また、今回もコウモリにGPSロガーを装着し、コウモリの移動経路を計測しました。その結果、4月と

は異なる傾向が見られました。4 月の計測では、多くのコウモリは、洞窟より南東の Lower Zambezi に向かい長距離の飛行をしていたのに対し、今回の 10 月の計測では、Lower Zambezi には向かうことはなく、首都ルサカのある北西に多くのコウモリが飛行していました。また飛行距離も短い傾向が見られました。この理由は、4 月は雨期の終わりごろであり、Lower Zambezi 付近に捕食対象である果実があったが、10 月は乾期であり、果実がなかったことが考えられます。また、今回の飛行は民家近くのマンゴーの木に留まり、食事していることもわかりました。ザンビアにおいては、マンゴーは自然に生えることはなく、ヒトによって栽培されているもののみです。つまり乾期においては、コウモリとヒトの距離は近くなっていることが確認できました。また、今回のコウモリを対象としたウイルス調査でも、マールブルグウイルスが検出され、乾期においてウイルス感染の危険度が高くなる可能性が示唆されました。



図 2 洞窟で捕獲したコウモリの体重測定や、ロガーの装着の様子。

今回の計測が、私にとって初めてのアフリカでした。やはり、現地でしか味わえない様々なものがありました。ザンビアの食事はおいしいですが、食費などはほとんど日本と変わりませんし、フットサルコートなどはすべて人工芝であり、広大で日本よりも設備は整っていました。対して大学の水道は、すぐ止まり、イン

ターネットは低速でした。また、空港を含め大きな明るい建物は中国が建てたものであり、中国の資本（影響力）の大きさを感じました。

現地のカウンターパートの方々は、みなさん親切で、協力して計画していた全ての計測を順調にこなすことができました。また、北海道大学の高田先生、梶原先生、服部さんには、非常にお世話になり、ザンビアでの生活が、楽しく充実したものとなりました。今後は、感染症の発生リスクのモデルを構築することを目的とし、継続して、季節ごとのコウモリの生態を計測することを計画しています。



図 3 今回 2 種類のコウモリを対象としたが、その内の 1 種類であるエジプシャンルーセットオオコウモリ (*Rousettus aegyptiacus*)

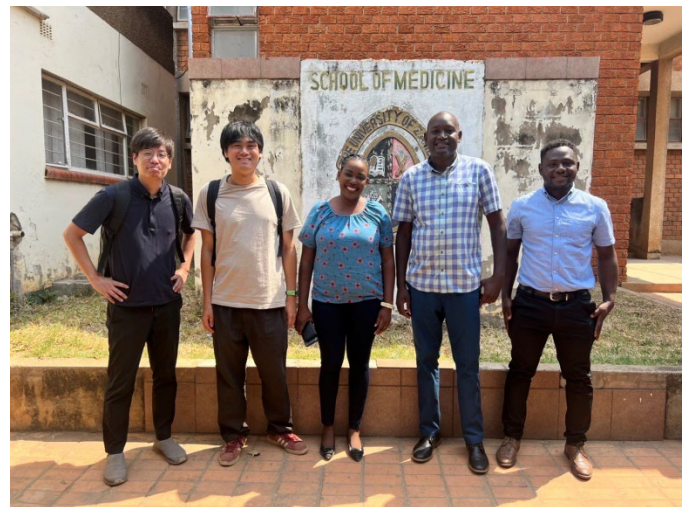


図 4 ザンビア大学の医学部や獣医学部の見学もさせていただきました。

階層的生物ナビ学

学術変革領域研究（A）

「サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション」ニュースレター
Vol. 3（2023 年 3 月発行）

＜領域代表＞	橋本浩一	東北大学大学院 情報科学研究科
＜編集／装丁＞	西森拓	明治大学 先端数理科学インスティテュート
	飛龍志津子	同志社大学 生命医科学部

領域事務局：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01

東北大学 大学院情報科学研究科

Tel: 022-795-7018 Email: contact@bio-navigation.jp

領域ホームページ：<https://bio-navigation.jp>



CyNav

Hierarchical Bio-Navigation
Integrating Cyber-Physical Space