



日本バイオロギング研究会会報

日本バイオロギング研究会会報 No. 186

発行日 2022年2月21日 発行所 日本バイオロギング研究会（会長 佐藤克文）

発行人 光永 靖 近畿大学 農学部 水産学科 漁業生産システム研究室

〒631-8505 奈良県奈良市中町 3327-204

TEL & FAX: 0742-43-6274 E-mail: BioLoggingScience@gmail.com (アドレスが変わりました)

会費納入先：みずほ銀行 出町支店 普通口座 2464557 日本バイオロギング研究会



もくじ

新しい発見

コウモリの鋭い聴覚フィルタは混信を低減する 長谷 一磨（マクマスター大学） 2

調査報告

コウモリの未知なる行動生態の解明を目指して 仁賀 佳史（同志社大学） 4

研究紹介

生物集団の軌跡から相互作用の規則を学習

「誰を見てどう動いたか」を理論とデータから推定できる技術を開発 藤井 慶輔（名古屋大学） 6

映像処理による群になって泳ぐ魚の検出・追跡 波部 斉（近畿大学） 9

学術変革領域研究（A）「階層的生物ナビ学」が立ち上がりました

飛龍 志津子（同志社大学）・依田 憲（名古屋大学） 11

コラム

育児をするようになって 藤岡 慧明（大阪大学） 12

「カメラに視線（？）を向けるキクガシラコウモリ」

撮影場所：北海道苫小牧市 撮影者：藤岡 慧明

新しい発見

コウモリの鋭い聴覚フィルタは混信を低減する

長谷 一磨 (マクマスター大学 心理学・神経科学・行動学部 海外特別研究員)

エコーロケーションを行うコウモリは、断続的に発する超音波パルスとそのエコーとを比較し周囲環境を把握します。複数のコウモリが同時に飛行すると、各々が環境把握のためにパルスを放射するため、他個体の音声が複雑な音響環境を作り出します。コウモリは、エコーロケーションに 10ms 以下の短い FM (Frequency modulated) 型の音声を使用するコウモリと、比較的長い CF (Constant frequency) 部とその前後に付随する FM 部を組み合わせた CF-FM 型の音声を発する種に大別されます。使用する音声と、複数個体飛行の結果として作り出される音響環境がそれぞれ異なります(図 1)。これら 2 つのタイプのコウモリは、複数個体飛行時の音響的な干渉に対応するため、どのようにエコーロケーション行動を変化させるのでしょうか。

私たちは以前、コウモリに搭載することのできるテレメトリマイクロホンを用いて、FM 型のコウモリの集団飛行時の音声を記録し評価しました。FM 型のコウモリは、集団飛行時に放射パルスの終端周波数(下降 FM 音の終端の周波数)を変化させ、単独飛行時よりも個体間の終端周波数差を拡大することがわかりました (Hase et al. (2018), *Comms. Biol.*)。この研究は、これまで示唆されてきた周波数調整による混信回避様の行動が、コウモリの集団飛行時において実際に行われることを直接的に示した初めての研究でした。

このような周波数調整型の混信回避様行動は CF-FM 型のコウモリにもみられるのでしょうか? CF-FM 型のコウモリは、飛行によって生じるエコー周波数のドップラー効果をキャンセルするように、放射パルス周波数を変化させ、エコー周波数を参照周波数と呼ばれる周波数に保ちます。一般的な哺乳類と類似した聴覚系を持つ FM 型のコウモリとは違い、CF-FM 型のコウモリの聴覚系は、聴覚感覚受容器である蝸牛から聴覚野までにおいて、その参照周波数への聴覚感度を高めるための解剖学的・生理学的な特殊化がみられます。つまり、参照周波数周辺が混雑していたとしても、CF-FM 型のコウモリが参照周波数を変化させることは難しいのではないかと考えました。

実際に、CF-FM 型のコウモリであるニホンキクガシラコウモリ (*Rhinolophus ferrumequinum nippon*) が、3 個体で飛行する際のパルスとエコーをテレメトリマイクロホンで記録しました。結果、単独飛行時に比べ、集団飛行時にパルス終端部の FM 部分

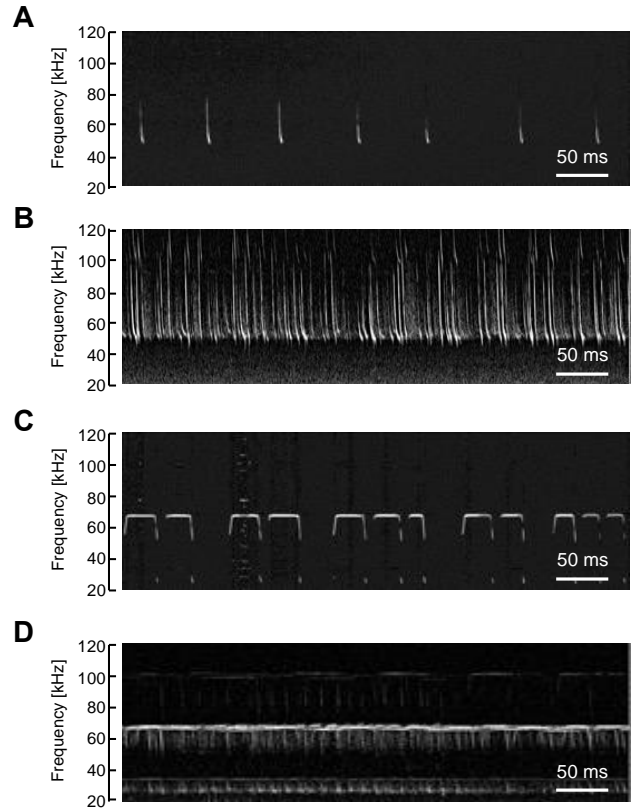


図 1. FM 型と CF-FM 型の混信状況。(A) FM 型コウモリであるユビナガコウモリの単独飛行時の放射パルス。(B) ユビナガコウモリの集団飛行時の放射パルス。(C) CF-FM 型コウモリであるキクガシラコウモリの単独飛行時の放射パルス。(D) キクガシラコウモリの集団飛行時の放射パルス。ユビナガコウモリでは周波数重畳が、キクガシラコウモリでは時間的な重畳が深刻である。

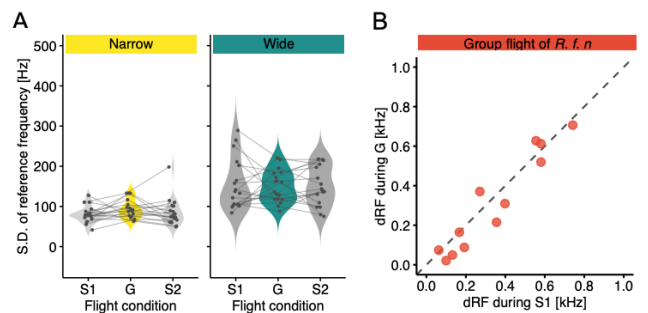


図 2. 集団飛行時の参照周波数の変化。(A) 広さの異なる 2 つの部屋での結果。エコー周波数の標準偏差は単独飛行時でも集団飛行時でも変わらず、集団飛行時にも単独飛行時と同等の補償精度が保たれている。(B) 単独飛行時と集団飛行時の個体間の参照周波数は、 $y=x$ の直線上にほぼ乗っており、参照周波数差を広げるような行動は確認されなかった。

の長さや周波数帯域幅が増加し、パルス長が減少する傾向がみられました。FM の帯域や長さが増加する反応は、FM 型コウモリの複数個体飛行時や、クラッター環境（木々などから大量のエコーが重畳し反響する環境）での飛行時の反応と類似していました。FM 型、CF-FM 型どちらのコウモリにおいても、FM 部は物体の定位に重要であることが知られています。そのため、複数個体であろうが、クラッターであろうが、複雑な環境でのエコーロケーションの問題は、FM 部を用いた定位と関わっていると推察できます。

一方、単独飛行時と集団飛行時で、エコー周波数の補償精度は変わらず、また参照周波数の変化は確認できませんでした(図 2)。参照周波数が複数個体間で重畳し、混信が生じてしまうことはないのでしょうか。そこで、他のコウモリから自身に届くパルスの周波数を計算し、エコーの周波数と比較してみました(図 3)。すると、エコー周波数は狭い帯域に補償されているのに対し、他個体から届くパルスの周波数は大きく変動することがわかりました。この変動は、①エコー周波数を補償するためのパルス周波数の変動と、②個体間の飛行速度差によって生じるドップラー効果の、2つの要因で生じると考えられます。CF-FM 型のコウモリは、参照周波数で感度が非常に高く、そこから少し上下に離れた周波数では感度が著しく低下する、参照周波数に鋭く同調した聴覚系を持ちます。そのため彼らは、たとえ参照周波数が類似していても、複数個体飛行時に参照周波数付近に深刻な混信が生じる可能性は低いのです。

わざわざ参照周波数を変化させ混信を回避する必要性は低いと考えてはいますが、その可能性を排除するわけではありません。参照周波数は不可変のものではないでしょう。例えば、体温によっても、参照周波数は変化します。さらに重要なことに、2個体のキクガシラコウモリを同一方向へ向かって同時に着地飛行させると、互いに参照周波数を近づけることもわかっています。混信を回避するために互いに参照周波数を近づけているのか、混信した結果参照周波数が近くなってしまうのか、それはまだわかりません。集団のサイズが大きくなり、混信がより深刻になると、参照周波数を変化させ対応してもおかしくはありません。その際、参照周波数を近づける行動が適応的になるのではないかと考えています。

これまで、コウモリの混信回避行動の研究では、主に放射パルスの特徴がどのように変化するかが調べら

れてきました。しかし、コウモリが実際に聴くのは、自身の飛行によってドップラーシフトした自身のエコーであり、他個体と自身の飛行速度によりドップラーシフトした他個体のパルス・エコーです。今後、混信回避の文脈において、コウモリの行動を正しく評価するためには、自身のエコーが実際にどのように妨害されているかを具体的に知る必要があるでしょう。

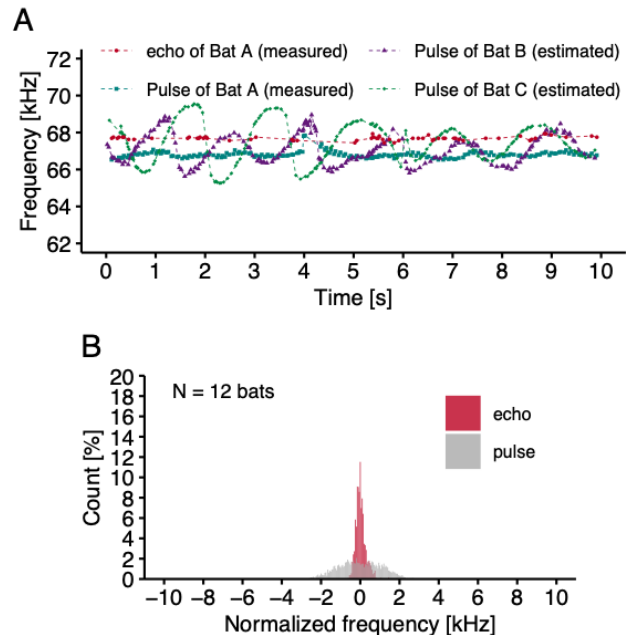


図 3. 集団飛行時のパルスとエコーの周波数の関係。(A) 3 個体飛行時の、ある個体が発したパルスとエコー、さらに他の 2 個体から届くパルスの周波数の関係。(B) 参照周波数で規格化したパルスとエコー周波数の関係。

文献情報

Hase, K., Kadoya, Y., Takeuchi, Y., Kobayashi, K.I., & Hiryu, S. (2022). Echo reception in group flight by Japanese horseshoe bats, *Rhinolophus ferrumequinum nippon*. *Royal Society Open Science*, 10.1098/rsos.211597.

コウモリの未知なる行動生態の解明を目指して

仁賀 佳史 (同志社大学大学院 生命医科学研究科 脳神経行動工学研究室 博士前期課程 1 年)

コウモリは超音波パルスを断続的に放射し、そのエコーを聞くことで物体を定位するエコーロケーション (反響定位) により周囲環境を把握します。視覚情報をほとんど用いない彼らはそのアクティブなセンシング機構を駆使して巧みに飛翔します。また、彼らは夕方から真夜中といった夜間の移動を主とし、その間に獲物を探索、捕食しています。私たちは、このように暗闇の中を移動し、音響情報に依存するコウモリが採餌飛行を行う際には、効率よく餌場や獲物を探索するコウモリ独自のナビゲーション戦略があるのではないかと考え、コウモリの未知なる行動生態の解明を目指して日々研究に励んでいます。

現在、私たちは以前から実施している GPS データロガーによる軌道計測とマイクロホンアレイによる音響計測に加え、企業(Arumotech Ltd.)との協力の下に開発した音響 GPS ロガー (図 1) を用いたバイオロギング実験にも取り組んでいます。昨年は北海道旭川市でヤマコウモリ (*Nyctalus aviator*, 図 2) を対象にこれらの実験を実施し、マイクロホンアレイ計測では小規模空間での飛行と採餌を、音響 GPS ロガーでは大規模空間での飛行と音響利用について調査しました。今回は昨年実施したマイクロホンアレイによる音響計測と音響 GPS ロガーを用いたバイオロギング実験について紹介したいと思います。

マイクロホンアレイ

マイクロホンアレイでは複数のマイクロホンを Y 字型に配置し、各マイクロホン間に生じるコウモリのパルスの到達時間差を利用します。この到達時間差情報からコウモリの三次元飛行軌跡を算出することができます。また、コウモリは獲物を捕食する際には Feeding buzz と呼ばれる放射間隔の短い (<20ms) 超音波を放射します (図 3)。この音響的な特性から獲物タイミングを推測することが可能です。つまり、マイクロホンアレイ計測ではコウモリの音響情報を利用して、獲物捕食と捕食前後の飛行を観測することができます。

一昨年、ヤマコウモリを対象としたこのマイクロホンアレイ計測を北海道旭川市の常磐公園で実施しています (図 4)。公園内にはヤマコウモリがねぐらとする樹洞があり、日没前から採餌に向かう様子が見られました。ヤマコウモリがエコーロケーションに用いる超音波の周波数は他の種と比較しても低いいため、

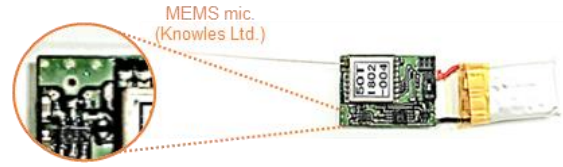


図 1. 音響 GPS ロガー。重量は約 2.5 g.



図 2. ヤマコウモリ (*Nyctalus aviator*)

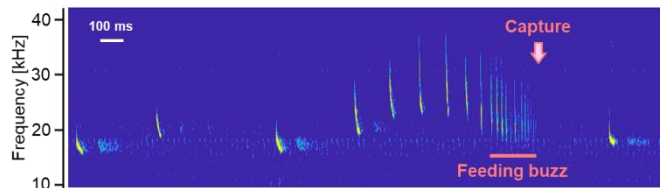


図 3. ヤマコウモリの捕食直前の音声の例

計測中に彼らのエコーロケーションコールが私たちに聞こえることもよくあります。昨年の調査では、このマイクロホンアレイ計測で合計 23 個体の採餌飛行軌跡を算出することができました。ヤマコウモリはパルスごとにその音響的な特性をダイナミックに変えながら、獲物の探索や捕食を行っていることがわかりました。

音響 GPS ロガー

音響 GPS ロガー (図 1) はコウモリ専用の GPS タグで、マイクが搭載されており、GPS による位置座標とコウモリがパルスを放射したタイミングを連続的に記録することが可能です。前述したように、パルスの放射タイミング情報があればコウモリが獲物を捕食したタイミングを推測することができ、位置情報と併せることで、経路上のどの地点で獲物を捕食していたかが推定できます。つまり、この音響 GPS ロガーを用いることで、軌道計測や定点観測のみではわからなかった軌道上の連続的な採餌行動を知ることができます。

昨年は、7月下旬にこの音響 GPS ロガーを北海道旭川市の旭川小学校付近の樹洞に生息する6匹のヤマコウモリに装着しました(図5)。音響 GPS ロガーはデータの遠隔ダウンロードができないので、データを回収するには装着個体の再捕獲が必要となります。そのため、装着されたロガーの所在を探すために、全ての捕獲個体において音響-GPS ロガーと併せて発振機も装着しました。結果として、2個体の再捕獲に成功し、そのうち1個の音響 GPS ロガーからデータの取得に成功しました。回収に成功したデータにはおよそ40分にわたるデータが記録されており、音響 GPS ロガーを用いることで、軌道計測だけではわからない採餌イベントを特定することが可能であることがわかりました。音響情報からコウモリのミクロな行動の分析が可能な音響 GPS ロガーは、野生コウモリの移動生態や採餌戦略の解明に有効な手段であると考えられます。

今回は昨年北海道旭川市で実施したマイクロホンアレイ計測と音響 GPS ロガーによるバイオリギング実験を紹介しました。どちらの実験もコウモリの音響的な特徴を利用したもので、これらをうまく組み合わせることで、より詳細な採餌飛行やその音響特性、そして大規模ナビゲーションと音響利用の関係性などを調べることができると考えています。今後も、こうしたコウモリの特徴を生かした計測やバイオリギング実験に取り組み、コウモリの採餌ナビゲーションと音響センシングの関係性を見出したいです。そして、野生コ



図5.ヤマコウモリに装着した音響ロガー

ウモリの行動生態の解明に貢献したいと考えています。

最後に、音響 GPS ロガーを野生コウモリに装着してデータの取得が可能となるまで改良を重ね、そしてここまでこのバイオリギング実験をつないでくださった先輩方、また、困ったときいつも助けてくださる藤岡さんや飛龍先生、東京大学の福井大先生のおかげでこうした貴重なデータを得ることができています。この場をお借りしてお礼申し上げます。本当にありがとうございます。これからも、先輩方の熱い思いが込められたこのバイオリギング実験の重みを感じながら、日々研究に励みたいと思います。そして、いずれは後輩たちに自分の実験を引き継いでもらえるよう、修士課程の残り一年、私も熱い思いを持って頑張りたいです。来年も音響 GPS ロガーを背負ったコウモリたちが貴重なデータと共にロガーを持ち帰り、ひとつでも多く音響 GPS ロガーとデータを回収することができるよう願っています。



図4. 公園内でのマイクロホンアレイ計測の様子

生物集団の軌跡から相互作用の規則を学習—「誰を見てどう動いたか」を理論とデータから推定できる技術を開発

藤井 慶輔 (名古屋大学 大学院情報学研究科 知能システム学専攻)



生物集団の移動軌跡から個体間の相互作用の規則を明らかにすること、例えば動物、人間などが、「どのように周りを見て行動を選択しているか」をデータから推定することは、様々な科学分野での課題です。これまで動物や人間の集団行動を方程式でモデル化するには、どのような対象でも当てはまる一般的な方程式を考えるか、種ごとに詳細な方程式を考えるのが基本的なアプローチでした。しかし前者は計測データからその妥当性を検証することが難しく、後者は問題を種ごとに考える必要があるため、図1に示すような多種多様な生物集団の移動データから、一般的な相互作用に関する情報を、簡便に抽出することが難しいという問題がありました。一方、近年では機械学習技術の発達により、計測された生物の移動軌跡に基づいてモデル化し、予測や分類を行うことが可能になってきました。しかし、これらのモデルは必ずしも生物の研究者が考えた方程式には従っておらず、しばしば解釈が難しい場合があります。そこで本研究では、図2に示すように、動物行動学の抽象的な方程式のモデル [Nathan et al. 2008] に基づき、残りの不明な関数や変数を、計測データから機械学習を用いて推定することで、理論とデータの両方に基づいて「誰を見てどう動いたか」に関する情報を取得可能にしました。

現しつつグレンジャー因果の解釈性を落とさない方法を実現しました。さらに「何も相互作用がなければ直線的に進む」のような人間の直観(あるいは物理法則)を活用し、その直観に反した場合に、罰則を掛けて学習する方法を用いることで、正確に「誰を見てどう動いたか」を推定可能にしました。

動物行動学の方程式のモデル(概念的)

$$p_{t+1} = f_U(f_M(\Omega, f_N(\Phi, r_t, w_t, p_t), r_t, w_t, p_t))$$

[Nathan et al. PNAS, 2008]



深層学習を用いて関数を推定

$$x_t^i = \sum_{k=1}^K (F_N^{i,t,k}(h_{t-k}^i) \odot F_M^{i,t,k}(h_{t-k}^i)) h_{t-k}^i$$



誰が原因でどちらに動くか解釈可能

図2 本手法の概要。動物行動学の概念的な方程式のモデルにおける関数(特に、ここではナビゲーションや運動の関数を表す f_N と f_M) を、深層学習を用いて軌跡のデータから推定することにより、誰が原因でどちらに動くか、ということ解釈可能にした。

シミュレーションデータで検証

実際の動物から正解となる「誰を見てどう動いたか」を得ることは難しいため、人工的な鳥や魚の群れの研究で有名なボイドモデルを用いて、正確に推定できたことを確かめました(図3)。

マウスとハエの分析結果

実際の生物集団の移動軌跡を用いた検証では、マウスやハエの集団移動データから、生物学的に統制された実験環境から得られた知見に基づいた仮説を、自由に行動する環境下においても定量的に検証できることを示しました(図4)。

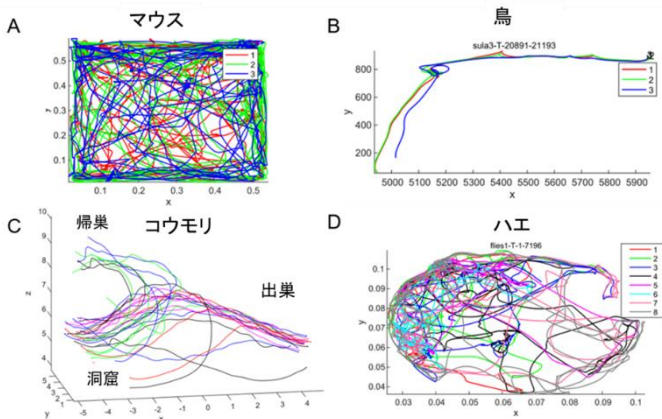


図1 各動物データセットにおける軌跡の例

方法の概要

方法論的には、グレンジャー因果を推定するための予測モデルである、ベクトル自己回帰モデルの係数を、図2のように移動軌跡の生成過程の構造を導入して深層学習により推定することで、非線形な移動軌跡を表

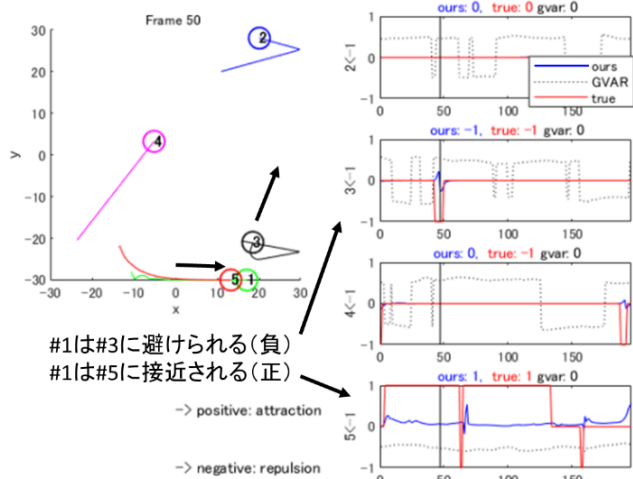


図3 ボイドモデルシミュレーションに対する結果の例。左：5つのボイドの動きの例であり、軌跡は動きの履歴を示す。特に、ボイド1は3に避けられていて、ボイド5に接近されている点に着目してほしい。右：原因（ボイド1）と結果（他のボイド2-5）の関係について、本手法（ours,青）と先行研究の方法（gvar,黒の破線）、および正解の値（true,赤）の結果を示す。1、0、および-1の3値で表された関係は、時系列グラフの上部に記述されており、それぞれ、接近、相互作用なし、および回避を示す。例えばボイド1は5に接近されているため正解は1であり、ボイド1は3に避けられているため正解（true）は-1で、ボイド2は1に無関心のため正解は0であるが、それらを本手法は正確に当てられている。ただし、本手法や先行研究の手法の時系列グラフの値自体は、それらの最大値で正規化されており、値自体を比較することはできない。

マウスの実験（図1A）では、異なるケージで育てられた場合、他者はより社会的に新奇であり、したがって同じケージで育てられるより頻繁に、接近・回避が観察されるという仮説を立てました（図4Aにより支持されました）。これらはより統制された実験設定（Nadlerら, 2004）や複数個体間の距離に基づく定量化（Thanosら, 2017）では示されていましたが、回避を含む時間的な行動の変化によって定量化されていませんでした。ハエの実験（図1D）では、オスはメスを積極的に追いかけるが、他のオスを追いかけない、という実験的研究結果（例: DemirとDickson, 2005）に基づき、より自然に近い複数のハエの自由な行動において、接近・回避の時間的変化を定量化しました。その際、オス・メスの混合グループではオスのみのグループより頻繁に接近・回避が観察されるという仮説を立てました（図4Bにより支持されました）。

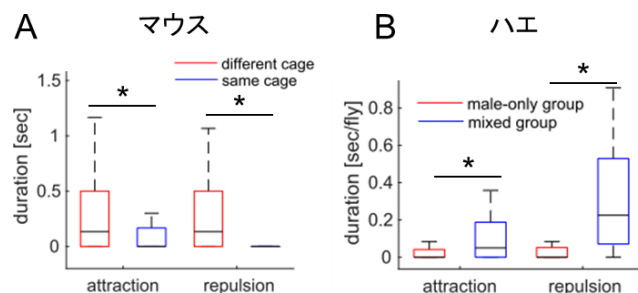


図4 マウスとハエの分析結果。アスタリスクは、グループ間の統計的に有意な差を意味する ($p < 0.05$)。 (A) 異なるケージ (赤) と同じケージ (青) で育てた3匹のマウスデータの分析結果。縦軸は、3回のインタラクションを10秒ビンで行った際の、両者の接近 (attraction) と回避 (repulsion) の時間[sec]を示している。本手法では、仮説通り、接近・回避の両方で、異なるケージで育った個体の方が、同じケージで育った個体よりも有意に相互作用の頻度が多いことを示した。 (B) 4匹のオスとメスの合計8匹の混合ハエ集団 (赤) と8匹のオスのハエ集団 (青) の分析結果。オスの相互作用の変化を比較するため、縦軸は各オスのハエごとに自分以外の7匹の相互作用を10秒単位で行った際の、両者の接近・回避を示した時間[sec/fly]を示す。本手法では、仮説通り、接近・回避の両方で、オスとメスの混合集団におけるオスのハエの方が、オスだけのハエ集団の個体よりも有意に相互作用の頻度が多いことを示した。

コウモリとカツオドリの分析結果

さらに野外で計測されたコウモリやカツオドリの集団飛行データからは、これまで定量的に示されなかったコウモリのリーダー・フォロワーの関係やカツオドリの相互作用に関する知見を明らかにすることができました（図5）。

コウモリの分析では、洞窟を出た（一部は出て戻ってきた）コウモリ集団飛行の3次元軌跡に本手法を適用しました（27個体の例は図1C）。動物集団の移動を対象とした研究では、リーダーとフォロワーの関係が調査されていますが、野生のコウモリについては不明でした。本手法の分析結果、洞窟を出たグループと戻ってきたグループの全34個体の中の興味のある138回の相互作用のうち（図5A）、位置的に先頭のコウモリが同じ方向の後続のコウモリを回避した回数が46回、先頭のコウモリが後続のコウモリに接近した回数が27回、相互作用がなかった回数が65回でした（後続のコウモリの結果は明らかなので割愛しました）。コウモリは約20mの範囲まで全方向の他のコウモリを反響定位できるので、位置的に先行しているコウモリは、同じ方向に位置的に後続しているコウモリから反響を受けることができます。この結果は、飛翔するコ

ウモリの集団が単純なリーダーとフォロワーの関係を示さないことを示唆しています。

カツオドリの分析では、若い個体間の集団飛行中における相互作用の縦断的（長期的）な研究が十分に行われていなかったため、本手法の適用により定量的に調査しました（一例は図 1B）。ここではその一例として、3羽のカツオドリの幼鳥の飛行時における GPS の軌跡を、34 日間のうち 6 回（各日約 12 時間）にわたって記録したデータを用いました。2、3羽で相互作用があると考えられる軌跡に切り取って分析した結果（図 5B）、最初の測定日には、ID1 と 2 の間で最も頻繁に有向性相互作用が観察されました。一方、2 回目以降の測定では、測定日ごとに最も相互作用の頻度が多い個体に変化していることが確認されました。相互作用の頻度（特に回避）が少なくなった要因としては、同じ個体との付き合いに慣れたことが考えられます。

成果の意義

本研究は、これまで概念的であった動物行動学の理論モデルの関数や変数を、深層学習モデルにより推定することで、多種の生物集団に柔軟に適用できる定量的な解析方法を開発しました。これにより、人間を含む複数の生物種間の集団移動に関する普遍的な法則や、その多様性の発見へと繋げていくことが期待できます。さらに、本手法は大量のデータを必要とせず、解釈可能な深層学習手法を用いているため、その他の希少な生物集団の移動データや、人間や人工物などの集団移動データにも容易に適用でき、3 体以上でも「誰を見てどう動いたか」をデータから推定することが可能です。これらは生物や人間集団の専門家や監督者が、対象の相互作用の意図を推定するのに有用だと考えられます。例えば生物実験の研究者や、スポーツチームのコーチが対象生物や選手の意図を推定して、実験の計画や戦術を考えることに利用することが期待できます。

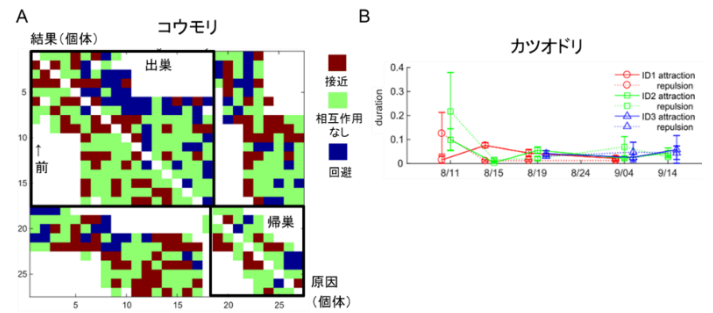


図 5 コウモリとカツオドリの分析結果。(A) 27 羽のコウモリを分析した結果。横軸と縦軸はそれぞれ、本手法で推定したグレンジャー因果における原因 (cause) と結果 (effect) のコウモリを示す。この縦軸と横軸は、洞窟を出た (leave a cave)、または戻った (return) 順に分けて並べた。色は、グレンジャー因果の符号付き最大値を閾値で分類したものであり、赤、緑、青は、それぞれ、接近、相互作用なし、回避を示す。(B) カツオドリの 2 羽または 3 羽を分析した結果。横軸は測定日を示す。3 羽の若いカツオドリ (赤、緑、青) の GPS 軌跡を分析した (プロットがないのは測定なしのため)。縦軸は、各カツオドリの正 (接近、実線) と負 (回避、点線) のグレンジャー因果が推定された時間を正規化した時間 (つまり、別の 1 羽または 2 羽の原因として働いた時間)。2 羽または 3 羽が同時に飛行している区間のみ分析した。エラーバーはその分析区間間の標準誤差を示す。

文献情報

Keisuke Fujii, Naoya Takeishi, Kazushi Tsutsui, Emyo Fujioka, Nozomi Nishiumi, Ryoya Tanaka, Mika Fukushima, Kaoru Ide, Hiroyoshi Kohno, Ken Yoda, Susumu Takahashi, Shizuko Hiryu, Yoshinobu Kawahara, Learning interaction rules from multi-animal trajectories via augmented behavioral models, *Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS'21)*, 34, 2021

研究紹介

映像処理による群になって泳ぐ魚の検出・追跡

波部 齊 (近畿大学 理工学部 情報学科・近畿大学 情報学研究所)



はじめに

映像中に現れている物体を検出し、その時系列での動きを獲得する技術は、画像認識・コンピュータビジョンの分野における中心的な課題として、長く研究が行われています。例えば、人物を対象とした場合は、不審行動の発見など、防犯用途などでの活用が想定されてきました。最近では、新型コロナウイルス感染拡大防止の観点から「人流」という言葉が注目を集めています。この人流をカメラで測るためにも、人物の検出・追跡が重要な技術となっています。

一方、人間以外の生物を対象とした取り組みも広く行われておりUMATracker[1]、DeepLabCut[2]などのソフトウェアが公開されています。これらを実際に使用されている方々も多いのではないかと思います。

我々は情報科学を専門とする立場から、映像からの生物の検出・追跡を行うための手法・モデルの開発や、それを用いた生物の行動理解に興味を持って研究を行っています。ここでは、群になって遊泳する魚の検出や追跡に関する技術を紹介します。

群になって泳ぐ魚の検出

映像中で注目している物体を見付ける技術、つまり物体検出技術は深層学習の発展に伴ってこの10年あまりで大きく発展してきました。当初は一つの物体を見付ける技術が主でしたが、複数の物体の検出・識別を同時に実現するような技術が提案されてきています[3]。このような機械学習(深層学習)を用いる手法では、正しい結果を人の手で与えた学習データを準備して検出器を学習させ、その後、新たなデータに対して適用させる手順を踏むこととなります。DeepLabCutなどのツールでも、ユーザーがいくつかの正解を与えると、その他のデータに対して予測を行うような形が多くなっています。

ここで、学習データを作成するのは手間となるため、なるべく少ない学習データで望ましい結果を得たい、という要望が生じてきます。さらには、新たな環境に適用するとき、学習データ無しでも結果が得られれば、解析に要する作業を大幅に効率化できます。我々は、このようなモチベーションに基づいて、技術開発を行っています。

この研究では、近畿大学水産研究所の協力を得て、クロマグロ養殖現場においてクロマグロ (*Thunnus orientalis*) 稚魚の映像を撮影して評価実験に使用しています。水産養殖現場では、生育状況や飼育環境の把握のために尾数を把握することが重要ですが、数千匹にも及び遊泳している魚の尾数を目視で計測することは極めて困難であるため、映像を用いた自動計数が実現できれば、養殖技術の効率化にも貢献できると期待されます。

図1. クロマグロ稚魚を飼育している水槽

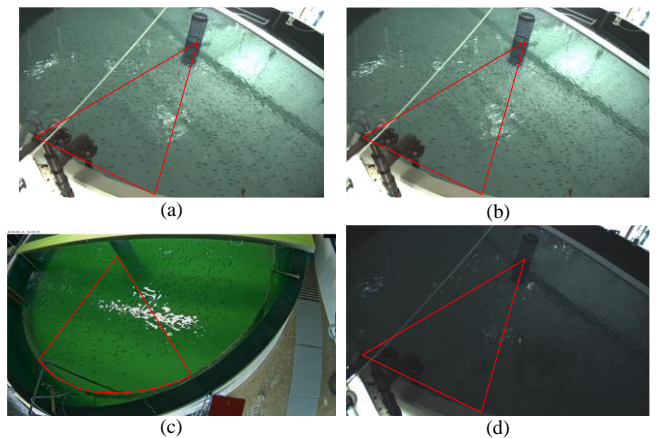


図1がクロマグロ稚魚の様子を撮影した映像の例です[4]。照明環境や水の状況などの影響で、映像の明るさや色が大きく変化しています。このような様々な映像でも、できるだけ少ない手間で高精度な検出ができるように、CNN(畳み込みニューラルネットワーク)の構造を変更したり、前処理や後処理を加えてその効果を見る検討を行っています。図2が我々の手法によって稚魚を検出した結果です。

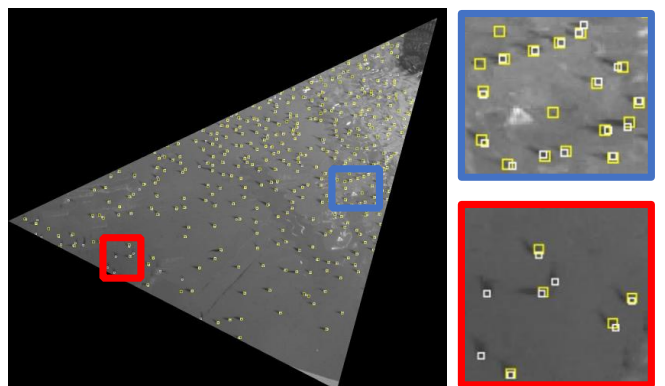


図2. クロマグロ稚魚の検出結果
群になって泳ぐ魚の追跡

このように検出した魚の動きを獲得するためには、時系列での追跡、つまり、隣接する時刻の間で、ある個体の位置がどのように変化したかを知る必要があります。追跡を行う際には、個体の動き変化を表現するモデルを用い、次フレームでの位置を予測する必要があります。単純な等速直線運動を仮定しても、ある程度良好な結果が得られますが、その個体が急激な変化を起こす場合は単純なモデルでは対応できないことがあります。

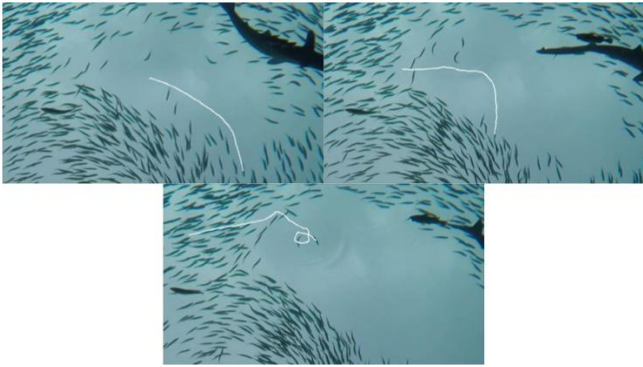


図 3. 群れになって泳ぐマイワシ (*Sardinops melanostictus*) が急激に遊泳方向を変える様子

図 3 に示す映像は、群れになって泳いでいるマイワシ (*Sardinops melanostictus*) がシュモクザメから逃げようとして大きく遊泳方向を変えています。このような場合は単純なモデルでは追跡ができず、動きを正確に表現できるモデルが必要です。我々は、魚の動きを正確に予測するために、その姿勢を表現するモデルを用いています。図 4 がその一例で、遊泳中の姿勢変化をパラメトリックに表現したものです。

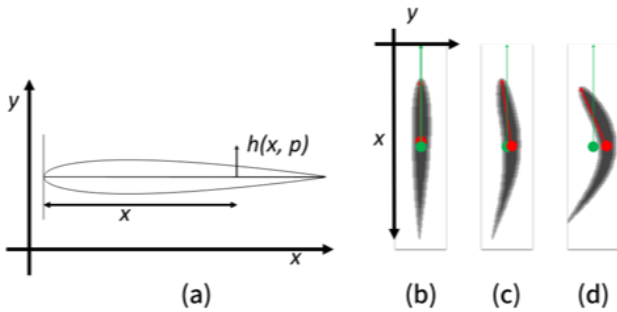


図 4. 魚の姿勢変化モデル

このモデルは当初の目的どおり、動きの予測に使用するだけでなく、通常とは異なる姿勢変化の検知など、魚の状態推定にも応用できると考えて、様々な検討を行っています。人間などの動物と違って、魚は表情を示す訳ではなく、その動き方が状態を知る唯一の手がかりとも言えます。

このように、姿勢を用いた様々な解析に向けた第一歩として、映像中の魚の姿勢推定を行いました[5]。図 5 がその結果であり、図 4 のモデルを用いて実際の遊

泳の様子を正しく表現できていることがわかります。

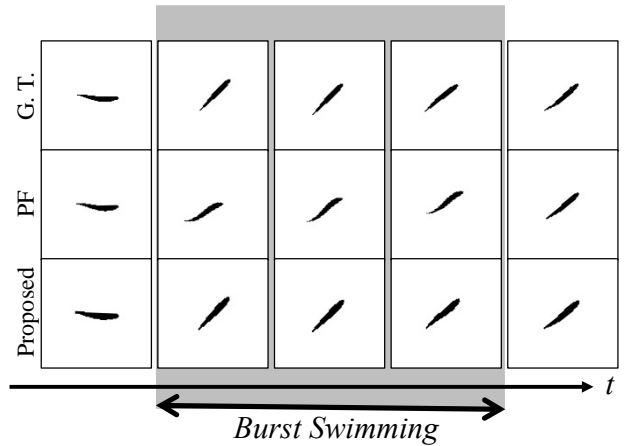


図 5. 映像から姿勢を推定した結果

おわりに

ここでは、群になって遊泳する魚の行動解析のために、魚を検出・追跡する技術を紹介しました。このような技術は、機械学習・画像認識の技術としても有意義なものであると考えていますが、魚の生態の解明や、養殖などの産業への貢献につなげることによって、その意義が高まると考えています。

我々は情報技術のバックグラウンドを持っていますが、生態学など様々な専門家の皆様と協力することをより良い技術ができると考えています。拙稿を読んでいただいている方々とも意見交換ができる機会があれば幸いです。

文献情報

- [1] O. Yamanaka, and R. Takeuchi. 2018. "UMATracker: An Intuitive Image-Based Tracking Platform." *The Journal of Experimental Biology*.
- [2] A. Mathis, P. Mamidanna, K. M. Cury, T. Abe, V. N. Murthy, M. W. Mathis, and M. Bethge. 2018. "DeepLabCut: Markerless Pose Estimation of User-Defined Body Parts with Deep Learning." *Nature Neuroscience* 21 (9): 1281–89.
- [3] Q. Zhao, T. Sheng, Y. Wang, Z. Tang, Y. Chen, L. Cai, and H. Ling. 2019. "M2Det: A Single-Shot Object Detector Based on Multi-Level Feature Pyramid Network." *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* 33 (01): 9259–66.
- [4] 村田一星, 波部 齊, 大谷雅之, 阿部孝司, 井口信和, 2021, "水面の見え方変化に頑健な大規模魚群中の稚魚検出手法." 情報処理学会第 83 回全国大会.
- [5] H. Habe, Y. Takeuchi, K. Terayama, M. Sakagami. 2021. "Pose Estimation of Swimming Fish Using NACA Airfoil Model for Collective Behavior Analysis." *Journal of Robotics and Mechatronics* 33 (3): 547–55.

学術変革領域研究 (A)「階層的生物ナビ学」が立ち上がりました

飛龍 志津子 (同志社大学)・依田 憲 (名古屋大学大学院)

2021年9月、動物や人、モノの移動を研究する新しい研究課題が採択されました。正式名は、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」(略称:階層的生物ナビ学)です (<https://bio-navigation.jp/>)。2026年3月までの5年間、領域代表の橋本浩一先生(東北大学)を中心に、100名以上の研究者や学生メンバーが集い、新たな研究領域を立ち上げていきます。本領域は、2021年3月をもって終了した新学術領域「生物ナビゲーションのシステム科学」の後継領域として採択されました。5年間続いた前領域では、バイオロギング研究会の皆さんにも時折、領域内の研究活動の様子や成果をご紹介させていただく機会があったかと思えます。そこで今回は、立ち上がったばかりの「階層的生物ナビ学」についてご紹介させていただきます。

新領域では、移動を中心とした個体レベルの活動(ナビゲーション)だけでなく、その上位階層にあたる他の個体や環境とのインタラクションを含むナビゲーションの解明にも挑んでいきます。私たちは、個と集団が階層性をもって目的地へとたどり着く行為を「階層ナビゲーション」と定義しています。前領域からさらにパワーアップして、ヒトを含む生物や人工物の様々なナビゲーションの包括的な理解に迫ります(図1)。

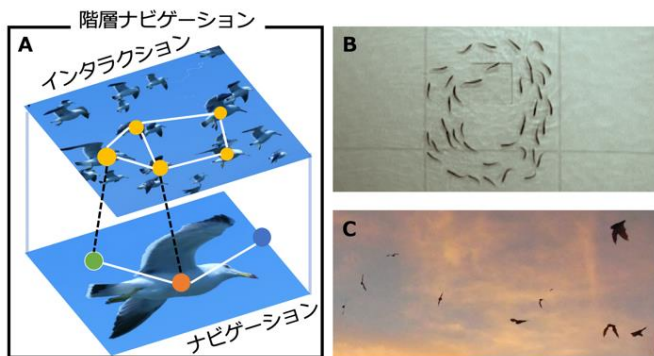


図1. 様々な階層ナビゲーションのイメージ。Aにある●は移動に影響を与える様々な要素(エサ、目的地、他個体など)を示す。Bは魚の群れ、Cは空を舞うコウモリ。本領域ではこれらの種以外にも、線虫やマウスをはじめ多様な生物の移動現象を扱う。

領域内の9つの計画研究は、フィールドや実験室といったいわゆる「実世界」で様々な動物のナビゲーションデータを取得・解析する「フィジカル班」と、先端的な工学技術やデータ科学的手法を用いてナビゲーション研究を変革へと導く「サイバー班」の二つから構成され

ています。また本領域で扱う生物種や研究アプローチも実に様々です。各計画班の詳細な内容は、領域のホームページをご覧ください。

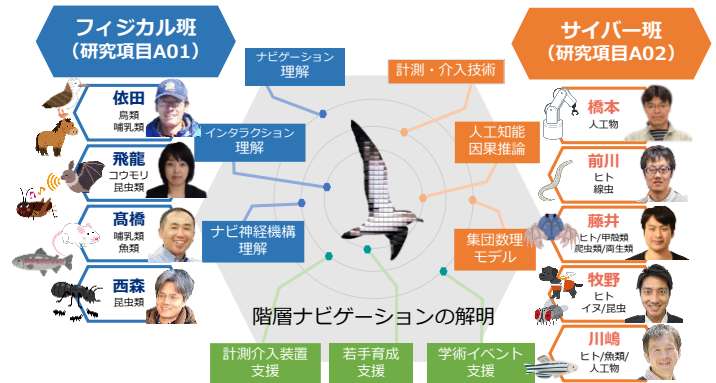


図2. 領域内の9つの計画班メンバー。扱う生物種も様々。

そして野生動物の移動研究の手法として、バイオロギングは前領域に引き続いて主力となります。前領域で開発したAI搭載型ロギングデバイス(通称“ログボット”)もさらに進化を目指します。野生動物に搭載し、移動や環境情報を高度に計測するだけでなく、それらの情報を基に動物ヘリアルタイムに“介入”を行う試みなどもすでにスタートしています。ログボットという呼び名も改め、Curiosity / Causality-driven を実装した Highly Intelligent Log-bot、ということから“ χ (カイ)ログボット”と呼んでいます。これからのバイオロギングのさらなる発展に向けて、サイバー班のメンバーを中心に様々な技術的チャレンジが展開されていく計画です。

昨年12月8日には、キックオフシンポジウムを開催しました。コロナ鍋ということで、オンラインとなりましたが、各計画班代表から研究の紹介と、公募研究についての説明、また本領域のアドバイザとなってくださった荒井修亮先生(水産大学校)、小林亮先生(広島大学)、有村博紀先生(北海道大学)からもキックオフにふさわしい、力強い応援メッセージもいただきました。

新しい目的地に向かって、我々もスタート切ったばかりです。ぜひ、バイオロギング研究会の皆さんにも興味をもっていただき、一緒に何か新しいことにチャレンジできれば幸いです。

領域のホームページも少しずつ、充実してきました。ぜひ一度、ご覧ください。<https://bio-navigation.jp/>

育児をするようになって

藤岡 慧明 (大阪大学大学院 情報科学研究科)

結婚、そして子育てと、この約2年間で私の周囲の状況が目まぐるしく一変しました。ここでは特に子供が生まれてからについて、とりとめのない話にはなりますが、研究しながら育児をしてみてもいいなと書いてみたいと思います。

有難いことに、結婚後すぐに子供を授かり、現在生後6か月を迎えています。出産予定日がフィールドワークと重なったので、初めて学生たちに実験を完全に任せ、色々なことを心配して落ち着きのない日々を送ったことは、今ではもう懐かしい思い出です。この2年間で、日々の生活スタイルも大きく変化しました。学生時代はほぼ一日中研究活動に没頭していましたが、今は日中に仕事、その他の時間に家事と育児で、家業も少し手伝う日常です。今は新型コロナの影響で在宅が多いですが、出勤の場合は6時半からのお勤めに出て17時には帰途につく生活を送っています。夜型だった自分が、日付が変わるまでに寝るようになるとは全く想像していませんでした。研究者の友人が「子供が生まれると全てが変わるわよ」と言っていて、何も知らない私は大げさやなあと思っていましたが、いざ色々やってみると、想像していたよりも大きな変化があって、自分でも驚いています。

元々育児することは楽しみで、積極的にやりたいと思っていました。いざやってみると、やらなければならないことが予想以上に多いと感じました。日々のミルクやおむつ替え、お風呂などは、大変ですがルーチンなのでまだ予想の範囲内です。しかし、保育所の手続き、離乳食のスケジュールや内容、ハイハイ期の危険予防など、次々と次のことを考えないといけません。子供は成長が早いといいますが、本当にそう思います。一息つく頃には次のステージに進んでいる感覚です。ワンオペ育児の記事やニュースを見るたびに、大変なのだろうなと想像はしていましたが、実際に子育てをやってみて、働きながら一人ではなかなかできるものではないなあと感じました。

研究活動は、まだ生後半年で妻が育休中ということもあって、ほぼ支障なくさせて頂いています。それでも研究に充てられる時間は減ったので、限られた時間の中でタスクをこなせるように、有効な時間の使い方を心がけています。最近は新型コロナの影響も重なって、学生との時間が大きく減りましたが、オンラインで時間を決めて打ち合わせをすることで効率的に進められているように思います。結果的にですが、自分の仕事はなんとかこれまで通りこなすことができいま

す。フィールドワークについても同様ですが、これからは今までのようには行けなくなると思いますので、これからは出産予定日のときのように、周りの人に頼るようになってきたらなと思います。

別の変化としては、研究に取り組む時間が少なくなった分、視野が広がったように思います。パートナー、子供、親、檀信徒の方々など、触れ合う時間が増えるほどその人々の気持ちになって考えることも増えます。これまでも視野をなるべく広く取ろうと努めてはいましたが、実際やるとやらないとは全然違います。このおかげで、自分の研究の何が面白いのか、何が足りないのか等、客観的に見ることができるようになっているように思います。時間に限りなく没頭できるのも強みだと思いますが、こちらもまた強みだなと思います。

これまでのところ、心にゆとりを持って研究活動を行えています。妻、親、研究室の先生と学生など、周りの方々に感謝感謝です。これから後輩や周りに同じことがあれば、自分自身の経験を基にサポートしてあげたいと思います。そして、このコラムがこれから子育てを考える人に多少なりとも参考になれば幸いです。とはいえ、私たちもまだ半年なので子育てはまだまだこれからです。幸いなことに保育所が決まり、妻も職場復帰します。ですので、これから大変なことは増えていくと思います。生活スタイルもまた変化するかもしれません。ただ、育児も家事も仕事も、自分自身の今とこれからのためにも、子供のように好奇心を持って、楽しむことを忘れずに過ごせたらと思います。

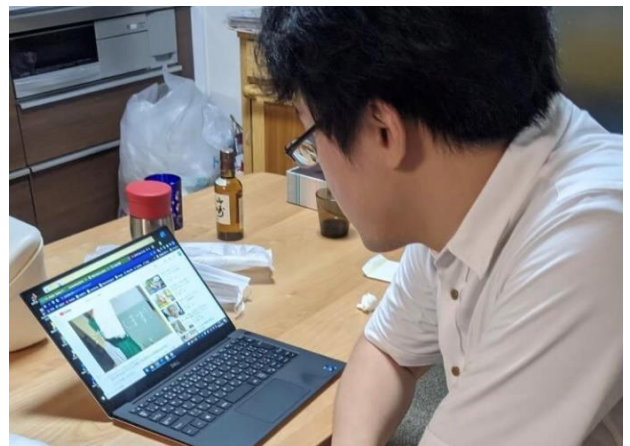


写真1. お風呂の入れ方について YouTube で勉強する筆者

事務局からお知らせ

会費納入のお願い

- 会費の納入にご協力をお願いいたします。
正会員 5000円、
学生会員（ポスドクも含みます）1000円です。
2年間会費未納ですと自動的に退会になりますのでご
注意ください。
- 住所・所属の変更はお早めに事務局
(BioLoggingScience@gmail.com) まで
メールアドレスが変わりました

編集後記

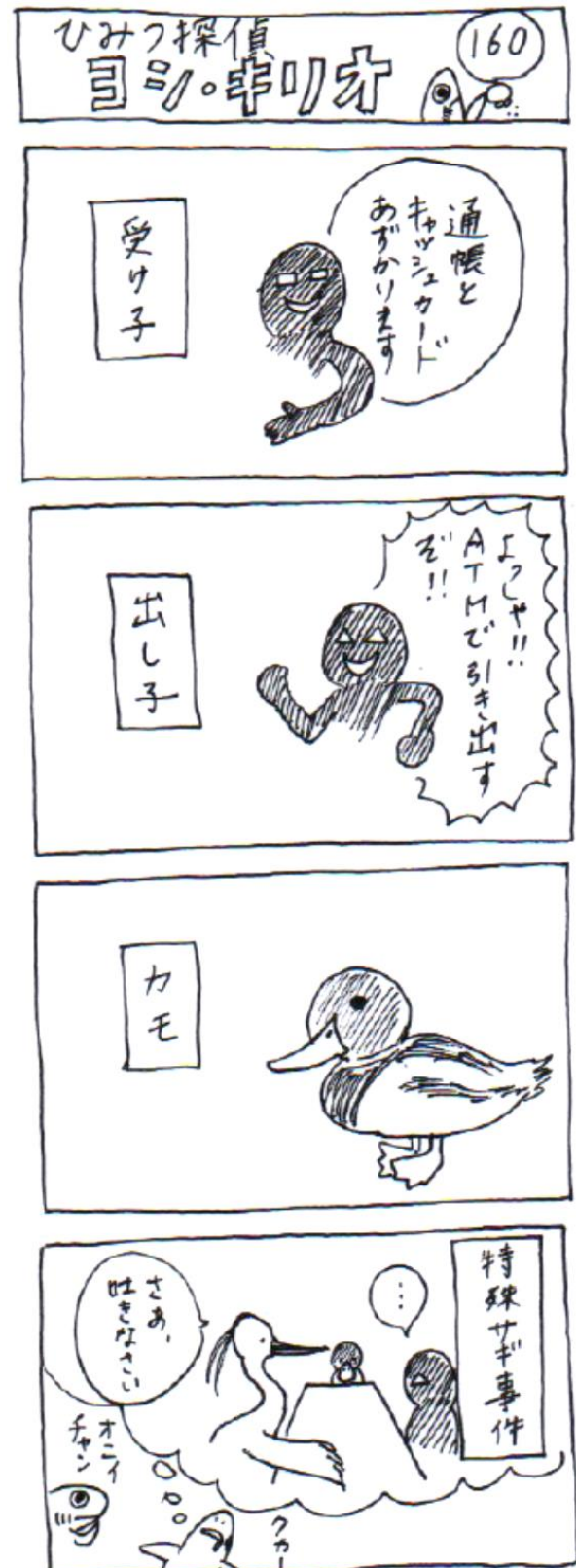
昨年の編集後記冒頭に“コロナで生活が一変しました”、と書いてから、もう1年が経ちました。小学校では学級閉鎖となるクラスが続出し、娘が通うクラスも今日現在学級閉鎖のため、私自身も編集後記を書いている本日は在宅勤務です。1年前と比べて、コロナは本当にもう目の前まで来ていることを実感するとともに、何をしてもまずコロナのことを考えて行動する日常に、だいぶ疲れも溜まってきました。。

とは言え、在宅勤務の環境が個人的にも、また社会的にも整ってきたことは、数年前では考えられなかったことで、特に子育て中の我々にとっては非常にありがたいです。あとは、コロナ以前のようにマスクをとって気兼ねなくみんなでワイワイできる日常を。。。今はそれを心から待ち遠しく思います。3年生も配属され、今の瞬間おそらく80名を超えるメンバーが研究室に在籍していますが、以前のように卒業式のあと、全員で集まることは今年もできません。とても寂しいです。来年の今頃は、どうなっているのでしょうか、どうか穏やかな一年であることを願うばかりです。

それではやっぱり最後に一言。家族とそして皆さんが今年も健康で楽しい一年でありますように(^^)!

【SH】

3月末にオンライン総会を開催します。皆さん奮ってご参加ください。【YM】



【S.K】