



# 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. 222

発行日 2025年2月28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 三田村啓理 京都大学フィールド科学教育研究センター

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

TEL & FAX: 075-753-6227 E-mail: BioLoggingScience@gmail.com

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

キクガシラコウモリのハイレゾ GPS トラッキング～森林環境の選択的飛行と経路追従行動について～

藤岡 慧明（同志社大学） 2

コウモリにおけるエコーロケーションと飛行を調和させた目標トラッキング戦略

西海 望（自然科学研究機構） 4

### 研究紹介

コウモリの不思議に迫る

福井 大（東京大学） 6

オリオオコウモリの母親はどんな移動してるの？

藤谷 彰子（同志社大学） 8

Integrated Tracking: Enhancing GPS Data with External Sensors Omer Yinon (Tel-Aviv University) 10

### 技術解説

波の干渉と回折

蘆原 郁（同志社大学） 15

### コラム

育休を経験して思うこと

藤岡 慧明（同志社大学） 22

### お知らせ

BiP News～「BiP Up 2024」研究計画発表会の案内～

佐藤 克文（東京大学） 23

BiP を使ったバイオロギング解析に挑戦～その2

渡辺 伸一（リトルレオナルド社/麻布大学） 24

“A free-ranging Mauritian flying fox displays its curiosity, reminding us of the importance of asking questions within the relevant context” photographed by Omer Yinon, in its natural habitat, Mauritius, September 2023.

# キクガシラコウモリのハイレゾ GPS トラッキング ～森林環境の選択的飛行と経路追従行動について～

藤岡 慧明 (同志社大学 研究開発推進機構)

放射する超音波や行動の特殊性から、キクガシラコウモリ (図 1) は、生物ソナー研究のモデル動物として室内で多くの研究が行われてきました。一方で野外では、彼らの行動を調べるには採餌生態などに不明な点が多いことから、他種の研究に比べて大きく遅れているのが現状です。そこで本研究では、キクガシラコウモリの採餌時の行動生態を明らかにするため、GPS バイオロギングによって行動を追跡しました。キクガシラコウモリは、コウモリの中でも特に敏捷性が高く小回りが利くので、測位をアクティブな採餌時間帯に限定することで、滑らかな軌道を計測・分析しました。

キクガシラコウモリの狩りは主に、木の枝などにぶらさがって探索し、獲物を発見したら飛んで捕獲する perch hunting スタイル。獲物は蛾などの飛翔昆虫です。バイオロギングによって得られた飛行軌跡 (図 2) を見ると、コウモリは主に森林内を飛行し、地域集中的なパターン (図 2 白丸) が多く見られるのが分かります。コウモリはここで採餌していると考えられ、頻繁に採餌と移動を繰り返してる様子が伺えます。記録個体の中には、約 4 時間移動が全く見られなかった個体 (bat D) や、ほぼ移動に費やしてねぐらから約 23.6 km も移動した個体 (bat C) も見られました。

移動パターンの中で見られた特に特徴的な行動が、経路追従行動です (図 3)。これは認知地図や太陽コンパスに代表されるような、目的地へ辿り着くためのナビゲーション戦略の一種です。先行研究では、道に沿って飛行していたことが翼手目の別科および同科の他種でも確認されていますが、観測が極めて部分的であ



図 1. キクガシラコウモリ。本研究観測地の苫小牧市のねぐらにて撮影。(撮影者：藤岡慧明)

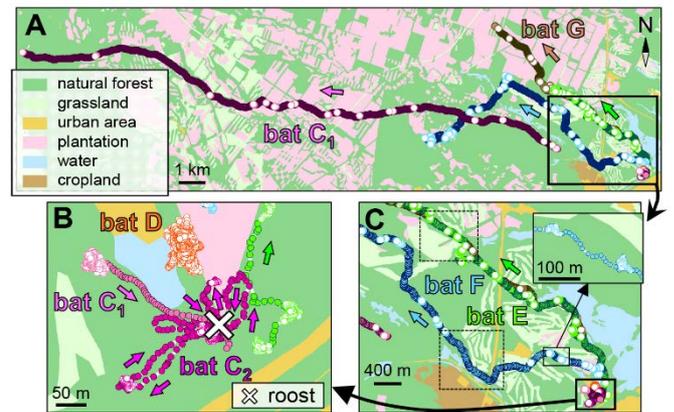


図 2. コウモリの一晩における移動経路。A と C の太線四角部の拡大図を各々 C と B に示す。移動モード (Commuting; COM, filled circle) と地域集中モード (Area-Restricted Behavior; ARB, open circle) は隠れマルコフモデルを用いてクラスタリングした。(文献[1]の Fig. 2 を改変)

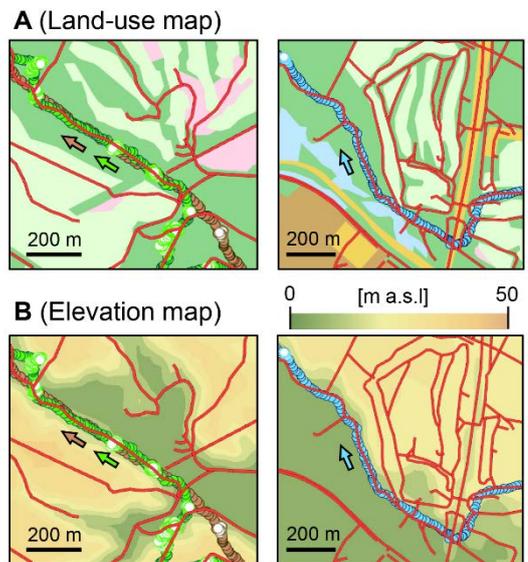


図 3. コウモリの経路追従行動 (図 2 C の四角部の拡大図)。A は土地利用マップ、B は標高マップ、赤線は道路を示しており、縦に同じ飛行軌跡を並べている。矢印は飛行方向。各コウモリが道路に沿って移動していることが分かる。(文献[1]の Fig. 5 を改変)

ったため、バイオロギングによってキロメートルオーダーの範囲で定量的に調べたことにも本研究の大きな意義があると言えます。

結果として、経路追従する場面は多くなく、道路に沿っていると判定されたのは、移動パターンの座標全体の 33.4% に留まりました。また、移動ステップが道路に対する選好性があったのかどうか、ステップ選択

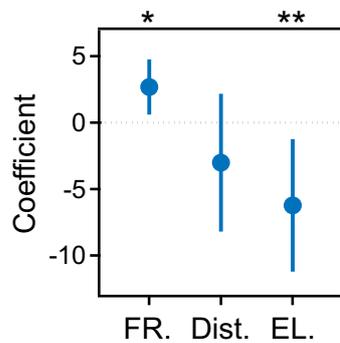


図4. ステップ選択関数 (Step Selection Function) を用いた環境選好性解析の結果。この解析では、各共変量 (FR : Forest, Dist: Distance to road, EL: Elevation) の係数 (縦軸) の 95%信頼区間 (青プロットを跨ぐ線分) が0を跨がなければ、有意な選好性があったと判定される。\*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ 。(文献[1]の Fig. 6より)

関数を用いて調べたところ (図4)、森林環境 (図4、FR) への選好性は認められましたが、道路 (図4、Dist) への選好性が有意となる結果は得られませんでした。それよりもむしろ、標高が低い場所へと選好的に移動することが分かりました (図4、EL)。

低い標高へ移動するステップが選択されるということは、より楽な経路を選択していたと推察できます。しかし、図3 Bのケースでは、傾斜の大きな場所を、

上りも下りもせずに同高度で斜面に沿うように飛行しており、ただ単純に低い標高を目指しているわけではなさそうです。そうになると、土地の起伏といった地形的な情報がナビゲーションに使われる可能性や、一方で道路があれば道路が優先される可能性など、色々な可能性が考えられます。ですので、キクガシラコウモリの経路追従行動については、これらの可能性を考慮しつつ、今後サンプル数を増やして詳細に分析する必要があります。

キクガシラコウモリ科 (Rhinolophidae) でのバイオロギングは世界的に見てもまだ数例しかない中、本研究はまだデータ数が少ないものの、詳細な軌道を計測した初めての研究です。本研究成果を基に、野外におけるキクガシラコウモリの移動生態や採餌戦略、超音波利用についても、これから徐々に明らかになっていくことが期待されます。

#### 文献情報

- [1] E. Fujioka, K. Yoshimura, T. Ujino, K. Yoda, D. Fukui and S. Hiryu. (2025) High-resolution GPS tracking of perch hunting bats, *Rhinolophus nippon*, during nightly foraging behavior. Zool. Sci. (in press). DOI: <https://doi.org/10.2108/zs240033>

# コウモリにおける エコーロケーションと飛行を調和させた目標トラッキング戦略

西海 望 (自然科学研究機構 基礎生物学研究所)

物体を注視し視野内に捉え続ける「目標トラッキング」の能力は、様々な場面で、物体を継続的に観測する際に大きな役割を果たしています。しかしながら、どのような動物であっても、トラッキングの際には「感覚の遅延」という問題から逃れられずにいます。これは、情報の伝達や処理に必ずある程度の時間がかかるせいで、リアルタイムの情報を得ることができないということを指します。そのため、目標の位置を知覚した時点では最早その情報は過去のものになっていて、今この瞬間の目標の位置は異なるところにある場合があります。こうしたことから、この遅延の悪影響を軽減し、トラッキング精度を向上させることが、目標トラッキングにおける一般的な課題となっています。

自然に目を向けると、コウモリは優れた飛行能力と独特のエコーロケーション能力で、複雑に逃げる獲物でも巧みに捕らえることができます。この事実は、コウモリが獲物の位置を絶えず正確にトラッキングし続けることにおいて高い能力を有していると言えます。つまり、コウモリは何らかの方法で、目標トラッキングにおける遅延の問題をうまく克服していることが示唆されているわけです。そこで、私と同志社大学藤岡慧明特任准教授、飛龍志津子教授との共同研究として、コウモリの目標トラッキング能力に着目し、獲物を捕捉し続ける上で、どのような工夫がなされているのか調べました。

本研究では、室内実験下でコウモリ（ニホンキクガシラコウモリ：*Rhinolophus nippon*）と獲物となるガ（フライヤキリバ：*Goniocraspidum pryeri*）を高速撮影し両者の飛行経路を計測するとともに、実験室内に多数配置されたマイクからコウモリの超音波照射の状態を計測し、これらのデータを解析しました。

解析の結果、まず、コウモリは超音波制御および飛行制御で構成される以下4つの独特の戦術を同時展開していることが判明しました（参考動画）。

## 超音波制御の戦術

1. 感覚の遅延時間の分だけ目標の移動を予測して、移動先にスキャン方向（照準）を修正すること。
2. スキャンのレートを高速化すること。
3. スキャン範囲（視野の広さに相当）を拡大すること。

## 飛行制御の戦術

4. 目標との角度変化を相殺するように飛行し、目標方向を安定させること。

次に、コンピュータシミュレーションによって各戦術がどの程度トラッキング精度に寄与しているのか調べたところ、各々が独立してトラッキング精度を向上させる効果を有していることが確認できました。そしてコウモリはそれらを調和させることで、安定して高いトラッキング精度を発揮していることが判明しました（図1）。複数の戦術を同時に用いるということは、たとえどれかが欠けても他の戦術がある程度機能を補ってくれることを意味します。このようなロバストな戦術の運用の仕方は、敵対的な状況、すなわち相手が捕食者のトラッキング戦略を崩そうとしてくる際に、特に有効と考えられます。

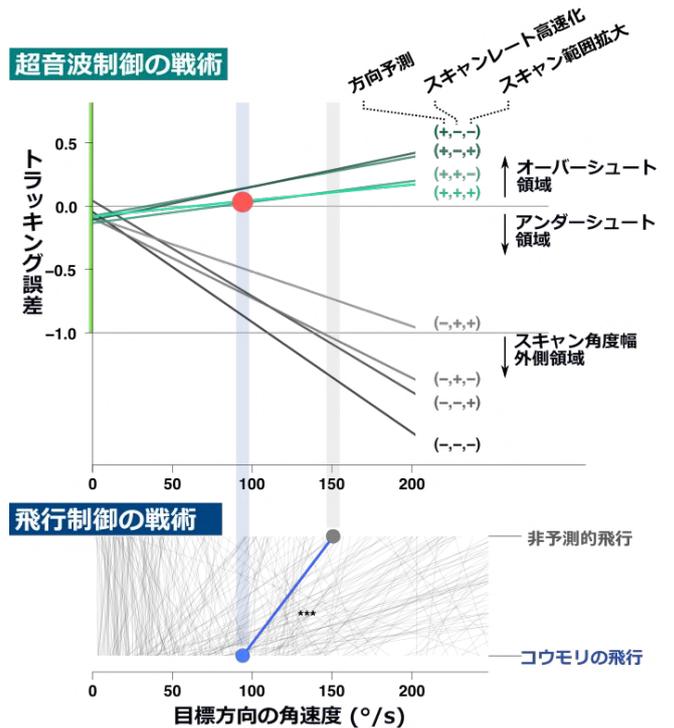


図1. シミュレーションによって得られた、トラッキングの誤差に対する各戦術の影響

上段の超音波制御の戦術に関しては3種類あるため、各々のON/OFFを+/-で各帰帰線の右側に示している。超音波制御の3戦術を全て投入することで照準誤差を低くできるが、それでも目標方向の角速度が100°/s付近を離れるほど、徐々に誤差が大きくなってしまふ。他方、下段の飛行制御上の戦術に関しては、推定された非予測的な飛行と比べ、コウモリの飛行は目標方向の角速度を低減し、平均100°/sに留めていることを示している。つまり、超音波制御上の戦術と飛行上の戦術が組み合わさることで、トラッキング誤差がちょうど0付近に収まるようになっている（赤点箇所）。

こうした有効性の一方で、複数戦術の同時展開は個体にマルチタスクを課すため、実際に運用するには相当の困難さがあると考えられます。これをコウモリがどのように克服しているのかを分析した結果、各戦術はどれも「目標方向の角速度」という単一の運動パラメータへの反応に集約できることが明らかになりました(図2)。このパラメータはコウモリからみた目標方向の時間変動を表すものであり、トラッキングしにくさの指標となる上に、現在の目標の方向を予測することにも使えます。したがって、このパラメータひとつから、トラッキング対処の重要度を見積もり、かつ目標方向の予測を行うことで、全ての戦術をひとまとめに制御することが理論上可能となります。そして、実際のコウモリにおいて、全ての戦術の調節度合いはこのパラメータと相関していることが確認されました。こうしたことから、一見マルチタスクを負っているようで、実はコウモリはタスクをうまくまとめあげ負荷を低減していることが示唆されたわけです。

以上の結果から、コウモリにおける目標トラッキングの戦略構造が提起されました(図2)。まず、目標のいる方向の変動が激しいほど、トラッキング誤差が生じやすいという基本構図があります。これに対して、上記1~3の超音波制御の戦術は、トラッキング誤差そのものに対抗するように機能し、4の飛行制御の戦術はトラッキング誤差の原因となる目標方向の変動に対抗するように機能します。そして、すべての戦術の調節は、目標方向の角速度に応じてなされるというものです。こうした戦術の機能的分業と単一パラメータによる統合的制御によって、コウモリは感覚の遅延の問題にうまく対処し、優れたハンターとしての地位を確立しているのではないかと考えられます。

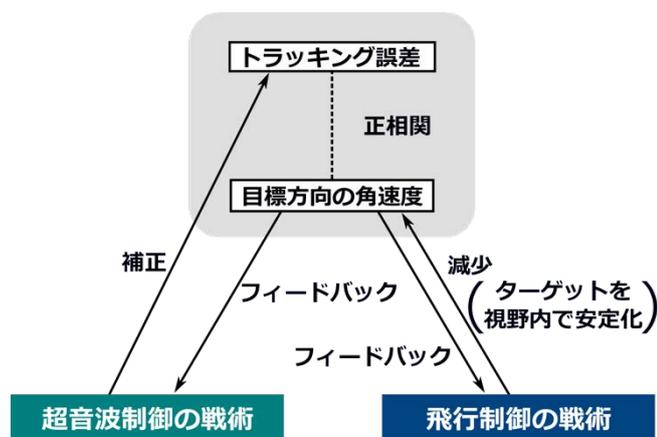


図2. 本種の目標トラッキングにおいて提起された戦略構造

ところで、捕食動物にとっては、ただ獲物をトラッキングだけしていればよいというものではなく、最終的には獲物に到達しなくてはなりません。そのため、特に飛行パターンに関しては、もしコウモリがトラッキングに注力するあまり、獲物への到達の見込みが下がってしまっただけでは本末転倒です。これに関して、実は角度変化を抑えるという今回のコウモリの接近の仕方は、トラッキングを支えるだけでなく、目標へ少ないエネルギーで到達しやすくなるという運動学的な合理性が数学的に示されています。さらに、角度変化が少ないということには、獲物の側が捕食者の存在に気づきにくくなるという効果も示唆されます。こうしたことから、コウモリの飛行は単に目標トラッキングの精度を高めているだけではなく、目標に到達するための様々な効果も同時に高めていると考えられます(図3)。分析の最中、これに気づいた時、複数戦術を統べる目標トラッキングの戦略もまた、「捕食」という最終目的への戦略の中に調和して組み込まれていることを感じ、戦略の階層性、そしてその裏にある生命進化の巧妙さに改めて思いを馳せるものでした。

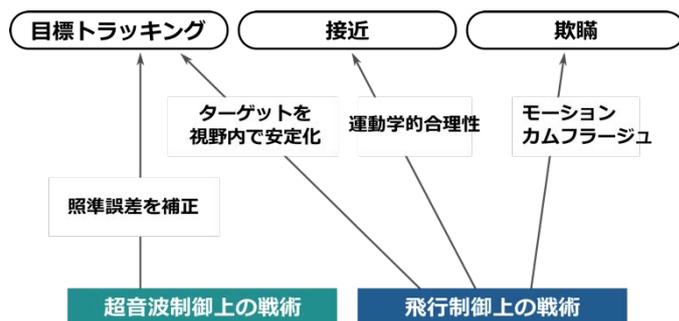


図3. 捕食戦略における各戦術の位置付け

獲物を見つけ追跡状態のフェーズに入ったコウモリにおいて、捕食を成功させるために想定される戦いの切り口は、本研究で紹介した「目標トラッキング」と、相手に効率的に近づく「接近」、相手に適切な防御手段を取らせない「欺瞞」の3点が挙げられる。超音波制御上の戦術は「目標トラッキング」にのみ有利にはたらくと考えられる一方で、角度変化を低減する飛行制御上の戦術は「目標トラッキング」だけでなく、他の切り口に対しても有利にはたらくと考えられる。

### 文献情報

・ N. Nishiumi, E. Fujioka, S. Hiryu (2019), Bats integrate multiple echolocation and flight tactics to track prey, *Current Biology*, 34(13), 2948 - 2956, doi:[10.1016/j.cub.2024.05.062](https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.05.062)

・ 参考動画：<https://youtu.be/ptj2TvnsVNk>

コンピュータグラフィックスによって、コウモリの視点で再構成された目標トラッキング時の様相。



# コウモリのふしぎに迫る

福井 大 (東京大学 農学生命科学研究科 附属演習林)

## 1. はじめに

コウモリはこれまでに1,400種以上が確認されている、哺乳類の中では齧歯目に次いで多様性の高い分類群です。飛翔能力を獲得することで極域をのぞくほぼすべての陸域に進出し、反響定位能力を獲得することで夜の空というニッチで繁栄してきました。昆虫個体数の抑制や受粉、種子散布といった高い生態系機能を有することでも知られ、さまざまな生態系において重要な役割を果たしています。そのほか、洗練された反響定位能力や飛翔能力については工学的応用が、頑強な免疫機能については医学的応用が期待されるなど、コウモリ能力には私たち人間生活を豊かにするヒントがたくさん隠されています。

一方で、小型で夜間に飛翔すること、昼間の休憩場所(ねぐら)が我々の目につきづらい場所にあることから、直接観察が非常に難しく、その生態や行動についての理解は他の哺乳類分類群と比べて遅れてきました。しかしながら、バイオロギングを含む、コウモリを調べるための技術発展は今世紀に入り目覚ましいものがあり、これまで不可能とされてきた研究が次々と可能になっています。私たちの研究グループでは、こうした技術を積極的に導入することで、さまざまなコウモリのふしぎを明らかにする研究を多角的に進めています。本稿では、それら研究事例の一部を紹介し

## 2. 音声を捉える

コウモリは夜の空で活動します。したがって、その行動を我々の目で直接観察することは極めて困難です。ただ、多くのコウモリは反響定位能力をもち、飛翔中に超音波音声を発しています。つまり、超音波を感知できるマイクロフォンと、それによって記録された音声を解析する環境があれば、音声を手掛かりに彼らの活動を把握することができるのです。超音波マイク(バットディテクター)は、1990年代から普及し始め、2010年ころからはマイクと録音デバイスが一体化した自動録音装置が気軽に入手できるようになりました(図1)。これを用いる音声モニタリングには、一度に複数箇所を長期間、同時に調査できることや、かすみ網やトラップによる捕獲調査では捕獲が困難な種(高高度を飛翔する種)の存在も把握できるなど、多くのメリットがあります。私たちは、森林環境とコウモリの活動の関係性に注目し、研究を進めてきました。例えば、台風による攪乱で森林構造が変化すると、そこ



図1. 音声モニタリングに用いる自動録音装置

を採餌利用するコウモリの種組成が大きく変化することや、森林内の河川から羽化する水生昆虫の量に応じてコウモリの活動量が変化することなどを明らかにしてきました[1][2]。

こうした音声モニタリングは、前述したようにコウモリの活動を明らかにする上でさまざまなアドバンテージがありますが、一方で解決しなければ課題もあります。それは、音声による種判別です。コウモリが反響定位のために発する音声にはさまざまなタイプ(周波数や波形)があり、種によってどのような音声を発するかがある程度決まっています。しかし、種間(特に同属)で極めて似ている音声をを用いる場合や、同種でも飛翔空間や状況によって音声構造を可塑的に変化させることから、一部の種については一見(一聴?)して正確に種を判定することが困難です。世界各国でこの課題を解決するための音声種判別法に関する研究が進められていて、私たちのグループでも、大阪大学と共同で日本産コウモリを対象として研究を進めています。これまでに判別分析や機械学習、深層学習を用いた識別モデルの開発を行い、90%を超える判別率を得ることができました[3]。とはいえ、誤判別があるのも事実で、モデルの適用は研究目的によって慎重に扱う必要があります。例えば、地域のファウナを調べたい場合には適用は避けるべきです(実際にはいない種が「いる」と判定されてしまう可能性があります)。一方で、種あるいはグループ判別が確実な特定の種やグループの活動量を評価する場合には強力なツールとなるでしょう。



図2. 0.4 g の発信機を付けたヒメホオヒゲコウモリ

### 3. 移動を追う

上述した音声モニタリングは、ある場所でのコウモリの活動量や種組成を調べるためにはとても効率の良い方法です。一方で、個体を識別することはできないため、ある個体が時空間的にどのように環境を利用しているのかについては明らかにできません。そのためには個体ベースでの行動追跡が必要になりますが、前述したように、暗闇を常に移動し続けるコウモリを直接観察することは不可能です。哺乳類の研究においては、1960-70年代に発信機を装着して情報を得るテレメトリー法が導入され始めました(図2)。しかし、初期は重量の制約から、小型のコウモリに装着できる発信機はなく、コウモリでテレメトリー法を導入できるようになったのは1990年代頃になってからでした。バッテリー容量の関係で追跡可能期間は短かったものの、テレメトリー法によって、森林棲コウモリの日中休息場所(ねぐら)など、それまでほとんどわかっていなかった事が次々と明らかにされました。私たちの



図3. GPS ロガーを付けたクビワオオコウモリ

研究グループでも、体重 5-10g 程度のコテングコウモリに発信機を装着・追跡し、ねぐらの移動パターンや、出産哺育場所での行動を明らかにする事ができました[4]。

ただし、テレメトリー法にも弱点があります。テレメトリー法は発信機から発信される VHF 電波を頼りに個体の探索を行います。労力がかかる上に、得られるデータはそれほど多くありません。そこで1990年代から登場したのが、位置情報を定期的にログできるGPSロガーです。当初はテレメトリー法の発信機同様、重量やバッテリーの制約から大型動物で盛んに利用されていましたが、近年の急速な技術発展によって、2010年代からはコウモリで利用できる製品も出てきました。そこで私たちは、2015年頃から同志社大学の研究チームと共同で、GPSロガーを用いたコウモリの移動パターンの解明に取り組んでいます。これまでキクガシラコウモリ(洞穴性、昆虫食)、ヤマコウモリ(樹洞性、昆虫食)、クビワオオコウモリ(果実食、図3)の3種にGPSロガーを装着し、採餌時の移動データを得る事ができました[5]。こうしたデータはこれまで決して得ることのできなかつたもので、それぞれの種が機能形質や食性に応じた特徴的な移動パターンを持っており、今後、詳細な解析が進んでいく事が期待されます。

### 4. おわりに

これまでバイオロギング手法で多様な移動データを得る事ができました。私たちは、これらの移動データと、食性や年齢などの関係にも興味を持っています。メタバーコーディングやエピソードティッククロックなどの新たな技術で食性や年齢も同時に明らかにする事で、移動パターンとの関係性を明らかにしていく予定です[6]。バイオロギングをはじめとした近年の技術革新は、今までブラックボックスだったコウモリのふしぎを解き明かす強力なツールになることでしょう。

### 文献情報

- [1] D. Fukui et al. (2006) *Journal of Animal Ecology*, 75: 1252-1258.
- [2] D. Fukui et al. (2011) *Forest Ecology and Management*, 261: 1546-1552.
- [3] K. Kobayashi et al. (2021) *Ecological Informatics*, 62: 101253.
- [4] D. Fukui et al. (2012) *Acta Chiropterologica*, 14: 93-104.
- [5] Y. Niga et al. (2023) *Royal Society Open Science*, 10: 230035230035.
- [6] O. Heim et al. (2021) *Ecology and Evolution*, 11: 18651-18661.

# オリオオコウモリの母親はどんな移動してるの？

藤谷 彰子 (同志社大学 生命医科学研究科 博士後期課程 2年)



## 1. はじめに

皆さん、日本に生息するオオコウモリを実際に見たことがありますか？

沖縄では、夕方に少し目を凝らして探せば、空を飛ぶオオコウモリの姿を比較的簡単に見つけることができます。私は初めてこのオオコウモリを沖縄で見た時は、大きな鳥が飛んでいるのかな？と、自分の想像よりもとても大きく感じて、飛んでいる生き物がオオコウモリだと理解するのに時間がかかったのを覚えています。子育て期には、木で休んでいるコウモリを探すと、母親にしがみついて一緒に休む仔の姿も見る事ができるかもしれません (図 1)。



図 1. オリオオコウモリの母仔

私は、沖縄本島に生息するオリオオコウモリ *Pteropus dasymallus inopinatus* の移動生態についてバイオロギング手法を用いて調査を行っています。オリオオコウモリは、体重約 300~500g、翼幅は 1m 越える大型のコウモリです。果実や花の蜜、花粉を主食とします。沖縄では、大型の種子散布者が少ない中で、果実散布者や送粉者として重要な役割を担っています。そのため、植物の多様性を維持する上で欠かせない存在です[1]。

2023 年 6 月と 2024 年 5 月にバイオロギング手法を用いたオリオオコウモリにおける移動調査を実施しました。この時期は本種の子育て期にあたり、母親は仔を連れて飛行したり、仔を木に置いて採餌に出かけたりします。この 2 回の調査で、子育て中の母親個体を捕獲し、データ回収や仔を木に置いている様子の撮影に成功しました。野外調査の様子と母親個体の解析結果をここで紹介させていただきたいと思います。

## 2. 野外調査

琉球大学構内でかすみ網を用いてオオコウモリを捕獲しました。丸い大きな目がとてもかわいいオオコウモリですが、捕獲がとても大変です。調査では、約 7m のポールに固定したかすみ網を、バレーボールのネットを張るように持ち、オオコウモリが木に飛んで来たり、木から飛び立つタイミングを狙って捕獲します (図 2)。調査メンバーはこのポールを支えるだけでなく、捕獲できそうな個体を発見した際には、即座に、そして静かに移動して捕獲を試みます。しかし、オオコウモリは目が良いため、街頭などの光があると大きなかすみ網を避けて飛んで行ってしまいます。そのため、2 つのかすみ網で挟み込んで捕獲を行うなど、場所に応じて工夫をしています。それでも、成功率は約 20~30% くらいだと思います。この調査を始めた頃は、捕獲も手探りで、オオコウモリが良く利用する木の前でかすみ網を張って待つだけでしたが、調査メンバーで試行錯誤を行って、現在の捕獲方法に落ち着きました。そして、かすみ網で捕らえたオオコウモリを慎重に取り出す過程やロガーを装着する際には、オオコウモリが怪我をしないよう、そしてオオコウモリは顎の力も強いので我々も怪我をしないように、細心の注意を払う必要があります。とても根気がいる捕獲とロガー装着なので、こうした調査を支えてくださる調査メンバーの方々には、本当に感謝してもしきれません。

ロガーは、Lotek 社の PinPoint-VHF ロガーを使用しており、GPS による位置情報の記録や遠隔操作でのデータ回収が可能です。計測間隔は 2 分で設定しており、オオコウモリの活動データを最大約 6 日間にわたり収集できます。調査期間中は、データ回収するためにロガー装着したオオコウモリを、ロガーから発信される電波を頼りに探し回っています。

## 3. 母親の 3 つの移動パターン

2023 年 6 月の調査では母親 4 個 (AF001~004)、2024 年 5 月の調査では母親 1 個体 (AF005) の捕獲とデータ回収に成功しました。5 個体とも捕獲時には単体でしたが、日中の目視観察で、仔と一緒に休んでいるのを確認できました。AF005 については、活動開始時間頃に母親が木に止まり、仔を置いて採餌に行き、戻ってくる様子のビデオ撮影にも数日成功しました。



図 2. 捕獲の様子

母親 5 個体の移動データから、3 つの移動パターンが示唆されました。1 つ目は夜間の採餌途中に仔の様子を確認しに戻るパターン(AF001,AF002,AF005)、2 つ目は夜間の採餌途中に仔の様子を確認しに行っていないパターン(AF003)、そして 3 つ目は子の様子を確認するために戻る頻度が日ごとの変動するパターン(AF004)です (図 3)。

また、母親の仔を置く木や日中に休息する木を調査したところ、計測期間を通して AF001 は仔を置く場所と休息場所が一定でしたが、AF003 では仔を置く場所と休息場所が毎日異なり、前日に比べると 3 km 以上も移動したなど、母親毎にそれらの場所選択に違いが見られました。これらの異なる母親の移動パターンは、仔の成長に応じて変動しているのではないかと考察されます。

今後は、更に詳細に移動パターンやその移動先決定要因を明らかにするために、土地利用の傾向や利用する採餌木の忠実度についての解析を進めたいと思っています。

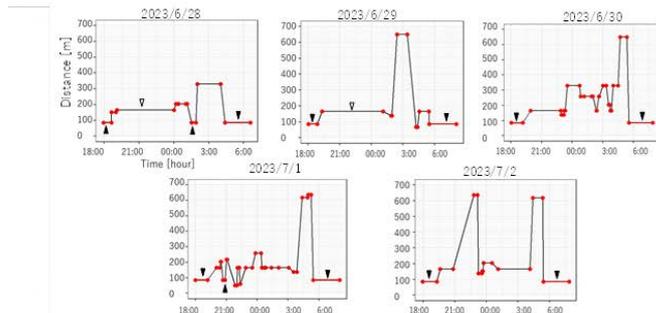
#### 4. 学会発表

日本哺乳類学会 2024 年神戸大会においてこの結果をまとめたポスター発表を行い、日本哺乳類学会優秀発表賞をいただきました (図 4)。このような賞をいただけたのは初めてで、とても嬉しく、そして気が引き締まる思いです。担当教員の飛龍志津子先生をはじめ、多くの方々のおかげです。ありがとうございます。これからも日々精進していきたいです。

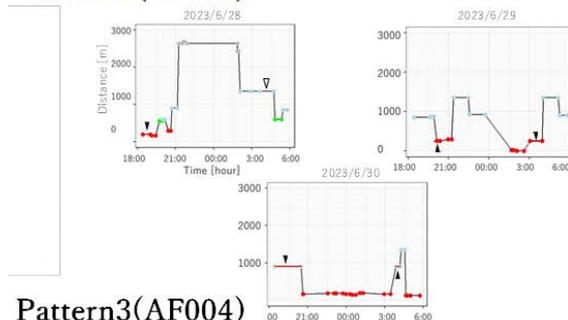
#### 文献情報

- [1] M. Fujita, M. S., & Tuttle, M. D. (1991). Flying foxes (Chiroptera: Pteropodidae): Threatened animals of key ecological and economic importance. *Conservation Biology*, 5(4), 455–463. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.1991.tb00352.x>

#### Pattern1(AF001)



#### Pattern2(AF003)



#### Pattern3(AF004)

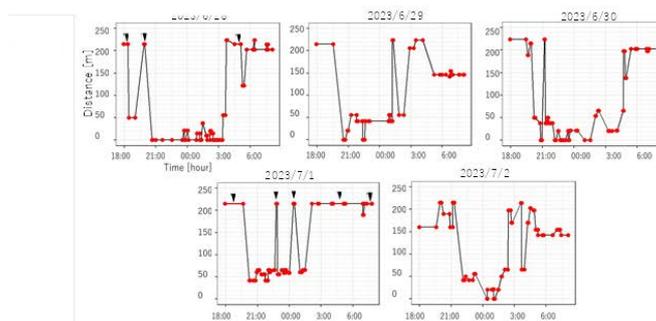


図 3. 母親の 3 つの移動パターン



図 4. 2024 年度哺乳類学会の様子

# Integrated Tracking: Enhancing GPS Data with External Sensors

Omer Yinon (Department of Zoology, Faculty of Life Sciences, Tel-Aviv University)



The use of GPS devices to collect movement data is among the most applied techniques in biologging. These devices have revolutionized the study of animal behavior by enabling precise tracking of movement patterns across diverse habitats and species. Technological advances have facilitated the miniaturization of tracking devices, making it possible to track species that were too small to tag just a few years ago (Menz et al. 2022). GPS loggers are particularly effective in investigating movement patterns and spatial coordination between tagged individuals. They can provide invaluable insights into seasonal behaviors, decision-making processes, and territorial usage over time (Conenna et al. 2019; Hallworth and Marra 2015; Nathan et al. 2022).

Despite their transformative impact, GPS loggers have inherent limitations that should be acknowledged. They are unable to record certain types of behaviors, such as vocalizations or physiological changes (e.g., body temperature). While GPS loggers can integrate additional data streams, such as location coordinates combined with body temperature or sound recordings, these advancements predominantly enhance the documentation of the tagged individual and often fail to incorporate critical environmental and external factors. Such as climatic conditions or the proximity of non-tagged individuals, which can influence the behavior. Furthermore, GPS devices face significant challenges in small-scale spatial studies, such as tracking the movements of insects within a flower patch or identifying the specific tree on which an animal has landed in an orchard.

The advent of non-invasive novel sensors and methodologies now offers opportunities to integrate diverse data types from an external point of view sensors (i.e., sensors not directly attached to the animal) to achieve a more comprehensive

understanding of animal behavior and movement patterns. In this article, I discuss emerging approaches employed in Prof. Yossi Yovel's Bat Lab at Tel Aviv University and their potential to advance our understanding of the ecological and behavioral processes underlying animal movements and behavior.

Sound cameras are external sensors that can record sound and movement in dense environments or low-light conditions. The sound camera used in Yovel's Bat Lab is equipped with a wide aperture array of 64 microphones, sampling at a rate of 200 kHz (Guggenberger et al. 2024). This device enables high-resolution acoustic recordings and allows the precise tracking and identifying specific acoustic parameters from distances of up to 20 meters, even in noisy environments.

The sound camera facilitates the visualization and localization of sound sources in space by integrating acoustic data with video recordings. This process overlays the recorded sound emissions onto a visual representation in real-time, allowing spatial analysis of acoustic activity. Such capabilities are particularly valuable in ecological field studies where tracking tagged individual movement integrated with their environmental sound is essential, especially in conditions where direct visual observation is not feasible. Furthermore, sound cameras offer a valuable method for studying social dynamics in group-living species that remain within the observer's line of sight for extended periods. This approach provides an efficient alternative to tagging each group member with GPS devices and sound loggers by recording multiple individuals in natural or controlled environments and mapping their vocal interactions. These recordings enable the reconstruction of social networks based on

vocal communication and movement, while also offering deeper insights into species' vocal repertoires by linking vocalizations and movements to specific stimuli.



Figure 1. The sound camera mounted on a tripod while recording vocalizations of Mauritian fruit bats (*Pteropus niger*) at Yovel's Bat Lab research station, Mauritius, September 2023.

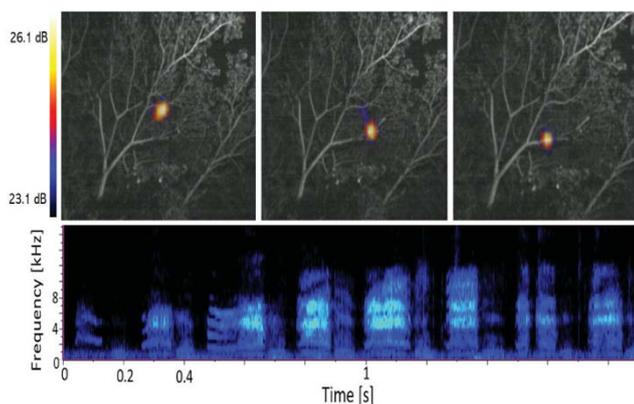


Figure 2. Sound camera data demonstrates overlapping real-time video and audio of a free-ranging Mauritian fruit bat (*Pteropus niger*), allowing for simultaneous sound recording and localization, regardless of light conditions. Data and figures adapted from (Guggenberger et al. 2024)

For example, a study published in *Frontiers in Bird Science* by Guggenberger et al. demonstrated how acoustic cameras can enhance the study of vocal mobbing in Arabian babblers (*Turdoides squamiceps*). The researchers tracked and analyzed individual vocalizations during snake-mobbing events involving ten groups of ringed babblers, including both juveniles and adults. Adult babblers demonstrated rhythmic coordination, whereas juveniles showed inconsistency,

disrupting group vocal dynamics. Groups with younger juveniles had lower vocal network densities than adult-only groups, which exhibited more structured coordination. This study highlights the potential of acoustic cameras as an efficient tool in investigating animal vocal interactions and movement while providing new insights into the learning abilities and social structures of certain species.

Thermal cameras are a valuable resource for advancing research on animal movement and behavior. These sensors offer new insights into the environmental conditions surrounding the tracked individual or group. For instance, thermal imaging enables the detection of the temperature of materials animals interact with and facilitates the identification of cohabiting species, particularly endothermic ones. When integrated with drones, thermal cameras provide the unique advantage of capturing real-time video and images supplemented with temperature data. This technology significantly enhances researchers' ability to detect both tagged and untagged animals in challenging environments, such as dense canopies, thick vegetation, or low-light conditions. Moreover, it facilitates the study of behaviors that were previously difficult to monitor, such as sleep patterns, thereby greatly advancing research methodologies. Observing animals at night is critical for uncovering hidden social and ecological dynamics that are often missed during daytime observations

For instance, A study by Loftus et al. (2024) on olive baboons (*Papio anubis*) highlights the significant role of shared sleeping sites in shaping social dynamics. While disrupting individual sleep quality, they simultaneously promote intergroup social tolerance and coordination. Individuals who shared sleeping sites demonstrated more cohesive movement and engaged in prolonged interactions over subsequent days. This research utilized thermal imaging as a non-invasive method to observe and identify nocturnal interactions, expanding knowledge of previously scarcely documented behaviors.

In addition to tracking, thermal data can provide valuable insights into the internal states and responses of animals to specific stimuli in both laboratory and field settings. For instance, in primates, nasal temperature has been identified as a reliable indicator of stress levels (Kuraoka and Nakamura 2011). By combining physiological measurements, such as thermal imaging, with movement data, researchers can gain a deeper understanding of how specific stimuli influence decision-making processes and social dynamics within groups.

Recent research, such as the study by (Barrault et al. 2022) has demonstrated the potential of thermography to reveal an interplay between social and physiological responses in competitive contexts. The study observed wild chimpanzees (*Pan troglodytes*) during social feeding events and found variations in nasal temperatures based on the type of food and the social composition of the audience. In more competitive scenarios, such as feeding on meat in the presence of dominant males, nasal temperatures were notably lower, reflecting heightened stress levels. Conversely, in cooperative or less contested situations, such as feeding on figs and being surrounded by more closely bonded social partners, higher nasal temperatures were recorded, indicating a more relaxed physiological state.

By extending the use of thermography, researchers can capture physiological and behavioral phenomena that are otherwise challenging to measure.

Moreover, Thermal cameras can provide substantial advantages for ecological studies, including population estimation, and the analysis of movement patterns based on directional choices relative to known benchmarks (e.g., tracking bats' directional movement to and from their colonies in caves). These thermal videos are especially beneficial in low-visibility environments or when data from a limited number of tagged individuals prove insufficient



Figure 3. Thermal images captured via the remote controller of a thermal camera. The images highlight temperature variations, enabling clear differentiation of bats from their surroundings, thereby facilitating population estimation surveys. Top: A Mauritian fruit bat (*Pteropus niger*) colony roosting in the forest canopy. Bottom: Mauritian free-tailed bat (*Mormopterus acetabulosus*) colony roosting in a cave. Yovel's Bat Lab research station, Mauritius, December 2022.

LiDAR (Light Detection and Ranging), the third sensor, has recently gained increased attention. Originally developed for precise engineering and topographic measurements, LiDAR has emerged as a critical tool in ecological research, offering high-resolution data for studying environmental structures and dynamics. LiDAR technology functions by emitting rapid laser pulses toward a target area, which are reflected off surfaces and returned to the sensor, and by measuring the time taken for the laser pulses to travel to the target and back the system calculates the precise distances. This enables the creation of highly detailed three-dimensional maps or models of the scanned environment or objects, making it a powerful tool for spatial analysis and

environmental mapping(Eitel et al. 2016).

Recently, in Yovel's Lab, we have adopted this sensor for diverse applications. The utility of LiDAR is often dependent on spatial context. For example, when studying small animal models such as insects, LiDAR can serve as a 3D measurement tool in fixed environments. Allowing researchers to track insect movements from a stationary sensor perspective, providing insights into their spatial behavior and interactions with their environment(Kirkeby, Wellenreuther, and Brydegaard 2016).

LiDAR also excels in generating models at varying scales, from capturing the precise dimensions of a single tree achievable with centimeter-level accuracy to modeling expansive landscapes spanning kilometers, albeit with reduced precision. A recent study led by Goldshtein in Yovel's lab (Goldshtein et al. 2024) investigated the navigation strategies of wild Kuhl's pipistrelle bats (*Pipistrellus kuhlii*). The findings revealed that these bats rely on acoustic cognitive map-based echolocation cues for navigation, even in relatively uncluttered environments.

To further explore how bats use acoustic information for navigation, we constructed a high-resolution 3D model of their habitat in the Hula Valley, Israel, using LiDAR technology. This model accurately represented the experimental environment, enabling precise calculations of the sound entropy within this setting.

Sound entropy quantifies the variation and complexity of the acoustic environment, in this study, as perceived by echolocating bats.

Higher entropy values were associated with complex environments, such as orchards, or edges of roads and rivers, which generate diverse and intricate echoes. In contrast, lower entropy values correspond to simpler environments, like open crop fields. By integrating a 3D model of their habitat with the routes chosen by the bats in the experiment, the study provided new insights into how bats navigate and localize themselves within their environment.

In conclusion, advanced external sensors such as sound cameras, thermal cameras, and LiDAR

represent a significant advancement in animal behavior and movement studies. These tools can complement biologging techniques or can function as stand-alone sensors for various research purposes.

By addressing the limitations of traditional GPS tracking, they offer a broader and more detailed perspective on animals' natural behaviors, with each sensor providing distinct advantages. Integrating these methods opens new avenues for conservation efforts and behavioral research, enabling researchers to gain deeper insights into the natural world.

## References

- Barrault, Claire, Adrian Soldati, Catherine Hobaiter, Stephen Mugisha, Delphine De Moor, Klaus Zuberbühler, and Guillaume Dezecache. 2022. 'Thermal Imaging Reveals Social Monitoring during Social Feeding in Wild Chimpanzees'. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 377(1860). doi: 10.1098/rstb.2021.0302.
- Conenna, Irene, Adrià López-Baucells, Ricardo Rocha, Simon Ripperger, and Mar Cabeza. 2019. 'Movement Seasonality in a Desert-Dwelling Bat Revealed by Miniature GPS Loggers'. *Movement Ecology* 7(1). doi: 10.1186/s40462-019-0170-8.
- Eitel, Jan U. H., Bernhard Höfle, Lee A. Vierling, Antonio Abellán, Gregory P. Asner, Jeffrey S. Deems, Craig L. Glennie, Philip C. Joerg, Adam L. LeWinter, Troy S. Magney, Gottfried Mandlbauer, Douglas C. Morton, Jörg Müller, and Kerri T. Vierling. 2016. 'Beyond 3-D: The New Spectrum of Lidar Applications for Earth and Ecological Sciences'. *Remote Sensing of Environment* 186:372–92.
- Goldshtein, Aya, Xing Chen, Eran Amichai, Arjan Boonman, Lee Harten, Omer Yinon, Yotam Orchan, Ran Nathan, Sivan Toledo, Iain D. Couzin, and Yossi Yovel. 2024. 'Acoustic Cognitive Map-Based Navigation in Echolocating Bats'. *Science* 386: 561-567. doi: 10.1126/science.adn6269
- Guggenberger, Marie, Arjan Boonman, Oded Keynan, and Yossi Yovel. 2024. 'Using Acoustic Cameras to Study Vocal Mobbing Reveals the Importance of Learning in Juvenile Arabian

- Babblers'. *Frontiers in Bird Science* 3. doi: 10.3389/fbirs.2024.1385017.
- Hallworth, Michael T., and Peter P. Marra. 2015. 'Miniaturized GPS Tags Identify Non-Breeding Territories of a Small Breeding Migratory Songbird'. *Scientific Reports* 5. doi: 10.1038/srep11069.
- Kirkeby, Carsten, Maren Wellenreuther, and Mikkel Brydegaard. 2016. 'Observations of Movement Dynamics of Flying Insects Using High Resolution Lidar'. *Scientific Reports* 6. doi: 10.1038/srep29083.
- Kuraoka, Koji, and Katsuki Nakamura. 2011. 'The Use of Nasal Skin Temperature Measurements in Studying Emotion in Macaque Monkeys'. *Physiology and Behavior* 102(3-4):347-55. doi: 10.1016/j.physbeh.2010.11.029.
- Loftus, J. Carter, Roi Harel, Alison M. Ashbury, Chase L. Núñez, George P. Omondi, Mathew Muttinda, Akiko Matsumoto-Oda, Lynne A. Isbell, and Margaret C. Crofoot. 2024. 'Sharing Sleeping Sites Disrupts Sleep but Catalyses Social Tolerance and Coordination between Groups'. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 291(2034):20241330. doi: 10.1098/rspb.2024.1330.
- Menz, M. H., Scacco, M., Bürki-Spycher, H. M., Williams, H. J., Reynolds, D. R., Chapman, J. W., & Wikelski, M. (2022). Individual tracking reveals long-distance flight-path control in a nocturnally migrating moth. *Science* 377(6607), 764-768.
- Nathan, Ran, Christopher T. Monk, Robert Arlinghaus, Timo Adam, Josep Alós, Michael Assaf, Henrik Baktoft, Christine E. Beardsworth, Michael G. Bertram, Allert I. Bijleveld, Tomas Brodin, Jill L. Brooks, Andrea Campos-Candela, Steven J. Cooke, Karl Gjelland, Pratik R. Gupte, Roi Harel, Gustav Hellström, Florian Jeltsch, Shaun S. Killen, Thomas Klefoth, Roland Langrock, Robert J. Lennox, Emmanuel Lourie, Joah R. Madden, Yotam Orchan, Ine S. Pauwels, Milan Říha, Manuel Roeleke, Ulrike E. Schlägel, David Shohami, Johannes Signer, Sivan Toledo, Ohad Vilk, Samuel Westrelin, Mark A. Whiteside, and Ivan Jarić. 2022. 'Big-Data Approaches Lead to an Increased Understanding of the Ecology of Animal Movement'. *Science* 375(6582).

# 波の干渉と回折

蘆原 郁 (同志社大学 音響ナビゲーション研究センター)



## 1. はじめに

かつては手が届かなかったハイスピード撮影や超高感度撮影が、近年どんどん身近になってきています。しかも超高解像度や無人撮影のおまけまでついてきます。音に関しても市販のハンディレコーダやフィールドレコーダがあれば屋内屋外を問わず誰でも高品質な録音が可能で、レコーダがハイサンプリング対応なら超音波まで記録してくれます。ハイドロフォンをつなげば水中録音も決して難しくはありません。こうした映像技術や音響技術が広い分野で活用されることにより新たな発見につながることを期待されます。そうは言っても光学も音響学も専門に学んだことが無い、そんな読

者もいると思います。そこで本稿では波の伝搬についての基本的な考え方を紹介することにします。

わたしたちの目に入ってくる可視光は電磁波と呼ばれる波です。音波もその名のとおり波ですから、撮影や録音で失敗しないためには、地球上に広がる多種多様な環境において、これらの波がどのように伝搬するかを知ることが大いに役に立ちます。特に高度な、あるいは特殊な撮影や録音において、さらに記録されたデータの解析においても基礎的な物理の知識は欠かせません。波が伝搬する過程では、反射 (Reflection), 屈折 (Refraction), 回折 (Diffraction) が起こるので、これらの特性を理解することが重要です。本稿では反射, 屈折, 回折のうち、特に理解しにくいと思われる回折に焦点を当てたいと思います。

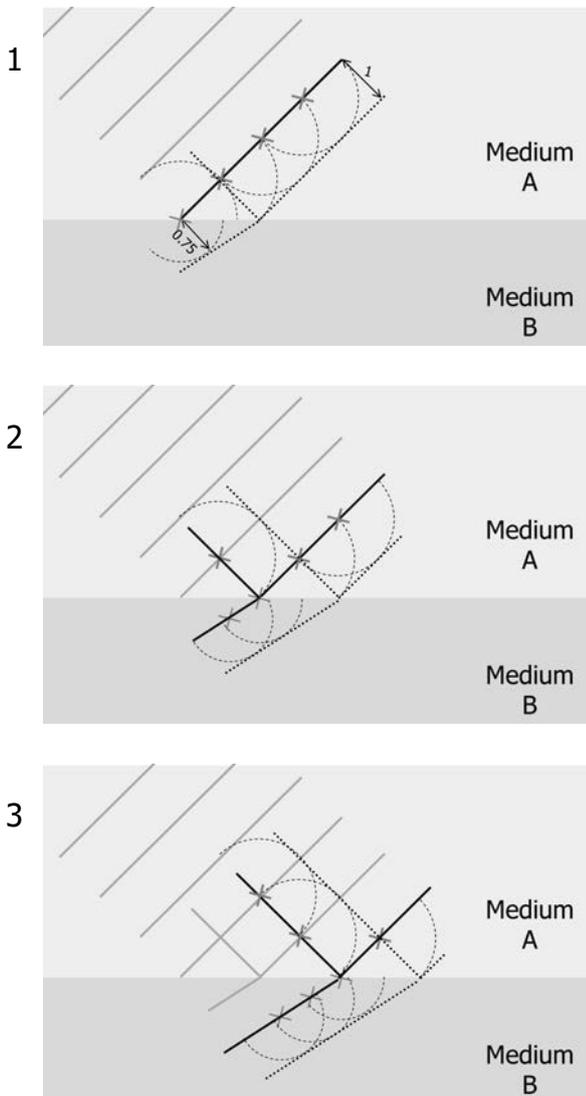


図 1. ホイヘンスの原理による反射と屈折の予測  
1 (上段): 平面波の先頭の波面 (黒実線) が媒質の境界面に達した瞬間。2 (中段) と 3 (下段) はその後の波面の様子。グレーの実線は過去の波面。点線は予測される波面を表す。

## 2. ホイヘンスの原理

波の伝搬を予測するのに有効な考え方として、ホイヘンスの原理 (Huygens' Principle) があります。これは、伝搬する波 (進行波) の波面上のあらゆる点が波源となり、その無数の波源から、もとの波面と同じ位相を持つ無数の球面波が発生し、その無数の球面波の包絡面をつなげたものが次の波面になる。という考え方です。ここで、もとの波面上に生まれる球面波を素元波 (Spherical wavelet) と言います。素元波はもとの波の進行方向側だけに生じるものと考えます。

図 1 は異なる媒質の境界面に達した平面波がどのように伝搬するかをホイヘンスの原理を用いて予測しているところです。上段 (1) では媒質 A 中を図中の左上から伝搬してきた平面波の先頭の波面 (黒実線) が媒質 A と媒質 B の境界面に到達した瞬間を模式的に

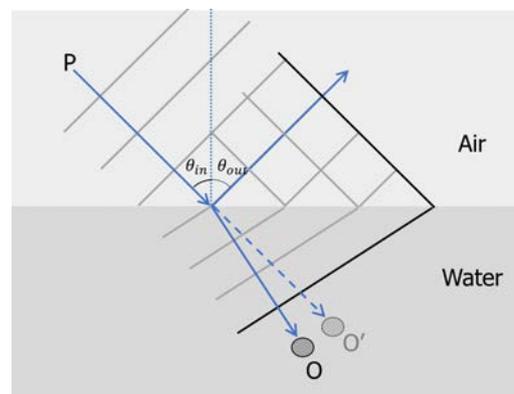


図 2. 水面での光の反射と屈折  
点 P から見ると、点 O にある物体が光の屈折により点 O' の位置に見える。また入射角  $\theta_{in}$  と反射角  $\theta_{out}$  は等しくなる。

描いています。波の一部は境界面をこえて媒質 B の中に伝わり、残りは反射するものとします。また波が媒質 A 中を伝搬する速度を 1 とすると媒質 B 中での速度は 0.75 だとしています。グレーの実線は過去の波面を表しているものとします。

現在の波面上のあらゆる点から素元波が生じる、つまり無数の素元波が生まれるわけですが、シミュレーションで無数の素元波は扱えないので、有限個数で表します。図では × で示す 4 点から素元波（破線）が生まれています。このうち一番左の点は媒質の境界面上にあるので、境界面をこえて媒質 B 側に進む素元波も、反射して媒質 A 側に進む素元波も、それぞれ破線の部分円として描かれています。媒質 A 内で広がる素元波の半径と媒質 B 内で広がる素元波の半径は、各媒質中で伝わる波の速度の比に合わせて、1 対 0.75 としてあります。そしてこれらの素元波の包絡をつないだものが次の波面になるわけです。素元波は球面波なので、包絡をつないだものも曲面になりますが、素元波は隙間なく無数に並んでいると考えるので、図では予測される波面をまっすぐな点線で描いています。

時間の経過にしたがい中段 (2)、下段 (3) のようになると予測されます。境界面をこえて媒質 B 中に伝わる波の進行方向がもとの波の進行方向から傾いていることがわかります。各媒質中で波の伝搬速度に合わせて素元波の半径を変えただけですが、媒質境界面での波の屈折が予測できているわけです。大気中の光速

を 1 とすると水中の光速はおよそ 0.75 ですので、図中の波を可視光とすれば、図 2 に示すように、媒質 A、媒質 B をそれぞれ大気と水だと考えることができます。空中の点 P から見たとき、水中の点 O にある物体は光の屈折によって点 O' の位置に見えます。また境界面で反射する波に着目すると、入射角  $\theta_{in}$  と反射角  $\theta_{out}$  が等しくなることもわかります。

このようにホイヘンスの原理は単純な考え方ですが、反射や屈折が進行波の波面に与える影響を予測するには強力なツールになります。しかし本稿のテーマは反射でも屈折でもなく、回折です。回折とは、波が障害物をこえてその裏側へも伝搬する現象なのですが、これが一筋縄ではいきません。回折を理解するには干渉 (Interference) を知る必要があります。干渉を理解するには重ね合わせの原理 (Superposition Principle) を知る必要があります。さらに干渉や回折を予測するには前述のホイヘンスの原理では不十分なので、ホイヘンス-フレネルの原理 (Huygens-Fresnel Principle) を用います。それぞれについて、順を追って見ていきましょう。

### 3. 重ね合わせの原理

異なる方向から伝搬してきた波が同時に同じ点を通過するとき、その点での振幅はその点におけるそれぞれの波単独での振幅の総和となるが、通過した後、それぞれの波は互いの影響を受けることなく、それぞれの

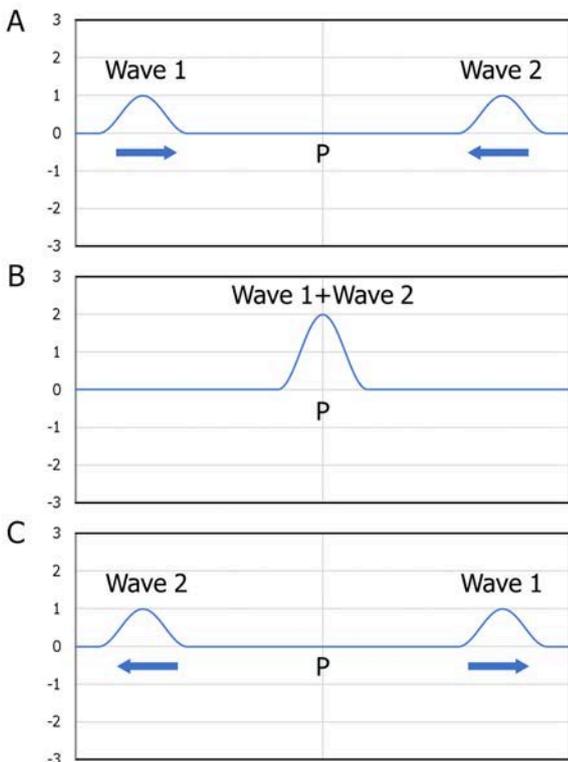


図 3. 同相の波の重ね合わせ  
右方向へ伝搬するピーク振幅 1 の Wave 1 と左方向へ伝搬するピーク振幅 1 の Wave 2 (A) が同時に点 P を通過するとき、点 P では振幅が  $1 + 1 = 2$  となる (B)。その後 Wave 1 は右へ、Wave 2 は左へ伝搬していく (C)。

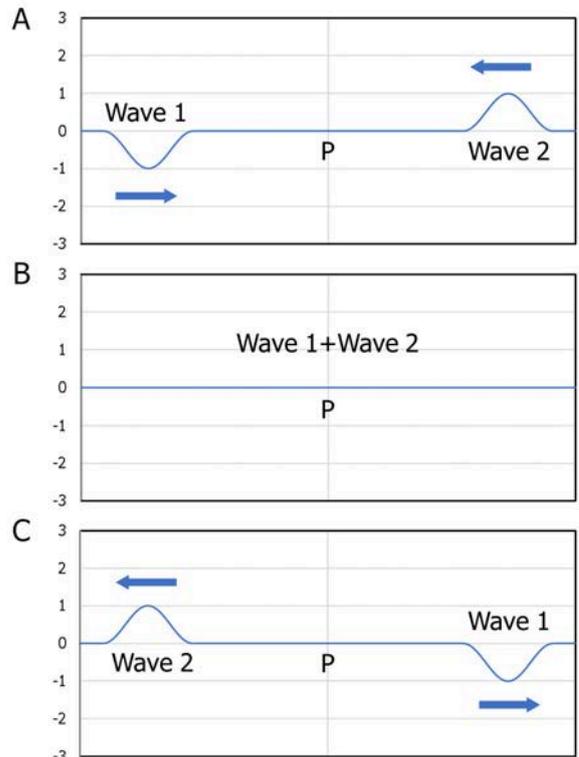


図 4. 逆相の波の重ね合わせ  
右方向へ伝搬するピーク振幅 -1 の Wave 1 と左方向へ伝搬するピーク振幅 1 の Wave 2 (A) が同時に点 P を通過するとき、点 P では振幅が  $1 - 1 = 0$  となる (B)。その後 Wave 1 は右へ、Wave 2 は左へ伝搬していく (C)。

進行方向に伝搬していく。というのが波の重ね合わせの原理です。

図 3, 図 4 は逆方向に進む二つの波が同時に点 P を通過する様子を描いています。図 3 では点 P において同相の波が重なるため振幅が増大しています (図 3, B) が, 図 4 では逆相の波が打ち消しあうため点 P で波が無くなったように見えます (図 4, B)。点 P をとおった後の波はそれぞれもとの振幅でもとの進行方向へ進みます (図 3, C および 図 4, C)。

#### 4. 干渉

複数の波が重ね合わさることにより, 新たな波形が生み出される現象を干渉と言います。図 5 の左図は点 A を波源とする球面波。中図は点 B を波源とする球面波。右図はそれらの波が同時に発生している様子を描いています。図は二次元なので球面波が円形波になっていますがご了承ください。振幅の変化が色の濃淡で表されています (プラス側の変位は白, マイナス側の変位は黒)。

図 5 の右図において, 白抜き矢印で示す方向では二つの波が同相 (どちらの変位もプラス側またはマイナス側) なので, 重ね合わせにより強め合っ明瞭な波 (振幅変化) が観察できます。黒矢印で示す方向では逆相になり, 打ち消し合っ波が見えなく (中間色のグレーに) なっています。

この例のように複数の波が重なって強め合ったり打ち消し合ったりするのが干渉です。もしもここでの波が単一波長の可視光 (つまり単色光) であり, 図 5 右図のように波の進む先にスクリーンが立ててあれば, そのスクリーンには, 光が当たって明るく照らされる部分と照らされない暗い部分が交互に並んだ縞模様が観察されるでしょう。そのような模様を干渉縞 (Interference fringe) と言います。

本稿のテーマである回折は干渉の一形態だと言えるのですが, 素元波の包絡面をつなぐことで波面を予測

するホイヘンスの原理では波の重ね合わせや干渉を表現することができません。そこでホイヘンス-フレネルの原理を利用します。

#### 5. ホイヘンス-フレネルの原理

ホイヘンス-フレネルの原理でも, もとの波面上のあらゆる点から, もとの波面と同じ位相の球面波 (素元波) が生じるのですが, この素元波は図 6 に示すように, もとの波の進行方向側で振幅が大きく, 反対側では振幅が小さいものと考えます。そしてすべての素元波の振幅を重ね合わせることによって次の波が合成されるものと考えます。

「ホイヘンスの原理と何が違うのか」って。そうですね。よくわかりませんね。回折を考える前にまず小手調べとしてホイヘンス-フレネルの原理を使って平面波の伝搬を予測してみましょう。

図 7 の下段は図中の下方向から進んできた平面波の先頭の波面が矢印で示す図の中央まで到達し, その波面上に素元波が生まれた直後の様子です。そこから一周期経過した状態が中段, さらに時間を進めたのが上段です。素元波の数は 7 個としています。

素元波はどれも球面状に広がっていきますが, それらの重ね合わせで描かれる波は平面波状に進むことが見て取れます。図 8 は同じ平面波を 60 個の素元波を用いて予測した結果です。素元波の数を増やしたことでシミュレーションの精度が上がり, よりきれいな平面波が予想されています。

平面波の未来の波面が平面波になるというあたりまえのことが, 球面波である素元波を用いて予測できたわけです。平面波の波面がその後も平面になることくらいなら, ホイヘンスの原理でも予測できるのですが, ホイヘンス-フレネルの原理を用いることにより, 波面だけでなく, 波の振幅変化まで予測できていますね。干渉や干渉の一形態である回折を考えるうえでは, このことが非常に重要なのです。前置きが長くなりました

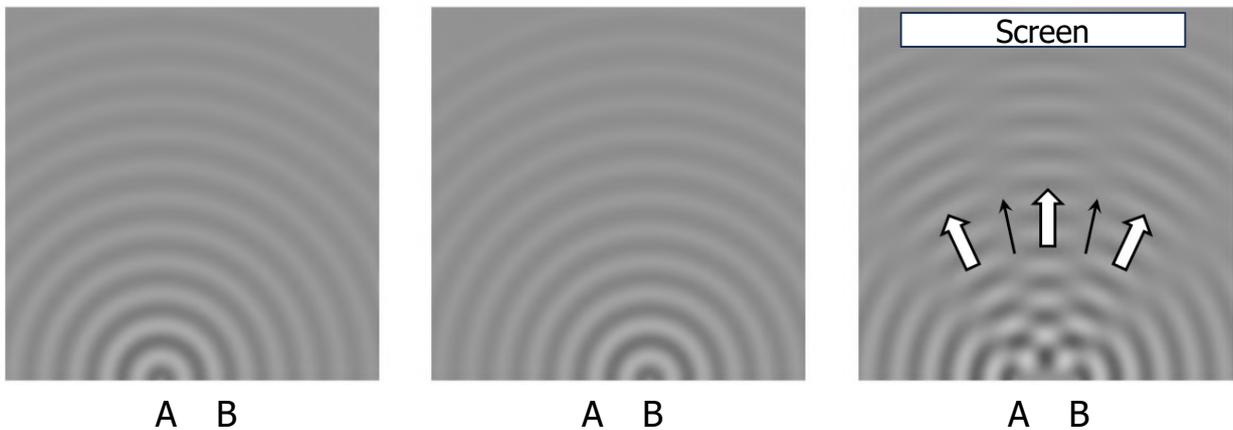


図 5. 二つの波の干渉

左: 点 A を波源とする球面波。中: 点 B を波源とする球面波。右: 二つの波が同時に発生している様子。二つの波は白抜き矢印の方向では同相で, 黒矢印の方向では逆相で重なる。振幅変化をグレースケールで表している。

が、いよいよ次節で回折について見ていきましょう。

## 6. 回折

ビルが立ち並ぶ表通りを一台の救急車が走行しており、あなたはビルを隔てて表通りと平行に走る裏通りを歩いているとします。あなたから救急車はビルの陰に隠れて見えませんが、救急車が鳴らすサイレンの音ははっきり聞こえます。ありふれた日常の光景ですね。ビルの反対側で発生したサイレンの音があなたの耳に届くのは、音波が障害物であるビルの外縁を回り込んで裏側まで伝搬しているからです。つまり音波が回折しているのです。一方で可視光も電磁波と言う波ですが、あなたの位置から救急車が見えないのは、可視光がビルの周囲を回り込まない、つまり回折しないということです。一体どうなっているのでしょうか。ここではスリットを通過する波を使って回折について考えます。

パーティションで仕切られた二つの部屋があり、このパーティションは波を透過させないものとします。ただしこのパーティションの中央付近には途切れ（スリット）があり、波はこのスリットを通過することができます。なお以降のシミュレーションではパーティションによる波の反射は無視するものとします。

図 9 の下段では、図中の下方向から進んできた平面波の先頭波面がちょうどパーティションに達しています。スリットの幅は波の波長よりも長いものとし、スリットを通過した波がどのように伝搬するのか、ホイヘンス-フレネルの原理を使って予想します。

中段は 素元波がまさに生まれた直後です。図では、スリット上に 9 個の素元波が描かれています。上段はさらに時間が経過した状態です。上段の図を見ると、グレースケールの濃淡図で描かれる波はスリット通過後ももとの進行方向、つまり図中の上方向には伝搬しています。しかし他の方向、特にパーティションのすぐ裏側は中間色のグレーのまま、波が横方向へは伝搬し

ていないことがわかります。図中の下方向から伝搬してきた波は、スリットをとおって正面方向に直進するだけで、障害物（パーティション）の裏へは殆ど回り込んで（回折して）いないわけです。

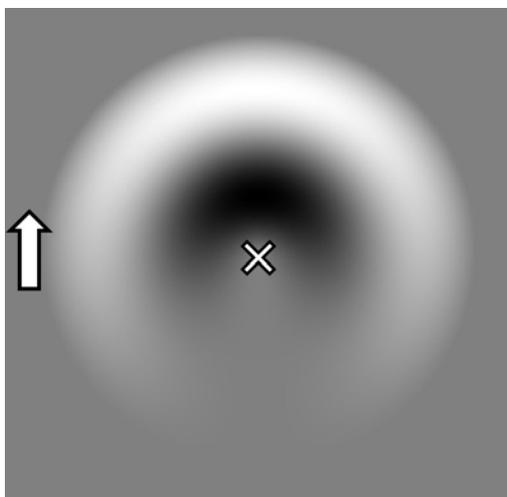


図 6. 素元波  
点 X から生じる素元波。振幅変化をグレースケールで表している。矢印はもとの波面の進行方向を示す。

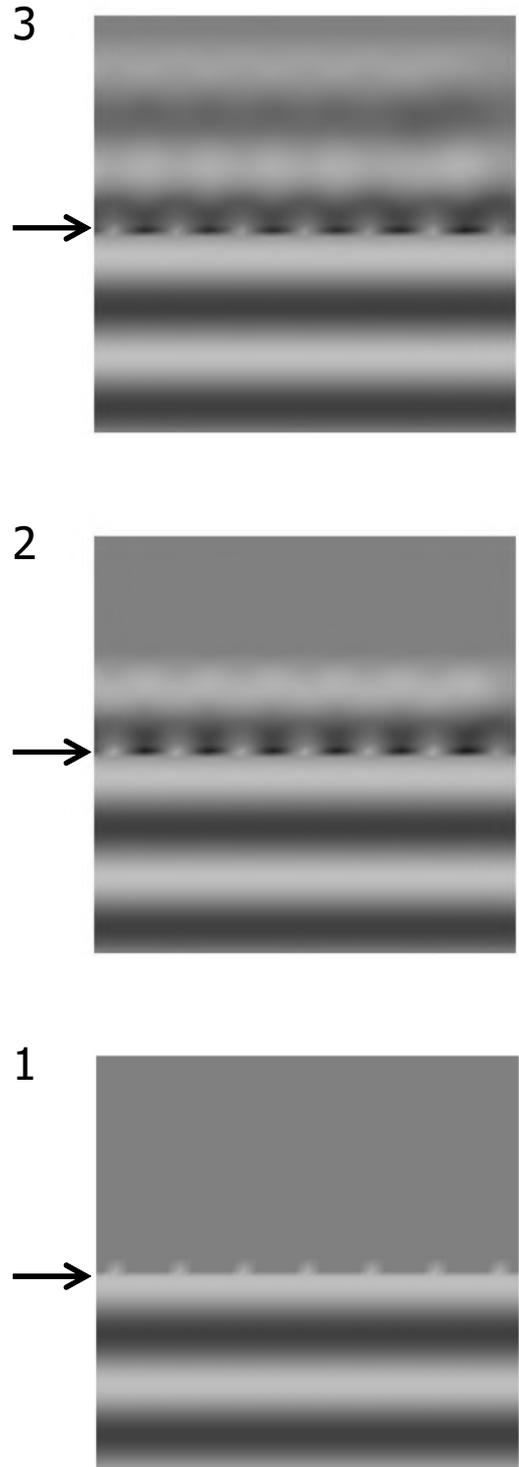


図 7. 素元波 7 個で予測した平面波の伝搬  
1 (下段) : 平面波の波面上に 7 個の素元波が生まれた直後。2 (中段) : その一周期後。3 (下段) : さらに時間が経過した状態。矢印は先頭波面の初期位置。

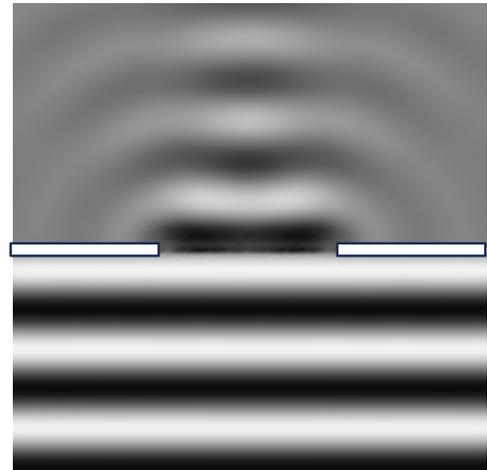
「えっ、これでは救急車のサイレンもビルの裏へは届かないじゃないですか！」ですって。そうですね。でもまだ続きがあります。図 10 も同様に、伝搬してきた平面波がスリットを通過したあとの様子を 9 個の素元波で予測したものです。1 (下段左) は平面波の先頭波面がパーティションに達したところ。2 (下段右) ではすでに素元波が広がり始めています。3 (上段左) は波がスリットを通過して一周期経過したところ。4 (上段右) はさらに半周期後です。平面波だった波がスリットを通過してからは球面波のように、正面だけでなく側方も含めて半球状 (2 次元の図では半円状) に広がりながら伝搬していることがわかります。つまりこの波は回折しています。図 9 の波と一体何が違うのでしょうか。

まず図 10 では、一見してスリット幅が狭くなっていますね。さらに波の波長が長くなっています。この結果、図 10 ではスリット幅よりも波の波長のほうが長くなっているのです。実際、図 10 のスリット幅は波の半波長よりも短く設定しています。図 9 と図 10 は、どちらのケースでも同じようにスリット上に 9 個の素元波を想定してシミュレートしていますので、それらによる干渉は当然起こっています。では、図 9 のようにスリット幅よりも波長が短い場合と図 10 のようにスリット幅よりも波長が長い場合でなぜ結果が異なったのでしょうか。

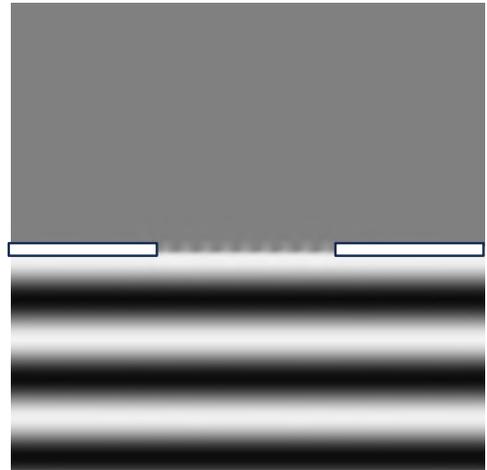
重ね合わせの原理を思い出しましょう。複数の波が同相の場合、波は強め合います。逆相の波同士は打ち消し合います。逆相というのは位相が半波長分ずれているということです。同じスリット上で生まれた 2 個の素元波が任意の観測点上で完全に打ち消し合うには、観測点までのそれぞれの伝搬経路長に半波長相当の差が生じる必要があります。

図 9 のようにスリット幅が波長よりも長ければ、スリットの裏側にあたる側方では最大でスリット幅に相

当する伝搬距離差が生まれるので、どの素元波にも必ず打ち消し合う素元波のペアが存在します。正面方向だけは伝搬距離に差が生まれなため、素元波は必ず同相で強め合います。その結果、波は正面方向には伝わりますが側方へは伝搬しにくくなります。



2



1

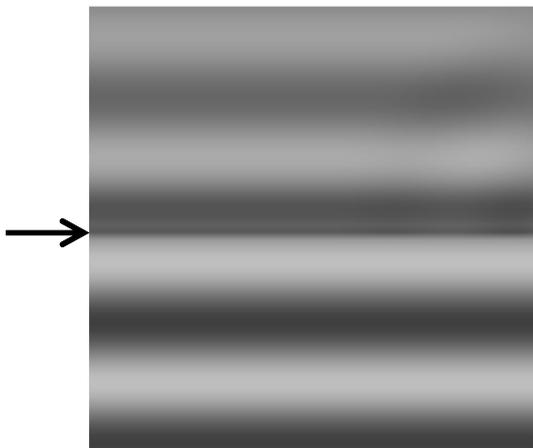
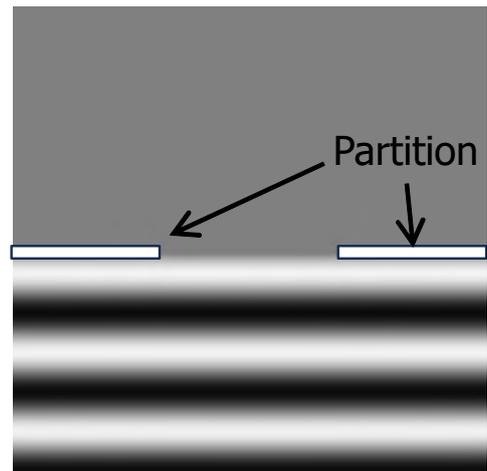


図 8. 60 個の素元波で予測した平面波の伝搬  
矢印位置より上半分は、矢印位置の平面上に並べた  
60 個の素元波から予測した波の様子。

図 9. 波長が短い波の回折

1 (下段) : 平面波の先頭波面がパーティションに到達した瞬間。2 (中段) : スリット上に並んだ 9 個の素元波が生まれた直後。3 (上段) : 波がスリットを通過してから十分に時間が経過した後。スリット幅が波の波長よりも長いケース。

これに対し図 10 のようにスリット幅が波の半波長よりも短い場合、任意の観測点までの経路長差は最大でも半波長以下ということになります。このため、観測点がスリットの裏付近であっても完全に逆相で打ち消し合う素元波のペアは発生せず、波はあらゆる方向に広がっていきけるわけです。

さて、図 10 ではスリット幅が波の半波長よりも短いために完全に打ち消し合う素元波ペアが生まれないうことになり、その結果、スリットの裏へも波が回折できたわけですが、波の波長が十分に長ければ、スリット幅が波の半波長より長くても回折は生じます。

素元波は球面波なので、広い方向に拡散しながら伝搬します。このとき素元波の振幅は伝搬距離に反比例して減少していくことになります。これを拡散減衰と言います。観測点までの経路長差が半波長になる素元波のペアがあったとしても、それぞれから観測点までの距離に十分な差があれば、つまり波の半波長が観測点までの伝搬距離に対して無視できないくらいに長かったなら、遠くから伝搬してくる素元波は近くから伝搬してくる素元波よりも遥かに減衰しているため、逆相で重なり合っても打ち消すには至りません。

図 11. I (上段) では、点 B から点 P までの距離が点 A から点 P までの距離よりも波の半波長分だけ長

くなっています (図中の  $\lambda$  は波の波長を表します)。したがって点 A と B で発生した 2 個の素元波は、観測点 P において逆相で重なります。もしもこれらの素元波の振幅が同じなら完全に打ち消し合うので、波は点 P の方向へ伝わらないはずですが、しかし点 B から点 P までの距離は点 A から点 P までの距離の二倍なので、点 P に到達するまでの拡散減衰により、点 B で発生した素元波のほうが余計に減衰します。このため観測点において、点 A で発生した素元波を点 B で発生した素元波で完全に打ち消すことはできません。では点 B と点 P を結ぶ直線上で観測点を遠ざけていくとどうなるのでしょうか。

II (下段) でも観測点 Q までの伝搬距離差は波の半波長ですが、点 Q が遠いので総伝搬距離とくらべると伝搬距離差はわずかです。拡散減衰による振幅差もわずかになります。このように観測点が遠ざかるにつれて振幅差が無くなっていき、素元波同士が打ち消し合うようになり、やがて波は届かなくなるはずですが。

図 11 に示す例でスリット幅が波の半波長より長いことはあきらかですが、I (上段) の波は回折して点 P まで伝搬できるわけです。つまり観測点までの伝搬距離に対して無視できないくらいの波長を持つ波なら、スリットの幅に関係なく回折すると言えます。

音源と観測点がビルを挟んだ反対側にあるとき、ビ

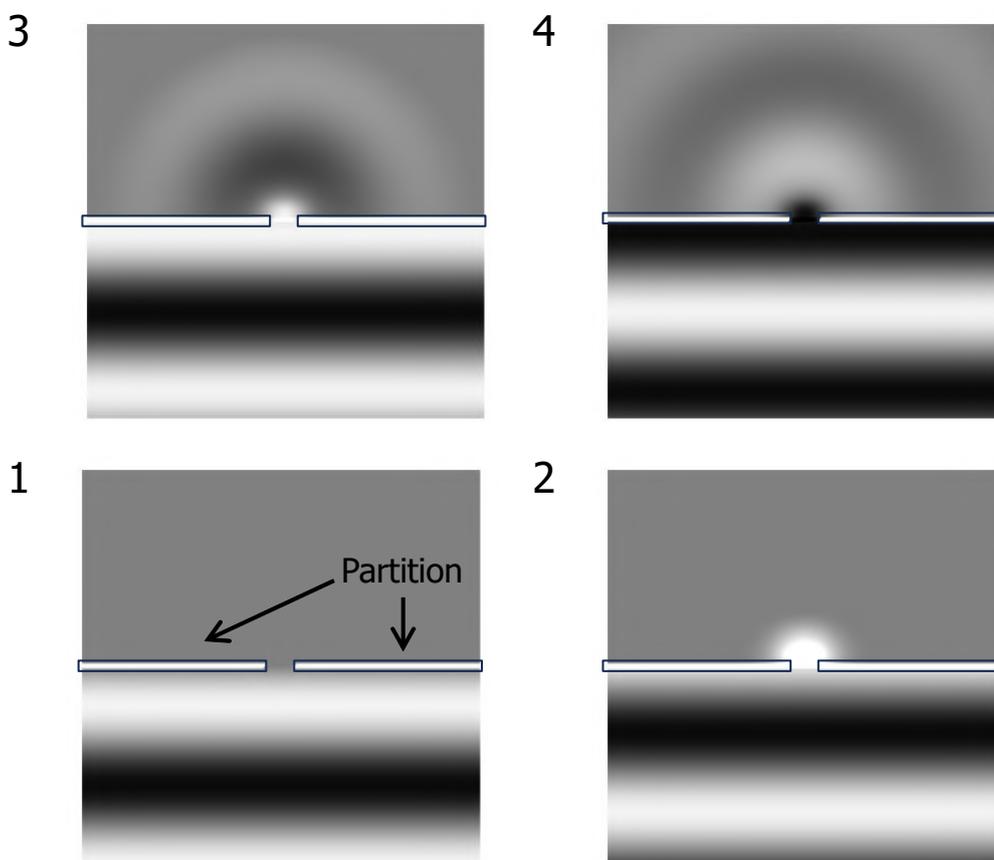


図 10. 波長が長い波の回折

1 (下段左) : 平面波の先頭波面がパーティションに到達した瞬間。2 (下段右) : スリット上に並んだ 9 個の素元波が伝搬し始めた様子。3 (上段左) : 波がスリットを通過してから一周期が経過した後。3 (上段右) : さらに半周期経過した状態。スリット幅が波の波長よりも短いケース。

ルの角から観測点までの距離にもよりますが、逆相になる素元波ペアのそれぞれから観測点までの距離差が数 m もあれば、観測点ではそれぞれの振幅に差が生じるので、素元波ペアは逆相で重なっても完全には打ち消し合わないのです。

空気中での可聴音の波長は、短ければ数 cm ですが、長いと 10 m をこえます。ですからビルの反対側で鳴っているサイレンの音がビルの周囲を回り込んであなたの耳に届くのです。

オーディオスピーカで音楽を鳴らしているとき、スピーカの前方だけでなく、後方にも音は聞こえますね。これも音楽のような可聴音であればスピーカの筐体の外縁を回り込んで後方へも伝搬するからです。

波長が 1 cm を下回るような超音波だとそうはいきません。わずかな数 mm の経路差でも逆相の素元波ペアが生まれ、しかもわずかな距離差では拡散減衰による振幅差も生じないので逆相の素元波同士がしっかり打ち消し合います。このような超音波はスピーカが点音源とみなせるくらい小型でない限り後方へは殆ど伝搬しません。

可視光も電磁波という波ですので、幅が波長よりも十分に短いスリットをとおせば回折します。しかし可視光の波長は数百 nm のオーダーなので、わたしたちが肉眼で見る巨視的な世界では殆ど回折しません。あなたが救急車とビルを挟んだ反対側にいるとき、可視光の波長がビルのスケールに対してあまりにも短いた

め回折は殆ど生じず、救急車の姿は見えないのです。

## 7. まとめ

他の条件が同じなら、波は波長が長くなるほど回折しやすくなるのです。そしてホイヘンス-フレネルの原理を駆使すれば、観察したい波の波長と障害物のサイズから回折の程度を予測することができるわけです。例えば、波長が数 mm 程度の超音波を計測したいなら、直径が数十 cm 程度の物体でも障害になるとか、波長が数 m の低周波音ならばビルの裏でも観測できるのか。予測ができれば計画も立てやすくなるはず。実際の計測でも役立てていただけると幸いです。

前述のとおり光速は空中よりも水中のほうが遅いのですが、音速は空中にくらべて水中のほうが 4 倍から 5 倍速くなります。これは同じ周波数の音の波長が水中では 4 倍から 5 倍になることを意味するので、同じ周波数の音なら水中のほうが空中よりも回折しやすいわけです。言い方を変えると、同じ大きさの障害物の影響が空中にくらべて水中では小さくなると言えます。水中録音に携わるならこのようなことも覚えておきましょう。

なお本稿ではホイヘンスの原理とホイヘンス-フレネルの原理を区別していますが、一般にはホイヘンス-フレネルの原理のことをホイヘンスの原理と呼ぶことも多いので注意が必要です。

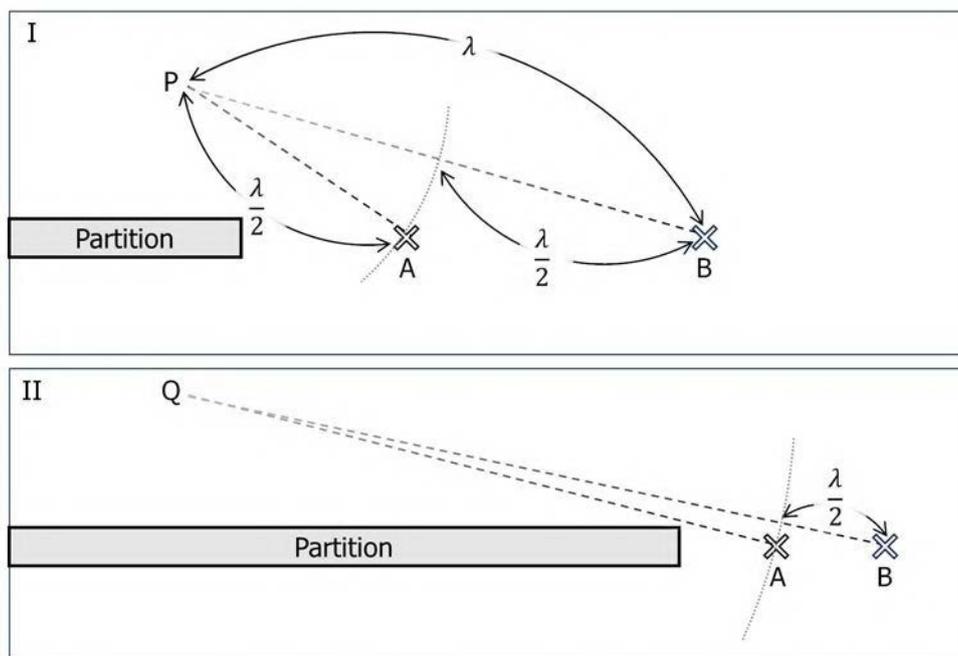


図 11. 2 個の素元波の伝搬距離差が回折に及ぼす影響

点 A を波源とする素元波と点 B を波源とする素元波を、I では点 P で、II では点 Q で観測しており、それぞれの素元波が伝搬する距離の差は波の半波長だとする ( $\lambda$  は波長)。よって観測点において二つの素元波は逆相になる。I では点 B で発生した素元波の伝搬する距離が点 A で発生した素元波が伝搬する距離の二倍になっているので、拡散減衰により、点 P において前者の振幅は後者の振幅の半分になり、逆相で重なっても完全には打ち消し合わない。II では 2 個の素元波が伝搬する距離の差は総伝搬距離にくらべるとわずかなので、点 Q における振幅差もわずかとなり、波は点 Q においてほとんど打ち消し合う。

## 育休を経験して思うこと

藤岡 慧明 (同志社大学 研究開発推進機構)

昨年5月、我が家に第二子となる長男が誕生しました。これに合わせて、私は約2か月間の育児休業を取得しました。本コラムでは、育休中の生活のことや、経験して思ったこと・感じたこと等についてつらつらと書いてみたいと思います。

### ● 育休取得から休業まで

業界によって、研究者界隈でもラボによっては男性の育休は取りづらいということは耳にしていたので、担当教員の先生に「2人目ができたので、育児休業を取得したいと思っている」と申し出た際、おめでとう！と喜びながら快諾していただいたことは、とても嬉しくて有難いことでした。それから育休取得の具体的な手続きを始めたわけですが、この頃感じたのは、父親の育児参加を推進させるための法整備(令和4年創設の産後パパ育休など<sup>[1]</sup>)が進んでいるなあということです。ただその後、私が育休申請する際には、男性の育休が珍しいとのことで多少ごたつきましたし、私の周りの方々の話や、保育園での様子を見ていても、父親の育児参加はまだあんまり増えてなさそうやなあと感じていましたが、直近の国の調査<sup>[2]</sup>では、男性の育休取得率も大きく向上した(令和5年10月時点)とのことで、確実に進んできているようです。

そして、無事に休業期間に入りまして、まずは妻は体を休めることが最優先ということで、授乳以外のほぼ全ての家事育児を私が担当するようにしました。また、新生児期(～4週)は、昼夜を問わず2-3時間おきに授乳する必要があり、授乳もスムーズにすることができないので、夜間授乳は私が対応して、昼間に睡眠を取るようになっていました。この頃は自分で言うのも何ですが、なかなか頑張ってたんじゃないかなと思います。夜に上の子と一緒に寝落ちして、妻に幾度となく叩き起こされたこと以外は。

このような実際の育児は、1人目を経験してる分スムーズだったと思います。ただ、スムーズとは言え、当然ですが2人いる分1人目の時より大変で、朝晩はバタバタです。1人だけの時は歯磨きを長い時は20分くらいかけて自分でさせていましたが、2人になるとそんな時間はありません。日によっては一分一秒の争いです。でも、色々大変だということ差し引いても、賑やかで楽しく、十分に充実した毎日を送れています。妻をはじめ育児の力になってくれる妻の友人や私の父母・義父母等、それからこのような状況を理解して色々相談にも乗って下さる担当教員の先生にも、日々感謝です。

### ● 育休を終えて

今回、育児休業を取得して本当に良かったなと思います。取得しなければ後悔していたと思います。その理由としては、前述のように新生児ともう1人を育児することが思いのほか大変だったこと、それに加えて、妻が体調を崩しがちだったことです。こう書くとイレギュラーなことと思われるかもしれませんが、出産直後の母親はホルモンバランスの変化等で様々な体調の変化が出ると言われています。今回、育休を取得せずに仕事を続けていたら家庭が崩れていてもおかしくなかったと思います。

ただ、2ヶ月間四六時中ずっと大変だったというわけではなく、幸いにも1人目が保育園に通えているので、妻と子供が昼寝している間などは余裕がありました。育休期間がちょうどフィールドワーク繁忙期ということもありましたので、その時間に学生や先生とslackで連絡などは取っていました。育児に慣れて次第に落ち着いてくると余裕も増えてきて、夫婦で交代して息抜きしたりしましたし、子供のことや仕事のことなどを立ち止まってゆっくり考える時間があつたのも良かったなと思います。余裕があれば、少し長めに育休を取るのもいいかもしれません。

育児に際しては、家庭によって事情は様々だと思いますし、父親の育休取得が特に珍しくもない昨今、余計なお世話かもしれませんが、もしも迷っているなら、これから考えるような世代の男性の皆様にも、育休を取得することをお勧めします。夫婦円満、家庭円満のためというのが、私がお勧めする一番大きな理由ですが、他にも、子供の成長に寄り添えること、自分自身の時間が増えること、給付金が支給されること等も考えれば、ポジティブな面が結構多いと思います。さらに給付金については次の4月から増額されるようです(最大28日間の手取り10割相当の給付<sup>[3]</sup>)。育休取得にあたって考えるべき事項はここに書いたことだけではないと思いますが、このコラムが1人でも育休取得を考えている方々の参考になり、1人でもその背中を押すことが出来たら嬉しく思います。

### 参考文献

- [1] 厚生労働省リーフレット『両親で育児休業を取得しよう！』 <https://www.mhlw.go.jp/content/11900000/001006151.pdf>
- [2] 厚生労働省 令和5年度雇用均等基本調査結果 <https://www.mhlw.go.jp/toukei/list/dl/71-r05/07.pdf>
- [3] 厚生労働省リーフレット『2025年4月から「出生後休業支援給付金」を創設します』 <https://www.mhlw.go.jp/content/11600000/001372778.pdf>

## お知らせ

# BiP News～「BiP Up 2024」研究計画発表会の案内～

佐藤 克文（東京大学 大気海洋研究所）



2024 年度に募集した「[BiP Up](#)」には、以下の 6 件の研究が採択されました。「[BiP Up](#)」は、[BiP-earth Project](#) が主催するプロジェクトで、BiP の新たな研究の発展を支援することを目的とし、採択された研究に対してデータロガーを無償提供するものです。

このたび、採択者による**研究計画発表会**を下記のとおり開催いたします。本発表会では、採択者の皆様に、これまでの研究の背景や、バイオリギング調査の計画について発表していただきます。また、研究会会員間で情報を交換し、研究計画をより実現可能なものへとブラッシュアップする機会とすることを目的としています。

発表会には**現地参加**のほか、**Zoom によるオンライン参加**も可能です。採択者の中にはバイオリギング調査が未経験の方も含まれますので、研究会会員および賛助会員の皆様にはぜひご参加いただき、調査の助言やディスカッションにご協力いただければ幸いです。

### 開催概要

日時) 2025 年 3 月 21 日 14:00~16:30

会場) 東京大学大気海洋研究所 (217 号室)

発表内容) 各発表 20 分 (質疑時間を含む)

#### 1. 井上 巨人 (神戸大学)

ウミガメの目線から探る Enrichment Device の効果

#### 2. 大谷 健太郎 (神戸大学大学院)

ニホンイシガメはいつ・どこで産卵するのか？

#### 3. 鎌田 真寿 (東京大学大学院)

オニヒトデはいつサンゴを捕食するのか？ -室内実験と野外観察で迫る-

#### 4. 堀口 祐輔 (東京海洋大学大学院)

「コイ農法」におけるコイの水田への適応戦略

#### 5. 本藤 聡仁 (京都府立西舞鶴高等学校)

高校生による京都府冠島のオオミズナギドリの日周行動解明と普及啓発活動

#### 6. 吉田 誠 (東京大学大気海洋研究所)

琵琶湖在来コイの春夏秋冬：大湖沼における魚類の超長期行動データ取得手法の開発

### 参加申し込み

参加をご希望の方は、以下の[応募フォーム](#)から **3月14日**までにお申し込みください。

右の QR コードからも申し込みが可能です。

<https://forms.gle/d5y6XcjbXtrhEw49>



申し込みいただいた皆様には、後日 Zoom リンクをお送りします。

BiP Up では以下の賛助会員であるバイオリギング機器メーカーにご協力いただきました。来年度も BiP Up を継続しますので、今後も賛助会員の皆様のご協力をお願いいたします。

### 協力企業



# BiP を使ったバイオリギング解析に挑戦~その2

- ・ generate\_kml: Google Earth で表示
- ・ plot\_DT: 深度・水温の時系列グラフを表示

渡辺 伸一 (リトルレオナルド社/麻布大学獣医学部)



本記事は、「BiP を使ったバイオリギング解析に挑戦」シリーズの第2回です。[前回の記事](#)では、Python を用いたバイオリギングデータの基本的な処理として、CSV ファイルから必要な情報を抽出する方法 ([filter\\_csv](#)) を紹介しました。

今回は、次のステップとして、動物の移動経路を Google Earth 上で視覚化する [generate\\_kml](#)、深度と水温データを時系列グラフとして表示する [plot\\_DT](#) の2つのプログラムを解説します。

Python を使ったデータ解析の経験がない方でも、JupyterLite を活用すれば、特別なソフトウェアのインストールなしに Python を実行できます。本記事では、JupyterLite を利用して、データの可視化に必要な Python コードを紹介します。なお、JupyterLite の基本的な使用方法については、[前回の記事](#)をご参照ください。

## generate\_kml : Google Earth で表示

GPS などで測位した緯度経度データを Google Earth で視覚化するには、緯度経度データを KML (Keyhole Markup Language) 形式に変換する必要があります。本プログラム [generate\\_kml](#) は、BiP でダウンロードした緯度経度データを元に、KML ファイルを作成するものです。作成された KML ファイルを Google Earth に読み込むことで、動物の移動経路を地図上に表示できます。

解析に必要な以下のデータを [BiP Help サイト](#)からご自身の PC へダウンロードしてください。

## 使用データ ([data\\_gps.csv](#))

BiP に公開されている オオミズナギドリの GPS データ (Katsufumi Sato, AORI, University of Tokyo) の一部を使用しています。AxyTrek (Technosmart) で計測されたデータから、前回紹介したプログラム ([filter\\_csv](#)) で GPS に関係する情報のみを抽出しています。データには、time (日時)、latitude (緯度)、longitude (経度)、height\_above\_mean\_sea\_level (高度)、ground\_speed (対地速度)、number\_of\_satellites (測位衛星数) が含まれます。

## 実行手順

1. JupyterLite を開き、CSV ファイルをアップロードする。
  2. Python コード ([generate\\_kml](#)) をテキストエディタで開き、ノートブックにコピーし、実行する。
- 1, 2 の手順について、詳しくは前回記事をご参照ください。

```
import pandas as pd
import xml.etree.ElementTree as ET

# 入力ファイルと出力ファイルのパス
input_file = "data_gps.csv"
output_file = "output.kml"

# CSVファイルを読み込み
df = pd.read_csv(input_file)

# Latitude と Longitude が空でないデータのみ抽出
df_filtered = df.dropna(subsets=['latitude', 'longitude'])

# KMLのルート要素を作成
kml = ET.Element("kml", xmlns="http://www.opengis.net/kml/2.2")
document = ET.SubElement(kml, "Document")

# ラインストリングのための座標リスト
coordinates = []

for index, row in df_filtered.iterrows():
    latitude = row['latitude']
    longitude = row['longitude']
    altitude = row.get('height_above_mean_sea_level', None)
    time = row['time']

    # 高度情報を含む場合と含まない場合で座標を設定
    coord = f"{longitude},{latitude}" if pd.notna(altitude) else f"{longitude},{latitude}"
    coordinates.append(coord)

    # 各ポイントのPlacemarkを作成 (時刻情報を含む)
    placemark = ET.SubElement(document, "Placemark")
    description = ET.SubElement(placemark, "description")
    description.text = f"Time: {time}"
    point = ET.SubElement(placemark, "Point")
    ET.SubElement(point, "coordinates").text = coord

    # ビンを非表示にするスタイルを設定
    style = ET.SubElement(placemark, "Style")
    iconstyle = ET.SubElement(style, "IconStyle")
    ET.SubElement(iconstyle, "scale").text = "0" # ビンを非表示にするスケール設定

# ラインストリングを作成
linestring = ET.SubElement(document, "Placemark")
name = ET.SubElement(linestring, "name")
name.text = "Flight Path"
line = ET.SubElement(linestring, "LineString")

# ラインの座標を設定
ET.SubElement(line, "coordinates").text = " ".join(coordinates)

# ラインのスタイル設定
style = ET.SubElement(linestring, "Style")
linestyle = ET.SubElement(style, "LineStyle")
ET.SubElement(linestyle, "color").text = "ff0000ff" # 赤色 (Google Earth形式のABGR順)
ET.SubElement(linestyle, "width").text = "3" # ラインの太さ

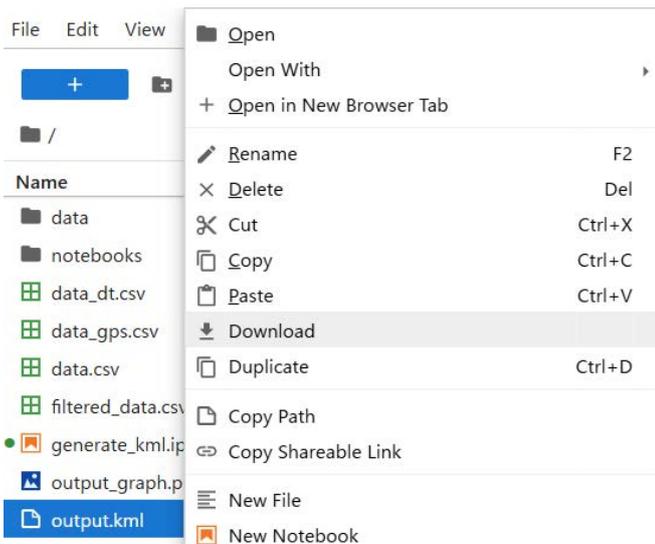
# KMLを保存
tree = ET.ElementTree(kml)
with open(output_file, "wb") as f:
    tree.write(f, encoding="utf-8", xml_declaration=True)

print(f"KMLファイルの作成が完了しました。出力ファイルは {output_file} に保存されています。")
```

KMLファイルの作成が完了しました。出力ファイルは output.kml に保存されています。

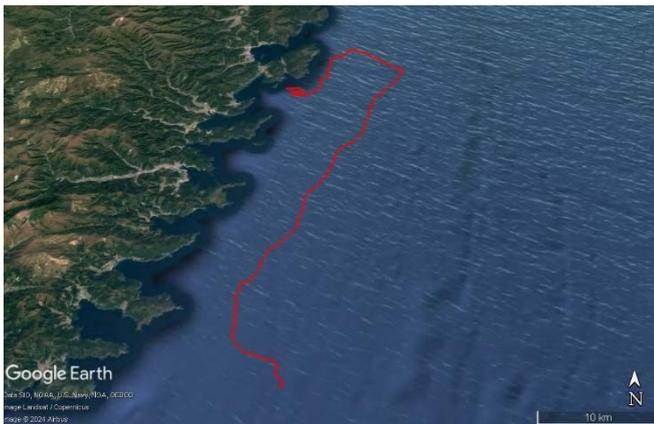
3. 作成された KML ファイルをダウンロードする。
- ノートブックのコードの下に「KML ファイルの作成が完了しました。出力ファイルは output.kml に保存されています。」と表示されていれば、KML ファイルが

作成されています。画面左から output.kml を選び、ダウンロードしてください。



#### 4. Google Earth で開く

PC に Google Earth をインストールしていれば、output.kml をクリックすると Google Earth 上に軌跡が表示されます。



GPS に限らず、緯度経度情報 (time, latitude, longitude) を含んだ BiP フォーマットのファイルであれば、KML ファイルを作成することができます。JupyterLite 上で必要に応じて入力ファイル (input\_file) と出力ファイル (output\_file) の名称を変更してご使用ください。

```
# 入力ファイルと出力ファイルのパス
input_file = "data_gps.csv"
output_file = "output.kml"
```

#### plot\_DT : 深度・温度データの時系列グラフを表示

潜水動物の行動を解析する際、深度や水温の変化を時系列で可視化することが重要です。本プログラム [plot\\_DT](#) は、BiP でダウンロードした深度・水温データを読み込み、時系列グラフを作成します。

#### 使用データ

・ [data\\_dt.csv](#)

BiP に公開されている [マッコウジラの潜水データ](#) (提供 : Kagari Aoki, Teikyo University of Science) の一部を使用しています。データには、time (日時)、depth (深度)、temperature (水温) が含まれます。

#### 実行手順

1. JupyterLite を開き、CSV ファイルをアップロードする。
2. Python コード ([plot\\_DT](#)) をテキストエディタで開き、ノートブックにコピーし、実行する。

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# CSVファイルの読み込み
data = pd.read_csv('data_dt.csv')

# 日時情報をpandasのdatetime型に変換
data['time'] = pd.to_datetime(data['time'])

# グラフの作成
fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, sharex=True, figsize=(10, 8))

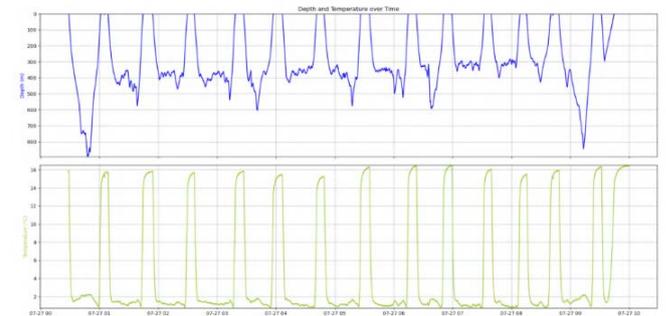
# 縦軸1 (Depth) の設定 (青色)
ax1.plot(data['time'], data['depth'], color='blue', label='Depth')
ax1.set_ylabel('Depth (m)', color='blue')
ax1.set_ylim(data['depth'].max(), 0) # 0を上にしてdepthの最大値を下に設定
ax1.grid(True)
ax1.set_title('Depth and Temperature over Time')

# 縦軸2 (Temperature) の設定 (黄緑色)
ax2.plot(data['time'], data['temperature'], color='yellowgreen', label='Temperature')
ax2.set_ylabel('Temperature (°C)', color='yellowgreen')
ax2.set_ylim(data['temperature'].min(), data['temperature'].max())
ax2.grid(True)

# 横軸の設定 (共通のtime軸)
ax2.set_xlabel('Time')

# グラフの保存
plt.tight_layout()
plt.savefig("output_graph.png", dpi=300, bbox_inches='tight') # 画像として保存
plt.show()
```

3. 出力された図を確認し、ダウンロードする。ノートブックのコードの下に深度 (上) ・水温 (下) の時系列図が表示され、Jupyter 上に画像ファイルがファイル名 (output\_graph.png) で保存されているのを確認してください。



深度・水温データを含んだ BiP フォーマットのファイルであれば、時系列図を表示することができます。JupyterLite 上で必要に応じて入力・出力ファイル名を変更するほか、縦軸の表示範囲や線の色を変更して、ご使用ください。

次回は、加速度データの可視化を使ったプログラムを紹介する予定です。

## 総会ご出席のお願い

■以下の要領で総会を開催いたします。会員の皆様におかれましては、ぜひご出席をお願いいたします。

日時 令和7年3月24日(月)10:00～

会場 Zoomによるオンライン開催

■ご欠席される場合は、委任状を3月23日(日)までにご提出いただきますようお願い申し上げます。

■zoomURL および委任状は、会員宛に2月14日にメール送付しておりますのでご確認ください。

## 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。

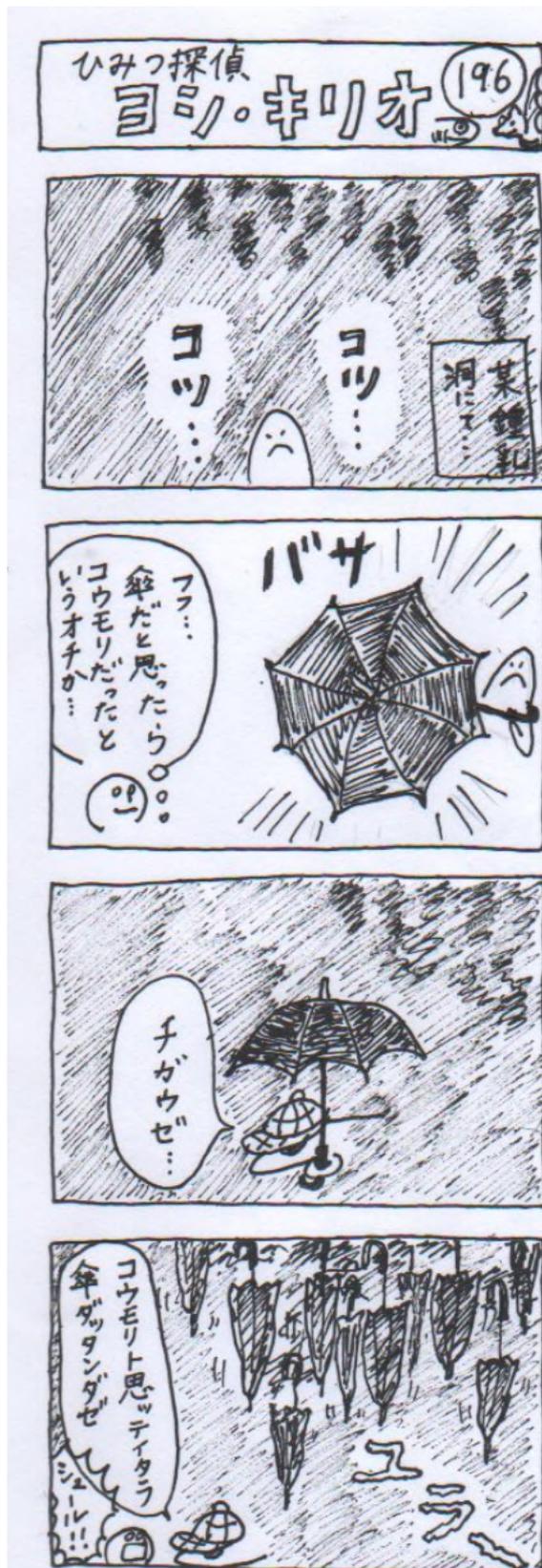
正会員5000円、学生会員(ポスドク、任期付ポストも含まれます)1000円です。

2年間会費未納ですと総会前に自動的に退会になりますのでご注意ください。

■[入会・会員情報更新はこちら](#)をクリック

## バイオロギング本のご案内

■多くの方に愛されているバイオロギング本。初めてバイオロギング本が産声をあげたのは、2009年でした。出版からすでに15年以上が経過しており、皆さんにたくさんお求めいただいたことから、絶版(在庫なし)となっています。そしてバイオロギング本の弟(バイオロギング2)が産まれてから8年が経ち、こちらも残りわずかとなりました。絶版となる前に是非お求めください！ 出版社「京都通信社」のWebページから購入できます。 <https://www.kyoto-info.com/kyoto/>



## 編集後記



毎年同じことを書いておりますが、あっという間にまた1年が過ぎてしまいました...先週末、20数名分の卒論の提出を済ませ、ほっと一息...数年前から事故(?)防止のため、学内締め切りの前日をラボ内の卒論提出のゼミ内締め切りにしています。前日は例年通りの修羅場でしたが、無事、全員提出できました。

研究紹介として、今年のBLS8で来日したYossi Yovelのラボに所属するOmer Yinonに書いていただきました。表紙の写真も彼のものです。そして日本では数少ない、貴重なコウモリ研究仲間の福井先生、西海さんにもそれぞれ研究の紹介を執筆いただきました。また今回、音の解説を、音響学のプロの蘆原先生に執筆いただきました。生物の音声の計測方法について、バイオロギング研究会メンバーの方も含む、様々な方面からご相談いただくことがあります。ただ私たちも超音波以外や、水中,,となると経験が少ないことから、ここ最近蘆原先生によく相談に乗っていただいています。生物の音声研究は、未だ一部のモデル動物に限定的です。バイオロギングとともに、生物の音声にも興味をもっていただき、これを機に、一度、ご自身が研究対象とされている生物の音声計測にもチャレンジしていただければ嬉しい限りです(もっと詳しい音の専門書をお探しでしたら、蘆原先生の著書はアマゾンでも購入可能ですので、ぜひ!). さらに育児で奮闘していた記憶がすっかり薄れてきている私ですが、今まさに育児真っただ中の藤岡君に、久々となる育児コラムを書いてもらいました。育児休暇はお母さんだけでなく、お父さんにとってもかけがえのない大切な時間です。

それでは最後に今年もいつもの一言を。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(^.^)!【S.H】

AIとの対話を経て自殺したアメリカの少年のニュースを目にし、衝撃を受けました。詳細な経緯は不明ですが、あなた(AI)のいる世界に行きたいから待って、というテキストがスマホアプリに残されていたとか。学生も研究者もAIを活用する場面が増えつつある昨今、技術の進化は素晴らしい反面、その使い方には注意が必要だと改めて感じました。時代は変わり続けますが、そんな流れの中で、ふと立ち止まってしみじみと考えることが増えたのは、歳を重ねた証拠でしょうか・・・

【S.S.K】

早咲きの梅が花を身にまといはじめ、日々の寒さの中にも、少しずつ春の訪れを感じるようになりました。繰り返す寒暖の中で季節の移ろいを味わいながら、桜花爛漫の景色を心穏やかに待ちたいと思います。【H.M】