研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

研究題目	野性コウモリから学ぶ長距離ナビゲーションアルゴリズム	報告書作成者	藤岡慧明
研究従事者	藤岡慧明		
研究目的	ある目的地までのナビゲーションを行うには周囲環境を効果的にセンシングする必要がある。物体検知や距離測定にはステレオカメラや赤外線、レーダー、超音波などのセンサ方式があり、現行のロボット技術等においては各センサの特徴に応じてこれらを組み合わせるのが主流である。これらの技術では環境認識を効果的に行える一方で、装置の大型化や実時間処理の困難さ、高価格化の問題点も生ずる。**介護・警護用やレスキュー用のロボットなど、自律移動型ロボット技術の発展に伴い、これらの問題を解決するためのブレイクスルーが求められる。** 一方で、コウモリは自ら放射した超音波のエコー情報のみから周囲環境を認識し、体長数ミリの動く飛翔昆虫を正確に定位・捕食することを実現している。小指の先ほどの小さな脳で実現される高度なソナー機能を調べるために、生物ソナー研究分野では実験室内（人工環境下）での緻密な行動計測に基づいた脳神経学的なアプローチが多く成されてきた。その一方で**自然環境下での野性コウモリに対する行動計測**は、重要性が認識されながらも計測の困難さ（夜に飛行、行動範囲の広さ）のために、**コウモリの音声の特徴を調べるといったような生態学的な側面からの研究に終始していた**。近年になって、計測装置のハイスペック化に伴いマイクロホンアレイ技術が急速に発展し、野外におけるコウモリの３次元音響動態計測が可能となり、採餌飛行時におけるマルチターゲットセンシングなど、野性コウモリのユニーク且つ高度な超音波ナビゲーションの実態が明らかになってきた。しかしながら固定マイクロホンを用いた受動観測では、小規模な範囲でしかコウモリの行動を追跡することができず、極めて限定的な行動計測しか行えないという問題点があった。 そこで本研究では、近年になって小型化が急速に進んでいる動物搭載型のデータロガーをコウモリに装着することで、**野外におけるコウモリのナビゲーション行動の全貌を明らかにする**ことを目指す。データロガーによって大規模ナビゲーション軌道を計測するとともに、マイクロホンアレイによってコウモリの３次元音響動態を計測することで、**野性コウモリの大規模音響ナビゲーションの戦略を明らかにする**ことを目指す。		

研究内容	本研究では、採餌のために出巣して帰巣するキクガシラコウモリをターゲットとし、まず(1)**超小型 GPS データロガーを野性コウモリに搭載し、ねぐらや採餌場までの長距離ナビゲーション行動を計測・調査する**。キクガシラコウモリは、超音波を用いてセンシングを行うコウモリ種の中では、ヤマコウモリ（超音波ソナーに関する知見が少ない）を除けば最も大きな種の一つである（体重が約 25-30 g）。そのため、本研究の対象種として選定した。長距離ナビゲーション行動の計測のため、まずコウモリに搭載可能な小型 GPS データロガーの選定・調達と、捕獲・回収などの実験プロトコルの構築を事前に行う。構築したプロトコルを用いて、コウモリをねぐらにて捕獲した後に GPS データロガー（GiPSy-5、Technosmart 社製、約 2.2 g）を装着してリリースし、後日同ねぐらにて再捕獲して回収する。回収したロガーからコウモリの長距離軌道を構築し、長距離ナビゲーションについて分析・検討を行う。また、コウモリがどのような経路を移動しながらどこで採餌飛行を行っているか把握する。その上で、（2）**申請者がこれまでに開発した大規模マイクロフォンアレイシステムを用いて、1で特定した場所における詳細な音響ナビゲーション行動を計測・調査する**。そして、1・2 で得られたデータと知見を、(3)**申請者がこれまでに構築した数理モデルを用いて軌道解析するとともにモデルを拡張させ、最終的に、目的地までをセンシングしながら移動する音響ナビゲーションモデルとして再構築する**。 コウモリは自ら信号を出して周囲をセンシングするため、他の動物の行動からは得られない意思決定プロセスについて分析することが可能である。これまでの研究で、我々はコウモリの３次元飛行動態を表現した数理モデルを新規に構築し、野外実験とその数理モデル解析から、飛行軌跡からコウモリの”意思”を抽出することに成功している。具体的には、野性のコウモリが複数のターゲットの情報に基づいて標的までの接近軌道を計画していることを明らかにしている。この数理モデリング分析を発展させながらコウモリの長距離ナビゲーション軌道を解析し、意思分析に基づいたコウモリのナビゲーション戦略を、**ヒトの小指の先ほどの小さな脳で情報処理できる“チープデザイン”の観点から、高度な計算は伴わない簡易なアルゴリズムを表現した音響ナビゲーションモデル構築を目指す**。

研究のポイント	野性コウモリの長距離音響ナビゲーションアルゴリズムについて知るには、野性コウモリがねぐらから出巣して移動しながら採餌を行う際の長距離軌道を計測する必要がある。しかしながら、国内外においても超音波ソナー能力を持つコウモリに対して、このような長距離軌道計測が行われた例はほぼ皆無である。**よって、本研究内容における第一のポイントは、まず長距離ナビゲーション軌道を計測するプロトコルを構築して、実際に計測することである。**そして、計測した軌道から、コウモリが移動および採餌を行う場所を把握し、そこにマイクロホンアレイを構築して3次元音響動態計測を行うことで、採餌場所やそこに存在するターゲット(獲物)までに、どのような超音波センシングを伴ったナビゲーションを行っているかを分析する。この際のポイントとなるのは、**得られたデータについて、工学的な観点から行動を解析し、評価すること**である。超音波を用いた小規模空間から大規模空間におけるナビゲーションに際して、効果的・効率的なセンシングおよび軌道計画の戦略やアルゴリズムについて計測データから検討し、定式化することを目指す。
研究結果	飼育下におけるコウモリを用いて実験室内にて実験プロトコルを構築し、北海道におけるコウモリのねぐらにおいて9個の GPS ロガーの装着(図1 A)を行った結果、4つのロガーを回収することに成功し、初めてキクガシラコウモリの長距離ナビゲーション軌道の構築に成功した(図1 B)。これらの軌道について調べたところ、直線的な移動パターンと、採餌を行う探索パターン(図1 B 左側の白い四角内)が多く見られた。移動時においては、道沿いや谷沿いを飛行している様子が見られ(図1 C、 D)、これより**地形情報を超音波ソナーで検知・利用しながらナビゲーションを行っていることが示された**。そして、この計測で特定された採餌場所にてマイクロホンアレイを展開し(図1 E)、3次元音響動態計測を行った。しかしながらコウモリの音声は計測されず、これより**キクガシラコウモリは特定の採餌場所を利用していないことが分かった**。キクガシラコウモリのナビゲーション時の音響利用についてのデータが得られなかったため、他の地域(図2 A)にて音響動態の計測を試みた。その結果、獲物探索時における飛行軌跡とソナー音声の同時計測に成功し(図2 B、 C)、**コウモリが飛行環境の複雑さに応じてソナー音の時間長や放射間隔を変化させながら標的の探索を行っていることが分かった**。
今後の課題	本研究によって、これまで知られて来なかった野性コウモリの長距離音響ナビゲーション時におけるソナー戦略および行動パターンが明らかになってきた。しかしながら、野性コウモリの長距離音響ナビゲーションアルゴリズムを具体的にアルゴリズムとして構築するには至っていない。この目標を達成するためには、もっと多くのコウモリの行動パターンを把握するとともに、数値シミュレーション等によってその行動パターンを評価する必要がある。一晩に大量の獲物を捕食するコウモリが、どのようにして採餌場所(および獲物)までのナビゲーションを行っているのか。本研究からは、コウモリが地形情報を利用しながら移動し、局所的に採餌を繰り返しながらも、いつも特定の採餌場所を利用しているわけではないことが明らかになった。今後、**資源探索において最適な行動パターンである Levy flight の軌道とコウモリの軌道との比較によってコウモリの飛行パターンについて評価を行うとともに、その際のソナー利用についてもさらなる計測および検討を加える**ことで、野性コウモリの長距離音響ナビゲーションアルゴリズムとして定式化することを目指す。

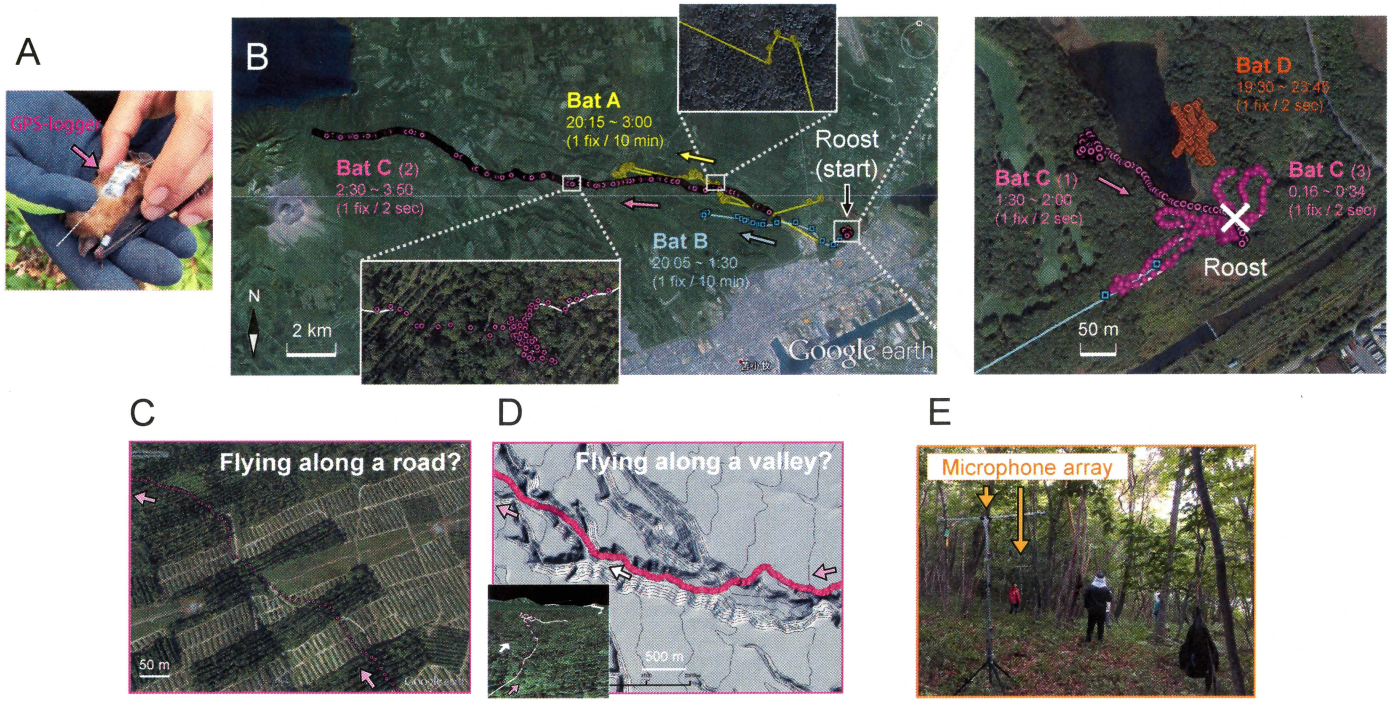

図1. コウモリの長距離音響ナビゲーション行動の計測。(A) 捕獲したコウモリに搭載された GPS データロガー。(B) コウモリの採餌飛行時における長距離軌道。全頭(4 頭)中 3 頭について、ねぐら(Roost)から出発し、時折留まりながら北西方向に移動している。(C、D) Bat C の飛行軌跡の拡大図(マゼンタ)。矢印は飛行方向である。この図から、道や谷に沿って飛行していたことが見て取れる。(E) 軌道から得られた採餌場所における音響動態計測。矢印で示しているのがマイクロホンアレイである。Bat D が集中的に飛行した場所(図1 B 右側参照)で計測したが、コウモリは全く現れなかった。

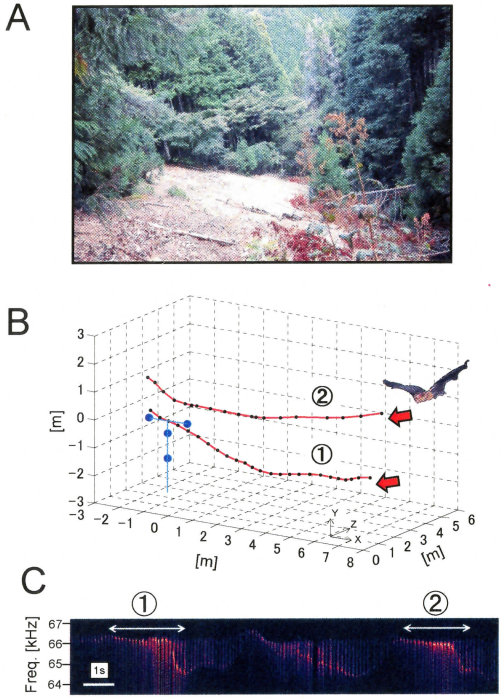

図2. コウモリの音響動態計測。(A) 実験場所。兵庫県佐用郡にある洞窟脇から撮影。(B)(C) キクガシラコウモリの獲物探索時における飛行軌跡とソナー音声のスペクトログラム。C の①と②の区間で軌道構築に成功した。