

博士学位論文審査要旨

2013年2月20日

論文題目：

A Study on the Biosonar of Bats during Natural Hunting Based on Microphone-array Measurement

(マイクロホンアレイ計測に基づいた野外での採餌飛行時におけるコウモリの生物ソナーに関する研究)

学位申請者：藤 岡 慧 明

審査委員：

主 査： 生命医科学研究科 教授 渡 辺 好 章

副 査： 生命医科学研究科 教授 力 丸 裕

副 査： 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所
エネルギー・生物機能利用技術グループ長 赤 松 友 成

要 旨：

コウモリが、超音波によるエコーロケーション機能をその生存戦略として駆使して、微小な飛翔昆虫を検知し採餌活動を展開していることはよく知られている。このような生物が生来的に有する洗練された優れた機能を詳細に分析・解析することによって得られる新たな知見は、次世代の高度技術社会実現へ向けた基盤技術として期待されている。本論文の対象であるコウモリのエコーロケーション機能も次世代の周囲環境認識技術としての展開が期待されており、近年その解明が急速に進展し、さまざまな観測を通じて人工ソナーに比べてその優れた機能が明らかにされつつある。しかしながら、これらの解明は主として人工環境下における実験や観測に基づいており、これらで得られた結果と自然界におけるコウモリの採餌行動との結びつきについては十分な考察が未だ行われてはいなかった。

本論文で著者は、大規模マイクロホンアレイシステムによる音響信号解析から、コウモリの採餌飛行とエコーロケーション行動の同時観測を行う手法を提案し、自然環境下において採餌飛行を行う野生コウモリのソナー行動戦略の全体像を計測することに初めて成功している。著者はこのシステムを用いて、数ミリ程度の小さな獲物の発見・捕食を1秒未満という極めて短時間で連続的に行っている観測対象種であるアブラコウモリの、ダイナミックでかつ洗練された採餌行動の全容を明らかにしている。また、これらの行動のうち、複数の獲物を連続捕獲時におけるパルスの放射方式に着目し、コウモリが自身の飛行行動と関連付けてそのパルス放射を極めて効率的に運用していることも見出ししている。さらに、これらの行動を考察するために、飛行軌道と放射パルスの関係に着目した数理モデルを提案し、このモデルを用いると効率的な連続採餌行動を説明できることも示している。

本論文で得られた成果は、既存の人工ソナーシステムの設計においても新しい重要な知見を与えると同時に、動物行動学の成果としても学術的に高く評価できる。よって、本論文は博士(工学) (同志社大学) の学位論文として十分に価値あるものと認める。

総合試験結果の要旨

2013年2月20日

論文題目：

A Study on the Biosonar of Bats during Natural Hunting Based on Microphone-array Measurement

(マイクロホンアレイ計測に基づいた野外での採餌飛行時におけるコウモリの生物ソナーに関する研究)

学位申請者：藤岡 慧明

審査委員：

主査： 生命医科学研究科 教授 渡辺 好章
副査： 生命医科学研究科 教授 力丸 裕
副査： 独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所
エネルギー・生物機能利用技術グループ長 赤松 友成

要 旨：

本論文提出者は、2009年4月に本学大学院生命医科学研究科生命医科学専攻に入学し、それぞれの年度において優れた研究成果を挙げている。また、本研究科修了に必要な所定の単位を修得するとともに、英語の語学試験にも合格しその能力についても十分な能力があると認定されている。

本論文の主要部分は、J. Acoust. Soc. Am. 誌等の当該分野の有力誌に5報掲載されている。さらに、4報の国際会議ならびに15件の国内会議にて筆頭著者として報告されている。また、これらの発表論文のうちの3報は、それぞれの学会において優秀発表賞等に出選されていることから分かるように、その論文内容の質の高さは高く評価されている。2013年1月19日午後2時から約1時間15分にわたり提出論文に関する学術講演会（博士論文公聴会）が開かれ、種々の質疑応答が行われたが、提出者の説明によりいずれも十分な理解が得られた。

さらに公聴会終了後、論文に関係した諸問題について、審査委員による口頭試験を実施した結果、提出者の十分な学力を確認することができた。

よって、総合試験の結果は合格であると判定した。

博士學位論文要旨

論文題目：

A Study on the Biosonar of Bats during Natural Hunting Based on Microphone-array Measurement

(マイクロホンアレイ計測に基づいた野外での採餌飛行時におけるコウモリの生物ソナーに関する研究)

氏名： 藤岡 慧明

要旨：

コウモリは、自身が放射した超音波パルスのエコーを聴取・分析することで、微小な飛翔昆虫を精確に探知・定位し（エコーロケーション）、捕食を繰り返すことを可能としている。本研究では、このように高度に発達した生物ソナーシステムが本来的に有する特性や機能を、工学的視点より詳細に分析・理解することで、コウモリのセンシングにまつわる洗練されたテクニックを明らかにすることを狙いとした。そのために大規模マイクロホンアレイシステムを構築することで、自然環境下にて採餌飛行を行うコウモリのソナー行動の全体像を計測することに初めて成功した。これまで知られていなかった、広い3次元空間で展開される野性コウモリの生物ソナーの詳細な特性を明らかにし、センシングに関わる具体的な行動戦略について検討を行った。

第1章では、本研究の意義と目的を述べた。コウモリの脳は人の小指の指先ほどの大きさしかなく、1個（口または鼻孔）の送信機と、2個（耳）の受信機という必要最小限のハードウェア構成となっている。従って生物ソナー機構は、人工ソナーや既存のセンシングシステムに比べて信号処理の効率性や柔軟性において、格段に優れていると認めざるを得ない。このようなコウモリの優れたソナー機構に関して、緻密な行動実験が可能な、室内における飛行実験がこれまでに数多く行われてきた。しかしながら、実験室という空間的な制約のために、コウモリが本来的に有するソナー能力を最大限観測できないという問題点があった。コウモリは元来、自然環境下での捕食活動のためにソナー機構を獲得・発達させてきたであろう故に、野外でこそコウモリによる本来のソナーパフォーマンスが発揮されると考えられる。そこで本研究では、広い空間で繰り返される野性のアブラコウモリ (*Pipistrellus abramus*) のソナー行動に着目し、動態音響計測に着手することで、彼らの洗練されたソナー戦略の解明を目指した。

第2章では、本研究に関連する先行研究を紹介し、それらの問題点を挙げ、本研究で実施する方法について述べた。これまでの野外におけるコウモリの生物ソナー研究では、多くが単一のマイクロホンを用いた生物学視点からの音声観測に留まり、近年になって赤外カメラを併用した音響と動態の同時分析が行われるようになった。室内では決して見られないダイナミックなコウモリの動態と生物ソナーの本来的な特性が徐々に明らかにされてきている一方で、これらはいずれもごく限られた空間を対象とした2次元平面における動態計測であった。コウモリは野外において3次元空間をダイナミックに飛行しながらエコーロケーションを行う。従って、コウモリの3

次元的な動態の全体像を捉え、ソナー音声と同時分析することが、彼らのソナー戦略解明に向けて重要な課題となると考えられる。これらのことから本研究では、マイクロホンアレイシステムの構築を提案し、野性コウモリの詳細な音響動態分析を目指した。

第3章では、4個のマイクロホンから構成されるアレイを構築し、野外におけるアブラコウモリの3次元飛行軌跡とソナー音声の計測を行い、その結果から明らかとなった採餌時における基本的なソナー行動について述べた。獲物探索時においてコウモリは、周波数定常型のパルスを放射し、その後、獲物を発見し接近するに伴い、周波数変調型に変化させ、パルスの放射間隔 (Inter-Pulse Interval, 以後 IPI) を減少させた。これらの特性より、コウモリの飛行昆虫に対する射程距離が平均で2-3 m、最大で約5 mであることが分かった。また時折、1秒未満の短い時間間隔で連続的に数ミリの大きさの獲物を発見・捕食するという高度なソナー行動も確認できた。さらに、コウモリは獲物への接近を開始する際にパルスの周波数定常部を伸長し、その後、飛行高度を下降しながら直線的に獲物に接近することが分かった。接近直前に見られたパルス長の伸長は、獲物の位置を確実に検知するための行動と考えられる。また直線的な飛行経路からは、コウモリが獲物の動きを予測している可能性や、飛行を単純化することで、獲物捕獲直前の複雑なエコーロケーションに集中していることが予想された。本章ではこのように、野性コウモリにより発揮される生物ソナーの特性が、ダイナミックな飛行動態との両立によって実現されていることを、マイクロホンアレイ計測によって初めて明らかにした。

アブラコウモリは野外において2-3秒の時間間隔で次々と獲物の捕食を繰り返すことが報告されている。また上述のように、アブラコウモリは1秒未満という大変短い時間間隔でダイナミックに獲物の捕食を行っている。これらより、獲物の捕食を繰り返す野性コウモリの生物ソナーとしての振る舞いに、高度で洗練されたセンシング戦略が観測できると考えられる。そこで第4章では、マイクロホンアレイシステムを大型に改良し、約20 m四方で繰り返される採餌飛行の全体像を、初めてトラッキングすることに成功した。その結果、コウモリの飛行パターンは、捕食頻度が高いときには狭い範囲で複雑な軌跡を描き、捕食頻度が低いときほど広い範囲でシンプルな巡回軌道を描くことが分かった。一方、獲物探索時において IPI が時折伸張し (以後 Long IPI), Long IPI が捕食頻度の低いときほど頻繁に観測されることが分かった。これまでの研究から、コウモリは IPI を標的距離に応じて変化させることが知られている。従って、獲物密度が低い際に見られた円軌道を描きながらの Long IPI は、コウモリが哨戒距離を時折伸張することで、新たな獲物の発見確率を向上させている、興味深い可能性を示唆している。このようなセンシングや飛行パターンのアクティブな制御が、コウモリによる効率的な標的探索のためのソナー戦略である可能性が、本章より初めて示された。

前章までに、野性コウモリが獲物までの位置やその分布状況などに応じて、飛行パターンやパルス放射パターンを柔軟に制御していることを明らかにしてきた。これより、コウモリは採餌飛行の際に状況に応じて“注耳”する方向も巧みに選択していると考えられる。そこで第5章では、マイクロホンアレイに更なる改良を加えることで、野外におけるコウモリのパルス放射方向を3次元飛行軌跡と併せて計測することに初めて成功した、その成果について述べた。コウモリは標的探索時において時折、パルス放射方向を飛行方向と他の特定の方向にほぼ交互にダイナミックに変化させていることが分かった。さらに、それに応じて放射パルスの時間周波数的な音響特性も変化していたことから、コウモリが複数の対象からのエコー列を時分割で処理していることを

見出した。一方、複数の獲物を連続的に捕食する際、1匹目に接近する前に2匹目に向けられたパルス放射があること、そして1匹目の捕食直後、探索期を経ずに2匹目への接近飛行を開始することが分かった。これよりコウモリは、複数の獲物を検知した際には、それらの位置情報を処理し、連続的に捕食できる効率のよい飛行ルートを選択している可能性が示唆された。本章ではこのように、パルスの時間周波数的な特性だけでなく、パルス放射方向も巧みにコントロールすることで、コウモリが野外において効率的な採餌飛行を実現していることが示唆された。

しかしながら、上記の計測から明らかとなったコウモリの様々な行動に関しては、その目的や効果については考察するに留まり、検証には何らかの新たな手法が求められる。そこで第6章では、数理モデルを用いた分析を新たに導入することで、上記の音響動態計測により示唆されたコウモリのソナー戦略の効果を分析した。本章の前半では、標的探索時における Long IPI の効果を、モンテカルロ法を用いた探索面積の計算により評価・分析した。これより、コウモリの描いたような円軌道において Long IPI が時折発生する際に、直線軌道とランダムな軌道に比べて探索面積が顕著に大きくなることが示された。これより、旋回しながら時折 IPI を長くすることが獲物の発見確率を高めること、またコウモリのように放射パターンを時折変化させることで、標的の探索を効率化できることが示された。本章の後半では、コウモリが連続的な捕食の際に、複数の獲物を検知してルートを選択している可能性の検証を狙いとして、獲物2匹に対するコウモリの動態を数理モデル化し、実験データを分析した。その結果、コウモリの双方の獲物に対する Attention の推移が、彼らの動態より見え始め、構築モデルが飛行軌跡からコウモリの Attention を分析するための有用なツールとなる可能性が示された。

第7章では、本研究を総括し、今後の展望について述べた。本研究では、大規模マイクロホンアレイシステムを開発、野外にて構築することで、これまで室内では観測されなかった、野性コウモリによるダイナミック且つ洗練されたセンシングのテクニックを明らかにすることに成功した。そして、これまでにコウモリの生物ソナーに対して行われてこなかった、数理モデルを用いた採餌行動分析によって、コウモリのソナー行動の効果、およびモデル分析の有用性を示唆することができた。本研究より、小さな脳とシンプルなハードウェアしか有さないコウモリが、いかにして採餌を効率化し、センシングに工夫を施してきたのか、野性コウモリから具体的な行動戦略を初めて見出した。これらは既存のセンシングの概念にも重要な知見を与えると考えられる。