

# 博士学位論文審査要旨

2019年2月14日

論文題目： Strategies for Mitigation of Signal Jamming in Bat Biosonar  
コウモリのバイオソナーにおける信号妨害の低減戦略

学位申請者： 長谷 一磨

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 飛龍 志津子

副査： 名古屋大学大学院環境学研究科 教授 依田 憲

要 旨：

コウモリが超音波を利用して、光の無い夜間や洞窟内で自由に飛行し採餌行動を行っていることは、エコーロケーション機能としてよく知られている。近年の計測機器や信号処理技術の進展によって、単体のコウモリに対してはこの独特の機能の解明は飛躍的に進展し、人工技術には無い生物の持つ「賢さ」が随所に見出されてきている。一方、多数のコウモリが狭い洞窟内において相互に衝突することなく飛行する仕組みは、技術者達を魅了し続けており、近年では自動運転への応用の観点からも注目を集めつつある。このようなコウモリの衝突回避行動はエコーロケーション機能と関係があるとは推定されているが、コウモリがどのような賢さをもってこの行動を実現しているのかについては不明であった。

本論文で著者は、集団飛行時のコウモリ間の衝突回避機能に着目し、ユニークな観測手法を駆使して回避機能に潜む生物の持つ賢さの解明を行っている。著者は、ユビナガコウモリを観測対象に、単体飛行個体にエコーロケーション音声を模擬したさまざまな種類の妨害音声を提示し、観測対象個体のエコーロケーション音声に生じる変化を詳細に観測している。その結果、コウモリは妨害音声提示後 150ms 以内に自身の FM 終端周波数を 2kHz 程度上昇させることを見出している。著者は、この終端周波数の変化が衝突回避に用いられていると考え、観測システムを多チャンネル化し、集団飛行時における終端周波数変化観測に成功している。すなわち、4 個体のコウモリを同時に飛行させたとき、各個体は互いに終端周波数を 1kHz 程度変化させ、各個体間の信号を動的に分離し衝突回避を実現していることを見出している。また工学的視点から、終端周波数を降下させた FM 音は、コウモリ間相互のエコーを分離できる最良の時間変化パターンであることを、各個体間信号の相互相関関数を計算することによって確認している。さらに、ニホンキクガシラコウモリのような CF-FM コウモリにおいては、この種の持つドップラーシフト補償機能も混信防止に役立っている可能性のあること、ならびにパルス放射のタイミングを調整することによって他個体の放射パルスによるマスキングの影響を低減し混信回避を実現している可能性についても言及している。

本論文で得られた成果は、生物の持つ賢さの工学的利用を顕在化させる可能性を示唆しており、今後の超音波による周囲環境センシング手法研究に新たな方向性を与えている。また、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

2019年2月14日

論文題目: Strategies for Mitigation of Signal Jamming in Bat Biosonar  
コウモリのバイオソナーにおける信号妨害の低減戦略

学位申請者: 長谷 一磨

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 飛龍 志津子

副査: 名古屋大学大学院環境学研究科 教授 依田 憲

要 旨:

本論文提出者は、2016年4月に本学大学院生命医科学研究科医工学・医情報学専攻医情報学コース後期課程に入学、さらに本学のリサーチアシスタントならびに日本学術振興会の特別研究員(DC2)にも就任し、各年度において精力的な研究活動を展開してきている。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、学位取得について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、Communications Biology 誌や JASA (米国音響学会誌) 等に既に掲載され高い評価を得ている。さらに、後期課程在学中に、11報の国際会議ならびに10報の国内会議において、得られた成果を報告している。また、これらの発表論文のうちの1報は、日本動物心理学会において招待講演に選出されていることから分かるように、その提出者の研究活動の質の高さは関係学会から高く評価されている。2019年1月12日午後3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認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： **Strategies for Mitigation of Signal Jamming in Bat Biosonar**

コウモリのバイオソナーにおける信号妨害の低減戦略

氏名： 長谷 一磨

## 要旨：

生物は様々な形で情報伝達を行う。中でも、音による情報伝達はヒトの会話や、カエルやコオロギ、鳴禽の求愛など、種を超えて大多数の動物に利用されている。通常、音声コミュニケーションは同種や他種が発する音声や、自然環境が作り出す雑音、さらには都市化によって増加の一途をたどる人為起源の雑音などが存在する環境で行われる。雑音環境下で、生物がどのように効率よく情報伝達を行うのかを理解することは、雑多な情報が混在する中で必要な情報を抽出する神経メカニズムを解明することだけでなく、人間が利用する情報伝達技術の改良にも繋がると考えられる。

イルカやコウモリは、自ら超音波を発し、周囲環境からのエコーを聴取、分析することで、視覚に頼らずとも聴覚のみで周囲の環境を把握するエコーロケーションを行う生物ソナーである。エコーロケーションにおいて、動物は信号の送り手であるだけでなく、受け手でもある。そのため、生物ソナーをモデルとして研究することで、雑音環境下でどのような信号を発するかという送り手側の戦略だけでなく、同時に雑音環境下での信号抽出メカニズムなどの受け手側の適応についても詳細に調べることが可能である。

コウモリは社会性が高く、集団で移動や採餌を行うことが知られている。コウモリがエコーロケーションに使用する音声は時間周波数構造が非常に単純であり、種間で類似している。これらのことから、コウモリが集団で飛行する際には、他の個体の発した音声自身のエコーの聴取を妨害する可能性がある。しかし、コウモリは集団飛行時にも他の個体と衝突することなく飛行する。本論文では、コウモリの集団飛行に着目し、類似する他個体の音声が存在する中で、目的エコーをコウモリがどのように抽出しているのかを調べた。

第1章では、コウモリのエコーロケーションについての基本的な知見を紹介した。特に、コウモリが自然環境下でエコーロケーションを行うにあたって問題となるであろう、①聴覚マスキング、②クラッターエコーによる干渉、③他個体の音声との混同について、これまで得られた結果と、いまだ未解明の点を述べた。

第2章では、飛行中のコウモリに搭載し音声を記録できるテレメトリマイクロホンシステムを用いて、エコーロケーション音声を模擬した妨害音声を呈示した際のコウモリのエコーロケーション音声に生じる変化を検討した。観測対象種は、エコーロケーションに短い下降型の FM (Frequency-modulated) 音 (周波数 100-45 kHz, 時間長 3 ms 程度) を用いるユビナガコウモリ (*Miniopterus fuliginosus*) を用いた。コウモリは自身の放射音声の終端周波数に重畳するか、それよりも低い終端周波数の妨害音声に対して、呈示後 150 ms 以内に終端周波数を約 2 kHz 上昇させた。これら結果は、コウモリが妨害音と自身のパルスの終端周波数に応じて自身の音声の終端周波数を素早く適応的に変化させることで、エコー聴取の混乱を回避することを示唆する。

第3章では、様々な周波数変調パターンを持つ妨害音声をコウモリに呈示し、エコーロケーション音声の変化が、どのような特徴を持つ音響的干渉によって誘発されるのかを調べた。コウモリは、エコーロケーション音声を模擬した妨害音声と、それを時間反転させた音声、さらには、周波数定常音の呈示に対して、自身の音声の終端周波数を変化させた。一方で、エコーロケーション音声を模擬した妨害音声と同じ周波数帯域、時間長を持つが、周波数が線形に時間変化する

FM音の呈示に対しては、放射音声の終端周波数を変化させなかった。この結果は、コウモリが時間周波数構造ではなく、周波数構造に基づいて音響的な干渉を分析し、自身の音声の特徴を適応的に変化させることを示唆する。

第4章では、テレメトリマイクロホンシステムを改良し、多チャンネル録音を可能にした。これによって、ユビナガコウモリが複数で飛行する際の音声を計測することに成功した。集団飛行によって生じる混信状況下で自身の音声を抽出するために、コウモリがどのように自身の放射パルスを変化させるかを検討した。コウモリが単独で飛行する際には、エコーロケーションに使用する音声の終端周波数帯域は類似していた。一方、4個体同時に飛行させると、コウモリは互いに終端周波数を1kHz程度シフトさせ、異なる終端周波数帯域を使用した。さらに、音声の個体間類似度は単独飛行時よりも集団飛行時に有意に減少することを明らかにした。また、エコーロケーション音声を模擬したFM信号を作成し、音響特性の変化に対し信号間類似度がどのように変化するかを評価した。終端周波数をわずかにシフトさせることが、コウモリ型音声の信号間類似度の低下に最も貢献することを計算によって証明した。加えて、集団飛行時にはエコーロケーション音声の音圧が約3dB増加することを確認した。本章では、集団飛行時に他個体の音声が存在する中で、エコーの信号対雑音比を改善し、さらには信号間の類似度を低下させることで、自身のエコー聴取を促進することを示した。この種のコウモリの信号は、広帯域の下降FM部と、その終端が伸長した疑似CF部から構成される。そのため、コウモリ型の信号をセンシング信号として用いると、相互相関処理によって高い時間分解能が実現できるだけでなく、混信をわずかな周波数シフトで回避できることが明らかになった。

第5章では、同様に多チャンネルテレメトリマイクロホンシステムを用いて、CF-FM音をエコーロケーションに用いるニホンキクガシラコウモリ (*Rhinolophus ferrumequinum nippon*) の集団飛行時の音声を計測した。このコウモリは、放射パルスの周波数をアクティブに変化させることで、自身の飛行によっておこるドップラー効果をキャンセルし、エコー周波数を狭い周波数帯域内に保つ(ドップラー補償行動)ことが知られている。本章では、パルスの音響特性だけでなく、エコー周波数の分析も行った。コウモリは単独飛行時に比べると、集団飛行時に音声の時間周波数構造を変化させた。一方で、エコー周波数は変化しなかった。自身のエコー周波数と、自身に届く他の個体のパルス周波数を比較すると、自身のエコー周波数は狭い帯域内に補償されていたのに対し、自身に届く他個体のパルス周波数は大きく変動することがわかった。自身が受信する他個体のパルスの周波数は、コウモリ間の相対的な飛行速度によって生じるドップラー効果や、各コウモリがそれぞれ行うドップラーシフト補償行動の影響を受ける。コウモリの聴覚系は、ドップラーシフト補償されたエコー周波数に対して非常に鋭く同調することがわかっている。これらは、ドップラーシフト補償行動を行うことが、混信防止のために役立つ可能性を示唆する。

第6章では、電気生理学的な手法を用いて、自身の弱いエコーに対する感度が、他個体の強い音声によるマスキングによってどのように影響を受けるかを調べた。コウモリの発する音声は130dB SPLを超るともいわれる非常に強烈なものである。一方で、聴取しなければならない昆虫からのエコーは、大気中での超音波の減衰や昆虫による散乱によって非常に弱くなる。本章では、2つのFM音(コウモリのエコーロケーション音声を模擬した音)を様々な時間間隔や周波数差で呈示し、その際の聴性脳幹反応を覚醒下のアブラコウモリ (*Pipistrellus abramus*) から記録した。2つの音の時間間隔が短いとき、1つ目の大きな音(80dB SPL)によって、2つ目の弱い音(60dB SPL)に対する反応は小さくなった。さらに、1つ目の音と2つ目の音の周波数差が0.5kHzから1kHz以上であれば、1つ目の音によるマスキングの影響は減少することがわかった。これらの結果は、コウモリが混信時に採用する、パルス放射タイミングの調整や周波数シフトによって、他個体の強力な音声によって生じるエコーのマスキングの影響を低減できる可能性を示す。

第7章では、本論文の成果を統括し、総合的な考察を行った。また、パルスとエコーの時間周

波数構造のミスマッチによって、クラッターエコーによる距離計測能の劣化が低減されるというメカニズムが、他個体との音声混信の回避にも適応できる可能性について論じた。近年、このメカニズムが、惑星の地形探索などにも応用可能であることが明らかになってきた。コウモリの信号抽出メカニズムを解明することは、人工の情報通信システムに生じる混信時の信号伝達の質の低下に対する対策の一つとなりうる。

本研究では、高度な計測に基づいた行動分析に加え、センシング信号デザインの理論的検証を組み合わせることで、コウモリの混信回避システムの包括的な理解を目指した。その結果、コウモリがセンシング信号のデザインに適した方法で混信を回避すること、特に、高い距離分解能と周波数分解能を実現するコウモリ型の信号が、実際の工学分野のセンシングにおいても有用である可能性を示した。コウモリの高度な音声情報処理を理解することは、生物学的に重要であるだけでなく、雑音下での目的音声抽出やセンサの混信防止などの技術シーズの創出に繋がるため、今後ますますセンシングが多彩化・多重化し、高度に情報化されるであろう社会に与える意義は大きい。