

機関番号：34310

研究種目：新学術領域研究

研究期間：2008～2010

課題番号：20200055

研究課題名（和文） コウモリのバイオ・ナビゲーション機構の解明とその工学的応用

研究課題名（英文） Study on biosonar in bats for engineering application

研究代表者

飛龍 志津子 (HIRYU SHIZUKO)

同志社大学・生命医科学部・助教

研究者番号：70449510

研究成果の概要（和文）：

コウモリの効率的なナビゲーションアルゴリズム解明を目的として、音響・生理・運動機能に対する各種機能計測を行った。その結果、(1)飛行と音響センシングの協調的制御、(2)放射パルス方向の飛行方向に対する先行変化及び複数標的に対する時分割処理、(3)パルス周波数シフトによる音響混信回避行動、をそれぞれ見出した。またこれらの音響行動計測と合わせて、神経生理学的手法による(4)下丘内最適周波数及び潜時分布と音響行動データとの相関性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

The biosonar system employed by bats was examined based on acoustical, physiological and dynamic measurements for understanding their effective bio-navigation algorithm. As a result, (1) collaboration control in flight and acoustical sensing behaviors by bats, (2) look-ahead control of pulse direction during flight, and time-sharing processing for multiple target, (3) avoidance for self-jamming (pulse-echo ambiguity) by shifting frequency range, (4) consistence of electrophysiological measures of best frequency and latency distributions in inferior colliculus of *Pipistrellus abramus* with behavioral measures during foraging in this species.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	12,000,000	3,600,000	15,600,000

研究分野：生物音響工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：生物ソナー・超音波・センシング・ナビゲーション

## 1. 研究開始当初の背景

コウモリは、地上で唯一アクティブソナーの能力を持つ生物である。その高度に進化したコウモリの聴覚機構に対しては、欧米の学術先進諸国を中心に生物学や神経生理学を軸とする研究が精力的に展開されてきた。

一方、我々ヒトも超音波によるセンシング技術を、物体探査や各種非破壊検査技術などに利用している。しかし、これらの人工的な計測技術は、スピードや効率面などあらゆる点で、生物ソナーが有するシステムを模擬するレベルには至っていない。その理由は、(1)生物ソナーが行うナビゲーション制御アルゴリズムの多くが未解明、(2)生物学が先行し、工学面からの取り組みが不足、(3)生物ソナー研究における従来型の計測手法の技術的限界、(4)実験動物としての飼育技術の難しさ、などが挙げられる。特に、ナビゲーション制御アルゴリズムの解明には必須の、飛行するコウモリからの生体情報の取得が実現されておらず、工学的応用を指向するための知見が大幅に不足している。

## 2. 研究の目的

そこで本研究の目的は、生物ソナーが持つ効率的なナビゲーションや音響センシング、イメージングアルゴリズムの抽出を目指して、コウモリが超音波を利用して行うセンシング機構に関する音響・生理・運動機能の総合的な解明を最終的な目標としている。具体的には、(1)エコー情報に対する発声及び飛行制御の関係、(2)障害物回避や飛行経路選択に関するコウモリの意思決定の過程、(3)コウモリのナビゲーション理論のモデル化、を目的としている。そのための手段として、飛行中コウモリに届くエコーの計測を、コウモリの頭部に搭載可能な小型 FM ワイヤレスマイクロホンを用いる。また、ヒトの注視方向に相当するパラメータとして、コウモリの放射パルス方向に着目し、マイクロホンアレイシステムの構築によって、コウモリの注耳方向の計測を試みる。さらに、コウモリのエコーロケーション行動の音響的側面に着目した音響計測と合わせて、脳内の信号処理機構解明のための神経生理学的計測を行い、将来的な両計測技術の融合を指向する。

## 3. 研究の方法

### (1) 観測対象種

実験にはエコーロケーションに FM 型パルスを用いる FM コウモリ (アブラコウモリ、ユビナガコウモリ) また CF-FM 型パルスを用いるキクガシラコウモリ (CF-FM コウモリ)

を用いた。実験は同志社大学動物実験等の実施に関する規程に基づいて実施した。

### (2) 音響行動計測

飛行実験は観測室(8 m (L)×3 m (W)×2 m (H))内で行った。観測室内を課題に応じてコウモリを飛行させ、その様子を2台の高速度ビデオカメラで撮影することにより、コウモリの3次元位置座標を算出した。またコウモリの背部には、小型のワイヤレスマイクロホン(テレマイク)を搭載し、飛行させた。これによりコウモリが発する超音波パルスを精度高く計測できると同時に、周囲からのエコーの計測も可能となる。テレマイクによる音響計測は、高速度ビデオカメラと同期記録させ、コウモリの飛行軌跡とそれに対応する超音波パルスの各種音響特性の分析を行った。

また高速度ビデオカメラを用いて、コウモリの羽ばたきのタイミングを計測し、超音波パルスの発声タイミングと飛行制御に関連する羽ばたきのタイミングについて検討を行った。

### (3) マイクロホンアレイシステム

本研究では、コウモリの空間計測や障害物回避時における飛行経路選択のアルゴリズム解明を目指している。そのため、コウモリの注耳方向を知る手段として、実験室内に3次元のマイクロホンアレイシステムの構築を行った(Fig. 1)。23 ch (水平方向 17ch, 垂直方向 7ch) の各チャンネルで録音したパルスの音圧差から合成ベクトルを求め、水平・垂直方向のパルスの放射方向の算出に成功した。

### (4) 電気生理実験

研究代表者はこれまでも、上述のような、エコーロケーション行動の音響的側面に着目した実験に取り組んできた。しかし、生物ソナー機構の解明には、音響計測の他、エコーロケーション行動を司る脳内の聴覚情報処理機構の理解も非常に重要である。特に、飛行中のコウモリに対して、従来からの音響計測と同時に脳内の神経活動の記録技術の確立も望まれる。そこで本研究では、まずコウモリに対する電気生理を行うための実験環境の構築を行った。その後、拘束下のコウモリにおいて、エコー情報を処理する聴覚系の重要な中継部位とされる下丘 (Inferior colliculus, IC)ニューロンに対して、最適周波数(best frequency, BF)及び潜時(latency)の計測を行なった。

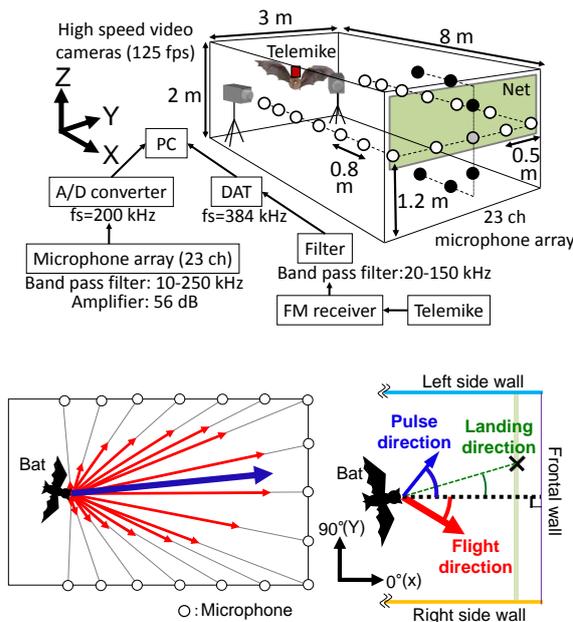


Fig.1 (top) Measurement system of microphone array system. (bottom) Calculation procedure of pulse direction estimated from whole microphones (heavy arrow indicates estimated pulse direction), and schematic diagram of directions of emission, flight and landing point.

#### 4. 研究成果

##### (1) 音響センシングと飛行制御の関係

コウモリのエコーロケーションのための発声は、羽ばたきのタイミングと一部連動することでエネルギー消費を抑えていると言われている。しかし飛行中コウモリの発声と羽ばたきのタイミングを従来の方法で厳密に計測することは難しく、テレマイクを用いた発声の計測が有用となる。Fig. 2 はキクガシラコウモリにおける超音波パルスの発声開始のタイミングと羽ばたきの位相関係を示している。またキクガシラコウモリは、翼のアップストローク時に超音波パルス列の放射を開始しており、ダウンストローク後半で発声を終えていることがわかった。すなわち、コウモリは羽ばたきのタイミングに応じてパルスを放射を行っていた。

また、羽ばたきの位相に対するパルスの音響特性を調べるため、直前のパルスを基準としたパルス長および音圧の変化を Figs. 2C, D に示した。これよりアップストローク内に放射されたパルスは、直前のパルスと比較して、持続時間が2倍以上、また、羽ばたきの位相が約 0.25~0.75 の範囲で、大きい音圧のパルスを放射していることがわかった。

コウモリの飛翔筋は、アップストローク後半からダウンストローク前半にかけて活動

することが報告されている(Fig. 2C, D 太線)。計測結果からも、飛翔筋の活動を利用することで、パルス長を長く、また強い音圧のパルス放射を行っていると考えられる。本来、機能的には独立と考えられる音響センシングと飛行制御を行う羽ばたきのタイミングに同期性を持たすことで、効率的なエコーロケーションを実現していることが実験結果より示唆された。

##### (2) コウモリの飛行経路選択

ヒトの視覚系では、注視と運動の繰り返しによって注意を向ける対象を切り替えながら空間サンプリングが行われており、視線の移動が重要な役割を果たしていると言われている。コウモリにおいても、ヒトの注視に相当する放射パルス方向を変化させることから、自身の飛行ルートを予想し、かつ注意を払う対象からの必要な情報を効率的に抽出していると推測される。そこで、障害物を回避飛行するコウモリが発するパルスの放射方向や放射タイミングを、マイクロホンアレイシステムおよびテレマイクを用いて計測した。

その結果、コウモリは飛行方向に先行する方向に超音波パルスを放射していることを明らかにした。また、同じ障害物環境下を複数回飛行することで、飛行軌跡を平滑化させ、パルスの放射頻度や音圧を減少させていることがわかった(Fig. 3)。さらに、障害物の配置の複雑さに依らず、コウモリの注視方向と飛行の旋回率の間には、先行時間が 0.1-0.2 秒であることも確認した。

ヒトの迷路空間の探索行動では、環境の形状に細かく対応する移動軌跡から、学習が進むに従い広い環境へ対応した移動軌跡に変化することが報告されている。さらに注視行動においても、視線の運び方が散発的注視から流動的注視へと変化する事、また短距離の注視が減少することが示されている。本実験によって計測した飛行中コウモリの放射パルス方向及び飛行軌跡、また IPI の変化から、ヒトの移動経路を探索するための環境認識時の注視点の運び方と類似性があることが示唆された。

またマイクロホンアレイを水平と垂直の双方に設置することでパルス放射方向を3次元的に計測したところ、目的地点とその他周囲への注耳を時分割的に行っていること、また進路方向先や目的地点など飛行中重要となるポイントに対しては、強い音圧のパルスを放射する事で、精度の高いエコー情報を入力しようとしていることがわかった(Fig. 4)。さらにコウモリは、パルス放射方向を変化させているほか、自身に届く複数の対象からのエコー列に対して、時分割的に情報を選択していることも示唆された。

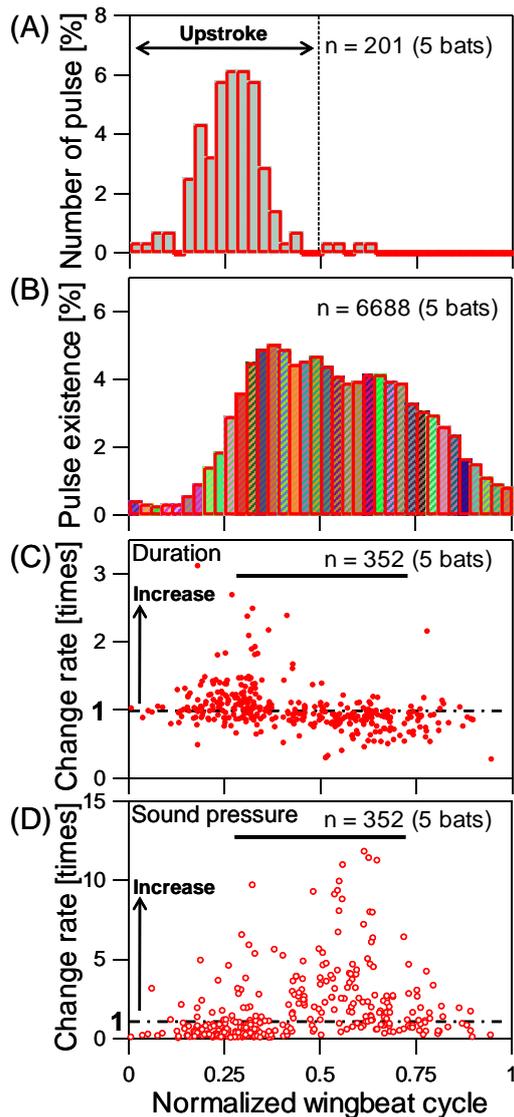


Fig. 2 Distributions of the first pulse emission of pulse train (A), pulse duration (B), changes in pulse duration (C) and sound pressure (D). Upper bars indicate duration of flight muscle activity

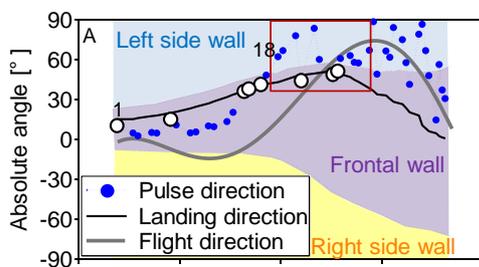


Fig. 4 Change in horizontal pulse direction during landing flight as a function of time to landing. Open circles indicate intense pulse.

### (3) 自身による音響混信に対する回避

実環境のエコーは、周囲の雑木や地面から複雑に多重散乱した数 10ms 長となる場合が多く、IPI が短い場合、エコー列同士が時間的に重畳し、物体までの距離計測が曖昧になる。そこで、実験室内に多重散乱環境下を人工的に実現し、エコー列が時間的に重畳する際の FM コウモリ (*Eptesicus fuscus*) の音響行動を調べた。飛行中コウモリの放射パルスは、テレマイクを用いて計測した。その結果、エコー列同士が重畳する場合、連続するパルス間の周波数帯域を 3~6kHz 程度、変化させることがわかった。倍音構造を伴う FM 音の場合、基本波の僅かな周波数変化によっても、パルス-エコー間の相関性が脆弱になる。パルスの周波数シフトは、重畳したエコー列から得られる音響イメージを脳内で分離する混信回避行動と考えられる。

また同様の実験を他の FM コウモリ 2 種に対し実施したところ、アブラコウモリは前述と同様の結果が、ユビナガコウモリはエコー列の重畳を回避するように IPI を制御することを見出した。

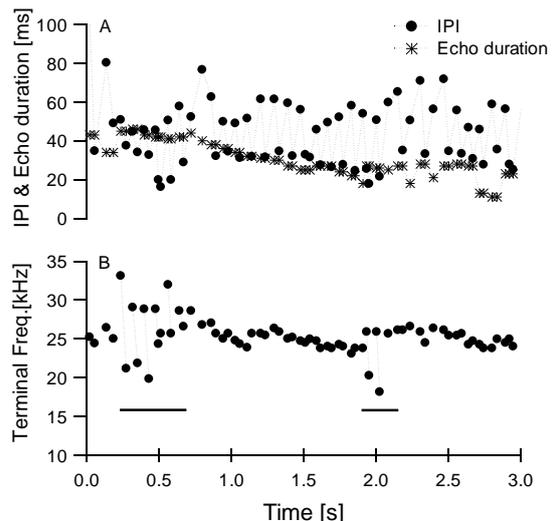


Fig. 5 Changes in the IPI, echo duration (A) and terminal frequency of emitted pulse (B) during the flight. Bar in B indicates the series of pulses while the echo overlap occurred.

### (4) コウモリ下丘に対する電気生理実験

コウモリに対する電気生理実験環境の立ち上げから、下丘 (IC) ニューロンにおける最適周波数 BF 及び潜時の分布を計測した。アブラコウモリの IC ニューロンは、放射パルスの終端周波数範囲と同調するもの多く、行動学的にもこの周波数範囲が非常に重要とされている。また潜時から推測されるコウモリの探索距離は約 2.5 m となり、音響計測で見られるアプローチ開始時における標的距離と一致した。

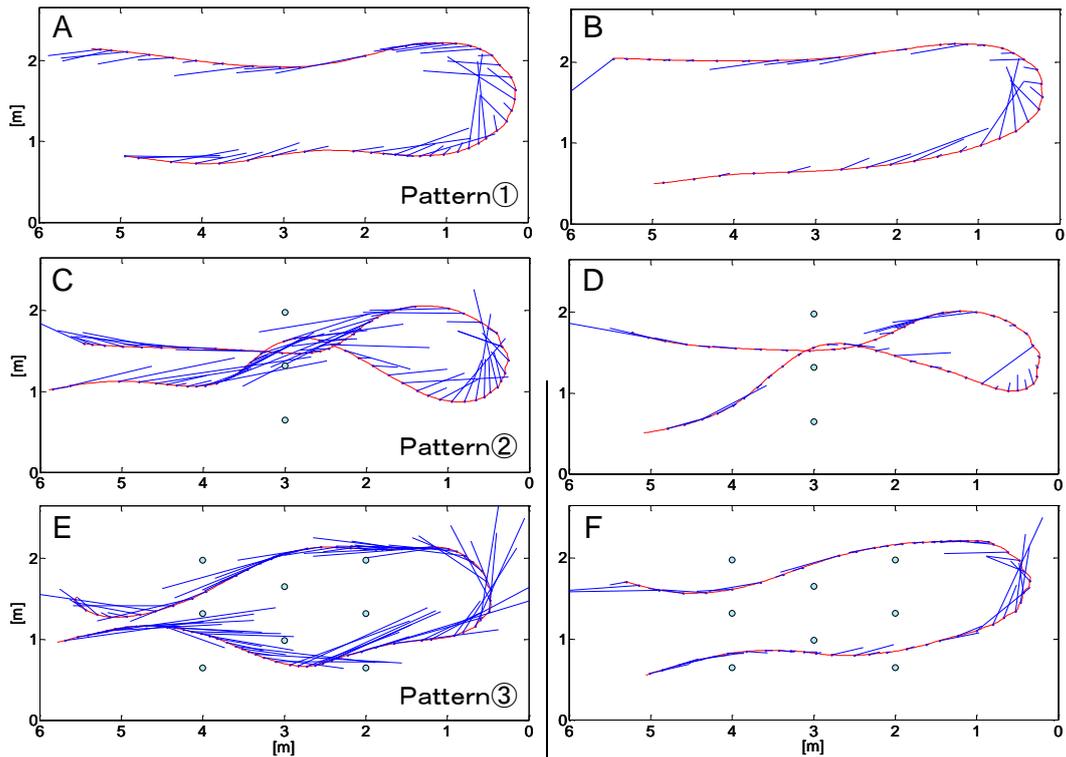


Fig. 3 Top views of horizontal flight trajectory (red line) of the bat during obstacle avoidance with the pulse direction (blue line). The length of blue line indicates sound pressure of the pulse. Solid circles indicate obstacle chains. Left side figures show the data of initial flight, and right figures show the data of the subsequent flight.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (全て査読有り：計4件)

- ① Kazuhiro Goto, Shizuko Hiryu and Hiroshi Riquimaroux, "Frequency tuning and latency organization of responses in the inferior colliculus of Japanese house bat, *Pipistrellus abramus*," *J. Acoust. Soc. Am.*, 128, 1452-1459, Sep. 2010.
- ② Shizuko Hiryu, Mary E. Bates, James A. Simmons, and Hiroshi Riquimaroux, "FM echolocating bats shift frequencies to avoid broadcast-echo ambiguity in clutter," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 7048-7053, 29 March., 2010.
- ③ Yu Shiori, Shizuko Hiryu, Yu Watanabe, Hiroshi Riquimaroux and Yoshiaki Watanabe, "Pulse-echo interaction in free-flying horseshoe bats, *Rhinolophus ferrumequinum nippon*," *J. Acoust. Soc. Am.* Vol.126, pp80-85, 2009.

[学会発表] (計35件)

- ① 山田恭史, 松田直大, 飛龍志津子, 力丸裕, 渡辺好章, "CF-FM コウモリの飛行時における放射音響特性の3次元解析," 日本音響学会春季大会, 早稲田大学, 2011/3/9-11.
- ② 竹永敏也, 各務裕佳子, 藤岡慧明, 飛龍志津子, 力丸裕, 渡辺好章, "多重複雑反射環境下におけるFM コウモリ (*Pipistrellus abramus*)の超音波パルス送波特性," 電子情報通信学会技術報告, Vol.110, No.366, pp.71-76, 同志社大学, 2011/1/20-21.
- ③ 平出直太郎, 藤岡慧明, 飛龍志津子, 力丸裕, 渡辺好章, "コウモリの周囲環境センシング手法の工学的応用へ向けた検討—障害物回避時における超音波ビーム方向と飛行方向の関係—," 信学技報 US-2009-115, pp.19-24, 東京計器株式会社, 2010/2/24.
- ④ 渡辺雄, 飛龍志津子, 力丸裕, 渡辺好章, "エコーロケーション時におけるコウモリのはばたきとパルス放射タイミングの関係—生物ソナーにおける効率的なナビゲーション制御に関する検討—," 信学技報 US2008-64, pp.17-22, 東海大学, 2008/11/27.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

飛龍 志津子 (SHIZUKO HIRYU)  
同志社大学・生命医科学部・助教  
研究者番号：70449510