

コウモリの生物ソナーに学ぶセンシング技術

Acoustic Sensing of Bat Biosonar System

飛龍志津子

Shizuko Hiryu

同志社大学生命医科学部

Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University

Abstract: Bats and dolphins evolved sophisticated SONAR (Sound navigation and ranging) system. They are called biosonar. Functions and algorithms of animals potentially provide us with knowledge useful for future innovative technologies. Now, it is important to learn from a biosonar system of bats that has advanced skills of ultrasonic sensing based on a simple mechanism; one transmitter and two receivers. By utilizing various measuring techniques, we investigated the unique echolocation behavior of bats. In this presentation, I introduce an outline of the biosonar system of bats and our recent research about jamming avoidance behavior during group flight.

1 はじめに

コウモリはイルカと並んで生物ソナーと呼ばれ、超音波を用いた優れた反響定位（エコーロケーション）能力を持つ。彼らは光の届かない暗闇や水中で“見る”能力を、偶然にも同じ手段＝音を使う、ことで獲得した[1]。また両者ともに、波長と必要なセンシング精度の兼ね合いから、センシング信号には超音波帯域 (>20kHz) を用いている[2]。コウモリやイルカの超音波の運用の実態を知れば知るほど、彼らがまさに音響工学の基礎を経験的に知っていることに驚く。

生物が生得している高度な機能やその運用方法には、未来の技術に役立つ知見が秘められているかもしれない。昨今、自動運転技術などを例にセンシングのニーズが急速に進んでいる。センサの数や種類も増え、センシングに必要な情報のビックデータ化が加速する中、少し立ち止まって動物たちに目を向けてみると、シンプルな機構で高度な技を成す、彼らのセンシングシステムに学ぶ意義は大きいように思う。

我々は様々な計測手段を用いて、コウモリのソナール行動の分析に取り組んできた。実験室では、再現性の良い緻密な行動実験を行う一方で、コウモリの高度なパフォーマンスを、野生下でのダイナミックな採餌飛行から見出してきた。例えば、野生下のアブラコウモリは、1秒未満という極めて短い間隔で獲物を連続的に捕食し、その際、超音波の放射方向

は直近の獲物ではなく、その次の獲物に向けられていた[3]。さらに飛行軌跡は両方の獲物を効率よく捕まえるのに都合の良いルートであることもわかった[4]。このように行動を丁寧に分析することで、彼らが想像以上に賢く、またユニークな発想でセンシングを活用している様子が垣間見えてくる。

本発表では、コウモリのエコーロケーションの概要のほか、集団で飛行する際の超音波信号の混信回避策に関する最近の研究結果などを交えて、コウモリのセンシング術について紹介する。

2 コウモリの超音波

コウモリは口または鼻孔から超音波を断続的に放射する。そして周囲から跳ね返ってくる反響音（エコー）を左右の耳で聞くことで、周囲の状況の把握するエコーロケーション（反響定位）を行う。図1の写真で示すように、コウモリは3次元定位に必要な最低限のセンシング機構（1送信、2受信器）しか持っていない。

コウモリが発する超音波は、その時間周波数構造から FM 型（Frequency modulation）と、定常音（Constant frequency）と FM 音を組み合わせた CF-FM 型の2つに分類される。日本で最も見かけるコウモリは、通称、家コウモリともよばれるアブラコウモリ（*Pipistrellus abramus*）である。図2(a)はアブラコウモリの超音波音声の例である。数ミリ秒ほどの短い降下型の周波数変調音を口から発し、

「FM (frequency modulated) 型」に分類される。しかしながら図でも示すように、獲物を探索する際などには、40 kHz 付近を中心とした比較的長い信号(疑似 CF) を発し、獲物を捕食する直前には、時間分解能の高い短い FM 音へと超音波の時間周波数構造を適応的に変化させる[5]。

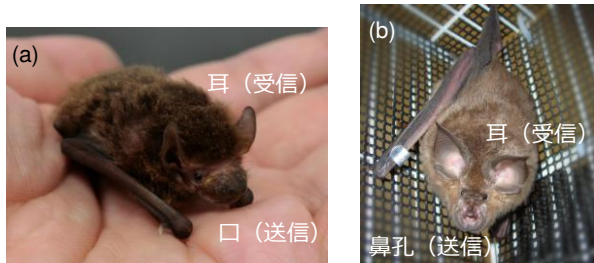


図1 コウモリの生物ソナーシステム。超音波は口または2つの鼻孔から放射され、周囲からのエコーは左右の耳で受信される。(a)アブラコウモリ。(b)キクガシラコウモリ。

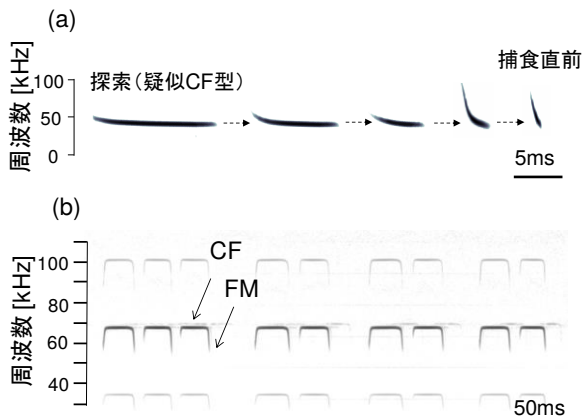


図2 コウモリの超音波。(a)アブラコウモリの超音波音声(FM型),(b)キクガシラコウモリの超音波音声(CF-FM型)。

一方、キクガシラコウモリ (*Rhinolophus ferrumequinum*) は、数十ミリ秒と非常に長い CF 音と、その前後には短い FM 音を伴う「CF-FM 型」の超音波を放射する(図2 (b))。超音波は鼻孔から放射され、第2倍音が最も強く、その波長は鼻孔間隔の半波長に相当している[6]。FM 音に比べて CF 音はより遠方まで届き、またドップラーの検知にも優れている。キクガシラコウモリに代表される CF-FM 型のコウモリは、この CF 音付近の周波数分解能が最も高い聴覚系を有しており[7]、獲物である蛾の羽ばたきによる微小なドップラー周波数の変化をも検知できる[8]。また、飛行速度に応じて発声する CF 周波数を変化させる(ドップラーシフト補償[9, 10])。その結果、コウモリに届くエコーの周波数は、飛行速度に寄らず一定に、かつ自らの聴覚系において最も感度のよい周波数に維持される(図3)。同じアナ

ロジーは、音圧制御に対しても行われる[11]。このようなコウモリ独自にみられる補償行動は、ヒトとコウモリのセンシングに関する設計思想が真逆であることを示す、良い例でもある。

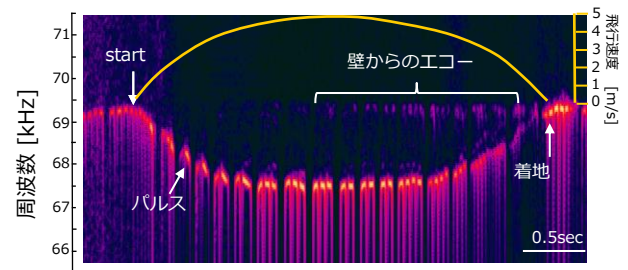


図3 飛行中のキクガシラコウモリの超音波(第2高調波のみを拡大して表示)。飛行速度に応じて、自らが発する超音波の周波数を低下させているのがわかる。その結果、コウモリに届くエコーの周波数は、飛行速度によらず常に一定に維持される。

3 集団飛行中の混信回避策

暗闇の洞窟内で、無数のコウモリ達が高速で飛び交う様子は、まさに圧巻である(図4)。多くの種のコウモリが、集団で生活をする。洞窟内や集団で飛び交うコウモリの側で音声を計測すると、同種他個体からのエコーロケーション音声が時間的にも周波数的に激しく重畳して計測される。誤センシングが生じそうに思うが、実際、私自身はコウモリ同志が衝突する場面をこれまで見たことがない。



図4 洞窟内のコウモリの様子。暗闇の中、たくさんのコウモリが飛び交っている。

古くから、集団で飛び交うコウモリの混信回避行動については、多くのコウモリ研究者が魅了されてきた[12, 13]。しかし、飛行するコウモリが発する超音波の計測はなかなか難しい。例えば地上に設置したマイクロホンを用いて計測した場合、ドップラーの影響を受けるだけではなく、個体毎に音声を分離することも不可能に近い。

そこで我々は、個々のコウモリの背中に小型のテレメトリマイクロホンを取り付け（図5 (a)）、集団飛行中の超音波を計測した。観測室内を飛行する4個体のコウモリそれぞれから、超音波を分離し計測することに成功した[14]。

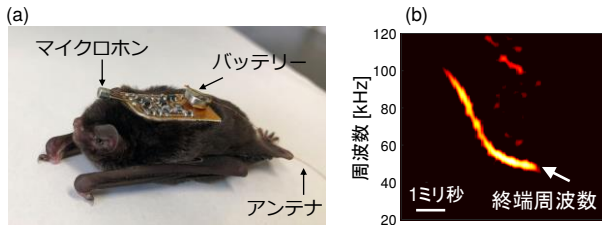


図5 テレメトリマイクロホンを用いた超音波の計測。(a) テレメトリマイクロホンを背中に搭載するユビナガコウモリ。(b) ユビナガコウモリの超音波音声のスペクトログラム。FM音の末端の周波数を終端周波数と呼ぶ。

実験にはアブラコウモリと同じくFM型の超音波を用いるユビナガコウモリを用いた。ユビナガコウモリは洞窟に集団で生息する。約100 kHzから45 kHzまでを数ミリ秒で降下するFM音を口から発する。ここでは、FM音の最も低下した周波数を「終端周波数」と呼び、音響分析の代表的なパラメータとして用いた。

テレメトリマイクロホンをそれぞれのコウモリに搭載し計測した結果、単独で飛行する際の各コウモリは、類似の終端周波数を使用していた（図6 (a)）。そしてそれらの4個体を同時に飛行させると、お互いのコウモリが瞬時に自信の終端周波数を約1 kHz程度ほどずつ、差を広げるように調整していることがわかった（図6 (b)）。どのようなルールに従って、集団内の各個体が周波数を調整するのかは不明であるが、飛行するコウモリ同志は、阿吽の呼吸で中間との周波数の重畳を回避していたのである。

次に、コウモリ同志の超音波音声の類似度を、相互相関のピーク値を指標として比べた。その結果、集団飛行中に発せられる超音波は、単独飛行時に比べて個体間の類似度が有意に低下していることもわかった（図7）。またコウモリのFM型音声の場合、時間長や開始周波数などの他のパラメータではなく、終端周波数の僅かに変化させることで、最も効率よく信号間の類似度が低下することもわかった。すなわち、コウモリが用いるFM型信号が音響の混信に強いこと、またシンプルな方法で周囲の仲間からの音声の混信を回避が可能であることがわかった。

コウモリの脳内で送信信号とエコーとの相互相関処理が行われているのかは、まだ不明である[15]。また数十というコウモリが飛行するような場合について、この戦術だけで混信回避が可能かどうかも疑

問が残る。さらにはCF-FM型のコウモリではどうなのか、などまだまだ解決すべき課題は多い。音響面の他、衝突を回避する飛行ルート計画など、経路面での混信回避策も興味深い。

鳥の集団運動については、計測と同時にモデルを用いた分析などが進んでいる[16]。信号をアクティブに発するコウモリの集団飛行や、空間を共有しながらのコウモリの採餌場面などからは、おそらくより高度な集団運動の戦術の存在が予想される。

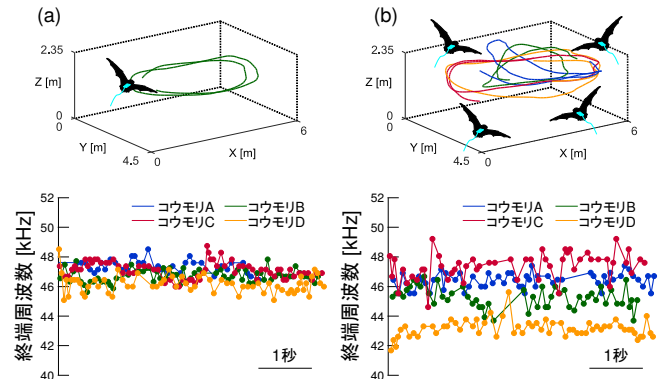


図6 コウモリの飛行軌跡（上図）とテレメトリマイクロホンで計測した超音波の終端周波数の時間的变化（下図）。

(a) 単独飛行時。(b) 4個体同時飛行時。

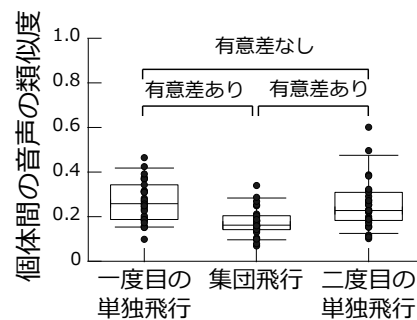


図7 コウモリ同志の超音波の類似度。単独飛行中に比べ、集団飛行中に発せられる超音波音声は、類似度が低い。

4 これからのコウモリ研究

デバイスの小型化・軽量化が進み、近年では小型のコウモリに搭載可能なGPSロガーデバイスも入手可能となってきた。バイオロギングにより、より大規模なナビゲーション研究への取り組みも進んでいる[17]。

また生物ソナー研究からアクセシビリティ技術への応用展開も、少しずつ進んでいる[18]。我々も、ヒトを対象にした音響心理実験を通じて、“音で見る”感覚知覚の解明に取り組んでいる。コウモリ研究で得たセンシングの運用方法を基に、超音波

の新たな可能性が見出せるかもしれない。

チープな自走ロボットを用いた、構成論的研究も面白い。コウモリ研究者自身が超音波運用の実態や難しさを実機を通じて経験することは、コウモリの行動分析にも大いに役立っている。

生物学的な興味から工学応用まで、コウモリの生物ソナー機構にはたくさんの魅力が詰まっている。生物に学ぶセンシング技術を、社会に役立つ知見として情報発信していくことを目指し、これからもコウモリに学び続けていきたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、日本術振興会 科研費 (JP18H03786, JP16H06542, 24686050) および JST さきがけ「社会と調和した情報基盤技術の構築」(JPMJPR14D8) の助成の助成による。

参考文献

- [1] D. R. Griffin, *Listening in the dark*. New Haven: Yale University Press, 1958.
- [2] J. A. Thomas, C. F. Moss, and M. Vater, *Echolocation in bats and dolphin*. Chicago: University of Chicago Press, 2003.
- [3] E. Fujioka, I. Aihara, S. Watanabe, S. Hiryu, J. A. Simmons, H. Riquimaroux, and Y. Watanabe, "Rapid shifts of sonar attention by *Pipistrellus abramus* during natural hunting for multiple prey," *J Acoust Soc Am*, vol. 136, pp. 3389-3400, 2014.
- [4] E. Fujioka, I. Aihara, M. Sumiya, K. Aihara, and S. Hiryu, "Echolocating bats use future-target information for optimal foraging," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, p. 201515091, 2016.
- [5] S. Hiryu, T. Hagino, E. Fujioka, H. Riquimaroux, and Y. Watanabe, "Adaptive echolocation sounds of insectivorous bats, *Pipistrellus abramus*, during foraging flights in the field," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 124, pp. EL51-56, 2008.
- [6] S. Hiryu, K. Katsura, L. K. Lin, H. Riquimaroux, and Y. Watanabe, "Radiation pattern of echolocation pulse in Taiwanese leaf-nosed bat, *Hipposideros terasensis*," *Acoust Sci Technol*, vol. 27, pp. 108-110, 2006.
- [7] N. Suga, "The extent to which biosonar information is represented in the bat auditory cortex," in *Dynamic aspects of neocortical function*, G. M. Edelman, W. E. Gall, and W. M. Cowan, Eds., ed New York John Wiley & Sons, 1984, pp. 315-373.
- [8] H. U. Schnitzler and A. Denzinger, "Auditory fovea and doppler shift compensation: adaptations for flutter detection in echolocating bats using CF-FM signals," *J Comp Physiol A*, vol. 197, pp. 541-559, 2011.
- [9] H. U. Schnitzler, "Compensation of Doppler effects in horseshoe bats," *Naturwissenschaften*, vol. 54, p. 523, Oct 1967.
- [10] S. Hiryu, Y. Shiori, T. Hosokawa, H. Riquimaroux, and Y. Watanabe, "On-board telemetry of emitted sounds from free-flying bats: compensation for velocity and distance stabilizes echo frequency and amplitude," *J Comp Physiol A*, vol. 194, pp. 841-851, 2008.
- [11] S. Hiryu, T. Hagino, H. Riquimaroux, and Y. Watanabe, "Echo-intensity compensation in echolocating bats (*Pipistrellus abramus*) during flight measured by a telemetry microphone," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 121, pp. 1749-1757, 2007.
- [12] J. Habersetzer, "Adaptive echolocation in the bat *Rhinopoma hardwickei*," *J Comp Physiol A*, vol. 144, pp. 559-566, 1981.
- [13] N. Cvikel, E. Levin, E. Hurme, I. Biorissov, A. Boonman, E. Amichai, and Y. Yovel, "On-board recordings reveal no jamming avoidance in wild bats," *Proc R Soc Lond B*, vol. 282, p. 20142274, 2014.
- [14] K. Hase, Y. Kadoya, Y. Maitani, T. Miyamoto, K. I. Kobayasi, and S. Hiryu, "Bats enhance their call identities to solve the cocktail party problem," *Communications Biology*, vol. 1, p. 39, 2018.
- [15] J. A. Simmons, "Perception of echo phase information in bat sonar," *Science*, vol. 204, pp. 1336-8, Jun 22 1979.
- [16] M. Ballerini, N. Cabibbo, R. Candelier, A. Cavagna, E. Cisbani, I. Giardina, V. Lecomte, A. Orlandi, G. Parisi, and A. Procaccini, "Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, pp. 1232-1237, 2008.
- [17] J. J. Flores-Martinez, A. T. Valdés, D. S. Johnston, O. Eitan, I. Borissov, J. R. Shipley, R. A. Medellin, G. S. Wilkinson, H. R. Goerlitz, and Y. Yovel, "Resource Ephemerality Drives Social Foraging in Bats," *Current Biology*, vol. 28, pp. 1-7, 2018.
- [18] J. Sohl-Dickstein, S. Teng, B. M. Gaub, C. C. Rodgers, C. Li, M. R. DeWeese, and N. S. Harper, "A device for human ultrasonic echolocation," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, pp. 1526-1534, 2015.