

<研究の背景>

コウモリは超音波パルスを放射し、その反響音（エコー）を聴取することで周囲の物体の位置等を把握するエコーロケーションを行います。これまでの研究から、コウモリがエコーロケーションによって、物体までの距離や方角を知覚することは知られていました。しかし、生き物の生存において重要となる、捕食者からの逃避に必要な物体の動きの検知をコウモリはエコーロケーションを用いてどのように行っているかは明らかではありませんでした。

エコーロケーションにおいて、物体までの距離はコウモリが超音波を放射してからそのエコーを聴取するまでの時間差（エコー遅延）によって符号化されます。そのため、繰り返し超音波を放射すると、そのエコー遅延が時々刻々と短くなることから、物体の接近を認知することができます。一方、物体との相対速度は、ドップラー効果によるエコーの周波数変化（ドップラー量）に符号化されます。すなわち物体が接近している時、コウモリに届くエコーは、エコー遅延の時間変化の他、速度によるドップラー量にも変化が生じます。

そこで本研究では、コウモリに対して音響的に仮想物体を呈示することを試み、エコー遅延の時間変化、またはドップラー効果によるエコーの周波数変化のどちらを手掛かりに物体の接近を知覚しているかを調べました。

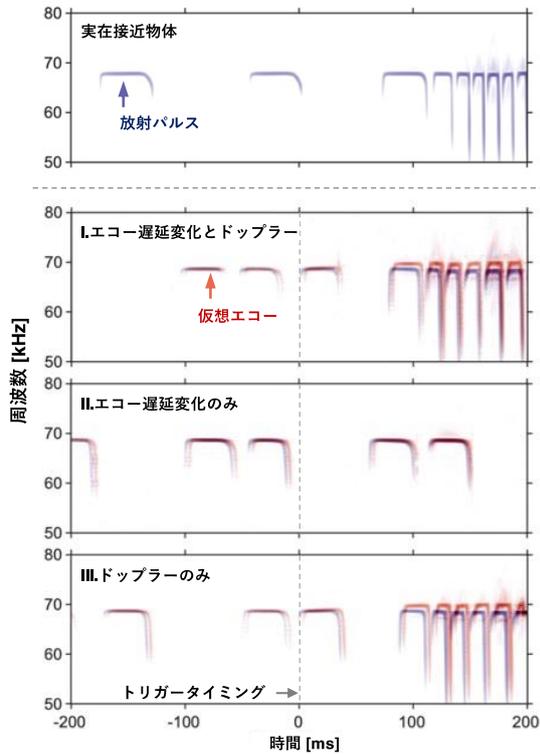
<研究の内容>

止まり木でエコーロケーションを行うコウモリに対して物体を突然接近させると、コウモリは脅威を回避しようと、止まり木から即座に飛び立ちます（図1A）。このコウモリが見せる反応を利用することで、接近する物体の知覚にコウモリが用いている音響的な手がかりを調べました。具体的には、コウモリが発する超音波をマイクロホンで取得すると同時に、高速信号処理器によりその音響情報を操作してスピーカよりプレイバック再生するシステムを構築しました。コウモリに対して仮想的なエコーを聞かせることで、物体の存在を錯覚させるものです。さらに物体の接近を模擬するために、エコー遅延とドップラー量を人工的に操作し、コウモリが止まり木から飛び立つかを観察しました。まず、現実の世界で見られる物体の接近を模して、コウモリに聞かせる仮想的なエコーのエコー遅延とドップラー量を共に変化させると、コウモリは即座に飛び立ち回避行動を行いました（図1B-I）。次にエコー遅延のみを時間変化させた時には回避行動はみられませんでした（図1B-II）、ドップラー量のみを変化させた時は、コウモリは回避行動を示しました（図1B-III）。このことから、コウモリが接近物体を知覚する際、従来考えられてきたようなエコー遅延の時間変化は利用しておらず、物体の速度に起因するドップラー量のみを利用していることが明らかになりました。さらに、このドップラー量に対する反応時間は30 ms程度であり、とても速い反応であることもわかりました。

<今後の展開>

我々ヒトなどが視覚によって動いているものを見つけるときは、物体の網膜上での“時空間的な変位”から検知していることが知られています。すなわち、物体位置の時間的な変位情報を手掛かりにしています。これをコウモリの音で“見る”エコーロケーションに置き換えると、コウモリに届くエコーの遅延時間（エコー遅延）が、超音波を発する度に変化すること（接近の場合はエコー遅延は短くなる）を利用するだろうと予測が立てられます。しかし、驚くことにコウモリは物体の接近を模したエコー遅延の変化には全く反応せずに、もう一つの音響情報であるドップラー量のみから動きの検知を行っていることが明らかになりました。エコー遅延を利用した物体の移動を検知するには、前に放射した超音波のエコー遅延と、次に放射する超音波のエコー遅延を比べる必要から、時間がかかります。したがって、検出に時間が必要な物体の位置の変位より、1回の超音波の放射によって得ることのできる情報、すなわちドップラー量を用いる方がより迅速な回避反応を可能にすることは明らかです。さらに森林内に生息するコウモリは、さまざまな位置の物体から散乱するエコーを聴取しています。そのため、エコー遅延ではなく、ドップラーを利用すれば、物体の接近を堅ろうに検知することも可能です。このように音波によるセンシングの利点を巧みに使いこなすコウモリのソナー戦略の1つ1つを紐解くことは、音で“見る”知覚世界を包括的に理解すると同時に、超音波の利用やセンシング技術に関する新たなシーズとして役立つことが期待されます。

A



B

個体番号	I. エコー遅延とドップラー	II. エコー遅延のみ	III. ドップラーのみ
2670	回避	回避なし	回避
2680	回避なし	回避なし	回避なし
2681	回避*	回避なし	回避
2682	回避	回避なし	回避
2687	回避	回避なし	回避
2689	回避*	回避なし*	回避
2691	回避	回避なし	回避
2695	回避	回避なし	回避
2893	回避なし	回避なし	回避なし

図3 仮想物体に対する応答

(A) 実在の接近物体と3種類の仮想物体におけるコウモリの放射パルス(青)とプレイバックしたバーチャルエコー(赤)のスペクトログラム。(B) 全9個体に対して行った3種類の仮想エコーそれぞれに対するコウモリの応答。ドップラー量が存在する時は多くのコウモリが回避行動を示したが、エコー遅延の時間変化のみの時は反応するコウモリは全くいなかった。

<論文情報>

タイトル: Doppler detection triggers instantaneous escape behavior in scanning bats

(スキャンニング中のコウモリはドップラー量の検知によって回避行動を始める)

著者: Soshi Yoshida, Kazuma Hase, Olga Heim, Kohta I Kobayasi, Shizuko Hiryu

(吉田創志、長谷一磨、Olga Heim、小林耕太、飛龍志津子)

掲載誌: iScience

<その他>

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

◆日本学術振興会科学研究費助成事業学術変革領域研究 (A)

領域課題名: 「サイバー・フィジカル空間を融合した階層的生物ナビゲーション」

(研究統括: 橋本浩一 東北大学 教授)

研究課題名: 「音響サイバー空間を利用したコウモリの階層ナビゲーションの理解」

研究代表者: 飛龍志津子 同志社大学生命医科学部 教授

研究期間: 2021 年度~2025 年度

◆国立研究開発法人科学技術振興機構 次世代研究者挑戦的研究プログラム

研究課題名: 「コウモリの知覚から“次世代型センシング技術”のシーズを探る」

研究代表者: 吉田創志 同志社大学大学院生命医科学研究科 博士後期課程1年

研究期間: 2023 年度

以上