

コウモリと蛾



コウモリが餌の獲得や洞窟の壁などへの障害物にぶつかることなく行動できるのは彼らが超音波を発生し、その反射波を識別しているからだと言われています。

コウモリはどうやって、昆虫などを捕食しているのでしょうか。多くの書には、「彼らは超音波を発生し、ドップラー効果を利用して昆虫の位置を確かめ捕食している」とあります。判ったようでよく判らないところがありますね。

飛んでいる虫を捕まえるには

- (1) 昆虫のいる方向や大きさ
- (2) 昆虫までの距離
- (3) 昆虫が飛んでいる速さ

がわからないと空振りに終わってしまいます。

イルカなどがソナーのような「音響探査システム」を利用していることは、よく知られています。これは自らが発信した音波が跳ね返ってくる音を聞いて対象物の「方向」、「距離」、「形」などを判断する「エコーロケーション (*Echo Location*)」と呼ばれるシステムです。コウモリも同じようなシステムによって餌を獲得しています。

このシステムの昆虫までの「距離」の測定は山彦の原理と同じです。皆さんの中には、登山やハイキングで山彦の経験を持つ人は多いでしょう。この山彦の時間から対面する山並みまでのおおよその距離を推定することが出来るのをご存知ですね。コウモリはこれと同じことをやっているわけです。すなわち、超音波の発信から着信までの時間差を知って、距離を知ることが出来るというわけです。

でも、コウモリたちは昆虫が飛んでいる「速さ」はどのようにして探知しているのでしょうか。そこで、飛んでいる昆虫の速度を、彼らが使用しているといわれている「ドップラー効果」の式を使って求めてみましょう。

次のような問題で考えます。

コウモリが速さ 5m/s で、蛾を捕食しようと追いかけています。このコウモリが発信する超音波の振動数は 50KHz で、蛾からの反射音の振動数が 50.5KHz の時、この蛾の飛行速度を求めなさい。ただし、空気中の音速は 340m/s とします。

さて、超音波は

①蛾に当たる時と、②それが反射される時の計2度ドップラーシフトされます。

1. 超音波が蛾に当たる時 以下では公式を用いますが、式の誘導は後述します。その前に用いる式の簡単な説明をしておきましょう。

$$f_1 = f_0 \frac{V - v_m}{V - v_b} \left(\text{観測者の受信周波数} = \text{発信周波数} \times \frac{\text{音速} - \text{観測者が動く速度}}{\text{音速} - \text{発信者が動く速度}} \right)$$

です。以下では、 V は音速、 v_b (*bat*)はコウモリの飛ぶ速さ、 v_m (*moth*) は蛾の飛ぶ速さ、

コウモリが発信する超音波の周波数を f_0 発信音の進む右向きを正とします。

まず、上の式より蛾が聞く超音波の振動数 f_1 は

$$f_1 = f_0 \frac{V - v_m}{V - v_b} = 50.0 \times \frac{340 - v_m}{340 - 5} = 50.0 \times \frac{340 - v_m}{335}$$

が得られます。

2. 超音波が蛾で反射される時

超音波が蛾で反射されると、今度は蛾が発信源に早代わりし、コウモリが音の観測者になります。さらに超音波の向きは超音波の方向、すなわち左向きになります。したがって、速度 v_m で右向きに飛ぶ蛾から発信される振動数 f_1 の超音波を右向きに飛ぶコウモリが観測する蛾からの反射音、 $f_2 = 50.5$ は次式で表されます。

上式を使ってこれを式で表わせば、

$$f_2 = 50.5 = f_1 \times \frac{340 - (-5)}{340 - (-v_m)} = f_1 \times \frac{345}{340 + v_m} = 50.0 \times \frac{340 - v_m}{335} \times \frac{345}{340 + v_m}$$

さらに式を変形すれば

$$2.04v_m = 6.8$$

したがって、

$$v_m = 3.3 \text{ m/s}$$

が得られます。

ドップラーの式から、蛾は $v_m = 3.3\text{m/s}$ の速さで飛んでいるということが判りましたが、コウモリはこのような計算式をどのように頭の中に取り込んでいるのでしょうか。何とも不思議ですね。

NHK テレビで見た「昆虫達の情報戦略」のコウモリのところではこんな映像が流れていました。以下は録画したものから拾ってみました。

「コウモリは目の代わりに超音波を使って障害物や獲物の存在を掴み取り、夜の森を自在に飛び回る事が出来ます。

そして、パラボラアンテナのような独特な鼻から超音波を発射します。顔の半分以上占めるコウモリの巨大な耳の中にはカタツムリ状の器官があります。かすかな超音波も探知できる高性能の装置です。耳が捉えた膨大な情報は、脳に集められます。そこで高度な情報処理を加え、目で見ると同じように周りの世界を知る事が出来るのです。

コウモリは様々な種類の超音波を使って、蛾を捕らえます。まず広い空間のどこに蛾がいるかを探す為に、探査用の超音波を出し、蛾がどこにいたかが分かった次の瞬間、攻撃用の超音波に切り替えます。正確な蛾の位置、形、速度など分析し一気に接近していきます。

まるでハイテク兵器のようなコウモリの攻撃に対して、蛾は逃れる術を持っているのでしょうか。

蛾はコウモリの攻撃をかわす為に、特別な器官を作り出している事がわかっています。すなわち、蛾の羽の下に見える小さな穴の中に鼓膜があります。その鼓膜の奥には、コウモリの超音波を捉える細胞があるというのです。

しかし、その数はたった2つで、この簡単な仕組みだけで一体、蛾はコウモリの攻撃に対抗できるのでしょうか。

実験では、蛾のたった2つの細胞は、コウモリが真近にきた時に発する超音波だけを捉え、その瞬間、蛾は素早く逃げようとしている事がわかりました。蛾は単純だからといって、決して劣っているわけではないのです。その証拠に蛾は見事に繁栄しています。

脳を使った複雑な情報処理をして攻撃をするコウモリに対して蛾は、たった2つの聴覚細胞だけで対抗しています。これはコウモリにとって、かなり屈辱的なことですね。

実際に飛んでいる蛾はコウモリの超音波を受けた瞬間、蛾は地面に向かって落ちていくように見えます。蛾の動きを細かく見ていくと、身を翻しその後急降下している事がわかります。蛾はきわどい所でコウモリの攻撃をかわしているのです。1メートルまで接近した時、蛾が突然コウモリのレーダーから姿を消すのです。闇の中でギリギリの情報戦略が繰り広げられているというわけです」。

さて、ここで前記した蛾の飛ぶ速度を求めたドップラー効果の式の説明をしておきましょう。コウモリと蛾は図1.の向きに、それぞれ速さ v_b 、 v_m (m/s) で動いているとします。コウモリが出す超音波（音波は空气中を伝わる波で、それに超がつくのは、人間の可聴周波数以上の音域 (20KHz 以上) という意味です) の振動数を f_0 (Hz)、蛾が聞く超音波の振動数を f_1 (Hz)、音速を V (m/s) とし、簡単のために無風状態とします。

図1. を見ながら考えましょう。

コウモリは t 秒間に、 $v_b t$ (m) 進み、 t 秒間に出した超音波の数は $f_0 t$ 個です。いま、コウモリが点 A_1 を通過する時音を出したとすれば、 t 秒後には超音波は A_3 まで達し、その時間にコウモリは点 A_2 まで進みます。

したがって、コウモリが t 秒間に出し続けた超音波は点 A_2 と点 A_3 間にあります。この距離は $Vt - v_b t$ であり、この距離に $f_0 t$ 個の数の波があるわけですから、1個の波の長さ λ (m) は

$$\lambda = \frac{Vt - v_b t}{f_0 t} = \frac{V - v_b}{f_0} \quad \dots (1)$$

この超音波はやがて蛾に届きます。いま、蛾が点 B_1 を通過する時、超音波が丁度やってきたとしましょう。それから t 秒たつと、蛾は距離 $v_m t$ (m) 飛んで点 B_2 まで進み、同時に超音波は距離 Vt (m) 進んで点 B_3 まで達します。したがって、点 B_2 と点 B_3 の間にある $f_1 t$ 個の数の波は、 t 秒間に蛾が聞いた超音波です。この距離は $Vt - v_m t$ ですから波長 λ (m) は

$$\lambda = \frac{Vt - v_m t}{f_1 t} = \frac{V - v_m}{f_1} \quad \dots (2)$$

式 (1)、(2) より

$$f_1 = f_0 \frac{V - v_m}{V - v_b} \quad \dots (3)$$

が得られます。この式は、音波の進む向きを常に正としていることに注意して下さい。

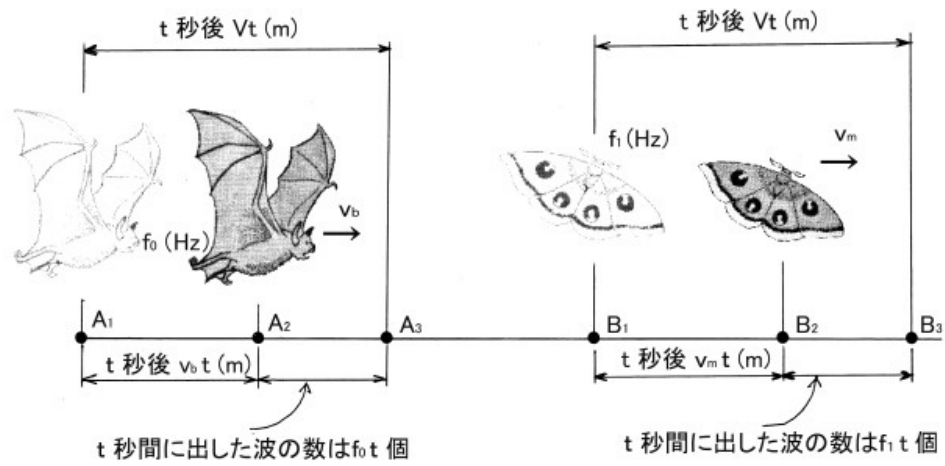


図 1. ドップラー効果の説明図

2006. 3. 23