

コウモリのエコーロケーションにおけるトップダウン信号による標的情報の抽出 Extraction of information about a target by top-down signal in echolocating bat

菊地 一成 (PY)¹⁾, 檜森 与志喜^{1) 2)}

Kazunari Kikuchi, and Yoshiki Kashimori

¹⁾電気通信大学情報システム研究科メディア情報学専攻

²⁾電気通信大学量子・物質工学科

c6work_orange_3@h.vodafone.ne.jp, kashi@pc.uec.ac.jp

Abstract — Most species of bat making echolocation use Doppler-shifted frequency of ultrasonic echo pulse to measure the velocity of target. To perform the fine-frequency analysis, the feedback signals from cortex to subcortical and peripheral areas are needed. The feedback signals are known to modulate the tuning property of subcortical neurons. However, the neural mechanism for modulation of the tuning property is poorly understood. To address this issue, we present a neural model for detecting Doppler-shifted frequency of echo sound reflecting from a target. We show here that the direction of tuning best frequency shifts is determined by a single mechanism consisting of two components, or facilitation and inhibition. We also propose a functional role of the best frequency shift in extracting the information of target velocity from background signal reflecting from trees.

Keywords — Echolocation, Bat, Corticofugal signal, Network model, DSCF area

1 はじめに

ヒゲコウモリは、自らが発した超音波のパルスとそのエコーの間の時間的相関を脳内で解析することにより、空中を飛んでいる昆虫の速度、距離、形状などの詳細な情報を得ることができる[1]。その脳内では、自分が発したパルスや目標物に反射して跳ね返ってくるエコーの様々な情報が処理される。コウモリが受ける刺激の中には、自分のえさとなる昆虫の情報だけでなく、森の木々や草などから反射された背景情報が含まれている。その中にうもれた昆虫情報だけをうまく取り出すためには、脳内の情報処理においてフィードフォワード入力の処理と同時にフィードバック信号をうまく使うことが重要である。コウモリは昆虫の相対速度や羽ばたきの情報をDSCF (Doppler-shifted Constant Frequency Area) でエコー音の周波数シフトと音圧の情報からしることができる。最近の生理学的実験では、そのニューロンの電気刺激に対する下位の部位であるIC (Inferior Colliculus) ニューロンのチューニング特性の変化が調べられている[2][3]。しかしながら、このようなトップダウン信号がエコーロケーションにどのように寄与するか明らかではない。本研究では、このトップダウン信号によるICでのチューニング特性を説明する神経モデルを作成し、木々の反射音にうもれた昆虫の信号を抽出するメカニズムを

探る。

2 モデル

図1に蝸牛(Chochlea), 下丘(IC), DSCF野からなるネットワークモデルを示す。各層のニューロンは周波数に対して規則的なマップ構造を形成している。

2.1 Chocleaの出力

i番目の蝸牛細胞の出力を次の式で与える。

$$I_i = I_0 e^{-(i-i_0)^2/\sigma_c^2} \quad (1)$$

ここで、 i_0 はエコー音の周波数に対応する周波数に調節された蝸牛細胞の番号。

2.2 ICのネットワークモデル

ICニューロンは、蝸牛からの入力をうけ、DSCF野のニューロンに出力を送る。また、DSCFニューロンからトップダウン信号を受けるi番目のICニューロンの膜電位 V_i^{IC} は、次の式で与えられる。

$$\tau_{IC} \frac{dV_i^{IC}}{dt} = -V_i^{IC} + \sum_{j=1}^N w_{ij} I_j + \sum_{k=1}^N w_{ik}^{FB} X_j^{DSCF}(t), \quad (2)$$

$$w_{ik}^{FB} = a e^{-(k-i)^2/\sigma_a^2} - b e^{-(k-i)^2/\sigma_b^2} \quad (3)$$

$$(0 < b < a; 0 < \sigma_a < \sigma_b)$$

ここで、 $X_j^{DSCF}(t)$ は、DSCFニューロンの出力。

2.1 DSCF野のネットワークモデル

DSCF野のニューロンはICから入力を受け、またネットワーク内に抑制結合がある。i番目のDSCFニューロンの膜電位 V_i^{DSCF} は次の式で計算される。

$$\tau_{DSCF} \frac{dV_i^{DSCF}}{dt} = -V_i^{DSCF} + \alpha X_i^{IC} + \sum_{k=1}^N w_{ik}^{DSCF} X_j^{DSCF}(t), \quad (4)$$

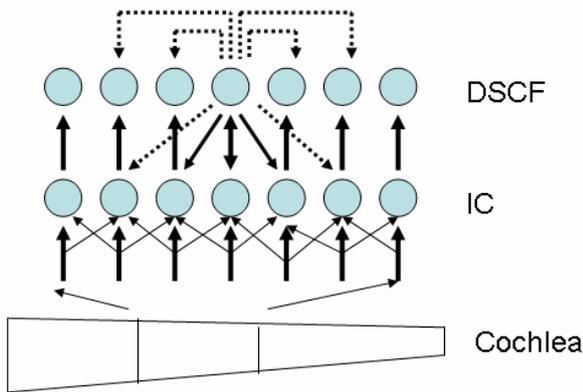


図1 ネットワークモデル: 実線は興奮性、破線は抑制性結合を表す。

3. 結果

図2に、30個のICニューロンの周波数チューニング特性を示す。図2a)は*i*=15に対応したエコー音を入力したときのICニューロンのチューニング特性を示している。図2b)では、DSCFのニューロンに電気刺激(ES)を加えた場合のICニューロンのチューニング特性の変化を示す。この電気刺激によって最適周波数(BF; Best Frequency)が刺激を加えた周波数から遠ざかる方向にシフトしている。また、図2c)に示すように、DSCFニューロンで電気刺激を加えた場所付近にBicuculin(BMI; GABA_Aの阻害剤)を投与するとチューニングのBFが刺激を受けたほうに近づくようになる。これらのBF shiftsの傾向は実験結果とよく一致している[2, 3]。

図3には、DSCFニューロンの電気刺激に対する単一のICニューロンの周波数特性の変化を示している。図2と同様に、電気刺激によってBFは刺激をうけた周波数から遠ざかる方向にシフトしている。

これらのBF shiftの変化は、DSCFとICの間の中心興奮一周辺抑制結合をもつトップダウン信号によって説明できる。DSCFの特定のニューロンに電気刺激を与えたとき、周波数の一致しないエコー音入力に対してはICニューロンのチューニング特性はこのトップダウン信号の抑制結合によってよりBFが遠ざかる方向にシフトする。一方、GABA抑制剤であるBMIによりDSCF野内の相互抑制が抑えられるとDSCFニューロンの興奮領域が広がり、その結果ICの広い領域に興奮性のトップダウン信号が送られる。これにより、逆方向へBFがシフトする。このように、BFシフトの移動方向はトップダウン信号の興奮と抑制のバランスによって統一的に説明することができる。

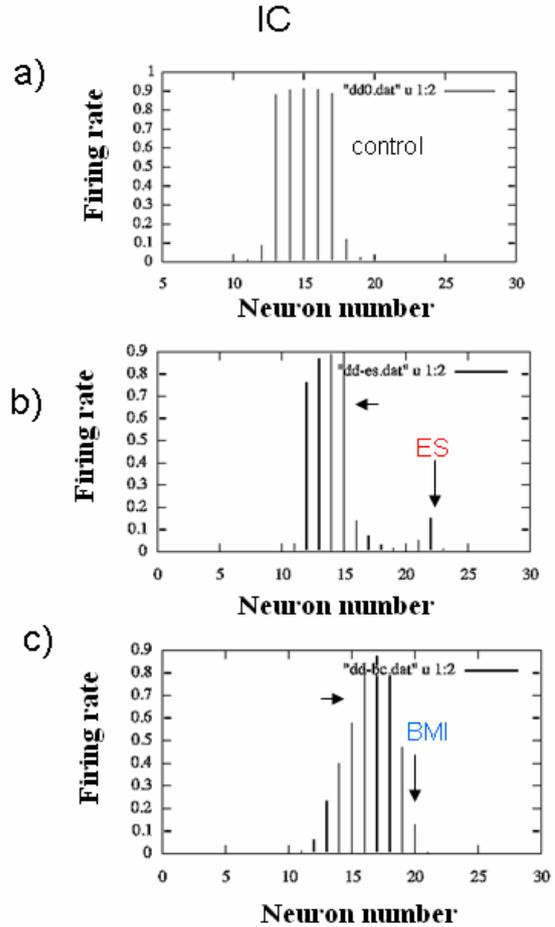


図2 ICニューロンの周波数チューニングシフト

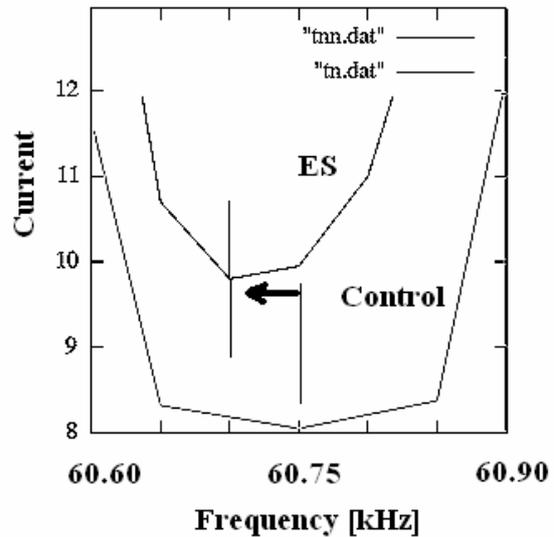


図3 単一ICニューロンの周波数チューニング特性

参考文献

[1] N. Suga (1990) Scientific American, **262**, 60-68.
 [2] Z. Xiao and N. Suga (2002) Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **99**, 15743-15748.
 [3] N. Suga and X. Ma (2003) Nature Neurosci. **4**, 783-794.