

学習による聴皮質の状況依存的な情報表現の誘導

Learning-induced context-dependent representation in auditory cortex

船水 章大

指導教員 高橋 宏知 講師

Akihiro FUNAMIZU

(Lecturer Hirokazu TAKAHASHI)

Keywords: rat, auditory cortex, context-dependent, fear conditioning, support vector machine

1. はじめに

認識とは、その時々状況や、動機・意欲に応じて変化する。認識の変化は、上述の要因による脳内の情報表現の切り替わり・変化に起因すると考える。本研究では、このような神経回路の動的なスイッチング機構を解明するために、ラット聴皮質をモデルとして、状況依存的に変化する認識と神経活動パターンの関連を検証する。また、認識の基本原則の理解を深めるために、聴皮質での周波数識別の仕組みを時空間的神経活動パターンから解析する。

2. 聴皮質の状況依存的な情報表現

2.1 方法

ウィスター系ラットの雄を用いた。状況依存的な条件付けを実施し、行動計測で同条件付けを評価した。条件付け後のラット聴皮質で、空間的な神経活動パターンを計測し(条件付け群; n = 12), 条件付けを実施していないラット聴皮質の神経活動パターン(コントロール群; n = 10)と比較した。

2.1.1 行動実験

背景音に白色雑音を提示した環境(雑音環境下)では、条件刺激(CS)の純音(周波数 20 kHz)と下肢への電気ショックを同時に与えた。一方、雑音のない環境(無音環境下)では、CSのみを提示した^[1]。条件付けの翌日に、CSのみ、雑音のみ、CSと雑音を組み合わせた音をそれぞれ3分間、ラットに提示した。ラットは恐怖を感じると体を硬直させる。そこで、音提示中の硬直時間を計測し、学習の指標とした。

2.1.2 神経活動の計測

ラットをイソフルレンで吸入麻酔し、18点の計測点を持つタングステン微小電極アレイを、聴皮質全体に複数回刺入した。各計測点で、様々な周波数、音圧の純音に対する神経反応を、無音、雑音、それぞれの環境下で計測した。

2.1.3 神経活動の解析

各計測点で、最も低い音圧で神経細胞が発火する周波数(特徴周波数)を調べた。異なる個体間で特徴周波数の空間分布を比較するために、基準座標を定義した。同座標上に、コントロール群と条件付け群、それぞれの特徴周波数分布を重ね、各群での特徴周波数分布を調べた。

2.2 結果

2.2.1 行動計測

条件付け後のラットで、CSのみ、雑音のみ、CSと雑音を組み合わせた音に対する硬直時間を計測した結果、各時間の平均は、それぞれ 65.0 秒、70.0 秒、141.8 秒だった。CSと雑音を組み合わせた音を提示したときの硬直時間が、CSのみを提示したときよりも有意に長かった(ウィルコクソンの符号順位検定: $p = 4.64 \times 10^{-5}$)。この結果は、状況依

存的な条件付けが成立したことを示す。

2.2.2 神経活動の計測

図1に、コントロール群と条件付け群で、基準座標で特徴周波数分布を重ねた結果を示す。条件付け後に、雑音環境下での聴皮質の面積が増加した。また、雑音環境下で、20 kHzに特徴周波数を持つ聴皮質の面積は、コントロール群と条件付け群でそれぞれ、 1.67 mm^2 と 3.28 mm^2 だった。一方、無音環境下では、同面積はほぼ変化しなかった(コントロール群: 2.04 mm^2 , 条件付け群: 2.15 mm^2)。図2に、聴皮質全体の面積に対する、各特徴周波数帯域が占める面

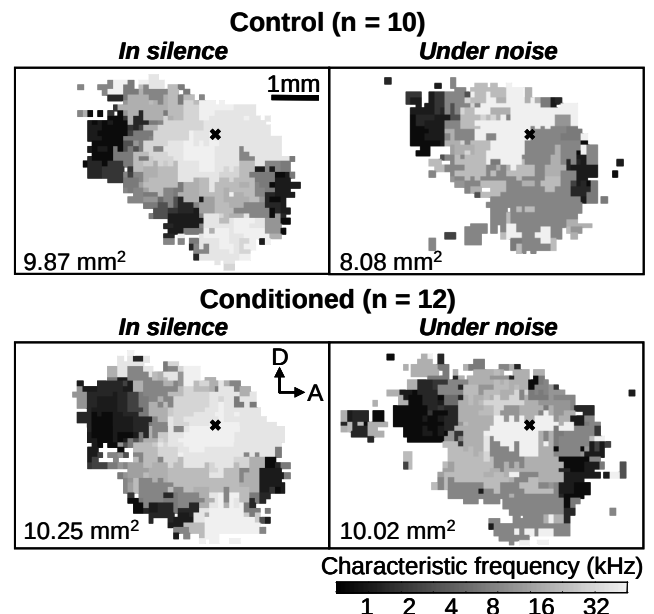


Fig.1. Characteristic frequency (CF) distribution in the derived auditory cortex

CFs are shown by gray scale. Area of auditory cortical field is given in the figure. "X" indicates the origin of the coordinate. D: dorsal, A: anterior.

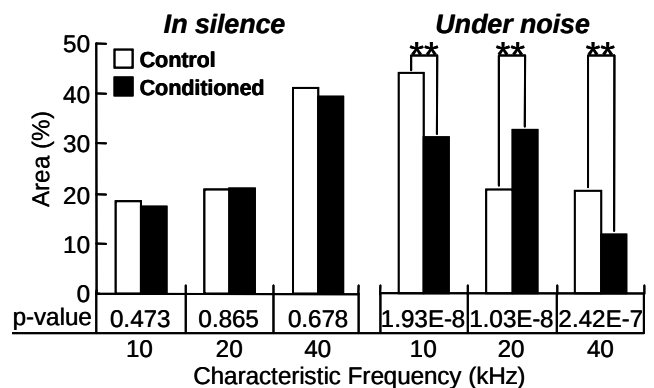


Fig.2. Areal proportion of CF

Statistical significance of χ^2 -test is given in the table. CFs above 10 kHz are shown in this figure: **, $p < 0.01$ (χ^2 -test).

積の割合を示す。雑音環境下では、条件付け群で、20 kHz に特徴周波数を持つ面積の割合が上昇し、10, 40 kHz に特徴周波数を持つ面積の割合が、有意に減少した。一方、無音環境下では、面積の割合は変化しなかった。

3. 聴皮質の時空間的神経活動の解析

3.1 方法

パターン認識手法を用いて、周波数識別に寄与する時空間的神経活動を調べた。また、各時刻での発火頻度と周波数識別率の関係を調べ、その時空間的神経活動を精査した。

3.1.1 神経活動の解析

10 匹のラットを用いた。24 点の計測点を持つ微小電極アレイを聴皮質に刺入し、様々な周波数、音圧の純音 (5-50 kHz, 50-70 dB SPL) に対する神経反応を計測した。

3.1.2 パターン認識 (Activity dropping analysis: ADA)

入力に時空間的神経活動 (24 ch x 16 time), 出力に純音の周波数を持つサポートベクターマシン (SVM) を構築した。SVM の識別率を損なわないように、入力の次元数を段階的に削減した (ADA)。また、ADA を、k 近傍法 (k = 15) でも行った。両 ADA で、入力次元数 96 まで残った神経活動を、周波数識別に寄与する神経活動パターンと定義した。

3.1.3 発火頻度分布 (Spike rate analysis: SRA)

ある周波数の純音に対する発火頻度確率分布 $P(a)$ に対して、二つの純音を識別できる確率を以下の式で定義した。

$$\int \frac{P(a)}{P(a) + P(b)} \times P(a) da$$

すべての純音の組み合わせで同確率を求め、その最大値の時空間的分布を調べた。

3.2 結果

ADA の結果、図 3 (a) に示すように、周波数識別に寄与する神経活動の発火頻度は高い傾向があった (相関係数: $r = 0.509$)。一方、発火頻度は低い、識別に寄与する神経活動もあった (図 3 (a) 右下)。図 3 (b) に ADA の識別率を示す。5 分割交差検定法での最大識別率の平均は 67.6 % だった。この結果は、ADA での周波数識別が有用であることを示す (両側 t 検定, $p = 4.87E-8$)。

SRA の結果、図 4 (a) に示すように、周波数識別率の大きい神経活動の発火頻度は、高い傾向があった (相関係数: $r = 0.719$)。図 4 (b) に周波数識別率の時空間的分布を示す。最大識別率は 96.2 % だった。図 5 (a) に、周波数識別に寄与する神経活動パターンを示す。図 5 (b) に示すように、発火頻度の低い神経活動の識別率は 52.4 % だった。すべてのラットで、発火頻度は低い、周波数識別に寄与する神経活動の識別率を調べた結果、94.7 % が有意水準 5 % を満たした。この結果は、発火頻度の低い神経活動も、周波数識別に寄与することを示唆する。

4. おわりに

脳の状況依存的な情報表現を調べるために、雑音環境下でのみ、純音と同時に電気ショックを与える状況依存的な条件付けを試みた。その結果、条件付け後の聴皮質では、雑音環境下でのみ、条件付けに用いた周波数に選択的に反応する領域が増加した。このような神経回路の動的なスイ

ッチング機構が、状況に応じた認識の神経基盤であると考えられる。また、認識の基本原理の理解を深めるために、周波数識別に寄与する時空間的神経活動を調べた結果、発火頻度の高い神経活動とともに、低い神経活動も周波数識別に寄与することが示唆された。このように、神経細胞群は、興奮と抑制のバランスで情報を表現していると考えられる。

参考文献

- [1] 船水章大, 内原匡信, 神崎亮平, 高橋宏知, “聴皮質の時空間的神経活動の状況依存的な可塑性.”, 生体医工学, 第 45 巻第 1 号, pp.17-26, 2007.

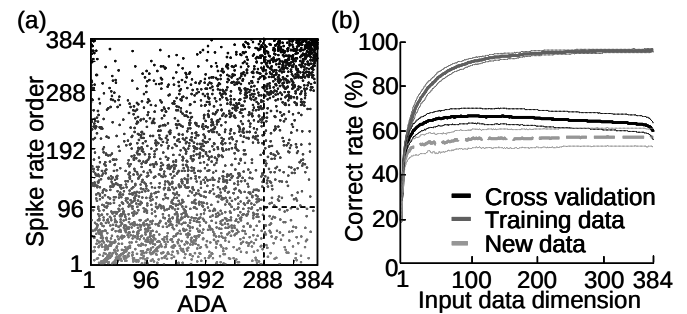


Fig.3. Activity dropping analysis (ADA)

(a) Dropping order of SVM input data as a function of normalized spike rate. Each dot indicates a neural activity and the color indicates the spike rate. (b) Means and standard errors of efficiencies in ADA. Cross validation: Result of 5-fold cross validation. Training data: Efficiencies of training data. New data: Efficiencies of new data.

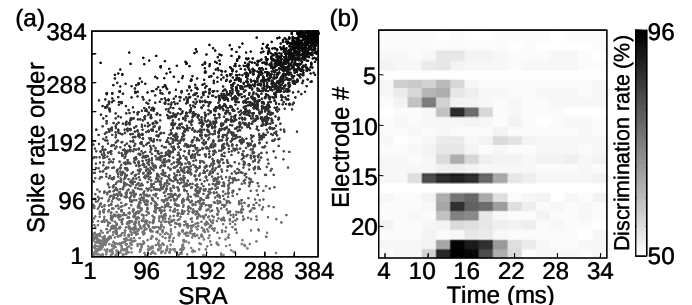


Fig.4. Spike rate analysis (SRA)

(a) Discrimination rate of neural activities as a function of normalized spike rate. (b) Example of SRA.

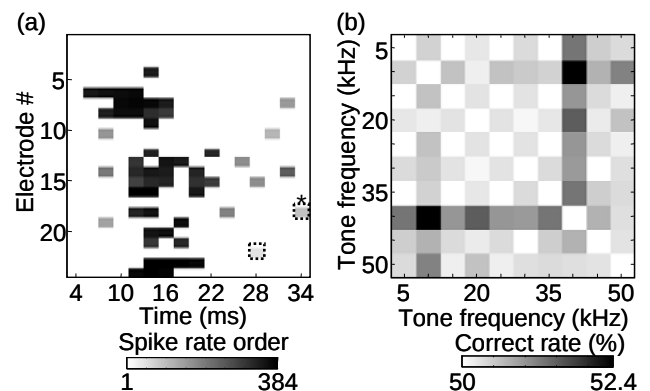


Fig.5. Frequency discrimination rate

(a) Neural activities contributed to frequency discrimination. Low spike activities (< 96 in fig.3) are highlighted. (b) Discrimination rate of low spike rate activity shown in asterisk (a).