

聴皮質の定常的な神経活動における音情報のデコーディング Decoding of Neural Activity Responding to Steady Sound in the Auditory Cortex

阿久津 完

Kan AKUTSU

Keywords: Rat, Auditory Cortex, Sparse Logistic Regression, Steady-State

指導教員 高橋 宏知 講師

(Lecturer Hirokazu TAKAHASHI)

1. 序論

周波数や情動情報といった音情報を表現する神経活動として、これまでは、音提示直後 (onset, 図1) の過渡的な神経活動が主に調べられてきた。一方で、過渡応答後の定常的な神経活動 (Steady-State; SS, 図1) には、音情報が表現されていないと考えられてきた。しかし近年、定常的な神経活動において、聴皮質の異なる2点間の発火頻度の相関が、音情報を表現していることが示唆されている [1]。また、恐怖や喜びといった音の情動情報が、定常的な神経活動の位相同期性 (Phase Locking Value; PLV) に表現されていることも示唆されている [2]。しかし、多点同時計測した神経活動から得られる、相関や同期性といった特徴ベクトルの次元は大きいため、音情報を表現している特徴量を機械的に抽出する手法が必要である。

本研究では識別器として、Sparse Logistic Regression (SLR) [3]を用いた。SLRは、データの特徴量ベクトルが高次元で、多くの成分が識別に不要な場合に、入力次元を効率的に圧縮できることが知られている。

本研究では、聴皮質の定常的な神経活動に、周波数や情動といった音情報が表現されているかどうかを調べた。具体的には、まず、音刺激に対するラット聴皮質の局所電場電位 (Local Field Potential; LFP) を、微小電極アレイで多点同時計測した。その後、過渡的または定常的な神経活動の特徴量を用いて、SLR で周波数情報を識別した際の正答率を比較した。

また、ラットに恐怖または報酬を用いた古典的条件付けを施す前後で、SLR の周波数識別における正答率を比較した。さらに、識別に寄与する特徴量についても考察した。

2. 方法

2.1 古典的条件付け

ラットを、ナイーブ群 (n = 6), 恐怖学習群 (n = 7), 報酬学習群 (n = 7) の3群に分け、学習群には、罰、または報酬に対する古典的条件付けを施した。条件刺激 (Conditioned Stimulus; CS) として、16 kHz (60 dB SPL, 10 sec) の純音を用いた。無条件刺激 (Unconditioned Stimulus; US) として、恐怖学習群では下肢への電気ショック (0.3 mA; 1 sec) を、報酬学習群は、スクロース錠2錠を用い、CS と US の組み合わせを、恐怖学習群は20または40回、報酬学習群は40回提示して、CS と US を連合学習させた。

2.2 生理実験

学習成立後のラットと、ナイーブ群のラットの聴皮質から、麻酔下の神経活動をそれぞれ計測した。96点の計測点をもつ微小電極アレイを聴皮質に刺入し、4層の局所電場電位 (LFP) を多点同時計測した。

2.2.1 過渡的な神経活動の計測

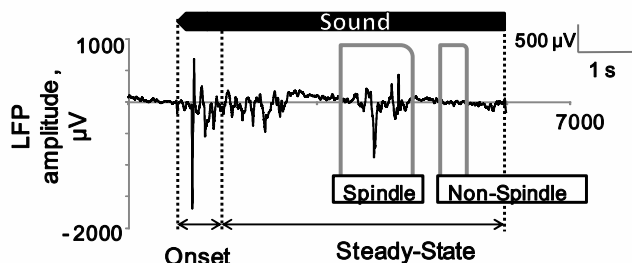


Fig. 1. Local Field Potential from Auditory Cortex

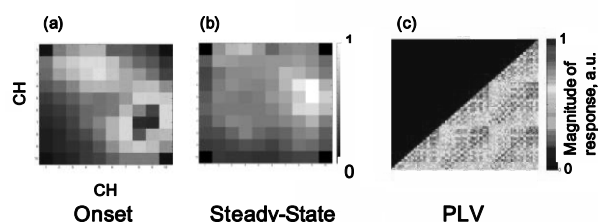


Fig. 2. Input Data

(a), (b) Each channel represents the electrode position and (c) represents PLV of each channel

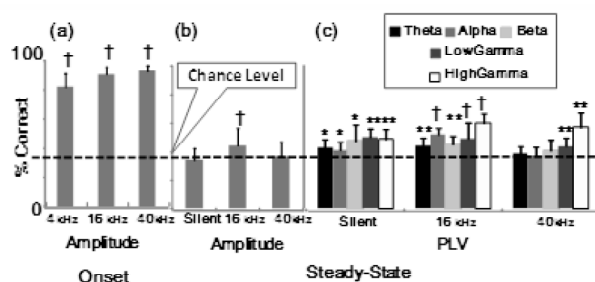


Fig. 3. Classification Performance

SLR input data as a minimum amplitude of LFP from 0 to 500 ms after the sound onset (a), average amplitude in 300ms in SS (b), PLV of Non-Spindle LFP. 10-fold cross-validation (c). (n=6) *p<0.03, **p<0.01, †p<0.001 (two-sided, t-test)

過渡的な神経活動を計測するために、15 ms の持続時間の純音を提示した。周波数は1 - 50 kHz の範囲で18種類、音圧は30 - 70 dB SPL の範囲で5種類とし、各周波数と音圧の組み合わせを20回ずつ、ランダムに提示した。

2.2.2 定常的な神経活動の計測

条件付けに用いた純音 (16kHz, 60dB SPL) と、用いていない純音 (40kHz, 60dB SPL) を30 sec ずつ提示した。各純音の前後には、音提示をしていない時間を30 sec ずつ設け、各周波数の純音を10回ずつ提示した。以上の計測を各ラットにつき、計10回施行した。

2.3 解析

2.3.1 各特徴量に対する正答率比較

SLRに入力する3つの特徴量について以下に示す。まず、過渡応答の特徴量として、音提示から0.5 s 以内の負の最

大振幅 (図 2 (a))を用いた。4 kHz, 16 kHz, 40 kHz (60 dB SPL) に対する最大振幅を 20 サンプルずつ用いて、これらの周波数を SLR に識別させた。識別の際には 5 回の相互検証をした。

定常状態の LFP には、まず、5 つの帯域のフィルタをかけた (bin 幅 300 ms, θ ; 4-8 Hz, α ; 8-14 Hz, β ; 14-30 Hz, Low γ ; 30-40 Hz, High γ ; 60-80 Hz)。定常状態の特徴量として、フィルタ後の LFP の振幅の根二乗平均値 (図 2 (b))と、紡錘波 (spindle) が無い状態 (Non-Spindle) における LFP の位相同期 (PLV, 図 2 (c)) を用いた。どちらも、無音状態、16 kHz, 40 kHz に対する入力ベクトルを 100 サンプルずつ用いて、SLR にこれらを識別させた。識別の際には、10 回の相互検証をした。

正答率は各個体の正しく識別できた入力テストデータをサンプルデータ数で割った値の平均値とした。

2.3.2 条件付けとの比較

定常状態の神経活動に、情動情報が表現されているかどうかを確認するため、学習群とナীব群における SLR の正答率を比較した。学習によって音に付随した情動情報が、PLV に表現されている可能性が示されている [2] ため、SLR への入力値として PLV を用いた。学習群とナীব群の間に、有意に差が出た帯域に関して、正答率に寄与したチャンネルと聴皮質の周波数局在性とを対応づけた。具体的には、SLR によって圧縮された特徴ベクトルの内、群同士を比較するため、特徴周波数 (Characteristic Frequency; CF) を Low (1.0-13 Hz), Middle (14-25 Hz), High (26-50 Hz) の 3 群に分け、識別に寄与したチャンネルの組み合わせに対応する CF の個数を各群の取りうる CF 数の総和で割った。最後に 3 群の総和を 1 に規格化した。

3. 結果と考察

3.1 過渡応答時と定常状態時の比較

図 3 に SLR を用いた未学習群の周波数識別精度を示す。過渡応答の正答率は全て 80% を超えた。(図 3 (a))。定常状態の各帯域振幅においては、16 kHz の識別精度のみがチャンスレベル (33%) より有意に高かった (図 3 (b))。一方、Non-Spindle 状態での計測点間の PLV においては、15 帯域中 12 帯域でチャンスレベルより有意に高くなり、帯域振幅に比べて向上した (図 3 (c))。これらの結果より、まず、定常的な神経活動にも、周波数情報が表現されていることが示唆される。さらに、紡錘波が無い時間帯のみを抽出することで、正答率が上昇したことから、定常的な状態においては、Non-Spindle 状態の PLV に音の周波数情報が強く表現されていることが示唆される。

3.2 ナীব群と学習群の比較

図 4 に、Non-Spindle 状態の PLV での、ナীব群と学習群の正答率の差分を示す。16 kHz 提示時には、 α , θ 帯域で、正答率に有意な差がみられた。特に θ 帯域では、報酬学習群の正答率のみがナীব群に比べて有意に大きかった。これは情動を伴う学習後に、特定の帯域のみ情動情報が表現されていることを示唆している。次に、報酬学習群のみで有意に正答率が向上した θ 帯域について、各特徴周波数 (CF) の寄与率を調べた。図 5 に各 CF の寄与率を示す。正答率が向上した報酬学習群では、中間の周波数の寄

与率が、ナীব群に比べて増加する傾向がみられた。このような傾向は、恐怖学習群ではみられなかった。この結果は図 4(a)の結果と対応している。中間の周波数群は、条件付けに用いた 16 kHz を含んでおり、学習によって、中間の周波数を処理する領野の面積が相対的に増加したことが示唆される。これらの結果から、定常的な神経活動が音の情動情報を表現していることが示唆される。

4. 結論

本研究では、音刺激に対する神経活動を過渡応答と定常状態に分け、計算論的手法を用いて周波数の識別を行った。その結果、定常的な神経活動からも、音の周波数情報の識別が可能であることが分かった。さらに、音に対する古典的条件付けが、この情報表現を変化させた。これらの結果は、定常的な神経活動に、周波数や情動といった音情報が表現されていることを示唆する。

5. 参考文献

- [1] R.Christopher de Charms, Michael M.Merzenich, "Primary cortical representation of sounds by the coordination of action-potential timing", Nature, vol.382, 13, 1996
- [2] 磯口知世, 野田貴大, 神崎亮平, 高橋宏知, "音の情動価がラット聴皮質の位相同期に与える影響," 聴覚研究会資料, vol.40, no.9, pp.735-739, 2010
- [3] Yamashita O, Sato MA, Yoshioka T, Tong F, Kamitani Y "Sparse estimation automatically selects voxels relevant for the decoding of fMRI activity patterns." Neuroimage 42: 1414-29, 2008

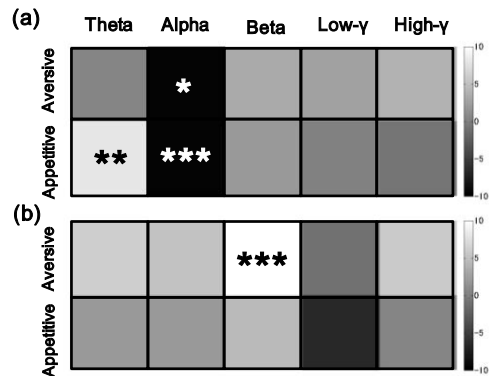


Fig.4. Difference of Naive and Conditioned Rat
* $p < 0.05$, ** $p < 0.03$, *** $p < 0.01$, (one-sided, t-test)

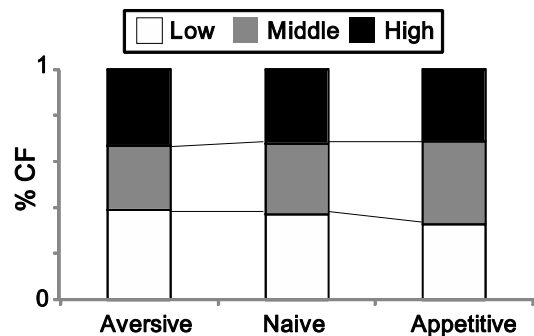


Fig.5. Percentage of CF