

相互情報量を用いた聴皮質の情報表現の解析

Analysis of auditory cortical representation with mutual information

横田 亮 指導教員 高橋 宏知 講師

Ryo YOKOTA (Assistant professor Hirokazu TAKAHASHI)

Keywords: Mutual information, Reduced measures, Representation, Auditory cortex, Time course

1. 背景・目的

情報理論の視点から、感覚皮質の情報処理の仕組みを解明しようとする研究が盛んに試みられている^[1]. 特に、相互情報量 (Mutual Information ; MI) は、刺激と神経応答間の関連性を定量的に評価できる指標として有望である. 本研究は、ラット聴皮質をモデルにして、刺激に含まれる情報 (音の周波数・音圧) が、神経応答のどのような特徴に時空間的に表現されているかを、MI を用いて考察した.

2. 方法

2.1 生理実験

麻酔下のラットの聴覚野で、様々な純音に対する神経反応を計測した. 刺激音の周波数と音圧は、それぞれ、1 kHz ~ 50 kHz まで 18 種類、30 dB SPL ~ 70 dB SPL まで 5 dB 間隔ごとに 9 種類用意し、任意の周波数と音圧を組み合わせた 162 種類の刺激音を用いた.

2.2 解析

聴皮質全域から、音刺激時の神経活動を計測し、その神経活動から、音刺激と神経活動間の MI を計測点ごとに計算した. MI は、次式で定式化され、計測した神経活動から、音刺激をどの程度の確かさで分類しうるかを定量化する.

$$I(S;R) = \sum_{s,r} p(s,r) \log_2 \frac{p(s,r)}{p(s)p(r)} \quad \dots (1)$$

ここで、 S と R は、それぞれ刺激 s と神経活動 r の条件群とする. また、 $p(s)$ と $p(r)$ は、それぞれ刺激 s と神経活動 r の周辺確率を表わし、 $p(s,r)$ は、刺激 s 、神経活動 r に対する同時確率を表わす.

神経活動の次元数は、非常に高い. したがって、刺激により誘発された神経活動を定量的に評価するためには、神経活動の様々な特徴に注目しなければならない. そこで、本研究は、次の 4 つの特徴に注目し、それぞれの視点から、音刺激と神経応答間の MI を計算した.

- i) 発火頻度の MI (firing rate MI; FRMI)
- ii) 時間的な発火パターンの MI (pattern MI; PMI)
- iii) 刺激誘発性の最初のスパイク発火の時刻の MI (first spike latency MI; FSMI)
- iv) 刺激誘発性の神経活動が最も活発になる時刻の MI (mean spike latency MI; MSMI)

FRMI と PMI は、音刺激開始時から 10 ms 時間幅ごと

に経時変化を計算した^[2]. FRMI は、平均発火頻度の大きさに比例して大きくなる. そこで、発火頻度の異なる計測点を比較するために、同時刻のスパイクの平均発火頻度で割り、発火電位あたりの MI を求めた. また、FSMI と MSMI は、刺激誘発性の最初の発火時刻と刺激誘発性の神経活動が最も活発になる時刻の累積度数分布を調べ、刺激ごとの分布の相違から、MI を計算した.

3. 結果

図 1 に、発火頻度、FRMI、PMI の経時的な変化を示す. 同図より、FRMI は、発火頻度が最大になる時刻の周辺で最大になり、一方、PMI は、発火頻度に依存しないことがわかった.

聴覚野の個々の神経細胞は、特定の周波数 (Characteristic frequency; CF) の音に選択的に反応する. そこで、計測点の CF ごとに、各種 MI を計算した.

図 2 (a) は、CF ごとに、どの時刻で PMI が最大値を取るかを示す. 同図は、横軸に CF を、縦軸に CF ごとの計測点数に対する PMI が最大になる計測点の割合を示す. また、図 2 (b) に、CF ごとの FSMI を示す. 両図から、PMI と FSMI には、CF 依存性があることがわかった. (PMI Ryan 検定 $p < 0.01$; FSMI William 検定 $p < 0.025$). さらに、PMI では、最大になる計測点の割合の CF に対する分布が、刺激時からの経過時刻に依存して変化した. また、PMI と FSMI は、共に発火頻度の高い時刻に、高い周波数で相対的に大きな MI を取った. これは、図 2 (c) に示す、同時刻で、高い周波数ほど発

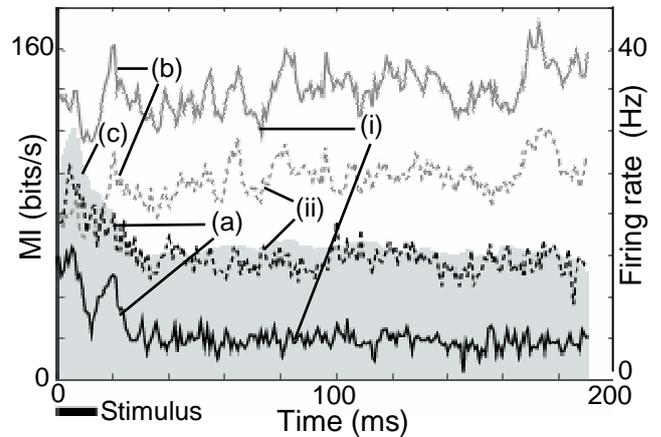


Fig. 1 FRMI and PMI with respect to a discharge rate: (a) FRMI (b) PMI; (i) MI of frequency; (ii) MI of intensity; (c) Peri-Stimulus time histograms. Each value is averaged with a 10-ms time window.

火頻度が高くなる領域が広がる結果と一致する。また、図 2 (d) に、聴覚野の領野ごとの FRMI を示す。同図に示すように、FRMI は、周波数・音圧ともに腹聴覚野 (VAF) で、他の一次 (AI)・前聴覚野 (AAF) よりも有意に小さくなった (Dannett 検定 $p < 0.05$)。

4. 考察

特定の刺激情報の MI が大きい領域は、その刺激の情報を最も復号化し易いことを示唆する。したがって、その領域は、MI の導出に用いた神経応答の特徴を利用して、その刺激情報を処理している可能性が高い。PMI と FSMI に CF 依存性が認められたことは、神経応答の時間情報の処理方式が、各 CF の神経細胞ごとに異なることを示唆する。さらに、PMI の CF 依存性が時刻により異なることから、時間情報の処理方式は、時刻に依存してダイナミックに変化することが推察される。また、各 CF における PMI・FSMI の値と面積の割合の一致は、神経細胞が少ないほど、応答の時間情報に関してより複雑な処理を行っていることを示唆する。一方、FRMI が領野に依存して変化したことは、発火頻度情報の処理方式が、領野間で異なることを示唆する。また、同一領野内の FRMI は、CF に依存しないことから、周波数情報を発火頻度へ符号化する仕組みは、同一領野内では変わらない。

表 1 にまとめたように、MI ごとに様々な時空間的な特徴が認められたことは、

- (i) 聴覚野の神経細胞が、音刺激の各特徴の情報を領域や時間ごとに分散して処理していること、
- (ii) その処理の方式は、神経応答の特徴ごとに異なることを示唆する。

5. 結論

本研究では、様々な視点から、音刺激と神経応答間の MI を計算した。その結果、聴覚野の神経細胞は、音刺激の周波数や音圧の情報を、神経応答の様々な特徴を用いて時空間的に分散しながら表現していることを示した。

参考文献

[1] Israel, N. and Gal, C., "Information theory in auditory research.", *Hearing Research*, vol.229, pp.94-105, 2007
 [2] Sugase, Y., Yamane, S., Ueno, S. and Kawano, K., "Global and Fine Information Coded by Single Neurons in the Temporal Visual Cortex.", *Nature*, vol.400, pp.869-873, 1999

Table1: Summary of spatio-temporal characteristics of MI

刺激 \ 応答	FRMI	PMI	FSMI	MSMI
周波数	領野	経時変化 領野 & CF	CF	×
音圧	領野	経時変化 領野 & CF	×	×

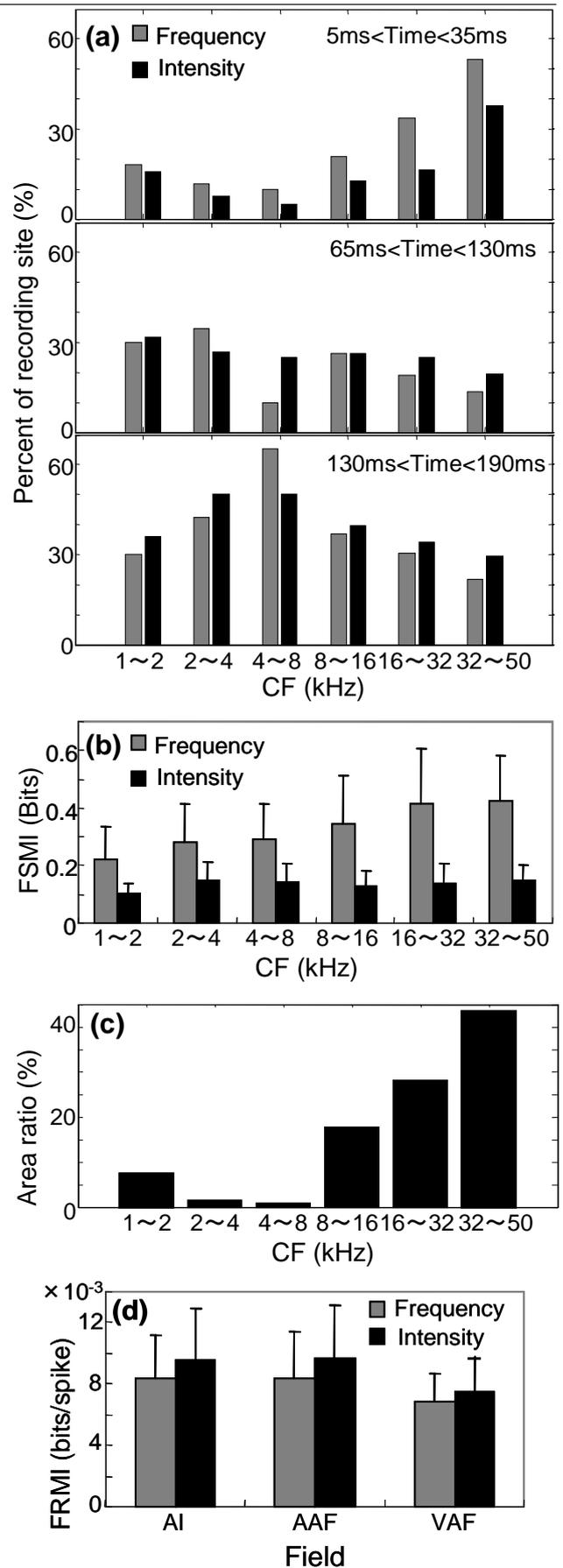


Fig. 2 (a) CF-dependant PMI changed temporally (b) CF-dependant FSMI (c) CF-dependant area ratio (d) field-dependant FRMI