

# 音の知覚を生み出す聴覚野の神経活動

高橋宏知<sup>†1</sup>

**概要:** 聴覚野は、前頭前野、扁桃体、線条体など様々な領域と直接的な結合をもつことで、知覚や情動的な情報処理に決定的な影響を与えており、質感情報の表現にも深く関わっているはずである。本研究では、ラットの聴覚野において、微小電極アレイを用いて、時空間的な神経活動パターンを計測し、音の知覚や質感に関わる神経活動の特徴を考察する。

**キーワード:** 聴覚野, 知覚, 機能マップ, 位相同期, 微小電極アレイ

## Cortical activities underlying auditory perception

HIROKAZU TAKAHASHI<sup>†1</sup>

**Abstract:** The auditory cortex interacts with various regions in the brain, such as the prefrontal cortex, amygdala and striatum. These global interactions might play crucial roles in auditory perception and emotional processing. We mapped and characterized the spatio-temporal patterns in the auditory cortex with a microelectrode array and attempted to identify such neural signatures.

**Keywords:** Auditory cortex, Perception, Functional map, Phase synchrony, Microelectrode array

### 1. はじめに

聴覚野 (または、聴覚皮質) は、聴覚系の最上位中枢として、意識にのぼる聴知覚の生成に密接に関わっていることは疑いない [1]. また、聴知覚には、任意の純音を組み合わせると、協和音や不協和音のような音響学的な質感に加え、長調や短調のような情動的な質感が生まれる。さらに、聴覚野は様々な情動学習でも柔軟に変化する。これらのことから、聴覚野は、前頭前野、扁桃体、線条体など様々な領域と直接的な結合を有し、知覚や情動的な情報処理に決定的な影響を与えていると考えられる (図 1) [2].

これらの神経メカニズムの解明を目指し、本稿では、聴覚野の神経活動の特徴を考察する。まず、機能マップに注目し、マップ内の神経細胞の多様性と可塑性の性質から、聴覚野の情報処理の原理を考察する [3]-[5]. 次に、聴覚野内の位相同期パターンに注目し、神経集団による情報表現を考察する [2], [6]-[8].

### 2. 周波数マップ

音情報は、蝸牛で神経信号に変換された後、延髄、中脳、視床の複数の中継核を経て、聴覚野に至る。蝸牛の各部位は、音から特定の周波数情報を抽出するため、蝸牛には空間的な周波数マップが形成される。周波数マップは、上位の中継核にも引き継がれ、聴覚中枢の情報処理に重要な役割を担うと考えられている。

周波数マップの意義として、二つの仮説が考えられる。

第一の仮説は、重要な情報の表現は、必要以上に多くの神経細胞が冗長的に動員されることで、頑健な情報表現を実現している可能性である。第二の仮説は、神経細胞の情報表現は冗長的ではなく、むしろ、周波数マップの面積が神経細胞の多様性を反映している可能性である。

著者らは、ラットの聴覚野を対象とし、上記の二つの仮説の妥当性を検証した [3]-[5]. ラットの聴覚野の各神経細胞は、特定の音の周波数に対する選択性を示す。そこで、同じ周波数選択性を示す細胞を集めて精査したところ、各細胞の反応特性は様々であることがわかった (図 2 (a)).

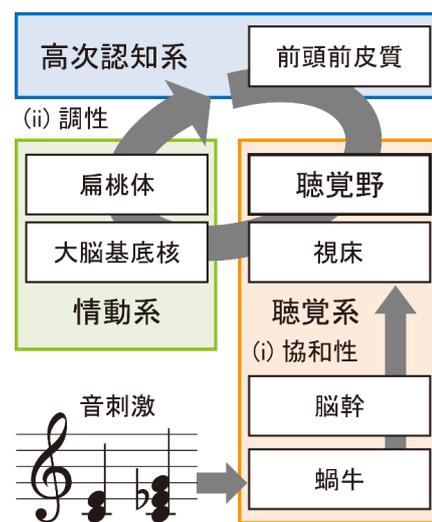


図 1 聴知覚に関わる脳領域

<sup>†1</sup> 東京大学先端科学技術研究センター  
Research Center for Advanced Science and Technology, the University of Tokyo.

これらの反応特性を刺激と発火数の相互情報量で定量化したところ、神経細胞の反応特性の多様性が周波数マップ上の面積と密接に関係した(図2(b)). すなわち、周波数マップ上で広い面積を占める部位では、神経細胞の反応特性は豊かな多様性を示し、逆にマップ上の狭い部位では画一的な細胞が多いことがわかった. なお、聴覚野で広い面積を占め、豊かな多様性を示す部位は、高い周波数(超音波)領域だった. これは、ラットが超音波帯域でコミュニケーションしているため、その領域がラットにとって重要であるからだとして唆される.

さらに、ラットに音に関わる学習をさせたところ、周波数マップが変化し、それに伴い神経細胞の多様性も変変動した(図2(c)). 興味深いことに、学習途中では聴覚野で音に反応する神経細胞が増え、それに伴い、細胞集団の多様性も増加した. 一方、学習終盤では音に反応する神経細胞が減り、その多様性も減じた. これらの結果から、脳にとっての学習とは、多くの神経細胞を情報処理に参加させて、神経活動の多様性を増やすことで、効率的に解を発見することであると考える. また、学習の効用とは、一旦、解を発見した後、無駄な神経活動を排除することで、効率的な情報処理を獲得することである.

以上から、周波数マップの面積は神経細胞の多様性を反映しているという第二の仮説が正しいことが裏付けられた. 脳内には様々な機能マップがあるが、それらは、神経反応の多様性生成に効率的な機構であると考えられる.

### 3. 定常的な位相同期パターン

上記実験では、聴覚野の情報表現を解明するために、音刺激提示後から数100ms以内の一過性の反応を調べた. この反応は、視床から皮質への入力を主に反映している. し

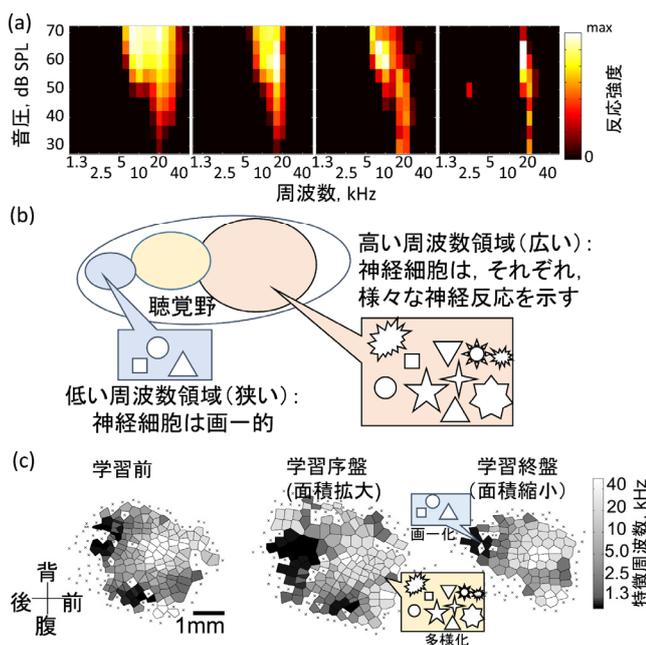


図2 機能マップ上の占有面積と神経細胞の多様性

かし、実際の知覚は、数100ms以上でも安定して続くので、一過性の反応後に聴覚野内の情報処理で生じるはずである. そのような情報処理では、連続した音刺激に対して、聴皮質内の神経活動は定常的になるはずである. 著者らは、定常的な神経活動として、聴覚野の位相同期パターンに注目した. 具体的には、連続音を提示しながら聴皮質内の局所電場電位を多点同時計測し、任意の電極ペアで帯域ごとの位相同期を調べた [2], [6].

#### 3.1 音の質感情報

協和音と不協和音に対する聴覚野の位相同期を調べたところ、位相同期は、協和音に対しては不協和音に対してよりも、帯域にかかわらず強くなった. 特に、 $\beta$ 帯域以上(15 Hz-)の位相同期は、単独の構成音を提示したときと比較すると、協和音を提示した場合は強くなり、逆に不協和音では弱くなった(図3, 図4). 生物の鳴声は、調和的な倍音構造を持っていることが多いことが知られている. 神経細胞レベルでも、倍音構造に選択的な反応もしばしば報告されている. これらのことから、位相同期パターンも、自然界の音環境に適応した情報処理を反映していると考えられる.

同様に、音の調性でも調べたところ、 $\alpha$ 帯域(8-14 Hz)と $\gamma$ 帯域(30-80 Hz)において、長三和音は短三和音よりも位相同期を高めることがわかった(図5). 一般的に、高

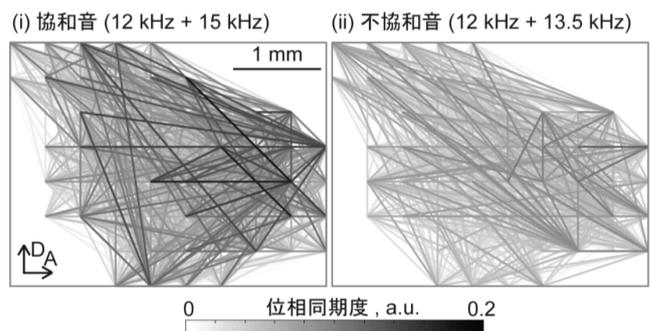


図3 聴覚野の位相同期パターンの例

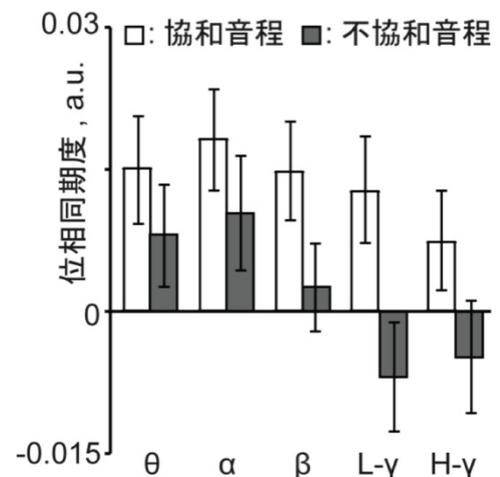


図4 協和音と不協和音に対する位相同期度

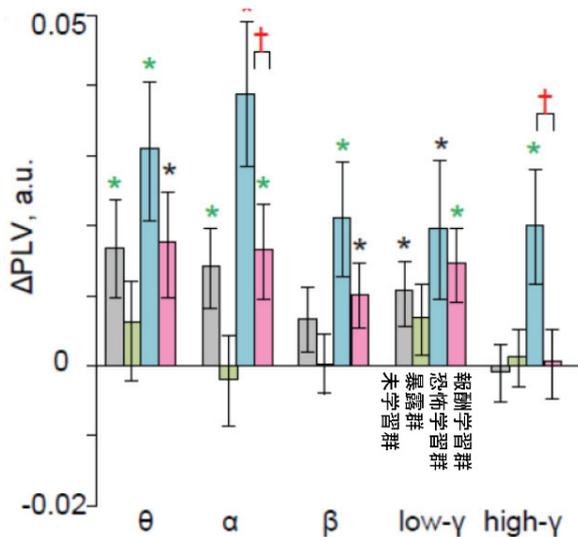


図5 聴覚野の位相同期パターンの例

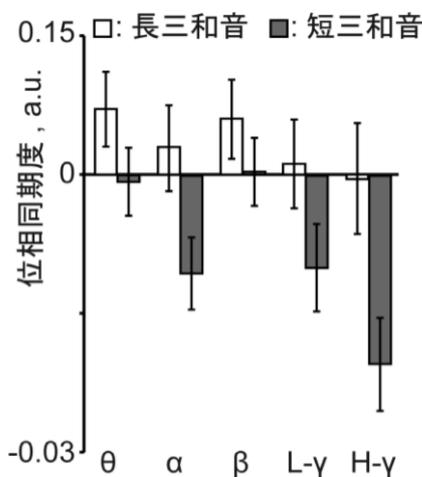


図6 協和音と不協和音に対する位相同期度

周波数成分の神経活動は、領野内の情報処理に適しており、低周波数成分の神経活動は、離れた領野で位相を同期できることから、領野間の情報伝達に適していると考えられる。音の情動的な質感が、聴覚系、情動系、高次認知系で相互に情報処理されているのであれば、これらの領野では帯域間同期が発生していると考えられる。先行研究でも、大脳辺縁系の側坐核では、報酬課題中に、 $\gamma$ 帯域と $\alpha$ 帯域の帯域間同期が強まっていることから、 $\alpha$ 帯域の神経活動は、大脳辺縁系との情報伝達に利用されていると考えられる。

これらの結果から、位相同期パターンは、音環境に適応した音の質感情報を表現していることが示唆される。

### 3.2 音学習に対する位相同期パターンの可塑性

古典的条件付けにより、特定の周波数の刺激音と、恐怖または報酬を連合学習させた後、位相同期パターンの変化を調べた。実際には、未学習群、音を受動的に暴露した暴

露群、報酬学習群、恐怖学習群の4群で神経反応を調べた。

報酬・恐怖学習後、位相同期パターンは、帯域にかかわらず、音提示中に増加した。特に、 $\alpha$ 、 $\text{high-}\gamma$ 帯域の位相同期は、恐怖・報酬学習群間で差異を示し、恐怖学習群では報酬学習群よりも高くなった。

これらの結果から、位相同期パターンには、学習により獲得された音の情動情報が表現されていることがわかった。

## 4. おわりに

聴覚や音学習は、多様性に富む神経細胞に支えられている。聴覚野の周波数マップとその可塑性は、個々の神経細胞の多様性と密接に関係している。学習や環境に応じて、聴覚野は、神経細胞の多様性を獲得し、重要な情報の処理には多種多様な多数の細胞を割り当てている。

さらに、聴覚野の定常的な神経反応には、音の質感情報や情動情報が表現されている。これらの情報は、聴覚野だけで生成されるわけではなく、情動系や高次認知系との相互作用で生成されるはずである。音の質感情報の脳内表現を明らかにするためには、今後、聴覚野を中心とした広域ネットワークを調べる必要がある。

## 参考文献

- [1] 高橋宏知。「聴皮質の情報処理」、音響学会誌, 2011, vol. 67, no. 3, pp. 119-124.
- [2] 白松知世, 高橋宏知。「聴覚一音の質感認知」、Brain and Nerve—神経研究の進歩, 2015, vol. 67, no. 6, pp. 679-690.
- [3] Yokota, S., Aihara, K., Kanzaki, R., Takahashi, H. “Tonotopic-column-dependent variability of neural encoding in the auditory cortex of rats.” Neuroscience, 2012, vol. 223, pp. 377-387.
- [4] Takahashi, H., Yokota, R., Kanzaki, R. “Response variance in functional maps: Neural Darwinism revisited.” PLOS ONE, 2013, vol. 8, no. 7, e68705 (7 pp)
- [5] Yokota, S., Aihara, K., Kanzaki, R., Takahashi, H. “Learning-stage-dependent plasticity of temporal coherence in the auditory cortex of rats.” Brain Topography, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 401-410.
- [6] 磯口知世, 阿久津完, 野田貴大, 神崎亮平, 高橋宏知。「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」、電気学会論文誌 C, 2012, vol. 132, no. 10, pp. 1608-1616

†1 東京大学先端科学技術研究センター  
Research Center for Advanced Science and Technology, the University of Tokyo.