

## 論文の内容の要旨

### 聴皮質における音の質感と情動情報の表現

氏名 白松 知世  
(磯口)

音には、様々な質感、つまり音の周波数構造のカテゴリが存在する。例えば、2つの周波数の音で構成される二音和音は、よく響く和音と、うなりを発生させる和音に分けられる。前者は協和音、後者は不協和音と呼ばれており、それぞれ異なる質感をもつことが、心理物理実験で調べられてきた。一方で、3つの周波数の音で構成される三音和音の一部は、長三和音、短三和音と呼ばれており、それぞれ長調、短調といった調性に関わる。また長調の楽曲は幸福感を、短調の楽曲は悲哀を誘発することも、心理物理実験で調べられている。こうしたことから、三音和音の調性といった質感は、情動的な質感をもつと考えられる。ある和音が協和音、不協和音であるか、または長調、短調の調性をもつかは、和音を構成する音の周波数比によって決まると言われており、実際に、二音和音の協和性を表す物理的な指標として不協和度が、三音和音の調性を表す物理的な指標としてモダリティが、それぞれ先行研究で提案されている。このように、和音の質感や、情動的な質感については、心理物理的、物理的な側面から多数の研究がおこなわれているが、神経活動において、質感の情報がどのように表現されているかは、解明されていない。

本研究の目的は、三音和音の調性をもつ情動的な質感を表現している、神経活動の特徴量を特定することである。そのために、ラット聴皮質を対象として、音の情動情報と、音の質感を表現する神経活動

の特徴量を特定し、それらを比較した。具体的には、ミスマッチネガティビティ (MMN) と、定常的な神経活動の帯域強度 (power), 位相同期度 (PLV) を対象とし、これらの神経活動が、音の情動情報や質感を表現しているかどうかを調べた。

## 1. ラット聴皮質における、神経活動の評価手法の構築

はじめに、ラット聴皮質から、ヒトと同様の性質をもつミスマッチネガティビティ (MMN) を多点同時計測する実験系を構築した。この実験系で計測されたラットの MMN が、ヒトの MMN と同様の性質をもつ事を、MMN の潜時、逸脱検出性、空間分布、NMDA 受容体への依存性の、4つの観点から示した。

第一に、MMN が、刺激音の周波数が変化してから 50 – 150 ms 後に、聴性誘発電位に現れる、陰性のゆらぎであることを確認した。第二に、MMN は、連続した刺激に対する神経活動の慣れからは説明できないことを確認した。第三に、聴性誘発電位の陽性成分である P1 と、MMN の空間分布から、両者が共に聴皮質から発生していること、一方で、P1 と MMN の聴皮質内の空間分布が異なっていることを確認した。第四に、NMDA 受容体の阻害剤を投与した所、MMN の振幅が減少したことから、MMN の NMDA 受容体への依存性を確認した。これらの結果から、本実験系で計測されるラット聴皮質の MMN が、ヒトと同様の性質を持つことを確認した。

また、ラット聴皮質の定常的な神経活動の帯域強度と位相同期度が、音の周波数情報を表現しているかを、機械学習を用いて調べた。具体的には、Sparse Logistic Regression (SLR) を識別機として用い、音刺激に対する過渡的な神経活動と、定常的な神経活動から、刺激音の周波数情報の抽出を試みた。その結果、定常的な神経活動からも、音の周波数識別が可能であった。特に、紡錘波が発生していない時間帯の LFP の、高周波数帯域の強度、位相同期度において、識別精度が高かった。また、音刺激直前の無音状態に対する神経活動を、これらの特徴量の初期値として減算すると、全ての周波数帯域の識別精度が向上した。さらに、帯域強度も、位相同期度も、聴皮質の周波数局在構造に依存した情報表現を有する事を明らかにした。これらの結果は、聴皮質の定常的な神経活動の、帯域強度と位相同期度にも、音の周波数情報が表現されていることを示す。

## 2. 音の情動情報を表現している神経活動の特徴量の特定

次に、ラット聴皮質の MMN と定常的な神経活動の帯域強度、位相同期度が、音の情動価といった、情動情報を表現しているかどうかを調べた。初めに、16 kHz の純音に対する曝露もしくは、罰または報酬を用いた古典的条件付けを、ラットに施した。曝露もしくは古典的条件付けが成立したラット (曝露群、恐怖学習群、報酬学習群) と、これらを施していないラット (未学習群) の聴皮質から、ミスマッチネガ

ティビティ (MMN) と、音に対する定常的な神経活動を多点同時計測した。第一に、16 kHz の音に対する MMN の振幅を、各群で比較した。その結果、曝露群の MMN の振幅が、他の 3 群よりも有意に小さかった。本研究では、この結果を考察するために、経験的に獲得された、音の発生確率の低さと、音と連合した情動の強度との和を、音の顕著度と定義し、MMN の振幅は、音の顕著度を表現していることを考察した。一方で、恐怖学習群と報酬学習群の MMN には、有意な差が無かったことから、MMN は音の情動価は表現していなかった。第二に、16 kHz の音に対する定常的な神経活動における、帯域強度と位相同期度を各群で比較した。その結果、まず、恐怖学習群と報酬学習群の帯域強度が、未学習、曝露群よりも低かった。このことから、帯域強度は、古典的条件付けの有無を表現している一方で、音の情動価は表現していないことが明らかになった。一方、 $\alpha$ , high- $\gamma$  帯域において、恐怖学習群の位相同期度が、報酬学習群よりも高かった。この結果は、 $\alpha$ , high- $\gamma$  帯域の位相同期度が、音の情動情報を表現していることを示す。

### 3. 音の質感を表現している神経活動の特徴量の特定

初めに、ラットが音の質感の違いを、行動レベルと神経活動レベルで区別できるかどうかを、以下の手順で調べた。第一に、ラットに、罰を用いた古典的条件付けを施した。うなりの強い二音和音 2 種類と、下肢への電気刺激 (無条件刺激) との組み合わせを 48 回ラットに提示した。一方で、うなりの弱い二音和音 2 種類と、無条件刺激は連合せなかった。条件付けから 24 時間以上後に、ラットの行動を画像計測した。条件付けに用いた (既知) うなりの強い和音、弱い和音 1 種類ずつと、条件付けに用いていない (未知) うなりの強い和音、弱い和音を 1 種類ずつ、合計 4 つの和音をそれぞれ 120 秒間提示している間のラットの硬直行動時間を定量化した。その結果、既知、未知にかかわらず、うなりの強い和音に対する硬直行動時間が、うなりの弱い和音に対する硬直行動時間よりも有意に長かった。この結果から、ラットが二音和音のうなりの強弱といった、音の質感の違いを、行動レベルで区別できることを確認した。第二に、ラット聴皮質において、二音和音のうなりの強弱といった質感の違いが、MMN を発生させるかどうかを調べた。協和音 2-3 種類を標準刺激、不協和音 1 種類を逸脱刺激、または、不協和音 2-3 種類を標準刺激、協和音 1 種類を逸脱刺激としたオドボール課題提示中の、ラットの聴皮質から聴性誘発電位を多点同時計測した。その結果、これらの質感の変化に対しても、MMN が発生したことから、ラットは、二音和音のうなりの強弱といった、音の質感の違いを、神経活動レベルでも区別できることを確認した。また、うなりの弱い和音に対する MMN の振幅が、うなりの強い和音に対する MMN よりも大きかったことから、MMN は、音の質感の違いも表現していると考えた。

さらに、ラット聴皮質において、二音和音の協和性や、三音和音の調性といった、音の質感を表現している神経活動の特徴量を特定するために、定常的な神経活動を多点同時計測した。楽典を参考に、二音和音刺激として、4つの協和音と3つの不協和音を、三音和音刺激として、2つずつの長三和音と短三和音、3つの無調性和音をそれぞれ作製した。作製した和音と、和音の構成音を、それぞれ30秒間ずつラットに提示し、定常的な神経活動を多点同時計測した。さらに、5つの帯域における位相同期度 (PLV) をそれぞれ求め、協和音と不協和音、長三和音と短三和音で比較した。その結果、まず、二音和音では、 $\beta$ 以上の帯域で、協和音の位相同期が、不協和音よりも強かった。また、三音和音では、 $\alpha$ , low- $\gamma$ , high- $\gamma$ 帯域で、長三和音の位相同期が、短三和音よりも強かった。これらの結果から、二音和音の協和性といった質感は、聴皮質の高周波数帯域の位相同期度に表現されており、三音和音の調性といった質感は、 $\alpha$ , low- $\gamma$ , high- $\gamma$ 帯域の位相同期に表現されていることを明らかにした。

#### 4. 音の情動的な質感を表現している神経活動の特徴量についての考察

三音和音の調性を表現している神経活動の特徴量の結果と、音の情動情報を表現している神経活動の特徴量を比較した。その結果、長調と短調といった調性が持つ質感のうち、情動的な質感は、聴皮質の $\alpha$ 帯域と high- $\gamma$ 帯域の位相同期に表現されていると考えられる。このことを、神経活動の帯域間同期から考察した。聴皮質において、high- $\gamma$ 帯域の神経活動は、側抑制が主に反映されている。聴皮質は周波数局在構造をもつことから、この帯域の神経活動は、周波数構造に対する情報処理を特に強く反映していると考えられる。一方で、情動に深く関わる大脳辺縁系においては、 $\alpha$ 帯域と $\gamma$ 帯域の帯域間同期が、情報伝達に重要な役割を担っている。特に、報酬や快楽といった情動に強く関わる側坐核では、報酬に関わる課題中に、 $\gamma$ 帯域と $\alpha$ 帯域の帯域間同期が強まることが報告されている。これらのことから、本研究の結果を、帯域間同期による情報伝達システムに当てはめて考察することができ、長調や短調といった、三音和音の調性が持つ音の情動的な質感は、聴皮質内では、定常的な神経活動の、 $\alpha$ , high- $\gamma$ 帯域の位相同期度に表現されている可能性を示唆する。