

情動センシング用 Brain-Computer Interface の基盤技術

Methodological Establishment of Brain-Computer Interface for Emotion Sensing

1081017

研究代表者 東京大学先端科学技術研究センター 講師 高橋 宏知

[研究の目的]

「幽霊の正体見たり枯れ尾花」とも詠われているように、脳は情報処理方法を状況に応じて変化させている。様々な状況は、快/不快、勇気/怖気など、様々な情動、すなわち、脳の「状態」を作り出す。本研究の目的は、神経活動からこのような情動をセンシングする手法を開発することである。

神経活動に含まれる情報を用いて、外部機器を動かす **Brain-Computer Interface (BCI)** が国内外で盛んに研究・開発されている。これまでの研究で、神経活動に基づいて、手足の運動のように、具体的な情報を予測する手法は、ほぼ技術的に成熟してきた。しかし、従来の BCI は、脳が状況に応じて情報表現を変化させていること、すなわち、脳活動の状況依存性を考慮していない。脳の状態の変化を捉える技術は、BCI の性能向上に寄与するばかりでなく、情動を読み出す BCI の開発の礎になる。

著者らは、これまでに、脳の状況依存性を考察するために、ラットを動物モデルとして、「状況依存的な条件付け」を提案した。ラットの聴皮質は、明確な周波数局在構造を有しており、部位ごとに特定の音の周波数に選択的に反応する。また、この構造は、学習や環境に応じて可塑的に変化する。状況依存的な条件付けでは、背景雑音がある環境でのみ、特定の音(条件刺激)と下肢への電気ショック(罰)が同時に起こり、静かな環境は安全であることをラットに学習させる。条件付け後、マルチユニット活動(発火電位)に基づいて、聴皮質の周波数局在構造を調べたところ、雑音下のみで、条件刺激に選択的に反応する領域の面積(細胞数)が増えた。この結果は、状況の変化(背景雑音の有無)に応じて、聴皮質が情報処理方法を変化させている、すなわち、脳の状態を変化させていることを裏付ける。

本研究は、このような動物モデルを利用して、個々の神経細胞のマルチユニット活動を精査しなくとも、脳の状態を読み出せる神経活動を探索する。具体的には、 γ 帯域 (30 – 80 Hz) の局所電場電位 (Local field potential; LFP) に注目する。 γ 帯域の神経活動は、脳内の情報処理に重要な役割を担っており、従来の脳波を用いた BCI も同帯域の神経活動に注目することが多い。さらに、本研究では、 γ 帯域の LFP とマルチユニット活動との関係にも着目し、情動的な神経情報処理のメカニズムを考察する。

[研究の内容・成果]

条件付け：背景音に白色雑音 (0.1 - 50 kHz; 60 dB SPL) を提示した環境(雑音環境下)で、条件刺激(CS)の純音 (20 kHz; 80 dB SPL) と無条件刺激(US)の下肢への電気ショックを同時に与えた。CS は 20 秒とし、US は CS の最後の 1 秒に与えた。一方、雑音のない環境(無音環境下)では、CS を提示したときに US は与えない。学習を促進するために、無音環境下での条件付けを 4 回、雑音環境下での条件付けを 3 回、交互に実施し、前者の各回では CS を 10 回、後者の各回では CS-US を 5 回ずつ与えた。

条件付けの翌日に、ラットの行動から学習効果を評価した。

ラットは、恐怖を感じると体を硬直させる。この硬直時間を学習効果の指標とし、無音環境下での CS、雑音、雑音環境下での CS を、それぞれ、3 分間提示し、各音に対してラットの硬直時間を計測した。その結果、雑音環境下での CS に対する硬直時間は、無音環境下の CS や雑音のみに対する硬直時間よりも有意に長くなった。この結果は、状況依存的な条件付けが成立していることを示している。

生理実験：条件付け後のラットを麻酔（イソフルレン；5%で導入，1%で維持）し，頭部固定装置に設置後，右側頭骨と硬膜の一部を除去して聴皮質を露出した。図 1 (a) のように，聴皮質の表面から約 0.5 mm の深さにタングステン微小電極（California Fine Wire）を刺入し，音刺激に対するマルチユニット反応と LFP を同時計測した。刺激には純音を用い，周波数と音圧をパラメータとして，様々な純音に対する聴皮質の活動を計測した。

図 1 (b) のように，雑音環境下と無音環境下で，マルチユニット反応から各計測点の周波数選択性を調べた。その結果，同図に示したように，各計測点が選択的に反応する周波数（特徴周波数）は，雑音環境下と無音環境下で，しばしば異なった。これらの例では，無音環境下で 10 kHz に選択的に反応した計測点（#1）や，周波数選択性を持たない計測点（#2）が，雑音環境下では，CS の周波数（20 kHz）に選択的に反応した。このような解析に基づいて，条件付け前後で，聴皮質の周波数局在構造を調べたところ，図 1 (c) に示すように，条件付け後（Conditioned）では，条件付け前（Naïve）よりも，CS の周波数（20 kHz）に反応する領域が増えた。

神経活動の解析：上記の音刺激中の神経活動において， γ 帯域の LFP のパワーに注目し，聴皮質内での空間的な分布を条件ごとに調べた。次に，マルチユニット活動から，聴皮質が刺激音の情報処理を開始する時刻（First spike latency; FSL）を推定し，図 2 のように，FSL に対する β 帯域（14–30 Hz）と γ 帯域の LFP の位相同期を調べた。

神経細胞群が協調して情報を処理するためには，何らかの時間的な基準が必要になる。通常の生理実験では，刺激の発生時刻を基準として，神経活動を解析する。しかし，刺激の発生時刻は，実験者によって任意に定められるため，聴皮質の神経細胞は，その時刻を事前に知ることはできず，それを基準にして情報処理を開始できない。そこで，最近の研究では，情報処理の時間的な基準の候補として，特定帯域の LFP が考えられている。このような仮説を検証するために，LFP と FSL の位相同期を調べ，神経情報処理のメカニズムを考察する。

FSL の計算では，神経細胞は，無刺激時にはポアソン分布に従って発火するという仮定のもとで，マルチユニット活動がポアソン分布から逸脱した時刻を FSL とした。また，FSL と LFP の位相同期は，次式中のオーダーパラメータ r で定量化した。

$$r e^{\psi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{j\theta_i},$$

ただし， ψ は位相の平均， N は試行数を示す。FSL が，LFP の特定の位相で常に発生すれば， r は 1 になり，逆に，位相非同期時，すなわち，FSL 発生時の位相が一様分布に従えば， r は 0 になる。

図 3 に，条件ごとに， γ 帯域（32 Hz）の LFP の空間分布を示す。条件付けや背景雑音の有無に関わらず， γ 帯域の LFP は，聴皮質の腹側部（図の下側）で顕著に発生した。ただし，同 LFP は，無音環境下では，雑音環境下よりも大きかった。このような傾向は，条件付け前のラットよりも，条件付け後のラットで顕著

に認められた。この結果は、条件付け後、 γ 帯域の LFP が、背景雑音の有無、すなわち、状況の変化を明瞭に反映するようになったことを示している。

さらに、図 4 は、20 kHz を特徴周波数とする計測点において、 β 、 γ 帯域の LFP と FSL の位相同期をオーダーパラメータで示す。 β 帯域では、条件付けに関わらず、オーダーパラメータは、雑音環境下では無音環境下よりも低下する。すなわち、無音下の FSL は、雑音下の FSL よりも、 β 帯域の LFP に位相同期している。雑音下では、純音を知覚しづらくなるが、このような知覚現象の神経基盤として、 β 帯域の LFP と FSL の位相非同期が考えられる。一方、 γ 帯域では、条件付け後、雑音環境下と無音環境下でオーダーパラメータに差異は認められない。これは、重要な音の情報処理を担う神経細胞が、 γ 帯域の LFP を利用して情報を処理するようになったことを示唆する。

これらの解析結果から、i) 条件付け後、 γ 帯域の LFP は状況依存的に変化すること、ii) LFP と FSL の位相同期は、神経情報処理の重要な基盤であること、iii) 聴皮質の情報処理において、 β 帯域と γ 帯域の LFP の役割は異なることを示した。これらの知見は、LFP から情動を読み出せること、また、LFP が情動的情報処理に関与している可能性が高いことを示している。

[今後の研究の方向・課題]

著者らは、状況依存的な条件付けの他に、スイッチング条件付けも試み、有望な結果を得ている。この条件付けでは、ある音に対して報酬（スクロース錠）を与え、別の音に対して恐怖（下肢への電気ショック）を与える。その結果、ラットは、各音に対して、異なる行動を発現するようになった。この条件付けで、ラットが音の価値を学習できたとすると、脳の情動システムは、音の価値に応じて、聴皮質の状態を変化させていることが期待される。現在、本研究で確立した実験・解析手法を用いて、条件付けで学習した音の価値が、聴皮質の神経活動にどのような影響を与えるかを調べている。

最近、ヒトを対象とした実験でも、fMRI や脳波を用いて、情動システムが神経活動に影響することが報告されている。例えば、言語に対する聴皮質の反応は、話者の声色に応じて異なる。これは、聴皮質が言語情報処理を開始する前に、情動システムが話者の声色から状況を判断し、聴皮質の情報処理方法（状態）を変化させていることを示唆する。今後、本研究を発展させれば、このような情動的情報処理の神経基盤の解明に大きく貢献できると考える。

また、脳の状態を読み出す技術は、臨床的な応用例として、てんかん発作の予測にも有望である。

[成果の発表・論文等]

- [1] 藤原正道，川合謙介，神崎亮平，高橋宏知：「多点皮質脳波によるてんかん発作直前時の特異的な周波数成分の抽出」，平成 20 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集：pp. 115-120, 2008
- [2] 藤原正道，川合謙介，神崎亮平，高橋宏知：「多点皮質脳波におけるてんかん発作の予測・検出の試み」，てんかん研究 26 (2): p. 95, 2008
- [3] 横田亮，合原一幸，神崎亮平，高橋宏知：「聴皮質の局所電場電位に対する第一スパイクの位相同期の学習に伴う変化」，平成 20 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集：発表予定(徳島，2009 年 9 月 3 日)
- [4] 大坪紀子，神崎亮平，高橋宏知：「報酬と罰を用いた古典的条件付けによる聴皮質の可塑性」，第 24 回生体・生理工学シンポジウム (BPES2009) 論文集：発表予定 (仙台，2009 年 9 月 24 日)

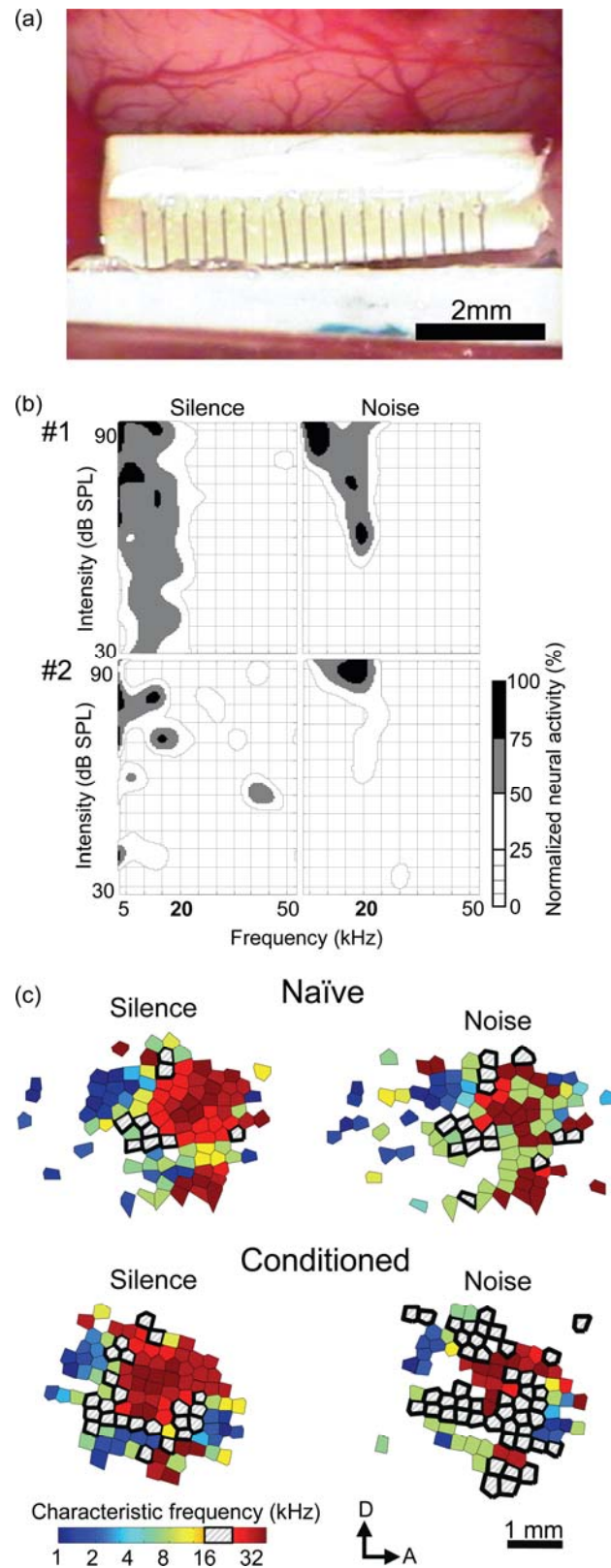


図1 生理実験の結果。(a) 微小電極による聴皮質の神経活動の計測。(b) 条件付け後の神経活動の状況依存的な周波数選択性。(c) 聴皮質の周波数局在構造。条件付け前 (Naïve) と条件付け後 (Conditioned) のラットに対して、無音下と雑音下で、それぞれ、各部位の特徴周波数を調べた。

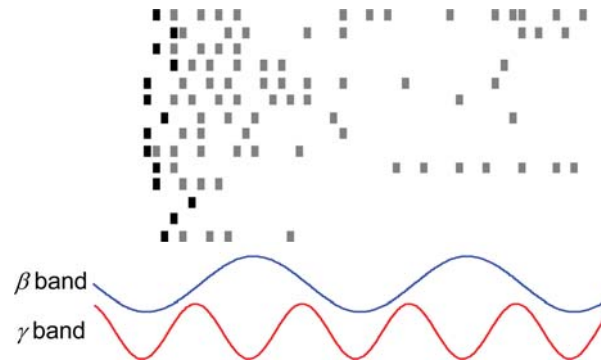


図2 FSL と LFP の位相同期の概念図. 上図は発火時刻を示す. 図中の黒印が FSL に相当. 下図は, β 帯域と γ 帯域の LFP を模式的に示す. 本研究では, FSL と LFP の位相の関係 (位相同期) をオーダーパラメータで定量化した.

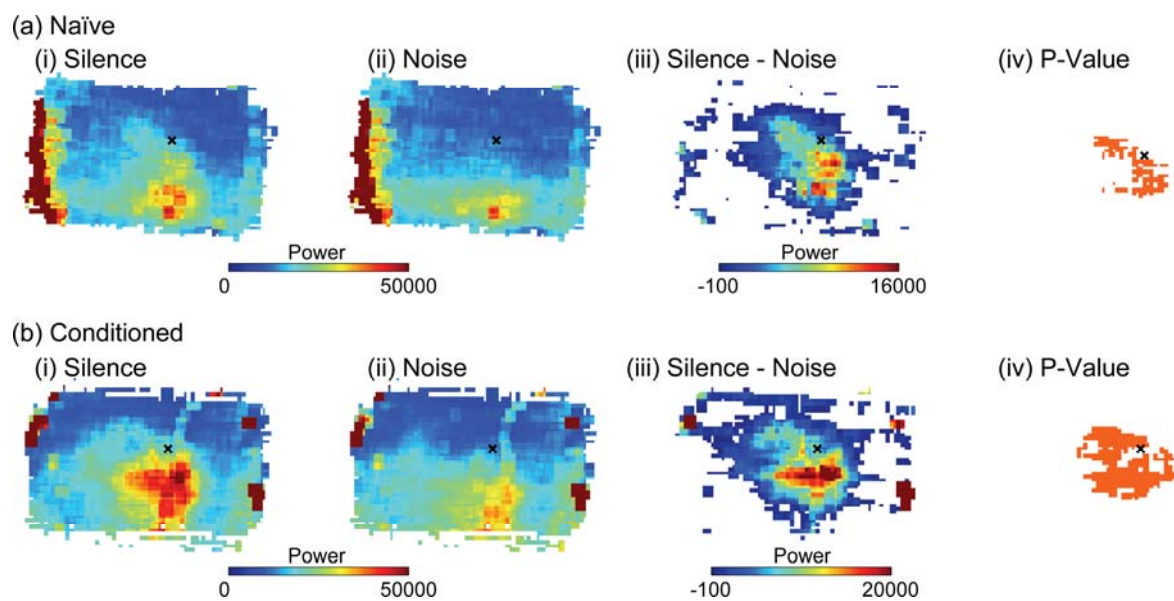


図3 γ 帯域の LFP のパワーの空間分布. (a) 条件付け前, (b) 条件付け後. (i) 無音下, (ii) 背景雑音下, (iii) 無音下と雑音下の LFP パワーの差異, (iv) γ 帯域の LFP が, 無音下で, 雑音下よりも有意に大きい部位 ($p < 0.05$).

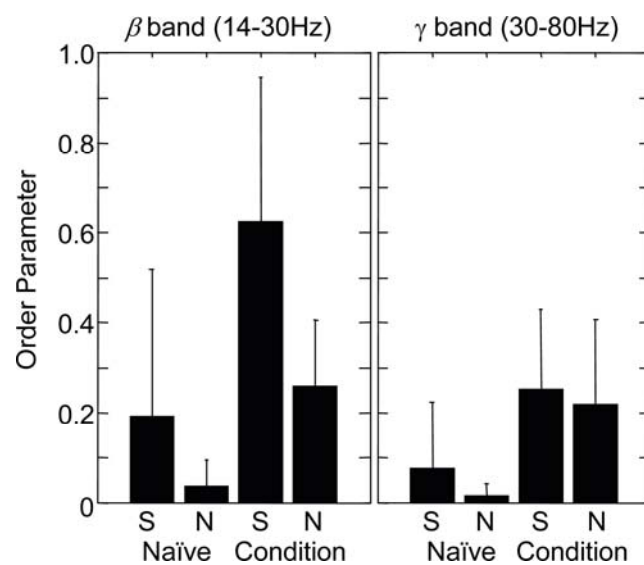


図4 FSL と LFP の位相同期：左図， β 帯域；右図， γ 帯域．条件付け前 (Naïve) と条件付け後 (Conditioned) の各群において，無音下 (S) と雑音下 (N) の各条件で調べた．