

外22-19

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

脳磁界計測による人の聴覚特性に関する研究
－複数音処理機構の解析－

A neuromagnetic study on the characteristics of human
auditory system: an investigation of the underlying
mechanism for multiple tone processing.

申 請 者

渡 辺 昌 洋

Masahiro Watanabe



2002 年 11 月

1. 人を取り巻く音環境

人は両方の耳に入ってくる様々な音の中から、聞きたい音だけを聞くことができる。重なりあった複数の音から聞きたい音だけを聞くことは逆問題にあたるが、人は容易にそれを解き、あるいはうまく回避している。これは耳の働きではなく、脳の働きであり、現在の機械にはない能力である。このような能力の機能解明をする一つのアプローチとして、音と音との関係に着目し、人の実際の脳活動を計測し知見を得ることは重要である。

2. 聴覚実験に適した脳磁界計測

時々刻々と変化する音を処理している人の聴覚系を観察するためには、非侵襲かつ時間分解能に優れた装置が不可欠である。これらの条件を満たした脳磁界計測を用いて聴覚誘発反応の計測実験を行った。脳磁界計測は超伝導量子干渉計 (SQUID) を用いて脳から発生する微弱な磁界を計測するものである。この計測装置は計測中に雑音を発することがないので特に聴覚実験に適しており、今後このような研究分野において極めて重要な役割を果たすであろう。

3. 音と音との関係に着目した本研究での計測方法

本研究では、正常な聴覚を有し中耳炎等の既往症のない被験者に対して、刺激音を与えたときの脳磁界反応を計測した。実験中は被験者が選んだ本を読み、刺激に注意を払わないよう教示し、刺激音に対する機械的な脳の反応を計測した。

誘発脳磁界反応の計測では、刺激音を繰り返し呈示して反応波形の加算平均が行われる。2種類以上の刺激音をランダムな順番で呈示すると、着目する刺激音（現行刺激音）の一つ前に呈示される刺激音（直前刺激音）はその時々で異なる。本研究では、直前刺激音と現行刺激音との関係に着目し、現行刺激音に対する脳磁界反応を調べた。

刺激音の物理的特性を正確に制御するために聴覚刺激呈示装置を試作した。脳磁界計測では磁気を帯びた装置を実験に用いることはできない。磁気シールドルーム外で生成した刺激音を、プラスチックチューブ等を介して被験者に呈示した。プラスチックチューブ等により生じる周波数特性の変化を計測し、実験に使用する周波数領域で振幅が一定になるように逆フィルタを設計し適用した。

4. 直前刺激音との呈示間隔が現行刺激音の始まりに与える影響

従来、刺激音の立ち上がりから次の刺激音の立ち上がりまでの間隔（刺激呈示間隔）が長いほど音の始まりに対する脳磁界反応 N1m の振幅が大きくなることが調べられている。音が呈示されると N1m 反応をつかさどる神経細胞が活動して疲労するが、刺激呈示間隔が長いほど疲労が回復するために反応が大きくなると考えられている。本章では、呈示時間のみ異なる 0.05, 0.5, 1, 1.5, 2 秒

の 1 kHz の純音を用い、直前刺激音と現行刺激音の刺激呈示間隔を 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 秒と変えてランダムな順番で呈示し、脳磁界反応を計測した。

その結果、直前刺激音との刺激呈示間隔が長いほど、現行刺激音に対する N1m 反応の振幅が大きくなった。また、刺激呈示間隔より刺激音間の空白時間（刺激間間隔）の方が N1m 反応に対する影響は大きかった。N1m 反応は主に聴覚野の活動を反映することから、様々に変化する直前刺激音との刺激呈示間隔に従って、聴覚野の活動がダイナミックに変化していることがわかった。

5. ペア音に対する聴覚誘発脳磁界反応

刺激間間隔が 0.5 秒以下になると、刺激音に対する反応が次の刺激音に対する反応に重畳し、正しく計測できない。短い刺激間間隔の二つの刺激音（ペア音）をある程度長い刺激間間隔で呈示すればペア音に対する反応の重畳を避けることができる。その後、ペア音に対する反応波形から第一音に対する反応波形を減算することにより、第二音に対する反応波形が得られる。本章では、第一音、第二音がともに 100 ms の純音、刺激間間隔が 0.2, 1.0, 1.8, 2.5, 3.2, 4.5 秒の 6 種類のペア音を用い、ペア音の刺激間間隔を 1.2~1.4 秒としてランダムな順番で呈示し、反応を計測した。第一音、第二音の周波数は 0.5, 1, 2, 3, 4 kHz として 13 種類のペア音を用意し、周波数と刺激間間隔の影響を調べた。

その結果、第一音と第二音の周波数が等しいときには刺激間間隔が短いほど N1m 反応振幅は大きく、前章とは逆の結果となった。また、第一音と第二音の周波数が異なるときには N1m 反応振幅は刺激間間隔の影響を受けないことがわかった。第一音と第二音の刺激間間隔および第一音と第二音の周波数の関係は第二音に対する反応に大きな影響を与えることがわかった。

この結果は、複数の音を一つのグループとして感じるときにグループの最終音が大きく聞こえるという心理実験の報告と関連している可能性がある。刺激音が大きいときに N1m 反応振幅が大きいからである。周波数と刺激間間隔に近いほどグルーピングされやすいことから、本章の結果とよく似ている。

6. 直前刺激音の呈示時間が現行刺激音の終わりに対する反応に与える影響

直前刺激音との関係に着目し、現行刺激音の終わりに対する反応がどのように変化するかを調べた報告は今までになかった。従来は、現行刺激音の呈示時間が長いほど現行刺激音の終わりに対する反応が大きくなることが調べられている。音の終わりに対する反応は、音を呈示している間活動を抑圧された神経細胞が、音を取り払われると同時に同期して活動したものと考えられている。本章では直前刺激音の呈示時間が 0.2, 1.2, 2.2 秒である 3 種類の 1 kHz の純音（長音）と 0.2 秒の 1 kHz の純音（短音）を用いた。そのうち 1 種類の長音と短音の計 2 種類の刺激音をランダムな順番で 1 秒の刺激間間隔で呈示し、短音に対する反

応が直前刺激音によってどのような影響を受けるかを調べた。

その結果、直前が長音であるときに、直前刺激音の呈示時間が長くなるほど、現行刺激音（短音）の終わりに対する反応が大きくなることを初めて発見し、この現象を off 反応増強（off-response enhancement）と呼ぶことにした。

本章の実験条件では、短音の呈示時間は 0.2 秒とあまり長くないため、呈示時間の影響により短音の終わりに対する反応は大きくなることはないと考えられる。事実、直前刺激音が 0.2 秒と短いときには、N1m 反応振幅は大きくならなかった。直前刺激音の影響により脳内の現行刺激音の処理過程が変化し、それが反応波形に現れたと考えられる。以前に呈示された刺激音の記憶と呈示されている刺激音との差を反映するミスマッチ反応の影響が示唆された。

7. 周波数、音圧の関係が現行刺激音の終わりに対する反応に与える影響

本章では、off 反応増強が起きた条件、すなわち 2.2 秒の長音と 0.2 秒の短音をランダムな順番で呈示し、反応を計測した。短音の周波数を 1 kHz に固定し長音の周波数を 0.5, 1, 2 kHz と変えたとき、また、短音の音圧レベルを 78 dB SPL に固定し長音の音圧レベルを 70, 74, 78 dB SPL と変えたときの、off 反応増強に対する長音の影響を調べた。

直前刺激音の周波数の影響に関しては、直前長音が短音と同じ 1 kHz であるときと長音が 2 kHz のときに off 反応増強は起きたが、短音が 1 kHz のときに最大となった。なお、長音が 0.5 kHz のときには off 反応増強は起きなかった。そのため、off 反応増強には周波数依存性があることが明らかとなった。

一方、直前刺激音の音圧の影響に関しては、直前長音が短音と同じ 78 dB SPL であるときに off 反応増強が観察された。長音の音圧レベルが 74, 70 dB SPL のときには、off 反応増強は起きなかった。そのため、off 反応増強には音圧依存性もあることが明らかとなった。

8. まとめ

本研究では、現行刺激音の始まりと終わりに対する N1m 反応が直前刺激音の影響を受けて変化することを明らかにした。刺激間間隔が短いときには音のグルーピングを示唆する結果が得られた。音の始まりに対する N1m 反応は、音と音との関係によって聴覚野がダイナミックに活動していることを表していると考えられる。一方、直前刺激音の呈示時間が長いほど現行刺激音の終わりに対する N1m 反応は大きくなるという off 反応増強現象を発見した。さらに、off 反応増強は、直前刺激音と現行刺激音の周波数、音圧が等しい場合に最大となる。直前刺激音と同じ属性を持つ現行刺激音の終わりに対して聴覚野が大いに活動する。これらの特徴をうまく使って、人は周囲をとりまく音環境を理解していると考えられるが、詳細なメカニズムの解明には、脳細胞レベルの検討も必要である。