聴覚誘発電位を手掛りとした作業時の脳の聴覚情報処理に関する研究

A RESEARCH ON AUDITORY INFORMATION PROCESSING IN THE BRAIN
WHEN A PERSON IS AT HIS TASK BY MEANS OF MEASUREMENT
AND ANALYSIS OF AUDITORY EVOKED POTENTIAL

秋田 剛*, 藤井利幸**, 平手 小太郎***, 安岡正人****

Takeshi AKITA, Toshiyuki FUJII, Kotaroh HIRATE
and Masahito YASUOKA

Auditory information processing in the brain that goes on when a person is at his task is investigated by means of measurement and analysis of Auditory Evoked Potential. Results of two experiments showed that auditory information processing was affected by the priority of processing in the brain. Less quantity of auditory information processing to the sound of 50 dBA or below seems to occur when task-related processing is prior in the brain, and that full auditory information processing to the sound of 70 dBA or more seems to occur even if a person pays little attention to it.

Keywords: Auditory Evoked Potential, Auditory information processing, Task, Brain waves

聴覚誘発電位, 聴覚情報処理, 作業, 脳波

1. はじめに

一般の建築環境下において、人間はその感覚器官を通して環境から様々な情報を受容している。感覚器官で受容された情報（感覚情報）は、中枢神経系に送られて処理を受け、必要であれば判断・評価がその情報に対して下される。また、それに基づいて何らかの行動が起こされたり、生体維持のための反応が末梢系に生じたりする。このような、環境からの情報入力に対して生体に生ずる一連の反応は、人間の中枢神経系を中心とした情報処理活動とその結果（出力）とみなすことができる。その意味で、中枢神経系は生体内の感覚情報処理システムと捉えることができる（図1）。

建築環境と人間の関係を明らかにするためにある環境の条件に対する生体の反応を捉える時には、感覚情報処理システムの出力（図1）を測定することが一般的に行われる。この場合、感覚情報処理システムとしての中枢神経系は、ブラックボックスとして扱われている。通常ブラックボックスとされるこの感覚情報処理システムを何らかの手法で捉え、その働きを知ることができれば、従来からの知見に加えて新たな切り口から環境と人間の関係に関する知見を蓄えることが可能となると考えられる。

建築環境学の分野では、そのような立場から様々な環境からの入力に対する中枢神経系の反応を捉える研究が、既に数多く行われて

きている。例えば、安藤ら¹⁾、陳ら²⁾、佐藤ら^{3), 4)}、大橋ら^{5), 6)}は、聴覚・視覚的な入力に対する中枢神経系の反応を脳波の形で捉えている。これらの研究において測定対象とされている α 波等の脳波は、生体へ入力された感覚情報に対する脳の特定の情報処理活動を捉えたものではなく、それをも含めた脳の活動の総合的な状態を捉えたものであり、その意味するところを解釈することが難しい場合が多い。一方、安藤ら⁷⁾、Andoら^{8), 9)}は、聴覚情報の入力に対する中枢神経系の反応を聴覚誘発電位の形で捉えている。また明石ら¹⁰⁾は、異なる照明条件下での作業への集中度を視覚に関連する事象関連電位であるラムダ反応の安定度の形で捉えている。一般に誘発電位や事象関連電位は、様々な感覚情報入力に対

図1: 感覚情報処理システムの概念図

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻
日本学術振興会 特別研究員・博士(工学)
** 兵庫県都市住宅部住宅整備課 修士(工学)

*** 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 助教授・工博

**** 東京理科大学工学部建築学科 教授・工博

JSPS Research Fellow, Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Engineering, The University of Tokyo, Dr. Eng.
Housing Development Div., Urban and Housing Dept., Hyogo Prefecture Government, M. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Grad. Sch. of Engineering, The University of Tokyo, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, Dr. Eng.

する大脳の情報処理活動やある心的事象の生起に基く大脳の情報処理活動を捉えたものであり、認知過程の初期の部分に対応する生体の反応¹¹⁾としてその意味するところは明らかである。

以上のように建築環境学における既往研究を概観すると、環境からの感覚情報入力に対する中枢神経系の感覚情報処理を捉えることを目的とした場合、①信号発生との因果関係が明確であること、②大脳の感覚情報処理・認知過程に関連した信号としてその意味が明らかであること、の理由により、測定対象の生体情報としては誘発電位・事象関連電位が優れていると判断できる。本研究では、中枢神経系の生体反応として誘発電位を取り上げ、その測定・解析によって感覚情報処理の視点から環境と人間の関係に関して新たな知見を得ることを試みた。

誘発電位に関する研究は、生理学等の分野では古くから行われており、Picton ら^{12), 13)}、Hillyard¹¹⁾、Blenner ら¹⁴⁾の研究をはじめとして、特に聴覚誘発電位・視覚誘発電位を利用した大脳の聴覚・視覚情報処理システムの解明に関する多数の研究が行われて来ている¹⁵⁾。しかし、これらの分野では大脳のメカニズムの解明が目的であるため、その目的に対して都合のよい設定の実験が行われる場合が多い。例えば Blenner ら¹⁴⁾は、聴覚刺激として最大 100 dB の強度のものを使用しているが、そのような強度の聴覚刺激が生体へ入力されることは日常的な建築環境下では希である。このように、誘発電位に関する生理学等の既往研究の成果は、そのまま建築環境制御のための知見として応用することが難しいものが多い。従って、一般的な建築環境下での人間の感覚情報処理を捉え、それをもって環境制御のための知見とするためには、生理学等の成果を基礎として新たに日常的に有り得る条件下で実験を行う必要があると考えられる。

一方、誘発電位測定を日常的な建築環境下での感覚情報入力に対する生体反応を捉える手法として使う際の利点としては、判断・評価等の感覚情報処理の出力に被験者を導くことなくその反応を捉えることができる(図 1) ことが第一に挙げられる。これは、被験者の注意をある対象(感覚情報)に向けさせることなくその対象に対する大脳の情報処理反応を捉えることができる、ということの意味し、従来の感覚情報処理の出力を捉える手法では難しかったことを可能とするものである。すなわち、生体側の心理的要因(注意等)と環境側の物理的要因の相互作用が感覚情報処理に及ぼす影響を探るのに、誘発電位測定の手法は適していると考えられる。

ところで、環境から生体に入力される様々な感覚情報のうち、視覚情報・聴覚情報の二者は、人間が空間を認識する上で重要な感覚情報である。これらは、大脳において高次の処理を受けるという点で類似しているが、視覚情報が視線の向き・まぶたの働きによってその処理対象が限定されるのに対し、聴覚情報は、通常の場合何の制限もなく常に環境から生体に入力され続ける、という特徴を持つ。すなわち、聴覚情報は、聴こうとして聴く場合はもちろん、聴こうとしていない場合でも聴覚系から生体に受容され得る情報と言える。しかも、聴こうとしていないのに聴いてしまう場面の方がより日常的であり、そのような場合の聴覚情報処理は聴こうとして聴く場合の聴覚情報処理とは異なるものであることが予想される。

以上のような考察を総合した結果、本研究では、環境から生体に入力される感覚情報として特に聴覚情報に注目し、作業に集中して

おり呈示される聴覚刺激に注意が向いていないような場面で、大脳の情報処理の主要な対象となっていない聴覚情報が、人間によってどのように処理され知覚されるのかという点に関して、聴覚誘発電位の測定・解析を通して知見を得ることを行った。

2. 聴覚誘発電位とその意味

2-1. 聴覚誘発電位

誘発電位とは、感覚受容器やその中枢への経路(感覚神経等)を適当な刺激によって興奮させたときに、大脳に見られる刺激に対応した電位変動のことである¹⁶⁾。すなわち、聴覚誘発電位(Auditory Evoked Potential, AEP)とは、耳を通して生体に受容された聴覚刺激に対応して大脳に見られる電位変動のことであり、聴覚情報の入力時点から 500 msec. 以内の時間帯に、頭皮上に置かれた電極を通して記録されるものである。AEP の初期成分(聴覚刺激入力時点から 10 msec. 以内)は聴性脳幹反応(Auditory Brain stem Response, ABR)と呼ばれ、感覚器から大脳皮質の一次聴覚野までの神経連鎖による情報伝達時に生ずる電気的活動がその起源である。それに対し、聴覚刺激の入力時点から 50 msec. 以降の長潜時の電位変動は、頭頂部緩反応(Slow Vertex Response, SVR)とも呼ばれ、大脳皮質の一次聴覚野以降の高次の聴覚情報処理に対応する。このような長潜時の電位変動の起源は、大脳皮質部のニューロン群の同期した電気的活動である^{15), 17), 18), 19), 20)}。

AEP は、脳波よりもその振幅が小さいため、分析可能な電位変動波形を得るためには、ABR で 2000 回、SVR で 50 ～ 60 回程度の、聴覚情報の入力時点に同期させた加算平均が必要となる。また、ABR を含む短潜時～中潜時の電位変動は、聴覚情報の物理的性質に対応して変化し、SVR のような長潜時の電位変動は、聴覚情報の物理的性質の影響も受けるが、心理的状態(注意の向き)の影響も受ける¹¹⁾。本研究では、作業時の大脳における聴覚情報処理という、入力される聴覚情報に人間の注意が向いていない場合の大脳の聴覚情報処理に関して知見を得ることを行うため、また、少ない加算平均回数で測定可能であり実験を遂行しやすく実験計画上の柔軟性も高いという理由から、長潜時の AEP を測定対象とした。これ以後本論文においては、単独で AEP の言葉が使われる場合、特に断りのない場合には長潜時のもののみを意味している。

図 2(a) は、50 dBA のピンクノイズ(立ち上がり速度 3 dB/msec.、継続時間 1 sec.、暗騒音 30 dBA (ピンクノイズ呈示))をスピーカを通してランダムな間隔(1 ～ 15 sec.、1 sec. きざみ)で繰り返し被験者に呈示した際に、被験者から記録した脳波(国際 10-20 法の Cz 点より単極導出)を聴覚刺激の立ち上がり部分と同期させて 60 回加算平均して得られた、AEP 波形である。一方、図 2(b) は、同じく記録された脳波を聴覚刺激の立ち上がりとは同期させずに 60 回加算平均して得られた波形である。これら二者を比較すれば明らかに、図 2(a) には聴覚刺激の呈示時点から 500 msec. 以内に 3 つの明確なピークが見られる。これが、本研究で測定対象とする AEP である。これらのピークは、時間的に初期のものから N1, P2, N2 と一般的に呼ばれている。長潜時の AEP には、これら以外にも 50 msec. 付近に P1 と呼ばれるピークも存在するが、図 2(a) のように判別がつけがたいことが多いため、本研究では前述の 3 つのピークを解析対象としている。なお、この図の横軸は、呈示した聴覚刺

図2: 聴覚誘発電位の例

刺激の立ち上がりからの時間を表わし、縦軸は、上方がAEPの負の振幅値、下方が正の振幅値を表わしている。

AEPの解析にあたっては、各ピークの潜時（聴覚刺激呈示時からピークまでの時間）と連続する二つのピーク間振幅値を、AEPの特性を示す代表値として取り上げた。また、Pictonら^{(12), (13)}は、長潜時のAEPの振幅は頭頂部付近で最大の値を示すとしている。本研究では、これにならい頭頂（国際10-20法のCz点）から測定されるAEPを解析対象とした。

2-2. 聴覚誘発電位の意味

聴覚情報が耳から入力されると、その情報は幾つかの神経伝達を経て一次聴覚野に至り、そこで初期の情報処理が行われる。AEPのピークは、それ以後の高次な聴覚情報処理時に見られる同期したニューロン群のシナプス後電位を測定したものである^{(15), (18)}。よって、そのピーク潜時は、そのピークを生じさせるニューロン群の活動に至るまでの時間にあたり、大脳における聴覚情報の処理速度を反映すると考えられる。また、同じAEPのピークに関する限りにおいては、ピーク間振幅は、それらのピークを生じさせるべく同期して活動するニューロンの数によって決まると考えられるため⁽¹⁵⁾、それらのピークが関連する聴覚情報処理反応の大きさ（情報処理反応量）に対応する、と解釈することができる。本研究では、AEPの潜時を情報処理速度、ピーク間振幅を情報処理反応量を反映するものとみなし、それに基づいて実験結果を解釈した。

3. 実験1

3-1. 目的

作業時の大脳の聴覚情報処理に関して知見を得るために、呈示される聴覚刺激とは無関係な作業を被験者に賦課した条件下で測定されるAEPを、そのような作業を賦課しない状態で聴覚刺激を呈示する受動的あるいは積極的受聴態度の条件下で測定されるAEPと比較することを目的として、実験を行った。よって、AEPを生じさせる同期聴覚刺激は存在するが、それに対する聴取態度が異なる際に生ずるAEPを比較することになる。

既往のAEPに関する研究によれば、AEPは聴覚刺激の音圧レベル⁽¹⁴⁾、暗騒音からのレベル差^{(21), (22)}、といった聴覚刺激の強度に関する物理的性質の影響を受ける。また、実際の音環境の場面を考えて

みても、存在する聴覚情報の強度は様々であり、その強度によって、作業中の人に無視され得る聴覚情報と作業をしていても十分に知覚される聴覚情報の両者が存在することが、予測される。よって、この実験では、実験要因のひとつとして聴覚刺激の強度を取り上げた。

3-2. 方法

実験は、1993年12月から1994年1月にかけて、東京大学工学部建築学科の半無響室内で行った。聴覚刺激としてピンクノイズ（立ち上がり速度3 dB/msec.、継続時間1.6 sec.）を使用し、被験者の正面前方2.5 mの位置にあるスピーカを通して、以下に示す3種類の聴取条件下にある被験者に聴覚刺激を呈示する実験を行った。実験中の被験者の脳波は、8 mm径のAg/AgCl電極を用いて国際10-20法のCz点から耳朵A1を基準電極として単極導出し、生体アンプ（日本光電製MME-3116）でフィルタ（1.6 Hz～100 Hz）をかけ増幅した後、データレコーダに記録した（図3）。ここで、ピンクノイズを聴覚刺激に使用したのは、どの被験者にも共通に無意味な聴覚刺激だと考えられるからである。

実験要因の一つは聴覚刺激の強度であり、受聴点音圧レベルで35, 40, 50, 60, 70, 80 dBAの6水準を設定した。なお、実験中は30 dBA（受聴点）のピンクノイズを暗騒音として呈示し続けた。

実験要因の二つ目は聴取条件であり、以下の3水準を設定した。
[条件A] 被験者に閉眼安静の状態を指示し、呈示される聴覚刺激を聴くように教示した。

[条件B] 被験者に閉眼を指示したが、その状態を保ったまま、繰り返し呈示される聴覚刺激のすべてに対して、呈示直後にうるささ（聴覚刺激の気になる度合）の評価を手元のキーボードから5段階で入力するように教示した。なお、被験者にはあらかじめ入力するキーの位置を覚えさせ、閉眼の状態でも入力が可能であることを確認した上で実験を行った。

[条件C] 被験者に閉眼を指示したが、繰り返し呈示される聴覚刺激を気にしないようにしながら、あらかじめ記憶させた10桁の数字を、あらかじめ記憶させた0.5 sec.の間隔で、この条件での実験時間中休みなく繰り返し正確に手元のキーボードから入力し続けるように教示した。10桁の数字は人差し指・中指・薬指の3本の指で閉眼の状態でも簡単に入力できる数字であり（図4）、この条件のも

図3: 誘発電位測定実験のブロック図

図4: 記憶させた数字列の例とキーボード配列

図5: 聴覚刺激の呈示パターン (実験1)

図6: 実験1のタイムスケジュール

とでの実験の直前に被験者に記憶させた。0.5 sec.の入力間隔は、やはりこの条件のもとでの実験の直前に、刺激呈示用のスピーカから 1 kHz 純音（継続時間 0.1 sec.）を 0.5 sec. 間隔で繰り返し呈示することによって記憶させた。この聴取条件では、入力作業のタイミングと聴覚刺激呈示のタイミングの間には関連がない。

条件Cは、記憶した数字列の正確な入力作業に被験者を集中させることにより、被験者の大脳の情報処理を作業に向かわせ、条件A、Bよりも聴覚刺激に対する情報処理の優先度が低くなることを意図した条件設定である。また、条件Aでは被験者は聴覚刺激を受動的に聴くだけであるが、条件Bでは聴覚刺激に対して評価を下す過程が付加されている。条件Bは、被験者がより積極的に聴覚刺激を聴くことを意図した条件設定である。また、全聴取条件において閉眼を指示したが、これは、感覚情報として環境から入力される情報を聴覚情報だけに限ることを意図したためである。

実験の一試行においては、ある一つの聴取条件下で、同じ音圧レベルの聴覚刺激を一定の呈示間隔（1.5 sec.）で 70 回繰り返し被験者に呈示した（図5）。実験は、すべての被験者に対して条件A→条件B→条件Cの順に行われた。但し、条件B、Cでの実験は、条

件Aでの実験とは別の日に休憩をはさんで連続して行われた。また、各聴取条件下で、呈示する聴覚刺激の音圧レベルの順序が上昇系列（35, 40, 50, 60, 70, 80 dBAの順に呈示）の群と下降系列（80, 70, 60, 50, 40, 35 dBAの順に呈示）の群とに分けて、実験を計画した。

被験者は、男性8名・女性3名の計11名であり、各被験者は呈示音圧レベル（6水準）と聴取条件（3水準）の組み合わせからできる計18水準の試行のすべてを経験した。実験のタイムスケジュールは、図6に示すとおりである。

3-3. 結果

データレコーダに記録した脳波を、シグナルアナライザー（HP35670A、A/D変換のサンプリング周波数：1024 Hz、サンプリング点数：1024点²⁾）を用いて、聴覚刺激の立ち上がりと同期させて原則的に64回加算平均してAEP波形を得た。但し、最初の4回と、明らかにアーティファクトが混入したと思われる振幅変動をしたものは、加算平均から除外している。その結果、全被験者から各聴取条件においてAEP波形が得られた。得られたAEP波形から、N1、P2、N2の潜時とN1-P2、P2-N2のピーク間振幅を読み取った。但し、

図7: 実験1の結果 (各点は被験者平均値、各誤差線は95%信頼区間を表す。)

ノイズに埋もれてピークが読みとれない場合、そのピークが関係する潜時・ピーク間振幅の値は欠測データとした。

読み取った潜時・ピーク間振幅値をもとに、各潜時・各ピーク間振幅について、呈示音圧レベル・聴取条件を要因として二元配置分散分析を行った。

その結果、各潜時について、呈示音圧レベルの主効果 (N1: $F(5, 160) = 20.49, p < 0.001$; P2: $F(5, 170) = 25.94, p < 0.001$; N2: $F(5, 167) = 8.18, p < 0.001$) と、聴取条件の主効果 (N1: $F(2, 160) = 24.96, p < 0.001$; P2: $F(2, 170) = 30.35, p < 0.001$; N2: $F(2, 167) = 20.52, p < 0.001$) が有意であり、それらの間に交互作用は見られなかった。これらの結果は、①各潜時が聴覚刺激の音圧レベルが小さい時 (35 dBA) に長く、増大するに従って短くなること、②特に条件Cでは呈示音圧レベルに関係なく他の条件に比べて潜時が長くなること、を示している (図7(a))。

N1-P2振幅に関しては、音圧レベルの主効果のみが有意であり ($F(5, 160) = 2.72, p < 0.05$)、聴取条件の主効果及び音圧レベルと聴取条件の交互作用に有意性は見られなかった。このことは、①聴取条件にかかわらず50 dBA以下の領域で呈示音圧レベルの増大に伴って振幅が大きくなり、その後安定する傾向にあること、②各聴取条件間でN1-P2振幅値に明確な差がないこと、を示している (図7(b))。

P2-N2振幅に関しては、音圧レベルの主効果 ($F(5, 167) = 6.14, p < 0.001$) と、聴取条件の主効果 ($F(2, 167) = 4.59, p < 0.05$) が有意であり、それらの間に交互作用は見られなかった。この結果は、①P2-N2振幅は50dBA付近までは聴覚刺激の音圧レベルの増大に伴って大きくなりその後安定する傾向にあること、②条件Cで

は他の聴取条件よりも振幅が小さくなること、を示している (図7(c))。

3-4. 考察

実験1の潜時に関する結果は、①呈示される聴覚情報を聴こうとしている／いないにかかわらず、より大きい音の方が速く処理されること、②条件A, Bのように大脳において聴覚情報処理が優先されるような状況では、情報処理の速度に差がなく同様の処理がなされること、③条件Cのように被験者が作業遂行に集中しており大脳において聴覚情報処理が非優先の状況下では、情報処理の速度が遅くなること、を示していると解釈できる。

振幅に関する結果では、聴取条件A, BでのN1-P2振幅・P2-N2振幅において、50 dBAを越える音圧レベルの聴覚刺激に対して振幅の安定化の傾向が見られた。これは、聴覚情報処理時に同期するニューロンの数が飽和した結果と解釈できる。また、両振幅とも、条件A, B間で振幅値に差が見られなかった。AEPの振幅を大脳の情報処理反応量に対応すると考えると、これらの結果は、①条件A, Bのように大脳において聴覚情報処理が優先されるような状況では、入力される聴覚情報の強度の増大に伴って大脳の情報処理反応量も増大すること、②50 dBA以上の強さを持った聴覚情報に対しては、一様に十分な反応量を持った聴覚情報処理が大脳において行われるようになること、を表わしていると解釈できる。

一方、条件Cの振幅に関する結果では、N1-P2振幅・P2-N2振幅ともに聴覚刺激の音圧レベルの増大に伴って振幅値が大きくなるという、条件A, Bと同様な傾向が見られた。また、N1-P2振幅では条件A, Bで得られた振幅値と変わらないが、P2-N2振幅において条件A, Bと比べて振幅値が小さくなる傾向が見られ、この傾向は40, 50,

60 dBA 付近において顕著となることが明らかとなった。このことは、①聴覚情報の入力から時間が経過しより高次の情報処理過程に進んだ段階において、被験者が作業遂行に集中し大脳で聴覚情報処理が非優先の状況下では、40, 50, 60 dBA 程度の聴覚情報に対しては相対的に小さな聴覚情報処理反応しか生じないこと、②それよりも大きい音圧レベルの聴覚刺激に対しては一様に十分な反応量を持った聴覚情報処理が生ずること、を示している。この結果は、40, 50, 60 dBA の聴覚情報は大脳がそれらの処理を優先していない場合により小さな知覚反応の対象にしかならないが、それより大きい聴覚情報は大脳が何を優先して情報処理をしているかにかかわらず一様に大きく知覚され得る、と解釈できる。また、35 dBA の聴覚刺激に対しても聴取条件間で P2-N2 振幅に差がない傾向が見られるが、このことは、レベル差にして 5 dB 程度の弱い聴覚情報は聴取条件によらず一様に小さく知覚されることを意味する、と解釈できる。

以上のように考察を行ったが、実験 1 で設定した実験要因では聴覚刺激の呈示間隔を一定としたため、条件 A, B では次に呈示される刺激の立ち上がりが予測できるが、条件 C では刺激の呈示と無関係なタイミングで作業が被験者に賦課されているため、次の刺激の立ち上がりが予測できない、という事態が生じた。Karlin²³⁾ は刺激の入力の予期が可能であることが誘発電位の振幅の増強に影響を及ぼすとしており、従って実験 1 の結果には刺激入力の予期の可否が影響を及ぼした可能性がある。そこで、この点を検証し実験 1 の結果の再現性を検討することを目的として、新たな実験を計画した。

4. 実験 2

4-1. 目的

実験 1 の結果を検証すると同時に、より一般の建築環境であり得る聴取条件下での聴覚情報処理、特に入力される聴覚情報に注意を向けることなく作業をするというような現実の場面で、日常的に生体によって行われている聴覚情報処理に関して知見を得るために、ランダムな間隔で呈示される聴覚刺激を用いて、受動的受聴（閉眼及び開眼）条件及び暗算作業に集中し聴覚情報に注意が向かない聴取条件のもとで、AEP を測定する実験を行った。

4-2. 方法

実験は、1994 年 7 月から 8 月にかけて、東京大学工学部建築学科の半無響室内で行った。実験に使用した聴覚刺激、実験場所のセッティング（図 3）、AEP 測定・記録の手続きは、実験 1 と同様である。

実験要因の一つは聴覚刺激の強度であり、受聴点音圧レベルで 33, 40, 50, 70 dBA の 4 水準を設定した。なお、実験中は 30 dBA（受聴点）のピンクノイズを暗騒音として呈示し続けた。

実験要因の二つ目は聴取条件であり、以下の 3 水準を設定した。
[条件 X] 被験者に閉眼安静の状態を指示し、呈示される聴覚刺激を聴くように教示した。

[条件 Y] 被験者に開眼の状態を指示し、被験者の前面約 60 cm の位置にあるノート型コンピュータの液晶ディスプレイ（白黒）に表示されるランダムな動きをする線の先端を、頭部を動かさないようにしながら視線で追うように教示した。聴覚刺激に対する聴取態度に関する教示は、行わなかった。

[条件 Z] 被験者に開眼の状態を指示し、繰り返し呈示される聴覚刺

激を気にしないようにしながら、被験者前面のノート型コンピュータの液晶ディスプレイ上に休みなく出題される加減算問題の、結果の正誤判別作業を行わせた。この作業の進行は、聴覚刺激の呈示タイミングとは無関係であり、被験者には課題になるべくすばやく正確に答えるように教示した。

条件 Y, Z において、ノート型コンピュータは被験者の前面やや下側の机上（被験者の座っている椅子と一体型の簡易机）に置かれており、その液晶ディスプレイが被験者正面の刺激呈示用スピーカを遮ることはなかった。また、受聴位置での音場の条件をそろえるため、条件 X においてもノート型コンピュータは同じ位置に同じ状態で設置した。条件 Z の暗算作業課題は、ディスプレイの決まった位置にまず 1 秒間加減算の式が表示され、式が消えた後それに対する解答（正しい答えが表示される確率 50 %）が以前に式が表示されていたのと同じ場所に表示され、その正誤判断をあらかじめ決めておいた正・誤・判別不能に対応したキーから入力する、という作業である。その際に、解答は正誤判別の結果が入力されるまで表示され続け、結果が入力されるとすぐに次の問題に移る、という形で作業は休みなく被験者に賦課され続けた。なお、キーは人差し指・中指・薬指で簡単に入力できるものであり、作業中に被験者は視線を画面からそらすずに結果の入力が可能であった。

条件 X は、環境から生体に入力される感覚情報を聴覚情報のみに限定することを意図した受動的聴取条件である。条件 Y は、聴覚情報に加えて単純かつ定常的で無関係な視覚情報（それに関連した判断・評価等の情報処理が伴わない）の入力が付加された、受動的聴取条件である。条件 Z は、休みなく賦課される暗算作業に集中することにより、大脳の情報処理が作業優先の状態となるようにし、条件 X, Y よりも聴覚情報に対する処理の優先度が低くなることを意図した聴取条件である。

実験の一試行においては、ある一つの聴取条件下で、同じ音圧レベルの聴覚刺激を 1 ～ 15 sec. の間でランダムな呈示間隔（ただし、1 sec. きざみ）で 70 回繰り返して被験者に呈示した（図 8）。実験は、呈示音圧レベル（4 水準）と聴取条件（3 水準）の組合せでできる計 12 水準の試行を、順序効果と系列位置効果を除去すべくラテン方格法で計画した実験順序で、12 名の被験者（男性 10 名・女性 2 名）に対して行った。よって、被験者ごとに実験順序は異なり、各被験者は必ず全水準の試行を経験した。実験のタイムスケジュールは、図 9 に示すとおりである。

4-3. 結果

実験 1 と同様に、全被験者から各聴取条件において AEP が得られた。AEP の各潜時・各ピーク間振幅値を得た後、呈示音圧レベルと聴取条件を要因として二元配置分散分析を行った。ただし、AEP を

図 8: 聴覚刺激の呈示パターン（実験 2）

* 各被験者とも、実験は4試行ずつ3回に分けて行った。以下のスケジュールはそのうちの1回あたりのものである。

図9: 実験2のタイムスケジュール

図10: 実験2の結果 (各点は被験者平均値、各誤差線は95%信頼区間を表す。)

得るための加算平均回数は原則的に60回とした。

その結果、各潜時について、音圧レベルの主効果 (N1: $F(3, 111) = 61.52, p < 0.001$; P2: $F(3, 113) = 87.0, p < 0.001$; N2: $F(3, 109) = 25.88, p < 0.001$) のみが有意であり、聴取条件の主効果と音圧レベル・聴取条件の間の交互作用は見られなかった。このことは、①聴覚刺激の音圧レベルが33 dBAの条件で潜時が長く、呈示音圧レベルの増大に伴って潜時が短くなること、②聴取条件間で潜時に違いがないこと、を示している (図10(a))。

N1-P2振幅に関しては、音圧レベルの主効果 ($F(3, 110) = 28.85, p < 0.001$) のみが有意であり、聴取条件の主効果や音圧レベル・聴取条件の間の交互作用は見られなかった。この結果は、①N1-P2振

幅が聴覚刺激の音圧レベルの増大に伴って大きくなること、②聴取条件間で振幅に差がないこと、を示している (図10(b))。

P2-N2振幅に関しては、音圧レベルの主効果 ($F(3, 109) = 23.38, p < 0.001$) と聴取条件の主効果 ($F(2, 109) = 6.77, p < 0.01$) が有意であるが、それらの間に交互作用は見られない、という結果が得られた。この結果は、①聴覚刺激の音圧レベルの増大に伴って P2-N2 振幅が増大すること、②条件Zにおいて他の2条件よりも振幅が小さくなること、を示している (図10(c))。

4-4. 考察

実験2の潜時に関する結果は、聴取条件によらず呈示音圧レベルの増大に伴って脳における聴覚情報処理の速度が速くなることを

示す、と解釈できる。これは、実験1で得られた結果を支持している。しかし、実験2の結果では、実験1の結果と異なり聴取条件間で潜時に差が見られなかった。このことは、聴覚情報処理が脳において優先されている場合には、そうでない場合に比べて聴覚情報処理の速度が速くなるとした、実験1の考察と矛盾する。従って、実験1の考察の最後に述べたように、実験1の潜時に関する結果には、聴覚情報の入力の前期の可否が影響を及ぼした可能性が考えられる。ここで、実験1と2の各ピーク潜時の値を比較してみると、実験2の各ピーク潜時の平均値は実験1の条件Cの値に近い。また、実験2の設定では聴覚刺激の提示間隔はランダムであるので、聴取条件にかかわらず被験者は聴覚刺激の立ち上がりを予測できない。一方、実験1では、前述したように条件Cのみにおいて被験者は聴覚刺激の立ち上がりを予測できなかった。これらのことを考え合わせると、実験1の潜時に見られた聴取条件間の差は、聴覚情報の入力が予測できるか否かが聴覚情報処理の速度に影響を及ぼした結果であり、ある聴覚刺激の出現が予測可能な場合ほどスムーズな聴覚情報処理が脳において行われることを意味する、と解釈する方がよいと考えられる。Karlin²³⁾の仮説は、刺激の入力の前期の可否が誘発電位の振幅に影響を及ぼすとするものであるが、本研究の結果は聴覚誘発電位の潜時に関しても影響が出ることを示唆している。

振幅に関する結果からは、実験1と同様に、聴取条件X、YでのN1-P2振幅・P2-N2振幅において、①ピーク間振幅が聴覚刺激の音圧レベルの増大に伴って大きくなること、②その現象が特に50 dBA以下で顕著であること、③それを超える強さの聴覚刺激に対しては、聴覚情報処理時に同期して活動するニューロンの数が飽和する傾向にあること、が示された。また、両振幅とも、条件X、Y間で振幅値に差が見られなかった。これらの結果は、脳において聴覚情報処理が優先される状況にある聴取条件Xに限らず、判断・評価等の高次な情報処理が伴わない視覚情報処理が存在する条件Yにおいても同様に、聴覚情報処理の反応量が聴覚情報の強度の増大に伴って増大し、50 dBAを越える強さの聴覚情報に対しては十分な情報処理が脳において行われるようになることを意味している。

一方、条件Zの振幅に関する結果では、N1-P2振幅・P2-N2振幅ともに聴覚刺激の音圧レベルの増大に伴って振幅値が大きくなるという、条件X、Yと同様な傾向が見られた。また、N1-P2振幅では条件X、Yで得られた振幅値と変わらないが、P2-N2振幅において条件X、Yと比べて振幅値が小さくなる傾向が見られ、この傾向は50 dBAの提示音圧レベル条件で顕著であった。また、70 dBAでは聴取条件間に振幅の差が見られなかった。これらの結果は、聴覚情報の入力から時間が経過したより高次な情報処理過程においては、①聴覚情報処理が脳で優先されていない場合に、50 dBA以下の比較的小さな聴覚刺激はより小さな情報処理反応しか引き起こさないこと、②70 dBAの比較的大きな聴覚刺激は聴覚情報処理が優先されている場合と同等の十分な処理反応を引き起こすこと、を示している。すなわち、脳において聴覚情報処理以外が優先されているときには、50 dBA以下の音は実際の音よりも小さな知覚反応の対象としか見なされないことが示唆される。

これらの振幅に関する結果は実験1の結果と矛盾せず、脳の聴覚情報処理の反応量は脳において聴覚情報処理が優先されているか否かの影響を受ける、と結論できる。Kramerら²⁴⁾は、入力され

る聴覚刺激とは無関係な作業の存在が、N100（本論文のN1にあたる）、N200（本論文のN2にあたる）、P300（本論文では扱っていない）の振幅の減少に影響を及ぼすとし、それを脳の有限な処理能力の配分による結果としている。本研究で行った実験とは課題・刺激等が異なるため直接の比較はできないが、本研究の結果はその考察を支持するものであると同時に、そのような効果が呈示される刺激の強度によって異なる可能性をも示唆している。

5. まとめ

聴覚誘発電位の測定・解析の手法を用いて、作業時の人間の脳における聴覚情報処理に関して知見を得るべく二つの実験を行った。その結果、①聴覚情報処理の速度と反応量は入力される聴覚情報の強度に影響を受けること、②聴覚情報処理の速度は環境から生体に情報が入力されるタイミングの予測の可否の影響を受け、処理の反応量は脳において聴覚情報処理が優先されているか否かの影響を受けること、が示された。すなわち、①脳の聴覚情報処理速度は、入力される聴覚情報の強度が大きくその入力が予測可能なほど速くなり、聴覚情報の強度が大きく聴覚情報処理が優先されているほど、処理反応量は大きくなること、②判断を伴う作業に集中している等で脳において聴覚情報処理が優先されていない場合でも、70 dBA程度の大きさの聴覚情報は優先されている場合と同等に十分な大きな処理反応を引き起こすこと、が示された。

これらの結果は、実験室内での限られた実験条件に対して得られたものに過ぎないが、例えばある作業環境で判断を伴う作業に集中している作業に対して聴覚的に情報伝達を行う場面において、確実な情報伝達を実現するのに適切な聴覚情報の強度の存在を示唆するものと考えられる。

また、各実験の考察では触れなかったが、実験1では30 dBAの暗騒音レベルに対して35 dBAの聴覚刺激が呈示された場合、実験2では30 dBAの暗騒音レベルに対して33 dBAの聴覚刺激が呈示された場合にも、聴覚情報処理が優先されていない各々の聴取条件下（条件C及びZ）で、ノイズとは分離して判別可能なAEPが測定された。AEPの存在は、脳において聴覚情報処理が行われていることの証明である。これらの結果は、わずかにレベル差3 dB程度の弱い聴覚刺激でさえも、作業に集中してそれに関する情報処理に終始しているはずの脳において、無視されずに何らかの情報処理を受けていることを示している。このことは逆に、聴覚情報処理が並行して行われているが故に、レベル差3 dBの聴覚刺激でも、本来優先させているべきの作業に関連した脳の情報処理に対して、干渉等の影響を及ぼす可能性があることを示唆する。

本論文では、誘発電位測定・解析の手法を用いることによって、感覚情報処理の視点から環境と人間の関係を捉えることを行った。ここで行ったように、生体反応をその信号発生メカニズムの観点から解釈することによって、制御対象となる環境と人間の関係を解明することが可能となると考えられる。今後もこのような視点から知見を積み上げるべく、一般建築環境下での聴覚・視覚上の諸問題に関して研究を進める予定である。

なお、本研究は文部省科学研究費補助金（特別研究員奨励費）による研究の成果である。

注

AEPを得るための加算平均は、シグナルアナライザーでA/D変換した上で行った。ここで言うサンプリング点数とは加算平均に利用した1データのデータ長のことである。1024 Hzのサンプリング周波数であるから0.98 msec. きざみに離散化された1 sec. 長の脳波を必要回数加算平均して、AEP波形を得たことになる。

本論文に関する既発表論文

- 1) 秋田剛, 平手小太郎, 安岡正人: 聴取状態による聴覚誘発電位の変化に関する研究, 日本音響学会講演論文集, I, pp. 367-368, 1994.3
- 2) 秋田剛, 藤井利幸, 平手小太郎, 安岡正人: 聴覚誘発電位測定による音環境評価に関する基礎的研究その2—呈示音に対する注意量による聴覚誘発電位の変化—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, pp. 1997-1998, 1994
- 3) 秋田剛, 藤井利幸, 平手小太郎, 安岡正人: 開眼時・作業負荷時の聴覚誘発電位測定, 日本音響学会講演論文集, I, pp. 441-442, 1994.10
- 4) Akita, T., Hirate, K., and Yasuoka, M.: The Effect of Attention on Perception of Sound from the Viewpoint of Auditory Evoked Potential, Proc. of INTER-NOISE 95, II, pp. 839-842, 1995

参考文献

- 1) 安藤四一, 陳炯堯: On the Analysis of Autocorrelation Function of α -Waves on the Left and Right Cerebral Hemispheres in Relation to the Delay Time of Single Sound Reflection, 日本建築学会計画系論文集, No. 488, pp. 67-73, 1996.10
- 2) 陳炯堯, 安藤四一: On the Relationship between the Autocorrelation Function of the α -Waves on the Left and Right Hemispheres and Subjective Preference for the Reverberation Time of Music Sound Field, 日本建築学会計画系論文集, No. 489, pp. 73-80, 1996.11
- 3) 佐藤仁人: 室内の窓や植栽・絵画が脳波等に及ぼす影響—執務空間における視環境の生理心理的影響に関する研究—, 日本建築学会計画系論文集, No. 461, pp. 87-95, 1994.7
- 4) 佐藤仁人, 当摩昭子, 中山和美, 高橋誠: 執務空間における照度の生理・心理的影響, 照明学会誌, Vol. 80 No. 5, pp. 23-30, 1996
- 5) Ohashi, T., Nishina, E., Kawai, N., Fuwamoto, Y., and Imai, H.: High frequency sounds above the audible range affect brain electric activity and sound perception, Audio Engineering Society 91st Convention (New York) Preprint 3207, pp. 1-25, 1991
- 6) 大橋力: 放送教材の改善のための音響効果に関する研究開発 (2), 放送教育開発センター研究報告第44号, 1992
- 7) 安藤四一, 渡辺猛: 音環境と聴覚・大脳生理, 日本音響学会誌, Vol. 45, No. 10, pp. 794-799, 1989
- 8) Ando, Y., Kang, S. H., and Nagamatsu, H.: On the auditory-evoked potential in relation to the IACC of sound field, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 8, pp. 183-190, 1987
- 9) Ando, Y., Kang, S. H., and Morita, K.: On the relationship between auditory-evoked potential and subjective preference for sound field, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 8, pp. 197-204, 1987
- 10) 明石行生, 金谷末子, 八木昭弘: 作業者の集中度と周辺照度/作業面照度の比との関係, 照明学会誌, Vol. 80, No. 8A, pp. 540-549, 1996
- 11) Hillyard, S. A.: Electrophysiology of human selective attention, Trends in Neurosciences, 8, pp. 400-405, 1985
- 12) Picton, T. W., Hillyard, S. A., Krausz H. I., and Galambos, R.: Human auditory evoked potentials. I: Evaluation of components, Electroenceph. Clin. Neurophysiol., 36, pp. 179-190, 1974
- 13) Picton, T. W. and Hillyard, S. A.: Human auditory evoked potentials. II: Effects of attention, Electroenceph. Clin. Neurophysiol., 36, pp. 191-199, 1974
- 14) Blenner, J. L. and Yingling, C. D.: Modality specificity of evoked potential augmenting/reducing, Electroenceph. Clin. Neurophysiol., 88, pp. 131-142, 1993
- 15) 丹羽真一, 鶴紀子: 事象関連電位, 新興医学出版社, 1997
- 16) 生理学大系V 脳の生理学, 医学書院, 1967
- 17) Andreassi, J. L.: Psychophysiology: Human Behavior and Physiological Response Third Edition, Lawrence Erlbaum Associates, 1995
- 18) 柴崎浩, 米倉義晴: 脳のイメージング—脳のはたらきはどこまで画像化できるか—, 共立出版, 1994
- 19) J. ハセツト: 精神生理学入門, 東京大学出版会, 1987
- 20) 川人光男, 行場次朗, 藤田一郎, 乾敏郎, 力丸裕: 視覚と聴覚, 岩波書店, 1994
- 21) 力丸裕, 平松幸三, 高木興一, 山本剛夫: 騒音のレベル変化量が聴覚誘発緩反応に与える影響, 日本音響学会誌, Vol. 38, No. 2, pp. 91-99, 1982
- 22) 力丸裕, 平松幸三, 高木興一, 山本剛夫: 聴覚誘発脳波(緩反応)に及ぼす騒音の立上がり速度の影響, 日本音響学会誌, Vol. 37, No. 2, pp. 55-64, 1981
- 23) Karlin, L.: Cognition, preparation, and sensory-evoked potentials, Psychological Bulletin, Vol. 73, No. 2, pp. 122-136, 1970
- 24) Kramer, A. F., Trejo, L. J., and Humphrey, D.: Assessment of mental workload with task-irrelevant auditory probes, Biological Psychology, 40, pp. 83-100, 1995

(1997年6月30日原稿受理, 1998年1月6日採用決定)