脳波を用いた環境音の快適性評価*

平澤 瞬^{*1}, 渡邊鉄也^{*2}, 田中基八郎^{*3}

Evaluation of Environmental Comfort Sound by Electroencephalogram

Shun HIRASAWA, Tetsuya WATANABE^{*4} and Kihachiro TANAKA^{**} Division of Mechanical Engineering and Science, Saitama University,
255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

We are surrounded by various sounds like the sound of the car, train, rain and all that in our daily life. It might become feelings very relieved, and come to want to prevent our ear unpleasantly at times. Then, it is thought that it is possible to pursue comfort of the specific sound source like an artificial machine noise by evaluating emotion caused by the sound. There are two methods of evaluating emotion. One is the subjective evaluation like the semantic differential method and the other is the objective evaluation method using biological information, such as electroencephalogram and electrocardiogram. And, a latter method is more certain and quantitative. This study establishes the method for quantitatively evaluating the comfort by measuring electroencephalogram. Then, an objective evaluation to an environmental sound is evaluated by this method.

Key Words: Electroencephalogram, Comfort Evaluation, Environmental Sound

1. 緒 言

私たちは日常の中で、車や電車の音、鳥のさえずり、雨音、工事現場の音といった様々な音（環境音）に囲まれて生活している。そして、それぞれの音に対してある感情を持ち、とても安らぐ気持ちになる場合もあるし、時には不快で耳を防ぎたくなる場合もある。そこで、音によって生まれる感情を評価することにより、どのような音が心地よいか、あるいは不快であるかなど、特定音源の快適性を追求することができると考えられる。特に機械音などの人工的な音に対する快適性を評価することは空間環境の改善、そして人々が過ごしやすい環境の構築につながると考える。

このような感情を評価するにあたり、一般的に用いられているのはSD法などの主観的な評価方法⁽¹⁾である。しかし、より確実に、定量的に評価をするためには主観的な手法に加えて、客観的な手法が求められている。そしてそれは心拍、脈波、脳波といった心理状態に呼応する生理応答をみることで可能となる。

本研究では、環境音と感情の関係性を解明するために、人間の生体情報の一つである脳波を用いて定量的な評価を行う。脳波は人間工学的分野に広く利用されているが、その多くは脳波の主成分の変化に焦点を当てたものである。これまでも快適性を α 波成分の増加で評価しようとする研究が行われてきた。しかし、脳の活動度は個人差が大きく外来ノイズに弱いという欠点がある。そこで本研究では比較的個人差が少なく、外来ノイズに強い脳波の周波数ゆらぎに注目する。ゆらぎは、製品としても利用されており、特に音楽自体にゆらぎ成分(1/f音楽など)を持たせるリラックス音楽は広く知られている。しかし、このように製品に対してゆらぎ成分を持たせる研究は多く行われているが、心拍や脈波、脳波などの生体情報のゆらぎを工学的に利用する研究⁽²⁾は少ない。人間の生体情報は非常に複雑であり、今なお解明されていない部分が多く、もし周波数ゆらぎなどの情報を利用することができれば、工学的に非常に有益なものとなると考えられる。

本研究では、脳波の周波数ゆらぎなどによる快適性評価方法について検討を行い、私たちの身の回りにある環境音に対する快適性を主観的、客観的の両側面から評価する。また、ストレスに関連があると言われていた $\alpha 1$ 波⁽³⁾の割合の時間推移を見ることが、環境音とそれに対する「慣れ」の関連性を調査する。

* 原稿受付 2010年3月26日。

^{*1} 学生員, 埼玉大学大学院理工学研究科(〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255)。^{*2} 正員, 埼玉大学大学院理工学研究科。^{*3} 正員, フェロー, 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: watanabe@mech.saitama-u.ac.jp

2. 快適性評価方法

2・1 脳波 大脳皮質は多数の神経細胞（ニューロン）で構成されている。すべての刺激は何らかの形で脳に伝わり、それに対して脳が判断を下す。脳での情報処理はニューロン同士の情報伝達によって行われるが、その際にニューロンは発火し電気信号によって情報を伝達する。このニューロン1つの発火による電位は非常に小さいものだが、大脳皮質を覆う頭蓋骨上の頭皮には多数のニューロン発火の合計が表れる。この電位波形が脳波、(Electroencephalogram)である。脳波には自発脳波と誘発脳波があり、前者は常に出現する定常的な脳波であり、背景脳波とも呼ばれることもある。それに対し、後者は何らかの課題や刺激を与えたときに出現する過渡的なものである。自発脳波は振幅数十 μV 、周波数0.5~100Hz程度の波形であり、様々な周波数の波が混在している状態であるが、周波数成分ごとに分類がされている（基本律動）。一般的に δ 波（2~4Hz）は睡眠時、 θ 波（4~8Hz）は覚醒レベルが低く、ボーっとした状態、 α 波（8~13Hz）は落ち着いた状態や安静閉眼時に優位になり、 β 波（13Hz~）は開眼時や精神活動時に優位になることが知られている。また、本研究では α 波を $\alpha 1$ 波（8~10Hz）と $\alpha 2$ 波（10~13Hz）に分けて扱う。

2・2 感情モデル 人間の感情は非常に複雑で多彩であるため、感情を完全に把握することは困難である。基本的な感情の識別はさまざまな研究者によって試みられている。エクマンは「幸福」「怒り」「驚き」「悲しみ」「嫌悪」「恐れ」の6感情が基本であるとし、万国共通といわれている感情と等しい。また、イザードは「興味・興奮」「喜び」「驚き」「苦悩・不安」「怒り」「嫌悪」「軽蔑」「恐れ」「恥」「罪悪感」の10感情を基本感情としている。また、プラチックは「歓喜」「憧憬」「恐怖」「驚嘆」「悲嘆」「憎悪」「激怒」「警戒」の8つの感情とそれぞれにその感情の強度を加えた3次元的なモデルを提案している⁽⁴⁾。一方、ヘラーは気分の良し悪し（Valence）と覚醒（Arousal）の2次元で感情を表現するモデルを提案した⁽⁵⁾。さらに、ValenceとArousalの2軸によって分割される4つの象限で感情を「Calm（落ち着いた）」「Happy（嬉しい）」「Anxious（不安）」「Depressed（落ち込んだ）」の4種類に区別している。エクマンやイザードらが考えたものに比べれば、単純化されているが、人の感情を簡便に評価するために、本研究ではこの感情の2次元モデル（図1）を参考にして感情評価を行う。

2・3 脳波のゆらぎ

脳波の時刻歴波形を見るとその周期は時々刻々変化していることがわかる。この周波数変動がゆらぎである。脳波の周波数ゆらぎを用いた研究の1つとして、 α 波の周波数ゆらぎと快適性の関係を調べた研究がある⁽⁶⁾⁽⁸⁾。現在までに、 α 波はリラックスしているときに、 θ 波はぼんやりしているときに支配的になることが知られている。本研究で用いる感情モデルは気分と覚醒感という次元を有しており、気分に関連する α 波と、覚醒に関連する θ 波の周波数帯域を解析する価値はあると考える。そこでゆらぎスペクトルを求める周波数帯域には、 θ 波帯域（4~8Hz）と α 波帯域（8~13Hz）、そして θ - $\alpha 1$ 波の帯域（4~10Hz）を利用する。これらの帯域のゆらぎをウォルシュ変換してパワースペクトルを求める。横軸に周波数、縦軸にパワー値をとった両対数グラフ上に求めた値をプロットすると、右下がりのグラフになるが、ある点（変曲点）を境にその傾きが変化している（図2）。そして、この変曲点の左側、つまり低周波数領域の傾きが-1に近づくほど快適感を示す傾向があることがわかっていく。

Fig.1 Emotional model

Fig.2 Yuragi power spectrum

3. 脳波測定

3・1 脳波測定装置 脳波はマルチテレメータシステム (WEB-5000: 日本光電製) で測定し, 無線で受信機へ送る. テレメータの受信機が受け取ったデータは AD 変換器 (PCD-320A: 共和電業製) を通して PC で記録される. また, データの解析は実験後に行う.

3・2 脳波測定位置 脳波測定は一般的には標準電極配置法である 10/20 法で行われるが, 本研究では, 測定の簡便さを考慮し, 感情との関連が深いとされている前頭連合野のうち左右前頭部に注目した. 電極位置を固定した電極バンドにより, 頭に巻くだけで簡単に電極を貼り付けられるようにした. 電極の位置は眉間点から高さ 35mm, 左右 32mm (図 3). 左右両耳 (A1, A2) 連結を基準として左右前頭部 (Fp1, Fp2) にて電位を測定し, Fp1, Fp2 の中点にアース (E) をとった. 本研究での測定は電位活性のない耳朵を規準とし, 前頭部との電位差を測る単極誘導法で行う事とするが, これは心理学や人間工学の分野で一般的な導出方法でもある.

3・3 実験条件 実験は図 4 のように無響室で行い, 被験者は閉眼で椅子に座った状態とし, ステレオスピーカーから環境音を呈示した. 30 秒の無音状態と, 環境音を 300 秒流した時の脳波を測定した (図 5). 実験終了後, 気分と覚醒感を 4 段階で評価してもらった (図 6). また, 実験を行う上で, 被験者には眠ることを意識させることで, 「眠りを誘発させる音 = 快適な音」, 一方で「眠りを妨害させる音 = 不快な音」といったように, 主観的にも客観的にも快・不快に感じる音を明確に評価できるようにした.

3・4 周波数ゆらぎ解析 実験によって得たデータの解析方法を示す. 解析の流れは次のとおりである.

- 1) 実験で得た脳波データから, 帯域フィルタを通すことによって任意の帯域を取り出し, ある一定の電位に達した点のみを検出することで, 周期を求める.
- 2) 検出した周波数ゆらぎを実際に測定した時間との対応をとるために 20Hz で再サンプリングする.
- 3) 周波数ゆらぎの時系列波形を 512 点ごとの区間に分割し, それぞれの区間でウォルシュ変換を用いてウォルシュパワースペクトルを求め, 10 点での移動平均を行ったものをその区間のパワー値とする.
- 4) 区間ごとに求めたパワー値を平均し, 実験データのパワー値とする (ゆらぎスペクトル).
- 5) 両対数グラフ上に 4) で求めたデータを縦軸に, 対応する周波数を縦軸にとる.

- 6) 5) のグラフで変曲点を境に, それより低周波数領域で直線適合し, その直線の傾きを求める.

以上のような手順で算出したゆらぎの傾きをもとに, 脳波による感情評価を行う. すでに述べたように, 左前頭部脳波 (Fp1) より算出したゆらぎの傾きは気分 (Valence), 右前頭部脳波 (Fp2) より算出した傾きは覚醒度 (Arousal) に関連するため, 傾きの値から感情モデルに沿った評価が可能である. また, 実験終了後のアンケート調査でも気分と覚醒度について評価しているので, アンケート結果も同様にして感情モデル上に表すことができる. したがって, 脳波解析結果が示す感情とアンケート結果が表す感情にどのような関係があるかを容易に見ることができる.

Fig.3 EEG electrode position

Fig.4 Experimental apparatus

Fig.5 Measurement process 1

Fig.6 Questionnaire

3・5 α 波の時間変化 人間が一定の感情を保つことができる限界は 300 秒であると言われている。これを参考に脳波測定時間を設定したが、実験終了後の感想として、「音に慣れた」、「徐々に気分が悪くなった」など、音を聴いている間に感情の変化があったという意見が多かった。そこで、取得した 300 秒全てのデータを平均することで得られるデータを見るだけでなく、一定時間毎にデータを平均し、脳の活動度の時間変化を確認する。ここでは前半 150 秒と後半 150 秒のデータに分け、データ毎に活動度を調査する(図 7)。この調査にはストレス変化に対応がある α 波の増減による評価を行う。 α 波はリラックスした状態や、落ち着いた状態に増加するとされ、快適感と α 波が関連することが知られている。また、 α 波の中でも周波数帯ごとに $\alpha 1$ 波 (8Hz~10Hz) と $\alpha 2$ 波 (10Hz~13Hz) に分類して評価を行った研究⁽¹⁾があり、ストレス変化には特に $\alpha 1$ が対応していることが報告されている。本研究ではこれを踏まえ、 α 波の割合の変化だけでなく、 $\alpha 1$ 波および $\alpha 2$ 波の割合の変化を調査する。これにより環境音が人間の精神状態の変化に与える影響を客観的に見ることができると考える。

4. 環境音の快適性評価結果

4・1 快適性評価結果 図 8~図 10 に冷蔵庫の音に対する快適性評価結果を示す。グラフは極座標表示であり、Fp2 のリズム度を x ; Fp1 のリズム度を y としたとき、式(1)から求められた ϕ が定める領域が感情を表し、式(2)から求められた r が快適度 (%) を表す。快適度は各領域に下限と上限があり、その値により第 1 象限が快適 (快適度:60~100%)、第 2 第 4 象限がやや快適 (快適度:40~80%)、第 3 象限が不快 (快適度:0~40%) であると位置付ける。

$$\phi = \arctan\left(\frac{y-0.5}{x-0.5}\right), (0.5 \leq x \leq 1) \quad (1)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{y-0.5}{x-0.5}\right) + \pi, (0 \leq x \leq 0.5)$$

$$r = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{2}} \times 100 \quad (2)$$

それぞれの図は θ 波帯域 (4~8Hz) を用いた結果、 θ 波- $\alpha 1$ 波帯域 (4~10Hz) を用いた結果、 α 波帯域 (8~13) を用いた結果を示している。 α 波帯域を用いた場合ではアンケート結果と解析結果は対応していないが、 θ 波や θ - $\alpha 1$ 波帯域を用いた場合にはある程度対応が見られる。次に、他の環境音 (①実験室の暗騒音、②掃除機の声、③冷蔵庫の音、④舗装工事現場の音、⑤ビニール袋の音、⑥電気街の雑踏、⑦国道脇の音、⑧駅前広場の雑踏、⑨モスキート音、⑩川のせせらぎの音) に対しても同様に評価を行い、各環境音に対して快適性を示した (快適、やや快適であると示した) 人数を図 11~図 13 に示す。これを見ても、 θ 波や θ - $\alpha 1$ 波帯域を用いた場合でのアンケート結果と脳波解析結果が対応しており、これらの帯域のゆらぎを使用することで客観的に快適性を評価できることがわかった。

アンケートによる主観的な結果と脳波解析による客観的な結果を見ると、①実験室の暗騒音、③冷蔵庫の音、⑩川のせせらぎが快適感を誘発させる傾向があり、④舗装工事現場の音、⑥電気街の雑踏は不快感を誘発させる傾向があることがわかった。

Fig.7 Measurement process 2

Fig.8 Evaluation result of refrigerator by θ wave

Fig.9 Evaluation result of refrigerator by $\theta - \alpha 1$ wave Fig.10 Evaluation result of refrigerator by α wave Fig.11 Number of subject felt good by θ wave Fig.12 Number of subject felt good by $\theta - \alpha 1$ wave Fig.13 Number of subject felt good by α wave

4・2 α 波の時間変化結果

図14～図23に各環境音を聴いた時の α 波の時間変化を示す。結果は測定条件ごとの平均で、横軸の「former half」は前半の脳波データであり、「latter half」は後半の脳波データを示す。縦軸は δ 波を除く基本律動波における $\alpha 1$ 波と $\alpha 2$ 波の割合、そしてその合計の α 波の割合を示す。 δ 波を除いた理由はローカットフィルタによる影響を考慮したためである。

ストレスに関連があるとされている $\alpha 1$ 波について見ると、変化が顕著であるのは図14の「実験室の暗騒音」と図17の「舗装工事現場の音」である。前者は減少する傾向が見られ、後者は増加する傾向が見られる。この2つの音は「静かな音」と「うるさい音」であり、前述のアンケート結果からも相対する環境音であることがわかる。ここで図17に注目すると、音呈示前半における $\alpha 1$ 波の含有量が20%と他の音に比べて低いことがわかる。これはこの音が呈示された当初は非常に不快であることを示していると考えられ、時間がたつことで「慣れ」が発生し、30%付近まで増加したものであると考える。一方、「実験室の暗騒音」では後半が前半に比べて小さくなっており、 α 波全体を見ても減少傾向にあることがわかる。これは実験中には被験者に対して眠ることを意識させているので、低覚醒時に優位になる θ 波の影響であると推測できる。このことは、図23の「川のせせらぎ」においても、同じような傾向があることから説明がつく。「実験室の暗騒音」の他では α 波全体が減少するというはっきりとした傾向は見られない。他の環境音に関しては、「舗装工事現場」に比べると顕著な $\alpha 1$ 波の増加は見られないものの、ある程度の増加は確認できる。よって他の環境音でも音呈示前半と音呈示後半で「慣れ」が発生していることが確認できたといえる。例外として図19の「電気街の雑踏」について確認する。「電気街の雑踏」は通行人の話し声の割合が多く、周波数や音の変化が大きい。そのため、音に慣れることができず、ストレスが大きくなり、結果として $\alpha 1$ 波の減少につながったと考えられる。このことから、音の変化が大きく断続的な環境音は「慣れ」が発生しにくく、逆に音の変化が少ない環境音、また、その変化が規則的な環境音ものは「慣れ」が発生しやすいと考えられる。

Fig.14 Shift of α wave ratio for background noise Fig.19 Shift of α wave ratio for electronics quarter Fig.15 Shift of α wave ratio for cleaner Fig.20 Shift of α wave ratio for side of road Fig.16 Shift of α wave ratio for refrigerator Fig.21 Shift of α wave ratio for station square Fig.17 Shift of α wave ratio for pavement construction Fig.22 Shift of α wave ratio for mosquito noise Fig.18 Shift of α wave ratio for plastic bag Fig.23 Shift of α wave ratio for chatter

5. 結 言

本研究から以下のことがわかった。

- (1) θ 波帯域または θ - $\alpha 1$ 波の帯域を使用してゆらぎ解析を行った結果はアンケート結果と近くなり、ある程度快適性の評価ができる。
- (2) 環境音に対する主観的及び客観的な快適性評価を行った。
- (3) α 波の増減から、音に対する「慣れ」を確認することができる。
- (4) 音の変化が大きい環境音は「慣れ」が発生しにくく、逆に音の変化が少ない環境音、また、その変化が規則的なものは「慣れ」が発生しやすい。

本研究では、主観的評価方法である SD 法を用いずに客観的に快適性を評価することを目標とし、その方法として脳波の周波数ゆらぎに注目した。第一段階として環境音を取り上げ、その快適性について検討した結果、脳波を用いてある程度環境音の快適性を評価できることがわかった。また、音に対する「慣れ」を判断できそうであることもわかった。

脳波を用いた快適性評価方法の妥当性を検証するには、より多くの被験者や情報を用いて統計的処理が必要であり、今後検討していきたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) Kawai, K., Kojima, T., Hirate K., Yasuoka M., , Personal psychological evaluation structure of environmental sounds: Experiments of subjective evaluation using subjects' own terms, *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol.60, No.5(2004), pp.249-257.
- (2) Okamoto, Y., Fukushima, Y., Sakaguchi, T., Arai, J., Choi, J., Hotta, K., Yoshida, T., The effect of Sound field containing the Supersonic wave on the Psycho physiological condition, *Technical report of IEICE, EA*, EA2003-65 (2003), pp.51-58.
- (3) Yamazaki, K., Hotta, K., Saitou, M., Ogawa, M., On the physiological effect of ultrasound included in the mountain stream sound, *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol.64, No.2 (2008), pp.545-550.
- (4) Randolph R. Cornelius, THE SCIENCE OF EMOTION: Research and tradition in the psychology of emotions, Seishin Shobo (1999).
- (5) Wendy Heller, Neuropsychological Mechanisms of Individual Differences in Emotion, Personality, and Arousal, *Neuropsychology*, Vol.7, No.4 (1993), pp.476-489.
- (6) Yoshida, T., The measurement of EEG frequency-fluctuation and evaluation of comfortableness, *The Journal of the Acoustical Society of Japan*, Vol.46, No.11 (1990), pp.914-919.
- (7) Yoshida, T., The Evaluation of Emotion Using the Measurement of Frequency-Fluctuation of Brain Wave, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol.98, No.918 (1995) , pp.403-406.
- (8) Yoshida, T., Objective Measurement and Evaluation for Comfortableness, *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.41, No.10 (2002), pp.696-701.