研究論文：論文

騒音に対する自発脳波及び脳血液動態の変化

自発脳波に及ぼす騒音の影響と近赤外線分光法からみた騒音に対する反応特性

谷崎みゆき^{*、**}・虎頭保尚^{*}・大西智史^{***}・中原凱文^{*}

^{*}東京工業大学大学院社会理工学研究科人間行動システム専攻

^{**}医療産業株式会社 薬事部

^{***}神奈川工科大学ハイテクリサーチセンター第2プロジェクト

EEG AND HEMO-DYNAMICS RESPONSES FOR THE BACKGROUND NOISE USING EMOTION SPECTRUM ANALYZER AND NEAR-INFRARED SPECTROSCOPY (NIRS)

Miyuki TANIZAKI^{*、**}, Yasuhisa KOTOH^{*}, Tomofumi ONISHI^{***} and Yoshibumi NAKAHARA^{*}

^{*}Department of Human System Science, Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

2-12-1, O-okayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552, Japan

^{**}Department of Regulatory Affairs, Medical Industries Corp.

4-2-1 Yushima, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0034, Japan

^{***}Department of High Technology Research Center 2nd. Project Team, Kanagawa Institute of Technology

1030 Shimoogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292, Japan

Abstract: In many NIRS studies, the change of Hemoglobin is obtained with the sensory stimuli. In this study, acoustical stimuli was presented in random order. The subject was required to listen to the seven kinds of sounds (Speech sound, Machine noise, Stream sound, Commotion noise, Speech sound with machine noise, Speech sound with stream sound, Speech sound with commotion noise) from speaker. While it was listening to the sound, the subject had measured Blood volume (Total Hemoglobin) and Deoxy Hemoglobin in the frontal area. Deoxy Hb evoked by the Stream sound in this task is a largest for auditory stimuli in normal young adults. On the other hand, when there was machine sound, Total Hb took an influence. We also measured EEG. A % α power got a high result by the murmur of a stream sound. The result was assessed from the view point of the foundation research, and it was shown that the measuring of Hemo-dynamics response and EEG might be useful for the sensory evaluation.

Keywords: Noise, Speech Sound, Near-Infrared Spectroscopy, Deoxy Hemoglobin, Total Hemoglobin

1. はじめに

数Hzから十数kHz付近にまで及ぶヒトの可聴域のうち会話領域とされる周波数帯域は1kHzを中心に125Hzあたりから4kHz付近までとされている[注1, 2]。私達が日常的に耳にする騒音は幾つかの周波数を含んでいるため、会話が邪魔されることもしばしばである。騒音規制法は音圧に対する制約を設けているものの、騒音の種類や周波数に対する規制は無く、またこれらに対する個人の感性の違いを客観的に理解するのは難しいとされている。そこで本研究では、音圧を一定にたもった騒音および語音に騒音をかぶせて聴かせたときの脳波を脳波解析装置（感性スペクトル解析装置ESA-16：エヌエフ回路設計ブロック、脳機能研究所社製）で計測、解析した結果と前額部のDeoxy Hb（デオキシヘモグロビン）とTotal Hb（総ヘモグロビン）量の変化を近赤外線分光法（非侵襲ハンディ酸素モニターHEO-200：オムロン社製）により測定し解析した結果から騒音のもつ周波数のちがいと前頭葉における自発脳波及び血液動態との関係について評価することを目的とした。

2. 実験方法

2.1. 被験者

健康な大学生および大学院生、男女13名を対象とした。実験はすべて大学施設内で行い、実験の開始時間は一定の時間帯を定めた（14：00～16：00）。

2.2. 実験環境

実験は、吸音用穴明き石膏ボード（JIS A6301）を施した防音設備のある室内で行った（図1）。室内温度は $25 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度60%。室内における被験者位置は、予備実験において室内での音環境を調べた上で、最も効果的である場所を設定した。被験者を背もたれのある座椅子に座らせ、体動がないようなリラックス姿勢をとらせた。

2.3. 測定項目

近赤外線分光法は生体における血液動態を非侵襲的かつ簡便に測定でき、その応用性は実験室のみならず術中の管理からベッドサイドに至るまで、臨床の場に於いても用いられつつある。近赤外線は700～3000nmの波長をもつとされ、本測定器はその波長光をヘモグロビンの吸光度に合わせてある[注3, 4]。光源部より送光された光は、

組織を透過し、拡散するが、その拡散した光はバナナシェーブと呼ばれる固有な光路をたどり受光部で検知される。その際の、吸光量が測定結果として記録される。また透過深長はプローブ幅の半分となるよう設定されており、ここではプローブ幅4cm、測定深部2cmの部位におけるDeoxy Hb（デオキシヘモグロビン）およびTotal Hb（総ヘモグロビン）を測定するよう設定した（図2）。近赤外線酸素モニタのプローブは被験者の前額部に固定し、測定結果はパーソナルコンピュータを用いて解析した。

図1. 被験者周辺の機器とスピーカ

図2. 近赤外線分光法の原理

また脳波の測定に際しては図3の部位に国際10-20法に基づきFp1、Fp2、F3、F4、C3、C4、P3、P4、O1、O2、T3、T4の12電極から右耳朶基準単極誘導により導出した。フィルタの設定は1.6Hz ハイパス 12 dB/Oct、30Hz ローパス 12 dB/Oct とし刺激音下での脳波の結果を感性スペクトル解析装置ESA-16の解析プログラムを用い8~13Hzにおけるα波の%パワーを求めた。

図3. 脳波時に配置した電極部位

2.4. 音刺激

音刺激は、スピーカをとおして、語音を LAeq 60dB に、語音に被せた騒音は騒音基準を上回る LAeq 70dB に設定した。実験中は、語音の聴き取りに集中させた。暗騒音は35~37dB であった[注5]。

語音に被せた騒音の選定に際しては、被験者10名に予備実験で6つの効果音を聴かせ、日常的に耳にするとと思われるもの、もう聴きたくないと思われるもの、もう一度聴きたいと思われるものを選別させた。その結果それぞれ「なんとないざわめき」（効果音大全集シリーズ17：キングレコード）、「製材機械音」（効果音大全集7 特殊音II：キングレコード）、「せせらぎと河鹿の声」（効果音大全集V水の情景：コロムビア）の3種（以下、ざわめき音、機械音、せせらぎ音と略す）に決定した。語音刺激は、日本聴覚医学会編集による語音聴力検査用語表の67-S語音表を使用した。語音に騒音を被せて与える場合はミキサーをとおし、アンプを経てスピーカより提示した。被験者にはプローブを装用後、安静をとらせ、それぞれ2分間の音刺激を与えた。刺激の順序はランダムとした（図4）。

図4. 安静と刺激の順 音刺激はランダムとした

図5は1kHz純音を80dB出力するようアンプを校正した場合の刺激音の音圧レベルと諸量のちがいを表したものである。積分形普通騒音計(JIS C1502)(RION NL-06)により各音2分間測定した。JIS C1502の騒音測定に関する事項において、音圧レベルと騒音レベル(IEC 651)は、重み付き音圧レベルという表現法を採用し、周波数の重み特性(周波数補正回路の特性)を規定している、とある。周波数の重み特性としては、A、B及びC特性があげられるが、今回は背景音としての意味合いが強いため、A特性を採択した。

Speech Sound: 語音刺激、Stream: せせらぎと河鹿の声、Commotion: なんとなくざわめき、Machine: 製材機械音

図5. 1kHz 純音を 80dB 出力するようアンプを校正した場合の各騒音の音圧レベルと諸量

縦軸は音圧を表し、横軸は JIS 8202 に基づく量記号の表記である。LAeq は等価騒音レベル、E は単発騒音暴露レベル、Max は最大値、Min は最小値、50 は 50% 時間率騒音レベル、90 は 90% 時間率騒音レベルを表している。

等価騒音レベルではせせらぎ音が一番低くなってしまったため、実験に際しては毎回キャリブレーションを行い騒音としての許容を満たすべく 70 dB が出力されるように心がけた。また語音は騒音下で聴こうと努力するように被せた騒音の音圧をあえて下回るように校正した。

3. 結果

図6は被験者AのFp1、Fp2、F3、F4における%α波の測定結果である。脳波に対して%パワー解析をほどこすということは、特定の周波数帯域のパワーが全帯域のパワーの何%を含有するかを表すものであり、睡眠覚醒などの評価に有用な指標であるとされている[注6~10]。

図6. 被験者Aの脳波からESA-16によりもとめられた%α power のデータ

ここでは全帯域中の 8.0 から 13.0 Hz 帯域における脳波の占める割合を全体を 100 として表している。下向きの振幅は Rest 時に、上向きの振幅は各音刺激下で得られたものである。7 名の被験者に 2 サイクルずつランダムに音刺激を与え (n=14) 得られた結果を条件別にグラフ化した (図7)。

Spch: 語音刺激、Strm: せせらぎと河鹿の声、Cmnt: なんとなくざわめき、Mchn: 製材機械音

S. p ~ は語音に各々の騒音を被せた場合 (Mean ± S. E)

図7. 被験者7名に対し2サイクル音刺激を与えた時の脳波から得られたFp1、Fp2、F3、F4における%α波

図8. 被験者7名に対し2サイクル音刺激を与えた時の脳波から得られたF3、C3、P3、T3における%α波

図9. 被験者7名に対し2サイクル音刺激を与えた時の脳波から得られたF4、C4、P4、T4における%α波

図10. 被験者7名に対し2サイクル音刺激を与えた時の脳波から得られたP3、P4、O1、O2における%α波

前頭部であるFp1、Fp2、F3、F4における%α波の結果から小川のせせらぎ音での値が高く、語音や機械音に比べ有意な差がみとめられた。同様に左側頭部F3、C3、P3、T3、右側頭部F4、C4、P4、T4に加え後頭部であるP3、P4、O1、O2に対して解析した(図8~10)。

α波はリラックスの脳波だといわれており、また得意なことや興味あることに集中しているときには、前頭葉の部分から強く観察されるといわれている。図7で小川のせせらぎ音での%α波が最も高値であったことから7つの音刺激のうち一番リラックスしていたと考えられた。また他の部位においても小川のせせらぎ音の値が一番高かった。

図11~14は刺激下での前額部におけるDeoxy HbとTotal Hbの変化である。刺激下2分間と刺激後(Post)の測定結果を30秒間ずつに区切り13名の平均をグラフ化した。いずれも安静時(pre30)との差を示している。

グラフ上、語音のみを聴かせた時の推移を太線で示した。語音のみを提示した場合Total Hbはほぼ一定に変化しておりDeoxy Hbは提示後60秒辺りにピークがみられるようななだらかな山型を示した。

Total Hbにおいては騒音のみを聴かせた場合においても語音に騒音を被せた場合においても機械音での値が最も小さくDeoxy Hbにおいては騒音のみを聴かせた場合においても語音に騒音を被せた場合においてもせせらぎ音での値が大きかった。

図15~16はDeoxy HbとTotal Hbの変化を時間の経過によってみたものである。Total Hbにおいては刺激後30秒を経過した辺りから条件下での差がみられはじめたがその後は大きな差はみられていない。Deoxy Hbにおいては刺激直後に条件下での差がみられているがその後は顕著な差はみられず60~90秒ではどの条件でも0.00~-0.01の間で推移していた。

Total Hbでは語音のみを聴かせた場合は刺激直後から刺激後に至るまでほぼ一定の値を示している。同様の傾向は機械音のみを聴かせた場合、語音にざわめき音を被せた場合にもみられた。せせらぎ音のみを聴かせた場合はゆっくりと減少し刺激後もまだ下降していた。ざわめき音のみを聴かせた場合は刺激下ではほぼ一定であるが刺激が止むと安静時の値に戻っている。同様の結果が語音にせせらぎ音を被せた場合、語音に機械音を被せた場合においてもみられた。

Deoxy Hbでは語音のみを聴かせた場合は30~60秒にピークがみられた。刺激下1分辺りにピークがみられるような結果はせせらぎ音のみを聴かせた場合、語音にざわめき音を被せた場合においてもみられた。ざわめき音のみを聴かせた場合は00~30秒と60~90秒にピークがくるような2つの山型がみられた(図11)。機械音のみを聴かせた場合でも、語音に機械音を被せた場合でも後半部分(90秒~)に増加がみられている。同様に語音にせせらぎ音を被せた場合は後半部で大きく上昇し、刺激が止んだ後も他の騒音に比べ高い値を示した。

Spch: 語音刺激、Strm: せせらぎと河鹿の声、Cmtn: なんとないざわめき、Mchn: 製材機械音

図 11. 騒音のみを与えた時の Deoxy Hb の変化

Spch: 語音刺激、S&S: 語音+せせらぎと河鹿の声、S&C: 語音+なんとないざわめき、S&M: 語音+製材機械音

図 12. 語音に騒音を被せた時の Deoxy Hb の変化

Spch: 語音刺激、Strm: せせらぎと河鹿の声、Cmtn: なんとないざわめき、Mchn: 製材機械音

図 13. 騒音のみを与えた時の Total Hb の変化

Spch: 語音刺激、S&S: 語音+せせらぎと河鹿の声、S&C: 語音+なんとないざわめき、S&M: 語音+製材機械音

図 14. 語音に騒音を被せた時の Total Hb の変化

Speech Sounds: 語音刺激、Stream: せせらぎと河鹿の声、Comotion: なんとないざわめき、Machine: 製材機械音、S.S with は語音に各々の騒音を被せた場合 (Mean $\pm$ S.E)

図 15. Total Hb の時間的变化

Speech Sounds: 語音刺激、Stream: せせらぎと河庭の声、Comotion: なんとなくざわめき、Machine: 製材機械音、S.S with~は語音に各々の騒音を被せた場合 (Mean±S.E)

図 16. Deoxy Hb の時間的变化

4. 考察

本実験で用いた騒音の周波数帯域は低域から高域に至るまで広く、語音聴力検査用語表 CD に収録されている女性の声 (スペクトラムのピークが 500Hz から 1kHz の範囲) を覆うように存在していた。実験中の騒音は平均音圧を 70dB に設定した。脳波から得られた % α 波の違いと近赤外線分光法によるヘモグロビンの変化量の違いは、音圧のみに依存するものではなく騒音の、もつ周波数の特質によるものであると示唆された。

自発脳波は周波数から α 波 (8~13Hz)・ β 波 (14Hz 以上)・ θ 波 (4~7Hz) などに分けられ、特に α 波は安静時や精神的負荷のないときに増えるといわれている。それはリラックスした状態であるかを見極めるための指標ともなり得る。

本実験では 7 名の被験者に音刺激を 2 サイクルずつランダムに与え、前頭部における条件による % α 波の違いを求めた。前頭部は刺激に対する評価、判断などヒトの高次脳機能をつかさどる部位であり前頭部から検出される脳波には、これらの活動が鋭敏に反映されるところと考えられる。解析の結果小川のせせらぎ音での値が高く、逆に機械音ではどの部位に於いてもその値は低くせせらぎ音とは対照的であった。閉眼時における脳波では、 α 波の % パワーが大きいほど、覚醒が高いと言えるが、本実験で得られた脳波も閉眼時のものであることから覚醒状態が高かったと考えられた。しかし今回のように騒音の種類による違いを得られたことから単に覚醒状態だけを測る指標ではなくそのレベルと騒音による関係が推測された。なぜなら小川のせせらぎ音はもう一度聴きたい音、機械音はもう聴きたくない音として選ばれたものであった。

また脳波のデータから ESA-16 により感性スペクトルを求めた。図 17 は解析プログラムを用い得られた被験者 A の 4 つの感性スペクトル (ストレス、喜び、悲しみ、リラックス) である。同様の結果を 7 名全員から得たが個人間での違いを考慮し被験者ごと、各条件での結果を規格化した。その結果、特にストレスに対して 14 サイクルの平均を表したものが図 18 である。

機械音や小川のせせらぎ音でのストレスは低く、語音にざわめき音が被った場合に高値を示している。このことは騒音の種類がストレスに大きく関与し、ざわめき音下での語音聴き取りに対する不快感を類推させた。これらのことから好ましい音がある場合はリラックス度が増し、さらに集中度も増していることが示唆された。機械音のような好ましくない音が存在する場合、逆に集中度は低下していると考えられた。

近赤外線分光法はその応用がベッドサイドを含め術中、術後の管理等多岐にわたって使用されつつある。侵襲性のないことから成人のみならず新生児に対しても利用されるようになり今後も脳波や PET、fMRI と並び、活用の場面が増えることと思われる [注 11~14]。

Deoxy Hb とは脱酸素化ヘモグロビンをさし、Total Hb とは総ヘモグロビン量をさしている。語音のみを聴かせた場合は Total Hb すなわち総ヘモグロビン量はほぼ一定に推移、Deoxy Hb すなわち脱酸素化ヘモグロビンはなだらかな山型を描いたことから、血液量は安定しており脱酸素化も他の騒音に比べ大きくは進んではいなかったことを示している。したがって語音を聴くという作業中の血液動態は安定していたことが示唆された。

図 17. ESA-16 によって描かせた感性スペクトル

図 18. 規格化したストレスに対する感性スペクトル

Total Hb は騒音のみ、語音に騒音を被せた場合でも機械音を除き、0.00～0.01 の間で推移しておりほぼ一定であるといえる (図 13、14)。一方、Deoxy Hb は全条件でプラスにシフトしており特に語音にせせらぎ音が被った場合の変化が大きく時間の経過に従い増加していた (図 11、12)。もう一度聴きたいと思う音として選ばれたせせらぎ音の存在下では語音聴きとり時には総ヘモグロビン量は一定であることから血液量は安定しており、脱酸素化は刺激直後から影響を受けしかも時間経過に伴い増加していることが類推される。

しかし二度と聴きたくない音とされた機械音では Total Hb においては騒音のみを聴かせた場合においても語音に騒音を被せた場合においても値が最も小さく (図 13、14)、Deoxy Hb においては刺激後後半部で上昇をみとめた (図 11、12)。このことは機械音が他の騒音に比べ血液量を下げ脱酸素化には遅延性があるように考えられた。これは機械音の聴き始めの衝撃が強く影響していることを示唆した。これらのことから血液動態には時間が関与していることが類推された。

脳波の結果と照らし合わせると小川のせせらぎ音下ではリラックスというよりはむしろ集中度が増した結果脱酸素化も亢進され、逆に機械音の場合は騒音としての要素が高く不快感が集中度を低下させたのではないかと考えられた。

中島智らは左右前頭葉における測定で、近赤外線分光法による血液動態変化のパターンを 3 つに分類した [注 15]。本実験の条件下における増減の仕方にもパターンがあることが考えられた。本実験において、刺激下から刺激後に至るまでの Total Hb における変化パターンには①ほぼ一定に推移するもの、②ゆっくり下降し刺激後も回復しないもの、③ゆるやかに下降し刺激後で戻るものの 3 つのパターンがみられた。また Deoxy Hb における変化パターンには①山型を示すもの、②2 つの山型がみられるもの、③後半から上昇するものの 3 つのパターンがみられた。これらのことは音刺激に対する変化の仕方が条件のみならず時間の経過によっても影響を受けるということを示唆した。

Total Hb は前頭葉の血液量を反映することからほぼ一定に推移する場合は血流量そのものが安定していたことを裏付けた。また下降する場合は測定開始とくらべ減少していることになるため刺激下では前頭葉のみならず脳の他の部位への局所的な流入も考えられた。

Deoxy Hb は脱酸素化を反映しているため山型に増加したことはそれだけ脱酸素化の亢進があったものと解釈される。

今後は前頭葉にかぎらず側頭を含め、脳の他の部位での測定を行うことで血液動態の局在性を明らかにすると同時に、刺激音をさらに物語性の強いものや心地よいとされる虫の声などをを用い顕著な違いがみられるかを研究する所存である。

謝辞

なお、本研究に際しまして、多大なご協力を頂きました神奈川工科大学ハイテクリサーチセンター第 2 プロジェクト、エヌエフ回路設計ブロック、荒賀裕氏に深謝申し上げます。また、本論文を執筆するにあたり、各測定器に関する規格に対しご助言を賜りました、医療産業株式会社深謝申し上げます。

注

- 1) 本郷利憲ほか：標準生理学、聴覚、医学書院、第3版、P206、1995
- 2) 松田幸次郎ほか：医科生理学展望、聴覚、丸善株、原書14版、106、1990
- 3) Michihiro Ohnishi, et al. : Measurement of Hemodynamics of Auditory Cortex Using Magnetoencephalography and Near Infrared Spectroscopy. Acta Otolaryngol., Suppl 532:129-131, 1997
- 4) Naoto Nakamura : Near-infrared Spectrophotometry and the application. J. Physiological Anthropology and Applied Human Science, 1, 2, 47-50, 1996
- 5) Murray Hodgson, et al. : Measurement and prediction of typical speech and background noise level in university classroom during lectures. J. Acoustical Society of America, 105, 1, 226-233, 1999
- 6) W.G. ウォルター., 懸田克躬、内菌耕二訳：生きている脳、岩波書店、248-256、1972
- 7) 大貝俊弘氏：いま、脳が進化する、日新報道、85-104、1996
- 8) ハーマン・ハーケン., 奈良重俊、山口陽子訳：脳機能の原理を探る、18-20、2000
- 9) 津本忠治：脳と発達、朝倉書店、104-106、1989
- 10) 佐藤昌康：ブレインサイエンスIV、朝倉書店、173-201、1991
- 11) K. Villringer, et. al. : Assessment of Local Brain Activation. Asimultaneous PET and Near-Infrared Spectroscopy Study. Optical Imaging of Brain Function and Metabolism II, 149-153, 1997
- 12) Patrizia Zaramella, et al. : Brain Auditory Activation Measured by Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) in Neonates. Pediatric Research, 49, 2, 213-219, 2001
- 13) Hellmuth Obrig, et al. : Near-infrared spectroscopy: does it function in functional activation studies of the adult brain? International Journal of Psychophysiology, 35, 2, 125-142, 2001
- 14) Ingrid S. Johnsrude, et al. : Functional specificity in the right human auditory cortex for perceiving pitch direction. Brain, 123, 155-163, 2000
- 15) 中島智：近赤外線スペクトロスコピーによる脳循環代謝の評価. Therapeutic Research, 16, 9, 28-33, 1995