

生体反応—脳波を用いたロードノイズの感性評価

Sensory Evaluation of Road Noise with Organic Reaction using Brain Waves

石井 康夫*
Yasuo ISHII

山下 剛* 荒賀 裕**
Tsuyoshi YAMASHITA Yutaka ARAGA

要 旨

車室内ロードノイズの評価に対して、従来からの間接的な記述式官能評価に加えて、生体反応(脳波)を直接計測する方法を用いた。その結果、ロードノイズを含むサンプル音に対する快—不快感因子は積極快と消極快に分離でき、消極快に対して脳波測定を用いて統計的に意味を有する客観的表現を得ることができた。

ABSTRACT

A method for direct measurement of organic reactions (brain waves) was used to evaluate interior road noise. This was used in addition to the conventional, indirect method of descriptive sensory evaluation. The results showed that the annoyance factors in perception of sample sounds that included road noise could be divided into an active pleasant-unpleasant factor and a passive comfort-discomfort factor. The use of brain wave measurement for the passive comfort factor demonstrated the possibility of obtaining objective descriptions that are statistically significant.

1. まえがき

車室内でのロードノイズの知覚についての研究は記述式官能評価によるものが多く報告されている^{(1), (2)}。それらにおいては迫力感、こもり感、快—不快感等がロードノイズに対する音色因子として挙げられている。このように官能検査による音の心理的評価等には多くの研究、事例があるが、従来の記述式官能検査については被験者の主観を忠実に捕らえているかという点において限界がある可能性がある。それは被験者が音刺激に対して励起された感情を記述するという行為によって記録するまでの過程において、高度な思考が介在し結果にバイアスがかけられる可能性を完全には回避できないことである。そこで主観的な評価を直接計測できれば、このような攪乱を避けられる可能性がある。近年人間に密着した結果を得る要求から、生体信号を用いた生理面からの反応レベルを対象とした評価法に強い関心がよせられるようになってきている^{(3), (4)}。例として心拍数や皮膚電位の測定から音刺激の心理的評価を行おうとするものであるが、これらの信号には情報量が少なく、快—不快など複雑な精神活動の推定まで行うには制約があるとされてきた。

本研究においては、真に心地よいロードノイズとは何かを明らかにするため、実機音を含む音提示を行う脳波実験を実施した。そして複雑な精神活動をつかさどる人間の中

枢神経系—脳活動の電氣的反映である脳波反応を分析の対象として、ロードノイズに対する快—不快感等の客観的な解析、評価を行った。また快反応の精度のよい特定と、その指標を用い、さらに音の物理的特性量との相関を分析し、音の物理的特性量からロードノイズの快—不快を推定する算出式の作成を目標とした。このことが可能になれば、心地よいロードノイズの開発に具体的な目標を与えるものと期待される。本報告ではその試みと結果を報告する。

2. 脳波計測・評価方法

ロードノイズ曝露により生じる快—不快感は脳の活動の結果であり、その影響は脳波に現れると考えられる。ロードノイズの提示はバイノーラル録音した粗面路走行時の助手席音をヘッドホン再生により行ったが、ヘッドホンの磁気により脳波計測結果にノイズが混入したのでハイパスフィルタ(40Hz)を再生信号にかけている。

脳波計測は脳機能研究所製感性スペクトル解析システム ESA-16 を使用し、装着電極は国際 10-20 法による、12 電極、右耳基準単極誘導で行った。

この研究に用いた脳波評価方法は次の3種類である。

- (1) 感性スペクトル
- (2) α 波%解析

* 栃木研究所

** (株)エヌエフ回路設計ブロック

(3) β 波 PCA(主成分分析)

これら脳波評価方法はあまり一般的でない技術であるので以下にその概要を述べる^{(5), (6)}。

2.1. 感性スペクトル解析概要

脳活動によって生じた感情は、多種類に細分化できるという研究もあるが、ここでは4種類の感性要素である喜怒哀楽によって表現する。この4種類の感性要素それぞれが発現した際の頭皮電位を Fig. 1 に示す。

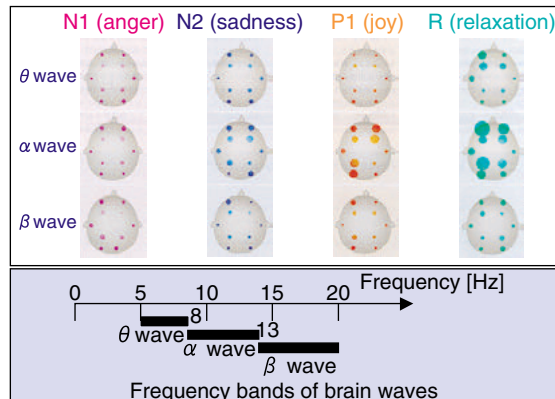


Fig. 1 Contribution of brain wave data for each emotion factor

さて、頭皮電位レベルの個人差の影響を除き電極間の位相関係、位置関係の情報を時系列で記録する手段として各電極間の電位の相互相関係数を用い、これらの相関係数を入力し4種類の感性要素を得る方法が感性スペクトル解析である。その概要を Fig. 2 に示す。電極数は10コであり、この中から2コを選び出す組み合わせは $10C_2=45$ 通りであり、また脳波計測バンドは、 θ 波・ α 波と β 波の3バンドであるので、入力する電極間電位相互相関係数は要素数 $45 \times 3=135$ のベクトルである。これに感性マトリックスと呼ぶ 4×135 の係数マトリックスを掛けることにより4種類の感性要素ベクトルが得られる。この時間的な変化を数値表現する方法が感性スペクトル解析である。ここで感性マトリックスは別途統計的手段によってあらかじめ

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= C_{1,1}Y_1 + C_{1,2}Y_2 + \dots + C_{1,135}Y_{135} + D_1 \\
 Z_2 &= C_{2,1}Y_1 + C_{2,2}Y_2 + \dots + C_{2,135}Y_{135} + D_2 \\
 Z_3 &= C_{3,1}Y_1 + C_{3,2}Y_2 + \dots + C_{3,135}Y_{135} + D_3 \\
 Z_4 &= C_{4,1}Y_1 + C_{4,2}Y_2 + \dots + C_{4,135}Y_{135} + D_4 \\
 Z &= C * Y + D
 \end{aligned}$$

$Y_1 \sim Y_{135}$: cross-correlation coefficients between potentials of two electrodes
 Z_1 : anger Z_2 : sadness Z_3 : joy Z_4 : relaxation
 parameters indicating emotional levels (Z: emotion vector)
 $C_{1,1} \sim C_{4,135}$: coefficients (C: emotion matrix)
 $D_1 \sim D_4$: constants (D: constant matrix)

Fig. 2 Calculation method to derive emotion factors from brain wave data

め作成しておく。

得られた感性要素喜怒哀楽は、言葉から連想する感情を表すが、それ以外の感性も表現している。

- (1) N1(怒り/ストレス): 被験者が怒っている時には高い値を示すが、ストレスが蓄積されたり精神的にたかぶっている時にも高い数値を示す。
- (2) N2(悲しみ/落ち込み): 被験者が悲しんでいた、気分が落ち込んでいることを示す。
- (3) P1(喜び/達成感): 被験者が喜びを感じていたり、何かをやり遂げた時などポジティブな状態を表す。
- (4) R(リラックス): 被験者がぐっすり弛緩している状態を表す。

2.2. α 波%解析概要

脳波中の α 波帯域のパワー百分率で非覚醒度を表す。この値が高い時は脳活動の活性の低下や覚醒度の低下が考えられる。

$$\alpha \text{ 波 \% パワー} = W_{\alpha} / (W_{\theta} + W_{\alpha} + W_{\beta})$$

W_{α} , W_{β} , W_{θ} : それぞれの帯域のパワー

2.3. β 波 PCA(主成分分析) 概要

主成分分析を高度な精神活動が行われているとされている前頭部の4点の β 波バンドに対して適用し、その第1主成分の寄与率を算出したもので、この値が高い時は前頭葉付近の脳細胞が同調的に働いていると推定できることから、この寄与率は精神活動の集中/散漫を表す。

3. 予備実験

最初に確認すべきことは音刺激によって脳波に変化が励起できるか否かである。そこで、被験者にサンプル音をヘッドホンにより提示しながら脳波を計測した。また、被験者毎の感性を検討する必要から同一のサンプル音に対しSD法による官能検査も実施した。

3.1. 脳波試験

サンプル音としては粗面路走行時のロードノイズを3種類(a, b, cとする)用意し、それらを用いて5分間の連続音、30秒間の断続音サンプルを作成した。被験者は男性4名(S1, S2, S3, S4とする)である。

連続音についての被験者 S2 の脳波測定結果を Fig. 3 に示す。各感性要素、 α 波%パワーやPCAについて音提示と開眼・閉眼に対して値が変化していることがわかる。リラックスについては、試験開始前と休憩中や試験終了後に明確に増加しており、試験していない時に被験者がぐっすり弛緩している状態にあることが読み取れる。

しかしながら、この図からは、提示したサンプル音による各指示値の違いを直接読み取ることは困難である。そこ

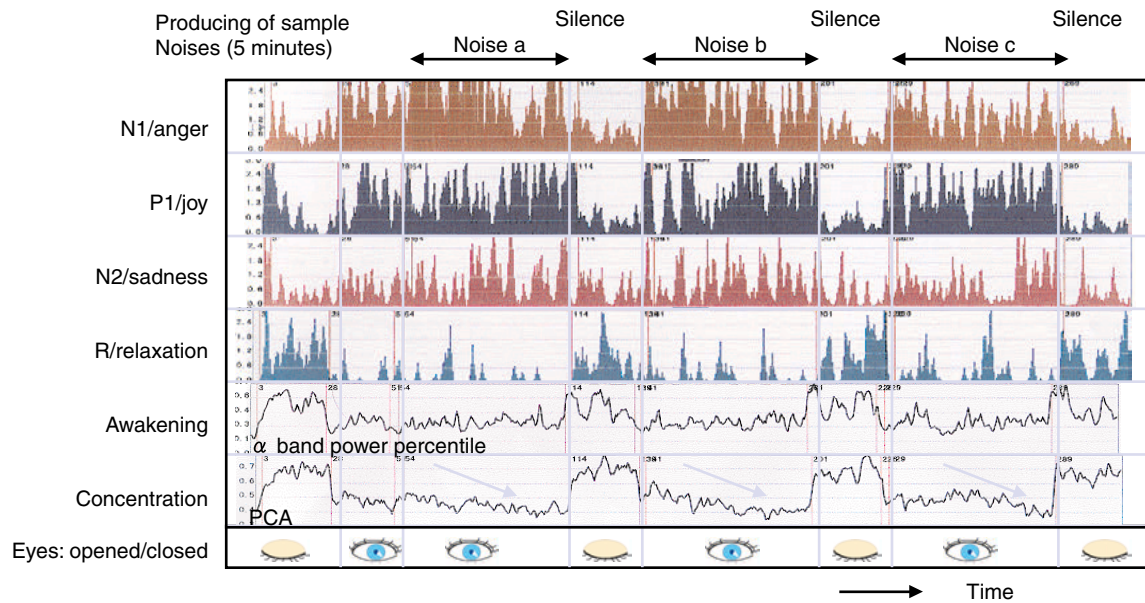


Fig. 3 Variations of emotion spectra for continuing noises

Table 1 Average emotion spectra during one term for each subject

Color of number shows consistency of order between states of eyes opened or closed;

Agree perfectly, Agree partly, Disagree

	Ranking of average emotion spectra							Ranking of average emotion spectra					
Sub.S1	Eyes opened			Eyes closed			Sub.S3	Eyes opened			Eyes closed		
	a	b	c	a	b	c		a	b	c	a	b	c
N1/anger	2	1	3	1	2	3	N1/anger	2	3	1	1	3	2
P1/joy	1	3	2	1	3	2	P1/joy	3	1	2	3	1	2
N2/sad	1	2	3	2	3	1	N2/sad	3	1	2	3	2	1
R/relax	3	2	1	2	1	3	R/relax	1	3	2	1	3	2
Sub.S2	Eyes opened			Eyes closed			Sub.S4	Eyes opened			Eyes closed		
	a	b	c	a	b	c		a	b	c	a	b	c
N1/anger	3	2	1	3	1	2	N1/anger	3	1	2	1	3	2
P1/joy	1	2	3	1	3	2	P1/joy	2	1	3	2	1	3
N2/sad	2	1	3	3	1	2	N2/sad	2	3	1	2	3	1
R/relax	2	1	3	1	3	2	R/relax	1	2	3	3	1	2

で Table 1 に示すように各サンプル音が提示されている間の平均をとり、その順位を比較した。

この表において各サンプル音の順位が閉眼時と開眼時において同一である場合を赤で示した。この結果をみると開眼時と閉眼時において、同一個人でも順位に違いがみられる。その中で喜びについては4人中3名(S1, S3, S4)が各々の閉眼時と開眼時の3音に対する順位が一致したが、被験者毎にその順位は異なっており個人間のばらつきが大きく、共通の傾向が見つけにくい。音に対する個々人の評価軸が異なっている可能性があり官能検査結果と対照検討の必要性がある。α波%(非覚醒度)については Table 2 に示すようにc音が覚醒を低下させることがわかる。PCAについてはサンプル音間の変化が少ないため音刺激に対する評価には不適切であると判定した。

Table 2 Result of α band power percentile

Color of number shows consistency of order between states of eyes opened or closed;

Agree perfectly, Agree partly, Disagree						
Ranking of average value						
	Eyes opened			Eyes closed		
	a	b	c	a	b	c
Sub.S1	2	3	1	2	1	3
Sub.S2	1	3	2	3	2	1
Sub.S3	3	2	1	1	2	3
Sub.S4	3	2	1	1	2	3

3.2. 官能検査

脳波試験と同様の手順で同じ4人の被験者に対し官能検査を実施し、各被験者が3種類のサンプル音をどのように評価しているかを調査した。Table 2 に示すように15種類の音色評価尺度について7段階のSD法を用いて主成分分析を行った。その結果従来からの3種類の主成分を抽出したが、第1第2主成分にて80%の累積寄与率があるのでこ

Table 3 Condition of sensory evaluation

Sample noise	Subject	Adjective				
1 Continuing noise a	1 S1	1 fresh	6 stagnant	11 powerful		
2 Continuing noise b	2 S2	2 high-pitched	7 rough	12 rich		
3 Continuing noise c	3 S3	3 unpleasant	8 offensive	13 dry		
4 Alternate noise a&b	4 S4	4 annoying	9 bright	14 smooth		
5 Alternate noise a&c		5 alive	10 loud	15 booming		
6 Alternate noise b&c						
Grade for estimation						
1	2	3	4	5	6	7
agree			neutral			disagree

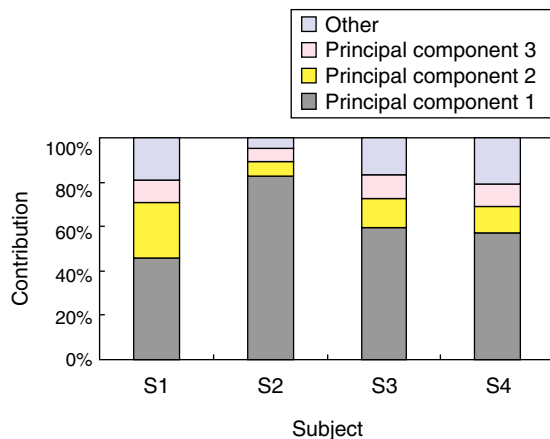


Fig. 4 Component contribution of each subject

の4人の被験者については第1第2主成分のみでロードノイズに対する音色構造が説明できる。(Fig. 4 参照)

第1主成分は

- ・正の方向に肯定的音色評価尺度
- ・負の方向に否定的音色評価尺度

となり因子負荷量の大きい尺度が「さわやかな」、「滑らかな」であり、快／不快を表わす「美的清澄感」と考えられる。(Fig. 5 参照)

第2主成分は音の「こもり感」を表す。

ここで4人の被験者の各サンプル音得点を2つの主成分で図示すると Fig. 6 のようになる。4人がサンプル音に対

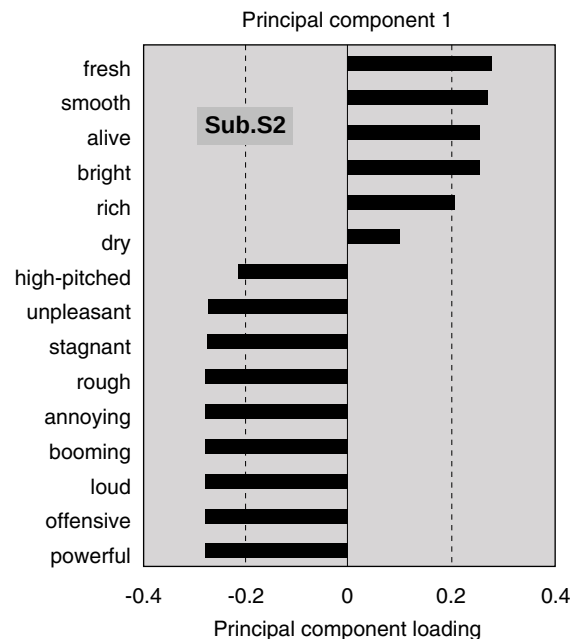


Fig. 5 Principal component loading for principal component 1 (subject S2)

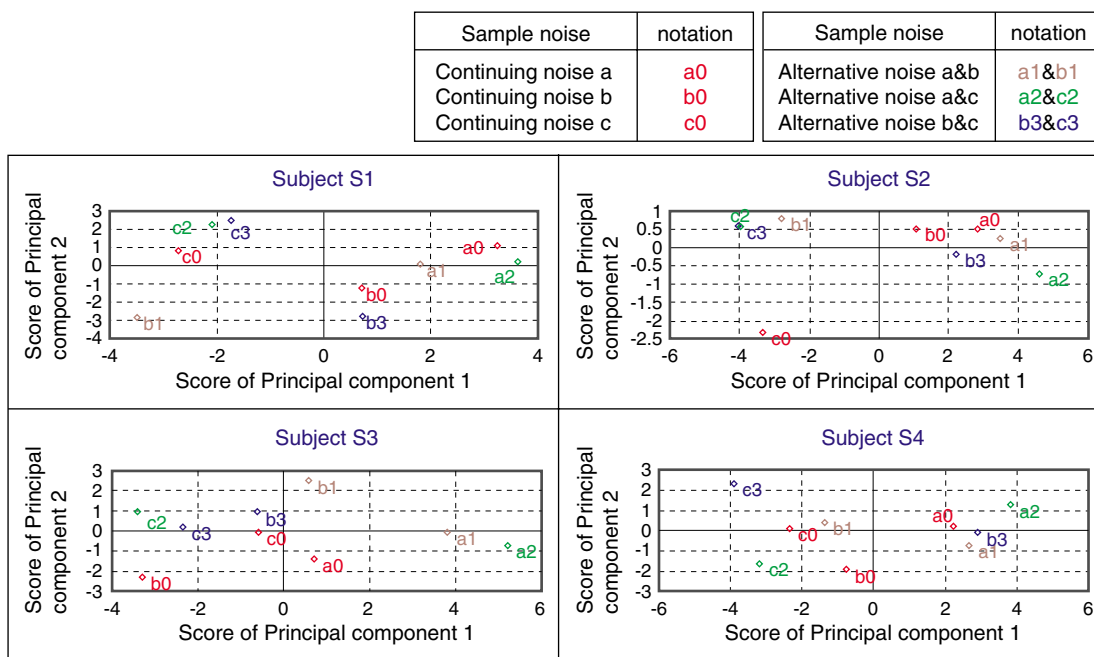


Fig. 6 Principal component score for each sample noise; horizontal: principal component 1, vertical: principal component 2

して共通の順序となったのは第1主成分「美的清澄感」で表現した断続音aとb(a1とb1), aとc(a2とc2)そしてbとc(b3とc3)の相対的位置付けのみである。従って, 生体反応検査と対比させるのは断続音での第1主成分テスト結果が適切と考えられる。

3.3. 脳波計測データと官能検査結果の対比

この研究の目的は心地よいロードノイズを見出すことであるので, 第1主成分に焦点を絞り第1主成分でロードノイズに対する感じ方の80%が決まる被験者S2の脳波計測データと官能検査結果を比較した。その結果をFig. 7に示す。

断続音に対する官能検査結果と感性スペクトル測定結果については第1主成分単独で80%を判断している被験者S

2については快を表わす感性ベクトル(喜び/P1, リラックス/R)から不快を表わす(怒り/N1, 悲しみ/N2)をひいて合成した快適性を表わす感性ベクトル($[P1+R] - [N1+N2]$)と相関が得られた。

この予備実験で得られた結果の位置付けは, ロードノイズ曝露に対して脳波測定結果に有為な差が生じており, 音の刺激に対して脳波計測により人の感性状態の識別ができる可能性があるということである。

また, 快・不快感についてより詳細に解析する必要があったので, 快—不快面を強調, 抽出するため「元気の出る」, 「楽しい」, 「憂鬱な」, 「落ち着ける」の4語を追加し, 官能検査のみ別途実施した。いずれも感情面を強調する語である。

Fig. 8の因子分析の結果から快・不快感には「明るい」, 「楽

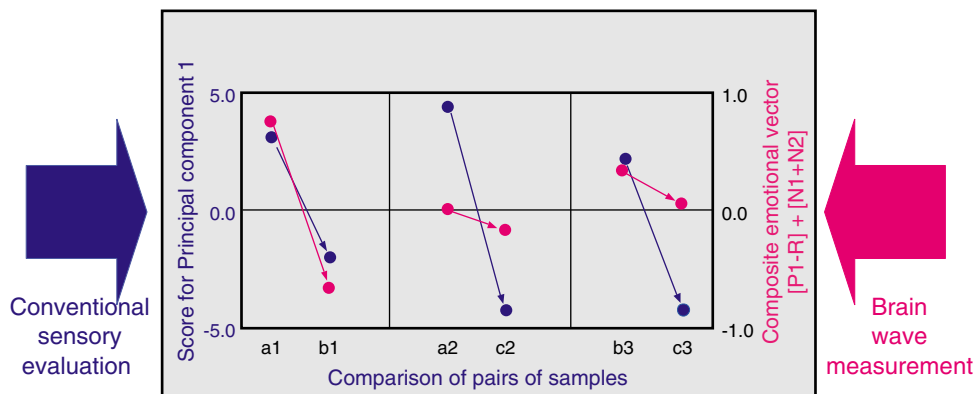


Fig. 7 Comparison between conventional results and results from brain wave measurement

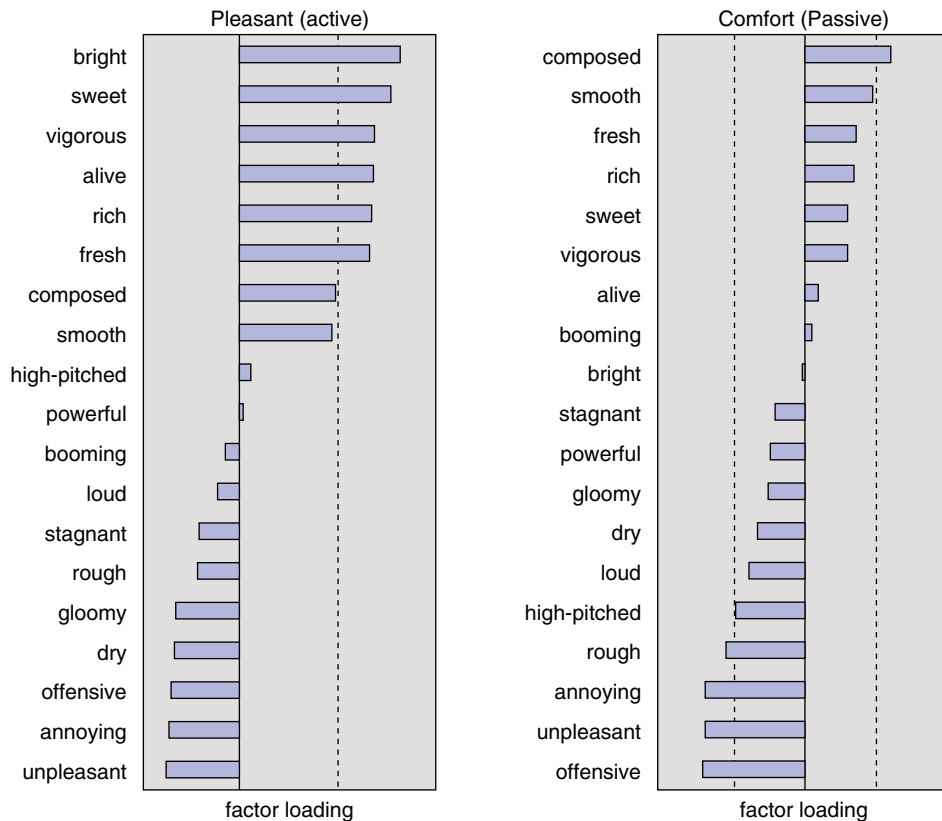


Fig. 8 Differences between active pleasant and passive comfort

しい」の因子負荷量が高い積極快と「落ち着ける」、「滑らかな」の因子負荷量が高い消極快の2種類があることが判った。

①積極快(活性化の快で、興奮し元気づくような快)

②消極快(沈静化の快で、弛緩して心地よくなるような快)

ロードノイズにとり重要であるのは消極快と考えられるので本試験では消極快を中心に解析した。

4. 本試験

4.1. 方法

消極快を脳波測定で把握するため、予備試験の結果をもとに本試験を実施した。被験者総数は21名(平均年齢23.6歳)とした。脳波計測方法は予備試験の際と変更はないが、解析方法は感性スペクトルに加えて、その合成量を求めた。また、サンプル音にロードノイズでない典型的な心地よい音と不快な音を追加した。

さて、サンプル音は全てバイノーラル録音してヘッドホンで提示した。その内訳は

(1)ロードノイズサンプル：市販車10車種の粗面路走行時の助手席音

(2)不快基準音：極粗面路を走行した助手席音、日光湯滝の轟音、すりガラスを引っかいたキーキー音

(3)快基準音：霧降高原の林を吹き抜けて行くそよ風の音、小川のせせらぎ、湯滝の音圧を下げた音および更にゆったりとしたAM変調をかけた音

(4)各ステージ基準音：ピンクノイズ

合計18種類である。(Table 4 参照)

サンプル音の提示については、ピンクノイズによる安定化(10秒間)、サンプル音提示(45秒間)、無音(10秒間)とし、サンプル音提示順序は順序による影響がなくなるようランダムとした。

Table 4 Sample noises

No.	group	content
1	Road noise	A Medium
2		B Medium
3		C Compact
4		D Compact
5		E Medium
6		F Entry
7		G Compact
8		H Entry
9		I Executive
10		J Executive
11	Criteria noise	K Rough road
12		Waterfall
13		Waterfall AM
14		A gentle breeze in wood
15		Stream
16		Scratch of a nail on frosted glass
17		Pink noise

感性スペクトル合成量は以下の4種類である。

(1)N1+P1：精神的活性の上昇と気分の上昇合成したもので、爽快感と解釈する。

(2)N2+R：精神的活性の下降と気分の下降を合成したもので、憂鬱感と解釈する。

(3)N1+N2：精神的活性の上昇と気分の下降を合成したもので、イライラ感と解釈する。

(4)P1+R：精神的活性の下降と気分の上昇を合成したもので、心地よさ感と解釈する。

脳波測定終了後に、同一のサンプル音に対する官能検査を実施した。16種類の音色因子を用いた7段階SD法により消極快を評価した。

解析の流れはFig. 9に示すように脳波測定結果、官能検査個々の妥当性を検証した後、両者の比較を行った。

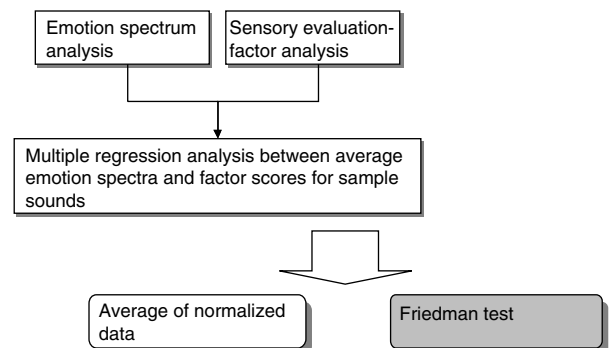


Fig. 9 Analysis flow

4.2. 感性スペクトル解析結果

サンプル音の提示に対して脳波計測から算出した感性スペクトルとその合成量を被験者全員について統計的に検証した結果をTable 5に示す。検証は18種類のサンプル音に対する21名の順位付けが有意であるかをフリードマンの検定を用いて判定し、1%有意である項目を**で示した。N1怒り等一部を除き、サンプル音に対して感性ベクトルが有意に反応していることがわかる。各サンプル音に対するRリラックスの結果をFig. 10に示す。

Table 5 Significant difference of emotion spectra for sample noises **expresses 1% reliable

Emotion spectrum	Significant difference
N1 Anger	—
P1 Joy	**
N2 Sadness	**
R Relaxation	**
α band power percentile	**
PCA Awakening	**
N1+P1	—
N2+R	—
N1+N2	**
P1+R	**

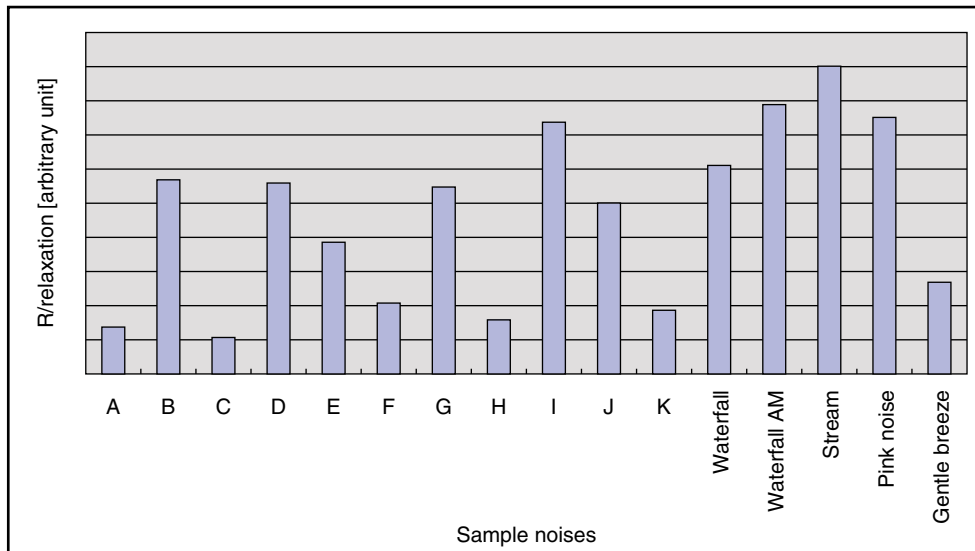


Fig. 10 Emotion spectra of sample noises

4.3. 因子分析結果

脳波計測後に同一のサンプル音を用いて、16種類の表現による7段階SD法の官能検査を実施した。その結果を因子分析にかけTable 6に示すよう、3因子、快—不快、濁—清、静—騒を得た。

この内、快—不快は予備試験においてロードノイズの評価に有用とされた、消極快(心地よくなる快)—積極不快(イライラする不快)を表現したものである。またこの因子分析

において、快—不快因子(以下消極快因子)は全体に占める寄与率が42.6%と高く、本官能検査によって消極快成分は信頼性が高く、かつ鮮明に表現されたと考えられる。各サンプル音の消極快因子得点をFig. 11に示す。

4.4. 感性スペクトルと消極快因子の対比

サンプル音に対し脳波計測から得た感性スペクトルは有意に反応した。また、同じサンプル音に対しての第1因子は消極快因子である。そこで、ロードノイズに対する快・不快感を脳波計測結果でどう表現できるか、各サンプル音に対する消極快因子得点を目的変数としそのサンプル音に対する感性スペクトル $N1 \cdot P1 \cdot N2 \cdot R$ を説明変数として重回帰分析を個々の被験者に対し実施した。但し、重回帰式の感性スペクトルの係数は個人毎にかなり異なり、被験者全体での相関係数は0.2程度と低く統一的な係数を定めることは困難である。そこで、個人毎に算出した重回帰得点を被験

Table 6 Results of factor analysis

No.	Name	Factor contribution rate (%)	Factor cumulative contribution rate (%)
1	Comfort	42.6	42.6
2	Roughness	13.4	56.0
3	Silence	10.9	66.9

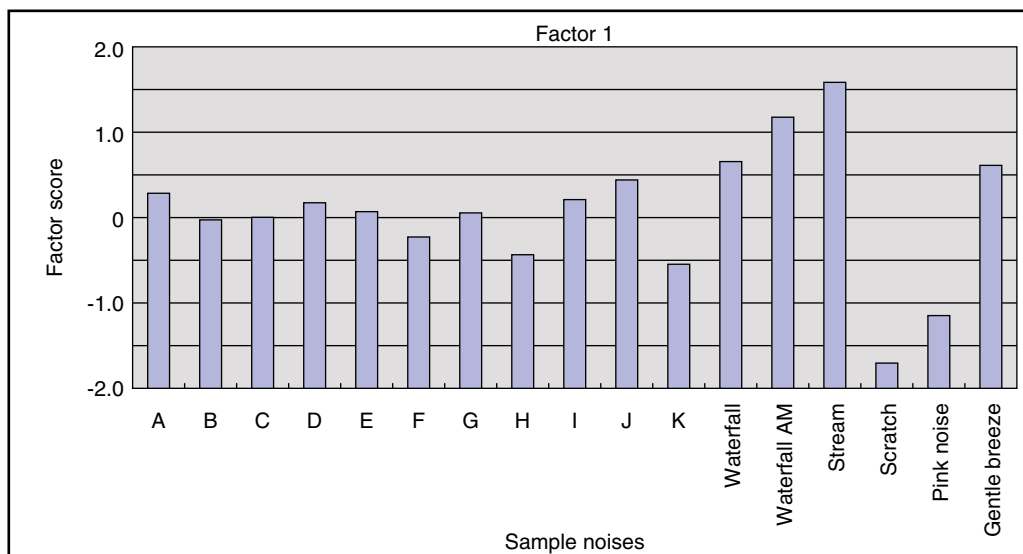


Fig. 11 Factor score of sample noises

者全員で平均化することで脳波計測の結果を反映することにした。この感性スペクトル一次結合による重回帰式で算出した消極快得点の被験者全員平均は、各サンプル音提示に対して有意であることがフリードマン検定で明らかになった。(Table 7参照)即ちロードノイズを含む音に対する消極快を生体反応である脳波計測結果を用いて表現できることが確認できた。但し、喜怒哀楽全ての感性スペクトルを用いているので、回帰式そのものの解釈は個人差も相まって困難であった。

Table 7 Significant difference of multi-regression correlation scores **expresses 1% reliable

Factor	Significant difference
Comfort (Factor 1)	**
Roughness (Factor 2)	**
Silence (Factor 3)	**

5. 客観量との対比

各サンプル音に対する生体反応(脳波計測結果)を反映した重回帰得点(4.4. 参照)を物理量や心理音響尺度の客観量の一次多項式で表現した。回帰式を得る際に以下の条件を課した。

1. 符号逆転, 多重共線にならない。
2. 重相関係数は 0.9 以上とする。
3. 回帰変動の分散分析において, P 値 0.05 以下において有意であること。
4. 偏回帰係数有意差判定については, 有意差確率 0.05 以下であることは問わない。

得られた回帰式は

$$\text{消極快・不快} = -A * \text{Loudness} + B * \text{Kurtosis} + C * \text{Tonality} + D$$

A, B, C : 偏回帰係数 D : 定数 重相関係数 0.901

となり、消極快の回帰式と因子得点は高い相関を持つ。(Fig. 12 参照)また回帰式によれば、今回使用したサンプル音の範囲においては音量が小さく、振幅変化が少なく、そして若干の目立つ周波数成分があると快い音ということができる。

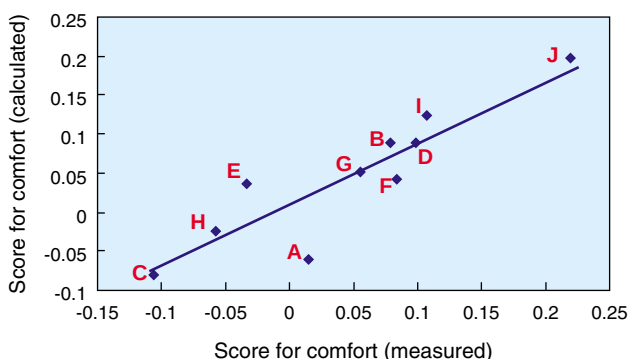


Fig. 12 Comparison of measured and calculated comfort scores

6. まとめ

この研究により、生体反応(脳波)計測による音の主観評価に関して以下の成果を得た。

- (1) ロードノイズを含むサンプル音提示に対して、有意な脳波計測結果を得ることができた。
- (2) 従来手法によるロードノイズの快・不快感を表現する消極快を、脳波計測による感性ベクトルで表現可能となったことがわかった。
- (3) 被験者一人一人の消極快を感性ベクトルで算出した重回帰得点を客観量で表現した回帰式を得ることができた。加えて課題として
- (4) 消極快の感性ベクトルによる回帰式は個人ごとに異なるため必ずしも万人に適用可能とは言い難いことも判明した。

なお、脳波計測とその解析については(株)脳機能研究所の協力をいただいた。

参考文献

- (1) 山下剛, 石井康夫, 中村光勇, 北村音一: 車内騒音フィーリングの評価に関する一考察, 日本ゴム協会誌 63, p.122-130 (1990)
- (2) 村田秀樹, 大佐々吉宏: 定常走行時車室内音の音質評価について, 自動車技術会 前刷集 942 No.95, p.145-148(1994)
- (3) 水野康文, 杉崎昌盛: 心電図 RR 間隔による運転疲労評価法の研究, 自動車技術会 前刷集No.951, p.165-168 (1995)
- (4) 広沢義久, 北川淳, 丸山剛生, 中原凱文: アイドル騒音の暴露が生体情報に及ぼす影響, 自動車技術会 前刷集 No.983, p.197-200 (1998)
- (5) 武者利光: 「こころ」を測る, 日経サイエンス, 4月号, vol.26 No.4, p.26-29 (1996)
- (6) Musha, T., Terasaki, Y., Haque, H., Ivanitsky, G.: Feature extraction from EEGs associated with emotions, Artif Life Robotics, vol.1, p.15-19 (1997)

■ 著 者 ■



石井 康夫



山下 剛



荒賀 裕