原著論文

音声信号のゆらぎ値算出随伴量と感性的印象との関係に関する試験的調査

川上 裕介*, 服部 哲郎*, 山松 達矢*, 泉 哲也**, 川野 弘道***

* 香川大学大学院工学研究科, ** 株式会社マイクロ・テクニカ, *** NTTアドバンステクノロジー株式会社

Experimental Investigation of the Relation between Feeling Impression and Quantities Accompanying Fluctuation Calculation in Sound Signal

Yusuke KAWAKAMI*, Tetsuo HATTORI*, Tatsuya YAMAMATSU*, Tetsuya IZUMI**
and Hiromichi KAWANO***

* Graduate School of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Hayashi, Takamatsu City, Kagawa 761-0396, Japan

** MICRO TECHNICA CO. LTD., Yamagami BLD. 3-12-2 Higashi-ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 170-0013, Japan

*** NTT Advanced Technology Corporation, Shinjuku Mitsui BLD. 2-1-1 Nishi-shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-0431, Japan

Abstract : This paper describes an experimental investigation result as to how the audio signal (i.e., sound and music) gives feeling impression to us and how the impression changes, depending on the distribution of power spectrum in Fourier domain of the audio input signal. In this investigation, we use three kinds of parameters accompanying the calculation of the signals' fluctuation degree. Then we examine the relationship between the parameters and affective impression, by using questionnaire survey. And also, from the viewpoint of feeling impression, we classify the sound signal by the values of three kinds of parameters. In this paper, we present the experimental results and show that the fluctuation degree and residuals are highly related to good impression

Keywords : Sound processing, fluctuation value, sum of squared errors, regression analysis, feeling impression

1. はじめに

近年、様々な領域の信号に対して、人間が心理的安らぎを覚える「癒し効果」を有するものとして、信号のエネルギースペクトルが周波数 f に対して $1/f$ の関係となるような、 $1/f$ 揺らぎが提唱され研究されて来ている [1-7].

しかしながら、従来の音声信号の $1/f$ 揺らぎに関する研究では [8, 9], ゆらぎ値のみに着目した解析・評価であり、同じ $1/f$ 揺らぎを有しながらもパワースペクトル分布が異なる場合の解析・評価までには至っていない. この場合、ゆらぎ値以外の要素も感性的印象に強く影響しているのではなかろうか、という疑問が生じる [10-12].

そこで筆者らは、文献 [13] において、音声信号のゆらぎ値算出随伴量 (ゆらぎ値, 切片, 残差二乗和) と感性的印象との対応関係を調査した. この調査で用いた楽曲のビット数は8bitであり、被験者は10名であった.

本論文では、より詳細な調査とするため、調査で用いる楽曲のビット数は16bitとし、被験者数を増加して、文献 [13] の10名とは全く別人の22名で質問紙調査を行う. また、楽曲の総合評価に基づくクラスター分析を行い、総合評価の高い楽曲の随伴量の傾向を探る. 更に、調査結果については有意差検定を実施するとともに、総合評価と随伴量との関係を重回帰式により分析する.

2. ゆらぎ値算出随伴量

2.1 ゆらぎ

ゆらぎの内、よく知られた $1/f$ 揺らぎとは、パワースペクトル (以下 PS と略記) 分布が周波数と逆比例関係にあり、周波数 f が高くなるにつれて PS が $1/f$ の割合で小さくなることを意味する. また、人間が心地よいと感じる効果の有ることが指摘されている [1-6]. その理由としては、人間の生体リズムが $1/f$ 揺らぎを持つが故に、ある事象に $1/f$ 揺らぎが含まれていれば、人間はリズムの合致を感じ、その事象に快感を覚えるためとされている. また、自然界現象の大半が $1/f$ 揺らぎ傾向を示すため、とも指摘されている.

ここで、横軸に周波数 f の対数を取り、縦軸に PS の対数で音声信号のグラフを示したとき、 $1/f$ 揺らぎは、 PS の回帰直線の傾斜 $-a$ の絶対値 a が1となることを意味する. 本論文では、この傾斜の絶対値 a をゆらぎ値と定義する (図1).

図1 回帰直線の例

2.2 3種の随伴量

実験をする上で重要となるゆらぎ値、切片、残差（または残差二乗和）の、3種の随伴量（以下、随伴パラメータとも言う）について説明する。PS分布と周波数の回帰直線を求めたときに得られる回帰直線のゆらぎ値（傾き）、回帰直線の切片（以下切片と略記）、回帰直線とPS分布との残差（または、残差二乗和）を3種のパラメータとする。ここで、残差二乗和を定義しているのは、仮にゆらぎ値と切片が等しい場合でも、近似直線との残差の値によって、感性的印象の違いを評価できる可能性が考えられるためである。

なお、残差二乗和 s は以下の式に従うものとする。但し、 y は目的変数、 Y は回帰推定値であり、回帰直線との残差を e_i とおく。

$$s = \sum_i (y_i - Y_i)^2 = \sum_i e_i^2 \tag{1}$$

また、残差のスケールリングを変化させて、切片と残差二乗和を変更する。ここで、スケールリング設定値を A, B とすると、スケールリング後の残差 e_i' は以下の式で求められる。

$$e_i' = Ae_i + B \tag{2}$$

従って、 A は残差の回帰直線に対する振幅を変更することとなり、 B は回帰直線の切片を変更することになる（なお、本実験結果を記した図中では、残差のスケールリング値を『 $A+B$ 』の形式で表記している）。

図2は、図1の回帰直線に対して、3種の随伴パラメータ値を変化させたときのパワースペクトラムの例を示す。

2.3 3種の随伴量の相関関係

表1に示す楽曲に対して、ゆらぎ値、切片、残差二乗和を求め、相関関係が存在するか調査した。ゆらぎ値と切片の関

図2 随伴パラメータ値変更によるPSの変化
(a) 変更前、(b) ゆらぎ値を変更、
(c) 切片を変更、(d) 残差二乗和を変更

係を示した散布図（図3(a)）より、ゆらぎ値が小さい楽曲は切片が低くなり、ゆらぎ値が大きい楽曲は切片が高くなっていることが分かる。このとき、相関係数は0.991と強い相関を示したことから、ゆらぎ値と切片は相関関係が存在すると考えられる。

切片と残差二乗和の関係を示した散布図（図3(b)）より、切片が小さい楽曲ほど残差二乗和が小さく、切片が大きい楽曲ほど残差二乗和が大きくなる傾向が見受けられる。このとき、相関係数は0.852と強い相関を示したことから、切片と残差二乗和は相関関係が存在すると考えられる。

ゆらぎ値と残差二乗和の関係を示した散布図（図3(c)）より、残差二乗和が同等の値を示している部分に注目すると、残差二乗和が同等にもかかわらず、ゆらぎ値が大きく異なっている楽曲が見受けられる。このときの相関係数は、0.786とやや強い相関を示したが、他のパラメータ相関関係よりは弱い結果となった。

表1 Waveファイルの一覧

番号	ファイル名	ジャンル
1	Another_Sky.wav	イージーリスニング
2	ロンドンデリーエア.wav	クラシック
3	君を信じて.wav	イージーリスニング
4	漂流.wav	イージーリスニング
5	Down_by_the_Riverside.wav	ジャズ
6	Space_Odessey3_Revelation.wav	イージーリスニング
7	TOMORROW.wav	ポップ
8	古いフランスの歌.wav	クラシック
9	自由.wav	ポップ
10	赤い川の谷間(brass).wav	ジャズ

図3 随伴パラメータ値の相関関係
(a) ゆらぎ値と切片、(b) 切片と残差二乗和、
(c) ゆらぎ値と残差二乗和

2.4 3種の随伴量の変更に伴う音声の変化

本節では3種の随伴量の変更に伴う、音声の変化をみる。
なお、調査に使用した楽曲は表1のAnother_Skyを用いた。
変換にはC言語（Borland C++ Compiler 5.5）のプログラムを用いた。 PS が 10^{-6} 以下である場合は0とみなしている。

Waveファイルに収録されている全周波数に対して、ゆらぎ値を1, 2, 2.7, さらに $\pm 10\%$ に変化させた結果を図4(a)～(c)に示す。切片の加算値を -0.8 から 0.8 まで、 0.4 刻みに変化させた結果を図5(a)～(b)に示す。残差の倍率を 0.4 倍～ 1.2 倍まで、 0.4 刻みの割合で変化させた結果を図6(a)～(c)に示す。切片の加算値を 0.4 に固定し、残差の倍率を 0.4 倍～ 1.2 倍まで、 0.4 刻みの割合で変化させた結果を図7(a)～(c)に示す。表2(a)～(d)に3種の随伴量の実測値を示す。

図4(a)～(c)より、ゆらぎ値が2.7に近づくにつれて、高周波成分の振幅の減衰が目立つことが分かる。これは原曲に比べて音量が低下していると考えられる。また、図4(d)より、ゆらぎ値を -10% 変化させた場合、原曲より、高周波成分が強調されていることが分かる。また、ゆらぎ値を $+10\%$ 変化させた場合においては、高周波成分がやや減衰していることが分かる。

表2 3種の随伴量の実測値

(a) ゆらぎ値の変更

Fluctuation

Title	Fluctuation setting	Fluctuation	Intercept	Residual
Another_Sky	Default	1.715343	7.704218	0.414398
	1	0.911212	6.967405	0.365765
	2	1.999770	7.702754	0.414189
	3	2.697053	6.374770	0.499135
	-10%	1.544157	7.705685	0.414481
	10%	1.886735	7.703315	0.414256

(b) 切片の変更

Intercept

Title	Intercept setting	Fluctuation	Intercept	Residual
Another_Sky	Default	1.715343	7.704218	0.414398
	-0.8	1.715196	6.903263	0.414285
	-0.4	1.715244	7.303572	0.414344
	0.4	1.717224	8.112298	0.415144
	0.8	1.719176	8.521416	0.415909

(c) 残差の変更

Residual

Title	Residual setting	Fluctuation	Intercept	Residual
Another_Sky	Default	1.715343	7.704218	0.414398
	$\times 0.4$	1.715957	7.706840	0.165808
	$\times 0.8$	1.720204	7.725080	0.333094
	$\times 1.2$	1.722168	7.734208	0.498860

(d) 残差と切片の変更

Residual and Intercept(+0.4)

Title	Residual setting	Fluctuation	Intercept	Residual
Another_Sky	Default	1.715343	7.704218	0.414398
	$\times 0.4$	1.718413	8.118504	0.166606
	$\times 0.8$	1.722001	8.134343	0.333833
	$\times 1.2$	1.724319	8.141005	0.496900

(a) ゆらぎ値1 (実測値：表2(a))

(b) ゆらぎ値2 (実測値：表2(a))

(c) ゆらぎ値2.7 (実測値：表2(a))

(d) ゆらぎ値-10%, +10% (実測値：表2(a))

図4 ゆらぎ値の変更

図5より、切片の加算値を変化させた場合においては、原曲に比べて図5(a)は、全周波数成分が減衰し、図5(b)においては、全周波数成分が増加していることが分かる。従って、切片の値は原曲の収録ボリュームと対応している。

図6(a)～(c)より、残差を変化させた場合においては、残差に乗算する値を増加させるほど残差が拡大していることが分かる。

図7(a)～(c)は、切片の加算値を0.4に固定し、残差に乗算する値を変化させた場合の結果である。図6(a)～(c)と図7(a)～(c)を比較すると、高周波成分の振幅の小さい部分が増幅され、低周波も若干ながら増幅・減衰していることが分かる。

以上の結果から、音声信号において『ゆらぎ値』の変更は低周波成分に比べて、高周波数成分を多く増減させることが可能と考えられる。このとき、ゆらぎ値の変更値が大きすぎると、原曲の感性的印象とは大きく異なってしまうと推定される。そこで、原曲のゆらぎ値を考慮して $\pm 10\%$ 程度に変更するのが望ましいと考えられる。『切片』の変更は、原曲の収録ボリュームを変更することである。また、『残差二乗和』は、近似直線への当てはまりを示す値である。

残差を変更した楽曲を聞いたところ、高周波成分が強調されている印象を受けた。この傾向は表1に示す全ての楽曲で同様であった。

3. 質問紙調査

3.1 調査概要

3種の随伴パラメータと楽曲の感性的印象の関係性を探るために、質問紙調査を行った。被験者は20代前半の学生22名である。質問紙調査は2種類行った。調査1は、楽曲の感性的印象を問う質問である。調査2は各楽曲のゆらぎ値、切片、残差二乗和を変化させたときの感性的印象を問う質問である。質問紙調査で使用した楽曲は表1に示したものである。

(a) 残差0.4倍 (実測値：表2(c))

(a) 切片値-0.8, -0.4 (実測値：表2(b))

(b) 残差0.8倍 (実測値：表2(c))

(b) 切片値+0.8, +0.4 (実測値：表2(b))

図5 切片の変更

(c) 残差1.2倍 (実測値：表2(c))

図6 残差の変更

3.2 Ward法

本調査では、評価の高い楽曲が多く分布する領域を探るために、Ward法を用いたクラスター分析を行った。Ward法は、新たに統合されるクラスター内の平方和を最も小さくするという基準でクラスターを形成していく方法である。この手法は鎖効果（ある1つのクラスターに対象が順に1ずつ吸収されてクラスターが形成されていく現象）が起きにくいのが特徴である [14]。Ward法は次のように定義される。

(a) 残差0.4倍と切片値+0.4（実測値：表2(d)）

(b) 残差0.8倍と切片値+0.4（実測値：表2(d)）

(c) 残差1.2倍と切片値+0.4（実測値：表2(d)）

図7 残差と切片の変更

データが p 変量 $x_1, x_2, \dots, x_p$ に関して観測され、クラスター C_i に含まれる n_i 個のデータは以下のように表わされる。

$$x_r^{(i)} = (x_{r1}^{(i)}, x_{r2}^{(i)}, \dots, x_{rp}^{(i)}) \quad r = 1, 2, \dots, n_i \quad (3)$$

このとき、 C_i 内での平均（ベクトル）は

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{r=1}^{n_i} x_r^{(i)} \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

であり、 C_i 内の平均のまわりの偏差平方和は、

$$E_i = \sum_{r=1}^{n_i} \sum_{l=1}^p (x_{rl}^{(i)} - \bar{x}_{il})^2 \quad (5)$$

となる。クラスター C_i とクラスター C_j が融合されたときの偏差平方和の増分は次式のようにになる。

$$\Delta E_{ij} = \frac{n_i n_j}{n_i + n_j} \sum_{l=1}^p (x_l^{(i)} - \bar{x}_l^{(j)})^2 \quad (6)$$

これをクラスター C_i とクラスター C_j の非類似度とみなすとき、 $C_i \cup C_j$ と他のクラスター C_k を融合したときの増分が最小となるようにクラスターを融合していく [15]。本調査では3次元随伴パラメータ空間におけるデータ間の距離はユークリッド距離において定義され、各要素間の平方和の増分が最小のものを統合していく。このとき3次元のベクトル群において分類されるが、視覚的に見やすくするために2種の随伴パラメータ空間に射影する2次元平面に投影する。

3.3 3種の随伴量による楽曲の感性的印象（調査1）

楽曲の感性的印象を問う調査1では、被験者に対して全10曲（1曲あたりの再生時間15秒）を最後まで聴かせ、毎曲終わるごとに表3に示す凡例について1点～4点で評価させた。また、楽曲の総合的な印象を10点満点で評価させた。結果を表4に示す。項目1～4の値是最頻値である。最頻値が複数個存在する場合は、それらの値の平均をとった。総合評価においては最頻値と、平均値および標準偏差を示している。

図8(a)は項目1とゆらぎ値の関係を表した散布図であり、図8(b)は項目3とゆらぎ値の関係を表した散布図である。表4のゆらぎ値との相関係数を見ると、項目3では0.67であり、中程度の相関が認められる。このとき、ゆらぎ値 ≥ 1.5 である楽曲は10曲中8曲であり、項目3の評価値が3以上となっているものは8曲中5曲であった。また、ゆらぎ値 < 1.5 である楽曲は10曲中2曲であり、項目3の評価値が3未満であるものは2曲中2曲であった。一方、項目1ではゆらぎ値 ≥ 1.7 である楽曲は10曲中5曲であり、項目1の評価値が3以上となっているものは5曲中3曲であった。また、ゆらぎ

表3 調査1に使用する凡例

項目1	ゆったりとした	1⇔4	せかせかした
項目2	後ろ向きな	1⇔4	前向きな
項目3	静的	1⇔4	躍動的
項目4	哀しい	1⇔4	楽しい

表4 音声情報の感性的印象に関するアンケート（調査1）

番号	ファイル名	ゆらぎ値	切片	残差二乗和	項目1	項目2	項目3	項目4	総合評価		
									最頻値	平均値	標準偏差
1	Another_Sky.wav	1.715343	7.704218	0.414398	2.0	3.0	2.0	3.0	6.0	6.1	2.56
2	ロンドンデリーエア.wav	1.627244	7.080130	0.398816	1.0	2.0	2.0	1.0	6.5	6.0	2.23
3	君を信じて.wav	2.110503	9.850914	0.466082	2.0	3.0	3.0	3.0	7.0	6.5	2.68
4	漂流.wav	1.592919	6.873790	0.430658	1.0	1.0	2.0	1.0	4.0	5.3	1.47
5	Down_by_the_Riverside.wav	1.724475	8.052250	0.448193	3.0	4.0	4.0	4.0	5.0	6.0	2.36
6	Space_Odessey3_Revelation.wav	0.990190	3.543654	0.323250	1.0	2.0	1.0	1.0	6.0	5.8	1.78
7	TOMORROW.wav	2.267830	11.134446	0.555204	3.0	4.0	4.0	4.0	7.0	7.2	2.48
8	古いフランスの歌.wav	1.398202	5.805316	0.433054	1.5	2.0	2.0	1.0	3.0	5.3	2.18
9	自由.wav	2.172833	11.011055	0.588947	4.0	4.0	4.0	4.0	8.0	7.2	2.18
10	赤い川の谷間(brass).wav	1.520269	7.336829	0.526494	2.0	3.0	3.0	4.0	6.0	6.5	2.36
相関係数	ゆらぎ値	—			0.67	0.61	0.67	0.55	0.27	—	
	切片				0.73	0.66	0.73	0.62	0.29		
	残差二乗和				0.76	0.61	0.76	0.63	0.28		

値<1.7である楽曲は10曲中5曲であり、項目1の評価値が3未満であるものは5曲中5曲であった。

従って、ゆらぎ値は『せかせかした・躍動的』といった印象を与えていると考えられる。このことから、ゆらぎ値 ≥ 1.5 である楽曲は『躍動的』、更に、ゆらぎ値 ≥ 1.7 になると『せかせかした』といった印象が強くなっている。また逆に、ゆらぎ値<1.7であれば、『ゆったりとした』という印象となり、更に、ゆらぎ値<1.5であると『静的』な印象が強くなると考えられる。

図8(c)は項目1と切片の関係を示した散布図であり、図8(d)は項目3と切片の関係を示した散布図である。表4の切片との相関係数を見ると、項目1と項目3で0.73のやや強い相関が認められる。項目1の評価値に着目すると、切片 ≥ 8 の楽曲は3以上であり、切片<8の楽曲は3未満であることが分かる。同様に、項目3の評価値に着目すると、切片 ≥ 7 の楽曲は3以上であり、切片<7の楽曲は3未満であることが分かる。すなわち、切片は『せかせかした・躍動的』といった印象を与えている。このことから、切片 ≥ 8 の楽曲は『せかせかした・躍動的』といった印象が強くなると考えられる。そして、 $8 > \text{切片} \geq 7$ の楽曲は『躍動的』という印象となり、切片<7の楽曲は『ゆったりとした・静的』な印象が強くなると考えられる。

図8(e)は項目1と残差二乗和の関係を示した散布図であり、図8(f)は項目3と残差二乗和の関係を示した散布図である。表4の残差二乗和の相関係数を参照すると、項目1、項目3の評価値と残差二乗和とで0.76の強い相関が認められる。図8(e)より、項目1の評価値が低い楽曲（ゆったりとした楽曲）は残差二乗和 ≤ 0.55 である楽曲が多いことが分かる。2.3節において、残差二乗和と切片の相関関係がやや強いことが分かっているので、残差二乗和 ≤ 0.55 である楽曲の切片値に注目すると、表4より、切片 ≤ 7.5 の範囲にあることが分かる。

逆に、残差二乗和 > 0.55 、切片 > 7.5 の楽曲は、『せかせかした』印象を与えている結果となった。また、図8(f)より、『静的』な印象を持つ楽曲の残差二乗和を見ると、残差二乗和 ≤ 0.44 であった。逆に、残差二乗和 > 0.44 である楽曲は『躍動的』な印象を与えている結果となった。

図8 凡例と随伴パラメータ値との関係性

(a) 項目1とゆらぎ値, (b) 項目3とゆらぎ値, (c) 項目1と切片, (d) 項目3と切片, (e) 項目1と残差二乗和, (f) 項目3と残差二乗和

以上の、項目1、3の評価値と随伴パラメータについて平均値の検定を行ったところ、1%の有意水準で有意であった。この検定とは、例えば、ゆらぎ値 ≥ 1.5 の楽曲に対する22名の評価値の平均と、ゆらぎ値<1.5のそれらの平均につ

いての差の検定を意味する。

続いて、総合評価についてクラスター分析を行った。総合評価が3以上7未満の楽曲を「×」とし、総合評価が7以上8以下の楽曲を「○」とする。また、評価の一番高い楽曲は「●」で表し、逆に一番評価の低い楽曲は「■」で表す。

クラスター分析の結果、総合評価の高い楽曲を多く含むグループ1と、総合評価の低い楽曲を含むグループ2に分類された。各グループにおける随伴パラメータの関係を見ると、グループ1において、ゆらぎ値と切片の関係は、 $2.111 \leq \text{ゆらぎ値} \leq 2.268$ かつ、 $9.851 \leq \text{切片} \leq 11.130$ であった。グループ2においては、 $0.990 \leq \text{ゆらぎ値} \leq 1.724$ かつ、 $3.544 \leq \text{切片} \leq 7.704$ であった（図9(a)）。

次に、切片と残差二乗和の関係を見ると、グループ1において $9.851 \leq \text{切片} \leq 11.13$ かつ、 $0.4661 \leq \text{残差二乗和} \leq 0.5889$ であった。グループ2においては、 $3.544 < \text{切片} \leq 7.704$ かつ、 $0.3233 < \text{残差二乗和} \leq 0.4482$ であった（図9(b)）。最後に、ゆらぎ値と残差二乗和の関係をみるとグループ1においては、 $2.111 \leq \text{ゆらぎ値} \leq 2.268$ かつ、 $0.4661 \leq \text{残差二乗和} \leq 0.5889$ であった。グループ2においては、 $0.990 \leq \text{ゆらぎ値} \leq 1.724$ かつ、 $0.3233 < \text{残差二乗和} \leq 0.4482$ であった（図9(c)）。

図9 総合評価と随伴パラメータ値との関係性

(a) ゆらぎ値、切片と総合評価、(b) 切片、残差二乗和と総合評価、
(c) ゆらぎ値、残差二乗和と総合評価

グループ1、グループ2の各々の楽曲に対する総合評価の平均値の差について検定を行った結果、1%の有意水準で、グループ1の総合評価の平均はグループ2の総合評価より高いという対立仮説が採択された。

従って、総合評価の高い楽曲は随伴パラメータ値が高く、感性的印象が良くなる傾向のあることが分かった。

3.4 3種の随伴量の変更に伴う楽曲の感性的印象（調査2）

次に各楽曲のゆらぎ値、切片、残差二乗和を変更したWaveファイル及び変更していないWaveファイルを被験者に聴かせ、最も好きだと感じたWaveファイルを、各楽曲について1つずつ選択してもらった。各楽曲にて用意したWaveファイルは次の、(ア)～(オ)の5通りである。

- (ア) 原曲と同じもの
- (イ) ゆらぎ値を10%減少したもの
- (ウ) 残差を1.2倍にしたもの
- (エ) 切片値を0.4増加したもの
- (オ) 残差を1.2倍にし、切片値を0.4増加したもの

直感的に感性的印象を判断してもらうため、各Waveファイルの出だしの10秒間を聴き、毎回曲が終わる毎に評価してもらった。但し、パラメータ変更された同じ楽曲をランダムに提示し、どれが最も良いか被験者22名によって投票してもらった。その投票数で、楽曲の感性的印象の向上の度合いを評価した。その結果を表5に示す。なお評価単位は[人]である。

調査2の結果を図10に示す。結果より最も高い投票数を得た曲は10曲中8曲（曲番号1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10）

図10 随伴パラメータの変更と投票数

表5 随伴パラメータを変更したときの感性的印象に関するアンケート（調査2）

番号	ファイル名	ゆらぎ値	切片	残差二乗和	原曲	ゆらぎ値-10%	残差1.2倍	切片値+0.4	残差1.2倍 切片値+0.4
1	Another_Sky.wav	1.715343	7.704218	0.414398	1	5	2	5	9
2	ロンドンデリーエア.wav	1.627244	7.080130	0.398816	8	2	3	6	3
3	君を信じて.wav	2.110503	9.850914	0.466082	3	1	7	8	3
4	漂流.wav	1.592919	6.873790	0.430658	7	2	5	7	1
5	Down_by_the_Riverside.wav	1.724475	8.052250	0.448193	2	6	3	6	5
6	Space_Odessey3_Revelation.wav	0.990190	3.543654	0.323250	5	7	4	4	2
7	TOMORROW.wav	2.267830	11.134446	0.555204	3	3	2	5	9
8	古いフランスの歌.wav	1.398202	5.805316	0.433054	6	4	10	1	1
9	自由.wav	2.172833	11.011055	0.588947	4	0	4	11	3
10	赤い川の谷間(brass).wav	1.520269	7.336829	0.526494	5	2	4	4	7

が随伴パラメータの変更曲であることが分かる。

そこで、その8曲の各最高投票数に対して統計的に意味を持つか否かを見るための検定を行う。各曲において投票総数(=被験者数) n は22票という小標本なので二項検定を用いる [16, 17]。

すなわち、各曲において前述の(ア)～(オ)の5通りに対する投票なので、平均確率 $p_0=1/5$ とし、随伴パラメータ変更曲の投票比率 p (投票比率 p =投票数/被験者数) が有意差をもって、平均確率 p_0 より大きいかな否かを見る。この検定における帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は、各々以下になる。

H_0 : 随伴パラメータ変更曲の投票比率 p =平均確率 p_0

H_1 : 随伴パラメータ変更曲の投票比率 $p >$ 平均確率 p_0

具体的には、投票数 b に対して次の確率値 $P(k \geq b)$ を有意水準 α と比較し、不等式が成立すれば帰無仮説 H_0 を棄却し、対立仮説 H_1 を採択する。そうでない場合は帰無仮説 H_0 を採択する。

$$P(k \geq b) = \sum_{k=b}^n {}_nC_k p_0^k (1-p_0)^{n-k} \leq \alpha \quad (7)$$

実際に計算すると、投票数 b が8以上ならば、有意水準10%で H_1 が採択され、投票数 b が9以上ならば、有意水準5%で H_1 が採択されることが分かる。

従って表5より、曲番号1, 7, 8, 9では、最高投票数が有意水準5%で平均より高く、曲番号3では有意水準10%で平均より高いことが分かる。他の曲(曲番号5, 6, 10)については、平均程度となる。一方、曲番号1, 3, 7, 8, 9において原曲に対する投票数は平均程度かそれ以下となる。

この結果、10曲中8曲(曲番号1, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10)において、最高投票数を得た曲は随伴パラメータ変更曲であったが、その内平均との有意差が有るのは、5曲(曲番号1, 3, 7, 8, 9)であり、それらの原曲とも差の有ることが分かる。

続いて、投票数に対する随伴パラメータの関係をみるため、重回帰分析を行う。このとき、2.3節より、3種の随伴量の相関関係をみたとき、切片はゆらぎ値、残差二乗和との相関関係が強いことから、多重共線性の可能性が大となり、回帰係数を一意に求めることが困難になると予想される。そのため、切片を説明変数から除去して、以下の回帰モデルを想定した重回帰分析を行う [14]。

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \varepsilon_i, \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (8)$$

ここで、目的変数 y_i は被験者の評価(楽曲への投票数)とし、説明変数 x_1, x_2 は、各々、ゆらぎ値、残差二乗和とする。また、誤差 ε_i は互いに独立に $N(0, \sigma^2)$ に従うとした。以上から、 $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ を最小2乗法により推定した。その結果、重相関係数が0.854となり、この重回帰式で評価の約85%を説明できる。

次に、重回帰式の有意性を確かめるために分散分析を行い、5%の有意水準で有意であるという結果になった。ここで重回帰式の各係数に注目したとき、係数 $\beta_0=0.0$ 、ゆらぎ値の係数 $\beta_1=1.28$ 、残差二乗和の係数 $\beta_2=4.29$ となり、総合評価に対しては残差二乗和の影響が大きいことが分かる。

4. 考 察

4.1 3種の随伴量による感性的印象の分類

音声の回帰分析を行い、ゆらぎ値、切片、残差二乗和のパラメータを求めた結果、ゆらぎ値と切片、切片と残差二乗和、ゆらぎ値と残差二乗和をプロットした散布図から、ゆらぎ値と切片、切片と残差二乗和の相関関係が比較的強くなっていることが分かった。従って、ゆらぎ値と残差二乗和とを用いることが望ましいと考える。

4.2 3種の随伴量の変更による効果

ゆらぎ値、切片、残差二乗和の各パラメータを変更したところ、再生されるパワースペクトルが拡張され、特定の周波数帯域のパワースペクトルが増幅・減衰した。このとき、ゆらぎ値の変更においては、元の楽曲が持つゆらぎ値を考慮しない場合、元の楽曲と比較して高周波成分の分布が大きく異なってしまうことが判明した。元の楽曲のゆらぎ値から $\pm 10\%$ の範囲で増減させたときには比較的良好な結果が得られている。従ってゆらぎ値の変更範囲は、元の楽曲の持つゆらぎ値を考慮し、 $\pm 10\%$ を限度とするのが望ましいと思われる。

次に、残差のスケーリングによって切片を変更した。切片は収録ボリュームに対応しており、切片の変更は元の楽曲の収録ボリュームを考慮して行うことが望ましいと考えられる。

残差二乗和の変更、つまり残差をスケーリングして回帰直線への当てはまり度合いを変更することであるが、残差の増加によって高周波成分が強調されている印象を受けた。従って残差の増減によって高周波成分が強調・減衰されうる可能性があると思われる。

4.3 質問紙調査

質問紙調査の結果から、随伴パラメータと関連している感性的印象を分析調査した(調査1)。その結果、ゆらぎ値 ≥ 1.5 である楽曲は『躍動的』、ゆらぎ値 ≥ 1.7 であると『せかせかした』といった印象が強くなり、ゆらぎ値 < 1.7 である楽曲は『ゆったりとした』、ゆらぎ値 < 1.5 であると『静的』といった印象が強くなる傾向が見られた。つまり、ゆらぎ値は『せかせかした・躍動的』という印象に関係していると思われる。

また、切片 ≥ 8 の楽曲は『せかせかした・躍動的』といった印象が強くなり、 $8 >$ 切片 ≥ 7 の楽曲は『躍動的』といった印象となり、切片 < 7 の楽曲は『ゆったりとした・静的』といった印象が強くなる傾向が見られた。

更に、残差二乗和 ≤ 0.44 のとき『静的』、残差二乗和 ≤ 0.55 、切片 ≤ 7.5 のとき『ゆったりとした』印象となり、逆に、残差二乗和 > 0.55 、切片 > 7.5 のときは『せかせかした』、残差二乗和 > 0.44 のとき『躍動的』な印象となる傾向がみられた。

これらの結果に対して平均値の検定を行ったところ、有意水準1%で有意であった。よって、今回調査した楽曲においては、ゆらぎ値、切片、残差二乗和の何れも『せかせかした・躍動的』といった印象と相関性が高いことが分かった。

表4における随伴パラメータの相関係数を見ると、残差二乗和、切片、ゆらぎ値の順に相関係数が高くなっていることが分かる。つまり、今回用いた楽曲の感性的印象は、残差二乗和が最も大きなファクターとなっていると言える。よって、残差二乗和と随伴パラメータとの関係を追求することが必要であると考えられる。

また、総合評価においては、総合評価の高い曲は随伴パラメータが高い傾向にあった。グループ間において平均値の検定を行ったところ、有意水準1%で有意であった。よって、今回用いた楽曲では総合評価の高い楽曲は随伴パラメータも高くなる傾向が認められた。

楽曲のパラメータを変更した場合の質問紙調査（調査2）では、10曲中8曲において最高投票数を得た曲が随伴パラメータの変更曲であり、その内5曲は平均との有意差が見られた。このことから、随伴パラメータの変更によるパラメータ変換が、感性的印象の向上をもたらし得ると期待できる。

また、重回帰分析の結果から、評価に影響を与えるファクターは残差二乗和、ゆらぎ値の順であると考えられる。

しかし、今回用いた楽曲の随伴パラメータの範囲外の楽曲における随伴パラメータと感性的印象に関しては、検討の余地があると考えられる。従って、評価の高い楽曲の傾向を求めるには、広い範囲の随伴パラメータを網羅するような楽曲を複数用意し、質問紙調査する必要があると考えられる。

更に随伴パラメータを一般的な指標とするためには、自動車のエンジン音のような騒音における随伴パラメータと、小川のせせらぎのような音における随伴パラメータとを比較し、騒音と心地よく感じる音との違いを調査する必要があると考えられる。

5. ま と め

本論文では、音声信号における、ゆらぎ値、切片、残差二乗和の3つのゆらぎ値随伴パラメータを提案し、感性的印象との関係について調査した。その調査方法として、楽曲の感性的印象とパラメータ値との関係、及び、3つのパラメータ値を各々独立に人為的に変更した場合、感性的印象が如何に変化するかを質問紙調査する方式を採用した。

質問紙調査は、限られた人数と年齢構成によるものであり、調査対象も限られた数の楽曲ではあったが、3つのゆらぎ値随伴パラメータを用いて、楽曲の感性的印象がある程度分類され得ることが分かった。更に、これらのパラメー

タ値を変更することで、音声信号を自分の嗜好に沿うように変換し得る可能性が高いことも分った。今後の課題は、広い範囲の随伴パラメータを網羅するような楽曲を用意してアンケート調査を行い、評価の高い楽曲のパラメータの傾向を考察する。そして、そのパラメータを満たすように随伴パラメータを自動で変更するアルゴリズムを求めることである。

参 考 文 献

- [1] 武者 利光：人が快・不快を感じる理由－音・映像・触感…“心地よさ”の不思議に迫る（KAWADE夢新書）、河出書房新社、1999.
- [2] 武者 利光：ゆらぎの世界－自然界の1/fゆらぎの不思議、講談社ブルーバックス、講談社、1980.
- [3] 赤池 弘次、和田 孝雄：生体のゆらぎとリズム、講談社サイエンスフィク、1997.
- [4] 堀内 征治：ゆらぎの不思議、信濃毎日新聞社、1997.
- [5] 寺本 英、広田 良吾、武者 利光、山口 昌哉：無限・カオス・ゆらぎ、培風館、1985.
- [6] 武者 利光：ゆらぎの発想－1/fゆらぎの謎にせまる、日本放送出版協会、1998.
- [7] 武者 利光：ゆらぎの科学〈1〉～〈10〉、森北出版、1991～1999.
- [8] 野村 俊昭、石井 六哉：スペクトル解析による快音・不快音の特徴抽出、電子情報通信学会技術研究報告、DSP、デジタル信号処理、pp.39-46、1995.
- [9] 菅井 桂子、斎藤 兆古、堀井 清之：音楽に伴う1/fゆらぎ周波数成分の抽出とその人間生理への応用、法政大学情報メディア教育研究センター研究報告、Vol.23、2010.
- [10] 大類 重範：デジタル信号処理、日本理工出版会、2001.
- [11] 泉 哲也、服部 哲郎、杉本 俊一、高島 徹：主成分軸における伸縮変換を用いたカラー画像の補正処理、日本感性工学会論文誌、Vol.8、No.3、pp.667-674、Feb., 2009.
- [12] 泉 哲也、服部 哲郎、藤田 笑美子、杉本 峻一、川野 弘道：“カラー画像におけるゆらぎ値算出随伴量と感性的印象”、日本感性工学会論文誌、Vol.9、No.2、pp.243-250、2010年2月.
- [13] Tatsuya YAMAMATSU, Tetsuo HATTORI, Tetsuya IZUMI, Yusuke KAWAKAMI, and Hiromichi KAWANO: “FEELING IMPRESSION AND QUANTITIES ACCOMPANYING CALCULATION OF FLUCTUATION IN SOUND SIGNAL”, Proc. of the Kansei Engineering and Emotion Research International Conference 2010 (KEER2010), Japan Society of Kansei Engineering (JSKE) and Art et Metiers ParisTech, 1242.pdf (10 pages), ISBN: 978-4-9905104-0-4, Paris, France, March 2-4, 2010.
- [14] 永田 靖、棟近 雅彦：多変量解析法入門、サイエンス社、2001.

- [15] 佐藤 義治：多変量データの分類－判別分析・クラスター分析－，朝倉書店，2009.
- [16] 上田 拓治：44 の例題で学ぶ統計的検定と推定の解き方，オーム社，2009.
- [17] 武藤 真介：統計解析ハンドブック，朝倉書店，1995.

川上 裕介 (非会員)

2009 年 3 月香川大学工学部信頼性情報システム工学科卒業。民間企業を経て，現在，香川大学大学院工学研究科博士前期課程在学。信号解析及び航空無線通信に関心を持つ。

服部 哲郎 (正会員)

1997 年同志社大学大学院（電気工学専攻）修士課程修了。民間企業等を経て，1988 年 10 月香川大学教育学部講師。同助教授，教授を経て，1997 年香川大学工学部教授，現在に至る。2001 年米国コネチカット州立大学

研究員。工学博士（大阪大学）。パターン認識，画像処理・医用画像解析，高速計算ハードウェア等の研究に従事。電気学会，電子情報通信学会，情報処理学会等の会員。

山松 達矢 (非会員)

2009 年 3 月香川大学工学部卒業。同年 4 月香川大学院工学研究科博士前期課程入学，現在に至る。ゆらぎと感性的効果に関する研究に従事。

泉 哲也 (非会員)

2002 年 3 月香川大学工学部卒業。2004 年 3 月香川大学院工学研究科信頼性情報システム専攻修士課程修了。2007 年 3 月同大学院博士後期課程修了。博士（工学）。現在，(株)マイクロ・テクニカに勤務。画像処理技術関連のシステム開発に従事。電子情報通信学会，電気学会，精密工学会画像応用技術専門委員会各会員。

川野 弘道 (非会員)

1976 年同志社大学工学部卒業。1978 年同大大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所入所。共通線信号網および電話網のトラヒック制御の研究，ネットワーク計画設計システムの研究に従事。2004

年より，NTTアドバンステクノロジー(株)ネットワークテクノロジーセンタ勤務。現在，トラヒック分析とネットワーク設計及び感性工学的観点からの需要分析等に関する研究に従事。博士（工学）。電子情報通信学会会員。