

## 感性スペクトル分析法 (ESAM) による オーディオ機器の比較試聴評価実験の報告 (2)

西田修造\* 増田清\*\* 武者利光\*\*\*

\*シャープ (株) 技術本部 技術戦略企画室 〒261-8520 千葉県千葉市美浜区中瀬1-9-2

\*\*シャープ (株) AVシステム事業本部オーディオ事業部 〒739-0192 広島県東広島市八本松飯田2-13-1

\*\*\* (株) 脳機能研究所 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区板戸3-2-1 KSP東棟211

E-mail : nishida.shuhzoh@sharp.co.jp masuda.kiyoshi@sharp.co.jp musha@bfl.co.jp

あらまし 可聴帯域を越える“広帯域音楽情報”と現在ポピュラーに使われている“可聴帯域音楽情報”を試験音源とし、1ビットアンプシステム(100kHz広帯域信号対応)と既存のアナログアンプシステム(可聴帯域対応)の間で比較試聴評価実験を行った。評価測定法には感性スペクトル解析法(Emotional Spectrum Analysis Method)を用いる。その結果、1ビットアンプシステムでは既存のアナログアンプシステムに比べて“喜び指標”、“ストレス指標”は大きく、“落ち込み指標”、“リラックス指標”は小さく示す傾向にある。更に可聴帯域を越える1ビット符号化による“広帯域音楽情報”ではマルチビット符号化による“可聴帯域音楽情報”に比べて、その傾向は顕著である。又、前回の報告<sup>(1)</sup>と同様、可聴帯域を越える“広帯域音楽情報”では“可聴帯域音楽情報”に比べて“ストレス指標”、“落ち込み指標”は小さく、“喜び指標”、“リラックス指標”が大きく示す結果が出たので合わせて報告する。

キーワード 1ビットアンプ、感応測定法、広帯域音楽情報

### Report (2) of Emotional Response of Audio Tools by ESAM (Emotional Spectrum Analysis Method)

Shuhzoh Nishida\* Kiyoshi Masuda\*\* Toshimitsu Musha\*\*\*

\*SHARP CORPORATION CORPORATE ADVANCED TECHNOLOGY STRATEGIC PLANNING GROUP

\*\*SHARP CORPORATION AUDIO & VISUAL SYSTEMS GROUP

\*\*\*BRAIN FUNCTIONS LABORATORY, INC.

E-mail : nishida.shuhzoh@sharp.co.jp masuda.kiyoshi@sharp.co.jp musha@bfl.co.jp

**Abstract** Playing the “broadband audio signals” and the “ordinary audio signals” by the 1bit amplifier system and the analogue amplifier system, we experimented the feeling tests to several men by ESAM. We report that the 1bit amplifier system has properties of “joy index”, “stress index” more than the analogue amplifier system and “sadness index”, “relax index” less than it. The inclination of index is stronger in the “broadband audio signals” more than the “ordinary audio signals”. Same as the last report <sup>(1)</sup>, the “broadband audio signals” has the property of “stress index”, “sadness index” more weak than the “ordinary audio signals”, and property of “joy index”, “relax index” stronger than it. The “broadband audio signals” sustain the feeling - efficiency, “more natural and more high - fidelity” than the “ordinary audio signals”.

**Keyword** 1bit-amplifier, ESAM, broadband audio signals.

#### 1. はじめに

従来、音楽情報及び音響機器の感応測定には、“ブラインドテスト+アンケート”というのが一般的であった。その技法の特徴は非リアルタイム性であり、被験者の言語による表現能力に依存し、間接的である。それに比して、本実験で用いた感応測定法は音楽試聴と同時に脳波を計測、信号処理し、リアルタイムでこころの状態を“ストレス指標”、“喜び指標”、“落ち込み指標”、“リラックス指標”で示すことを特徴としている。感応測定には(株)脳機能研究所で開発した“ESAM;感性スペクトル解析法”を用いる。

試験の概要を説明すれば、可聴帯域を越える“広帯域音楽情報”と“可聴帯域音楽情報”を試験音源とし、1ビットアンプシステムと既存のアナログアンプシステムの間で比較試聴評価実験を行った。被験者は前回の実験<sup>(1)</sup>

では音響従事者4名で行ったが、今回は若年層に的を絞って、20代の男子学生5人と女子学生1人を選んだ。実験場所は東京工業大学総合理工学研究所G2棟408号室シールドルームで行った。試聴した音楽プログラムは7曲である。その結果、1ビットアンプシステムでは既存のアナログアンプシステムに比べて“喜び指標”、“ストレス指標”は大きく、“落ち込み指標”、“リラックス指標”は小さくなる傾向がでた。更に可聴帯域を超える“広帯域音楽情報”の方が“可聴帯域音楽情報”に比べてその傾向は強い。図4で示すように1ビットアンプシステムとアナログアンプシステムを従来の測定方法で性能を判別することは困難であるが、本測定法では評価が可能であることを示している。更に、可聴帯域を超える“広帯域音楽情報”を表現する1ビット符号化信号(標本化周波数2.8224MHz)と“可聴帯域音楽情報”を表現する現在のマルチビット符号化信号(標本化周波数44.1kHz、量子化ビット数16bit)の間で比較試聴評価実験を行った。その結果、前回同様<sup>(1)</sup>、可聴帯域を超える“広帯域音楽情報”は“可聴帯域音楽情報”に比べて、“喜び指標”、“リラックス指標”が大きく、“ストレス指標”、“落ち込み指標”が小さくなる傾向が確認できた。

本論では第2章に試聴評価実験の環境条件と感応指標の演算手法、第3章に実験計画と実験結果について説明する。最後に本技法の確立に向けた今後の取り組みについて述べる。

## 2. 試聴評価実験の環境条件

### 2-1 試聴評価実験の環境と使用した音響機器・感応測定器の説明

本実験の試聴評価実験状況を図1に示す。試聴実験に使用した主な音響機器/感応測定システムは

- ・スピーカーシステム : JBL製 Ti-10K 2台
- ・1ビットアンプ : SHARP製 SM-SX200
- ・アナログアンプ : (上記と同等仕様のアナログアンプ)
- ・SACDプレーヤー : SHARP製プロトタイプ
- ・Hard-disk Recorder : 1ビット記録/再生仕様プロトタイプ
- ・1ビットtoマルチビット変換機 : SHARP製プロトタイプ
- ・感応測定システム : (株)脳機能研究所製 ESA16

である。構成する音響機器システムのブロックを図2に、1ビット/マルチビット符号化信号の周波数特性を図3に、1ビットアンプとアナログアンプの周波数特性を図4に、スピーカーシステムの周波数特性を図5に示す。

音響特性の測定には横河電機製FFTアナライザ“SA2400”を使用した。測定方法はチャープ信号を発生させ、伝達関数を求めた。

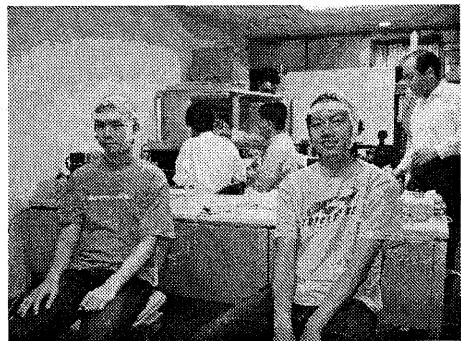


図1 試聴評価実験状況

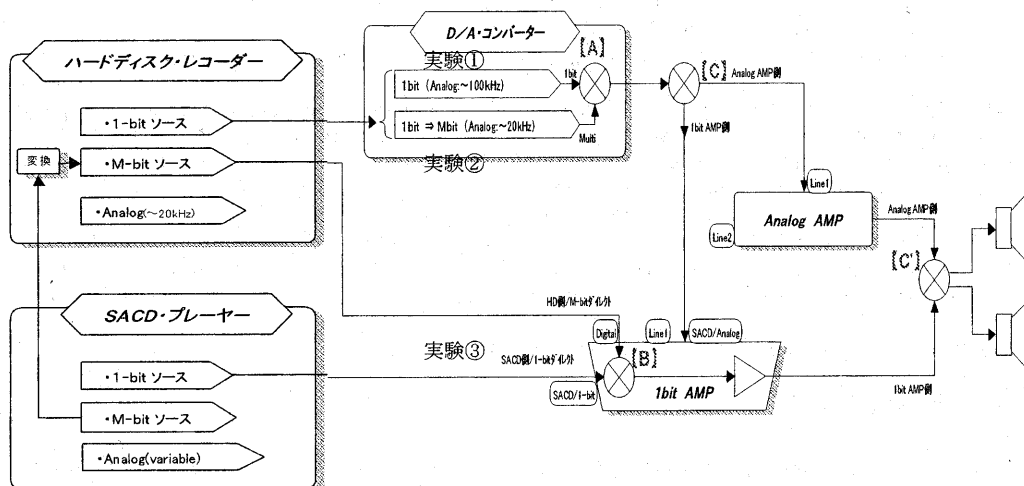
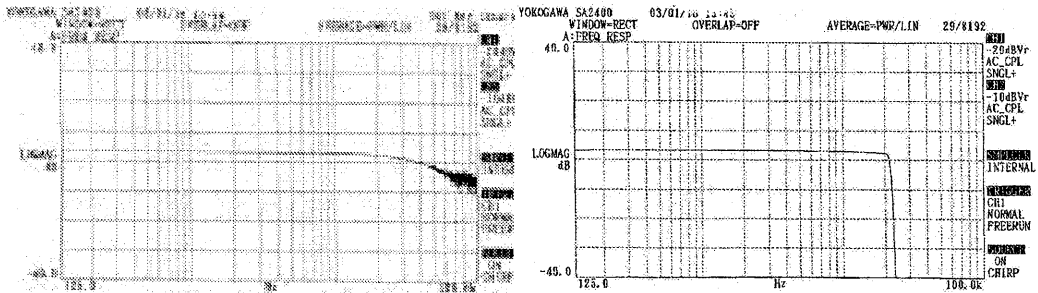


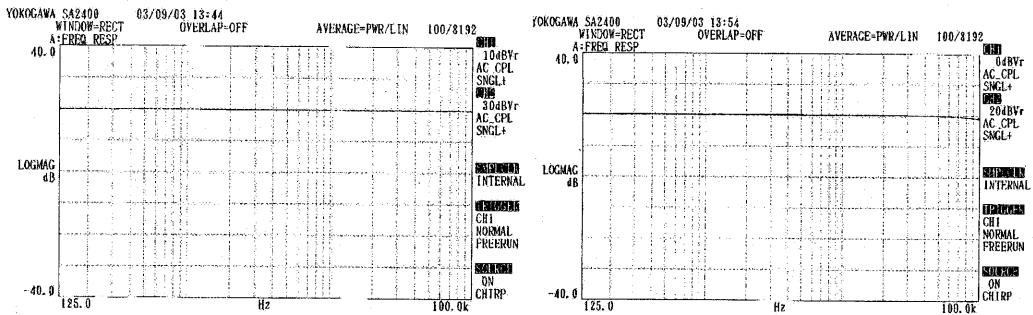
図2 試聴した音響機器システムの構成



(a) 1ビット符号化信号の周波数特性

(b) マルチビット符号化信号の周波数特性

図 3 1ビット/マルチビット符号化信号の周波数特性



(a) 1ビットアンプの周波数特性

(b) アナログアンプの周波数特性

図 4 1ビットアンプ/アナログアンプの周波数特性

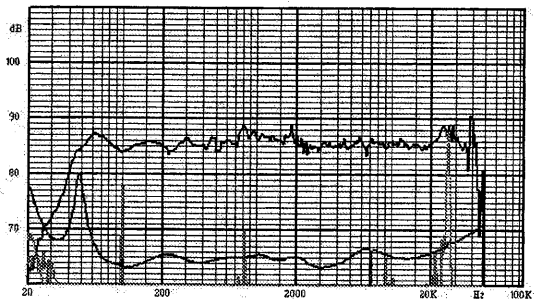


図 5 スピーカーシステムの周波数特性

## 2-2 感応指標の演算プロセス

感応指標の生成にはまず頭皮上の10ヶ所の電位を記録する。それぞれの脳波信号にはシータ波(4~8Hz)、アルファ波(8~13Hz)、およびベータ波(13~20Hz)の3種の信号成分について合計135個の相互相関係数を1.28、2.56、または5.12秒毎に計算する。これらの相互相関係数の1次結合によって、“ストレス指標”、“喜び指標”、“落ち込み指標”、“リラックス指標”の4つの基本感応状態を表す指標を得る。この変換法則は実験的に得られたものである。この4つの指標は4次元の直交座標系を構成する。1.28秒毎の感応状態をこの座標系でベクトル表現をする。本比較聴覚評価には指標毎に60回加算平均(76.8秒)し、その比較対象指標毎に指標の加算平均値の大小により判定を行う。この比較は同一被験者に対するタスクの違いによる大小関係で、被験者間の比較ではない。

その演算処理の概要を、順を追って以下に示す。

ステップ① (脳波電圧測定)

測定ポイントは頭皮上10カ所、Fp1、Fp2、F3、F4、T3、T4、P3、P4、O1、O2を選択する。電圧レベルは数~数十μVである。サンプリング周波数は100Hzとする。

ステップ② (脳波の相互相関係数 $X_{i,j,k}$ の演算)

$$X_{i,j,k} = \frac{\langle V_{i,k} V_{j,k} \rangle}{\sqrt{\langle V_{i,k}^2 \rangle \langle V_{j,k}^2 \rangle}} \quad i, j = 1 \sim 10, k = \theta, \alpha, \beta$$

測定ポイント $V_1 \sim V_{10}$ の中から2測定ポイントを選ぶ組み合わせは ${}_{10}C_2$ 個あり、45個の脳波経路が生じる。この値を3信号成分(θ波、α波、β波)について計算するので、総数135の相互相関係数を上記の式に基づいて計算する。相互相関期間は128サンプル期間(1.28秒間)とする。

ステップ③ (感性ベクトル値の演算)

相互相関係数 $X_{i,j,k}$ の状態ベクトルから、図6に示す感性マトリクス方程式により感性ベクトル(N1、P1、N2、R)を計算する。

$$\begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \sim & a_{1,135} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \sim & a_{2,135} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & \sim & a_{3,135} \\ a_{4,1} & a_{4,2} & \sim & a_{4,135} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_{1,2,\theta} \\ X_{1,3,\theta} \\ X_{1,4,\theta} \\ X_{1,5,\theta} \\ \vdots \\ X_{9,10,\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C1 \\ C2 \\ C3 \\ C4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N1 \\ P1 \\ N2 \\ R \end{bmatrix}$$

感性マトリクス (定数)

状態ベクトル

定数

感性ベクトル

図 6 感性マトリクス方程式

ステップ④ (判定方法)

感性ベクトル値N1、P1、N2、Rに関して、60回加算平均(76.8秒)する。例えば、“喜び指数”P1を60回加算平均した値を<P1(時刻、人A、音楽A、機器A)>と表す。次の加算平均値を<P1(時刻+約90秒後、人A、音楽A、機器B)>と表す。そのとき、判定基準は

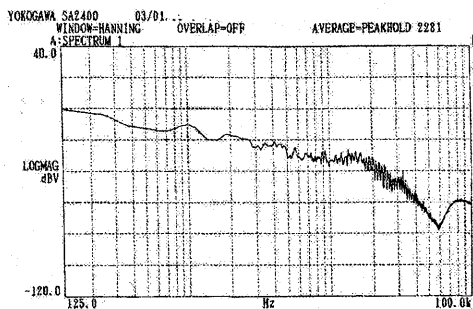
P1(時刻、人A、音楽A、機器A) < P1(時刻+約90秒後、人A、音楽A、機器B) → → → “0”

P1(時刻、人A、音楽A、機器A) > P1(時刻+約90秒後、人A、音楽A、機器B) → → → “1”

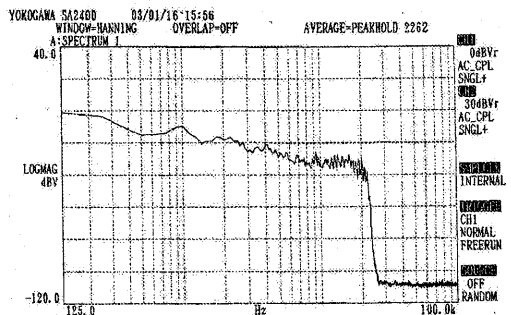
とする。それら判定した数を集計する。有意水準の検定法には片側t検定法を用いる。

2-3 試聴実験に使用した曲及び演奏音のパワー・スペクトル密度

表1に試聴実験に使用した曲名を記す。その中の“朝の光の中で”のスペクトル測定結果を図7に示す(各試聴実験した曲の約2分間をピークホールドする)。図の左側が1ビット信号、右側がマルチビット信号の各スペクトルを示す。比較するとマルチビット信号(44.1kHz、16bit)では20kHz以上の周波数成分を失っていることがわかる。



(a) “朝の光の中で”の周波数成分(1ビット)



(b) “朝の光の中で”の周波数成分(マルチビット)

図 7 音楽情報“朝の光の中で”のスペクトル

表 1 試聴実験に使用した曲目

番号	分類	曲 目	1ビット音源	マルチビット音源
1	市販	Erich Kunzel / Cincinnati Pops Orchestra : "Children Will Listen" from Into the Woods	SACD	1ビット→マルチビット変換
2		Robert Shaw / Atlanta Symphony Orchestra and Chorus : Dvorak: Stabat Mater - Quando corpus morietur		
3		Monty Alexander No Woman, No Cry		
4		YO-YO MA : 1B		
5		Keiko Lee : Beautiful Love		
6		Gaudeamus : Beati Quorum		
7	自製	朝の光の中で	2.822MHz	

### 3 実験計画とその結果

#### 3-1 実験計画

実験計画表を表2に示す。概略を説明すれば、

実験①：6人の被験者に7曲の1ビット音楽情報を1ビットアンプとアナログアンプの間で比較試聴実験。

実験②：6人の被験者に7曲の“可聴帯域音楽情報”を同上の間で比較試聴実験。

実験③：6人の被験者に6曲の可聴帯域を越える1ビット符号化による“広帯域音楽情報”とマルチビット符号化による“可聴帯域音楽情報”の間で比較試聴実験。

である。

表 2 実験計画表

アンプ種類 \ ソース種類	可聴帯域を越える 広帯域音楽情報	可聴帯域音楽情報
1ビットアンプ	アナログ信号	アナログ信号
	デジタル信号	デジタル信号
アナログアンプ	アナログ信号	アナログ信号

実験①: 1ビットアンプとアナログアンプ間の比較 (縦向き二重矢印)  
 実験②: マルチビット音源とアナログアンプ間の比較 (縦向き二重矢印)  
 実験③: 広帯域音楽情報と可聴帯域音楽情報間の比較 (横向き二重矢印)

#### 3-2 実験結果

6人の被験者に対して、前記に示す比較試聴実験を行った。選択した7曲の可聴帯域を越える1ビット符号化による“広帯域音楽情報”とマルチビット符号化による“可聴帯域音楽情報”をアナログアンプシステムと1ビットデジタルアンプシステムで交互に試聴し、又1ビット信号とマルチビット信号を交互に試聴し、脳波測定を行った。その感性スペクトルの解析結果を図8に示す。横軸は時間軸で単位は分である。縦線はイベントマークで、測定の始まりと終わりを示す。感性状態は絶えず変動しているため、期間(約1分強)平均値を取る。上から“ストレス指標”、“喜び指標”、“落ち込み指標”、“リラックス指標”を示す。

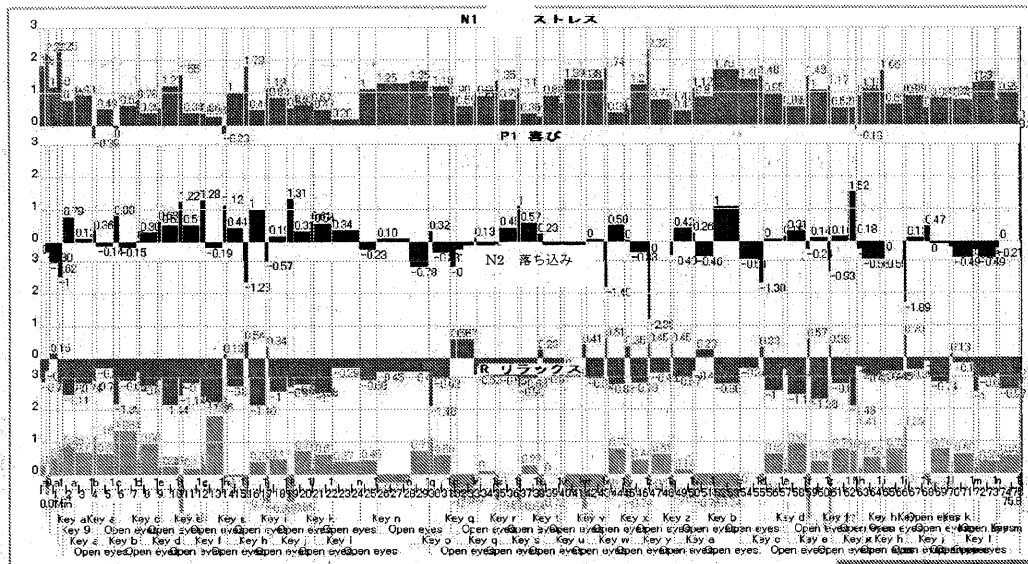


図 8 感性スペクトルの解析結果

表 3 集計結果

実験	実験条件	感応指標	ストレス指標	喜び指標	落ち込み指標	リラックス指標
①	信号源：“広帯域音楽情報”	集計データ	23:19	28:14	16:26	18:24
	比較対照：1ビットアンプ	比率	55:45	67:33	36:64	43:57
	アナログアンプ	有意水準	—	0.014%	0.062%	0.18%
②	信号源：“可聴帯域音楽情報”	集計データ	21:21	22:20	19:23	19:23
	比較対照：1ビットアンプ	比率	50:50	52:48	45:55	45:55
	アナログアンプ	有意水準	—	—	—	—
③	比較対照：可聴帯域を越える	集計データ	17:19	21:15	17:19	19:17
	“広帯域音楽情報”	比率	47:53	58:42	47:53	53:47
	“可聴帯域音楽情報”	有意水準	—	0.16%	—	—

実験計画（表2）に基づいて、感性スペクトルの解析結果（図8）からどちらが大きいかで判定し、集計したのが表3である。

この数値は、実験①、②、③でそれぞれの感性状態の指標が相対的に大きくなった回数を示している。たとえば、実験①の集計データで“23:19”の意味は1ビットアンプで聴いたときにアナログアンプで聞いた場合よりも“ストレス指標”が大きかった回数が23回で、その逆が19回あったという意味である。

実験①：可聴帯域を超える“広帯域音楽情報”を1ビットアンプシステムとアナログアンプシステムで比較試聴した結果、“喜び指標”、“落ち込み指標”、“リラックス指標”で1ビットアンプシステムがアナログアンプシステムに比して有意差を示す傾向が出ている。図9に示す。

実験②：“可聴帯域音信号”では実験①と同じ傾向を示しているが弱い。図9に示す。

実験③：可聴帯域を越える1ビット符号化による“広帯域音楽情報”はマルチビット符号化による“可聴帯域音楽情報”に比して、前回の報告と同じで“喜び指標”で有意差を示す傾向が出ている。図10に示す。

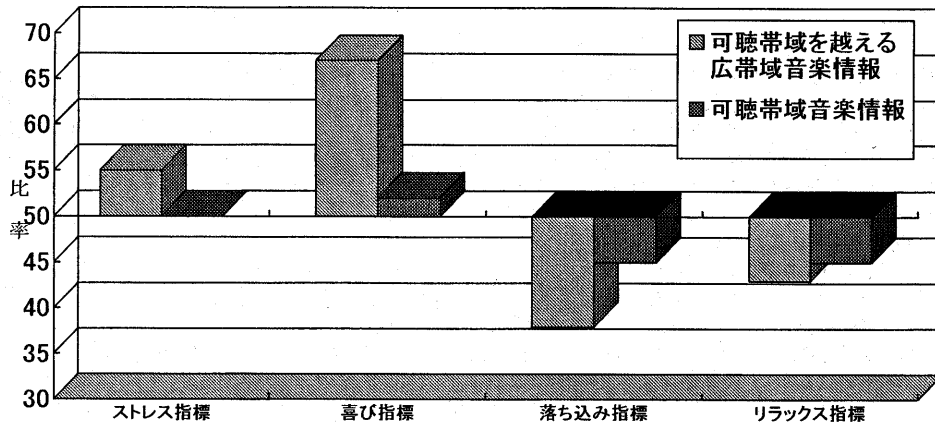


図 9 1ビットアンブシステムとアナログアンブシステムの感性反応比較

図9が示すように、1ビットアンブシステムではアナログアンブシステムに比べて、“喜び指標”、“ストレス指標”が大きく、“落ち込み指標”、“リラックス指標”が小さく示す傾向がある。それも可聴帯域を越える“広帯域音楽情報”の方が顕著に出ている。実際、可聴帯域を越える“広帯域音楽情報”では“喜び指標”と“落ち込み指標”で有意水準0.014%、0.062%を示す。又、逆の傾向があるので同質性向であると言える。又“ストレス指標”と“リラックス指標”についても逆傾向にあり、同質性向であると考えられる。

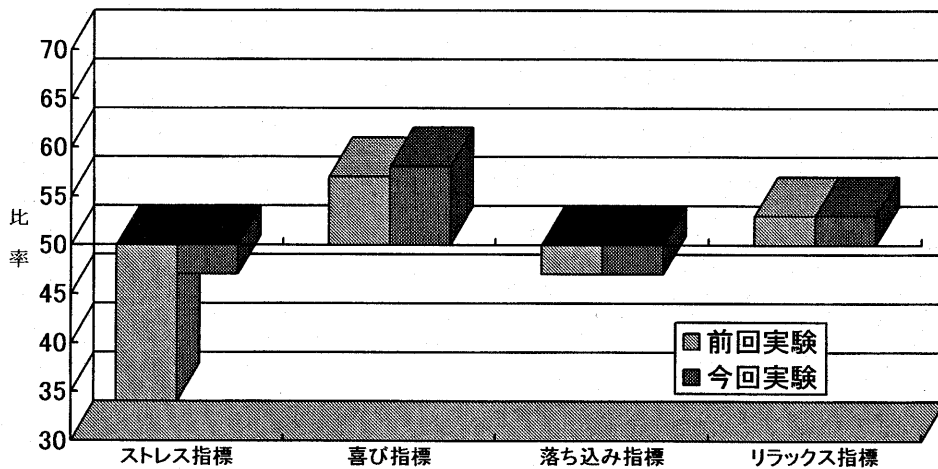


図 10 可聴帯域を越える1ビット符号化による“広帯域音楽情報”  
/マルチビット符号化による“可聴帯域音楽情報”源による違い

図10が示すように前回と今回で同じ傾向が出ている。可聴帯域を越える1ビット符号化による“広帯域音楽情報”のほうはマルチビット符号化による“可聴帯域音楽情報”に比べて、“喜び指標”、が大きい。又、“喜び指標”と“落ち込み指標”、又“リラックス指標”と“ストレス指標”で逆傾向になっている。これは、“ストレス指標”と“喜び指標”の2指標で説明できる可能性を示している。結論として、可聴帯域を超える1ビット符号化による“広帯域音楽情報”のほうが、現在ポピュラーに使われているマルチビット符号化による“可聴帯域音楽情報”に比べて、ストレスを引き起こさず、本来音楽情報が持つ喜びをもたらす機能を最大限に引き出している。一般的に言って、タスクに対して非常に強い好奇心を感じているときには、ストレス指標と喜び指標が同時に大きいレベルを示す。

## 4. おわり

可聴帯域を越える“広帯域音楽情報”を1ビットアンプシステムと既存のアナログアンプシステムで比較聴感実験を行った。1ビットアンプシステムのほうがアナログアンプシステムに比べて“喜び指標”、“落ち込み指標”、“リラックス指標”で有意差を確認することができた。“可聴帯域音楽信号”でも有意差は小さいが同様な傾向を確認できた。また、前回同様<sup>(1)</sup>、可聴帯域を越える1ビット符号化による“広帯域音楽信号”ではマルチビット符号化による“可聴帯域音楽信号”に比べて、ストレスを引き起こさず、ナチュラルで音楽自体が持つ喜びを忠実に伝える効能を保持していることを示す測定結果が出た。

今後の課題として、

- ① 感応試験法の測定精度の向上策として
  - ・感応マトリックス指数を音響測定用にチューニングし、感度アップをはかる。
  - ・脳波測定ポイントの削減/センサーの簡略化をはかる。
  - ・聴感音楽プログラムの特性の評価(記録環境、音楽プログラムの感応特性、動的特性)。等の確立により、条件を絞り測定精度の向上をはかる。
- ② 世界各地の感性マトリックスのデータベース構築。
- ③ 原音(例:楽器の音)と“広帯域音楽情報”源の差の原因追求。
- ④ 音楽情報及び音響機器と共に広帯域化に向けて開発を進め、より原音の持つ情感を忠実に記録・再生するシステムの開発推進。

等があり、今後の発展につなげていきたい。

## 5. 参考資料

- (1) 西田修造、増田清、武者利光 「イーサムによる広帯域1ビット符号音楽情報の感応評価実験の報告(1)」情報処理学会 第50回音楽情報科学研究会 MISJ0003 May. 2003
- (2) 山崎芳男 「広帯域音響信号の高速標準化1ビット処理」信学技報E A93-102(1994.3)
- (3) 大林國彦・早瀬徹 「ADA/Advanced Digital Audio デバイスの実現のために高次 $\Delta\Sigma$ 変調による1ビット信号処理7次 $\Delta\Sigma$ 変調モデル/量子化ノイズ分布の制御/AD変換回路の設計/1ビット信号のメリットを検討する」ラジオ技術 OCT. 1996
- (4) 増田清、佐藤昭治 「1ビットアンプ/ $\Delta\Sigma$ 変調技術の増幅回路への応用」JASジャーナルVol.39 No.11 (1999.10)
- (5) 増田清、早瀬徹、佐藤昭治 「1ビットオーディオ」シャープ技報 No9-通巻77号-特集:ユーザーインターフェース(2000.8)
- (6) 武者利光 「「こころ」を測る」日経サイエンス 4月号 20-29(1996)
- (7) 武者利光 「リラックスした心の状態は測れるか (Estimation of the State of Mind)」日本機械学会誌 1998.6 Vol.101 No.955
- (8) Toshimitsu Mushi 「脳研究と新産業の創出学際研究 (Journal of Multidisciplinary Research)」Vol. 11 No.1 脳工学の新時代II