

時間周波数解析手法を用いた音響機器評価の基礎検討

A Study of Audio Equipment Evaluations Using Time-Frequency Analysis

好美 敏和, 石光 俊介

Toshikazu Yoshimi, Shunsuke Ishimitsu

要 旨 音響システムの再生音質を評価する場合、最終的には実聴による主観評価が重要であることはいうまでもないが、物理計測による客観的特性評価を行うことも同様に重要である。楽音を聴くことにより何らかの聴取印象を覚えるが、その印象に良好に対応した電氣的計測データが得られれば、再生機器のその後の音質性能改善作業への着手が比較的容易となるものと想像できる。この報告では、電氣的計測手法として、従来の正弦波などによる「静特性」評価ではなく、聴取楽音入力に対する応答信号の時間周波数特性による「動特性」評価手法に着目し、SD法による試聴評価との対応付けを市販のオーディオアンプの再生音質評価に適用したので紹介する。また、一般的な電解コンデンサの音質評価にも同様の手法を適用した。さらに、再生音質評価とは異なる一応用例として、カーオーディオメインユニットの操作ボタン動作音の時間周波数分布とその好まれ方の対応付けを行った。

Summary In evaluating the reproduced sound quality of sound systems, more weight should be given to the subjective evaluation by jury listening test. However an objective evaluation using physical measurements is also important.

Music makes a great impression on those who listen to it. If we have some objective measurement data corresponding to this impression, it will be comparatively easy to start to improve the sound quality performance.

In this report, we focused on a "dynamic" evaluation technique using a time-frequency characteristic of a response signal for the listening musical sound, instead of "static" evaluation for sine waves, and introduced SD method to sound quality evaluation of a commercial audio amplifier.

In addition, we also applied a similar technique in sound quality evaluation for aluminum electrolytic capacitors.

Furthermore, as an example of another application, the switch button sounds of a car audio system was adopted.

キーワード : 静特性, 動特性, 聴取楽音, 時間周波数解析, Wavelet 解析, フーリエ変換, Wigner 分布, SD 法, 因子分析, 複素 Wavelet, 等価直流抵抗, 損失角, LMS, 適応制御

1. まえがき

現在、音響システムを評価する場合、一般的には正弦波信号を用いた「静特性」評価により行われている。しかし、その音響システムで再生されるのは非定常な楽音であり、これまでに

も「動特性」の評価方法が求められてきた。「動特性」評価方法としては、楽音に近似させた測定信号を作成し、これを用いて混変調歪や非線形歪を測定する方法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、その方法は未だ確立されたものではない。その原因の一つは、これらの方

法は再現性に優れるものの、実際の楽音の聴感評価と直接結びつけることが困難であることである。一方、「静的」な正弦波信号のフーリエ変換により、周波数解析が一般に広く行われている。信号を「動的」に表現するためには、時間周波数解析を行う必要がある。

代表的な時間周波数解析方法には、Spectrogram, Wigner 分布, Wavelet 変換 (WT) が有る。

Spectrogram は短時間フーリエ変換 (Short Time Fourier Transform, STFT) のエネルギー表現であるが、これは短時間 Δt ごとの信号を取り出し、その区間ごとのフーリエ変換を行うものである。一般には声紋分析図やソナグラムなどとして良く知られる。しかしこの方法は、楽音に相当するような非定常信号に対しては解析精度が充分とはいえず、周波数分解能と時間分解能とが互いにトレードオフの関係となる。

Wigner 分布は、当初は量子力学分野での応用が提案され、応答信号の変化点抽出能力に優れた特長を活かして、近年では主に地中の埋蔵鉱物探査などに利用され、実績をあげていた。音響研究分野でも STFT に換わる新しい信号解析手法として活発に研究されてきたが、信号に複数の周波数成分が含まれる場合、それら相互による干渉項が偽の成分として現れるため、解析データの理解が大いに困難となる原理的欠点を有する⁽³⁾。

この中で Wavelet による時間周波数解析は、低周波数領域において周波数分解能が高く、高周波数領域においては時間周波数分解能が高いという人間の聴覚特性に類似する性質を持っている⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾。この手法は時間的に局在した AW (Analyzing Wavelet) と呼ばれる基底関数の伸縮変形と平行移動により解析を行うものであり、周波数軸上での自己相似性が高い特徴を持つ。このことから、楽音のような典型的な非定常信号や一過性の機械動作音の時間周波数解析には最も有利であると考えた。

2. オーディオアンプの音質差評価

本研究では、動的な特性評価方法として、楽音を用いて市販のホーム用オーディオプリメインアンプの再生音質を評価する方法について検討した^{(7),(8)}。2種類の評価対象アンプにスピーカケーブルを經由してスピーカシステムを接続し、その入力端子での応答波形の時間周波数解析によりこれらの音質差の可視化を行うとともに、この差の原因の考察と解析結果と聴感印象とを結びつけることを試みた。ここで用いたスピー

カシステムは DIATONE DS-2000Z (3ウェイ・3スピーカ構成、公称インピーダンス 6 Ω 、最大入力 180 W) である。スピーカケーブルには、左右チャンネル共に 2 m の一般的な平行ケーブルを用いた。

2.1 Wavelet による時間周波数解析

前述の各解析方法から、比較的高い分解能と聴感との対応付けに有利な特徴をもつ Wavelet 解析を用いた。式 (1) のように、Wavelet 解析は、解析信号: $f(t)$ と AW: ψ の内積により行われる。

$$(W_{\psi} f)(b, a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) f(t) dt \quad (1)$$

式 (1) は、スケールパラメータ、はシフトパラメータであり、それぞれ の伸縮変形、平行移動を行う変数である。WT は本来、時間-スケール ($t-s$) 平面で表わすことが多いが、時間的・周波数的に局在している AW を用いることにより 時間-周波数 ($t-f$) 分布で近似ができる。なお、WT には予備実験により最適であった Morlet ウェーブレットを用いた。

2.2 信号収録・解析条件

解析対象としては、比較的高価格なアンプとして A(120,000 円) と普及価格の B(26,800 円) を用いた。これらは互いにメーカーが異なる。これらのアンプは事前に、一般に用いられる方法で電氣的性能測定を行ったが、最大出力電力値以外の諸特性で大差のないことが確認されている。

まず、デジタルレコーダ (96kHz, 24bits) により再生側と収録側のサンプリングクロック共有の性質を利用し、楽音の再生と収録を同時に行った。これにより SN 比が向上し、再現性に有利となった。信号の採取は、デジタルレコーダ出力部、アンプ出力端子、スピーカ入力端子の 3 箇所とした。スピーカ入力端子では電圧のほか、電流値も収録した。ボリューム位置設定は各 L チャンネルにて White Noise 入力時におけるアンプ出力信号を 3.5V に調節した。このときのスピーカ出力音圧レベルは、約 2m 離れた試聴位置にて 75dB SPL とした。以上のようにして得られた信号を、レベル差補正のために RMS 値で正規化し、さらにその最大値で正規化した後 96kHz から 48kHz にダウンサンプリングした。その後、時間領域での差分を導出し、差分値を WT による時間周波数領域上で評価した。

なお、評価信号として以下 3 曲の CD 音源を用いた。これらは、事前の簡易試聴実験によりアンプの音質差が認識されたものとして選定された。

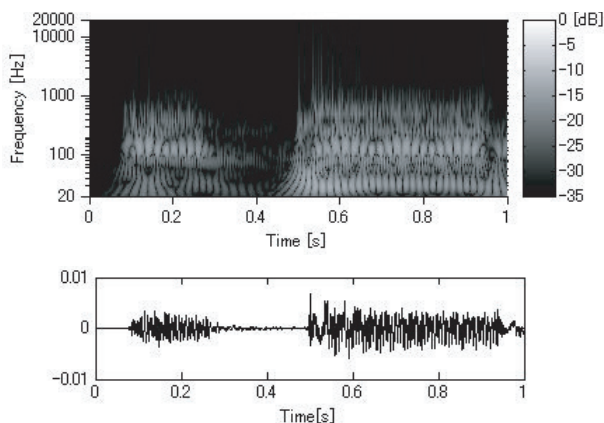
- (1) Rob Wasserman / Satisfaction (BASS POWER 日本オーディオ協会)
- (2) Jennifer Warnes / Somewhere, Somebody (BMG ファンハウス)
- (3) Pfalzer Bahnhofsuhr (stakkato 3 Eine Horstest-CD Von AUDIO)

2.3 解析結果

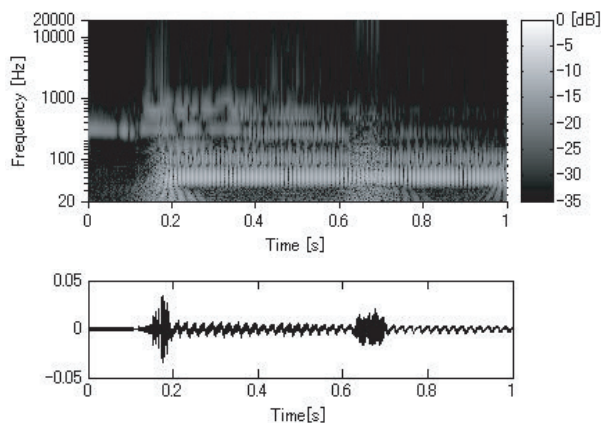
音源 (1), (2), (3) による 2 台のアンプの出力端で

の信号を 1 秒間抽出し、これらの差成分の WT 結果を **図 1** に示す。その下図は差成分の絶対値であり、白黒の濃淡の差は収録信号の最大値 1 を底とした dB 表示である。

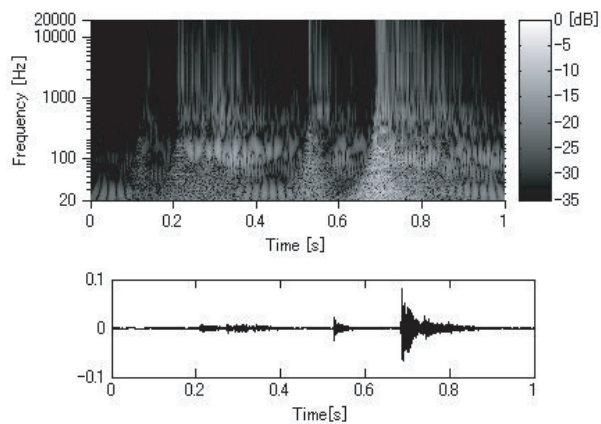
音源により差のパターンは異なるが、主に低域から中域にかけてのレベル差が観測されており、特にスピーカシステムの定インピーダンス領域付近とウーファの低域共振周波数で差が検出されていることに



(a) アンプ出力電圧の差分 WT, 音源 (1)



(b) アンプ出力電圧の差分 WT, 音源 (2)



(c) アンプ出力電圧の差分 WT, 音源 (3)

図 1 差分信号とその WT

気付く。そこで、事前の電気測定にて一旦は大差なしと判断していた出力インピーダンス特性に着目してみた。各アンプの出力インピーダンス Z_{output} およびスピーカシステムの入力インピーダンスは On-Off 法により測定したもので、各測定回路を図 2 に示し、計算式を (2), (3) に示す。

ここで、 E_0 : 無負荷電圧、 E_i : 負荷電圧、 V_r : 抵抗の両端電圧、 V_{sp} : スピーカシステム入力端電圧、 r_i , r : シャント抵抗である。図 3, 4 にアンプ出力、スピーカシステム入力のインピーダンス特性を示し、図 5 にスピーカ負荷時のアンプ出力電圧値のシミュレーション結果を示す。

$$Z_{output} = \frac{E_0 - E_i}{E_i} r_i \quad (2)$$

$$Z_{sp} = \frac{V_{sp}}{V_r} r \quad (3)$$

図 5 から、アンプの出力インピーダンスの違いにより、20 Hz, 100Hz, 2kHz 付近にて電圧特性差のピークを生じている。これらの差は、全ての音源の WT における 20Hz, 100Hz 付近の帯域に共通して出ている差と、音源 (3) の 2kHz での差に対応しており、アンプ間の出力インピーダンスの差が WT の差の一因であることを確認した。このことは、これらのアンプ間で、上記の周波数各帯域付近にてブロードに極く僅かの音圧差を生じ、これが互いに試聴印象が異なる原因に結びつくものと推定できる。

次に複素 Wavelet による位相解析も試みた。図 6 は各アンプでの信号の位相差を時間周波数領域上で表現したものである。アンプ A の位相から B のそれを引いた値を示した。これからは、音源により高域において 1° 程度でアンプ A が進んでおり、このアンプの方が立ち上がり特性に進んでいる。この立ち上がり性能の違いも WT の差の一因であることも確認できた。

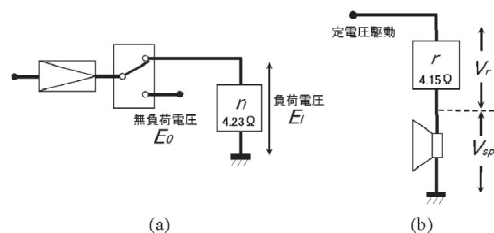


図 2 測定回路 (a) (b)

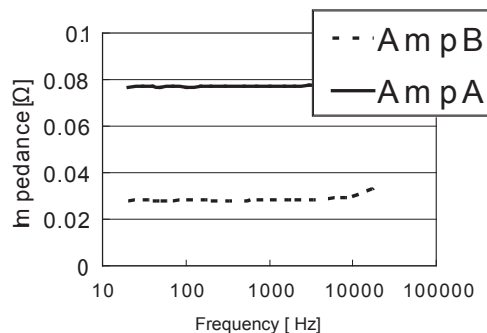


図 3 各アンプの出力インピーダンス特性

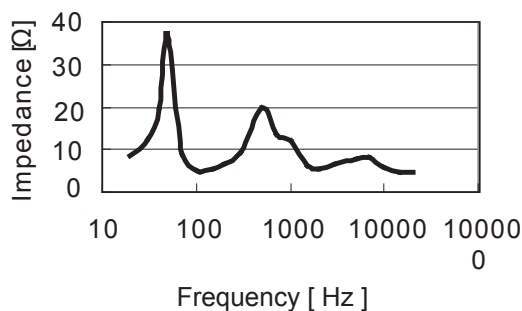


図 4 スピーカシステムの入力インピーダンス特性

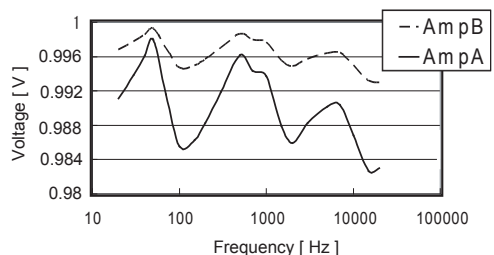


図 5 スピーカ負荷時の各アンプ出力電圧

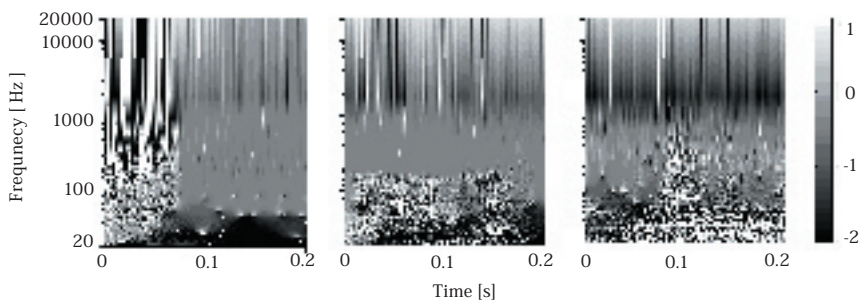


図 6 出力電圧の位相差解析

2.4 聴感実験

2.4.1 実験方法と結果

各アンプでのWT解析結果と聴感印象との対応付けを行うため、SD法⁹⁾による試聴実験を行い因子分析による評価を行った。16種類の形容詞対を用いて、それぞれ7段階評価で、評価のポジティブ要因に近い方から+3, +2, ..., -3点とした。実験は19~24歳の楽器演奏経験のある健聴者24名に対して楽音1分間を2回ずつ提示し、各アンプについてブラインドテストを実施した。なお、評価音楽および音圧レベルは解析時と同じとした。図7に各音源での実験結果を示す。

2.4.2 因子分析

各アンプ・音源についてそれぞれ因子分析を行なった。表1に曲(1)での各アンプの因子分析結果を示す(表の数字は因子負荷量を表す)。表1-(a)はアンプAの場合であり、因子1を美的因子、因子2を迫力因子、因子3を金属性因子と解釈した。また、表1-(b)はアンプBの場合であり、因子1から迫力因子、美的因子、金属性因子と解釈した。ここで「響く」の要素に着目すると、アンプAの場合では美的因子の因子負荷量が高いのに対し、アンプBの場合では迫力因子の因子負荷量が高い。これより、アンプ間において「響く」の印象が潜在的に異なることがわかる。同様に、3音源それぞれについて因子分析を行なった結果、「臨場感」を例にとるとそれをアンプAは「美的要素」から、アンプBは「迫力」から感じる事がわかった。以上より、まず、アンプBは迫力を特徴としており、WTの低音域の差として解析できたと考えられる。次に、「深い」の要素に着目すると、曲(1)の場合、両方のアン

プが迫力を特徴とするためWTの高音域で差が見られない。これに対し、曲(2),(3)の場合、アンプBでは迫力を特徴とするが、アンプAでは美しさを特徴とするためWTの高音域で差が見られる。また、複素ウェーブレットの結果により立ち上がりの差もみられている。よって、アンプAでは美的要素の中に「深さ」を感じ、WTの高音域の差、複素WTの立ち上がりの差として解析できたと考えられる。

2.5 結果のまとめ

アンプの再生評価に、WTを用い出力端での楽音信号成分の差を可視化し、アンプの違いによる結果を聴感印象と結び付けることができた。その結果、安価なアンプBはパワフル感などの迫力因子を中心に構成されており、一方の高価格のアンプAは「深さ」の美的因子、(鋭さ)の金属因子に結びつく要素から音質が構成されていることが解った。これらはWT解析結果の低域部分と位相解析結果による立ち上がり性能に相関が観測された。この検討の場合、アンプによって音質差が生じるのは、出力インピーダンス特性や高域での立ち上がり性能の違いによることが主因であることが解った。

3. 電解コンデンサの音質評価

オーディオアンプを構成する電気部品は多数存在し、どの部品が音質に影響するかを特定することには困難がともなう。一方、静電容量の同一なコンデンサにおいても、音質の違いが指摘されることがある。そこで、部品と音質の関連を調べることを目的として、従来から解析が困難といわれた電解コンデンサが音質

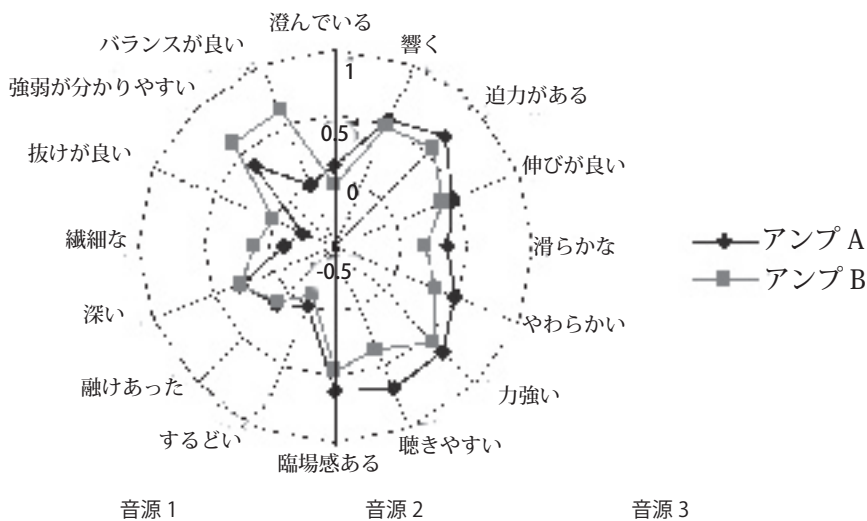


図7 主観評価

表 1 各アンプの因子分析結果

(a) アンプ A の因子負荷量・・・音源 (1)

	美的因子	迫力因子	金属性因子	共通性
響く－つまった	0.838	0.279	-0.120	0.795
やわらかい－甲高い	0.832	-0.478	0.259	0.987
滑らかな－粗い	0.780	0.102	0.141	0.639
伸びが良い－そのまま	0.755	0.401	0.138	0.750
融けあった－割れた	0.480	0.369	0.431	0.552
力強い－弱々しい	0.215	0.723	0.270	0.641
深い－浅い	-0.007	0.687	0.340	0.587
するどい－丸い	0.042	0.615	0.004	0.380
強弱がわかりやすい－単調	0.142	0.600	0.056	0.383
臨場感がある－イメージしにくい	0.240	0.573	0.343	0.503
迫力がある－ものたりない	0.390	0.532	0.303	0.528
聴きやすい－耳障り	0.019	0.380	-0.028	0.145
繊細な－雑な	0.014	0.125	0.903	0.831
抜けがよい－こもった	-0.000	0.034	0.634	0.404
澄んでいる－くもっている	0.350	0.068	0.499	0.375
バランスが良い－不安定な	0.227	0.193	0.409	0.258
因子寄与	0.203	0.198	0.146	0.547

(b) アンプ B の因子負荷量・・・音源 (1)

	迫力因子	美的因子	金属性因子	共通性
響く－つまった	0.906	0.310	0.047	0.918
伸びが良い－そのまま	0.781	0.280	0.133	0.695
抜けがよい－こもった	0.735	0.120	0.519	0.824
迫力がある－ものたりない	0.733	0.142	0.316	0.658
強弱がわかりやすい－単調	0.692	0.389	0.333	0.741
滑らかな－粗い	0.657	0.398	0.175	0.621
臨場感がある－イメージしにくい	0.642	0.541	0.103	0.715
やわらかい－甲高い	0.624	0.534	0.043	0.676
バランスが良い－不安定な	0.505	0.273	0.471	0.639
深い－浅い	0.558	0.440	0.195	0.543
繊細な－雑な	0.513	0.434	0.449	0.652
融けあった－割れた	0.148	0.909	0.179	0.880
聴きやすい－耳障り	0.354	0.700	-0.007	0.616
力強い－弱々しい	0.476	0.164	0.667	0.698
澄んでいる－くもっている	0.414	0.451	0.657	0.806
するどい－丸い	-0.036	-0.063	0.615	0.384
因子寄与	0.355	0.193	0.143	0.692

表 2 解析結果と対応する因子

		音源 (1)	音源 (2)	音源 (3)
深い－浅い	アンプ A	迫力因子	美的因子	
	アンプ B	迫力因子	迫力因子	
するどい－丸い	アンプ A	迫力因子	金属性因子	迫力因子
	アンプ B	金属性因子	金属性因子	金属性因子

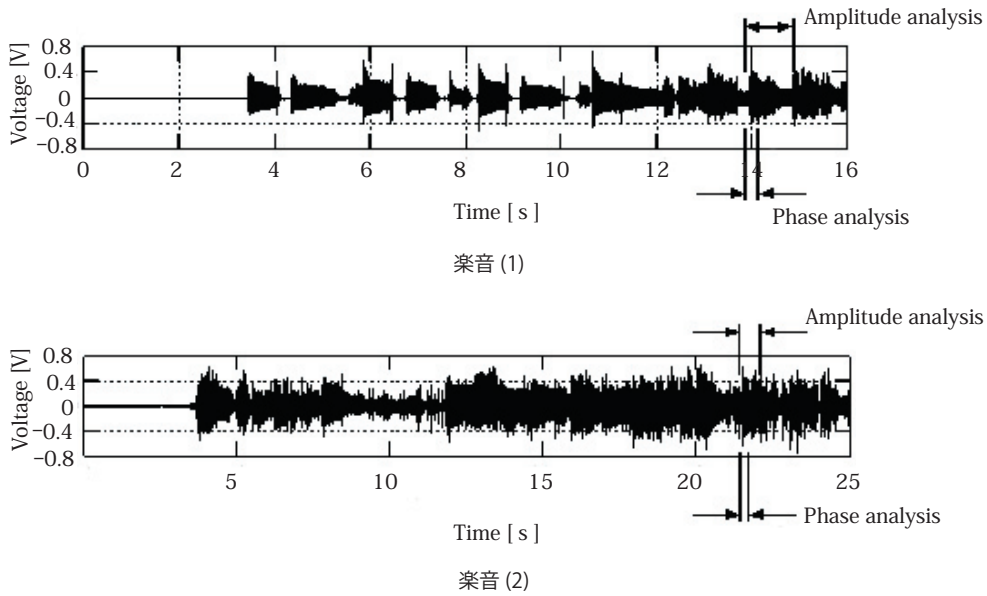


図8 音源の時間波形

に与える影響について、本法の分析力を試す意味合いも込めて調査した⁽¹⁰⁾。

3.1 解析条件

評価対象のコンデンサとコンデンサ非接続時に用いたケーブル、実験条件を以下に示す。

- アルミ電解コンデンサ (静電容量 6.8 μ F/50V)
; A社製 (大型), B社製 (小型)
- 楽音音源;
(1) Jennifer Warnes / Somewhere Somebody
(2) The Rippingtons / Summer Lovers
- RCA ケーブル; Acrolink 6N-D5050 II
- 音圧レベル; 75dB SPL

データ収録には CD プレーヤの代わりにデジタルレコーダを用い、コンデンサはデジタルレコーダ-アンプ間に接続した。デジタルレコーダ (96kHz, 24bits) から楽音信号を再生し、アンプ出力電圧を同期収録した。収録信号は同期加算法により 128 回平均することでノイズを軽減し、再現性を確保した。以上のようにして得られた信号をコンデンサ接続時と非接続時で WT を行なった。なお、コンデンサ非接続時には、上記の RCA ケーブルを用いた。図 8 に音源 (1), (2) の時間波形を示し、振幅解析と位相解析を行った部分を示す。

3.2 解析結果

図 9,10 にコンデンサ非接続時からコンデンサ接続

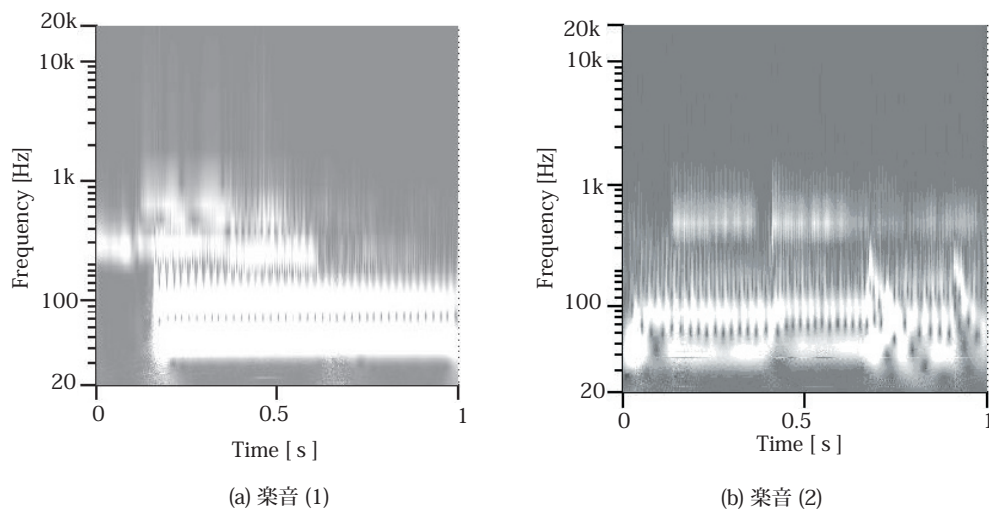


図9 コンデンサ A 有無での WT 振幅の差分

時の振幅および位相を差し引いた結果を示し、**図 11**、**12** にコンデンサ A 接続時からコンデンサ B 接続時の値を引いた結果を示す。これらの図よりコンデンサ A は、コンデンサ B と比べ振幅が大きく、立ち上がり良

いことが観測できることから、原信号との差は有るものの、それにより近い伝送性能を持つことが解った。また、高域で振幅差がみられないのは楽音の高域成分が少ないためである。

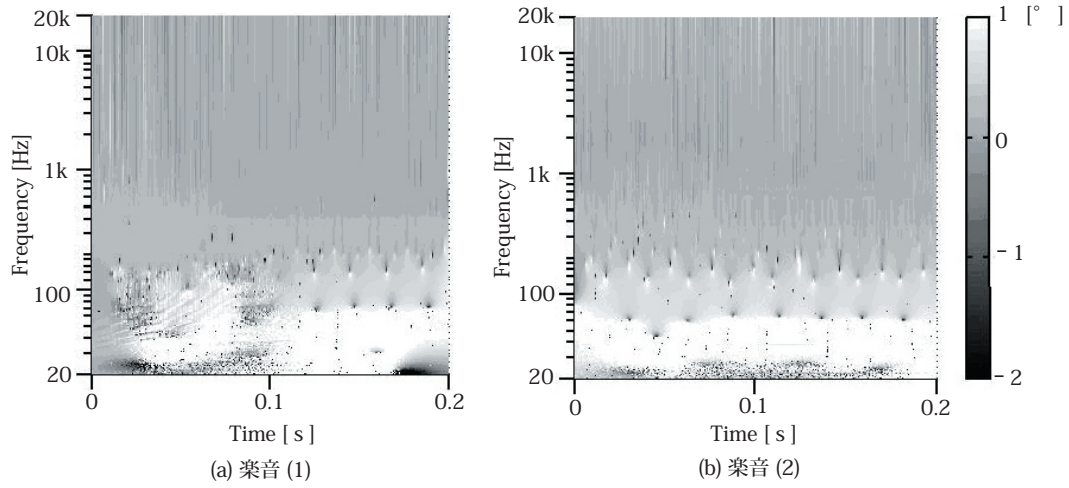


図 10 コンデンサ A 有無での WT 位相の差分

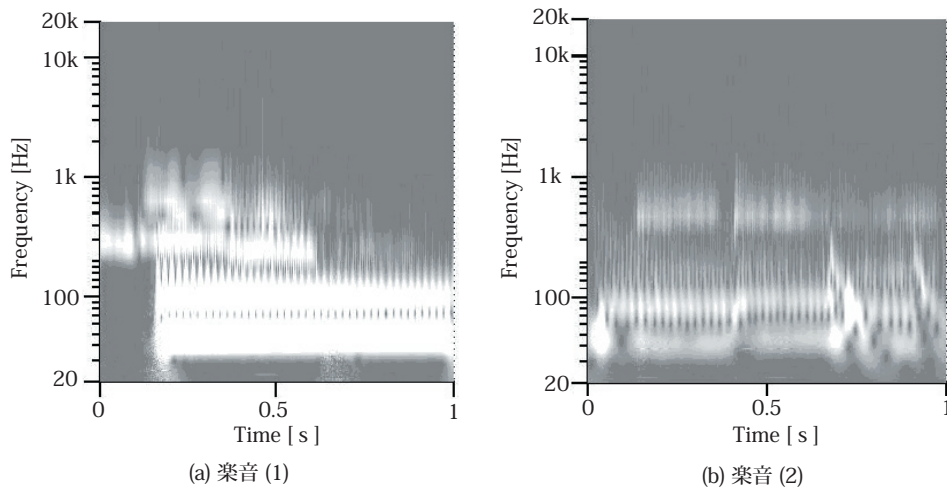


図 11 コンデンサ A と B の WT 振幅の差分

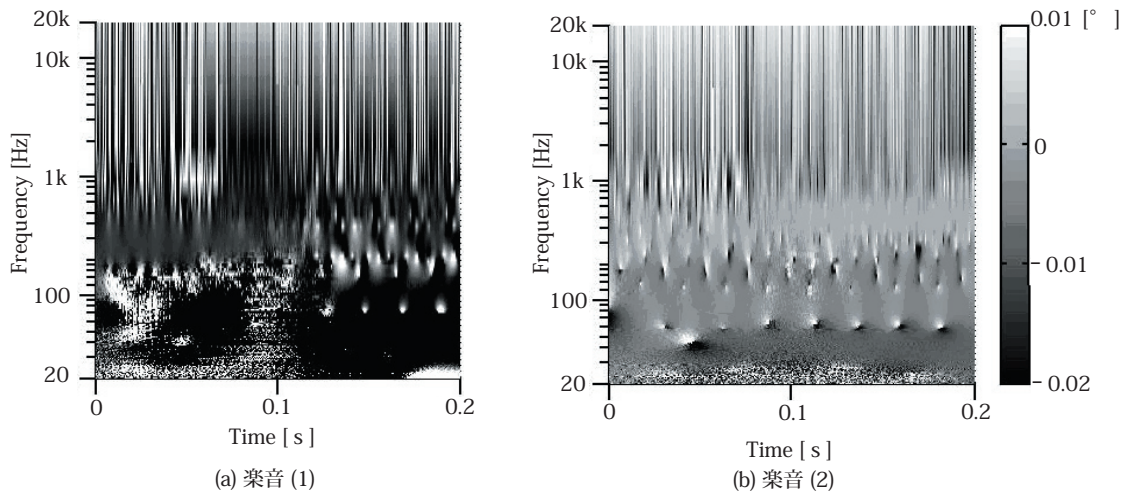


図 12 コンデンサ A と B の WT 位相の差分

3.3 差の原因

今回実験に用いた二種類の電解コンデンサのインピーダンス特性と等価直流抵抗 (ESR) を測定し、損失角を式 (4) によって算出した⁽¹¹⁾。

$$\delta = \tan^{-1}(2\pi fCR) \quad (4)$$

C: 静電容量 F, R: ESR Ω である。

これらのうち、インピーダンス特性はほぼ同等で、0.1 ~ 40kHz の帯域で大きな差は無かった。

図 13 に各コンデンサの ESR と損失角特性を示す。コンデンサ B (小型) は ESR が大きく、コンデンサ

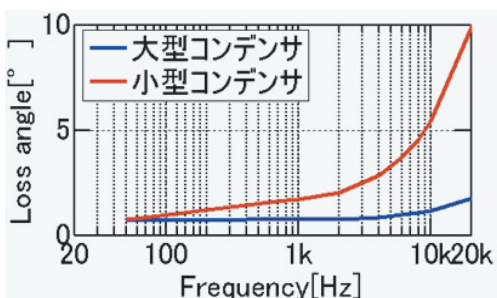
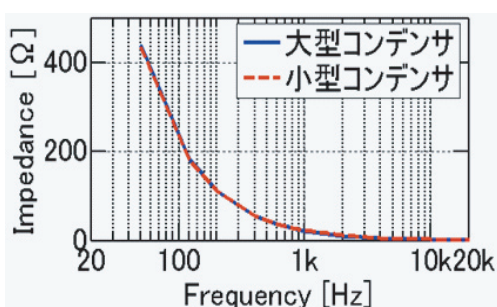
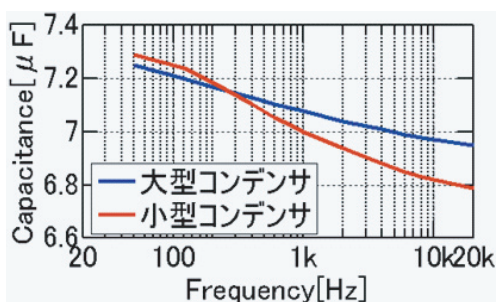
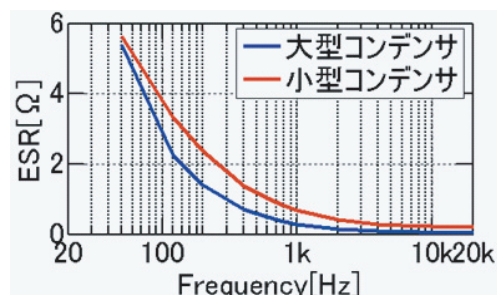


図 13 コンデンサの電氣的性能

A (大型) のほぼ 2 倍となる帯域もあり、伝送ロスが大きいことを示している。さらに B は損失角も大きく、WT による位相が遅れる傾向となった。また、損失角の違いにより立ち上がり特性の差が生じることから、瞬時の振幅差としてそれらが観測されることが考えられる。よって、ESR と損失角の特性差は音質差の一因であると考えられる。

3.3 聴感実験

実験は SD 法により行い、実験結果の因子分析を行った。楽音約 1 分間を 2 回ずつ、ブラインドテストによりコンデンサを切り替えながら再生した。以下に実験条件を示す。

- ・被験者；楽器演奏経験のある健聴者男子 15, 女子 5 名
- ・受聴位置での音圧レベル；75dB SPL

各音源、各コンデンサにおける被験者の得点間の相関関係より因子分析を行なった。その結果から美的因子、迫力因子、金属性因子を抽出した。表 3 に、有意差があり異なる因子に含まれる形容詞対を示す。例えば「迫力がある—物足りない」に着目すると、音源 (1) において聴感印象が異なることがわかる。

これらの結果を WT 解析結果と対応させると、音源 (1) では図 11(a) の低域におけるコンデンサ A での振幅の大きさが、因子分析の迫力因子に対応している。

表 3 分析項目

	非常に	かなり	やや	どちらでもない	やや	かなり	非常に	
澄んでいる								曇っている
響く								残響感がない
迫力がある								物足りない
伸びが良い								つまった
滑らかな								粗い
落ち着いた								甲高い
力強い								弱々しい
聴きやすい								耳障りな
臨場感がある								イメージしにくい
鋭い								鈍い
融け合った								割れた
深い								浅い
繊細な								雑な
抜けが良い								こもった
強弱がわかりやすい								単調
バランスが良い								不安定

また、音源(2)では図12(b)におけるコンデンサAの高域の位相が進んでいることが、金属性因子に対応している。

3.4 結果のまとめ

WTと聴感印象を対応付けた結果、コンデンサの音質差を視覚化することができた。

音源(1)の場合、コンデンサAの方がWTによる低域の振幅が大きく、迫力を感じる。また、音源(2)の場合、コンデンサAの方がWTによる高域の位相が進んでいる。これは立ち上がりの速さを示しており、金属感として認識される。これらはアンプでの検討結果とも矛盾がない。ただし、今回の実験では電解コンデンサとしての機能を必要とされない、伝送ケーブル途中で直列接続した場合の音質変化を論じているので、この点に問題がないとは言いきれない。実際に回路中に組み込まれ、コンデンサとして機能している場合の音質を評価観測する方法については今後の検討を必要とする。

4. ボタン押し音評価に関する検討

近年、自動車加速音など、騒音として扱われていたさまざまな音を設計するサウンドデザインが注目されている^{(12),(13),(14)}。機構動作音も製品の質の一部という考え方が浸透してきたためである。ここではカーオーディオ・メインユニットのスイッチボタン11種類の押し音のサウンドデザインとその評価について検討を行った⁽¹⁵⁾。まず、SD法により印象を抽出し、それらの因子とWTによる時間周波数解析との関連性を調査した。

このことにより、印象の時間周波数平面表現という可視化が可能となり、今後のボタン音設計に反映することができるようになると思われる。また、ボタン音の加工性を検証するため、印象の悪かったボタン押し音の特性を印象の良かったボタン押し音に適応制御で加工することにより印象が変化することも確認した。

4.1 実験条件

評価対象は6機種のカーオーディオ・メインユニットのボタン11種類である。データ収録は無響室で行なった。各ボタンを3回ずつ押し、メインユニットから30cm離れた位置でマイクロフォンによりその音を収録した。図14に各ボタンの収録信号を示す。ボタンを押したときの音(Push音)と離れたときの音(Back音)が観測できる。

4.2 心理音響指標

音に対する人の聴覚の心理音響学的特質を数値的に表そうとするものに心理音響指標(ラウドネス、シャープネスなど)がある⁽¹⁶⁾。このうち、ラウドネスは定常音についてISO 532Bで規格化されている⁽¹⁷⁾。しかし、ラウドネスは定常音に対する評価量であるため、ボタン音のような非定常音の評価には不十分である。そこで本研究では時間周波数構造と感覚量の比較を検討することにした。

4.3 解析条件と結果

図15~20にメインユニット別のWT結果を示す。左から順にDFT結果、プッシュ音、バック音のWT

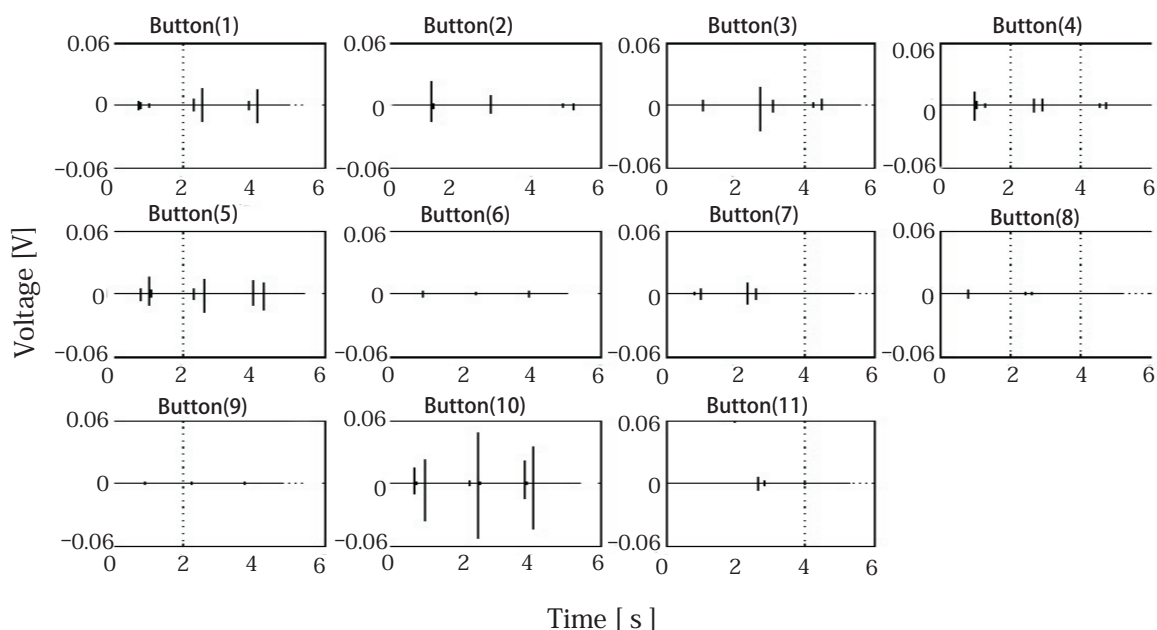
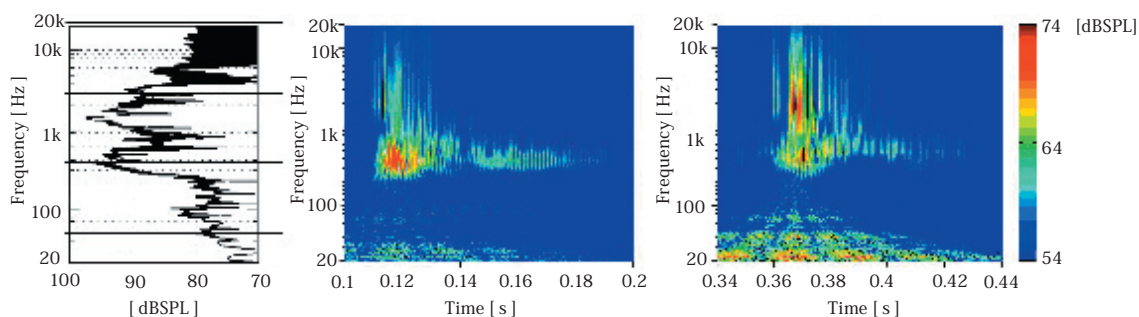


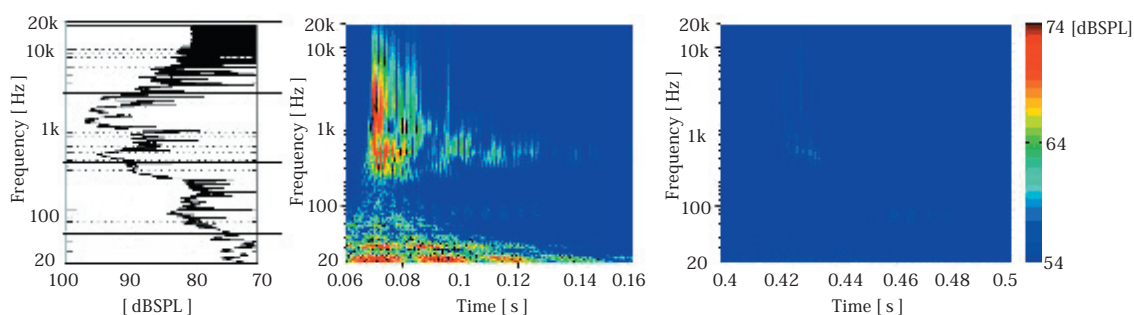
図14 収録信号

結果を示す。AWにはMorlet Waveletを使用した。「好き-嫌い」において高得点のボタン音は低域にパワーが集中し、得点が低くなるほど高域にパワーが集中す

る傾向を観測することができた。また、エネルギーの継続時間(何らかの共振に因り尾を引く)も得点に関連していることが観測された。



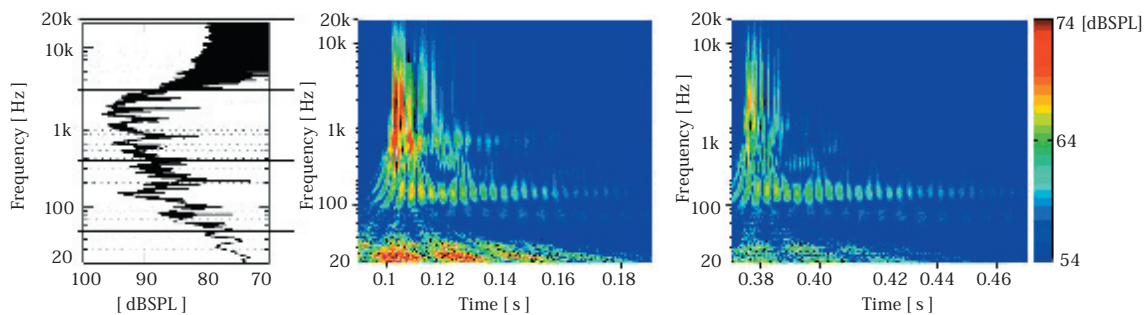
(a) ボタン 1



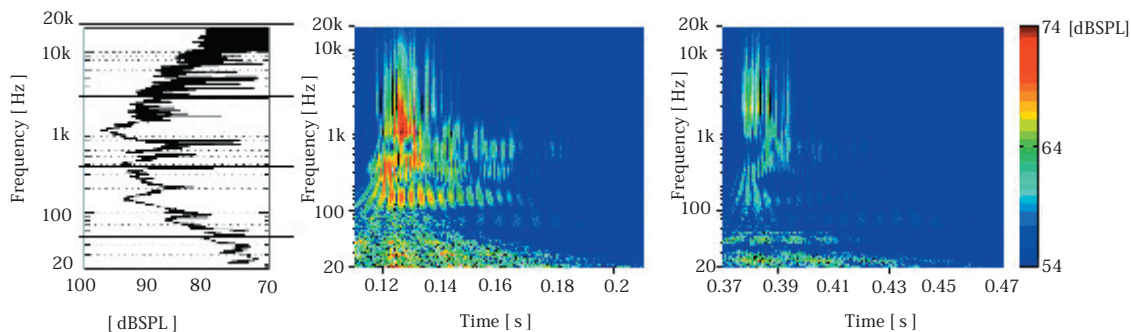
(b) ボタン 2

図 15 メインユニット 1 の DFT および WT による振幅特性；

(左)Push 音と Back 音の DFT, (中)Push 音の WT, (右)Back 音の WT



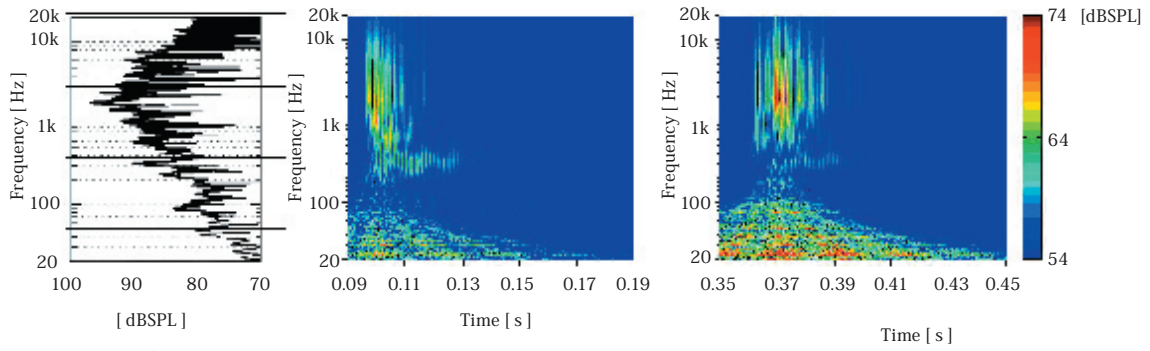
(c) ボタン 3



(d) ボタン 4

図 16 メインユニット 2 の振幅特性；

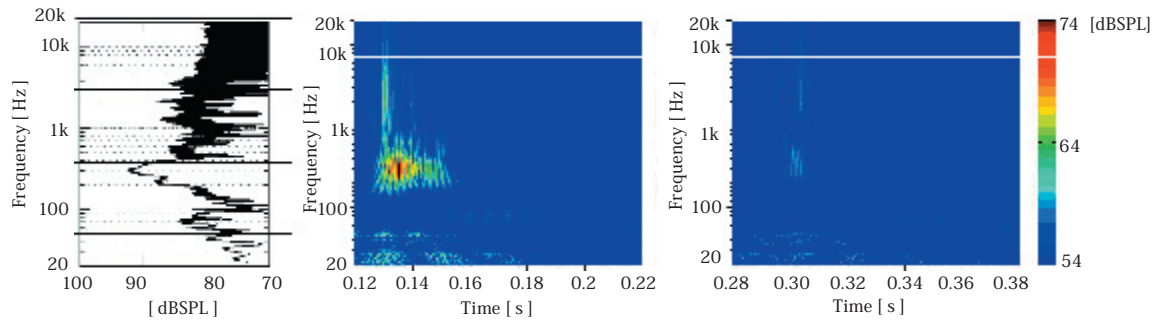
(左)Push 音と Back 音の DFT, (中)Push 音の WT, (右)Back 音の WT



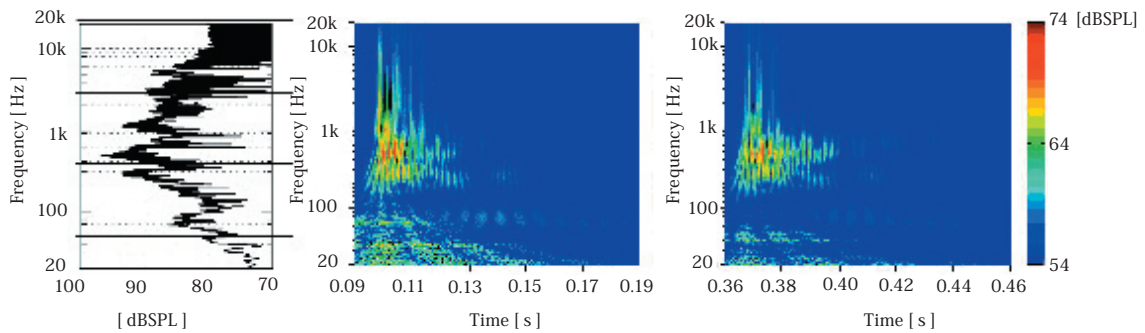
(e) ボタン 5

図 17 メインユニット 3 の振幅特性；

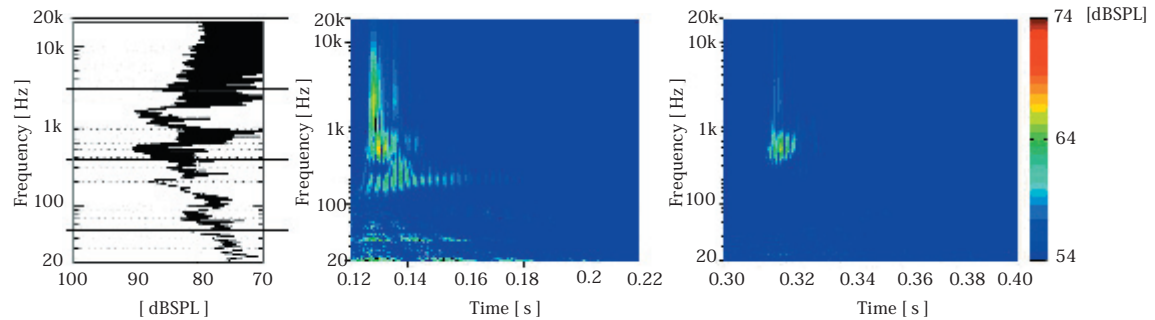
(左)Push 音と Back 音の DFT, (中)Push 音の WT, (右)Back 音の WT



(f) ボタン 6



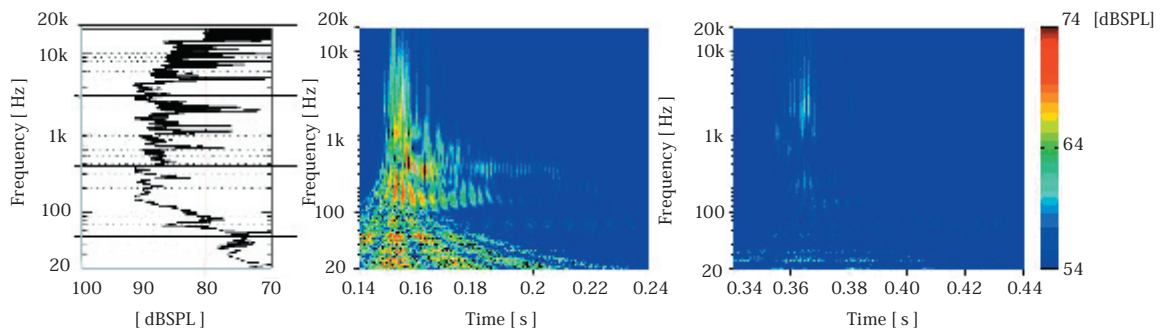
(g) ボタン 7



(h) ボタン 8

図 18 メインユニット 4 の振幅特性；

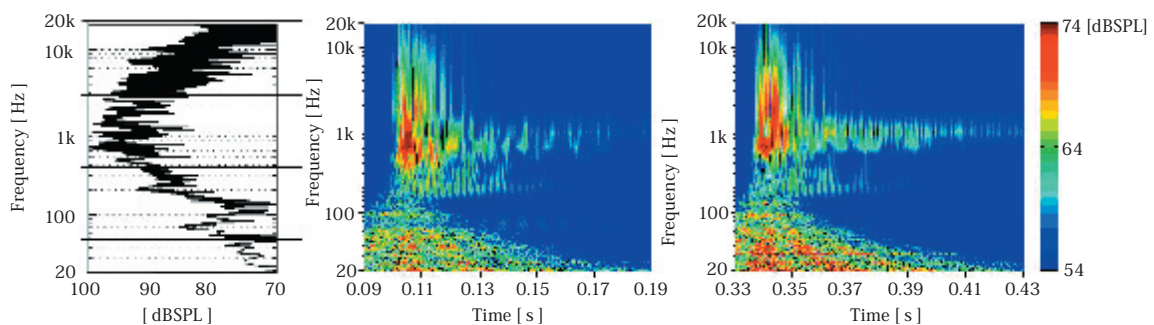
(左)Push 音と Back 音の DFT, (中)Push 音の WT, (右)Back 音の WT



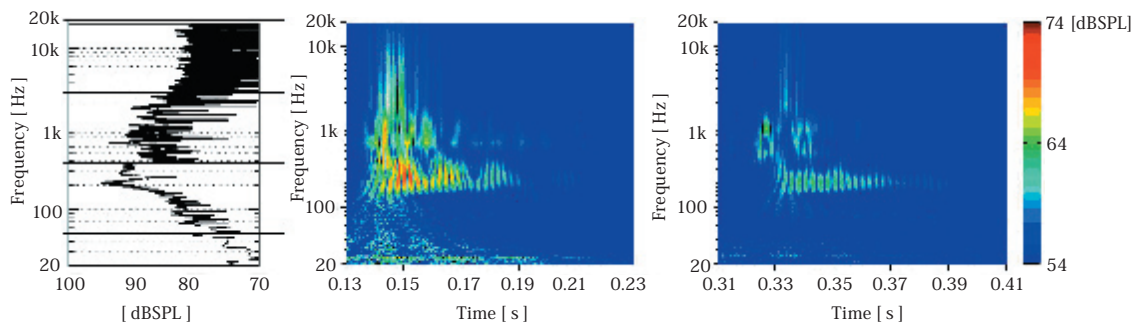
(i) ボタン 9

図 19 メインユニット 5 の振幅特性；

(左)Push 音と Back 音の DFT, (中)Push 音の WT, (右)Back 音の WT



(j) ボタン 10



(k) ボタン 11

図 20 メインユニット 6 の振幅特性；

(左)Push 音と Back 音の DFT, (中)Push 音の WT, (右)Back 音の WT

4.4 聴感評価

4.4.1 心理量解析

音の心理量としては「音の大きさ」、「音の高さ」、「音質・音色」があげられる⁽¹⁶⁾。「音の大きさ」は音圧レベルという物理量に対応し、「音の高さ」は周波数、「音質・音色」はスペクトル構造や時間変化などが関連している。これらは感覚量で考えたとき、感覚の次元と呼ばれている。しかし、その次元量は音の大きさや高さでは考えやすいかもしれないが、音質とした場合

は、「明るい」、「堅い」や「抜けた」などさまざまな次元が生じてくる。この結果を因子分析により、共通因子をみだし、それらを次元と関連させて、次元数を決定する。

4.4.2 聴感実験方法と結果

実験は健聴者 67 名に対して SD 法により行ない、ヘッドホンにより音を再生した。図 21 に聴感実験に用いた評価用紙を示し、図 22 に被験者の性別および年齢分布を示す。図 23 に実験結果を示す。まず、そ

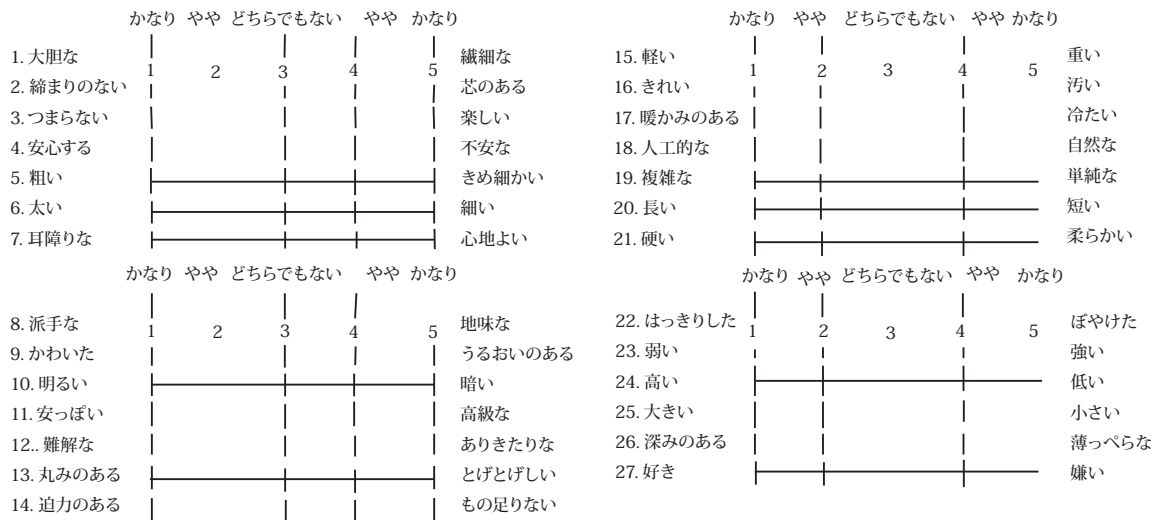


図 21 評価用紙

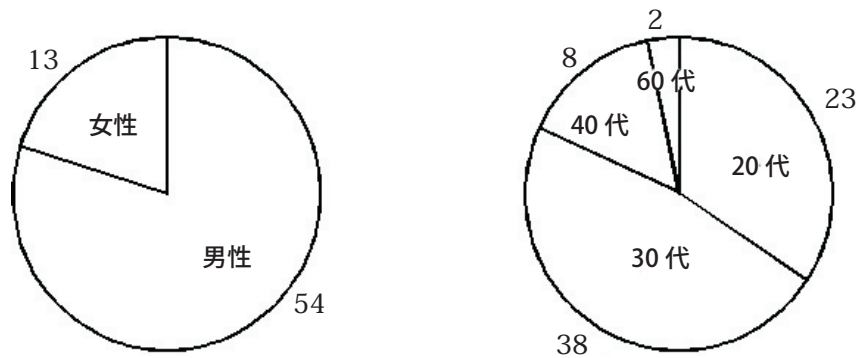


図 22 性別年齢分布

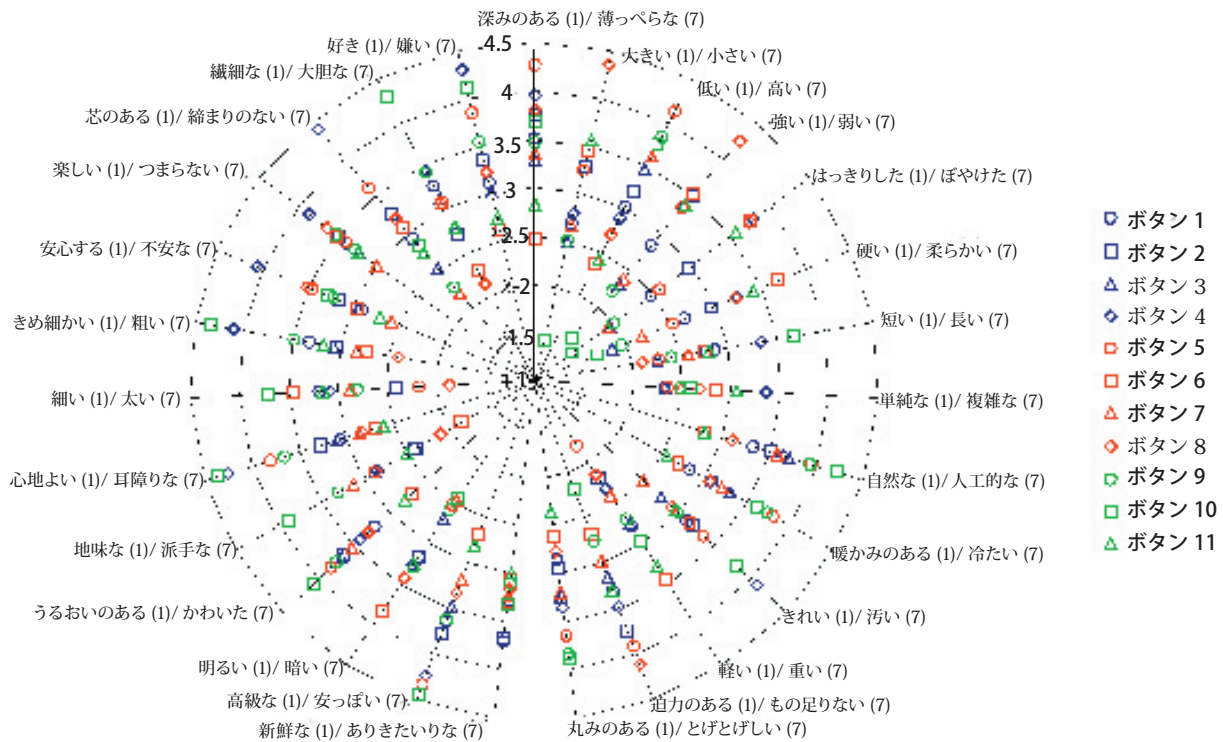


図 23 主観評価

それぞれの形容詞をその形容詞の最も印象の良いボタンおよび悪いボタンと対応付けた。差の大きい形容詞から順に示している。

ボタン(6)…暗い, 深い, 地味な, 柔らかい, 重い, 好き, 高級な, 低い, うるおいのある

ボタン(11)…丸みのある, 暖かみのある, 新鮮な, 自然な

ボタン(7)…きれいな, 楽しい, 安心する, 芯のある

ボタン(3)…単純な

ボタン(1)…ありきたりな, 単純な

ボタン(8)…小さい, 弱い, きめ細かい, 細い, もの足りない, 繊細な, 短い

ボタン(2)…なし

ボタン(9)…なし

ボタン(5)…軽い, 薄っぺらな, 高い, 冷たい

ボタン(10)…大きい, 強い, はっきりした, 迫力のある, 大胆な, 派手な, 硬い, 長い, 人工的な, 乾いた, 粗い, 太い, 明るい, とげとげしい, 安っぽい, 耳障りな

ボタン(4)…締りのない, 不安な, 嫌い, 複雑な, 汚い, つまらない, ぼやけた

ここで, ボタン(4)のback音のWTより100Hzから600Hzへのスイープ音が観測できるが, この分布が「締りのない」や「不安な」, 「嫌い」と対応していると考えられる。また, ボタン(3)にみられる低音の継続は聴感印象に影響せず, ボタン(10)の高音の継続は「長い」や「安っぽい」と対応していると考えられる。しかし, 形容詞間に相関があるため, これらの対応付けでは不十分である。

4.4.3 因子分析

前述の実験結果の因子分析を行い, WTとの対応付

けを試みた。それぞれのボタン音と因子の関係を調べるため, 27対の形容詞から有意差のあるペアの多い10対の形容詞を選定した。求めた因子負荷量と因子得点をそれぞれ表4, 図24に示す。因子抽出には主因子法, 回転にはバリマックス回転を行なった。第1因子から順に金属性因子, 美的因子, 迫力因子と解釈し, それぞれ得点が高いほど「硬い」, 「心地よい」, 「迫力のある」音であることがわかる。また, 累積寄与率は十分に満足している。図24より, 「好きな」ボタン音は金属性因子, 迫力因子の得点が低く, 美的因子の得点が高いことがわかった。また, 「嫌いな」ボタン音はそれぞれの因子得点が逆転することがわかった。このことは図15~20のWTの結果と対応している。

4.5 音質制御

最も印象の悪かったボタン(10)をLMS(最小二乗平均誤差, Least Mean Square)⁽¹⁸⁾アルゴリズムにより最も印象の良かったボタン音(6)へ近づくように適応信号処理を行ない, 同じ印象となるかどうかを調査した。適応フィルタのタップ数は512タップで, 所望信号をボタン(6), 参照信号をボタン(10)とし, フィルタ出力を観測した。図25に収束後のy(n)およびd(n)のWT結果を示す。この結果より, LMSアルゴリズムによって所望信号に近い分布へと変化したことがわかる。また, フィルタ出力では「好き」に分類されたボタン音に近い聴感印象であった。

4.6 結果のまとめ

ここでは, カーオーディオメインユニットにおける11種類のボタン押し音のサウンドデザインとその評価について検討を行った。まず, SD法により印象を抽出し, 時間周波数解析との関連性を調査した。

表4 因子負荷量

	金属性因子	美的因子	迫力因子	共通性
硬い / 柔らかい	0.91	0.33	0.33	0.97
はっきりした / ぼやけた	0.90	0.41	0.41	0.98
高い / 低い	0.86	-0.01	-0.01	0.90
地味な / 派手な	-0.63	-0.46	-0.46	0.88
心地よい / 耳障りな	-0.22	-0.14	-0.14	0.96
高級な / 安っぽい	-0.36	0.12	0.12	0.96
きめ細かい / 粗い	-0.09	-0.42	-0.42	0.95
迫力のある / もの足りない	0.15	0.95	0.95	0.92
強い / 弱い	0.65	0.74	0.74	1.00
大きい / 小さい	0.50	0.71	0.71	0.95
因子寄与率	36.41	26.48	26.48	94.90

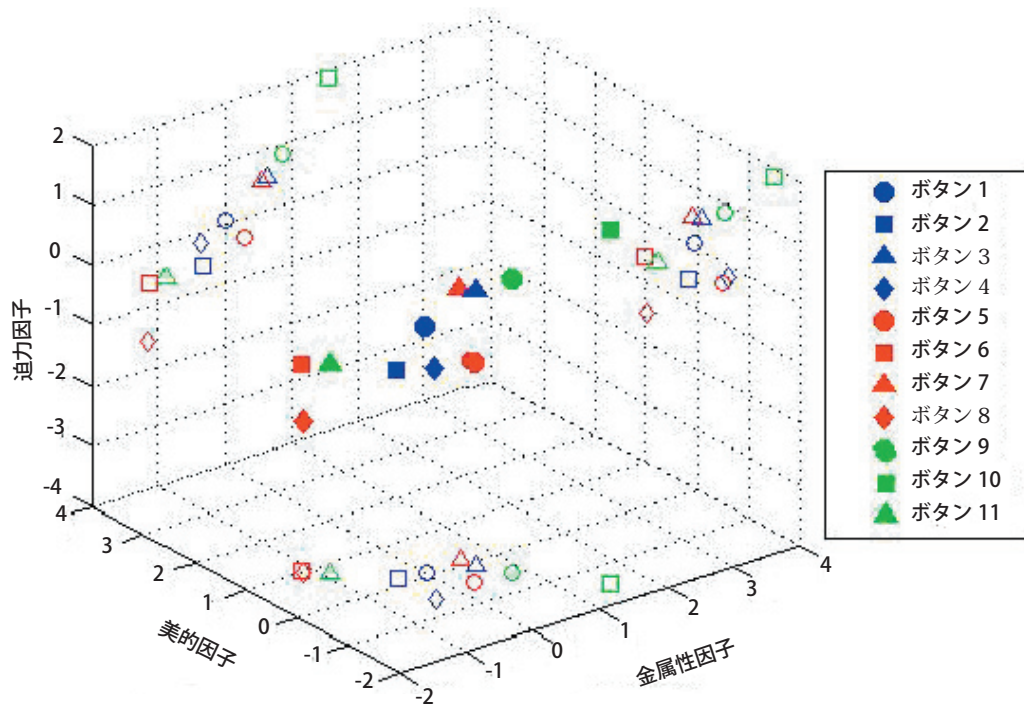
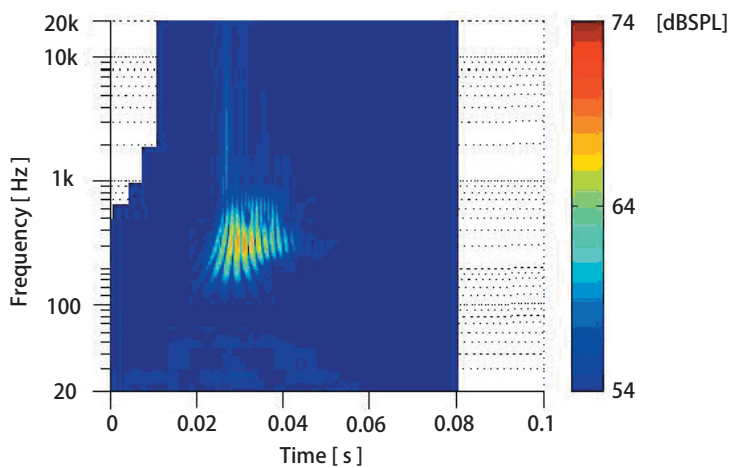
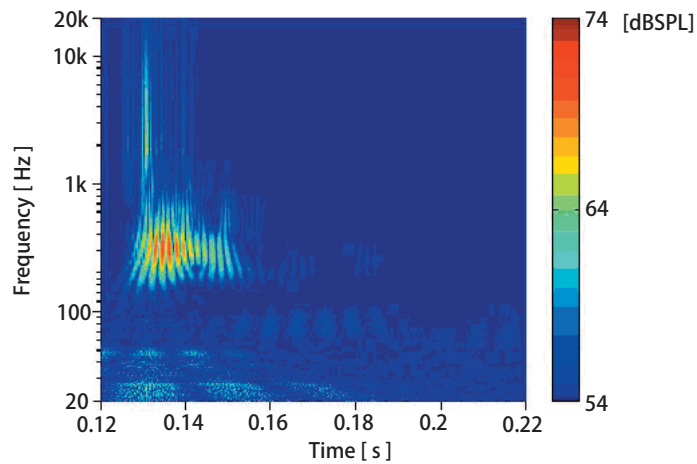


図 24 因子得点



(a) 適応後のボタン音 (10)



(b) ボタン音 (6)

図 25 信号処理後のボタン音 (12) と (6) の比較

WT 特性と聴感印象を対応付けた結果、低周波数のボタン音は好印象であり高周波数のボタン音は印象が悪く、両者とも金属性、美的、迫力因子に印象が分類されることがわかった。また、印象の悪かったボタン押し音の特性を印象の良かった

ボタン押し音に適応制御で加工することにより印象が変化することも確認した。

5. 考察

応答信号の Wavelet 解析による動特性評価に着目して、オーディオアンプおよび電解コンデンサの音質差評価、スイッチボタン動作音の適正評価に適用し、SD 法による聴感評価による因子分析結果と対応させた。その結果この動特性評価手法の有効性を確認することができた。即ち本法は、従来の静特性評価に比較して、いわゆる耳で聴く音の差を目に見えるデータの差として表現できる能力に優れていると考える。これは、実際に耳で聴く音楽なりメカ動作音そのもののエネルギーを高精度に時間 - 周波数成分に展開できることによる。

オーディオアンプの検討からは、まず 2 台のアンプ間の出力インピーダンス特性の違いによってスピーカユニットの逆起電力やスピーカシステムのパッシブネットワーク入出力インピーダンス特性、スピーカケーブルの伝送インピーダンス特性からの影響の受け方が異なり、そのためにスピーカ出力音圧周波数特性にブロードな複数のうねり方の、極く僅かな差が生じ、これが互いの音質キャラクタの違いの一因となっていることが解った。このことは、アンプの実用動作状態では、スピーカに対して必ずしも完璧な定電圧駆動を行ってないことを示しており、従来からオーディオ系設置の初歩的条件としていわれてきたアンプ-スピーカ間における、左右のチャンネルへの最短で等距離、同質といったケーブル接続設定の重要性を暗示している。さらに、ウーファとミッド・トゥイータとを各独立にアンプに接続するバイワイヤリングや、左右のスピーカユニット、ネットワーク各素子の定数ペアマッチングの有効性をも間接的に示唆するものである。

電解コンデンサの検討においては、供試コンデンサの挿入箇所が適切かどうかに関して、今少しの議論の余地があるが、ともかくも聴感音質差の原因を、試聴音楽でのエネルギー特性の差として捕らえることは可能であることが解った。2 種類のコンデンサの音質差の原因が、全て各々の ESR と損失角特性に直接的に

結びつくものかどうかは議論が必要と思われるが、コンデンサ B は広い周波数帯域で ESR 値が A に対しほぼ 2 倍の差があり、楽音試聴で感じる中域、低域部でのヤセた印象は、やはり ESR の大きさに主因があるといえそうである。電解コンデンサの本来の役目は、いわゆるカップリングやデカップリングであり、回路中での実使用状態で動特性評価を行う方法を今後も検討したい。また、高音質用途品種や、低 ESR 品とか種々のタイプの電解コンデンサもあわせて検討することが必要である。

ボタン押し音の検討では、収録した機構動作音を、WT を用いて時間周波数平面上に展開したエネルギー分布と、その音の好まれ方とを SD 法によって関連付けることができた。ここで評価の高かったボタン (6) は、国産最高級セダンのセンターコンソールに装着されるオーディオユニットのパワースイッチ部である。これは導入以来の足掛け 10 数年の間、客先の要望に合わせて操作感や動作機構の改良が続けられてきた歴史を持つものであり、その実績が今回の評価実験でも好成績であったことは大いに喜ばしい。しかし一方、搭載車両が仮に北米市場の大型トラックのような、全く車両の使われ方やユーザキャラクタが異なる場合には、動作音の狙いが全く違ってくことも予想に難くない。それは、例えば高級セダんに適した上品さや軽快感ではなく、むしろボタン (10) のような強さや大胆さをイメージさせる動作音が好まれることも有り得ると考えることができる。いうまでもなく、機構動作音も車両音と同様に静粛無音であることだけが理想とはいえ、その状態や場面、機能に適したサウンドデザインが求められている。さらに、Wavelet 解析手法は臨床医学分野での応用も活発であり、肺呼吸音や心筋電図での異常判定診断に適用され、web 上でも各種の報告が紹介されている^{(19),(20)}。

本研究で紹介した Wavelet による時間周波数解析手法は、楽音の再生音であれ、機械動作音であれ、その「好ましい音」を設計者自信がイメージし、デザインするための分析ツールとして、いっそう汎用的に利用されることが望ましい。

6. 謝辞

本研究は広島市立大学大学院との共同研究により進められたが、その契約着手に強力な口添えを頂いた MBG 本部長 波江野 章 常務取締役にお礼を申し上げます。また、アンプ・コンデンサの電気計測を行って頂

いた TAD ラボ 佐々木勝弘氏，スイッチボタン動作音の收音データを頂いた MBG OSS8 藤本裕一氏，研究準備をお願いしたオーディオ開発課菅原啓太郎氏，ならびに協力頂いた諸氏に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 蘆原，桐生：日音学誌，56，2，(2000)，pp.69-77
- (2) 今岡，大賀：日音学講論集，(2004.9)，pp.567-568
- (3) 石光：“Wigner 分布による非定常信号の時間周波数解析” 豊橋技科大博士論文，(1994.12)
- (4) 永田：“ウェーブレットの産業応用” エレクトロニクス (1995-11)，オーム社
- (5) 榊原：“ウェーブレット ビギナーズガイド”，(1995) 東京電気大学出版局
- (6) 新，中野：“図説 ウェーブレット変換ハンドブック”，(2005) 朝倉書店
- (7) 石光，他：“楽音を用いた音響機器評価に関する基礎検討”，信学技報 EA2006-30
- (8) S. Ishimitsu, K. Sakamoto, T. Yoshimi, K. Sugawara, K. Sasaki and H. Yanagawa :
“The study of audio equipment evaluations using the sound of music” ,AES 122nd Convention No.7120, Proceedings CDROM 8 pages, May, 2007
- (9) 難波，桑野：“音の評価のための心理学測定法”，(1998) コロナ社
- (10) 阪本，他：“楽音による音響用部品評価の検討”，日音学講論集，(2007.3)
- (11) 例えば：稲葉，“波形で学ぶ電子部品の特性と実力”，(1997) CQ 出版社
- (12) 石光，小林：“ウェーブレットによる自動車加速音の瞬時相関解析と聴感評価に関する検討”，日機学論集，72，719，C，pp.2094-2100，(2006)
- (13) 戸井：“快音設計のススメとその手順”，機会設計，48-2，pp36-45，Feb.，(2007)
- (14) 桑野：“音環境デザイン”，(2007)，コロナ社
- (15) 石光，他：“ボタン押し音評価に関する検討”，信学シンポジウム，B3-3，(2007-11)
- (16) E. Zwicker：“Psychoakustik”，Springer-VerlagBerlin Heidelberg.，(1982)
- (17) ISO 532：“Acoustics - Method for calculating loudnesslevel”，ISO，(1975)
- (18) B. Widrow and S. D. Stearns：“Adaptive signal processing” ,Prentice-Hall, pp.99-103, 1985
- (19) 臨床医学のためのウェーブレット解析：<http://www.uinet.or.jp/~ishiyasu/ch6/>
- (20) MATLAB による Wavelet 解析について：<http://oshiete1.goo.ne.jp/qa1162077.html>

筆 者 紹 介

好 美 敏 和 (よしみ としかず)

MBG 川越事業所 技術統括部 技術開発部。大森工場 研究開発部にてホール素子性能評価。所沢音響研究所にて高分子圧電体応用開発，音研 LS-PJ にて TAD/EXCLUSIVE スタジオモニタスピーカ開発。川越事業所にて車内音場制御手法開発，OEM-LEXUS サウンド開発，Ferrari F1 用コムシステム開発を経て，時間周波数解析手法開発に従事。兼務として，MBG 音質委員会委員長，パイオニア・カーサウンドコンテスト審査委員長。

石 光 俊 介 (いしみつ しゅんすけ)

広島市立大学 大学院情報科学研究科 准教授。平成 2 年から川越工場第 3 技術部にてデジタル信号処理応用技術開発を担当。平成 9 年退社後，大島商船高等専門学校，University of Southampton，兵庫県立大学を経て，現職。人間工学，認知科学などを講義する一方，時間周波数解析，サウンドデザイン，適応信号処理，体内伝導音認識について研究している。