

タイムドメインオーディオシステムの開発

Development of Time Domain Audio System

西川	彰	Akira Nishikawa
横山	勲	Isao Yokoyama
津森	克彦	Katsuhiko Tsumori
小脇	宏	Hiroshi Kowaki



要 旨

当社オーディオ技術力の向上とブランドイメージの強化を図るため、自社ブランドで本格的ホーム用オーディオシステムを開発・発売することになった。本開発に際し他社との徹底した差別化を図るべく、タイムドメイン社社長の由井啓之氏の提唱する「タイムドメイン理論」に基づいた商品開発を行った。タイムドメイン理論は従来のオーディオシステムの多くが、周波数特性を重視し、低い音から高い音までを出来るだけ平坦に再生すること、また歪みを低減する事などに注力し開発を行ってきたのに対し、スピーカの時間軸特性を重視しているのが特徴である。具体的には、入力された波形を忠実に再生することが音の再生について理想的であるとする考え方である。本稿では、今回開発したタイムドメインオーディオシステムの内容について紹介する。

Abstract

Fujitsu Ten made a decision to develop and market a full-fledged home audio system under its own brand, in order to improve its audio technology capability and strengthen its brand image. To thoroughly differentiate such system from those of other companies, we implemented the product development based on the "Time Domain Theory" advocated by Hiroyuki Yoshii, President of the Time Domain Corporation. The feature of this theory is that it stresses the time-base characteristics of the speakers, as opposed to most conventional audio systems which stress frequency characteristics and were developed with a focus on reproducing all sounds from low to high as evenly as possible, and at reducing distortion. Specifically, this theory represents the thinking that faithful reproduction of the input waveforms is the ideal for reproduction of sound. This paper describes the content of the Time Domain Audio System that was developed.

1

はじめに

当社はこれまで車載用を中心とした商品展開を行っていたが、このたびブランドイメージの強化と技術力向上を狙って、自社ブランドで本格的ホーム用オーディオシステムを開発・発売することになった。

このシステムは奈良のベンチャー企業であるタイムドメイン社の技術協力を得て実現したものであり、同社長である由井啓之氏の提唱する「タイムドメイン理論」に基づいた商品である。

由井社長は以前、オンキヨー（株）開発部に在籍しており、その時開発に携わったGRAND SEPTER(GS-1)がオーディオ業界で絶大な評価を受け、それ以来、オーディオ業界の著名人である。

2

タイムドメイン理論とは

従来のオーディオシステムの多くが、周波数特性を重視し、低い音から高い音までを出来るだけ平坦に再生すること、また歪みを低減する事などに注力して商品開発を行っているのに対し、タイムドメイン理論は時間軸特性を重視しているのが特徴である。従来でも時間軸に着目し、各スピーカーからの音の到達時間を揃えるなど、時間に着目した理論や製品はあったが、タイムドメイン理論はこれらをさらに徹底させ、入力された波形を忠実に再生することが、音の再生について理想的であるという考え方である。

スピーカーの周波数特性と時間軸特性の間は、フーリエ変換・逆フーリエ変換の関係にある。この周波数特性の中には、音圧周波数特性と位相周波数特性の2つがあり、音圧周波数特性がフラットになっても位相周波数特性が違えば音の聞こえ方は異なる。音圧周波数特性をフラットに近づけているスピーカーが数多く存在しているにも関わらず、それぞれが千差万別の音をしているのは、このためである。音を忠実に再現するためにはインパルスを入力した場合、各周波数の音が同じタイミング・同じレベルで最短時間発音する、つまり入力されたインパルスが忠実に再生されるのが理想であるというのが、タイムドメイン理論の考え方である。2000年5月に発売されたタイムドメイン社製筒型スピーカー「Yoshii 9」もこの理論に基づいて開発されたスピーカーである。（図-1）



図-1 Yoshii 9
Fig.1 The "Yoshii 9"

3

スピーカのあり方について

スピーカの音作りについては大きく分けて2つの方向がある。

一つは「スピーカは楽器である」という捉え方であり、もう一つは「スピーカはトランスデューサ」である、つまり単なる変換器であってそれ自体はいっさい音に味付けをしないという考え方である。結論からいうとスピーカのあり方についてはおそらく「聴く人が楽しければ良い」という事に尽きると思われる。

音はご承知の通り趣向品である。食べ物でもお店によってそれぞれの個性があり、また食材の旨みを楽しむ人、ファーストフードを旨いと感じる人など千差万別であり、オーディオについても全く同様のことがいえる。オーディオを食べ物に例えると、食材の善し悪しとはCDなどに録音されている音楽やその録音状態、イコライザやサラウンドなど再生音の加工処理は調味料、再生機材を選び部屋にセッティングして音の調整を行うのが調理と言いつ換えることが出来る。

この音に対する趣向は各国の食文化が違うのと同様、その人が生まれてからどういった音楽への接し方を行ってきたかという経験にも大きく依存する。例えば自分がピアノを長く演奏しており、表現力を意識して鍵盤のタッチ感に大変注意を払っていれば、響きが多くてタッチ感が分かりづらい録音よりも響きの少ないオンマイク録音のほうがひとつひとつの音が聞き取りやすく、また採譜もしやすく好きだという人もいるだろう。また、コンサートホールで音楽を聴く機会が多いので包まれるようなあたたかい響きが多く含まれている方が好きだという人や、チェロやバイオリンを演奏している人の中には自分の耳で刺激的な音を聴きつけているので、通常の録音よりもマイクを近づけさらにイコライザで低音が強調されている方が生々しいと感じられる方もいる。そしてオーディオファンの方には自分が長く聞き慣れたスピ

ーカと違うスピーカの音を聞くと違和感を感じられる方などもいる様である。

このように人がオーディオに求める音の方向性は多種多様であり、スピーカにもそれぞれのニーズに合った音があるべきだと考える。こういった音の趣向について考える際に、一度実際にスピーカから再生される音が何の音なのかを考えるために、再生音の伝達関数について振り返ってみる。

図-2は音が楽器から発せられてそれがCDとなり、その音をリスナーが聴くまでの伝達関数を大まかに表したものである。

ここで、もし原音の忠実な再生を目指そうとすると、

$$M(f)R(f)PI(f)A(f)S(f)R(f) = 1$$

というのが理想的ということになる。

まずこのうちレコーディングに関係するのは $M(f)R(f)$ である。CDには、楽器が放った音がホール等の空間を経てマイクロフォンに入り、それがレコーディング機器を通して編集された音が収録されている。ここで注意したいのが、収録されている音にもさまざまな音の傾向があるということである。まずはマイクロフォンのセッティング問題である。レコーディングエンジニアは彼らの技術を駆使して彼らの考える最適なレコーディングを行うわけであるが、天井からマイクロフォンを吊り下げ、楽器とホールの響きを一緒に録音するという方法もあれば、マイクを楽器のすぐそばに置いて楽器の響きだけを録音し、場合によっては後で電子リバースを付加するという方法もある。さらにその録音された音を編集する場合、モニタリングするスピーカの音の傾向が違えば、その音を聴きながらイコライジングされて出来る音は当然千差万別のものとなる。つまり $M(f)R(f)$ が必ずしも1に近くなっているとは限らないということである。

次に再生側の $PI(f)A(f)S(f)R(f)$ についてであるが、一般的に伝達関数が1に近い順に並べると、 $PI(f)A(f)S(f)R(f)$ の順

になる。特に一般の家庭では部屋の伝達関数を完全に1にすることは不可能なので、全ての伝達関数1を目指すことは現実的に無理がある。またレコーディングで用いられるモニタースピーカにはある程度固有の響きがあり（つまり伝達関数が1ではない）、これが加わった状態でレコーディング・編集が行われると、伝達関数が1に近い（つまり響きが無い）スピーカでそのソフトを再生した場合、今度は響きが少なく、寂しい音になってしまう可能性が高くなってしまふ。しかしこういったさまざまな条件が存在する中で我々は、響きが増える（伝達関数が1から外れる方向）とそれだけ細かい信号はマスクされて再生されにくくなるという側面があること、また特にスピーカ再生において一度崩れた伝達関数を完全に修復する（つまり1から外れた伝達関数を1に戻す）ことはほぼ不可能であること、そしてさきほどの伝達関数全体がシンプルになる（つまりあとは部屋のチューニングだけが支配的という状態になる）という意味でもスピーカの伝達関数=1を目指すことは、1つの合理的な方向性であると考えた。そして最大のポイントとしては、音に関する芸術性はアーティストとレコーディングエンジニアにまかせ、逆にスピーカはこれらに味付けをしないことに特化した方が、本当にすばらしい演奏・録音をされているものがベストの状態再現出来るはずであると考えこれをコンセプトとして商品開発を行った。

4 タイムドメイン理論から見た従来スピーカの課題

このタイムドメイン理論の視点で従来スピーカを見た場合の課題について考察してみる。まずタイムドメイン理論の理想的な姿とは何かというと、先ほど述べたとおり伝達関数が1、つまりスピーカのインパルス応答がインパルスのまま再生されるということである。この見地から、まずインパルス応答に何が起因して波形を崩した

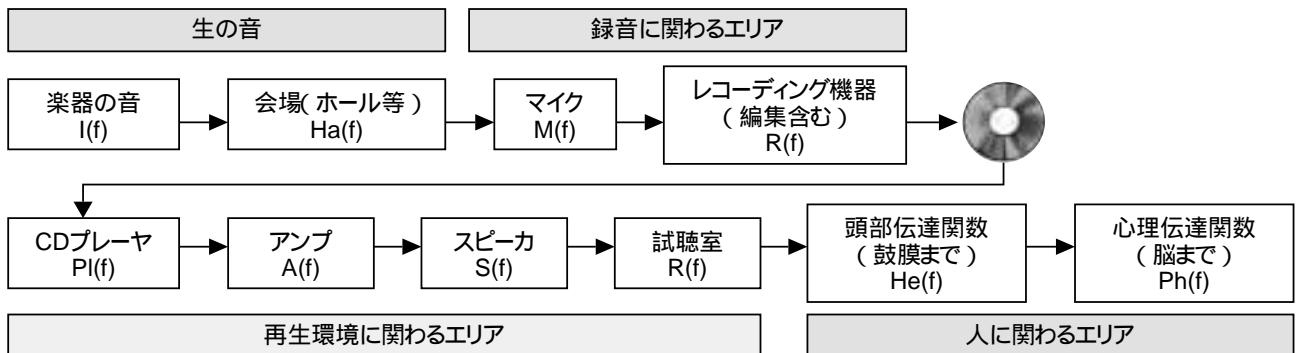


図-2 音が発せられてから人が知覚するまでの伝達関数

Fig.2 Transfer functions from emission of sound up to perception by humans

り、余分な信号を加えているのかを考えてみる必要がある。

4.1 スピーカボックスの問題

まずスピーカの形状に着目してみる。従来の多くのスピーカは箱形であるが、これは向かい合う平面の間で定在波が発生する事や箱材料の持つ固有振動などによって、スピーカ固有の響きが存在する。定在波は元の信号に対して遅れて発生する信号であり、また録音されている信号ではなくスピーカによって生成された信号であるため、これは時間軸上でみた場合入力信号に対してノイズ成分と見なすことが出来る。また平らな板は寸法に対応した固有振動を起こしやすいことなどもこれと同様にノイズ成分と見なすことが出来る。さらにスピーカの取り付けられている平板バッフル面によって、スピーカユニットから発生した球面波がバッフル面の角で回折効果によって形が崩れる。つまり試聴位置で到達する波の到達時間に不正確さが生じることになる。これらがインパルス応答を崩す要因となる。(図-3)

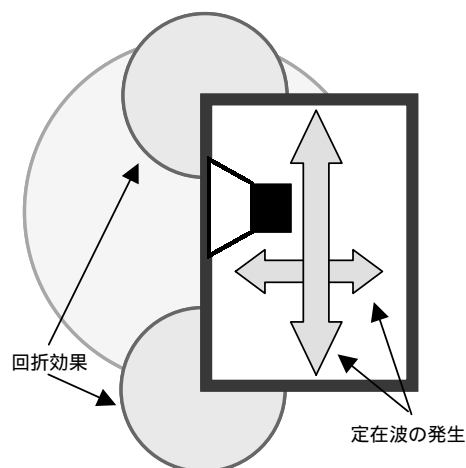


図-3 従来スピーカボックスの問題点

Fig.3 Problem points with the conventional speaker box

4.2 スピーカユニットの取り付けに関する問題

また多くのスピーカは、スピーカユニットが直接エンクロージャにネジ止めされているが、この場合スピーカユニットの振動がスピーカユニットフレームからそのままエンクロージャに伝わり、エンクロージャから固有の響きを発生させる。この響きは当然スピーカから発せられた音に対して遅れて発生するわけであるから、これもまたインパルス応答を崩す要因の一つになる。

4.3 マルチウェイユニット構成

周波数特性を出来るだけ広く平らにしようとすると、スピーカの数を増やすことは大変有効であるために、マ

ルチウェイユニットのスピーカは現在の主流となっている。しかし球面波が複数のユニットからそれぞれ広がっていく場合、試聴位置にそれぞれの波が同時に到達する必要があるが、これを完全に調整する事は難しい。例えばツイータがスコカの真上20cmの所に設置されたスピーカからスコカの軸上で2m離れて試聴した場合、ツイータは約29 μ s遅れる。これは例えばCDのサンプリング周波数である44.1kHzで換算すると約1サンプル分の遅れに相当する。つまり1本の入力パルスに対してスピーカユニットの帯域毎に1サンプルずれて音が到達することになる。

さらにマルチウェイユニットの場合、各ユニットに入力される信号を周波数帯域分割するためのネットワーク回路が必要になるが、このネットワーク回路も位相特性を崩す、つまりインパルス応答を崩す要因になる。一例として $f_c=3\text{kHz}$ のネットワーク(2次LPF/HPF)に3kHzの正弦波1波を通した場合の入出力信号遅れを図-4に示す。

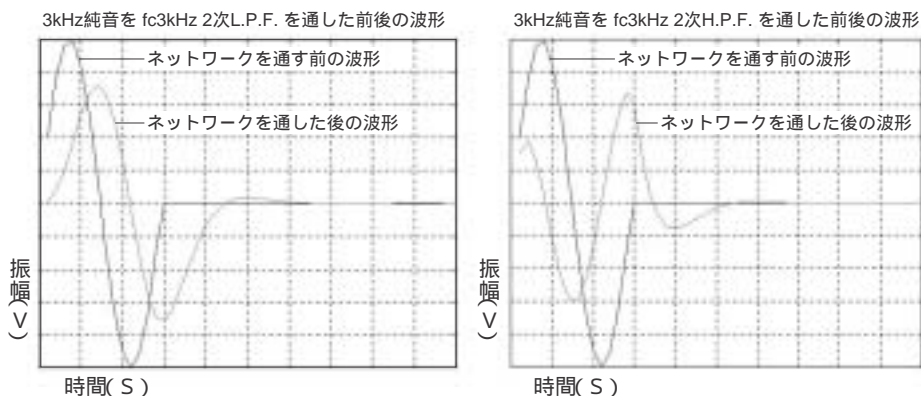


図-4 ネットワーク波形比較

Fig.4 Comparison of network waveforms

これはネットワークを構成するL.P.F.とH.P.F.に入力された信号と出力された信号を表している。これを見ると出力波形が崩れてさらに同じ周波数(3kHz)においてはL.P.F.とH.P.F.を通過した後で約8サンプル($f_s=44100\text{Hz}$),つまり $181\mu\text{s}$ (5.5kHz の1波長に相当)もずれた信号が空間で重なり合っていることになる。結果としてこれらの合成波形は元の波形から大きく変わった形になっている。(図-5)

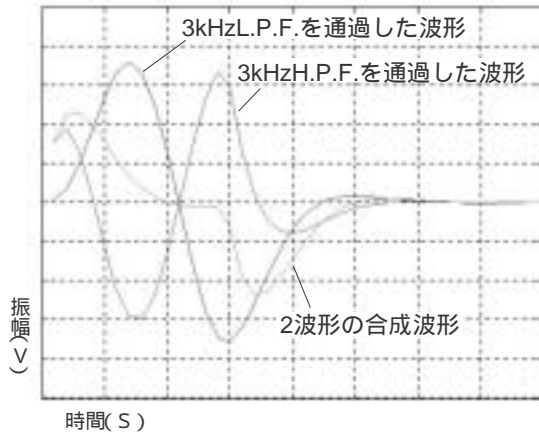


図-5 ネットワーク出力の合成波形
Fig.5 Synthetic waveform of network output

5

スピーカ概要

これらの問題点をクリアするため、今回開発したスピーカでは次の特徴を持たせた。

5.1 フルレンジ・シングルコーンユニットの採用

シングルコーンスピーカの音がいいというのはオーディオマニアからはよく言われることであるが、現実にはオーディオ機器や音楽ソフトのワイドレンジ化に伴って再生周波数帯域の狭いシングルコーンよりはマルチウェイの方が好まれる傾向が強い。しかしシングルコーンは前述の通り位相特性を良くするには有効であるため、今回はこのシングルコーンをユニット径・振動系質量・エンクロージャ容積等の最適化や構成部材の吟味を行うことで出来るだけ再生帯域を伸ばしながら、位相特性の良さを生かす方向で検討を行った。

5.2 卵形形状のエンクロージャ採用

インパルス応答に余分な響きを付加する要因の一つであるエンクロージャ内部での定在波を最小限にとどめるため、内部で平面の無い卵形を採用した。卵形は自然界で大変剛性が高い形状であるため、固有振動が発生しにくい点も有利である。さらにこの形状だとスピーカユニットから球面波が拡がっていく課程に置いて、パツフル面がほとんど邪魔にならないため、球面波形が崩れるのを最小限にとどめることが可能になる。

この卵形形状エンクロージャの有効性確認のために実施した実験データの一例を示す。(本実験は、今回のスピーカ自身ではなく、実験用に試作したもので実施している。) 本実験は、同一素材のボックスを立方体形状と卵形形状で作成し、そのボックスに同一のスピーカユニットを取り付けてデータを測定したものであり、図-6はインパルス応答、図-7は立下り累積スペクトラムでの比較を行

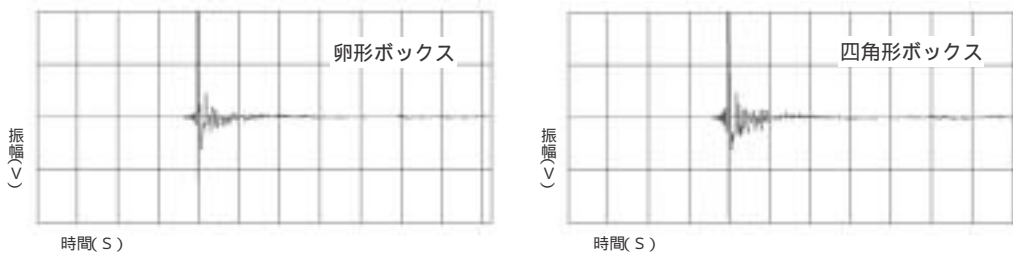


図-6 卵形ボックスと四角形ボックスとのインパルス応答比較
Fig.6 Comparison of impulse responses of ovoid box and tetragonal box

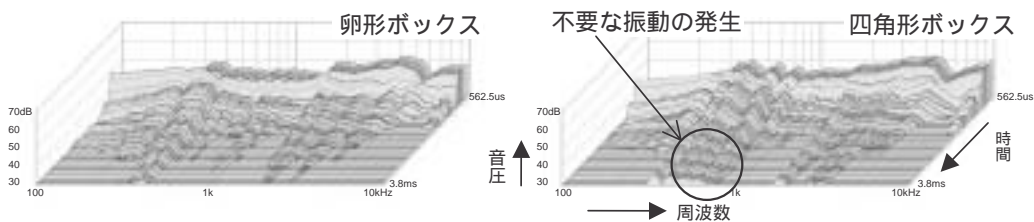


図-7 卵形ボックスと四角形ボックスとの立下り累積スペクトラム比較
Fig.7 Comparison of cumulative spectra of ovoid box and tetragonal box

っている。本データのインパルス応答結果から四角形ボックスの方が余分な振動が多いことがわかるが、立下り累積スペクトラムの結果からも四角形ボックスは300~700Hz付近に大きな不要振動が続いていることがよくわかる。これらの結果から、不要な音の発生を抑制することに対する卵形ボックスの有効性が確認できた。

5.3 スピーカユニットのステーへの取り付け

スピーカユニットの取り付けは通常スピーカユニット周辺をエンクロージャにねじ止めするという構造がほとんどであるが、今回のスピーカではステーに取り付ける構造を採用した。(図-8)



図-8 TD 512の内部構造
Fig.8 Internal structure of TD 512

これはメカニカルアースの考え方に沿っている。電気回路においても「1点アース」にしてグランドとなるポイントを明確にすることによって、不要なノイズが他の回路に流れ込んでS/Nを低下させるなどの悪影響を抑える方策を用いるが、今回我々が用いた構造は基本的にこれと同じ考え方で、スピーカコーンの振動をスピーカフレーム・ステーを通して床に落とし、スピーカ内部で余分な振動音を発生させないための配慮を施した。今回はさらにスピーカユニット背面に約3kgの「アンカー」を取り付けた。これはスピーカユニット背面を慣性重量によって固定する、つまりメカニカルグランドにするという考えで、スピーカユニットが空気を押す際の反作用が起こるユニット背面(ヨーク・マグネット部)をがっちり支え、スピーカコーンがしっかりと空気を押すことができるようにしている。これによって特に中・低音部の音の立ち上がり、立ち下がりのスピード感を向上させている。

5.4 エンクロージャのフローティング

さらにスピーカユニットからの不要振動がエンクロージャに伝わるのを最小限に抑えるため、今回はエンクロージャを前述のスピーカユニットとステーに対してフローティング構造を取った。具体的には気密を保ちながら個体同士の接触を絶つという考え方にに基づき、スピーカユニットやステーとエンクロージャの間に緩衝剤を挟みこむという方策をとった。

このフローティング構造の有効性確認のために実施し

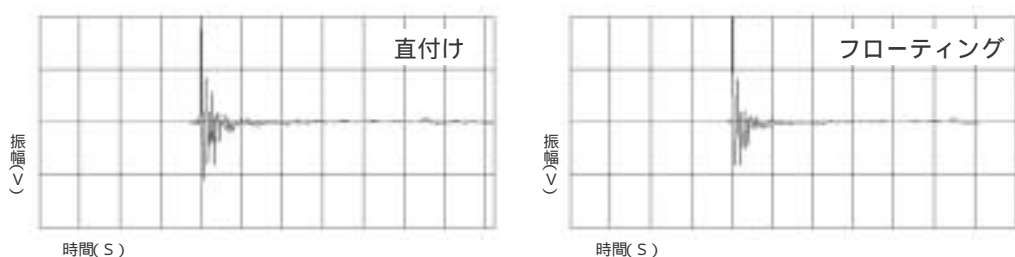


図-9 直付けとフローティングとのインパルス応答比較
Fig.9 Comparison of impulse responses of surface-mounted and floating types

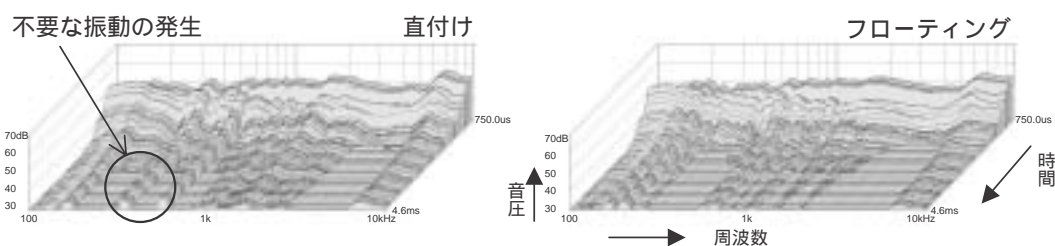


図-10 直付けとフローティングとの立下り累積スペクトラム比較
Fig.10 Comparison of cumulative spectra of surface-mounted and floating types

た実験データの一例を示す。(本実験は、今回のスピーカ自身ではなく、実験用に試作したもので実施している。)本実験は、同一素材・形状のボックスに、同一のスピーカユニットを直接ねじ止めしたものとフローティングさせて取り付けたものを作成し、それぞれのデータを測定したものであり、図-9はインパルス応答、図-10は立下り累積スペクトラムでの比較を行っている。本データのインパルス応答結果より、フローティング構造のほうが余分な振動が少ないことがわかるが、立下り累積スペクトラムの結果からも直付けタイプは300Hz~500Hzに大きな不要振動が続いているのがよくわかる。これらの結果から、不要な音の発生を抑制することに対するフローティング構造の有効性が確認できた。

これらの技術を取り込んだ今回のスピーカの主な仕様は次の通りである。

再生周波数特性(-10dB)	: 40 ~ 17kHz
インピーダンス	: 6
音圧レベル	: 81.5dB / W・m
許容入力(定格 / 最大)	: 30W / 60W
外形寸法(mm)	: W286 × H372 × D364
質量	: 14.2kg

6

アンプ概要

本システムを開発するにあたり、スピーカの能力を最大限に発揮するためアンプについても同時開発を行った。以下にその概要を示す。

6.1 電源部、アンプ部のセパレート化

本アンプは、円錐形状のアンプ部と円柱形状の電源部に分かれており、電源部の上にアンプ部を載せられる形にデザインされている。

通常このクラスのアンプでは電源部とアンプ部が一体形状となっているものが一般的である。しかし、トランス自身が発生する不要振動がアンプ回路に伝わりやすく、それにより音声信号に不要振動が乗ってしまい音質を劣化させるためセパレートの構造とした。

6.2 アルミ材筐体の採用

本製品では振動を排除することに主眼を置いて開発を行った。通常筐体部には板金材が用いられるのが常であるが、下記の理由によりアルミ材を用いることとした。

(1) 板金では板厚に限界があり、それ自身が振動してし

まう恐れがある。

(2) 成形性に欠けるためデザイン面で自由度が少ない。

(3) 発熱源であるパワーICをアンプ部筐体に直接ネジ止めしているため、筐体が放熱板を兼用している。

また、先にも記したがアンプ部に関しては円錐形状とすることにより、筐体剛性を高めることが出来た。更には独創的なフォルムを生み出すことにも寄与した。

6.3 回路の簡略化

録音されている音の情報を味付けせず、出来るだけ忠実に再現するというタイムドメイン理論に基づき、内部回路においても簡略化を図った。他社製品アンプに見られるようなトーンコントロール、イコライザなどは一切排除し、単純に音を増幅するという事だけに主眼を置き開発を行った。また入力は1系統、コントロールはボリュームのみと機能面においても最低限に絞ることとした。これらのことにより飾り気の無い非常に素直な音を再現することができ、本システムのスピーカを再生するに最適なアンプであると言える。

これらの技術を取り込んだ今回のアンプの主な仕様は次の通りである。

定格出力	: 30W × 2ch(T.H.D.=1%時)
入力インピーダンス	: 10k
負荷インピーダンス	: 6 以上
再生周波数特性(-3dB)	: 10 ~ 100kHz
高調波歪率	: 0.05%以下
外形寸法(mm)	: 本体部 W286 × H372 × D364 電源部 W215 × H 97 × D187
質量	: 本体部 2.6kg 電源部 3.3kg

7

音響特性

このスピーカの音響特性は次の通りである。

7.1 インパルス応答

今回開発したTD 512のインパルス応答を図-11に示す。この特徴としては、他のスピーカと比べてまずプリエコーがほとんど無い点、そしてオーバーシュートが少ない点があげられる。つまりほとんどの周波数が同位相で立ち上がり、立ち下がっていることが分かる。

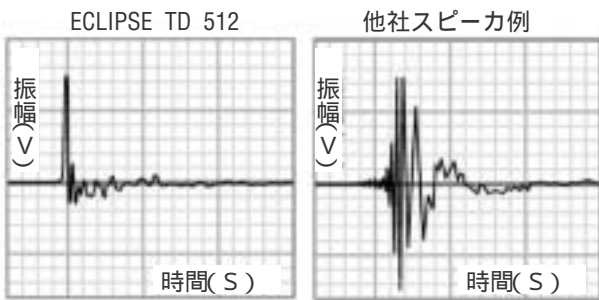


図-11 インパルス応答比較
Fig.11 Comparison of impulse responses

7.2 音圧周波数特性

今回開発したTD 512の音圧周波数特性を図-12に示す。下記のデータに見られるように、インパルス応答がきれいであったため、当然音圧周波数特性も平坦になっている。

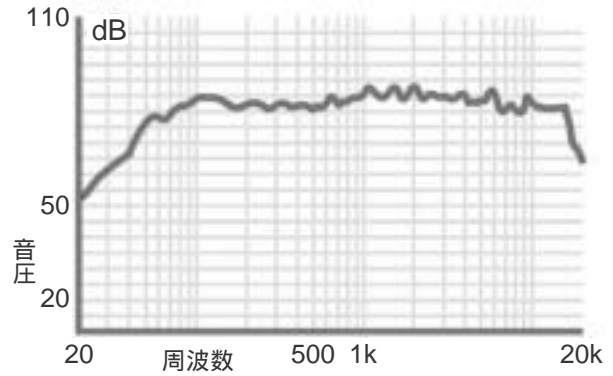


図-12 TD 512の周波数特性
Fig.12 Frequency response of the TD 512

7.3 立下り累積スペクトラム

今回開発したTD 512と他社スピーカ（2way四角形ボックス型）の立下り累積スペクトラム比較を図-13に示す。

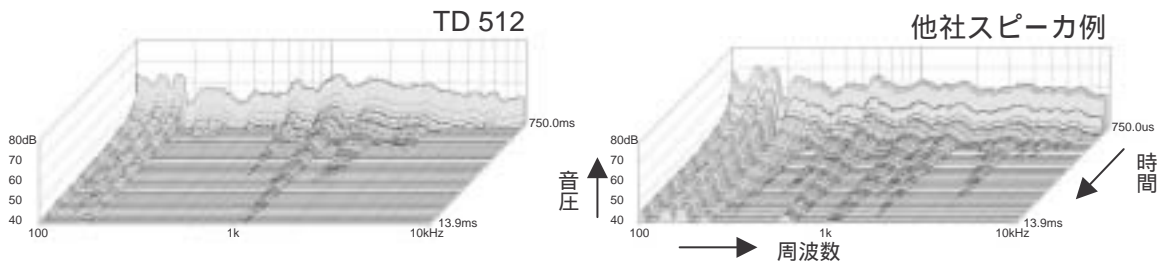


図-13 立下り累積スペクトラム比較
Fig.13 Comparison of cumulative spectra

8

まとめ・考察

今回の商品開発では形状も重要な伝達関数の要素ととらえ、伝達関数を極力1に近づけるためにスピーカユニットのみならずエンクロージャの形状や内部の支持構造も工夫することで新しい音づくりを試みた。

その結果、音の立ち上がり・立ち下がりが聴感的にも早くなり、たとえばピアノのタッチ感や弦楽器の弦を弾く微妙な弓使い、あるいはボーカルの口の動きなどプロアーティストが感情をこめた微妙な演奏がより鮮明に表現されるようになった。また音場の表現も左右方向のみ

インパルス応答波形の違いによる音像定位の違いのイメージ

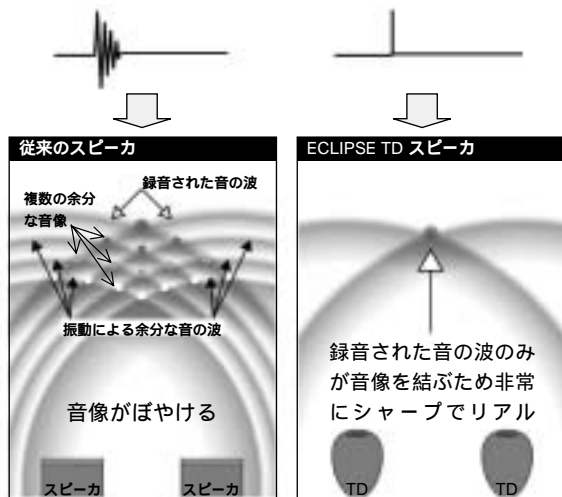


図-14 インパルス応答の違いによる音像定位のイメージ
Fig.14 Schematic of sound image orientations resulting from differences in impulse response

ならず奥行き方向・上下方向の再現性もシャープでリアルになった。これらは従来スピーカのようにインパルス応答に複数のパルスが含まれている場合、音の波が複数生じて、その結果複数の音像が出来るのに対し、1本のパルスしか出ない場合は1つの音像しか出来ないことに起因する。(図-14)

しかし反面、録音状態によってその音場のリアル感に差が生じるようにもなった。たとえばアコースティック楽器をライブで録音されたものは、録音された信号がすべて自然な音であり元々情報量が多いため、位置情報も含めた詳細をリアルに再現するが、電子楽器やイコライジングなど音響編集を多く施した音楽は、自然の音の情報が加工されているため再生される音場の立体感に乏しくなったり、録音・編集の粗が出やすい傾向がある。これは伝達関数が1に近づいたことによって録音されている情報にフィルタをかけずに全てを再生しているからに他ならず、映像に例えるとレンズの解像度がよりシャープになったことによって、これまで見えなかったものが見えてくるのと同じ現象である。

今後はこのスピーカの物理特性をさらに定量的にとらえる検討をすすめ、更なる時間軸特性の向上と共に、再生周波数帯域の拡大を実施したいと考える。

最後にこのスピーカの開発に際して多大なるご指導・ご鞭撻を賜ったタイムドメイン社の由井啓之社長他タイムドメイン社の皆様、そしてスピーカ開発にご協力いただいたフォスター電機の皆様への謝辞を持って終わりとする。

筆者紹介



西川 彰
(にしかわ あきら)
1990年富士通テン(株)入社。以来車載用音響システムの開発に従事。現在富士通テン(株)AVC本部コンポーネント事業部音響技術部AEプロジェクト在籍。



横山 勲
(よこやま いさお)
1991年富士通テン(株)入社。以来カーオーディオ機器の開発に従事。現在富士通テン(株)AVC本部ホームオーディオ事業部TD部在籍



津森 克彦
(つもり かつひこ)
1986年富士通テン(株)入社。以来車載用音響システムの開発に従事。現在富士通テン(株)AVC本部コンポーネント事業部音響技術部SPプロジェクト在籍。



小脇 宏
(こわき ひろし)
1985年富士通テン(株)入社。以来車載用エンジン制御システム開発、デジタル信号処理等のオーディオ基礎技術開発に従事。現在AVC本部ホームオーディオ事業部TD部プロジェクト課長。