

# 単発サイン波が語る 現代スピーカ・システムの 問題点

フルレンジ・スピーカの  
単発サイン波応答を  
考察する



別府俊幸

## はじめに

スピーカは、連続サイン波に対してはそれなりに良好な応答を示します。ところが、単発サイン波に対してはなかなか満足のゆく応答を示してはくれません。大抵のスピーカは、ユニット単体であればそれなりに、入力に対応した波を再生します。けれどもマルチウェイ・スピーカでは、ユニットの前後位置のずれやネットワーク（ディバイダー・アンプも含む）の過渡的なひずみのために、出力は大きく“ひずんだもの”となっています（第1図、本誌91年1月拙稿参照）。当然これらのスピーカは、単発サイン波を變形するように、音楽信号をも大きく變形します。

90年12月号の石塚峻氏の指摘<sup>1)</sup>を待つまでもなく、音楽信号を周波数によって複数のスピーカに分けようとする考え自体に無理があることは間違いありません。フルレンジを用いればクロスオーバーの問題も発生しませんし、位相回転も最少に抑えられることもそ

のとおりです。ついでに言えば、ネットワークのLやCなどの質も気にしなくてすみますし、その気になれば、マルチアンプ・システムに投入する費用を1本のユニットに費やすことも可能です（コストをかけたから良いものができる、とは考えられませんが）。

確かに、この世界にはマルチスピーカ・システム、それもホーン型が至上のものであるとの説があります。が、それにしたところで、優秀な広帯域ユニットが存在するのであれば、もっと多くのフルレンジ愛好者がいてもおかしくはありません。

今回はスピーカ・システムの問題を探るため、原点ともいべきフルレンジ・スピーカを測定しました。

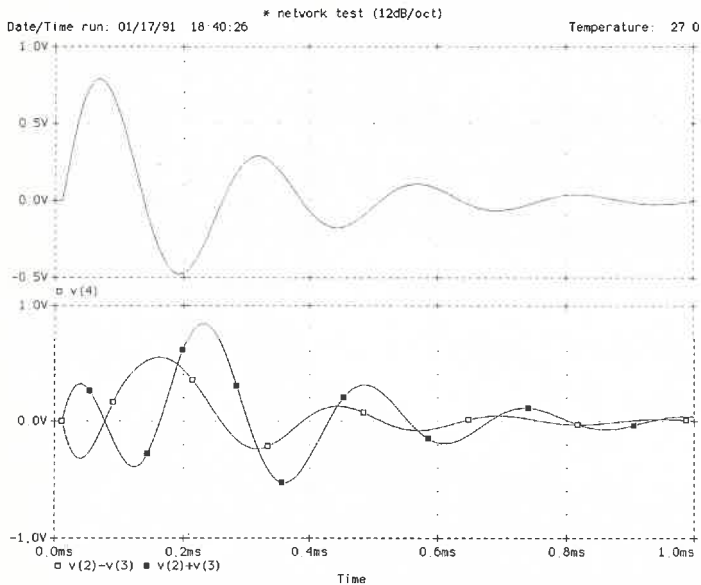
結論から申しますと、マルチウェイ・スピーカは、フルレンジの弱点や欠点を解決するものではなく、また、フルレンジに関しても、広帯域化のための試みや改良が、逆にその利点を奪い去っているといえるようです。

## 低域再生の問題

### バスレフ方式の問題

第2図は、某システムでの200 Hzの応答です。諸般の事情があり詳細を申し上げることができませんが、バスレフ箱です。(a)はバスレフ・ポートにグラスウールを詰め込んだ状態、(b)は何もしていない状態です。スピーカの放射音に遅れること12 msec、R波はバスレフ・ポートの共鳴音であることがわかります。

バスレフ方式の問題点の第1は、(1)ポートの共鳴音が、ユニットの直接音より遅れて放射されることです(第3図(a))。これらの遅れで聴こえる低域成分は、ユニットや箱から放射される不要振動（リバースひずみ）と同じく、音をにごらせ、音場感を損なう効果を持っているようです。しかし、連続サイン波による計測では、ポートからの音が遅れて伝わって



上：入力（減衰サイン波） 下：出力（□：逆相接続，■：正相接続）  
 クロスオーバーは、信号と同じ4kHz。ウーファがツイーターよりも3cm奥にある普通の2ウェイのシミュレーション。正相接続であっても、逆相接続であっても出力波形は“ひずみ”いる。現実の応答は、電気的な加算よりもさらに悪いものとなるだろう。

〈第1図〉 -12dB/oct ネットワークが発生するひずみ（シミュレーション）

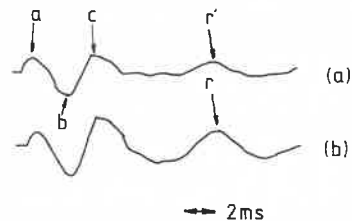
こうしたも周波数と同じである限りはそれなり（振幅と位相が変化する）に合成され、高調波ひずみの数字にも表れません。マルチウェイ・スピーカの音源位置がずれていることも、連続サイン波で測定している限りは永久にわからないでしょう。が、音楽信号は永遠に持続する連続波ではありません。したがって、過去の信号の一部を引きずる“ひずみ”が、聴感上の悪影響となっても不思議はありません。

もちろん、部屋の反射音もユニットからの直接音に遅れて到達します。けれども、これらの反射音はスピーカと

は異なった、あらゆる方向から聴こえてきます（第3図(b)）（当然、スピーカ後方の壁にぶつかって跳ね返る成分もあります）。これに対し、

(2) 共鳴音はスピーカから放射される点で救いようがありません。反響音は、いろいろな方向から跳ね返ってくるから“残響音”となり、音にうるおいを与えてくれるのですが、特定の方向から聴こえてくる強力な反射は“エコー”として忌み嫌われるのは周知のとおりです。

部屋の残響にしたところで、信号伝送の面から考えればひずみに違いあり



(a) バスレフ・ポートにグラスウールを詰めた状態

(b) 何もしていない状態

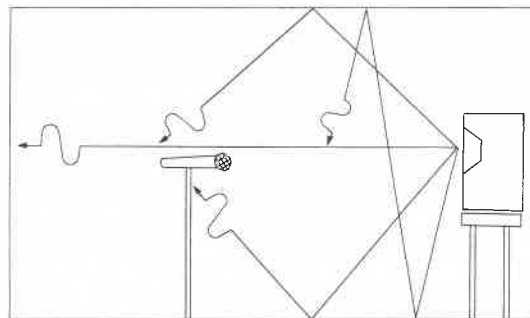
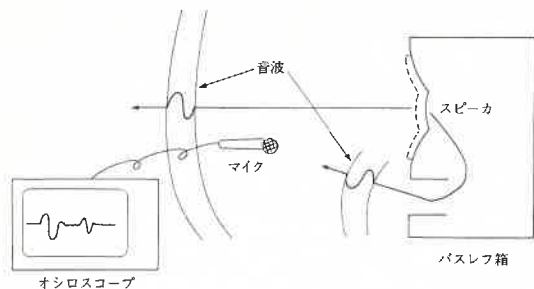
r 波は、バスレフ・ポートが関係していることがわかる

〈第2図〉 あるバスレフ箱での200Hzの応答

ません。ところが、アンプのひずみにめくじら立てるマニア氏も、適度な室内の影響は必要と感ずます。人間は、部屋の残響とスピーカが発生するリバーブひずみとは異なったものと感じます。スピーカが生成する残響音は、いわばカラオケのデジタル・リバーブ・エコーです。エコーはカラオケだけにしたい、と思うのはオーディオ・マニア共通の願いでしょう。

さらに、部屋の反響音は、高音であれ低音であれ、それなりに跳ね返って来ます。これに対しバスレフからは、(3) 特定の帯域だけが、ポートから遅れて放射

されます（第3図(c)）。もちろん、特定の帯域だけが共鳴することで低域を補っているのですから当たり前の話です。ですが、室内の物が何か共鳴しているのであれば、たとえ小さな音量であったとしても耳につきます。それらの共鳴する物体は、排除されるに違いありません。それなのに、スピーカに



〈第3図〉(a) バスレフ・ポートからの音は、直接音から遅れて到達する (b) 部屋の反射音はいろいろな方向から飛んでくる

共鳴器を取り付けようとするのはなぜでしょう。

第4図はフォステクス社の16cmウーファ、FW160を用いてバスレフ箱と、バスレフ・ポートにフェルトを詰め込んだ状態と、その上から板でふさいだ状態(密閉箱)を比較したものです。実験に使用した箱を第5図に示します。箱の中には適当にフェルトが入っています。なお、以後の測定もすべてこの箱を用い、マイクロフォンは、常時、ユニットの軸上50cmとしています。

いずれの周波数でも、密閉箱、ポートにフェルトを詰めたバスレフ箱、バスレフ箱の順でc、d波のピークが高くなっています。加えて同じ順番で、d1波以降の不要振動も大きくなっています。それに対し、入力信号の直接の応答であるa、b波は、波高、形ともほとんど変化がないことがわかります。すなわち、

(4) 入力に対応する音が大きくなるわけではない

ことがわかります。バスレフ方式も、不足している低域そのものを補うことはなく、入力の後に派生する付随振動を増加させて聴感上の低域を増強しているにすぎません(第3図(d))。

では、a、b波に影響がないのにc波以降に影響が現れるのはどうしてでしょうか。

スピーカ背面の音が表に回って影響しているとの説明は、困難です。ポートとユニットとはほとんど接しているのですから(第27図参照)、背面の音が回り込んだところで、正面の音に対

し約20cm=0.6msec遅れでマイクロフォンに届くはずですが、第4図(d)のレンジ(10msec/div)などでは、ユニット前面から放射された音と背面から放射された音は重なってしまいます。とすると、ユニット背面の音が遅れて到達する効果ではありません。

(5) エネルギーを与えられてから共鳴が始まるまでにディレイがある  
言い換えれば、共振は1周期遅れて始まること、c波から影響が現れる原因でしょう。

フルートが息を吹き込み始めた瞬間から共鳴するのではないことと同じ、と例えるのは適切ではなさそうですが、電源を接続した瞬間には水晶振動子は発振を開始しないように(もっと適切でない例?)、コーン紙が最初に動いた瞬間には共鳴は始まりません。こう考えると、常に先頭のa波には影響が見られないことも、共鳴音がc、d波に同期していることも説明がつきます。

さて、バスレフ・ポートは低域を補うための方法ですが、ポート効果は低域だけに限りません。第4図(f)に示すように、500Hzにおいても矢印に示したd波に変化が見られます。ここでは、入力信号が2msecで終わっていますのでd波に変化が現れたのでしょうか、この変化をポート共振に結び付けられるかどうかは疑問です。

第4図(g)に示したようにポート共振周波数は60Hz近辺であり、500Hzにこれだけの効果があるとは考え難いところです。加えてd波は、c波に対しても2msec以上遅れていますか

ら、スピーカ背面の音とも考えられません。箱の内部構造から、スピーカ背面の音が裏板、天板などに跳ね返ったとも考えられません。やや苦しい解釈ですが、バスレフ穴を開けることによつて、

(6) スピーカ・ユニットに対する空気制動が弱くなり、リバーブひずみが増加する

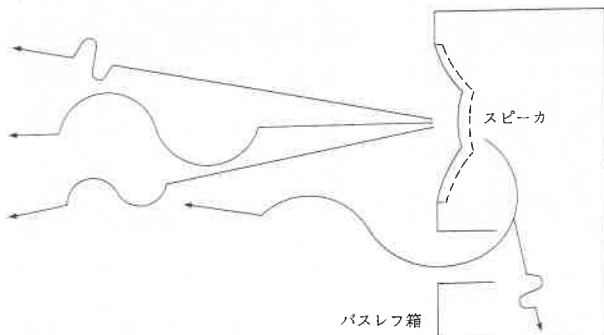
とも考えられます。一説に言われる「バスレフ箱は、ポートから内部の中高音が漏れ出すために音が汚れる」効果かもしれません。いずれにしても、入力波形の忠実な再現を目標とする観点からは、低忠実度と言わざるを得ないでしょう。

ところで、第4図(b)~(d)、60~100Hzでのdn波は、同じ周期になっているようです。おそらく、適切にチューニングされたバスレフ箱であればより顕著に観測されるのでしょうか、

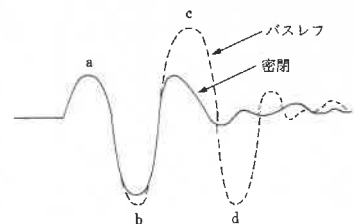
(7) 共鳴音は特定の周波数で共鳴するという、これまた当たり前の話が忘れられているようです。

ポート共振周波数が53Hzであれば、入力が49Hzであっても68Hzであっても共鳴するのは53Hzであることは、水晶発振回路を想像するまでもなく自明のことです。お寺の鐘は、撞木(しゅもく)で突いたときには“インパルス”です。そのインパルスの中から共振周波数だけを残すから“鐘の音”がします。

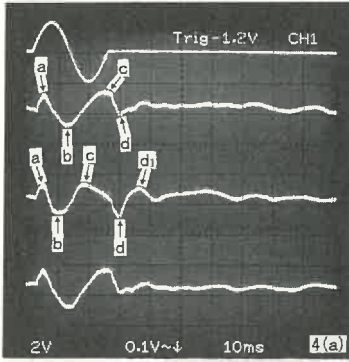
連続サイン波入力で共振点表に出



<第3図>(c)バスレフ・ポートからは、特定の帯域だけが放射される



<第3図>(d)▲  
入力に対応した振幅が大きくなるわけではない。言い換えれば、不要振動のみが大きくなる

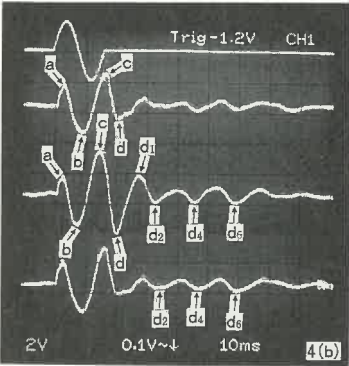
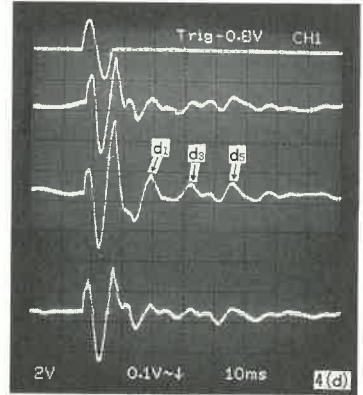


◀(a) 40 Hz

バスレフ応答のみ周期が縮んでいる。ポート共振周波数 (60 Hz) 以下では連続波の f 特も低下するが、単発サイン応答も a, b 波の周期が短くなっている。フェルト詰めは、密閉箱とほとんど同じ応答になっている。かなりいっばいに詰め込んだからであろう。

(d) 100 Hz ▶

ここでもバスレフは、c, d 波が高くなっている。矢印で示した d1, d3, d5 波はポート共振によるものであろう。周波数は約 70 Hz である。

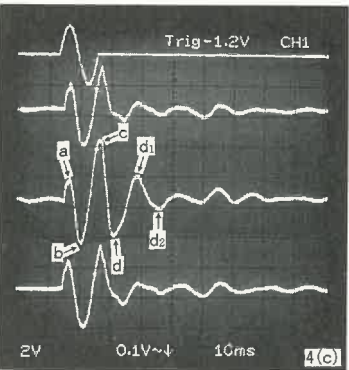
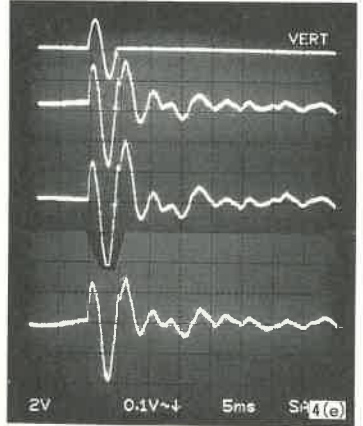


◀(b) 60 Hz

バスレフ応答で c, d 波が高くなっている。d1 波以降の振幅も大きくなっているが、ヘルムホルツ共鳴箱の共振であろう。密閉状態にも共振性の d 波が観測されるが、周期がわずかに短くなっている。こちらは  $f_0$  共振 (75 Hz) であろう。いずれの共振も、入力信号とは無縁の周波数である。

(e) 200 Hz ▶

ほとんど同じに見えるが、バスレフで c 波のピークが高くなっている。d 波は形も異なるがピークも高いようである。d1 波以降は計ったように同じになっている。

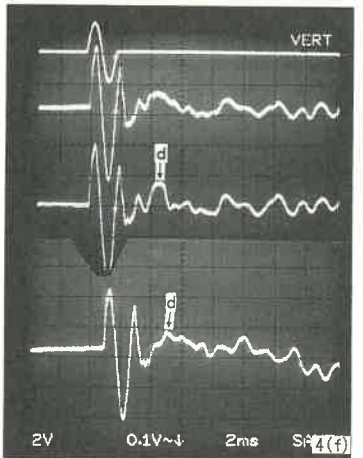


◀(c) 80 Hz

これもバスレフで c, d 波が高くなっている。密閉箱などでは d1, d2 波はほとんど見えない。また、不要振動は大きくなっているが、入力に対応する a, b 波は、ほとんど変化ない。

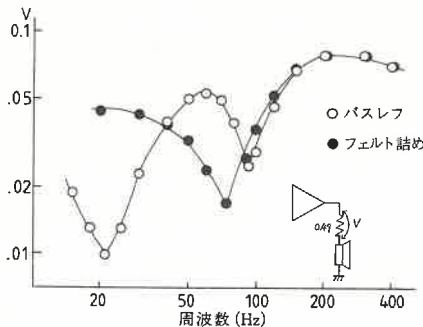
(f) 500 Hz ▶

バスレフの b 波が切れているためわからないが、高さに変わりないようである。密閉箱の最後の方が下がっているのは外からのノイズであろう。7 msec 以降は同じになっている。4 msec あたりの d 波でわずかの違いが観測される。



(g) ▶

○：バスレフ ●：密閉  
スピーカに  $0.47 \Omega$  を直列にして測定したので、絶対値はあてにならない。密閉時の  $f_0$  は 75 Hz、バスレフ時の共振周波数は 60 Hz である。



(上から)入力信号、バスレフ・ポートにフェルトをきっちり詰め込んだ状態、バスレフ箱、密閉箱の応答となっている。ただし密閉箱と称しているが、バスレフ・ポートにフェルトを詰めた上から板でふさいだ状態である。いずれの周波数でも入力に対応する a, b 波の振幅はほとんど変わらないが、バスレフで c, d 波が大きくなるのがわかる。

◀第 4 図▶ 密閉箱とバスレフ箱の単発サイン応答の比較

ないのは、単に連続的に信号(エネルギー)が与えられ続けているからに他なりません。バスレフ箱は、ヘルムホルツの共鳴器と同様、特定の周波数で共鳴します。入力信号が消えた後に残るのは、この共振周波数だけです。なお、連続波の場合、53 Hzでも 68 Hzでも密閉箱に比べて音圧が増加するのは、共振の Q が高くないからです。

実際に音を聴いても、連続サイン波ではポート共振周波数はまずわかりません。ところが、単発サイン波であれば、共振周波数の上下に周波数を変えても同じ音に聴こえる帯域があり、さらにその帯域との境で“音色”が変化するように感じられます(第6図)。これは、後半で述べる高域の共振系の場合にはより顕著であり、3オクターブ以上に渡って同じ音に聴こえることもあります。

この音色変化が“共振”に起因していることは確かであり、そしていわゆる“バスレフの音”を作り出しているようです。

## 音響的低域増強方式の欠点

さて、以上述べました弱点は、いずれもバスレフ方式固有のものではありません。

バック・ローデッド・ホーン、アコースティック・ラビリンス、ドロン・コーンなどの音響的低域増強方式すべてについて当てはまります。もちろん、ダブル・バスレフや ASW、TQWT などの共鳴器を有する方式もすべて同様です。

ところが、なぜこれらの方式が発展してきたかを考えますと、これはどう考えても低域が不足しているからに他なりません。

「密閉箱では低域が不足」と感じる場合には、時間遅れを伴っても低域を増強する箱を“良い音”と感じたところで不思議はありません。“低域不足”のスピーカは、入力を忠実に再現しているとは言えないのですから(アンプにロー・カット・フィルタを入れたのと同じです)、このとき、失われた信号そのものではなくても、それを補うと錯覚させる成分があるほうが“良い音”と感じるのでしょう。

もともと人間には、非常に残響の多い場所でも話ができるように、直接音に遅れて聴こえる間接音を、直接音と一体のものとして認識する能力が備わっています(第7図)。壁や床や天井から跳ね返ってくる音は、すべて最初に聴こえた音から発せられたかのように

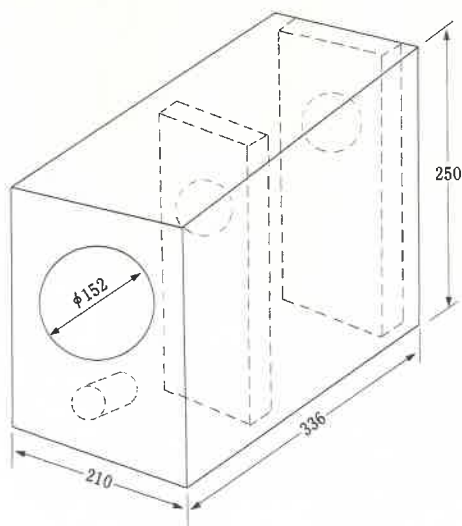
誤認します。そして、直接音に遅れてやってくる間接音は“別の音”と感じない限り、直接音の音量を大きくしたのと同じ効果を持ちます。2つのパルスがあっても、その時間差が 15~20 msec 以内であれば2つに聴こえないとされています。第1波がスピーカから放射されていますから、それに続く共鳴音も、その第1波と同一のものとして聴いているのでしょう。

しかし、1~4 msec 以上の時間差を持つ2つのパルスは、2つには聴こえないけれども、全く1つの音ではない、何物かが加わった音として認識すると言われています。直感的にはバスレフ箱などでは、音のにごりとして感じるのではないかと思われそうですが、それよりも体験的には分解能の低下、定位の悪化、音場感の減少として感じられるようです。

確かに、密閉箱とバスレフ箱を比較すれば、低域の音量感が異なりますから全体の音色も変化したように感じられるでしょう。が、それらの音色とは別のところで、楽器の定位、音のひろがりなどのイメージも異なってきます。低域増強によるクォリティの向上と、遅れた音ももたらすクォリティの低下を秤にかけ、どう評価するのでしょうか。

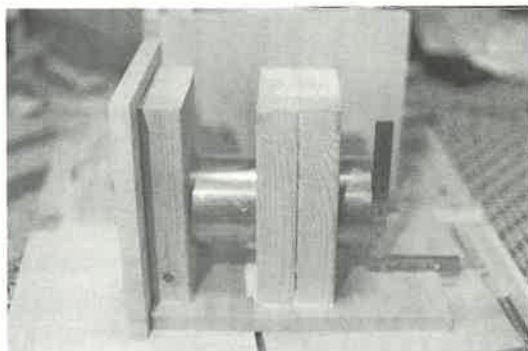
## デッド・マスの効果

低域の不足に対しては、デッド・マス付加が第一に採り入れるべき方法です。おもりの効果については高橋和正氏が 84 年 9 月<sup>2)</sup>(スピーカ・システム



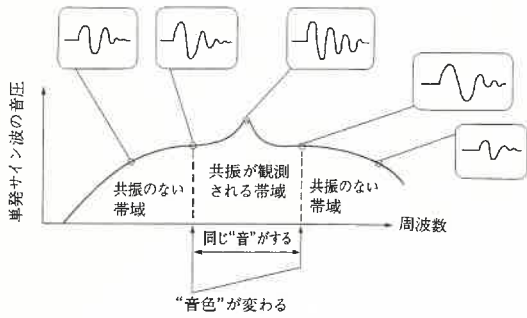
板厚 18mm  
バスレフ・ダクトは φ30×72mm

(a) 実験に使用した箱



(b) 実験箱の内部構造

<第5図> 90年9月号のラ技ユニット箱と同じく、中央に柱を立ててウェイト(真鍮丸棒 φ100×230, 15 kg)を支える構造となっている。



〈第6図〉  
共振が観測される範囲は、同じ“音”に聞こえる。また、その帯域の上と下で“音色”が変化する。共振系の音は耳につきやすいのであろう。

製作集に再掲)、88年7月号<sup>3)</sup>などでレポートされているとおりで、私が付け加えることはありません。確かに低域は拡大しますし、それ以上に中高域の音質改善効果が小さくありません。

第8図は、テクニクス SH-8000 を用いてワープル・トーンで測定した f 特です。○は FW 160 だけ、●は 2 kg のウェイトを瞬間接着剤で張り付けて (15 分後に) 測定したプロットです。不思議なことにウェイトによって全帯域に渡って音圧が低下しています。もちろんアンプの出力は言うまでもなく、スピーカの位置、マイクの位置もまったく同じです。バック・グランド・ノイズは、53~56 dB(SPL) でしたから影響はないはずで。

おもりの追加によって、50 Hz で -2 dB、100 Hz で -1.5 dB、200 Hz で -2 dB、400 Hz で -3 dB、1 kHz で -4 dB それぞれ下がっています。ところが、見方を変えて 1 kHz のレベルで正規化しますと、50 Hz では 2 dB、100 Hz では 2.5 dB、200 Hz でも 2 dB と、20~200 Hz で 2~3 dB の音圧上昇となっています。

また、第9図は、別の日に FW 160 改造タイプ (後半で述べます) を用いて、2 kg のおもりにさらに 15 kg (計 17 kg) を付加して測定した結果です (第10図)。こちらは 63 Hz で 3 dB 上昇したことを除けば 0~1.5 dB と、ほとんど差はありません。逆に 100 Hz と 200 Hz では、それぞれ 1 dB 下がっています。とは言いましても箱の内容積を考えますと、ウェイトなしで (計算上) 8.12 l に対してウェイトを

付けると 6.55 l と 21% も減少しているのですから、かなり不公平な条件下での測定となっています。したがって、このデータからは、小型の箱で内容積が減ってしまう場合でも、ウェイトは効果ありと言えるでしょう。

今回の測定では、高橋氏が 88 年 7 月号にレポートされたような、低域の音圧上昇は観測されませんでした。確かに、相対的には低域は上昇していますが、絶対的には全帯域で音圧が低下しています。が、この点について高橋氏に確認したところ、氏は絶対的な音量についてはケアされていなかったとのことであり、矛盾する結果ではないようです。

次に、2 kg と 17 kg の単発サイン応答を示します (第 11 図)。

意外というか当然というか、単発サイン応答では低域のレスポンス増加は観測されません。50 Hz の波形 (第 11 図 (a) と (b)) では、どう見ても同じ写真です。示してはありませんが、0 kg と 2 kg でも波形写真を見る限り同じです。

変化が観測されるのは、低域ではなく中高域です (第 11 図 (c) と

(d))。今回の測定では、500 Hz あたりから上で効果が見られました。それも a, b 波ではなく、d 波以降のリバーヴひずみの減少としてです。これは第 12 図に示すようにトウィータの場合も同様で、TW 501 にも 3.6 kg のウェイトを付加すると、リバーヴひずみの減少が観測されます (第 13 図)。

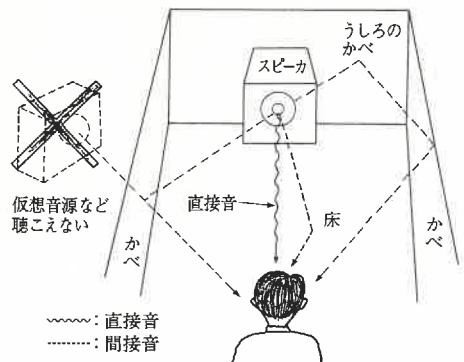
この不要振動を抑えることこそ、デッド・マスの最大の効果であり、本質的な音の改善につながっているポイントだと考えられます。

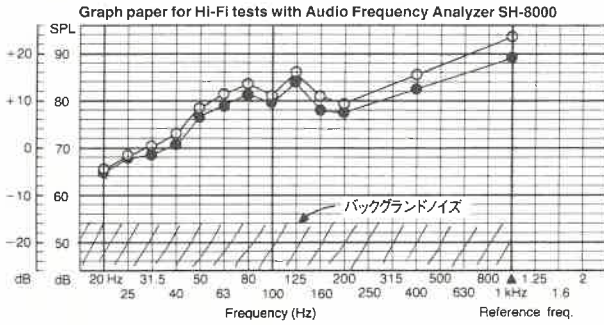
マグネットやフレームなど、スピーカ・ユニットの“構造系”は、ヴォイス・コイルの反作用を受けて振動します。ヴォイス・コイルやコーン紙などの“振動系”と空気の子が動くからには、それらを動かした力と等しい力 (反作用) が“構造系”を反対方向に押しします。しかし、構造系が押されることは確実なのですが、スピーカが鳴った途端にボックスが部屋の中を転がった話は聞いたことがありませんから、箱は“止まって”はいます。ただ、完全に“静止”しているのではなく、入力に応じて“振動”しています。

これをかなり強引なモデルで表せば、第 14 図のようになるでしょう (ここでは都合の良いことに、モデルの妥当性は考えないことにします)。“振動系”が動けば、それと等しい反作用が磁気回路に与えられます。しかし、箱の振動はその反作用と等しくはありません。スピーカのマグネット、フレーム、取付部のパッキン、ネジ、パッフルやその他の面の木の弾性、接合部の強度などにより複雑に変化し、スピーカはス

〈第7図〉

直接音と、わずかに遅れて間接音が聞こえるが、すべての音が最初に到達する直接音の方向から聞こえるように感じる。壁に跳ね返って到達した音の先に、仮想音源を感じたりはしない。また、間接音は直接音の音量を上げる効果を持つ。

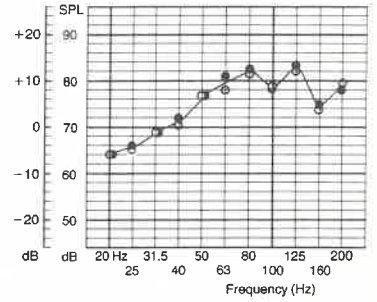




○：デッド・マス 0 kg ●：デッド・マス 2 kg  
 テクニクス SH-8000 を用いてワープル・トーンで測定した。全体的に、マスによって音圧が低下している。しかし 50 Hz で -2 dB, 100 Hz で -1.5 dB に対して 400 Hz では -3 dB, 1 kHz では -4 dB と低域での減衰量が小さくなっている。おもりは、f 特上も(相対的に)低域を増大させる効果があるようである。

〈第 8 図〉 デッド・マスの有無による f 特の変化(ワープル・トーン)

〈第 9 図〉▶  
 デッド・マスの有無による f 特の変化(ワープル・トーン)



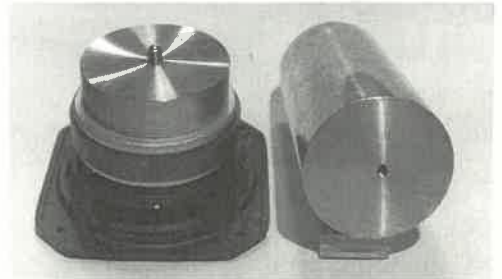
○：デッド・マス 2 kg ●：デッド・マス 17 kg  
 63 Hz での 3 dB 上昇を除けば、ほとんど変化はない。ただし、マスの取付けによって内容積が 20% 減少する影響があるのかもしれない。

ピーカで、箱は箱で、それぞれ固有のモードで振動します。これらの振動が第 11, 12 図に表れる不要振動です。残念ながら“構造系”の振動は、入力信号とは無縁の、スピーカに固有のモードで発生します。

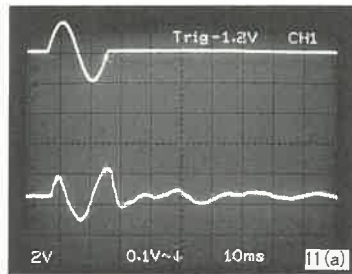
加速度センサを取り付けて測定したわけでも、レーザー変位計を所有しているわけでもありませんので、あくまでも推論ですが“振動系”の振動は d 波、遅くとも d1 波まででしょう。その後の振動は“構造系”が鳴いているに違いありません。なぜならウェイトを取り付けると変化が観測されるからです。なお、余談になりますが、ウーファ(第 11 図)よりもトゥイータ(第 12 図)での改善効果が大きいのは、ウーファとおもりが箱に入っているのに対し、トゥイータとおもりがむき出しになっているからでしょう。

第 12 図からは a, b 波の振幅に比べ、d1, d2 波でも -13 dB 程度の振幅があります。このレベルが聴こえないわけではありません。人間の聴覚は変なところに敏感で、S/N=0 dB でもその中の信号を聴き分けることができます。小さな音でラジオでも鳴らしながら、スピーカからホワイト・ノイズでもおもいつき大きな音で流して聴

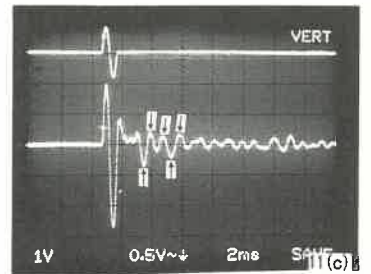
〈第 10 図〉  
 スピーカとデッド・マス



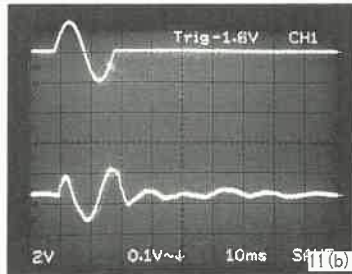
FW 160 のマグネット裏に φ100×30 のスペーサ(真鍮製, 2 kg)を接着、さらに φ100×230 (15 kg)のおもりに M 10 のボルトで固定する。写真では見えないが、スペーサにはヴォイス・コイルの背圧を逃すための穴があけてある。



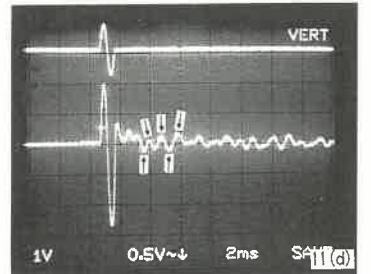
(a) デッド・マスなし (50 Hz)



(c) デッド・マスなし (1 kHz)



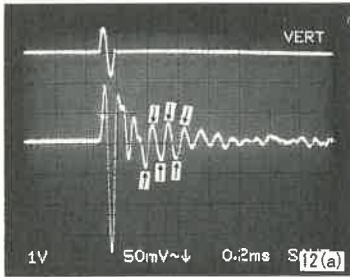
(b) デッド・マスあり (50 Hz)



(d) デッド・マスあり (1 kHz)

単発サイン波では、低域のレスポンスに変化は観測されない。変化は中高域での不要振動の減少として観測される。

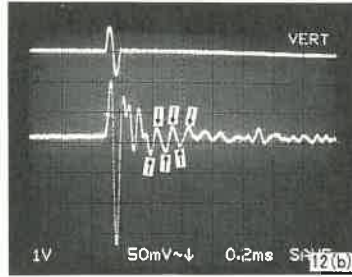
〈第 11 図〉 デッド・マスの効果 (FW 160)



(a)デッド・マスなし

デッド・マスによって不要振動の減少が観測される。

〈第12図〉 トゥイータのデッド・マス効果 (TW 501, 10 kHz)



(b)デッド・マスあり

きましょう。意外と聴こえるものです。ベートーヴェンの第9で、オーケストラとコーラスをバックに唱うソリストのパワーは、たとえジェシー・ノーマンでも-20 dB以下でしょう。が、それでも聴こえます。

したがって、-13 dBのリバーブひずみが聴こえたとしても、なんの不思議もありません。-13 dBとあなどってはなりません。波形の変化として“見る”ことができるのですから、間違いなくクオリティの悪化を招いています。

波形写真を見て大したことはないと思われ、高を括(くく)っているあなた、聴感上はCRTに映し出される以上の効果となって感じられます。大体、オシロスコープで音楽信号を眺めたところで何の楽器かわかりませんし、まして何の曲かもわかりません。けれども、耳で聴けばたちどころにわかります。箱の中の吸音材の量を“多少”変えたいらでは、単発サイン応答にはほとんど表れません(第15図)。ところが当然のことながら、第15図の(a)と(b)では音が違います。

ついでに付け加えておきますが、箱の中の吸音材に神経を使うよりは、箱の外側の吸音処理に留意すべきです。今回の実験で外側を覆っていないのは、ユニットの交換が面倒になるなどの言い訳をする実験者の怠慢によるものです。また、もう一言付け加えますが、ユニットが振動しても外側を吸音材で覆ってしまえばよいと考えるのも無理です。後半に例を示しますが、おもりによって振動そのものを低減しなけれ

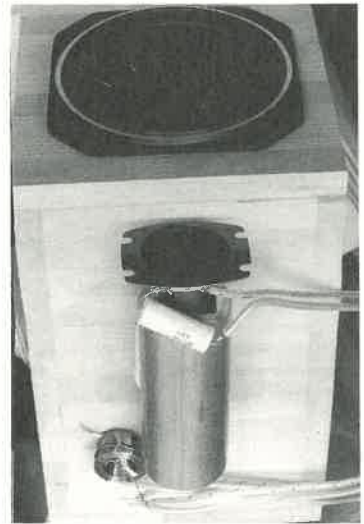
ば十分な効果は得られないでしょう。

本題に戻ります。84年9月の高橋氏のレポートに、おもりの有り無しでマグネット振動を測定し、累積周波数スペクトラムとして表した図がありましたので転載します(第16図)。この図が、すべてを物語っているようです。

ウェイトを取り付けることにより、マグネット振動の振幅が低くなると同時に、スペクトルのピークも低い方へ移動します。加えて、ピークが低くなっただけ振動の収束も早くなっています。これは第14図のモデルで、M1の質量を増加したことにより、M1, M2それぞれの振動が小さくなり、同時にM1の共振周波数も低くなったと考えることができます。もちろんこれらの振動は、フレームを伝わり、箱を揺さぶり、空气中に放射されます。その結果として、単発サイン応答にも表れます。

ここで、振動そのものを小さくすることを考えるのであれば、k1のバネを強くする方法も考えられます。けれども、アルミとか鉄でできているフレームを厚くしたところで、k1のバネ定数を大きくすることはできません。なぜなら、k1の強さはフレームを伝わる音速によって支配されるからです。

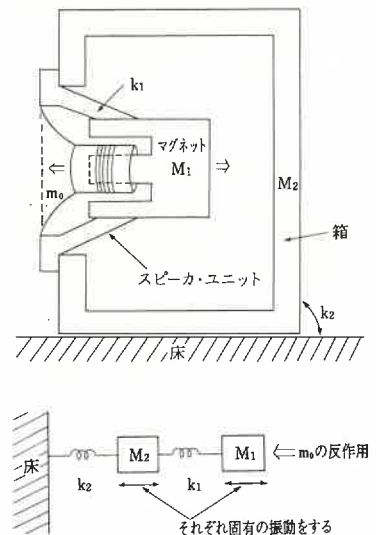
第16図に示すように“構造系”共振のピークは3~4 kHzです。この値は、スピーカーによって多少は変化する(小さければ高くできる)でしょうが、金属で作る限りは数kHz以上にはできません。フレームを厚くして効果が感じられたとしても、それはほとんど



〈第13図〉 TW 501とデッド・マス (3.6 kg)

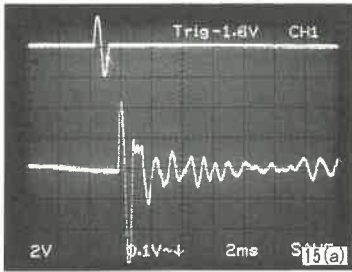
重量が増加した効果でしょう。加えて、k1よりはk2の方が弱いのですから、k1だけを強化したところで、k1を強化したことによる効果は表れないでしょう。

このように考えれば、おもりはただ重いだけではダメであり、硬い(それだけ音波の伝播も速い)ことも必要であることが、ご理解いただけると思います。柔らかい材料では、音が伝わるのも遅くなりますから、ヴォイス・コイ

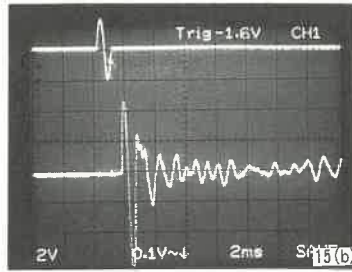


〈第14図〉 スピーカの振動モデル





(a)フェルトまったくなし  
波形からは変化したとは思えないが、音は確かに変わっている。  
(第15図) 箱の中のフェルトの有無による単発サイン波の変化



(b)適当にフェルトを入れた

ルが動いた瞬間にはマグネット近傍しか“マス”として働きません。

金属での音速は数 km/sec です。仮に 6.42 km/sec (アルミニウム) とすれば 10 cm の距離を伝わるのに 15.6  $\mu$ sec を要します。また、5 kHz の a 波であれば立ち上がり時間は 36  $\mu$ sec です。波の伝播と波の立ち上がり時間が 3 倍も離れていないのですから、電氣的に考えれば高周波回路であり“分布定数”として扱わなければならない世界です。つまり第 14 図の“集中定数”モデルは適当ではなく、第 17 図のように考えることが必要です。機械的に考えれば、1 つの質量として考えていた M1 が、それぞれ内部で分割振動し、独自のモードで動くということです。

さらに第 8, 9, 11, 12 図の応答からは、デッド・マスの利点はスピーカ原点を明確化することではなく、不要振動を減らすことにあって考えられます。なぜなら、原点明確化としての効果があるならば、マスによって音圧の上昇が観測されるはずだからです。しかし、実際にはその逆です。

とすれば、振動を押さえるためには、おもりを付加する以外にはありません。フレームなどの構造を強化したところで、パッフルを厚くしたところで、パッフルに固定せず底板とか床そのものに固定したところで、振動モードを変えることはあるでしょうが、デッド・マスのような根本的な改善は得られないでしょう。江川三郎氏のユニットを背中合わせにドライブする方法<sup>4)</sup>も、振動そのものを減らすことは

ありません。

逆に、ヴォイス・コイルの反作用そのものを運動エネルギーに変換しようとする石塚峻氏の宙吊りスピーカ<sup>1)</sup>は、不要振動の“消費”に効果があるかも知れません。ただ、氏のレポートでは、なぜ宙吊りに御利益があるのかが、ほとんどわからないように記されているようですが(意図的か?)。

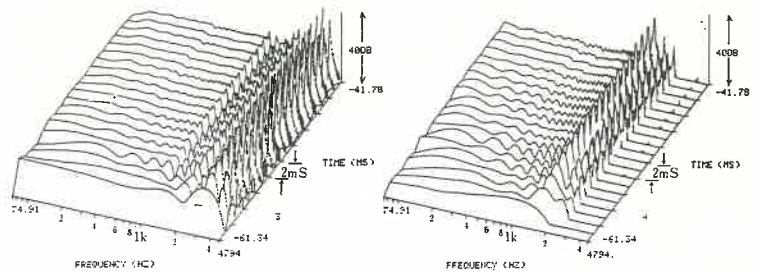
次に、デッド・マスによって低域が(聴感上)増強される理由を考えます。

直接的には、第 8 図に示したように相対的な低域の音圧上昇として説明できます。中域での振幅減少は、“構造系”から放射される音が低下したためと考

えられます。“構造系”固有のモードで(しかもそのモードは第 16 図に示されるように、数 kHz に存在する)不要な振動を放射するので、低域におけるパルスレフと同様、中高域での音圧上昇に貢献していないはずがありません。

しかし、それ以上に“構造系の固有音”そのものを小さくする効果が大きいでしょう。これら固有の振動音は“ノイズ”です。しかも金属の音はたいへんよく耳につきま。オーケストラがフォルテシモで演奏しているときでもトライアングル(たいてい後ろの方にある)の音は、前の楽器を飛び越えて聴こえてきます。金属質の“ノイズ”を押さえることが聴感上の低域を増加させる大きな要因でしょう。

デッド・マスは、低域の振幅そのものを大きくするわけではなく、中高域に付帯するノイズを低減して聴感上の低域を豊かにします。そして、これらのノイズを低減するので、中高域の音をも明確にします。全帯域に渡って振幅が減少した理由は、おもりの質量が切れたことによつて箱鳴りが

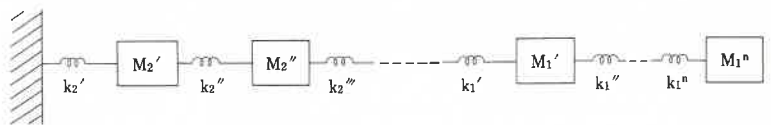


(a)付加質量なし

(b)付加質量あり

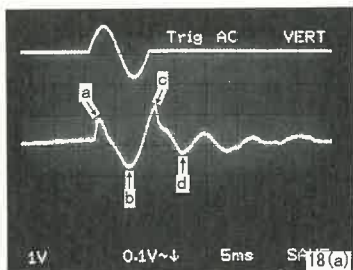
インパルス(広範囲のスペクトラムを一様に持つ)入力の、特定の成分だけが残っていることがわかる。これはユニット、あるいは箱の固有の振動モードである。マスによって振動が減少するだけでなく、ピークのスペクトルが低い方に移動し、さらに減衰も早くなっている(ピークが低くなるから当然である)のがわかる。

▲第16図) デッド・マスの有無によるマグネットの振動<sup>2)</sup>

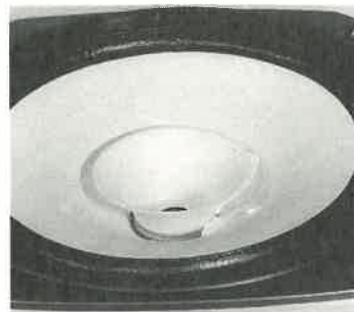
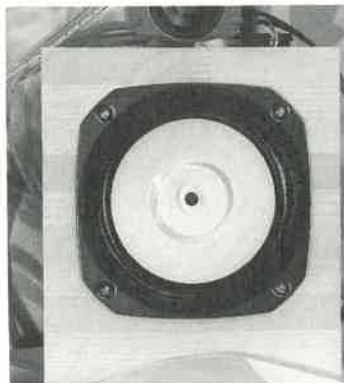


〈第17図) スピーカの振動モデル(分布定数)

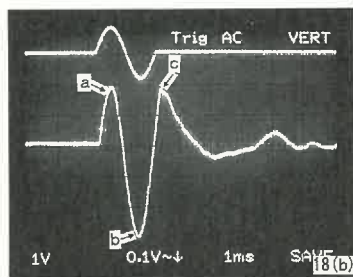
金属の音の伝達速度と波長の関係からは、少なくとも分布定数として考えなければならない。



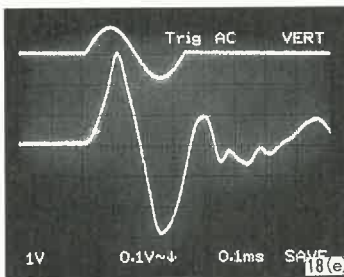
(a) 100 Hz  
出力は微分されている。100 Hzは左下がりの領域であることがわかる。



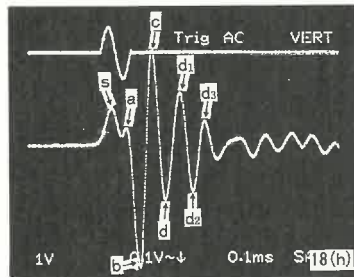
◀◀第19図>> FE 164



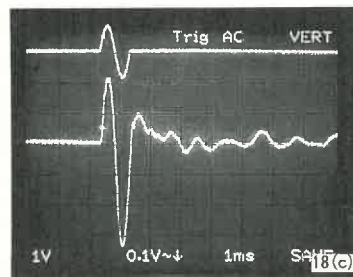
(b) 500 Hz  
良好な応答である。



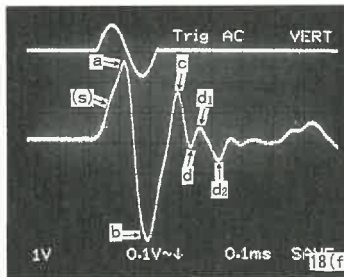
(e) 3 kHz  
a波の立ち上がりだけでなく、a~b波にかけても直線的となり、まるで三角波のように見える。



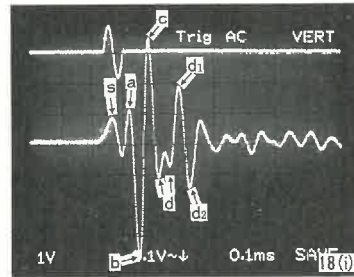
(h) 10 kHz  
s波はa波よりも高くなり、c波以降の共振も強くなっている。



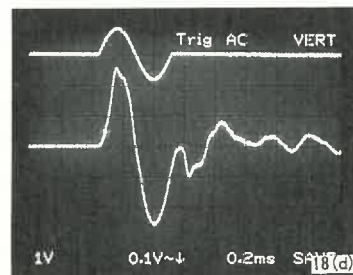
(c) 1 kHz  
これも良好である。



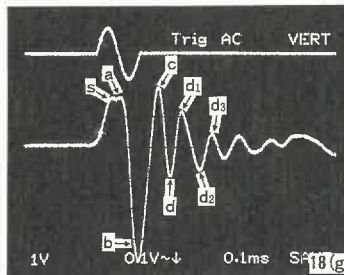
(f) 5 kHz  
a波の立ち上がりに特徴的な膨らみが現れ始めた。s波である。s波はサブ・コーンの音がメイン・コーンよりも先に到達する波である。



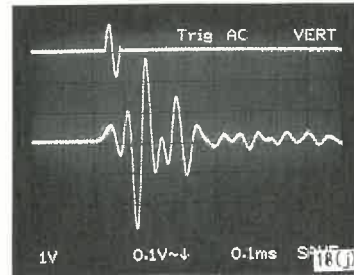
(i) 15 kHz  
d波のピークにも新たな波が現れ、入力とは相関のなさそうな出力となっている。



(d) 2 kHz  
a波の立ち上がりが直線的となっている。

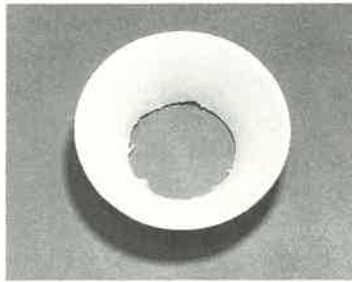
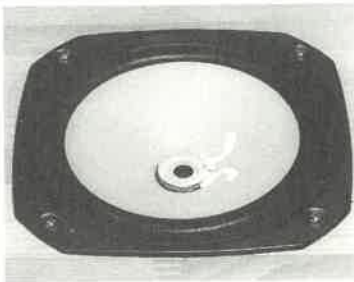


(g) 7 kHz  
s波とa波の高さは同じになった。c波以降に11 kHzの共振が現れる。

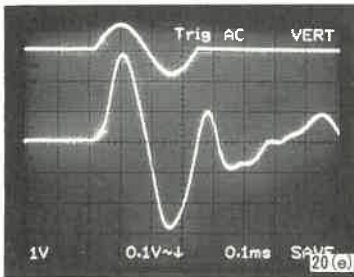


(j) 20 kHz  
15 kHzと形は変わらず、振幅だけが小さくなっている。

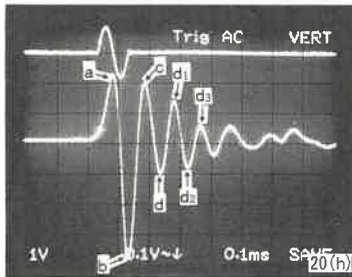
◀第18図> FE 164の単発サイン応答



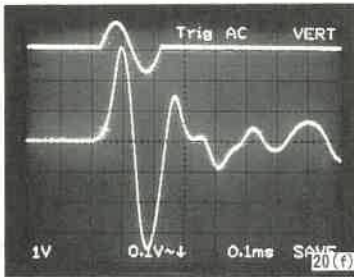
〈第 21 図〉 無惨にもサブ・コーンを切除された FE 164 (改) と切除したサブ・コーン



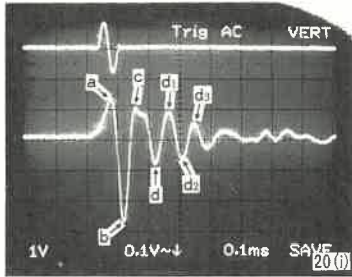
(e) 3 kHz  
オリジナルと異なり、良好な応答である。



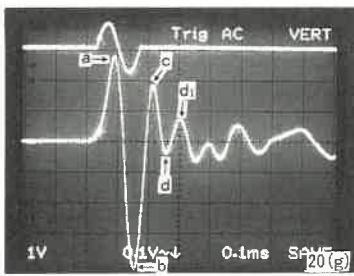
(h) 10 kHz  
a 波は改善されているが、立ち上がりはゆるやかになっている。d 波の共振には変化がない。11 kHz の共振はサブ・コーンではなく、メイン・コーン側に原因がある。



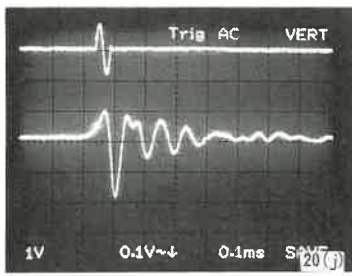
(f) 5 kHz  
a 波は良好である。



(i) 15 kHz  
a 波は立ち上がらず、共振も相変わらず観測される。音的には 10 kHz と同じに聞こえる。



(g) 7 kHz  
a 波に異常は見られない。c 波以降には共振がありそうだ。



(j) 20 kHz  
15 kHz と形は変わらず、振幅だけが小さくなっている。

〈第 20 図〉 サブ・コーンを切除された FE 164 (改) の単発サイン応答 (a~d は欠番)

少なくなったからと考えます。

もう 1 点。低域でデッド・マス効果が単発サイン応答に表れない理由は、コーンなどの“振動系”の動きが大きく、そして持続時間も長いから、構造系の動きを覆い隠しているためと考えられます。88 年 7 月号で高橋氏は、ドロン・コーンではデッド・マスの効果が十分に感じられなかったと述べておられますが、パッシブ・コーンの“共振音”が支配的であったため効果を隠していたとも考えられます。しかし、それでも耳は“構造系”の音を聴いているようです。

## 高域再生の問題

### ダブル・コーン

第 18 図に、フォステクス FE 164 の単発サイン応答を示します (第 19 図)。

100~1 kHz はふつうの応答です。1 kHz (c) など c 波は低く、良好な応答にも思えます。しかし、2 kHz (d) では、a 波の立ち上がりが直線的になり、頂上に意味ありげな突起が見られます。3 kHz (e) では、a 波の立ち上がりだけでなく、a~b 波の間も直線的となり、まるで三角波のようになっています。この原因は (f) 図 5 kHz あたりから現れます。a 波の立ち上がりスロープが独特の形をしています。これはトウィータがウーファよりも前にある 2 ウェイと同様、サブ・コーンから放射される音がメイン・コーンから放射される音よりも先に到達しているためです。

a 波のピークは 7 kHz (g) では 2 峰性となりますが、先頭の s 波がサブ・コーンから放射された音、それに続く a 波がメイン・コーンの音と考えられます。さらに b 波以降の波形から、なんらかの共振 (分割振動) があることがわかります。共振周波数は約 11 kHz ですから、メイン・コーンの振動を疑うには高すぎるようです。7 kHz では a 波と同じ高さであった s 波は、

10 kHz (h) ではより高くなっています。15 kHz (i) では s 波は a 波と完全に分かれ、さらに d 波も 2 峰性となり、とても入力と相似には見えない複雑な波形となっています。そして 20 kHz では、15 kHz の応答と同じ形のまま、振幅だけが小さくなっているのがわかります。

第 20 図はサブ・コーンを切りとった状態(第 21 図)での応答です。(a) ~ (d) 図は変化がないので省略します。3 kHz (e) では、直線的であった a, b 波が正弦波らしく丸みを帯び、5~10 kHz と a 波が改善されているのがわかります。15 kHz 以上では振幅だけが小さくなり、波形そのものはほとんど変化がないことがわかります。が、オリジナルよりはましな形でしょう。サブ・コーンの放射がなくなり、s 波が消えているのがわかります。

しかし、d 波以降は改造前とほとんど同じになっています。したがって、この 6 kHz~20 kHz で観測される共振は、サブ・コーンに起因するものではありません。周波数的にはセンター・キャップを疑いたいところです。

この 11 kHz の共振が、スピーカのトーン・キャラクタを作っているようで、単発サイン波を聴いていると、共振が姿を現す 5 kHz の下あたりから音色が変化するのを感じられます。また、サブ・コーンの切除によって高域の「クセ」は多少抑えられるのですが、共振が強力なキャラクタを作り出しているようで、波形が変化したほどには音が変わったようには感じられません。言い換えれば「メチャ軽」の音の印象は、ほとんどそのままです。また、164 改も 10 kHz 以上の波形そのものがほとんど変化しませんが、単発サイン波も、6~7 kHz からほとんど同じに聴こえます。トゥイータであれば、20 kHz は私の耳には聴こえなくなるのですが、このスピーカは 6~7 kHz と同じ音(ピッチは上がっている)に聴こえます。つまりは、まともに再生できていません。

一説に「サブ・コーンは高域を再生

する」というのがありますが、今回の測定を待つまでもないのですが、明らかに嘘であることがわかります。残念ながら、メイン・コーンは動かないけれどもサブ・コーンだけが動いて高域を再生するという手品のような芸当は、空想上の産物であったことがわかります。サブ・コーンもスピーカの高域限界を伸ばすものではなく、低域におけるアコースティック増強法と同じく、共振を作って高域不足を補おうとする手法でしょう(第 22 図)。いずれにしても入力にはない成分、つまり“ひずみ”を作り出して、錯覚を誘う姑息な手段の域を出ることはないでしょう。

### メタル・キャップ

第 23 図はメタル・キャップの代表として、フォステクス FF 165 N(第 24 図)の単発サイン応答です。3機種ともフォステクス社の製品ですが、同社と関係があるわけでも、因縁があるわけでもありません。ただ、豊富なユニットを供給してくれるのが、同社しかないというのが現実です。いや、1社でも供給してくれるところがあるだけありがたいと感謝すべきでしょう。

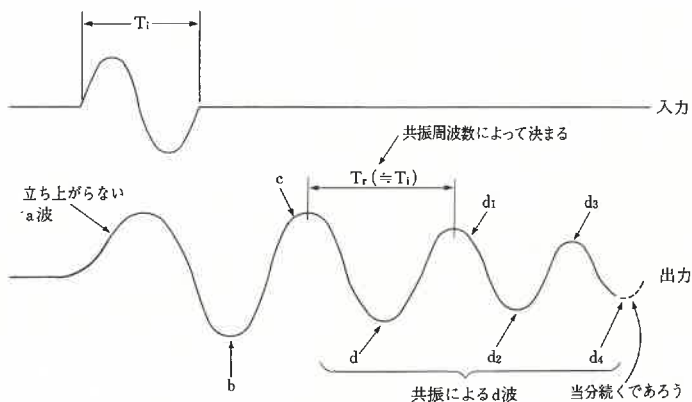
100 Hz (a) は、FF 165 N とほとんど見分けが付きません。マグネット

重量は FE 164 の 330 g に対して 600 g と倍近くありますが、フレームなどの構造が同じ設計だからでしょうか。200 Hz (b) では c 波にディップが現れ、c, c1, c2 と 3 波に分裂します。500 Hz (c) は良好です。1 kHz (d) も良好ですが、それほど強くはない。1.2 kHz の共振(d1~d5)が観測されます。

波形的には大したことはありませんが、聴感上は共振の影響は大きく、1 kHz あたりで音色が変化します。よく表現すれば、明るくなるようなきらびやかな傾向ですが、悪く表現すれば、うすっぺらなチャラチャラする感じです。この音の傾向は、メタル・キャップ音が支配的になるまで続きます。2 kHz (e) も共振の名残が見えます。

3 kHz (f) からは、応答波のレンジ(Y 軸)も半分になっていますので注意してください。それだけ 3 kHz から上のレベルが高くなっています。また、a, b 波の P-P (ピーク・トゥ・ピーク)の振幅は、5~6 kHz で最大となります。

3 kHz の応答は良好ですが、不要振動域に共振らしき波が見られます。5 kHz (g) では、明確にわかります。さらに 7 kHz (h)、10 kHz (i) とこ

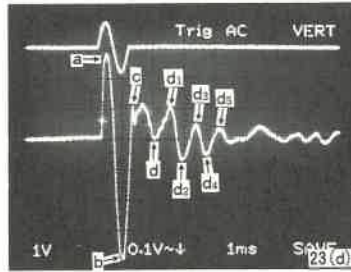


入力信号に応答しきれないため、a 波が立ち上がらなくなる。このままではハイ落ちの音になってしまうため高域共振を利用する。ところが、共振は入力信号とは関係なく固有の周波数で起こり、入力が 0 になっても当分続く。共振によって f 特が伸びているかのような印象を得るかも知れないが、これらの共振は“付帯音”となりクオリティを悪化させる。が、見方を変えれば、低域にも同じ手法があるのだ。

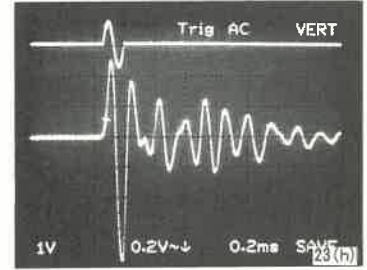
〈第 22 図〉 高域のアコースティック増強法



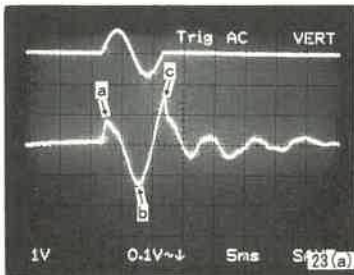
<第 24 図> FF 165 N



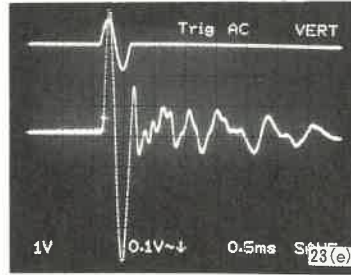
(d) 1 kHz  
d 波の後に 1.2 kHz の共振が観測される。聴感上も、この共振音が支配的となる。



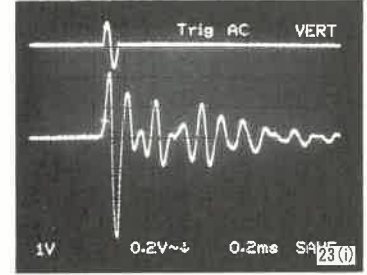
(h) 7 kHz  
長い時間にわたって共振が観測される。共振周波数は、当然のことながら入力周波数とは関係しない。



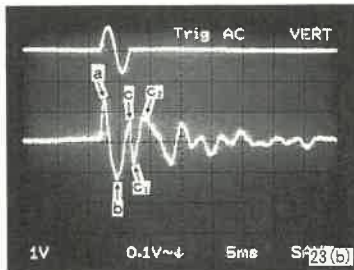
(a) 100 Hz  
FE 164 と同じような波形となっている。



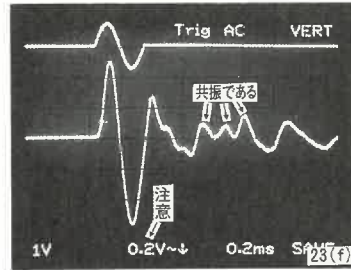
(e) 2 kHz  
a, b 波は悪くないが、相変わらず共振が観測される。



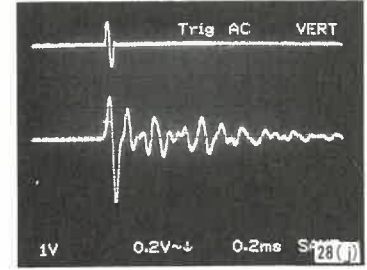
(i) 10 kHz  
10 kHz も共振が観測される。



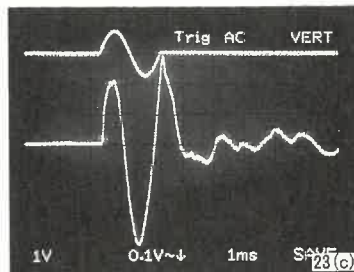
(b) 200 Hz  
c 波が c, c1, c2 波の 3 つに分解する。



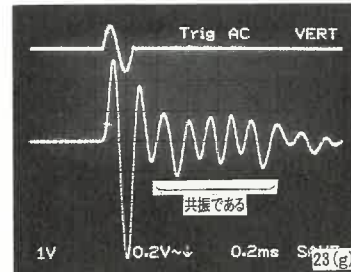
(f) 3 kHz  
3 kHz 以上はゲインが半分となっている。メタル・キャップの共振が現れ始める。



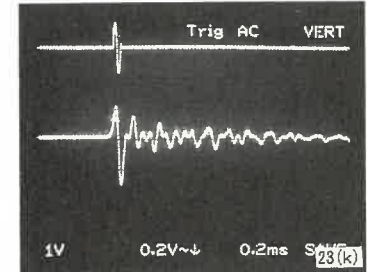
(j) 15 kHz  
ほとんど 10 kHz の振幅を小さくしたような応答である。音的にも同じに聴こえる。



(c) 500 Hz  
まあまあ良好な応答である。

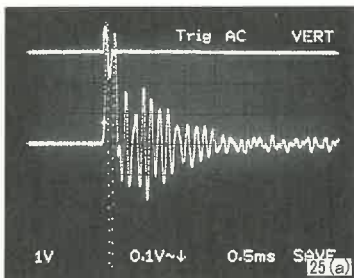


(g) 5 kHz  
強烈な共振が観測される。聴感上も強烈である。また、a, b 波の振幅が最も広がっている。



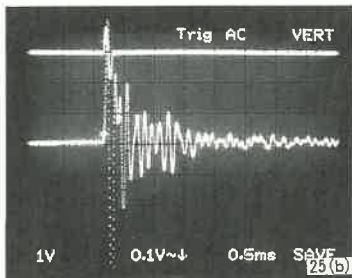
(k) 20 kHz  
15 kHz の振幅を小さくしたような応答である。聴こえてはならない音が聴こえる。

<第 23 図> FF 165 N の単発サイン応答



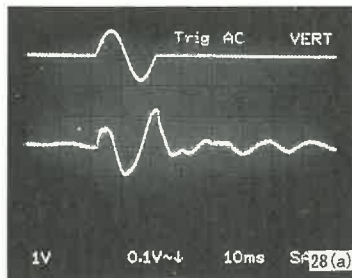
(a)オリジナル

第23図(h)のレンジを変えたものである。3.7 msec くらいでは、共振は収まっていない。10 msec 以上は持続している。



(b)フェルト・ダンプしたとき

第26図のように、メタル・キャップの前面にフェルトを張ったときの応答。共振の振幅が小さくなってはいるが、とても押さえられてはいないことがわかる。



(a)50 Hz

さすがにウーファである。相対的な低域の振幅は、2種のフルレンジよりも大きいようである。

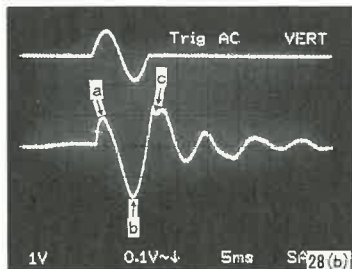
<第25図> FF 165 N のメタル・キャップ共振 (7 kHz)

の傾向は変わりません。大体 3.5 kHz あたりからメタル・キャップの音が支配的となり、その上では、周波数を変えても同じ音=メタル・キャップの音しか聴こえません。周波数を変えても音が同じに聴こえる傾向は、共振を持つスピーカに共通のものです。

共振周波数は、応答波形より 7.5 kHz とわかり、10 msec は観測されます(第25図(a)ただし尻切れ、図は Y 軸を2倍にしている)。この高域共振は、波形応答からも想像されるとおり、音にもはっきり聴こえます。メタル・キャップを持ったスピーカは、例

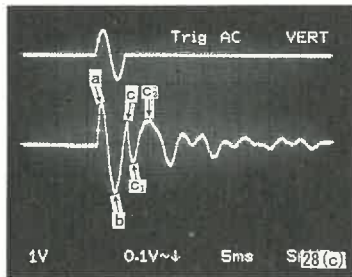
外なくメタルの音を聴かせてくれますが、このような共振音を発生しているのでしょう。

この種の共振があると、それを止めることは容易ではありません。テープを貼ると押さえられると某誌にありましたが、その程度では焼け石にお湯です。誰とは申しませんが、その人の耳を疑っています。第26図に示すように、メタル・キャップを覆うように両面テープでフェルトを張り付けて応答を観測しましたが(第25図(b))、たいして効いていないことがわかります。以前にアメリカ製の8インチ・スピーカを使用していたころ、メタル・キャップの音に悩まされ、テープとかスポンジとか貼って押さえようと試みましたが、メタルの音は全然消えなかった覚えがあります。



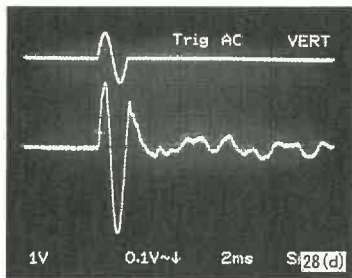
(b)100 Hz

良好な応答である。他の2種に比べ出力の時間短縮が小さい。過渡的にはフラットな帯域に入っているようだ。



(c)200 Hz

FF 165 N と同様、c 波が分解する。



(d)500 Hz

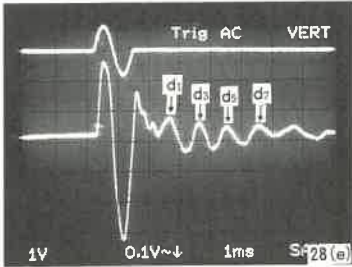
良好な応答である。



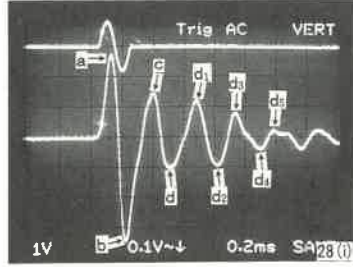
<第26図> みつともなくもメタル・キャップをフェルトで覆われた FF 165 N。これでも“メタル・キャップ”の鳴きが聴こえる。



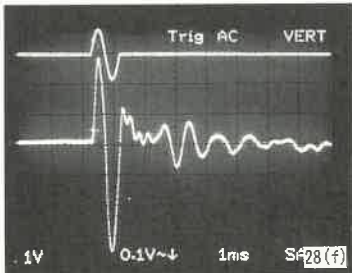
写真はバスレフ箱の実験中  
<第27図> FW 160



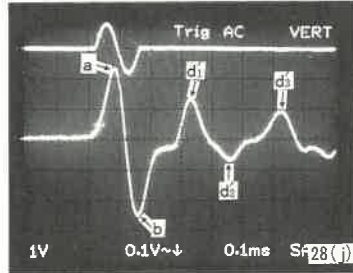
(e) 800 Hz  
c波まではよいが、d波以降に1.2 kHzの共振が観測される。



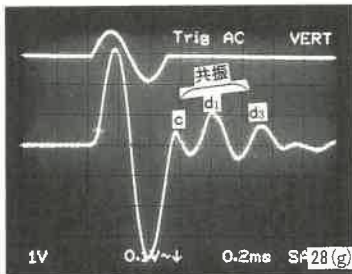
(i) 5 kHz  
c波以降に共振が見える。3 kHzと同じ音に聴こえる。



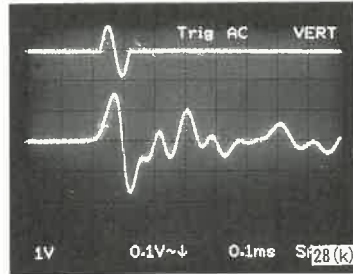
(f) 1 kHz  
共振はあるが、まあまあの応答である。



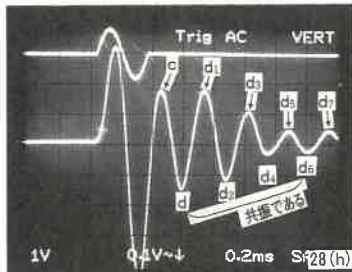
(j) 7 kHz  
高次モードの振動が乗っているようだ。波形的には3倍モードが加わったようである。



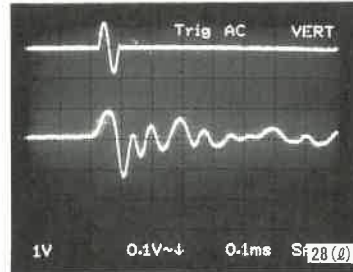
(g) 2 kHz  
3.4 kHzの振動が現れてきた。音的にも、特徴的なポコポコ音が聴こえ始める。正直なところ、我慢できない音である。



(k) 10 kHz  
とても入力と相似とは言えない出力だ。5 kHzでクロスさせるとすれば半分にはなるが、このような波が放射されているのだ。



(h) 3 kHz  
共振が大きくなっている。紙のコーンではあるが共振は起こす。

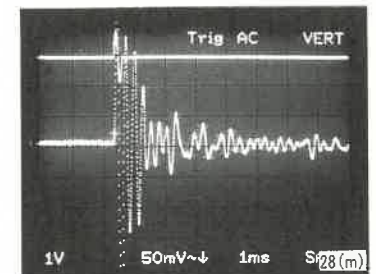


(l) 15 kHz  
基本的な形は10 kHzと似ている。

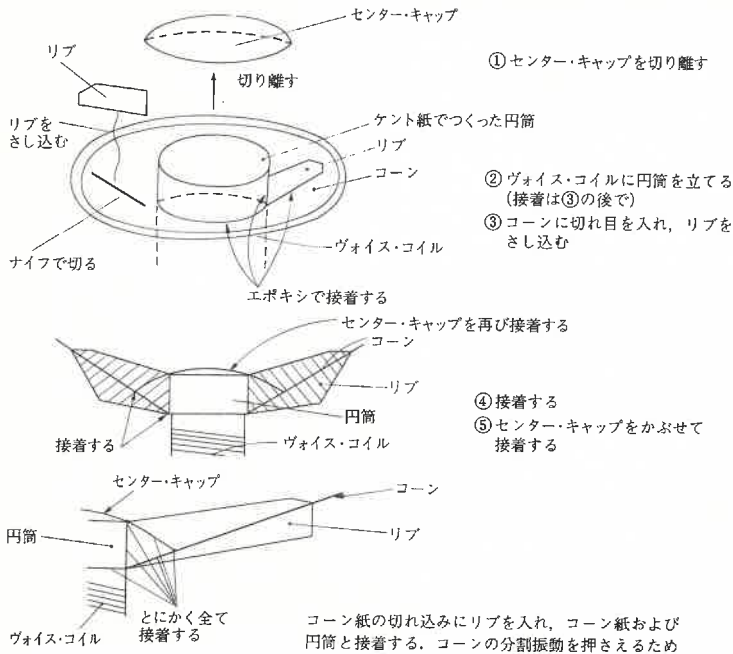
人間の耳は、オーケストラの合奏の中からでも、フルートとかオーボエとかトランペットとか特定の楽器音を聴き分けることができるように、たくさんの音の中で鳴っている楽器を特定する能力を持っています。オーケストラを再生したとき(もちろんパイプオルガンでもヴォーカルでもパーカッションでも)、そこにメタル・キャップの鳴きが混ざってれば、その音を簡単に聴き分けることができるのでしよう。

俗説に「メタル・ドームは高域を再生する」というのがあります。が、前述のサブ・コーンとまったく同様に明らかに嘘であることがわかります。残念ながら、メイン・コーンは動かないけれどもメタル・ドームだけが動いて高域を再生するという手品のような芸当は、これも空想上の産物であったことがわかります。メタル・ドームもスピーカの高域限界を伸ばすものではなく、低域におけるアコースティック増強法と同じく、共振を作って高域不足を補おうとする手法でしょう(第22図)。20 cmスピーカならまだしも、10 cmクラスでメタル・ドームを必要とするスピーカは、よほどの問題を抱えているのでしよう。

また、ドーム・スピーカはソフトとハードに2分されるように、ドームの材質の音がすると言われます。振動板が固有のモードで共振していることは間違いありません。半球状のお椀が鳴かないはずはありません。また、今回の測定のように吸音材を張ったくらい



(m) 3.5 kHz  
共振が長く尾を引いていることがわかる。20 msec以上持続しているようである。



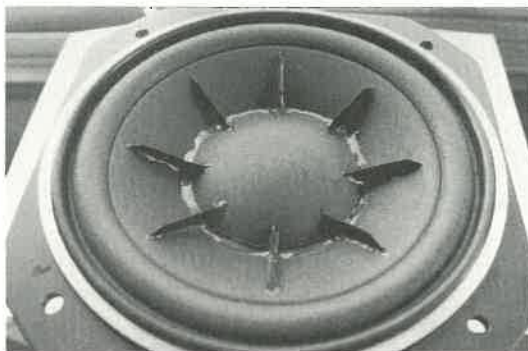
〈第 29 図〉 大春五郎氏直伝のリブ補強法

で鳴きが止まるものでもありません。

ホーン・スピーカも、ドライバーの振動板の金属名が宣伝されるように、材料によって音が変わります。これもまた、振動板の共振が聴こえていることは間違いありません。一般的に紙のコーンが使われるのは、比較的材質の音が目立たないからでしょう。しかし……。

## 紙のコーン

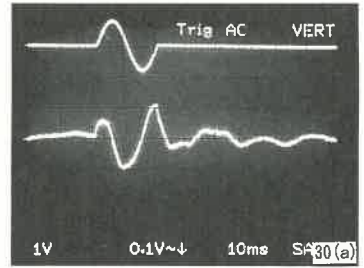
それではサブ・コーンもメタル・キャップも持たない FW 160 (第 27 図)



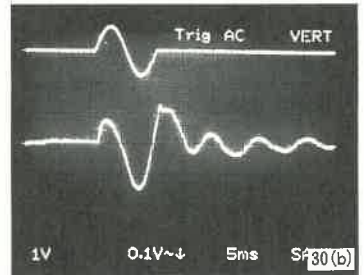
〈第 31 図〉 リブを取り付けられた FW 160 改

です。応答を第 28 図に示します。

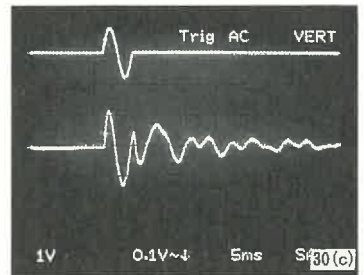
(a)~(d) 図, 50 Hz~500 Hz の応答はまあまあです。さすがにウーファらしく、100 Hz (b) 出力の a, b 波の周期は入力とほとんど同じになっています。おそらく過渡的には、このあたりからフラット帯域となるのでしょう。200 Hz (c) では FF 165 と同じように c 波が分解しますが、エッジやダンパーが同じ構造だからでしょうか。800 Hz (e) から 1 kHz (f) にかけては、1.2 kHz での共振が見られます。原因は調べていないのでわかりま



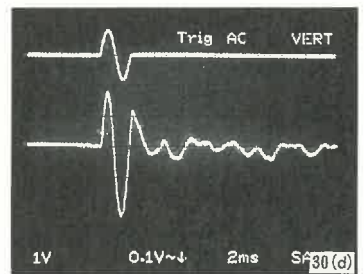
(a) 50 Hz  
まったく変化はない。



(b) 100 Hz  
基本的には変化はないが、a, b 波がわずかに低くなっている。振動板が重くなったせいであろう。

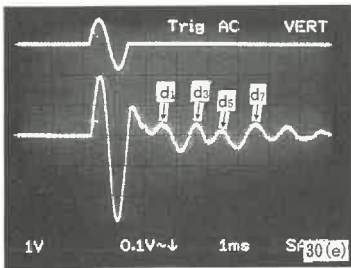


(c) 200 Hz  
全体的に低くなっているが、d 波以降のリバースひずみに変化は見られない。

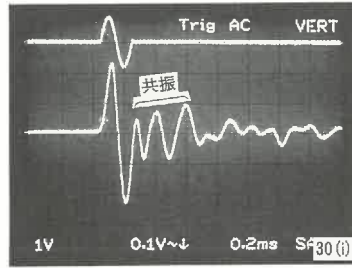


(d) 500 Hz  
a, b, c 波は低くなっているが、形には変化はない。

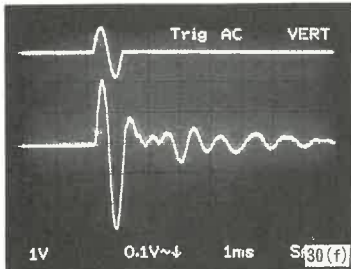




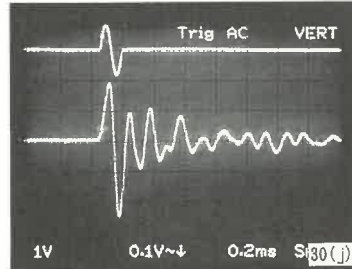
(e) 800 Hz  
d波以降の共振も、少しだけ低くなってはいるが、ほとんど変わらない。とすると、振動系ではあるが、補強されていないとこちらに原因があると考えられる。エッジか？



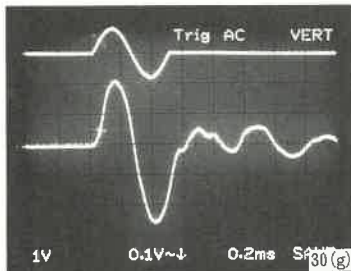
(i) 5 kHz  
リップ補強は施したが、またもや共振が出現した。オリジナルの3倍モードであろうか。



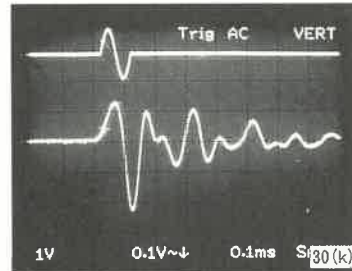
(f) 1 kHz  
800 Hzと同様である。



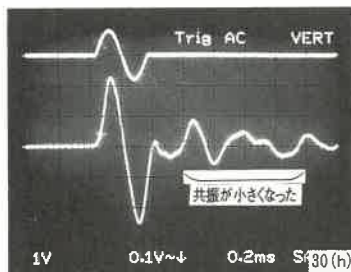
(j) 7 kHz  
7.8 kHzの共振が見える。オリジナルもこの周波数あたりで共振があったから、それが残されているのだろう。センター・キャップの高次振動モードか？



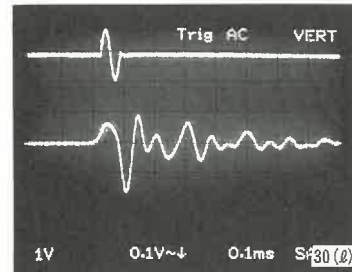
(g) 2 kHz  
3.4 kHz共振は抑えられているようだ。



(k) 10 kHz  
ここまでくるとリップも効果はない。



(h) 3 kHz  
明らかに共振が抑えられている。リップの効果である。



(l) 15 kHz  
10 kHzを小さくしたような応答である。

せんが、これも FF 165 N とよく似ています。音質は 165 とは相当に違うのですが、共振音が聴こえる点では同じです。

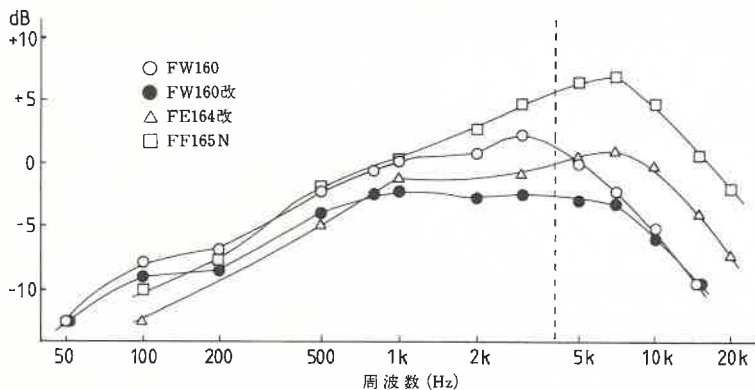
2 kHz (g) からは、これまた共振が現れます。3 kHz (h)、5 kHz (i) と強力に鳴いているようで、音的にも 2 kHz の下あたりからポコポコ音が張り出し、周波数を変えても支配的な音となっています。共振周波数は 3.4 kHz であり、20 msec 以上は持続しているようです (第 28 図 (m))。

7 kHz (j) では、さらに高次のモードが乗っているようです。波形的には 3 次の倍調波を加算したような形です。10 kHz (k) では、さらに高次 (5 次か?) のモードが加わったような波形となり、振幅も狭くなっています。20 kHz (l) も同様です。メタル・キャップがないからと言っても、安心してはいられません。紙のコーンでも共振系を持ち、一度共振すれば、やはりその音が支配的になります。実際に音楽を聴いて気になる帯域も、単発サイン応答によって共振が観測される帯域と一致するようです。信号が消える(弱くなる)と共振音がしゃしゃり出てくるためでしょう。

さて、白状してしまいますと、当初は FW 160 と TW 501 の 2 ウェイ・システムを作る予定でした。高橋氏に相談しますと必然的に 4 ウェイになってしまうのですが、なんとか 2 ウェイでまとめようと始めました。しかし、いざ鳴らしてみますと、このウーファのポンポコリン音が気になり、我慢できません。そこで、どうせウーファを買い替えるのならと、大春五郎氏より習ってきたリップ補強を施してみました (第 29 図)。

FW 160 改の応答を第 30 図、記念写真を第 31 図に示します。

一見したところ (a) ~ (d) 図、50~500 Hz までは同じ写真に見えますが、よくみると a, b 波の振幅が減少しています。振動系の重量が増加したから当然でしょう。800 Hz (e) も、振幅が小さくなった以外には変わ



a, b 波の P-P を測定してプロットした。立ち上がり限界(約 4 kHz)以上はあてにならないが、一応示した。FW 160 は改造によって音圧が低下しているが、過渡的な f 特はフラットに近づいている。FE 164 は高域に共振があるため、聴感上はグラフよりもさらにハイ上がりになっている。なお、FE 164 と FF 165 の FW 160 に対する音圧は相対的なものである。

〈第 32 図〉 スピーカの過渡的な周波数応答

りはないようです。が、ここで d 波以降の不要振動も、わずかに振幅が減った以外に変化がないことから、この共振も振動系に原因があることがわかります。リップ補強されてない部分、エッジでしょうか。1 kHz も同様です。

2 kHz (g) 以上では、3.4 kHz 共振の退治に成果があったことがわかります。2 k, 3 kHz (h) と共振は小さくなっています。リップ補強を加えた部分、例えばセンター・キャップの 1 次の振動モードだったのでしょいか。

ところが、5 kHz (i) からはまた上の周波数、7.8 kHz での共振が観測されます。5k, 7kHz (j) とかなり

のレベルです。そして 10 kHz (k) 以上は、あまり効果がなかったことがわかります。リップにしたところでケント紙ですから、10 kHz にそのまま応答してくれると考える方が無理でしょう。

また、波形だけではなく過渡的な f 特もリニアになっているようです。第 32 図は、a, b 波間の P-P をグラフに表したものです。改造によって全般的に音圧は下がりましたが、100 Hz で -1 dB, 1 kHz で -2.5 dB, 3 kHz で -5 dB と、よりフラットに近づいていることがわかります(第 32 図で、FW 160 と 160 改の音圧は絶対的なものですが、FE 164 改、FF 165 の音圧は

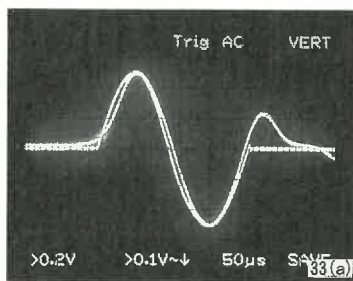
相対的なものです)。ただし、聴感上の音圧は a, b 波の P-P だけでなく、その後付随する共振によって大きく変化しますので、図がイコール聴感上の f 特とはなりません。FF 164 などは図に示される以上にハイ上がりを感じられます。

改造によって、3.4 kHz 共振をパラパラにすることはできました。が、消し去ったわけではありません。分割して高い周波数に移動させただけです。音的にもやたらポコポコ鳴っていた帯域は改善されましたが、やっぱりその上の帯域でココココ鳴ります。改善されたことは確かですが、FW 160 オリジナルの音の印象を変えるほどのものではありません。言い換えれば、本質的な改良とはなっていません。

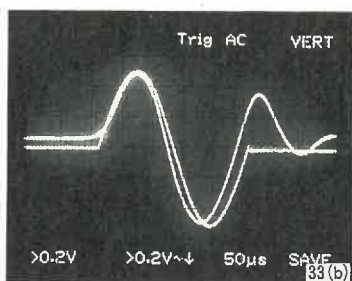
なお、大春氏ご自身は、さんざんにリップ補強(など)の、私のようにまともな人間からは、正気の沙汰とは思えないような試みを繰り返された挙げ句、現在はセラミック振動板スピーカの研究に取り組んでおられることは読者諸兄もご存知と思います。

## 高域の再生限界

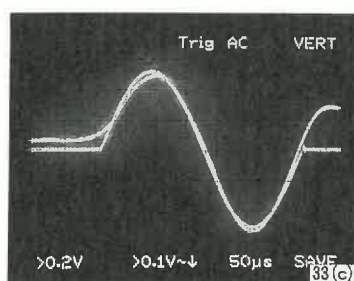
第 33 図に、サブ・コーンを切りとった FF 164 改、FF 165 N、FW 160 それぞれの“立ち上がり限界”周波数での応答を示します。“立ち上がり限界”とは、私が勝手に名前をつけたのですが、a, b 波(これも私が勝手に名前を付けたのですが)の P-P を 100% と



(a) FE 164 改, 4 kHz



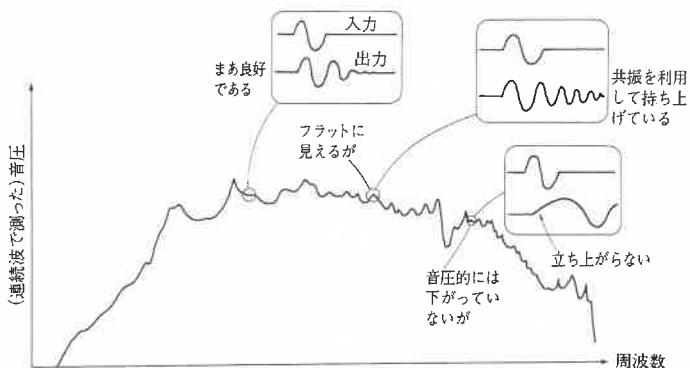
(b) FF 165 N, 4 kHz



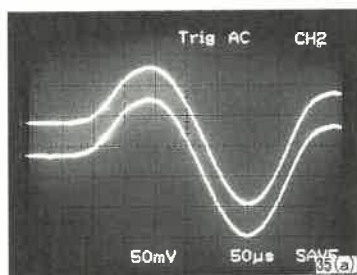
(c) FW 160, 3.2 kHz

a, b 波の P-P を 100% とし、a 波の立ち上がりが入力信号に対して遅れない上限の周波数を求めた。いずれのスピーカも連続波では十分に使用できるとされる帯域であるが、単発サイン波では立ち上がりの限界となっている。

〈第 33 図〉 立ち上がり限界周波数での応答



〈第34図〉 連続波では応答するが……



〈第35図〉 パワーを10倍に変えてみる (FW 160改) 上を基準として、下が20 dB レベルをアップした応答である。見たところでは同じである。もちろん飽和領域に入れば変化が現れるだろう。

し、オシロスコープで見て、a波の立ち上がりが入力信号に対して遅れない上限の周波数を求めたものです。

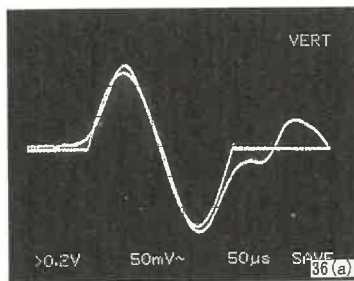
どんなスピーカでも、高い周波数に対してはそれなりに応答はしますが、a波の立ち上がりは遅れてしまいます (第34図)。連続波的には応答があったとしても「立ち上がり限界」周波数以上では、a波は立ち上がりません。

FE 164改、FE 165 Nは4 kHz弱、FW 160は3.2 kHzがそれぞれ限界であり、いずれも連続波によるレスポンスに比べ、過渡的な高域限界は案外と低いことがわかります。なお、立ち上がり限界は20 dB程度でしたら、アンプの出力を変えても変化しないようです (第35図)。したがって、スルー・レートのように振動板の加速度に機械的なりミッタが働いているわけではないようです。

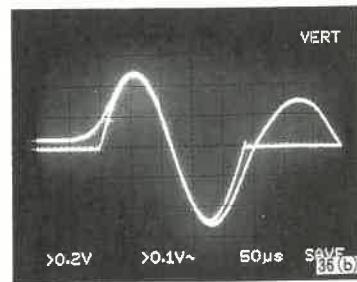
連続波であれば再生されるにもかかわらず、渡過的には応答がついて行かないことが、f特 (連続波による) はあってもトウイータを付加すると高域が改善されるフルレンジや、f特はあるはずなのにスーパー・トウイータを欲

しがるトウイータや、f特的には十分再生できるのにやたら重たい音のするウーファの原因でしょう。

単純に考えると、音圧は振動板の加速度に比例し、 $F=m \cdot a$ より、加速度はヴォイス・コイルの駆動力と質量の比で決まります。よって、立ち上がり限界も同様に決まると考えられます。FW 160は $m_0=21$  g、38 cm ウーファであれば126 g前後はあるでしょうから、単純に6倍とします。また、磁束密度はそんなに変わらないと考え



(a) FW 160改の立ち上がり限界周波数 (4.2 kHz)



(b) FW 160オリジナルの4.2 kHzでの応答

〈第36図〉 改造によって振動板の質量は増加したにも関わらず、立ち上がり限界は向上している。一般に言われる振動系の質量/駆動力比は、実際には高域限界を規定するパラメータではないことがわかる。

れば、

$$3200/6=533 \text{ Hz}$$

が立ち上がり限界周波数と計算されます。

この手の計算を示すと、「だから振動板は軽ければ軽いほどよいのだ」との声が聞こえてきそうですが、そうは問屋が卸しません。 $F=m \cdot a$ だけで計算できると考えたことが、単純極まりない発想なのですが、そこから軽い振動板がよいと結論しては、飛躍のしすぎとしか言いようがありません。が、過去の過ちは忘れましょう。

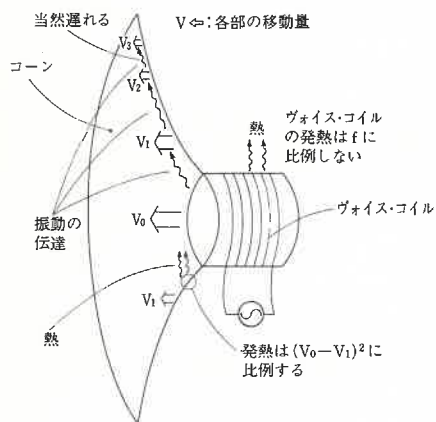
大春流リブ補強を実施したFW 160改の立ち上がり限界を第36図 (a) に、念のため (b) 図に同じ周波数でのFW 160オリジナルの応答を示します。リブ取付によってケント紙とかエポキシ接着剤の質量が加わり、振動系の質量は増加し、実際に音圧は低下しますが、立ち上がり限界は改善されているのがわかります。第1表に示されるように、FW 160オリジナルの実効質量でさえ、FE 164やFF 165 Nの3倍もあります。160改はそれ以上になっています。けれども立ち上がり限界はほとんど同じです。まさか磁束密度×コイルのターン数が3倍あるとは考えられません。

結論として、質量/駆動力比は、立ち上がり限界 (高域限界) を規定するパラメータではありません。

第37図に、それらしいメカニズムを示します。ヴォイス・コイルは、た

型名	FW 160	FE 164	FF 165 N
口径	16 cm	16 cm	16 cm
インピーダンス	4Ω	8Ω	8Ω
最低共振周波数	30 Hz	50 Hz	45 Hz
再生周波数帯域	~10 kHz	~20 kHz	~16 kHz
出力音圧レベル	87 dB/W	92 dB/W	94 dB/W
入力	100 W	60 W	70 W
m <sub>0</sub>	21 g	7.0 g	7.5 g
Q <sub>0</sub>	0.27	0.4	0.25
実効振動半径	6.5 cm	6.5 cm	6.5 cm
マグネット重量	830 g	330 g	600 g
総重量	2.6 kg	1.1 kg	1.6 kg

〈第1表〉 測定に使用したスピーカ・ユニット



〈第37図〉 振動板がヴォイス・コイルについてゆかない

とえ 63 cm ウーファに 20 kHz を入力したとしても必ず動きます。「振動系の質量が大きいから動かない」などと、程度の低い思いつきを振り回す人がいるようですが、無視しましょう。けれども、振動板は“動かない”との説はまんざら嘘ではないでしょう。コーンの上に加速度センサーを取り付ければ、ヴォイス・コイルで検出される加速度の 1/100 とか 1/1000 に減衰していることは間違いありません。

どこで動きが消えてしまうか、柔らかな振動板以外には考えられません。ヴォイス・コイルの動きがコーン紙によって吸収され、そして振動板が“動かなく”なれば、音も放射されなくなります。

もう 1 つ状況証拠を示します。ウーファの耐入力、何 Hz の信号を入力するかで変わります。信号の周波数が

上がれば上がるほど、耐入力は下がります。熱でヴォイス・コイルが断線するからです(と、有名メーカーのエンジニアがラ技紙上で語っていました)。あえてエンジニア氏は黙っていたのですが、高域になればなるほどコイルが劣化する理由は、コイルは動くけれども振動板が動かないからです。コイルは動くけれども振動板が動かないから、そこに摩擦熱が発生しコイル周囲の温度を上昇させます。ヴォイス・コイルそのものの発熱は、同じパワーを食わせているのであれば同じカロリーです。

ヴォイス・コイルは動くけれども、振動板が柔らかすぎて動かないことが、 $F = m \cdot a$  よりも大きな要因となり、高域の限界を決めています。したがって前述の 38 cm ウーファの推定は、この要素を加味しなければなりません。実

効振動板直径を 16 cm では 12 cm, 38 cm では 30 cm と仮定すると面積は 6 倍となります。ヴォイス・コイルの直径を 2 倍としても、6 倍の面積を 2 倍の面積で支える計算となります。実効振動質量からも、また実際のコーンからも、剛性が 3 倍もあるとは思われません。これがどの程度の損失を生み出すかはわかりませんが、適当に 25 % 減としますと、

$$533 \times 0.75 = 400 \text{ Hz}$$

がよいところでしょう。

ついでに、ヴォイス・コイルが動いてから振動板の各部分が動くまでにデレイがあるはずですが、どの程度影響があるかはデータがないのでわかりません。が、大口径ほど不利になることは間違いありません。

38 cm + 広帯域ホーンシステムの、例外なく独特の重い、立ち上がりの悪い音がします。これは、中低域の再生能力に問題があるはずだと予言いたします(まだ測ったことはありません)。

高域特性を改善するためには、振動板の軽量化ではなく、剛性強化が必要です。紙の繊維に混ぜものをしたところで、高が知れています。紙の厚さを増すとか、リブ補強するとか、金属とかセラミックとかを採用するとか、強力な改善が必要でしょう。第 32 図、第 35 図に示される立ち上がり限界周波数がほとんど同じになっていることから、紙の振動板で 16 cm とすると、どうしてもこのあたりが限界となるのかもしれない。

## 高域再生についてのまとめ

高域のレスポンスを向上させるためにも、アコースティック低域増強法と同じ手法が用いられているようです。ダブル・コーン、メタル・キャップなど、もちろん紙のコーンも、実際には再生できない周波数を、その下で共振を作って補っています。

高域共振(分割振動)によって、確かに高域は伸びているように感じられ

るでしょう。しかし、この手法はバスレフよりも評判が悪いようです。共振系があれば、その共振周波数の上下で支配的な音となって聴こえます。加えて低域よりも敏感な帯域です。メタル・キャップでは共振も強く、さらに材料の音が目立ってしまいます。フルレンジ・スピーカの場合は、低域と高域で音が変わることも弱点となります。

ハード・ドームやホーン・ドライバーでの金属振動板がそれほど問題視されないのは、使用帯域全体に材料の音がするため、ユニットの音として認識されるからでしょう。こうなれば好みの問題です。

しかし、いずれにしても入力には存在しない“ひずみ”を付加していることには違いありません。忠実な波形再生の観点からは好ましくない方法と言えましょう。

余談にはなりますが、ラ技のフルレンジ・ユニットが、あの値段と外観と特性と作りにも関わらず、意外と高い評価を得ていることは、強い共振がないことも一因でしょう。90年10月号の大春システムの測定<sup>5)</sup>にあるとおり、5k~7kHzに見られる9kHzの弱い共振を除けば、実に見事なものです。たったの2.5k円!

高域の応答に関しては、連続波ではレスポンスがあるにもかかわらず、過渡的には立ち上がりがついて行かないことがわかりました。f特的には再生可能であっても、聴感上は再生されていないと感じることも少なくありませんが、ズバリこれが原因でしょう。今回測定した3機種<sup>6)</sup>の再生周波数帯域の上限は10k~18kHzと取説には記載され、f特の図もそれなりに伸びており、実際に連続波では再生されます。しかし、単発サイン波での立ち上がり限界周波数は、いずれも3.4k~4kHzと低くなっています。ロクハンでは高域がどうしても不足しますが、経験的にも納得できる結果です。

また、スピーカの立ち上がり限界を制限するパラメータは、一般に言われる質量/駆動力比ではなく、振動板の内

部損失と考えられます。適度な内部損失が必要と言われていますが、現状では過大損失となっていることは間違いありません。

さらに立ち上がり限界は、コーン型に限らず他の型にも存在します。ホーン型については91年2月号に示しました<sup>7)</sup>が、ドーム型、コンデンサ型など、どんなスピーカでも持つ限界です。f特上は音圧があるにもかかわらず、聴感上不足と感じられることが少なくありません。これらの場合、立ち上がり限界が支配しているのでしょう。

## おわりに

今回の測定によって、フルレンジ・スピーカにも多くの弱点があることがわかりました。しかも皮肉なことに、特性上および聴感上の弱点である高域と低域を改善するために考えられた手法が、かえって“素直さ”を失わせる結果を招いているようです。フルレンジの音の最大の魅力は、その“素直さ”であり、とくに中~中低域の“音の自然さ”であるように思います。しかし、裏を返せば、低域にも高域にも問題が存在するのであり、これらの欠点を嫌ったことが、多くのマニアをマルチウェイへと向わせる要因となったのでしょう。

けれども、スピーカの数は、増えれば増えるほど問題は増加します。しかも、ほとんどのマルチウェイ・スピーカは、フルレンジにはない欠点、位相の問題や音源位置の問題などを背負ったにもかかわらず、フルレンジの弱点さえも解決できてはいません。振動板の高域共振(分割振動)にしても、アコースティックな低域の共振(共鳴)にしても、過渡的には立ち上がらないウーファ(トゥイター)にしても、フルレンジの弱点を、そのままマルチウェイに引き継いでいると言えましょう。

振動板の素材の音がするスピーカは、すべて共振音を聴かせていると言っても過言ではありません。いくら新しい材料を開発したところで、本質的には何も改善されないでしょう。

現代のスピーカに絶対的に欠けているものは、入力信号と同じ出力を得ようとする姿勢です。スピーカといえども、基本的には電気音響変換器です。入力数値に対応する電圧を出力するD/Aコンバータと同じく、電気信号入力に正確に対応する音響信号を出力することが、最も大切な任務に違いありません。

けれども現代のスピーカは、周波数特性だけを追いかけ、周波数特性を改善するために入力にはない“ひずみ”をつけ加えることさえ行われています。しかもこれらのひずみ付加法は、陰でこっそり用いられるのではなく、堂々と推奨されたりもしています。しかしながら、周波数特性の陰で、時間的応答は、ますます入力信号とはかけ離れたものになっています。

スピーカは、周波数領域だけで考えるのではなく、時間領域で考えることが必要ではないでしょうか。私には密閉箱とバスレフ箱、デッド・マス、高域の共振(分割振動)、いずれの例でも入力信号をより正確に取り出す方法が、聴感上でも優れていると感じました。これは偶然の一致ではないでしょう。

## 参考資料

- 1) 石塚 峻、「宙吊りスピーカの提案とその実験」、ラジオ技術90年12月号、pp.76-79 (1990)。
- 2) 高橋和正、「15kgの鋼塊をユニットにつけてみると」、ラジオ技術84年9月号、pp.98-101 (1984)。(「スピーカ・システム製作集」、pp.160-163)
- 3) 高橋和正、「スピーカ・システムにおける低域拡大と位相特性改善の実験」、ラジオ技術88年7月号、pp.72-80 (1988)。
- 4) 江川三郎、「江川三郎実験室」、pp.72-74、音元出版。
- 5) 大春五郎、「超重量級SPシステムの製作」、ラジオ技術90年10月号、pp.74-81 (1990)。
- 6) 別府俊幸、「単発サイン波によるホーン・スピーカの測定」、ラジオ技術91年2月号、pp.74-79 (1991)。