

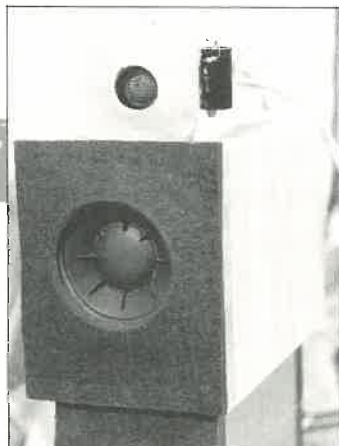
スピーカ・システムの技術者，自作者必読!!

連載

「ユニウェーブ・スピーカの 設計思想から実測まで」

スピーカの原点を時間軸でとらえた
総合理論「ユニウェーブ」。
その解説と実製作例の詳細報告。

べっぶ としゆき
別府俊幸



なぜスピーカは “スピーカの音”が するのか

スピーカは、例外なく“スピーカの音”がします。いい換えれば、スピーカから再生される音は、人間の声や鳥の鳴き声やアコースティックな楽器音などとは、どこかが異なっています。それぞれのスピーカによって、再生される“音”はそれぞれに違っているのですが、どのスピーカも人工的な響きをつけ加えている点では同じです。

また、マルチウェイ・スピーカは、これまた例外なく“マルチの音”がします。2ウェイ、3ウェイ、4ウェイとスピーカは増えれば増えるほど、周波数帯域は広げられるかもしれませんが、反面、音のリアリティは失われてしまいます。

なぜ、スピーカからは“スピーカの音”が聴こえるのでしょうか。周波数特性に原因があるとか、指向性が楽器と異なっているとか、スピーカが見えるからとか、いろいろと理由は指摘されていますが、最大の要因は、スピーカが入力にはない出力、いい換えればス

ピーカに特有の“鳴き”，簡単にいえば“ひずみ”，それも過渡的なものを生み出すことと考えられます。

いま、コンサート・ホールの中に入りスニング・ルームくらいの広さの部屋があり、音楽家はステージで演奏し、あなたは部屋の中にいるとします（第1図）。部屋の壁と天井と床は完全な防音壁でできていて、外の音は少しも聴こえない状況です。

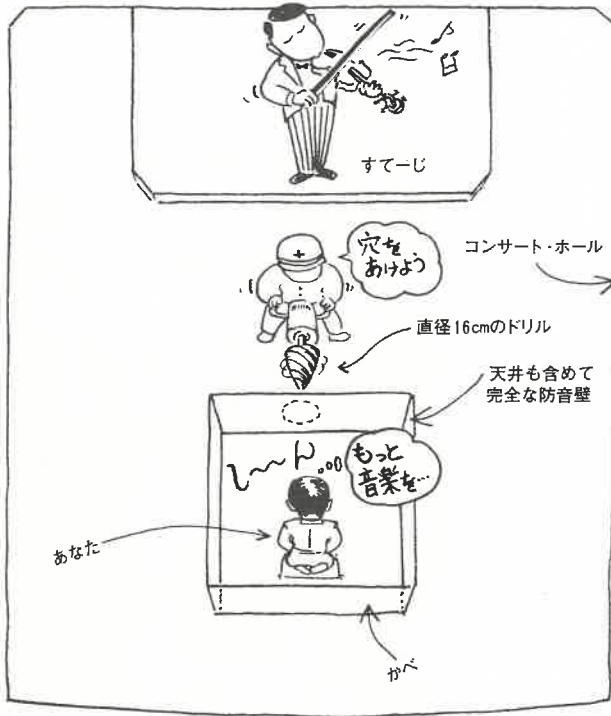
その部屋のステージに向かった壁に、直径16cmの穴を1つ開ければどうでしょう。おそらく、モノフォニックで聴いているように感じるでしょう。穴を2つにすれば、ステレオになるに違いありません。しかし、おそらくほとんどの人は、ホールの中と部屋の中で聴く音は違うと感じるはずですが（一部には、自分のスピーカと生の音は差がないと主張する人もいますが、特殊な例として除外しましょう）。そこで、部屋の壁や天井やあちこちに穴を増やしたとします。中にいるあなたには、1つ1つ穴が増えるたびに、だんだんとホールの音に近づいたと感じられます。そして、あるところまで穴を増やしたとき、ホールの音と部屋の音の違

いはわからなくなるでしょう。

これは、完全な音場の再生には、どれだけの数のマイクと伝送系とスピーカが必要なかを考えたたとえ話です。そして、ステレオ伝送ではホールと同じ環境を作り出せないことを述べた話でもあります。が、いささか楽観的すぎる話でしょう。

第2図のように考えてみましょう。穴の代わりに、2つのマイクをスピーカの前の壁の外に置き、部屋の中にはロクハン・スピーカを取り付けたとします。もちろん壁パフルです。このとき、スピーカから再生された音は、穴から直接伝わる音と同じに聴こえるでしょうか。否、ほとんどの人は差を感じるでしょう。

ロクハンでは周波数帯域が不足だという人は少なくないでしょう。それでは、38cmと25cmとホーン・スコカとホーン・トゥイタの組み合わせにして聴きましょう。ロクハンよりも生の音に近づいたでしょうか。近づいたと感じる人も、遠ざかったと感じる人もいることと思います。超低音が必要だと考える人もいるはずですが、80cmのウーファを取り付けてみましょう



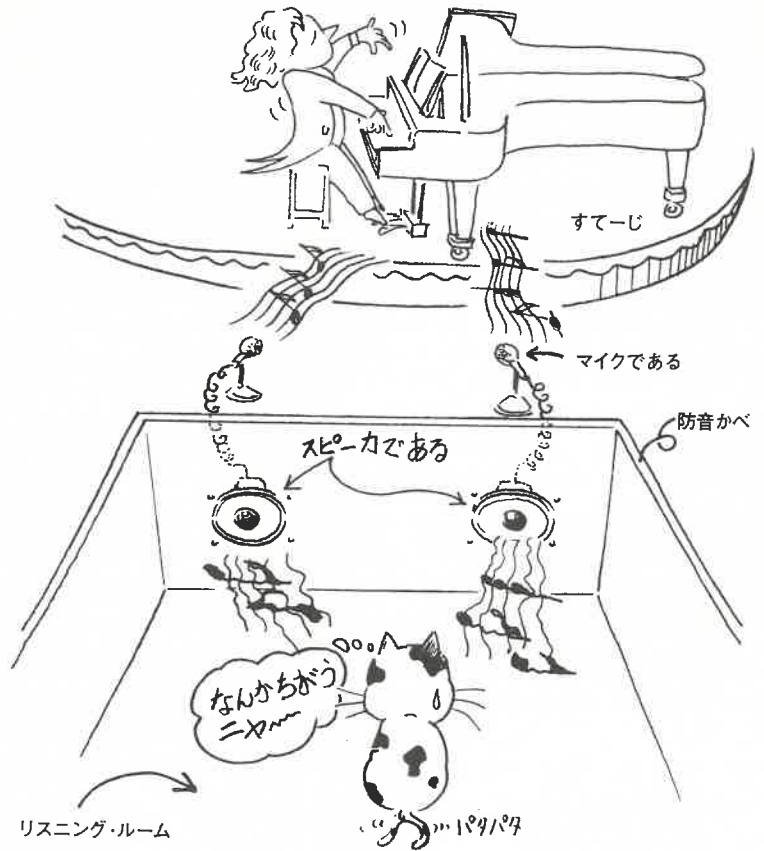
〈第1図〉コンサート・ホールの中に、完全な防音壁に囲まれたあなたの部屋がある……

う。可聴帯域より上が必要だとの意見も聞こえます。スーパーツイーターも加えましょう……。

それでも多くの方は、生の音と再生音の差を感じるに違いありません。

それでは、スピーカの音と生の音の違いはどこから聴こえるのでしょうか。いい換えれば、区別のできない、つまりはそっくり同じ音がするスピーカとは、どのような条件を兼ね備えているのでしょうか。

スピーカは、入力とは大きく異なった波形を出力します。個々のスピーカは、個々のスピーカに特有の出力パターン、つまりは特有のひずみ音を放射します。クラリネットであろうとベース・ギターであろうとおおろぎの羽の音であろうと猫の足音であろうと、常にスピーカに特有のひずみが加えられるのですから、これが聴こえないはずはありません。



〈第2図〉部屋の外にマイクを置いて、スピーカで再生したら……

なぜマルチウェイは“マルチの音”がするのか

マルチウェイ・スピーカは、2つとか3つとか4つとか、ところによっては5つとか6つのスピーカが、それぞれに、それぞれのひずみを生じ、存在を主張します。このような状態ですから、ここから“1つの音”が再生されることなど、望む方が無理というものでしょう。

ヒトは、聴こえる音から音源の種類を特定する能力を持っています。音を聴いただけで振り向かなくても、後ろを走っているのはトラックなのか乗用車なのかラッタッターなのか識別できます。この能力が音のする方向だけに依存していないことは、モノラル録音のリートを聴けば明らかでしょう。ス

スピーカから放射される音は、同じラッパから出てくるにもかかわらず、人の声とピアノの音の2つに分けて聴こえます。

自然界に存在するほとんどすべての音源は、1つの発音体もしくは複数の発音体に共通の共鳴機構によって構成されています。人の声はいうまでもなく1つの声帯の振動から生み出されるものですし、人それぞれに固有の共振系（口や鼻）を持っています。息を吹き込む管楽器も（発音メカニズムは楽器によって異なりますが）、1つの発音体と1つの共鳴管である点は同じです。ヴァイオリンは4本の弦を持っていますが1つの胴で共鳴します。ただ、ヴァイオリンでは“1つの楽器”として聴くこともできますし、EADGの4弦を聴き分けることもできます。ピアノともなりますと、どのハンマーがたたいたのか音程によってしか聴き分けられませんが、それでも“1つの楽器”として聴こえます。さらに、きちんと調律されていても2台のピアノによる演奏では、どちらのピアノが弾かれたのかもわかります。

ヒトは、音の中に含まれる何らかの特徴をつかまえて、“1つの楽器”を聴き分けられていることは確かです。どのような特徴を抽出して認識しているのかについては、いろいろと明らかにされています（文献(1)(2)に詳しい）。例えば、ひと昔前までは、周波数スペクトラムなどが考えられていましたが、アンプのf特をいくらいじったところで、トランペットの音をホルンの音に変えることができないように、それほど単純ではないことがわかっています。

しかし、その特徴をどのようなアルゴリズムで認識しているのかは、現在でもわかっていません。それにもかかわらず（当然のことというべきか）、たちどころにピアノなのかフルートなのかを聴き分けられるすばらしい能力を備えています。そしておもしろいことに、聴けば分かるのですが、オシロス

コープで波形を見たのではわかりません。

マルチウェイ・スピーカは、複数の発音体とそれぞれの発音体に特有の共振機構とに分かれています。ウーファはウーファ特有の帯域で鳴き、スコーカはスコーカで、そしてトゥイータはトゥイータで別々の鳴きを加えます。しかもウーファの“鳴き”は、ネットワークによって制限された帯域に限りません。当然2倍とか3倍の周波数でも鳴きます（2次とか3次の高調波ひずみもあるのです）。そしてこの“鳴き”は、スコーカの“鳴き”ともトゥイータの“鳴き”とも違って聴こえます。さらにいえば、それぞれの“鳴き”は1箇所から聴こえてくるではありません。しかも“鳴いている”場所までの距離も違ってきます。

これらスピーカが、スピーカごとにそれぞれ特有のひずみを発生することが、マルチウェイをして“マルチウェイの音”を再生する原因となっているのでしょう。たとえこれらの“鳴き”は、“別々の音”として認識できないとしても、異質な雰囲気、希薄な実在感として感じてしまうに違いありません。

ユニウェーブ・スピーカ

ユニウェーブは、「入力電気信号と等しい音響出力信号を得る」ことを目標としたスピーカです。スピーカから発せられるひずみが、自然音とは異なる“スピーカの音”を放射させる原因となっている以上、なんとかしなければなりません。これらのひずみは、スピーカに音をへばりつかせ、左右の広がり感、前後の奥行き感をなくすだけでなく、音像イメージを不明確にし、音像の定位を悪化させます。そして、いかにも目の前でスピーカが鳴っているような気にさせてくれます。

とは申しませんが、現状では、とても“ユニウェーブ”と呼べるようなモノはありません。なんとかユニウェーブ

に近づけようと試行錯誤しているのが現実です。

まずは、ユニウェーブ・スピーカを作るに当たって、高橋和正氏によって示された原則⁹⁾を振り返って考えてみましょう。

この原則は、

1. ユニットの音源位置合わせ
 2. 合成位相回転のないネットワーク
 3. 振動系リアクション吸収用デッド・マス
 4. 密閉箱エンクロージャ
 5. 最少バブル面積と吸音防振処理
 6. 単発サイン波応答による調整
- 以上の6点でした。

この6原則は、厳密には市販ユニットを用いてユニウェーブ・システムを製作するための方針です。もう少々明確にするために、一部を改変し、さらに順番を入れ換えましょう。

1. 単発サイン波応答によるユニットの選択、システムの調整
 2. -6dB/oct ネットワーク
 3. ユニットの音源位置合わせ
 4. リアクション吸収デッド・マス
 5. エンクロージャに音響共振器を使わない
 6. キャビネット外側の吸音処理
- 以上を「高橋和正氏の6原則(改)」と呼びましょう。

原則(1)

単発サイン波によるユニットの選択

「スピーカは楽器である」との考え方があります。まさしくそのとおりで、スピーカは音楽を再生する“楽器”です。ただし、楽器であるから特有の音、つまりはひずみを放射してよいと考えるのは、いささか短絡的でしょう。録音された音楽を最大限美しく再生する“楽器”は、特有のひずみ(音)を発生しない、真の透明な音のスピーカと考えます。もっとも、そのひずみが好きだという人は、それはそれでよいのです。

原則(1)については、改めて申し上げ

げるまでもないでしょう。周波数特性カーブをいくら注視したところで、スピーカがどのような状態にあるのか、どのような波形応答を示すのか、正確には把握できません。低域特性はインピーダンス・カーブと合わせて考えれば、ある程度は想像できそうですが、高域に関しては分割振動、振動板の共振など、f特性カーブからはほとんど読みとり不可能です。これに対して単発サイン波応答からは、ユニットの動作状態を適切に把握することが可能です。マルチウェイ・スピーカのメリットの1つとして「ユニットのピストン・モーション帯域だけを利用できる」との説がありますが、f特性カーブだけでは、このメリットを享受できているのかいないのかも判りません。そして現実には、ほとんどできていないようです。

もちろん、究極的にはユニウェーブ・スピーカはフルレンジでなければなりません。フルレンジであれば「高橋和正氏の原則(改)」の(2)と(3)も不要になります。この2点は、安易なマルチウェイ化によって生じた“問題”を解消するためのアイデアにすぎません。石塚峻氏の指摘⁴⁾を待つまでもなく、ユニットが増えれば増えるほど“ユニウェーブ”である空間が狭められることは明白です。さらに後述しますが、ユニットが増えれば増えるほど信号の持つ時間情報も失われます。なお、2個のスピーカでユニウェーブとなる位置は中心線上だけとの見解は、スピーカそのものが点音源ではありませんから、いささか窮屈すぎると考えます。後半で検討しますが、実用的なエリアはカバー可能です。

しかしながら、広帯域に満足のできるフルレンジはどこにも売ってません。連続的な特性だけでなく、過渡にも広帯域な、そして共振を排したユニットが必要です。安易に共振を利用して広帯域化したスピーカは、マルチウェイと同様、フルレンジの素直さをも失っ

ています。残念ながら今のところ、原則(2)と(3)を避けて通ることはできません。

さて、悲しむべきことに現在、市販のスピーカ・ユニットは少なくなっしまいました。その上に、ホーン型は周波数によって音源位置が前後するなどの欠点を持っていますから不適当です。別に不適当でなくても、個人的には音質の上からも使いたくないところです。

また、ダイレクト・ラジエーションのユニットでも、メタルの振動板やメタルのセンター・キャップを持つものは使いたくありません。金属の振動板は、私にはどれもこれもその共振音が支配的となり、すべてに同じ音が聴こえてしまいます。実はホーンが嫌いなのもこれが主因で、スコーカとかツイータの帯域がすべて同じ“鳴き”に聴こえてしまい、とても耐えられません。あのようにペラペラのアルミとかチタンとかベリリウムのホイルをコイルで揺すっているのに、「振動板がピストン運動している」と信じられる人が信じられません。そう信じている人が「ドーム型は振動板が分割振動する」などと平気でしゃべっているのですから……。

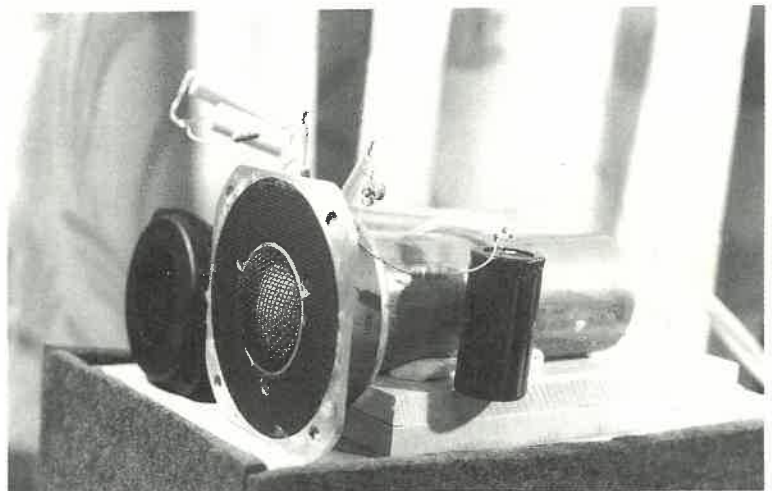
脱線しました。たいへん遺憾ながら

上記のような制限を加えざるを得ませんので、手に入れられるユニットはわずかに10数種類となります。とりあえずウーファはFW 160改(90年4月号参照)を使うとして2ウェイで組むとなると、ツイータは少なくとも4kHzから、できれば1kHzから上を任せられるユニットが必要です。また、FW 160の能率は87dB/W・m(4Ω)ですから、ツイータは90dB/W・m(8Ω)以上が必要です。家にはパワー・アンプが1組しかありませんから、羨望のマルチアンプなどにはできません。しかしながら、マルチアンプなど、優秀なフルレンジがないための窮余の策に過ぎません。マルチアンプを究極のゴールだとする意見も聞きますが、私にいわせれば究極の回り道、袋小路とでもいうべき方法です。ただ、もう1組パワー・アンプができましたら、いっていることが180°変わる可能性は否定できません。

原則(2)

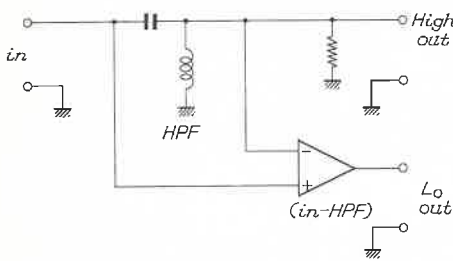
-6 dB/oct

さて、マルチウェイ化はいたしたくないとしても、どのように帯域分割するかが重要です。できるだけデメリットを抑え、できることならシングル・コーンと錯覚できるような方法(そし



●実験中の「ユニウェーブ・スピーカ・システム」

●新スピーカ総合論



〈第3図〉引き算フィルタ
2次以上の構成としても、
High+Loの合成は入力と等しく
なる。

で、まるでスピーカの音ではないと錯覚できるスピーカ)を用いたいところです。分割された音、あるいは別々の音に聴こえるようではユニウェーブ、でなくてスピーカ失格です。それほど極端でなくても、マルチは別々のスピーカの鳴き、いわゆる“マルチの音”が聴こえます。

クロスオーバー周波数については「聴感上敏感な3kHzでの分割は避けるべき」とか、「人の声のファンダメンタル帯域は1つのスピーカにする」とかの「設計指針」が聞かれますが、普通のマルチウェイには当てはまるとしても、ユニウェーブには関係ありません。どこで分割するかは、ユニットの応答にのみ依存すべき問題です。

ところで、スピーカ・ネットワークは、遮断特性と合成音圧特性だけが問題とされ、なぜだか高次のフィルタ、つまりは急峻なスロープが高級であるとされています。-6dB/octでは遮断スロープが急でないから音が重なりあうとか、重なりあう帯域が広いから音が濁るとかいらわれていますが、問題外です。2次以上のフィルタはすべて信号波形をひずませます。

例外として引き算式のフィルタがあります(第3図)。引き算フィルタでは伝達関数=1となり、過渡的なひずみは生じません。しかし引き算フィルタでは、片側を高次の構成としても、引き算された残りの側の遮断特性がそれほど急にはなりません。このため、急峻なスロープを要求されるチャンネル・デバイダ用には普及しなかったでしょう。

第4図(a)に-6dBと-12dBネットワークのインパルス応答を示し

ます。一目瞭然、-12dBは独特のひずみを生じています。連続波では振幅と位相が変化するだけですが、過渡波ではもろにひずんでしまいます。

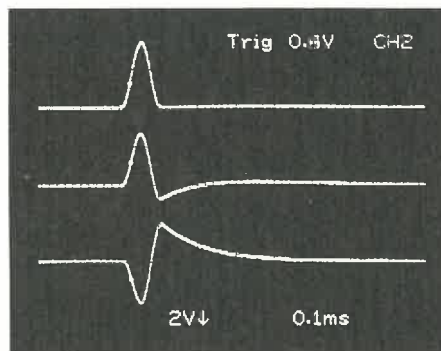
第4図(b)はインパルスの幅を変えながら、-12dB逆相接続のネットワークの出力を観測した図ですが、インパルスの幅によって、極性がひっくり返っています。広いスペクトラムを持った信号では、トゥイータとウーファの振動板が逆方向に動いてしまいます。

-12dBや-18dBのネットワークでは、信号がそのままの形で通り抜けることはできません。決まり文句を繰り返しますが、一度、-12dBや-18dBのネットワークによってひずめられた信号は、二度と元には戻せません。

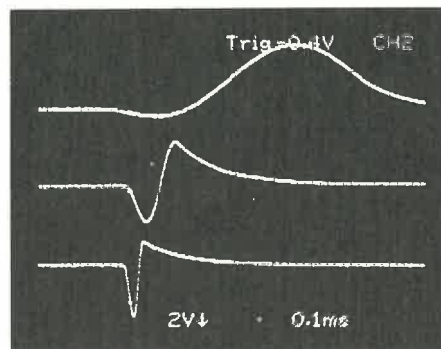
さて、ここで本当に重要な問題は、ひずみが発生することではなく、この波形の変化が聴こえるか否かです。「位相は聴こえないのだからわかるはずがない」と一言で断定される方もあるようですが、そもそも、このような過渡現象に“位相”を持ち込むことが無理というものです。が、最近ではその位相さえも聴こえるといわれています。

たとえば、第5図のような波形の違い(3次の高調波の位相を変えた場合)は、音も違って聴こえます⁹⁾。第6図はもっと極端な例です。この4つの波形も、フーリエ変換すれば周波数スペクトルは同じです。が、音は違いますが¹⁰⁾。もしも位相の違いがわからないのであれば、4つの波形は同じに聴こえるはずですが、ただし、波形ほどには違わないようで、似通った音に聴こえるとされています。

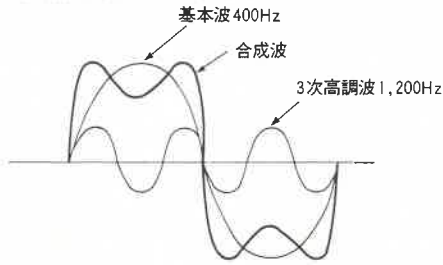
似通って聴こえる点は第5図の合成波でも同様で、実験したキャボット氏らは「テスター達は、最初、違いを聴き分けるのが困難であった」と述べています。ということは、「慣れなければ



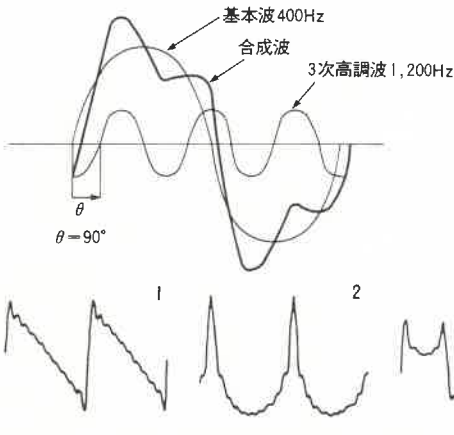
〈第4図(a)〉
-6dB/octと-12dB/octネットワークのHi+Lo合成インパルス応答(1kHzクロス)
上:-6dB
中:-12dB正相
下:-12dB逆相
-6dBの出力のHi+Loの合成は入力と等しい。しかし、-12dBでは正相接続でも逆相接続でもインパルスはひずんでしまう。



〈第4図(b)〉
-12dB/oct(逆相)ネットワークのインパルス応答(1kHzクロス)
インパルス幅を変えたときの出力変化である。波形の極性までもひっくり返ってしまう。



〈第5図〉正弦波に3次の高調波(正弦波)の位相を変えて合成する(文献(5)より)。



〈第6図〉1から4までの波形は、スペクトルは同一であるが成分間の位相関係が異なるようにつくられた音に対応している。これらの音は、波形は大幅に異なるが、非常に似かよって聴こえる(文献(2)より)。

ばわからない」ということにもなります。が、裏を返せば、「慣れてしまえばわかる」ということでもあります。ということは、これらの音の違いが聴こえるためには学習が必要です。気がつかなければ一生平気であるのに、一度聴こえてしまうと次から無視できなくなる、あの、恐怖の学習効果です。「電線を変えても音は変わらないでしょう」といっていた人が、ある日突然「変わるんですよー」と手のひら返す事例(自分のことである)は、読者の周りにもごろごろ転がっているに違いありません。そうすると、昨日まで「部品で音が変わることはない」といっていた人が、「ASCでなければだめだ」などと他人にも押しつけるようになってしまいます。

想像に難くないのですが、逆相接続の-12dBネットワークでは、第5図(a)の波形が(b)に化ける可能性があります。リプシッツ氏⁹⁾によりますと、2次(-12dB)と3次(-18dB)の

パタワース、4次(-24dB)のリンクウィッツ=ライリー・フィルタ⁷⁾(1次のパタワース・フィルタを縦列接続したもの)に方形波、のこぎり波などの電気信号や音楽を通して聴いたところ、フィルタを通さない場合との違いが明確にわかるとのことです。しかし反対に、これらのネットワーク・フィルタ特性の違いは聴こえないと主張する研究者もあります(文献(8)など、他にも複数ある)。まあ、両方の意見があるのですから、それほど致命的な“ひずみ”を発生してはいないとも考えられます。

ところで、三菱電機のスズキビデオ氏ら⁸⁾は、トーン・バースト波を使った実験から、位相によるひずみの知覚能力は個人差が大きいと述べています。とすれば、-12dBのネットワークでも-6dBでも違いが聴こえない人も少なくないのかもしれませんが。

第4図のインパルス応答を電氣的に足し算し、友人(オーディオ・マニア

には限らない)にも聴いてもらいましたが、私を含め3人とも違いがわかりました。これだけ波形が異なっているのですから、違いが聴こえないほうが不思議です。私などは、-12dBの逆相での音が、そのままスピーカの音に結びつくようにも聴こえます。もっとも、高次のフィルタの音が良いと感じる人もいるのかもしれませんが。ですが、よいと盲信しているだけで-6dBを試みたことがないのなら論外です。

なお、これらの“2次以上のフィルタによるネットワークひずみ(英語ではフェイズ・ディストーションといいますが、位相と訳すと話がこんがらがりそうなので)”は、次に述べる“時間差ひずみ”よりも容易に知覚できるようです。

大むかし、ホーン・スピーカのユーザーであった高橋和正氏や大春五郎氏は、当時から「-12dBや-18dBよりも、-6dBが音がよい」と感じておられたそうです。“時間差ひずみ”を持ったシステムでも“ネットワークひずみ”は検知できるに違いありません。なお、大昔、ホーン・スピーカのユーザーであった別府俊幸氏は、固定観念に捕らわれていたため-6dBを聴いたことがなかったそうです。

位相よさようなら

「位相は聴こえない」とは、かの、ヘルムホルツ大先生がおっしゃったのが始まりだそうですが(オシロスコープもない時代ですよ!)、個人的経験でも、サイン波では位相は聴こえません。右と左のスピーカから位相の異なったサイン波を再生して聴いたことがありますが、位相差 0° 以外では、さっぱりわかりませんでした。位相差が 0° のとき、サイン波は両方のスピーカの中央に定位しますが、位相差が大きくなるにしたがって、音像は不明確になり、 $\pm 10^\circ$ 以上では、どうなっているのかわからなくなりました。 20° の位相差でも 80° でもぼやっとした印象にはか

わりありません。不思議なことに180°に近づくと、なんとなく逆相の音に聴こえるのですが、これは私がオーディオ・マニアだからでしょうか。

この実験結果からは、ステレオ音像の定位に関与しているのは位相差ではなく、到達時間差であるということがいえそうです。なぜなら、連続波ではわからなくても、インパルス様の波形では時間差(位相差ではない)があれば音像は移動する¹⁰⁾からです。もちろん定位には、時間差だけでなく音量差などのパラメータも関与しています。

ところで、複数のユニットを使っている1つのスピーカ・システムにも、同様の現象があります。連続波で聴く限りはネットワークの次数を変更しても、ユニットの前後左右の位置をずらしても、まずわかりません。ところがインパルス(ただし“パルス”よりもレイズド・コサイン波がわかりよく、もちろん単発サイン波でもわかる)では、ネットワークの次数ははっきりと区別できます。ユニットの位置も(インパルスの場合はパルス幅を変える必要はありません)、5mmも動かせば十分わかります。そしてもちろん、音楽を聴いても、これらの差は聴こえます。

ところで“位相”とは、特定の周波数での時間差を意味する用語であり、過渡的な波の時間差を表すために使用する言葉ではありません。連続波では位相差45°と表せても(これは暗黙のうちに周波数N[Hz]を前提としている)、音楽信号ではこのような表現は無意味です。

-12dBネットワークの場合、低域側はクロスオーバー周波数で90°位相が遅れ、高域側は90°進みます。そこで一方を逆相にすると合成和は0°になるといわれるのですが、サイン波ではそうかもしれませんが、永遠に持続する周期信号でなければ、そうは問屋が卸しません。信号が入ってくる前に“進む”ことなどありません。極性を反転したところで、遅れた波形は遅れたま

まです。過渡的には、第4図に示したとおり、信号はひずみます。

そして、われわれが聴く音楽(自然音もそうです)は、周期的な信号ではありません。インパルスをひずませるネットワークは、音楽をもひずませるのです。

そもそもスピーカ・ネットワークに“位相”なる概念を持ち込んで考えるから話がややこしくなったのでしょう。しかも同時に、位相は聴こえないとの前提をも持ち込んでいるのですから、結局のところ、位相を考慮してはいなかったのです。結果として、f特グラフだけですべてを考えていたのでしょう。その上、われわれが聴いている信号の性質を理解しようとししないで、連続波での現象から結論していたのではないのでしょうか。

しかし、再生波形がひずんでいたら、それは聴こえます。

原則(3) ユニットの 音源位置合わせ

帯域分割によるデメリットを少なくするもう1つの鍵は、スピーカ・ユニットから耳までの距離を同じにすることです。たとえ-6dB/octのネットワークを使っていたとしても、スピーカからの距離差があるならば、依然として“時間差ひずみ”を聴いていることになります。しかし、完全な距離合わせは、これまた不可能でもあります。

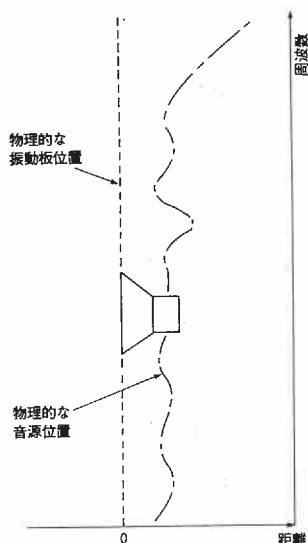
ところで、音源からの距離差も連続波による測定ではわかりません。たとえば100m離れていたとしても、2つのスピーカから放射されたサイン波は(0.3秒待てば)1つに合成されます。しかし過渡的には、100mはおろか1cmの距離差でも聴こえる人には聴こえます。

どれだけの距離差があれば検知できるかも興味深い問題です(この点に関して、現在実験中です)。状況は異なりますが、2つのスピーカから時間差を

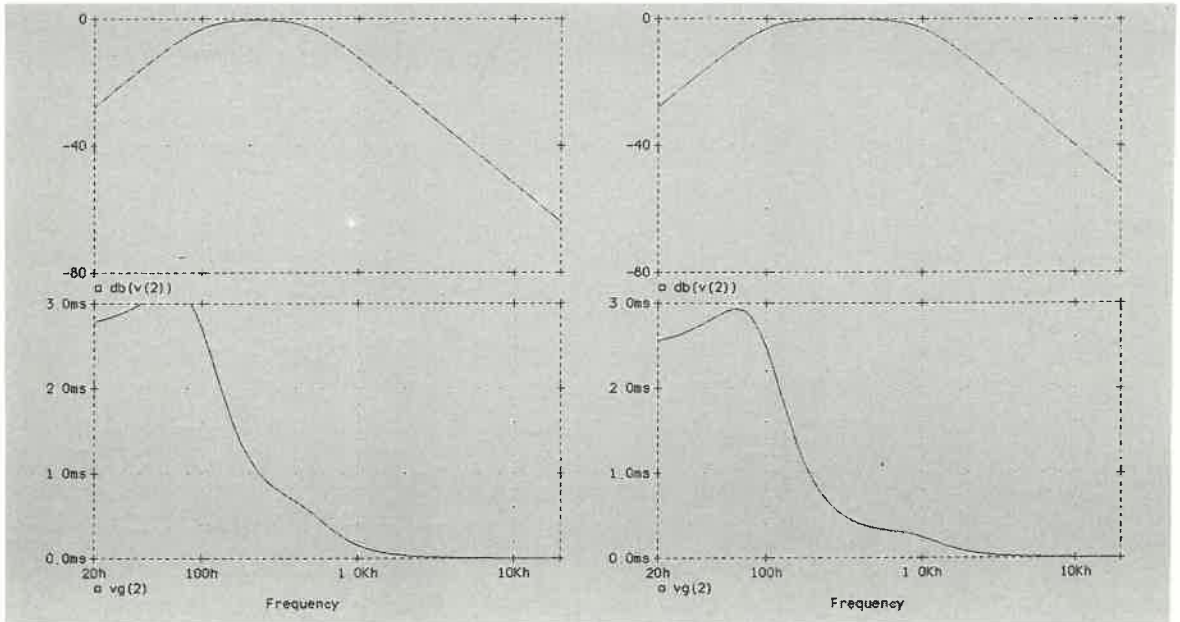
持ったパルス聴かせた場合には、敏感な人は1μsで検知できるそうです¹¹⁾。平均では30μs(距離にして1cm)程度だそうですから、“ネットワークひずみ”と同様、個人差が大きいようです。そういえば昔、ある中音ホーンの利用者が「低音ホーンは音が遅れて聴こえるからよくない」と某誌に記していました。某氏の場合、数十〜数百μsはわからなくても、数ms以上では気がついたのでしょう。

さて、91年1月号の実験¹²⁾での“最適位置”は、単発サイン波応答によって探したのではなく、高橋和正氏の聴感が決めた位置です。1cm(30μs)どころではありません。2~3mmです。ちなみに私は、2kHzのクロスオーバーで、3mmも動かせば確実にわかりますが、安易に測定器に頼って位置を決めています。わずかな抵抗の音の差も追求できるマニアには、音源の距離差が聴こえないはずはありません。しかし、最適位置を聴き分けることができるかどうかは、また別です。

ところで、スピーカの音源位置がどこにあるのか、これさえわかれば単発サイン波応答に頼らなくても距離あわ



〈第7図〉スピーカの物理的な音源位置は、物理的な振動板位置より奥になる。



(a) 100~500 Hz

(b) 100~1 kHz

〈第8図〉周波数特性と群遅延特性

2次のローパスとハイパス・フィルタを組み合わせ、群遅延時間を計算した。現実のスピーカも必ず時間遅れをとまっている。もっとも実際のスピーカの実性は、もっと複雑になるが……。

せが可能になります。ところが、これがなかなか難しい問題です。まず、スピーカそのものがバンド・パス・フィルタ特性を示します。さすれば、そこに必ず遅れ時間（厳密には群遅延時間）が生じます。つまりは、スピーカはすべて、その振動板の奥（マグネット寄り）に実音源を持ちます¹⁴⁾（第7図）。ヴォイス・コイルが振動源だからそこが音源であるとの珍説も耳にしたことがあります。そうではありません。振動板を動かす力はヴォイス・コイルが発生するとしても、空気を動かすものは振動板です。ここが音源です。なお、振動板より手前に音源が現れるスピーカの話も聞きますが、リスナー寄りで何か（別にホーンとはっていない）が鳴っているからでしょう。

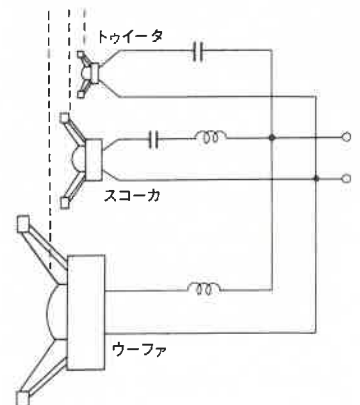
第8図は、2次のハイパスと2次のローパス・フィルタの組み合わせによるシミュレーションです。時間遅れがあり、しかも、遅れ時間が周波数によって変化することがわかります。周波数特性によって音源が振動板の奥の何

cmにあるかが異なり、さらに周波数によって音源位置が前後することも明らかです。これはスピーカの型には依存しません。再生帯域が限られているために起こる現象です。

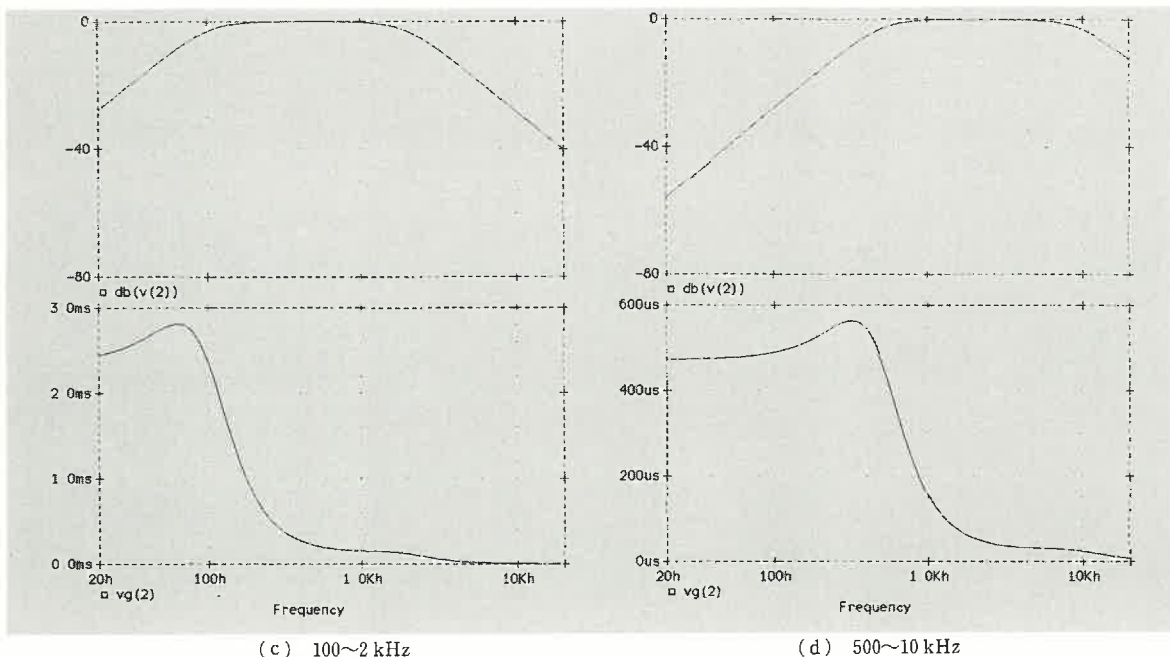
第8図のシミュレーションからは、低域ユニットほど遅れ時間も大きいことがわかります。スコカ帯域（第8図(e)）では40 μ s（14mm）程度ですが、ミッド・パス帯域（第8図(b)）では0.4ms（14cm）程度となります。これは、単発サイン波測定で、ウーファの振動板をスコカの振動板よりも前に設置しなければa波が一致しない経験とも合っています（第9図）。かつて、音源は振動板位置で合わせるなどと無責任なことをいった人（私です）がいましたが、それほど単純ではありません。申し訳ありません。「平面スピーカであれば同じバフルに取り付けただけで位相が揃う」などといった人もいるようですが（私ではありません）、これもまた真実ではありません。

もう1点、第8図からは、興味深い

現象が読み取れます。ユニットの帯域が狭ければ狭いほど遅延時間（群遅延）は長く、そして時間の変化も大きくなります（例えば第8図の(a)と(b)と(c)）。帯域分割を増やすデメリットが、また1つ明らかになりました。スピーカは、増やせば増やすほど再生帯域が狭められ、遅延時間は増加し、再生波形のひずみは大きくなります。つ



〈第9図〉ウーファの振動板は、スコカの振動板よりも前に位置しなければユニウェーブにならない。



(c) 100~2 kHz

(d) 500~10 kHz

いにつけ加えておきますとクロスオーバー・ネットワークの遮断特性を急峻にすればするほど、つまりは次数を高くすればするほど、遅れ時間は大きくなります。

なお、実在のスピーカの音圧特性は、第8図のようにスムーズではありませんから、遅延特性にも複雑な山谷が現れます。また、これはリニアな系でのシミュレーションですが、スピーカの動作には非線形成分が少なからずあります(たとえば、出力音圧によって高調波ひずみのレベルが変わったりする)から、遅延時間の変化もより複雑かもしれません。逆にいえば、シミュレーションよりも前後移動が大きくなるのであれば、それはユニット自体に問題があります。さらには'91年4月号のダブル・コーンなどの応答例¹³⁾にもみられるように、振動板が平面でなければその影響も受けます。ウーファでは、振動板だけで5 cmから10 cmもの距離差があります。が、単発サイン波を聴いている感じでは、周波数が低くなるほど距離差もわかりにくく(例えば、1 kHzの波長は34 cmですが、50 Hzの波長は6.9 mです)なり

ますから、ウーファを平面振動板にするよりは、スコーカとの距離差をなくす方が重要です。

八谷具佳氏によると、やはり音源位置はスピーカごとに測定してみなければ判らないそうで、結局のところ単発サイン波応答に頼るしかなさそうです。結果として、今回のユニットの組み合わせであれば、寸法どおりに組み合わせていただければ応答は保証できますが、それ以外の組み合わせではなんとも申し上げられません。

原則(4)

デッド・マス

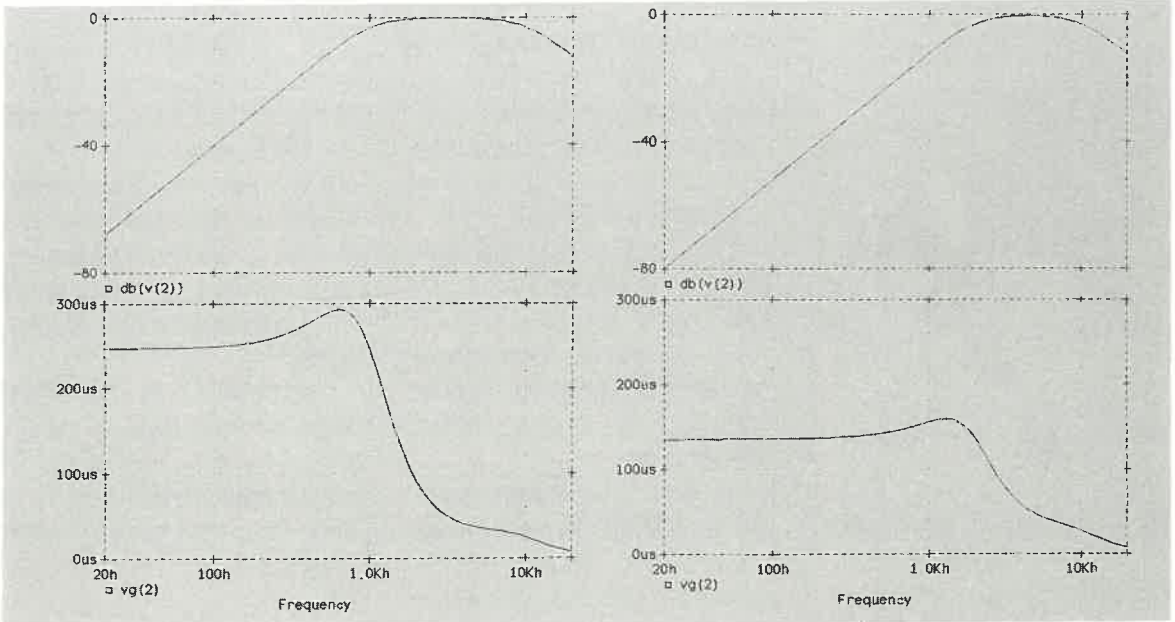
デッド・マスは、ヴォイス・コイルや振動板などの“振動系”の動きの反作用による、マグネットやフレームなどの“構造系”の振動を減少させる手法です。振動系が動けば自然の摂理として、構造系は反対方向に動きます。構造系が動けば音も出ますし、振動系にある種の変調ひずみをつけ加えることにもなりかねません。スピーカにおけるデッド・マスは、ターンテーブルにおける慣性モーメント、電源におけるトランスとケミコンの容量と同じく、

大きければ大きいほど音に安定感を生み、細部までもクリアに表現します。

デッド・マスは、箱の振動を押さえますから、一見、箱の補強と同様な効果をもたらすようにも思われます。しかし、おもりの効果は、補強の効果とは本質的に異なります。**箱の補強では、振動モードを変えることはできませんが、振動のエネルギーを減らすことはできません(第10図)**。箱に伝わったエネルギーは、すべて箱で消費しています。板を厚くすれば効果があるのは、与えられたエネルギー当たりの振幅が小さくなるからです。これに対しデッド・マスは、**振動板以外に伝わる振動エネルギーそのものを減らします**。はるかに大きな効果が得られる道理です。

また、箱の強化では、フレームなどのスピーカそのものの不要振動を少なくする効果は望めません。もちろんおもりは、振動板以外の振動すべてに効きます。初めて試したとき、ユニット裸のままでも効果が聴こえました。

デッド・マスがどれだけあればよいのかについては、未だ定説はありません。が、**重ければ重いほど構造系の振動を抑えられますし、かつ音波の伝播**



(e) 1k~10 kHz

(f) 2k~10 kHz

速度が早くなければマスとして働かなくなり、硬い材料であることが必要であり、そして振動系の動作と同じ方向、つまりはマグネット後方の軸上に集中させなければ、たわみなど他の要素による制限も大きくなってきます(第11図)。当然ながら「振動系+動かした空気+重量」に対抗する質量で、振動系が重ければ重いほど、そしてスピーカの効率が高ければ高いほど、デッド・マスも重くなければなりません。

FW160 (振動系の実効質量21g) を

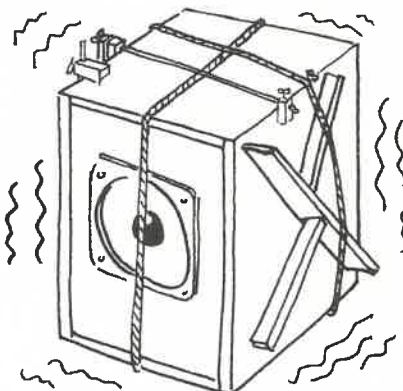
6畳間で試作した限りでは、2kgでも効果はありました。が、もう少し欲しいところ。単に寸法的な制約から17kgとしていますが、もっとあっても良いかもしれません。ただし、この手の変化は対数的に効きます。おそらく2kgから17kgと同じ効果を得るためには、17kgから145kgに増やさなければならぬでしょう。なお、大春五郎氏によると振動系の10,000倍必要だそうですが、200kgにするには床が心配です。

とりあえずむりやり法則化すれば、

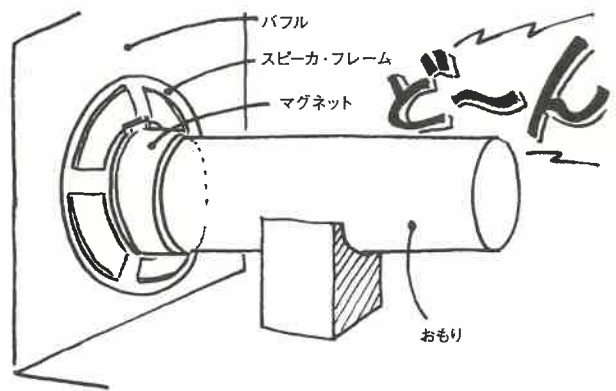
口径[cm]=kg、つまり10cmであれば10kg、20cmは20kgでどうでしょう。

原則(5) 音響共振器を使わない

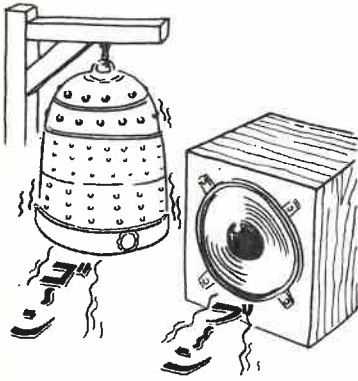
エンクロージャは密閉式に限るといのがオリジナルの高橋氏の原則でしたが、この点はもう少し広くとらえてもよいと思います。共振器さえ使わなければ、OKでしょう(第12図)。これは低域はもちろんですが、中高域でも同じことです。密閉箱であっても、箱



<第10図> いくら箱を補強しようと、振動エネルギーを減らすことはできない。



<第11図> おもりは、マグネット後方軸上に集中させる。(おもりをスピーカのフレームで支えようとしてはいけない)。



〈第12図〉ウーファの前に鐘をつるして低域で共振させる（バスレフの原理）。

鳴りするようなやわな代物では問題です。いかにうまく箱を鳴らそうとも、特定の帯域でひずみをつけ加えていることに変わりはありません。箱を鳴らそうとの発想は、ユニウェーブとは次元の違う世界です。

ところで、このように原則を書き換えたところで、依然としてバスレフもバックロードもドロム・コーンも、もちろん低音ホーンもダメなのです。ほとんど適応は広がっていません。あえて密閉箱以外を上げれば、十分に強固な平面バフルです。平面バフルではユニットの背面から放射された音が回り込めますが、十分大きなバフルであれば、背面からの音は部屋の反射と等価に感じられるでしょう。もちろん大きく強固なバフルの前面は、吸音処理されなければなりません。

バスレフに代表される共振器は、見かけ上の音圧をもたらしますが、特徴的な音（ひずみ）をも持ち込みます。BBCリサーチ・センタのハルウッド氏⁸⁾は、共振周波数近辺で機械インピーダンスが大きく変化するためにひずみが発生し、聴感上有害であるとの見解です。そういわれれば、BBCモニターを名乗るスピーカにバスレフ・ポートはありません。

この“バスレフひずみ”も、サイン波による連続的な測定では見つけだすことができません。むしろバスレフ箱

の場合は低域での音圧が上昇していますから、高調波ひずみのパーセンテージは低くなるかもしれませんが、しかし過渡的には、入力にはない出力が発生しているのですから、“ひずみ”以外には呼びようがありません。

このように考えますと、“ネットワークひずみ”も“時間差ひずみ”も、“バスレフひずみ”もホーン・スピーカの“リバーブひずみ”も、すべて同様の性質、連続的には現れないが、過渡的には現れる、を持っていることがわかります（第13図）。

これらスピーカの“過渡的ひずみ”が、どの程度聴感上有害であるかは難しいところです。周波数特性のこぼこ（これも“ひずみ”に違いありません）や高調波ひずみやFMひずみなどの“連続的ひずみ”と比べ、より有害なのかどうかはわかりません。が、裏を返せば、周波数帯域を広げ“周波数特性ひずみ”を低減することが最重要であると即断する根拠もありません。

おそらく“過渡的ひずみ”も、その他のひずみと同じく、聴こえる人とそうでない人がいるでしょう。どんな音でもそうですが、その成分に注意を向けなければ聴こえてはきませんし、知らなければ聴こえたとしても認識できないでしょう。ヒトは、盛大にトラン

ジェントひずみを発生するスピーカからでも、カートリッジのボディ鳴きを捕らえたりもできますし、強烈な振動板の共振音のなかからヴァイオリンの音を聞き分けたりもできます。注意が払われれば、多くの人がこれらスピーカ・トランジェントひずみを聴きとることになるでしょう。むしろ、聞き分けた上で許容するか否かは、個人個人の問題です。

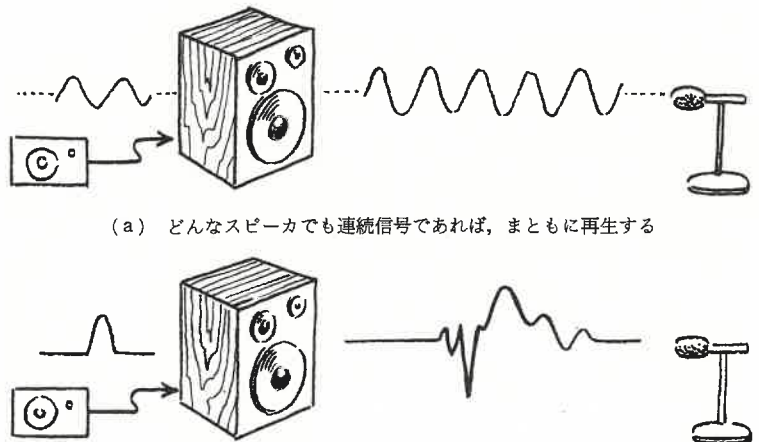
一般にスピーカにおいては、“周波数特性ひずみ”だけを追いかけ、f特を伸ばすことしか考えられていません。が、そろそろ連続的ひずみだけでなく、過渡的ひずみにも目を向けることが必要な時期にきているのではないのでしょうか。

高橋和正氏の原則(改)の(4)、(5)、(6)は、いずれもスピーカのトランジェントひずみを低減する改善策です。

原則(6)

キャビネット外側の吸音処理

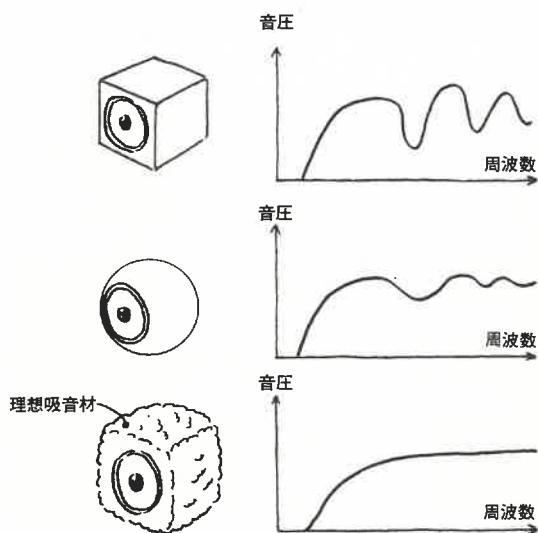
ひと昔前、バフル端での回折効果の問題であると大騒ぎされ、端の丸いスピーカが各社からどどどと登場しました。しかしラウンド・バフルも、平面振動板や疑似A級アンプやLカセ



(a) どんなスピーカでも連続信号であれば、まともに再生する

(b) しかし、過渡信号ではひずんでしまう。

〈第13図〉連続信号と過渡信号



〈第 14 図〉
キャビネットの外側が完全に吸音してくれれば回折効果はなくなる（はずである）。

ットや4チャンネル・ステレオなどと同じく、一時のブームに終わった感があります。が、音質上はそれなりの効果がありました。ところで、バフル面を丸く削り取るよりは、キャビネットの外側を吸音構造とした方が回折効果を抑える効果は大です(第 14 図)。

吸音処理による利点はそれだけではありません。スピーカから放射された音がバフルによって反射されるのを吸収する効果もあります。かつて某社のスピーカに、でこぼこにして音を乱反射させるバフルがありました。それよりも吸音構造とした方が効果は大です。

また、どんなに箱を強化しようともどんなにおもりを巨大にしようとも、必ず振動は残ります。箱の外側の吸音処理は、振動から発生する音をわずかかもしれませんが、減らすことが期待されます。ご存知のとおり、バフルに限らずスピーカ・キャビネットは、複雑に振動しています。極端に弱い構造であればびりつきなどとして感じられますが、強固なキャビネットでも、やはりさわってみれば動いています。加速度センサを取り付けて実験したわけではありませんので断言はできませんが、フェルトを貼った程度ではこの振動を減らすことはできないと思います。

なお、念のためにつけ加えておきますが、この点に関しては吸音処理よりもキャビネットの強化が、まず第一になされなければなりません。

以上のように考えますと、箱の外側に張る材料は、低域まで吸音能力を持っていなければ効果が薄いことも説明がつきます。グラス・ウールや低密度のフェルトでは、中高域に関しては効果があるかもしれませんが、ウーファ箱では十分な効果は得られません。加えてウーファでは、ある程度しっかりした重い材料でなければ、音圧によって揺すられてしまいます。試みましたが、グラス・ウールでは“さわさわ”鳴ってしまいました。厚手の、高密度のフェルトが必要となります。そう考えると、箱の中の吸音材も軽い材料では、“ざわざわ”騒いでいるのではないかと心配になってきます。

なお、オリジナルの原則は「バフル面の吸音処理」でしたが、側板や天板の外側の処理も効果があります。スピーカ後方の壁にカーテンを吊ったり吸音材を設置したりすると音が変わるのですから、当然といえば当然です。もっとも、最も効果が大きいのはバフル面です。

参考文献

- 1) ジョン・R・ピアース、音楽の科学、日経サイエンス社(1989)、p.174より(7000円もする本ですが、音楽を聴いて装置のグレードを判断する人は必読です)
- 2) ダイアナ・ドイチュ編、音楽の心理学(上)、西村書店、第2章より(文献(1)を読まれたら、次にこの上下2冊をお薦めします)
- 3) 高橋和正、自作4ウェイ・メイン・システムそのコンセプトとノウハウ全公開、ラジオ技術1991(6)、pp.72-80
- 4) 石塚峻、宙吊りスピーカの提案とその実験、ラジオ技術1990(12)、pp.76-79
- 5) Richard C. Cabot, Michael G. Mino, Douglas A. Dorans, Ira S. Tackel, and Henry E. Breed, Detection of phase shift in harmonically related tones, J. Audio Engineering Society, vol. 24, pp. 568-571 (1976)
- 6) Stanley P. Lipshitz, Mark Pocock, and John Vanderkooy, On the audibility of midrange phase distortion in audio system, J. Audio Eng. Soc., vol. 30, pp. 580-595 (1982)
- 7) Siegfried H. Linkwitz, Active cross-over networks for noncoincident drivers, J. Audio Eng. Soc., vol. 24, pp. 2-8 (1976)
- 8) H. D. Harwood, Some factors in loudspeaker quality, Wireless World, pp. 45-54 (1976, May)
- 9) Hideo Suzuki, Shigeru Morita, Takeo Shindo, On the perception of phase distortion, J. Audio Eng. Soc., vol. 28, pp. 570-574 (1980)
- 10) 境久雄編、聴覚と音響心理、日本音響学会(コロナ社)、第12章ほか
- 11) Alfred Schaumberger, The application of impulse measurement techniques to the detection of linear distortion, J. Audio Eng. Soc., vol. 19, pp. 664-668 (1971)
- 12) 別府俊幸、リニア・フェイズ・システムの音源位置とネットワークの検討、ラジオ技術1991(1)、pp.66-73
- 13) 別府俊幸、単発サイン波が語る現代スピーカシステムの問題点、ラジオ技術1991(4)、pp.67-87
- 14) Richard C. Heyser, Loudspeaker phase characteristics and time delay distortion: part 1&2, J. Audio Eng. Soc., vol. 17, pp. 30-41, pp. 130-137 (1969)