

シミュレーションによる クロスオーバー・ネットワークの検討

フィルタの次数と位相，音源の位置によって 合成波形と周波数スペクトラムはどう変わるか

単発サイン波測定とその応用

別府俊幸

はじめに

一般に，スピーカの特性は周波数特性を用いて表されます。サイン波を 20 Hz から 20 kHz までスイープさせ、それを X 軸とし、出力音圧を Y 軸にプロットする方法です。

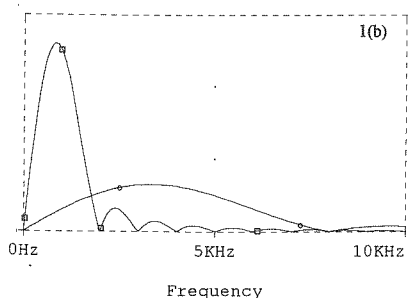
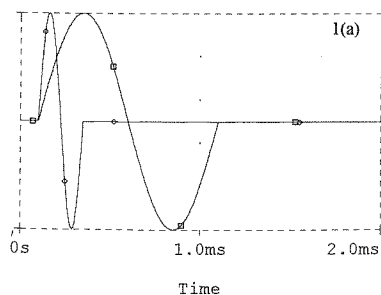
しかしこの周波数特性には時間軸方向の変化が捕えられない欠点があります。極端な話，信号を入力してから 1 msec. 後に振動板が動こうと，1 sec. 後であろうと，1 min. 後であろうと，周波数特性図では何もわかりません。出力音圧の曲線にひずみ率の曲線を付け加えても同じです。マルチウェイのスピーカ（複数）から放射された音は，

時間差をとまなつてマイクに到達しますが，（定常状態として）合成された音圧だけが周波数特性に表れます。

時間的な応答を捕えるためには，連続波ではなく，過渡的に変化する信号を観測しなければなりません。

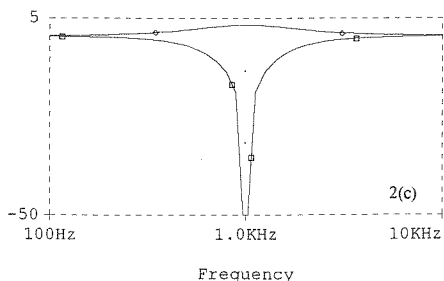
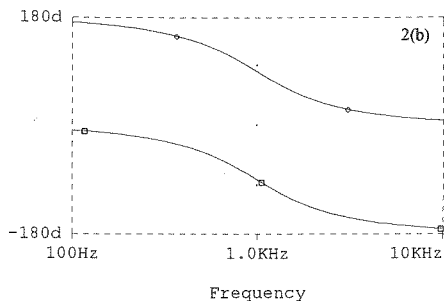
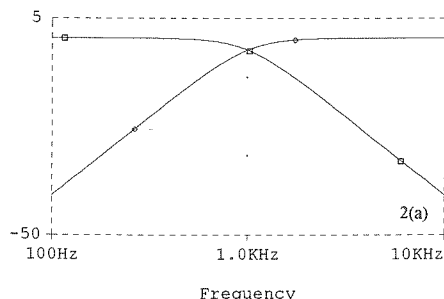
ところで，過渡応答の測定には，一

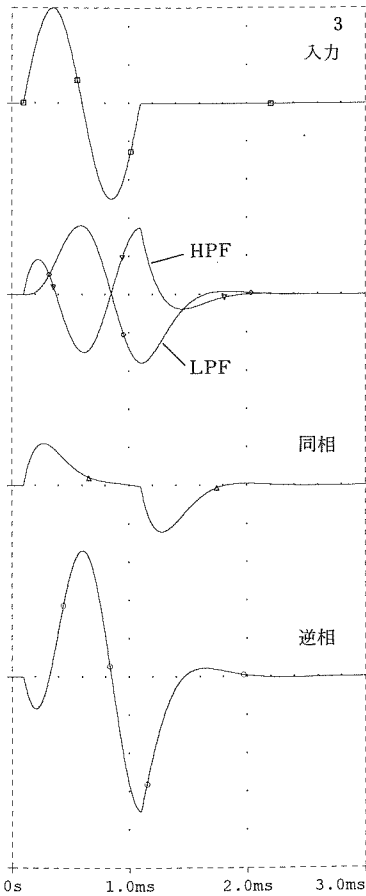
般に，インパルスが使われます。しかし，インパルス応答そのままでは，読みとることのできる情報は限られています。今回は，シミュレーションを通じて，単発サイン波の効用と，クロスオーバー・ネットワーク，スピーカ音源位置の問題について考えます。



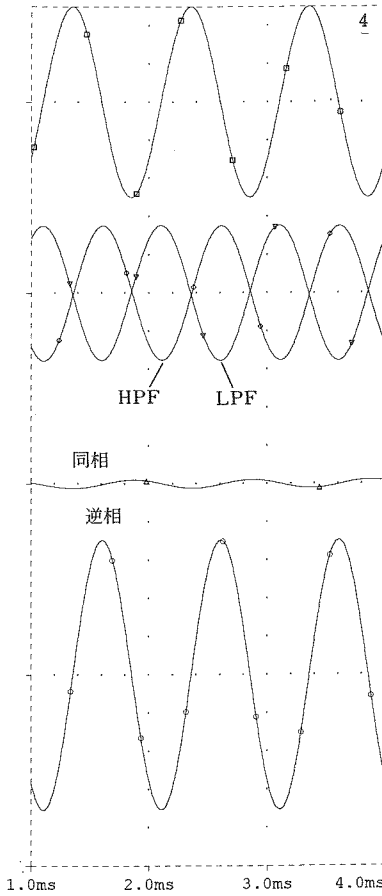
◀ 第2図 ▶
1 kHz, 12 dB/oct. のネットワークのゲイン特性(上), 位相特性(中)と合成出力(下)
合成出力特性のうち □は同相, ◇は逆相

◀ 第1図 ▶
(a) 2つの単発サイン波 (□ 1 kHz, ◇ 4 kHz) と (b) その周波数スペクトラム
サイン波 1 周期のみの周波数スペクトラムはほぼ DC から 2/周期の幅となる。4 kHz の振幅が低く見えるのは FFT 計算を同じ時間区間で行ったため

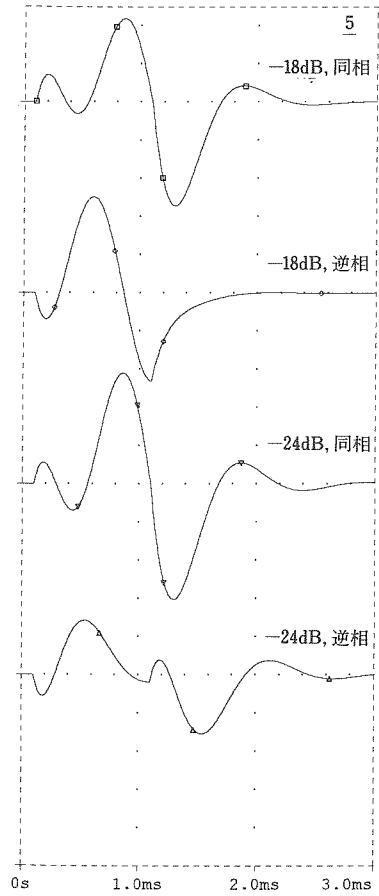




〈第3図〉2次フィルタによる12 dB/oct.のネットワークの単発サイン波応答



〈第4図〉左と同じネットワークのサイン波応答。連続波の観測でははずみらしいものは観測されない



〈第5図〉-18 dB/oct.と-24 dB/oct.ネットワークの単発サイン波応答。どちらも入力=出力とはならない

単発サイン波とは

「サイン波を1波(1周期)だけ入力したとき、スピーカはどんな応答を示すだろう」、こう考えたのが、この測定法の始まりでした。

第1図に1 kHzおよび4 kHzの単発サイン波とその周波数スペクトラムを示します。単発サイン波はその名のとおりに、サイン波の1波(1周期)だけを測定信号としたものです。その周波数スペクトラムは、基本波の周波数の上下に広がりを持ちます。おおむねDCから基本波の2倍まで分布します。また、スペクトラムのピークは、基本波の周波数よりも15%ほど低くなります。ここでは、便宜上“サイン波の周期の逆数”を“周波数”と呼び表します。

信号としてはこれだけですが、単発サイン波の周波数を動かしながら測定することで、スピーカ・システムの問題点を数多く明らかにすることができます。

クロスオーバ・ネットワークはどうひずむか

(1) 2次のネットワーク

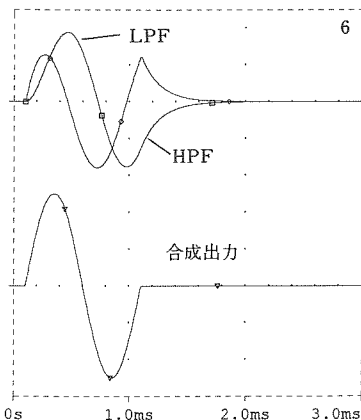
1例として、ネットワークの応答を見てみましょう。

第2図に示すクロスオーバ周波数1 kHz、12 dB/oct.のネットワークの特性で、これを一般に2次のフィルタといい、その単発サイン波応答が第3図です。

一目瞭然、出力は入力とは異なっています。過渡的に観測すると、出力ははずんでいます。はずんでいるという

よりも、ほとんど別の波形です。同相出力であっても逆相出力であっても、はずんでいる点では同等です。耳を澄ませば誰にでもこの“ネットワークひずみ”は聴こえるはずですが、“ネットワークひずみ”が聴こえないからではなく、存在が知られていないため、-12 dB/oct.ネットワークも使われるのです。

ところで、第2図(b)のグラフはフィルタの位相特性です。LPF(ローパス・フィルタ)出力の位相は周波数が低いときにはほぼ0°ですが、周波数が高くなるにつれて位相は遅れ、最終的には180°の遅れになります。HPF(ハイパス・フィルタ)の位相は反対の傾向、周波数が高いときには0°で、周波数が低くなると位相は進み、最終的には180°の進みとなります。そしてフィル



〈第6図〉1次フィルタによる6 dB/oct.のネットワークの単発サイン波応答。合成出力は入力と等しくなる

タどうしの位相の差は 180° で一定です。

この特性から、「 -12 dB/oct. ネットワークは逆相接続にする」ことになったのでしょう。オーディオ雑誌には、「HPF出力はLPF出力と位相が逆だから、ツイータのプラスとマイナスを逆に接続するとウーファと位相がそろおう」などと、当然のごとく記されています。たしかに、サイン波を入力し続けながら出力を観測したのは(第4図)位相がずれるだけですが、進んだり遅れたりするのは“位相”であって“信号”ではありません。進んだ位

相は極性を反転すれば遅れになりますが、ひずんだ信号はひっくり返しても上下が逆になるだけです。

念のため付け加えておきますが、“ネットワークひずみ”が発生する点では -3 dBクロスでも -6 dBクロスでも同じです。

(2) 高次のネットワーク

第5図は -18 dB/oct. (3次), -24 dB/oct. (4次)のネットワークの合成出力です。過渡的にひずむ点では 12 dB/oct.の2次フィルタと同じです。というよりも、むしろフィルタの次数が高くなればなるほど、信号の変形の度合いも大きくなります。「4次フィルタは位相が 360° 回るから、HPFとLPFの位相が正しく合う」などの話もありますが、位相が合ったとしても波形はひずみます。

付け加えておきますと、第5図はバタワース・フィルタでのシミュレーションですが、ベッセルであろうと、チェビシェフであろうと、過渡的にひずむ点では同じです。

(3) 1次のネットワークはひずまない

第6図(a)に -6 dB/oct.のフィルタ(1次)によるネットワークのLPF, HPF出力, (b)に合成出力を示します。

1次フィルタの合成出力は入力と同じ、つまり“ネットワークひずみ”を発生しません。

インパルス応答はどうなっているか

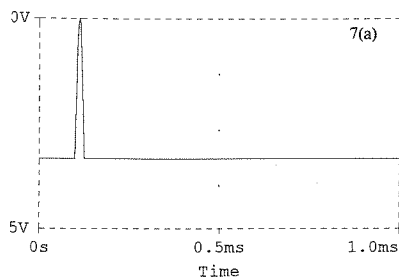
ここで、ネットワークのインパルス応答を見てみましょう。

第7図(a)はインパルス信号、第8図(a)は2次フィルタの逆相出力, (b)は4次フィルタの同相出力です。一見ただけでは、パルスの極性は反対ですが、どちらも入力とそれほど違わないように思われます。この波形から第3図、第5図のような過度ひずみが現れるとは、どなたも想像されないことと思います。

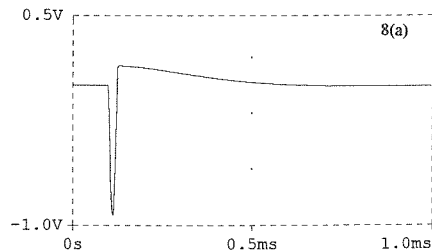
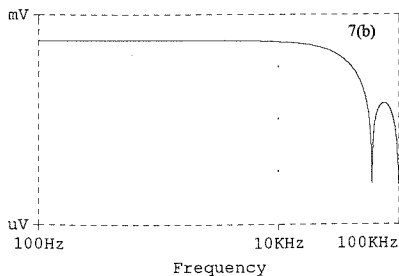
インパルスは、DCから(パルス幅で決まる)周波数まで、一定のエネルギーを持った信号です(第7図b)が、その波形応答をそのまま見たのでは、高い周波数の(持続時間が短い)振幅が大きくなり、低い周波数の変化がわかり難い弱点があります。第8図のパルスに続くゆっくりとした波の中に、低周波域の応答は埋もれてしまいます。

音源位置の違いによるひずみ

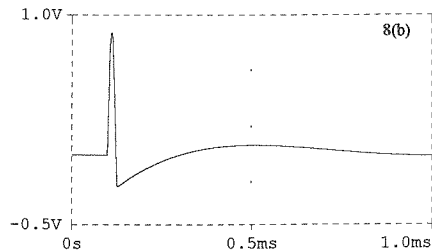
さて、1次フィルタの6 dB/oct.のネットワークはひずまないと記しまし

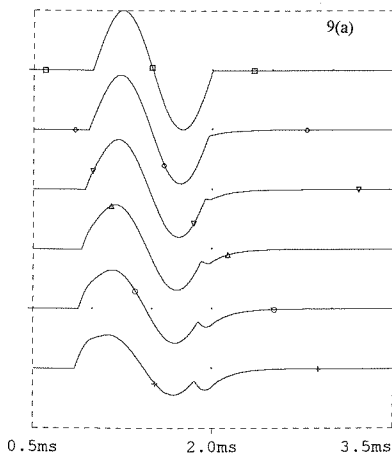


◀〈第7図〉インパルス信号とその周波数スペクトラム。可聴帯域で十分なf特がえられるよう $25 \mu\text{sec}$ 幅のインパルスで計算したもの。DCから平坦なスペクトラムとなる

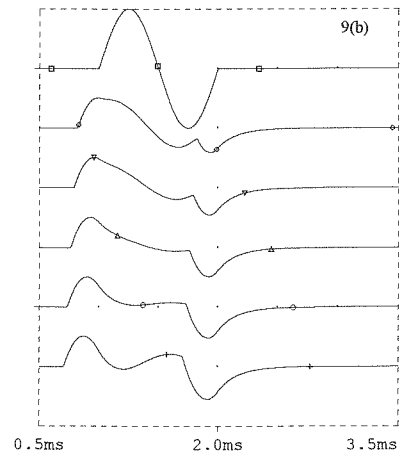


▶〈第8図〉 -12 dB/oct.と -24 dB/oct.のネットワークのインパルス応答。 -12 dBは逆相、 -24 dBは同相接続としてある。一見良好な応答だが、後に続くゆるやかな変化が問題



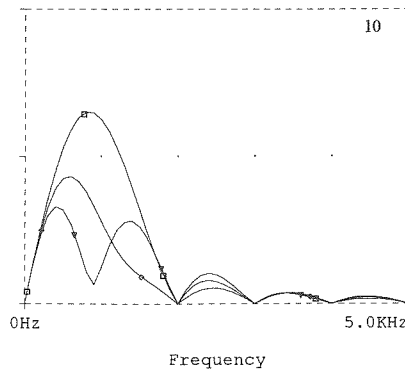


◀ <第9図 a>
 ツイーターがウーファより前に位置するときの応答。入力は1 kHz。
 上が最適位置，下へ1~5 cm まで1 cm づつ前に出た場合



> <第9図 b>
 同じくツイーターがウーファより前に出た場合の応答。
 上が最適位置，下へ6~10 cm まで1 cm づつ前に出た場合

<第10図>
 ツイーターが前にあるときの周波数スペクトラム。
 □入力，◇5 cm 前，▽10 cm 前



たが，“ネットワークひずみ”は発生しません。スピーカの音源位置を合わせなければ、別のひずみが発生します。これは、ツイーターおよびウーファからリスニング・ポジションまでの距離が異なったときに発生するひずみですから、これを“音源位置ひずみ”と呼びましょう。もちろん“音源位置ひずみ”も連続波の測定には現れません。ツイーターとウーファが1 m 離れていても、1/340 sec 後には検出不能になります。

(1) ツイーターがウーファより前方に位置する場合

第9図は、1 kHz、-6 dB/oct. のネットワークを用いて、ツイーター位置を1 cm ずつ10 cm まで前にずらしたときの単発サイン波の変化を示したものです。1枚のバッフル・ボードにツイーターとウーファが取り付けられたスピーカ・システムでは、ふつうト

ツイーターが3~5 cm、ウーファより前に位置します。その場合のシミュレーションです。

なお、1 kHz での1 cm のズレは、X 軸を倍に読めば、2 kHz での0.5 cm のズレとなります。

1, 2 cm のズレでは、それほど変化はなさそうです。よく見れば、サイン波が広がっていますが、最上段の0 cm と見比べてやっとわかる程度です。が、距離差が3, 4 cm と大きくなるにつれ、サイン波の広がり方は大きくなり、5 cm 以上(第9図 b)では、ウーファからの音が遅れていることが明確にわかります。8 cm あたりからは、単発サイン波というよりも、方形波をローカット・フィルタに通したような波形です。

図に示すように“音源位置ひずみ”によっても再生波形は変化します。ですから、聴こえる音も変化します。これは単発サイン波で聴いていてもわか

りますし、音楽を聴いていてもわかります。

第9図の応答のパワー・スペクトラムを計算すればどうなるか、第10図です。

音源位置がそろっている場合(□)に比べ、5 cm 前方にある場合(◇)はスペクトラムの山が低くなるとともに、中心が300 Hz ほど左にシフトします。また、10 cm 前方(▽)では、スペクトラムは中心部がなくなり、2峰性となります。“音源位置ひずみ”は、過渡音の周波数スペクトラムにも影響することがわかります。

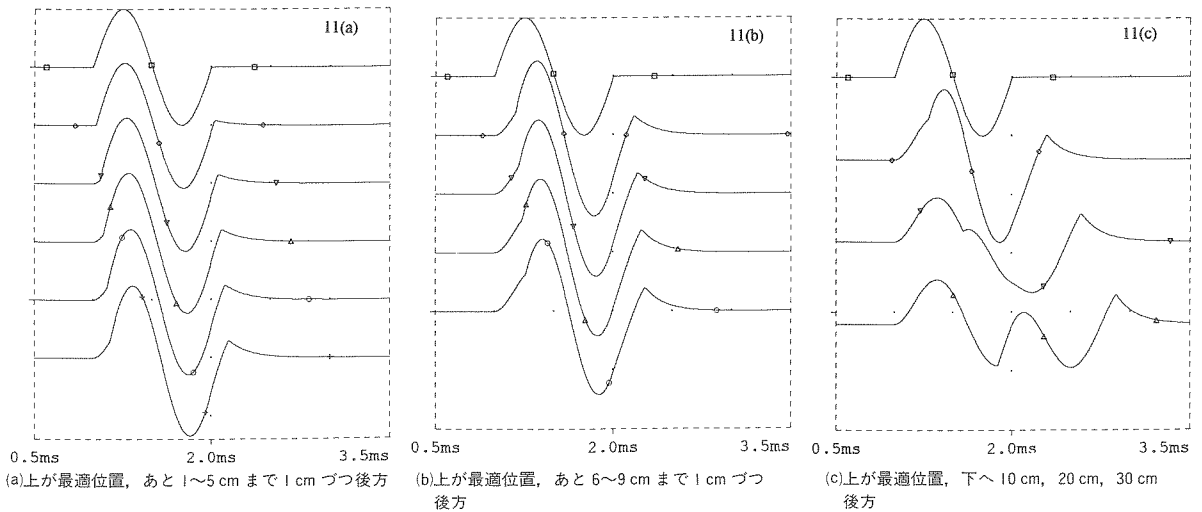
私の印象としては、ツイーターが前にある場合には、音が固くなるような、きつくなるような感じです。

(2) ツイーターがウーファより後方に位置する場合

一方、ツイーターがウーファよりも後方に位置した場合には、第11図のように再生波形が変化します。

5 cm までは、第11図(a)のとおりそれほど波形の変化は見られません。わずかに立ち上がりと終わりの部分が上昇傾向を見せる程度です。また、距離差が増加するにつれ、振幅も大きくなります。

が、6 cm 以上では第11図(b)のように波形の立ち上がり、立ち下がりに独特のパターンを示し、ツイーターからの信号が遅れてくるのが目にも(当然耳にも)明らかです。さらに10 cm、



〈第 11 図〉 トゥイータがウーファよりも後方にある場合の応答。入力は 1 kHz 単発サイン波

20 cm, 30 cm とトゥイータが極端に後方に位置する場合 (第 11 図 c. これは中音ホーンの場合を暗示しています), 単発サイン波は大きく広がり, 30 cm では 2 波に増えたかのように見えます。

第 12 図は, 第 11 図の応答のスペクトラムですが, たいへんおもしろいことに 5 cm ((a)図□), 10 cm ((a)図◇) では 0 cm 時と形はほとんど変わらず, ただ, 山が高くなっているだけです。20 cm ((b)図□), 30 cm ((b)図◇) ではスペクトラムの形も変わりますが, トゥイータが前にある場合 (第 10 図) の 5 cm, 10 cm と同じ傾向の変化です。

私の印象では, トゥイータが後方にズレると活気に乏しいような, おっとりとしたような音です。また, 経験的にトゥイータは, 前方に位置するより

は, 後方に位置した方が音質変化は少なく感じます。第 12 図のように, 周波数スペクトラムの変化が小さいことが理由でしょうか。

単発サイン波の周波数を変えたときの応答

さて, せっかくの単発サイン波も第 9 図や第 11 図の波形応答を見る限り, スピーカの精密な位置調整には向いていないようにも思われます。が, 周波数を高くして応答を観測すると, より精密な位置調整が可能になります。

第 13 図は測定周波数を 2 倍の 2 kHz にしてシミュレートした応答です。トゥイータが後方に位置した場合にも, ウーファからの波が先に到達することがわかりやすく, また, トゥイータが前方にある場合にも, 波形の広

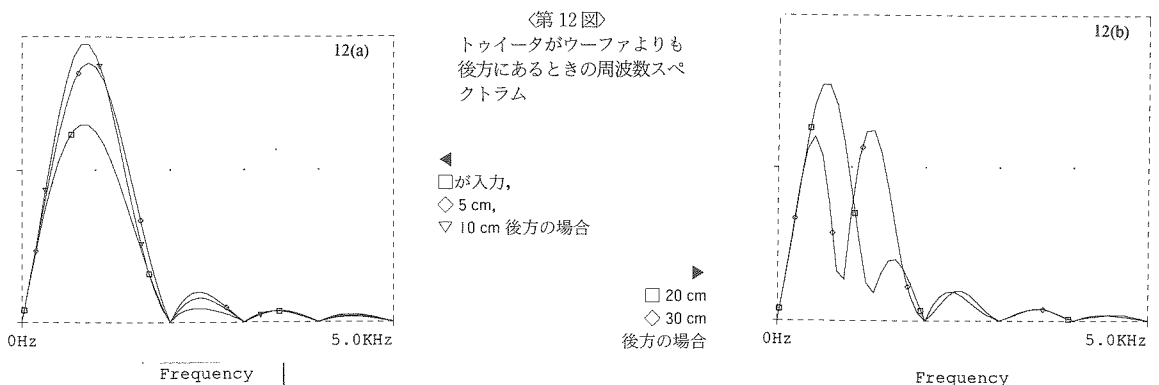
がり方がより大きく見え, 1 kHz の場合よりも音源位置調整に有利です。

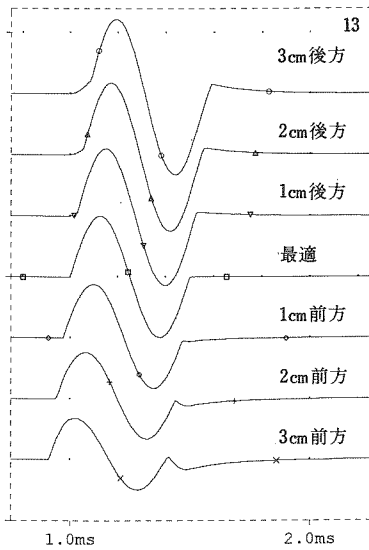
第 13 図からは, 音波の到達時間の推移によっても “最適位置” を探せそうです。が, 実際には信号の立ち上がりでオシロスコープをトリガーさせるより手がないため (発振器の出力を可変のディレー回路に通してトリガー信号に使う手はあります), 波の “形” を見ながら位置を調整することになります。

第 14 図は半分の 0.5 kHz にした応答ですが, 波形の変化パターンは 1 kHz と同程度か, かえってわかりにくいくらいです。

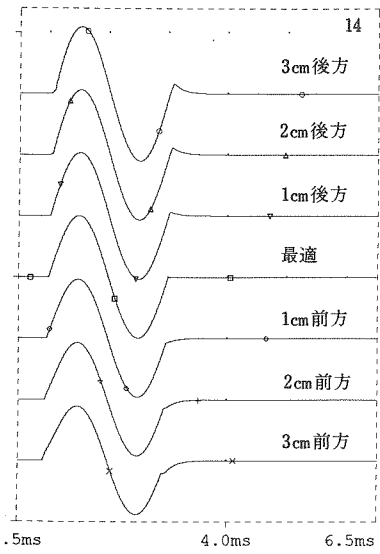
クロスオーバー・ネットワーク 応答の周波数スペクトラム

ついでに, といっちは何ですが, 2, 3, 4 次のネットワークの単発サイン波





◀〈第13図〉
クロスオーバー点の2倍の2kHz入力時の単発サイン波応答。こちらの方が1kHzの場合よりも音源位置はずみの検出に向いている



▶〈第14図〉
クロスオーバー点の1/2、500 Hzでの単発サイン波応答

応答のパワー・スペクトラムを計算してみました(第15図)。

(a)は2次ネットワーク応答のスペクトラムです。逆相出力(▽)は、入力(□)と同じような山の形ですが、ピークは3dB分高くなっています。同相出力(◇)は、スペクトラムも減少し2峰に分かれています。

(b)は3次、4次ネットワークです。興味深いことに、3次の出力は同相(□)、逆相(◇)ともに入力と似通っています。さら4次の同相出力(▽)は2次の逆相出力と似ています。

しかし、いずれにしても“ネットワークひずみ”もまた、過渡信号の周波数スペクトラムに影響することがわかります。

なお、高次のネットワークの音質劣化を、このスペクトラム・パターンの変化でもって説明することはできない

と考えます。2次や3次のネットワークの音は、私の印象では、それらを使用したスピーカ・システムの特徴の一部、つまりは、マルチウェイの音の一部として聴こえます。

インパルス応答はどうなっているか

話をもとに戻しましょう。

音源までの距離の差がある場合、いい換えればトゥイータとウーファの音源位置がそろっていない場合のインパルス応答はどうなっているでしょう。

第16図は上から順に、トゥイータが10cm後方にある場合、位置が揃っている場合、10cm前方にある場合です。

図を見れば一目瞭然、ウーファからの音と、トゥイータからの音が、別々の時刻に到達しています。インパルス

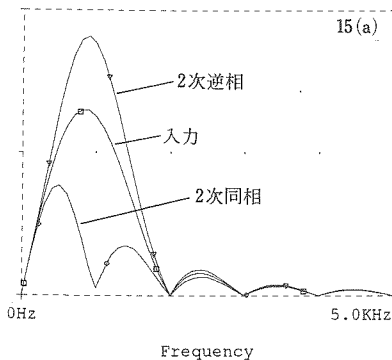
応答からも“音源位置はずみ”があることは読みとれます。ただ、インパルス応答では、クロスオーバー周波数が低い場合には、ウーファからの信号はより小さくなります。

さらに、第16図は-6dB/oct.ですからわかりやすいのですが、第8図に示したように“ネットワークひずみ”がある場合には、“音源位置はずみ”は埋もれてしまいそうです。

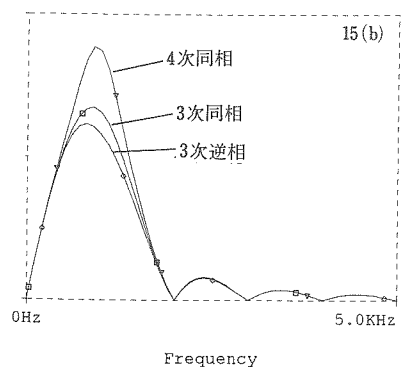
音源位置合わせに関しても、インパルス応答そのものよりも単発サイン応答が役に立ちそうです。

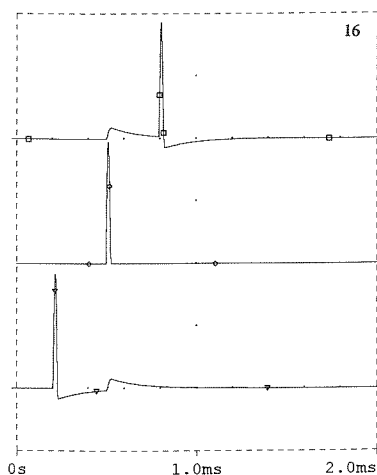
インパルスと単発サイン波のちがいは

“音源位置はずみ”や“ネットワークひずみ”をインパルス応答そのものから読みとることは困難と記しましたが、が、実は、人の目に触れにくいだけで、



◀〈第15図〉
2次以上のフィルタを使ったネットワークの単発サイン波応答。2次以上のフィルタを使う限り、入力と同じスペクトラムは得られないが、3次出力のスペクトラムに限れば入力とほぼ同じである。ただし音は違う





〈第16図〉音源位置がずれているときのインパルス応答。ここでは単発サイン波測定ほどには音源位置ひずみは問題なさそうに思われそう

インパルス応答の中には、すべての単発サイン波応答が含まれています。いい換えれば、インパルス応答さえわかっていたら、(任意の周波数の)単発サイン波応答を計算することができます。ですから、単発サイン波応答は、インパルス応答の処理法の1つということもできます。

それでは、インパルス応答を測れば測定が簡単に終わるかといいますと、そうでもありません。インパルス応答の測定にも弱点があります。それは、信号の持つエネルギーが小さいため、S/Nの点で実用的ではないことです。遮音のよい無響室で測定するならいざ知らず、バックグラウンド・ノイズが50 dBもあるような普通の部屋ではまづ無理です。

しかしながら、何を測定しようと、

どうやって測定しようと、大切なのはその“データをどう読むか”です。インパルス応答を測定したところで、そのFFTを計算し、周波数特性図を描いているのでしたら、サイン波をスイープさせて測定するのと何の違いもありません。

“位相差は聴こえるか”

「位相差は聴こえないのだから、高次のフィルタを使用してもよいのだ。音源位置を合わせる必要などないのだ」との乱暴な意見も耳にします。

ですが、位相差が聴こえようと聴こえまいと、再生される波形がひずむのですから、“ネットワークひずみ”も“音源位置ひずみ”も聴こえます。

仮に、ヒトは位相差をわからないとしても、“ネットワークひずみ”や“音源位置ひずみ”は、信号の周波数スペクトラムも変えてしまいます。つまりは位相以外の成分にも影響します。ですから位相差が聴こえるか否かは、“ネットワークひずみ”や“音源位置ひずみ”が聴こえるか否かととは別の問題です。

ついでに付け加えますと、ヒトは位相差を聴き分けることができます。

第17図は1次クロスオーバー・ネットワークの同相出力と逆相出力での単発サイン波応答です。ここで、(a)の2つの波形は、(b)に示すように同じ周波数スペクトラムを有しています。周波数スペクトラムが同じなのですから、第17図(a)の2つの波形で異なっているのは位相です。

もしも、位相が聴こえないのであれば、この2つの波形の差は同じ音として聴こえるはずですが、しかし、試された方はご存じのとおり、1次のネットワークの同相接続と逆相接続は異なった音に聴こえます。なぜなら、位相の違いが聴こえるからです。

おわりに

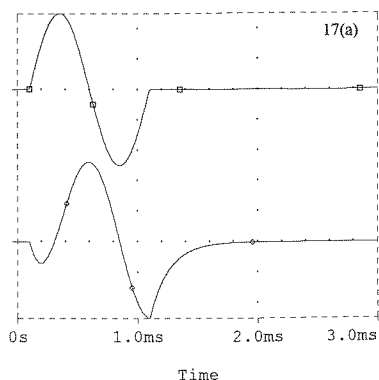
“ネットワークひずみ”と“音源位置ひずみ”、この2種類のひずみは連続波による測定では検出できません。また、周波数特性のグラフにも表れません。しかし、この2種類のひずみは音の形をゆがめ、音場感を損ないます。躍動感のないただきれいなだけの音、いわゆる“マルチウェイの音”の50%は、この2種類のひずみが作り出していると信じます。

ただ、力説してはきましたが、実際のところ、これらのひずみを音楽再生に耳障りなものと感じる人は少数派のようです。その証拠に、多くの方が-12 dB/oct.や-18 dB/oct.ネットワークで、不満もなく聴いています。もしも気にならないのであれば、それはそれでよいでしょう。

ですが、マルチウェイの音のつながりが悪いとお感じであれば、この2種類のひずみを退治されることをお奨めします。

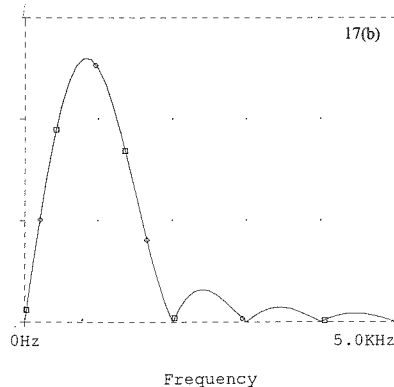
ユニウェーブ・スピーカでは、よりHi-Fiな再生が可能になります。

注：計算に使用したソフトウェア
MicroSim 社 Pspice 6.0



〈第17図〉
1次フィルタによる6 dB/oct.の同相、逆相出力での単発サイン波応答。同相、逆相とも同じ。□同相、◇逆相

(a)時間応答



(b)周波数スペクトラム