

スピーカーの物理学 V

スピーカーシステムとその評価法

はじめに

Ⅲ講、Ⅳ講では、スピーカーユニットとエンクロージャーの基礎理論を紹介したが、スピーカーはオーディオ機器の中で最も未完成なもので、歪み率なども人間の検知限を上回っているものが多く、客観的な評価法であるブラインドテストを待たずとも、それぞれに固有の音色を持つといってもいいだろう。従って、スピーカーの選択がオーディオ装置の音を決めると言っても過言でない。特に、第Ⅲで論じたように、ダイナミックスピーカーでは、低音の特性をよくしようとして大口径のユニットを選択すると、高音域で問題が生じ、逆もまた真と、いわゆるトレードオフの関係にあり、通常はいくつかのユニットを組み合わせてスピーカーシステムとして使用する。

どのようなシステムを選べばいいかという、端的には各人の好みで選べばいい。つまり、オーディオマニアが好きな「聴いてなんぼ」ということになるが、それでは身も蓋もないので、ここではソース（CD など）に入っている音情報を忠実に再生することをよしとする観点から論じる。

1. システムの各特性

忠実度を評価の基準とするなら、多くの特性は測定可能であり測定値に基づき客観的な議論が可能となる。以下に、どのような特性に注目すればよいか、具体的にどのように測定すればいいかについて論じる。

1.1 周波数特性

(1) 必要とされる再生周波数域

通常人間が聴き取れる周波数は 20～20,000 Hz といわれるが、純音が聴き取れる上限は、表V-1 に示すように年齢と共に低下する。ただし、これは純音の場合であり、実際の複合音の成分として混ざっている場合感じ取れるかどうかは別にテストする必要がある。

年齢	上限周波数 (kHz)
18 ～ 24	16
30 ～ 39	14～15
40 ～ 49	12～13
50 ～ 59	11～12

表V-1 加齢による可聴周波数上限の変化。音圧 60 SPL (dB) の純音が聴き取れるかどうかのテストの結果

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/NHKreport486.html>

に示したのは、20kHz でカットした場合区別がつかどうかの結果であり、やはり複合音であっても

20kHz 以上の成分は聴き取れないという結果である。これより先にCDの規格を決定するために実施された、耳に自信のある若い音響技術者も交えた被験者を対象とした大規模かつ厳密な実験の結果、カットオフ周波数を色々変えて試みると、16kHz 以上の高周波成分の有無は人間に音質差として検知されないという結論が得られている。ということで、このような客観的事実に基づくなら、再生装置に要求される、実際に必要な周波数の上限は 16 kHz くらいということになり、これならスピーカーを含めて、現在市販されているオーディオ装置は問題なくクリア出来る。

一方、下限については、年齢差はあまりないようで、20 Hz をはっきり音として感じるのは難しいが 30 Hz であれば十分聴き取ることが出来る。また、実際の音楽においても、オルガンやコントラバスの低音、バスドラムなど重要な役割を担う楽器で 30Hz 台の重低音が含まれることは多く、再生装置も少なくとも 30 Hz までフラットな周波数特性がほしいところである。このような特性はCDをソースとする限り、プレーヤーやアンプであれば容易に実現可能であるがスピーカーの場合は難しい。実際、

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/subwoofersusume.html>

に示したように、高級なスピーカーシステムといえども 30 Hz までフラットに再生できる装置は殆ど無い。すなわち、現在市場に出回っているスピーカーシステムは高忠実度再生からはほど遠く、再生レンジは著しく高音側に偏っている。

その理由として、高音域の再生能力を伸ばすのは技術的にもコスト的にも容易だが、一つのシステムで低音再生限を 30 Hz まで伸ばすのは大変難しいということが考えられるが、ユーザー側にも 30Hz 辺りの超低音が出ると「音が遅れる」と感じて好まないという側面もありそうである。

(2) 音圧周波数特性 (f 特) の平坦さ

高忠実度再生を目指すなら、当然平坦な周波数特性が望ましいが、実際のスピーカーから出る音の f 特にはかなり凹凸がある。その原因は周波数域によって異なる。

(i) 低音域

ここでいう低音域とは振動板がほぼピストン運動をしてくれる範囲で、概ね 500 Hz 以下とする。この周波数帯は人の声や多くの楽器の基音を含み、f 特の平坦さは重要な要素である。幸いこの範囲の f 特のプロファイルは、無響室で測定する限りにおいては、Ⅲ講、Ⅳ講で述べたユニットの諸パラメータや

エンクロージャーの種類、構造から予想される理論曲線にかなり近い特性が得られる。しかし、実際にリスニングルームに置いて聴く場合は、壁や床からの反射音と直接音の干渉や定在波の影響を強く受け、周波数特性にはかなり強い凹凸が発生し、f 特は部屋の音響特性や聴く位置によって決るといってよい。その対策法や室内音響については

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/roomacoustics.html>

を参考にしてほしい。

(ii) 中音域

中音域といってもはっきりした定義があるわけではないが、ここでは広くとって 500 ~ 5000 Hz としておこう。人の声や楽器の高調波成分はほとんどこの音域に分布し音の「音色」を決定づける重要な音域である。スピーカーにとっても、口径や材料にもよるが、ピストン運動からのずれが生じ、分割振動が始まる音域であり周波数特性に凹凸が生じやすく、スピーカー固有の「音質」を決める大切な領域である。出来れば、この音域専用の比較的小口径の専用スピーカー、いわゆる「スコーカー」を使い、分割振動を出来るだけ高周波数側に押し上げ、この音域でもピストン運動を維持することが望ましい。

そのためには、硬くて軽く、かつ適度の内部損失を持つ材料を使う必要がある。表V-2 に、いくつかの材料についての物性値を、表V-3 に、第III講 (III-29) 式で与えられる厚さ 0.5mm、直径 d の円盤の同心円状固有振動の最低次の振動数を見積もった値を示しておく。この値は厚さや材料の充填度によって大きく異なり、さらに実際のスピーカーでは中心にボイスコイルのボビンがついているので、中心に穴のある円盤と見なせ、また立体的な形状もコーン型やドーム型など分割振動を抑える工夫がされているので、固有振動の周波数はこれよりかなり高くなると見てよい。いわば下限を与える値として参考にしてほしい。ただ、材料の違いによる分割振動開始周波数の傾向はほぼこの通りだと考えてよい。表V-3 をみると、Be (ベリリウム) と B₄C (ボロンカーバイド) が大変優れた材料であることがわかる。ただ、Be は毒性があり使われなくなっており、B₄C の製法が難しく入手困難になっている。

材料	ヤング率 E (10 ¹⁰ Pa)	ポアソン比 σ	密度 (g/cm ³)
紙(推定値)	0.5	0.33	0.7
Mg	4.24	0.31	1.74
Ti	11.6	0.32	4.54
Al	7	0.35	2.7
Be	30.2	0.05	1.85
B ₄ C	44.5	0.17	2.48

表V-2 振動板に使われる材料の物性値。

$d =$	3 cm	5 cm	10cm	20cm
紙	2,500 Hz	920	230	60
Mg	4,750	1,710	430	107
Ti	4,900	1,760	440	110
Al	5,000	1,800	450	110
Be	11,700	4,200	1,060	260
B ₄ C	12,450	4,480	1,120	280

表V-3 前表の材料で円盤振動板を作ったときの最低固有振動数

(iii) 高音域

こちら、はっきりした定義があるわけではないが、5000 Hz までを中音域としたので 5000 Hz 以上としておこう。この領域になると楽器の場合ほとんど高調波成分のみとなる。この領域でピストン運動を維持するのはかなり難しくなり、金属系材料が使われることが多い。音響学的には指向性が強くなり、第II講4章で示したように、指向性の面でも小口径の方が有利であり、形状も重要でドーム型などが採用されることが多い。

1.2 歪率

(1) 高調波歪・相互変調歪

高調波歪みと相互変調歪みの多くは

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/distortion.htm>

ここで説明しているように、振動系の非線形性より生じる。具体的には、(1) エッジやダンパーが伸びきり、振動板の変位がボイスコイルに生じる駆動力に比例しなくなる、(2) ギャップ部の磁場の不均一性により、ボイスコイルの駆動力が入力電流に比例しなくなるなどが考えられる。これらは主に振幅が大きくなる低音ほど増大する。中低音域では振動板がピストン運動からずれ、ボイスコイルの変位が振動板全体に一樣に伝わらず発生する音圧が入力電流に比例しなくなるなどが考えられる。

(2) 位相歪み

位相とは言うまでもなく、単振動を表す式

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (V-1)$$

における ϕ をさすが、その値は相対的なもので、何を基準として ϕ を定義するかを常に念頭に置いておく必要がある。ここで言う位相歪みとは

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/highlimit.htm#IMD>

に説明しているように、基音に対して高調波成分の位相がずれ、そのため波形が変形することをいう。ただし、位相のずれによる波形の変化は聴感にあまり影響を与えないといわれており、広い意味では歪みといってよいが、音質劣化の原因となる高調波歪みと区別するため以下では位相特性とよび項をあらためて説明する。

1.3 位相特性

スピーカシステムの位相特性は、スピーカユニットで生ずる位相のずれとマルチウェイシステムでのそれを区別して論じる必要がある。なお、この項目は2013年初頭にAudio BBSで活発に議論された内容のまとめも兼ねている。

(i) スピーカーユニットの位相特性

スピーカユニットでの位相のずれは、振動板にかかる力（ボイスコイルに流れる電流に比例する）に対し振動板の変位に遅れから生じるが、これは理論的に容易に求めることが出来る。ダイナミックスピーカの動特性、あるいは位相特性は本講 I 基礎編の過渡特性とインピーダンスで述べたように $L\cdot C\cdot R$ 等価回路を使って解析でき（基礎編 図 I-8 参照）、具体的には位相のずれは (I-33) 式すなわち、

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{1/\omega C - \omega L}{R}\right) \quad (V-2)$$

で与えられる。ここで、 R は機械抵抗、 C はエッジ・ダンパーのコンプライアンス、 L ($\equiv M$) は振動板の質量である。 $\tan^{-1}(x)$ 関数の性質

$$\tan^{-1}(-\infty) = -90^\circ, \tan^{-1}(0) = 0, \tan^{-1}(\infty) = 90^\circ$$

より、共振周波数 $f_0 = \omega_r / 2\pi = 1/2\pi\sqrt{LC}$ の位相を 0 とすると、低音周波数極限では $\phi = 90^\circ$ 、高音極限では $\phi = -90^\circ$ となる。このとき、機械抵抗 $R \approx 0$ では f_0 から少しでもずれると位相が 90° 変わるのに対し、 R が十分に大きい、すなわち制動が充分効いているときは、可聴周波数帯での位相のずれは小さくなる。臨界制動条件の近くで動作する実際のスピーカユニットでは図 V-1 に示す密閉箱の位相特性のようになる。ただし、この図では共振点の位相を 90° としている。いずれにせよ単体ユニットでの位相のずれは 180° の範囲に収まる。なお、バスレフ型の箱に入れた場合は共振点がもう一つ増えるので密閉箱の倍の 360° の範囲まで広がる。

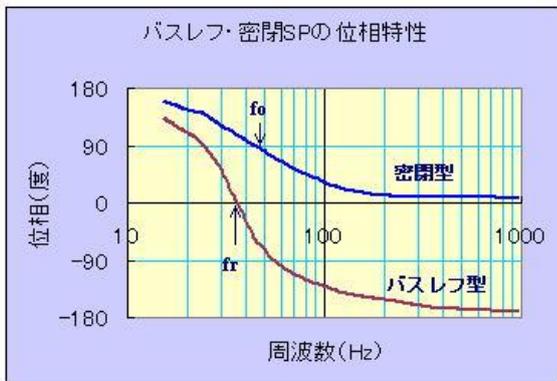


図 V-1 密閉箱およびバスレフ型スピーカの位相特性

(<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/groupdelay.htm#SP> 参照)

(ii) マルチウェイシステムでの位相特性

① 音源位置の差によって生じる位相のずれ

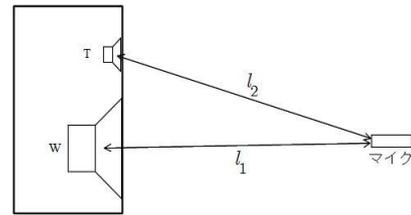


図 V-2 2 way システムで生じる距離差

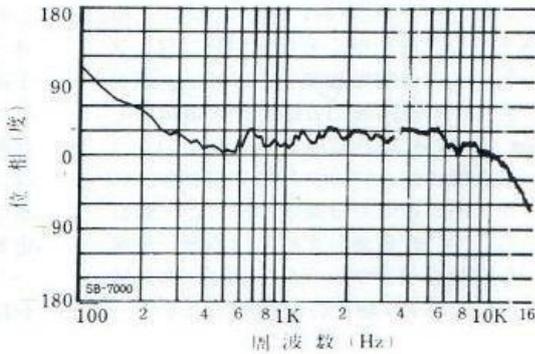
ここでは、簡単のためウーファーとトゥイーターからなる 2way システムについて説明する。通常 2way システムは下に大口径のウーファー（以下 W と略記する）が、上に小口径のトゥイーター（以下 T と略記する）がついているが、この場合一般的には図 V-2 に示すように、聴取位置（耳またはマイク的位置）と振動板間の距離に差が生じる。その差を $\Delta l = l_2 - l_1$ とすると（W の音源位置を 0 とし、T がその前方（手前）にある場合を正とする）、周波数 f の音波が距離 L 進むとき、その位相変化は音速を c 、音波の波長を λ とすると、

$$\Delta\phi = \frac{\Delta l}{\lambda} \times 360^\circ = \frac{f\Delta l}{c} \times 360^\circ \quad (V-3)$$

で与えられるので、W が発する音と、T が発する音の間に $\Delta\phi$ の位相差が生じる。 Δl の値はマイクの高さによって決まるので、 Δl が W と T 間の距離より小さければ、 $\Delta l = 0$ 、従って $\Delta\phi = 0$ となる位置が存在する。通常、W と T を同一バツフル板に取り付けてある場合、T の発音位置の方が W のそれより前に来るので $\Delta\phi = 0$ となる位置は W と T の中間位置より高くなる。なお、3 way（あるいはそれ以上）システムでは、全てのユニットとマイク位置を等しくすることは一般的には不可能であり、あえて $\Delta\phi = 0$ としたい場合、各ユニットの前後位置を、マイク位置（通常の聴取位置）で $\Delta\phi = 0$ になるよう適当に調節しなければならない。実際このように設計されたシステムは存在し、タイムアラインメント型、あるいはリニアフェーズ型システムと呼ばれている。ただし、聴覚は一般に位相歪みには鈍感であり、そこまでする必要があるか疑問で、最近あまり見かけなくなった。なお、スクーアーやトゥイーターにホーン型ユニットを使っている場合、音源位置がかなり奥に引っ込んでいるので、きわめて大きい位相遅れが生じることがある。

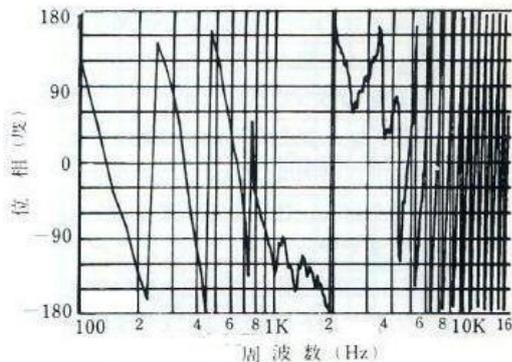
以下に、位相特性を揃えたいいわゆるタイムアラインメント型システムとオールホーンシステムの位相特性の測定値を例示しておく。データはオーディ

オの科学 BBS に投稿されたもので、1977 年「ラジオ技術」誌 1 月臨時増刊号に掲載されたインパルス信号を解析して求めたデータからの転載である。



↑位相周波数特性(マイク距離2m)

図 V-3(i) 国産のタイムアラインメント型 3way システムの位相特性。位相変化はほぼ 180° 以内に収まっている。



↑位相周波数特性(マイク距離2m)

図 V-3(ii) 米国製 3way オールホーンシステム。グラフは 360° 毎に折り返してある。

② デバイディングネットワークの位相特性

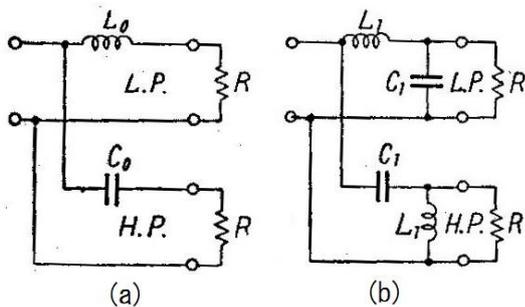


図 V-4 デバイディングネットワーク。

(a) 1次 $L_0=R/\omega_c$, $C_0=1/R\omega_c$

(b) 2次 $L_1=\sqrt{2}L_0$, $C_1=C_0/\sqrt{2}$

ω_c : クロスオーバー角振動数 ($2\pi f_c$)

マルチウェイシステムの場合、アンプの出力信号を各音域に分割するためには通常 LC 回路によるデバイディングネットワークが使用される。この場合、フィルター特性の急峻度に応じ

て、1次 (-6dB)、2次 (-12dB) などのフィルターが使用される。ここでは、簡単のため、図 V-4 に示す 2Way システムの 1次、2次のネットワークについて説明する。

(a) 1次ネットワークの出力電圧と位相特性

図 V-4(a) に 1 次ネットワークの回路図を示す。ここで、 $\omega_c (=2\pi f_c)$ はクロスオーバー角振動数であり、 L_0 , C_0 を図の説明に記した値に選ぶことにより、低音側と高音側の合成出力が平坦な出力が得られる。これを Butterworth (バターウォース) 型のフィルターと呼ぶ。計算の詳細は付録に示すが、結果は図 V-5 に示すように完全に平坦な出力が得られる。位相特性を図 V-6 に示すが、クロスオーバー周波数を挟んでどちらの出力も 90° ずれるが両者を加算した合成出力の位相は常に 0 となり位相のずれは生じない。ただし、これはあくまで純抵抗負荷に対する電気出力の位相特性であり、視聴位置での音圧の位相特性は、前項で論じたユニットでの位相のずれ、音源からの距離の差による位相のずれが加わるので、1 次フィルターを用いるからといって理想の位相特性が得られるというわけではない。

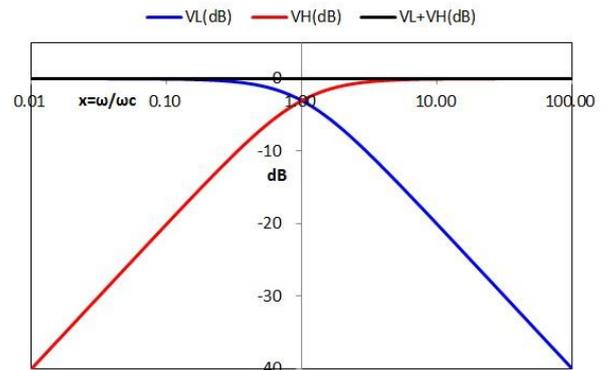


図 V-5 1 次ネットワークの電圧出力。横軸はクロスオーバー周波数を 1 としたときの周波数 (対数表示)。縦軸は減衰率 (dB)。VL (青線) は低音出力。VL (赤色) は高音出力。VL+VH (黒線) は両者を正相で加算した出力。

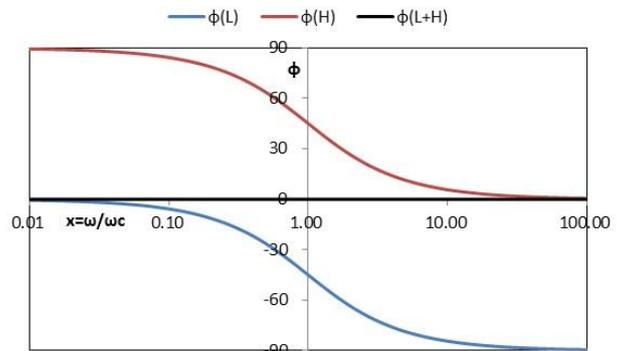


図 V-6 1 次ネットワークの位相特性。phi (L) (青線) は低音出力。phi (H) (赤色) は高音出力。phi (L+H) (黒線) は両者を正相で加算した出力。

(b) 2次ネットワークの出力電圧と位相特性

図 V-7 は、図 V-4(b) に示す 2 次ネットワークについて計算で求めた出力電圧特性を示す。この場合、低音出力と高音出力を逆相にして足し合わすとほぼフラットな特性が得られるが、クロスオーバー周波数付近で最大 3 dB 持ち上がる。一方、同相で足し合わせると、クロスオーバー周波数で低音出力と高音出力が逆相になり互いに打ち消し合い出力は 0 となる。従って、通常、2 次のネットワークを使う場合は逆相にしてスピーカーに繋ぐ。図 V-8 に位相特性を示すが、逆相接続では当然、低音極限と高音極限の位相は 180° ずれる。マニアの間では位相がずれることを嫌って正相结合を良しとする向きもあるようだが、この場合もクロスオーバー周波数の前後で位相が飛び、それに周波数特性に強いディップが生じるので、やはり逆相结合が正解であろう。

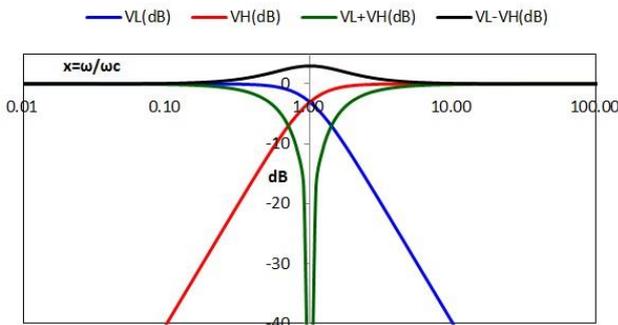


図 V-7 2次ネットワークの電圧出力。VL (青線) は低音出力。VL (赤色) は高音出力。VL+VH (緑線) は両者を正相で加算した出力。VL-VH (黒線) は逆相で加算した出力。この場合クロスオーバー周波数で+3dBの膨らみが生じる。

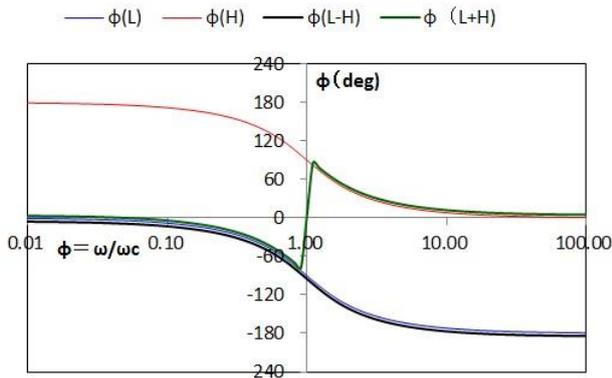


図 V-8 2次ネットワークの位相特性。φ (L) (青線) は低音出力。φ (H) (赤色) は高音出力。φ (L+H) (緑線) は両者を正相で加算した出力。クロスオーバー周波数では両者が逆相になり出力電圧はキャンセルされる。φ (L-H) (黒線) は両者を逆相で加算した出力。低音の極限と高音の極限で 180° 位相がずれる。なお、合成出力は線の重なり

を避けるためそれぞれ 5° づつ上下にずらして表示してある。

1.4 群遅延

位相特性と密接に関係するのは群遅延時間である。これについてはオーディオの科学の雑学帳「群遅延とは」にくわしく解説しているが、位相周波数特性が乱れているシステムにトーンバースト信号を入力すると少し遅れて音が出るという現象である。具体的には群遅延時間は位相特性の時間微分で与えられる (上のページの第(5)式)。従って、位相のずれの原因により群遅延時間が異なってくるので、各要因について考える。

(i) スピーカーユニットの群遅延

スピーカーユニットの位相のずれは (V-2) 式で与えられるので群遅延時間はその微分で求められる。臨界制動条件付近で作動しているシステムについては、

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/groupdelay.htm#SP>

このページに示してあるが、一般に f0 付近で位相遅れが顕著になるのでその付近で群遅延時間は最大となる。実際に、図 V-9 に図 V-1 に位相-周波数特性を示したフルレンジシステムの群遅延時間を示すが、確かに共振周波数付近で最大値を示す。また、Q 値が大きい (制動が効かない) ほどピークは鋭くかつ大きくなる。

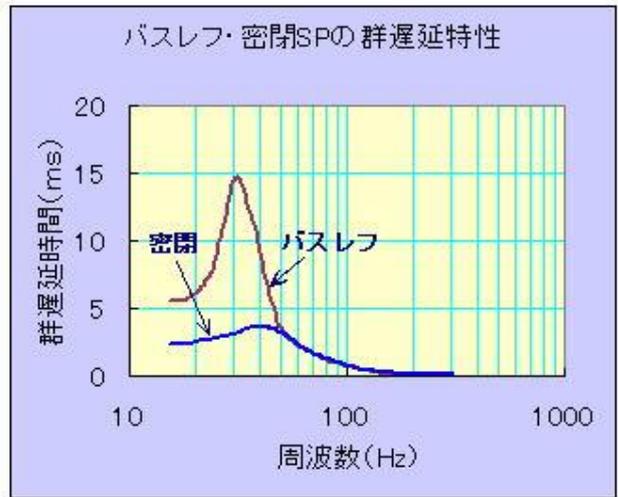
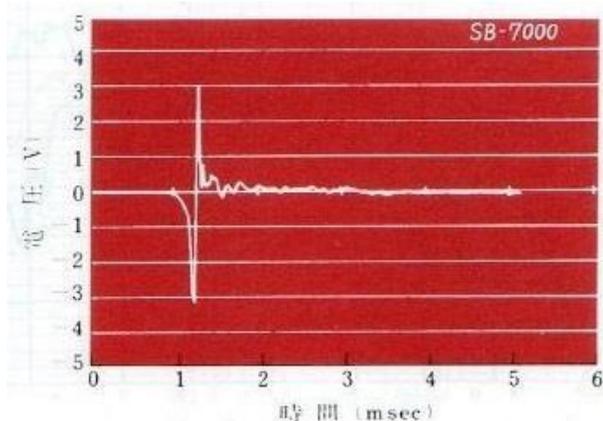


図 V-9 図 V-1 に示したスピーカーの群遅延特性。共振点付近で最大値を示す。

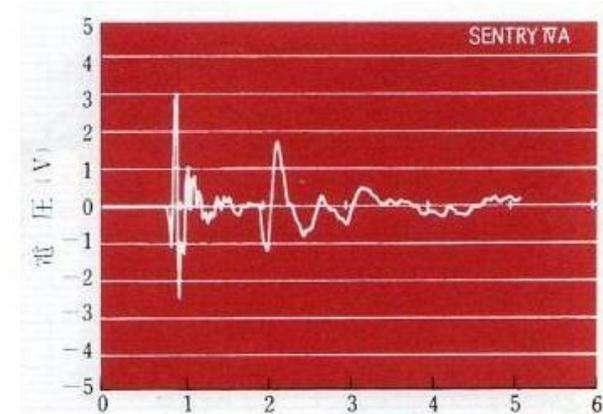
(ii) マルチウェイシステムでの群遅延

この場合は群遅延というより、むしろ音源位置と聴取位置間の距離の差、つまり到達時間の差による遅延と考えた方が分かりやすい。当然タイムアライメントを考慮したシステムの方が遅延時間が短い。図の V-10 (i)、(ii) に、図 V-3 (i)、(ii) に示した、タイムアライメントを施したシス

テム(i)と、音源位置の差が大きいオールホーンシステム(ii)についてインパルス応答を示す。リニアフェーズシステムの応答はほぼ理想的だが、ホーンシステムの場合メインの応答に約 1 msec 遅れて第2のピークが現れるが、恐らく第1のピークがウーファの、第2のピークが中高音を受け持つホーン型のスピーカーからの音だろう。1msec は約 34cm の距離に相当するのでホーンの振動板はウーファの振動板面から約 40cm 後ろにあるものと推定される。



図V-10(i) 図V-3 (i) に示したリニアフェーズシステムのインパルス応答。



図V-10(ii) 図V-3 (ii) に示したホーンシステムのインパルス応答。横軸は前図と同じms単位の時間目盛。約1msと2msの位置に見られる2つの大きなピークは音波の到達時間の差によると思われる。

1.5 位相歪みは検知できる？

以上、スピーカーシステムの位相特性について少し詳しく書いたが、そもそも、位相のずれによる波形の変化(位相歪み)が人間に検知できるのかも問題である。このとき、管楽器や弦楽器のように比較的長く持続する音(定常音)と打楽器や弦楽器のピッチカートのような瞬発的な音(衝撃音)に及ぼす影響が少し違うので分けて考える必要がある。

(i) 定常音の場合

簡単のため、波形が時間によって変化しない理想的な定常音を考えると三角関数の性質

$$\sin(\phi + 2n\pi) = \sin(\phi)$$

により、一周期($2\pi = 360^\circ$)以上の位相のずれがある場合は 360° 以内のずれと同等なので、例えば、(ii)-①項に書いた音源との距離差によって生じた 360° 以上のずれも 360° 以内のずれと物理的に区別出来ない。一方、基音に対して、高調波の位相が変化しても(当然波形は大きく変化する)音色としては変化しないということが古くから知られている(オーム-ヘルムホルツの法則)。つまり、定常音の場合、位相歪みは検知できないといってもよい。ただし、ステレオ再生の場合、左右の音の間に位相のずれが生じている場合は定位感の変化としては検知できる可能性はある。この場合も、スピーカーの運動を含めた電気系では左右の位相のずれはほとんど生じないが、左右の壁で生じる反射音を含めた、耳に入る音は反射率の違いなどにより位相差を生じ音像定位に影響する事は考えられる。

(ii) 衝撃音(トーンバースト)の場合

立ち上がりが速く、かつ短時間で減衰する衝撃音の場合は位相歪みは遅延時間として検知される。ただ、どの程度の遅延が実際に音質の差として検知されるかどうかは別問題で、これについては、

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/distortion.htm#feeling>

ここに示したように、高忠実度再生の条件の一つとして群遅延時間の許容度は周波数にもよるが10 msec 以下であれば問題がないとされているので、先に示したホーンシステムで生じている1 msec 程度の遅延であれば問題なさそうである。

1.6 過渡特性

スピーカーの過渡特性については

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/Audio.htm#trangent>

ここに説明してあるが、要するに時間領域での特性であり、衝撃音などを如何に忠実に再現できるかの問題である。スピーカーユニットの過渡特性はスピーカーの物理学 III の 3.2 節で簡単に説明したが、立ち上がりが速いこと、そのため振動板質量が小さいことが望ましい。又、制動力が強くとリンキングをおこさないため大きな制動力が必要である。しかし、マルチウェイシステムの場合、ウーファーは一般に口径が大きいので、質量が大きくなり、また、ネットワークで高音をカットするので速い立ち上がりは望めない。そのため、速い立ち上がり部分はトゥイーターが担当する

ことになる。具体的な特性は評価法の章、ステップ応答のところで説明する。

2. 具体的なシステム

2.1 フルレンジシステム

これは、ネットワークを用いないので位相特性が良好なことなどの理由により一部マニアの間で人気があるようだが、良好な周波数特性が得られないので製品としてはあまり作られていない。この場合、低音の再生には大きな口径のユニットを用いることが望ましいが、口径が大きいと分割振動が生じる周波数が中音域に下りてきて、重要な中音域の音質が損なわれ、高域が早く減衰するので大きな口径のユニットは使えない。実際には口径 10cm ~ 20cm くらいのユニットが使われるが、これでも f_0 を低くすれば低域の再生は可能だが能率が悪くなり大きな音を出すことが難しくなる。ただ、サブウーファーで超低音域を補ってやるとかなり高音質のシステムを組むことが可能であろう。

2.2 マルチウェイシステム

フルレンジシステムでは主として分割振動の発生のため良好な周波数特性が得られないので、各ユニットに得意とするレンジを受け持たせ、それを繋いでいくという手法が採られる。各ユニットにどのような帯域を受け持たせるかの指針は、(i) 各ユニットにピストン運動が可能な周波数帯域を受け持たす。(ii) 各ユニットの能率がほぼ等しくなるようにする。そのため、放射抵抗が小さい低音域を受け持つウーファーには大口径のユニットが必要となる。又高音域は分割振動を出来るだけ高い周波数に追いやるため、また指向性が強くなるので小口径のユニットが使われる。

2.2.1 2ウェイシステム

2つのユニットで上の(i)、(ii)の条件を満たすのはかなり難しい。通常、帯域の分割点、いわゆるクロスオーバー周波数は 2000 ~ 3000 Hz に採ることが多いようだが、(i)の条件によりウーファーにあまり大きな口径のユニットを使うことは難しい。そのため2ウェイシステムは比較的小型のブックシェルフ型システムに使われることが多い。この場合、やはり超低音域はサブウーファーで補うことをお勧めする。

2.2.2 3ウェイシステム

さらに中音域を受け持たせるスクーカーを追加することにより、(i)、(ii)の条件を満たすことはかなり容易になる。スクーカーが受け持つ範囲は音声や楽器の音の主要部分を受け持つのでシステムの音質を左右する重要なユニットと言える。従って、スクーカーの振動板にどのよう

な材質を使うかによりシステムの音色が決まると言っても過言ではない。ウーファー・スクーカー間のクロスオーバー周波数を 1000Hz 以下に抑えることにより最低域を受け持つウーファーには大口径のユニットが使えるのでフロア型のシステムはほとんど3ウェイ、またはそれ以上のユニットを使う場合が多い。ただ、

http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/su_bwoofersusume.html

このページに書いたように大口径ウーファーを用いた高級システムといえども 30 Hz までフラットに出るシステムは少なく、やはりサブウーファーで補うことをお勧めする。また、ハイレゾ対応と称して 20kHz 以上の超音波域を再生するためスーパートウィーターを追加しているシステムもあるようだが 20kHz 以上の音をカットしても誰も気がつかないという実験があり意味があるとは思えない。

3. 評価法

スピーカーシステムの評価は最終的には個人の好みとなるが、高忠実度再生をのぞむなら客観的な情報としての測定が不可欠である。この章では第1章で取り上げた諸特性の測定法を説明する。

3.1 測定用機器

3.1.1 信号発生器

いわゆる低周波発信器があればよいが最近ではパソコンのソフトで作ることが出来る。有名なのは、WaveGene というフリーソフトで大変高機能である。これを使うと、サイン波だけでなく、矩形波やホワイトノイズも発生できる。また、4種類の独立した信号を混ぜて出力できる。詳しくはこちら

<http://efu.jp.net/soft/wg/wg.html>

をご覧ください。

3.1.2 マイク

測定に使う以上、当然マイクの周波数特性は出来るだけ広領域でフラットでなければならない。測定用マイクも市販されており数千円で買えるようである。マイク感度の周波数特性が付けてあることが望ましい。また少し高級な IC レコーダー付属のマイクも使える。これを使うと測定データを簡単にパソコンに送ることが出来るので便利である。

3.1.3 解析用機器およびソフト

マイクで拾った信号を解析する方法は何を知りたいかによって異なる。

(i) 周波数特性および歪み率

周波数特性や高調波歪み率は上に述べた

WaveGene と対になって提供されている WaveSpectra というフリーソフトがよい。周波数範囲は 20Hz ~ 20 kHz だが音源がいわゆるハイレゾで録音されている場合は自動的に周波数領域が広がる。単純周波数特性は WaveGene でホワイトノイズを発生しこれを WaveSpectra で解析することにより手軽に測定出来る。ただこの場合、一定の周波数の継続時間が短いので定在波の影響などが過小に見積もられる可能性があるため、定在波の影響を見るにはサイン波の周波数を徐々に変えてゆきその応答を測定する方がよい。

(ii) 位相特性と過渡特性

位相特性や過渡特性は原理的には矩形波をオシロスコープで観測することにより可能だが、オシロスコープは高価で使い方も難しい。現在ではパソコンソフトを使って、次に述べるインパルス応答を解析することにより容易に測定出来る。具体的には、自分ではまだ使っていないが、スピーカーシステムの総合評価用のソフトである MySpeaker を使うとよい。こちらから

<http://www.asahi-net.or.jp/~ab6s-med/NORTH/SP/myspeaker/index.htm>

ダウンロード出来る。

(iii) インパルス信号による総合評価

インパルス信号（数学的にはデルタ関数）は <http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/groudelay.htm#inpulse>

ここで説明しているようにあらゆる周波数を位相 0 で含んでいる。従って、インパルス信号をスピーカーに入れ、その応答を解析することにより、歪み率を除いて、周波数特性、時間分割周波数特性、位相特性、ステップ応答特性など、ほとんどあらゆる特性を求めることが出来る。具体的にどのようなアルゴリズムを使って解析するかを説明するのは難しいが、1 つ注意する必要があるのは単純なインパルス信号は瞬間的に発生する電圧でありそのエネルギーは小さく、従って、S/N 比が小さくそのままでは信頼出来るデータを取るのには難しい。そのため実際の測定は、いわばインパルス信号を裏返した信号として、ホワイトノイズを発生し、この元信号と応答信号の差分を解析することによりインパルス信号を解析すると同等の情報得られるという原理を用いて行われる。この方法を MLS(Maximum Length Sequence) 信号によるインパルス解析という。上に述べた MySpeaker はこの方法を使ったソフトのようである。

3.2 測定によって分かること

3.2.1 周差数特性

(i) 単純周波数特性

周波数特性は音質を左右する最も重要な情報なので、少なくとも低音と高音の限界周波数は調べておきたいものである。マルチウェイシステムの場合ウーファー、スクーカー、トゥイーター間の音量バランスが適正かどうかを調べておきたい。特にマルチアンプシステムを使っている場合は重要である。また、サブウーファーを使う時、耳だけで判断すると、どうしても超低音を過剰に出してしまう傾向があるので測定により適正なクロスオーバー周波数と音量レベルを決めることを強くおすすめする。通常は普段の聴取位置にマイクを置き測定すればよいが、別の場所も測定し定在波の存在や部屋の影響も調べておきたい。

(ii) 指向性

高音は指向性があるので、マイクの位置を中央からずらして周波数特性を測定することによりトゥイーターの指向性が分かる。ただし、この場合ステレオ接続のまま測定するとトゥイーター自身の指向特性は分からないので左右どちらかの一方のスピーカーをオフにして測定する必要がある。ステレオ接続のまま測定してもそれなりの意味はあるが、この場合マイクが中央位置からずれると左右のスピーカーの音が干渉し f 特にディップが生じるので注意が必要である。この件については以下を参照して下さい。

<http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/position.htm>

3.2.2 歪み率

歪みは主に再生系の非線形によって発生するもので再生音の音質に影響する。その原理は <http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/distortion.htm#distortion> ここに書いてあり、また人間がどの程度の歪み率を検知できるかについても <http://www.ne.jp/asahi/shiga/home/MyRoom/distortion.htm#feeling> に記載してあるので参照されたい。

(i) 高調波歪み率

高調波歪み率は WaveGene と WaveSpectra を用いれば簡単に測定出来る。例えば 1000 Hz での第 2 高調波の大きさを求めるには WaveGene で 1000 Hz サイン波 (-10dB くらいの強度) を出力し、スピーカーにいれマイクで収録した音を WaveSpectra で解析し、デシベル表示でのメインピーク (1000 Hz) のピーク値と、第 2 高調波の 2000Hz に現れるピーク値の差を求め、これを Δx とすると、パーセント表示での歪み率は

$$y = 100 \times 10^{-\Delta x / 20}$$

で与えられる。また、WaveSpectra では全高調波歪み率 (THD) やノイズレベルを表示することも出来る。なお、適正に設計されたアンプやレコーダーを使う場合そこから発生する高調波歪みはスピーカーで発生する歪みに比べ十分小さく、得られた歪み率はスピーカーによって生じると見なしてよい。ただし、アンプやレコーダーのレベル調整がまずいとその限りでないので注意が必要である。

(ii) 相互変調歪み

高調波はもともと楽器において盛大に発生しており、これが楽器の音色を決めており、再生系で高調波歪みとして発生してもそれほど気にならないといわれている。しかし、周波数の異なる音が重なる時、再生系に非線形があると、2つの音の差分が相互変調歪み成分として発生し、これは自然音にはほとんど含まれておらず音を濁す原因となるといわれている。

相互変調歪みの測定も WaveGene で2つの周波数のサイン波が混ざった音を作り、これを WaveSpectra で解析し差分成分の強度を測定することにより可能である。

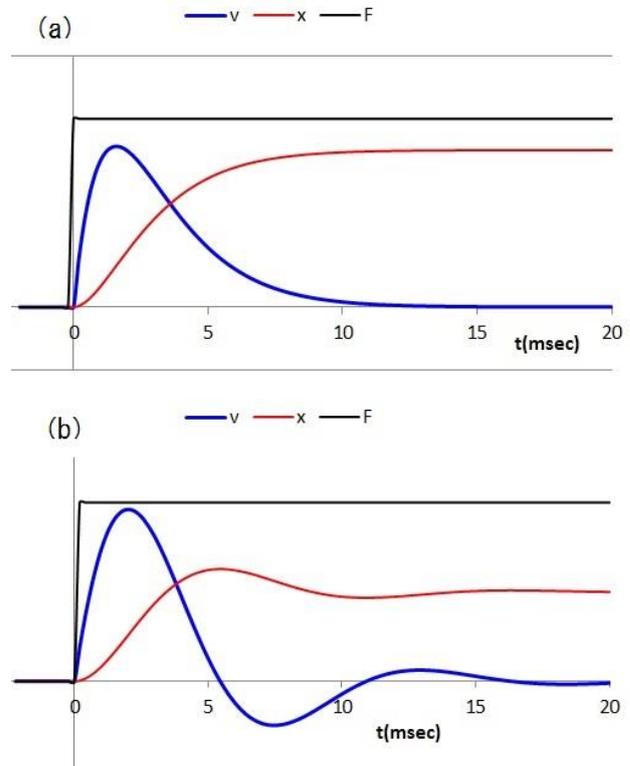
3.2.3 位相特性と過渡特性 (ステップ応答)

位相特性はインパルス法で解析することは可能だが、1.5 節で説明したように単純な位相特性は聴感との関係が不鮮明であり役に立たない。しかし、衝撃音の再生には位相特性と密接に関係する過渡特性が重要でこちらの測定が望ましい。過渡特性は音圧周波数特性と位相周波数特性を時間領域の波形に変換したものといえる。具体的には方形波を入力しその反応を調べるステップ応答の測定がよく用いられる。これも、インパルス応答を解析することにより求めることが出来る。

(i) フルレンジシステムでのステップ応答

スピーカーに方形波電圧を入力するとその瞬間からボイスコイルに電流が流れ、ローレンツ力 (F) が発生し振動板が加速される。発生する音圧は振動板の速度 (v) に比例するのでマイクが感じる波形は方形波ではない。その波形はこのシリーズ I (基礎編) で説明した直列 L-C-R 回路 (図 I-5 参照) の応答と同等で、 L を振動板の質量 M 、静電容量 C をコンプライアンス C_m 、電気抵抗 R を機械抵抗 r_m 、電流 I を速度 v に置き換えれば (表 I-1 参照) ステップ応答特性が計算できる。図 V-11 は $f_0:100\text{Hz}$ 、 $M=10\text{g}$ 、機械抵抗 r_m の大きさを臨界制動としてシミュレートした結果で、黒線が力 F 、赤線が位置変化 x 、青線が振動板の速度を示す。音圧は速度に比例するのでマイク

で観測されるステップ応答は青線のようにになる。図(a) は r_m を臨界制動値 ($Q=0.5$) とした時、(b) は制動不足 ($r_m < r_t$) の場合のレスポンスである。当然、制動不足だと振動しながら減衰するので過渡特性はよくない。従って、良好な過渡特性を示すスピーカーのステップ応答特性は(a)のようなパターンを示す。

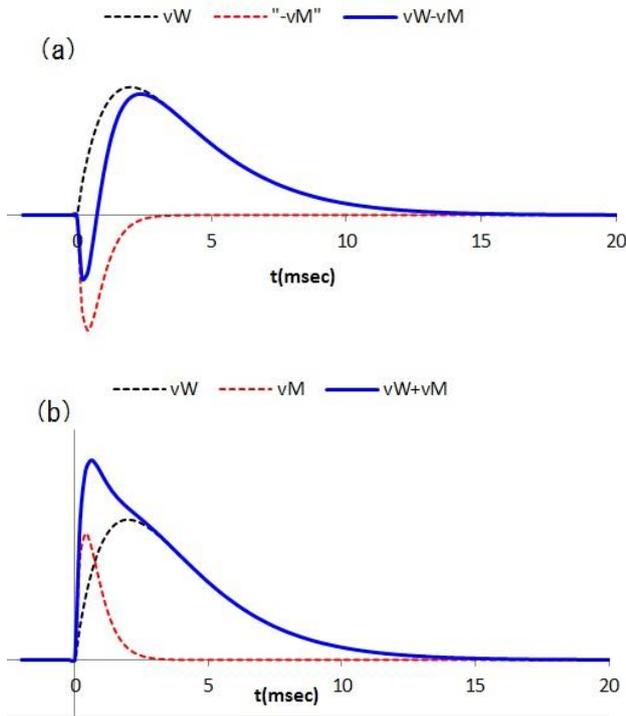


図V-11 計算で求めたステップ応答。黒線はボイスコイルにかかる力 (入力電圧に比例)、赤線は振動板の位置変化、青線は振動板の速度 (生成される音圧に比例)。モデルケースとして振動板質量 10g 、 $f_0:100\text{Hz}$ の場合のシミュレーション。(a) は臨界制動 ($Q=0.5$) の場合。(b) は制動不足 ($Q=1.26$) の場合

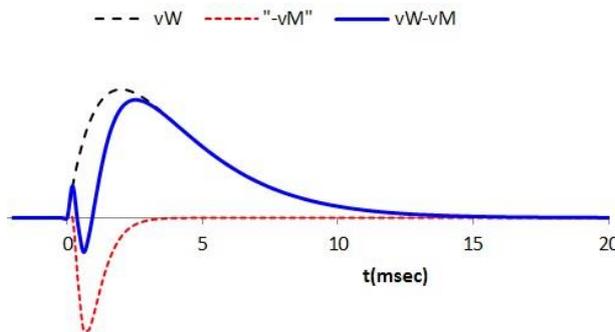
(ii) 2Way システムのステップ応答

マルチウェイシステムの場合、2次のネットワークを使用する場合、クロスオーバー周波数で f 特にディップが生じるのを避けるためトゥイターをウーファーに対して逆相に接続することが多い。この場合、ステップ応答特性はかなり複雑なパターンを示す。ここでは2Wayシステムの場合、タイムアラインメントがとれている場合とトゥイターの音源位置が少し後ろにある場合について逆相接続 (トゥイターの出力をマイナスとして足し合わせる) にした場合と正相接続 (両者をいずれも正として足し合わせる) の場合について、フィルターによる信号減衰を無視して計算した。また、ウーファーの質量は 30g 、 f_0 は 80Hz 、

トゥイーターの質量 10g、 f_0 は 400 Hz としてどちらも臨界制動 ($Q=0.5$) にあるとした。



図V-12 タイムアライメントのとれた2Wayシステムのステップ応答。(a)は逆相接続の場合、(b)は正相接続の場合。黒点線はウーファー(振動板質量: 30g、 $f_0=80\text{Hz}$ 、 $Q=0.5$)、赤点線はトゥイーター(質: 10g、 $f_0=400\text{Hz}$ 、 $Q=0.5$)のステップ応答。青太線は両者を合わせたステップ応答。



図V-13 トゥイーターの音源中心がウーファーのそれより 10cm 後ろにずれた 2Way システムを逆相接続で使用した場合のステップ応答。各ユニットの特性は上と同じ。

図V-12 はタイムアライメントが取れている場合のステップ応答を示す。(a)は逆相接続の場合を示すが、出だしは立ち上がり(下がり)の速いトゥイーターからのマイナス音圧がまさり下(マイナス側)にフレ、しばらくするとウーファーからのより大きな正圧が追いつき、プラス側になる。トゥイーターは減衰も早いので、後は

ウーファーの応答特性が支配的となり、このように出だしが複雑な応答曲線が得られる。ただし、タイムアライメントが取れている位置は限られており、マイクの位置がずれると後に述べるようにさらに複雑な立ち上がりを見せる。一方、正相接続では、どちらも正相なのでマイナスに振れることはなく、出だしはトゥイーターの出力が支配的で急激な立ち上がりを見せ、ウーファーの応答と合わせるとほぼ三角形をした応答特性となる。

図V-13 はトゥイーターの音源位置がウーファーのそれより少し後ろにありかつ逆相接続の場合のステップ応答で、出だしはウーファーのプラス出力のみで、すぐにトゥイーターのマイナス信号のため一旦マイナス側に振れる。しかし、トゥイーターの減衰が速いのですぐにプラス側に戻り、後はウーファーの減衰曲線が支配的になり、このようにさらに複雑なステップ応答が見られる。なお、正相接続の場合はトゥイーター・ウーファーともにプラス出力なので図V-12(b)とそれほど変わらず単純な三角形の応答特性となる。また、3 Way 以上のシステムではさらに複雑になる。

このように2次のネットワークを使ったマルチウェイシステムは、周波数特性を重視すればステップ応答が複雑になり、シンプルなステップ応答を得るために正相接続とすれば周波数特性にディップが生じいわばトレードオフの関係にある。どちらを取るかは議論の分かれるところであるが、一般には周波数特性を重視して逆相接続にすることが多い。ステップ応答の乱れは、位相特性の乱れに相当するので聴感には影響が少ないはずで、合理的な選択であろう。

3. 市販システムでの測定例

3.1 歪み率・周波数特性

単純な周波数特性は最も基本的な特性で、ネット上でもかなり多くの例が見つかるが、歪み率を合わせて測定している例は少ない。ここでは、sutureo sound 誌 2005年発行 No.155、156に掲載された高級スピーカーシステムの測定例の一部を紹介したページを挙げておく。

<http://shigaarch.web.fc2.com/electrostaticsP.html>

これは以前 Audio BBS で話題になった静電型スピーカーの歪み率がいかに小さいかを示すために示した図であるが、その他代表的な高級スピーカーの歪み率周波数特性も紹介している。かなり大きな高調波歪みがあっても結構人気の高いシステムがあるようで、適度な高調波歪みを含む方が心地よく感じる人があるのかもしれない。

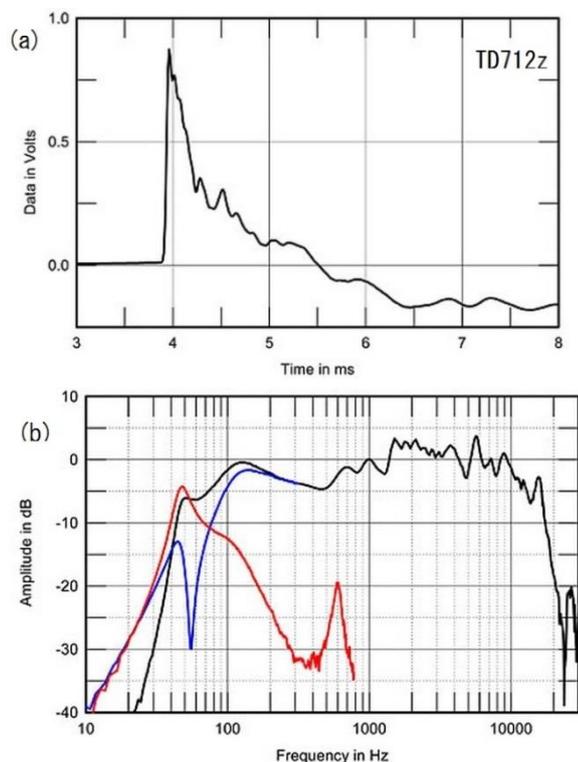
3.2 ステップ応答と周波数特性

ステップ応答は国内のオーディオ誌で見つけるのは難しいが、アメリカのオーディオ誌 *Stereophile* 誌ではスピーカーのレビュー記事の測定項目としてステップ応答が標準的に記載されており、ネット上でも公開されているので、この中からいくつかの例を紹介する。ホームページの URL は

<http://www.stereophile.com/equipmentreviews>
 検索欄があるのでこれで探せばよい。標準のマイク位置はツイーター軸上 125cm のようである。

(i) フルレンジシステム

市販品でフルレンジシステムはほとんど見られないが、いわゆるタイムドメイン重視のシステムとして日本製 F 社の小型フルレンジシステムがあったので紹介しておく。ユニットは 12cm 径のグラスファイバー製のコーンを使っており、リアバスレフタイプである。

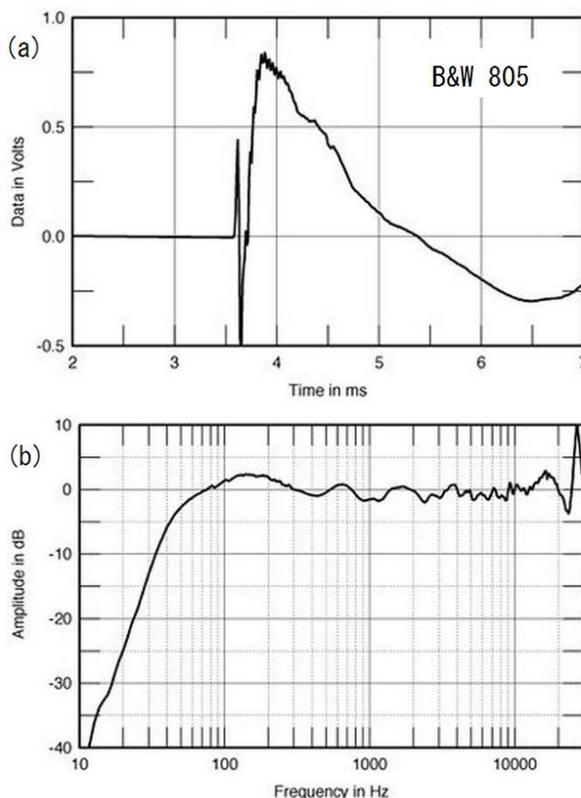


図V-14 日本製フルレンジシステムの (a) ステップ応答 (b) 周波数特性；青線はユニット直前、赤線はポート直前、黒線は両者の和

図V-14 (a)にステップ応答曲線を示すが典型的な三角形型の特徴を示す。(b)はユニット直前、ポート直前、両者の和の周波数特性を示すが 12cm 径のユニットとしては意外と低域が伸びている。実は、このシステムを試聴したことがあるが、室内楽などでは大変きれいに鳴ってくれるが、やはりオーケストラ曲ではもの足りなさは否めない。

(ii) 2Way システム 1 – 周波数特性重視型 –

市販のブックシェルフ型のシステムの多くは 2Way システムであり、データも豊富である。ここでは、モニタースピーカーで有名な英国 B 社の小型システムのデータを紹介します。ユニットは 16.5cm 径のウーファー、2.5cm 径のメタル製トウィーターを使用しておりフロントバスレフタイプである。

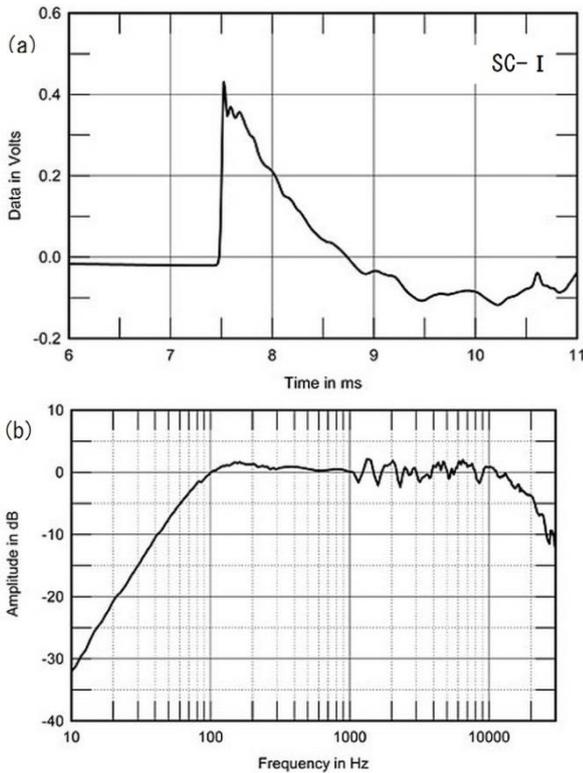


図V-15 英国製小型 2Way システムの (a) ステップ応答 (b) 周波数特性

図V-15 (a) にステップ応答を示すが、立ち上がり部分は図V-13 に示した、少しタイムアライメントがずれた逆相接続のシミュレーション図とよく似ている。周波数特性は 50 Hz 以上 20kHz までほぼフラットな特性を示しており、このシステムが周波数領域の特性を重視していることが分る。

(iii) 2Way システム 2 – 時間領域重視型 –

次に、時間領域特性を重視したものと思われる米国 D 社製のシステムを紹介する。ユニットは 14 cm ウーファー、2.5cm トウィーター で 1 次のネットワークを使っている。



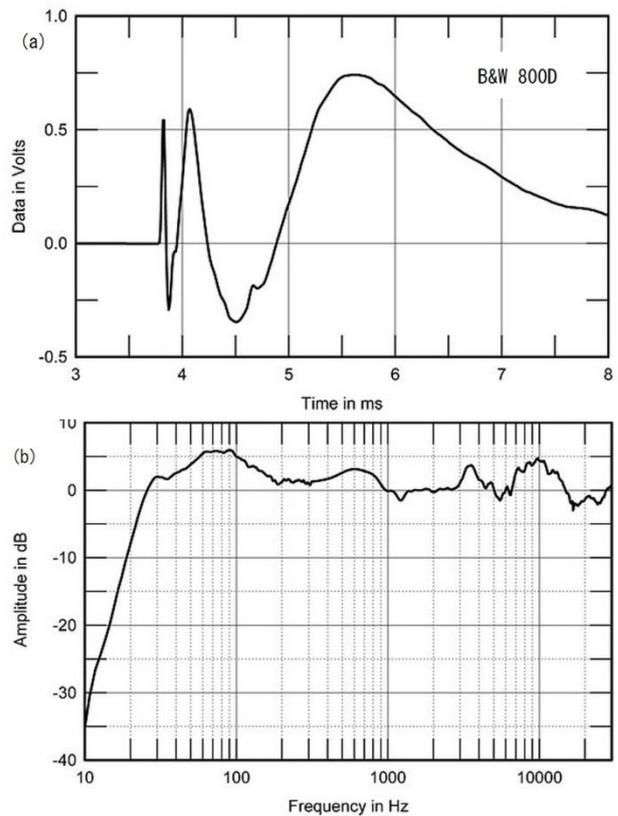
図V-16 米国D社製小型2way システムの (a) ステップ応答 (b) 周波数特性

図V-16 (a) はステップ応答で、きれいな三角形を示し、正相接続と思われる。(b) は周波数特性であるが、1次のネットワークを使用しているので、クロスオーバー周波数 (3.5 kHz) でディップは生じず、70 Hz から 20kHz までほぼフラットの良好な特性を示している。ただ、このメーカーは、理由は不明であるが、すでに消滅しており、物理特性だけではユーザーに好まれないのかもしれない。

(iv) 3Way システム 1 – 周波数特性重視型 –

いわゆるフロアタイプのシステムはほとんど 3way 又はそれ以上のユニットを使うマルチウェイシステムである。ここでは、代表的な高級スピーカーである英国 B 社のモニタースピーカーを紹介する。ユニットはウーファーとして 25 cm 径のユニットを 2 個、16 cm のミッドレンジ、2.5cm のトゥイター を使い底面にポートがあるバスレフ型である。

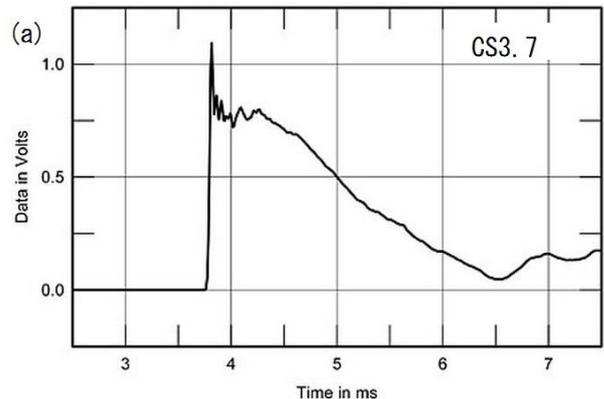
図V-17 (a) はステップ応答で、かなり複雑な形をしており、正-逆-正 結合と推定される。(b) は周波数特性で 25Hz から 20 kHz までほとんどフラットで、さすがにきわめて優秀な特性を示している。ステップ応答が複雑なパターンを示すことでこのシステムを低く評価する人もいるようだが一般的には高く評価されているようである。

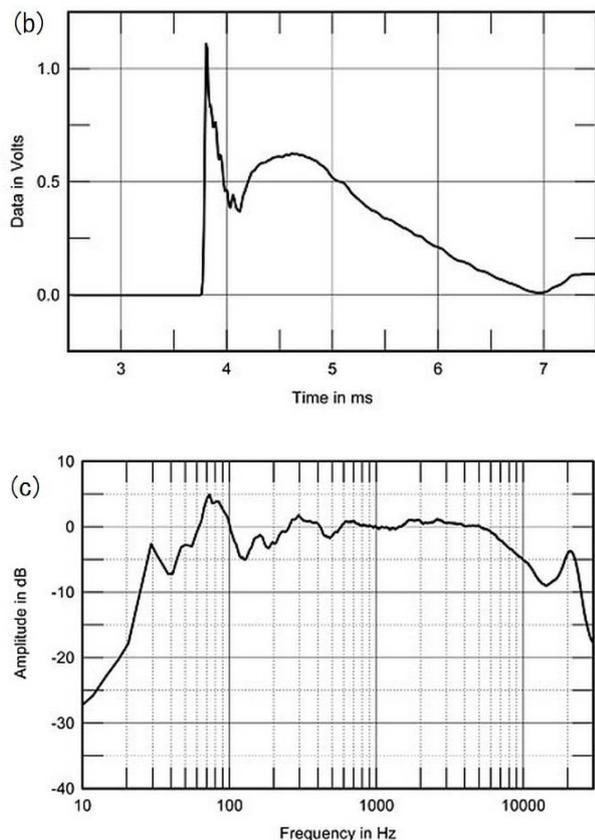


図V-17 英国B社製3Way モニタースピーカーの (a) ステップ応答 (b) 周波数特性

(v) 3Way システム 2 – 時間領域重視型 –

3Way システムで単純な3角形のステップ応答を得るのは難しいが、意識して設計すれば実現可能のようである。ここでは、米国 T 社のシステムを紹介する。ユニットは 25 cm ウーファー、11cm ミッド、2.5cm トゥイターを使い低音はパッシブラジエータで補強している。



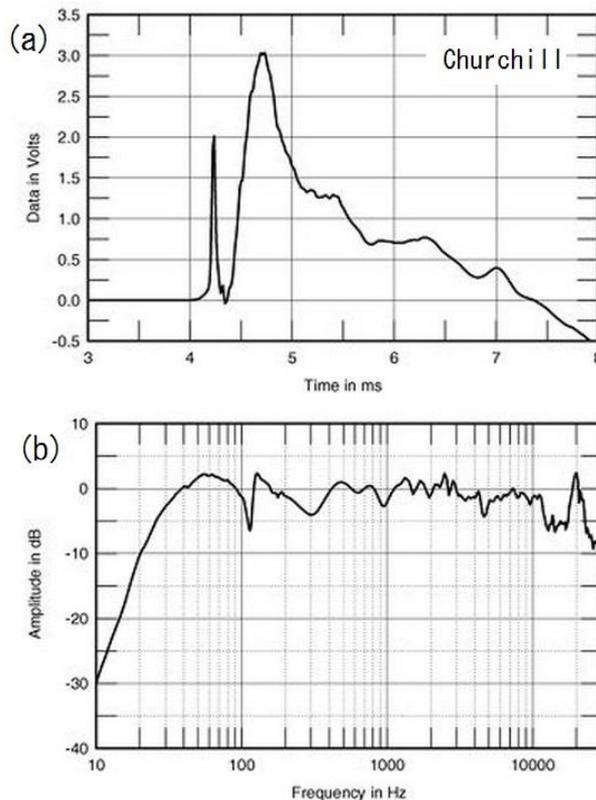


図V-18 米国T社製3Way (a) 最適位置でのステップ応答 (b) トウイーター軸上のステップ応答, (c) 周波数特性

図V-18 (a) は最適位置でのステップ応答で、きれいな三角形を示す。しかし、マイク位置を標準の位置である、最適位置から13cm上のトウイーター軸上におくと、(b)のように三角形がつぶれてしまう。すなわちこのような大型マルチウェイシステムではきれいな三角形のステップ応答を示すのはタイムアライメントがとれた狭い範囲に限られるということである。周波数特性は30 Hz から出ているが低域に少し凹凸が目立つ。

(vi) 特殊なシステム 1 – 同軸スピーカー

同軸型の2Way ユニットを使うことで有名な英国 T 社製の高級モデルで30cm 径の同軸ユニットを使っている。

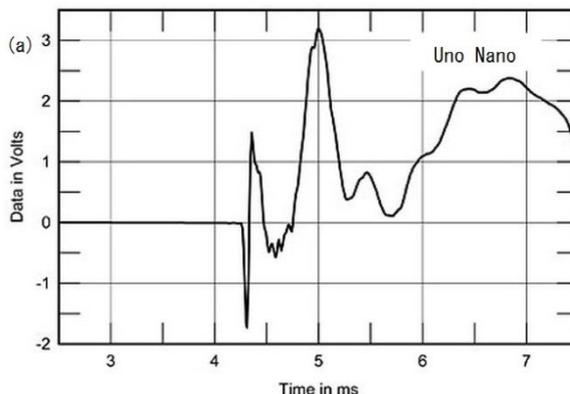


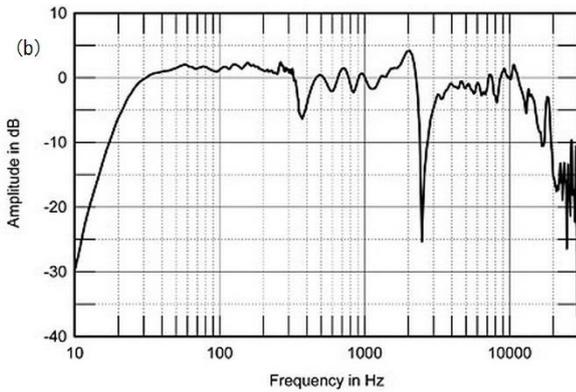
図V-19 英国T社製同軸スピーカーの (a) ステップ応答 (b) 周波数特性

図19-(a) はステップ応答で、トウイーターからの信号が少し早く到達しピークが2個に分裂している。同軸型と言っても三角形型のステップ応答が得られるわけではないことを示す。

(vii) 特殊なシステム 2 – ホーンシステム –

中域、高域にホーンユニット、低域は25cm 径 x 2 のコーン型ウーファーを使用したドイツ製のホーンシステム。



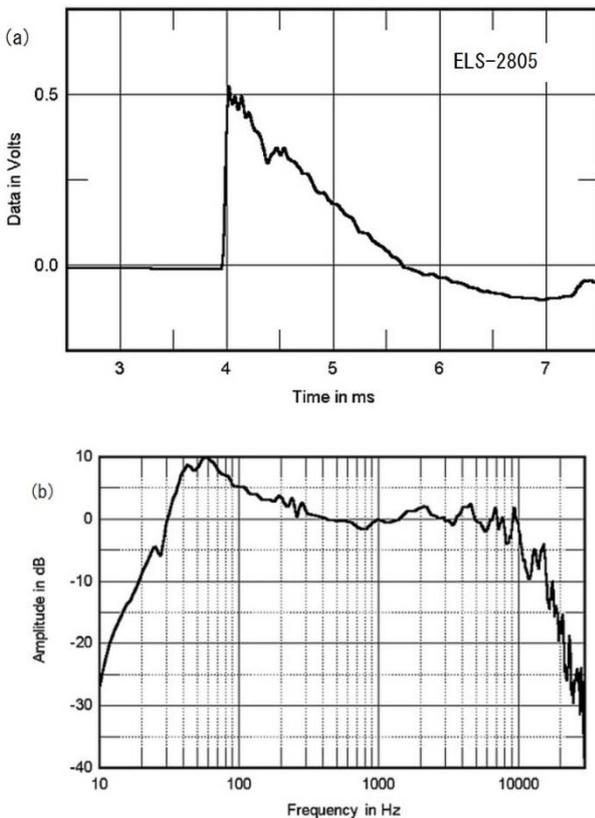


図V-20 ドイツ製ホーンシステムの (a) ステップ応答 (b) 周波数特性

図V-20 (a) にステップ応答を示すがかなり乱れており、時間領域の特性は考慮していないように思える。(b) は周波数特性で 2500 Hz 付近に深く鋭いディップがあるのが気になるところである。

(viii) 特殊なシステム 2 – 静電型 –

最後に静電型システムを紹介しておく。英国 Q 社の製品で代表的な静電型システムである。以前、3-1 節の歪み率・周波数特性で取り上げたのと同じメーカーの製品である。



図V-21 英国製静電型システムの (a) ステップ応答 (b) 周波数特性

図V-22(a) にステップ応答を示すが、きれいな3角形を示している。フルレンジシステムなので当然の結果とも言える。

以上、Stereophile 誌で取り上げられているシステムのいくつかを示したが、ここで取り上げたのは同じ構成で、時間領域の特性を重視したと思われるシステムとそうでないシステムであり、実際には後者が圧倒的に多い。具体的には、新しい順に 30 個の大型フロアタイプのマルチウェイシステムのステップ応答を調べたところ、良好な特性と言われる三角形を示すのは、2、3 個で全体の 1 割程度しかなく、また、いわゆるタイムアライメントを考慮したと思われる、トゥイーターの位置を前後にずらしたシステムでも標準の測定位置では立ち上がりにステップ応答が振動するものがほとんどで、**時間領域の波形の歪みは聴感にそれほど影響を与えないと推定される**。残念ながらこのことを客観的に証明するブラインドテストの結果は見当たらないが、各ユニットに電氣的に遅延をかけ比較聴取することにより可能なので実行されることがのぞまれる。

付録 デバイディングネットワークの特性

図V-4~8 参照

\tilde{V} : 入力電圧、 \tilde{V}_L : LFP 出力、 \tilde{V}_H : HPF 出力

$x = f/f_c$ (f_c : クロスオーバー周波数)

(a) 1次ネットワーク (-6dB/Oct)

$$\tilde{V}_L = \left[\frac{1}{x^2+1} - \frac{x}{x^2+1}i \right] \tilde{V}, \quad \tilde{V}_H = \left[\frac{x^2}{x^2+1} + \frac{x}{x^2+1}i \right] \tilde{V}$$

$$\tilde{V}_L + \tilde{V}_H = \frac{1-ix+x^2+ix}{x^2+1} \tilde{V} = \tilde{V}$$

合成出力は入力電圧と出力電圧が一致し位相変化も生じない

(b) 2次ネットワーク -12dB

$$\tilde{V}_L = \left[\frac{-x^2+1}{x^4+1} - \frac{\sqrt{2}x}{x^4+1}i \right] \tilde{V}, \quad \tilde{V}_H = \left[\frac{x^4-x^2}{x^4+1} + \frac{\sqrt{2}x^3}{x^4+1}i \right] \tilde{V}$$

$$\tilde{V}_L + \tilde{V}_H = \left[\frac{x^4-2x^2+1}{x^4+1} + \sqrt{2} \frac{x^3-x}{x^4+1}i \right] \tilde{V}$$

$$\tilde{V}_L - \tilde{V}_H = \left[\frac{-x^4+1}{x^4+1} - \sqrt{2} \frac{x^3+x}{x^4+1}i \right] \tilde{V}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}(\tilde{V})}{\text{Re}(\tilde{V})} \right)$$