

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

波形再生の理論と実際



別府俊幸

マルチアンプはなやかなりどころ、本誌上でデバィティング・アンプの合成後諸特性について激烈な議論がたたかわされ、音場での波形合成実験の結果も発表されました。そのときすでに6 dB/octフィルタの合理性は確認されたのですが、世の主流となることはなかったのです。しかし別府氏の新測定法によって改めて波形再生に対する6 dB/octフィルタの優位性が立証されつつあるのは、オーディオ界への重要な問題提起として大いに注目されるべきだと考えます。(編)

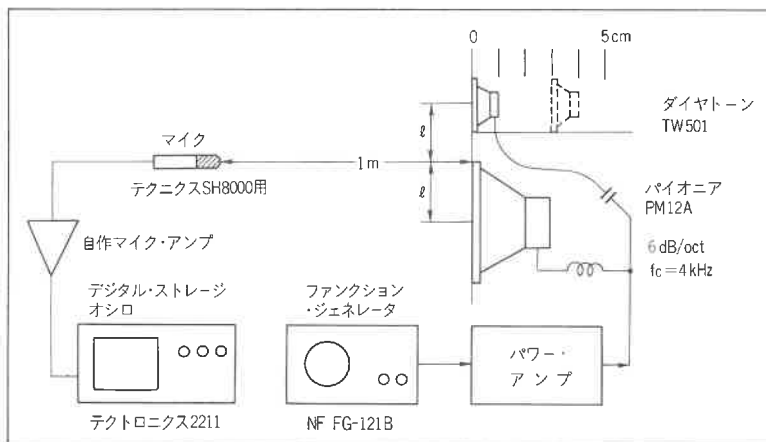
はじめに

リニア・フェイズ・スピーカは、シングル・コーンの素直な音質を最大限生かしたまま、再生帯域を広げるシステムです。しかもその利点は、単発サイン波応答によって過渡応答の正確さを向上させるためにもたらされることがわかりました。今回は、リニア・フェイズ方式の要点であるユニット間の位置関係、およびネットワークについてシミュレーションと実測によって検討します。

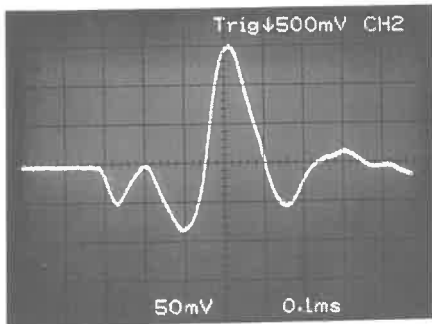
スピーカ位置による変化

1) 実測値の検討

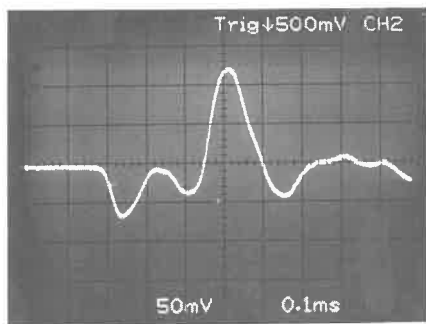
実際は、高橋和正氏のミニゴンの中高域ユニットを用いて行ないました。第1図に実験方法を示します。スコカ (PM 12 A) のフレームを基準位置として、トゥイータ (ダイヤトーン



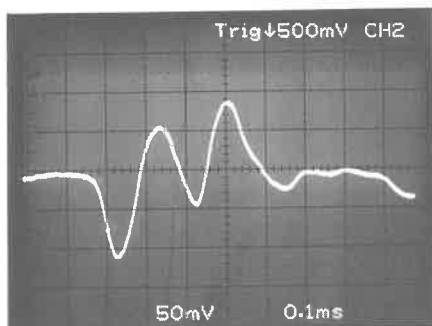
〈第1図〉スピーカ位置実験のブロック図。スコカのバッフル取り付け面を基準とし、トゥイータを1 cm刻みで後退させ、それぞれの単発サイン波応答を測定する。ネットワークは4 kHz、6 dB/oct、測定周波数も4 kHzとした。



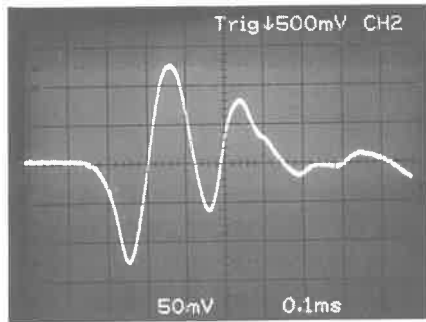
(a) 0 cm: プリエコーの後にインパルスが発生したような波形で、単発サイン波には見えない。また、プリエコーとインパルスの幅が異なっていることにも注意。これが普通のマルチウェイ・スピーカの応答と考えられる。



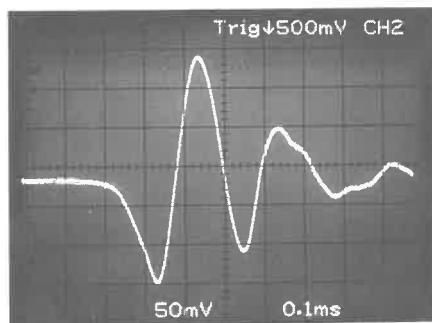
(b) 1 cm: 0 cmの場合とよく似た波形となっている。



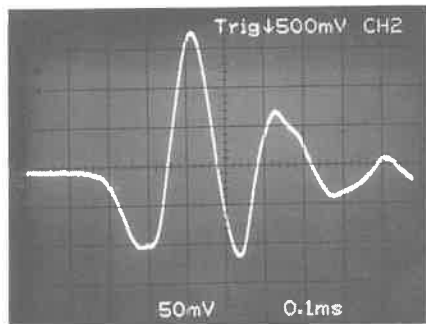
(c) 2 cm: 明らかに出力が2波となり波形の周期が異なっている。トゥイータがわずかに前にある時の音のごりが最悪になるのだそうだが、このような状態であろう。



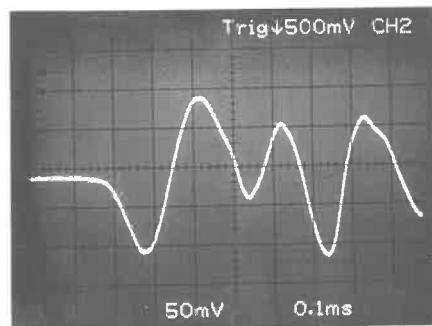
(d) 3 cm: 聴感上の最適ポイント。a波からd波まで良好に減衰振動している。



(e) 4 cm: 基本的には(d)と変わらない。が、a波の立ち下がりながまっているのに注意。最適ポイントよりトゥイータが下がっている場合は聴感上、問題が少ないが、波形的にも変化が小さいことがわかる。



(f) 5 cm: これも3 cmの時とほぼ同じだが、a波の立ち下がりにはさらに悪く、ピークもつぶれている。



(g) 12 cm: 一気にトゥイータを下げてみると、明らかにウーファの波が先に到達し、後からトゥイータの波がやってくる。高音ホーンでも、この程度の距離差はしばしば開いている。

〈第2図〉スピーカ位置による波形応答の変化

TW 501) の位置を 1 cm 刻みで変化させます。スコーカとトゥイータが同一平面上にある場合、つまり普通のスピーカ・システムの場合を 0 cm とし、1 cm, 2 cm, …, 5 cm と下げて行きます。測定周波数は、ネットワ

ークのクロスオーバー 4 kHz とし、マイクロフォンはスピーカ正面 1 m に設置しました。もちろんネットワークは 6 dB/oct タイプです。

第2図に、測定された単発サイン応答を示します。(a) 図はトゥイータが

スコーカと同一平面 (0 cm), (b) 図は 1 cm 後退させた場合です。プリエコーの後にインパルスが入ったような波形に歪められています。しかしこのピークは、減衰振動の足し算により偶然に発生したことがわかっています。いずれにしても、入力1波サイン波は、ほとんど失われています。

2 cm 下げた場合が (c) 図です。トゥイータの位置がほんの前に出た時に、濁ったいやな音になるそうですが、(c) 図がその場合でしょうか? 1波入力が2波に増えています。ついでに、ヒマな人も忙しい人も図に定規を当ててみましょう。せつかく大きめに印刷しているのですから。オシロスコープ画面

の1 divが0.1 msec、つまり4 kHzの周期は2.5 divになります。(d)図は合っているのですが、(c)図はどう見ても周期が短くなっています。変調音(?)が発生している状態としか考えられませんから、音がにごって聴こえるのもうなずけるものがあります。

(d)図は聴感上のベスト・ポイント、3 cm押し込んだ場合です。この点は、波形を見てベストと決定したのではなく、聴感で最適と感じた位置です。a, b波とそれに続くc, d波の減衰振動が最もよく再現されています。若干a波の立ち上がりがなまっているようですが、トゥイータももとの性質なのか、トゥイータが1~2 mm下がりがすぎているのか、他に原因があるのか、調べてはありません。

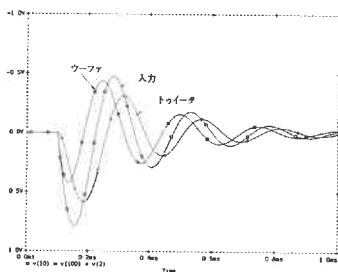
4 cm後方の場合が、(e)図、5 cm引込んだ場合が(f)図です。ところが一見したところでは、(d)図とそれほど相違はないようですが、むしろ(e)図など、b波のピークが高くなり好ましいようにも見えます。けれども、よくよく観察すると、a波の立ち下がりスコープの傾斜が少なくなり、(f)図ではa波がつぶれ気味となっているのがわかります。高橋氏が89年9月号の製作記に、聴感上はトゥイータを下げ気味の方が問題が少ないと述べられますが、応答波形の面からも変化が小さいことがわかります。

それではと、おもいきりトゥイータを下げたのが(g)図、12 cm後退させた場合です。ここまで後方に追いついてしまうと、スコープからの波が先に届き、トゥイータの波と完全に分離しているのがわかります。想像されるとおり、たいていのホーンではこの程度の距離差ではすみません。

2. シミュレーションでの検討

第3図、第4図にシミュレーション結果を示します。

第3図の□が入力波形です。信号源には4 kHzの減衰振動波を用いています。これは、スピーカの応答が減衰



〈第3図〉シミュレーションによる波形の検討。入力には4 kHzの減衰振動波、ネットワークは4 kHzクロス、6 dB/oct、■+◇=□となる。単純に足し算すれば、

振動を伴うため、1波サインの応答よりも実際のスピーカ応答に近い形に見えるからです。シミュレータはPSPICEです。■がウーファ出力、◇がトゥイータ出力を表します。ネットワークは4 kHzクロスオーバーとし、それぞれのスピーカは8オームの純抵抗として計算しています。ネットワークのモデルを第5図に示します。

なお、2つのスピーカの出力合成は単純な足し算としていますので、空間で合成される音波とはかなり異なった状態ではあります。とはいいいましても、足し算よりも空間での合成は複雑な結果となりますから、シミュレーションでよくないものは、実際にはもっと²良くないと決めつけます。また、出力結果は1 msecの範囲を表示していますので、実測(1 msec範囲となっている)と等価に見ることができます。

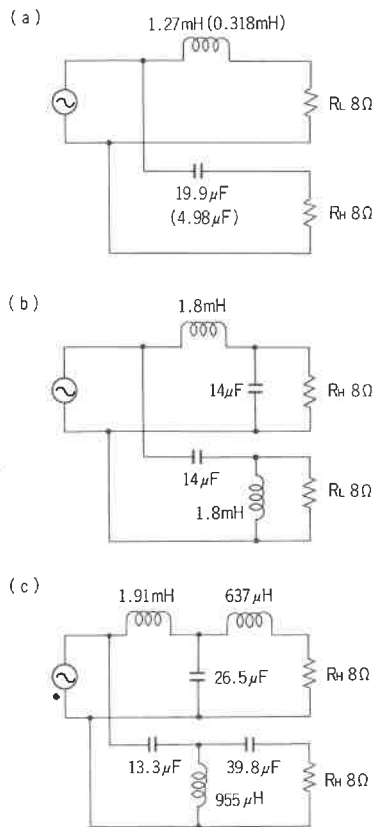
第4図はトゥイータを0 cm~5 cm下げたシミュレーション応答です。(a)図は0 cm、トゥイータが最適位置より3 cmにある状態です。実測ほどのピークは発生していませんが、あのピークはスピーカが勝手に発生したも

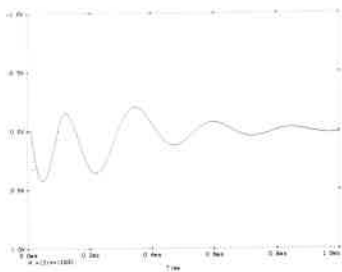
〈第5図〉シミュレーションに使用したネットワーク・モデル(f_c 1 kHz)。スピーカを8オームの純抵抗で計算していること、空間で合成される音波を単純足し算していることに問題があるが、スピーカのインピーダンスは波形にそれほど影響はないことがわかっている(第10図参照)。また、空間で合成されるより悪い応答になることもないはず。

- (a) ()内はカットオフ4 kHzの場合。
- (b) -3 dB点を f_c としているので、音圧合成としては+3 dBとなる状態。
- (c) -3 dB点を f_c 。

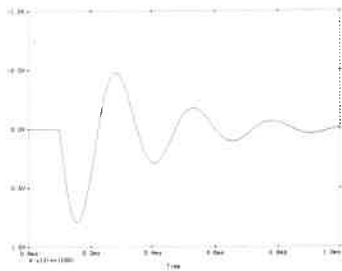
のですから、何とか近似と見せせそうです。(b)図では、2つのスピーカの干渉のため、先頭の半波以後の波形がほとんどフラットになっています。(c)図は1 cmほどトゥイータが前の状態ですが、合成出力(□)はそれほど悪くないようです。しかしウーファ出力(■)とトゥイータ出力(◇)はほとんど位相が反対ですから、実際の合成がこれほどうまく行くはずはありません。

(d)図が最適の場合で、最適になるように電氣的に計算していますから、入力波形とイコールになっています。(e)図はトゥイータが1 cm後退した状態ですが、実測と同じくa, b波のピークが高くなっています。しかしa波の立ち下がりには変曲点が現れ、(f)図ではよりはっきりと折れ曲がっています。これはトゥイータからの振動が先に現れ、その後にトゥイータの波形が合成されるため、a波の開始点からピークまでを直線で考えると(f図点線)、実測で立ち下がりが悪化した理由

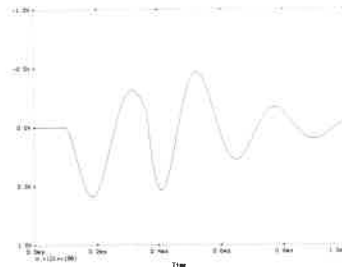




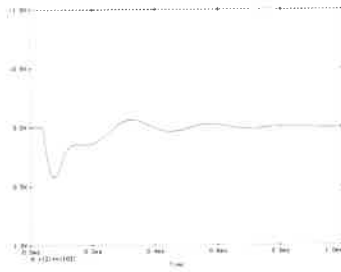
(a) 0 cm: 第2図に比べピークがなくなっているが、だいたい似たような傾向はある。



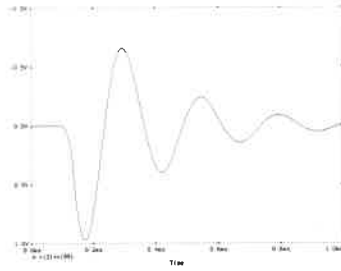
(d) 3 cm: 最高ポイント、2つの出力を足し算しただけなので入力とイコールになる。



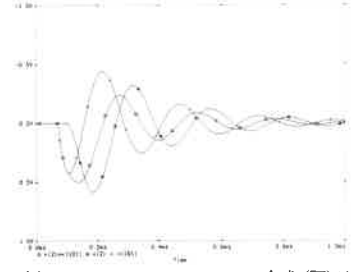
(g) 12 cm: 明らかに別々の波形に分離している



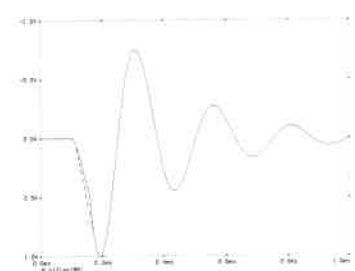
(b) 1 cm: 2つのスピーカの干渉によって、先頭以降の波が平坦になっている。



(e) 4 cm: 基本的には3 cmの場合と同じ。a波の立ち下がりに変曲点が生じている。シミュレーションからも、トゥイータ後ろに下がった場合の方が波形変化が小さいことがわかる。



(c) 2 cm: シミュレーション合成(□)は実測ほどには悪くない。しかしウーファ(■)とトゥイータ(◇)の位相はほぼ逆転。



(f) 5 cm: a波の立ち下がりの折れ曲がりの方がよりはっきりとしている。これはウーファの波に後から折り重なってトゥイータの波が到達するため、a波の開始点とピークを点線で結ぶと、第2図での立ち下がりの悪化の説明が見つかる

とおり、入力とは以てもいつかないような応答となっています。正相でも逆相でもです。

(a) 図 200 Hz の正相接続(□)は、先頭の立ち下がりにおかしな波形があり、逆相接続(■)では逆方向のプリエコーが見られます。(a2) 図に 200 Hz 時のウーファ(□)とトゥイータ(■)の出力を示しますが、残念ながらこの2つを加えようと引こうと、入力とイコールにはなりません。

200, 300 Hz ではそれほどでもありませんが、630, 800 Hz [第7図(e), (f)]ともなりますと、正相(□)では先頭の波形がつぶれ、振幅が少なくなり、F特上のディップを作ることがわかります。ですが、逆相(■)の場合は、入力には存在しない上方向のパルスが大きく表われています。

クロスオーバー[第7図(g), 1 kHz]では、正相(□)の先頭波形のつぶれも最悪となり、振幅も最小となります。しかし、逆相(■)ではプリエコーが大きくなったため、1 kHz から 2 kHz にかけて、出力が2波に増えているよ

〈第4図〉音源位置の変化のシミュレーション。6 dB/oct の場合

がわかります。そして(g) 図は完全に別々の波形になって出力されています。

第4図のシミュレーション結果は第2図の実測と比較し、よりましな波形となっていますので、このシミュレーション方法は他にも応用できそうです。**遮断特性の変化のシミュレーション**

次にネットワークの遮断特性について検討を加えます。

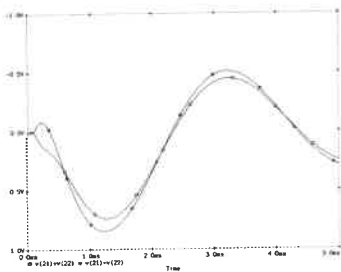
1. 6 dB/oct の場合

第6図に 1 kHz, 6 dB/oct のネットワークに 250 Hz~3 kHz の減衰サイン波を入力した応答を示します。□がウーファの出力、■がトゥイータ出力、そして◇が合成出力となっています。リニア・フェイズ状態でのシミュレーション

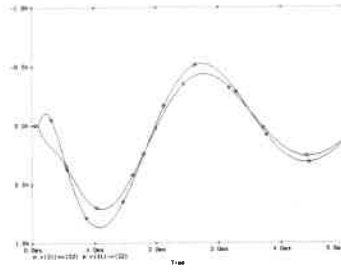
レーションとしていますので、合成(◇)は、常に入力と等しくなっています。周波数が高くなるにつれてウーファ出力の振幅(□)が小さくなり、トゥイータ出力(■)が大きくなっています。また、当然のごとく位相差は 90° となっています。念のため付け加えますが、位相差が 90° となるために、合成出力が入力とずれてしまうや錯覚されている方が多いようですが、単なる錯覚です。

2. 12 dB/oct の場合

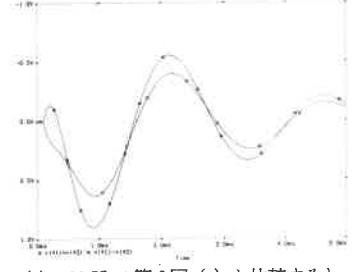
第7図は同等の条件で、ネットワークのモデルだけを 12 dB/oct に変更した応答です。ただし、こちらは□が正相接続、■が逆相接続の合成出力を表わしています。一見しておわりの



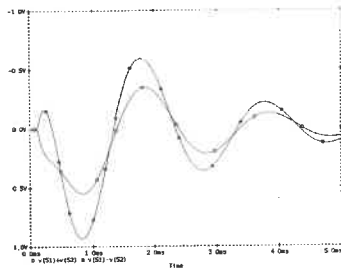
(a) 250 Hz: 正相では立ち下がり時にこぶ, 逆相では逆方向のパルスが生じている。



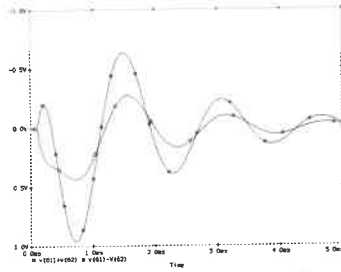
(b) 300 Hz



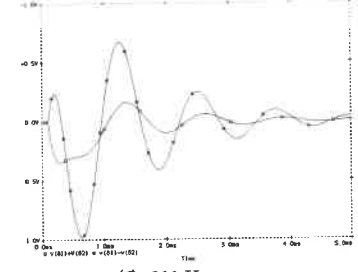
(c) 400 Hz: 第6図(c)と比較すると, 正相で振幅減少, 逆相で振幅増大している。



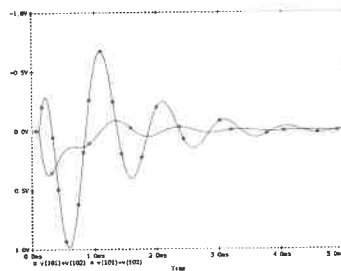
(d) 500 Hz



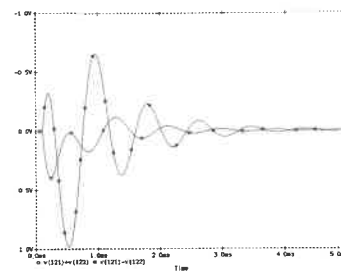
(e) 630 Hz: 逆相は, なんとなく先頭に1波増えているように見える。



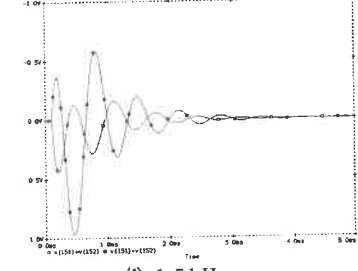
(f) 800 Hz



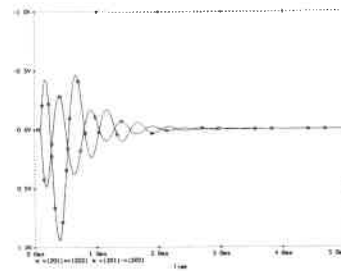
(g) 1 kHz: クロスオーバー点。正相は振幅が著しく減少, 逆相は明らかに”逆相”。これはネットワークが発生するはずみによる



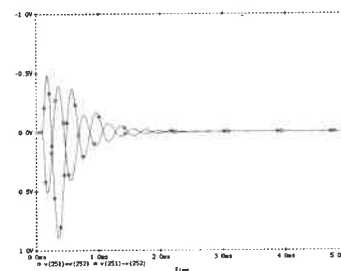
(h) 1.2 kHz



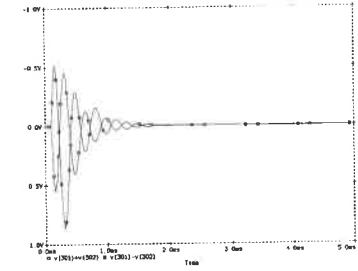
(i) 1.5 kHz .



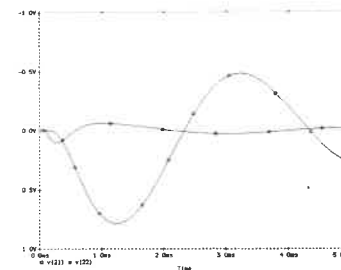
(j) 2 kHz: 正相は, それらしいが, 逆相での波形変化は著しい。一般的に逆相接続がよいとされているが



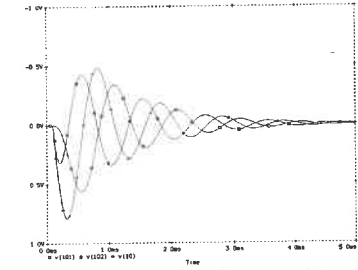
(k) 2.5 kHz



(l) 3 kHz



(a 2) 250 Hz: この2波を足そうと引こうと, 入力とは等しくならない。



(g 2) 1 kHz: 先頭の部分を除けば□と■は逆相だが, 連続波での議論を過渡的な応答にも適応したのが失敗(?)。

〈第7図〉シミュレーションによる合成波形の変化(12 dB/oct). □が正相接続, ■が逆相接続による合成出力。いずれも入力にない過度はずみを生じる。

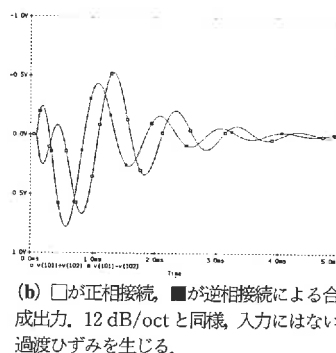
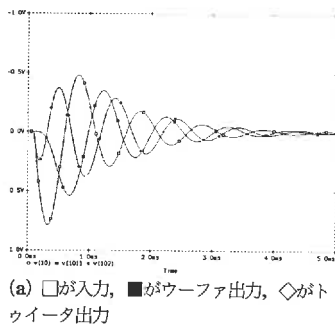
次に、18 dB/oct のネットワークについて調べます。第8図 (a) の□は1 kHz の入力、■はウーファ出力、◇はトゥイータ出力、第8図 (b) の□が正相接続による合成の場合、■が逆相接続した場合は、18 dB/oct の場合も12 dB/oct と同様、出力はひずんでしまうことがわかります。

最後に山中式ネットワークです。山中式は、低音側にローパス・フィルタを用い、高音側は入力から低音側を引算し、伝達関数1とする方法です。伝達関数、というと難しそうにも感じられますが、入力と出力が等しくなると考えればOKです。したがって、山中式であれば12 dB/oct のネットワークでも、過度ひずみを発生しないはずです。

第9図、□は1 kHz の入力、■はウーファ出力、◇はトゥイータ出力です。計算上はもちろん■+◇=□になります。しかし、■と◇の位相関係をよく見てください。位相がほぼ180°回転しています。これでは空間でまともに合成することは不可能でしょう。たとえば、2つのフルレンジ・スピーカを並べて逆相動作させたところ考えてみましょう。何も聴こえないなんてことがあるのでしょうか。もし完全に合成されるならば、何も聴こえないはずですが。

さらに、このシミュレーションは音源位置を合わせた状態での結果です。山中氏は、音源距離について何も指摘されてはいなかったようですから、残念ながら片手落ちであったと思います。最後に、ボイス・コイルのインダクタンスの影響について確かめます。

これまでのシミュレーションでは、純抵抗を用いてスピーカをシミュレー



〈第8図〉シミュレーションによる合成波形の変化、18 dB/oct のとき

ションしていました。けれども実際のスピーカのインピーダンスは、もちろん純抵抗ではなく、複雑なカーブを描きます。したがって、ネットワークを含めた応答も異なった結果になるはずですが、つまり、これまでのシミュレーション結果はマルチアンプの場合と考えれば間違いありません。

それではボイス・コイルのインダクタンスを考慮した場合です。第10図に高域でのインピーダンス上昇を加えたモデルでのシミュレーションを示します。単純なRL直列で、 f_0 はクロスオーバーと遠く離れているので無視した単純なモデルです。□が入力、■が出力ですが、それほど波形は変化しないようです。よって、第3図から第9図までのシミュレーションは、ネットワークによる分割にも適応できると考えます。

あなたは ひずみが聴こえるか

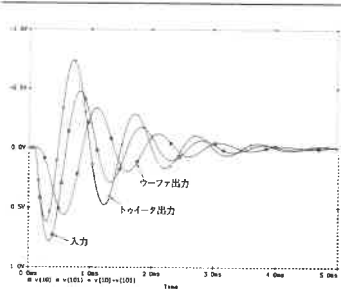
今回の実測およびシミュレーションからも、リニア・フェイズ SP システムは波形再現能力において優れていることがわかります。また、リニア・フェイズ化には、ネットワークを6 dB/oct とするだけでも、ユニットの位置

を合わせるだけでも不十分であり、同時に2つの実施しなければならないことがわかります。過去に「一時期、”リニア・フェイズ” スピーカが流行したことがありますが、リニア・フェイズと称しても12 dB/oct 以上のネットワークを使用したシステムもあつたようです。あるいは、山中式のように伝達関数1を掲げたネットワークもありましたが、音源からリスナーまでの距離が等しくなければ、ほんとうの1にはなり得ないことがわかります。

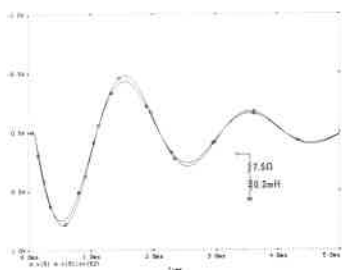
不要帯域はできるだけ急峻にカットしたいとの常識(?) 的な思考の下に作られた、従来のスピーカ・ネットワークやチャンネル・デバイダは、時間領域から検討を加えると、とても HiFi と呼べるような応答を示さないことが明らかになりました。

それでは、なぜこのような低忠実度(?) システムが世の中の主流となったのでしょうか。

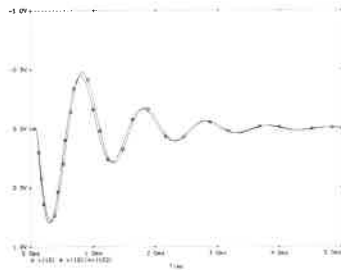
おそらくは、この種のひずみの存在が指摘されていなかったことが、最大の原因と考えます¹⁾。そんな馬鹿なと思われるかも知れません。しかし、人の判断は思い込みによって左右されています。効くと信じた薬は砂糖でも効きます。何か実験する際に、たとえば「ケーブルを OFC に交換したらよくなるだろう」と考えてから試聴するのですが(考えなければ、あるいは考えられなければ交換試聴などするものですか、面倒な)、しかし、よくなるだろうと考えた時点で80%以上結果は決まっているといても過言ではありません。××すればよいはずだと考え、そ



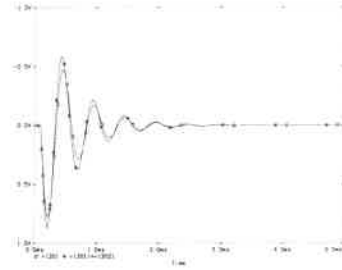
〈第9図〉シミュレーションによる合成波形の変化、12 dB/oct、山中式の場合、12 dB/oct 以上の遮断特性で伝達関数1を実現しようとするものだが、□と■は180°近く位相がずれているため、これを空気中で完全に合成することは不可能であったと思われる。また、このシミュレーションは音源位置を合わせた状態だが、これについては山中氏自身にも述べられていないようだ。もちろん、音源がずれていれば伝達関数は1にならない。



(a) 500 Hz



(b) 1 kHz



(c) 2 kHz

〈第10図〉インダクタンスを含む負荷の場合も純抵抗の場合とそれほどには変わらない。空間での合成が理想的に行かない影響の方が大きいであろう。

のとおりアンプを組み立て、本人は自分の考えたおりのよい音がしたと満足するのですが、残念ながら悪く感じるはずはないのです。

この場合も同じと考えます。「ネットワークで帯域分割をしても何も問題はなさだ」と考えていることが、問題に気がつかない最大の原因でしょう。まさか再生波形がメチャメチャだなどと、夢にも思わないはず（私も思いませんでした）。そして、たとえ、おかしい音が聴こえたとしても「マルチウェイは調整が難しいものだから」と理性が感性を納得させ、「周波数特性はフラットだ」とスイープ特性を信じ込み、そうこうしているうちに過渡的なひずみに慣れてしまったのではないのでしょうか。

そして一度慣れてしまうと、ほんとうにわからなくなります。たとえ生を聴きに行ったとしても、生で聴こえる波形と、自分の装置で聴こえる波

形と、どちらも“同じ”と大脳皮質が認識するようになってきているのですから。

確かに従来より、一部のマニアからマルチウェイ、とくにホーン・システムの不自然さ、定位や奥行き感の悪さが指摘されていました。そしてその指摘は、ホーンのユーザーにも届いていたに違いありません。しかし、指摘はあくまでも“聴感”に頼ったもので、理論的裏付けがあったわけではありません。それどころか、“科学的”証拠である特性には問題はないのですから、まちがいはあるはずなどありません。どこにも欠陥があると記されていない以上、「あいつの耳がおかしいのだ」と論理的に考え、無視していたのではないのでしょうか。

20年前、ケーブルを交換すると音が変わると誰が考えたでしょうか（未だに変わらないと信じている人がいるのです！）。しかし音の変化を感じたマニアが、その理由はわからないながらも、

変わる現実を認識したことが（商魂と結びつき）、今日何十種類のケーブルが巷にあふれている状況をつくり出したのではないのでしょうか。

しかし、どんな“ひずみ”でもそうですが、認知できないものであれば対処する必要などありません。人間には知ることができないのですから、無視してかまわないのです。-60 dBの高調波ひずみが聴こえないのであれば（聴こえると主張する人もいます）、アンプのひずみを0.0001%以下に下げても無意味なのです。どのようなデータレナ波形がスピーカから放射されようとも、正確な空気振動との識別が不可能であれば、それは“無ひずみ”に違いないのです。

ところが残念なことに、ノン・リニア・フェイズのひずみに悩まされているのは私だけではありません。そして、どんな“ひずみ”でもそうですが、1度耳につき出すと、いつでも音楽鑑賞の邪魔をするものです。加えて、いま貴方はマルチウェイ・スピーカが発生する“ひずみ”を見てしまいました。

そうです。今晚あなたは、ひずみが聴こえてしまうのです。

（注）独断です。高橋和正氏はこの仮説を支持しているわけではありません。

■訂正と追加：11、12月号の私の記事中GWのメーカーは日コンではなく日ケミでした。また、12月号岡俊彦氏の記事で「パワー・TRのエミッタ抵抗を0にすると、バラにできない」との指摘がありました。普通のTRはそのとおりですが、A 1006/C 2336はEBTなので、バラ接続にしても問題ありません。



●物差しを当てて慎重にツイータを動かしながら測定する。