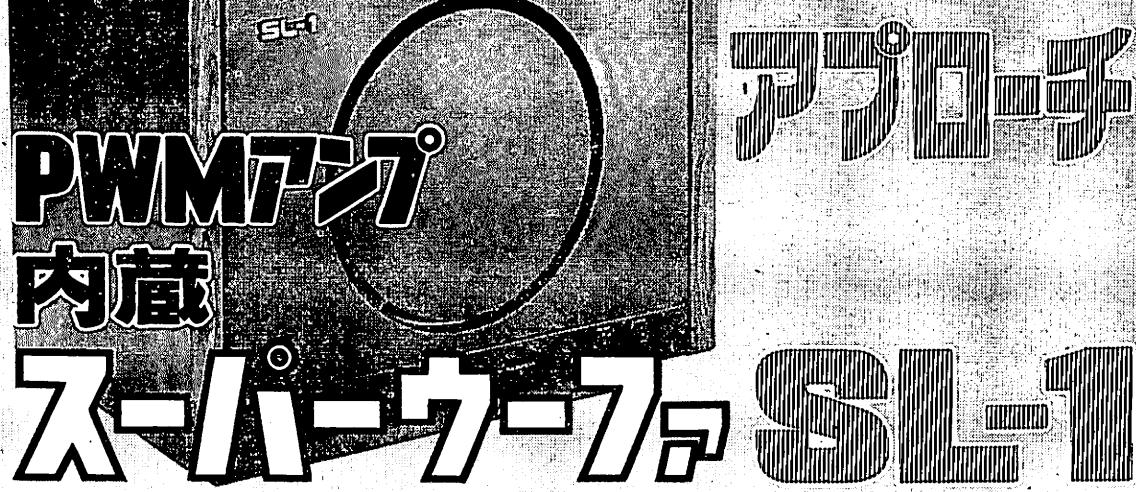


超低音域への積極的アプローチ



由井 啓之

SL-1 の開発意図

①従来のスピーカシステムで再生できなかった超低音域を可聴周波数下限まで再生する。

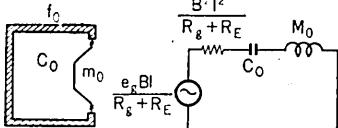
②超低音域で良い室内音響特性を得るために、理想的な駆動点に設置できるよう小形にする。一般家庭に持ち込むためにも小形にしなければならない。

③ベテランからビギナーまで誰にも簡単に使えること。性能上の妥協はせず高性能であること。

④音楽を普通の部屋で素晴らしく聴くためのものであること。

超低音再生システムの大きさ

小さな容積で低い周波数まで再生したいということを目的に、昔から数多くのスピーカエンクロージャ方式が開発され発表されてきましたが、今回は



[第1図] 密閉箱システムの原理図

可聴音域下限まで、しかもどんな部屋にも持ち込める大きさということですので、従来の方式ではとても無理なようです。この辺の原理を少し考えてみます。

第1図は密閉箱システムの原理図です。簡単にため少し省略してあります。スピーカ振動板から見たこの箱のコンプライアンス（振動板の動き易さ）は

$$C_0 = \frac{V}{\rho_0 C^2 \pi^2 a^4} \text{ (m/N)} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $C = 344.8 \text{ m/sec}$, $\rho_0 = 1.18 \text{ kg/m}^3$, V は箱の容積 (m^3) で a は振動板の半径です。このコンプライアンス C_0 は最低共振周波数 f_0 で振動板の重さ M_0 (kg) と共振します。

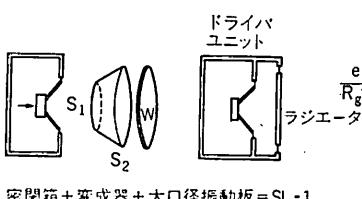
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_0 C_0}} \text{ (Hz)} \quad \dots \dots \dots (2)$$

f_0 から下の周波数では音圧が急激に低くなりますが、 f_0 の少し下が再生限界です。 f_0 を低くするには M_0 か C_0 を

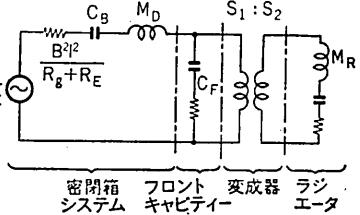
大きくしなければなりません。 C_0 を大きくするには箱の容積を大きくしなければなりませんが、これでは目的と反対になってしまいます。振動板半径を小さくすると、その4乗に比例して C_0 が大きくなり、低音が出やすくなります。これは意多に思われる方もあると思いますが、他の条件が同じなら、口径が小さいほど、周波数特性は低い方へ延びるのです。特にこれは4乗で大きくなりますので、設計者の誘惑にかられやすいところですが、小口径の振動板やポートでは質の良い低音は出ませんし、十分な音圧はとれませんので、大口径はゆずれない条件です。小容積、大口径で低い周波数までとなると、後は振動板 M_0 を大きくするしかありません。(1), (2)式より

$$M_0 = \frac{\rho_0 C^2 a^4}{4 f_0^2 V} \text{ (kg)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

M_0 を試算してみると大変大きな値になります。この式では無視しています



密閉箱 + 変成器 + 大口径振動板 = SL-1



[第2図] SL 方式の原理図

が、重い振動板を支えるために、支持系を工夫すると、系のコンプライアンスが小さくなり、 f_0 が高くなる、それでまた振動板を重くするといった悪循環もあります。

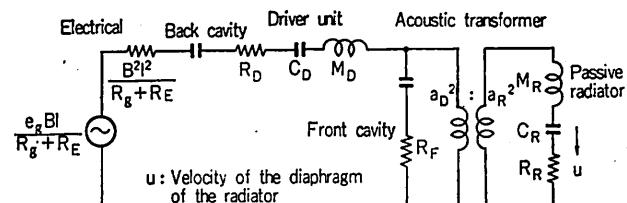
このような重い振動板をボイスコイルギャップに接触しないよう動かすのも困難ですし、通常の磁気回路では駆動も制動もできません。

SL 方式の原理

小形ボックスに大口径振動板をつけた超低域まで再生するという難題を解いたのが SL 方式です。第 2 図がそれです。

これで難問が解けるばかりか、スーパーウーファとしては一石数鳥の利点が生じます。駆動系と放射系を分離しましたから、ボイスコイルのない大口径振動板は重くても容易に支持できますし、ギャップあたりの心配もなく、十分のストロークが確保できます。また、この振動板は音響変換器を介して駆動されますので、楽々と駆動または制動され、入力信号に忠実に動きます。変換器のインピーダンス変成比は口径比の 4 乗になります。

ラジエータの全面にはパスカルの原理で均一に駆動力が加わりますので、振動板としては理想的な平板形を採用することができますし、帯域内は完全にピストン運動が使用できます。振動



〔第 3 図〕 SL 方式の等価回路（シミュレーション用）

〔第 4 図〕 試作各要素の値

* Constants of the System
Input voltage (volt)

e_B	2.8
Volume of the back cavity (1)	V_B 40
Radius of the driver (cm)	a_D 8
Volume of the front cavity (1)	V_F 32
Resistance of the front cavity (me. ohm)	R_F .2
Radius of the radiator (cm)	a_R 16
Mass of the driver (g)	M_D 30
Compliance of the driver (mm/N)	C_D 1.2
Resistance of the driver (me. ohm)	R_D 1.7
Mass of the radiator (g)	M_R 400
Compliance of the radiator (mm/N)	C_R .7
Resistance of the radiator (me. ohm)	R_R 4
BI (W/m)	B_I 7.6
Resistance of the voice coil (ohm)	R_E 7.45

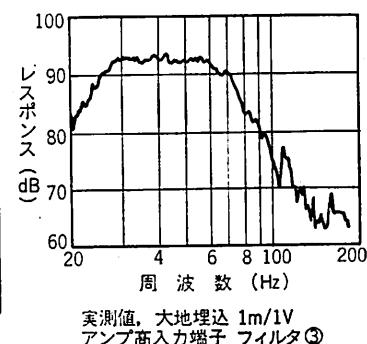
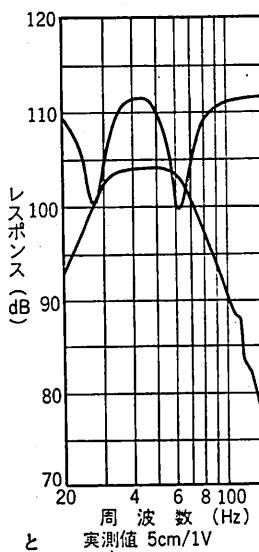
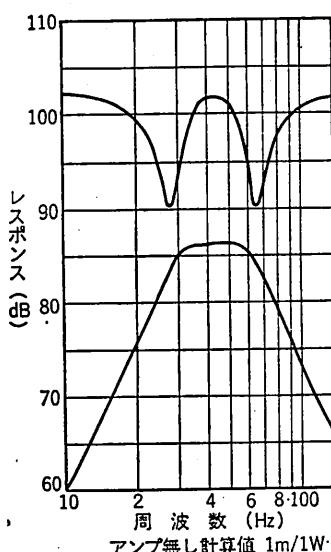
板はドライバより放射されるスーパーウーファとしては有害な高域成分を完全に遮断するため、ジュラルミンとネオプレン系ゴムよりなる複合構造を探用しました。また帯域の中央では、ラジエータとフロントキャビティによって十分の負荷がドライバにかかりますから、振幅は制限され、ひずみは小さくなり、最大出力が大きくとれます。ドライバユニットは口径は小さくてよいので、大きな負荷がかかってもたわぬよう、振動板を設計することは容

易です。またフロントキャビティのコンプライアンス C_F (第 2 図) はスーパーウーファとして不要、有害な超低音域以上の信号をカットしてくれます。

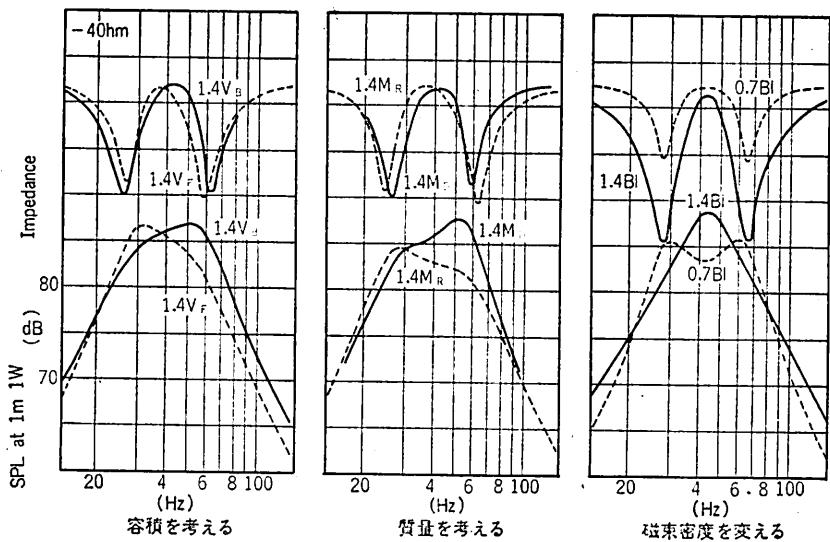
これらの結果、ひずみ率も 40, 50Hz で 0.1% 以下というこの帯域では驚異的な値を得られました。

第 2 図の等価回路の各要素の値を適当に設置すると、スーパーウーファとしてそのまま使える周波数特性を得ることができます。第 3 図の等価回路に

〔第 5 図〕 SL-1 の周波数特性



実測値、大地埋込 1m/1V
アンプ高入力端子 フィルタ③



(第6図) コンピュータシミュレーション

について第4図の値を用いて計算したのが第5図です。同じ値で作った実物の実測値と良く合致します。このようにコンピュータシミュレーションで設計していますので、残念ながらアマチュアの方が設計自作されるのは一寸難しいと思われます。第6図に主要な素子を変化させたときの特性の変化を計算しておきましたので、やる気のある

方はチャレンジして下さい。

後廻しになってしましましたが、SL方式で f_0 が低くできるメカニズムを説明しておきます。第3図の等価回路は f_0 附近では第7図(a)となり、ラジエータの質量を音響変成器の1次側に変換すると同図(b)となります。これは第1図の密閉箱システムと同じになりますので、これと比較して考えてみま

しょう。

まず箱のコンプライアンスが大きくなります。(1)式より口径比の4乗に逆比例しますので、SL-1の20cmでは38cmのラスの16倍となり(2)式より f_0 は $\frac{1}{4}$ になることが分ります。次にSL-1のドライバユニットの等価質量は30gですが、これにラジエータユニットの等価質量が加わります。音響変成器のインピーダンス変成比は口径比の4乗ですから、SL-1の場合は16倍になります。したがってラジエータユニットの質量400gは400/16=25gとしてドライバユニットの等価質量に加わります。400gの振動板を25gとして扱えるのは、変成器を使ったSL方式のみです。計55gの質量は20cmクラスウーファの2~4倍ですから(2)式より f_0 が1/1.4~1/2に低下することがわかります。この等価質量55gは1クラス上のウーファ程度で特に大きな値ではありませんし、箱のコンプライアンスが大幅に大きくなり、共振時のインピーダンスが低くなっていることから、普通の磁気回路で十分駆動制動できます。SL-1のバックキャビティは40ℓ開口半径は8cmですから(1)式より

$$C_0 = \frac{0.04}{1.18 \times 344.8^2 \times \pi^2 \times 0.08^4} = 0.7 \times 10^{-3} \text{ (m/N)}$$

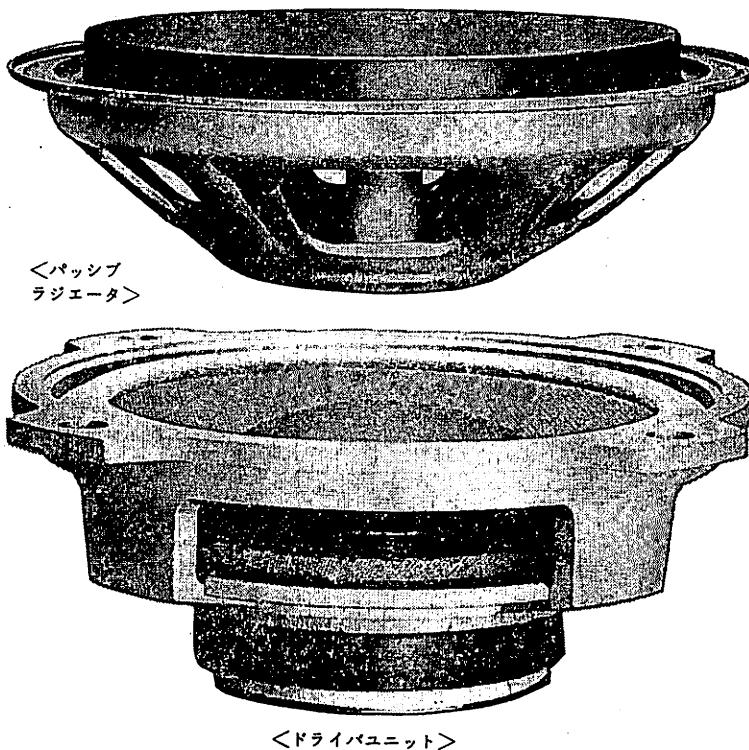
等価質量は55gですから(2)式より

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{0.055 \times 0.7 \times 10^{-3}}} = 25.6 \text{ (Hz)}$$

となり実際値とほぼ合います。

内蔵アンプと3D再生

SL-1は第8図に示すよう最大出力120WのPWM方式の出力アンプと、3D使用のためのプリアンプやフィルタなどの付属回路を内蔵していますので、現用システムに超低音だけを簡単に付加することができます。PWM方式アンプは別名Dクラスアンプとも呼ばれ、ブロックダイヤグラムの下段がこれです。

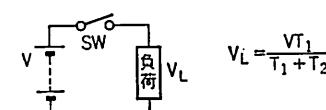


第9図のごとく、オーディオシグナルで、 T_1, T_2 の比を変化させ、パルスの幅がオーディオ信号の振幅に比例するようにします。このパルス列を出力フィルタ回路で積分しますと、変調信号が電力増幅された形で負荷に取り出することができます。PWMアンプでは出力トランジスタはスイッチング素子として使用しますので、最も効率の高い使用法となります。一般に使用されるBクラスアンプとの比較を第10図に示します。

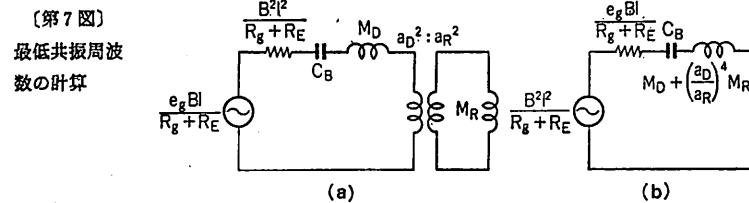
全域形汎用アンプとしてのPWM方式はスイッチング周波数を十分高くとれないこと、スイッチング成分を完全に除去できないことから来る妨害スピアスの問題、出力フィルタによる高域の音の変化、出力インピーダンスが高くなることになるダンピングの悪化などと解決すべき問題はまだ多くあります。超低音域専用の内蔵アンプとしては理想的です。

スイッチング周波数は16kHzと低いので、スイッチング損失も少く、スピアスの心配もなくなります。出力インピーダンスは専用アンプですから、音響回路側に入れて(第2図のRg)設計できますし、出力フィルタに、スーパーウーファとしては有害な200Hz以上の音声も除去しますので、一石二鳥です。

PWMアンプの前にあるフィルタはSL-1を付加するスピーカシステムの低域となめらかに連がるよう、SL-1の再生帯域を切替えるもので、3段に切替えることができ、大形フロア



[第9図] PWMアンプの原理図。



から小形ブックシェルフまでを対象に考慮してあります。

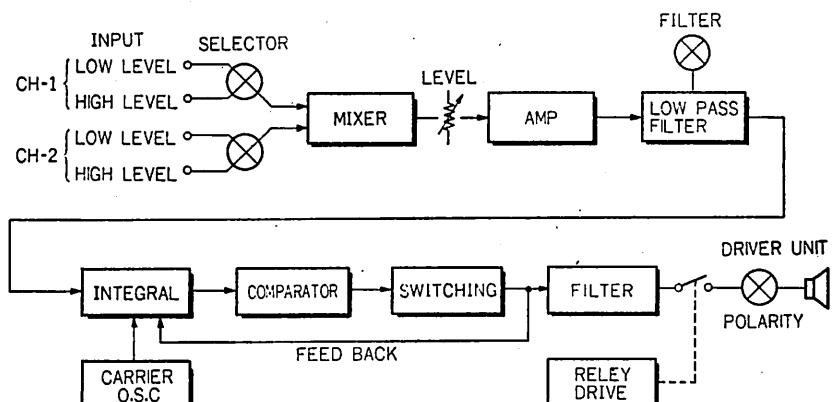
その前のミキシングアンプは3D用に右左の信号を合成するためのものです。2系統それぞれがアンプを持ち、高入力または低入力に切替えることができます。高入力はパワーアンプの出力端子から、低入力はプリアンプやディバイディングアンプから信号を取り出します。

具体的には高入力端子をメインスピーカ端子に並列に接続するのが最も良いと思います(第11図)。

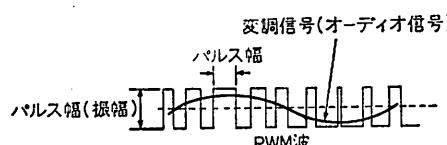
超低音再生は、3Dの方が望ましいのか、ステレオで再生した方が良いのかは、まだ結論の出ない段階ですから、

SL-1はどちらにも使用できるよう設計してありますが、3D使用のメリットを生かして使用されるのが良いのではないかと思います。3D接続にしますと、カートリッジの針先が垂直方向に動いて出力される信号はキャンセルされて、SL-1には出て来なくなります。

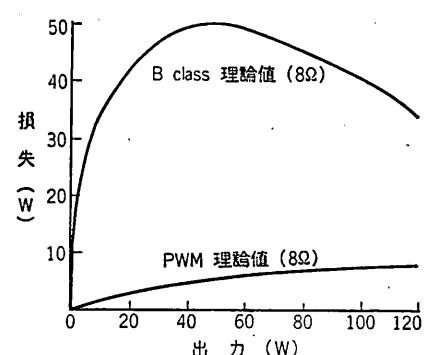
また超低音域では全く方向性がありませんので、3D方式といってもメインのスピーカの中央に置く必要は全くなく、リスナーの横に置いても置いても良いのです。むしろこのことを活用して、室内音響伝達特性が最も良くなる位置に設置して、実際の室内で質の良い超低音を得ようというの



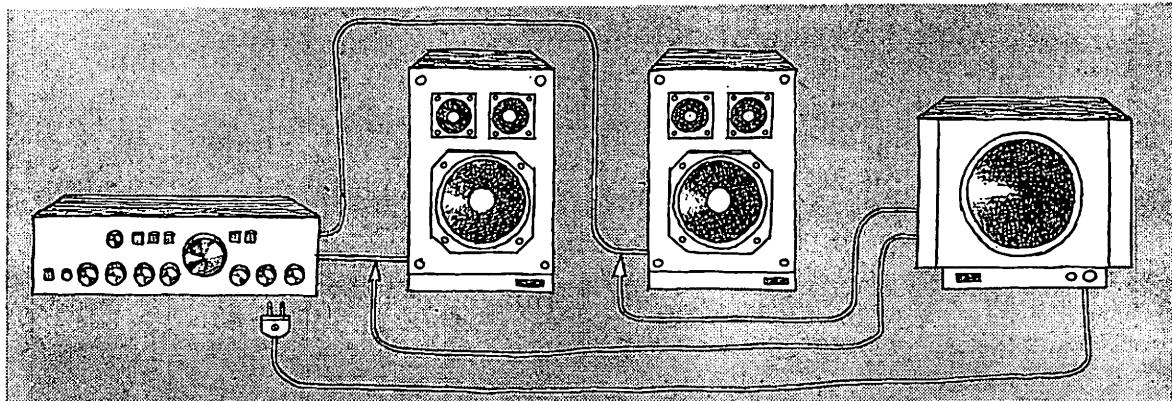
[第8図] 内蔵アンプのブロックダイヤグラム



T_1 : SWの閉じている時間
 T_2 : SWの開いている時間



[第10図] BクラスアンプとPWMアンプの熱損失の比較。最大出力 120W



[第11図] SL-1 を現用システムスピーカ端子に接続する 3D 使用

SL-1 の大きな開発目標の一つなのです。

SL-1 の設置場所

大ホールは別として、一般の部屋では 100Hz 以下、特に超低音域では室内に必ず定在波が生じ、これが伝達特性と音の品質を決めてしまします。定在波については、くわしくは参考書を見ていただくとして、第12図に六角の室について計算した例を示しました。

点線が定在波の節で、太線の部分が腹です。定在波の生じている周波数付近では、節となる場所で弱く、腹の位置で強く聞こえます。超低音域では第13図のフレッチャーマンソン等感曲線で分るよう、音圧の強弱以上に聴感上の強弱が現われますので、節の位置では全く聞こえなくなります。部屋の形を変える以外に、定在波の周波数や

そのパターンを変えることはできませんので、節や腹の位置をさけた場所で聞くことになるわけです。

方形の室の中心線上には節と腹が集中しますので、この位置はさけた方が良さそうです。特に 2 本の中心線が交わる室の中央は良くありません。

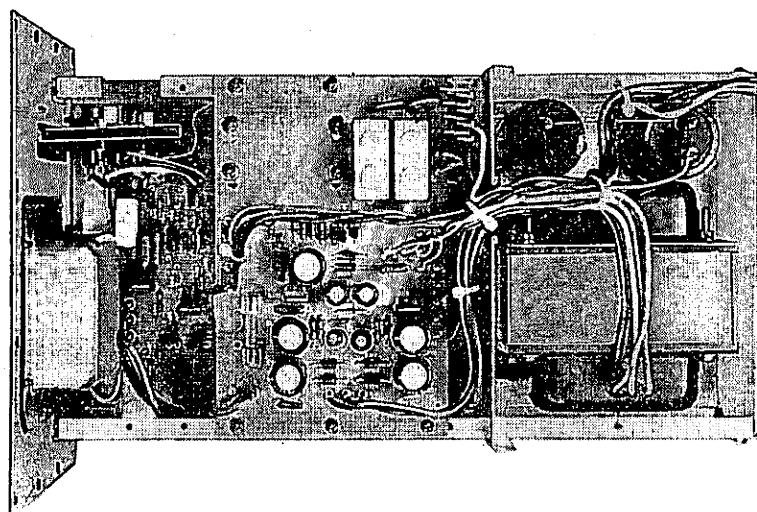
一般に室に限らず、定在波の生じるものは、その節の位置を駆動してやればその定在波は弱く、腹の位置を駆動してやれば、その定在波は強くなることが知られています。方形の室の中心線上は一つの定波数の節がその 2 倍の周波数の谷になっていますので、ここにスーパーウーファを置くと、定在波による周波数特性の凹凸を大きくしてしまうことになります。『駆動点、試聴点共、室の中心線上をさける』これだけの注意で、十分良い特性を得ることができます。

第14図は定在波の強く出る団地の六角での実測です。(a)は SL-1 が中心線で試聴位置が室の中央という最悪の組合せです。40~50Hz の超低音域は 80~100Hz の 20dB 程度ですから、これでは全く聞こえません。(b)のように SL-1、試聴位置共中心線上をさけると、このような素晴らしい特性になります。

超低音再生の必要性

昔から人間の耳の可聴限界は 20~20,000Hz とされていますが、現在のスピーカーシステムは、高域はともかく、低域は十分再生されているとはいえない。低域再生の相場はブックシェルフ形で 60~70Hz、大形フロア形でも 50~60Hz です(第15図)。それ以下では急激に音圧が低下して聞こえなくなります。もう少し下まで聞こえそうですが、そうではありません。第13図の等感曲線を見て下さい。スピーカーシステムの低域再生限界の周波数では曲線がつまっています。中域では音圧を 6 dB 下げても聴感は 6 dB しか下がらないのに、この帯域では 20dB も下がってしまい、ほとんど聞こえなくなるのです。このように聴感特性と合わせてスピーカーシステムの特性を見ると、本当の再生帯域が分ります。

何 Hz の音といっても分らないと思いますので、説明しておきます。第16図が音域図です。一般に低音といっているのは、100~200Hz の音で腹にひびくドラムやベースのいわゆる低音です。案外高い周波数なので、意外に思



<内蔵アンプのシャシ上面>

われる方も多いと思います。80Hz ぐらいになると唸る感じの低音になります。この辺をブーストすると、いかにも重低音という感じがしますので、スーパーウーファといわれているものの中には、このあたりを対象にしたものもあります。50~60Hz は大形フロア一形でないと再生できません。ブックシェルフ形との音の差を考えると判りますが、"ウンウン" という感じの音で、この辺りを超低音という人は多いようです。

50Hz 以下は SL-1 が対象とする音域で、今まで再生の対象とされていませんでした。再生してみると『どうして、こんな大切なものが……』と誰もが驚くほどですが、今までの装置では望んでも得られなかった音です。

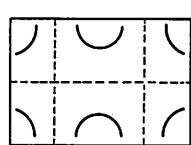
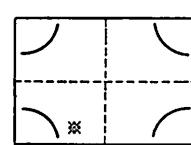
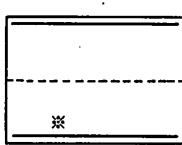
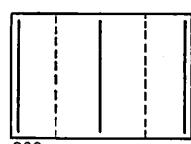
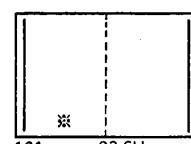
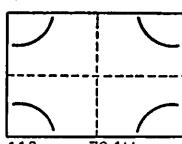
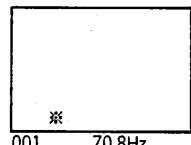
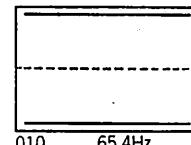
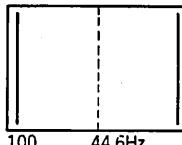
50Hz 以下の音域をここでは超低音域と呼ぶとして、超低音再生の主な効果を簡単に説明します。

①聞こえなかった音が聞こえます。

第17図は超低音の話にしばしば引用される表です。表の元祖はスノー氏で 1931年 Jour. Acous. Soc. Amer. に発表したものです。これを見ますと、50Hz 以下の再生効用は大してなさそうですが、そうではありません。47年前のデータを今だに引用するのがおかしいので、スノー氏に罪はないのですが、今調べ直してみると、50Hz 以下の音はもっと多くあります。例えば、スノー氏が 50Hz までとしているバスドラム、この基音は 50Hz 以下にも多くあります。

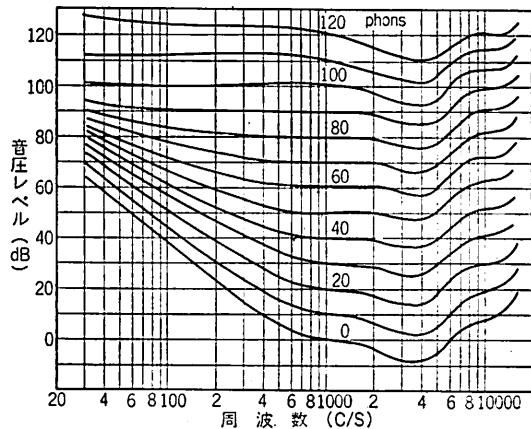
第18図はベートーベンの第9「合唱」

※は天井と床面が腹でその中間が節



↑ [第12図]
定在波パターンの計算例(六図)

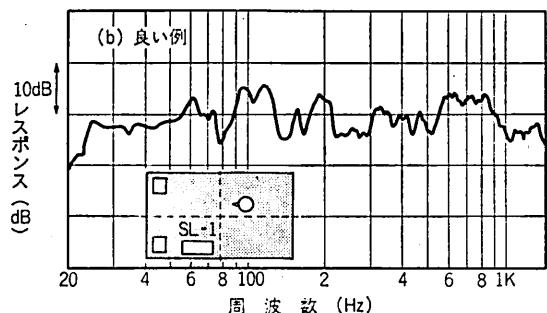
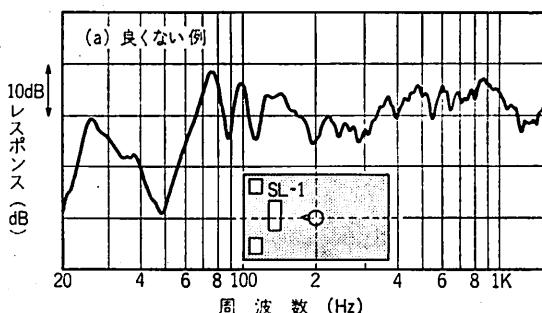
[第13図]
フレッチャーマンソン等感曲線
(1933年)



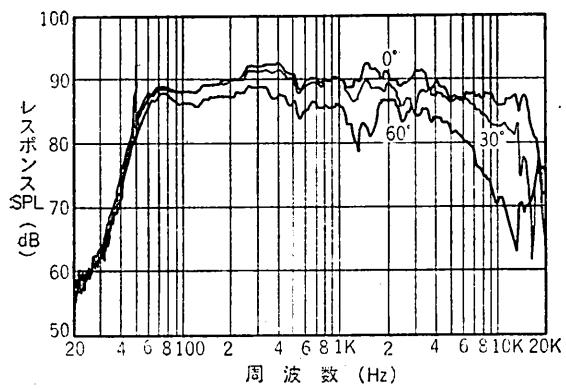
ショルティ、シカゴ(ロンドン SOL 1001~2) 第4楽章のバスドラムで 37.5Hz です。スノー氏は同レポートで フィルタで切ったとき、変化が初めてわかる点を、バスドラムの場合 80Hz と していますが、これでは変化どころか 聞こえなくなってしまいます。打ち方

で倍音成分の多い場合は聞こえるでしょうが、この演奏はほとんど基音なので、大形フロア一形でも聞こえません。

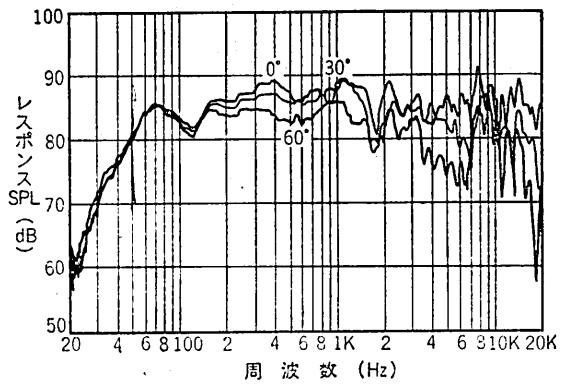
②超低音楽器がはっきり聞こえ音色 や音階が識別できるようになります。
基音が再生できなくても、倍音がか



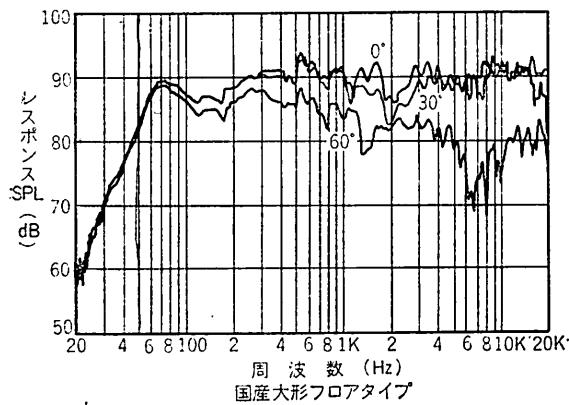
[第14図] 超低音域室内伝達特性の実測例



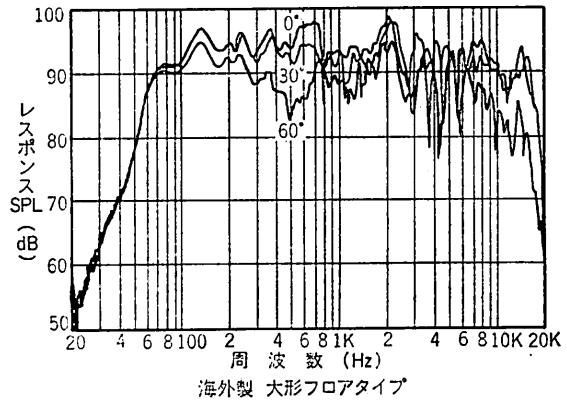
国産大形モニタースピーカ



海外製 大形モニタースピーカ

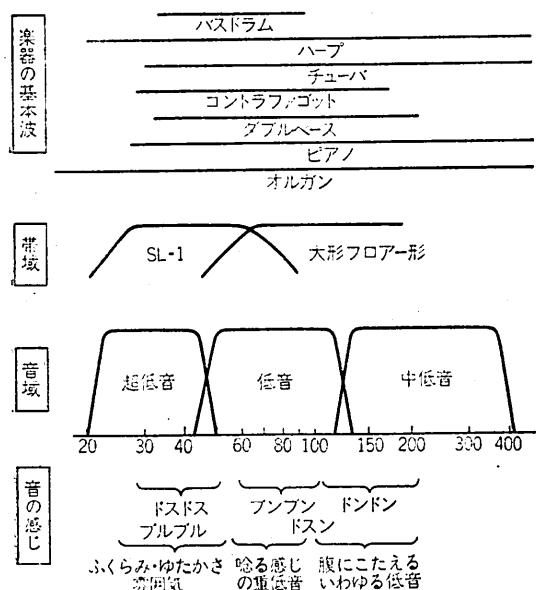


国産大形フロアタイプ

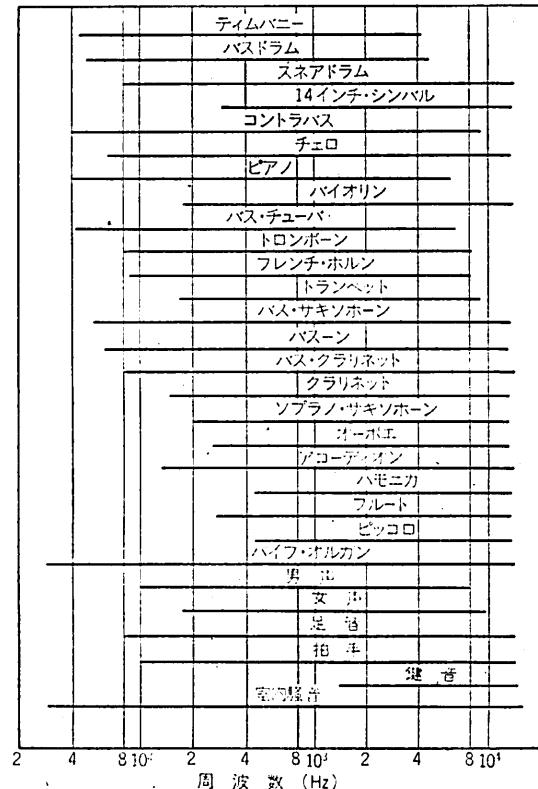


[第15図] 大形スピーカシステムの周波数特性

すかにでも再生できれば音は聞こえますが、音楽の礎台を構成する部分がこれではいけません。重箱隅的にまでシビヤに吟味される中高音に対比して



[第16図] 低音域解説図



[第17図] スノー氏による各種の音の周波数範囲

不思議なことです。

第19図はマーチ・サウンド・スペクタキュラー(28AG403)『星条旗よ永遠なれ』のバスドラムで基音40Hzです。スナー氏データ以下ですが、倍音は割合ありますので、聞こえないことはありませんが、音は全く違います。このレコードは他に低音楽器が多くあります。SL-1を付加すると鳴っているのが分るのはもちろん、何と何がなっているかの区別、音階もはっきりわかり、本当の音楽になります。

このように従来のシステムでは常に基音が聴こえなかったり、音階が低くなったりとき聴こえなくなる楽器はたくさんあります。

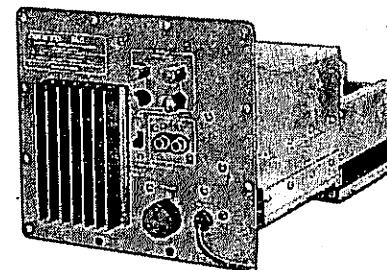
③中音域、高音域が艶やかに、まるやかな感じに変化します。

超低音域を再生することによって、

全く関係のなさそうな高音域の音がこのように変化することは不思議です。諸説があってまだ理論的には証明されていませんが、マニアが求めて得られなかった中高音域の要求への解答が、思いもかけなかったところにあったのではないかと思えます。私自身はトゥイーターとスコーカーに対して持っていた不満がこれではぼ解消しました。

④雰囲気、臨場感が加わり奥行きと厚さを感じます。

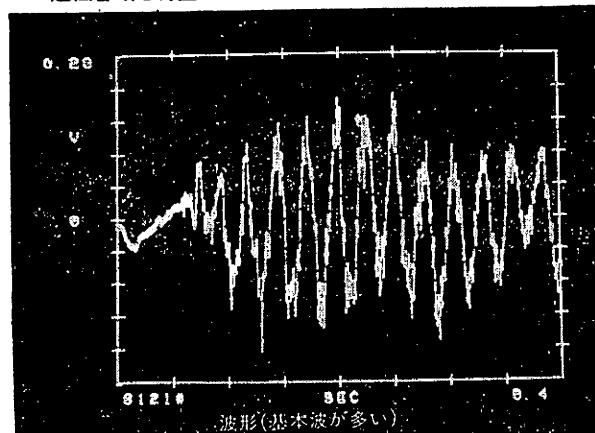
SL-1をOFFすると超低音楽器がない場合でも、何かがフッと消えてしまい、音が薄っぺらくなってしまいます。スペクトルアナライザで調べてみると、演奏会場や、日常生活の場には必ずある超低音が、従来の再生音場にだけなかったのが分ります。いくら



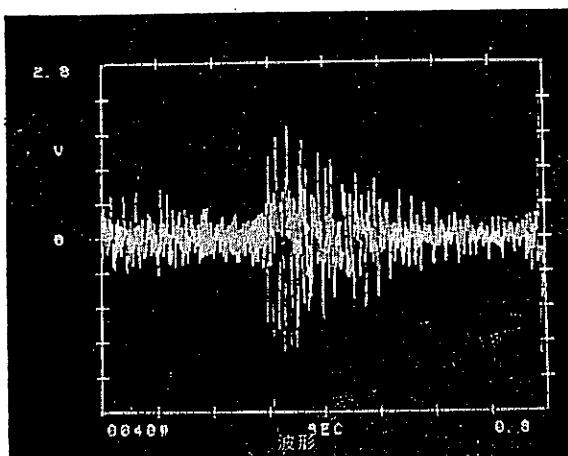
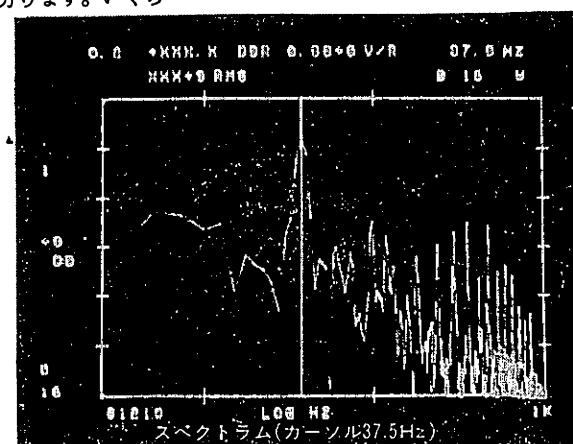
<内蔵アンプの外観>

もっともらしい音を出しても超低音域がないと、現実の音ではないと判断されてしまうのではないかと思う。現実の場にある雰囲気とか、気配の再生には超低音域が必要だと思われます。

(オニキヨー KK
音響技術研究所)



[第18図] 第9合唱のバスドラム



[第19図] スーザ・マーチのバスドラム

