

TSP 信号を用いた音響系評価の研究

98kc068 菖蒲 真利子

目次

1. まえがき	．．． 4
2. TSP	．．． 5
2.1 はじめに	．．． 5
2.2 TSP の設計法	．．． 6
2.2.1 ATSP	．．． 6
2.2.2 OATSP	．．． 7
2.3 N より長いインパルス応答の測定	．．． 8
2.3.1 インパルス応答が N より長い場合の通常の手続き	．．． 8
2.3.2 TSP とその逆フィルタの直線状畳み込み	．．． 9
2.3.3 最適な円状シフト量	．．． 15
2.3.4 m と誤差の関係	．．． 18
3. スピーカ	．．． 20
3.1 分類と特性	．．． 20
3.1.1 分類	．．． 20
3.1.2 特性	．．． 21
3.2 平面振動板からの音の放射	．．． 22
3.3 直接放射スピーカ	．．． 24
3.3.1 放射インピーダンスと音響出力	．．． 24
3.3.2 動電直接放射スピーカ	．．． 27
3.4 エンクロージャ	．．． 29
3.4.1 密閉型	．．． 29
3.4.2 バスレフ型	．．． 30
4. 測定 1 無響室の特性の測定	．．． 31
4.1 測定に際して	．．． 31
4.2 無響室の特性の測定	．．． 36
4.2.1 無響室とは	．．． 36
4.2.2 測定目的	．．． 37
4.2.3 測定	．．． 38
4.2.4 考察	．．． 50

5. 測定 2 バスレフスピーカの測定	・・・ 51
5.1 測定目的	・・・ 51
5.2 スピーカの指向特性の測定	・・・ 52
5.3 バスレフホーンの影響の測定	・・・ 60
5.4 特性の落ち込みの分析	・・・ 68
5.5 周波数特性の改善	・・・ 76
5.6 エンクロージャの影響の測定	・・・ 85
6. まとめ	・・・ 86
6.1 無響室の特性について	・・・ 86
6.2 バスレフスピーカの特性について	・・・ 87
6.2.1 指向特性について	・・・ 87
6.2.2 バスレフホーンの影響と改善法について	・・・ 88
参考文献	・・・ 89
謝辞	・・・ 89

1 まえがき

音響系の測定は、測定手法、環境、機器に大きく影響を受ける。

音響系測定のもっとも基本的な測定項目として、インパルス応答の測定が挙げられる。インパルス応答の測定手法としては、1)電気を利用した起爆装置による少量の黒色火薬の爆発、競技用あるいは玩具の火薬ピストル、ペーパースタータ、風船の破壊、火花放電等のパルシブな音源を使って受音点においたマイクロホンで直接収録する方法、2)幅の狭いパルス性(15~20 μ s、50~100V)の信号でスピーカを駆動し多数回平均化する方法、3)M系列雑音やピンクノイズで音場を駆動した状態で受音点においてマイクロホンで収録した信号と駆動信号の両者を用いて、音源のパワースペクトルと音源・受音点間のクロスパワースペクトルから周波数伝送特性を求めフーリエ逆変換により計算する手法、4)TSPで音場を駆動しその応答と時間軸を反転させた駆動信号との畳み込みによりインパルス応答を求める方法等が使われている⁽⁴⁾。これらの測定方法にはそれぞれに長所、短所はあるが、今回はもっとも広く利用されているTSPを用いて測定を行うこととした。

一方、測定環境については、外部からの雑音や室内反響などが測定結果に大きな影響を与える。そこで、無響室と呼ばれる音響測定を行うための特殊な空間を作り出した音響実験室で行うのがよい。無響室は床や壁、天井に吸音性の高い材料を取り付けることにより、あらゆる方向からの反射音がないように設計されている。また、分厚い壁で周囲を囲うことにより外部からの音の進入を遮断している。しかし、壁面付近では少量の反射音の影響を受け、測定結果が変動することが予想されるため、本研究においては無響室内の測定位置と特性の変動を測定し、無響室の利用条件の検討を行った。

また、測定に使用する機器にはそれぞれ特性があるということも重要な点である。機器によって固有の周波数特性がある場合、測定結果に影響を及ぼすと考えられる。計測においては、周波数特性の谷の存在はその周波数の情報が失われることを意味するので、このような場合は何らかの対策をし、特性の改善を行わなければならない。本研究では、スピーカを例にとりその特性の測定と問題点の改善についての考察を行った。

2 TSP⁽¹⁾

2.1 はじめに

系が線形時不変であるならば、その系への任意の入力信号に対する応答は、入力信号と系のインパルス応答 (Impulse Response) との畳み込み演算によって計算することができる。例えば、楽器を演奏する位置で短いパルス性の音を出して、聴く人の位置でその応答インパルス応答 を記録し、その応答から任意の音源に対してどのような音がするかを計算により求めることができる。

しかし、音響系の伝達関数は一般に、ダイナミックレンジが広くインパルス応答が長いという特徴をもっている。また、音響系の伝達関数を測定する場にはかなりの暗騒音が存在することが多い。このため、持続時間の短い矩形パルスのようなクレストファクタの大きな信号を用いて伝達関数の測定を行うと、伝達関数の谷の部分で十分な SN 比 (信号対雑音比) をとるためには同期加算の回数が非現実的な大きさになってしまう。そこで、短時間に安定したインパルス応答測定を行う方法として、時間引き延ばしパルス (Time Stretched Pulse TSP) が提案されている。これはインパルスの位相を周波数の 2 乗に比例して変化させることにより、時間軸を引き伸ばした信号である。

2.2 TSP の設計法

2.2.1 ATSP

まずはじめに、青島の提案した ATSP について説明する。ATSP は、次のような周波数領域の表現で書き下すことができる。

$$\begin{aligned} H(n) &= a_0 \exp(jkn^2) & 0 \leq n \leq N/2-1 \\ H(n) &= H^*(N-n) & N/2+1 \leq n < N \\ H(N/2) &= a_0 \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 n は離散周波数、 $H(n)$ は TSP 信号のスペクトル、 $*$ は複素共役をあらわす。 $H(n)$ は $n = N/2$ を中心に複素共役対称となるため、 $n = N/2+1$ から先については $n = N/2-1$ までの $H(n)$ の複素共役をとればよい。 $N-n$ とする理由は、 $n=0$ と $n=N$ 、 $n=1$ と $n=N-1 \dots$ が対応するためである。ここで、 $n = 2^i$ (i : 整数) であり、 k は TSP の時間引き伸ばしの程度を表すもので、この値が大きいほど TSP は時間軸上で引き伸ばされた形をとる。この $H(n)$ を IDFT (逆離散フーリエ変換) すれば実際の時間関数である $TSP_x(t)$ が得られることになり、これが時間領域における ATSP の実際の姿である。また、この ATSP では、全ての離散周波数 n で絶対値が一定値の a_0 となる。

このパルスがある系に加え、その応答を次式で定義される $H(n)$ の逆関数 H^{-1} を IDFT したものと畳み込めば、時間引き伸ばしが逆に圧縮されて被測定系のインパルス応答が求められる。この逆フィルタは次式より求めることができる。

$$\begin{aligned} H^{-1}(n) &= a_0 \exp(-jkn^2) & 0 \leq n \leq N/2-1 \\ H^{-1}(n) &= H^*(N-n) & N/2+1 \leq n < N \\ H^{-1}(N/2) &= a_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$N = 4096$ 、 $k = 8.991 \times 10^4$ の場合の ATSP(a) とその逆フィルタ(b) を図 2-2-1 に示す。

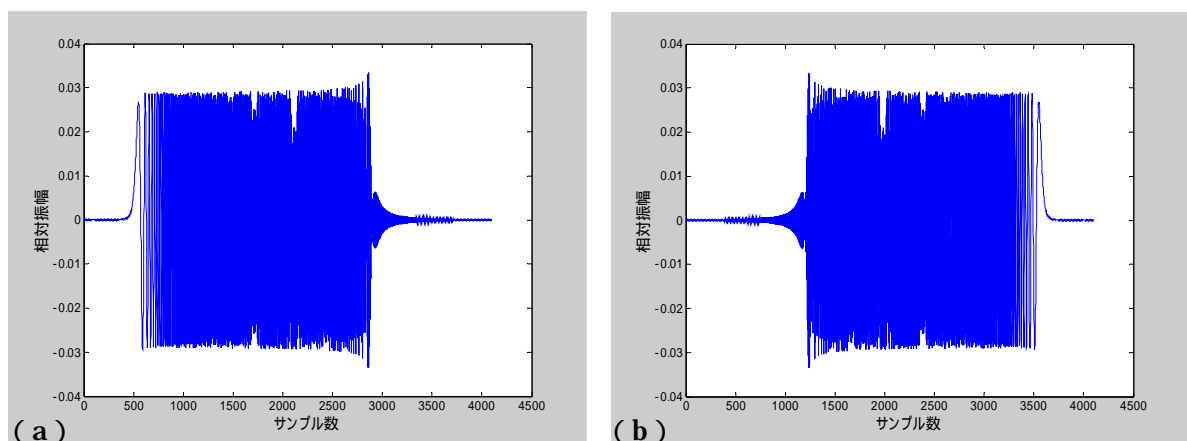


図 2-2-1 式(2)で定義される時間引き伸ばしパルス (ATSP) の一例

2.2.2 OATSP

図 2-2-1 を見てみると、TSP が「しっぽ」と「くちばし」を持っていることがわかる。ある周波数 f までのスイープを行ったアナログのチャープ信号には、周波数変調の側波帯のために f を超える周波数成分を含むことになる。よってしっぽとくちばしは、周波数 0 と $fs/2$ の外側に広がった側波帯が折り返され、この折り返しも含めて周波数スペクトルを平坦にしたことによるものと考えられる。できる限り側波帯を小さく抑えれば、このようなしっぽやくちばしを小さくできると考えられる。

このことをふまえて式(1)を見てみると、この式では k の値にかかわらず $H(N/2)$ を常に実数 (= 偏角零) と置いているので、ここで位相の不連続が生じている。これはチャープ信号を作るための変調波に不連続があることを意味し、このため変調波は高い周波数成分を含むことになるので、 $fs/2$ を超える部分に大きな側波帯を生じさせることになる。したがって、 $H(N/2)$ を実数と置くのではなくこれが自動的に実数になるよう k を設定すればよい。そこで、新しい整数のパラメータ m を導入し、

$$k(N/2)^2 = m\pi \quad (3)$$

と置く。こうすれば、前述のような不連続を取り除くことができる。

(3)式より k は

$$k = m\pi / (N/2)^2 \quad (4)$$

となる。この(4)式を(2)式に代入し、次式で定義される ATSP を提案する。

$$\begin{aligned} H(n) &= a_0 \exp(j4m\pi n^2 / N^2) & 0 \leq n \leq N/2 \\ H(n) &= H^*(N-n) & N/2+1 \leq n < N \end{aligned} \quad (5)$$

これを最適化 (Optimized) ATSP(OATSP)と呼ぶ。この式を IDFT すれば実際に時間関数の OATSP が得られる。 m は TSP の幅を決める整数のパラメータであり、この値が大きければ OATSP の幅が広がる。 $m=N/2$ のとき直流成分に対応する部分と $fs/2$ に対応する部分とがちょうど重なるので、通常 m は $N/2$ より小さくとることになる。

この OATSP をある系に加え、その応答を次式で定義される $H(n)$ の逆関数 $H^{-1}(n)$ を IDFT したものと畳み込めば、時間引き伸ばしが逆に圧縮されて被測定系のインパルス応答が求められる。 OATSP の逆フィルタ $H^{-1}(n)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} H^{-1}(n) &= a_0 \exp(-j4m\pi n^2 / N^2) & 0 \leq n \leq N/2 \\ H^{-1}(n) &= 1/a_0 * H^*(N-n) & N/2+1 \leq n < N \end{aligned} \quad (6)$$

図 2-2-2 は上記の式から得られる OATSP の一例で、 $N=4096$ 、 $m=1200$ の場合のものである。図 2-2-1 と比較すると、「しっぽ」がはるかに小さくなっているのがわかる。

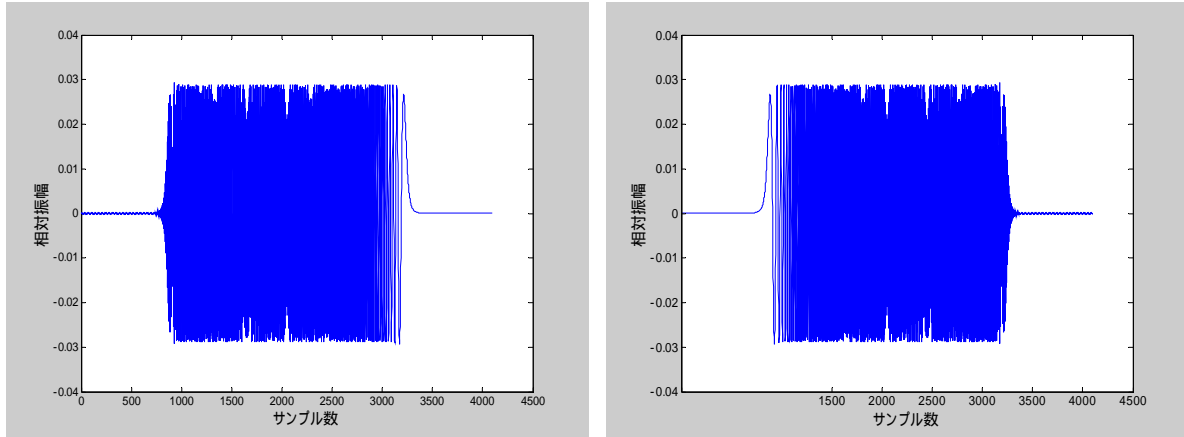


図 2-2-2 式(5)と式(6)で定義される最適化時間引き伸ばしパルス (OATSP) の一例

ここで、図 2-2-2 の MATLAB におけるプログラムを示す。

```
%Program1
%OATSP の設計

N=4096;           %TSP の長さ
m=1200;          %TSP の幅を決めるパラメータ

A=1;             %振幅の大きさ
L=N/2-m;        %円状シフト量 (3.3 参照)

n1=(0:1:N/2);   %離散周波数の範囲

x1=A*exp(4.*m.*pi.*n1.*n1.*j./(N*N)); %OATSP の設計

H=zeros(1,N);   %1 行 n 列の行列の初期化
H(1:N/2+1)=x1;
H(N/2+2:N)=conj(fliplr(H(2:N/2))); %H(N/2+2)以降は H(N/2+1)
                                        %までの行列を左右反転させ、
                                        %複素共役をとる

Y=real(ifft(H)); %H(n)を IFFT する

%円状シフト
(N-L+1:N)=Y(1:L);
YY(1:N-L)=Y(L+1:N); %TSP 信号

figure(1);
```



```
plot(YY); %TSP をプロット

%逆 TSP の設計
G=conj(H); %H(n)の複素共役をとる
YG=real(iff(G)); %G を IFFT する

%円状シフト
YYG(1:L)=YG(N-L+1:N); %円状シフト
YYG(L+1:N)=YG(1:N-L); %TSP 逆フィルタ信号

figure(2);
plot(YYG); %逆 TSP をプロット
```

2.3 Nより長いインパルス応答の測定

2.3.1 インパルス応答がNより短い場合の通常の手続き

式(5)で定義される ATSP と式(6)の逆フィルタを用いれば、インパルス応答の長さが N 以下の系の測定を行うことができる。これらは全て DFT を基礎に定義されているので、測定は全て円状畳み込み的に行われることとなる。したがって、測定に当たっては TSP の出力時に第一回目の TSP 出力時の応答を取り込んでではなく、第二回目以降の部分の応答しか使用できないことに注意しなければならない。このとき、同期加算を行うか否かで手順は次のように異なる。

同期加算を行わないとき...TSP を 2 回放射し、2 回目の放射に重なる部分の応答を取り込む。

同期加算を行うとき... L 回同期加算を行う場合には、TSP を $L+1$ 回放射し二回目以降からの放射に重なる部分の応答を、各 TSP 周期に同期して加算して取り込む。

このようにして応答を取り込んだ上に、この応答を N 点 DFT する。その後、逆 TSP の周波数表現をこれに乗算し、さらに IDFT すれば被測定系のインパルス応答が得られる。例えば、1 秒の長さのインパルス応答を標本化周波数 48[kHz]で測定するためには、 $N = 2^{16}$ で TSP の設計を行えば良いことになる。

2.3.2 TSP とその逆フィルタの直線状畳み込み

いつも必要な長さの N について TSP を得ることができるのなら、極めて高精度の測定が可能である。しかし、機器のメモリの制限やそれぞれの N についての TSP の計算を行う時間の問題などで、それが難しい場合も考えられる。このような場合にある適当な N について TSP を設計しておいて、 N より長い系のインパルス応答を測定する場合には、この TSP に零を挿入して使用することができればたいへん都合である。この場合、放射する TSP と逆フィルタの間では円状畳み込みではなく、直線状畳み込みが行われることとなる。式(5)と式(6)同士を直線状に畳み込んだときに、正しいインパルス応答が求められるという保証はない。しかし、もし直線状畳み込みを行ったときにも測定誤差が十分小さいのであれば、インパルス応答が N より長い系の測定が可能となり、極めて便利であると考えられる。

図 2-3-1 は式(2)と式(3)で定義される ATSP を直線状に畳み込んだ結果である。直線状畳み込みに当たっては、事前にある円状シフト（後述式(8)参照）を行い、さらに TSP のあとに零を N 個付け加えた。もし、直線状畳み込みの結果がインパルスになれば、TSP を用いて長さが N を超える系のインパルス応答の測定が可能であることになる。結果を見ると、若干の誤差が生じていることがわかる。

このような誤差を少なくするためには、TSP が十分零に収束している部分に零を挿入するのが効果的である。その点で、ATSP よりも時間領域できれいに収束している OATSP のほうがよい結果が得られることが期待される。図 2-3-2 が式(5)と式(6)で定義される OATSP を直線状に畳み込んだ結果である。この場合、事前の円状シフトとその後の零の挿入は図の ATSP の場合と同様に行った。図では、OATSP を直線状畳み込みで使用しても誤差がほとんどないことを示している。

以上の検討から、OATSP のほとんど零に収束した部分が時刻 0 で現れるよう適当な円状シフトを行った上で、零を挿入して放射信号として用い、それをある系に通した応答を同様の処理を施した逆フィルタに通せば、その系のインパルス応答が N より長くてもほとんど誤差のない測定が可能であることがわかる。

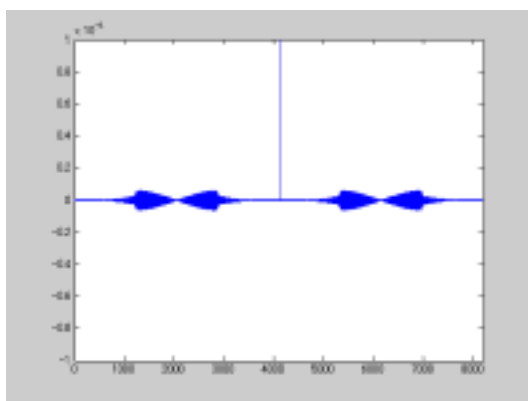


図 2-3-1
式(2)で与えられる ATSP（図 1 に示してあるもの）を直線状に畳み込んだ結果

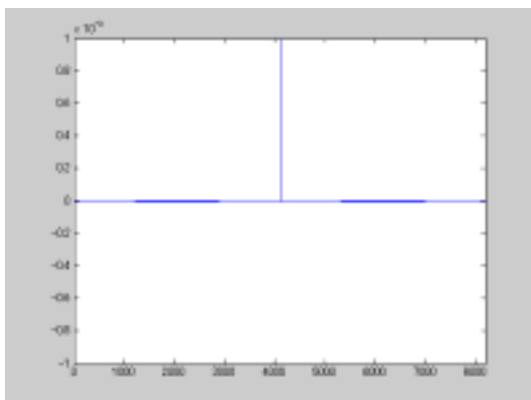


図 2-3-2

式(5)と式(6)で与えられる OATSP (図 2 に示してあるもの) を直線状に畳み込んだ結果

通常、「TSP」と呼ばれるものは OATSP を指す場合が多いので、以下本論文では、OATSP を TSP 信号と呼ぶことにして話をすすめる。

図 2-3-1 のプログラムを以下に示す。

```

%Program2
%ATSP の直線状畳み込み

N=4096;                                %TSP の長さ

A=1;                                     %振幅の大きさ
k=8.991*10^(-4);                         %TSP の引き伸ばしの程度を表す
L=N/2-m;                                  %円状シフト量

n1=(0:1:N/2-1);                          %離散周波数の範囲

x1=A*exp(k.*n1.*n1.*j);                  %ATSP の設計
x3=A;

H=zeros(1,N);                             %1 行 n 列の行列の初期化

H(1:N/2)=x1;
H(N/2+1)=x3;
H(N/2+2:N)=conj(fliplr(H(2:N/2)));      %H(n)を左右反転させて複素共役をとる

Y=real(ifft(H));                          %H(n)を IFFT する

%円状シフト
YY(N-L+1:N)=Y(1:L);
YY(1:N-L)=Y(L+1:N);                      %TSP 信号

figure(1);
plot(YY);                                 %TSP をプロット

```

```

%逆 TSP の設計
G=conj(H);           %H(n)の複素共役をとる
YG=real(iff(G));    %G を IFFT する

%円状シフト
YYG(1:L)=YG(N-L+1:N); %円状シフト
YYG(L+1:N)=YG(1:N-L); %TSP 逆フィルタ信号

figure(2);
plot(YYG);          %逆 TSP をプロット

%畳み込み (インパルス応答)
F=conv(YY,YYG);    %TSP と逆 TSP を畳み込む
figure(3);
plot(F);           %インパルス応答をプロット

```

図 2-3-2 のプログラムを以下に示す。

```

%Program3
%OATSP の直線状畳み込み

N=4096;           %TSP の長さ
m=1200;          %TSP の幅を決めるパラメータ

A=1;             %振幅の大きさ
L=N/2-m;         %最適な円状シフト量

n1=(0:1:N/2);   %離散周波数の範囲

x1=A*exp(4.*m.*pi.*n1.*n1.*j./(N*N)); %OATSP の設計

H=zeros(1,N);    %1 行 n 列の行列の初期化
H(1:N/2+1)=x1;
H(N/2+2:N)=conj(fliplr(H(2:N/2))); %H(N/2+2)以降は H(N/2+1)
                                        %までの行列を左右反転させ、
                                        %複素共役をとる

Y=real(iff(H));  %H(n)を IFFT する

%円状シフト
YY(N-L+1:N)=Y(1:L);
YY(1:N-L)=Y(L+1:N); %TSP 信号

figure(1);
plot(YY);        %TSP をプロット

```

```
%逆 TSP の設計
G=conj(H);
YG=real(iff(G));

%円状シフト
YYG(1:L)=YG(N-L+1:N);
YYG(L+1:N)=YG(1:N-L);

figure(2);
plot(YYG);

%畳み込み(インパルス応答)
F=conv(YY,YYG);
figure(3);
plot(F);

%H(n)の複素共役をとる
%G を IFFT する

%円状シフト
%TSP 逆フィルタ信号

%逆 TSP をプロット

%TSP と逆 TSP を畳み込む

%インパルス応答をプロット
```

2.3.3 最適な円状シフト量

通常、前述の式通りに TSP を設計すると、図 2-3-3 のようなグラフとなる。

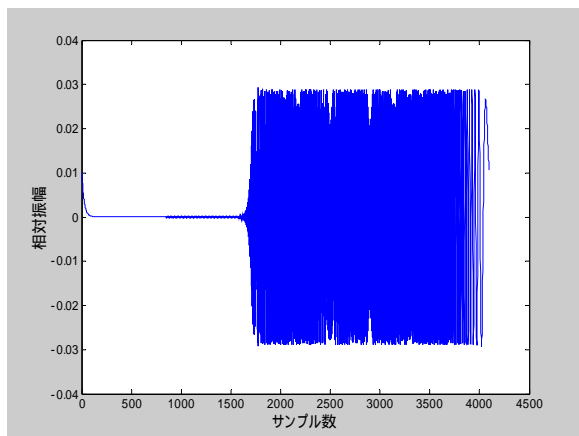


図 2-3-3
円状シフトを行う前の TSP

しかし、このままでは円状畳み込みとして取り扱うためには、前述（2.3.1 参照）のように最初のパルス周期の間の応答は利用することができない。これに対し、事前に円状シフトを与えておいてからパルスを出力すれば、第一周期に対する応答も利用することができ、測定時間を短縮することもできる。

ここでいう円状シフトとは、TSP の特定のサンプル数を信号の最後尾に移動させることである。具体例を挙げれば、全体で 100 のサンプル数を持つ TSP のサンプル数 1~10 を、新たに定義する TSP の 91~100 に移動させ、残りの部分を全体的に前にシフトするということになる。このことを図 2-3-4 に示す。

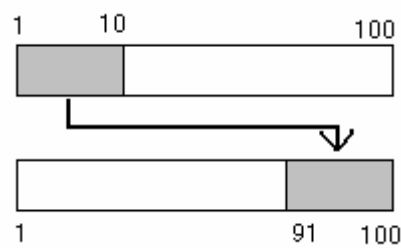


図 2-3-4 円状シフト

円状シフトをすることによって図 2-3-3 の TSP が図 2-3-5 のようになる。

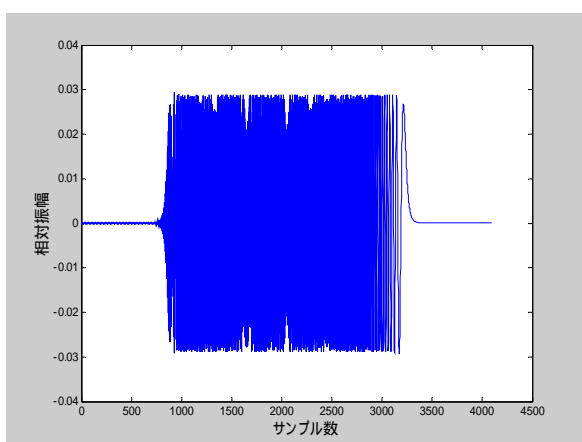


図 2-3-5
円状シフトを行った後の TSP


```

H(1:N/2+1)=x1;
H(N/2+2:N)=conj(fliplr(H(2:N/2)));

Y=real(iff(H));

G=conj(H);
YG=real(iff(G));

E=zeros(1,4096);           %1 行 4096 列の行列の初期化
kk=1;                     %パラメータ kk の設定

for L=1:128:4096          %円状シフト量を 1 から 128 ずつ変化させる

    YY(N-L+1:N)=Y(1:L);   %円状シフト(Program2 参照)
    YY(1:N-L)=Y(L+1:N);

    YYG(1:L)=YG(N-L+1:N);
    YYG(L+1:N)=YG(1:N-L);

    F=conv(YY,YYG);       %TSP と逆 TSP を畳み込む

    F(4097)=0;
    E(kk)=(F'*F)/(2*N-1); %誤差の平均パワーを求める

    kk=kk+1;

end

kk=kk-1;                  %kk が実際のデータより1つ
                           %多くなっているのを戻す

xx=[1:kk];
xx=(xx-1)*128;           %グラフ上のx軸の表記にあわせる
E(1:kk);
E1=10*log10(E(1:kk));    %dB 表示
plot(xx, E1(1:kk));      %プロットする

hold on;

end

hold off;

```

2.3.4 m と誤差の関係

図 2-3-7 は、 $N=4096$ 以外でも式(8)で与えられる円状シフトを行った上で OATSP に零を付け加えて、TSP を直線状畳み込み的に使用した場合の誤差を示したものである。図の横軸は TSP の幅を決定する整数パラメータ m を TSP の長さで正規化した大きさである。縦軸は式(7)で与えられる誤差の平均パワーである。 $m = N/2$ のとき、 $fs/2$ に対応する時間遅れがちょうど TSP の周期に一致し、TSP の頭と尻尾が接するようになるので誤差が急激に大きくなっている。

この図より、例えば $N=4096$ のときには、直線上畳み込みに伴う誤差を $-98[\text{dB}]$ 以下に抑えるためには、誤差の平均パワーの観点からみて m をおよそ 1840 以下にして使用すべきであるということがわかる。

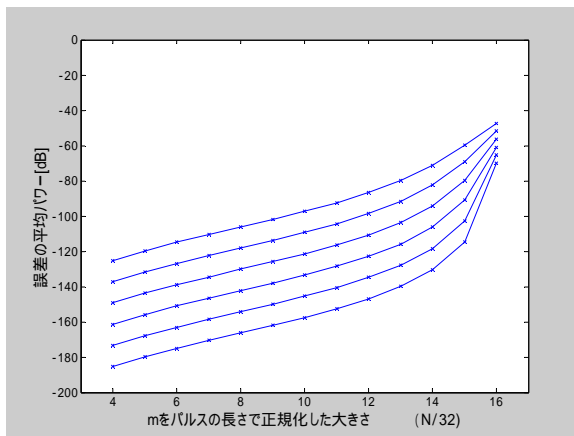


図 2-3-7

様々な N について、式(8)から得られる円状シフト後に直線状畳み込みを行った場合の誤差。

グラフは上より $N=512$ 、 1024 、 2048 、 4096 、 8192 、 16384 である。

図 2-3-7 のプログラムを以下に示す。

```
%Program5
```

```
%TSP の長さによる円状シフトと直線状畳み込みの誤差の関係
```

```
pp=zeros(20,1);
```

```
%グラフを重ねて描くため、  
%pp という行列を設定
```

```
for P=9:1:14
```

```
%N を変化させるため P という値を設定
```

```
    N=2^P;  
    A=1;
```

```
%N は2のP乗の値  
%振幅の大きさ
```

```
    n1=(0:1:N/2);
```

```
%離散周波数の範囲
```

```
    for t=4:1:16
```

```
%m を変化させるためtという値を設定
```

```
        m=t*N/32;
```

```
%t は N/32 の値
```

```

x1=A*exp(4.*m.*pi.*n1.*n1.*j./(N*N)); %TSP の設計
                                           %(Program2 参照)

H=zeros(1,N);

H(1:N/2+1)=x1;
H(N/2+2:N)=conj(fliplr(H(2:N/2)));

Y=real(iff(H));

G=conj(H);
YG=real(iff(G));

E=zeros(1,N);

L=N/2-m; %円状シフト量の設定 (m は変数)

YY(N-L+1:N)=Y(1:L); %円状シフト (Program2 参照)
YY(1:N-L)=Y(L+1:N);

YYG(1:L)=YG(N-L+1:N);
YYG(L+1:N)=YG(1:N-L);

F=conv(YY,YYG); %TSP と逆 TSP を畳み込む

F(N+1)=0;
E=(F*F')/(2*N-1); %誤差の平均パワーをとる

E1=10*log10(E); %dB 表示
pp(t)=E1; %行列 pp に格納

end

plot([4:16],pp(4:16),'x-');

hold on;

end

hold off;

```

3 スピーカ(2)(3)

本章では、スピーカの特性および原理について説明する。

3.1 分類と特性

スピーカは電気信号を音に変換し、それを大気中に放射する電気音響機器である。

3.1.1 分類

音の放射の仕方によって、スピーカは次の二種に大別される。

A. 直接放射スピーカ

音の波長と同程度の寸法の振動版から、大気中に直接音を放射するスピーカ

B. ホーンスピーカ

音の波長より小さい寸法の振動版から、断面積が長さに沿って次第に増大する音響管（ホーン）を通して音を大気中に放射するスピーカ

また、他の電気音響機器と同様に、電気機械変換器によっても分類ができる。過去には電磁変換器やまれには圧電変器も使われたが、今日ではほとんど動電変換器だけが使われる。静電変換器や電気ひずみもまれには使われるが、一般的ではない。

3.1.2 特性

重要な特性は次のようなものである。

A. 音圧周波数特性

一定の大きさの電気信号をスピーカに加えたときの、周波数とスピーカに対して一定位置（通常は正面前方一定距離）での音圧との関係を、横軸に周波数、縦軸に音圧をデシベルメモリでとったグラフで示す。希望する周波数範囲内で音圧が一定で、この範囲から離れるにしたがって音圧が低下することが望ましい。また、スピーカからの方向によってこの特性が変わらないことが望ましい。

B. 効率

スピーカへの電気信号入力に対する音響出力の比

C. 指向特性

スピーカから一定の距離での方向に対する音圧の変化を、半径方向に音圧をデシベルでとった極座標グラフ、または方向毎の音圧周波数特性を重ね書きしたもので表す。周波数によって指向特性が変わらないことが望ましい。

上記の特性のほかに、無ひずみ最大出力を決める非線形ひずみ特性、無用な過度現象の有無を見るための過度特性（周波数特性とも関係があり、周波数特性が急に变化する周波数の付近では過度現象を起こす）、入力インピーダンス特性などがある。

3.2 平面振動版からの音の放射

はじめに、基本的な事項として平面振動版からの音の放射について説明する。

ある大きさの振動版が図 3-2-1 のように空中に孤立して振動するときは、音の放射が複雑である上に有効でない。それは、例えば図 3-2-1 で振動版が右の方へ動いた瞬間には、振動版の右側に接する空気は圧縮されて密に、左側は疎になるが、これが外に伝わっていかないうちに密の部分の空気が振動版の縁をまわって裏側の疎の部分で中和してしまうので、音が有効に放射されないのである。それで、ふつうは図 3-2-2 のように板や箱で振動版の表裏間の空気の流通を妨げる。この板はバフル板とよばれる。

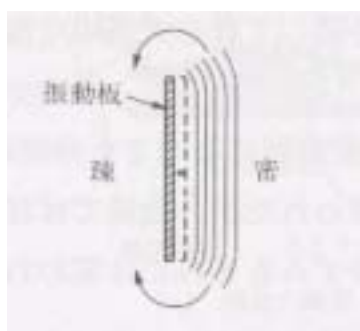


図 3-2-1 空中に孤立した振動版

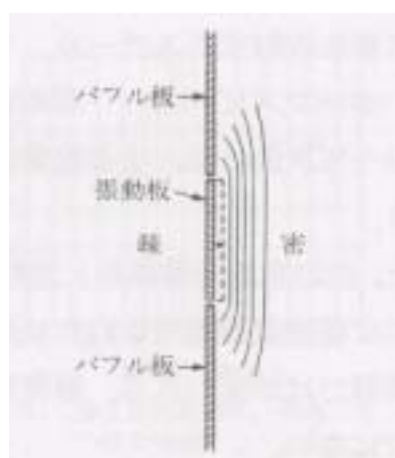


図 3-2-2 バフル板をつけた振動版

振動版がバフル板とつけた状態で振動するものとして、振動版の寸法が音の波長に比べてかなり小さければ、音はバフル面で限られた半無限空間の各方向へほとんど一様な強さで放射されるが、波長に比べて寸法が同程度以上になると、図 3-2-3 のように、正面方向では振動版の各部から出る音はほとんど同位相で伝わるから、重なり合って音は最も強くなるが、正面からずれた方向では振動版の各部からの音の位相が互いにずれて合成面が正面より弱くなる。振動版の寸法より音の波長が短く（周波数が高く）なるほどこの傾向は強くなり、ある方向では合成音が 0 になる場合も生ずる。

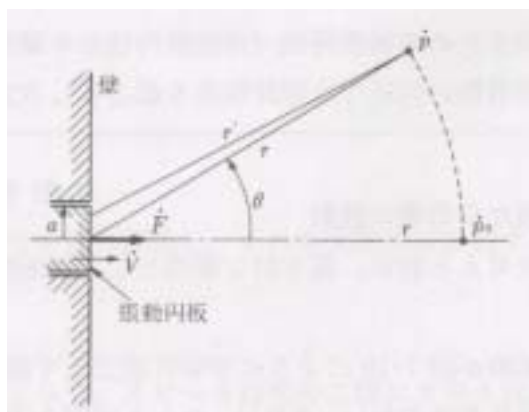


図 3-2-3 振動円板からの音の放射

図 3-2-4 は円形振動板の直径と波長との比が変わったときの指向性の変化である。波長に比べて振動板の寸法が大きくなるほど、音は前方に強く出て、横へはあまり出なくなるのがわかる。振動面が細長いときは、狭い径を含む面内では指向性は広がるが、長い径を含む面内では指向性が鋭くなる。

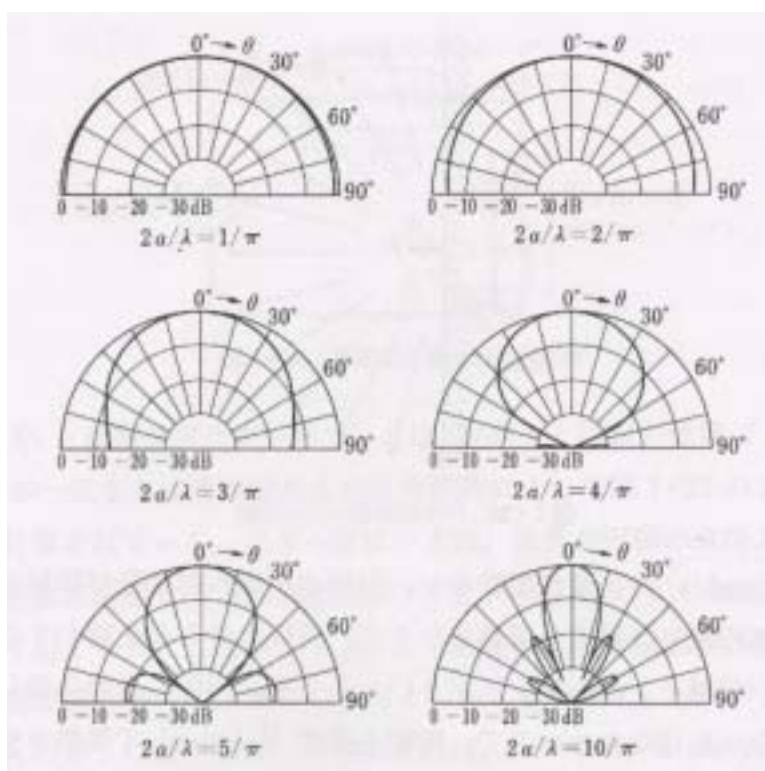


図 3-2-4 いろいろな直径 $2a$ 対波長 λ の比の値に対する円板音源の指向特性

半径方向の長さは正面方向の音圧に対する dB 値

3.3 直接放射スピーカ

3.3.1 放射インピーダンスと音響出力

直接放射スピーカの振動板としては、軽くて適当な剛性を保つために浅い円錐形の紙が使われることが多いが、振動板がほぼ一体になって振動する中以下の周波数範囲では、それからの音の放射は剛体円板からの放射に近いと考えることができる。

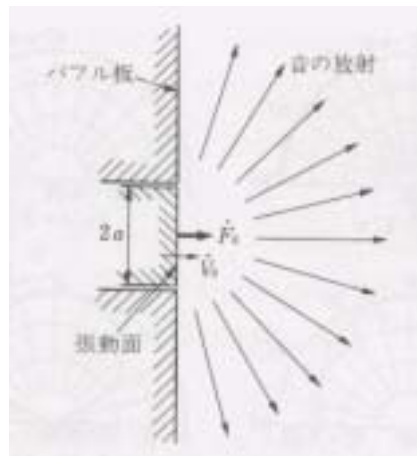


図 3-3-1 円形振動面からの放射

今、円板面が図 3-3-1 のように平面の壁の中にはまって、面と直角の方向に各周波数 ω [rad/s] の正弦波振動をし、円板の片側へだけ音が放射されるものとする。仮に円板には質量も抵抗もなく、円板そのものを動かすのに全く力がいらぬ（機械インピーダンスが 0）としても、円板の表面に接している空気を動かさなければならないので、円板を速度 \dot{V} [m/s] で振動させるためには、ある大きさの駆動力 \dot{F} [N] が必要である。この力は一般には速度と同位相ではない。この \dot{F} と \dot{V} との比

$$\frac{\dot{F}}{\dot{V}} \equiv \dot{Z}_r = R_r + jX_r \text{ [N} \cdot \text{s/m]}$$

を、この円板の放射インピーダンスという。 R_r は放射抵抗で速度 \dot{V} と同位相の力の割合を表し、音のエネルギーの放射に関係し、 X_r は放射リアクタンスで、 \dot{V} と位相が 90° 違う力の割合を表し、空気の慣性に打ち勝ってただ振動させることに関係する。

実際には振動板には質量や支持のためのコンプライアンスや機械的損失による純機械インピーダンス \dot{Z}_{m0} [N · s/m] をもつから、駆動力 \dot{F} に対する全振動系の機械インピーダンスは \dot{Z}_{m0} と \dot{Z}_r との和になり、振動系の電氣的等価回路は図 3-3-2 のようになる。このうち放射抵抗 R_r だけが音の放射に役立つ。

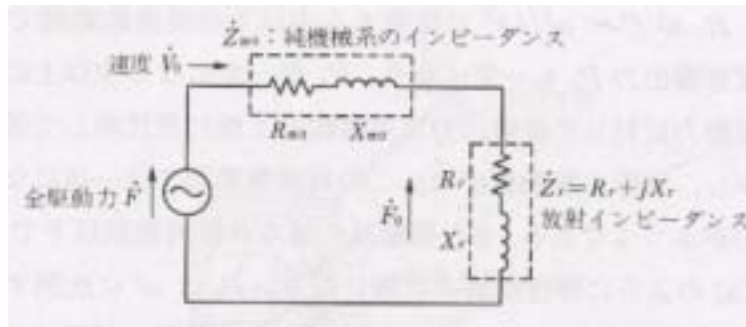


図 3-3-2 振動系の電氣的等価回路

したがって音響出力 P_a は図 3-3-2 から明らかなように

$$P_a = R_r |\dot{V}|^2 = R_r \left| \frac{\dot{F}}{\dot{Z}_{m0} + \dot{Z}_r} \right|^2 \text{ [W]}$$

放射抵抗 R_r と放射リアクタンス X_r とは、波長 λ と円板の直径 d との比、したがって d が一定ならば音の波長または周波数によって図 3-3-3 のように変化することが計算されている。大雑把に言えば、波長が円板の直径より長いような低い周波数の範囲では R_r は周波数の 2 乗 f^2 に、 X_r は f にほぼ比例し、波長が直径より短くなるにしたがって R_r は一定値 Sz_0 (S は振動板の面積、 z_0 は空気の固有音響抵抗) に、 X_r は 0 に近づく。もし全機械インピーダンスが $\dot{Z}_m + \dot{Z}_r \cong j\omega m$ のように慣性制御の状態にあれば、ふつう $R_r \ll \omega m$ だから、式の音響出力は次のようになる。

$$P_a \cong R_r \left| \frac{\dot{F}}{j\omega m} \right|^2 \text{ [W]}$$

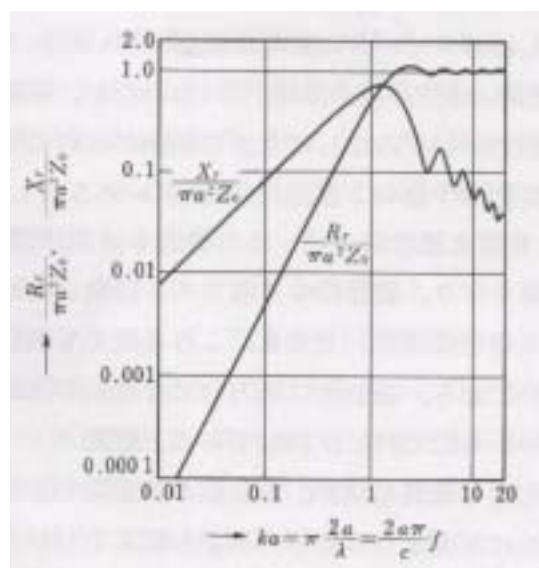


図 3-3-3 円形平面音源の放射インピーダンス

したがって、 R_f が $f^2 = \omega^2/4\pi^2$ に比例する中以下の周波数範囲では駆動力 \dot{F} が一定ならば音響出力 P_a も一定になり、 R_f が一定になる中以上の周波数範囲では一定の駆動力に対して音響出力は周波数の 2 乗に反比例して低下することになる。しかし、実際の振動板では、この周波数範囲では一体になって振動できなくなるのが普通である。また振動系の基本共振周波数以下では $\dot{Z}_m + \dot{Z}_r \cong -j(1/\omega C_m)$ のように弾性制御の状態になり、 P_a は ω^4 に比例することになるから、共振周波数から下の周波数では音響出力が急激に低下する。(図 3-3-4)

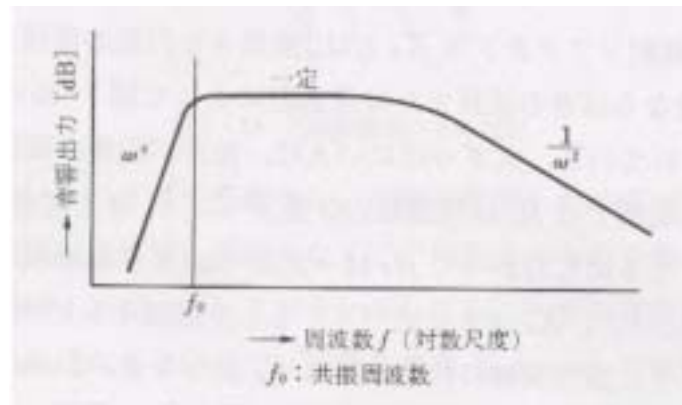


図 3-3-4 駆動力一定の円形振動版からの音響出力

3.3.2 動電直接放射スピーカ

今日では、ほとんどのスピーカに動電変換器が用いられている。動電変換器は、静止時には振動系に何の力も加わっていないこと、駆動力が正確に電流に比例すること、駆動力のひずみなしに大きな振幅がとれること、周波数によるインピーダンスの変化が少ないこと、などの利点があることがその理由である。図 3-3-5 に代表的な動電直接放射スピーカの構成を示す。円筒形の磁極間隙の中に円筒放射状の磁界を作り、磁界の中に軸方向に自由に動ける円筒形駆動コイルを軟らかいばね（中心保持器）で支え、これに軽くて剛性を保つような円錐形の振動板を取り付けてある。振動板は縦方向になるべく自由に動けるように、その周辺を軟らかいもので枠に支持してある。駆動コイルには、やわらかく動ける導線を通して信号電流を流す。振動板の表裏間の空気の流通を遮断するために、スピーカは平面または箱型のバフル板に取り付けて使われる。

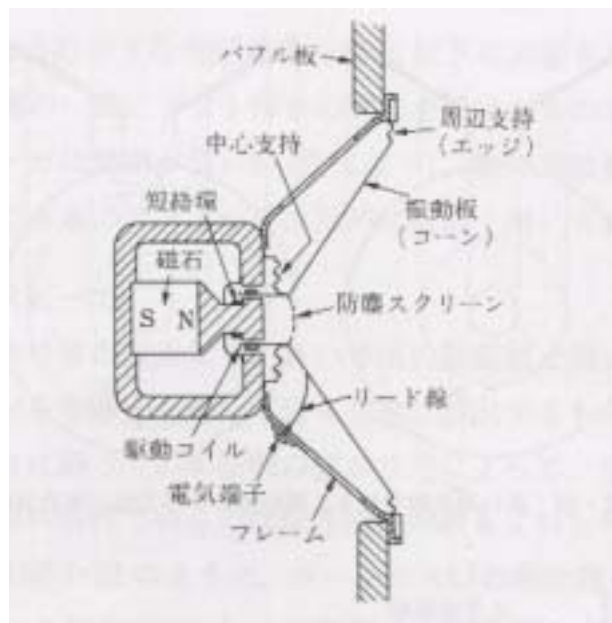


図 3-3-5 動電直接放射スピーカの代表的構造

振動板（その形からしばしばコーンと呼ばれる）全体がほぼ一体になって振動するような数百 Hz 程度（振動板の直径が小さいほど高くなる）以下の周波数での音の放射は前節の平円板からのそれと大体同じと考えられ、入力信号電流、したがって駆動力 F' の大きさが一定のとき、振動系が慣性制御の状態（基本共振周波 f_0 より高い周波数範囲）では音響出力は一定になる。しかし、 f_0 以下の周波数範囲では振動系は弾性制御の状態になり、音響出力は周波数 4 乗に比例して低下するから、実際上の低音の限界は大体 f_0 になる。

また、振動板はふつうは中心付近で駆動されるから、ある程度の剛性はあっても中以上の高い周波数ではもはや一体になっては動かず、周辺に行くにしたがって振動が遅れ、い

くつかの特定の周波数では図 3-3-6 のように同心円状の節ができるような共振が起こる。

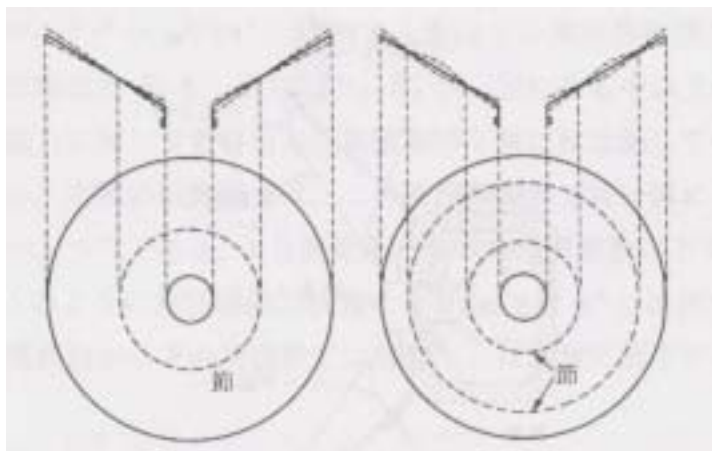


図 3-3-6 高い周波数で起きる振動版の半径方向の高次共振

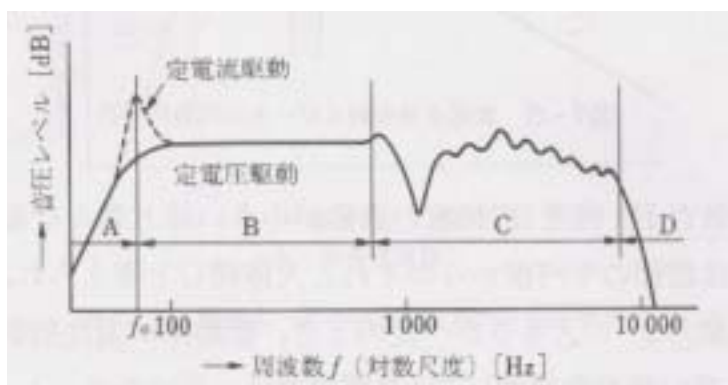


図 3-3-7 単一の紙円錐振動版をもつ動電直接放射スピーカの音圧周波数特性の代表的な形

上記のような理由で図 3-3-5 のような構造のスピーカに一定の信号入力(例えば入力電圧一定)を加えると、正面の音圧周波数特性は一般に図 3-3-7 のようなものになる。動作範囲を図のように大体四つに分けることができる。A は基本共振周波数 f_0 以下の範囲で、周波数が下がると音圧が急に低下するから音の再生にはほとんど役に立たない。B は振動板がほぼ一体になって動き、音圧も出力も大体一定の部分、C は振動板がもはや一体になって動かず分割振動をする範囲で、凹凸も多いが、その形は振動板の円錐の形、材質(ふつう紙が用いられる)直径などで違う。D は駆動コイルの振動が振動板にほとんど伝わらない範囲で、音の再生には使えない。なるべく B の範囲だけを使うように、振動板の直径が大きいスピーカと小さいスピーカを 2 個または 3 個合わせて使うものもある。

3.4 エンクロージャ

3.4.1 密閉型

密閉型は、構造、動作原理ともに簡単で広く利用されている。ただし、箱の容積が小さいときは、内部の空気がばねのように反発して振動版が動きにくくなる。そのため、スピーカユニットの最低共振周波数(f_0)が上昇し、低音の限界が高いほうに移動する。

図 3-4-1 は、小型の密閉型でなるべく低音を出せるような工夫をしたものである。すなわち、最低共振周波数が十分に低いスピーカユニットを用い、内部の空気のバネをスピーカユニットのサスペンションとして利用し、その箱の容積いっぱいの最低共振周波数を得ようとするもので、エアサスペンション方式と呼ばれる。

図 3-4-2 も同じように最低共振周波数の重文に低いスピーカユニットを用い、さらに内部に吸音材を満たしたものでアコースティックサスペンション方式と呼ばれる。吸音材の効果によって全体の f_0 の上昇を押さえるようになっている。

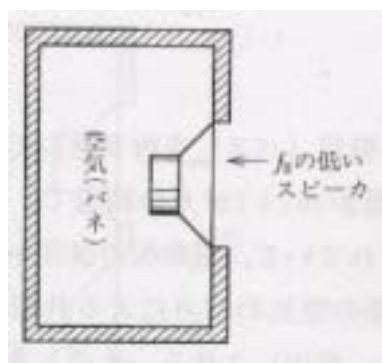


図 3-4-1 エアサスペンション型

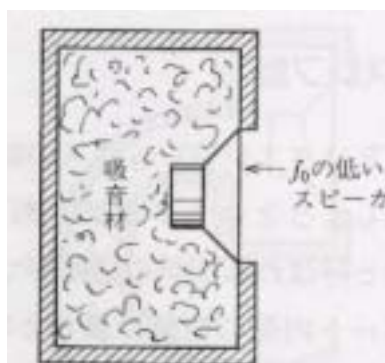


図 3-4-2 アコースティックサスペンション型

いずれもスピーカユニットの f_0 を低くするために振動版は重くなり、能率は低くなる。

3.4.2 バスレフ型

バスレフとはバスフレックスの略で、低音を折り返して利用しようというタイプである。図 3-4-3 がその構造で、バスレフホーンと呼ばれる空気の通路が作られている。振動版の後面から出た音波は、このホーン内部の空気の重さと箱内部の空気のバネによる共振系を駆動して、ホーン内部の空気を大きく振動させる。その時、共振周波数以上では、振動版後面の音波とホーンから出入りする音波は位相が逆になり、振動版前面の音波と同相になる。こうして後面から出た音波は、スピーカユニット前面の音波と一緒に低音が増強される。

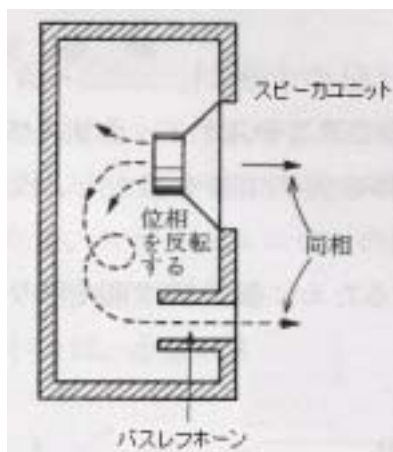


図 3-4-3 バスレフ型エンクロージャ

4 測定 1 無響室の特性の測定

4.1 測定に際して

測定に使用した TSP の波形を図 4-1-1 に示す。今回測定に用いた TSP は、サンプリング周波数 48[kHz]、 $N=24576$ 、 $A=10$ 、 $m = N/4$ である。(TSP については前述 2 章参照)

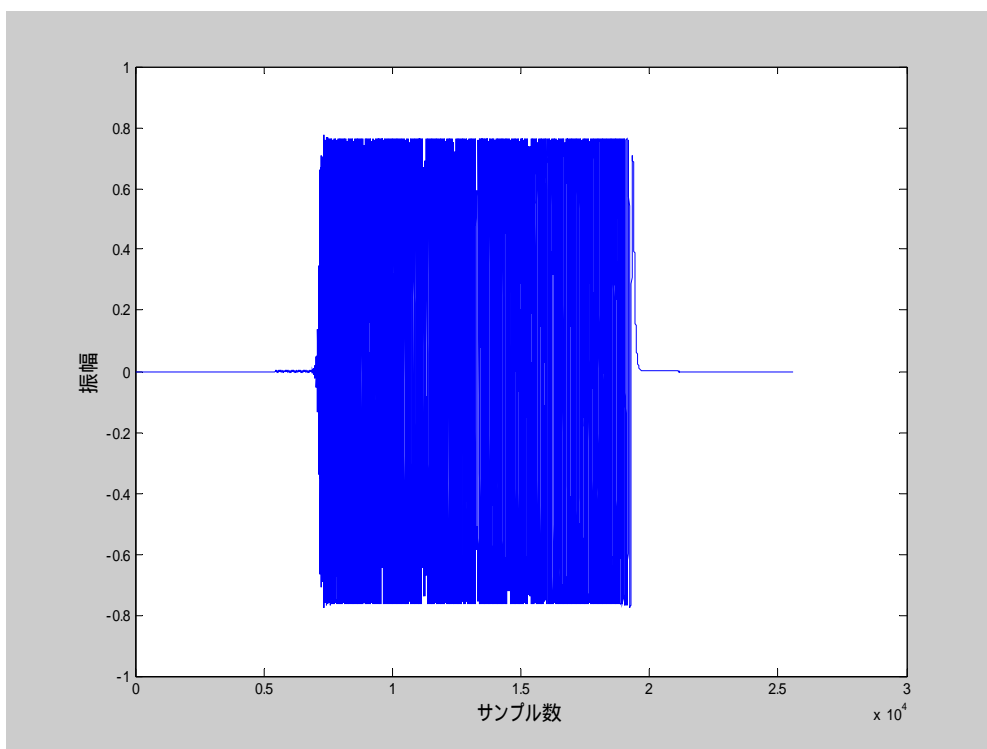


図 4-1-1 TSP 信号

以下に測定に用いたプログラムを示す。

```

%Program6
%TSP を鳴らして出力された音を録音するプログラム

Fs=48000;           %サンプリング周波数
N=24576             %TSP の長さ
A=10;              %振幅の大きさ
m=N/4;             %TSP の幅を決めるパラメータ
L=N/2-m;          %円状シフト量

n=0:N-1;          %離散周波数の範囲

```

```

H=zeros(1,N);           %1 行 N 列の行列の初期化

%TSP の生成(Program1 参照)
H1=A*exp(j.*4.*m.*pi.*n.*n./N./N);
H2=A;

H(1:N/2)=H1(1:N/2);
H(N/2+1)=H2;
H(N/2+2:N)=conj(fliplr(H1(2:N/2)));

h1=real(iff(H));       %H を IFFT する
h2(1:N-L)=h1(L+1:N);  %円状シフト
h2(N-L+1:N)=h1(1:L);

%TSP の前に 0 を挿入
h5=zeros(1,1000+N);   %1 行 1000+N 列の行列の初期化
h5(1001:N+1000)=h2(1:N); %作成した行列の 1001 番目から
                        %TSP を挿入

figure(1);
plot(h5(1:N+1000));
wavwrite(h5,'ファイル名'); %原音を記録

wavplay(h5,Fs,'async'); %生成した TSP を鳴らす

h4=wavrecord(N+9000, Fs); %録音

figure(2);
plot(h4);
wavwrite(h4,'ファイル名'); %出力を記録

```

また、測定したデータは次に示すプログラムにより周波数特性を算出した。

```

%Program7
%測定した音と原音より、周波数特性を求めるプログラム

Fs=48000;              %サンプリング周波数
N=24576;              %TSP の長さ

%音データの呼び出し
h1=wavread('ファイル名'); %原音
h2=wavread('ファイル名'); %出力

h3=zeros(1,N);
h3=h1(1:N);
h4=flipud(h3);        %原音の反転(逆 TSP の生成)

```



```

%インパルス応答
c1=conv(h2,h4);                                %畳み込み(インパルス応答)

%周波数特性
c2=abs(fft(c1));                                %c1 を FFT、絶対値表示
c2=c2/max(c2);                                  %最大値で正規化

%周波数表示
Nfft=length(c1);
NN=(Nfft+1)/2;

f1=(Fs/2)/(NN-1);
XX=0:f1:(Fs/2);                                %X 軸の表記
plot(XX,20*log10(c2(1:NN)));                    %周波数特性をプロット
xlabel('周波数[Hz]');                           %X 軸のタイトル

```

さらに、周波数特性をグラフ上で比較する場合には、次に示すプログラムを用いた。

```

%Program8
%測定した音の周波数特性を比較できるようプロットするプログラム

Fs=8000;(48000)                                %サンプリング周波数
N=4096;(24576)                                  %TSP の長さ

%音データの呼び出し
h1=wavread('ファイル名');                       %原音

%出力の呼び出し(1)
%ファイル名が a0.wav,a30.wav,a60.wav と数値が規則的に変わる場合
for ii=0:30:180
    t=(ii/30)+1;
    hh(:,t)=wavread(['ファイル名#a',num2str(ii),'.wav']);
    %出力 num2str(ii)が変化
end

%出力の呼び出し(2)
hh(:,1)=wavread(['ファイル名']);               %hh という行列にデータを格納していく
hh(:,2)=wavread(['ファイル名']);
hh(:,3)=wavread(['ファイル名']);

h3=zeros(1,N);
h3=h1(1001:N+1000);
h4=flipud(h3);                                  %原音の反転(逆 TSP の生成)

```

```

jj=[1,2,3]; %使うデータの数により変化

col=['r','b','g','m','y','c','k','c']; %グラフの色の指定

for kk=1:length(jj) %length(jj)はデータの数を表す
    tt=jj(kk);

    c1=conv(hh(:,tt),h4); %出力と逆 TSP の畳み込み
                        % (インパルス応答)

    c2=abs(fft(c1)); %c1 を fft する

    %周波数表示 (Program7 参照)
    Nfft=length(c1);
    NN=(Nfft+1)/2;

    f1=(Fs/2)/(NN-1);
    XX=0:f1:(Fs/2);

    plot(XX,20*log10(c2(1:NN)),col(tt)); %色指定
    xlabel('周波数[Hz]'); %X 軸のタイトル
    ylabel('振幅[dB]'); %Y 軸のタイトル
    Legend('右より','中央','左より'); %凡例

    hold on
end

hold off

```

測定にはBOSE社の「101MM」を使用した。表4-1-1にこのスピーカの仕様について示す。また、図4-1-2、図4-1-3にスピーカの写真を示す。以下、本論文内の測定はすべてこのスピーカを用いて行った。

表 4-1-1 BOSE 101MM の仕様

ユニット構成	11.5[cm]フルレンジ×1
再生周波数帯域	70~17k[Hz]
インピーダンス	6[Ω]
許容入力	45[W](rms IEC268-5) 150[W](peak)
感度	86[dB] SPL、1[W]、1[m]
最大音圧レベル	-
指向特性	水平：130°、垂直：130°
入力端子	スナップインターミナル、2P標準ジャック
サイズ	232(W)×245(H)×152(D)[cm]
重量	2.1[kg]



図 4-1-2 BOSE 101MM



スピーカユニット

バスレフホーン

図 4-1-3 各部の名称

4.2 無響室の特性の測定

4.2.1 無響室とは

無響室は、音響測定を行うための特殊な空間を作り出した音響実験室の1つであり、床や壁、天井に吸音性の高い材料を取り付けることにより、あらゆる方向からの反射音がないように設計されている。また、分厚い壁で周囲を囲うことにより外部からの音の進入を遮断している。

無響室内では、測定対象となる音以外に音が存在しないので、測定対象物が持つ音のみを正確に測定することが可能である。具体例として、機械の騒音測定や吸音・遮音効果の評価、スピーカやマイクなどの性能試験などを行うことができる。

無響室は外からの音の進入を防ぐために、外壁は分厚いコンクリートなどの重くて硬い材料で作られている。また窓などは通常設置されておらず、空調設備も間接的に空気が送りこまれるような工夫がされている。内部での音の反射をなくすため、壁、天井、床面は吸音クサビと呼ばれる構造をとっている。これは、グラスウールなどの多孔質吸音材料をクサビ形状に整形したもので、低音から高音までの幅広い周波数領域の音を効率よく吸収できるようになっている。

図 4-2-1 に本測定で使用した無響室の写真を示す。



図 4-2-1 無響室

4.2.2 測定目的

無響室は4.2.1節でも述べたように、壁面をグラスウールで覆うことにより反射を防ぐように作られている。しかし、壁面付近では少量の反射音の影響を受け、測定結果が変動することが予想される。以下、本節では無響室内の測定位置と特性の変動を測定し、無響室の利用条件を検討する。

4.2.3 測定

無響室内において、スピーカとマイクロホンの位置をいろいろと変化させて TSP を鳴らし、各位置による特性に変化が見られるかどうか考察する。

<測定方法>

図 4-2-2 に無響室の簡易平面図と測定における位置を ~ で示す。各 ~ は壁のくさび先端から 30[cm]程度離れた位置である。以下グラフにある番号はこの図に基づくものとする。

測定条件とその例を以下に示す。全ての測定において、スピーカとマイクロホンは正面に設置し、距離は 1[m]とした。

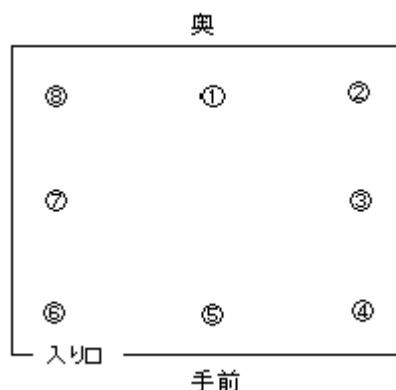


図 4-2-2 無響室の簡易平面図と測定における位置

測定 1：無響室の壁際 8 箇所（ ~ ）にスピーカを置き、それぞれのスピーカから無響室の中央にむかって 1[m]の位置にマイクロホンを置き測定した。

測定 2：無響室の隅 4 箇所（ ~ ）にスピーカを置き、それぞれのスピーカから壁際に沿って左右にマイクロホンを置き測定した。

測定 3：無響室の壁際中央 4 箇所（ ~ ）にスピーカを置き、それぞれのスピーカから壁際に沿って左右にマイクロホンを置き測定した。

測定 4：スピーカを無響室の中央に設置し、そこから ~ の方向にマイクロホンを置き測定した。この際、スピーカはマイクロホンに向かって正面を向くように設置した。

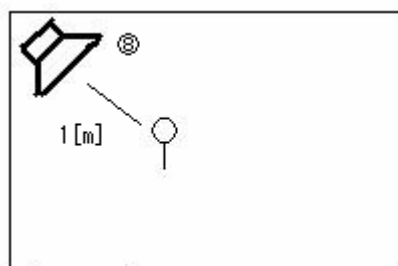


図 4-2-3 測定 1 の例

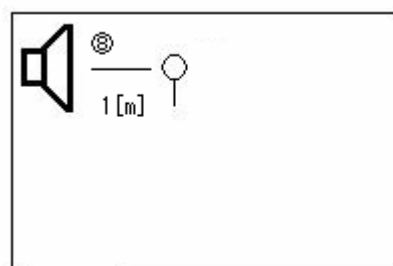


図 4-2-4 測定 2 の例

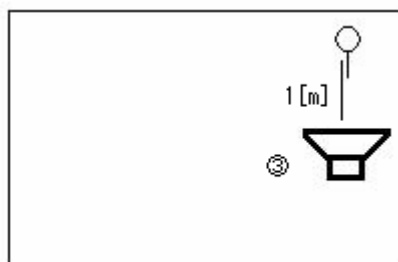


図 4-2-5 測定 3 の例

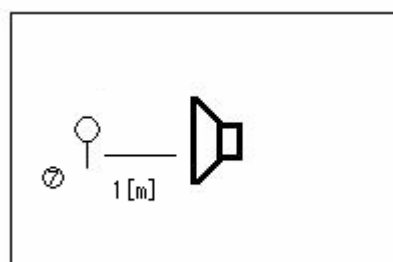


図 4-2-6 測定 4 の例

図 4-2-7 に測定風景を示す。



図 4-2-7 測定風景（測定 1、位置 ）

<測定結果 1>

まず、スピーカを部屋の4隅と壁際中央に設置し、部屋の中央に向けてマイクロホンを向けた場合(測定1)の特性を比較した。図4-2-8、図4-2-9にそれぞれの特性を比較した図を示す。

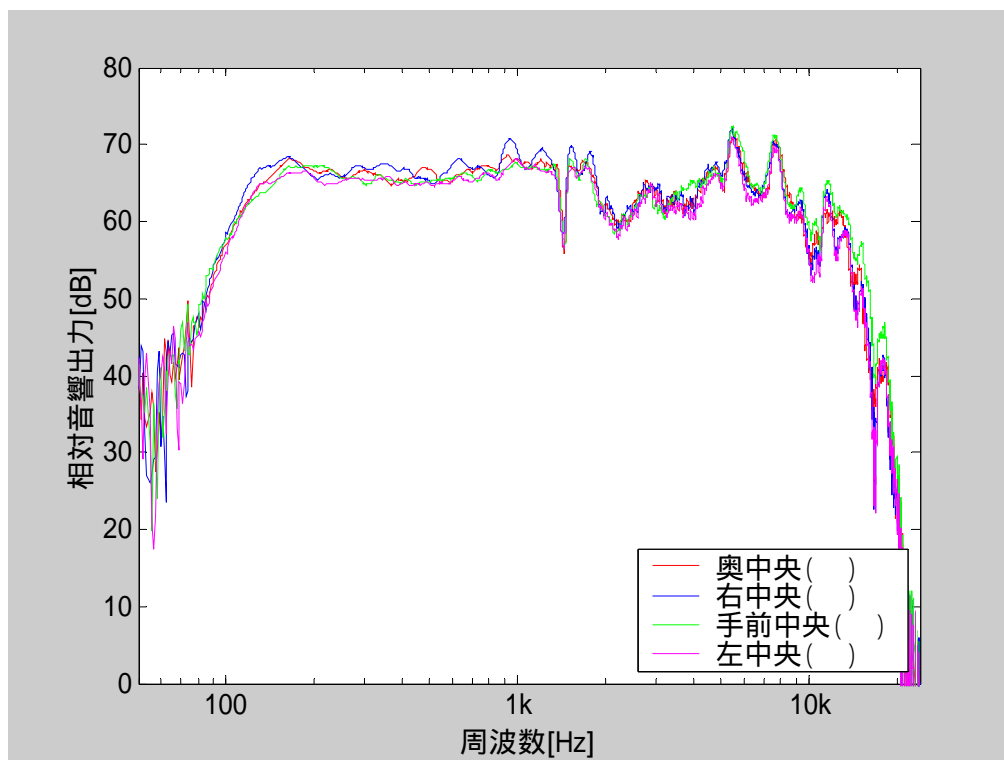


図4-2-8 スピーカを4隅におき、マイクロホンを部屋中央に置いたときの測定結果

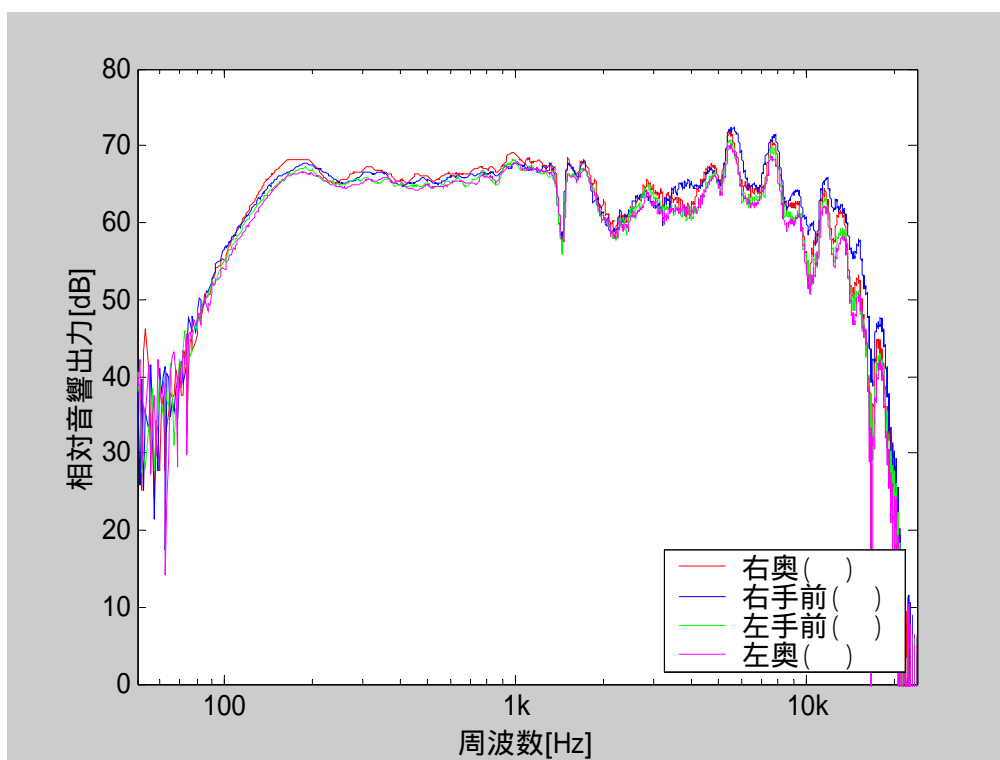


図 4-2-9 スピーカを 4 隅におき、マイクロホンを部屋中央に置いたときの測定結果 2

図 4-2-8、4-2-9 より、低域、高域ともに特性にばらつきが見られる。このことから、スピーカが部屋の隅にあるときは、壁からの反射音が測定結果に影響を与え、正確な測定ができない可能性があることが考えられる。

<測定結果 2>

次に、同じくスピーカを壁際に設置した場合に、マイクロホンを壁際に設置した時と中央に設置した時で特性に違いがあるか比較検討を行う。測定 1、2、3 より、スピーカの位置を固定してマイクロホンの位置を変えた場合の特性をグラフにまとめ比較する。まず、部屋の奥中央()にスピーカを置いたときを例にとり比較する。その結果を図 4-2-10 に示す。

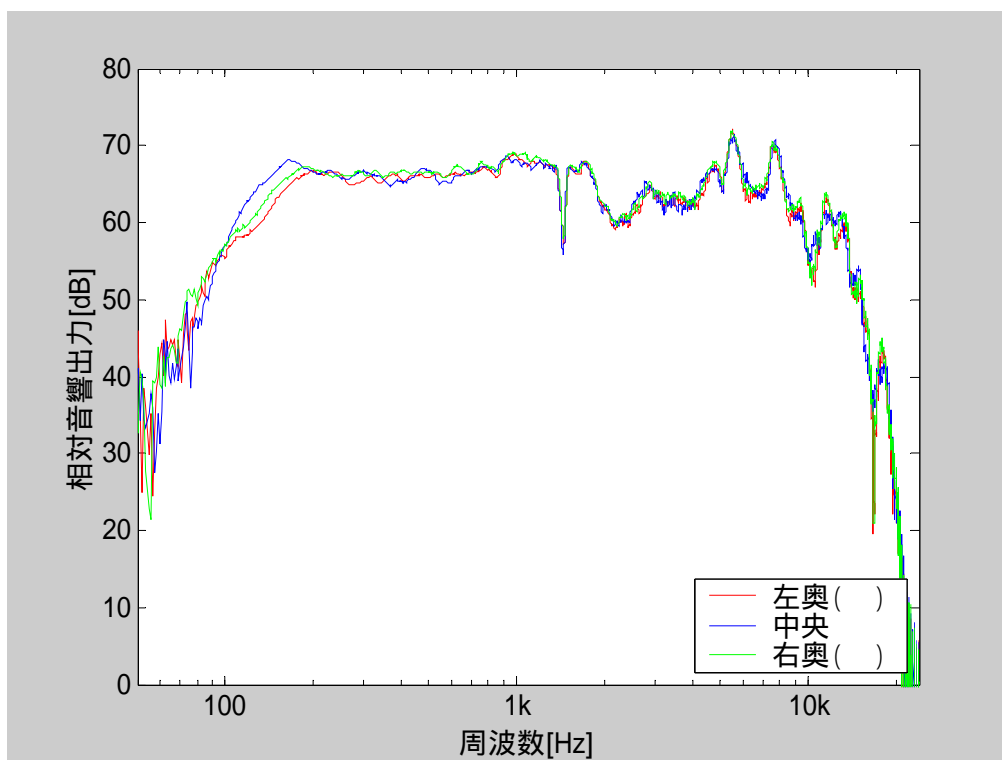


図 4-2-10 スピーカを奥中央()に置いたときの測定結果

図 4-2-10 より、音源が中央にある場合に比べて壁際にあるときのほうが 100[Hz]から 200[Hz]あたりで 2~3[dB]ほど特性が下がっていることがわかる。1[kHz]以上の高域では特性に大きな違いが見られないことから、これ以降、無響室の特性に関しては 1[kHz]までを比較することにする。

以下、それぞれの場所(~)に置ける特性を比較したグラフを示す。

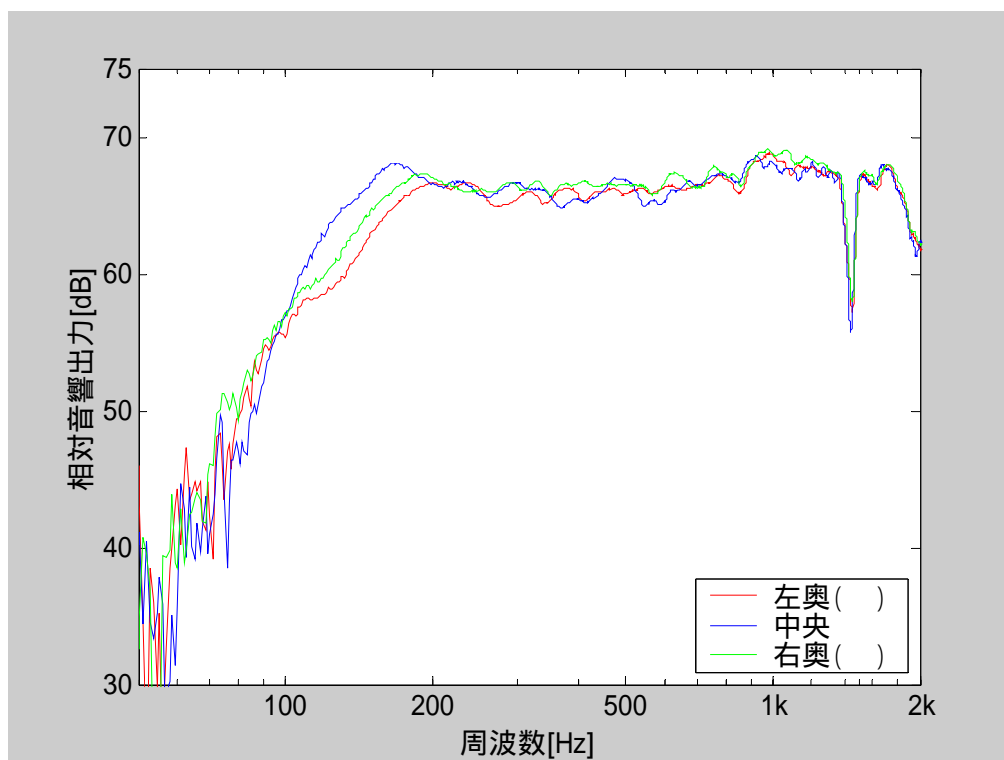


図 4-2-11 スピーカを奥中央 () に置いたときの測定結果 (低域拡大)

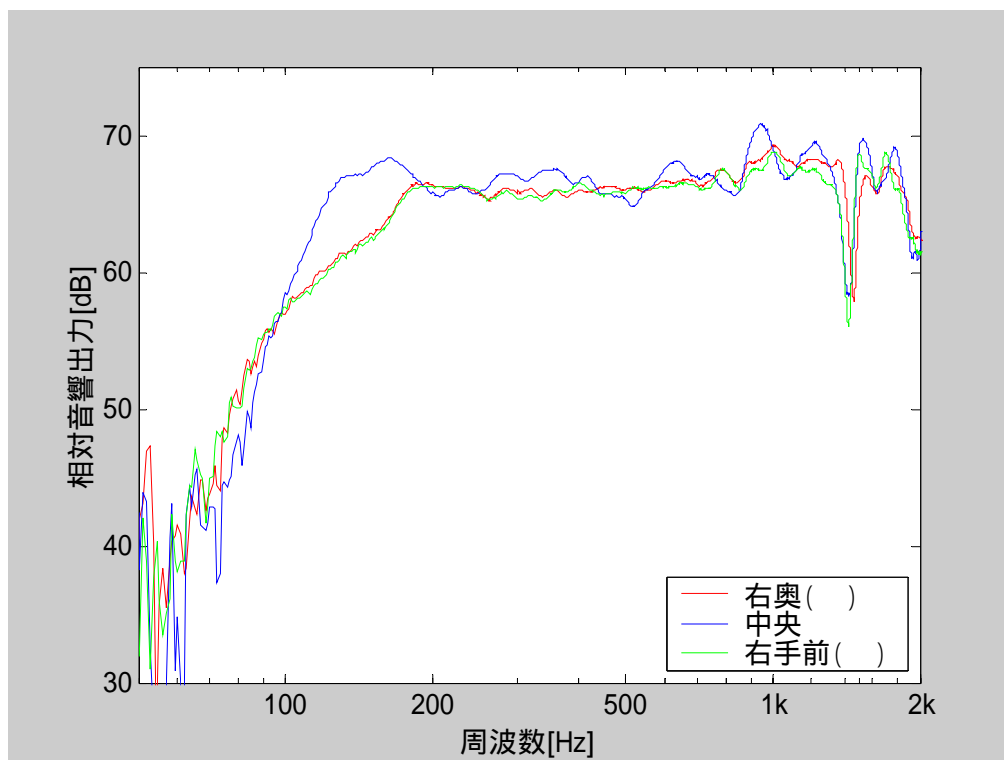


図 4-2-12 スピーカを右中央 () に置いたときの測定結果

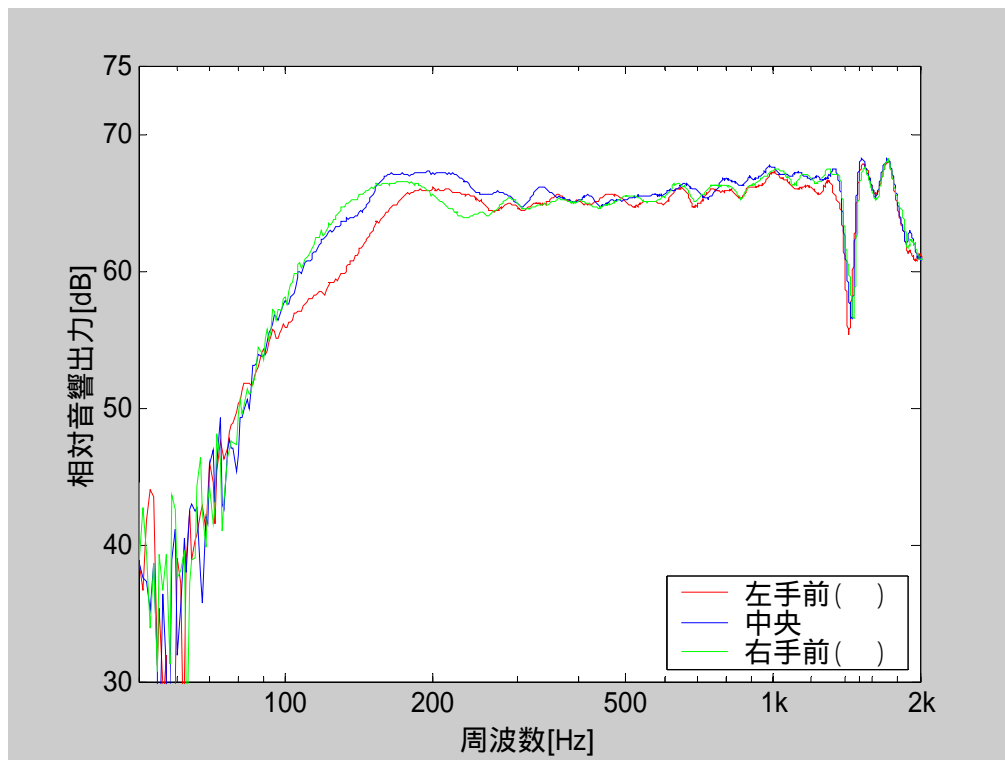


図 4-2-13 スピーカを手前中央 () に置いたときの測定結果

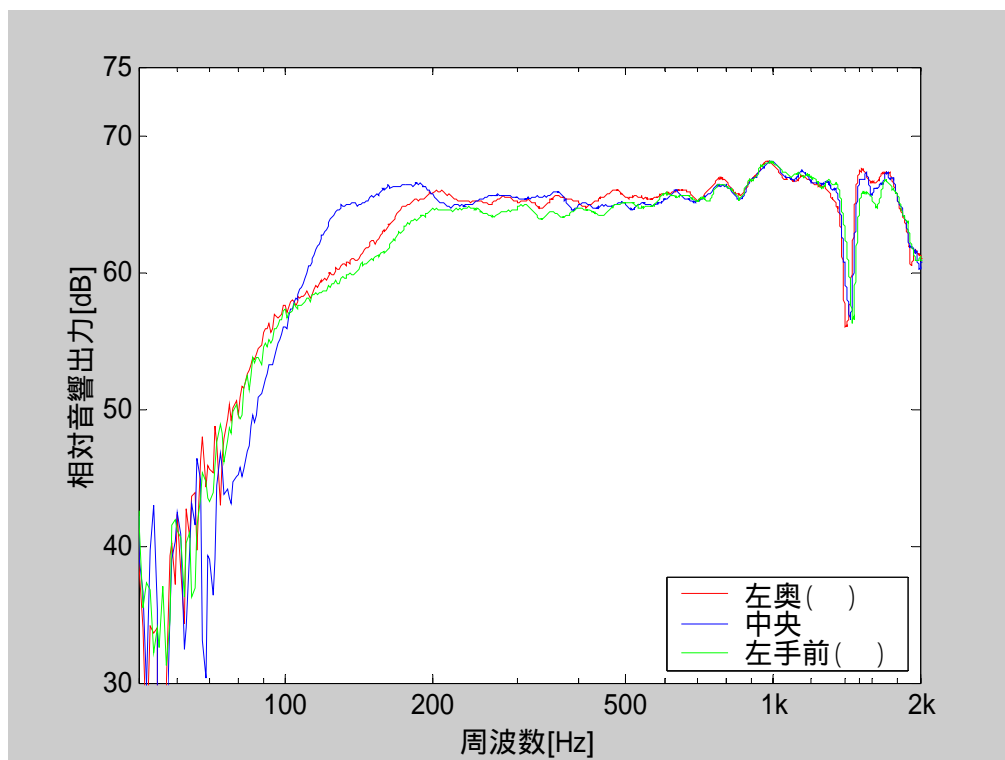


図 4-2-14 スピーカを左中央 () に置いたときの測定結果

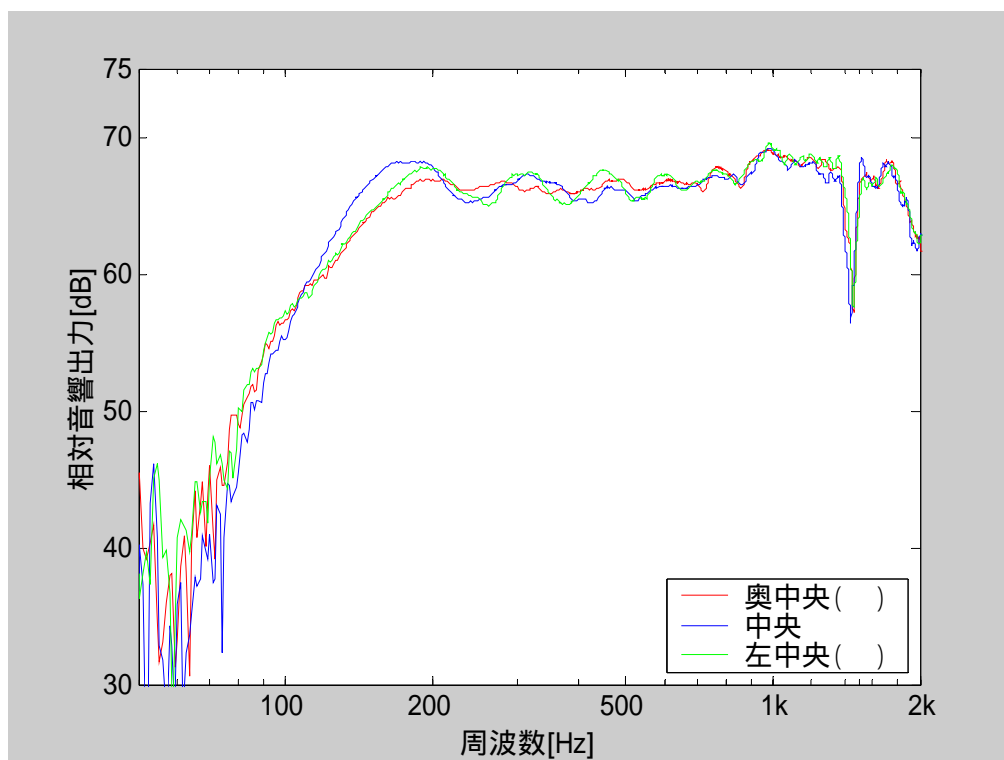


図 4-2-15 スピーカを右奥 () に置いたときの測定結果

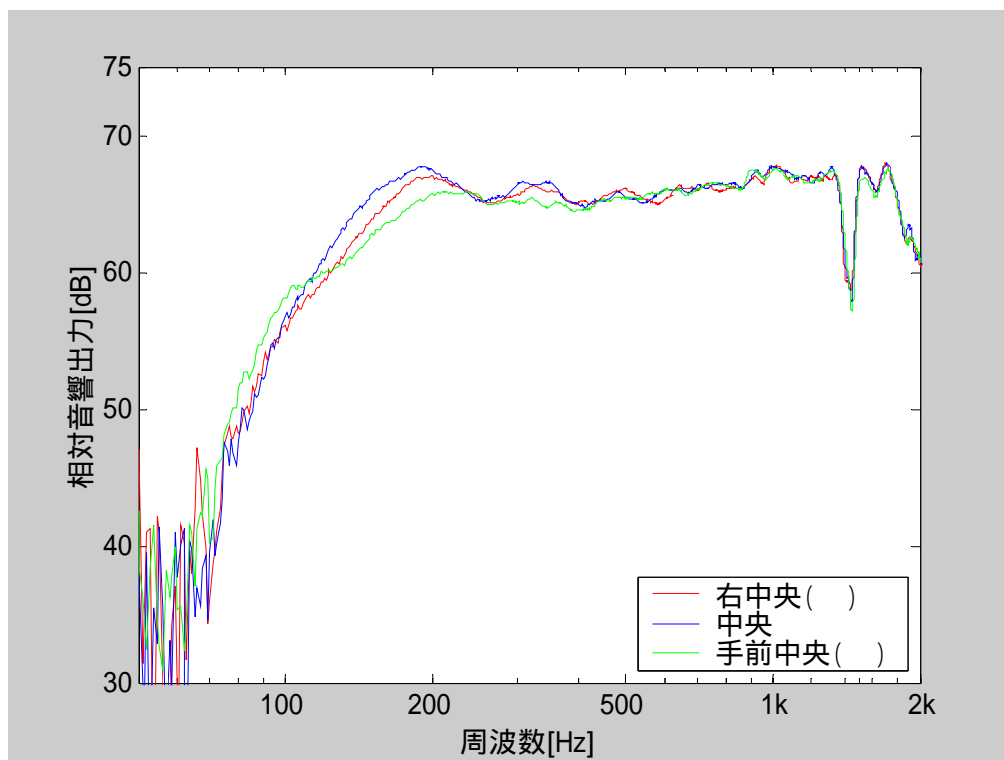


図 4-2-16 スピーカを右手前 () に置いたときの測定結果

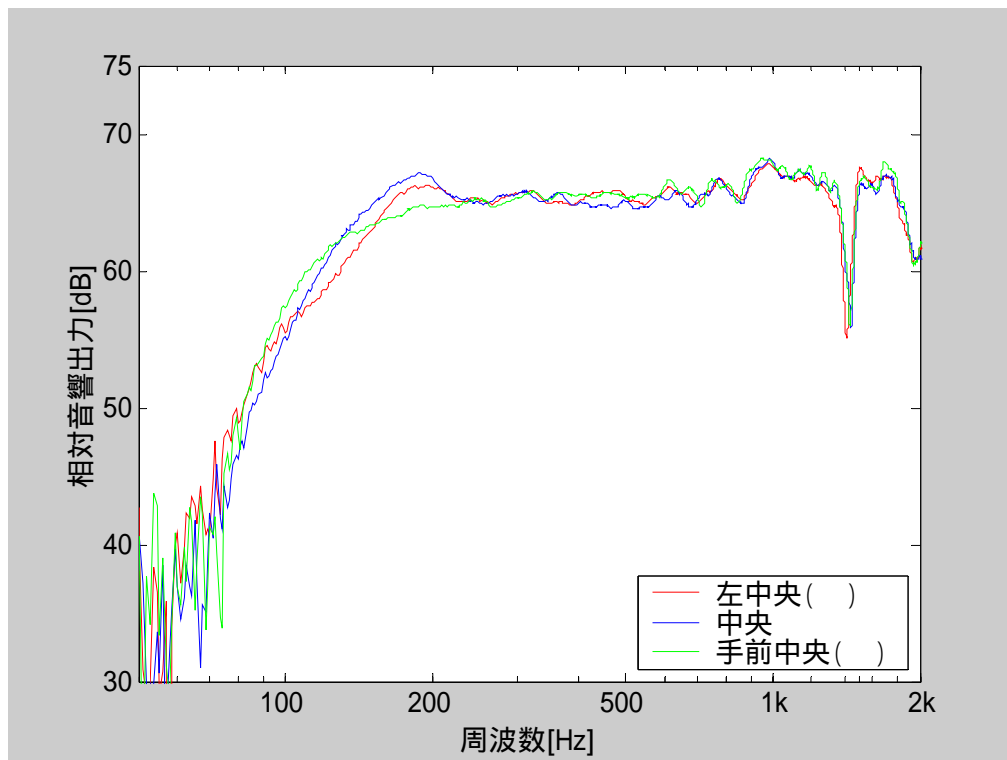


図 4-2-17 スピーカを左手前 () に置いたときの測定結果

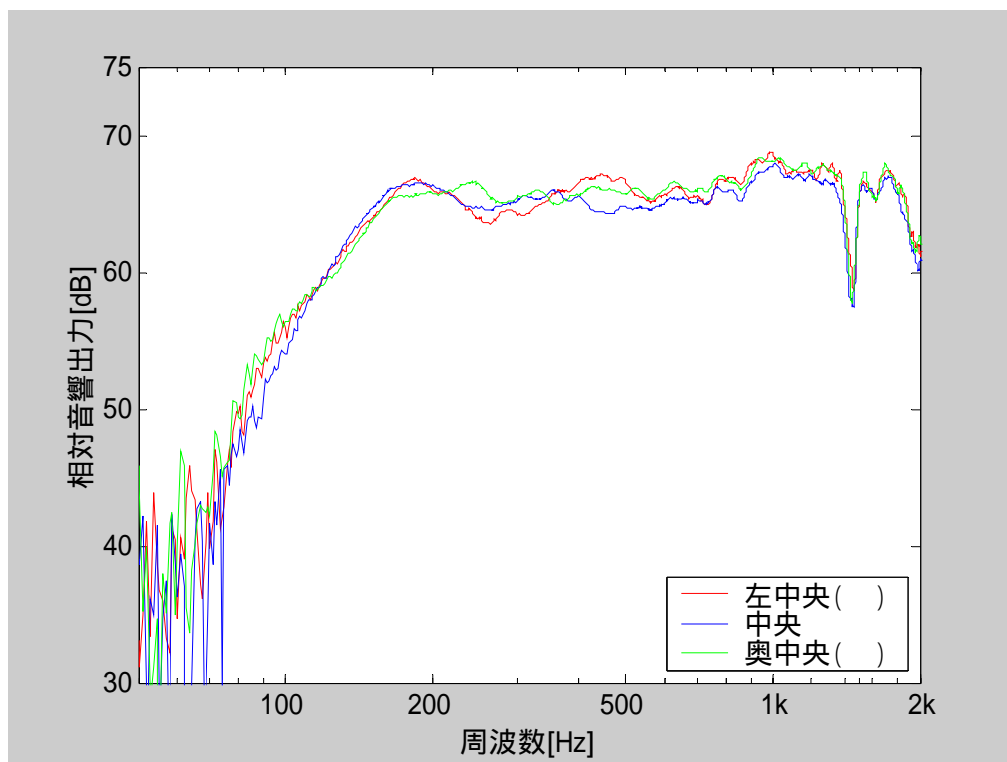


図 4-2-18 スピーカを左奥 () に置いたときの測定結果

図 4-2-11 ~ 図 4-2-18 より、低域においてマイクロホンが中央にある場合に比べて壁際にあるときのほうが特性が下がっていることがわかる。このことより、音源が壁際にあるときは壁の反射の影響を受けるために特性に影響がでる可能性があることが確認された。

そこで、スピーカの位置を中央に固定して、マイクロホンの位置を変化させたときにどのように特性に影響がでるのか比較した。図 4-2-19、図 4-2-20 にその結果を示す。

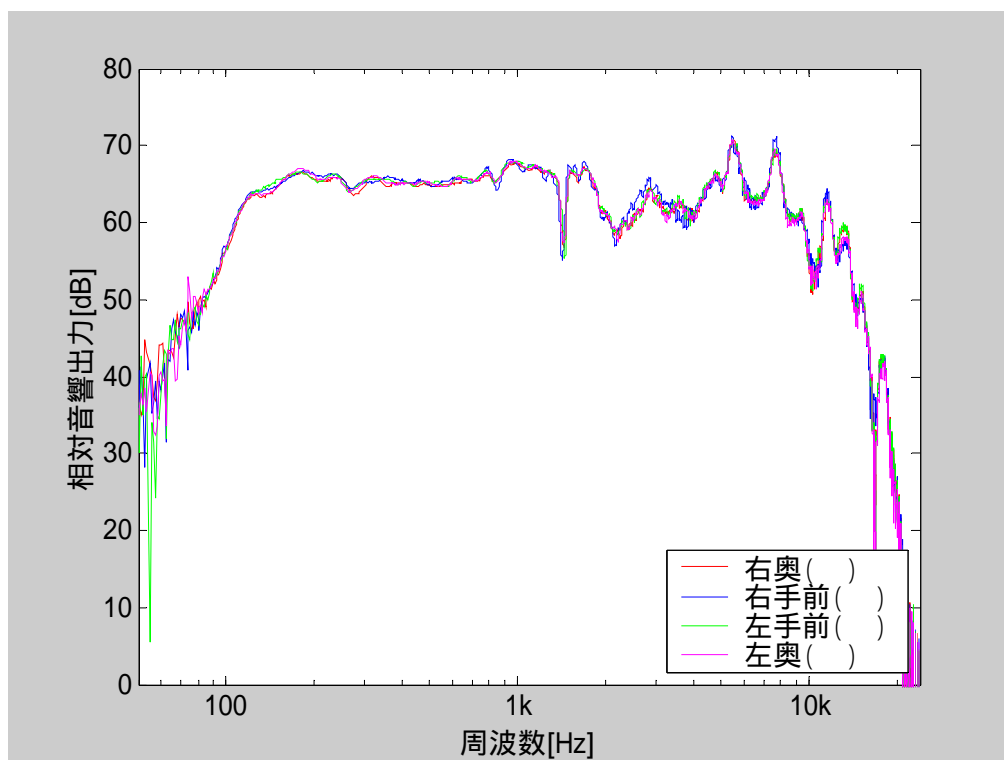


図 4-2-19 スピーカを部屋中央に置き、マイクロホン部屋 4 隅に置いた際の測定結果

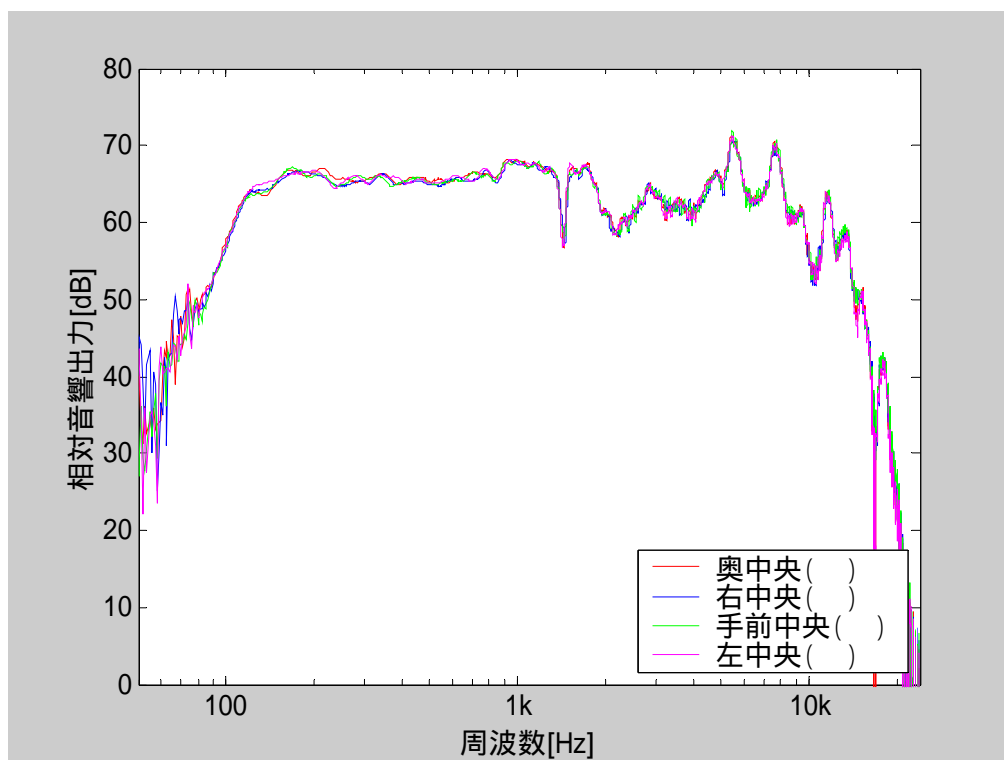


図 4-2-20 スピーカを部屋中央に置き、マイクロホンを部屋 4 隅に置いた際の測定結果

図 4-2-8、4-2-9 と図 4-2-19、4-2-20 を比較すると、図 4-2-19、4-2-20 ではマイクロホンの位置が変化しても特性がよくそろっている。一方図 4-2-8、4-2-9 ではスピーカの位置が変わると特性が変わる。すなわち、スピーカを中央に設置したほうがマイクロホンを中央に設置したときより特性の変化が少ないことが確認できた。このことから、音源は極力部屋の中央に設置したほうが、安定した測定が可能であるということがいえる。

<測定結果 3>

次に、以下の図 4-2-21 に示す条件で測定を行った。スピーカとマイクロホンとの距離はそれぞれ 1[m]とした。

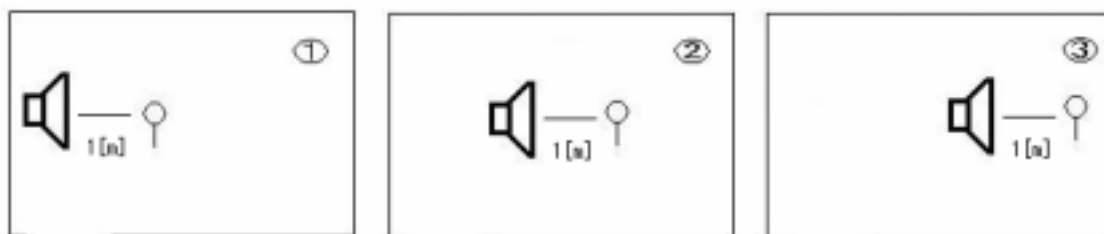


図 4-2-21 スピーカとマイクロホンの位置

測定結果を図 4-2-22 に示す。

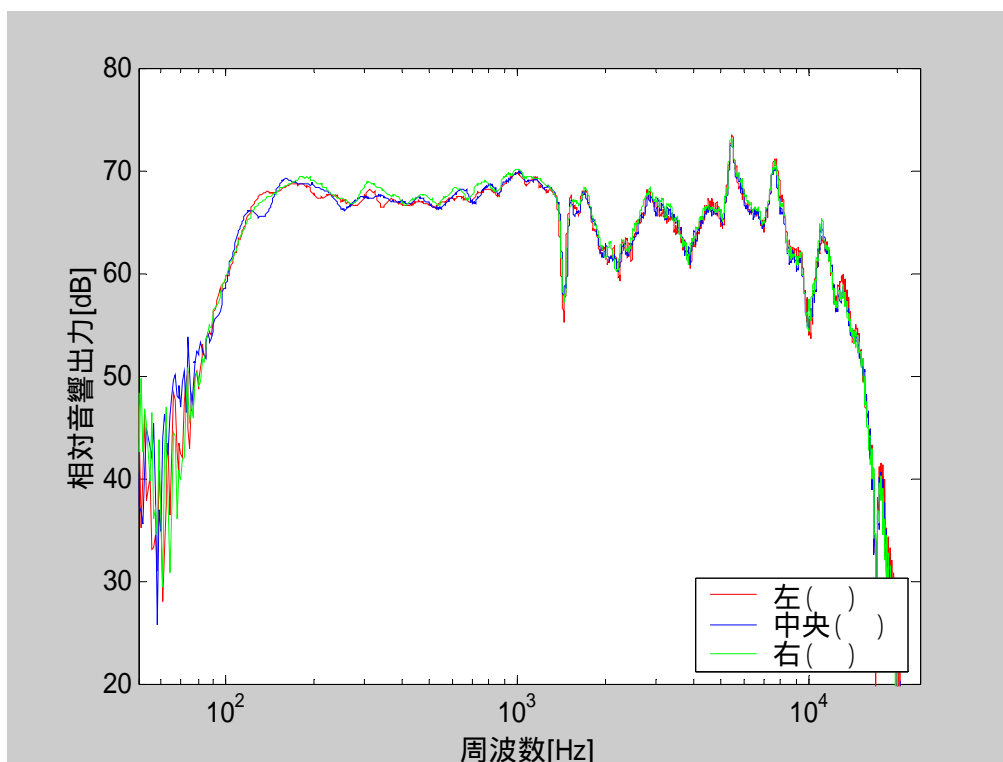


図 4-2-22 スピーカとマイクロホンの位置による特性の比較

図 4-2-22 より、スピーカとマイクロホンの位置が変わっても特性には大きな違いは見られないことがわかる。よって、特性に影響を及ぼすものは、壁からの反射音であるということがいえる。

4.2.4 考察

測定結果 1~3 より、無響室内ならばどこでも均一の測定結果が得られるというわけではなく、場所によって壁面からの反射音の影響を受けてしまうということが確認された。この原因ははっきりとはわからないが、無響室内は全てグラスウールで覆われているというわけではなく、ドアノブや床などには多少の金属が使われているため、全ての音を吸音できないのではないかとと思われる。

無響室で測定を行う際に注意する点としては、マイクロホン、スピーカ共に無響室の中央よりに設置したほうが壁面からの反射音の影響を受けなくてすむため安定した測定結果を得ることができるといえる。また、その中でもスピーカは極力部屋の中央に設置したほうがよい。

5 測定2 バスレフスピーカの測定

5.1 測定目的

現在、オーディオ機器としてバスレフスピーカが広く利用されている。バスレフスピーカとは、低域を強調することを目的としたスピーカであり、中～高域の周波数特性については必ずしも十分な配慮はされていない。

オーディオ機器としての実用上からはこの点は問題とならなかったが、測定用として用いる場合にはその適正をきちんと把握しておくことが必要になる。そして、不適切な特性が生じている場合には何らかの対策を行う必要がある。

本章においては、TSP を用いてバスレフスピーカの特性について測定を行い、バスレフホーンの与える影響とその原因、周波数特性の改善方法について評価、検討を行う。

5.2 スピーカの指向特性の測定

スピーカは聞く位置によって音の聞こえ方が変わる。この測定では、スピーカから出力される音がどのような広がりをもって進んでいくか測定する。

<測定方法>

無響室において、スピーカ側から見て正面を0度とし、左へ+30度、+60度、右へ-30度、-60度というように、-90度から+90度までの地点（距離はそれぞれ1[m]）にマイクロホンをおき、TSP信号をならして音を測定する。測定はスピーカを無響室中央に固定し、マイクロホンを移動して行った。図5-2-1、5-2-2にスピーカの無響室内での測定位置を示す。

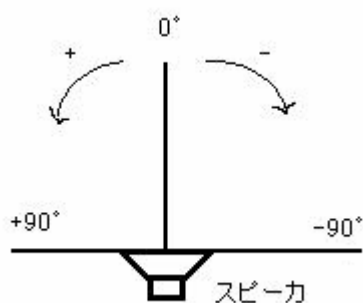


図 5-2-1 スピーカと角度

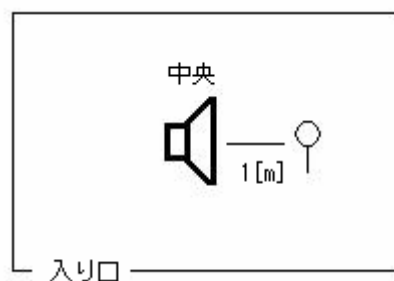


図 5-2-2 測定における位置

測定したデータを逆 TSP と畳み込んだ後 FFT を行って、それぞれ周波数特性を求める。以下にそれぞれの周波数特性を示す。

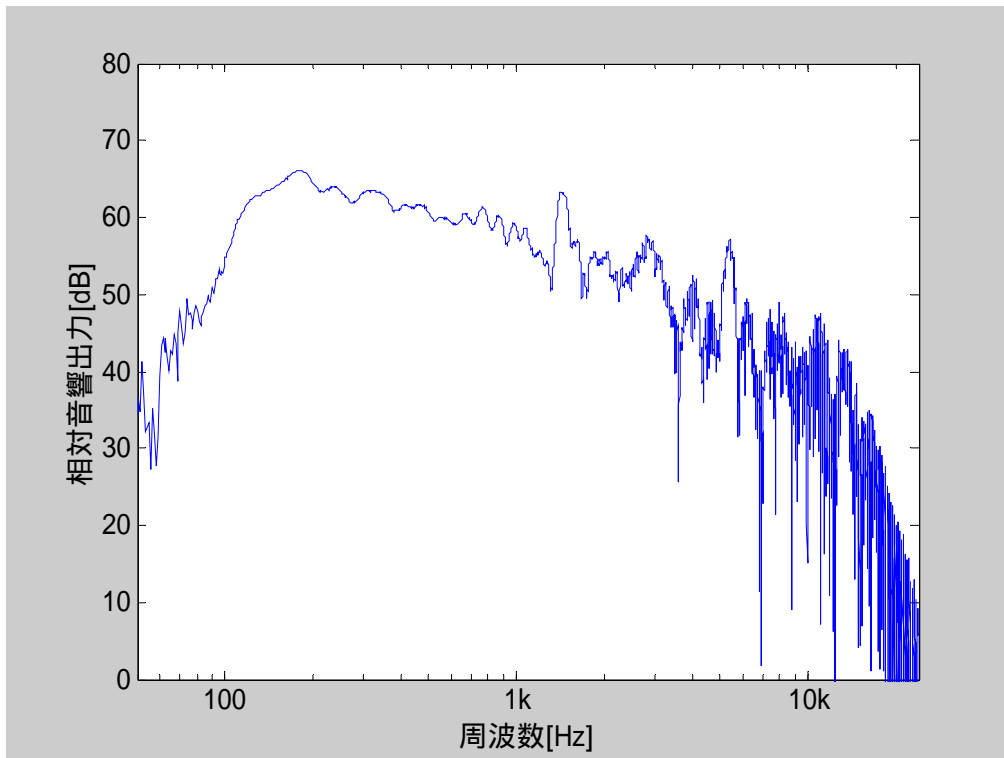


図 5-2-3 -90 度における出力の周波数特性

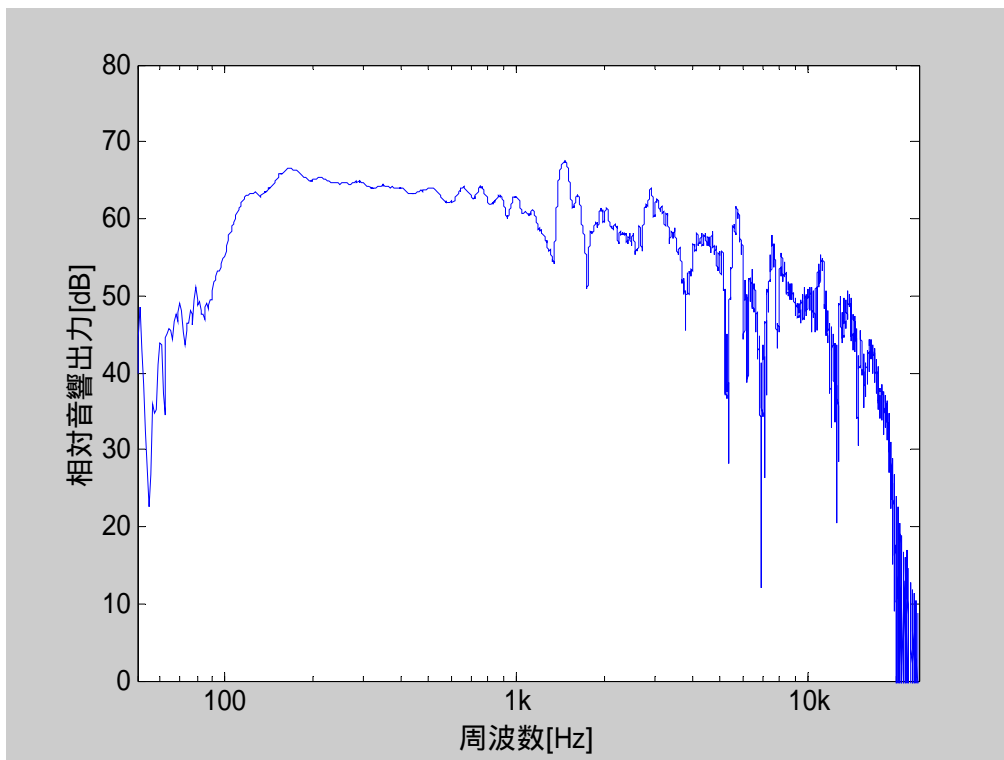


図 5-2-4 -60 度における出力の周波数特性

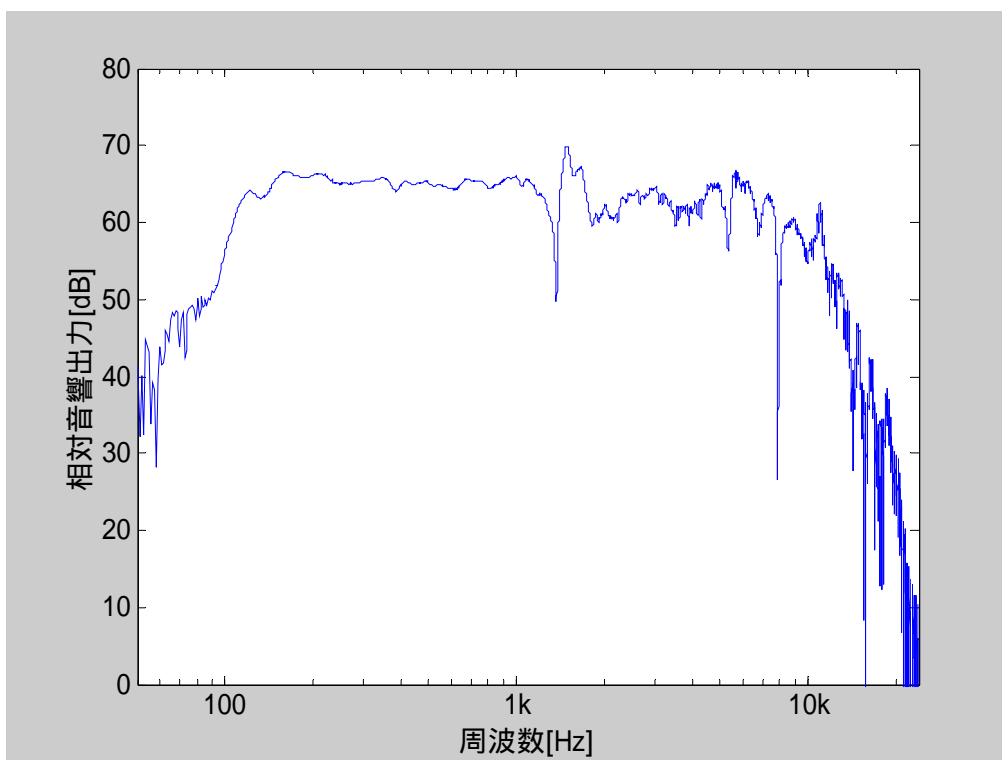


図 5-2-5 -30 度における出力の周波数特性

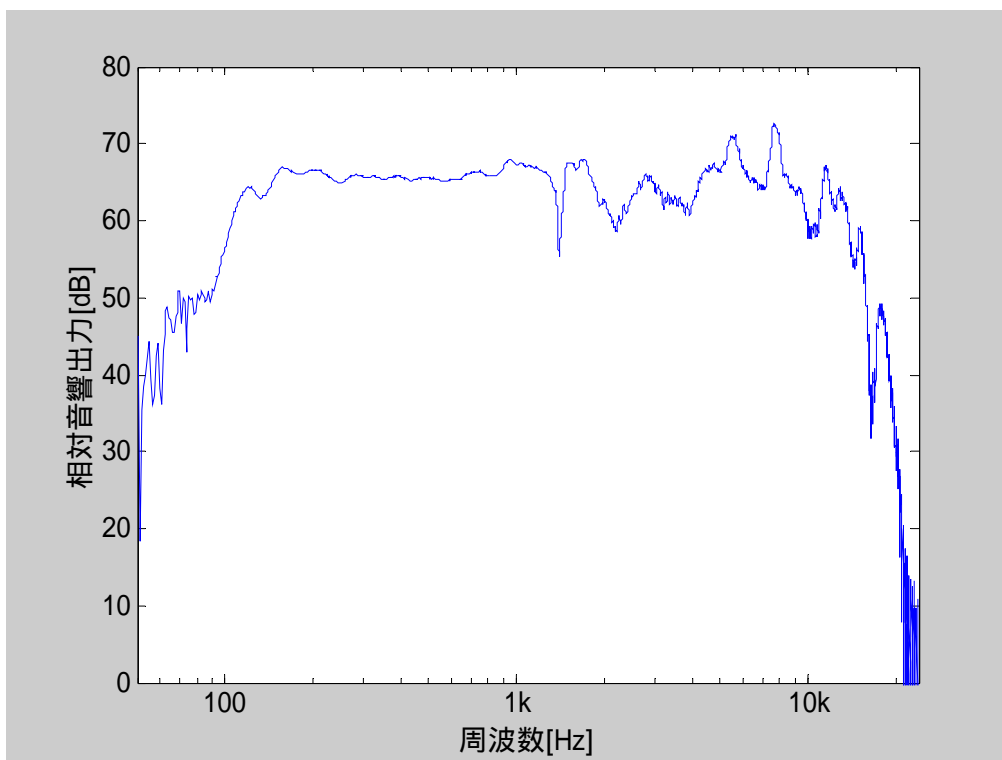


図 5-2-6 0 度における出力の周波数特性

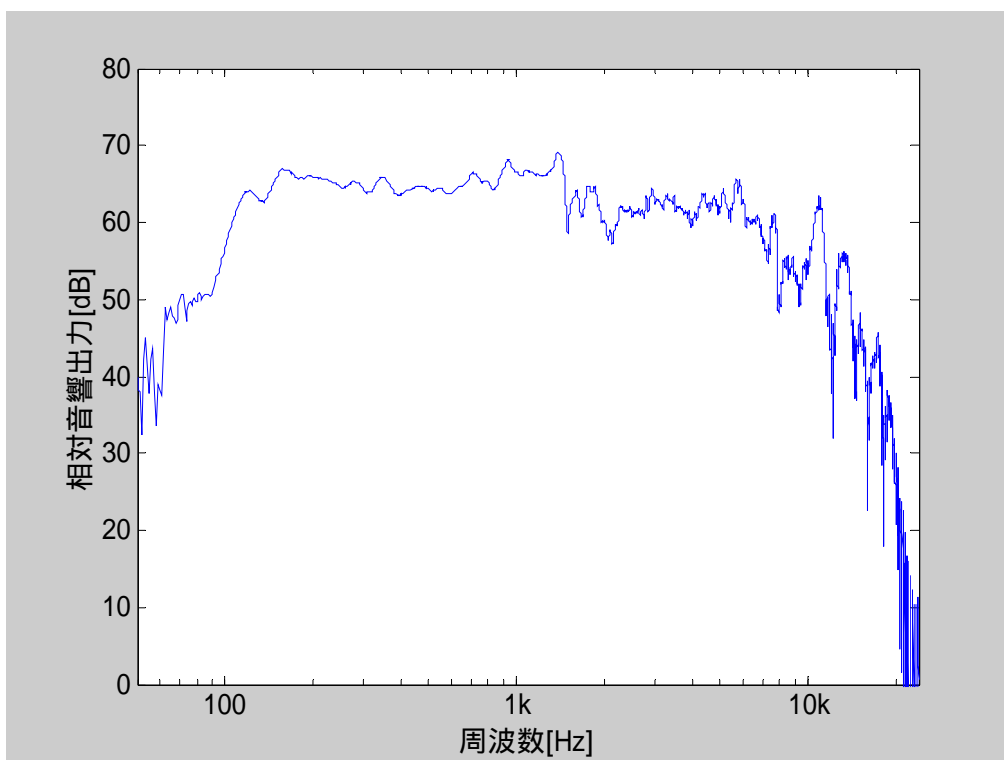


図 5-2-7 30度における出力の周波数特性

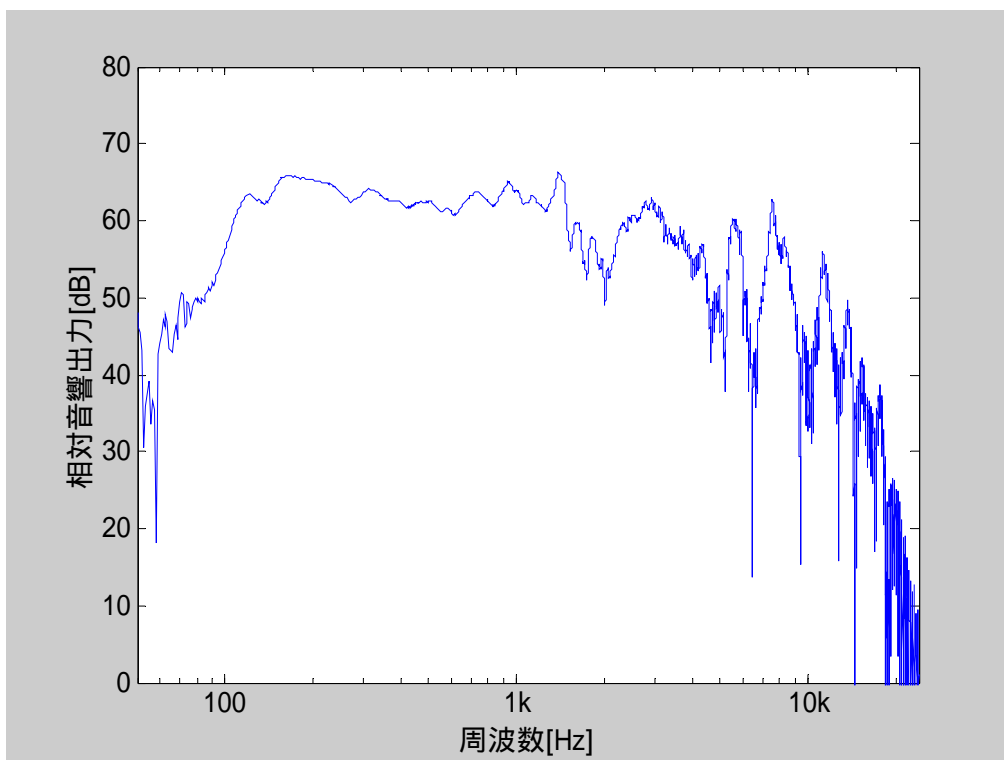


図 5-2-8 60度における出力の周波数特性

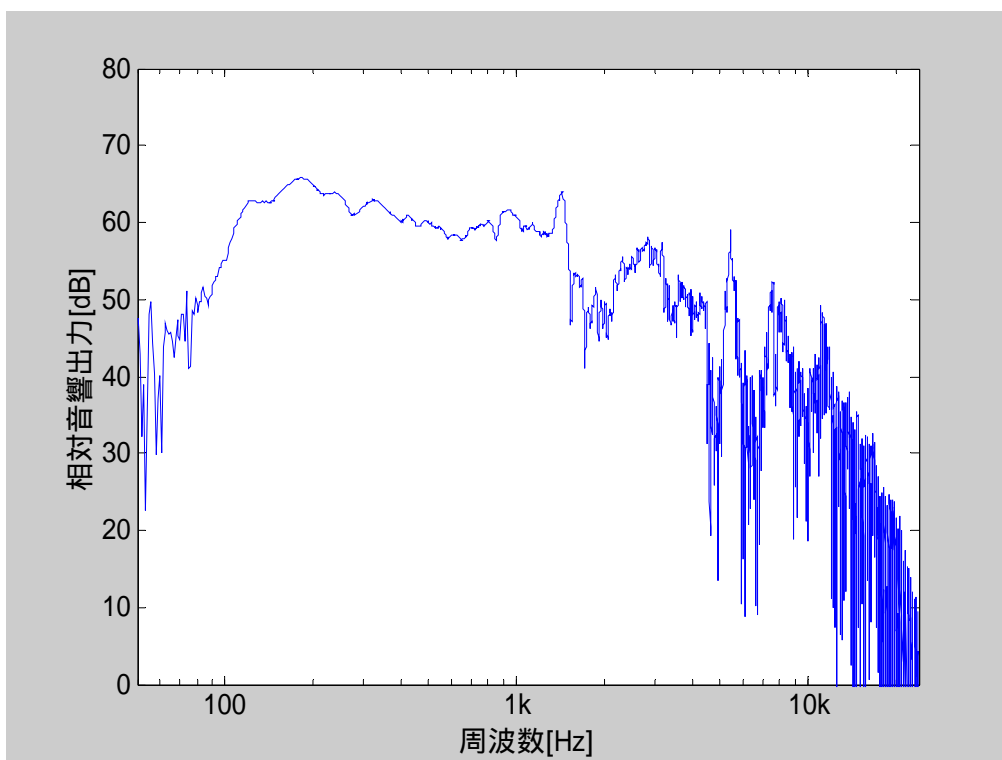


図 5-2-9 90 度における出力の周波数特性

測定結果より、角度によって特性に差があることがわかる。次に、特性の変化を比較するために $-90^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 、 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ での特性をまとめた図を示す。

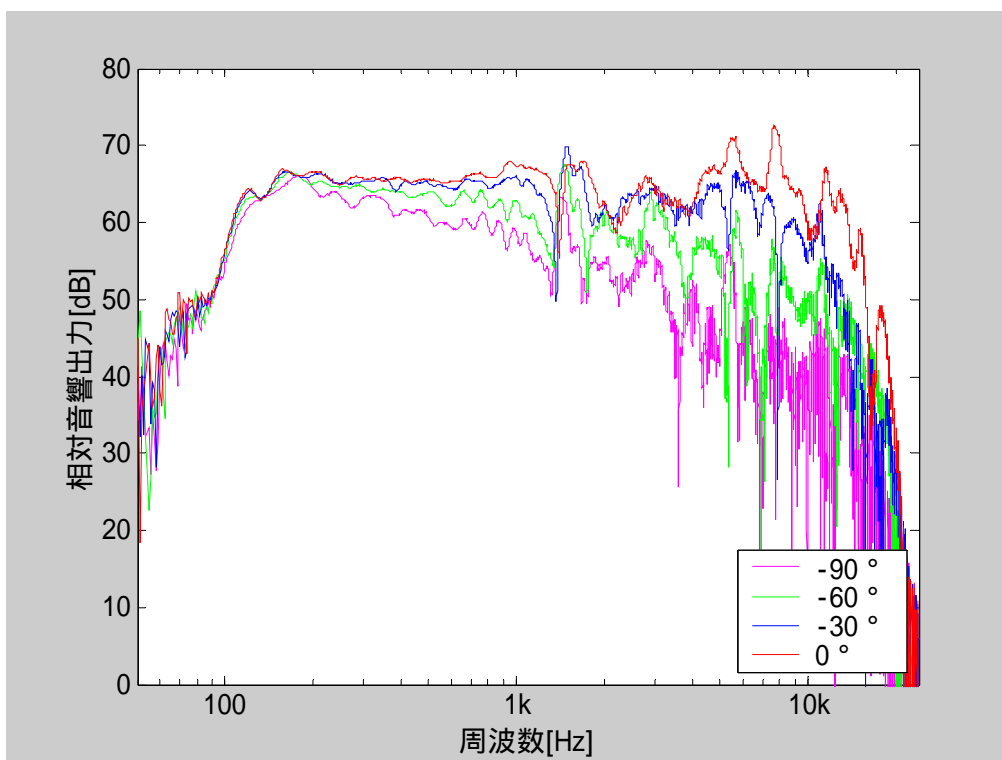


図 5-2-10 スピーカの指向特性 (-90° 、 -60° 、 -30° 、 0°)

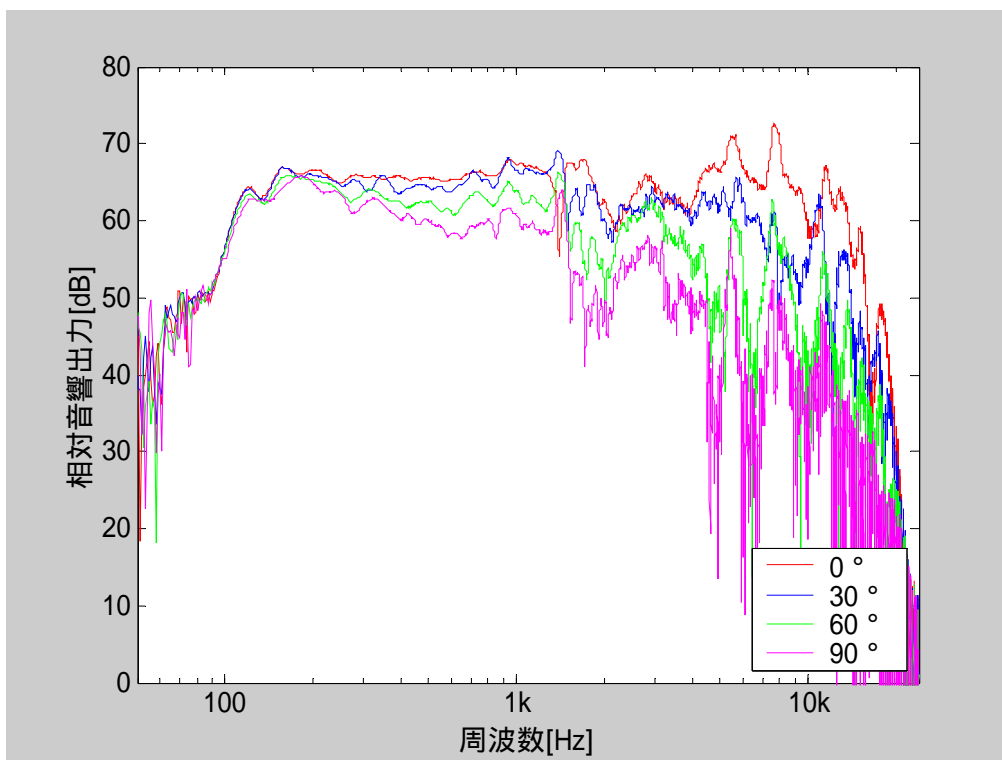


図 5-2-11 スピーカの指向特性 (0° 、 30° 、 60° 、 90°)

図 5-2-10、図 5-2-11 より、スピーカに対して 0° の位置にマイクロホンがある場合と -90° 、 $+90^\circ$ の位置にある場合では周波数特性にかなりの違いが確認できた。特に高域に顕著に見られる。この理由として、低域は波長が長いので音が広がりやすいのに対し、高域は波長が短いため指向性があり回折しにくいということが挙げられる。そのためスピーカから出された音は、低域は全体に広がっていくため -90° 、 $+90^\circ$ の位置にあるマイクロホンでも受音できるが、高域は広がらないために 0° の位置のマイクロホンでは受音できるが -90° 、 $+90^\circ$ の位置のマイクロホンでは受音できないのである。

測定に用いたスピーカ BOSE 101MM の特性の保証範囲は水平方向 130° である。これは正面に対して左右に 130° ということであり、測定条件に合わせると $-65^\circ \sim 65^\circ$ ということになる。測定結果を見ると、 -90° 、 90° のときが特に大きく落ち込んでいるが、これはスピーカ本来の指向特性から外れているためと考えられる。

次に、保証範囲内の周波数特性について見てみる。図 5-2-12 は -30° 、 0° 、 $+30^\circ$ における周波数特性を比較したものである。

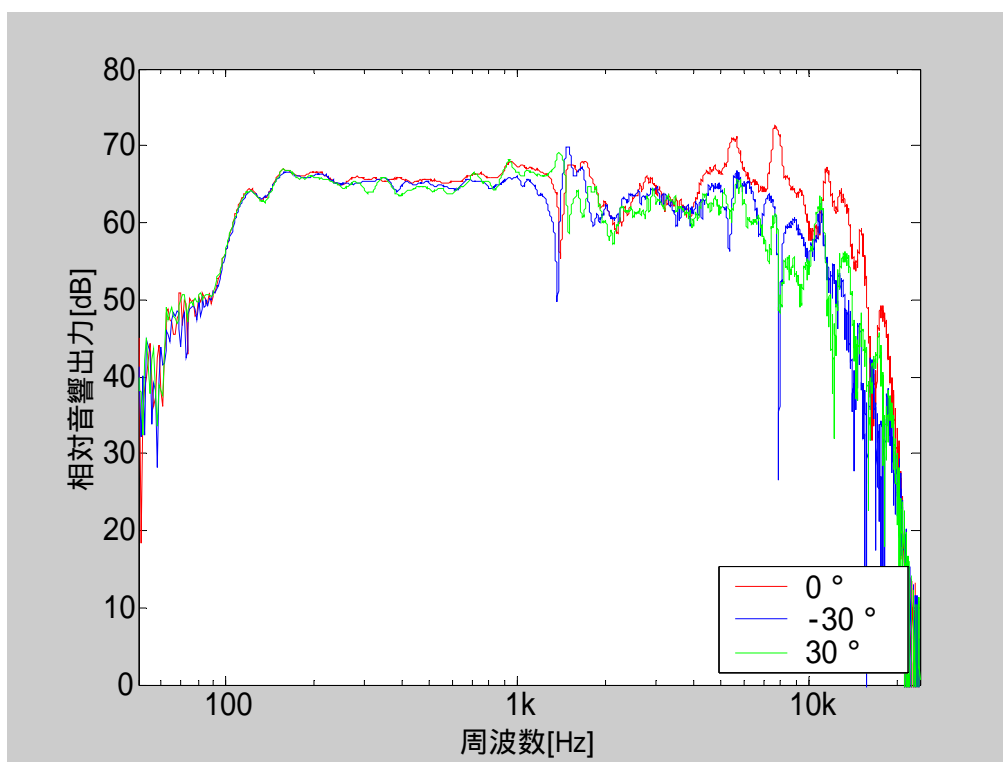


図 5-2-12 指向特性の比較

図 5-2-12 より、正面から 30° ずれた場合は、低域はそれほど特性の変化がないが、 1[kHz] あたりから違いが表れはじめることがわかる。高域になればなるほど、正面から外れるにつれ特性の落ち込みが大きくなる。次に、 1[kHz] あたりを拡大した図を示す。

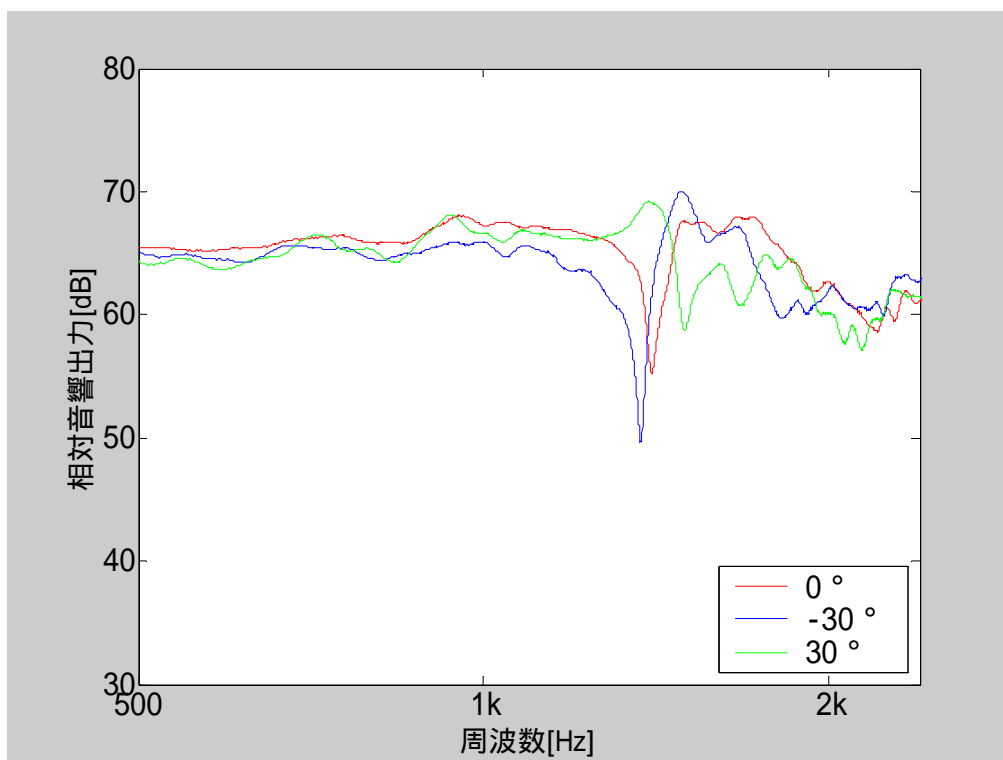


図 5-2-13 拡大図

図 5-2-13 より、1.5[kHz]あたりに特性の鋭い落ち込みが確認できる。このような周波数特性の谷は、ある特定の周波数成分が伝達されていないことを表しており、測定の目的には望ましいことではない。また、この落ち込みの周波数はスピーカとマイクロホンの角度に依存して異なった周波数となっており、特性の補正も容易ではない。

5.3 バスレフホーンの影響の測定

バスレフホーンが周波数特性にどのような影響を与えているのか測定により確認する。まず、バスレフホーンを塞いで測定を行う。さらに 5.2 節のデータと比較し、バスレフホーンに有無による周波数特性の違いについて考察する。

<測定方法>

無響室内にスピーカを 5.2 節と同様に配置した。マイクロホンは、スピーカ側から見て正面を 0 度とし、左へ+30 度、+60 度、右へ-30 度、-60 度というように-90 度から+90 度までの地点（距離はそれぞれ 1 m）に配置して、TSP 信号をならして音を測定した。スピーカのバスレフホーンは粘土*1)で密閉した。（図 5-3-1）



図 5-3-1 バスレフホーンに粘土を詰めた状態

測定したデータを逆 TSP と畳み込み、それぞれ周波数特性を求める。次ページより測定結果を示す。

*1) 粘土は文具店で購入した油粘土を使用した

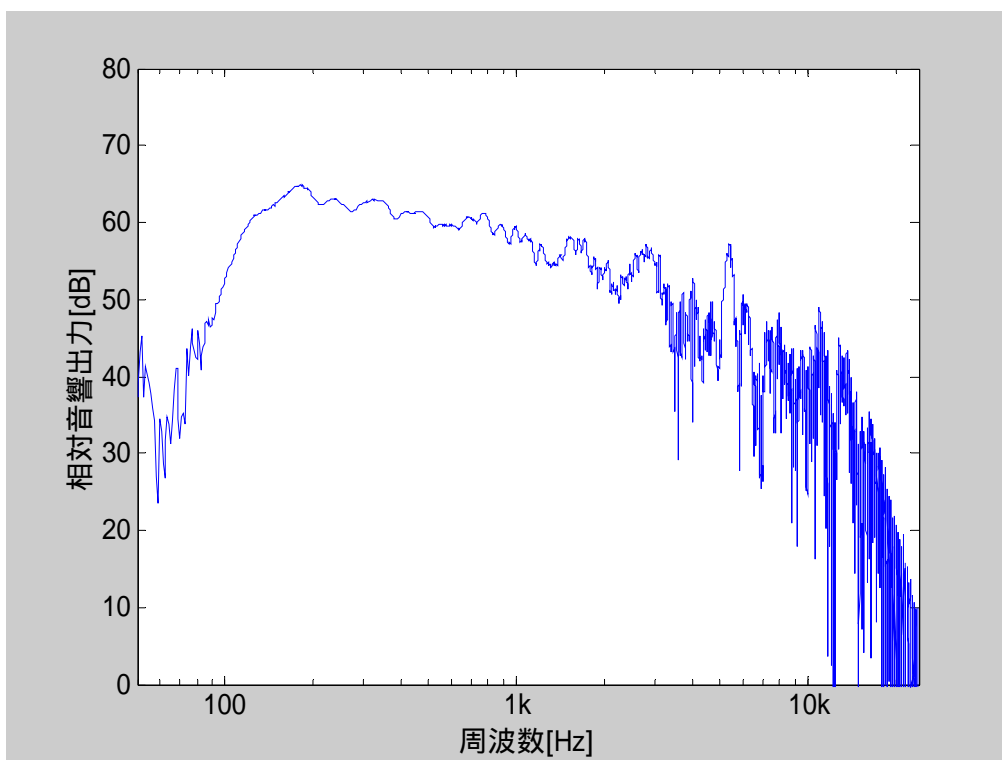


図 5-3-2 -90 度における出力の周波数特性

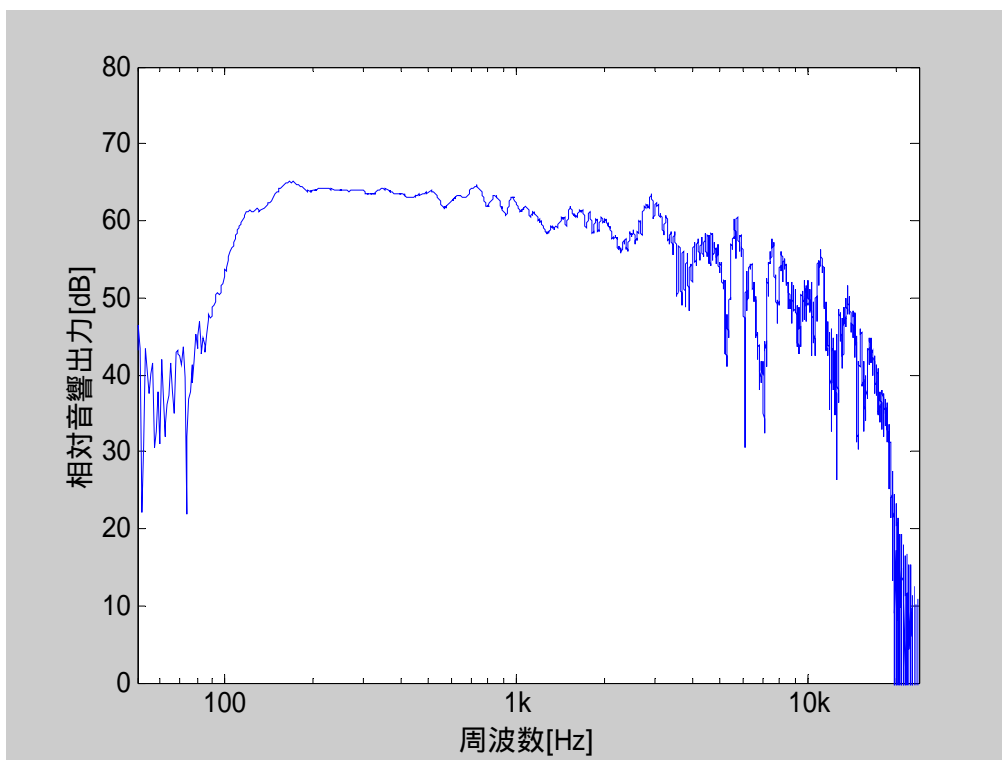


図 5-3-3 -60 度における出力の周波数特性

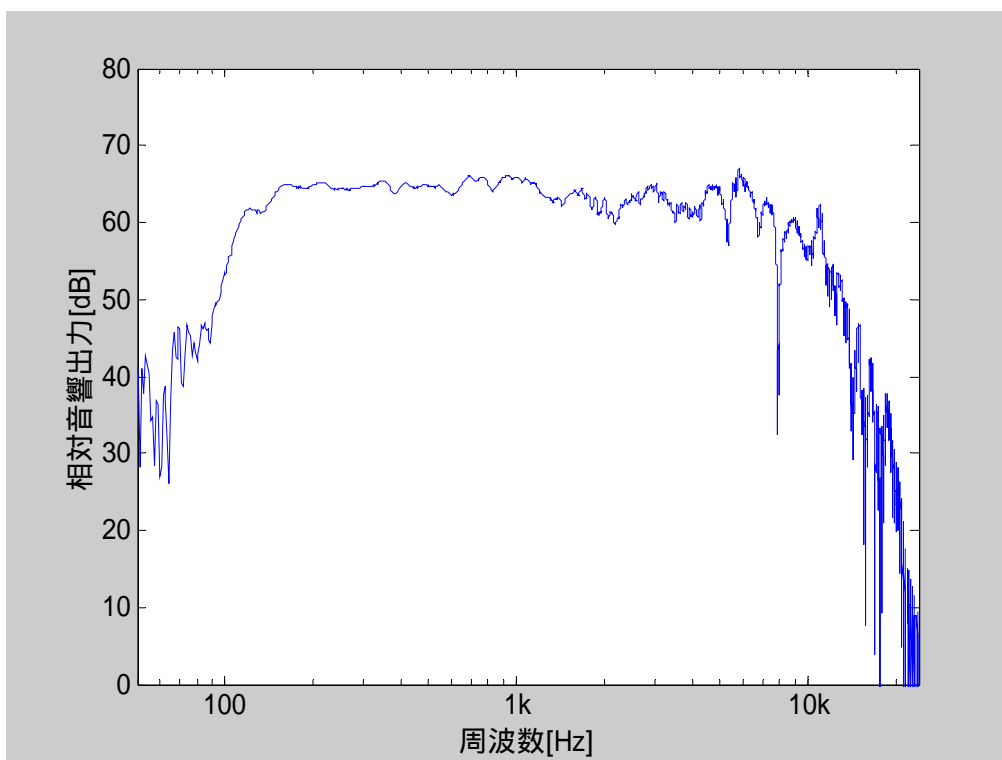


図 5-3-4 -30 度における出力の周波数特性

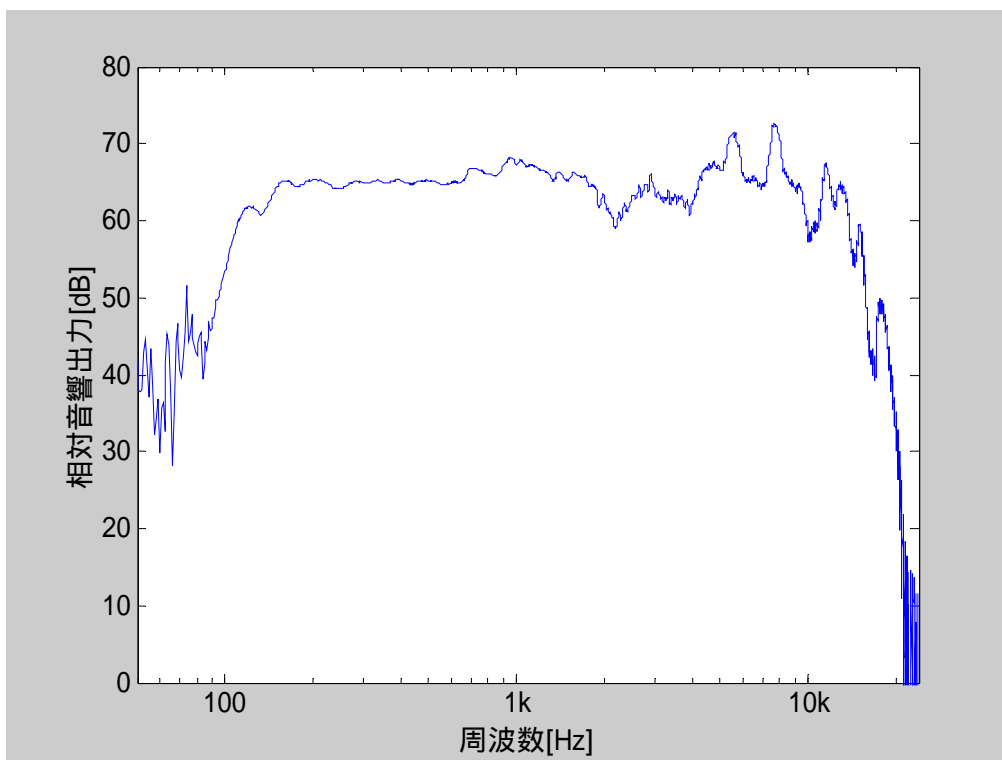


図 5-3-5 0 度における出力の周波数特性

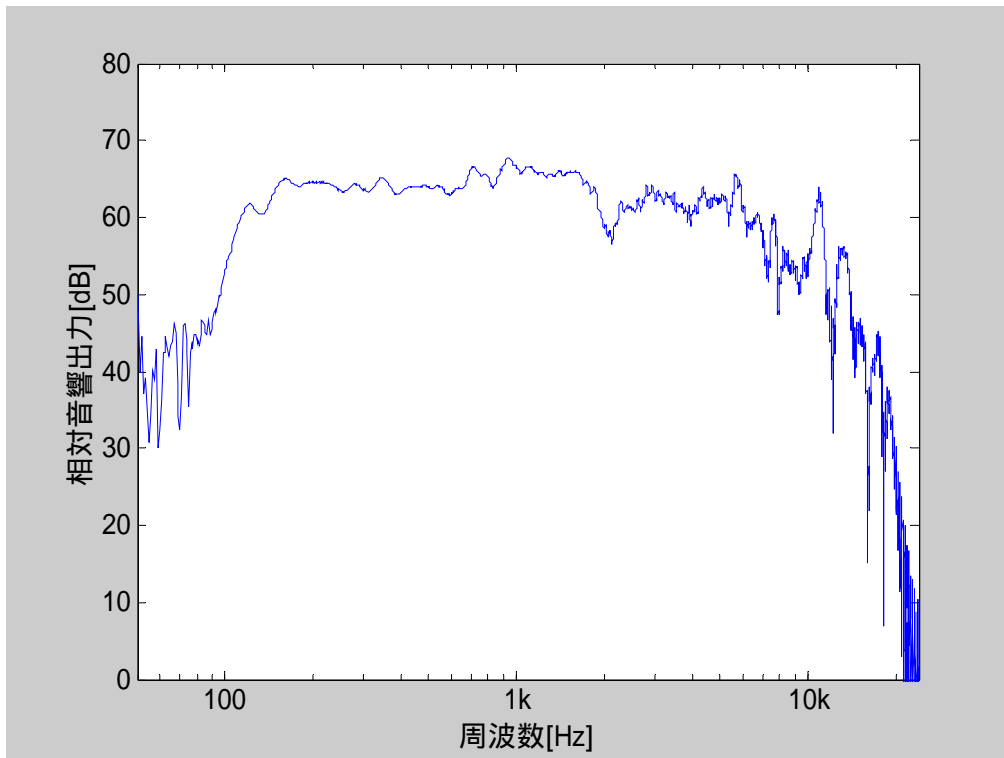


図 5-3-6 30 度における出力の周波数特性

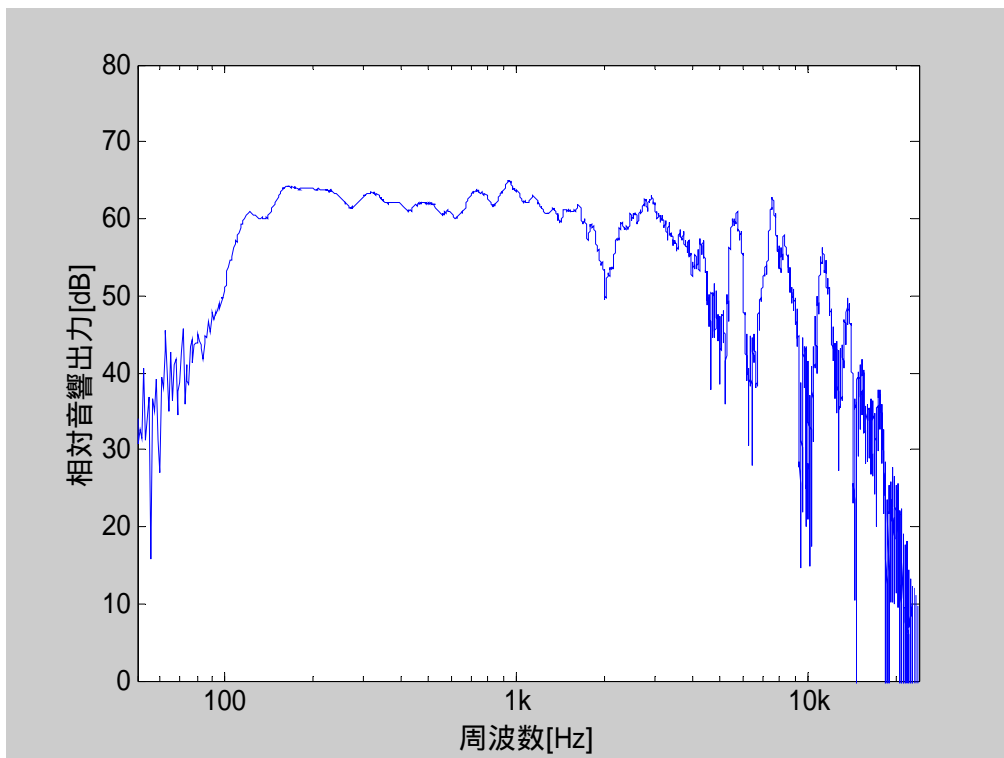


図 5-3-7 60 度における出力の周波数特性

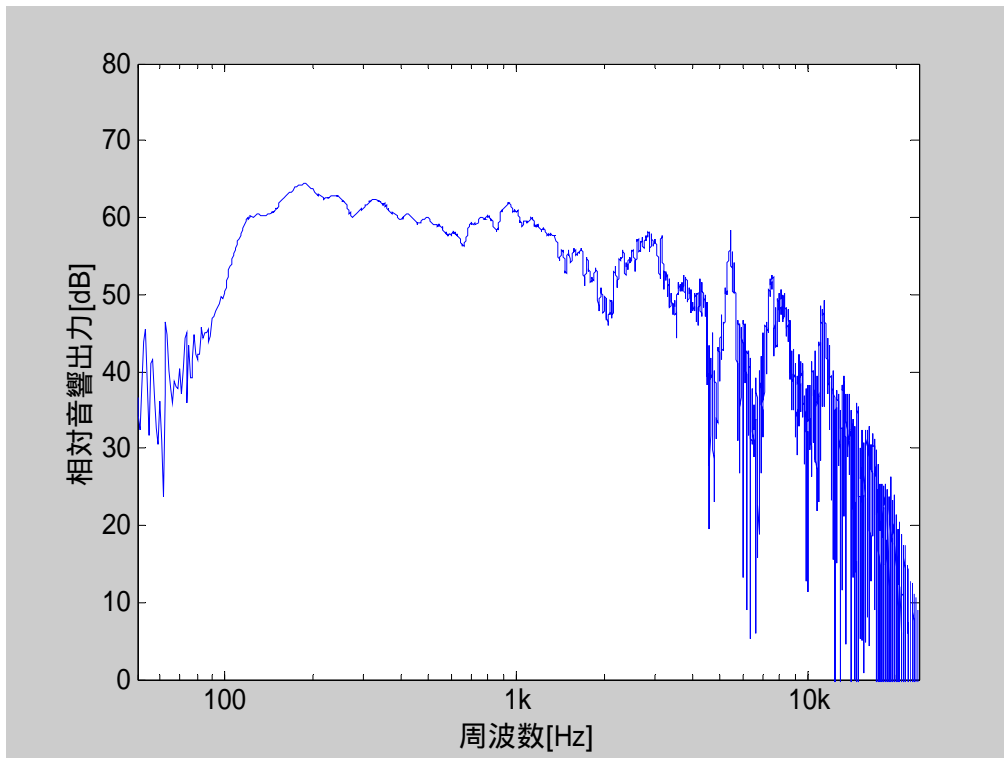


図 5-3-8 90 度における出力の周波数特性

5.2 節、5.3 節の結果より、バスレフホーンの影響を考察する。例としてスピーカの正面で測定したデータを用い、バスレフホーンの有無により周波数特性にどのような違いがあるか比較する。図 5-3-9 はバスレフホーンの有、無の際における周波数特性のグラフである。

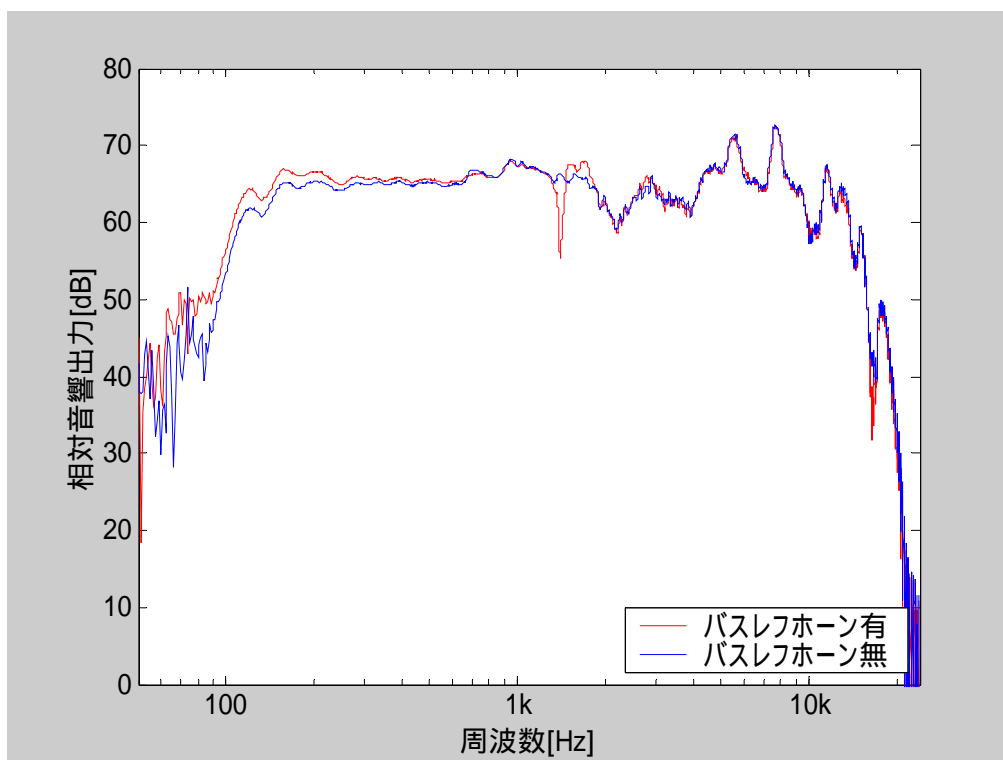


図 5-3-9 バスレフホーンの有無による周波数特性の比較 (0°)

この図より 100[Hz]から 200[Hz]あたりの低域に関してはバスレフホーンがあるときのほうが 2[dB]ほど特性がよくなっていることがわかる。しかし、1500[Hz]あたりの特性にも違いがでていることがわかる。次にこの 1500[Hz]あたりを拡大した図を示す。

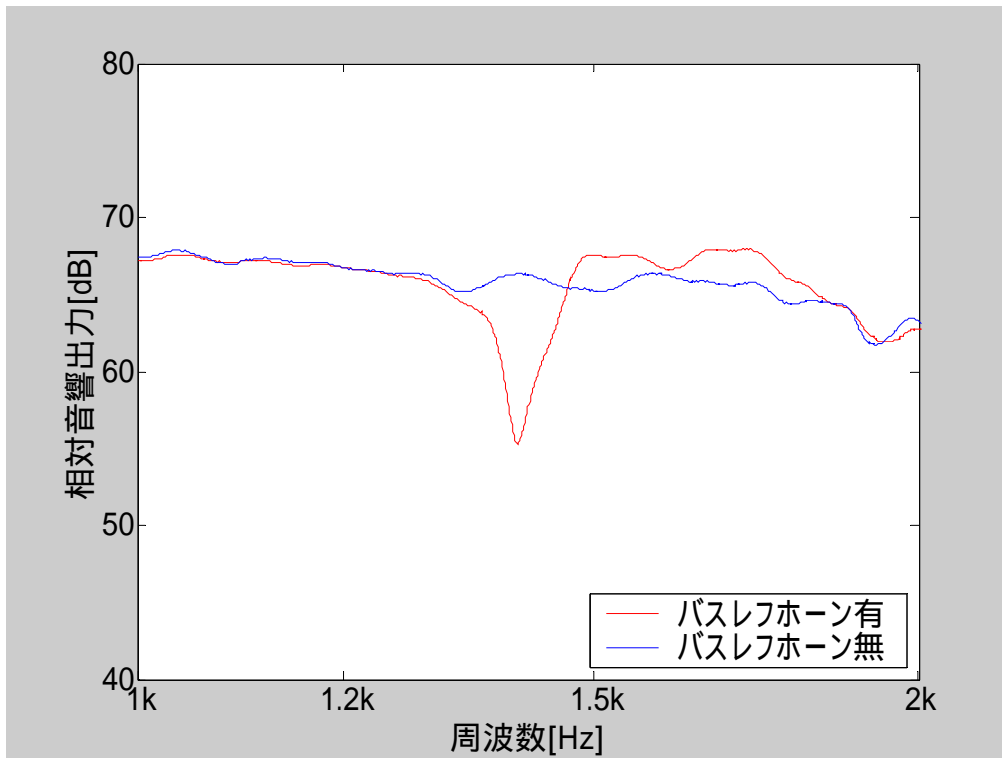


図 5-3-10 拡大した図

図より明らかにバスレフホーンがあるときのほうが特性が下がっていることがわかる。この原因としては以下のことが考えられる。

3.4.2 項でも述べたように、スピーカユニットから出された音はエンクロージャを通りホーンからも排出される。このとき、低音はスピーカ背面からの音は2分の1波長だけ遠回りしてホーンから放出され、本来のユニット前面からの音と重なって、重ならないときに比べて強い音になる。このため低域が強調される。しかし、本来強調されなくてもよい音域の音もホーンから放出されてしまうため、特性が悪くなる部分が出てくるものと考えられる。

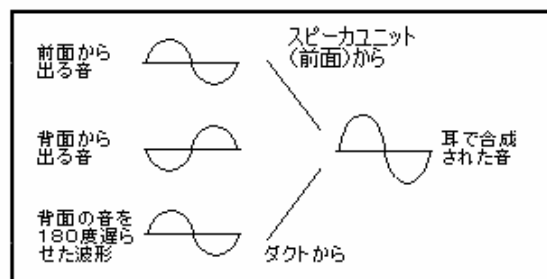


図 5-3-11 バスレフスピーカの仕組み

また、図 5-3-12 に正面から -30° ずれた時のバスレフホーンの有無による周波数特性の比較を示す。

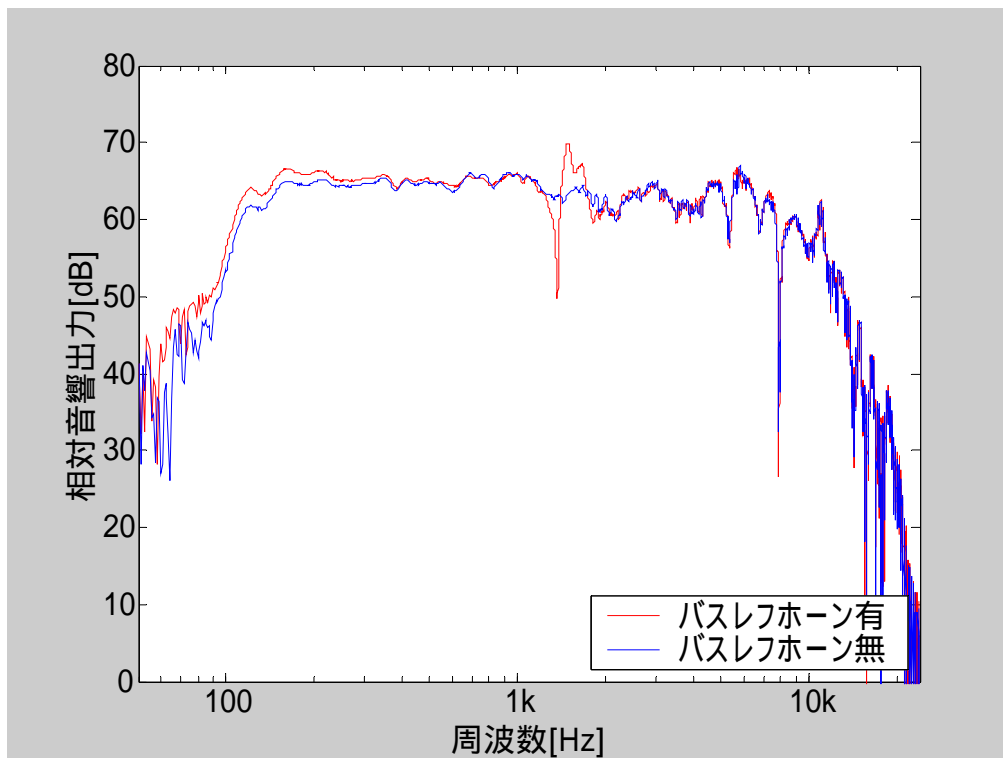


図 5-3-12 -30° ずれた場合のバスレフホーンの有無による周波数特性の違い

図 5-3-12 より、バスレフホーンがない場合はスピーカとマイクロホンの位置が正面でなくても特性の落ち込みが改善されていることがわかる。

5.4 特性の落ち込みの分析

特性が落ち込むということは、その周波数において、ホーンからの出力とスピーカからの出力が同振幅、逆位相となって打ち消しあっていると考えられる。スピーカユニットからの音とバスレフホーンからの音をそれぞれ測定、合成することにより、このことを確認する。

<測定方法>

無響室において、スピーカユニット直前（10[cm]手前）にマイクロホンを設置し、TSP信号をならして音を測定し、これをスピーカユニットからの出力とみなした。同様にバスレフホーン直前（10[cm]手前）にもマイクロホンを設置し測定し、これをバスレフホーンからの出力とみなした。無響室での測定風景を図 5-4-1 に、測定位置を図 5-4-2 に示す。



図 5-4-1 測定風景（スピーカユニットからの出力の測定）

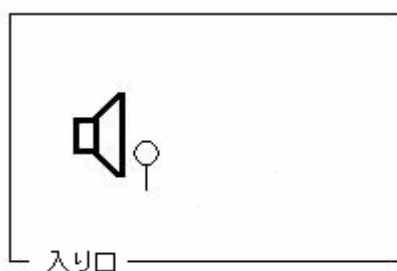


図 5-4-2 測定位置

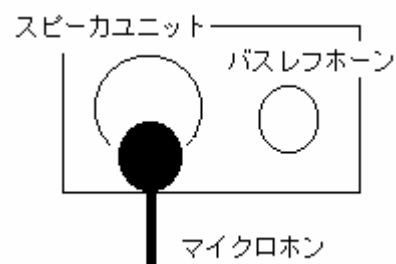


図 5-4-3 測定位置（正面から見た図）

以下に測定に使用したプログラムを示す。

```
%Program9
%ユニットからの音とホーンからの音を合成させる
```

```

Fs=48000;           %サンプリング周波数
N=24576;           %TSP の長さ

h1=wavread('ファイル名'); %原音

hh1=wavread('ファイル名'); %スピーカユニットからの出力
hh2=wavread('ファイル名'); %バスレフホーンからの出力

h3=h1(1001:N+1000);
h4=flipud(h3);      %原音の反転

c1=conv(hh1,h4);    %畳み込み(インパルス応答)
c2=conv(hh2,h4);

%2 つの出力の時間のずれを修正する
t=140;              %ずらす量
c22=zeros(1,t+(2*N-1));
c22(t+1:(2*N-1)+t)=c2(1:(2*N-1)); %ずらす分だけ先頭に 0 を挿入
c22=c22*0.8;        %振幅を変更

c11=zeros(1,t+(2*N-1));
c11(1:(2*N-1))=c1(1:(2*N-1)); %ずらす分だけ最後に 0 を挿入

c3=c11+c22;         %2 つの音を合成
c4=abs(fft(c3));    %合成した音を fft する

%周波数表示(Program7 参照)
Nfft=length(c3);
NNN=(Nfft+1)/2;

f1=(Fs/2)/(NNN-1);
XXX=0:f1:(Fs/2);
semilogx(XXX,20*log10(c4(1:NNN))); %dB に変換(片対数表示)
xlabel('周波数[Hz]');
ylabel('音響出力[dB]');

axis([50 24000 0 80]);

```

以下に、スピーカユニットからの出力、バスレフホーンからの出力それぞれの測定結果より求めた周波数特性を示す。

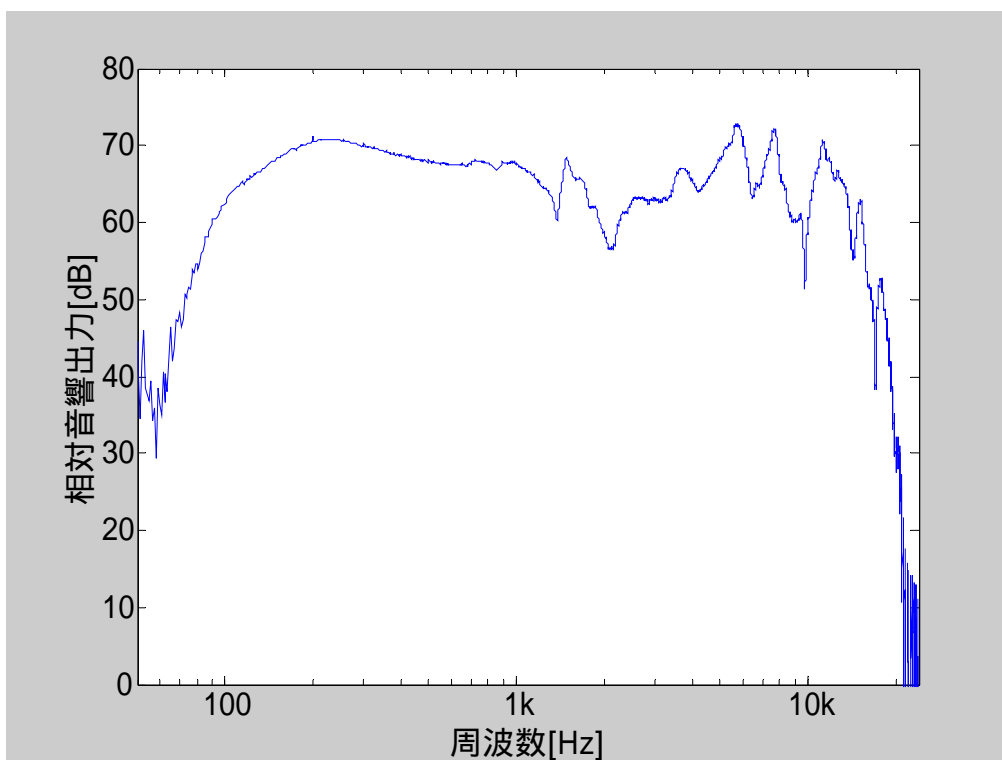


図 5-4-4 スピーカユニットからの出力

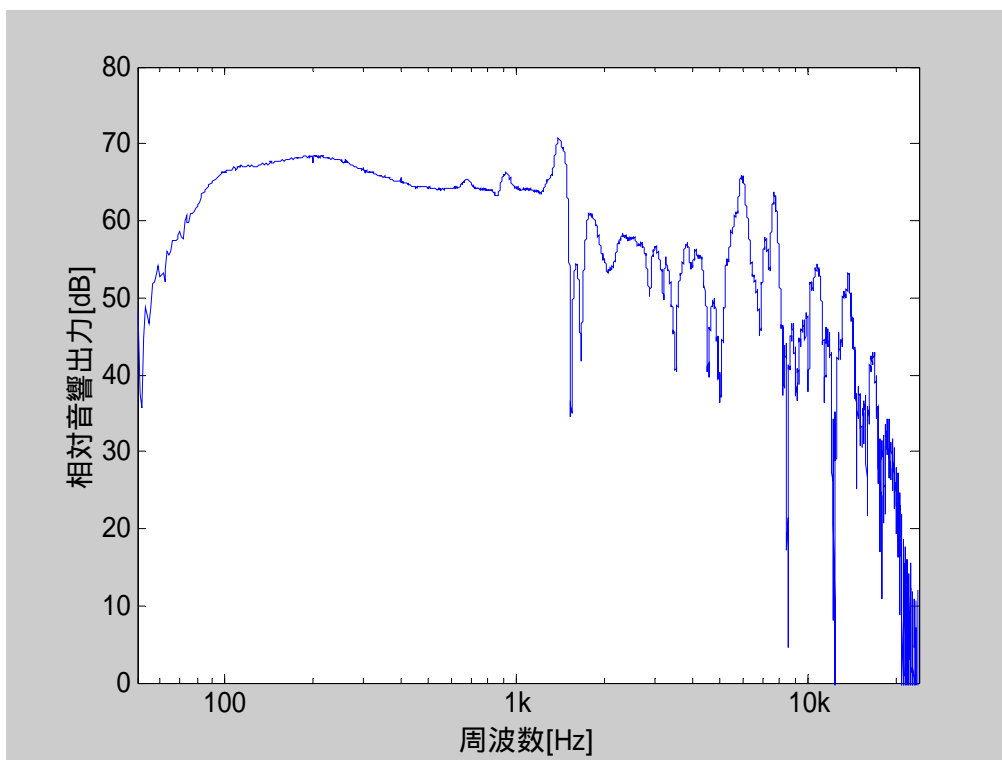


図 5-4-5 バスレフホーンからの出力

図 5-4-4、5-4-5 より、バスレフホーンから出る音は、1[kHz]までは振幅が同程度であることがわかる。バスレフにより低域は強調されていることから、位相がそろっているものと思われる。また、2[kHz]以上では、ホーンからの出力が低下しているため、逆相になったとしても打消しが生じない。1.3[kHz]あたりでは、ほぼ振幅が等しく位相が逆相となっており、周波数特性の落ち込みが生じているものと思われる。

次に、これら 2 つを合成することにする。

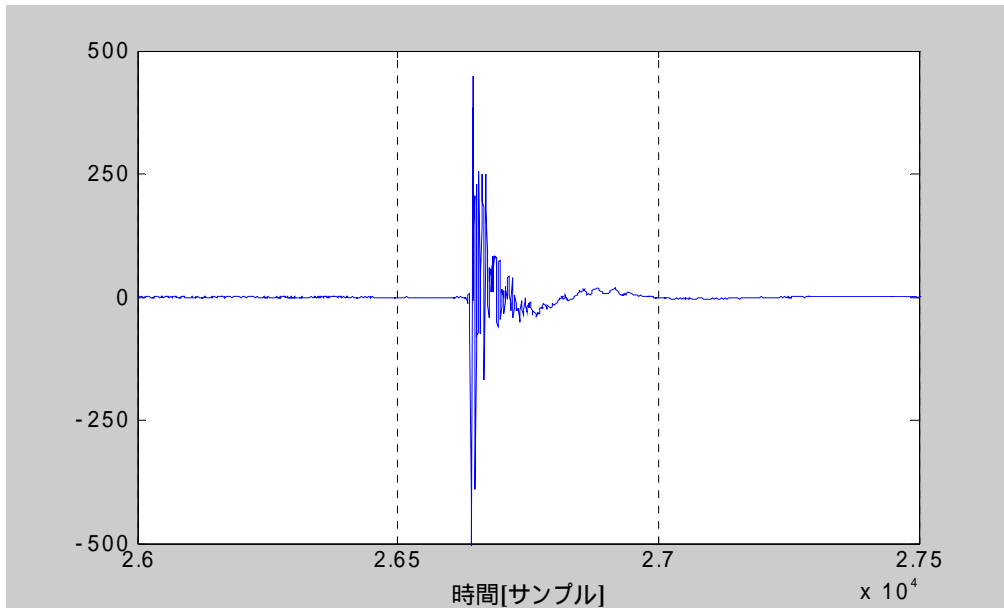


図 5-4-6 ユニットからの出力のインパルス応答

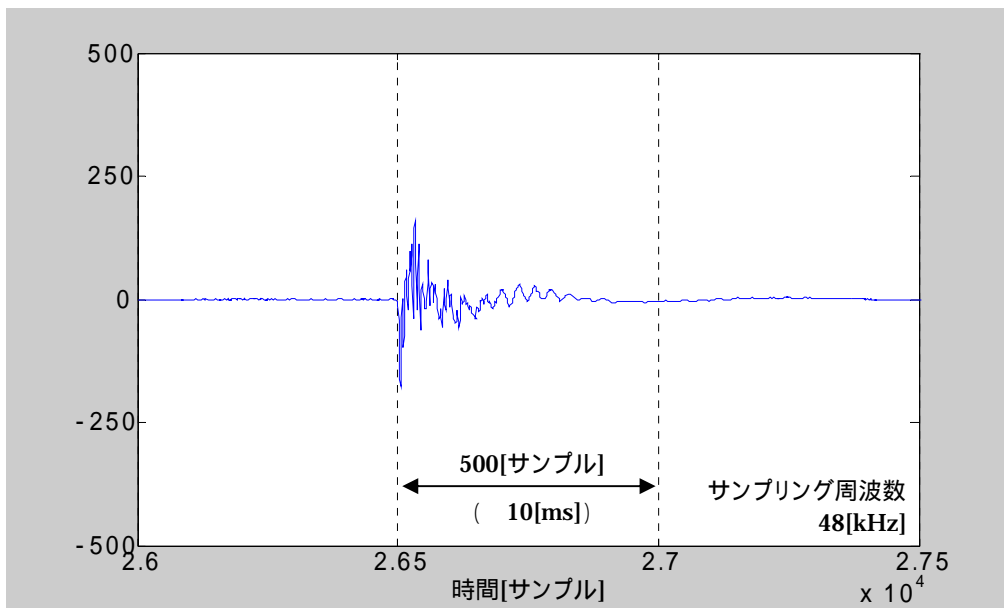


図 5-4-7 ホーンからの出力のインパルス応答

図 5-4-6、5-4-7 にそれぞれの出力のインパルス応答を示す。この 2 つを比較してみると、時間にずれがあることがわかる。そこで、合成するにはこのずれを修正したうえで合成を行う。

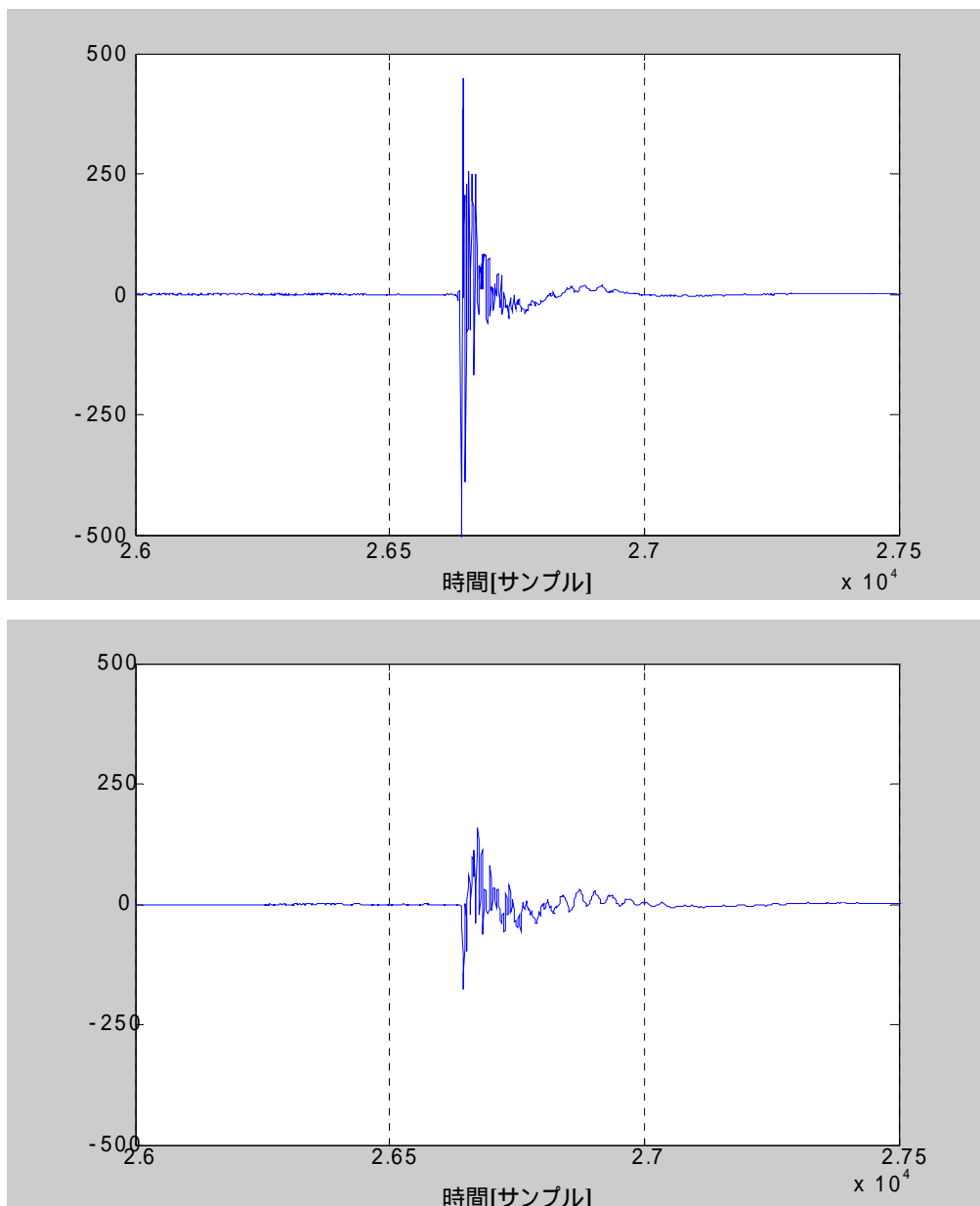


図 5-4-8 時間のずれを修正したインパルス応答

図 5-4-9 よりスピーカユニットからの出力とバスレフホーンからの出力を合成したものの周波数特性を示す。時間をずらした幅は 135[サンプル]、140[サンプル]、145[サンプル]とした。

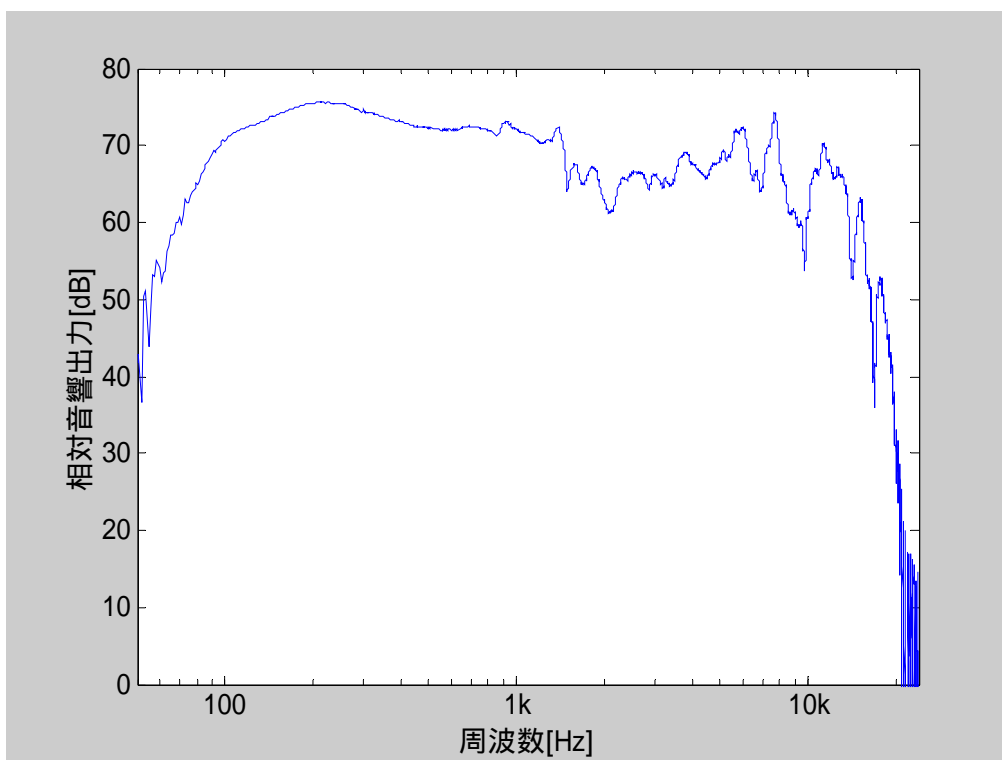


図 5-4-9 135[サンプル]ずらして合成した場合

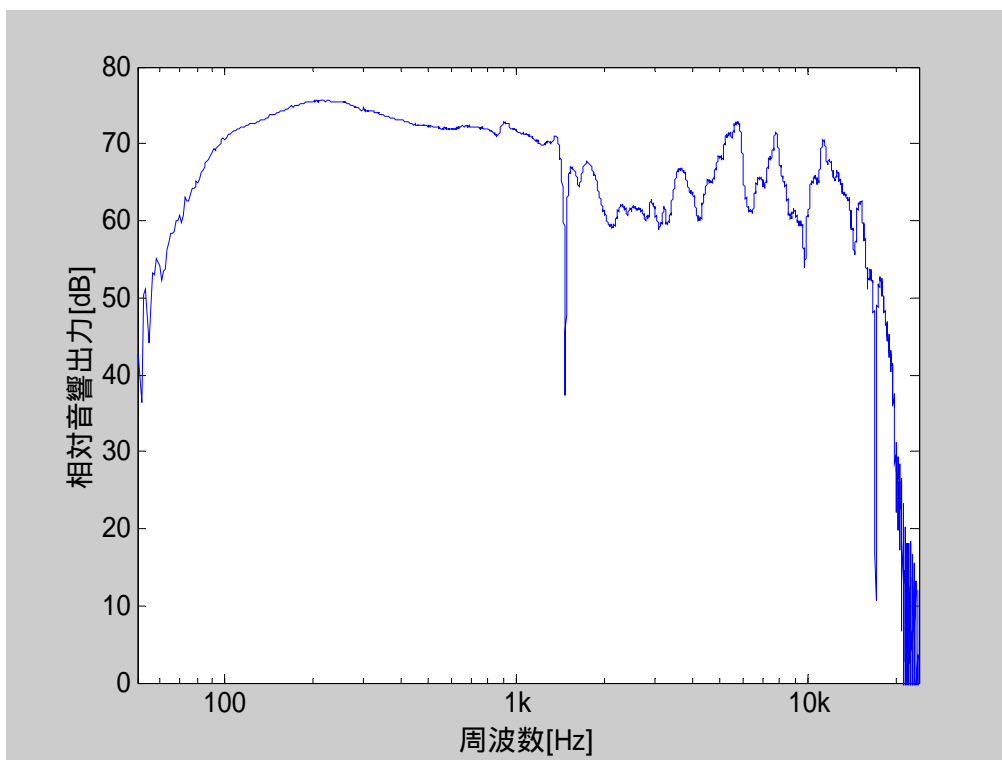


図 5-4-10 140[サンプル]ずらして合成した場合

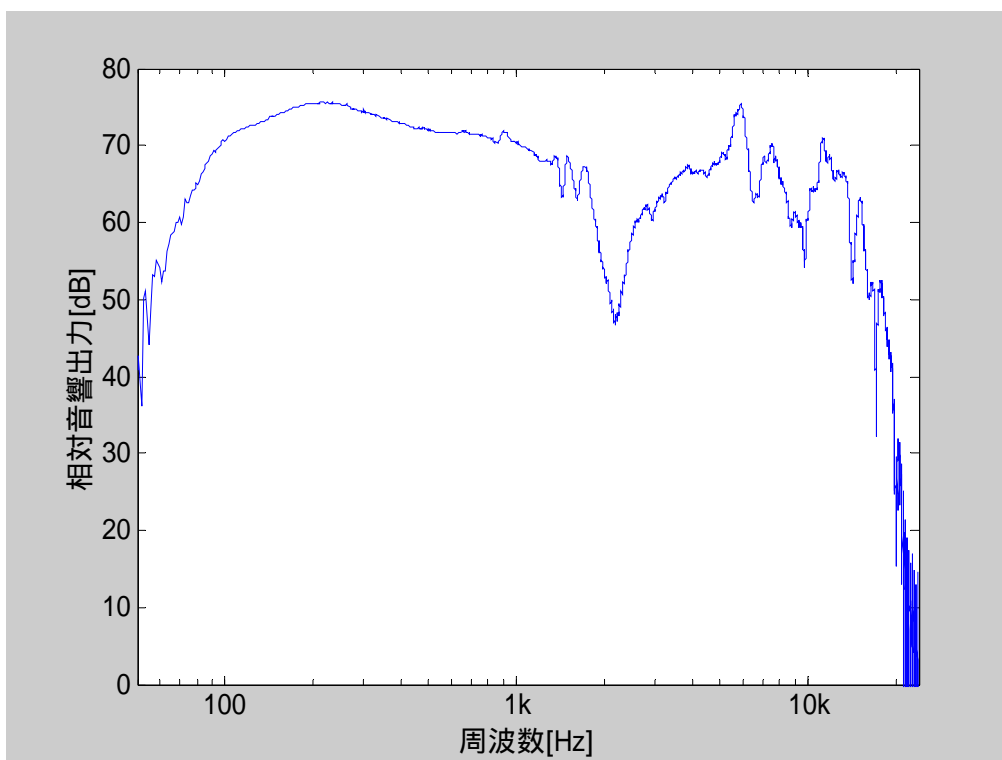


図 5-4-11 145[サンプル]ずらして合成した場合

以上図 5-4-9、5-4-10、5-4-11 より、ユニット、ホーンそれぞれからの音を合成する際、時間のずれも合成した音の周波数特性に影響を及ぼしていることが確認できる。5.2 節でスピーカとマイクロホンの角度により谷の位置が違っていたことも、このことが影響していると考えられる。

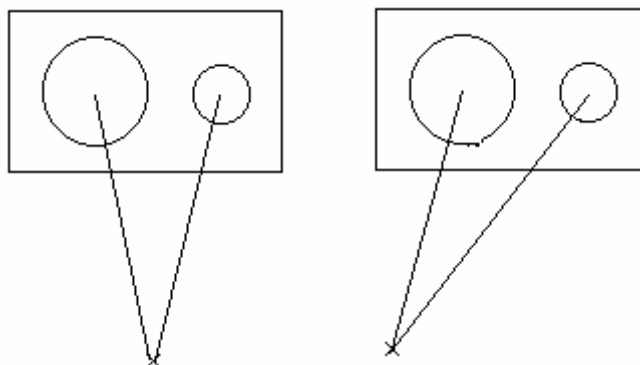


図 5-4-12 測定位置によるユニット、ホーンからの距離の違い

図 5-4-12 に示すように、測定位置が変わると、ユニット、ホーンそれぞれから測定点までの距離が変わる。実際の測定音はユニットとホーンからの音が測定点で合成されたものであるので、その音というのは音源からの距離に影響を受ける。距離が変われば、測定点に到着する時間も変わるので、結果として合成されるときに、それぞれの音がずれること

になる。そのため、周波数の落ち込む位置が変わると思われる。

この中でも 140[サンプル]ずらしたときが一番谷が深く、測定 1 における測定結果と近い
ためこれを利用して考察をすることにする。

スピーカの直前にマイクロホンを設置して音を測定したが、実際にはスピーカユニット
からの音大きい。そこで、バスレフホーンより測定された音の振幅を 0.7 倍して合成した。

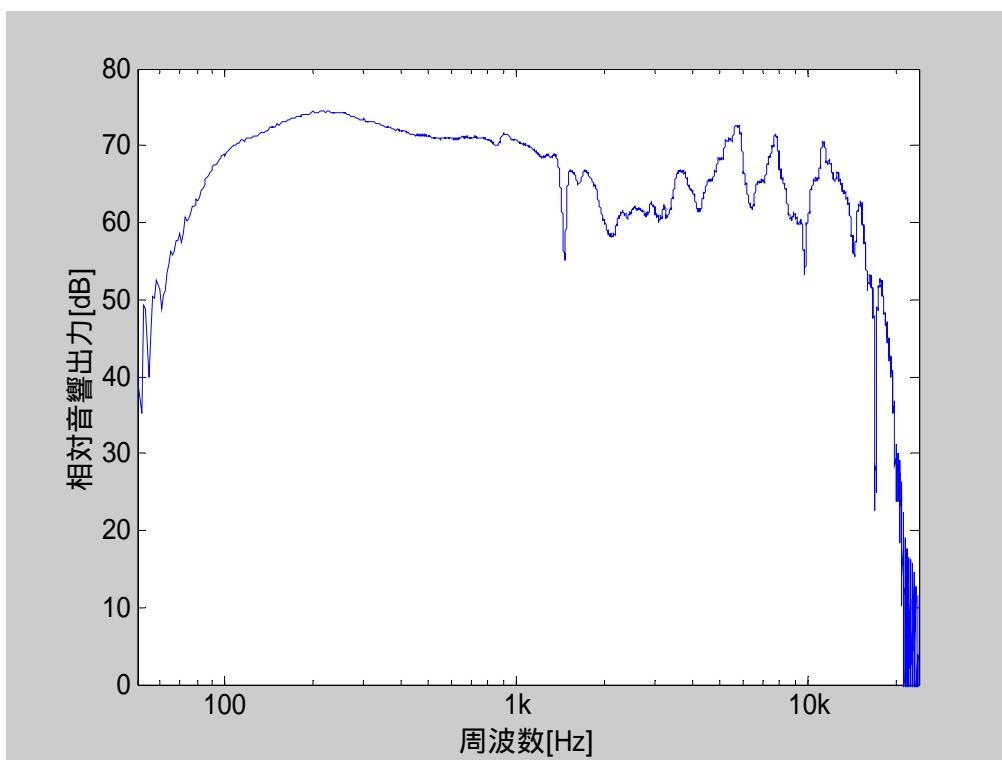


図 5-4-13 145[サンプル]ずらし、振幅を 0.7 倍して合成したもの

図 5-4-13 と図 5-2-6 を比較すると、特性の落ち込みの位置など、近いものとなっている
ことがわかる。このことから、特性の落ち込みはスピーカユニットとバスレフホーンから
の音を合成した際、ホーンからの音に含まれる高域の周波数成分が影響しているというこ
とが確認された。

5.5 周波数特性の改善

ホーンからでる音の高域の周波数成分を低減すれば、落ち込みを改善できると考えられる。そこで、エンクロージャとホーン内に吸音材をつめて測定を行う。吸音材は高域の音は吸音するため低減させるが、低域には影響が少ないためバスレフホーンの特徴を保持すると予測される。

<測定方法>

図 5-5-1 に示すように、エンクロージャ、バスレフホーンに吸音材として綿*2) を詰めた上で、TSP を鳴らして測定を行う。マイクロホンを無響室中央に設置した。音源とマイクロホンの位置は正面（図 5-5-2 参照）とし、距離は 1[m]とする。



図 5-5-1 エンクロージャとバスレフホーンに吸音材を詰めた様子

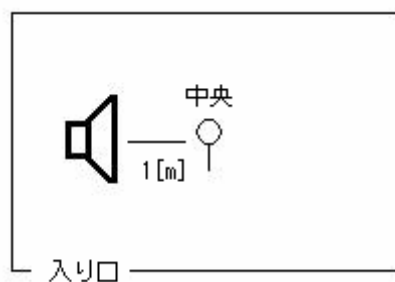


図 5-5-2 無響室における測定位置

測定結果を以下の図に示す。

*2) 綿は、御茶ノ水駅前のレモン画翠で購入、成分はポリエステル 100[%]のものを使用した

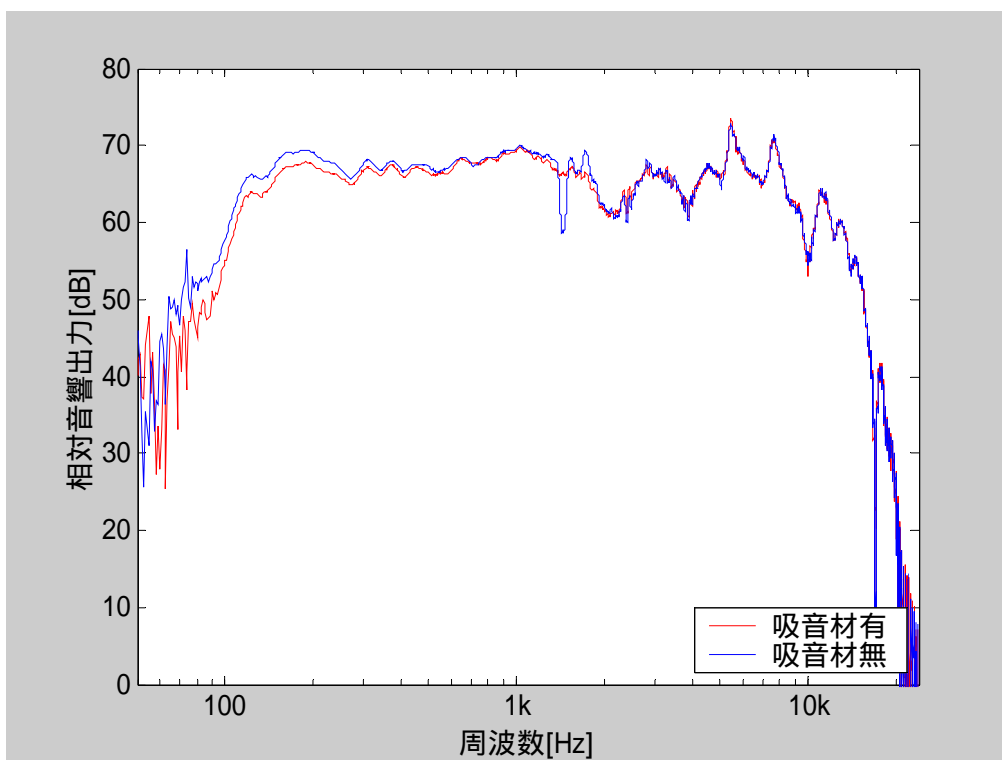


図 5-5-3 吸音材の有無による比較

2[kHz]付近までを拡大した図を以下に示す。

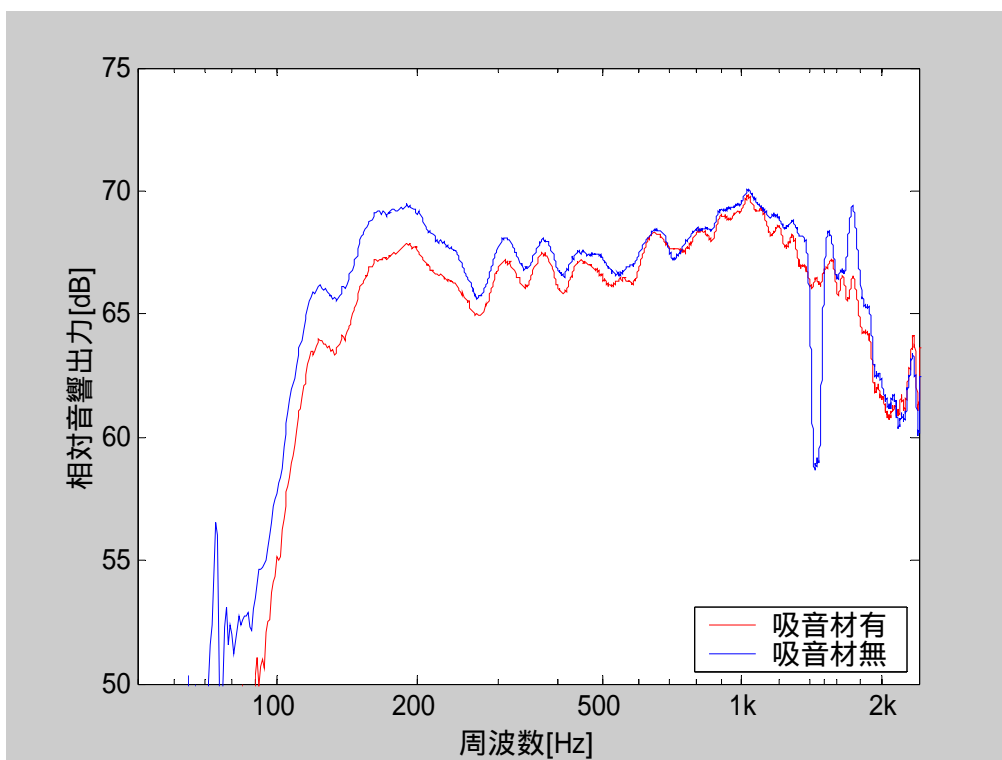


図 5-5-4 拡大図

図 5-5-4 より、バスレフホーンに粘土を詰めてふさがなくても、エンクロージャに吸音材として綿を詰めたことにより周波数特性の落ち込みが改善されたことがわかる。そこで、どの程度綿を詰めたときが一番特性がよくなるのか比較した。綿の量は次の表の通りとする。

表 5-5-1 吸音材の量

	多め [g]	少なめ [g]
エンクロージャ	10	4
ホーン	3	0.5

吸音材の詰め方は次の 4 通りとした。

1. エンクロージャ多め、ホーン多め
2. エンクロージャ少なめ、ホーン少なめ
3. エンクロージャ多め、ホーン少なめ
4. エンクロージャ少なめ、ホーン多め

以下にそれぞれの測定結果を示す。なお、比較対象として吸音材を詰めていない場合と比較してある。

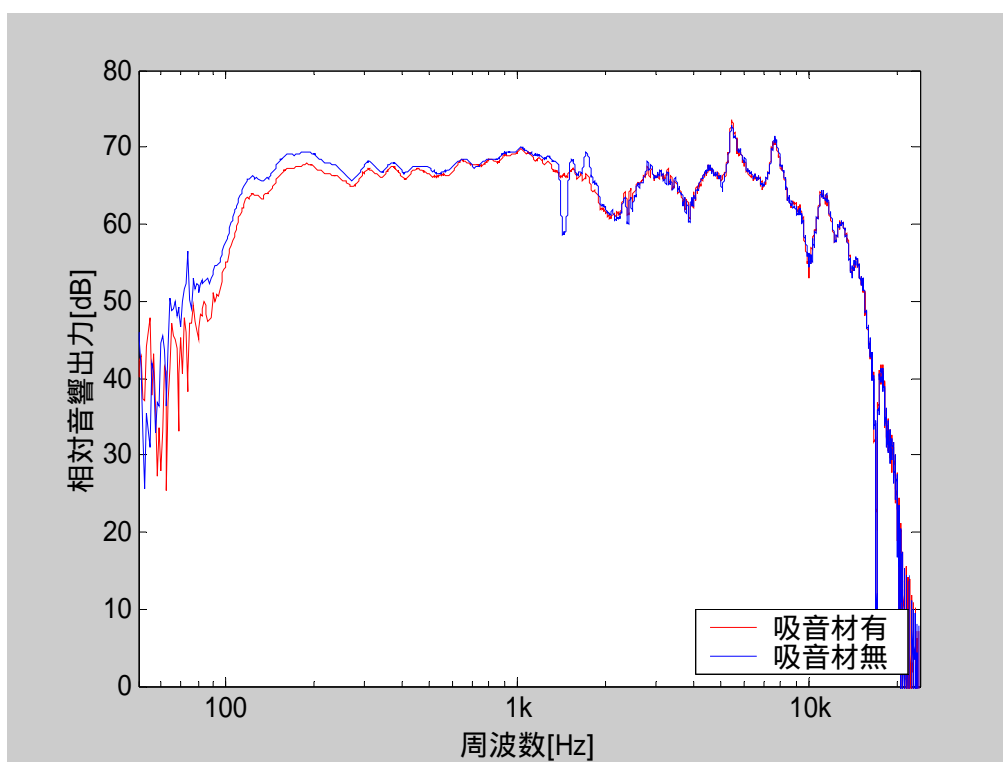


図 5-5-5 条件 1 : エンクロージャ多め、ホーン多め

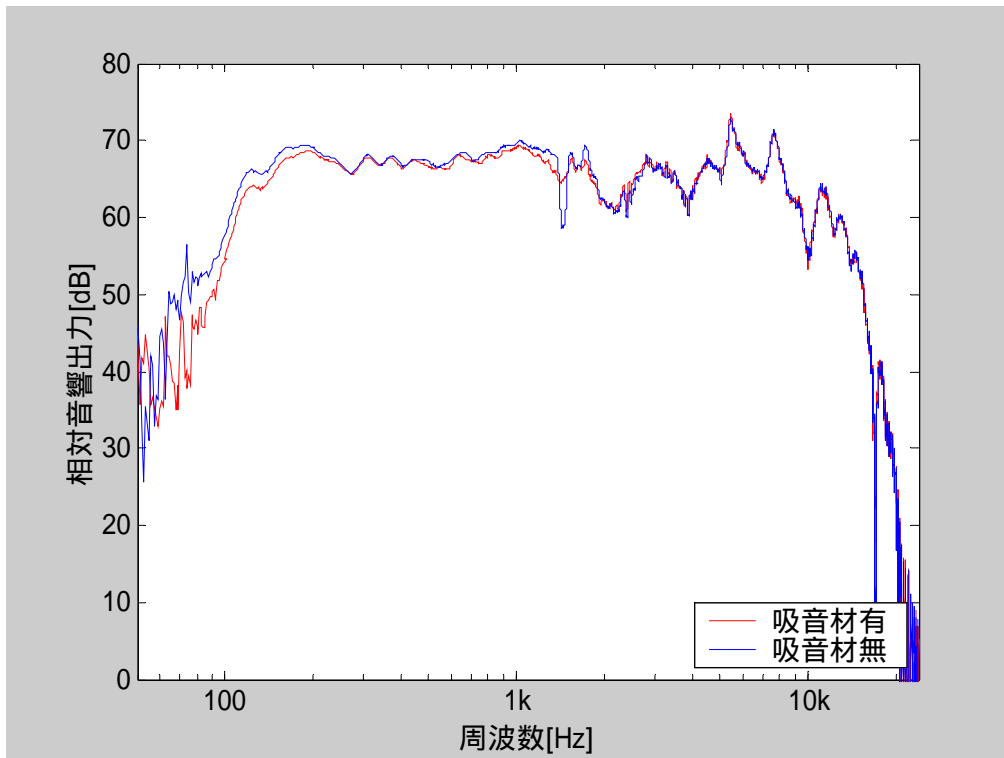


図 5-5-6 条件 2 : エンクロージャ少なめ、ホーン少なめ

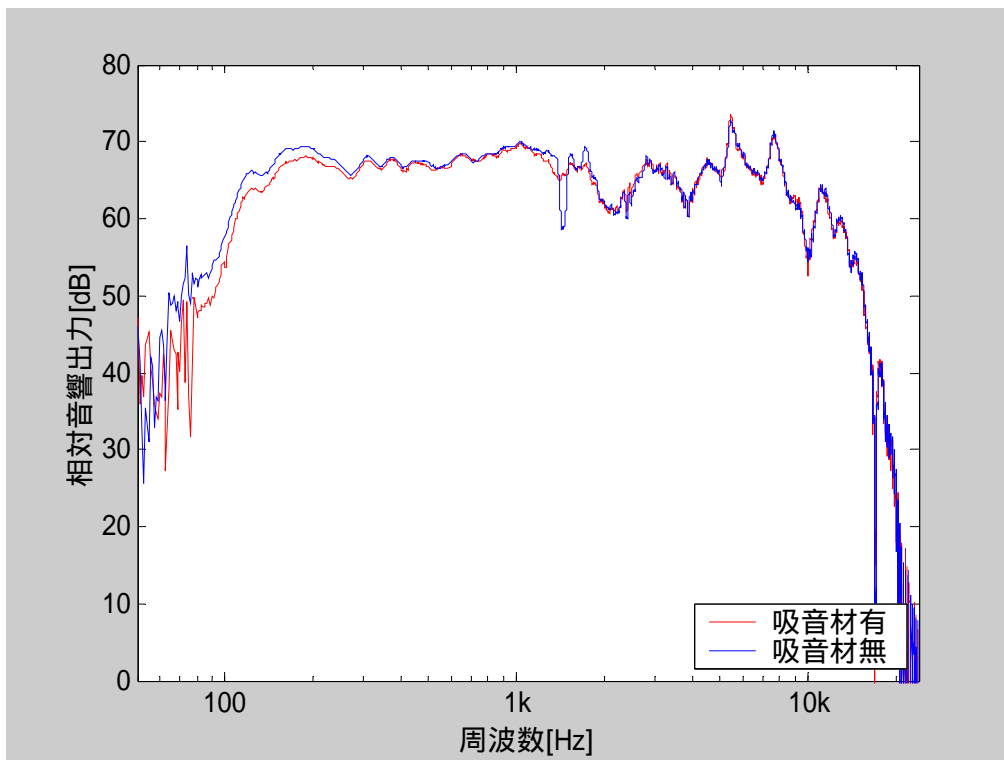


図 5-5-7 条件 3 : エンクロージャ多め、ホーン少なめ

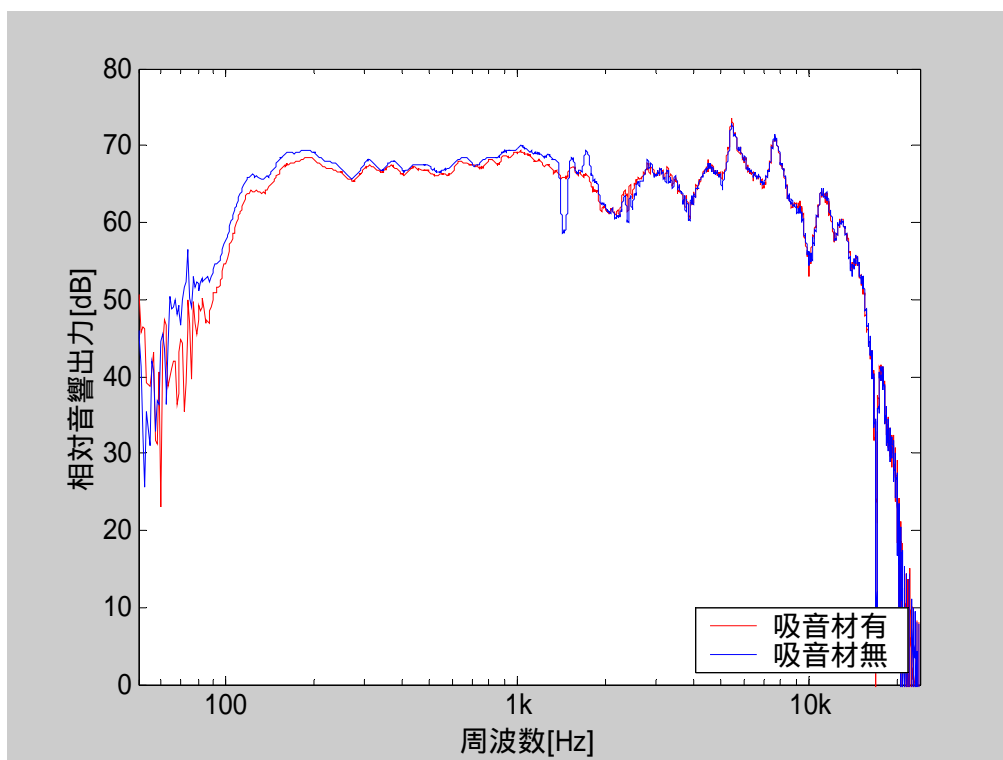


図 5-5-8 条件 4 : エンクロージャ少なめ、ホーン多め

図 5-5-5 から 5-5-8 は、エンクロージャとホーンに詰める吸音材の量を様々に変化させたものであるが、大きな差は見られなかった。そこで、エンクロージャのみ、ホーンのみ吸音材を詰めて測定を行うことにより、それぞれの吸音材の効果を確認する。

次に、エンクロージャのみ、ホーンのみ吸音材を詰めた場合の測定結果を示す。

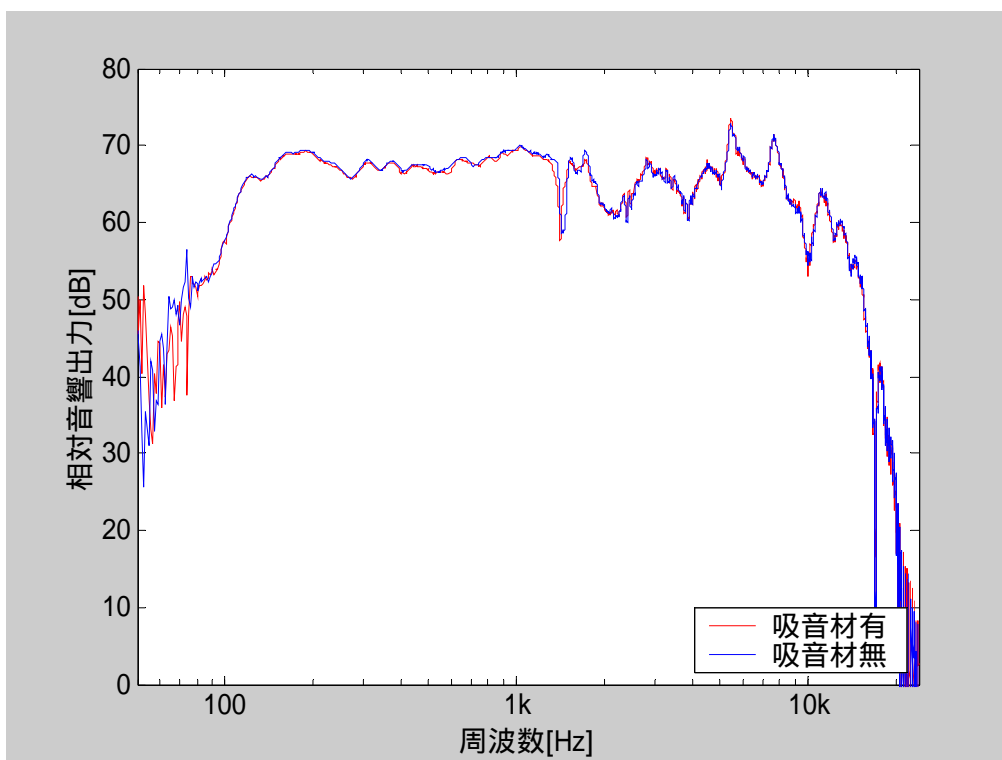


図 5-5-9 エンクロージャのみに吸音材を詰めた場合

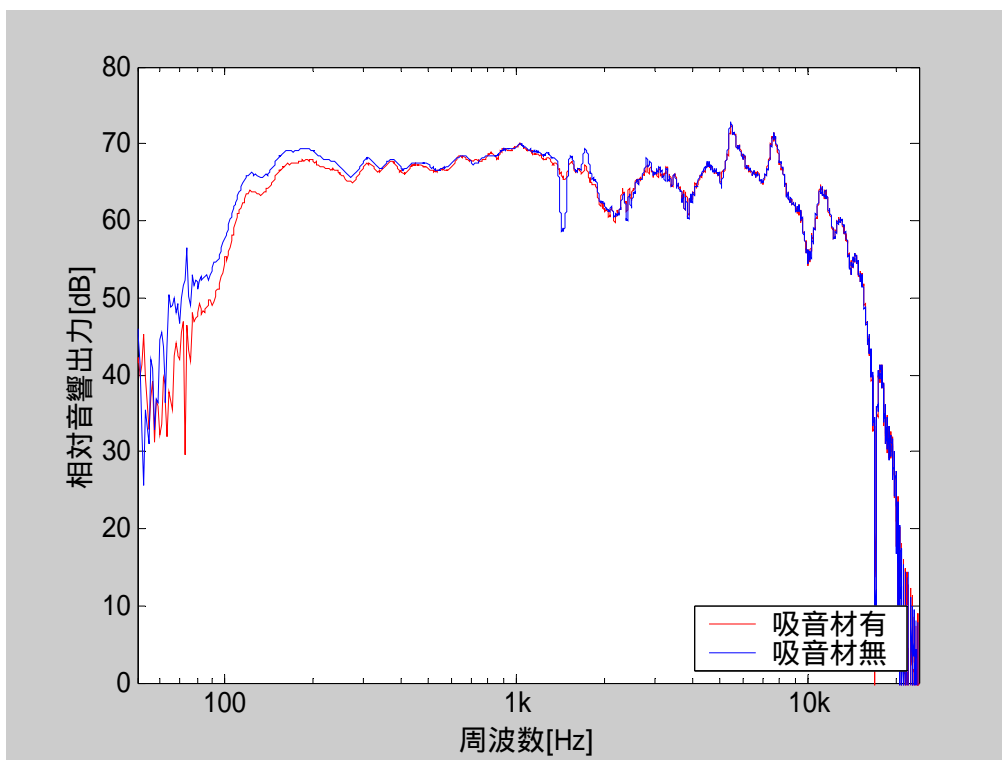


図 5-5-10 ホーンのみに吸音材を詰めた場合

図 5-5-9 より、エンクロージャに吸音材を詰めても効果が無いことがわかる。また、図 5-5-10 より、ホーンに吸音材を詰めた場合は、1.3[kHz]あたりでの落ち込みが改善されていることがわかる。このことから、ホーンに吸音材を詰めることにより、ホーンから出る高域の出力を低減させられることがいえる。

次に、ホーンに詰める吸音材の量を減らして測定を行う。量は表 5-5-1 に示す「少なめ」とする。図 5-5-11 に測定結果を示す。

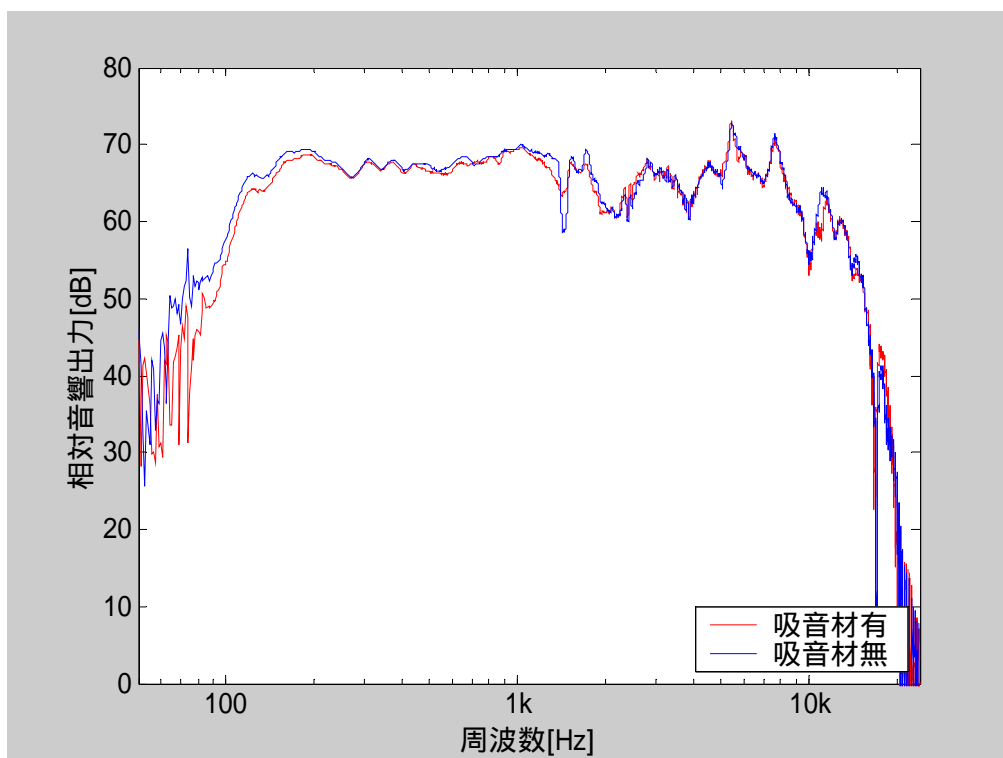


図 5-5-11 ホーンにのみ吸音材を詰めた場合で吸音材の量を減らした場合

図 5-5-11 より、ホーンに詰める吸音材の量を減らした場合、低域の落ち込みは減少するが 1.3[kHz]あたりでの落ち込みがあまり改善されていないことがわかる。このことより、吸音材の量により特性の改善に違いが見られるということが予測される。そこで、吸音材の量の違いによる特性の違いを比較し、図 5-5-12 に示す。

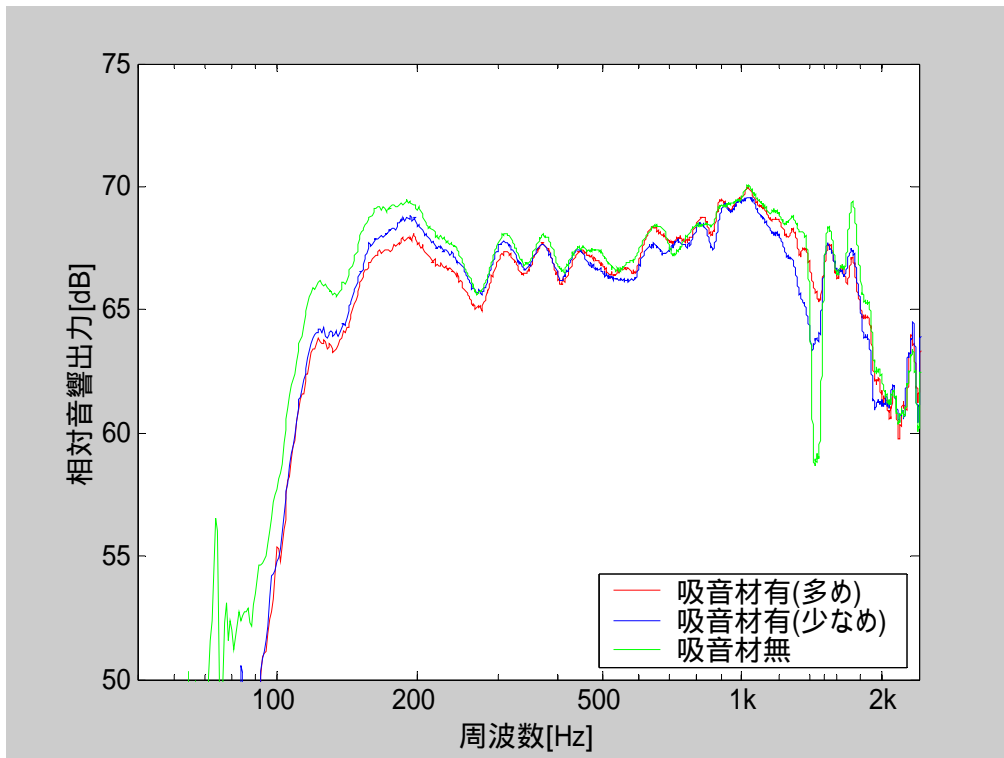


図 5-5-12 吸音材の量による比較（ホーンのみ）

図 5-5-12 より、ホーンに詰めた吸音材の量が多い場合は、1.3[kHz]あたりでの落ち込みは改善されるが、低域が落ち込んでしまうことがわかる。逆に吸音材の量が少ない場合は、低域の落ち込みは減るが、1.3[kHz]あたりでの落ち込みはあまり改善されない。これらのことより、バスレフホーンを塞ぐにつれて低音域が落ち込むということがわかる。よって、バスレフホーンを粘土で完全に塞いだ場合は低音域がさらに落ち込むと推測される。

以上のことより、吸音材により 1.3[kHz]あたりでの落ち込みは改善されるが、その代わりに低域が落ち込んでしまい、バスレフ本来の特徴が活かせなくなってしまうといえる。よって、吸音材の量は低域を活かすか、1.3[kHz]あたりでの落ち込みを改善するかにより変える必要がある。

ここで本来であれば、バスレフホーンを粘土で完全に塞いだときとホーンに吸音材を詰めたときで比較を行うべきである。しかし、測定した日が異なるため出力の大きさが違い、比較することができなかった。（図 5-5-13）

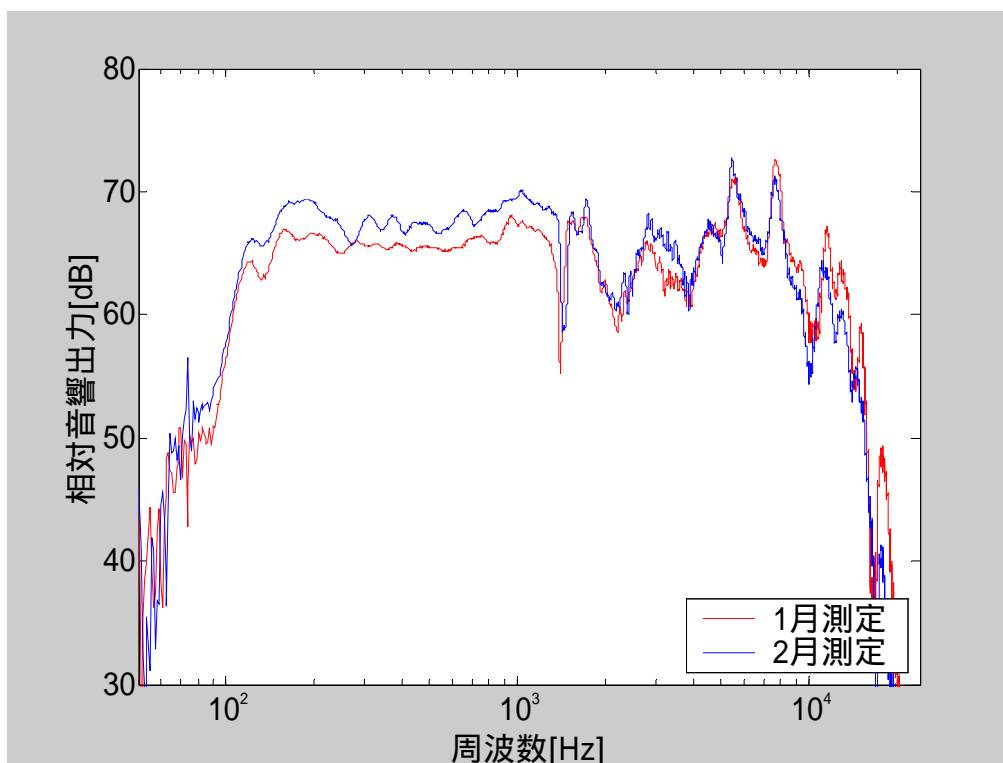


図 5-5-13 測定日の違いによる出力の違い

図 5-5-13 からわかるように、測定日が異なると同じ条件で測定を行ったつもりでも出力が異なってしまう。これはスピーカとマイクロホンの距離、それぞれの角度、スピーカからの出力の大きさなど様々な要因が影響していると考えられる。測定を行う際、同じデータを毎回測定しなおすのでは手間がかかるし効率もよくない。常に同じ条件で同じ測定結果を得られる工夫が今後必要であると思われる。

5.6 エンクロージャの影響の測定（参考）

スピーカは、ユニット単体では性能を発揮することはできない。そこで、スピーカユニット単体での周波数特性を測定した。

<測定方法>

ユニットをエンクロージャからはずした状態で、TSP を鳴らして測定を行う。音源とマイクロホンは正面に設置し、距離は 1[m]とする。

測定結果を図 5-6-1 に示す。

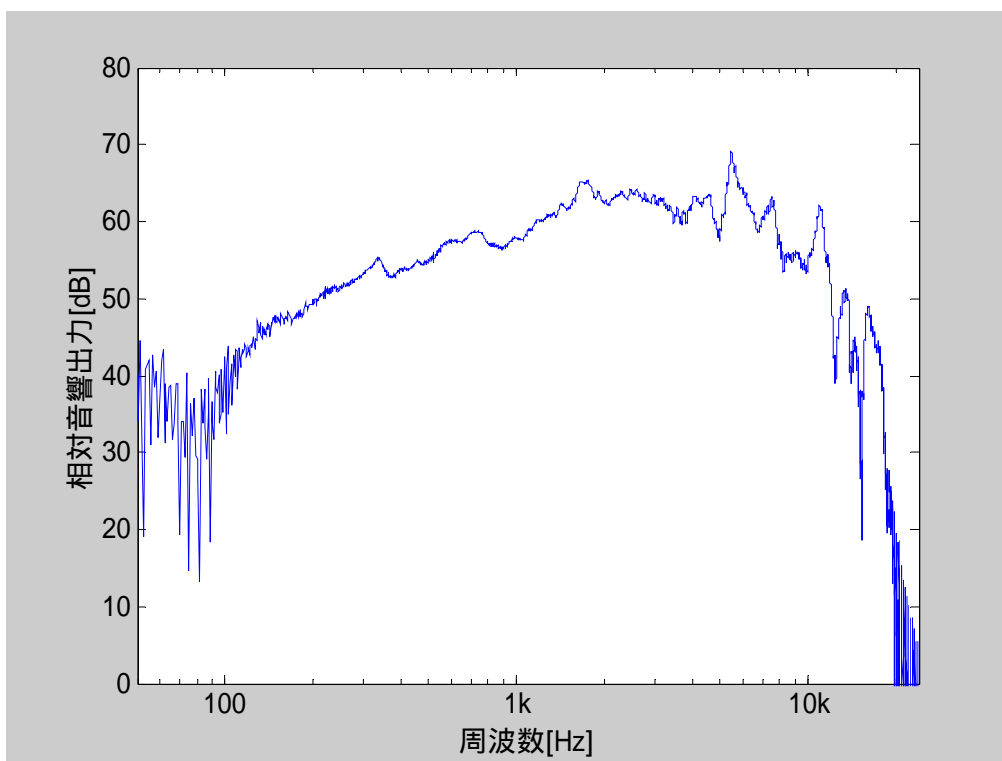


図 5-6-1 エンクロージャがない場合の周波数特性

図 5-6-1 より低域があまり出力されていないことがわかる。スピーカユニット前面から出る音波と後面から出る音波は、逆相であるためお互いに打ち消しあってしまう。高域の音は、直線的に進むため正面のマイクロホンの方向へ進んだが、低域の音は広がりながら進むため、ユニットの裏側からの音と打ち消しあってしまったものと思われる。エンクロージャはこれを防ぎ、スピーカユニット前面から発生する音波だけを利用するためである。

6 まとめ

6.1 無響室の特性について

無響室では、測定する位置によって得られる特性が変わっている。壁面をグラスウールで覆うことにより吸音してはいるが、それでも完全に吸音できているわけではなく壁面からの反射の影響を多少なりとも受けてしまうことが確認された。精密な測定を行う際にはこの少量の反射音も測定データに影響を与えてしまうため、極力反射音を受けない位置で測定をすることが必要である。

測定結果より得られた無響室での測定における注意点としては、マイクロホン、スピーカ共にできるだけ部屋の中央に設置するということが挙げられる。これらが壁面に近いと、壁面からの反射音の影響を受けるため、安定した測定結果を得ることができなくなってしまふからである。

6.2 バスレフスピーカの特性について

測定結果より、BOSE101MM の特性についてまとめる。

6.2.1 指向特性について

スピーカに対してマイクロホンの位置が正面から左右に離れれば離れるほど、高域の周波数特性が落ち込むことが確認された。この理由として、低域は波長が長いので音が広がりやすいのに対し、高域は波長が短いため指向性があり回折しにくいということが挙げられる。そのためスピーカから出された音は、低域は全体に広がっていくため -90° 、 $+90^\circ$ の位置にあるマイクロホンでも受音できるが、高域は広がらないために 0° の位置のマイクロホンでは採集できるが -90° 、 $+90^\circ$ の位置のマイクロホンでは受音できないのである。

測定に用いたスピーカ BOSE 101MM の特性の保証範囲は水平方向 130° である。これは正面に対して左右に 130° ということであり、測定条件に合わせると $-65^\circ \sim +65^\circ$ ということになる。測定結果を見ると、 -90° 、 $+90^\circ$ のときが特に大きく落ち込んでいるが、これはスピーカ本来の指向特性から外れているためと考えられる。また、保証範囲内であっても、 $\pm 30^\circ$ 離れると高域の特性が落ち込み始める。高域のことを考えるならば、スピーカの正面で聞くことが望ましい。

6.2.2 バスレフホーンの影響と改善法について

バスレフホーンは低域の特性を増幅させる。この原理としては次の通りである。スピーカユニットから出された音はエンクロージャを通りホーンからも排出される。このとき、低音はスピーカ背面からの音は2分の1波長だけ遠回りしてホーンから放出され、本来のユニット前面からの音と重なって、重ならないときに比べて強い音になる。このため低域が強調される。しかし、低域が強調されるだけでなく、1.3[kHz]あたりに鋭い落ち込みが生じる。これは、バスレフホーン内で本来強調されなくてもよい音域の音もホーンから放出されてしまうため、特性が悪くなる部分が出てくるものと考えられる。バスレフホーンを粘土で密閉した場合、低域の強調はされないが、同時に特性の落ち込みがなくなることからも、これらはバスレフホーンの影響によるものであるといえる。

これを改善する方法として、吸音材を用いることが考えられる。ホーンから出る音の高域の周波数成分を低減すれば、落ち込みを改善できる。吸音材は高域の音は吸音するため低減させるが、低域には影響が少ないためバスレフホーンの特徴を保持すると予測される。吸音材の詰め方としては、エンクロージャ、ホーンに詰めることが挙げられるが、エンクロージャに詰めても効果は見られない。ホーンに詰める吸音材の量により、特性が変わる。吸音材の多い場合は、1.3[kHz]あたりでの落ち込みは改善されるが、低域が落ち込んでしまうことがわかる。逆に吸音材の量が少ない場合は、低域の落ち込みは減るが、1.3[kHz]あたりでの落ち込みはあまり改善されない。これらのことより、バスレフホーンを塞ぐにつれて低音域が落ち込むということがわかる。よって、バスレフホーンを粘土で完全に塞いだ場合は低音域がさらに落ち込むと推測される。吸音材の量は再生音の低域を強調するか、1.3[kHz]あたりでの落ち込みを改善するかにより変える必要がある。

具体例を挙げると、人間の耳は周波数の深い谷には鈍感なので、オーディオ機器としては、谷があっても低域が強調されるほうが望ましいと考えられる。一方、計測においては、谷の存在はその周波数の情報が失われることを意味するので、数 dB 程度の低周波域の低下は許容しても、上記対策を施して周波数特性の落ち込みを改善することが望ましいと考えられる。

参考文献

- (1) 鈴木ほか “時間引き伸ばしパルスの設計法に関する考察”
信学技法, EA92-86(1992-12).
- (2) 西巻正郎 “電気音響概論”
pp.94-103, 森北出版(1989-8).
- (3) 加銅鉄平 “わかりやすいオーディオの基礎知識”
pp.38, オーム社(2001-4).
- (4) 大賀寿郎、山崎芳男、金田豊 “音響システムとデジタル処理”
pp.158-159, 電子情報通信学会(1995-3).

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導くださいました金田豊教授、ならびに卒業研究生各位に深く感謝申し上げます。