

# 重低音再生の試み

栃木県立宇都宮清陵高等学校 科学研究部

神谷忠孝 落合良貴 手塚浩美

菅原達也 中川 暁

## はじめに

友人の家で聞いたステレオの音は、重低音が響き素晴らしかった。それに比べて、自分の家のコンポの音は低音が響かず迫力に欠けていた。もっと低音が響くようにスピーカーを買い換えようと思っていた時、物理の授業で共鳴の実験を行い、共鳴すると大きな音がすることを知り、この原理を使って低音を響かすことが可能ではないかと気づきスピーカーを自作しようと考えようになった。

高価なスピーカーをかうお金もなく、安値で自作できないかと顧問の先生に相談したところ、耳元にスピーカーを置き、音楽を聴くと、安物のスピーカーでも低音が豊かに聞こえるとのお話であったのでさっそく実際に試してみるとその通りで驚いた。おそらく低音はスピーカーから離れるとすぐに減衰するので、通常の聞く位置では相対的に低音が減衰するのではないかとアドバイスを受けた。

自作するにあたり、お金をかけずに、共鳴や耳元においたスピーカーの音の響き等を参考にし工夫をこらして低音が良く聞こえるスピーカーを製作する決心をした。そして、製作を始めるに当たり、昨年度の先輩達の研究“フェイズドアレイマイク”の成果も参考にして、次の様な視点から予想を立て、小型で安物のスピーカーを使って、重低音を再生するためのスピーカシステムを製作するための研究を始めることにした。

## 研究方法

研究を進める前に、今までの科学研究部の研究成果（フェイズドアレイマイクの研究）と、物理で学んだ知識を総合して次のような予想をたてた。

低音が聞こえないのは、低音ほど音が広がってしまい、スピーカーから離れると周波数の低い音ほど急速に音圧が下がり、相対的に低音が聞こえなくなる。

気柱共鳴の実験では、共鳴すると音が大きくなる。従って重低音に共鳴する工夫をすれば低音が強く響くようになる。

に関して

マイクを複数並べると指向性が鋭くなり、遠くの音もよく聞こえるようになることが先輩たちの研究でわかっている。今回は逆にスピーカーを並べれば、発生する音の指向性が鋭くなり遠くまで音が届くはずである。もしこの事が正しければ、低音がよく聞こえるスピーカー製作の手がかりになる。

に関して

物理の授業での共鳴の実験では、共鳴するかしないかで音の大きさはかなり変化した。低い音に共鳴させれば、低音だけ増強させられるのではないかと考えた。

### **(1)実験方法に関する計画**

に関して

1. 周波数ごとにスピーカとマイクの距離を変えて音圧の変化するかを調べる。
2. スピーカを並べて、昨年の研究「フェズドアレイマイク」の研究結果のから、指向性特性を鋭くコントロールする事で効率的に低音を送り出せるのではないかと思えるので、指向性をコントロールできるのか実験する。

に関して

3. スピーカの音を気柱で共鳴させるとどの程度周波数特性が変化するか測定する。
4. 気柱は閉管、開管のどちらがよいか試してみる。
5. 共鳴する周波数は基本振動、3, 5倍(閉管)となるが、これで好ましい音が再生できるのか。

などを実験の中心として研究を進めることにした。もちろん実験の結果によってそのつど必要な実験を行っていくこととした。

## . 研究

**実験1** 耳元にスピーカを置いたときの再生音は、はたして低音が響くのか。

実験方法



写真のように、裸のスピーカ(10cmフルツ)を耳元に置いて音楽を再生し試聴する。アンプは、鬼怒川に不法投棄されていたものを再生したものであるが、かなりの高級品であったようである。音楽ソースとしてはカセットテープを用いた。

実験結果

試聴した結果は、主観的になるが、耳元に置いたスピーカからは確かに低音がよく聞こえる。しかし、スピーカを耳から遠ざけると低音が聞こえなくなり、全く迫力がなくなった。試聴に利用したスピーカはそれほど高級なものではないが、耳元に置いたときは、ヘッドフォンで聞いたときのように低音が聞こえ、さらに音が頭の中にこもらず広がりのある音に聞こえたのには驚いた。

これだけでも結構満足できる音であるが、手で押さえて聞くわけにもいかないし、このスピーカでヘッドフォンを作ったとしても、重くて首が痛くなるだろうと予想できるので、残念ながらヘッドフォンは論外である。スピーカは箱に入れないと低音がでないと思っていたが、これだけの低音が聞こえたのは正直いって驚いた。

## 実験2 スピーカとマイクの間隔を変えて距離による音圧の変化をみる。



### 実験方法

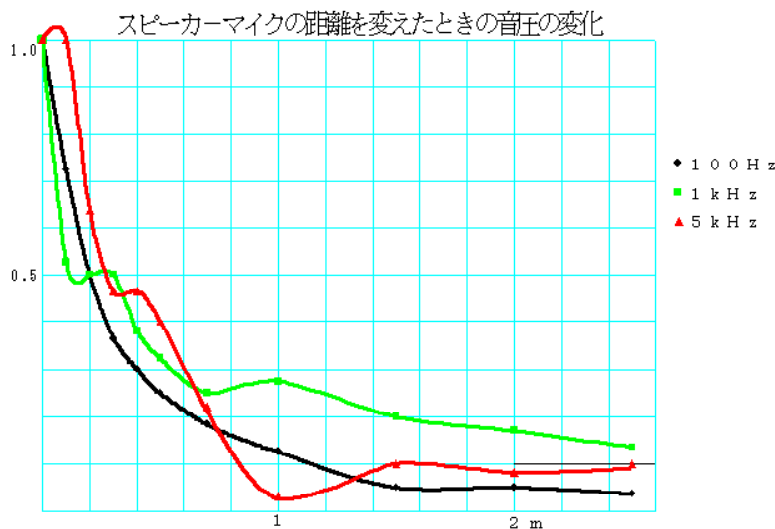
100 Hz、1 kHz、5 kHzの周波数で14 cmのフルレンジスピーカを使い、スピーカ・マイク間の距離を変えて音圧を測定した。測定に利用した測定器は昨年度のフェイズドアレイマイクの研究で利用したものを使った。

(写真参照のこと)

### 実験結果の予測

低音がよく聞こえないのは、スピーカと観測者の距離が大きいと、周波数の高い音に比較して低い音は急激に強さが下がるためと考えた。従って、周波数の違う音でスピーカとマイクの間隔を変えながら音の強さを測定すると、低い音は急激に弱くなるはずである

### 実験結果

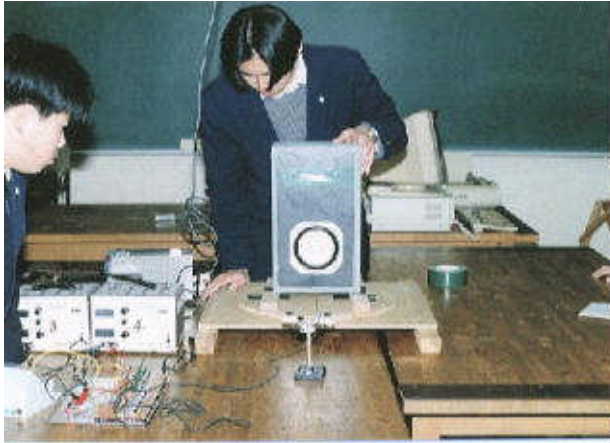


実験結果のグラフをみると、100 Hzに比較して1 kHzの音波の減衰が緩やかであることがわかるが、予想よりかなり小さな差である。さらに5 kHzの音波の減衰は波打っており、定常波の影響をかなり受けている様である。

この結果から考えると、我々の

予想は間違っていた感じが強い。しかし、耳元で聞いたスピーカからの音は確かに低音が響いていた。そうすると実験方法に何らかの問題があったかもしれない。そこで、指向性特性が強ければ、距離が離れていても音の大きさはあまり減衰しないと考えられるので、次にスピーカの指向性特性を測定して予想の検証を再度行うことにした。

### 実験3 スピーカの指向性特性の測定



#### 実験方法

回転テーブルにスピーカを置き、10度刻みで回転させ、マイクで音の強さを測定した。測定周波数は100Hz、1kHz、10kHzで行った。スピーカとマイクの距離は50cmで行った。実験は実験室の屋内で行った。

#### 実験結果

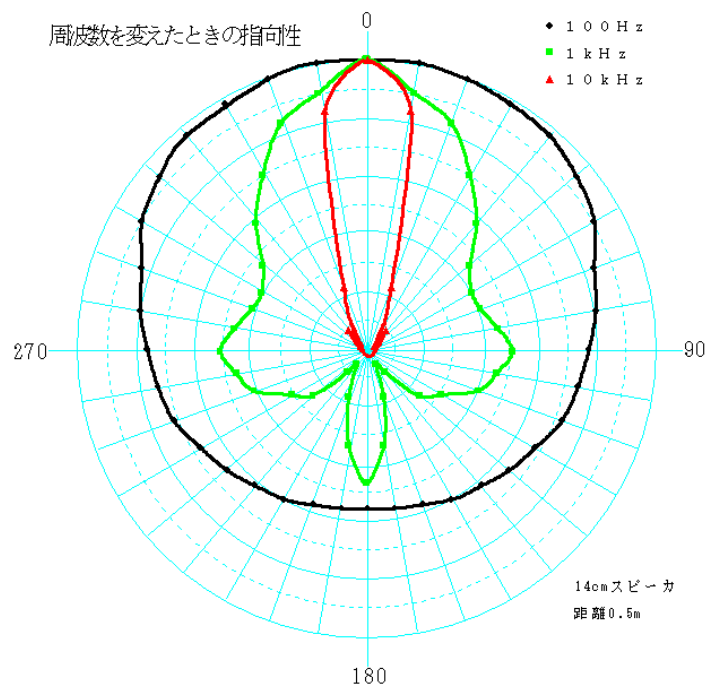
この結果をみると、10kHzの指向性特性が他に比較して大変シャープであることがわかる。この結果はまさに予測どおりである。しかし、これだけシャープであるとスピーカの正面からわずかにずれただけでも、大きく音の強さが変化してしまうことがわかる。従って実験2の結果が予測を裏切ったのは、マイク的位置が指向性特性のピークからずれたためであると考えられる。

そこで、この点を考慮して、再度マイクとスピーカの距離を変えて音の強さを測定する事にした。

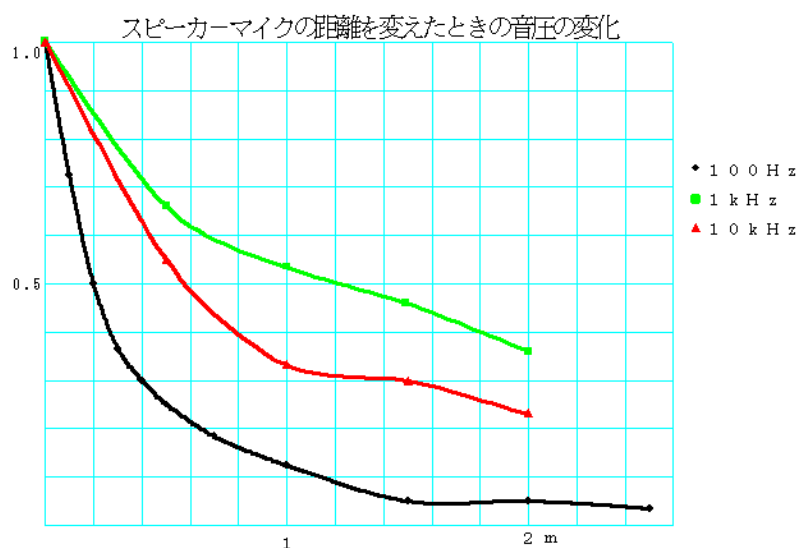
### 実験4 スピーカとマイクの間隔を変えて音圧の変化をみる。(再実験)

#### 実験方法

実験方法は実験2と同じであるが、距離を変えて音の大きさを測定するとき、左右にマイクを動かして、大きさが最大になる点を探り、その距離での最大の大きさを測定した。



## 実験結果



実験結果をみると、100 Hzと1 kHzを比較すれば明らかに100 Hzの音の大きさは、距離が大きくなると急激に減衰している事がわかる。

しかし、10 kHzに関しては1 kHzより急に減衰している。この点に関して指向性特性をうまく説明できないが、定常波の影響と鋭い指向性で測定がうまくいかなかったのではないかと思う。

### 実験2～実験4までの考察

スピーカーの指向性特性を測定した結果。10 kHzの特性はきわめて指向性が強いが、100 Hzに関してはほとんど無指向性に近い。この結果から考えると周波数の高い音は、スピーカーの各部から出る音が干渉して、指向性が強くなっているようである。つまり、ホイヘンスの原理で、平面波が多数の素源波からできるように、振動板の各部からの素源波によって正面にのみ進む平面波ができていると考えれば説明できる。

それに対して100 Hzの音は振動板が波長に対して十分に小さいので、点上の波源から生じる波の様に四方八方に音が広がっているようである。つまりこの場合は球面波が生じたと考えれば良いと思う。

以上の考察から、低音の減衰を少なくするには、複数のスピーカを配列して、フェイズドアレイマイクとは逆に、音の進む方法を正面に限れば良いのではないかと結論づけられる。

## 実験5 2個のスピーカによる指向性特性

### 実験方法

2このスピーカの間隔を変えて指向性特性を測定する。測定する音の周波数は100Hzで、スピーカの間隔は

0、1/4、1/2波長

の場合について行った。なおマイクとスピーカの間隔は、スピーカを乗せた回転台の中心から2mで測定した。

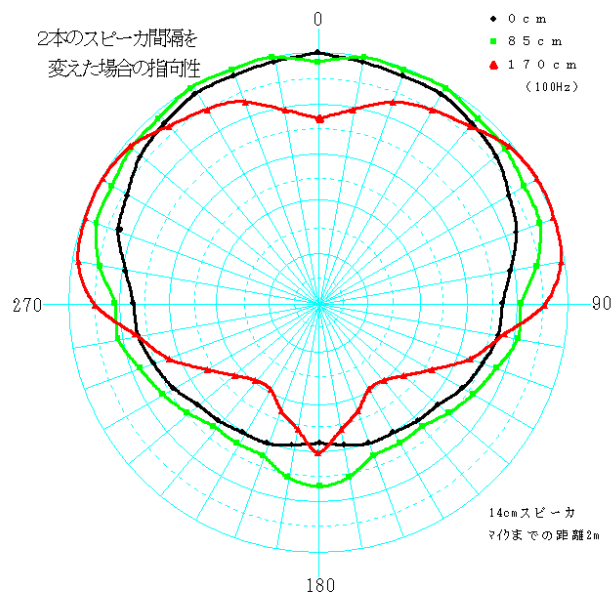


### 測定結果

指向性特性をみると最も鋭いのが間隔0の場合で、0.25、0.5波長と悪化している。特に0.5波長の場合には、指向性特性がハート型に変形している。

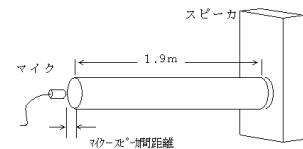
アレイマイクの結果を参考にすると、この場合0.5波長の場合が最も指向性は鋭くなるはずであるが、全く逆の結果になった。この結果から、アレイマイクの研究結果がうまく適応で

きないことがわかる。予想を裏切る結果がでて残念であるが、考えてみると、スピーカ間隔に比較してマイクとの距離が近すぎたのが原因であると思う。また、低音再生を最終目的とするので、スピーカとリスナーの距離を大きくすることは通常の実験室では不可能であるので、スピーカ間隔の距離を大きくする方法は事実上採用できないことになる。



## 実験6 共鳴による低音増強効果の測定

気柱共鳴の原理を使って、低音を共鳴させることで増強できるかを確認する実験を行った。実験方法は、スピーカの前面に筒を接続し、反対側の開口端で音の大きさを測定した。利用した筒は絨毯が



まいてあった厚紙製であり直径は約 1.5 cm である。利用したスピーカは直径 1.4 cm のフルレンジスピーカである。

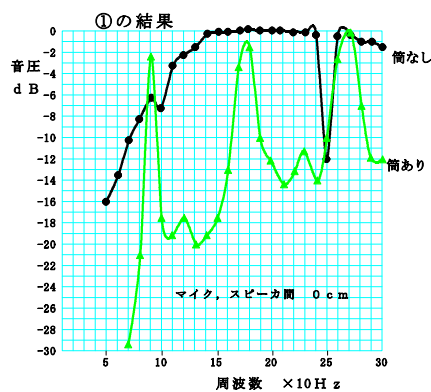
### 実験方法

図の様にセットし、50 Hz ~ 300 Hz の範囲で周波数を可変させて、音の大きさを測定した。測定に利用したマイクはピン型コンデンサーマイクである。周波数特性は未知であるが、周波数が低いこの領域では問題がないと判断した。マイクは 管口、及び管口から 50 cm の位置



でそれぞれ測定した。また 筒を使わずスピーカの直前、及び 50 cm の距離でマイクを設置して同じように測定した。

### 測定結果



#### (1) 管口直前での周波数特性。

管口直前にマイクを設置した時の周波数特性をグラフにまとめた。また、管を使わないでスピーカの直前で測定した周波数特性も重ねて表示した。なお 2 つのグラフの間の絶対的な音圧の関係はなく、他方を上下にずらして重ねてある。周波数特性の傾向の違いを目的に重ねてある。なお音圧は d B で表したが、測定電



圧  $v$  を  $20 \text{Log} v$  で計算して表してある。

測定結果をみると、管口直前ではかった周波数特性では 90 Hz、180 Hz、270 Hz に周波数特性のピークが生じている。このピークは閉管の気柱にできる表の様な定常波に対応している。

周波数	波 長	振動モード	ピークの相対強度
90Hz	3.8 m	開管：基本振動	- 2.5 d B
180Hz	1.9 m	開管：2倍振動	- 1 d B
270Hz	1.25 m	開管：3倍振動	0 d B

この結果共鳴を利用しない場合と比較すると、をみると、90Hzでは3.5dBほど下がり方が少なくなっている。つまり、低音を再生させるのにかなり有効な方法である事が確認できた。

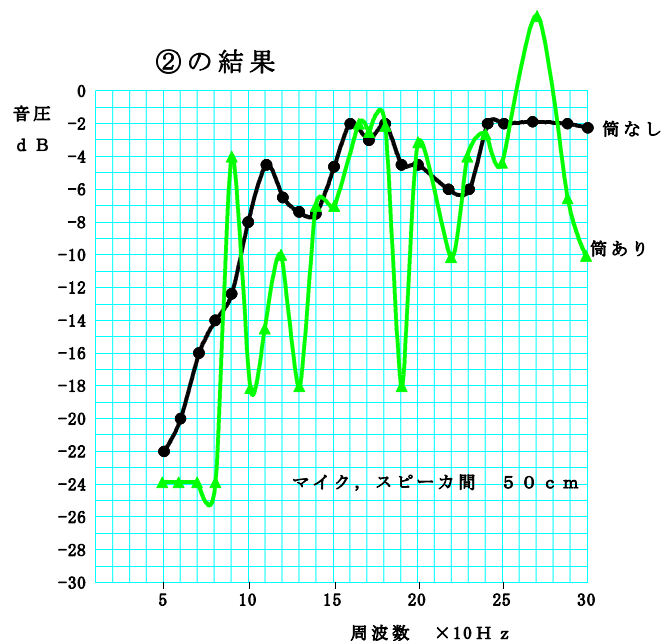
ところで、120Hz、230Hzにも小さなピークがみられるが、この周波数で共鳴を起こす場合を推定すると、閉管の気柱共鳴の定常波が生じている事がわかる。

周波数	波長	波長/1.9	推定振動モード	ピーク相対強度
120Hz	2.8m	1.47	閉管：3倍振動 	-17.5dB
230Hz	1.48m	0.78	閉管：5倍振動 	-11dB

(2)管口から50cmでの周波数特性。

管口から50cmの距離にマイクをセットして周波数特性を測定した結果をグラフにまとめた。

(1)の場合と同じ様に、管を使わないでスピーカの振動板から50cmで測定した周波数特性も重ねて表示した。



(1)と同じ特徴は現れている。つまり、90Hzの音が同じようにかかなり増強されている様に見える。しかし、(1)と比べると複雑な凸凹が生じている。特性がこのように乱れた様に見える理由の一つには、閉管での気柱共鳴の成分が大きくなっているためである。またそれ以外にも多くのピークが生じているように見える。推定の域を脱していないが、50cmの距離で測定するので、(1)よりスピーカへの電力を上げていたので、いろいろな「キシミ音」が生じたためではないかと思える。さらに室内での測定なので、部屋の中の定常波の影響も考えられる。



## 実験 1 ~ 実験 6 のまとめ

実験 1 ~ 実験 6 までの基礎的な実験の結果、重低音を再生させるためのスピーカシステムについて次の様な事が確かめられた。

周波数の低い音は高い音に比較して指向性特性が良いので、スピーカから離れると音の強さが高い音に比較して急に弱くなる。従って、スピーカから離れて聞く通常の音楽鑑賞状態では、低音が聞き取りにくくなるので迫力がなくなる。

低音の指向性を強くしようと、スピーカをアレイ状に配置すると、理論上指向性は強くなるはずだが、室内での音楽鑑賞を考えると、スピーカとリスナーの距離が波長換算（低音の）でそれほどとれないので、実測の結果指向性の改善にはならない。スピーカを単純に並べる程度の方が、間隔を目的の波長の半波長に並べるより素直な特性になる。この事から、先輩たちの研究であるアレイマイクの逆をスピーカからの音で行う方法は実際問題として利用することは重低音再生の目的では、できない。

気柱共鳴を利用して、低音を響かせる方法はかなり効果がある。直径 1.4 cm のスピーカで 90 Hz の音に共鳴した時はかなり良好な響きを聞かせてくれた。しかし、共鳴する周波数の範囲が狭いので、実際に音楽を聴いた場合には音質を悪化させる可能性があることが気になる。また、低い周波数に共鳴させるためにはかなり長い柱が必要になるのも問題点として上げることができる。

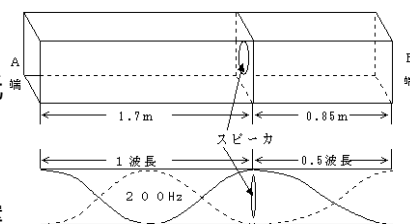
スピーカを管の一方に取り付けた場合、開管の気柱共鳴が生じると予想していたが、そでだけではなく、スピーカを取り付けた端が閉じた閉管での気柱共鳴が生じる事がわかった。ただし共鳴の強さは開管の場合の方が強いようである。

## 試作器第 1 号

今までの研究の結果をふまえると、共鳴を利用することで重低音を再生させる事に絞って研究を進めることに決めた。

そこで、実験 6 の研究結果を基に、次の図のような共鳴箱を考案

し、特性を測定することにした。利用したスピーカは、実験 6 より小型の直径 10 cm のフルレンジスピーカ（フォステックス製）で箱はベニヤ板で製作した。

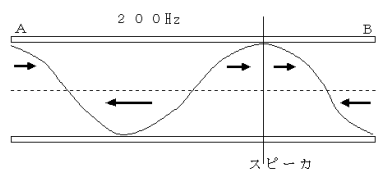


この写真が製作した共鳴箱である。ベニヤ板は 3 mm で、かなり薄いので実験中は板が振動していた。この薄い板をコーナーにあて木を当てて釘で固定してある。さらにガムテープでコーナーを張り合わせた。かなり箱の強度は低い。スピーカは写真の位置に取り付け、箱（筒）

を張り合わせた。

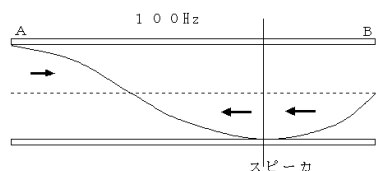
### 設計方針

200Hz の音に共鳴するように設計した。スピーカから放射される音は、スピーカの前後で位相が 180 違うのでこのままでは打ち消しあう事になる。しかし、図 1 の様に配置すると、両端 A, B から放射される音は同位相になるのではないかと考えて設計した。図 2 がその原理を示した図である。



スピーカから A 端までが一波長、スピーカから B 端までが半波長の様に設定した。このようにすれば、A, B 端ともに媒質は筒の内側に向かって変位するので、同位相となる。このような関係が成り立てば、スピーカの前後の音が打ち消される事はなく、しかもそれぞれの音は共鳴して増強されるはずであるから、かなり低音が響くはずであると考えた。なお、重低音というからには、もっと低い音に共鳴させる必要はあるが、試作品なのでとりあえず 200Hz に設定した。

なお、この設計でも、スピーカ～A 端の筒で、100Hz の音に対して、基本波として共鳴するはずである。しかし、この場合、B 端から放出される音との



位相差が 90 度生じると考えられる。

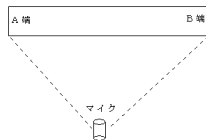
100Hz では共鳴は起こるはずであるが、200Hz と比較すると、A、B 両端から放出される音の位相が完全に一致し

ないので、それほど大きな効果は認められないことが予想される。

# 試作機第 1 号の特性

## 測定 1 A, B の中心位置での周波数特性

第 1 号のスピーカの特性を特定した。測定方法は図のように両端の中心の延長線上に配置し、A B 両端とマイクが正三角形になる

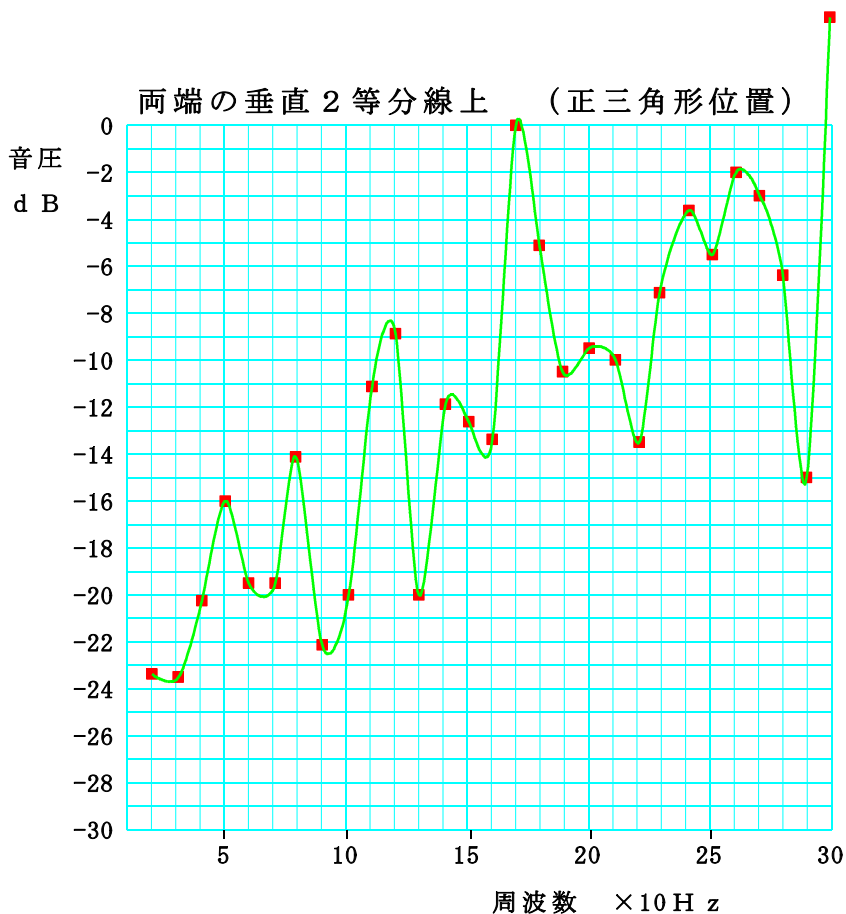


ようにして測定した。



## 測定結果

測定は教室内で行った。若干定常波の影響が出ている可能性はある。周波数特性をグラフにまとめたのが上のグラフである。横軸が周波数、縦軸が音圧で、 $Y=20\log(X)$  で計算し対数になおしてdB にして表示した。

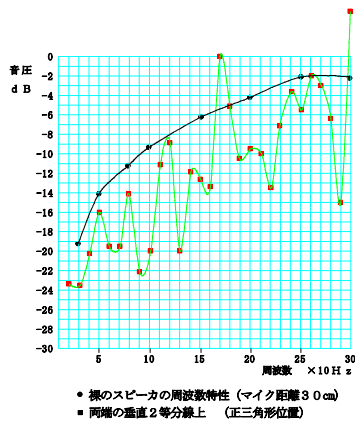


測定で利用したマイクは、タイピン型で、今までの測定で利用したものである。マイク自体の周波数特性は未知であるが、コンデンサー型は特に低域は素直であると言われているので、フラットであると仮定して考えることにした。マイクアンプ等は十分な周波数特性を持っている。

## 考察

測定結果を見ると、170 Hz にピークが見られる。約200 Hz で共鳴させる計算であったが若干下がっているようだ。（開口端補正をきちんと考えればこのズレは説明できる）

また120 Hz、300 Hzにもピークが見られる。

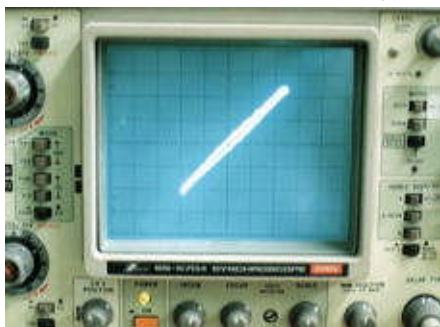


しかし、これだけではどの程度特定の周波数の音が増強されているのか判断できないので、このスピーカを裸の状態に測定した周波数特性を重ねて比較してみた。裸のスピーカの特性はマイクとの距離を30 cmにとって測定している。そのグラフが左の図である。測定結果を上下方向に平行移動して約250 Hzの所で一致させた。比較してみると共鳴を利用した方は凸凹がたくさんあるが、平均して考えれば、周波数が低くなるとなだらかに特性が下がっている

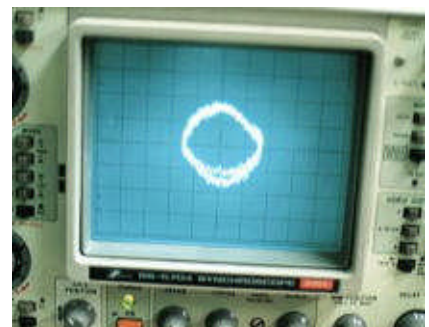
ことがわかる。そしてその“ダラサガリ”の傾向は裸のスピーカの周波数特性と大変良く似ている事がわかる。しかしその中で約200 Hzの周波数で音圧がでハッキリと増強されていることがわかる。また120 Hzは特にピークとは言えないかもしれないが、設計方針どうりの特性である。

### A、B 両端の音の位相

A、B 両端にマイクを取り付け、発振器の周波数を変えながらシンクロスコープでリサージュ波形を観察し位相の違いをみた。すると170 Hzのピークでは同位相、90 Hzのピークでは位相の違いが約90度あることが読みとれた。



170 Hz



90 Hz

上の写真の170 Hzのリサージュ波形をみるとA、B同位相であることがわかり。また90 HzのA、B信号の位相は予想通り約90度位相がずれていることがこの事から直接わかる。

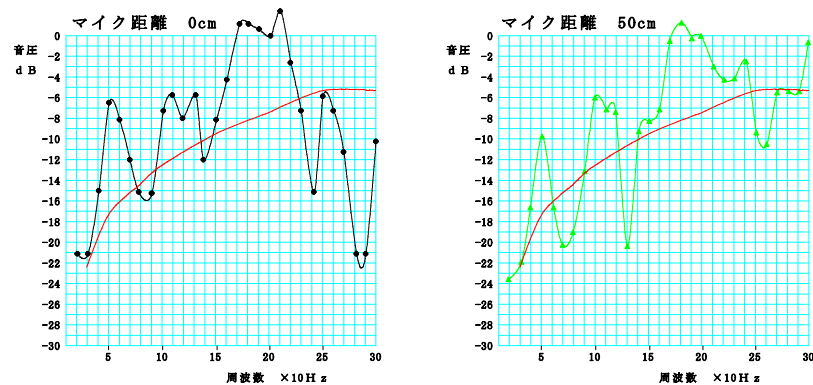
この事からも、試作器の設計は間違っていないようである。

## 測定2 Aの正面での周波数特性

測定1ではA, B両端から出て干渉した音を測定している。しかし、強めあう条件に合致しない音がどれだけ出ているのかを測定した。測定方法はA端の正面0 cm, 50 cmの位置にマイクを置いて測定1と同じ方法で測定した。



### 測定結果



グラフの左が0 cm, 右が50 cmの距離で測定した周波数特性である。またそれぞれのグラフに赤い線で示したのが裸のスピーカの周波数特性である。赤い線は上下に平行移動して250 Hzあたりで接するように描いた。特にその位置であわせる理由はないが、一般的な傾向として両グラフとも周波数が下がると音圧が下がり特性は、裸のスピーカの特性に従っていることがわかんと思う。

測定中、50 Hzの音が良く聞こえていた。小さなスピーカでこんな低い音が再生できるのかと驚いた。つまりその事からも、50 Hzの音が共鳴によって大きくなっていることは事実である。

両グラフを見ると、50 Hzの音がかなり大きくなっている。つまり赤い線をこの位置に描いて低音再生能力が改善されたと考えても良いと思われる。

### 考察

約100 Hzでの共鳴はスピーカからA端までの筒が、開管で生じる基本波である。この共鳴は予想できた。しかし、約50 Hzでの共鳴は閉管で生じる基本波である。A端は開いているが、スピーカが設置してある所は、スピーカの振動板が大きく変位するのでその点は腹になると考えていた。しかし、この測定結果で50 Hzの共鳴がハッキリ生じているので、スピーカで一方をふさがれた閉管として動作していると考えて良いようだ。A端正面での測定を詳しくみると、閉管での共

鳴で生じる45Hz、136Hz、223Hzのピークと、開管で生じる共鳴89Hz、180Hz、270Hzのピークが重なり合っているようだ。そしてピークがつながり、かなり広い幅で音が共鳴するようになっている。このことはたいへん都合が良いことであると思う。

裸のスピーカの特性を測定したとき、周波数が低くなると振動板の振幅が非常に大きくなり、振動板が物理的に変位できる限界に達し、びりびり音がした。従って単純にアンプのトーンコントロールで低域特選を上げてても、スピーカの振動板の最大可能振幅で制限される事に気づいた。

50Hzの共鳴が開管での共鳴なら、ひょっとしてスピーカの振動板が殆ど動いていないかもしれない。それならば小型のスピーカでも低音を再生させることができるはずである。

今までの研究で、スピーカ自体の特性について、全く関心がなかった。しかし、裸のスピーカの特性で、周波数と振幅に関係があることに気づいたので、ここでスピーカの振幅と周波数の関係の特性を測定する必要があることに気づいた。

## スピーカの振幅特性

現在重低音再生のために利用しようとしているスピーカは、フォステックス社製 10 cmフルレンジスピーカ：FE103である。このスピーカは先生が以前物理の実験装置で使っていたもので、新たに16 cmのスピーカを購入したために不要になったものを2個いただいたものである。直径の大きなものほど低音再生には有利であることはわかるが、この小型のスピーカで低音が再生できれば、大きなスピーカを利用すればさらに良好な低音が再生できるはずであると考えて、このスピーカを利用することに決定した。（若干傷んでいるようであるが、十分使える感じがする）

共鳴箱の実験で、50 Hzの再生音がかなり明瞭に聞き取れたとき、信じられないとのコメントを先生にいただいたが、このスピーカを利用していた。従って十分に目的を達成できるものと自信を持ったが、裸での周波数特性の測定では、1 kHzの再生では耳がつんざけるばかりの再生音なのに、振動板の振幅はほとんどゼロのようであった。しかし、周波数が50 Hzの時は、同じ電圧で駆動していたのに、振動板が飛び出すのではないかと思えるほど激しい振幅で振動していた。これでは大きな音を出そうとボリュームを上げると、スピーカが壊れてしまうのではないかと心配になった。

スピーカの磁石のところに最大入力15 wとの表示があるが、とてもこのような大入力の低音を加えることはできないと感じた。そこで

一定電圧の入力で周波数によって、振動板の振幅はどう変化するのか。

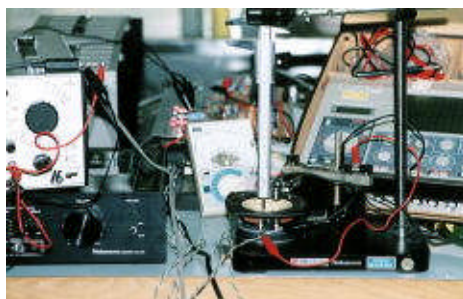
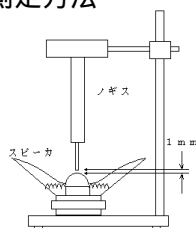
最大入力電圧は周波数によってどう変化するのか。

その他、このスピーカに関する特性を測定する。

などの、スピーカの諸特性を測定し、製作のための基礎データを収集する事になった。

### 実験7 裸のスピーカの入力電圧と振動板の振幅の関係

#### 測定方法



図の様に、スピーカの上にノギスをセットし、振動板との間に1 mmの間隔をあげ、アンプのボリュームを徐々に上げ、振動板とノギスが接触することで生じる異音を聞くことでスピーカの振動板の振幅が1 mmになった事を確認し、またそのときのスピーカへの入力電圧を測定した。同時に音圧も測定した。

## 測定結果

周波数 Hz	入力電圧 V	振幅 mm/V	最大電圧 V	最大電力 W
150	3.8	0.26	11.40	16.25
120	2.4	0.42	7.20	6.48
110	2.1	0.48	6.30	4.96
100	1.4	0.71	4.20	2.21
80	1.16	0.86	3.48	1.51
60	1	1.00	3.00	1.13
50	0.86	1.16	2.58	0.83
40	0.72	1.39	2.16	0.58
30	0.64	1.56	1.92	0.46
20	0.56	1.79	1.68	0.35

入力電圧：振動板の振幅が1mmになる入力電圧

振幅：1Vの入力電圧で生じる振動板の振幅(入力電圧より逆算し)

最大電圧：振動板の最大振幅3mmになる入力電圧

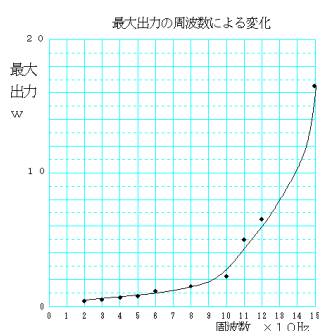
最大電力：振動板の最大振幅3mmになる入力電力

表の様に、1Vの交流電圧で何mmの振幅になるかを逆算した。大ざっぱに言って、周波数に反比例して振動板の振幅が変化している。

スピーカの入力電圧として直流電圧を加え、最大何mmまで振動板が動くことができるかを測定した結果、FE-103の場合約3mmであった。従って、この3mmから逆算した50Hzの最大入力電圧は約2.6V、電力になおしてたったの0.8Wである。

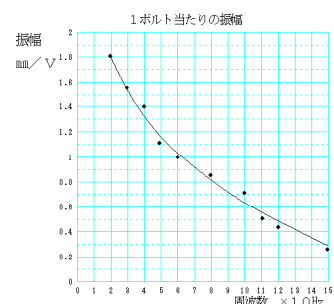
あまりにも小さな電力しか加えられないので驚いた。

左のグラフが周波数による、最大出力の変化をグラフにまとめたものである。偶然だと思うが150Hzの時の最大出力が15Wになっている。



このグラフをみると、このスピーカで重低音を再生するのは無理である感じがする。

スピーカの規格についての詳しい知識はないが、低音域での最大入力電力は間違いなく振動板が物理的に変位可能な最大振幅によって制限されると考えられる。逆に、周波数が高い音域では、スピーカが電気エネルギーを100%音響エネルギーに変換できるはずがないので、変換ロスで生じる熱エネルギーが制限となると思う。すると逆に、振幅で制限される低音域でも、何らかの方法で振幅を抑えれば、もっと大きな電力を供給できると思われる。つまり、共鳴の結果振幅を抑えられればもっと大きな電力を供給できるかもしれないとの望みもある。





## スピーカのエネルギー変換能率

スピーカの振動板のもつエネルギーを見積もるためにバネ振り子のもつ振動のエネルギーを参考に考察した。

バネ定数  $k$  のバネに質量  $m$  の重りをつけたバネ振り子が、振幅  $A$  で単振動する場合の振動のエネルギーを考えると、バネが  $A$  変位したときのバネに蓄えられたエネルギー  $E$  は

$$E = \frac{1}{2} k A^2$$

ところで、この振り子の振動数  $f$  は

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

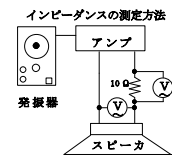
ここで、上の式を  $k$  について解くと

$$k = 4\pi^2 m f^2$$

従って、エネルギー  $E$  を  $A$ 、 $f$  で示せば、 $E = 2\pi^2 m f^2 A^2$

となる。周波数の自乗と振幅の自乗に比例することになる。スピーカ FE-103 のカタログを見ると振動板の質量 ( $m_0$  と表記してあった。振動する物体の質量と判断した) が  $2.7 \times 10^{-3} \text{ kg}$  となっているので、周波数、振幅 (全て 1mm) をもとに振動する振動板のもつエネルギーを計算した。

振幅 1mm を生じさせる入力電圧は測定したので、さらに、スピーカに供給された電力を計算するに、スピーカの各周波数での電気抵抗 (インピーダンス) を知る必要



がある。そこで、図の方法で測定した。測定の方法は、10Ωの抵抗の両端の電圧が 0.1[V] 一定になるように発信器の出力ボリュームを調整し、その時のスピーカの両端の電圧を測定して算出した。

周波数	入力電力 (W)	入力電圧 (V)	インピーダンス	入力電力	効率
150	1.20E-03	3.8	16	0.903	0.13%
120	7.67E-04	2.4	28	0.206	0.37%
110	6.45E-04	2.1	32	0.138	0.47%
100	5.33E-04	1.4	36	0.054	0.98%
80	3.41E-04	1.16	47	0.029	1.19%
60	1.92E-04	1	26	0.038	0.50%
50	1.33E-04	0.86	18	0.041	0.32%
40	8.53E-05	0.72	14	0.037	0.23%
30	4.80E-05	0.64	12	0.034	0.14%
20	2.13E-05	0.56	9.6	0.033	0.07%

入力電力:  $E = 2\pi^2 m f^2 A^2$  で計算した入力電力。

入力電圧: 振幅が 1mm になる時のスピーカに加えた電圧。

インピーダンス: その周波数でのスピーカのインピーダンス。

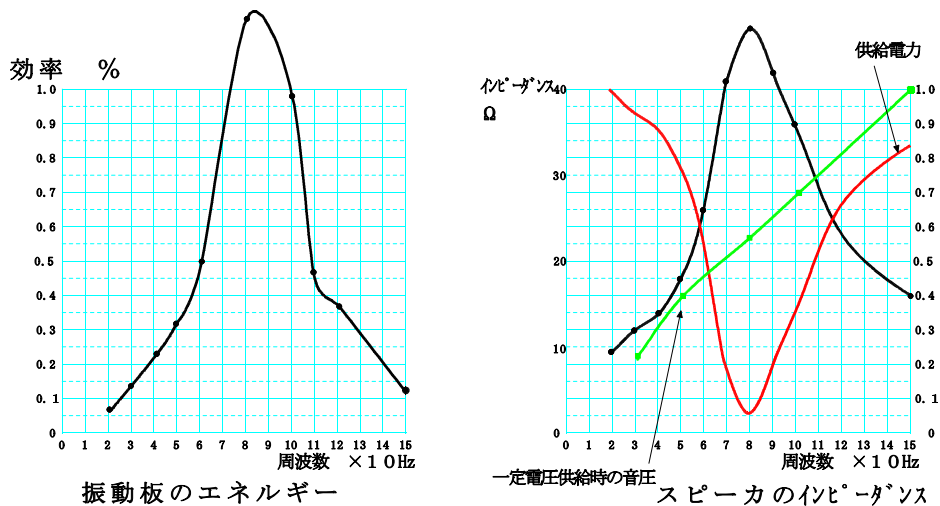
入力電力: 入力電圧とインピーダンスから計算した電力。

効率:  $E = 2\pi^2 m f^2 A^2$  で計算した入力電力 - を入力電力でわり算して求めた効率

## 考察

振動板の振幅が 1 mm の場合のエネルギーは極めて小さい。次に、インピーダンスの測定結果を使って、1 mm の振幅を与えたときのスピーカに供給された電力を計算した。

振動板のエネルギー（1 秒間当たりのエネルギーと考え）を供給した電力でわり算し、何パーセントの電気エネルギーが振動板のエネルギーに変わったかを計算し、効率とした。この考え方が正しいかは不明であるが、エネルギーの変換効率の、判断材料になると考えた。



インピーダンスのグラフに重ねて、一定電圧の交流電圧を加えたときに、スピーカに供給される電力と、その様にして測定したスピーカの周波数特性を示した。100 Hz 前後のインピーダンスのピークで、供給電力は最小値になっているが、それによって周波数特性にピークが生じるようなことはない。

グラフを見て驚いたことは、100 Hz あたりで効率が最大になる点が存在することである。しかしそれでも、約 1 % 程度であり、極めて効率が悪い。

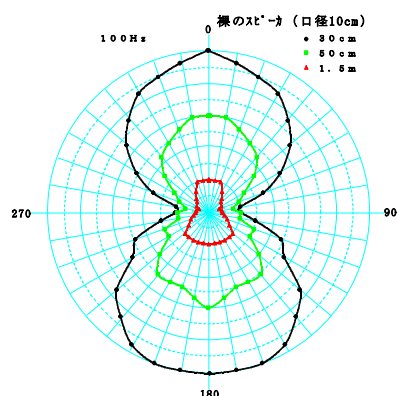
この様に効率が変化する理由は、スピーカのインピーダンスに極大値が存在するためである。定格で 8 となっているが、100 Hz あたりでは 50 近くまで跳ね上がる。このため 100 Hz あたりで電流が流れず、電力を供給できない。しかし、周波数特性を見てもこの周波数で音圧が特に下がっている様子はない。ということは、この周波数で特に効率よく電気エネルギーを音響エネルギーに変換していると考えて良いのではないかと思う。

スピーカのインピーダンスを測定すると、その変化からスピーカの効率の変化を推定できるのではないかと思う

## 試作機第1号のまとめ

1. 狙い通り，気柱共鳴（開管）で200Hz（実測値170Hz）に共鳴し，周波数特性が改善される。
2. スピーカの面は定常波の節になると考えた場合，スピーカの前後から発生する逆位相の音波を，一方を1波長，他方を0.5波長に共鳴させると，管の開口部で位相が同位相になり，強め合うようにすることが可能である。しかし，試作機1号では，直線的な構造で，両端間の距離が1.5波長もあるので，間隔が広すぎ同位相で重ね合わせて指向性を鋭くし，低音が減衰することを防ぐまでにはいかない。

しかし，スピーカの前後に発生する音が逆位相で打ち消し合う現象を防ぐ効果は少なくともあることが確認できた。下の図は10cmフルレンジスピーカ（FE-103）を箱に入れず，裸のまま測定した指向性特性である。90度，及び270度方向では，前後の振動板から出る音の位相が逆位相なので，打ち消し合っている。また，同じ条件で，スピーカ - マイク間の距離をか



えて測定した結果を見ると，距離が大きくなると正面でも前後の音が打ち消し合って音圧が下がっている事がわかる

この事から，通常の低音を再生させるためのスピーカは，箱の中に入れて一方の面から出る音を吸収させ，打ち消しが起こらないようにしているが，試作機1号の方法を使えば，一方から出る音も吸収する必要がないのであるから効率が良くなると考えられるのではないかと思う。

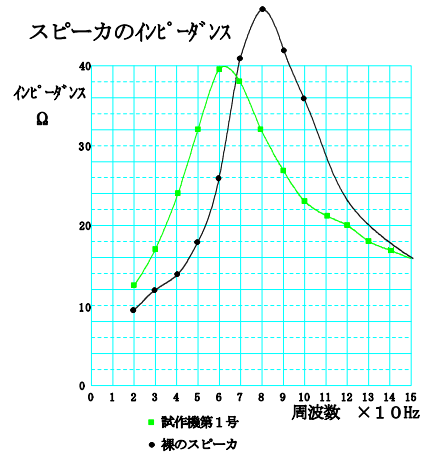
注意) マイクとスピーカの距離を離せば音圧が下がるのは当然である。しかしグラフを見ると距離が増えたと90度，270度の音圧との差がすくなくなっているのので，前後に出る音が打ち消しあっていることを意味する。

3. スピーカを取り付けた端が閉じた管の部分として働く閉管での気柱共鳴が生じることが確認できた。従って，閉管での気柱共鳴を利用すれば，管の長さを短くする事が可能になる。また，スピーカを取り付けた端が閉じた状態だとすると，その場合，振動板の振幅が小さくなるのではないかと予想できる。それならば，物理的に制限される振動板の最大変位の制限から生じる最大出力の問題が解消できるのではないかと考えられる。
4. 試作機第1号のインピーダンス特性を測定した。

測定結果をグラフにまとめて、裸のスピーカの特性と比較した。その結果今まで80Hzで最大インピーダンスになったのが60Hzに下がっている。しかし、周波数特性であれだけ凹凸があるのだから、もう少しインピーダンスに変化があっても良いと思ったが、グラフの様に細かな変化はなかった。この結果から、インピーダンス特性の変化を見ても、共鳴がおきているかを判定できない事がわかった。

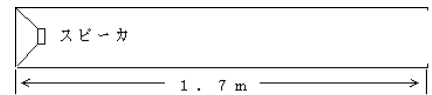
裸のスピーカと比較するとピークの位置が周波数の低い方向に移動したことはそれだけ低い周波数で効率が高くなった事を物語っていると考えられる。

以上の試作機の特性をもとに第2号機を製作する事にした。2号機は、1号機の筒を折り曲げて、小型の共鳴箱とする工夫をした。さらに製作と同時並行して、閉管での気柱共鳴の特性について試作機第1号を使って調べることにした。

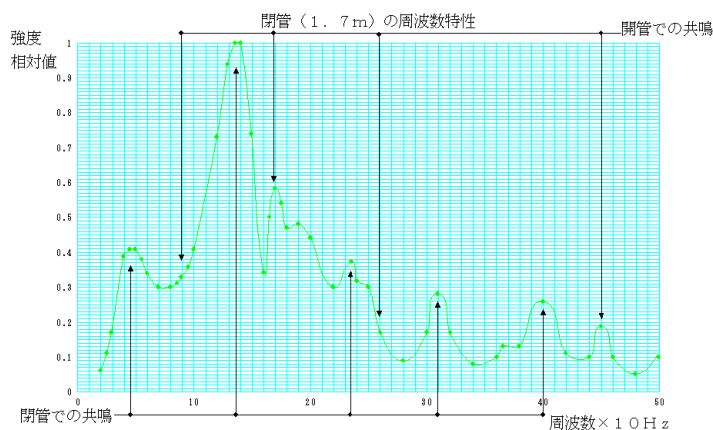


### 閉管の特性 1. 周波数特性

管の一方にスピーカを取り付けた場合、開管（スピーカを取り付けた所は腹になる）の共鳴だけが生じると考えていた。従って、閉管の共鳴とは一方にスピーカ、他方をふさいだ管で生じる共鳴であると考えていた。しかし、スピーカを取り付けた面が節となるような閉管の共鳴が生じることが実験で確認できたので図の様な管の長さが1.7mで、一方にスピーカ、他方を開いた管の周波数特性を測定し、どの周波数で共鳴が生じるか測定した。周波数特性の測定に利用したマイクはピン型のマイクで、測定場所は開口端で行った。



### 測定結果



グラフのように、閉管での共鳴が 4 5 Hz、1 3 6 Hz、2 3 4 Hz、3 1 0 Hz、4 0 0 Hz ( 4 5 Hz が基本振動、5 0 Hz になる予定であったが開口端補正のため実測値は 4 5 Hz となった ) の周波数ではっきり生じている。開管の共鳴は、8 9 Hz、1 7 9 Hz、2 6 8 Hz、3 5 8 Hz、4 4 7 Hz で生じる計算であるが、は

っきり現れているのは 1 7 9 Hz の共鳴の山で、その他は閉管の共鳴で生じた山の陰に隠れているようである。特に 8 9 Hz の共鳴のピークは全く現れていない。

あまりにも予想外の結果であったので驚いた。当初このようなスピーカの設定ではスピーカを取り付けた端は腹の部分になり、従って開管での気柱共鳴が主に生じると考えたのだが、実際には閉管の気柱共鳴の方が強く生じる。

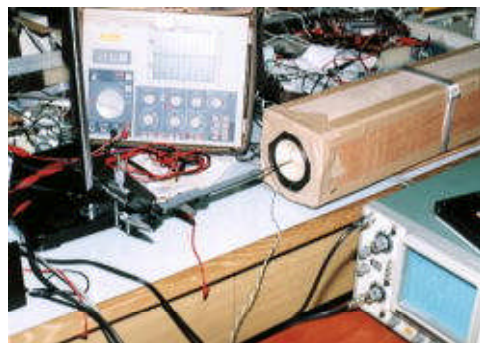
#### 考察

試作機第 1 号、測定 1 の結果では開管の共鳴での 8 9 Hz とと思われるピークが現れていた。今回の実験との違いは 0 . 7 5 m の筒がスピーカの側についていたことが関係するかもしれない。

この測定結果を見ると、どうみても開管の共鳴によってピークは生じないとする事が合理的であると思われる。

#### 閉管の特性 1. 振幅特性

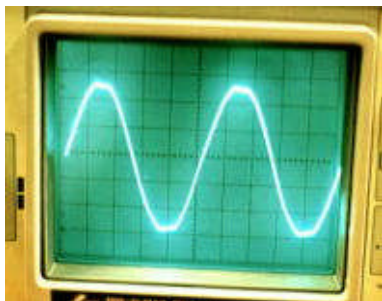
閉管の場合、スピーカの所は節になるのだから、共鳴した場合振幅が小さくなるのではないかとこの予想がたつ。そこで 1 mm の振幅を得る時の入力電圧を測定して確かめることにした。測定方法は実験 7 と同じであるが、開口端側にマイクをセットして共鳴音をシンクロスコープでモニターした。なお、実験 7 の場合も同じであるが、正確に 1 mm の振幅となるようにノギスをセットできない。従って実験 7 と完全に振幅を同じにはできない。しかし、それぞれの実験の中ではノギスと振動板の距離は一定に保たれている。



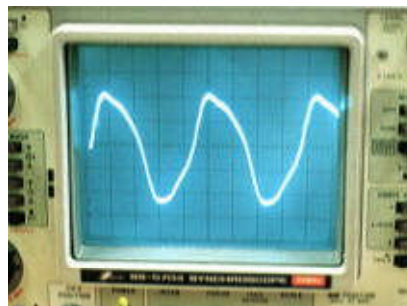
## 測定結果

シンクロスコープで波形をモニターすると、この写真のように、ノギスが振動板にふれると波形が崩れた。この波形をもとに接触したかを判断して、そのときの入力電圧を測定した。

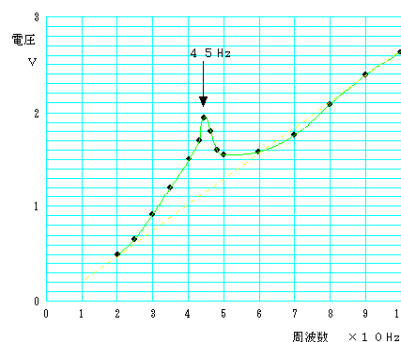
1 0 0 Hz



5 0 Hz

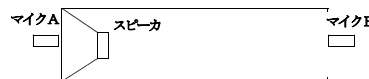


測定結果をグラフに表したのが右の図である。図より4.5 Hzで、1 mmの振幅を得るために大きな電圧を必要としている。つまり閉管の共鳴周波数ではスピーカの振動板は動きづらくなることを示している。周波数特性をみると盛り上がるのであるから、大きな音を発生させると同時に、振幅が小さくなるのであるので、大きな電力を供給する事も可能になり大変都合がよい結果となった。



## 閉管の特性 3. スピーカ側の周波数特性

閉管の開口端側で（マイク B）測定した周波数特性を測定した結果は閉管の気柱で生じる共鳴を観察することができなかった。

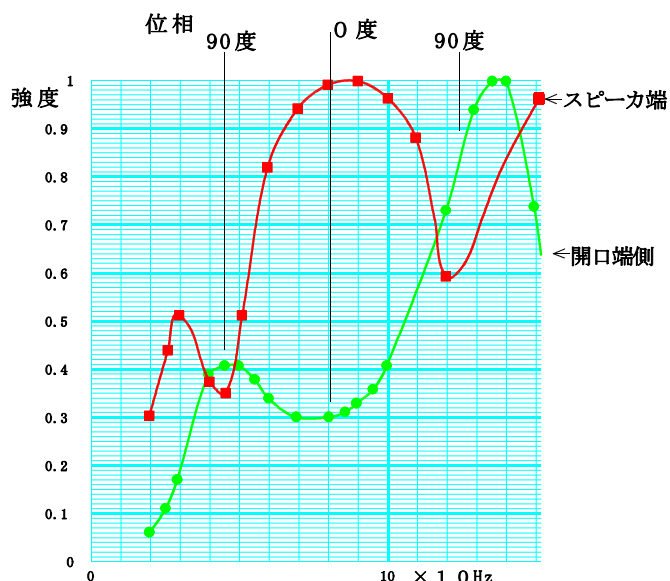


その原因を探るために、同じ条件で、スピーカ側にマイク A を設置してマイク B との位相の違い、及び周波数特性を測定した。

### 測定結果

このグラフの赤で描いた線がスピーカ側（マイク A）の周波数特性、緑で描いた線が開口端側（マイク B）で測定した周波数特性である。

赤のグラフを見ると、緑のグラフが盛り上がるところで音圧が下がっていることがわかる。閉管の気柱で共鳴を起こすと、ス



スピーカの振幅が小さくなる事がわかったが、その結果、スピーカ側（マイク A）の端では振幅が小さくなる結果、閉管の共鳴する周波数の近辺では逆に音圧が下がってしまうために生じた結果であると思われる。

マイク A，B の位相を見ると、45 Hz，120 Hz あたりで位相差が 90 度となるのは、この周波数で閉管の気柱の共鳴が生じていることを示している。つまり一方が節、他方が腹であるために位相差が 90 度となる。

80 Hz あたりの周波数では位相差が 0 度である。この周波数は開管の気柱の基本振動である。そしてその場合マイク A が負圧に変化すればマイク B も負圧に変化するので、共鳴は生じている事がわかる。

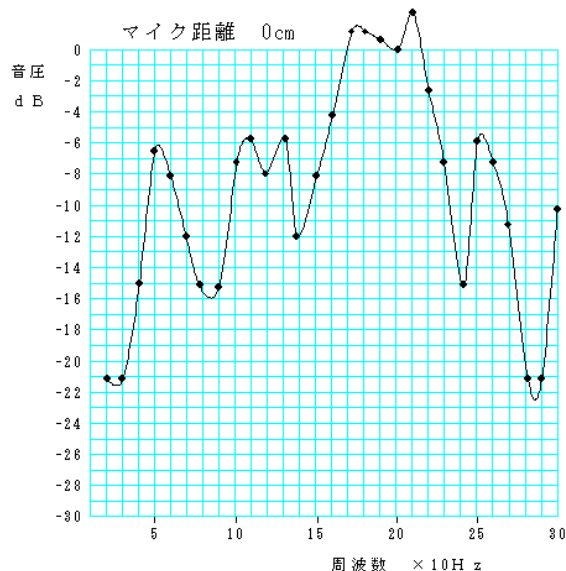
### 考察

- ・マイク B 側での周波数特性を見ると、共鳴で音圧にピーク（盛り上がり）が生じるのではなく、閉管の気柱の共鳴の周波数で、音圧が下がると考える事が正しいと思う。
- ・この様に一方の端にスピーカを取り付けた構造で共鳴を利用する場合、開管の共鳴よりも、閉管の気柱の共鳴の周波数で音が増強される方が強いようである。

### 試作機第 1 号，測定 2 の解析

スピーカのところが節となる閉管の共鳴が生じ、その場合振幅が抑圧される事がわかったので、測定 2 における実験結果を、この事実を使って説明できるか解析した。解析にはマイクを管口のところにおいて測定したグラフを用いた。

このグラフのように多数のピークが存在するのは次の理由によるものと仮定した。まずスピーカが有るところを基準にして両側にそれぞれ 1.7 m，0.85 m の気柱があると考え。次にそれぞれの気柱において開管・閉管の共鳴



が生じると考え、1.7mの開口部に設置したマイクで音を拾っているのに、0.85mの気柱が閉管の共鳴を生じる場合には振動板の振幅が抑圧されるので、その周波数で特性の谷、ディップが生じると考えた。なお、開口端補正は無視しておおよその共鳴周波数で見積もって、代表的な1つのピークを選び、その周波数をもとに他の共鳴する周波数を導いた。

ピークの位置

計算値	実測値	振動モード
43Hz	50Hz	閉管：基本振動
87	-	開管：基本振動
*130	110 130	閉管：3倍振動
*175	175	開管：2倍振動
217	210	閉管：5倍振動
261	255	開管：3倍振動
301	300	閉管：7倍振動

計算値	実測値	振動モード
*90	90Hz	閉管：基本振動
	120	-
	200	-
	240	-
270	285	閉管：3倍振動

\* マークは計算値のもとになった実測値。

計算結果を見ると開管の基本振動である87Hzのピークが見あたらない以外はすべてのピークが共鳴の結果生じている事がわかる。110Hzのピークは130Hzのピークの一部であると考えられる。ところでディップを見ると、90Hzが閉管の共鳴の基本振動であり、この結果振動板の振幅が抑圧され、1.7mの開口部ではディップが生じると考えられるので、87Hzのピークが存在しない結果になったと考えられる。同じメカニズムが285Hzでも働き、この場合明瞭にディップが生じている。なお、120,200,240Hzのディップはマイク距離を50cmで測定すると小さくなっているため共鳴以外の理由で生じたと思われる。(きしみなどのため)

この様に解析すると、ほぼ完全に周波数特性を説明できるので、スピーカの振動板のところが腹や節になる共鳴が存在することが確認できた。また、節になる共鳴が生じる場合振幅が抑圧される事も証明できた。



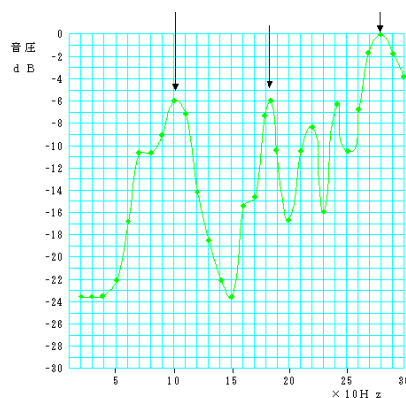
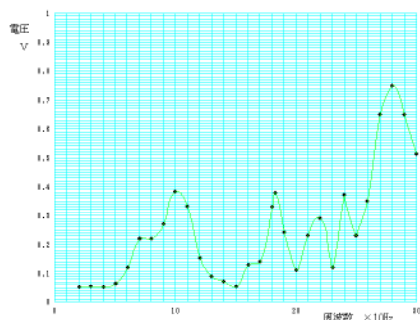
## 試作機 2 号の製作

試作機 1 号機は両端の管の開口端の距離が2.55mもあり，両端から同位相で音が出て，間隔が広すぎる。また，あまりにも長すぎるので，管を折り曲げて小型にした。写真がそのスピーカの内部構造である。



閉管での気柱の共鳴が，小型のスピーカを使った場合には理想的な方法であることがわかったが，両端での位相の変化などを考えると，ほぼ計算通りの結果が得られた試作機 1 号と同じ両端を 2 対 1 に内分する位置にスピーカを設置することに決定し製作した。また 2 号機は 1 号機の反省をもとに，9 ミリのベニア板で製作し，中の仕切り板は木ねじで固定し，上下の板も木ねじで固定しかなりがっちりとした構造にした。スピーカは写真の様に板にスピーカの大きさの穴をあけ取り付け，隙間が無いようにテープでふさいだ。

### 周波数特性



周波数特性の測定は，両開口端とマイクが正三角形の位置関係になるようにマイクをセットし測定した。またスピーカに供給した電圧は1.41Vで，スピーカのインピーダンスを8 とするとちょうど0.25Wになる電力で測定した。この電力ならば20Hzにおいても振動板の最大振幅により制限されない。グラフの左が測定電圧をそのままのスケールで描いたもの，右が試作機 1 号と比較のための縦軸を対数で描いたものである。

測定結果をみると右のグラフで矢印で示した周波数 約 185 Hz が開管の気柱で生じる定常波（なおかつ両端での位相が同位相）によるピークである。また，約 1000 Hz，2800 Hz のピークは，両端で同位相とはならないが，スピーカからみて長い気柱となる方で共鳴して生じていると考えられる。試作機 1 号の特性と比較すると 1000 Hz 前後での特性が良くなっている事がわかるが，必ずしも予測した特性とは違った特性であった。つまり，試作機 1 号であった閉管での気柱の共鳴が見あたらない。

## 試作機 2 号の試聴



作すると思う。

右の写真が試聴の様子で、アンプには周波数特性を測定するときに利用したものを、音楽ソースにはカセットデッキを利用した。

### 試聴結果

はじめに、試作機だけをアンプにつないで音楽を聴いた。試作機は高音がでないのもたついた感じの音に聞こえた。しかし、予想外に低音が響いている様に聞こえた。

次に上に乗せてあるスピーカだけをアンプにつなぎ試聴した。かなり低音が響いている。これならば特に試作機をつながなくても十分ではないかと思った。

さらに、2つを並列にして試聴した。低音もよく響いている。しかし、試作機を並列につないだ場合とそうでない場合の違いがよくわからない。そこで音楽を聴きながら次々とつなぎ変えて変化を調べた。その結果、やはり間違いなく、試作機を並列につなぐと低音が響いている。

そこで、じっくりと試聴をした。その結果、まず、2つのスピーカの能率の違いがあまりないので鮮明な違いは、ちょっと聞いただけではわからないが、じっくりと聞いてみると音の出方に違いがあるようである。まず、上のスピーカだけで再生した場合の低音は“締まり”があるというのが“ボン・ボン”という感じで響くが、試作機を並列に入れるとその低音に“ゆったり”した広がりのような感じが増えて“ポ～ン、ポ～ン”と響く感じになる。低音の豊かさが増すようである。しかし、研究を始める動機となった重低音とは違った感じであるが、試作機は試作機なりに豊かな低音を響かせてくれるようである。

## 試作機第 2 号の改良

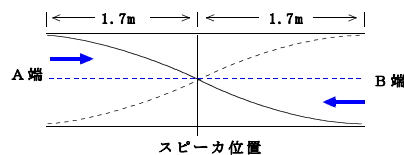
実験の結果、スピーカの所が節になる閉管の共鳴が生じることがわかった。このような現象は当初予想できなかったもので、試作機は 2 対 1 に筒を内分する点にスピーカを設置した。しかし、閉管



の共鳴が利用できるのであれば、次の2点でメリットがある。

1. 開管と比較して短い管で低い音に共鳴させられる。
2. スピーカの所が節になれば、振幅が抑圧されるので、大入力 of 低音でもスピーカの物理的な最大振幅によって制限されることが無くなり小さなスピーカでも重低音が再生できる。

そこで、次のような原理で動作するスピーカを設計した。



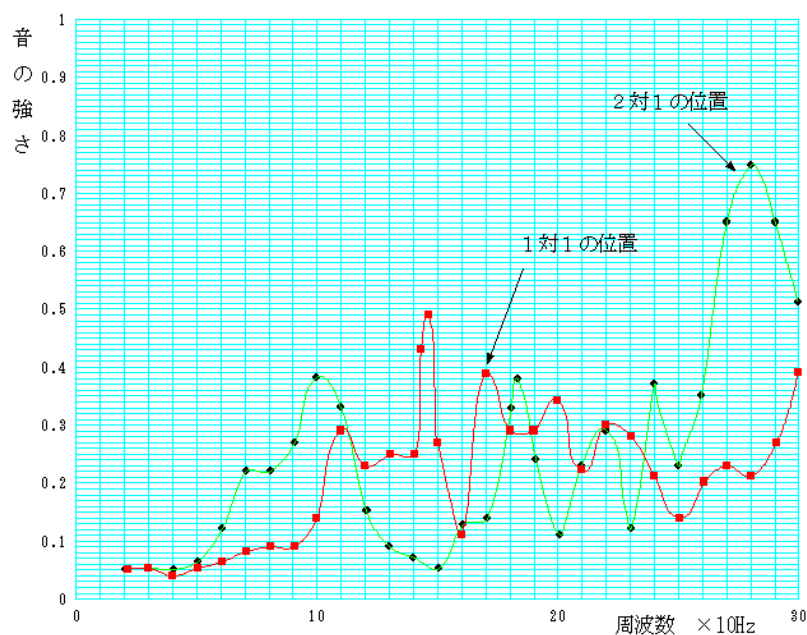
この場合スピーカの前後の管で、約50Hzの定常波（開口端補正を考えればもっと低い周波数で生じ）が生じ、しかもA、B両端の位相が同位相になるはずである。そこで、試作機第2号を改造し、スピーカの位置を管の中心になるようにして周波数特性を測定した。

### 測定結果

周波数特性は試作機第2号の特性と比較できるように、マイクとスピーカの位置関係を同じにした。また測定時にスピーカに加えた電圧も同じ1.41Vに設定し条件を測定した。

（気温も殆ど同じであった。なお、今回の実験全てを等して特に温度変化による音速の違いは無視し、音速を340m/sとしている。その理由は気温の変化による音速の変化は3%程度で、発振器の周波数設定の精度の方が誤差が大きいためである）

測定結果を見ると、50Hzあたりに生じるであろうピークは全くあらわれていない。



## 考察

今までの実験では予測を大きく裏切る結果はなかったが、全く予測外の結果である。実は試作機第2号を製作したとき、スピーカを写真の様に前後の管にすき間が生じるような適当な取り付け方をして音出しをしたときは明瞭な共鳴が生じなかった。(周波数特性は測定していない)この事から考えて管の状態、さらに形状に敏感に共鳴は左右される可能性がある。従って50Hzのピークが生じなかった原因は、管を曲げた事が関係しているとも考えられる。



つまり、曲げた結果管の壁の右側と左側では長さが違ってくるので、その結果管の長さの内側と外側の違いで共鳴する周波数に違いが生じるから共鳴が弱くなることが考えられる。試作機1号と2号とでは、ピークの幅が2号の方が広がっているのはこのためかもしれない。

## まとめ

1. 低音ほど指向性が良いので、高音と比較すると、スピーカとリスナーの距離があると相対的に低音の音圧が下がってしまう。そこで指向性を強めるようにスピーカを配列すると指向性が鋭くなるはずであるが、アレイマイクで得たデータである半波長の間隔で並べても、スピーカとリスナーの距離を十分にとらなければ効果がでない。従って現実的に部屋の中で聞くオーディオセットには適用できない。
2. 気柱の共鳴を利用して、低音を増強することは可能である。気柱の共鳴では閉管と開管の場合が考えられる。管にスピーカを取り付けたときには、スピーカの振動板は激しく振動するのであるから振動板は“腹”になると思っていた。しかし実験の結果“節”となる共鳴、つまりスピーカの振動板の側が節となる閉管の共鳴も生じることがわかった。
3. 低音を再生する場合、一定の音圧を発生する場合、低音ほどスピーカの振動板の振幅が大きくなる。小型のスピーカを利用する場合、機械的に振幅の上限が制限されるために、単にアンプで低音を上昇させても再生させることはできない。しかし、閉管の気柱で生じる共鳴では、共鳴する周波数で振幅が小さくなるので、小型のスピーカを利用した再生装置では閉管の気柱共鳴がもっとも都合がよい。なお、利用した直径10cmのスピーカの場合振幅の上限より受ける最大入力電力は150Hzで15W程度あるが、100Hzで約2W、50Hzでは1W以下にまで減少する。従って閉管の共鳴を利用する場合、100Hz以下の周波数に設定するのが合理的である。
4. スピーカの前後から発生する音は逆位相であり、そのままでは打ち消しあう。しかし、試作機1号のように、スピーカを管の途中に設置し、前後の管で共鳴を生じさせ、なおかつ両開口端での位相を同位相になるようにすれば効果がある。
5. 試作機第1号の周波数特性を、裸のスピーカと比較すると、共鳴した周波数では測定電圧が約2倍に増加している。共鳴する周波数の範囲は狭いが、補助的に利用すればかなり有効である。
6. 試作機第2号の特性を測定した結果、第1号と同じ様な共鳴の傾向はあったが、完全に一致はしなかった。この理由は現在検討中である。しかし、今までの箱に入れた14cmのスピーカが“ボン・ボン”と堅めの音であった低音が、“ポ～ン・ポ～ン”と広がるのある柔らかい低音に変わった。重低音ではないが、豊かな低音を響かせる。

## 反省と今後の課題

共鳴を利用して低音再生能力を向上させ、重低音を再生できる安値な装置を作る目的の研究であったが、必ずしも重低音を発生させる事には成功していない。ただし、顧問の中村先生は、試作機第2号の低音は、昔聞いた真空管アンプの音に雰囲気かいてっていると評価して下さいました。

共鳴は特定の周波数の音に対して生じるので不自然な再生音になるのではないかと懸念したが、低音域だけに限っているのも特に不自然ではなかった。しかし、多数の長さの違う管を1つのスピーカに取り付けて、色々な音に共鳴するスピーカを計画していたが、時間的に出来なかったのが残念である。

安値なスピーカで重低音を再生させようと計画したが、実験で使ったスピーカはあまりにも重低音再生には不向きであった。ちょっと大きめの低音を入力すると、すぐに“カサカサ”異音を発してしまった。

試作機第2号で、50Hzの音に共鳴をさせることに失敗した。この様な閉管の気柱共鳴で成功すれば理想的なスピーカとなるはずであった。今後十分に研究を深めたいと考えている。

課外授業が毎日のようにあった。研究をする時間がなかなか確保できず予定より大幅に遅れてしまった。（課外をさぼると顧問が異常に怒った）研究が遅れぎみであったので、別グループ（手塚班）の助けをかりたが、その結果別グループの研究が進まなくなってしまった。この場でお詫びしたい。