

フェイズドアレイ・マイクロフォンの研究

栃木県立宇都宮清陵高等学校

科学研究部

横山健次 植木隆仁 手塚浩美

田崎秀聡 小林祐也

はじめに

複数のマイクを並べ、各マイクに入射する音波の位相差を利用して、指向性の鋭い高性能な集音マイクを開発した。

フェイズドアレイレーダーは、小さなアンテナ素子を並べて各素子に供給する電波の位相を電氣的に切り替えることで、アンテナを回転させずに物体を探知するレーダーである。放射する電波は大変鋭く絞られ、ペンシルビームと呼ばれている。電波を音波に置き換えれば、位相を電氣的に制御することは我々には出来ないまでも、多数のマイクを並べることで、大変鋭い指向性の集音マイクが製作できるのではないかと考えた。そして、基礎的な実験を積み上げて集音マイクを完成させた。

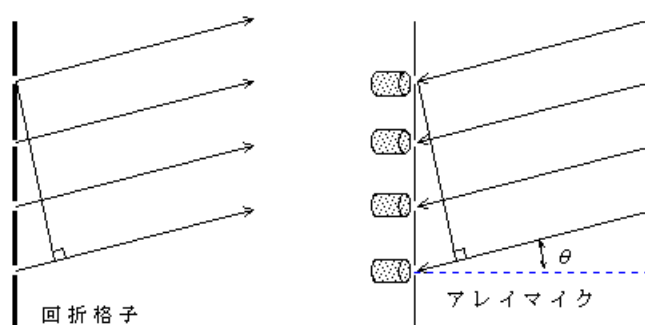
研究の動機

昨年度の本校の創立記念講演会で、東工大教授の後藤尚久先生のお話を聞き、公演後、先生の著書「アンテナの科学」を読んだ。そして、電子的に位相差をつけた信号を多数のアンテナから放射することで、機械的にアンテナを回転させることなく動作するフェイズドアレイレーダーを知った。本を読んだ時期の物理の授業は、丁度、波の干渉を学んでいたもので、回折格子で特定の方向の波が強め合うことと同じ原理であることに気づいた。そして、同じ波動現象である音波に応用して、多数のマイクロホンを使い、位相差を利用し、特定の方向の声にのみ強い感度のあるマイクロホンを自作できるのではないかと考えた。そして、この方式による集音マイクを、フェイズドアレイレーダーになぞらえて、フェイズドアレイ・マイクロフォンと命名し、研究をスタートした。

研究方法

正面に対して、指向性の鋭い集音マイクを自作することを最終目標においた。電氣的に位相差を付けて、指向性のある方向をコントロールすることは考えていない。従って、正面からの音以外に対しては、各マイクからの信号が打ち消され、正面からの音（音声）のみを集音するマイクを開発することにした。

ヤングの干渉実験で得られる干渉縞と、回折格子で得られる干渉縞とでは、明らかに回折格子で得られる縞の方がシャープである。この違いを物理の授業で気づいたが、この事は、数多くの小型アンテナを組み合わせたフェイズドアレイアンテナで、鋭い放射パターンが得られる事と同じ原理である。



我々が考えたアレイマイクの動作原理は、この図のように、格子の所にマイクロフォンを多数並べると、仮に図の角度で打ち消し合うとすれば、各マイクロフォンからの信号を電氣的に同位相で加算すると出力を生じない。つまり鋭い指向性特性が生じると考えた。

そこで回折格子にならい考察すると、マイクの間隔を d 、音波の波長を λ 、角度を θ とすると明線の出来るための条件は $d \sin \theta = m \lambda$ となる。そこで、間隔を調整して、明線が出来る条件の角度 θ が、前方にのみ存在するようにすれば良いのではないかと考えた。

そこで、回折格子による干渉と同じ干渉が音波でも生じるのか、まず動作原理を確認するための基礎的な実験を行い。次に、実際に製作するための基礎となるデータを収集し、

何本のマイクを利用するのが合理的か。

マイクをどのような間隔で並べると良いか。

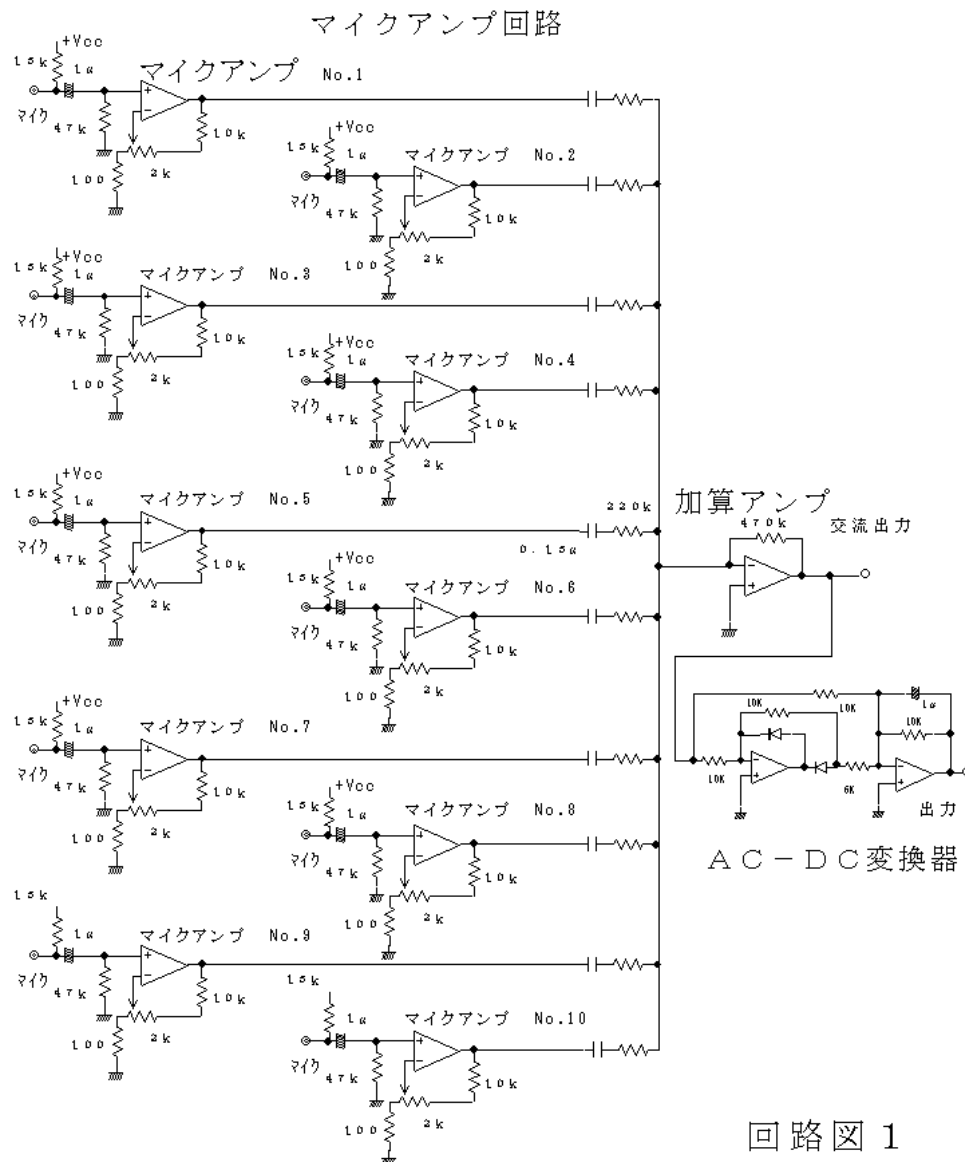
マイクをどのような位置関係に設置するか。

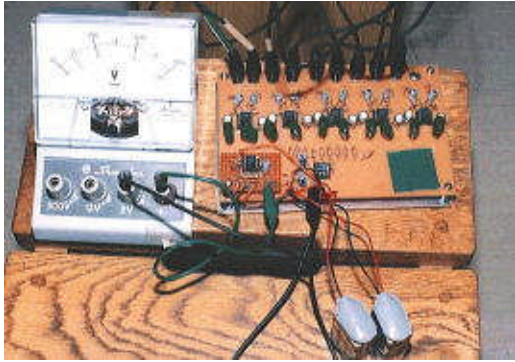
以上の3点を決定するための合理的根拠を実験より得ることにした。また、シミュレーションプログラムを積極的に利用し、実験の指針とする一方、理論と実測の違いに着目し実験の問題点を洗い出す手がかりにした。

実験装置

(1)マイクアンプ回路

実験を行うために、タイピン型マイクロフォン（コンデンサー型）用のマイクアンプの自作から開始した。何本のマイクロフォンを組み合わせるかは不明であったので、とりあえず10台分のアンプを自作した。さらに各マイクの信号を重ね合わせるための加算アンプ（各マイクに入射した音声はまず電気信号に変換し、このアンプで重ね合わせる。波の重ね合わせは電気信号の形で行うことになる）、信号の強度（振幅）をメーターで読みとるための絶対値回路（AC-DCコンバータ）を自作した。絶対値回路が必要な理由は、交流電圧計で感度の高い電圧計が無かったので、交流を直流に直し直流電圧計で読みとることになった。





自作にあたり、回路は先生に設計していただき、その回路を元に配線パターンを設計、プリント基板を起し回路を組み立てた。(回路図1、写真1)回路はマイクの信号を100倍から5倍まで調整できるようにし、各マイクの感度の違いを補正できるように注意した。

写真1 マイクアンプ回路

(2)回転テーブル

フェイズドアレイ・マイクの指向性を測定するために、回転テーブルを自作した(写真2)。テーブルは9mmのベニア板で作製し、10度刻みで角度を描き、手でテーブルを回転させる方式を用いた。マイクが大型になる可能性があるのでかなり丈夫に作った。

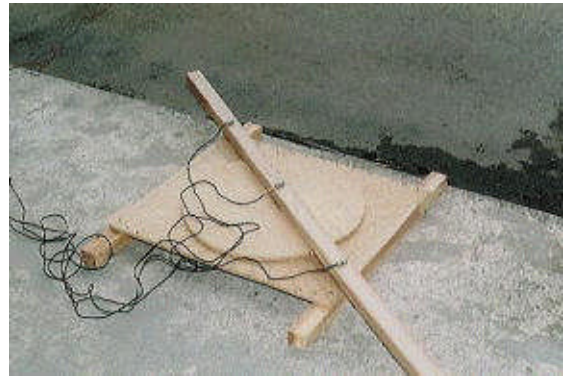
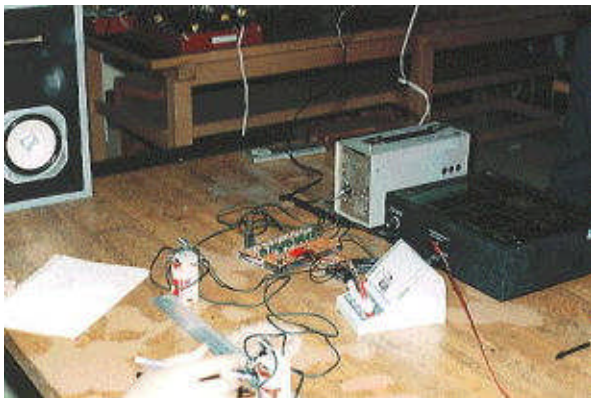


写真2 回転テーブル

(3)発信器、増幅器、スピーカ



低周波発信器の出力を、最大出力20Wの増幅器で増幅し、口径12cmのフルレンジスピーカを駆動し音源とした。マイクで拾った音波の振幅は、直流電圧計で読みとった。測定でもっとも苦労した事は、周囲から色々な騒音が入り込むので、放課後人氣が無くなってから行った。また室内で行った実験では

写真3 実験装置全景

反射波の影響がかなりあり苦労した。従って予備実験は室内で行ったが、殆ど実験はが室外で行った。

研究結果

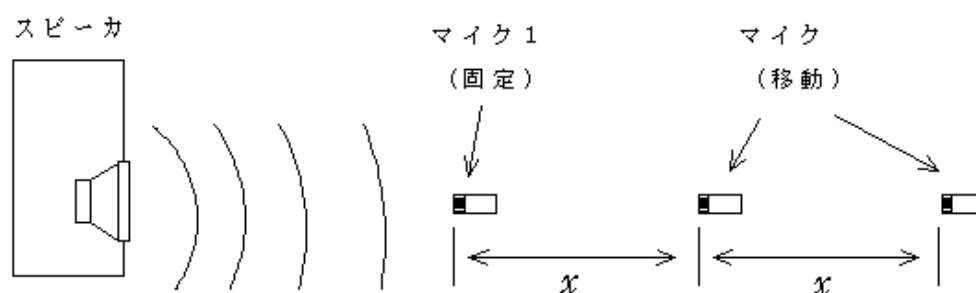
1. 位相差による打ち消しの基礎データ

波は同位相では強め合い、逆位相では打ち消し合う。しかし、その位相が同位相（0度）から逆位相（180度）の間にある時の振幅はどのような値になるかは学んではいない。さらに、回折格子のように、一定の位相差がある2つ以上の波が重ね合わさる場合の、位相差と振幅の関係も確認したことがない。そこでパソコンを利用してシミュレーションする事にした。そして実際に複数のマイクを使って実測し、計算結果と比較検討した。

実験方法は、スピーカから1kHzの正弦波を発生させ、1つのマイクを固定し、他方のマイクを少しずつスピーカとマイクを結ぶ線の後方にずらしながら、重ね合わせる波の位相を0度～180度まで連続的に変化させ、2つのマイクで拾った波を重ね合わせ振幅を測定した。

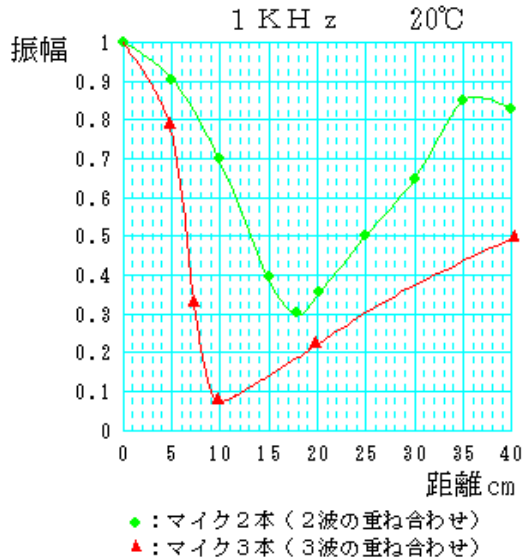
次に、一定の位相差のある多数の波の重ね合わせでは、位相差によって振幅がどのように変化するか1つのマイクを固定し、2つのマイクを、各々のマイクの間隔は等しくしてずらし、同じ位相差のある波を合成し振幅を測定した。

このように、重ね合わせる波が2つの場合と3つの場合とで位相差と振幅の関係を比較検討した。なお、実験を始める前に、各マイクをスピーカから等距離の位置に置き、各マイクからの信号の振幅を同じにそろえた。

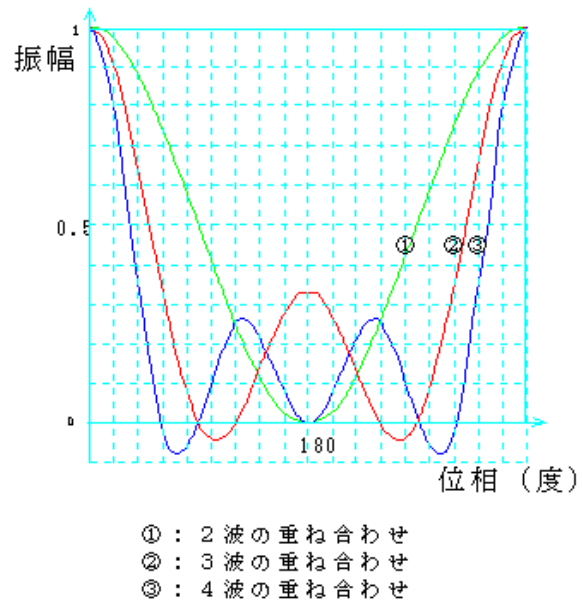


グラフ1-1が測定値、グラフ1-2がシミュレーション（プログラムNo.1）によって得られた理論値である。1kHzの音波の半波長が約17cm、従って17cmの距離の差があるマイクに入った波は位相が180度ずれる。1-1からもその様子が確認できる。完全に打ち消し合わない理由は、後方に置いたマイクに入る音の振幅が減少するためで、逆位相になっても振幅が違うので完全に打ち消すことができないことによる。

グラフ1-1 実測値



グラフ1-2 理論値



音の周波数を 500 Hz にして同じ方法で実験すると、マイクの間隔を半波長の距離にしても、振幅は顕著に減少しない。これは、スピーカから放射される波が球面状に広がり、音源から離れると急激に音圧が下がるためである。スピーカの指向性は、高い周波数で悪くなるが、この理由は音が球面波でなく平面波に近くなるためで、この場合距離が変化しても音圧の低下は少ない。振動板の大きさが、発生する音の波長に対して十分に小さい場合、発生する音は球面波状で指向性がよいと一般的に言われている。

以上、完全に理想的な条件では無いが、

0度～180度の位相差のある波を重ね合わせるとなめらかに減少する曲線（余弦曲線）になる。

重ね合わせる波の数が増えると振幅は、0度から急激に減少するが、振動する。

複数のマイクを使った集音器が完成した場合、音源とマイクの距離がある程度離れていないと、

各マイクに入る音の位相が乱れ、良い指向性特性は生じない。

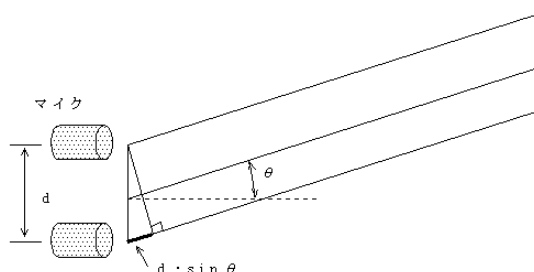
などの事が基礎実験で判明した。

2. 複数のマイクを組み合わせたときの指向性

理論的考察

1.の実験で、一定の位相差のある複数の波を重ね合わせると急激に振幅が変化することがわかった。従って、(当然だが)光と同じように音波でも干渉による打ち消しが出来る。

そこで、まずマイク2本を使うとき、マイクの間隔をどの程度に選んだらよいかを理論的に考察することにする。



この図のようにマイク2本を間隔 d で並べたとき、方向の遠方からやってくる音波に対し、

$d \sin \theta$

の距離の差があり、位相差が生じることになる。

この音波の波長を λ としたとき、2つのマイクの出力

信号を加算したときに強めあう条件は、 $d \sin \theta = m \lambda$ $m=0, 1, 2, \dots$

しかし、集音マイクとして利用するためには、 $m \neq 0$ 以外に上式を満足しないようにマイク間隔 d を選ばなければならない。そこで式を変形すると。

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d} m \quad \text{.....②}$$

が $m \neq 0$ 以外で強めあわないと言うことは、 $m \neq 0$ 以外で成り立たなければ良い。つまり $\sin \theta$ の最大値は1であるから

$$\frac{\lambda}{d} > 1 \quad \text{従って} \quad d < \lambda \quad \text{.....③}$$

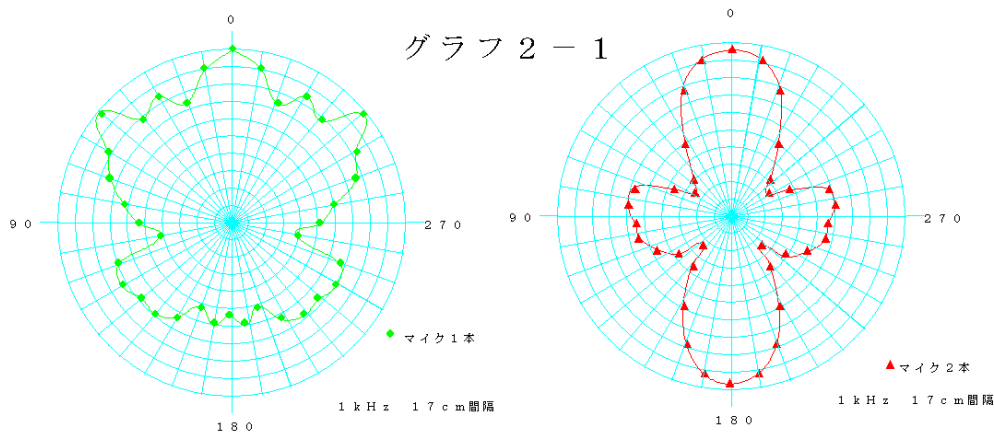
の条件が成り立てば $m \neq 0$ 以外では成立しない。

以上の考察より、マイクの間隔を集音しようとする音の波長 λ 以下に設定すれば $m \neq 0$ 以外では強めあわない(勿論 $\theta = 180$ 度でも強めあう)ことになる。しかし、グラフ1 - 2から完全に位相がそろわなくても、例えば90度の位相のずれた波を重ね合わせても、合成された波の振幅は位相差ゼロで重ね合わせた場合の二分の一の大きさにはなる。従って、式③の条件が成り立っていても、 $m \neq 0$ 以外での振幅の変化を考慮する必要があると思う。そこで、最も単純な場合であるマイク2本を使い、その間隔を測定しようとする音波の半波長間隔で並べて指向性特性を実測し、どのような特性を示すか確認した。

マイク2本の指向性特性

グラフ 2 - 1 は、緑の線が測定に使用したタイピンマイク 1 本の指向性特性である。ほぼ無指向性の特性であると言える。測定は 0 度 ~ 180 度まで 10 度毎に振幅を測定した。

グラフの左側の赤の線で描いた指向性特性は、このマイクを 2 本、1 K H z の音に対して 1/2 波長間隔で並べた場合の特性をグラフに示したものである。



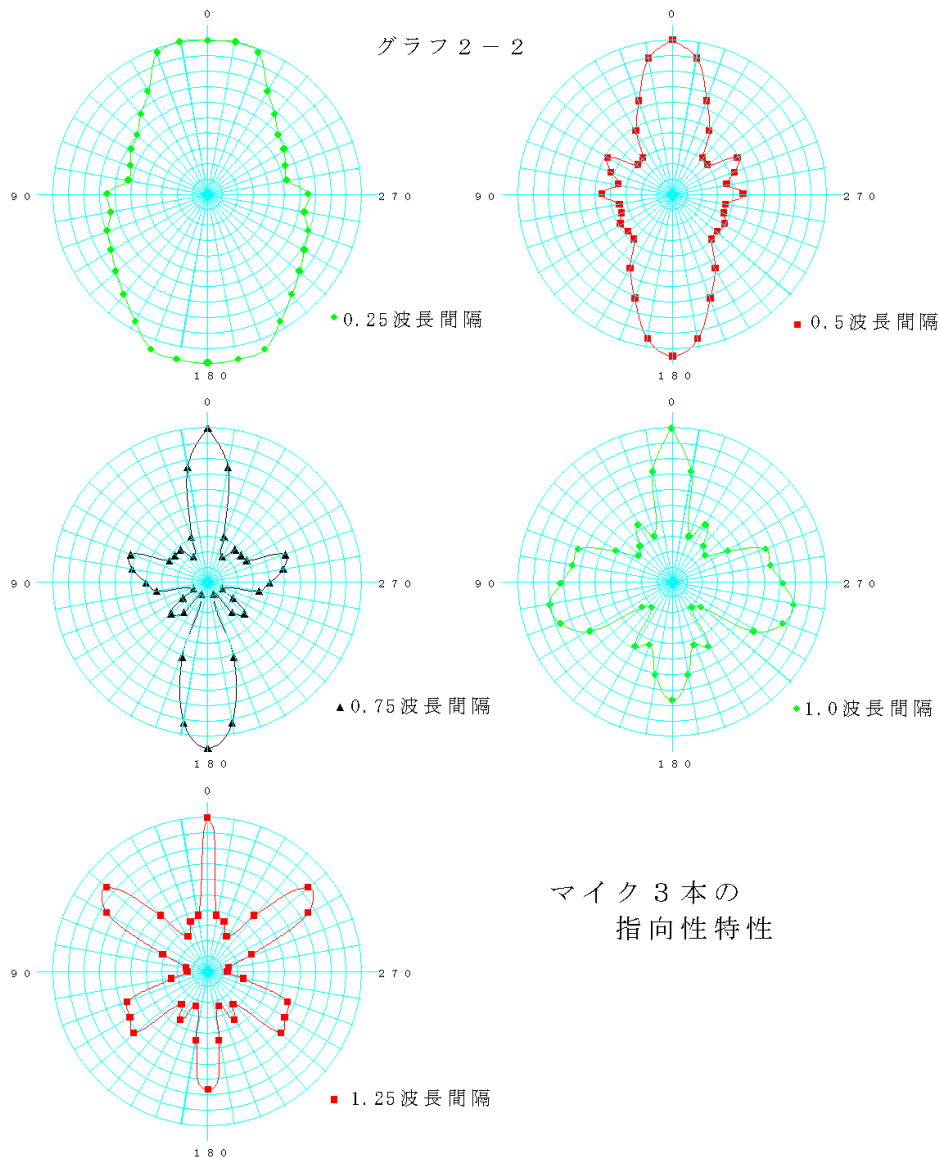
グラフからわかるように、90 度の方向に ≈ 0 の感度の半分程度の感度を示すピークが生じている。予想通り、単純に $d < \lambda$ の条件で間隔を決定できないことがわかる。従って、マイクの数を増やした場合、マイク間隔で微妙に特性が変化する可能性がある。

マイク 3 本の指向性特性

次に、3 個のマイクロフォンを回折格子のように、直線上に並べ、マイク間隔を色々な場合について指向性を測定した。測定には 1 K H z の正弦波を用い、回転台にマイクを写真 2 のように並べ、角度を 10 度きざみで変えてマイクアンプ回路の出力電圧を直流電圧計で読み取った。

測定ではマイク間隔を 0.25、0.5、0.75、1.0、1.25 と 0.25 間隔で変えた。なお、間隔が 1.0 以上の場合の特性も参考に測定した。

グラフ 2 - 2 が 3 本のマイクの間隔を 0.25、0.5、0.75、1.0、1.25 に変えて測定した場合の指向性特性である。測定を始める前に、各マイクの感度が同じになるように、それぞれのマイクアンプの増幅度を調整してある。なお測定は室内で行った。



測定結果から，

間隔を集音しようとする波長に対して短くしていくと，合成された指向性は 1 本のマイクの指向性からの改善率は低くなる。

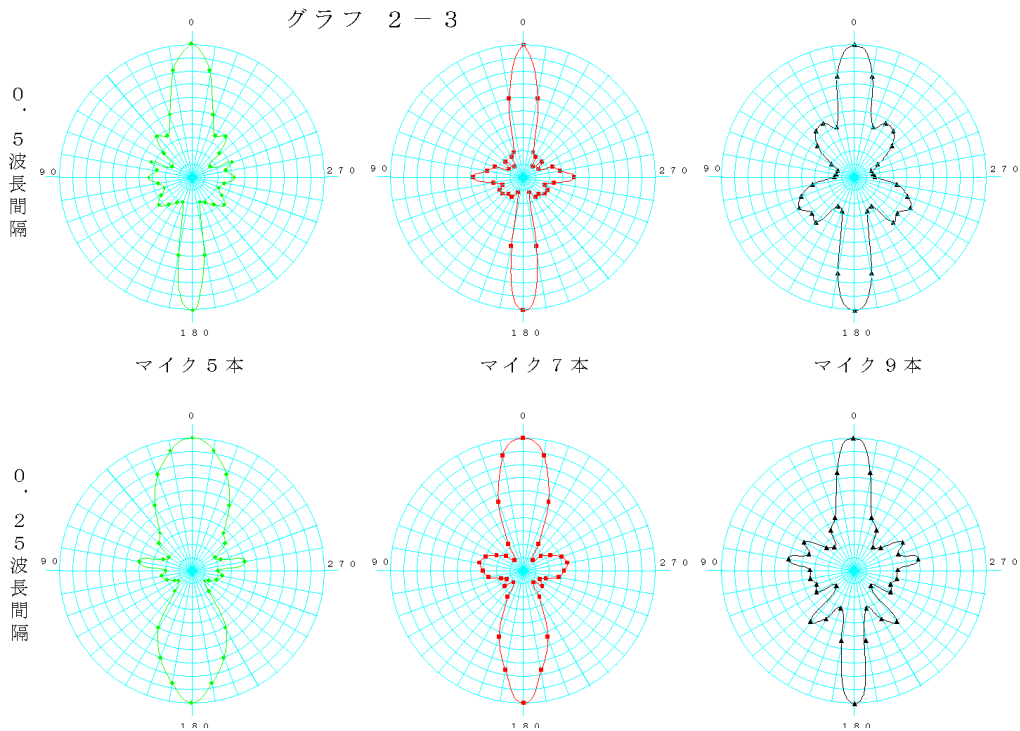
しかし，あまり間隔をあけすぎると（半波長程度以上）横方向に対する感度のピークが目立ち大変特性が乱れる。しかし，正面の指向性を示すピークは鋭くなる。

間隔を 以上にとった場合，予想したとおり，前方以外にも位相差がゼロになる角度が生じ，複数の方向にピークを持った指向性特性を示す。従って，集音マイクとしては問題がある。

以上の事より，大まかに見て，間隔には最適値が存在し，集音しようとする音の半波長程度の間隔がそれにあたると思われる。

マイクの数を増やしたときの指向性特性

さらに、マイクの本数を5, 7, 9本と増やし、1 K H zの音波を使い、各マイクの間隔を、マイク3本のデータを参考にして、素直な特性が得られる0.5波長, 0.25波長の場合について指向性特性を測定した。測定は反射音の影響を避けるために屋外で行った。



グラフ 2 - 3 が測定結果である。その結果、

マイクの本数が5 ~ 7本へと多くなるほど指向性が鋭くなっている。しかし、9本に増やした場合は指向性特性に乱れがあらわれており、必ずしも7本と比べて向上したとは断言できない。マイクの本数にも最も効果的な本数が存在すると考えられる。この理由は、スピーカとマイクの距離が3 m程度であったのに、マイクの横幅が1.3 mにも及び、両翼のマイクに入る音と、中心付近のマイクに入る音に位相差が生じたためと考えられる。従って、実際に集音を考えたときにマイクシステムの幅が大きくなりすぎるのは問題であるから、闇雲に多くのマイクを並べることは必ずしも合理的ではない。

グラフ 2 - 3 の下の指向性特性は、0.25波長間隔で並べた場合の指向性特性である。1 K H z で0.5波長でも500 H zの音に対しては0.25波長であるから、周波数の低い音波に対する指向性特性は悪化する。しかし、マイクの本数が多ければ、相対的に悪化は目立ちにくい。

アレイマイクは全ての周波数に対して同じ指向性特性を原理的に示すことは出来ない。そこで、マイクの間隔を何cmにすれば良いかは集音しようとする音の周波数によって変える必要がある。しかし、人の声に限らず、自然界の音は、単一の周波数であるはずがなく、色々な周波数の成分をもっている。従って、マイクの間隔を決めるためには音声の周波数成分を測定し、その特徴を考慮した間隔に選ぶ必要があると思う。

3. 人の声のスペクトル

実験の結果、アレイマイクの間隔は集音しようとする音の波長の半波長程度に選ぶのが合理的であることがわかった。しかし、波長によって指向性特性は変化する問題点がある。勿論、人の声は単一の周波数ではなく、色々な周波数成分を持っている。従ってどの周波数の半波長に選ぶかを、スペクトルの特徴をもとに検討する必要がある。



写真 4

そこで、何人かの者の声の周波数成分を測定し、間隔を決定することにした。周波数成分の測定には、Lux Kit AUDIO SPECTRUM INDICATOR model A810（写真 4）をマイクは松下電器 WM-331を使用した。この測定器は、下表の周波数を中心周波数とする成分の割合をバーグラフ表示するもので、分解能は低いが、我々の利用目的から考えて十分である。

表は 38 歳男性の“あいうえお”の各音の周波数成分を測定しまとめたものである。表を見ると 440 Hz 以下及び 3.5 kHz 以上の周波数成分は限られている。その他、多くの者のスペクトルを測定したが、この測定器の分解能で見える限り、殆ど同じ傾向を示している。（添付資料参照）

音 \ Hz	28	55	110	240	440	880	1.8k	3.5k	7.0k	14k
あ	-	-	-6	-15	-3	0	-21	-15	-2	-
い	-	-21	-12	-12	-12	-15	-12	0	-6	-21
う	-	-21	-12	-12	0	-21	-	-21	-	-
え	-	-21	-9	-12	0	-15	-12	-15	-18	-21
お	-	-	-9	-15	0	-15	-	-	-	-

注) 単位：dB サンプル：38 歳 男性 職業：教員

スペクトルの測定結果から、マイクの間隔を決めるにあたり、指向性特性がマイクの間隔によって集音する音の波長に対して間隔が小さい場合は、指向性が悪化し 1 本のマイクの特性に近づく。逆に間隔を大きくとりすぎると、ピークが複数発生する。

という相反する特徴を考慮すると、最も合理的と考えられる間隔は、基準とする周波数を 880 Hz において、その半波長の 19 cm 程度とするのが最適であると思われる。

19 cm に選ぶ理由は、表を見ると 440 Hz がスペクトルのピークになる音が多いようであるが、アレイマイクの場合、上記の から間隔を短めに設定した方が、総合的に素直な指向性特性を示すためである。従って 880 Hz を基準に選ぶことにした。

4. アレイマイクの試聴

アレイマイクを使って、実際の音声を試聴した。マイクの間隔は19cm、7本のマイクを直線上に並べて行った。自作したアンプの出力をオーディオアンプに接続しスピーカで聞いた。



写真5は試聴実験を行う前に各マイクの感度をそろえている様子である。当然、どのマイクがどのマイクアンプに接続するか確認する必要がある。

室内での調整や実験では壁面からの反射音が無視できないので、暗幕を張って行ったが、反

写真5

射音が無視できず、指向性特性の測定では180度回転させたときの感度が大きく変化する。通常実験は屋外で行っている。しかし、各マイクの感度をあわせるためには、雑音の少ない室内で行う必要がある。



写真
6



写真7

写真6は、7本のマイクを使い、屋外にセットした風景である。写真7が室内で聞いている様子である。この時、写真6で人が立っているところにラジオをおいて音源とした。また偶然通りかかった女子の音声なども実験に利用した。

実験の結果、明瞭に音声が聞き取れ実験は成功したと思った。特に驚いたことは、50mほど前方の道路を走行した車の音が、急に聞こえたことであった。しかし、風きり音のためスピーカが大きく振動することと、スズメの鳴き声が強く聞こえた。しかし、不思議なことに、通りかかった女子の話の内容が、驚くほど明瞭に判断できたことで、スズメの鳴き声がうるさいと言う者もいたが、内容の判断の邪魔にはならなかった。

試聴の結果、次のような点に気づいた。

指向性特性が前後で全く対象であるため、後方の音をそのまま拾ってしまう。

屋外での試聴であったために、風きり音を強く拾ってしまう。

ヘリコプターが上空をよぎった時、どこからともなく唸るような音が強く聞こえた。

常時スズメの鳴き声が大変強く入感した。

そこで、これらの点を整理し問題点を洗い出すことにした。

まず に関しては、前方向からの音のみを拾うような工夫が必要がある。一般に使われているマイクは単一指向性特性を示すものが殆どである。従って単一指向性特性のマイクを使いアレイマイクとすれば解決できる。しかし7個のマイクを購入するほどの予算はない。タイピンマイク（一個千円で購入）を工夫して位相差を利用し、単一指向性マイクを合成できないか研究する価値はある。

、 に関しては、低い周波数成分の音を電氣的に増幅しないようにすれば簡単に解決できる。音声のスペクトルを測定した結果、低い周波数の成分はそれほど多くはないので、低周波成分は切り落としても問題にはならない。さらに、間隔に対して長い波長の周波数に対する指向性は悪化するるので一挙両得である。

の問題に関しては、アレイマイクが原理的に持っている問題に関係する。アレイマイクは各マイクの位相差を利用して正面以外の音を打ち消すことで鋭い指向性を得ている。しかし、 の音は、校舎や地面、その他の構造物で複雑に反射した音が各マイクに入射している。従って各マイクに入った音の間に一定の位相関係が存在しない場合は打ち消しあわない。

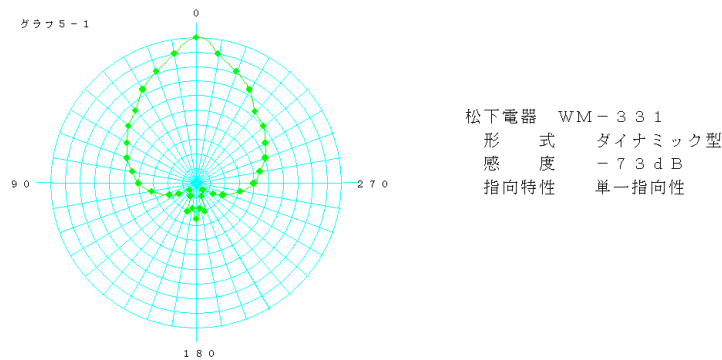
に関しては、スズメの鳴き声が設定したマイク間隔に比べて短い波長の音であるので、色々な方向に感度を持ち、強く聞こえてしまう。従って、指向性特性が乱れる周波数の高い成分に対して、アンプに周波数特性を持たせて、高い音をカットするようにすればある程度改善できると思う。

意外に好結果が得られた点もあった。

普通の部品で作ったマイクアンプであるが、アンプが発生する雑音が殆ど目立たなかった。従って、風きり音を無視すればかなり増幅度を大きくする事も可能である。アンプの雑音に信号が埋もれて聞き取れない、そんな問題は発生しない感じがする。

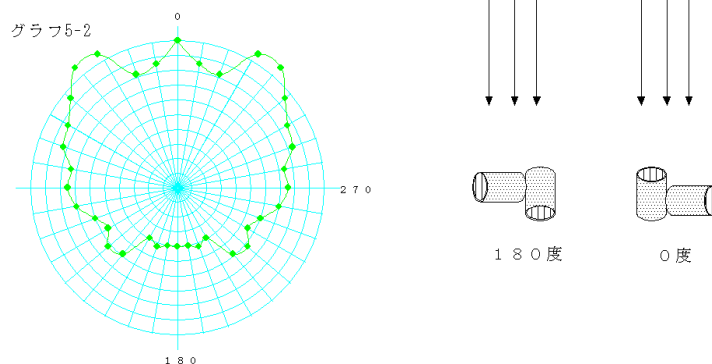
5. 単一指向性マイクロフォン

マイクを直線上に並べて得られる指向性は、前後に対象な指向性を示す。一般に単一指向性マイクとして販売されているマイクは前方にのみ感度を持つ。グラフ5-1は市販マイクの指向特性を実測した結果である。



マイクを組み合わせることで前後で感度差を作り出す方法を考えた。

まず、マイク2本で、位相差を利用して実現できないか試した。グラフ5-2のようにマイクを配置にすると、180度回転させたとき、一方のマイクは常に音源に垂直で、他方のマイクは前方に音源がくる場合と、後方に音源がくるような位置関係になる。従って前後で感度に変化が生じる可能性があるかと予測した。その背景には、このような配置にし、音波の進行方向と平行な位置に振動板を置けば、位相変化がなく。音波の進行方向に垂直に振動板を置けば、正面を向けたときと、逆に向けたときでは、このマイクからの信号の位相は180度変化するだろうから、2つのマイクを垂直に置くことで、一方向からの音のみに感度があるマイクが出来ると考えた。



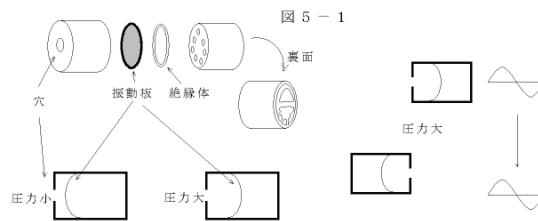
グラフ5-2の測定結果を見ると、若干前後で感度に差は生じているが単一指向性マイクと言うにはほど遠い。残念ながら予測は違っていた。

予測の何が間違っていたのかを確かめるために、マイクからの信号の位相の変化をシンクロスコープで観察した。測定は2本のマイクを使い、一方のマイクを固定し、他方のマイクを動かして、

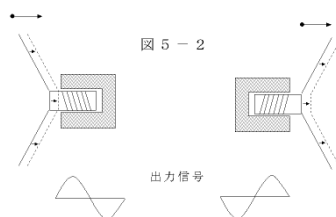
どのように位相差が生じるかを測定した。その結果、マイクを前後に動かせば位相は変化する。しかし、マイクを回転させて、今まで正面から受けて状態を、背面に音源が来るように180度回転させても位相に変化は見られなかった。結局タイピンマイクを回転させても信号に位相の変化が生じないために予測通りの結果にはならなかった。

マイクの動作原理の確認

マイクは空気の動きに振動板が同期して動き、電気信号に変換する装置であると考えていた。このように考えれば、マイクを180度回転させると振動板の動きが逆転するので、出力信号の位相も逆転すると思いこんでいた。その根拠になったのがスピーカの振動板の動きと位相の関係で、アンプの出力端子のプラスマイナスを逆に接続すると、音の位相も180度変化する。しかし、タイピンマイクの出力信号の位相は180度回転させても全く変化がなく、マイクの振動板は空気の動きに追従しないと結論づけられる。



そこで、小さなコンデンサマイクを分解し構造を調べてみた。図5-1が分解した時のスケッチである。我々が利用したタイピンマイクはコンデンサマイクで、振動板の後ろ側がケースで被われていて振動板の後ろの空間と外側の空間の圧力差で振動板が振動する構造になっていた。従ってマイクを180度回転させても図5-1の様に振動板の変化する方向は同じであるから、出力される電気信号の位相は変化しないことが解る。それに対しスピーカをマイク代わりに用い180度回転させて出力信号の位相の変化を見ると、コンデンサマイクとは違って、位相が反転した。



スピーカの場合、振動板の前後での圧力差は生じないと考えられるので、振動板は媒質の変位に追従して動くと考えられる。従って180度回転させると出力信号の位相が反転する。

6. 合成単一指向性マイク

タイピンマイクは無指向性で、全方向からの音波に対して出力電圧の位相変化はない。これに対しスピーカをマイク代わりに利用すると、前方向からの音波に対して後方からの音波は位相が反転する。この動作原理の違う2つのマイクからの音を重ね合わせると、前方からの音波に対しては同位相、後方からの音波に対しては逆位相で重ね合わさることになる。従って前方からの音に対してのみ感度を持つ単一指向性マイクが合成されるはずである。

そこで、写真8のようにマイクとスピーカを組み合わせ、2つのマイクの信号を加算して、指向性特性を測定した。測定は1 K H zの正弦波を用い、2つのマイクの間隔をできるだけ小さくし、なおかつ中心が回転テーブルの中心に位置するようにした。

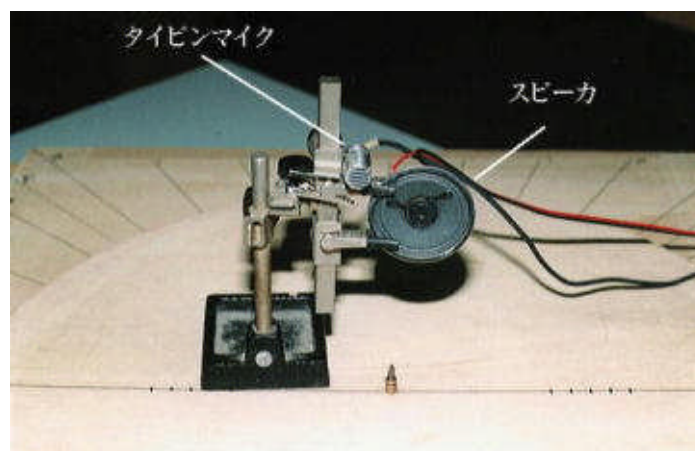


写真 8

写真9、10はマイクとスピーカから拾った音の前後での位相の違いをシンクロスコープで確認した写真である。写真9は、0度方向からの音波に対するスピーカとマイクの信号を観察したもので、双方の信号が同位相であることがわかる。それに対して、写真10は180度（後方）からの音波に対するそれぞれの信号を観察した写真である。写真9と違って2つの信号の位相は逆位相の関係になっていることがわかる。従ってこの2つの波を加算すると完全に打ち消しあうはずである。

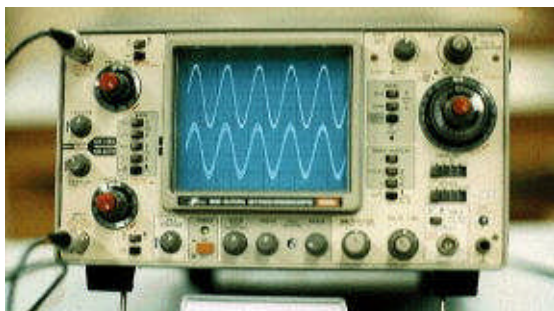


写真 9

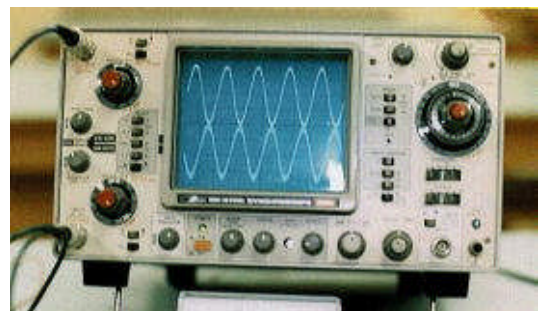
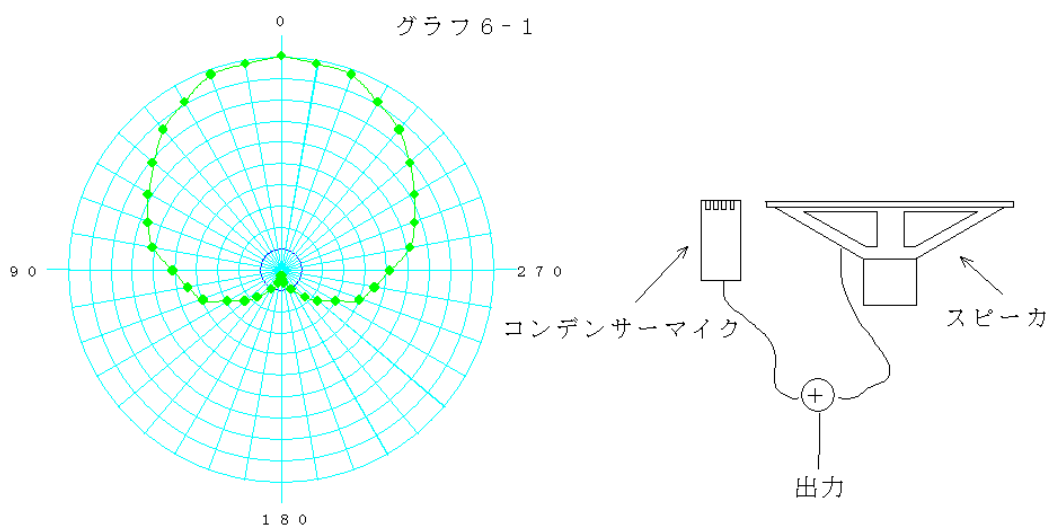


写真 10

グラフ6-1が測定したマイクの指向性特性である。完全に後方からの音に対しては感度がなく

なっていることが確認できる。

このようにして単一指向性マイクを動作原理の違う2つのマイクを使い、位相の違いを利用して実現できた。この合成単一指向性マイクは、アレイマイクが位相の違いを利用して鋭い指向性特性を得たことと位相の変化を利用する点では同じであるが、マイクとスピーカの前後の音に対する位相特性の違いは、原理的に波長によらないので、スピーカとコンデンサーマイクの周波数特性が一致していれば、全ての周波数に対して後方からの音は打ち消されることになるはずである。従ってアレイマイクが波長によって指向性が変化するようなことはない。



実際の単一指向性マイクを分解して調べたところ、振動板の後ろ側の容器に小さな穴があいていることがわかった。おそらく我々が電氣的に単一指向性特性を得たことに対して、実際の製品は機械的に、圧力で反応する成分と、空気の振動に反応する成分を作り出して特性を作っているように考えられる。

なお、パソコンによるシミュレーションの結果、グラフ 6 - 1 の指向性特性は、グラフ 1 - 2 の 2 波の重ね合わせのグラフを、位相の違いを円の中心角度で示し、振幅を中心からの距離で表すように、表現方法を変えた場合の結果と完全に一致した。(プログラムNO.2)

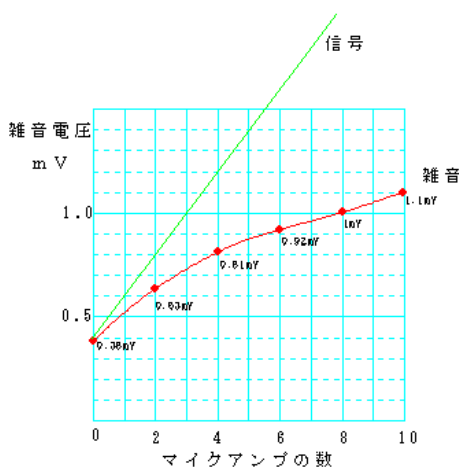
7. アレイマイクアンプの特性

測定結果の各マイクアンプ雑音出力とは、各マイクアンプのTP端子での雑音電圧を測定した。さらに加算アンプ雑音出力とは10個のマイクアンプの信号を加算し、増幅率3倍の加算アンプの出力端子で測定した。

測定結果から、雑音電圧に関して大変不思議な結果が得られた。各アンプの発生する雑音電圧は加算アンプで合計される。各アンプの雑音電圧の合計は1.14mVである。従って加算アンプの雑音電圧は、この電圧を3倍した値である4.23mVの雑音を発生すると予測される。ところが、測定結果を見ると1.10mVで、この値の26%の値でしかなく、雑音電圧が小さくなっている。つまり各アンプの雑音電圧の単純合計にはなっていない。そこで次の様な実験を行った。

マイクアンプは2ch内蔵のOPアンプ5個を使って10ch分のマイクアンプを構成してある。そこで、ICを1個ずつぬいていき、加算アンプの出力端子での雑音電圧を測定した。

アンプの数	0	2	4	6	8	10
雑音電圧 mV	0.38	0.63	0.81	0.92	1.0	1.1



この表をグラフにしたのが左図で、図(赤)はマイクアンプのICを抜いていき、雑音電圧が何Vになるかを測定した結果である。まお、0個とは、加算アンプから発生する雑音電圧で、2個とは2チャンネル分のマイクアンプを接続した時の雑音である。

測定の結果10個接続したとしても雑音電圧は10倍にはならないことがわかった。測定したグラフの形からおおよそマイクアンプの個数の平方根に雑音電圧は比例

していることが予想できる。

この性質をアレイマイクの動作原理と照らし合わせると、アレイマイクを接続して、各マイクの同位相の信号が入射していれば、加算アンプの出力はマイクの数に比例する。従ってマイクの数に信号電圧は比例する。しかしアンプからの雑音電圧はほぼマイクの数に平方根に比例するので、マイクを増やせば増やすほど、信号と雑音の比率(いわゆるS/N比)は向上することになる。

この理由は、各マイクアンプからの雑音信号の間には位相に相関関係がないので、同位相で強めあう時と逆位相で打ち消しあう時があり、全てが同位相で強めあう信号と比較すれば相対的に弱くなるためであると考えられる。この意味でアレイマイクは高性能なマイクになる!

結論

研究の結果、フェイズドアレイマイクに関して次の事がわかった。

1. マイクの数を多くすれば鋭い指向性特性を示すようになる。しかし、マイクの数をもっと多くすると形状が大きくなり、両翼のマイクでは音源からの距離の差が無視できず、音圧の変化、反射音などの影響で位相の乱れが生じ指向性特性に乱れが生じる。従って7個程度のマイクが最もバランスが良いとの結論を得た。
2. マイクの間隔は指向性特性に大きく影響する。集音しようとする音の波長の半分に選んだときが最も指向性特性は良好である。これより間隔を広げると、色々な方向に指向性特性のピークが生じ、逆に間隔を短くすると特性は素直になるが指向性特性は広がってしまいアレイマイクの効果が出なくなる。
3. 音声は色々な周波数成分を持っているので、どの周波数の半波長に間隔を選ぶかは大きな問題である。人間の音声の周波数成分を測定した結果、殆どは440 Hz ~ 3 kHzの間にあり、最もエネルギーが集中する880 Hzの音波を基準にする事が合理的であることがわかった。従ってマイクの間隔は19.5 cmに決定した。
4. フェイズドアレイマイクは、原理的に波長が変わると指向性特性が変化してしまう。従って本来は単一の周波数の音波に対して最高の性能を発揮する。そこで、不必要な波長の成分は電気的にカットすることにした。具体的には、300 Hz以下及び3 kHz以上の音波はフィルターでカットすることに決定した。
5. 前方向の音にのみ感度を持つ単一指向性特性を得るためには、音圧によって振動板が動き電気信号に変換するタイプのマイクと、空気の変位により振動板が動き変換するタイプのマイクを組み合わせる事で実現できた。この理由は前者は180回転させても出力される電気信号の位相は変化しないのに対し、後者は180回転させると発生する信号の位相が180度変化するので、この2つの信号の位相差を利用し、重ね合わせることで実現できることがわかった。
6. フェイズドアレイマイクは複数のマイクを利用するので、その数だけマイクアンプが必要になる。しかし、マイクアンプの数を増やすとアンプから発生する雑音信号のレベルはアンプの数の平方根に比例するのに対し、本来の信号はマイクの数に比例して増加する。従ってマイクの数が多いほど信号と雑音の差が増大し、雑音の少ないマイクとなる。

以上の要点に基づいてフェイズドアレイマイクを製作した。単一指向性を得るために、小型のスピーカを利用し、タイピンマイクと組み合わせ単一指向性ユニットとした。そして、このユニット

を19.5cm間隔で7個直線上に並べフェイズドアレイマイクとした。

タイピンマイク、及びスピーカは厚さ3mmのベニア板にはめ込み写真11のように組み上げた。なお、板により前後の音が遮蔽されたり、反射等が生じると、指向性特性に悪影響があると考えられるので、大きな穴をあけて影響がでないように心がけた。

今回の製作では、上下方向の指向性特性は1本のマイクのみである。その理由はマイクの利用形態を考えた場合、鉛直線上の一点からの音のみを狙うことは殆ど無いと考えたからである。

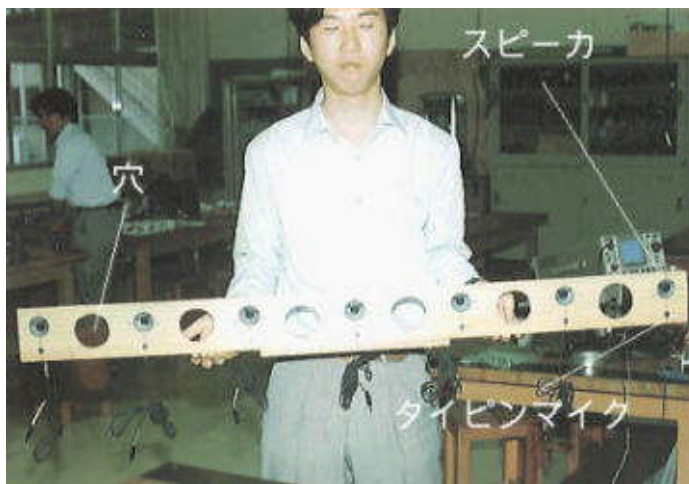
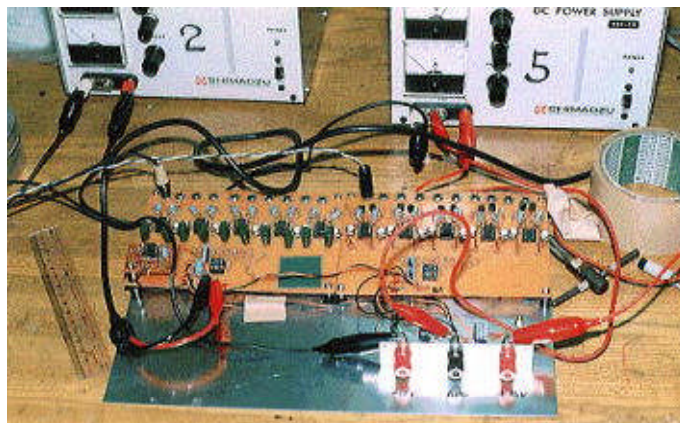
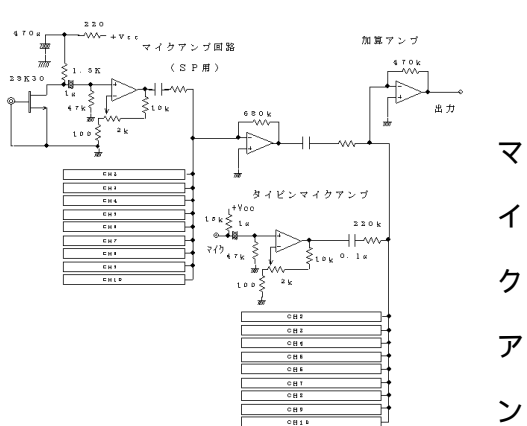


写真11 フェイズドアレイマイク

マイクアンプはすべて自作した。スピーカをマイク代わりに使うためのマイクアンプを改めて製作し、実験で利用したマイクアンプの加算アンプに入力し、信号を重ね合わせた。

この下図がフェイズドアレイマイクアンプの全回路図である。さらに加算アンプの出力にフィルターを接続し不要な周波数成分を除去する。

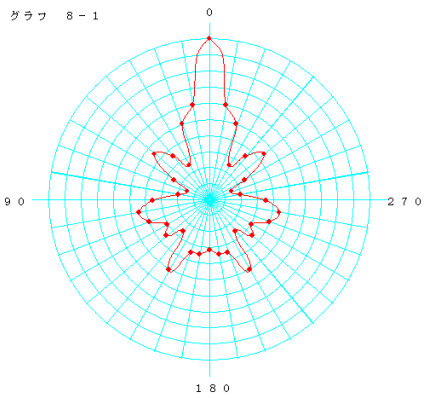


マイクアンプ

回路図

写真12 マイクアンプ

・フェイズドアレイマイクロフォンの指向性特性



880 Hzの正弦波を用い、屋外で指向性特性を測定した。測定に先立って、各タイピンマイクの感度をそろえるためにマイクアンプの増幅度を調整した。次に、スピーカの感度を対応するタイピンマイクの感度にあわせ、後方からの音を打ち消すように調整した。

測定結果がグラフ8-1である。タイピンマイクの際は前後に对称に感度を持っていたが、前方向にのみ感度を示している。(グラフ2-3と比べてください)しかし、グラフ2-3と比較すると、特性に大きな乱れが現れている。やはりマイクを取り付けた板の影響がでている可能性が考えられた。

そこで、アレイマイクのデザインを変更した。変更点は、マイクとスピーカを細い棒の両脇に取り付け、取り付け部での音の反射や遮蔽の影響が最小限ですむように注意した。写真12が改良型のアレイマイクの構造を示している。

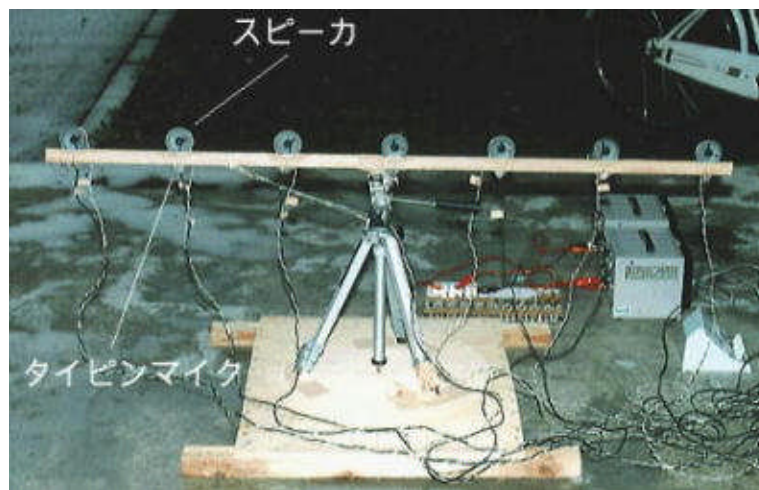
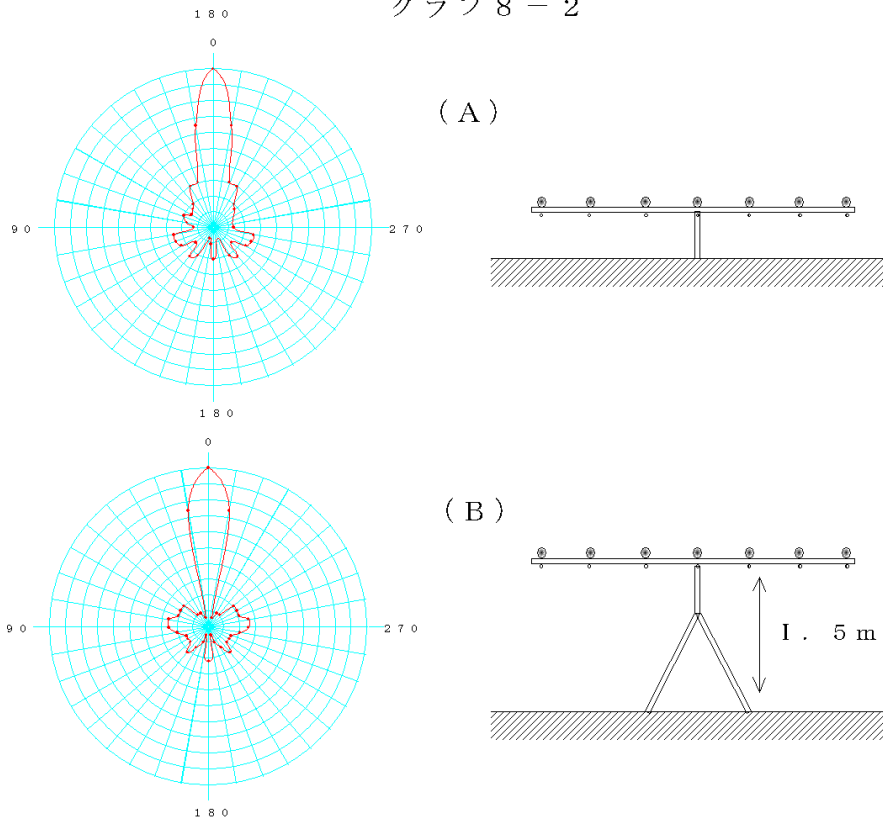


写真12

このデザインのアレイマイクで写真12の高さで測定をしたが、測定の結果、指向性特性に若干の乱れが測定された。このアレイマイクは上下方向の指向性特性は1本のマイクとほとんど変わらないので、地面からの反射音が測定に影響する可能性が強い。そこで、マイクの位置を地面から1.5mの高さにあげて指向性特性を測定した。なお、実際に集音する場合、目的とする人物の上と下に別の人物が存在する状況は考えられないので、今回は水平方向の指向性特性のみを追求した。

グラフ 8 - 2



グラフ 8 - 2 は、マイクの構造を改良した後に、地表からの高さを変えて指向性特性を測定したグラフをまとめた図である。マイクを地上から約 1 . 5 m の高さにした (B) の測定結果を見ると、今まで問題になっていた指向性特性の乱れもほとんどなく、十分満足できる性能が得られたことがわかる。そこで、再度試聴実験を行った。



写真 1 3

写真 1 3 が試聴の様子を示している。おしゃべりな女子に協力してもらい、肉声で試験を行った。その結果、今まで問題になった後方からの音を拾ってしまう点も克服され、大変明瞭に音声を聞くことができた。

マイクの前方を左右に移動してもらい試聴した結果では、指向性特性のグラフ通りに正面で大変強い感度を持っている事が再

確認できて満足している。

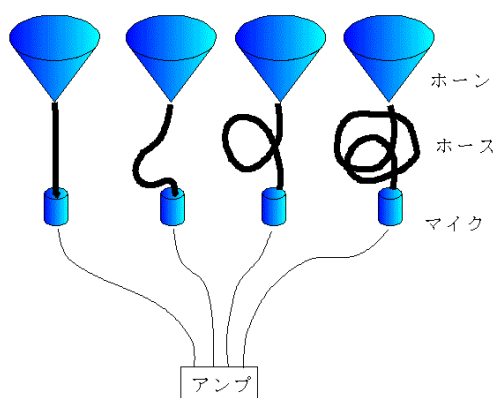
以降の研究は工学院大学論文応募後継続して研究した内容である。工学院大学での受賞には寄与していない

フェイズドアレイ・マイクロフォンの研究(2)

フェイズドアレイマイクロフォンシステム

今までのアレイマイクではマイクからの信号の位相を変化させずに重ね合わせた。正面からの音に鋭い指向性特性を示すマイクとなった。しかし、各マイクからの信号の位相を操作することで、正面以外の方向に指向性をもつマイクができるはずである。

マイクからの信号の位相を変える方法を考えたが、例えば次の様な方法もある。



マイクの前にホーンをつけ、ホーンとマイクの間導波管（例えばホース）を集音しようとする音の0.25波長づつ長さを増やしながらかつ接続すると、正面からの音は0.25波長の位相差を生じて各マイクに入り、正面には感度のピークを生じない。この場合ホーンの間隔が0.5波長で並んでいるとすれば、各マイクに入る音の位相が同位相になるには、正面右30度ずれなければならない。この様

にホースの長さを可変できるようにすれば任意の方向からの音に感度を示すマイクになる。しかし、ホースの長さを変えるよりは素直にマイクを回転させた方が手っ取り早い。またホースを通過した音はこもった感じの音になってしまい問題が多い。

電気信号に変換された音の位相をずらして加算すれば、同じことが可能である。しかも電氣的に位相差を可変できれば任意の方向に感度のピークを示すことができるはずである。そこで、デジタル技術を用いて実現することを試みた。

1. デジタル位相制御

2年前の摩擦の研究で利用した高速A/D変換器がある。信号をA/D変換しデジタル量に変え、パソコンを使って各マイクからの信号に位相差（時間差）を付け加算することで実現できると考えた。位相差は、メモリーに保存されている各マイクからの音のデータをずらして加算すれば容易に実現できる。またずらす量はプログラム次第で任意に可変できる。従って任意の方向からの音に感度を示すフェイズドアレイマイクロホンシステムが実現できる。

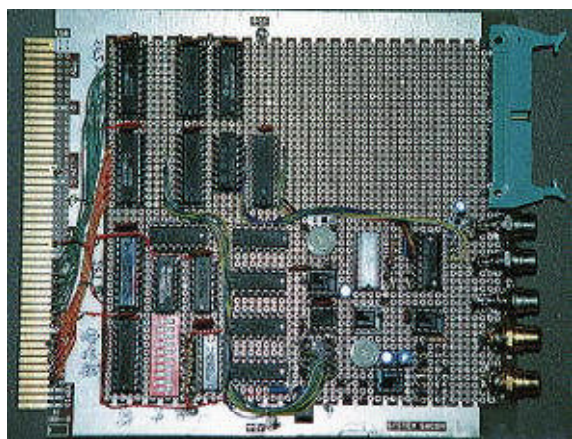
今回の研究にあわせてA/D変換器の入力チャンネル数を4回路に拡張し、あわせてデジタル量に変わった音を元のアナログ量に戻すためにD/A変換器を増設した。A/D、D/A変換器とも8ビット分解能の性能で、若干精度に不安はある。

A/D変換器

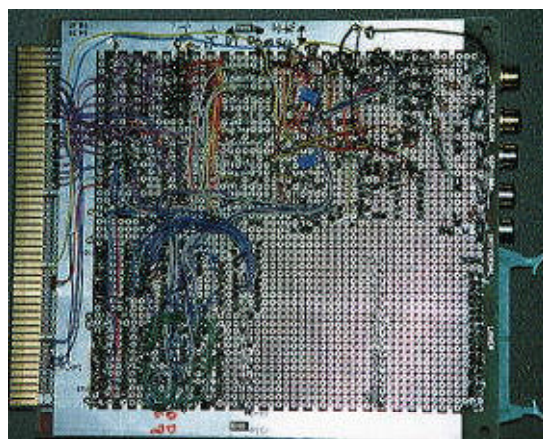
製作した回路の性能は次の通りである。

A/D変換器 ・分解能 8ビット
・変換時間 1 μ sec
・入力数 4回路

D/A変換器 ・分解能 8ビット
・変換時間 0.2 μ sec



A /
D変換
回路基
盤部
品面



裏面

製作に関しては顧問の先生に全面的にお願いした。我々も回路の拡張に参加したいと申し出たが、回路が複雑で、しかも間違いがあるとパソコン本体を故障させる危険性がある。との理由で断られた。(この写真の様に大変複雑でしかも細かい。)なお、A / D変換器の性能に関して、実際にパソコンからの命令で入力チャンネルを切り替えながら変換すると、最新のパソコンを使ってトータルで10 μ secの時間が1チャンネルあたり必要になる。(i486DX2, 66MHz)従って、各チャンネルに入る信号は40 μ sec毎にデジタル量に変換される。

2.測定プログラム

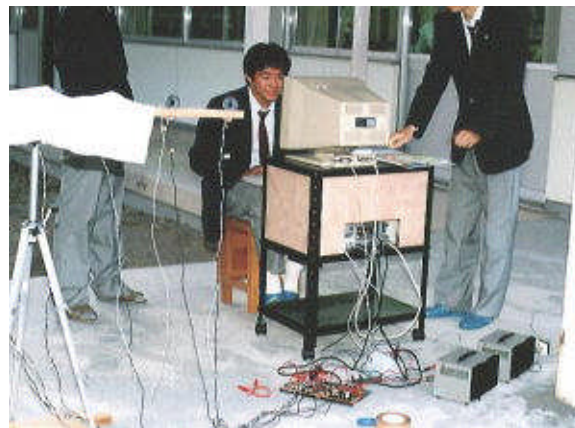
A/D変換器を使って、順次1～4までのチャンネルの信号をA / D変換するため厳密に同時に4つの入力信号を変換していない。この結果、各のチャンネルのデータはすべて同位相のデータが入った場合においても、変換時間に対応した位相のズレが生ずる点に注意する必要がある。

A/D変換器の変換時間が10[μ /チャンネル]であるから、1入力あたり40 μ secの変換時間がかかる。これは1 kHzの正弦波の信号を1周期25回の変換を行う速さである。この時間分解能から位相の分解能に焼き直すと約14度となる。

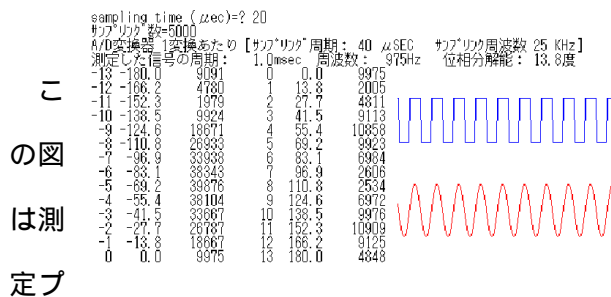
A/D変換器の変換タイミングは、プログラムで周期を設定できる水晶発信器の波形の立ち上がり、及び立ち下がりプログラムで検出し変換を開始する。従って若干の時間のずれも存在するが今回は無視できるとした。

3.測定方法

A/D変換器を使って音をデジタル量に変換し、各マイクからの信号をデジタル的に加算して重ね合わせるアレイマイクシステムの試験を行った。利用したマイクは完成している7本のアレイマイクシステムの中心付近のタイピンマイク4本を使い、1 KHzの正弦波を使って指向性特性を測定した。右の写真が実験の様子である。風が強かったのでマイクにタオルをかぶせ風防とした。なおマイク間隔は880 Hzの半波長にあたる19.5 cmである。



(画面のコピー)



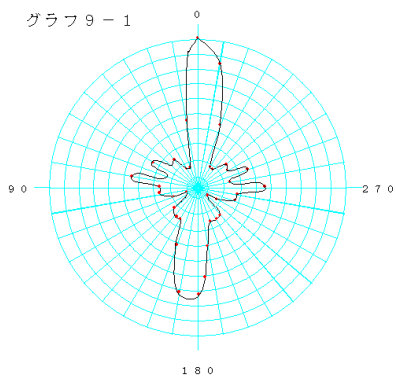
プログラムの画面である。最初にサンプリング時間を入力すると、その倍の時間間隔で各チャンネルあたり指定した回数A/D変換しメモリーに保存していく。画面右下の正弦波は、測定した波形を表示し正しく変換できているかを確認するためのものである。その上に示される矩形波は、入力された波をプログラムで波形整形したもので、この波をもとに入力波形の周期・周波数を計算する。

周期が求められると、次にその周期をもとに4つのマイクの信号を+180度、及び-180度まで、位相分解能の幅でそれぞれの波の位相をずらしながら加算していく。そして、それぞれの位相差において、合成された波の実効値（各サンプルされた波高の絶対値を加算した値）を計算し表示する。

左下の数値は右から、ずらした配列の添字の大きさ、配列に対応するずらした位相（度）、波の実効値を示している。今まで電圧計で読み取っていた値が図のように数値として出力される。

左下の数値は右から、ずらした配列の添字の大きさ、配列に対応するずらした位相（度）、波の実効値を示している。今まで電圧計で読み取っていた値が図のように数値として出力される。

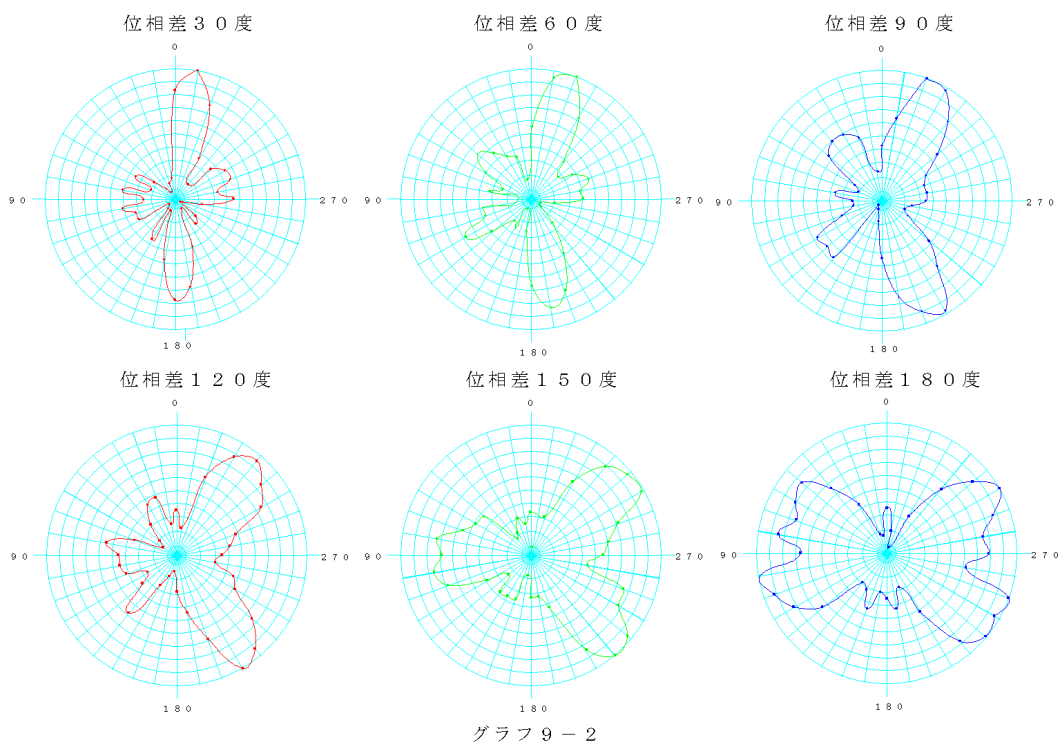
4.測定結果



測定プログラムを使い、各マイクからの信号に位相差を付けずに加算して得られたアレイマイクシステムの指向性特性を測定した。

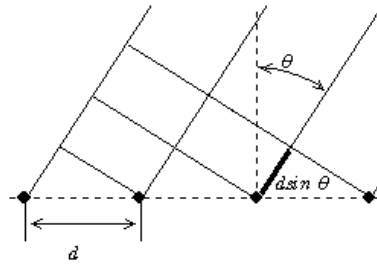
このグラフを今までの測定結果と比較すると、マイク5本と3本の間程度の鋭さを示している。A/D変換器を使いデジタル的に加算してもうまく波の重ね合わせができていないことが判明した。しかし、若干ピークが曲がっていることが気になるが、この曲がりは、順次4つのマイクからの信号を変換するために、完全に同位相とならないために生じる現象である。各マイクの信号は10 μ secの時間差が生じるので、1kHzの正弦波の場合3.6度の位相差が生じる。もっと高速にサンプリングするか、同時に変換できるように回路をグレードアップすれば原理的に無視できる状態になる。

次に各マイクからの信号の位相をずらしながら加算した場合の指向性特性を測定した。



この図が位相差を付けて各信号の値を加算した場合の指向性特性である。位相差を付けることによって指向性を示す方向が変化していることがわかる。なお条件はグラフ9-1の場合と同じである。また、タイピンマイクのみを測定では利用したので前後に線対称な形になっている。また、指向性が横に傾くほど、指向性特性のピークが広がっている。

ここで位相差を付けて加算した場合に指向性特性がどの様になるかを考えてみる。下図の様に



正面より 方向から波長 の波が入射するとき、隣り合ったマイクに入る波は図のように $d \sin \theta$ の行路差が生じる。これを位相差 に焼き直すと(1)式になる。

$$\alpha = \frac{d \sin \theta}{\lambda} \cdot 360 \text{ [度]} \dots \dots \dots (1)$$

次にフェイズドアレイマイクシステムにおいて各マイクの位相を電氣的に [度]ずらし、マイクに入る波の位相差を打ち消したとすると、指向性のピークを示す方向 は(1)を につい解くと

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{\alpha \lambda}{360d} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

つまり、位相差を をつけて加算すると 方向に感度のピークを生じることになる。そこで、この実験でのデータ、 = 34.32cm, d = 19.5cmを使いピークを生じる角度を計算すると次の表になる。

位相差	計算値	実測値
30	8.4度	約10度
60	17.1	15
90	26.1	25
120	35.9	40
150	47.2	50
180	61.6	60

この表の様に理論値と実測値が誤差の以内で完全に一致した。

5. 考察

測定結果を見ると、位相をずらし横方向に指向性特性を生じさせると、 が大きくなるほど特性曲線は広がっていることがわかる。この理由は音源に対して斜めにアレイマイクが整列しているので、等価的にマイク間隔が狭まるためである。このことから考えると、位相をずらして指向性の方向をコントロールする場合、正面からの角度が大きくなるほど指向性特性が悪化する性質がある点に注意する必要があることが判った。

反省と今後の課題

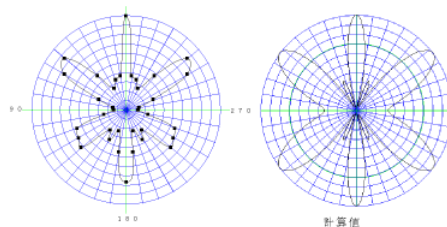
試聴の結果，満足出来る結果が得られ，“半波長間隔7本のアレイマイクが最も合理的である”と結論をだした。しかし，実験が終了した後，色々と考えだすと，さらに多くの場合について実測する必要があると反省をした。しかし，屋外での測定が必要なので，騒音をまき散らしてしまい，これ以上迷惑をかけることも出来ない。（課外を受けていた仲間からかなり文句が出た）

アレイマイクが完成した後，顧問の先生にこの様な事を話した時，先生からシミュレーションプログラムがあるので使ってみないかとのアドバイスを頂いた。そこで，測定できなかった細かな部分はシミュレーションプログラムで補足することを試みた。

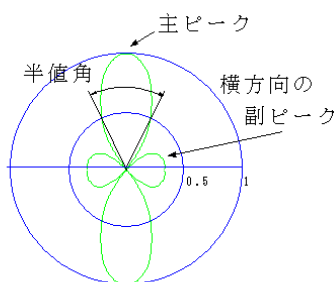
1.シミュレーションプログラム

ここで利用したシミュレーションプログラムは，先生が以前アマチュア無線の八木アンテナを複数個並べて高感度なアンテナシステムを作る場合に開発したプログラムである。このプログラムは各アンテナの固有の指向性特性を角度の関数として表現できれば，原理的にアレイマイクにも利用できるのご指導を受けた。そこでシミュレーションプログラムを使って研究の補足おこなうことにした。（プログラムについては資料参照のこと）

まず，このプログラムで実測した特性が再現できるのかの検証をおこなった。なお，タイピンマイクは無指向性であるので，マイクの実測値を示す係数は定数とすればよいとの助言を受けた。この図は実測値で最も特徴的なパターン



であったマイク3本，間隔1.25波長の指向性特性を比較した。シミュレーションの結果大変良く計算結果と実測した指向性特性が一致した。従って計算結果をもとに十分に考察することが可能であると確信した。シミュレーションプログラムを使って，マイクの本数，間隔を変えて図の主ピーク

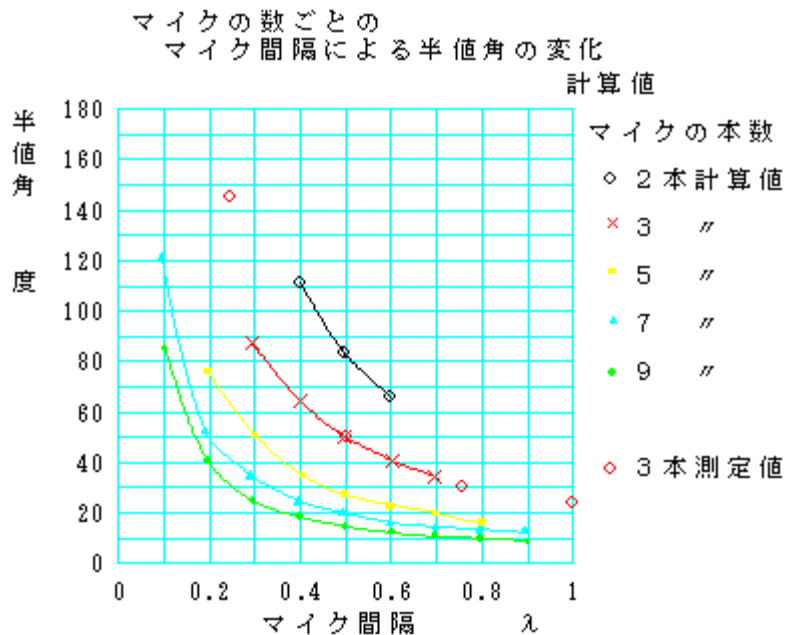


の半値角が何度になるかを読み取った。間隔を小さくしていくと，指向性特性は無指向性に近づいていくので，最小の間隔は主ピークの半分の感度が生じなくなる範囲までとした。また間隔を広げていくと，真横に副ピークが生じるので，副ピークが主ピークの半分を超えない範囲での間隔の最大値とした。（図参照）

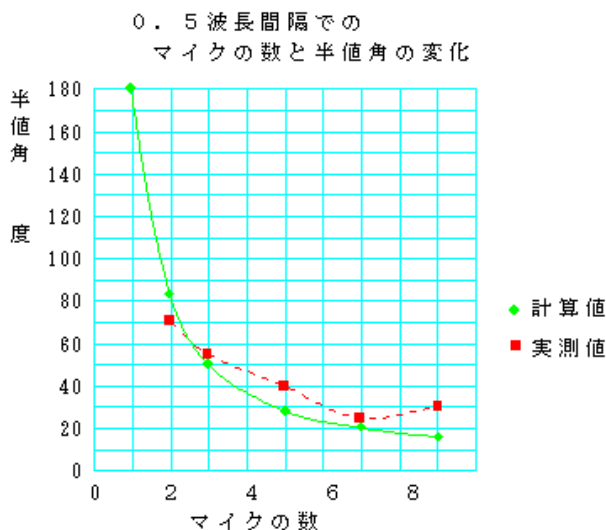
2.計算結果

アレイマイクのマイクの本数に関して多ければそれだけ鋭い指向性が得られると考えたが，実測の結果，9本のマイクの実測より7本のマイクを使った場合の方が素直であった。結局7本のマイ

クを0.5波長間隔で横一直線に並べる形状を採用した。そこでシミュレーションプログラムを使い、マイクの本数、マイク間隔を変えて半値角を計算し、マイクの本数に関する合理性を検証した。



上の図が計算結果をグラフにまとめたものである。マイク3本に関しては、実測値も示したが、計算値と大変良く一致している。この結果をみると、マイクの数を増やしていくと、指向性特性は鋭くなるが、マイクが多くなるほど、その改善度は小さくなっている。つまり、むやみにマイクを多くしても無駄であることがわかる。そこで、マイク間隔を半波長に選んだときの半値角とマイクの本数の関係を抜き出して、次のグラフにまとめた。



左のグラフがそれで、グラフの形から推定すると、マイクの数を増やしていけば、半値角は漸近的にゼロに近づくと推定できる。従って、やみ雲にマイクの本数を多くしても、マイクの本数の割には、それ程鋭い指向性にはならない事がわかる。

合理的に考えれば、マイクの本数は5本から7本程度の場合が最もバランスが良いように思える。

従って実測値からマイクの本数を7本に決定したことは正しい。しかし、マイクの本数が多いほど、マイク間隔の広い範囲で、実用になる指向性特性を示すこともグラフから読みとれる。つまり、間隔を固定した場合、集音する音の波長によって変わる指向性特性の変化が小さいことを意味する。

この意味からもマイクの数が多いほど良いが、やはりマイクの数割には改善度は小さいので、7～9本程度が良いことがわかる

以上のように、シミュレーション結果から考えても、実測で決定したアレイマイクのマイクの本数、及びマイク間隔は最も合理的であった事が確認できた。

3. 鉛直方向の指向性特性

研究を進める上で、水平方向の指向性特性にのみ注意をはらった。それは、集音する場合の状況を考えると音源が鉛直方向に並ぶことはほとんど考えられなかったためである。試聴の結果も現在の横方向のみのマイクの整列で十分に実用になるとの確信を得ている。しかし、さらに指向性を鋭くする場合には鉛直方向の指向性特性も考慮する必要があることが実測において暗示されていることも事実である。7本のマイクの指向性特性を測定したとき、床面からマイクの位置を離さないと素直な特性が得られなかった理由は、間違いなく床からの反射音の影響である。また、7本と比較して9本のマイクの指向性特性が乱れたのもおそらく床からの反射音の影響がかなりあったと考えられる。

このように考えていくと、さらに水平方向の指向性特性を鋭くするには、同時に鉛直方向の指向性特性もある程度鋭くする必要があることを示唆している。また、マイク7本の場合でも鉛直方向の指向性特性をもっと改善すれば、実際に利用する段階で使いやすいマイクになると考えられる。従って、7本×2列のアレイマイクがより高性能であったと考えている。しかし、予算の関係で実現は不可能であったのが残念である。

今後の課題

今回の研究では実際の利用を考慮して水平方向の指向性特性を追求したが、2次元平面にマイクを並べることで、まさにペンシルビームを持つ指向性の強いマイクが出来る。このようなマイクでの試聴を行い効果を確認してみたいと思っている。

マイクからの信号の位相を変化させずに直接重ね合わせ前方向に鋭い指向性特性のアレイマイクを完成させた。各マイクからの信号の位相を一定の間隔で変化させれば、マイクを回転させることなく、指向性を示す方向を変えることも出来る事も確認できた。従って音がする方向を検知することも十分可能になった。そこで、音がする方向を探知しその方向に水ロケットを発射する水ロケットシステム「ペトリオットミサイル」を開発し学校祭の呼び物としたいと考えている。最後に、マイクの試聴の時に気づいたのだが、雀の鳴き声はかなり大きく聞こえたのだが、試聴していた声の妨げには全くなかった。人の聴覚の特性のためと考えられる。今後聴覚の特性を調べてみたいと考えている。

おわりに

実験は反射音の影響を避けるために屋外で行った。放課後課外が行われている時も、悪いとは思っていたが実験を強行した。その為に多くの人に大変不快な音を聞かせることになり大変申し訳ないと思っている。最後にお詫びを申し上げたい。