

振幅と位相制御における音像定位の研究

98KC117 正岡 涼

98KC136 八木淳史

目次

1. はじめに	・・・ 3
2. 音像	・・・ 4
3. 方向知覚の種類	・・・ 5
3.1. レベル差定位	・・・ 5
3.2. 時間差定位	・・・ 6
4. ヘッドフォン受聴における音像知覚	・・・ 7
4.1. ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動	・・・ 8
4.1.1. 振幅変化の方法	・・・ 8
4.1.2. 主観的な音の大きさの補正	・・・ 9
4.1.3. 測定の条件と手順	・・・ 10
4.1.4. MATLAB プログラム	・・・ 11
4.1.5. 判定方法	・・・ 20
4.1.6. 測定結果	・・・ 21
4.1.7. 結果の比較と考察	・・・ 26
4.2. ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動	・・・ 28
4.2.1. 時間差変化の方法と範囲	・・・ 28
4.2.2. 測定の条件と手順および判定方法	・・・ 30
4.2.3. 測定結果	・・・ 31
4.2.4. 結果の比較と考察	・・・ 36
4.3. 振幅差と時間差による定位置移動の比較	・・・ 37
5. スピーカー受聴における音像知覚	・・・ 40
5.1. 測定方法	・・・ 40
5.2. 予備実験	・・・ 41
5.3. 測定手順	・・・ 42
5.4. 測定結果	・・・ 44
5.5. 検討・考察	・・・ 56
6. GUI (Graphical User Interface)	・・・ 57
6.1. 音の作成プログラム	・・・ 57
6.2. 実験測定用プログラム	・・・ 62
7. おわりに	・・・ 66
参考文献	・・・ 67
謝辞	・・・ 67

1 . はじめに

音というものを判断する際、その要素として『高さ』、『大きさ』、『音色』などが存在するが、人や動物はさらに両耳によって『方向』を判断する事も可能である。また、周囲の残響音から方向にとどまらず、音源までの距離をある程度推測することも可能である。この方向や距離を知覚する能力は昔から人や動物にとって外敵や獲物の位置を知るという目的から極めて重要なものであった。すなわち音源の方向や位置を知ることこそが両耳の持つ最も重要な機能だと言えるだろう。そしてこのときの音の位置情報は音像と呼ばれ、我々が両耳を使って音を聴いている時、その音に対する一つの音像をもっているのである。

この研究では両耳の持つ音像を知覚する能力のうち、音源の方向知覚に注目し、両耳間における音響信号の振幅差および時間差による音源の定位変化を実測し、これを数種の音響信号で行うことで人の持つ両耳の基本的な方向知覚能力を検討する。

2 . 音像^[1]

人は音を聴いたとき、左右2つの耳で聴いていながら1つの音像を認識する。音像はヘッドフォンを使って音を聴いたときに頭の中に生じるが、実在の音源に対しても同じ場所に音像としての存在を認識しているので、これによって視力に頼らずとも両耳の聴覚のみで音源の位置をある程度特定できるのである。しかし、これは周囲に残響音が存在する場合であり、残響が発生しない状況では距離の特定は極めて困難である。

ここで音源の方向知覚能力に着目すると、これは2つの耳を持つ事によって持ちえる能力であると言える。すなわち一つの音源から発生した音波を2つの耳で捉えることによって、両耳間に生じたわずかな音量差および音波の到達時間の差から方向を知覚しているのである。普通、人は左右耳間に十数[cm]の間隔があるが、この間隔や頭部による音波の遮蔽、回折などが両耳間の音響信号に音量差や時間差を与えている要因である。

このことから考えると、両耳間の音響信号に音量差および時間差を与えてやれば音像の方向をコントロール出来ることになる。そしてそれはステレオスピーカーやヘッドフォンを用いることで可能である。ただし、この時音を発生させているのは2つのスピーカー部であり一つの音源ではないので、受聴者は実音源ではなく見せかけの音像、すなわち虚像を知覚することになる。ステレオスピーカーで受聴した時の両スピーカー間の音像、およびヘッドフォンで受聴した時の頭の中に知覚する音像がそれである。

3 . 方向知覚の種類

ステレオスピーカーを使用して左右のスピーカーから同一の信号を出力する場合、一方のスピーカーから出力される信号を大きくすれば、音像は中央よりもそちら側へ定位する。また、同様に一方のスピーカーから出力される信号に対して微小時間の遅延を設けると、音像は先に出力された側の方向へ定位する。すなわち定位変化には左右の音量差によるレベル差定位と、遅延による時間差定位があり、特にこの時間差定位の現象は先行音効果、ハース効果あるいは第1波面効果、聴覚抑制効果とも呼ばれている。

水平面内での方向知覚にはさらに『音の高さ』の要素も関わってくる。本来人間の耳は周波数特性と呼ばれる性質を持っており、異なる周波数の音を同じ強さで鳴らしても、実際に人間が感じ取る音の強さは周波数によって変化し、一定でない事が明らかになっている。

周波数特性には当然個人差はあるものの、音を真正面から捉えた時よりも、両耳に対して音源に角度をつけた際に個人差が大きくなっていく。その特性の個々による変化は、周波数特性のピークである3[KHz]付近を境に、差が見られてくる。

3.1. レベル差定位

人の耳は両耳で同一の音響信号を捉えた時、音量の大きい方へ定位を感じる性質がある。音源からの距離が遠くなるほど音波が減衰し音量が小さくなる事からも、音量の大きい方が音源との距離が近いと感じるのは明らかである（図1参照）。

本研究ではヘッドフォン受聴という環境において左右の音響信号に音量差をつけることで人工的に音像の定位を変化させ、レベル差定位による方向知覚能力を測定した。その結果は『4.1. ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動』にて述べる。

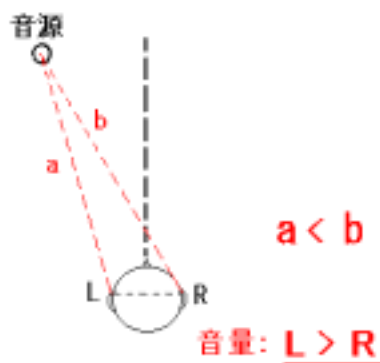


図1：音源からの距離と音量差

3.2. 時間差定位

左右の音源と観測者の位置の3点がちょうど正三角形になった状態で、左右の音源から同一の信号を流せば、観測者は、2つの音源の中央に音像を認識する。ここで、どちらかの音源の位置を観測者と音源を結ぶ直線上のどこかに離して設置する。この状態で同様に出力すると音像は観測者に近い側の音源方向に定位する。過去の研究において、この現象は両信号の時間差が1～30[ms]の間で生じ、時間差が50[ms]を越えると、分離したエコーとしての存在が認められる、という事が報告されている。

本研究では、人工的にヘッドフォンおよびスピーカーから出る音に遅延を付け、音源と被験者の間に擬似的な距離を持たせる手法で、この現象についての測定を行った。ヘッドフォンを用いた測定結果は『4.2. ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動』にて、スピーカーを用いた測定結果は『5. スピーカー受聴における音像知覚』にてそれぞれ述べる。

4 . ヘッドフォン受聴における音像知覚

音像知覚の研究における受聴方法として、本研究ではヘッドフォンによる受聴とスピーカ―を用いた受聴の2種類を試みているが、まずはこの2方法の違いを明確にする必要があるだろう。

ヘッドフォン受聴ではその構造上、出音部であるスピーカ―が耳に極めて近い位置にあるため、両耳で受聴した左右の音は感覚的に頭の中で融合し、ひとつの音として認識される。すなわち音像は頭の中に存在することになり、定位を変化させると頭の中で変動する。これに対しスピーカ―受聴ではスピーカ―と耳との間に通常ある程度の距離がおかれるため、左右のスピーカ―から発生した音波は両耳に到達する前に空気中で融合する。これによって音像は左右のスピーカ―周辺に認識され、定位の変動もその周囲で行われる。

また、左右音の受聴の仕方にも明らかな違いがある。ヘッドフォン受聴では前述のとおりスピーカ―部と両耳とが近接しているため、左の音は左耳で、右の音は右耳でのみ受聴することになるが、スピーカ―受聴ではスピーカ―と両耳の間にある程度の距離があることから、左右それぞれの音を両耳で受聴するという点である。このことによって定位の変動および方向知覚に何らかの違いが生じる事が予想される。

このようにヘッドフォン受聴とスピーカ―受聴には音像の発生場所と左右音の受聴の仕方という二点の違いがあるが、後者の点からスピーカ―受聴のほうが実際に身の回りに起こる自然現象に近いのではないと言える。ヘッドフォン受聴で行われるような左右の耳で全く別の音を聴くという行為は普段の自然現象では起こりえないからである。しかし近年の日本の住宅事情をみると、近所迷惑になるという理由からTVやステレオの音声をヘッドフォンで受聴するという機会も珍しくない。従ってヘッドフォン受聴における測定も重要な意義を持つと言えるだろう。

ここではまずヘッドフォン受聴における方向知覚を取り挙げる(スピーカ―受聴における方向知覚は『5. スピーカ―受聴における方向知覚』を参照)。



図2：ヘッドフォン受聴時の測定風景

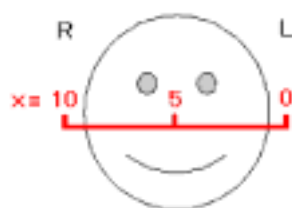
4.1. ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動

「方向知覚の種類」で前述したとおり、人間は音が左右耳に到達した時の左右の音量差および時間差から音源の方向を知覚している。そこでヘッドフォン受聴における測定では定位を変化させるための手段としてこれらを用い、ヘッドフォンの左右の音量に差異をつける、または発音タイミングをずらすことで方向知覚の基礎能力を測定している。ここではまず音量差によって定位を変化させた実験について述べる（時間差による定位置動については『4.2. ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動』を参照）。

ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動の実験では、ヘッドフォンの左右から聴こえる音の大きさを変え、左右に音量差をつけることで定位を変移させ、主観的な音像の位置との関係を測定した。以下、振幅の変化方法から順に説明する。

4.1.1. 振幅変化の方法

左右の音に音量差をつけるためには、左右それぞれの音響信号の振幅を変化させ、差をつけてやればよい。この研究では、そのための手段としてMATLABを使用している。では実際にどのように左右の音響信号の振幅を変化させ、定位を移動させているかであるが、この測定では左右の振幅を比で10:0から0:10まで1ずつ変化させることで左定位から右定位まで計11種の定位の音を作り出している。そして、それぞれの定位音の説明を簡易化するために右の振幅をxとおき、 $x = 0 \sim 10$ までの値をつけている（図3参照）。



x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
R	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

図3：振幅差による定位置動の方法

図 3 より、 $x = 0$ (左右の振幅比 10 : 0) の時、右の音響信号は振幅 0 なので音が出ず、左からのみ音が出るので定位は完全な左となる。 $x = 10$ (左右の振幅比 0 : 10) の時はその逆である。そして $x = 5$ (左右の振幅比 5 : 5) の時では左右の音が全く同じ音量になるため、頭の中央から音が鳴っている感覚が生じ、定位は中央 (センター) となる。ここで、これらの中間の音、例えば $x = 3$ (左右の振幅比 7 : 3) の時では左の音量が右のそれよりも大きくなるため、定位が中央からわずかに左にずれて音が鳴っている感覚が生じる。これら 11 種の音をランダムに被験者に聴かせ、頭の中のどの位置から音が鳴っているかを測定している。

次にこの方法で生じる問題点について述べる。

4.1.2. 主観的な音の大きさの補正

前述の方法では左から右までを均等に 10 等分した定位の音ができるという利点があり、このことは測定結果の明確さにおいても非常に重要である。しかし、主観的な音の大きさに差が生じるという問題点もある。すなわち、 $x = 0$ の時と $x = 5$ の時では左右の音を総合した主観的な音の大きさに差が生じ、 $x = 5$ の時の方がわずかに小さくなるのである。この主観的な音の大きさの差によって、小さいときは音源が遠く、また大きいときは音源が近く感じられ、この距離感が定位の判定に影響を及ぼす可能性が考えられる。

これより、次のような操作をし、どの定位から音が鳴っても全体的な音量が揃うように補正した。

一般的に、主観的な音の大きさは左右の信号の振幅の 2 乗和にほぼ比例する。そこで、図 3 で示した振幅比 x と $(10 - x)$ に対して、次式で示す振幅 A_r 、 A_l を定める。

$$A_r = \frac{x}{\sqrt{x^2 + (x-10)^2}} \qquad A_l = \frac{(10-x)}{\sqrt{x^2 + (x-10)^2}}$$

これにより A_r と A_l の 2 乗和は

$$A_r^2 + A_l^2 = \frac{x^2}{x^2 + (10-x)^2} + \frac{(10-x)^2}{x^2 + (10-x)^2} = 1$$

となり、 x の値によらず一定となる。

4.1.3. 測定条件と手順

測定条件として以下の3点が挙げられる。

- ・ ヘッドフォン受聴において行う。
(使用したヘッドフォン：松下電器産業株式会社 Technics 製 RP-DJ700)
- ・ 正弦波(周波数 500Hz、1000Hz、2000Hz)、ホワイトノイズ、音声の5種の音響信号において行う。
- ・ 被験者は20代の成人男女5名。各人に対して2回ずつ測定を行う

まず、ヘッドフォン受聴において測定を行うことに関しては前述したとおりの理由からである。次に音響信号の種類による結果の違いを明らかにするために上記の5種の音を使用している。ここで周波数の違う正弦波3種を使用しているのは音の高さによる定位への影響を調べるためである。そして測定結果の傾向がある程度見られるであろう理由から、被験者5名に対し2回ずつ測定することで、計10個のデータを取っている。次に実際に行った測定の手順を示す。

測定の手順

1. 左右の音を聴かせる

2 . センターの音を聴かせる

3 . ランダムに様々な定位の音を聴かせ、鳴った位置を答えてもらう

2と3の繰り返し

(その都度センターの音をはさむ)

1.の左右の音を聴かせるとは、 $x = 0$ および $x = 10$ の定位の音を聴かせることであり、事前に定位の変化量の最高値を教えることで被験者各人の定位判定の範囲を共通化させている。これは最終的なデータの統計を取る上で極めて重要である。

次に、基準となる中央定位の音を聴かせ、その後判定してもらう音を聴かせている。こうすることでその都度、方向知覚の感覚がリセットされ、前の音につられて判定があやふやになることを避けている。以後、この繰り返しである。尚、判定してもらう音は $x = 0 \sim 10$ の計11種の音がランダムに2回ずつ発音されるようにプログラムしており、これにより上記、測定条件「2回ずつ測定する」を満たしている。

4.1.4. MATLAB プログラム

以下、測定に使用した MATLAB のプログラムを正弦波のものから順に示す。

```
% sin_amp Ver 2.0
```

```
% 左右の振幅(amplitude)を変えて定位を変える(信号：正弦波)  
% 定位の測定前に、参考として左右の定位の限界を教えるために使用
```

```
%パラメータ設定
```

```
Fs=8000;           %サンプリング周波数  
x=1:16000;        %データの長さ  
y=zeros(24000,2);
```

```
freq=500;         %周波数  
t=x/Fs;
```

```
%振幅 (0 の時 left、10 の時 right、5 の時 center)
```

```
M=5;             %この値を変更することで定位が変わる(0 ~ 10)  
AR=M;           %AR は振幅 (右)  
AL=10-AR;       %AL は振幅 (左)
```

```
%信号生成
```

```
seigen=sin(2.*pi*(x'-1)*(freq/Fs));
```

```
%Left
```

```
yleft=(AL/sqrt(AL*AL+AR*AR))*seigen;
```

```
%Right
```

```
yright=(AR/sqrt(AL*AL+AR*AR))*seigen;
```

```
y=[yleft yright];
```

```
sound(y,Fs);
%wavwrite(y, Fs,'d:\¥sin_amp_test1.wav');
```

```
return
```

このプログラムは測定の手順 1.である左右定位の音を聴かせるために使用している。
次に、被験者に判定してもらう音をランダムに発音するプログラム（正弦波）である。

```
% sin_amp2 Ver 1.1
```

```
% 左右の振幅(amplitude)を変えて定位を変える(信号：正弦波)
% sin_amp 測定用プログラム
% center を発音してから、1 秒後に別の定位でランダムに発音する
```

```
%パラメータ設定
```

```
Fs=8000;           %サンプリング周波数
x=1:16000;        %データの長さ
y=zeros(24000,2);
```

```
freq=500;         %周波数
t=x/Fs;
```

```
%0～10のランダムな数列を生成（振幅用）
```

```
M=2;             %2回鳴らす
L=randn(11*M,1);
[hh,kk]=sort(L); %22個のランダムな数字を並び替え
kk=fix((kk+1)/M)-1; %1～22を0～10にする
```

```
%信号生成
```

```
seigen=sin(2.*pi*(x'-1)*(freq/Fs));
```

```

yleft1=(5/sqrt(5*5+5*5))*seigen;    %center の信号を生成 (他の音との比較用)
yright1=yleft1;                    %同上

for n=1:11*M

    AR=kk(n);    % AR は振幅 (右) (0 の時 left、10 の時 right、5 の時 center)
    AL=10-AR;

    %Left
    yleft=[yleft1;zeros(8000,1);(AL/sqrt(AL*AL+AR*AR))*seigen];

    %Right
    yright=[yright1;zeros(8000,1);(AR/sqrt(AL*AL+AR*AR))*seigen];

    y=[yleft yright];

    input('?')
    sound(y,Fs);
    amp=kk(n)

end

return

```



```

AR=1/10*kk(n);      % AR は振幅 (右) (0 の時 left、10 の時 right)
AL=1-AR;

%Left
yleft=[yleft1;zeros(8000,1);(AL/sqrt(AL*AL+AR*AR))*noise];

%Right
yright=[yright1;zeros(8000,1);(AR/sqrt(AL*AL+AR*AR))*noise];

y=[yleft yright];

input('?')
sound(y,Fs);
amp=kk(n)

end

return

```



```

for n=1:11*M

    AR=kk(n);    % AR は振幅 (右)(0の時 left、10の時 right、5の時 center)
    AL=10-AR;

    %Left
    yleft=[yleft1;zeros(8000,1);(AL/sqrt(AL*AL+AR*AR))*y];

    %Right
    yright=[yright1;zeros(8000,1);(AR/sqrt(AL*AL+AR*AR))*y];

yy=[yleft yright];

input('?')
sound(yy,Fs);
amp=kk(n)

end

return

```

以上がヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動の測定で使ったプログラムである。

4.1.5. 判定方法

被験者はランダムに様々な定位の音を聴き、それをどの位置から聴こえたか判定するわけだが、ここではその判定方法を説明する。

下図のとおりセンターから R(L)までを 3 等分し、計 7 箇所どの位置から聴こえたかを -3 ~ +3 の数値で答えてもらっている。ここで、センターから R(L)までを 3 等分にした理由は予備測定の結果、7 箇所の判定位置が限界であると判断したためである。つまり、これ以上判定位置を増やしても、そこまで聴き取るのは困難であると考えられた。

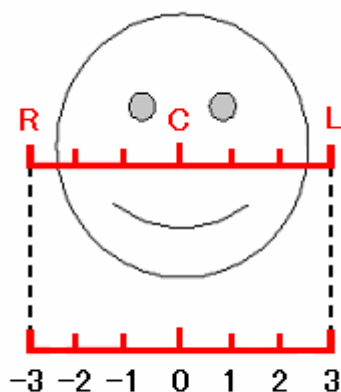


図 4 : 定位の判定方法

4.1.6. 測定結果

以下に測定結果を示す。これは様々な定位×の音を聴き、判定値-3~3のうちどこから聴こえたかを集計し、まとめたものである。定位×および判定値に関する詳細は前述したとおりである。

ここで平均値とは、判定値-3を値-3、判定値-2を値-2（以下同様）とし、それぞれに判定人数を掛け、総データ数である10で割ったものである。正弦波（周波数500Hz）の時の定位X=1を例にとると、-3と判定した被験者が4名、-2と判定した被験者が4名、-1と判定した被験者が2名なので

$$\text{平均値} = \{ (-3 \times 4) + (-2 \times 4) + (-1 \times 2) \} / 10 = -2.2$$

となる。

表1：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動
正弦波（周波数500Hz）の測定結果

定位× (右の振幅)	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
0	8	2	0	0	0	0	0	-2.8
1	4	4	2	0	0	0	0	-2.2
2	1	2	7	0	0	0	0	-1.4
3	1	3	5	1	0	0	0	-1.4
4	0	0	4	6	0	0	0	-0.4
5	0	0	0	10	0	0	0	0
6	0	0	0	6	3	1	0	0.5
7	0	0	0	0	8	2	0	1.2
8	0	0	0	0	7	3	0	1.3
9	0	0	0	0	0	6	4	2.4
10	0	0	0	0	0	0	10	3.0

表 2：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動
 正弦波（周波数 1000Hz）の測定結果

定位 x (右の振幅)	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
0	8	2	0	0	0	0	0	-2.8
1	2	7	1	0	0	0	0	-2.1
2	0	3	7	0	0	0	0	-1.3
3	0	1	8	1	0	0	0	-1.0
4	0	0	3	7	0	0	0	-0.3
5	0	0	0	10	0	0	0	0
6	0	0	0	8	2	0	0	0.2
7	0	0	0	1	7	2	0	1.1
8	0	0	0	0	5	4	1	1.6
9	0	0	0	0	0	6	4	2.4
10	0	0	0	0	0	2	8	2.8

表 3：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動
 正弦波（周波数 2000Hz）の測定結果

定位 x (右の振幅)	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
0	7	3	0	0	0	0	0	-2.7
1	2	7	1	0	0	0	0	-2.1
2	0	4	6	0	0	0	0	-1.4
3	0	2	6	2	0	0	0	-1.0
4	0	0	3	7	0	0	0	-0.3
5	0	0	0	10	0	0	0	0
6	0	0	0	6	4	0	0	0.4
7	0	0	0	4	6	0	0	0.6
8	0	0	0	0	3	7	0	1.7
9	0	0	0	0	0	7	3	2.1
10	0	0	0	0	0	0	10	3.0

表 4：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動
ホワイトノイズの測定結果

定位 x (右の振幅)	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
0	8	0	1	0	0	0	0	-2.5
1	3	6	1	0	0	0	0	-2.2
2	1	2	7	0	0	0	0	-1.4
3	0	2	7	1	0	0	0	-1.1
4	0	1	4	5	0	0	0	-0.6
5	0	0	0	9	1	0	0	0.1
6	0	0	0	6	2	2	0	0.6
7	0	0	0	2	6	2	0	1.0
8	0	0	0	0	5	3	2	1.7
9	0	0	0	0	0	5	5	2.5
10	0	0	0	0	0	0	10	3.0

表 5：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動
音声の測定結果

定位 x (右の振幅)	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
0	6	4	0	0	0	0	0	-2.6
1	0	7	3	0	0	0	0	-1.7
2	0	2	8	0	0	0	0	-1.2
3	0	0	5	5	0	0	0	-0.5
4	0	0	1	9	0	0	0	-0.1
5	0	0	0	10	0	0	0	0
6	0	0	0	10	0	0	0	0
7	0	0	0	2	8	0	0	0.8
8	0	0	0	2	5	3	0	1.1
9	0	0	0	0	2	7	1	1.9
10	0	0	0	0	0	0	10	3.0

これらの集計結果を視覚的に分かりやすくするためにグラフにしたものが以下の図 5 ~ 図 9 である。円が黒く、大きくなるほど判定した人数が多いところである。

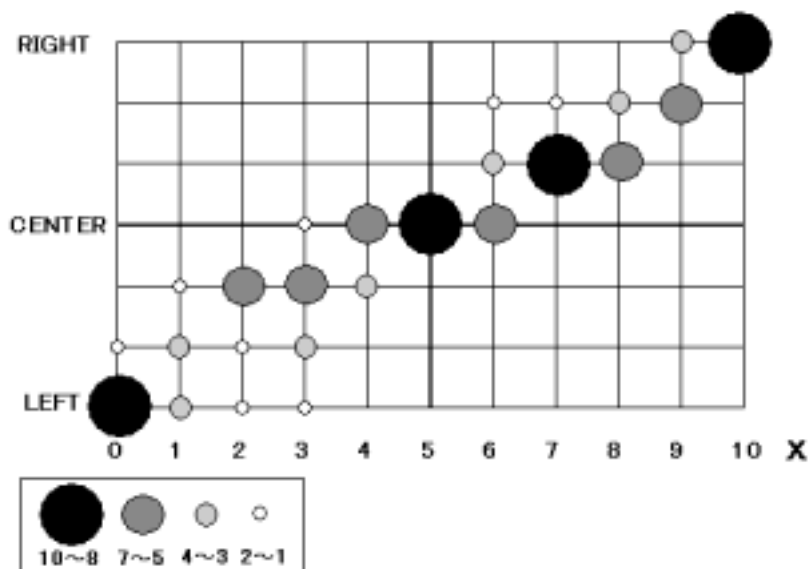


図 5：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動
正弦波（周波数 500Hz）のグラフ

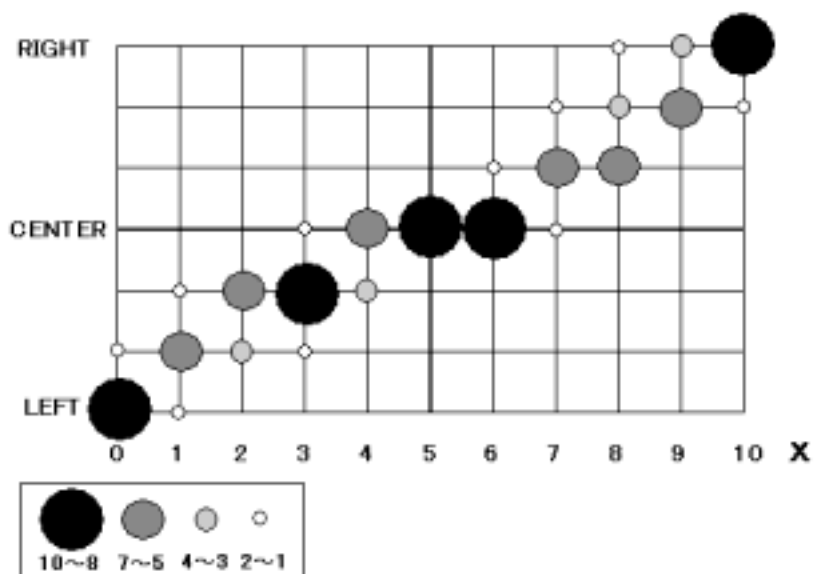


図 6：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動
正弦波（周波数 1000Hz）のグラフ

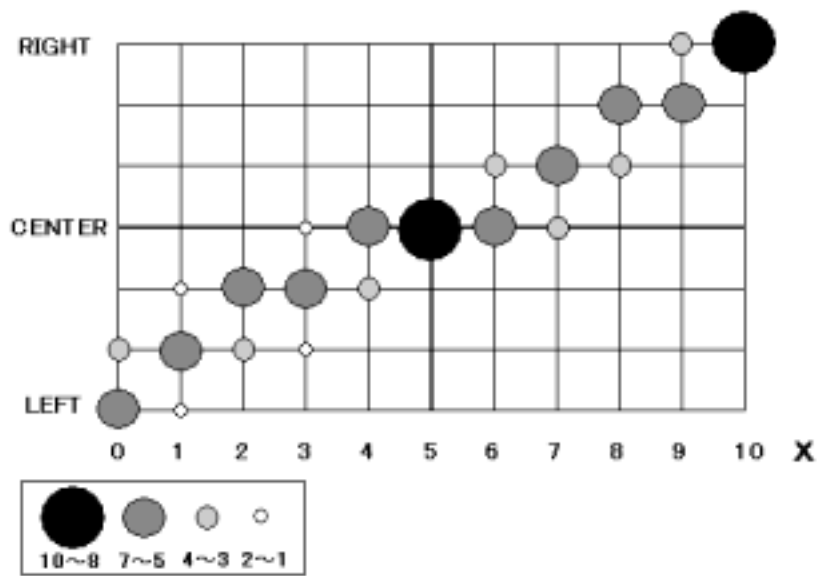


図 7：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動
正弦波（周波数 2000Hz）のグラフ

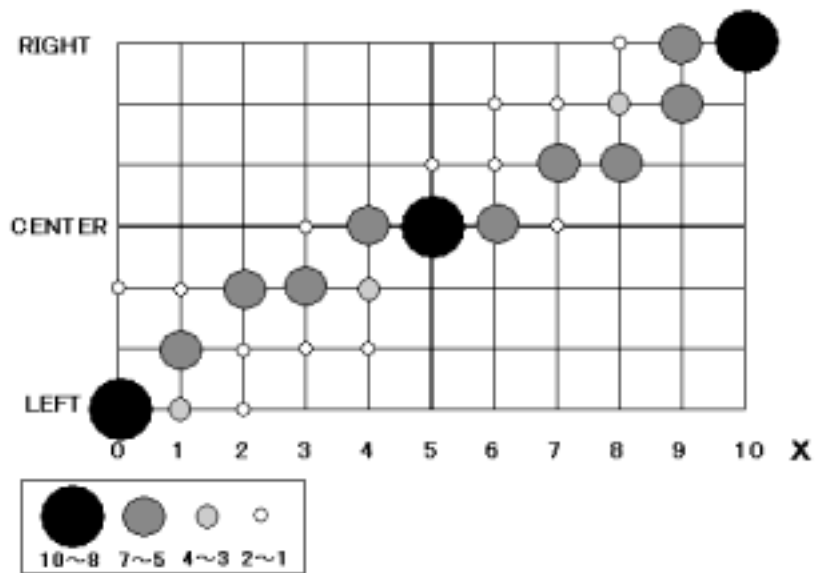


図 8：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動
ホワイトノイズのグラフ

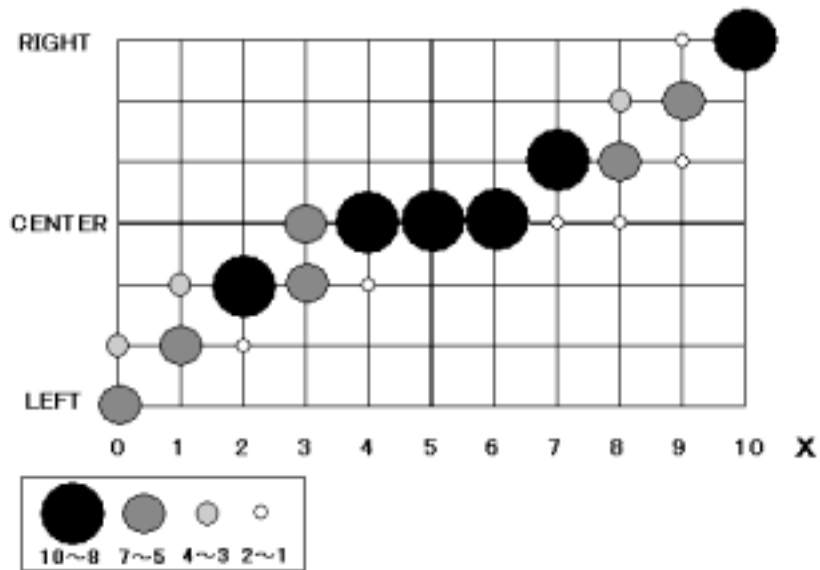


図 9：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動
音声のグラフ

4.1.7. 結果の比較と考察

それぞれの音響信号の測定結果を比較・検討してみる。

まず正弦波を周波数で比較してみると、ほとんど判定結果に差がないと言えるだろう。中央定位置周辺、つまり $x=2 \sim 4$ および $x=6 \sim 8$ を注意深く見ると、周波数が高くなるにつれて、すなわち音が高くなるにつれて定位が中央（センター）に寄って聴こえる兆候が見られるがそれもごくわずかである。

測定結果のグラフでは、円が直線的に並ぶほど定位が知覚しやすかったと言えるが、そのことから考えると、ホワイトノイズの定位変化では他の音響信号に比べて比較的定位の知覚がし易かったのではないかと言える。

次に音声の結果を見ると、 $x=5$ 周辺でセンターと判断している被験者が多い事がまず目に付くだろう。このことからつまり、音声では定位変化の知覚が困難であり、わずかに中央からずらした程度の定位ではセンターと判断してしまうことが分かる。

以上に述べたような特徴がそれぞれ見られたが、これらはどれもごく小さなものであると考えられる。それぞれの音響信号における差異を分かりやすくするために表 1~5 で求めた平均値をグラフ化し以下に示す。

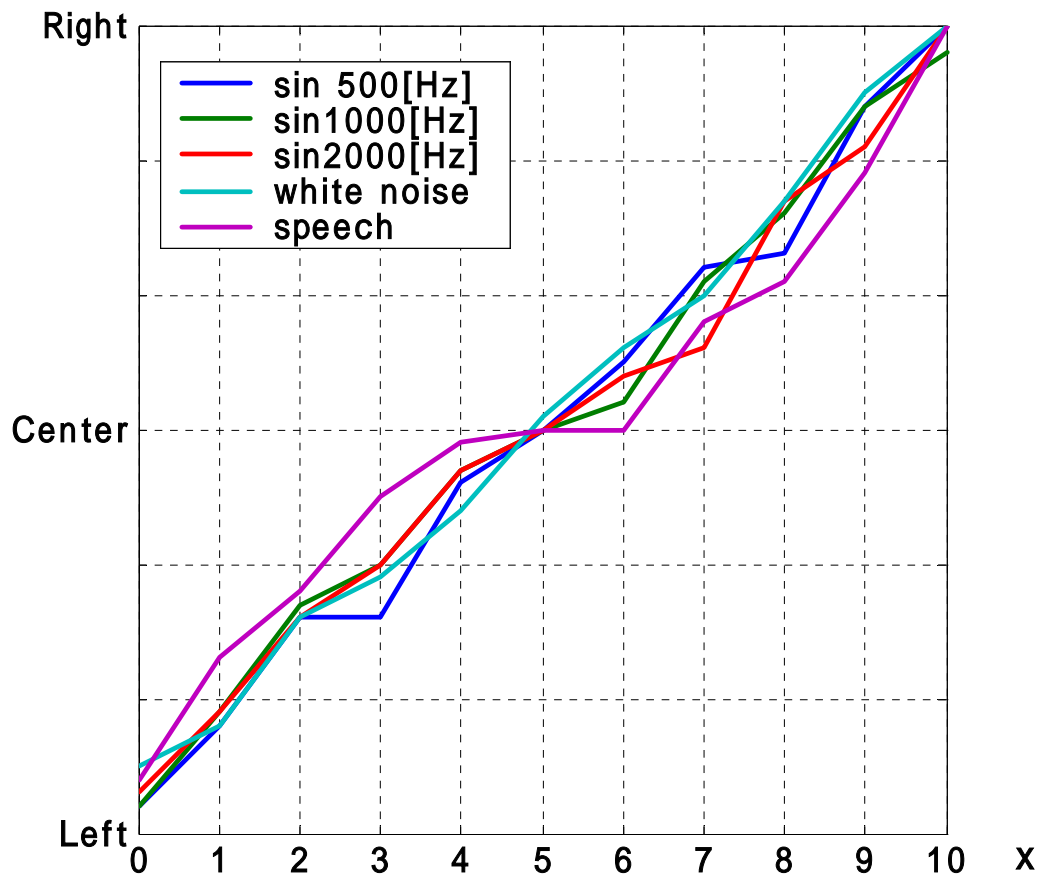


図 10：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動
音響信号における測定結果の違い

このグラフから、測定で用いた各種音響信号による結果の差は小さいことが見て取れる。そしてどの曲線も右上がりの直線に近いことから、ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置動では音響信号に関わらず定位の知覚が比較的簡易であると推測できる。

4.2. ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動

ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動の測定では、ヘッドフォンの左右から聴こえる音の発音タイミングを変え、左右に時間差をつけることで定位を変移させ、主観的な音像の位置との関係を測定した。

4.2.1. 時間差変化の方法と範囲

両耳における時間差による方向知覚は、音源から発生した音波が両耳に到達する時間の差に基づいている。つまり音波が先に到達した耳の方へ定位を感じるのである。ヘッドフォン受聴においてもこの時間差をつけるために左右の発音タイミングをずらしているが、その方法としてこの実験では MATLAB によるプログラムを使用した。使用したプログラムの詳細は『6. GUI (Graphical User Interface)』内の『6.2. 実験測定用プログラム』に示す。

時間差変化の範囲であるが、これは 1[ms]を限界としている。理由としては予備実験の結果、-1 ~ 1[ms]の範囲が最も定位の変化が顕著に現れると判断したためである。なお、これ以上範囲を大きくしても定位はほとんど変化せず、さらに変化量を増し遅延が 50[ms]前後になると左右音は 2 つの音として分離して聴こえてしまう。

実験では-1 ~ 1[ms]の範囲で 0.2[ms]ずつ発音タイミングをずらすことで振幅変化の測定同様、計 11 種の定位の音を作成し、それをランダムに被験者に聴かせて測定している。



図 11：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動

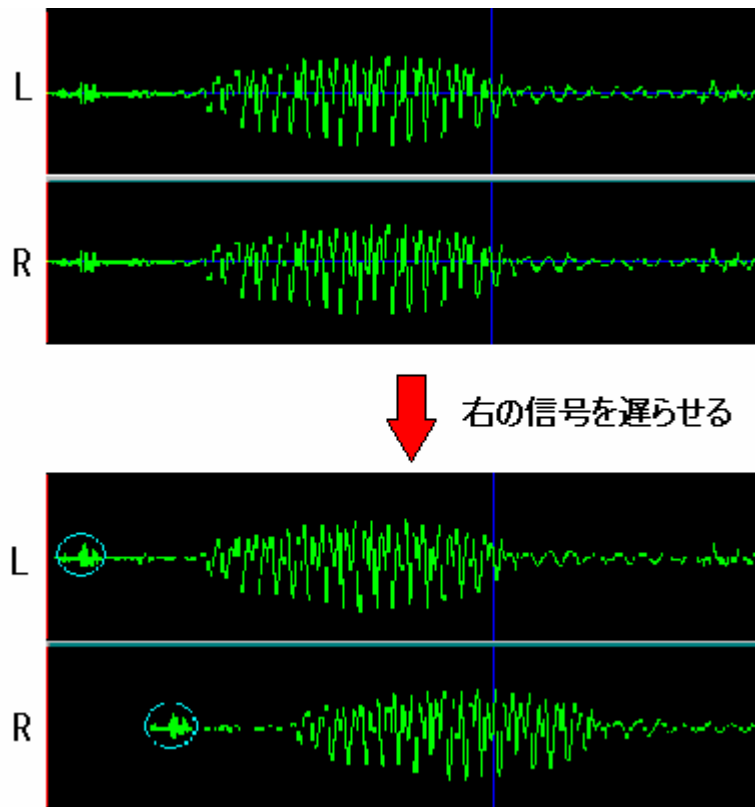


図 12：時間差をつけた音響信号

上図は実際に時間差をつけた音響信号の波形である。このように R を遅らせた場合、先に出音される L の方に定位が移動して聴こえる。

4.2.2. 測定の条件と手順および判定方法

測定の条件は以下の3点であり、振幅変化の測定と同様である。

- ・ ヘッドフォン受聴において行う。
(使用したヘッドフォン：松下電器産業株式会社 Technics 製 RP-DJ700)
- ・ 正弦波(周波数 500Hz、1000Hz、2000Hz)、ホワイトノイズ、音声の5種の音響信号において行う。
- ・ 被験者は20代の成人男女5名。各人に対して2回ずつ測定を行う

次に実際に行った測定の手順を示す。

測定の手順

1.左右の音を聴かせる

2 .センターの音を聴かせる

3 . ランダムに様々な定位の音を聴かせ、鳴った位置を答えてもらう

2と3の繰り返し

(その都度センターの音をはさむ)

1.の左右の音を聴かせるとは、左の音響信号に対する右の音響信号の発音タイミングを-1[ms]および1[ms]早めた定位の音を聴かせることであり、事前に定位の変化量の最高値を教えることで被験者各人の定位判定の範囲を共通化させるためである。

尚、判定してもらう音は右の音響信号の発音タイミングを-1[ms]から1[ms]まで0.2[ms]ずつずらした計11種の音であり、これをランダムに2回ずつ被験者に聴かせ測定している。

被験者が行う定位の判定方法についても振幅変化の測定と全く同様なので省略する(詳しくは『4.1.5. 判定方法』を参照)。

4.2.3. 測定結果

以下に測定結果を示す。これは様々な定位の音を聴き、判定値-3~3のうちどこから聴こえたかを集計し、まとめたものである。判定値に関する詳細は前述したとおりである。尚、右音の発音タイミングとは、左音に対する右音の発音タイミングのずれのことであり、-1[ms]では右音が左音よりも1[ms]遅く発音されたことを示している。

平均値の説明は前述したとおりである（『4.1.6. 測定結果』参照）。

表 6：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動
正弦波（周波数 500Hz）の測定結果

右音の発音タイミング[ms]	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
-1.0	5	5	0	0	0	0	0	-2.5
-0.8	5	4	1	0	0	0	0	-2.4
-0.6	4	5	1	0	0	0	0	-2.3
-0.4	1	3	6	0	0	0	0	-1.5
-0.2	1	2	7	0	0	0	0	-1.4
0	0	0	1	8	1	0	0	0
0.2	0	0	0	1	7	2	0	1.1
0.4	0	0	0	0	7	2	1	1.4
0.6	0	0	0	0	4	4	2	1.8
0.8	0	0	0	0	0	6	4	2.4
1.0	0	0	0	0	0	6	4	2.4

表 7：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動
 正弦波（周波数 1000Hz）の測定結果

右音の発音タ イミング[ms]	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
-1.0	2	3	3	2	0	0	0	-1.5
-0.8	5	4	1	0	0	0	0	-2.4
-0.6	2	7	1	0	0	0	0	-2.0
-0.4	0	7	3	0	0	0	0	-1.7
-0.2	1	1	8	0	0	0	0	-1.3
0	0	0	0	10	0	0	0	0
0.2	0	0	0	2	2	6	0	1.4
0.4	0	0	0	1	4	5	0	1.4
0.6	0	0	0	1	1	5	3	2.0
0.8	0	0	0	2	2	2	4	1.8
1.0	0	0	0	1	5	1	3	1.6

表 8：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動
 正弦波（周波数 2000Hz）の測定結果

右音の発音タ イミング[ms]	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
-1.0	3	3	2	2	0	0	0	-1.7
-0.8	3	4	2	1	0	0	0	-1.9
-0.6	2	4	3	1	0	0	0	-1.7
-0.4	1	2	4	3	0	0	0	-1.1
-0.2	0	1	8	1	0	0	0	-1.0
0	0	0	0	9	1	0	0	0.1
0.2	0	0	0	0	6	3	1	1.5
0.4	0	0	0	1	3	4	2	1.7
0.6	0	0	0	2	2	5	1	1.5
0.8	0	0	0	1	1	4	4	2.1
1.0	0	0	0	1	4	5	0	1.4

表 9：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動
ホワイトノイズの測定結果

右音の発音タイミング[ms]	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
-1.0	6	4	0	0	0	0	0	-2.6
-0.8	4	4	2	0	0	0	0	-2.2
-0.6	4	5	1	0	0	0	0	-2.3
-0.4	3	3	4	0	0	0	0	-1.9
-0.2	0	2	8	0	0	0	0	-1.2
0	0	0	1	9	0	0	0	-0.1
0.2	0	0	0	1	4	5	0	1.4
0.4	0	0	0	0	1	8	1	2.0
0.6	0	0	0	0	2	5	3	2.1
0.8	0	0	0	0	2	1	7	2.5
1.0	0	0	0	0	3	2	5	2.2

表 10：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動
音声の測定結果

右音の発音タイミング[ms]	判定結果[人]							平均値
	-3	-2	-1	0	1	2	3	
-1.0	4	5	1	0	0	0	0	-2.3
-0.8	6	2	2	0	0	0	0	-2.4
-0.6	3	3	4	0	0	0	0	-1.9
-0.4	1	2	5	2	0	0	0	-1.2
-0.2	0	1	5	4	0	0	0	-0.7
0	0	0	0	10	0	0	0	0
0.2	0	0	0	2	6	2	0	1.0
0.4	0	0	0	0	8	2	0	1.2
0.6	0	0	0	0	4	5	1	1.7
0.8	0	0	0	0	1	8	1	2.0
1.0	0	0	0	0	1	4	5	2.4

次にこれらの表をグラフにしたものを示す。円が黒く、大きくなるほど判定した人数が多いところである。

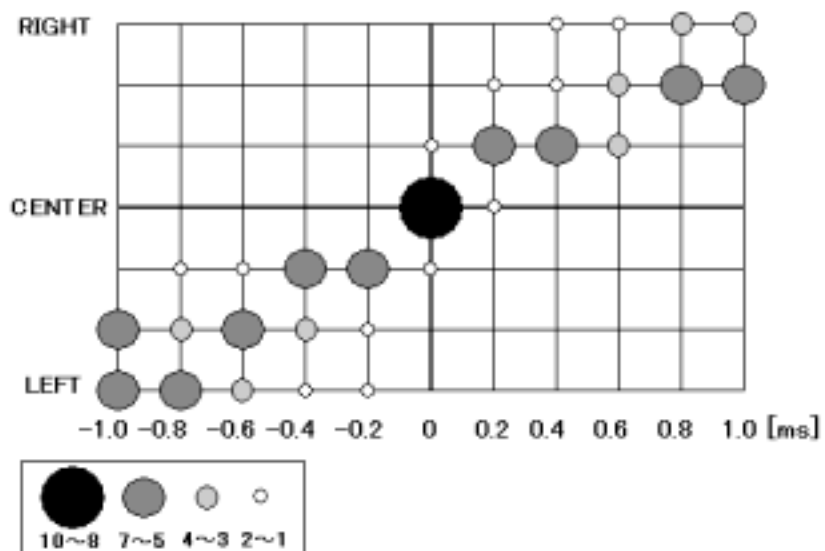


図 13：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動
正弦波（周波数 500Hz）のグラフ

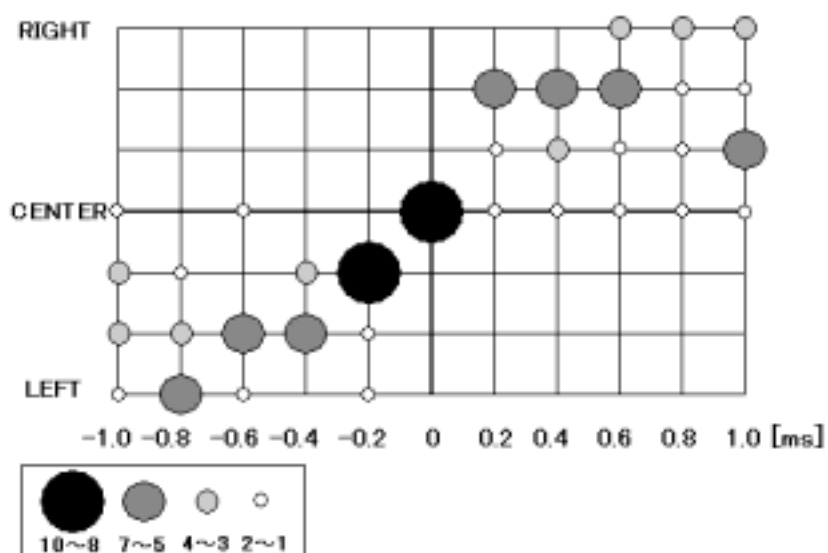


図 14：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動
正弦波（周波数 1000Hz）のグラフ

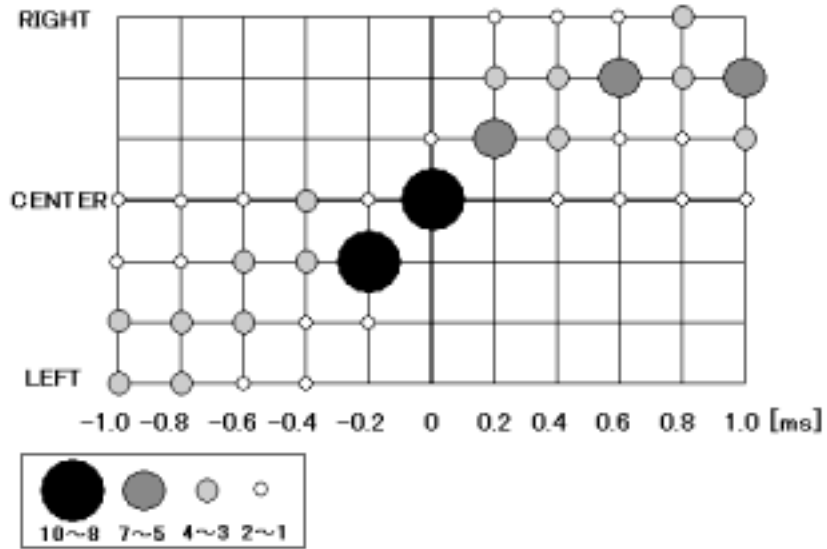


図 15：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動
正弦波（周波数 2000Hz）のグラフ

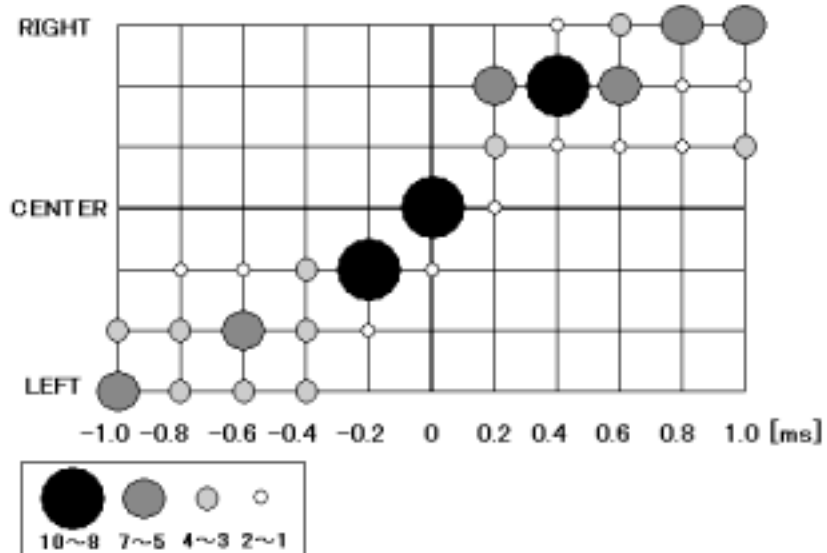


図 16：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動
ホワイトノイズのグラフ

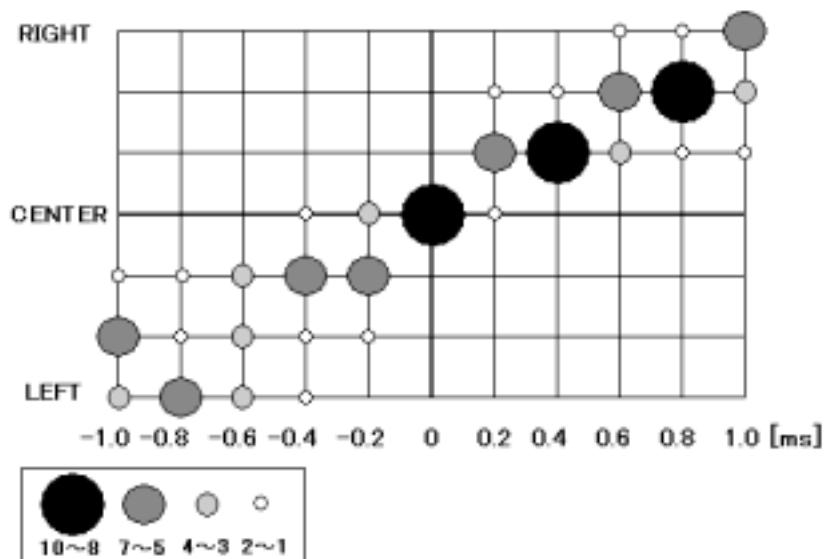


図 17：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置動
音声のグラフ

4.2.4. 結果の比較と考察

それぞれの音響信号の測定結果を比較・検討してみる。

まず正弦波の結果をみると、周波数が高くなるにつれて被験者によって判定にばらつきが見え、定位の知覚が困難であった事が伺える。特に-1.0~-0.6[ms]あるいは0.6[ms]~1.0[ms]周辺でその様子が現れている。しかし、時間差をつけていない中央定位の音だけを見ると、ほぼ全員が的確に知覚している。これは判定してもらう音の直前にその都度、中央定位の音を鳴らしているのですべての音と同じであるかどうかを判断していることが考えられる。つまり、様々な音の定位を知覚するよりも、前の音と同じか同じでないかを判断する方が容易であると思われる。

そしてホワイトノイズの結果をみると、被験者による判定のばらつきが少なく、正弦波の結果に比べ明らかに定位が知覚しやすかったことが分かる。これは振幅変化の測定と同様である。

音声の結果は正弦波（周波数 500[Hz]）のものと似ている。つまりホワイトノイズの定位よりもやはり知覚が困難だったことが分かる。

4.3. 振幅差と時間差による定位置移動の比較

振幅差による定位置移動の測定結果と時間差による定位置移動の測定結果を比較してみると、時間差による定位置移動の測定結果の方が振幅差によるそれよりも判定にばらつきがあり、どの音響信号においても定位の知覚があいまいであった事が分かる。そして、振幅差では音響信号による差があまり見られなかったのに対し、時間差では正弦波の周波数による違いが明確に出た。すなわち、1.0[ms]以内の遅延では音が高くなると定位の変化があまり見られなくなるという結果が出た。このことからたとえ遅延を順次大きくしていったとしても、高周波においては定位の変化をあまり感じないまま 50[ms]周辺で左右の音が分離して聴こえてしまうのではないかと思われる。

ここで、時間差による定位置移動の測定結果において、音響信号による結果の違いを明確にするために表 6～10 の平均値をグラフにして次項 図 19 に示す。尚、図 18 は振幅差による同様のグラフであり、図 10 と同じものである。これらのグラフを比較してみても時間差による定位置移動の方が音響信号による判定結果にばらつきがあることがよく分かる。そして曲線が Center に向かう形で S 字になっていることから音も中央に寄って聴こえることが表れている。

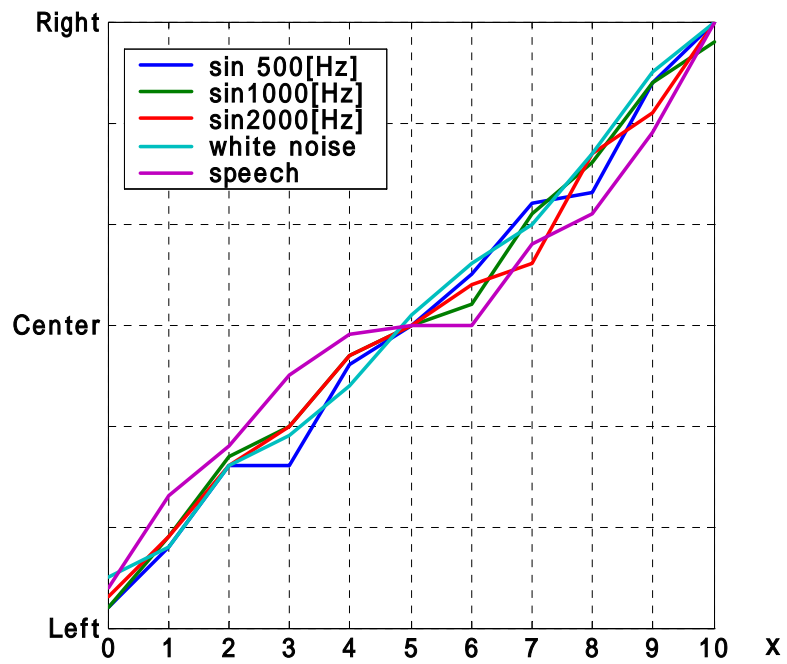


図 18：ヘッドフォン受聴時の振幅差による定位置移動
音響信号における測定結果の違い

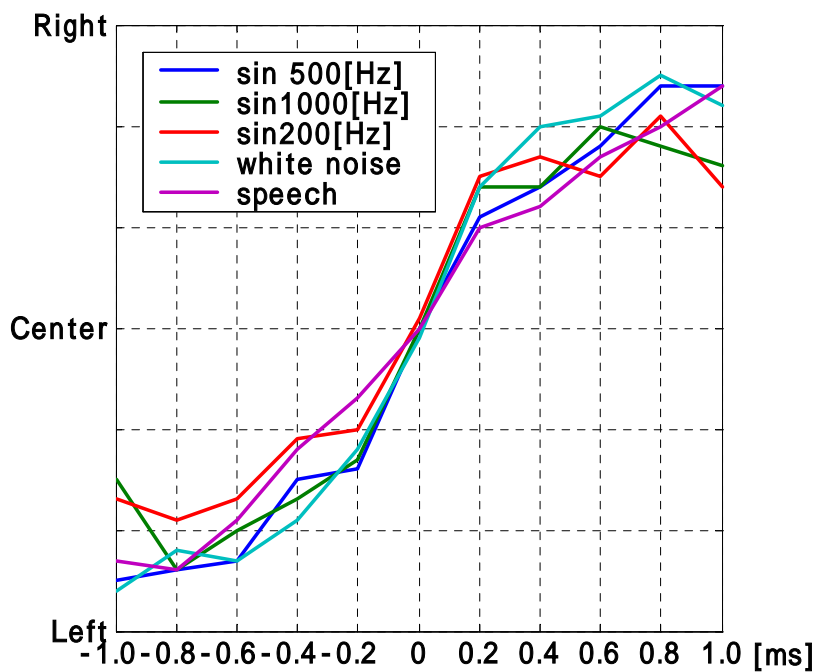


図 19：ヘッドフォン受聴時の時間差による定位置移動
音響信号における測定結果の違い

時間差による定位置移動の方が定位の知覚があいまいであることは前述したとおりであるが、その要因を考えてみる。まず考えられるのは、人間の耳は「音量の変化」と「1.0[ms]以内の時間の変化」では後者の方が判断が困難でなのではないかという事である。そしてもう一つは、定位を左右に振った時の発音の違いが考えられる。例えば定位を最大まで左に変化させた際、振幅変化では右からは全く発音されないのに対して、時間差による定位置移動では右からも発音されている。これが定位の判定を困難にしている要因であると思われる。

5 . スピーカー受聴における音像知覚

音像知覚の研究として、振幅と時間差による定位の変化を調べる事が本研究の目的である。前に述べた通り、左右の音源と観測者の位置の3点がちょうど正三角形になった状態で、左右の音源から同一の信号を流せば、観測者は、2つの音源の中央に音像を認識する。ここで、どちらかの音源の位置を、観測者と音源を結ぶ直線上に移動させる。この状態で同様に出力すると音像は観測者に近い側の音源方向に定位する。このように人間は先に音が到達した耳の方向に音像を認識する。その性質について、本章ではスピーカースシステムを用いて測定を行った。

実験では、スピーカーの距離を擬似的に変化させるべく、左右のスピーカーから発音される信号のどちらかに可変の遅延時間を与えた。

5.1 測定方法

2台1組のスピーカー(BOSE社、101M)を用いて、時間差定位についての実験を行った。今回の実験では、無響室と呼ばれる残響音の発生しない部屋にて測定を行った。

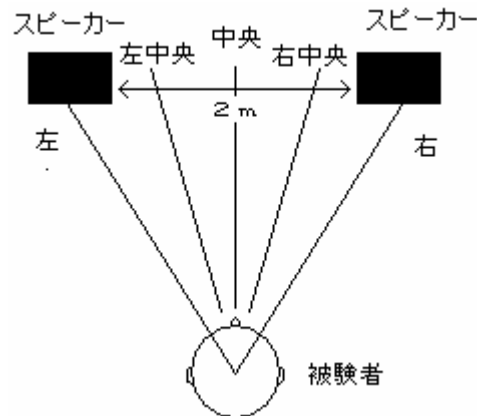


図 20 : 測定時の配置

測定時に図 20 のように左右のスピーカーと、被験者の位置がちょうど辺約 2 [m] の正三角形になるように配置をし、それに加え、被験者が実際に中央の音を聞いた時にその音がしっかり中央から聞こえるように被験者毎に個々で自分の位置を補正してもらった。

判定方法はその音がどこから聞こえた(ように感じた)かを図 20 のように左・左中央・中央・右中央・右の 5 段階で音の方向を判定してもらった。

判定における左、及び右の基準については、振幅比による定位の場合と異なり、時間差による定位変化では完全に左または右に定位した状態が不明瞭である。振幅比による定位変化の場合は意図する方向と逆のチャンネルの音を消す事により、完全にその方向に定位した音を作る事が出来るのに対し、時間差によるそれは完全にどちらかの方向に定位する時間の値が決められない。また今回の実験はそれを調査する実験であるためでもある。

また、振幅比による完全に左に定位した音と時間差によるそれでは、異なる問題であるゆえ、振幅比による完全に定位した音を参照信号として利用するのは避けた方が良いと判断した。今回の実験ではそのため被験者に左または右に定位した参照信号は知らせていない。

5.1. 予備実験

今回の実験を行う前に、今回の実験の具体的な手段や測定方法を決定するために予備実験を行った。その際に調べた事項は

- ・ 使用する音の種類（長さ、周波数、音量等）
- ・ 時間差をつける区間と区切り

以上のような項目について今回の実験を進めるにあたって事前に調査をした。その予備実験の結果、今回の実験で使用する音の素材や測定する時間差の区間を決定した。

最初にスピーカーでの時間差定位において人間が定位の変化を感じられる時間差の範囲を探した。過去の研究に基づき、エコーとして判断される 50[ms]までを測定区間とし、この中で最も定位の変化を感じられる範囲、また殆ど定位の変化を感じられない範囲、そして明らかにエコーとして聞こえる範囲、の3種類の範囲に分類することから始めた。

まず、50[ms]までの範囲を 5[ms]刻みで計 10 種の時間差に関して測定をした所、25[ms]以上からは、定位の存在は感じられず、明らかに左右の音が分離して鳴っている、すなわちエコーの状態であると判断した。

次に、20[ms]までを 2[ms]刻みで計 10 種の時間差に関して測定をした所、10[ms]以上からは、時間差の変化に対し定位の変化が感じられず、10[ms]以降では、定位の変化を判定するのは困難であると判断した。

更に 2[ms]まで 0.2[ms]刻みで計 10 種の時間差に関して測定した所、1.4[ms]以下では、時間差の変化によって定位が変化していく様子をはっきりと感じられた。更に細かく測定した結果、1.0[ms]以下が明らかな変化を感じられる点であると判断し、今回の実験では 1.0[ms]までを測定区間とする事にした。

使用する音は以下の3つ。

- ・ 音声：女性が“good morning”と発音している音声 / 0.85[sec]
- ・ 矩形波：1000[Hz] / 0.5[sec]
- ・ 正弦波：3000[Hz] / 0.5[sec]

測定する時間差の範囲と刻み

- ・ ± 1.0 [ms]まで 0.1[ms]刻みの時間差（中央を含めず計 20 種）

以上の条件を基に、今回の実験を進めてゆく。

5.2. 測定手順

被験者が中央の音がしっかり中央から聞こえるように補正した状態で測定を開始する。測定方法は以下の2通り。

- ・ まず中央の音を鳴らし、直後に測定用の音を鳴らしてその音を判断してもらう。それを記録したら再度中央の音を鳴らし、測定用の音を鳴らす、というように測定用の音の中に毎回中央の音を挟む測定方法
- ・ 中央の音を鳴らし、それがしっかり中央から聞こえている事を確認した後、測定用の音を次々と鳴らしてゆく、中央の音を途中に一切挟まない測定方法。

以上の2種の測定方法で行う。今回の実験では同時に、この2種について測定結果に何らかの変化は現れるかどうかの検討も行う。

次項から実際の測定結果を挙げてゆく。結果はグラフ化し、視覚的に変化が分かり易くなるよう考慮した。

- ・ グラフの横軸は設けた時間差であり、負の値は右側の発音を遅らせた量、正の値は左側のそれにあたる。
- ・ 縦軸は定位の位置を示す。上から、右・右中央・中央・左中央・左、となっている。
- ・ グラフ中の円に書かれている数値は実際にその定位の位置を判定した人数を示している。この値が大きいほど円を大きくしてある。
- ・ グラフは2個1組となっており、上側が測定用の音の間に毎回中央の音を挟む場合で、下側が中央の音を挟まず測定を進めた場合となっている。



図 21：実際の測定風景

5.3. 測定結果

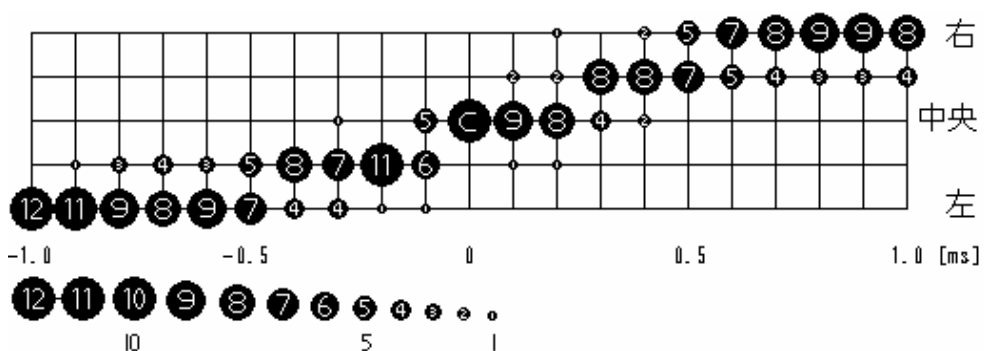
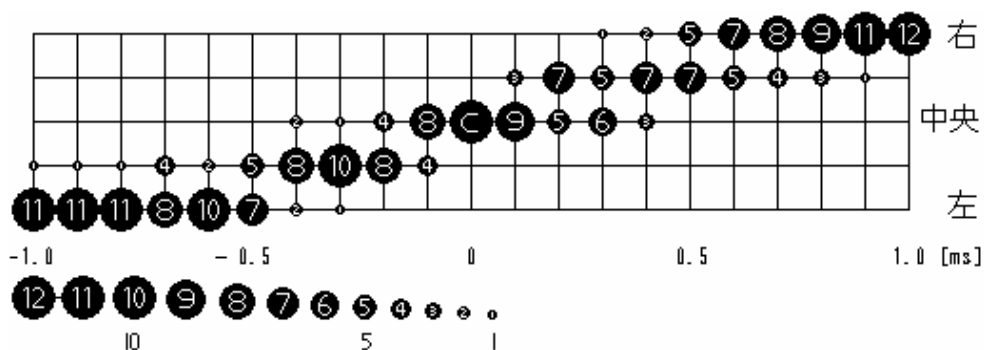


図 22：音声での測定

< 音声：女性が”Good morning”と発音している声 / 0.85[sec] >

< 被験者：6 名に対し各 2 回づつ >

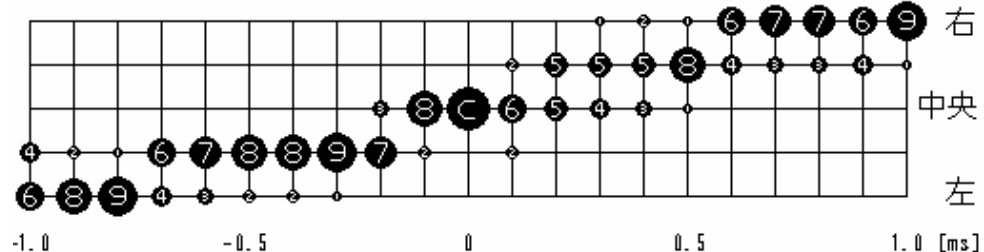
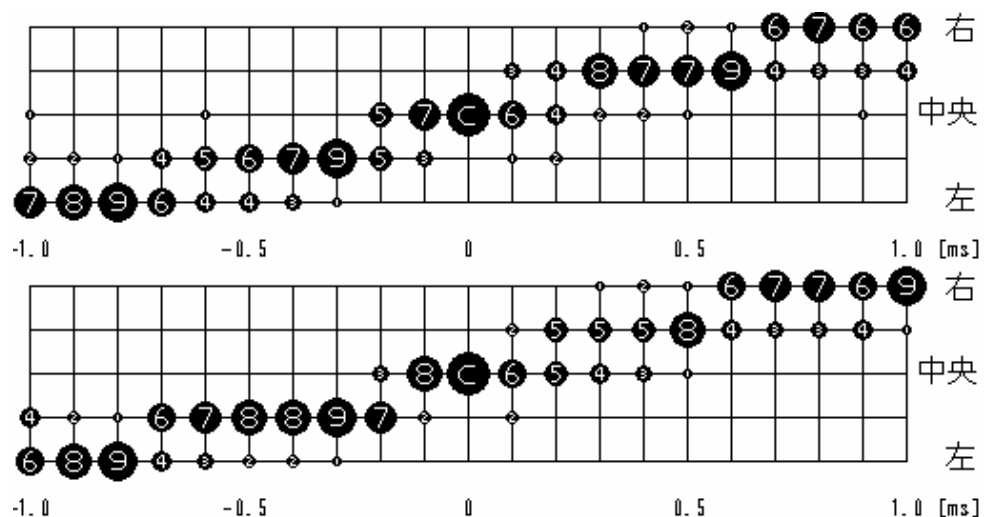


図 23：矩形波での測定

< 矩形波：1000[Hz] / 0.5[sec] >

< 被験者：5 名に対し各 2 回づつ >

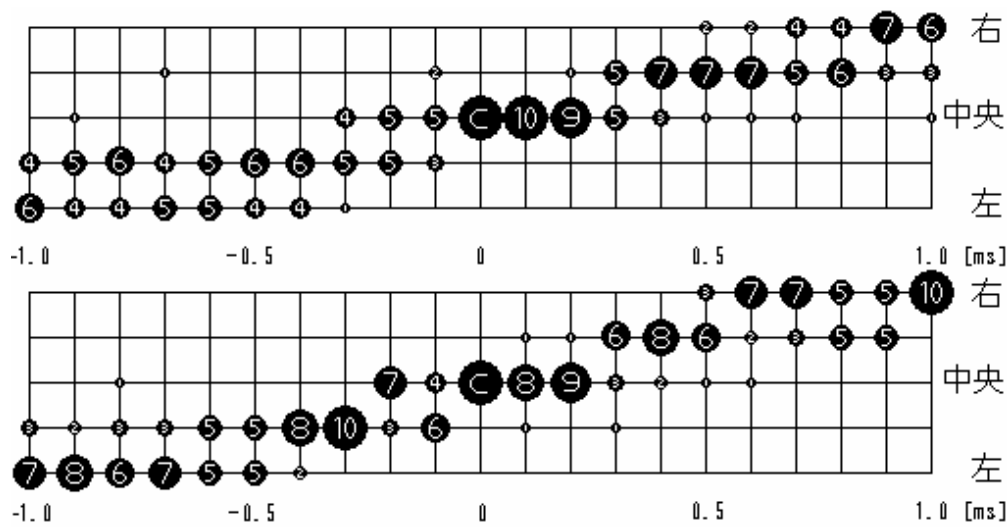


図 24：正弦波での測定

< 正弦波：3000[Hz] / 0.5[sec] >

< 被験者：5名に対し各2回づつ >

以上測定結果を基に、各々について平均値及び標準偏差を算出する。

平均値については、判定の左及び右を2、左中央及び右中央を1、中央を0として計算した値である。例として次項 表 6 における 0.3[ms]の場合での平均値は

$$\{(1 \times 2) + (5 \times 1) + (6 \times 0)\} / 12 = 0.58$$

となる。

標準偏差についても同様であるが、標準偏差は時間差が 0[ms]の場合において、標準偏差が必ず 0 になる故、グラフ化した際に不自然な形になりかねない為、ここについては、直前直後の 0.1[ms]、-0.1[ms]の値の平均値をこの時の値としている。

次頁から、各場合についての平均値及び標準偏差を算出した表を各測定方法毎に挙げてゆく。

表 6：音声での測定

時間差[ms] (負は右の遅延)	判定結果[人]					平均値	標準偏差
	左	左中	中	右中	右		
-1.0	11	1	0	0	0	1.92	0.29
-0.9	11	1	0	0	0	1.92	0.29
-0.8	11	1	0	0	0	1.92	0.29
-0.7	8	4	0	0	0	1.67	0.49
-0.6	10	2	0	0	0	1.83	0.39
-0.5	7	5	0	0	0	1.58	0.52
-0.4	2	8	2	0	0	1.00	0.60
-0.3	1	10	1	0	0	1.00	0.43
-0.2	0	8	4	0	0	0.67	0.49
-0.1	0	4	8	0	0	0.33	0.49
0	CENTER						0.47
0.1	0	0	9	3	0	0.25	0.45
0.2	0	0	5	7	0	0.58	0.52
0.3	0	0	6	5	1	0.58	0.67
0.4	0	0	3	7	2	0.92	0.67
0.5	0	0	0	7	5	1.42	0.52
0.6	0	0	0	5	7	4.58	0.52
0.7	0	0	0	4	8	1.67	0.49
0.8	0	0	0	3	9	1.75	0.45
0.9	0	0	0	1	11	1.92	0.29
1.0	0	0	0	0	12	2.00	0

< 測定用の音の間に毎回中央の音を挟む場合 >

< 音声：女性が“Good morning”と発音している声 / 0.85[sec] >

< 被験者：6名に対し各2回ずつ >

表 7：音声での測定

時間差[ms] (負は右の遅延)	判定結果[人]					平均値	標準偏差
	左	左中	中	右中	右		
-1.0	12	0	0	0	0	2.00	0
-0.9	11	1	0	0	0	1.92	0.29
-0.8	9	3	0	0	0	1.75	0.45
-0.7	8	4	0	0	0	1.67	0.49
-0.6	9	3	0	0	0	1.75	0.45
-0.5	7	5	0	0	0	1.58	0.52
-0.4	4	8	0	0	0	1.33	0.49
-0.3	4	7	1	0	0	1.25	0.62
-0.2	1	11	0	0	0	1.08	0.29
-0.1	1	6	5	0	0	0.67	0.67
0	CENTER						0.60
0.1	0	1	9	2	0	0.08	0.52
0.2	0	1	8	2	1	0.25	0.75
0.3	0	0	4	8	0	0.67	0.49
0.4	0	0	2	8	2	1.00	0.60
0.5	0	0	0	7	5	1.42	0.52
0.6	0	0	0	5	7	1.58	0.52
0.7	0	0	0	4	8	1.67	0.49
0.8	0	0	0	3	9	1.75	0.45
0.9	0	0	0	3	9	1.75	0.45
1.0	0	0	0	4	8	1.67	0.45

< 中央の音を挟まず測定を進めた場合 >

< 音声：女性が“Good morning”と発音している声 / 0.85[sec] >

< 被験者：6名に対し各2回ずつ >

表 8：矩形波での測定

時間差[ms] (負は右の遅延)	判定結果[人]					平均値	標準偏差
	左	左中	中	右中	右		
-1.0	7	2	1	0	0	1.6	0.70
-0.9	8	2	0	0	0	1.8	0.42
-0.8	9	1	0	0	0	1.9	0.32
-0.7	6	4	0	0	0	1.6	0.52
-0.6	4	5	1	0	0	1.3	0.68
-0.5	4	6	0	0	0	1.4	0.52
-0.4	3	7	0	0	0	1.3	0.48
-0.3	1	9	0	0	0	1.1	0.32
-0.2	0	5	5	0	0	0.5	0.53
-0.1	0	3	7	0	0	0.3	0.48
0	CENTER						0.56
0.1	0	1	6	3	0	0.2	0.63
0.2	0	2	4	4	0	0.2	0.79
0.3	0	0	2	8	0	0.8	0.42
0.4	0	0	2	7	1	0.9	0.57
0.5	0	0	1	7	2	1.1	0.57
0.6	0	0	0	9	1	1.1	0.32
0.7	0	0	0	4	6	1.6	0.52
0.8	0	0	0	3	7	1.7	0.48
0.9	0	0	1	3	6	1.5	0.70
1.0	0	0	0	4	6	1.6	0.52

< 測定用の音の間に毎回中央の音を挟む場合 >

< 矩形波：1000[Hz] / 0.5[sec] >

< 被験者：5名に対し各2回ずつ >

表 9：矩形波での測定

時間差[ms] (負は右の遅延)	判定結果[人]					平均値	標準偏差
	左	左中	中	右中	右		
-1.0	6	4	0	0	0	1.6	0.52
-0.9	8	2	0	0	0	1.8	0.42
-0.8	9	1	0	0	0	1.9	0.32
-0.7	4	6	0	0	0	1.4	0.52
-0.6	3	7	0	0	0	1.3	0.48
-0.5	2	8	0	0	0	1.2	0.42
-0.4	2	8	0	0	0	1.2	0.42
-0.3	1	9	0	0	0	1.1	0.32
-0.2	0	7	3	0	0	0.7	0.48
-0.1	0	2	8	0	0	0.2	0.42
0	CENTER						
0.1	0	2	6	2	0	0	0.67
0.2	0	0	5	5	0	0.5	0.53
0.3	0	0	4	5	1	0.7	0.68
0.4	0	0	3	5	2	0.9	0.74
0.5	0	0	1	8	1	1.0	0.47
0.6	0	0	0	4	6	1.6	0.52
0.7	0	0	0	3	7	1.7	0.48
0.8	0	0	0	3	7	1.7	0.48
0.9	0	0	0	4	6	1.6	0.52
1.0	0	0	0	1	9	1.9	0.32

< 中央の音を挟まず測定を進めた場合 >

< 矩形波：1000[Hz] / 0.5[sec] >

< 被験者：5名に対し各2回ずつ >

表 10 正弦波での測定

時間差[ms] (負は右の遅延)	判定結果[人]					平均値	標準偏差
	左	左中	中	右中	右		
-1.0	6	4	0	0	0	1.6	0.52
-0.9	4	5	1	0	0	1.3	0.68
-0.8	4	6	0	0	0	1.4	0.52
-0.7	5	4	0	1	0	1.3	0.95
-0.6	5	5	0	0	0	1.5	0.53
-0.5	4	6	0	0	0	1.3	0.52
-0.4	4	6	0	0	0	1.3	0.52
-0.3	1	5	4	0	0	0.7	0.68
-0.2	0	5	5	0	0	0.5	0.53
-0.1	0	3	5	2	0	0.1	0.74
0	CENTER						0.37
0.1	0	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	9	1	0	0.1	0.32
0.3	0	0	5	5	0	0.5	0.53
0.4	0	0	3	7	0	0.7	0.48
0.5	0	0	1	7	2	1.1	0.57
0.6	0	0	1	7	2	1.1	0.57
0.7	0	0	1	5	4	1.3	0.68
0.8	0	0	0	6	4	1.4	0.52
0.9	0	0	0	3	7	1.7	0.48
1.0	0	0	1	3	6	1.5	0.70

< 測定用の音の間に毎回中央の音を挟む場合 >

< 正弦波 : 3000[Hz] / 0.5[sec] >

< 被験者 : 5 名に対し各 2 回ずつ >

表 11：正弦波での測定

時間差[ms] (負は右の遅延)	判定結果[人]					平均値	標準偏差
	左	左中	中	右中	右		
-1.0	7	3	0	0	0	1.7	0.48
-0.9	8	2	0	0	0	1.8	0.42
-0.8	6	3	1	0	0	1.5	0.70
-0.7	7	3	0	0	0	1.7	0.48
-0.6	5	5	0	0	0	1.5	0.53
-0.5	5	5	0	0	0	1.5	0.53
-0.4	2	8	0	0	0	1.2	0.42
-0.3	0	10	0	0	0	1.0	0
-0.2	0	3	7	0	0	0.3	0.48
-0.1	0	6	4	0	0	0.6	0.52
0	CENTER						0.50
0.1	0	1	8	1	0	0	0.47
0.2	0	0	9	1	0	0.1	0.32
0.3	0	1	3	6	0	0.5	0.70
0.4	0	0	2	8	0	0.8	0.42
0.5	0	0	1	6	3	1.2	0.70
0.6	0	0	1	2	7	1.6	0.57
0.7	0	0	0	3	7	1.7	0.48
0.8	0	0	0	5	5	1.5	0.53
0.9	0	0	0	5	5	1.5	0.53
1.0	0	0	0	0	10	2.0	0

< 中央の音を挟まず測定を進めた場合 >

< 正弦波：3000[Hz] / 0.5[sec] >

< 被験者：5名に対し各2回ずつ >

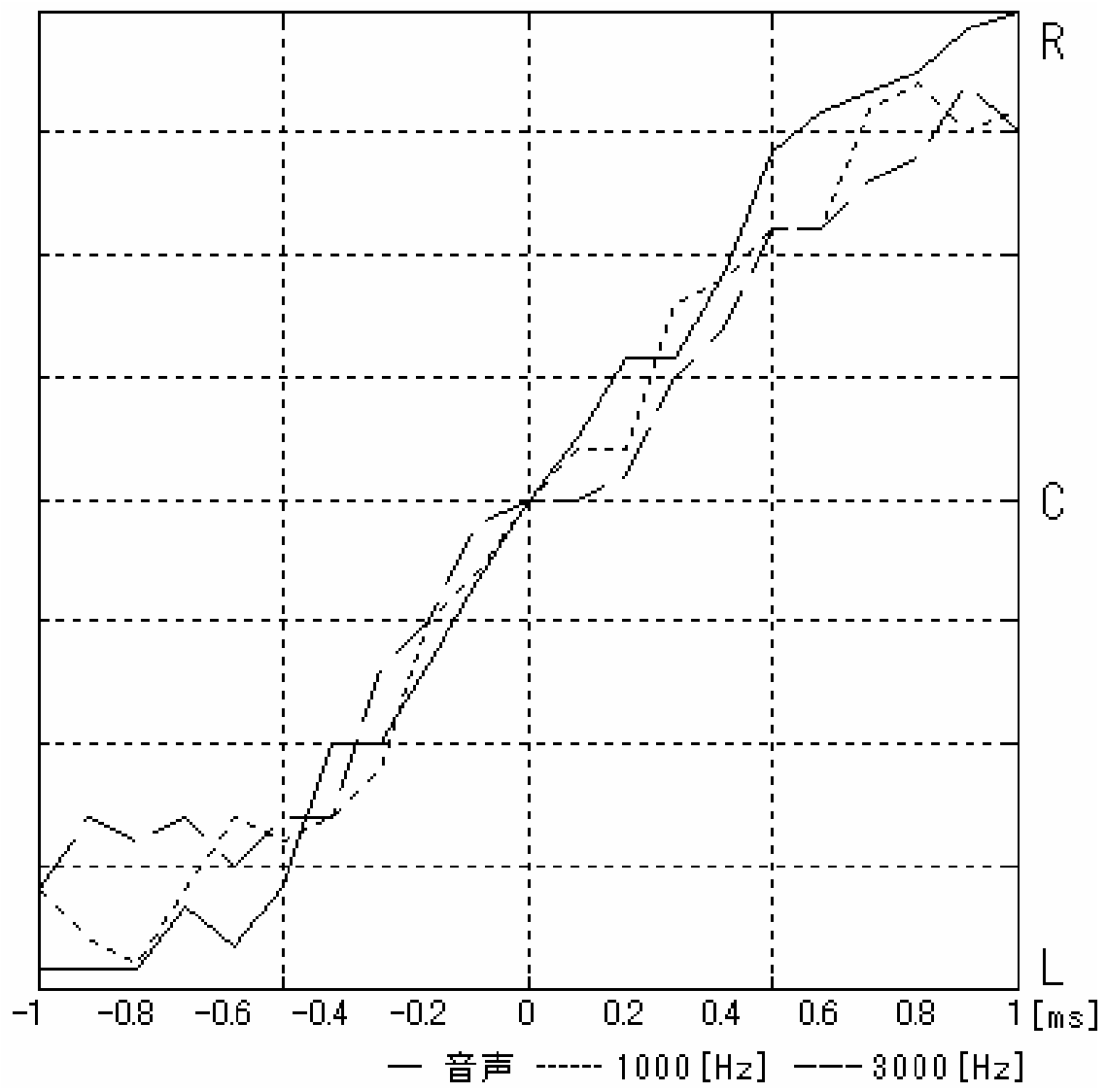


図 25 平均値の推移
 <測定用の音の間に毎回中央の音を挟む場合>

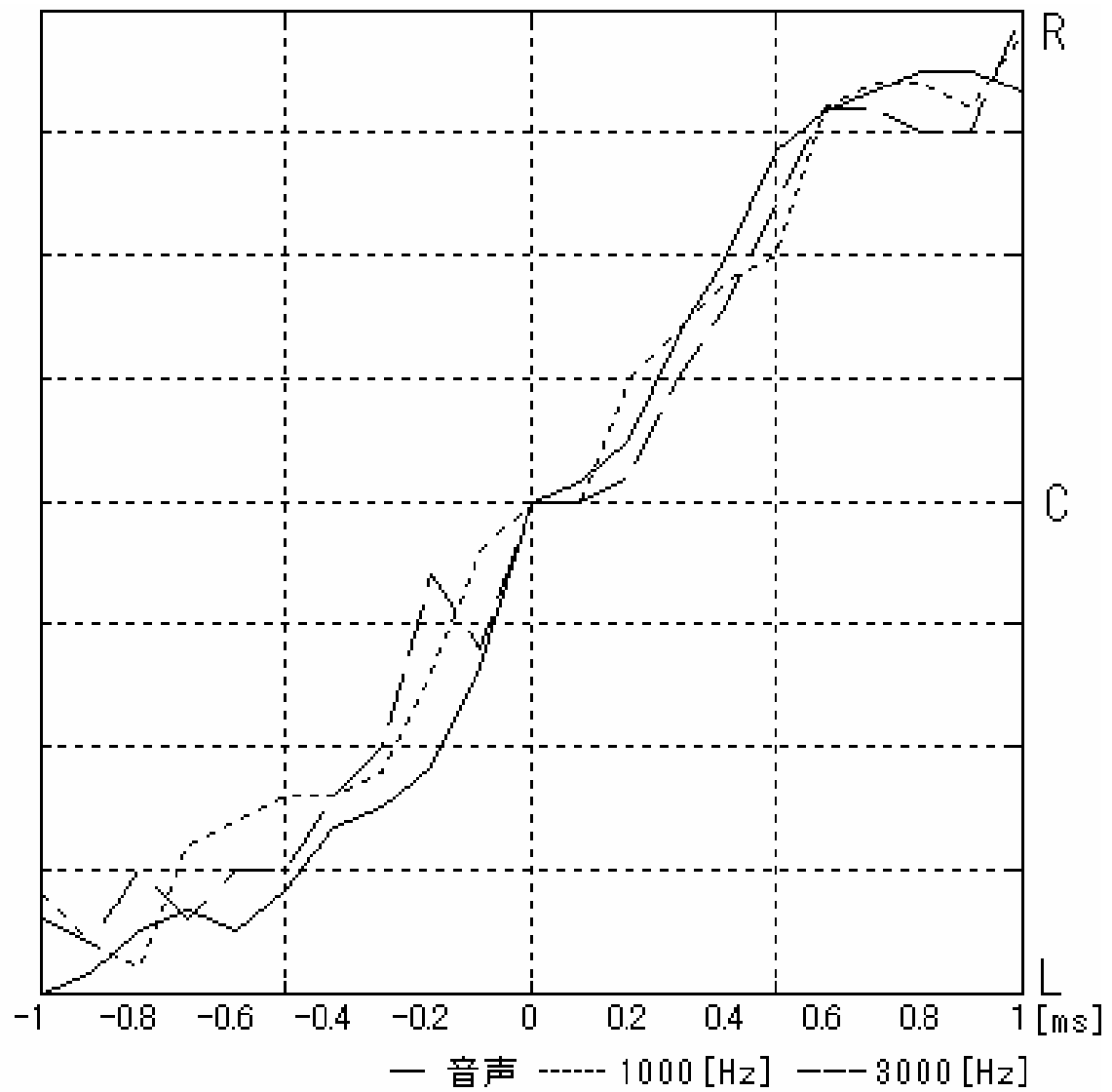


図 26 : 平均値の推移
 < 中央の音を挟まず測定を進めた場合 >

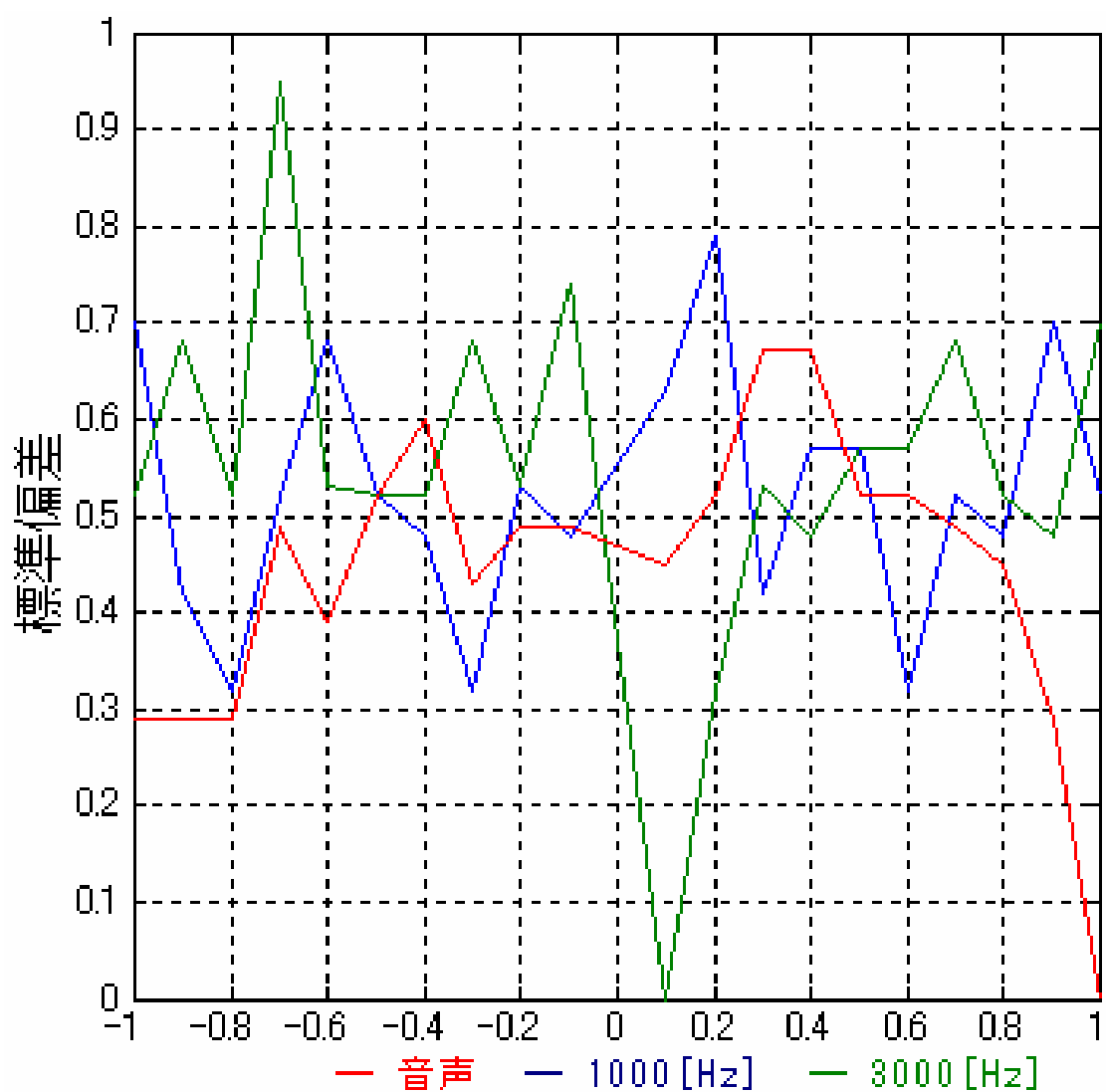


図 27：標準偏差の推移
 <測定用の音の間に毎回中央の音を挟む場合>

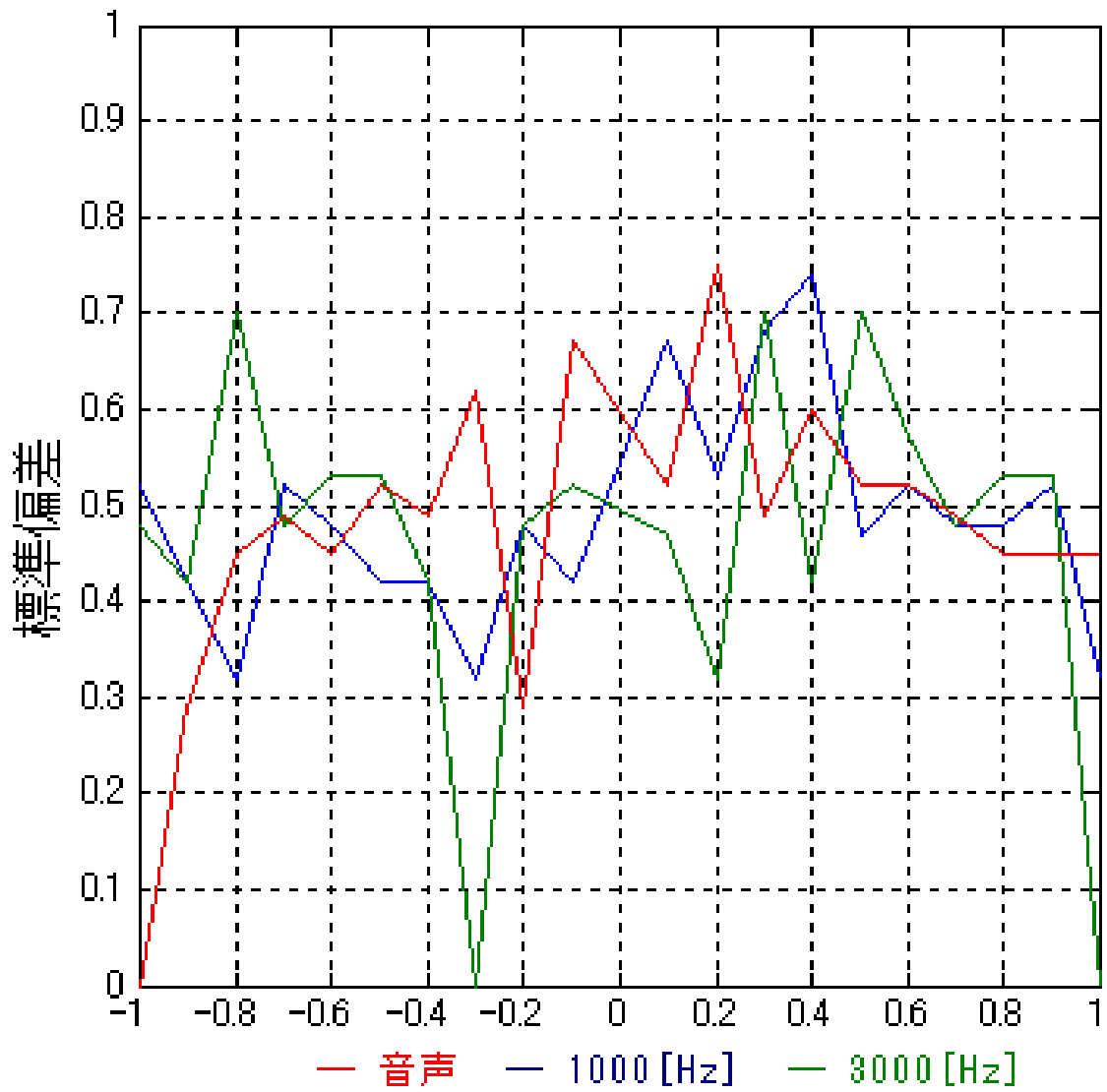


図 28 : 標準偏差の推移
 < 中央の音を挟まず測定を進めた場合 >

5.4. 検討・考察

以上のデータを基に本実験での結果を報告する。

まず、2種類の測定方法（測定中に中央の音を挟むか否か）を比較する。当初は、中央の音を挟まず測定を進めた場合、途中から判断基準が曖昧になり、毎回中央の音を挟んで測定する場合と比べ、結果に分散がより多く生じてくるのでは無いかと考えた。

しかしながら実際に測定をしてみると、今回の実験においてはどちらの場合でも、実験結果に大きな差は生まれていない。現段階では被験者の数が少なく、一人の判断の影響が大きいため、実際にグラフ化した際に差は出来ているものの、このまま被験者の数を増やして、データをより細かいものにしてゆくとすれば、いずれ双方の差はある程度落ち着いてくるのではないかと考えられる。

従って、この2種の測定方法によって、結果に差は殆ど出てこない、と言えるであろう。

だが、今回の実験のみに関して、標準偏差のグラフを比較してみた所、中央の音を毎回挟む測定方法の方が、挟まない方法の結果に比べて不安定である。これはこちらが当初に意図していた結果と逆の結果となった。ここで中央の音を挟む事が、結果として個々の判断基準を曖昧にしている可能性も出てきた。このような原因の追求も、今後の課題として挙げられる点であろう。

今後、同様の実験が行われる際には、実験の効率を考え、「毎回中央の音を挟まない」方法で測定を行う方が良いかと思われる。

次に周波数別での比較を行う。今回使用した周波数は、日常的な音声のレベルから、周波数特性のピークに近い3000[KHz]の間から3点を取り上げて測定した。

まず全体的に、平均値の推移状況のグラフから、この時間差及び周波数の区域であれば、音像の動き方に差は現れていない。どの場合でも遅延時間が大きくなるにつれ、曲線の傾きがS字型に緩くなっていく動きを見せている。

次に周波数別に見た場合、遅延時間が大きい部分での傾きが、高周波である程、緩やかなものになっている。その中で、高周波（ここでは1[KHz]、3[KHz]）は時間差が1.0[ms]に達しても、音像はまだ左、または右に完全に定位しきっていない事が判る。即ち、1.0[ms]までの範囲内では、完全に左または右には定位しない、定位するにはもう少し時間を要するのではないかと、という疑問点が残った。

それを踏まえ、今後の研究課題として今回測定しなかった範囲外（1.0[ms]以上の時間差、100[Hz]以下や3[KHz]を超える周波数）での測定や、被験者を増やしてのデータの精度向上、等が挙げられる。

6 . GUI (Graphical User Interface)

MATLAB の GUI 機能を使用して測定に使用したプログラムを作成した。この機能を利用すれば、この実験に限らず各種の実験や測定において応用次第で利用できると思われる。

今回作成したプログラムは下の二つである。

- ・ 簡単な音の作成プログラム
- ・ 実験測定用プログラム

6.1. 音の作成プログラム

GUI 機能のテストを兼ねて作成したもの。正弦波やノイズを音量や定位、また周波数や発音時間を設定して発音し、その音を任意保存出来る程度の簡単なプログラムである。下に実際の実行画面を示す。

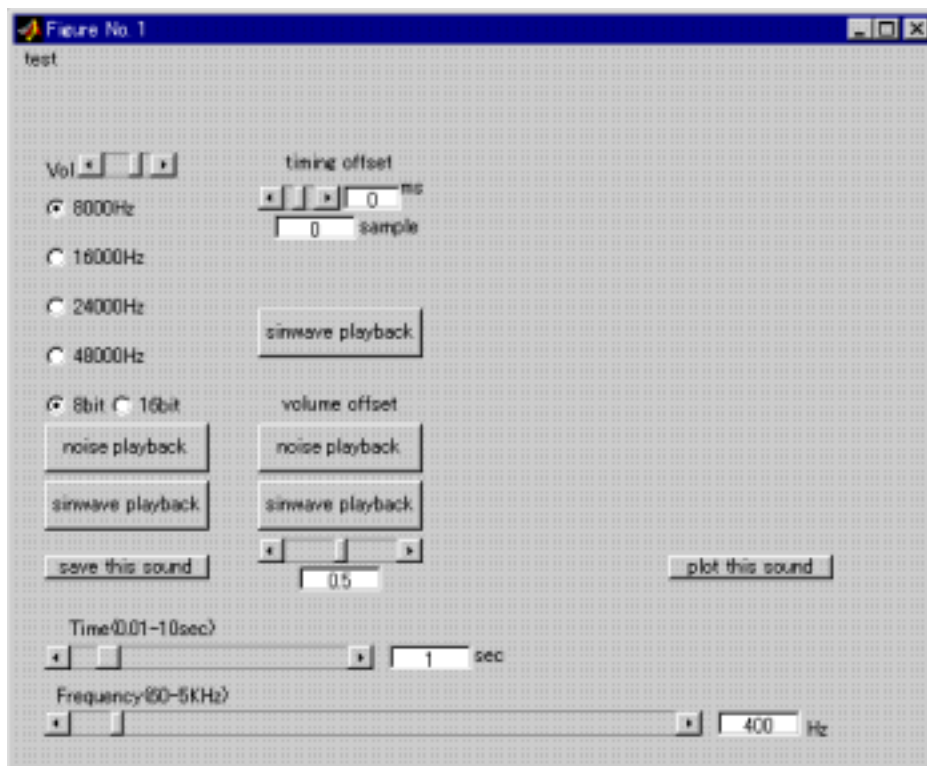


図 29 : 実行画面 (1)

以下にプログラムのソース(一部省略)を示す。尚、%内(斜体字)はコメントである。

```
figure(1);

%メニューバーにメニューを出すプログラム。本プログラムでは使用しませんが参考として残して
%おきます。
set(gcf,'Menubar','none');
addmenu=uimenu(gcf,'Label','test');
doglid=uimenu(addmenu,'Label','Grid','Callback','Grid');

%初期値設定
vl=0.75;    %ボリューム
x=1:8001;   %行列 x。音出力の際に再定義するため本来は不要ですが念のため。
Fs=8000;    %サンプリング周波数[Hz]
t=-3025;    %ランダムノイズ用の出力時間に関するパラメータ
fr=400;     %周波数[Hz]
br=8;       %ビット数[bit]
tm=1.0;     %時間[sec]
lr=0.5;     %左右の音の大きさのバランス。0で完全に左、1で右。
tou=0;      %出音タイミングのズレ(タウ)。単位はサンプル。
            %結果的に出音に絡むことになる変数はこちら。
tout=0;     %上に同じ。但しこちらの単位は(ms)。
            %因みに1ms単位で設定されないとエラーが出ます。
            %そのため細かくずらしたい時は上のサンプル単位で。

%ラジオボタン群(サンプリング周波数 Fs)
            %オブジェクトの[x座標 y座標 x幅 y幅]
ra1=uicontrol('style','radiobutton','string','8000Hz','position',[20 330 80 20],'value',1,
...
            'callback','if get(ra2,"value") == 1,set(ra2,"value",0);end;
            if get(ra3,"value") == 1,set(ra3,"value",0);end;
            if get(ra4,"value") == 1,set(ra4,"value",0);end;
            Fs=8000;t=-8000;');
%if...のくだけはラジオボタンをチェックした時に他のどれかにチェックが
%入っていればそれを消す為のもの。
```

```

ra2=uicontrol('style','radiobutton','string','16000Hz','position',[20 300 80 20],...
    'callback',['if get(ra1,"value") == 1,set(ra1,"value",0);end; if get(ra3,"value") ==
1,set(ra3,"value",0);end; if get(ra4,"value") ==
1,set(ra4,"value",0);end;Fs=16000;t=0;]);

```

%同様に ra3,ra4 も作成(省略)

%ラジオボタン2(ビット数 br)

```

br1=uicontrol('style','radiobutton','string','8bit','position',[20 210 40 20],'value',1,...
    'callback',['if get(br2,"value") == 1,set(br2,"value",0);end;br=8;]);
br2=uicontrol('style','radiobutton','string','16bit','position',[60 210 48 20],...
    'callback',['if get(br1,"value") == 1,set(br1,"value",0);end;br=16;]);

```

%周波数 fr 用スライダー

```

f1=uicontrol('style','slider','position',[20 20 400 15],'Min',60,'Max',5060,'Value',400,'slider
step',[0.0002,0.002],...'callback','fr=get(f1,"value");set(f2,"string",num2str(fr)););

```

%時間 tm 用スライダー

```

tm1=uicontrol('style','slider','position',[20 60 200 15],'Min',0.01,'Max',10.01,'Value',1.
0,'sliderstep',[0.01,0.1],...'callback','tm=get(tm1,"value");set(time,"string",num2str(t
m)););

```

%周波数(Hz)可変エディットボックス(スライダーの値をリアルタイムに反映)、数値の直接入力可能

```

f2=uicontrol('style','edit','string',num2str(fr),'backgroundcolor',[1 1 1],'position',[430
20 50 15],...'callback','fr=eval(get(f2,"string")););

```

%時間(ms)可変エディットボックス(スライダーの値をリアルタイムに反映)数値の直接入力可能

```

time=uicontrol('style','edit','string',num2str(tm),'backgroundcolor',[1 1 1],
'position',[230 60 50 15],...'callback','tm=eval(get(time,"string")););

```

%ボリューム vl 用スライダー

```

v1=uicontrol('style','slider','position',[40 360 60 15],'Min',0,'Max',1,'Value',0.75,...
    'callback','vl=get(v1,"value"););

```

%左右音量バランス調整 lr スライダー

```
lr1=icontrol('style','slider','position',[150 125 100 15],'Min',0,'Max',1,'Value',0.5,'sliderstep',[0.01,0.1],...'callback','lr=get(lr1,"value");set(lr2,"string",num2str(lr));');
```

%音量バランスエディットボックス

```
lr2=icontrol('style','edit','string',num2str(lr),'backgroundcolor',[1 1 1],'position',[175 108 50 15],...'callback','lr=eval(get(lr1,"string"));');
```

%時間変移 色々。上から時間単位のスライダ、時間単位のエディットボックス、サンプル単位のエディットボックス(時間の値からも反映)

```
toutime1=icontrol('style','slider','position',[150 340 50 15],'Min',-10,'Max',10,'Value',0,'sliderstep',[0.05,0.1],...'callback','tout=get(toutime1,"value");set(toutime2,"string",num2str(tout));tout=tout*(Fs/1000);set(tousam,"string",num2str(tou));');  
toutime2=icontrol('style','edit','string',num2str(tout),'backgroundcolor',[1 1 1],'position',[202 340 35 15],...'callback','tout=eval(get(toutime2,"string"));tout=tout*(Fs/1000);set(tousam,"string",num2str(tou));');  
tousam=icontrol('style','edit','string',num2str(tou),'backgroundcolor',[1 1 1],'position',[160 322 50 15],...'callback','tou=eval(get(tousam,"string"));');
```

%テキスト(文字)類

```
tx1=icontrol('style','text','string','Vol','Position',[20,360,20,10]);
```

%中略

```
tx10=icontrol('style','text','string','sample','Position',[210,321,40,15]);
```

%モノラルノイズ出力(ノイズは元々音量が大きいので、出力時にサイン波との差を無くすために、あらかじめ音量を小さく("vl-0.4"の部分)してます。

```
so2=icontrol('string','noise playback','position',[20 180 100 30],'callback',...'y=(vl-0.4)*randn(((16000+t)*tm),1);sound(y,Fs,br);');
```

%モノラルサイン波出力

```
so3=icontrol('string','sinwave playback','position',[20 145 100 30],'callback',...'x=1:Fs*tm;y=vl*sin(2*pi*(x-1)/(Fs/fr));sound(y,Fs,br);');
```

%音の保存、一番最後に出された音が掃き出されます。が、今の所強制的に特定のファイル名で毎回上書き保存という形に。

```
ww=uicontrol('string','save this sound','position',[20 115 100 15],'callback',...  
    'wavwrite(y,Fs,br,"newsound");');
```

%ステレオサイン波(音量)出力

```
stes1=uicontrol('string','sinwave playback','position',[150 145 100 30],'callback',...  
'x=1:Fs*tm;y=vl*[((1-lr)*(sin(2*pi*(x-1)/(Fs/fr)))+(lr*(sin(2*pi*(x-1)/(Fs/fr)))]";sound  
(y,Fs,br);');
```

%ステレオノイズ(音量)出力

```
sten1=uicontrol('string','noise playback','position',[150 180 100 30],'callback',...  
    'no=(vl-0.4)*randn(((16000+t)*tm),1);y=[(1-lr)*no lr*no];sound(y,Fs,br);');
```

%ステレオサイン波(時間変移)出力

```
stes2=uicontrol('string','sinwave playback','position',[150 250 100 30],'callback',...  
'q=zeros(1,(Fs/100));q1=zeros(1,((Fs/100)-tou));q2=zeros(1,((Fs/100)+tou));xa0=1:Fs*  
tm;xa1=[q1 xa0 q2];xa2=[q xa0 q];y=vl*[(0.5*(sin(2*pi*(xa1-1)/(Fs/fr)))+(0.5*(sin(2*  
pi*(xa2-1)/(Fs/fr)))]";sound(y,Fs,br);');
```

%ステレオノイズ(時間変移)出力(検討中)

```
sten2=uicontrol('string','noise playback','position',[150 285 100 30],'callback',...  
'q=zeros(1,(Fs/100));q1=zeros(1,((Fs/100)-tou));q2=zeros(1,((Fs/100)+tou));no=(vl-0.4  
) *randn(((16000+t)*tm),1);xa1=[q1 no q2];xa2=[q no  
q];y=[xa1,xa2];sound(y,Fs,br);');
```

%plot

```
pl=uicontrol('string','plot this sound','position',[400 115 100 15],'callback',...  
    'figure(2);plot(y);');
```

6.2. 実験測定用プログラム

今回の測で実際に使用したプログラム。

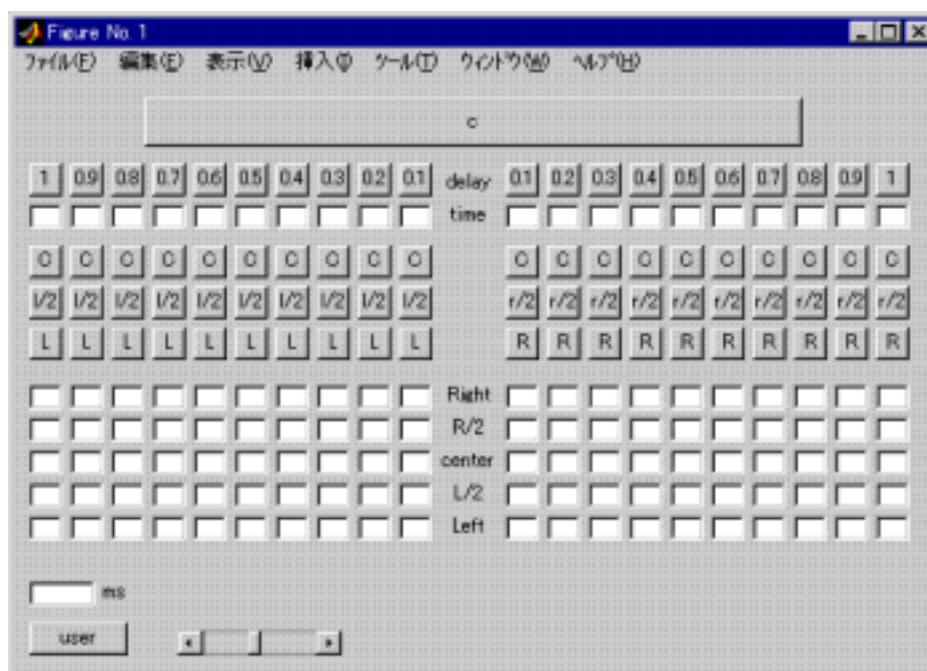


図 30 : 実行画面 (2)

機能の説明

- ・ ‘ C ’ ボタン : 中央(センター音)を鳴らすボタン
- ・ 1~0.1 ボタン : 音の発生の遅延時間。左側が右チャンネルの遅延 (左チャンネル先行)、右側が左チャンネルの遅延 (右チャンネル先行)
- ・ ‘ time ’ 欄 : 真上の遅延時間に対応。その音が何度鳴らされたかをカウント
- ・ ‘ C,l or r/2,L ’ ボタン : 被験者の判定を記録するボタン。L は真左、L/2 は左真中、C は中央・・・というように遅延時間に対応した縦ラインの場所のボタンを押して記録。押せば、下の欄にその判定の数がカウントされていく。もし、逆方向の結果が返ってきた場合には手書きで下のエディットボックスに数値を書き込む。
- ・ ‘ user ’ ボタン : 任意の発音タイミングで音を鳴らせる。真上の ms 欄に入力した数値[ms]分、左チャンネルの発音が遅れる。値をマイナスにすると右側がその分遅れて発生する。
- ・ スクロールバー : 音量調整

以下にソースを示す。

似たような構成のオブジェクトが多数存在しているので、ソースは一部を抜粋。

%使用 wav ファイルの指定(モノラルに限る)

%wav ファイルでなくとも、ここで wavread の代わりに正弦波やノイズ等を入力するプログラム作成して、

%その出力関数を y1 と定義すれば、その音を使用しての同様の作業ができます。

```
y1=wavread('voice00m.wav');
```

%サンプリング周波数。特に wav ファイルを使用する場合は、その wav ファイルのサンプリング周波数と同一の値に設定する事が必要(再生時に音のピッチが変化してしまうため)

```
fr=11025;
```

%各種変数の初期値

%tl,tr は再生回数カウンタ数、jl,jr は判定回数カウンタ数

```
tl01=0; tl02=0; tl03=0; tl04=0; tl05=0; tl06=0; tl07=0; tl08=0; tl09=0; tl10=0;
```

```
tr01=0; tr02=0; tr03=0; tr04=0; tr05=0; tr06=0; tr07=0; tr08=0; tr09=0; tr10=0;
```

```
jl51=0; jr51=0; ... (中略)... jl80=0; jr80=0;
```

%% == callback の内容 ==

%% ms=X; (時間差・右側が遅れて出る場合にはマイナスになる)

%% dl=round(fr/(1/(0.001*abs(ms)))); (時間差をサンプル単位に変換)

%% d2=zeros(1,dl); (時間差サンプル分だけゼロを作る)

%% y12=[d2 y1']; (遅れて出るチャンネル)

%% yr2=[y1' d2]; (先に出るチャンネル)

%% if ms < 0,y=[yr2;y12]';

%% else y=[y12;yr2]';end; (2種類の y(右が先に・左が先に)を用意)

%% sound(y,fr,16); (再生)

%% tlX=tlX+1; (1カウンタ)

%% set(elX,'string',num2str(tlX)); (editbox に表示)

%center(センター音再生・左右とも同じ音を同じタイミングで)

```
ce=uicontrol('string','c','position',[80 380 400 30],'callback',...  
    'y=[yl yl];sound(y,fr,16);');
```

%left(再生用ボタン配置 + 変数定義, 再生命令)

```
l01=uicontrol('string','0.1','position',[235 350 20 20],'callback',...  
    'ms =-0.1; dl=round(fr/(1/(0.001*abs(ms)))); d2=zeros(1,dl); yl2=[d2 yl]';  
    yr2=[yl"          d2];          y=[yr2;yl2]";          sound(y,fr,16);  
    tl01=tl01+1;set(el01,"string",num2str(tl01));');  
%上は 0.1[ms] ずらした場合, 同様に 1[ms], 110 まで定義。
```

%right(同上の右側)

```
r01=uicontrol('string','0.1','position',[300 350 20 20],'callback',...  
    'ms = 0.1; dl=round(fr/(1/(0.001*abs(ms))));d2=zeros(1,dl);yl2=[d2 yl]';yr2=[yl"  
    d2]; y=[yl2;yr2]"; sound(y,fr,16); tr01=tr01+1;set(er01,"string",num2str(tr01));');  
%こちらは callback の内容が少し違う, これも同様に r10 まで定義していく。
```

%カウンタ(鳴らした音の回数を editbox に表示)

```
el01=uicontrol('style','edit','backgroundcolor',[1 1 1],'position',[235 330 20 15]);  
er01=uicontrol('style','edit','backgroundcolor',[1 1 1],'position',[300 330 20 15]);  
%el10 及び er10 まで定義する。
```

%判定の結果を記録(ボタン式)

```
bl01=uicontrol('string','C','position',[235 300 20 20],'callback',...  
    'jl51=jl51+1;set(el51,"string",num2str(jl51));');  
... 中略  
bl30=uicontrol('string','L','position',[10 250 20 20],'callback',...  
    'jl80=jl80+1;set(el80,"string",num2str(jl80));');  
%右側についても同様に br01 ~ br30 まで定義する。
```

%判定の結果を表示(editbox)

```
el51=uicontrol('style','edit','backgroundcolor',[1 1 1],'position',[235 180 20 15]);  
... 中略
```

```
el80=icontrol('style','edit','backgroundcolor',[1 1 1],'position',[10 140 20 15]);  
%これも同様に右側, er50 ~ er80 を定義する
```

```
%[ms]の値を自由に変えて再生する
```

```
ez01=icontrol('style','edit','backgroundcolor',[1 1 1],'position',[10 100 40 15]);  
tz01=icontrol('style','text','string','ms','Position',[52,100,20,15]);  
bz01=icontrol('string','user','position',[10 70 60 20],'callback',...
```

```
'ms=eval(get(ez01,"string"));dl=round(fr/(1/(0.001*abs(ms))));d2=zeros(1,dl);yl2=[d  
2 yl"];yr2=[yl" d2]; if ms < 0,y=[yr2;yl2]"; else y=[yl2;yr2]"; end; sound(y,fr,16);');
```

```
%音量
```

```
v1=icontrol('style','slider','position',[100 70 100 15],'Min',0.2,'Max',2,'Value',1,...  
'callback','vl=get(v1,"value"); yl = yl*vl;');
```

```
%例外的に意図する結果と逆の方向で判定があった場合の為に editbox(要手書き)
```

```
el21=icontrol('style','edit','backgroundcolor',[1 1 1],'position',[235 220 20 15]);  
...(中略)  
el40=icontrol('style','edit','backgroundcolor',[1 1 1],'position',[10 200 20 15]);
```

```
%これも右側, er21 ~ er40 まで定義する。
```

```
%実行画面が煩雑になるのを避けるため、このエディットボックスについては例外的に手書  
き処理を要する
```

7. おわりに

本研究では両耳の持つ「音の方向知覚の基本能力」に着目し、ヘッドフォン受聴およびスピーカー受聴という状況下においていくつかの測定を行った。

まずヘッドフォン受聴においては左右の音響信号における振幅差と時間差の変化の2方法による音像の定位置移動について、主観的な音像の位置との関係を測定した。その結果、振幅差による定位置移動は音像の変移が知覚しやすく、一方、時間差による定位置移動は知覚が曖昧であることが分かった。

そして音響信号別における測定結果については、振幅差の定位置移動よりも時間差によるものの方が違いが明確に表れた。これはスピーカー受聴における測定結果についても言えることだが、高周波では左右の音響信号の発音タイミングに時間差をつけてもあまり定位置が変移しないという興味深い結果が得られた。

次に、スピーカー受聴においては時間差による音像の定位置移動について上記と同様の測定を行った。その結果、今回使用した周波数の範囲内（音声レベル～3000[Hz]まで）では、どの場合もほぼ同様の結果が得られた。よって今後はこの範囲外、及び更に時間差を付けた場合（1.0[ms]以上）の研究が課題として挙げられる。

今回のような聴覚実験は、音響心理学的な色合いが強く、個人差が測定結果を大きく左右してくるゆえ、整然とした測定結果としてまとめ上げる事が非常に困難である事から、より多くの被験者を募ってデータ統計の密度をより高くしていく事が重要である。今回の研究では被験者を5、6名としているが、これは測定結果の傾向を知るという理由からである。従って、データの精度を高めるためには今後も測定を重ね、データ数を増やすことが重要である。そして今回の測定で使用した範囲外の周波数や音響信号、異なる判定方法などによる測定を行うことで、よりデータの精度は高まっていくだろう。

また、今回研究した方向知覚の性質は水平面の、しかも限定された状況下での測定ゆえ、今後は立体的な範囲（前後や上下）での実験を行うことによって、方向知覚のみでなく音源の位置（距離）知覚の基本能力を測定し、またそれを利用しての音響シミュレーター等への応用なども今後の研究課題として挙げられるだろう。

参考文献

- [1] 境 久雄・中山 剛 著：“聴覚と音響心理” / 日本音響学会編, pp.180-183, 1987.

謝辞

本研究を進めるにあたり指導・提案をして頂いた東京電機大学 情報通信工学科 金田 豊教授、ならびに音響信号処理研究室の研究生の皆様、および実験に参加して頂いた皆様に厚く御礼を申し上げます。