



# 音像の空間的性質の評価に関する研究

飯田, 一博

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1993-03-31

(Date of Publication)

2015-03-17

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲1220

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3092499>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1001220>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

音像の空間的性質の評価に関する研究

平成5年3月

神戸大学大学院自然科学研究科

飯田 一 博

博士論文

音像の空間的性質の評価に関する研究

平成5年3月

神戸大学大学院自然科学研究科

飯田 一 博

# 目次

## 第1章 序論

1.1 まえがき	1
1.2 従来の研究と問題点	4
1.3 本論文で取り上げる研究課題	14
1.4 音響心理実験における共通事項	15

## 第2章 音像の方向感における第一波面の法則の適用限界

2.1 第一波面の法則の適用限界に関する実験	17
2.2 結論	23

## 第3章 みかけの音源の幅(A S W)と両耳間相関度の関係

3.1 両耳間相関度の定義	25
3.2 第一波面の法則が成立する音場としない音場のA S Wの比較	26
3.2.1 第一波面の法則の成立範囲の確認	26
3.2.2 第一波面の法則が成立する音場としない音場のA S Wの比較実験	30
3.2.3 結論	34
3.3 第一波面の法則が成立しない音場のA S Wの評価方法	35
3.3.1 仮説	35
3.3.2 第一波面の法則が成立する反射音レベルの上限値	36
3.3.3 第一波面の法則が成立しない音場のA S Wと両耳間相関度の関係	40
3.3.4 結論	44
3.4 反射音の到来方向がA S Wに及ぼす影響	45
3.4.1 被験者調整法を用いた実験	45
3.4.2 恒常法を用いた実験	52
3.4.3 結論	55

3.5	直接音の到来方向がA S Wに及ぼす影響	56
3.6	A S Wに関する両耳間相関度の弁別限	61
3.7	両耳間相関度の測定方法	67
3.7.1	広帯域信号を用いた場合のA S W	70
3.7.2	広帯域信号を用いた場合のA S Wと両耳間相関度の関係	74
3.7.3	結論	80
3.8	第3章のまとめ	81
第4章	両耳聴信号処理モデルを用いた音場シミュレーション	
4.1	シミュレーションの原理	84
4.2	シミュレーションの可能性の検証	87
4.2.1	多次元尺度構成法を用いた非類似度実験	87
4.2.2	評価語を用いた一対比較実験	97
4.2.3	結論	100
4.3	インパルス応答の簡略化がシミュレーション精度に及ぼす影響	101
4.4	時間窓の継続長がシミュレーション精度に及ぼす影響	112
4.5	内耳の信号処理機能がシミュレーション精度に及ぼす影響	116
4.6	A S Wのシミュレーションのための空間分割方法	125
4.7	第4章のまとめ	133
第5章	総括	135
謝辞		140
参考文献		141
本研究に関する発表論文一覧		148

# 第1章 序論

## 1.1 まえがき

音環境設計により所望の聴空間を実現するためには、受聴者の両耳に到達する音響信号と、それらを入力として受聴者が知覚する音像との関係を明らかにする必要がある。両者の関係を整理するために、まず受聴者が音環境を評価する過程についてシステム論的に考察する。

本論文では、中山と三浦(1966)による音響機器のための音質評価モデルを発展させた、Fig.1-1に示す評価システムを設定して音環境の評価方法を考究する。Fig.1-1において、音源から放射された音響信号 $S(\omega)$ は室の伝達関数 $R(\omega)$ の影響を受けて受聴者の位置に到達する。到達した音響信号は $S(\omega) \times R(\omega)$ で表される。ここで、 $\times$ は複素乗算を示す。さらに、この音響信号は頭部伝達関数  $HRTF_{l,r}(\omega)$  の影響を受けて左右の外耳道入口に到達する。この信号は $S(\omega) \times R(\omega) \times HRTF_{l,r}(\omega)$ で表され、受聴者の聴覚機構への入力信号となる。両耳入力信号は外耳道を伝達して鼓膜に到達し、中耳で増幅された後、蝸牛内のリンパ液に振動が伝達される。この振動によって基底膜が運動し、基底膜上にならんだ受容器細胞が刺激を受けて神経パルスが発生する。神経パルスを入力とする末梢あるいは中枢の知覚メカニズムを経て、受聴者は種々の要素感覚を知覚する。それぞれの要素感覚に対して受聴者は個人の嗜好に基づいて主観評価を行う。さらに、各要素感覚の主観評価に重み付けを行った後、それらを統合した総合主観評価を行う。

このように、主観評価には受聴者の嗜好の違いが含まれているため、同じ音環境であっても受聴者が異なれば評価は異なる。つまり、受聴者を特定しない限り、音場の物理的特性との対応関係は得られない。これに対し、要素感覚の知覚においては、知覚メカニズムを踏まえた適切な評価方法を用意すれば、受聴者に共通の一般的な対応関係が得られる。したがって、音環境を設計あるいは制御するためには、まず要素感覚の評価方法を明らかにすることが重要である。

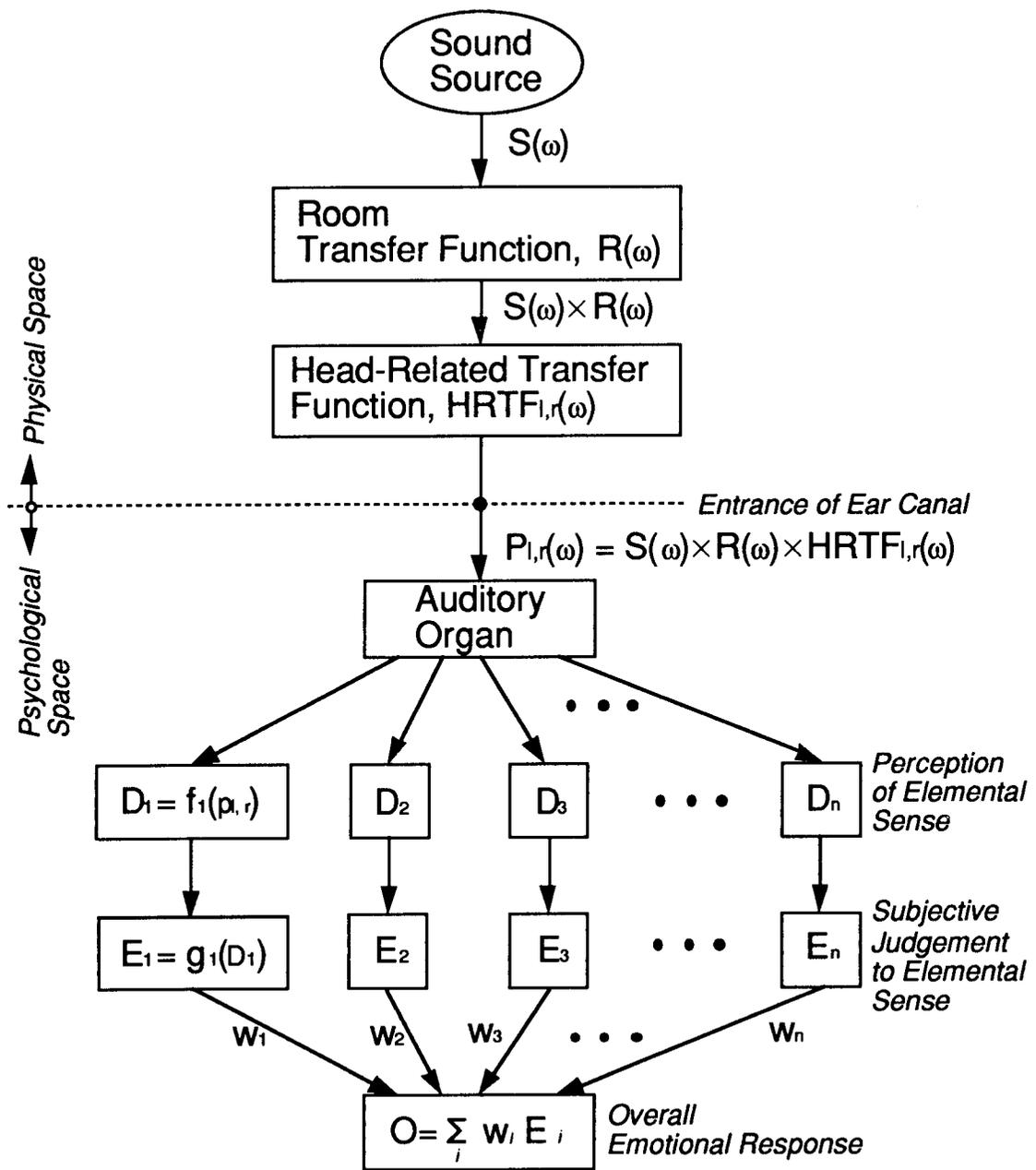


Fig.1-1 Evaluation system of acoustical environment.

ところで、要素感覚は次に示す3つの性質に分類されることが知られている(森本1982).

1. 時間的性質(持続感, 逐次感, リズム感など)
2. 空間的性質(方向感, 拡がり感, 距離感など)
3. 質的性質(大きさ, 高さ, 音色など)

これらのうち、時間的性質と質的性質については、従来よりそれぞれの要素感覚に関する評価方法が確立されつつある。しかし、空間的性質については、知覚メカニズムが必ずしも明確ではなく、評価方法が明らかにされていない要素感覚が数多く残されている。

本論文では、音像の空間的性質の評価方法に関する研究課題のうち、閉空間の音環境設計において特に重要であると考えられる以下の3つの問題を取り上げ、それらを解明することにより、音環境評価の新たな進展を図るものである。

- (1) 音像の方向感における第一波面の法則の適用限界
- (2) 音像の拡がり感におけるみかけの音源の幅と両耳間相関度の関係
- (3) 両耳聴信号処理モデルを用いた音場シミュレーション

## 1.2 従来の研究と問題点

1.1節で示した3つの問題に関する従来の研究を概説し、その問題点を整理する。

### (1) 音像の方向感における第一波面の法則の適用限界に関する研究

先行音と後続音が異なる方向からある時間間隔で入射した場合、受聴者は先行音の入射方向に音像を知覚する。この現象に関する実験結果は1950年前後にCremer(1948), Wallach *et al.*(1949), Haas(1951)により相次いで報告され、第一波面の法則、あるいは先行音効果と呼ばれている。この法則が成立する範囲内であれば、音像の方向を先行音方向に保ちながら拡声することが可能であり、その代表的な例としてデルタステレオフォニーシステム(Steinke 1983)が知られている。

第一波面の法則の成立範囲の上限を決定する現象は音像の分離である。従来、音像の分離に関する直接の研究はなく、エコー検知限がこの法則の成立する上限であると考えられていた(Blauert 1983)。エコー検知限については、これまでにMeyer and Schodder (1952)や Lochner and Burger(1958)および森本ら(1983)が実験により求めている。しかし、オーディトリウムなどで実際にスピーチを聴いている場合の目的音は直接音であるのに対して、エコー検知限の実験においては目的音は反射音であり、被験者の意識は反射音に集中している。両耳マスキングの振舞いを考えると、実験では実際の聴取状態と比較すると過度に厳しく判定していると考えられる(森本ら1983)。したがって、エコー検知限をもって第一波面の法則の適用限界とすることはできない。

また、音像の分離と類似した現象の一つとしてエコーディスタージョブがある。エコーディスタージョブに関しては、Bolt and Doak(1950)が先行音に対する後続音の遅れ時間および相対音圧レベルとパーセントディスタージョブの関係を表す等パーセントディスタージョブ曲線を提案している。それによると、直接音に対する後続音の遅れ時間がおおよそ50ms以内であれば、直接音と同等の音圧レベルの後続音が到来してもほとんど直接音の聴取の妨害とはならない。また、Haas(1951)は遅れ時間が50ms以内であれば後続音の音圧レベルが先行音に対して相当大きい場合でもうるさい(annoying)と

は知覚されないとしており、これはハース効果として知られている。従来の音響設計において第一反射音の遅れ時間の設計目標が50ms以内とされたのは、以上の結果を根拠としているものと考えられる。しかし、パーセントディスタージョンやハース効果は、後続音が先行音の聴取の妨害になる程度を示しているに過ぎず、音像が先行音方向にだけ知覚されることを保証するものではない。音像が分離していても先行音の聴取の妨害にはならないことも考えられる。

したがって、音像方向を評価あるいは制御するためには、第一波面の法則の本質的な意味での成立限界、つまり音像が先行音の方向と後続音の方向に分離する限界を明らかにする必要がある。

## (2) 音像の拡がり感の評価に関する研究

従来、拡がり感に影響を及ぼす音場の物理的要因として、次の3つが明らかにされている。

1. 音圧レベル
2. 周波数成分
3. 両耳間相関度

### A. 音圧レベルと拡がり感の関係

音圧レベルと拡がり感に関する従来の主な研究を以下に記す。

Keet(1968)は、ヨーロッパの3つのホールにおいて無響室録音の音楽をステージ上に設置した1つのスピーカーから再生し、ステレオ録音した。これを無響室でステレオ再生し、被験者に apparent source width すなわち音像の水平方向への拡がり感を角度で評価させた。その結果、apparent source width は音圧レベルが大きくなるに従って  $1.6^\circ / \text{dB}$  で直線的に増加することを示した。

Kuhl(1978)はダミーヘッドを用いてオーケストラの演奏を録音し、それを無響室でスピーカー再生して Räumlichkeit についての実験を行った。その結果、音圧レベルが大きいほど Räumlichkeit は大きくなると報告した。

一方、古居と北村(1983)は、無響室録音のオーケストラ曲(Mozart Symphony No.41)を音源として音圧レベルが拡がり感に及ぼす影響の実験を行った。音圧レベルが拡がり感に及ぼす影響は被験者によって異なり、拡がり感に全く影響がない被験者、中程度の拡がり感が得られる音場に限り影響がある被験者、および全ての音場で影響がある被験者の3つのグループに大別されると述べている。

翁長ら(1988)は、音源に1オクターブバンドノイズを用いて、直接音と単一反射音で構成される音場で実験を行った。被験者に「音が存在する領域」を回答用紙の円周上に図示させ、この回答を「拡がり角」に変換した。その結果、拡がり角は音圧レベルの上昇にともなって拡大することを示した。

以上のように、被験者によっては音圧レベルの影響を受けない者もいるが、一般には音圧レベルが大きいほど拡がり感は増すといえる。

## B. 周波数成分と拡がり感の関係

周波数成分と拡がり感に関する従来の主な研究を以下に記す。

Barron and Marshall(1981)は、音源に音楽信号を用いて周波数成分が *spatial impression* に及ぼす影響について実験を行った。無響室において直接音に初期反射音と残響音を付加した音場を作成し、初期反射音の周波数成分を変化させた。その結果、高い周波数成分が欠けるより、低い周波数成分が欠ける方が *spatial impression* の減少の程度が大きいことを示した。

また、Morimoto and Maekawa(1988)は、音源に帯域ノイズを用いて、その周波数範囲と両耳間相関度を変化させて *spaciousness* に関する一対比較実験を行った。その結果、周波数帯域が同じであれば両耳間相関度が小さいほど *spaciousness* は大きくなるが、周波数帯域が異なれば、両耳間相関度は同じでも *spaciousness* は異なり、低域成分を多く含む方が *spaciousness* は大きいことを示した。実験を行ったのは100から5300Hzの範囲であるが、低周波成分の中でも特に100から200Hzの成分が重要であると述べている。

翁長ら(1988)は、直接音と単一反射音で構成される音場で、基準音場と比較音場を比較することにより、等しい拡がり感が得られる音圧レベルを求めた。ここで、基準音場は1kHzのオクターブバンドノイズを再生した音場であり、比較音場は中心周波数が250, 500, 1k, 2k, 4kHzの各オクターブバンドノイズを再生した音場である。その結果、

1kHzの基準音場と等しい拡がり感を得るためには、周波数帯域が高くなるほど大きな音圧レベルが必要であり、また音圧レベルが同じであれば拡がり感は低い周波数でより大きいと報告している。

以上のように、音響信号の周波数成分は拡がり感に影響を及ぼし、低域成分が多いほど拡がり感は増すことが明らかにされている。

### C. 両耳間相関度と拡がり感の関係

両耳間相関度と拡がり感の関係に関する従来の主な研究を以下に記す。

Keet(1968)は、前述の音圧レベルに関する実験の他に、両耳間相関に関する分析を行った。ホールのインパルス応答をステレオマイクで録音し、2チャンネル信号の積分区間が50msの short-time cross-correlation coefficient,  $K$  を求めた結果、apparent source width は  $(1 - K)$  が大きくなるに従って単調に増加することを示した。

Chemyak and Dubrovsky(1968)は、ヘッドホンで両耳に広帯域ノイズを提示し、2つの耳入力信号が完全にコヒーレントな場合は正中面に拡がりの小さい音像が生じ、コヒーレント度が減少するに従って音像は拡がり、完全にインコヒーレントになると2つの分離した音像が左右の耳の位置に生じることを報告している。

また、穴沢ら(1970)は1/3オクターブバンドノイズの相互相関係数を種々変化させた2チャンネル信号をヘッドホンで被験者に提示して実験を行った。その結果、拡がり感と2チャンネル信号の相互相関係数が負の相関関係にあることを示した。

黒住と大串(1983)は、スピーカー再生を用いて実験を行った。2つのスピーカーからホワイトノイズを提示して求めた音像の拡がり感は、2チャンネル信号の相関係数の絶対値に対応し、それが小さいほど拡がり感は大きくなると報告している。

以上の研究では、インパルスやノイズを音源としていたが、Barron and Marshall(1981)は実際にコンサートホールなどで使われる音楽を音源とした実験を行い、側方エネルギー率(Early lateral fraction)とspatial impressionが比例関係にあることを示した。側方エネルギー率はKeet(1968)の  $(1 - K)$  と比例関係にあるので(Barron 1971)、音楽を用いた場合でも  $(1 - K)$  とspatial impressionは比例関係にあるといえる。

Barron and Marshall(1981)は初期80ms以内の離散的反射音を用いて、側方反射音が拡がり感に寄与すると述べているが、Morimoto and Pössl(1989)は直接音に遅れ時間が80ms

までの2本の初期反射音を加えた音場と、直接音に80ms以降の残響音を加えた音場を用いて実験を行った。その結果、2つの音場の *spaciousness* が同じになるときの初期反射音と残響音のエネルギーはほぼ等しくなることを示した。この場合、2つの音場の両耳間相関度は等しいことから、残響音も初期反射音と同等に拡がり感の知覚に寄与し、いずれも両耳間相関度で評価できる。

ところで、両耳間相関度で拡がり感を評価するためには、両耳間相関度の弁別限を明らかにする必要がある。

Pollack and Trittipoe(1959)は、広帯域ノイズを用いて両耳間相関度の弁別限を求める実験を行い、弁別限は基準の両耳間相関度が0.0の場合は約0.4で、1.0の場合は約0.04であると報告している。

また、Gabriel and Colburn(1981)は中心周波数が500Hzの帯域ノイズを用いて、帯域幅が両耳間相関度の弁別限に及ぼす影響について実験を行った。その結果、基準の両耳間相関度が0.0の場合は、帯域幅を3から115Hzに広げると弁別限は0.7から0.35に減少し、それ以上帯域幅を広くしても弁別限は一定であることを示した。また、基準の両耳間相関度が1.0の場合は、帯域幅が115Hz以下では弁別限は約0.004で一定であり、帯域幅をそれ以上広げると弁別限は約0.04まで単調に増加すると述べている。

以上のように、両耳間相関度は拡がり感と負の相関関係にあり、その評価指標となる可能性が示されている。しかし、上に述べた従来の研究では、刺激がヘッドホンや左右対称に配置されたスピーカーで提示されており、得られた結果の任意の音場への適用性については明らかにされていない。つまり、第一波面の法則が成立する音場でもしない音場でも同様に両耳間相関度で拡がり感を評価できるか否かという問題や入射音構造が空間的に異なる任意の音場において、両耳間相関度で拡がり感を評価できるか否かという問題は従来の研究では明らかにされていない。また、拡がり感に関する両耳間相関度の弁別限についても、従来求められている弁別限は音源がノイズの場合であり、コンサートホールなどで演奏される音楽を用いた場合については明らかではない。さらに、拡がり感の評価指標としての両耳間相関度の測定方法の確立も未解決の課題である。

#### D. 音像の空間的な拡がりに関する表現語と「みかけの音源の幅」の定義

従来、音の空間的な拡がりを表す語は研究者により様々であり(ブラウエルトら1986), 海外では「apparent source width」, 「Räumlichkeit」, 「spaciousness」, 「spatial impression」, 「spatial responsiveness」, 「subjective diffuseness」などが用いられ, 日本では一般に「拡がり感」が使われている。

しかし, これらの語句が必ずしも同一の聴覚事象を表しているか否かは明らかではない。杉山ら(1982)は, 拡がり感について「音場の拡がり感」と「音像の拡がり感」を分けて考える必要があると述べている。しかし, 「音場の拡がり感」は知覚した音像から類推した音場の大きさであり, 本論文で研究の対象とする音像の空間的な拡がりとは別のものである。

また, 古居と北村(1987)は, 空間性に関する表現語についての因子分析を行い, 「拡がり感」は「音場の広さ」とよく一致し, 「音像全体の左右の大きさ」「音場の奥行き」「囲繞感」などと関係が深いことを示している。

森本と前川(1987)は, これらの研究を踏まえ, 「拡がり感」という語で表現できる事象として3種類が考えられるとしている。それらをまとめると以下ようになる。

1. みかけの音源の幅
2. 音に包まれた感じ
3. 音場を形成している室の大きさ

これらのうち, 音像に関係があるのは1と2である。Fig.1-2にそれらの概念を示す。

さらに, 森本ら(1990a)は, 「みかけの音源の幅」と「音に包まれた感じ」の2つの性質の違いを理解していれば両者を区別して知覚できることを実験により示し, 音像の空間的な拡がりとは「みかけの音源の幅」と「音に包まれた感じ」の2つの性質で捉えるのが妥当であると提案している。

本論文では, このうち「みかけの音源の幅(ASW: Auditory Source Width)」を取り上げ, 両耳間相関度との対応関係を解明する。ここで, みかけの音源の幅とは, 「先行音の到来する方向に先行音と時間的にも空間的にも融合して知覚される音像の幅」と定義する。なお, 従来の拡がり感に関する研究のほとんどは, 研究者の定義あるいは実験条件より, ASWを対象にしたものであるとみなせる。

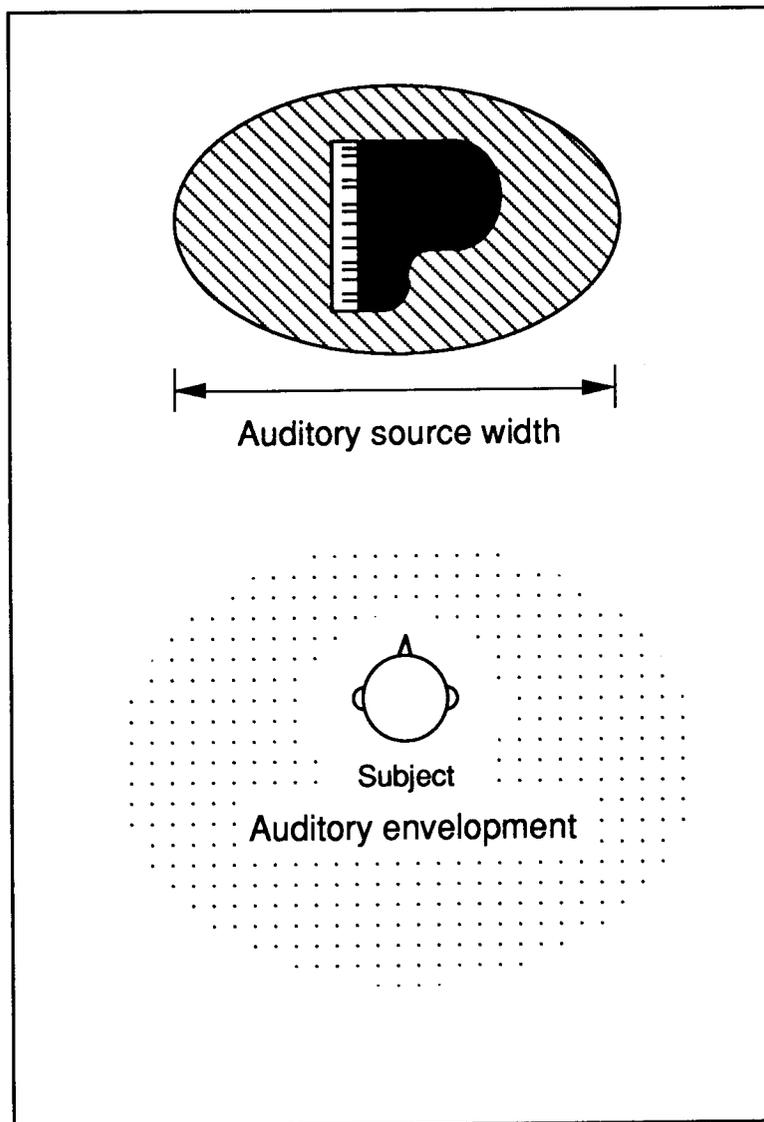


Fig.1-2 Two kinds of broadening of sound image.

### (3) 音場シミュレーションに関する研究

音場シミュレーションとは、ある音場を時間と空間を越えて忠実に再現する手法である。音場シミュレーション方法の確立は、音環境の研究や設計において重要な課題の一つである。従来提案されている音場シミュレーションは、原理的には次の2つの方法に分けられる。

1. 合成音場によるシミュレーション
2. 耳入力信号のシミュレーション

#### A. 合成音場によるシミュレーション

これは、再生室に原音場(現実存在する、しないを問わず、シミュレーションの対象とする音場を本論文では原音場と呼ぶ)と同じ音場を作る方法(Camras1968)である。原音場を無響室などの空間に再現するためには、原音場の受聴点における入射音構造、つまりFig.1-1の音環境評価システムにおける $S(\omega) \times R(\omega)$ と入射方向をシミュレートしなければならない。換言すると、全ての入射音について音圧振幅、到達時間、周波数特性、および入射方向を正確に再生する必要がある。初期の離散的反射音に関しては比較的容易にこれらを求めることが可能であるが、後期残響部の入射音に関してはそれらを正確に求めることは困難である。

Meyer *et al.*(1965)は、無響室内に被験者の上部半球面を取り囲む65個のスピーカーを設置したシミュレーション装置を報告している。同様に、Kleiner *et al.*(1990)は50個のスピーカーを用いている。しかし、シミュレーション精度についての検討やシミュレーションに必要なスピーカーの個数やその配置方法についての検討は行われていない。

井上ら(1988)は、原音場の初期80msまでのインパルス応答を広帯域アレイマイクロホンを用いて水平面で12方向に分割して測定し、それを無響室にシミュレートする実験を行った。インパルス応答のエンベロープ波形を比較した結果、残差は500から2kHzの平均で約9%であることを示した。

宮島ら(1990)は、原音場とシミュレーション音場でRR(Room Response), C(Clarity), ts(時間重心), MTI(Modulation Transfer Index)の4種類の物理音響指標を比較し、RR以外の

指標については比較的良好にシミュレートできると報告している。

以上のように、合成音場によるシミュレーションの従来の研究では、原音場の後期残響音についての音圧振幅、到達時間、周波数特性、および入射方向を正確に求めることができないことが最大の問題である。また、シミュレーション精度についても音場の時間的特性に関する物理指標上での検討にとどまっており、音像の空間的性質のシミュレーション精度については明らかにされていない。さらに、任意の音場をシミュレートするために必要なスピーカーの個数とその配置方法も未解決の課題である。

## B. 耳入力信号のシミュレーション

これは、受聴者の両耳への入力信号が原音場における耳入力信号と一致するように再生する方法である(Schroeder and Atal 1963 および Morimoto and Ando 1980)。換言すると、Fig. 1-1の音環境評価システムにおける $Pl, r(\omega)$ をシミュレートする方法である。この方法の具体例として、Damaske and Mellert(1969/70, 1971) およびDamaske(1971)による TRADIS (True Reproduction of All Directional Information by Stereophony)や Hamada *et al.*(1985) の OSS(Orthostereophonic system)が提案されている。これらはいずれも、原音場において疑似頭の両耳の鼓膜位置で信号を収録し、2個のスピーカーで再生する方法である。疑似頭で収録した音をスピーカーで再生する際に、左右の音を選択的に受聴者の両耳へ伝達するために、両耳のクロストークを補償する信号を加えている。

TRADISやOSSが両耳のクロストークを電氣的に消去するのに対して、受聴者の前にスピーカーを左右に分けるように衝立を設置することによりクロストークを低減させる方法も試みられている(木村ら1986)。

また、Pösselt *et al.*(1986)や Hidaka *et al.*(1989)は、疑似頭の縮尺模型を作成して、オーディトリウムなどの音響設計における縮尺模型実験に耳入力信号のシミュレーションを導入した。これらの研究では、得られた耳入力信号をヘッドホンにより再生していたが、佐藤ら(1992)は両耳のクロストークの除去を考慮した2個のスピーカー再生を用いてシミュレーション精度を検討している。

以上のように、耳入力信号の再生に着目したシミュレータは種々提案されている。しかし、シミュレーション精度については必ずしも十分であるとはいえない。その最大の原因は、疑似頭と受聴者の頭部伝達関数の違いである。原理的には、いかなる疑

似頭を用意しても各受聴者が固有の頭部伝達関数をもっているため、収録側と再生側の誤差は避けられない。その結果、音像の頭内定位や前後の誤判定が生じることがある(森本1982)。

### 1.3 本論文で取り上げる研究課題

1.2節で整理した従来の研究の問題点を踏まえ、本論文では以下の研究課題を取り上げて、その解明を図る。

第2章では、音像の方向感における第一波面の法則の適用限界について検討する。先行音と後続音が分離して知覚される場合の、先行音に対する後続音の相対音圧レベルと遅れ時間の関係を明らかにし、従来求められているエコー検知限やパーセントデイスターバンスと比較検討する。

第3章では、両耳間相関度をみかけの音源の幅(ASW)の評価指標として任意の音場に適用するうえで解明すべき、以下の4つの課題について検討する。

1. 第一波面の法則の成否にかかわらず、両耳間相関度でASWを評価できるか否か。
2. 入射音構造が空間的に異なる任意の音場において、両耳間相関度でASWを評価できるか否か。
3. 音源が音楽信号の場合のASWに関する両耳間相関度の弁別限。
4. ASWの評価指標としての両耳間相関度の測定方法。

第4章では、音場シミュレーションについて検討する。まず、時系列両耳間相互相関関数を中心とした両耳聴信号処理モデルを用いたシミュレーション方法を提案する。これは、受聴者が音場において要素感覚を知覚する手掛かり(Cue)をシミュレートする方法、すなわちFig.1-1の音環境評価システムにおける  $D_i$  の知覚の Cue をシミュレートする方法である。この方法に関して、以下の5つの課題について検討する。

1. 両耳聴信号処理モデルを用いた音場シミュレーションの可能性
2. インパルス応答の簡略化がシミュレーション精度に及ぼす影響
3. 時間窓の継続長がシミュレーション精度に及ぼす影響
4. 内耳の信号処理機能がシミュレーション精度に及ぼす影響
5. ASWのシミュレーションのための空間分割方法

## 1.4 音響心理実験における共通事項

本論文における音響心理実験の共通事項を以下に記す。

### (1) 実験室

神戸大学工学部環境心理実験室内無響室および建築音響実験室内無響室

### (2) 被験者の状態

椅子に座り、頭を固定されている。照明は、回答に必要な最小限の明るさを確保する手元灯を用いた。

### (3) 座標系

被験者の頭を中心とする球座標を用いる。

原点 : 左右の耳珠を結ぶ線分の中点。

耳軸 : 左右の耳珠を通る軸。

水平面 : 右眼窩点と左右の耳珠を含む平面。

正中面 : 原点を通り耳軸と直交する平面。

横断面 : 耳軸を含み水平面と直交する平面。

方位角 : 音源と原点を結ぶ線分を水平面上に投影した線分と水平面と正中面の交線がなす角で、時計廻りを正方向とする。

## 第2章 音像の方向感における第一波面の法則の適用限界

第一波面の法則の成立範囲の上限を決定する現象は音像の分離である。従来、音像の分離に関する直接の研究はなく、エコー検知限がこの法則の成立する上限であると考えられていた。しかし、オーディトリウムなどで実際にスピーチや音楽を聴いている場合の目的音は直接音であるのに対して、エコー検知限の実験においては目的音は反射音であり、被験者の意識は反射音に集中している。両耳マスクの振舞いを考えると、実験では実際の聴取状態と比較すると過度に厳しく判定していると考えられる。したがって、エコー検知限をもって第一波面の法則の適用限界とすることはできない。

本章では、後続音の先行音に対する遅れ時間および相対音圧レベルと音像の分離の割合(パーセントスプリット)の関係を定量的に検討し、第一波面の法則の適用限界を明らかにする。

## 2.1 第一波面の法則の適用限界に関する実験

直接音と単一反射音で構成される音場において、単一反射音の先行音に対する遅れ時間と相対音圧レベルがいかなる場合に音像が分離するか、すなわち第一波面の法則が適用できなくなるかを音響心理実験により明らかにする。

### (1) 実験方法

#### A. 音源信号

音源信号は、日本音響コンサルタント協会制作のテスト用CD(PRCD-1012)の男声アナウンスの最初から約7秒間、「荒川の上流、豊かな水に自然の表情を映す埼玉県寄居町の朝の模様を」である。スピーチ速度は約6シラブル/秒である。

#### B. 刺激として用いた音場

正面方向から到来する直接音と方位角 $-60^\circ$ から到来する単一反射音で構成される音場を用いた。刺激の時間的構造と空間的構造をFig.2-1に示す。直接音に対する反射音の遅れ時間と相対音圧レベルを変化させて、Table 2-1に示す50種類の刺激を作成した。反射音の遅れ時間は、10, 20, 30, 40, 50msの5水準である。相対音圧レベルは、音像が全く分離しない刺激から完全に分離する刺激まで含むように予め試聴を行い、遅れ時間ごとに2dBステップで10水準設定した。反射音方向を $-60^\circ$ としたのは、この方位角から到来するとエコーとして知覚されやすいためである(森本ら1983)。提示した刺激の音圧レベルは、被験者の頭の中心に相当する位置で直接音を65dBA(時定数:slow, RMSの最大値)に設定した。

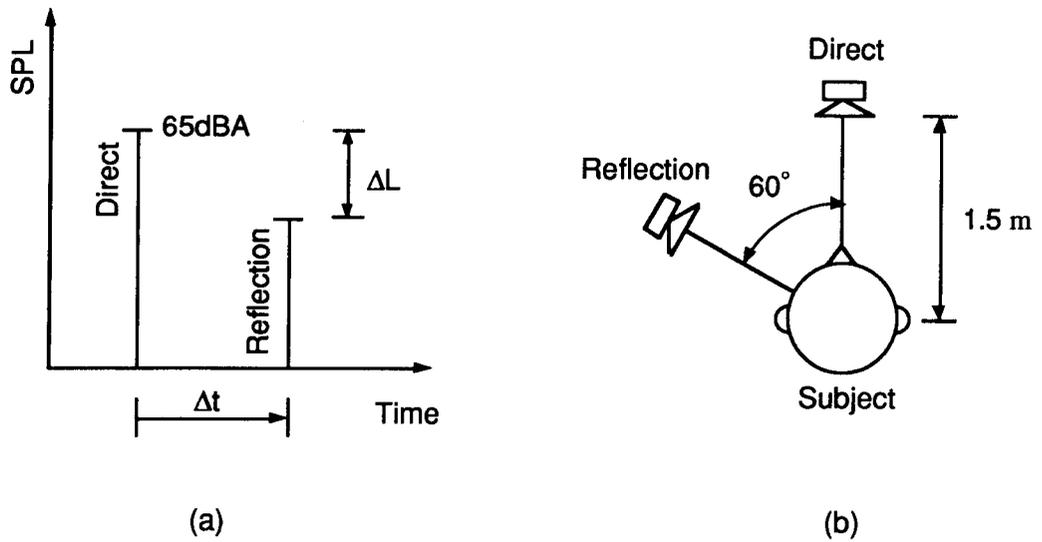


Fig.2-1 Temporal (a) and spatial (b) structure of stimuli used in experiment.  
 $\Delta t$ , time delay of a reflection from a direct sound ;  $\Delta L$ , relative SPL of a reflection to a direct sound.

Table 2-1 Combination of time delay and relative SPL of a reflection of stimuli.

Time delay from a direct sound (ms)	Relative SPL to a direct sound (dB) (in 10 steps of 2dB)
10	+6 ~ -12
20	+6 ~ -12
30	+2 ~ -16
40	-4 ~ -22
50	-8 ~ -26

### C. 刺激の提示方法と回答方法

50種類の刺激をランダムな順に提示した。刺激と刺激の間隔は5秒である。回答方法は、被験者が反射音方向に過度の意識を向けるのを避けるため、被験者がそれぞれの刺激について知覚した音像方向を予め円が描かれている回答用紙に記入する方法、すなわちマッピング法(ブラウエルトら1986)を用いた。Fig.2-2は実験に用いた回答用紙

である。音像が分離して複数生じた場合には、同じ回答用紙にそれらの方向と範囲を全て記入させた。

なお、実験の前に被験者に Table 2-2 に示すような、音像が全く分離しない、あるいは完全に分離するとみなせる刺激を含めた6種類の練習用の刺激を提示し、それが正しく判断できることを確認した。

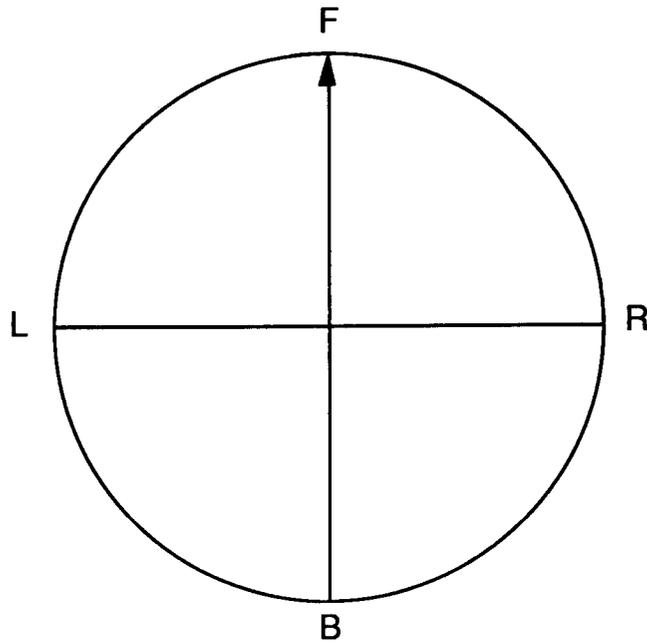


Fig.2-2 Response sheet.

Table 2-2 Combination of time delay and relative SPL of a reflection of stimuli used in a preparatory experiment.

Stimulus	Time delay from a direct sound (ms)	Relative SPL to a direct sound (dB)
1	only a direct sound	
2	only a direct sound	
3	10	+6
4	10	0
5	20	-10
6	50	-8

#### D. 被験者

被験者は、19-25才の男女学生75名である。

#### (2) 実験結果と考察

回答用紙に音像の方向が複数記入されている場合は、音像が分離しているとみなした。ただし、次の場合は音像は分離していないとした。

- 1) 記入した方向が近い( $\pm 10^\circ$  以内)場合
- 2) 正中面内に複数個記入している場合

各被験者について、遅れ時間ごとに音像の方向が1つから2つに変化する境界の相対音圧レベルをコーネル法(Guttman 1947)により求め、Guttman の再現性係数が 0.9以上となる被験者65名の回答を採用した。この回答から各遅れ時間における相対音圧レベルに対する音像の分離の割合を求めた。Fig.2-3に示すように、音像の分離の割合は正規分布をするとみなせる。

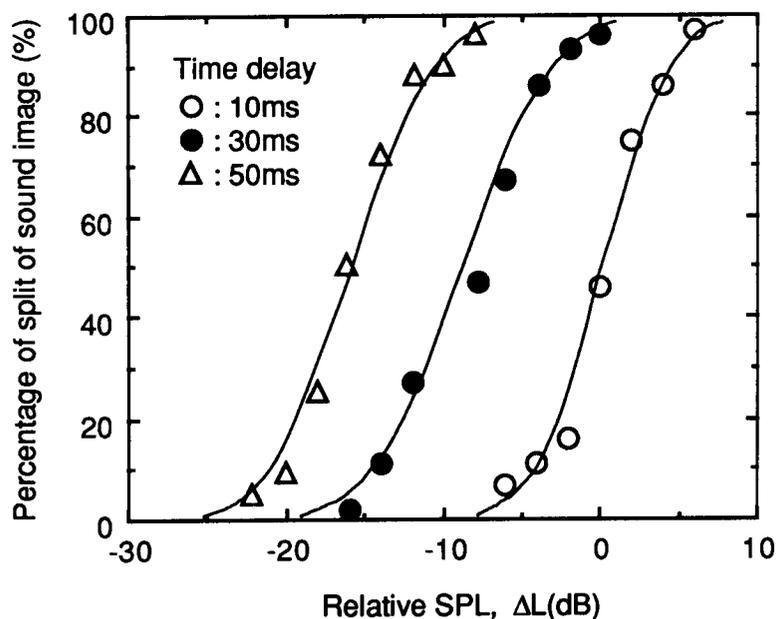


Fig.2-3 Examples of percentage of split of sound image obtained in the experiment as a function of reflection level.

そこで、音像の分離の割合(以降パーセントスプリットと呼ぶ)をパラメータとして、遅れ時間と相対音圧レベルの関係を直線回帰により求めた。その結果をFig.2-4に示す。回帰直線の傾きは約  $-0.4\text{dB/ms}$  で、相対音圧レベルが一定であれば遅れ時間が大きくなるほど音像は分離しやすい。

ここで、従来求められているエコー検知限と比較してみる。10%スプリットとなる場合の後続音の相対音圧レベルをエコー検知限(森本ら1983)と比較すると、前者は後者より10dB以上大きく、両者の差は遅れ時間が増すに従って広がる。この差の原因は、先に述べたように、実験における目的音の違いであると考えられる。本実験では、オーディトリウムなどでスピーチを聴いている状態を想定して先行音を目的音としている。しかし、従来のエコー検知限の実験では目的音は後続音であり、実際の聴取条件と比較すると過度に厳しく判定しているといえる。したがって、後続音の相対音圧レベルが従来のエコー検知限を越えても、実際の聴取条件では音像が分離して知覚されるわけではなく、エコー検知限をもって第一波面の法則の適用限界とすることはできない。

次に、エコーディスタージャンプと比較する。90%スプリットをBolt and Doak(1950)による10%エコーディスタージャンプ(一点鎖線)と比較すると、前者は後者より3dB以上小さい。このことは、後続音の相対音圧レベルがエコーディスタージャンプとはならない程度であっても、音像は分離する場合があることを示している。したがって、パーセントディスタージャンプで第一波面の法則の適用限界を決定することはできない。

以上より、第一波面の法則の適用限界に関する音像の分離は、エコーの検知ともエコーディスタージャンプとも異なる現象であり、第一波面の法則の適用限界はここで求めたパーセントスプリットにより規定すべきである。

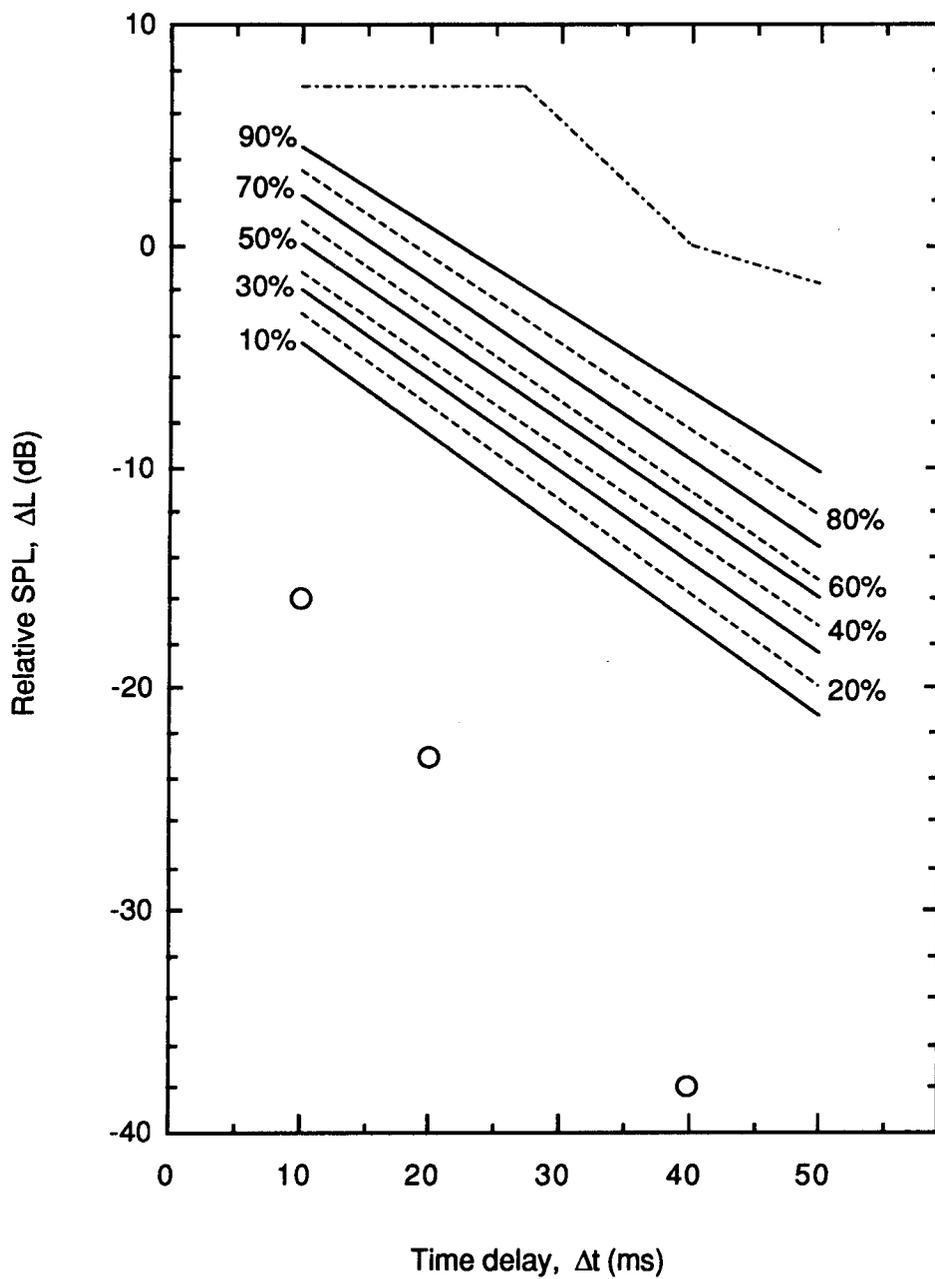


Fig.2-4 A chart of %-split of sound image for speech. ---, 10% echo-disturbance by Bolt and Doak(1950) ; ○, echo threshold by Morimoto *et al.*(1983).

## 2.2 結論

直接音と単一反射音で構成される音場を用いて、第一波面の法則の適用限界について音響心理実験を行い、以下のことを明らかにした。

1. 日本語のスピーチを音源とした場合の音像の分離の割合(パーセントスプリット)を、先行音に対する後続音の遅れ時間と相対音圧レベルで定量的に示した。先行音に対する後続音の相対音圧レベルが一定であれば、遅れ時間が大きくなるに従って音像は分離しやすくなる。音像の分離の割合を一定にするためには、後続音の遅れ時間1msの増加に対して、相対音圧レベルを約0.4dB減少させる必要がある。
2. 10%スプリットとなる場合の後続音の相対音圧レベルをエコー検知限と比較すると、前者は後者より10dB以上大きい。両者の差は遅れ時間が増加するに従って大きくなる。この差は、実験における目的音の違いに起因すると考えられる。オーディトリウムなどでスピーチを聴いている状態を想定すると後続音を目的音としたエコー検知限は過度に厳しく判断しているといえる。したがって、後続音の相対音圧レベルが従来のエコー検知限を越えても、実際の聴取条件では音像が分離して知覚されるわけではない。また、90%スプリットとなる場合の後続音の相対音圧レベルを従来報告されている10%ディスタージャンスと比較すると、前者は後者より3dB以上小さい。つまり、後続音の相対音圧レベルがエコーディスタージャンスとはならない程度であっても、音像は分離する場合がある。以上の結果より、第一波面の法則の適用限界に関する音像の分離は、エコーの検知ともエコーディスタージャンスとも異なる現象であり、第一波面の法則の適用限界はここで求めたパーセントスプリットにより規定すべきである。

### 第3章 みかけの音源の幅(ASW)と両耳間相関度の関係

両耳間相関度はみかけの音源の幅(ASW)と負の相関関係にあることが従来の研究で明らかにされている。しかし、前述したように、従来の研究では刺激がヘッドホンや左右対称に配置されたスピーカーで提示されており、得られた結果の任意の音場への適用性については明らかにされていない。

本章では、まず第一波面の法則の成否にかかわらず、両耳間相関度でASWを評価できるか否かを明らかにする。次に入射音構造が空間的に異なる様々な音場を用いて、両耳間相関度でASWを評価できるか否かを検討する。さらに、音楽信号を用いた場合のASWに関する両耳間相関度の弁別限を明らかにする。最後に、ASWの評価指標としての両耳間相関度の測定方法を提案する。

### 3.1 両耳間相関度の定義

一般に、両耳に入力する信号の正規化両耳間相互相関関数  $\phi_{lr}(\tau)$  は式3-1で定義される。

$$\phi_{lr}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p_l(t) p_r(t-\tau) dt}{\left[ \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} p_l^2(t) dt \int_{-T}^{+T} p_r^2(t) dt \right]^{1/2}} \quad (3-1)$$

ただし、

- $p_l(t)$  : 左耳に入力する信号の音圧振幅
- $p_r(t)$  : 右耳に入力する信号の音圧振幅
- $\tau$  : 両耳間時間差

Damaske(1969/70)は、疑似頭を用いて音源方向を種々変化させて正規化両耳間相互相関関数を測定し、それが入射方向により変化することを示した。さらに、正規化両耳間相互相関関数を測定すれば入射音の両耳間時間差を求めることができることを示した。この場合の両耳間時間差  $\tau$  の範囲は  $\pm 770\mu\text{s}$  であった。

Damaske and Ando(1972)は、両耳間時間差  $\tau$  が  $\pm 1\text{ms}$  の範囲における正規化両耳間相互相関関数の絶対値の最大値を *degree of interaural coherence* と定義している。さらに、Ando(1985)はこの指標を *IACC(interaural crosscorrelation)* と呼び、音場のプリファレンス評価に関する研究に適用している。

しかし、最大両耳間時間差は必ずしも  $1\text{ms}$  ではない。本論文で用いた2種類の疑似頭(KEMAR および Neumann KU81i)の最大両耳間時間差の実測値はどちらも  $680\mu\text{s}$  である。そこで、本論文では式3-2に示すように  $\tau$  が  $\pm 680\mu\text{s}$  の範囲における両耳間相互相関関数の絶対値の最大値を両耳間相関度(DICC: Degree of interaural crosscorrelation)と定義する。

$$\text{DICC} = \left| \phi_{lr}(\tau) \right|_{\max} \quad \text{for } |\tau| \leq 680\mu\text{s} \quad (3-2)$$

## 3.2 第一波面の法則が成立する音場としない音場のASWの比較

直接音と単一反射音で構成される音場において、直接音に対する単一反射音の相対音圧レベルが第一波面の法則が成立する上限を越え、音像が分離する場合でも、分離しない場合と同様にASWを両耳間相関度で評価できるか否かを明らかにする。

### 3.2.1 第一波面の法則の成立範囲の確認

本実験は、第一波面の法則が成立する(音像が分離しない)範囲と成立しない(音像が分離する)範囲を求め、同時に次項で述べる両範囲におけるASWの比較実験に適した被験者を求めるために行った。

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

音源信号は、音楽用シンセサイザ(Roland JX-3P)のフルート音を自動演奏させたJ.S.バッハの無伴奏フルートパルティータ(J.S.Bach; Partita a-mol für flute allein BWV 1013)の最初から約7秒間の部分である。この曲は全て16分音符から構成されており、被験者が音像の分離を判断しやすいように選んだ。

##### B. 刺激として用いた音場

直接音と単一反射音で構成される音場を用いた。Fig.3-1に音場の時間的構造と空間的構造を示す。直接音と反射音の音圧レベルは等しく、反射音の遅れ時間は $\Delta t$  msである。スピーカーは、被験者の耳軸を含む水平面内で被験者の頭の中心に相当する位置から1.5mの距離に設置した。直接音の方向は正面で、反射音の方位角は $-135^\circ$ である。現実には、最初の反射音が斜め後方から到来することは稀であるが、被験者が音像の分離を知覚しやすいように設定した。

反射音の遅れ時間は、10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80msの8種類である。試聴により、この範囲で音像の分離する場合としない場合が起こることを確認した。提示音圧レベルは、直接音と反射音のいずれも被験者の頭の中心に相当する位置で69dBA(時定数：slow, RMSの最大値)である。

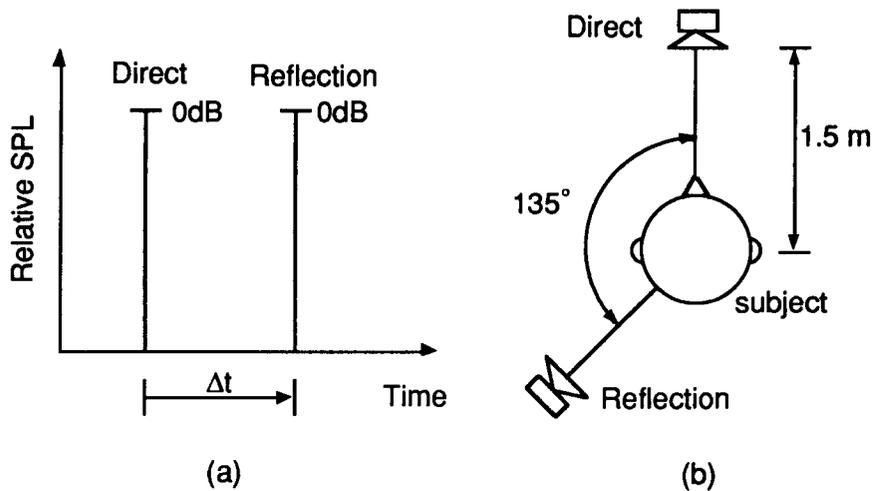


Fig.3-1 Temporal (a) and spatial (b) structure of stimuli .

### C. 刺激の提示方法と回答方法

同じ遅れ時間の刺激を1秒間隔で3回ずつ提示したものを1試行とした。被験者には、1試行の1回目は刺激を聴くだけ、2回目を聴いた後回答を記入、3回目で確認、このとき必要ならば訂正をするように指示した。試行と試行の間隔は7秒である。8種類の刺激を各3回ずつ計24試行をランダムに提示した。1回の実験時間は約13分である。十分な休憩をはさみながら1人の被験者につき2回実験を行った。すなわち、1人の被験者あたり同一刺激に対して6個の回答が得られた。なお、実験に先立ち、遅れ時間が10msと80msの刺激を各被験者に数回聴かせて、回答方法に慣れさせた。

回答方法としては、被験者が反射音方向に過度の意識を向けるのを避けるため、マッピング法を用いた。回答用紙には予め円が描かれており(Fig.2-2)、被験者に音像の方向とその範囲を記入させた。音像が分離して複数生じた場合には、同じ回答用紙にそ

これらの方向と範囲を全て記入させた。

#### D. 被験者

被験者は、22-25才の男子学生12名である。

### (2) 実験結果と考察

回答用紙に音像の方向が複数記入されている場合は、音像が分離しているとみなした。ただし、次の場合は音像は分離していないとした。

- 1) 記入した方向が近い( $\pm 10^\circ$  以内)場合
- 2) 正中面内に複数個記入している場合

得られた結果から、被験者ごとに各遅れ時間に対して音像が分離する百分率を求めた。その結果から、この実験の範囲内で第一波面の法則が成立する範囲としない範囲が明確に現れる5名を選んだ。この5名を対象に再度同じ実験を行い、同様の結果が得られることを確認した。

Fig.3-2は、5名の被験者に対する2回の実験結果をまとめて表したものである。第一波面の法則が成立し、音像が分離しない確率は、遅れ時間が10msで100%、20msでは98.3%である。反対に、第一波面の法則が成立しないで、音像が分離する確率は、遅れ時間が70msで98.3%、80msで100%である。

以上の結果から、3.2.2項で用いる刺激の遅れ時間として10, 20, 70, 80msの4種類、被験者としてこの5名を選ぶことにした。

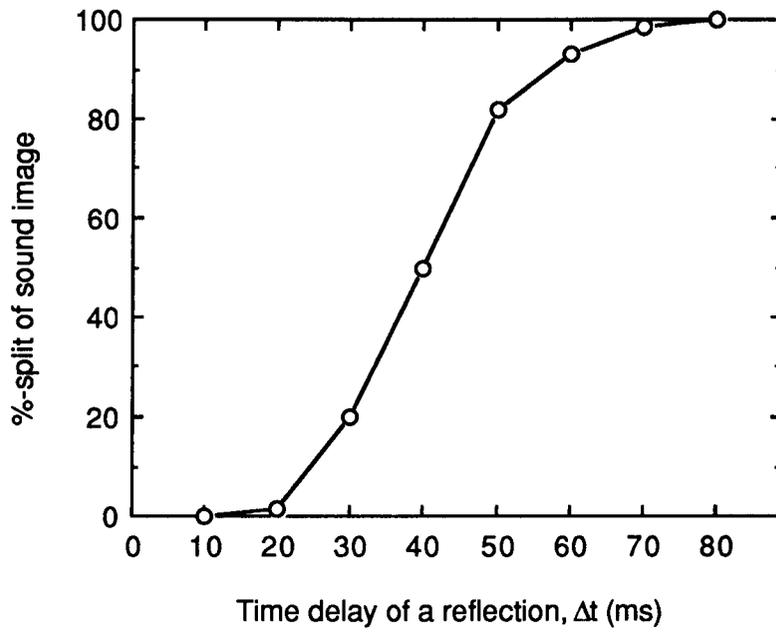


Fig.3-2 %-split of sound image as a function of time delay of a reflection.

### 3.2.2 第一波面の法則が成立する音場としない音場のASWの比較実験

両耳間相関度が一定で、第一波面の法則が成立する音場としない音場のASWを比較することにより、第一波面の法則の成否にかかわらず両耳間相関度でASWを評価できるか否かを明らかにする。

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

3.2.1項と同じ音源信号を用いた。

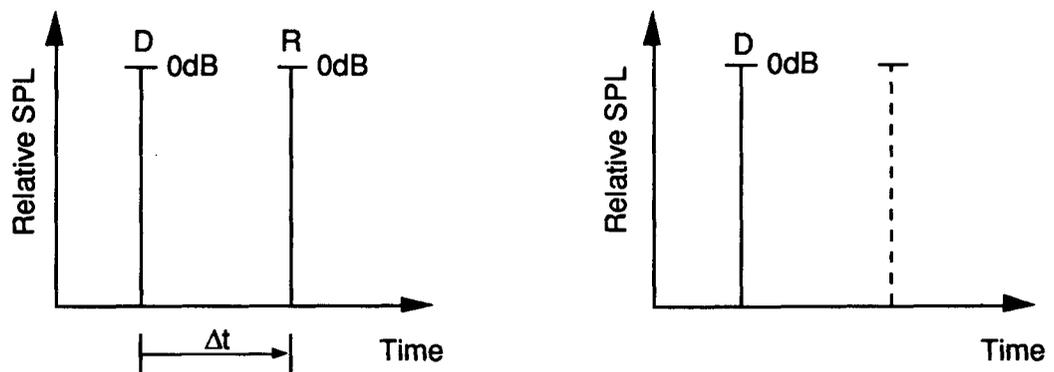
##### B. 刺激として用いた音場

直接音と単一反射音で構成される音場を用いた。Fig.3-3に音場の時間的構造と空間的構造を示す。(a)と(b)は第一波面の法則が成立する音場、(c)と(d)は法則が成立しない音場、すなわち音像が分離する音場である。(e)は(a)-(d)の音場から反射音を除いた直接音だけの音場、(f)は(a)-(d)と音圧レベルが等しくなるように音場(e)の音圧レベルを3dB大きくした音場である。

提示した刺激の音圧レベルをTable 3-1に示す。これは、被験者の頭の中心に相当する位置で時定数をSlowとして測定したRMSの最大値(dBA)である。

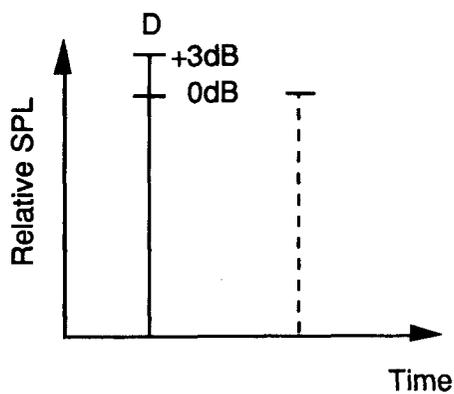
Table 3-1 Sound pressure level of stimuli (dBA).

Stimulus	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
SPL	70.5	71.7	71.6	71.8	69.0	72.0



- |                              |  |
|------------------------------|--|
| (a) $\Delta t = 10\text{ms}$ | } satisfying the law of the first wave front     |
| (b) $= 20\text{ms}$          |  |
| (c) $= 70\text{ms}$          | } not satisfying the law of the first wave front |
| (d) $= 80\text{ms}$          |  |

(e) only direct sound



(f) only direct sound (+3dB)

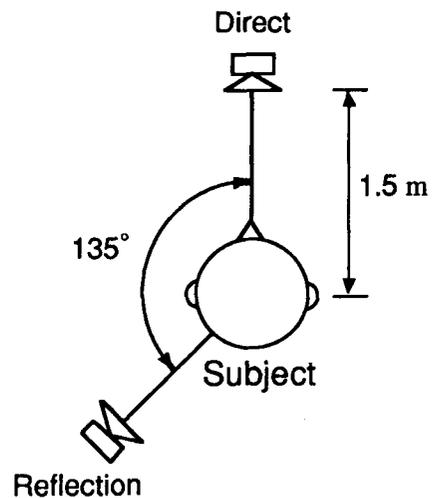


Fig.3-3 Temporal and spatial structure of six stimuli.

### C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は一対比較法を用いて行った。6種類の刺激から任意に2種類を選び刺激対とした。刺激と刺激の間隔は1秒、対と対の間隔は6秒である。対の組み合わせ順序が逆のものも含めて30対をランダムに提示した。被験者には対で提示した刺激のうち、どちらの刺激のASWがより大きいかを手元のスイッチで回答させた。実験は各被験者に

つき4回実施した。すなわち、被験者一人につき1つの刺激対について8個の回答を得た。

#### D. 被験者

被験者は、3.2.1項の結果をもとに選んだ22-25才の男子学生5名である。

### (2) 実験結果と考察

得られた回答から、Thurstone(1927)の比較判断の法則 Case V に従って刺激間の距離尺度を構成した。データが不完備になったものについては、Gulliksen(1956)の反復法を用いた。その結果をFig.3-4に示す。なお、得られた結果はMosteller(1951)の適合度検定で正規分布の仮定に適合していた。図の縦軸の単位は $\sqrt{2}\sigma$  ( $\sigma$ は各刺激に対する弁別過程が正規分布をすると仮定したときの標準偏差)である。直接音だけの刺激(e)については、全ての回答が他の刺激よりASWが小さいとなったため、尺度値を求めることができなかった。

まず、第一波面の法則が成立する刺激(a)と(b)を比較すると、尺度値の差は0.16である。これは、(a)のASWが大きいと回答する確率が56%、(b)のASWが大きいと回答する確率が44%であることを意味している。一般には、一方が75%以上の確率で起これば弁別できるとみなせることから、(a)と(b)のASWには弁別できるだけの差がないといえる。

同様に、第一波面の法則が成立しない刺激(c)と(d)を比較すると、尺度値の差は0.10である。これは、(c)のASWが大きいと回答する確率が54%、(d)のASWが大きいと回答する確率が46%であることを意味し、この場合も前述の理由から両者のASWには差はないとみなせる。

次に、第一波面の法則が成立する場合としない場合を比較すると、前者の尺度値は後者に比べて平均値で1.59大きい。これは、前者のASWがより大きいと回答する確率が94%、後者がより大きいと回答する確率が6%であることを意味している。すなわち、第一波面の法則が成立する(音像が分離しない)場合の方が成立しない(音像が分離する)場合よりもASWが大きいといえる。

4つの刺激(a), (b), (c), (d)は反射音の到来方向および直接音に対する相対音圧レベルが等しいことから、従来ASWの評価指標といわれている Lf(Lateral energy fraction) や両耳間相関度は等しい。したがって、ここで得られた結果は、反射音が第一波面の法則を満足しない場合には、法則を満足する場合と同じようにASWの評価にそれらの評価指標を適用することはできないことを示している。

しかし、第一波面の法則が成立しない刺激(c)と(d)の尺度値の平均値と、Table 3-1 からこれらの刺激と音圧レベルが等しいとみなせる刺激(f)の尺度値を比較すると前者の方が0.92大きい。これは、前者のASWが大きいと回答する確率が82%、後者のそれが大きいと回答する確率が18%であることを意味している。すなわち、第一波面の法則が成立しない場合でも、音圧レベルが等しい直接音よりはASWは大きいといえる。このことは、反射音が第一波面の法則を満足しない場合でも、部分的にASWの形成に寄与していることを示唆している。

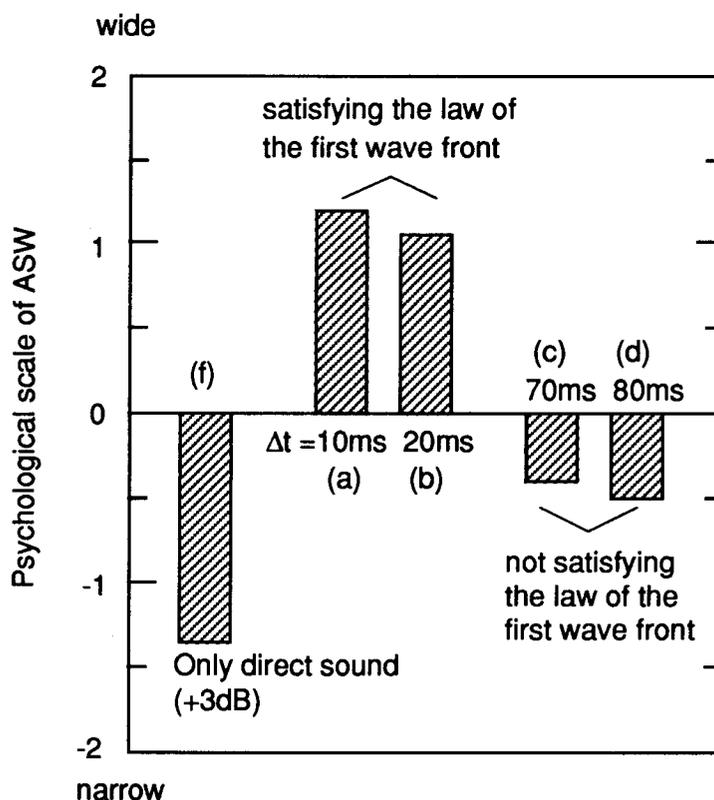


Fig.3-4 Psychological scale of ASW relating to the law of the first wave front.

### 3.2.3 結論

両耳間相関度が等しくても，第一波面の法則が成立する上限を越える反射音が形成するASWは，同法則の成立範囲内にある同じ音圧レベルの反射音が形成するASWよりも小さくなる．つまり，第一波面の法則が成立しない場合のASWの評価に，同法則が成立する場合と同じように両耳間相関度を適用することはできない．

### 3.3 第一波面の法則が成立しない音場のASWの評価方法

第一波面の法則を満足しない反射音が形成するASWの評価方法について一つの仮説を立て、それを音響心理実験により検証する。

#### 3.3.1 仮説

Fig.3-5は、第一波面の法則が成立する上限(破線)と、それを越える反射音を模式的に示している。3.2節の実験結果から直感的に予見される仮説は以下の通りである。

仮説：「反射音のうち、第一波面の法則が成立する範囲に含まれる部分(図中一点鎖線)がASWの形成に寄与する」。

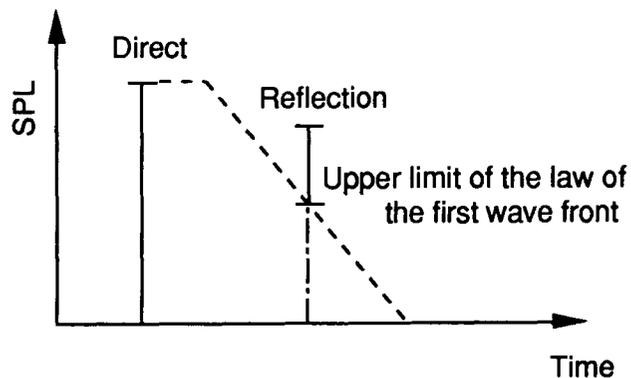


Fig.3-5 Schematic explanation of the hypothesis on ASW by a reflection not satisfying the law of the first wave front.

### 3.3.2 第一波面の法則が成立する反射音レベルの上限值

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

音源信号は、音楽用シンセサイザ(Roland JX-3P) のフルート音を自動演奏させた J.S. バッハの無伴奏フルートパルティータ(J.S.Bach; Partita a-mol für flute allein BWV 1013)の最初から約7秒間である。この曲は全て16分音符から構成されており、被験者が音像の分離を判断しやすいように選んだ。

##### B. 刺激として用いた音場

直接音と単一反射音で構成される音場を用いた。Fig.3-6に音場の時間的構造と空間的構造を示す。反射音の遅れ時間は80msに固定した。直接音の音圧レベルは被験者の頭の中心に相当する位置で69dB A(時定数: slow, RMSの最大値)で一定である。反射音の直接音に対する相対音圧レベル $\Delta L_{sp}$ (dB)は、音像が全く分離しない刺激から完全に分離する刺激まで含むように予め試聴を行い、-5dBから-15dBを1dBステップで変化させた11種類を設定した。

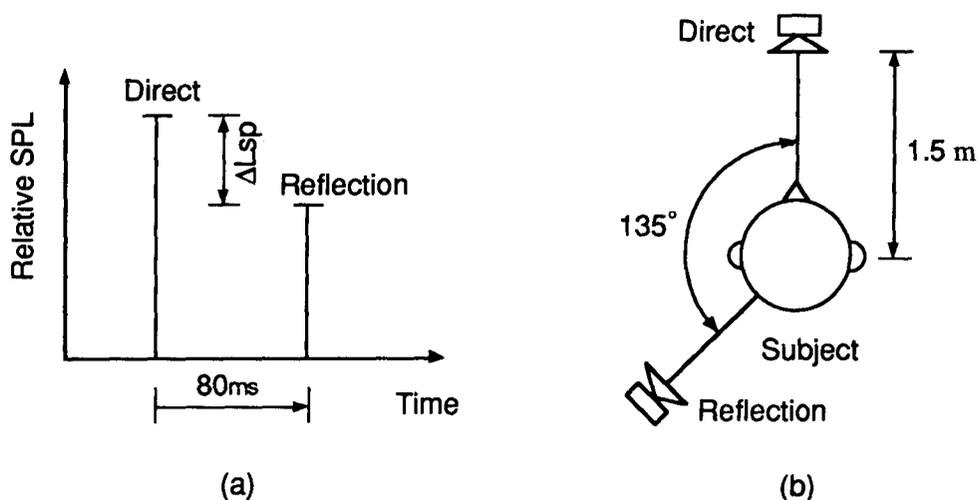


Fig.3-6 Temporal (a) and spatial (b) structure of stimuli.

### C. 刺激の提示方法と回答方法

同じ相対音圧レベルの刺激を1秒おきに3回ずつ提示したものを1試行とした。被験者には、この1試行の1回目は聴くだけ、2回目を聴いた後回答を記入、3回目で確認、このとき必要ならば訂正をするように指示した。試行と試行の間隔は7秒である。11種類の刺激を各2回ずつ計22試行をランダムに提示した。1回の実験時間は約11分である。十分な休憩をはさみながら1人の被験者につき25回実験を行った。すなわち、1人の被験者あたり同一刺激に対して50個の回答が得られた。

回答方法としては、被験者が反射音方向に過度の意識を向けるのを避けるため、マッピング法を用いた。回答用紙には予め円が描かれており(Fig.2-2)、被験者に音像の方向とその範囲を記入させた。音像が分離して複数生じた場合には、同じ回答用紙にそれらの方向と範囲を全て記入させた。

### D. 被験者

被験者は、22-25才の男子学生3名である。

## (2) 実験結果と考察

回答用紙に音像の方向が複数記入されている場合は、音像が分離しているとみなした。ただし、次の場合は音像は分離していないとした。

- 1) 記入した方向が近い( $\pm 10^\circ$  以内)場合
- 2) 正中面内に複数個記入している場合

得られた結果から、被験者ごとに音像が分離する百分率を求めた。さらに、その百分率をZ変換して回帰直線を求めた。ただし、0% および100% となった回答は省いた。被験者ごとの結果をFig.3-7に示す。横軸は反射音の直接音に対する相対レベル、縦軸は左がZ値を右が百分率を表している。図に示した相関係数はいずれも1に近く、心理実験の結果が正規分布していることを意味している。

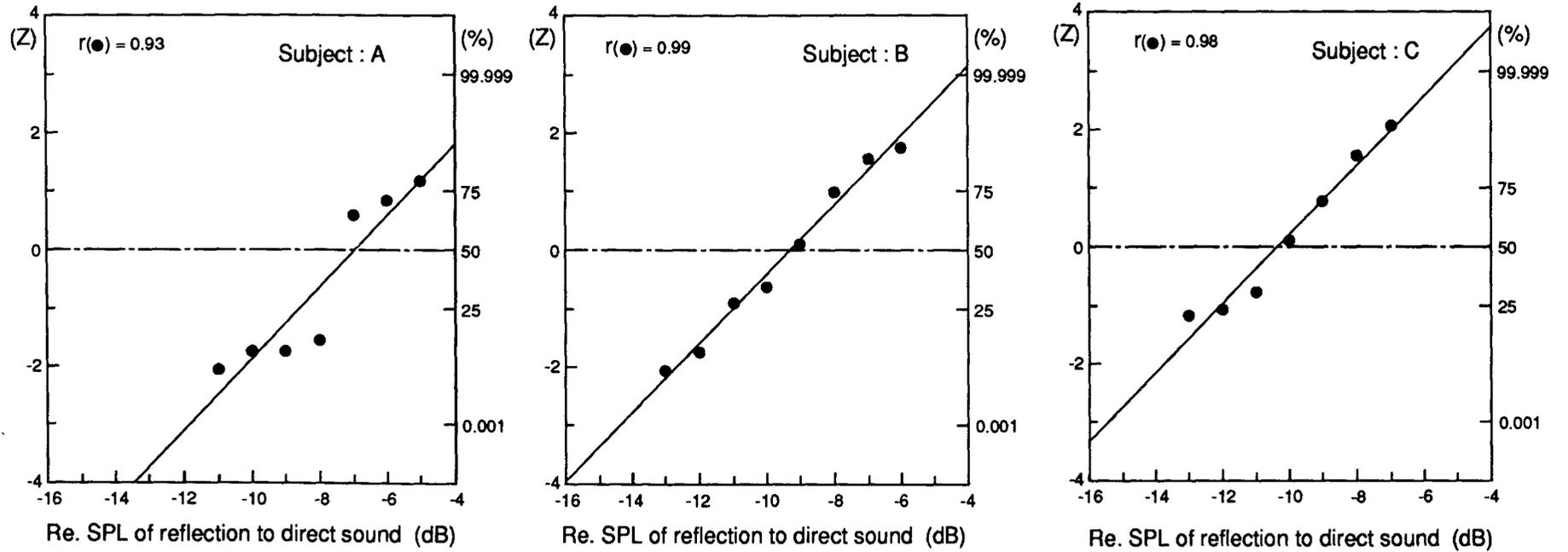


Fig.3-7 Probability that a sound image splits for each subject.

次に、それぞれの回帰式から $\overline{\Delta L_{sp}}$ を求めた。 $\overline{\Delta L_{sp}}$ は音像の分離する確率が50%、すなわち第一波面の法則が成立する上限値となる反射音の相対音圧レベルである。被験者ごとに求めた $\overline{\Delta L_{sp}}$ をTable 3-2に示す。

Table 3-2  $\overline{\Delta L_{sp}}$  obtained in experiment (dB).

Subject	$\overline{\Delta L_{sp}}$
A	-7.0
B	-9.3
C	-10.3

### 3.3.3 第一波面の法則が成立しない音場のASWと両耳間相関度の関係

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

3.3.2項と同じ音源信号を用いた。

##### B. 刺激として用いた音場

直接音と単一反射音で構成される音場を用いた。スピーカー配置は3.3.2項と同じである。Fig.3-8に音場の時間的構造を示す。Fig.3-8(a)は第一波面の法則が成立しない場合で、反射音の遅れ時間は80ms、直接音に対する相対音圧レベルは0dBとした。Fig.3-8(b)は第一波面の法則が成立する場合で、反射音の遅れ時間は20msに固定した。直接音に対する相対音圧レベル $\Delta L_{sp}(dB)$ は、-5から-15dBを1dBステップで変化させた11種類である。

どちらの場合も、刺激の音圧レベルは直接音と反射音を合わせたラウドネスが等しくなるように、KEMAR疑似頭の両耳音圧レベルからRobinson and Whittle(1960)の両耳加算式によって求めた値を71.4dBA(時定数：slow, RMSの最大値)で一定とした。

##### C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は一対比較法を用いて行った。第一波面の法則が成立しない刺激と成立する11種類の刺激の中から任意に1種類を選んで刺激対とした。刺激と刺激の間隔は1秒、対と対の間隔は5秒である。第一波面の法則が成立する刺激を対の前にした11種類の対と、対の後ろにした11種類の対を作成し、実験はそれぞれ別に行った。1回の実験では、11種類の対を各5回ランダムに提示した。1回の実験時間は約18分である。

十分な休憩をはさみながら1人の被験者につき5回実験を行った。すなわち、1人の被験者あたり同一刺激に対して50個の回答が得られた。

被験者には、前者のASWと比較して後者のASWが大きいか小さいかを手元のスイッチで回答させた。

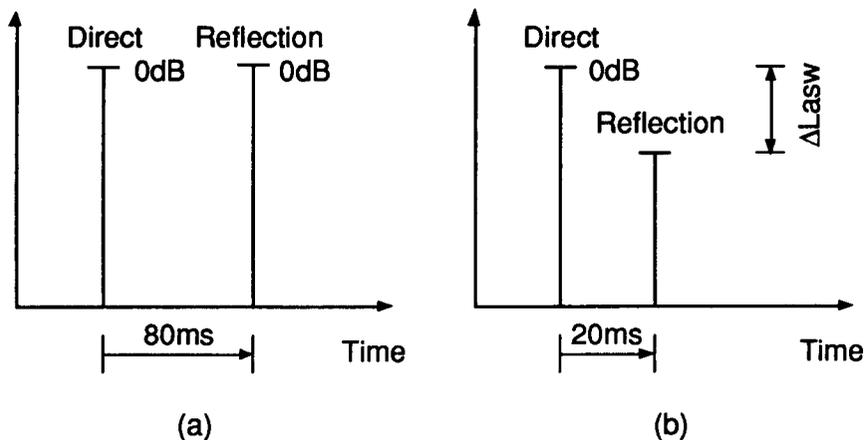


Fig.3-8 Temporal structure of stimuli. (a), not satisfying the law of the first wave front ; (b), satisfying the law of the first wave front.

#### D. 被験者

被験者は、3.3.2項と同じ22-25才の男子学生3名である。

#### (2) 実験結果と考察

まず、第一波面の法則が成立しない刺激のASWより成立する刺激のASWが大きい百分率を求めた。さらに、その百分率をZ変換して回帰直線を求めた。ただし、0%および100%となった回答は省いた。得られた結果を3.3.2項で求めた音像の分離の結果と併せてFig.3-9に示す。横軸は反射音の直接音に対する相対レベル、縦軸は左がZ値を右が百分率を表している。図に示した相関係数はいずれも1に近く、心理実験の結果が正規分布していることを意味している。

次に、それぞれの回帰式から $\overline{\Delta L_{asw}}$ を求めた。 $\overline{\Delta L_{asw}}$ は第一波面の法則が成立しない音場とASWが等しくなる第一波面の法則が成立する音場の反射音の相対音圧レベルである。被験者ごとに求めた $\overline{\Delta L_{asw}}$ と3.3.2項で求めた $\overline{\Delta L_{sp}}$ を併せてTable 3-3に示す。 $\overline{\Delta L_{sp}}$ と $\overline{\Delta L_{asw}}$ の差は被験者Bの0.7dBが最大であることから、両者は等しいとみなせる。

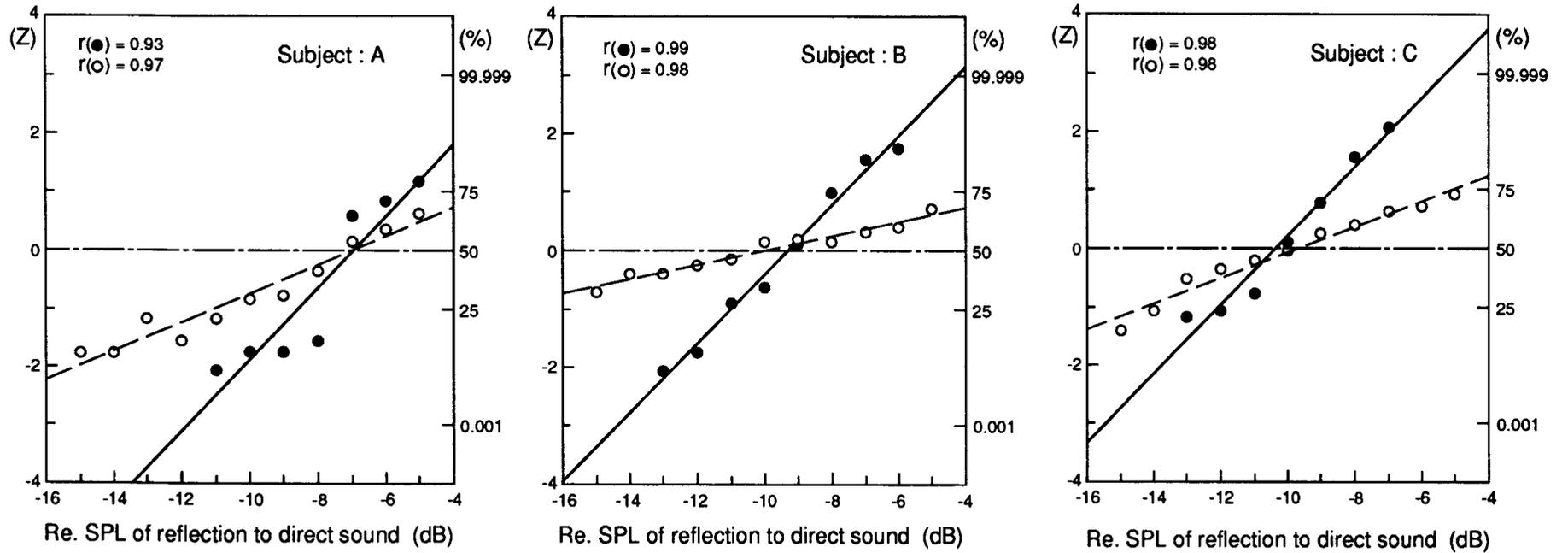


Fig.3-9 Probability that a sound image splits(closed circle and solid line) and probability that ASW for a stimulus satisfying the law of the first wave front is wider than ASW for a stimulus not satisfying the law(open circle and dotted line) for each subject.

また、第一波面の法則が成立する範囲では、ASWは反射音の遅れ時間に依存しないことから(Barron and Marshall 1981 および Morimoto and Pössel 1989)、反射音の相対音圧レベルが $\overline{\Delta L_{sp}}$ の場合のASWは、反射音の相対音圧レベルが $\overline{\Delta L_{asw}}$ の場合のASWと等しい。したがって、第一波面の法則が成立しない音場のASWは、反射音の相対音圧レベルが第一波面の法則が成立する上限値の場合のASWと等しい。

この結果は、3.3.1項に示した「反射音のうち、第一波面の法則が成立する範囲に含まれる部分がASWの形成に寄与する」という仮説を支持している。したがって、第一波面の法則が成立しない音場で知覚されるASWの評価には、第一波面の法則が成立する部分だけを考慮した両耳間相関度を用いる必要がある。

Table 3-3 Comparison of  $\overline{\Delta L_{sp}}$  with  $\overline{\Delta L_{asw}}$  (dB).

Subject	$\overline{\Delta L_{sp}}$	$\overline{\Delta L_{asw}}$
A	-7.0	-7.0
B	-9.3	-10.0
C	-10.3	-9.7

#### 3.3.4 結論

反射音が第一波面の法則が成立する上限を越える場合、その反射音の第一波面の法則が成立する範囲内に含まれる部分だけがASWの形成に寄与する。したがって、ASWを評価するためには、その部分だけを用いて両耳間相関度を求める必要がある。

### 3.4 反射音の到来方向がASWに及ぼす影響

ASWと両耳間相関度の関係に関する従来の研究では、刺激がヘッドホンや左右対称に配置されたスピーカーで提示されており、入射音構造が空間的に異なる任意の音場において両耳間相関度でASWを評価できるか否かについては明らかにされていない。ここでは、反射音の到来方向が異なる様々な音場において、両耳間相関度が等しければASWは等しいか否か検討する。

#### 3.4.1 被験者調整法を用いた実験

##### (1) 実験方法

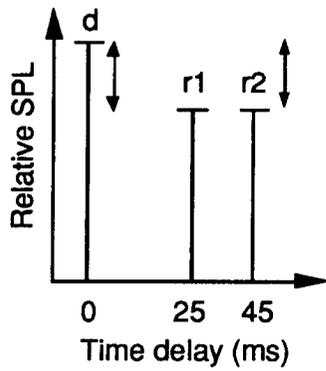
###### A. 音源信号

音源信号として、Building Research Station による無響室録音の W.A.Mozart, Symphony No.41 "Jupiter" の第4楽章第94-151小節の約47秒間を用いた。この音源信号は、Barron and Marshall(1981)が使用したのと同じである。

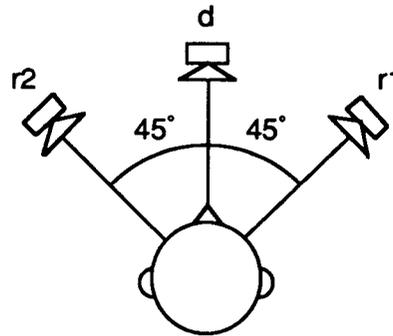
###### B. 刺激として用いた音場

両耳間相関度を0.6と0.8に固定した試験音場と両耳間相関度を変化させることができる比較音場を用いた。Fig.3-10は比較音場の時間的構造と空間的構造である。比較音場は直接音と2本の反射音で構成され、直接音は正面から反射音は方位角 $\pm 45^\circ$ から到来する。反射音の遅れ時間はそれぞれ25msおよび45msである。2本の反射音の音圧レベルは等しく、直接音に対する相対音圧レベルは連動アッテネータを介して被験者が調整することにより、両耳間相関度は0.33から0.97の範囲で変化させることができる。

試験音場の時間的構造と空間的構造をFig.3-11に示す。試験音場は直接音と2本または4本の反射音で構成され、反射音の遅れ時間は2本の場合は25msおよび45msで、4本の場合にはさらに61msおよび74msである。

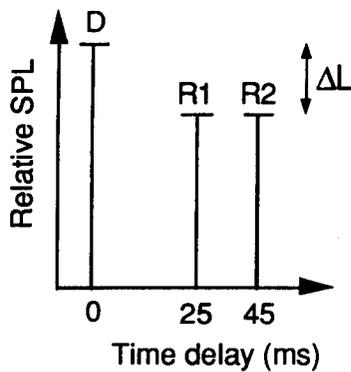


(a)

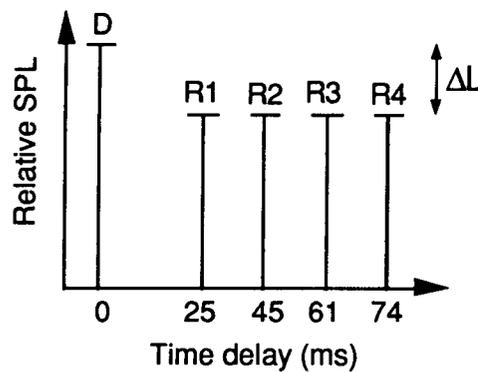


(b)

Fig.3-10 Temporal (a) and spatial (b) structure of a variable comparison field. d, direct sound ; r1 and r2, reflections.



(A,B,C,D)



(E,F,G,H)

Fig.3-11(a) Kinds of temporal structure of fixed test fields. D, a direct sound; R1-R4, reflections;  $\Delta L$ , SPL relative to a direct sound.

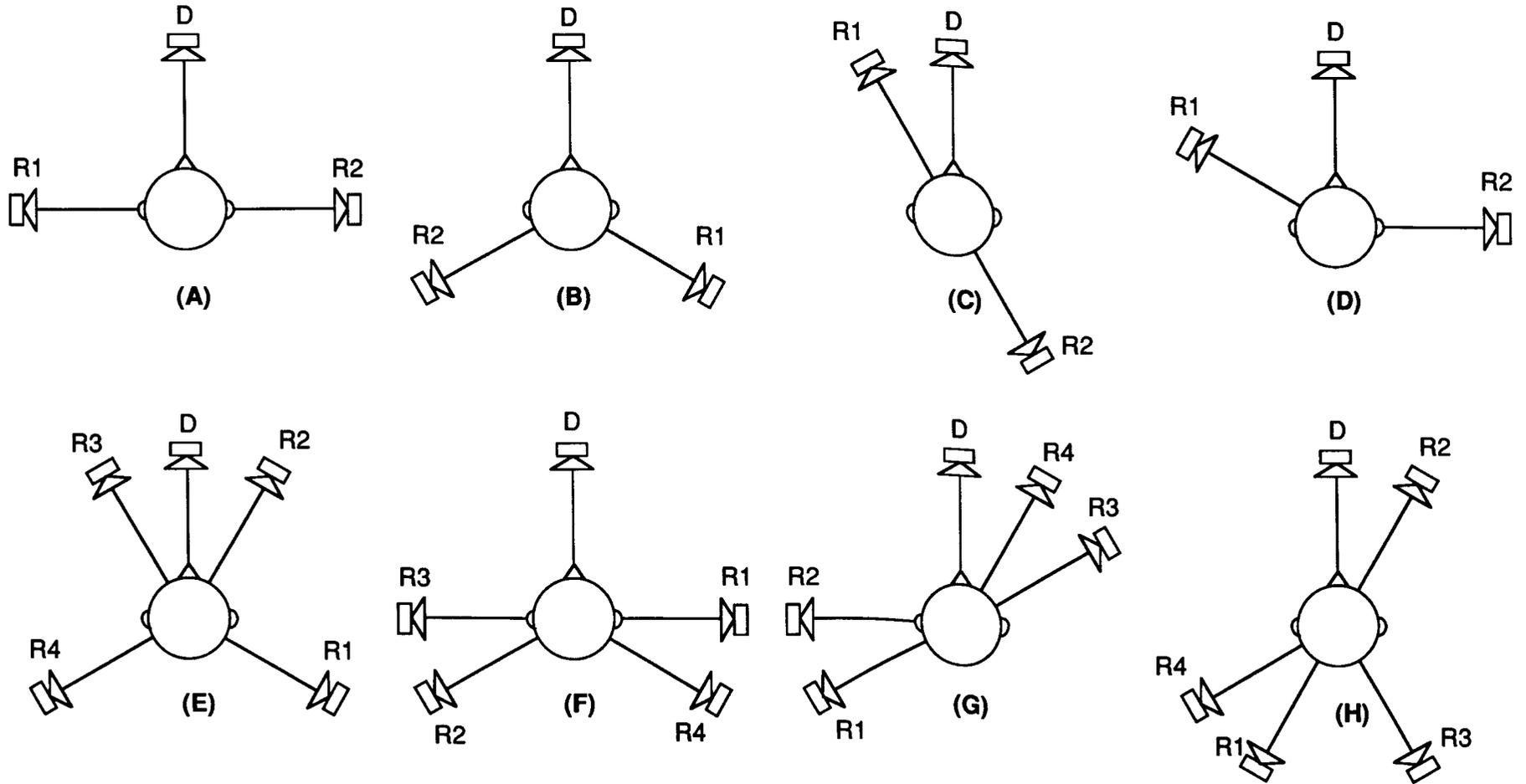


Fig.3-11(b) Kinds of spatial structure of fixed test fields. D, a direct sound; R1-R4, reflections;  $\Delta L$ , SPL relative to a direct sound.

直接音用のスピーカーは正面に、反射音用のスピーカーは方位角 $\pm 30, \pm 45, \pm 60, \pm 90, \pm 120, \pm 150^\circ$ に設置した。反射音の到来方向は、A, B, E, Fが左右対称で、他は非対称である。前後方向については、全ての試験音場において非対称である。さらに、被験者の両耳間相関度に対する弁別の程度を知るために、Fig. 3-10に示す比較音場と同じ音場を試験音場Tとして加えた。2-4本の反射音の音圧レベルは互いに等しく、直接音に対する相対音圧レベルは、試験音場の両耳間相関度が0.6あるいは0.8となるように2種類設定した。

Table 3-4に9種類の試験音場の反射音構造を示す。両耳間相関度の測定にはKEMAR疑似頭を用いた。ただし、2.5kHz付近の外耳道共振の影響を除去するため、疑似外耳(BK DB100)を取外し、マイクアンプの特性を平坦にした状態で測定した。提示音圧レベルは、KEMAR疑似頭の左耳で70dBA(時定数:slow, RMSの最大値)で一定である。なお、これらの音場ではエコーは知覚されないことを予め確認した。

### C. 刺激の提示方法と回答方法

被験者に、比較音場と試験音場をスイッチを切り替えて比較させ、両音場のASWが等しくなるように、連動アッテネータで比較音場の反射音の相対音圧レベルを調整させた。刺激の長さは47秒であるが、被験者の調整が終るまで刺激の提示を繰り返した。調整が終ると被験者はインターホンを通じて無響室の外にいる実験者に知らせた。被験者が調整した比較音場の反射音の相対音圧レベルは無響室の外に表示され、その結果から予め測定しておいた両耳間相関度を求めた。

まず、試験音場の両耳間相関度が0.8の場合について、9種類の試験音場をランダムに提示して、それらとASWが等しくなる比較音場の両耳間相関度を求めた。続いて、試験音場の両耳間相関度が0.6の場合についても同様に行った。各被験者は各試験音場について6回の実験を行った。

### D. 被験者

被験者は、23-24才の男子学生5名である。

Table 3-4 Nine kinds of fixed test fields.

Fixed test field	Degree of interaural cross correlation	Reflection								
		Azimuth (deg.)				Relative SPL (dB)	Time delay (ms)			
		R1	R2	R3	R4		R1	R2	R3	R4
A	0.6					-3.0				
	0.8	-90	+90	-	-	-7.9				
B	0.6					-2.3				
	0.8	+120	-120	-	-	-6.0				
C	0.6					-0.2				
	0.8	-30	+150	-	-	-4.4				
D	0.6					-3.3				
	0.8	-60	+90	-	-	-7.2				
E	0.6					-0.8				
	0.8	+120	+30	-30	-120	-6.1	25	45	61	74
F	0.6					-3.0				
	0.8	+90	-120	-90	+120	-8.0				
G	0.6					-2.1				
	0.8	-120	-90	+60	+30	-8.0				
H	0.6					-0.7				
	0.8	-150	+30	+150	-120	-5.8				
T	0.6					-4.5				
	0.8	+45	-45	-	-	-8.0				

## (2) 実験結果と考察

各試験音場に対する1回目の実験は練習とみなし、2回目から6回目までの5回の回答を採用した。すなわち、各試験音場に対し25個の回答を得た。

Fig. 3-12は、各試験音場とASWが等しいと判断された比較音場の両耳間相関度の95%信頼区間を示す。(a)は試験音場の両耳間相関度が0.8の場合、(b)は0.6の場合である。図中の一点鎖線は設定した試験音場の両耳間相関度を示す。また、2本の点線は3.6節で論述するASWに関する両耳間相関度の弁別限を示す。

まず、両耳間相関度が0.8の場合の結果をみると、各試験音場に対する95%信頼区間は試験音場HとTを除いて0.8を含んでいる。比較音場と全く同じ反射音構造をもつ試験音場Tに対する95%信頼区間は、試験音場Eを除く全ての95%信頼区間と重なっている。全ての試験音場の95%信頼区間は、試験音場Eが試験音場HおよびTと重なっていないことを除き、互いに重なりあっている。

次に、両耳間相関度が0.6の場合の結果をみると、比較音場と全く同じ反射音構造をもつ試験音場Tに対する95%信頼区間は、両耳間相関度が0.8の場合と同様に、試験音場Eを除く全ての95%信頼区間と重なっている。しかし、95%信頼区間が0.6を含む試験音場は、C、F、H、Tの4つだけである。また、それぞれの試験音場の95%信頼区間は必ずしも互いに重なっているわけではない。

ここで、試験音場Tの95%信頼区間について考察する。この音場の反射音構造は比較音場のそれと全く同じであるから、この場合の95%信頼区間はそれぞれ0.8および0.6を含むはずである。しかし、求められた95%信頼区間は、それぞれ0.82-0.84と0.59-0.65であり、0.8の場合は0.8を含まず、0.6の場合も信頼区間の中心は高い値にずれている。これは、被験者調整法を用いたため、被験者の判断に偏倚があった可能性を示唆している。

本実験で得られた95%信頼区間は、いずれも弁別閾内に入っていることから、9種類の試験音場のASWは互いに等しいと考えられるが、上で述べた偏倚が含まれているため、恒常法を用いた実験で再確認する。

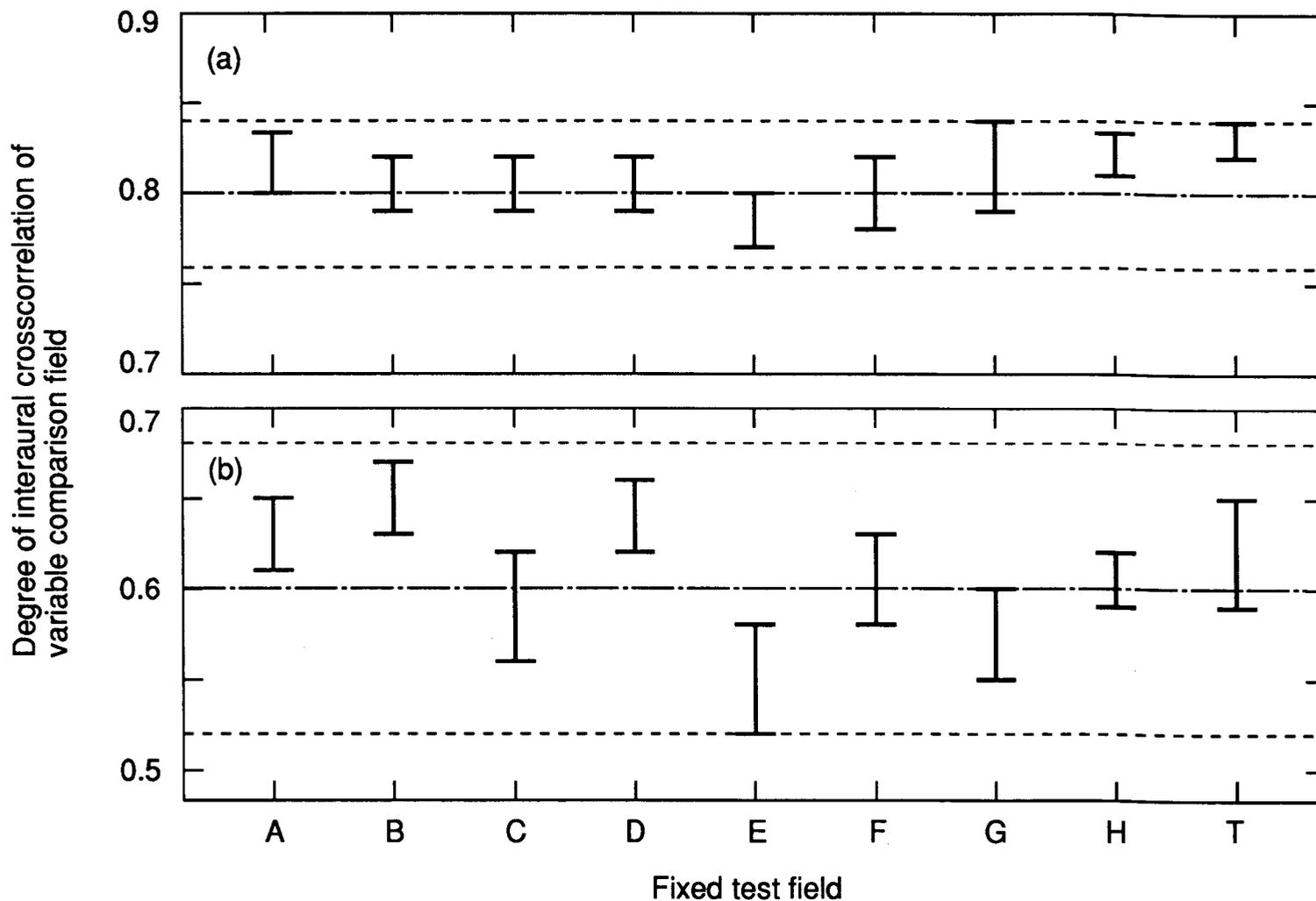


Fig.3-12 95% confidence interval of degree of interaural crosscorrelation of a variable comparison field, ASW for which is equal to ASW for fixed test fields. Degree of interaural crosscorrelation of fixed test fields are 0.8 (a) and 0.6 (b). Dashed-dotted line is interaural crosscorrelation of fixed test fields. Two dotted lines indicate jnd of the degree of interaural crosscorrelation with regard to ASW measured for the sound field with the same structure of reflections as a variable comparison field(see 3.6).

### 3.4.2 恒常法を用いた実験

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

3.4.1 項と同じ音源信号を用いた。

##### B. 刺激として用いた音場

試験音場は3.4.1 項と同じ音場を用いた。ただし、両耳間相関度は 0.8 の場合だけである。また、比較音場は3.4.1 項と同じ反射音構造で、両耳間相関度が0.650-0.904 の範囲の9 音場を設定した。

両耳間相関度の測定にはKEMAR疑似頭を用いた。ただし、2.5kHz付近の外耳道共振の影響を除去するため、疑似外耳 (BK DB100) を取外し、マイクアンプの特性を平坦にした状態で測定した。提示音圧レベルは、KEMAR疑似頭を用いて測定した両耳ラウドネス(Robinson and Whittle 1960) が  $70 \pm 0.1$  dB(A)(時定数: slow, RMSの最大値)である。なお、これらの音場ではエコーは知覚されないことを予め確認した。

##### C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は一対比較による恒常法を用いて行った。各試験音場について9種類の比較音場の中から任意に1種類を選んで刺激対とした。刺激と刺激の間隔は1秒、対と対の間隔は5秒である。1回の実験では、9種類の対を各5回ランダムに提示した。1回の実験時間は約13分である。十分な休憩をはさみながら1人の被験者につき5回実験を行った。すなわち、1人の被験者あたり同一刺激対に対して25個の回答が得られた。

被験者には、前者のASWと比較して後者のASWが大きいか小さいかを手元のスイッチで回答させた。

#### D. 被験者

被験者は、22才の男子学生3名である。

#### (2) 実験結果と考察

まず、被験者ごとに比較音場のASWが試験音場のASWより大きいと回答した百分率を求め、それをZ変換した。各被験者の各試験音場における両耳間相関度とZ値の相関係数は全て0.89以上であり、心理実験の結果は正規分布しているとみなした。次に、最小自乗法により回帰式を求め、試験音場とASWが等しくなる比較音場の両耳間相関度の平均値と標準偏差を求めた。さらに、各試験音場について、被験者間の平均値の差をt分布により検定した。その結果、いかなる試験音場のいかなる被験者の組み合わせでも差があるとはみなせなかったので( $p < 0.1$ )、3人の被験者の回答を合計して扱うことにする。

比較音場のASWが試験音場のASWより大きいと回答した百分率を求め、それをZ変換した。各試験音場における両耳間相関度とZ値の相関係数は全て0.96以上であり、心理実験の結果は正規分布しているとみなした。次に、最小自乗法により回帰式を求め、試験音場とASWが等しくなる比較音場の両耳間相関度の平均値と標準偏差を求めた。その結果をFig.3-13に示す。図の縦軸は試験音場とASWが等しくなる比較音場の両耳間相関度である。

比較音場と同じ反射音構造をもつ試験音場Tについてみると、比較音場の両耳間相関度の平均値は0.798で、試験音場の両耳間相関度0.8とほとんど同じであり、3人の被験者は正常な判断力を有しているとみなせる。他の試験音場に対する比較音場の両耳間相関度の平均値についてみると、試験音場との差は最大で0.04である。これは3.6節で論述するASWに関する両耳間相関度の弁別閾内である。さらに、各試験音場間の平均値の差をt分布により検定した結果、各平均値の間に差があるとはみなせなかった( $p < 0.1$ )。したがって、ここで検討した9種類の試験音場のASWは、反射音の到来方向に関わらず、等しいとみなせる。

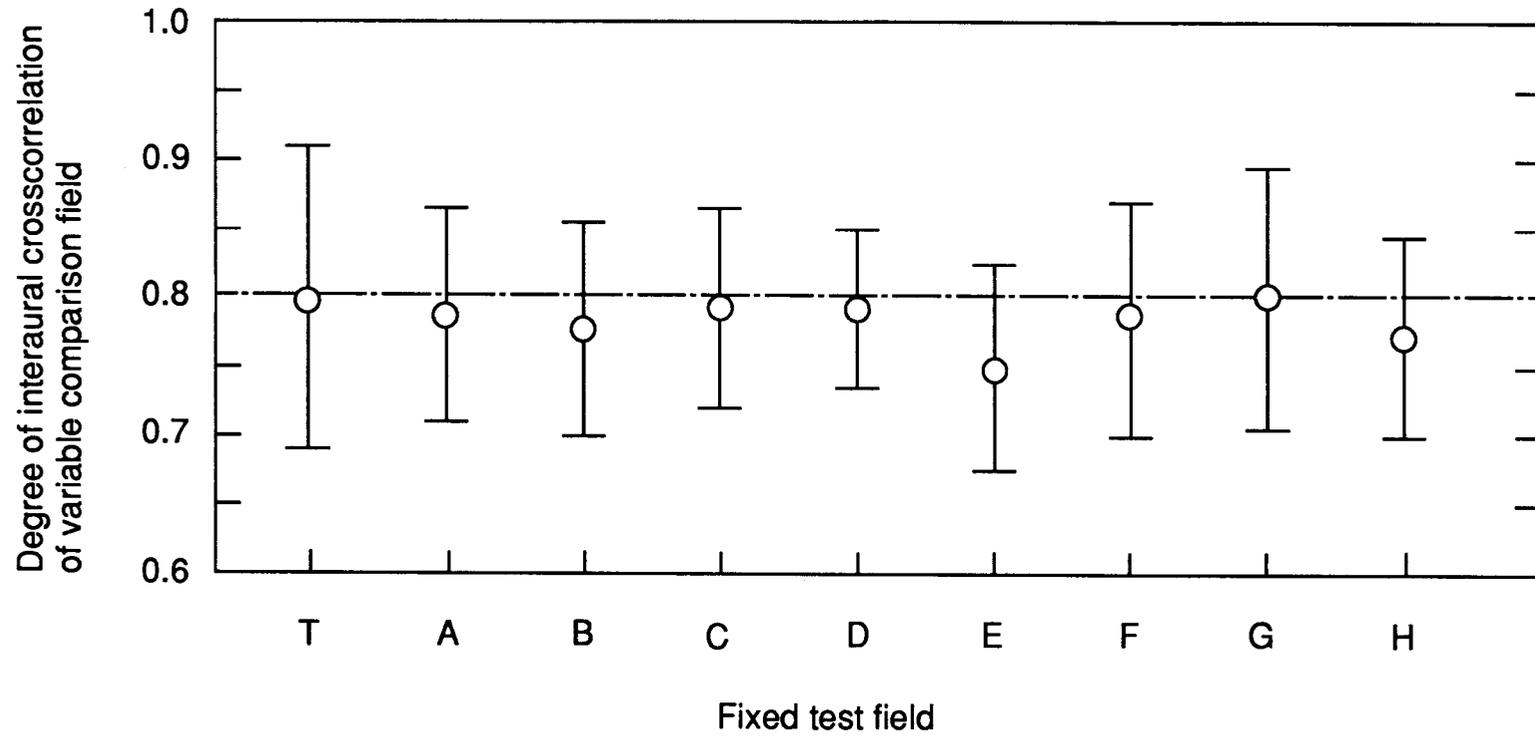


Fig.3-13 Mean value and standard deviation of degree of interaural crosscorrelation of a variable comparison field, ASW for which is equal to ASW for fixed test fields. Dashed-dotted line is interaural crosscorrelation of fixed test fields.

### 3.4.3 結論

両耳間相関度が一定であれば反射音の到来方向に関わらず，ASWは一定である。つまり，反射音の到来方向に関わらず，両耳間相関度でASWを評価できる。

### 3.5 直接音の到来方向がASWに及ぼす影響

3.4節で、第一波面の法則が成立し、直接音が正面方向から到来する音場においては、反射音の到来方向にかかわらず、両耳間相関度が等しい場合はASWは等しくなることを示した。しかし、実際の音場では直接音は必ずしも正面から到来するとは限らない。ここでは、直接音の到来方向が異なる音場において、両耳間相関度が等しければASWは等しいか否かを検証する。

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

音源信号として、Building Research Station による無響室録音の W.A.Mozart, Symphony No.41 "Jupiter" の第4楽章第94-151小節の約47秒間を用いた。

##### B. 刺激として用いた音場

両耳間相関度を0.6と0.8に固定した試験音場と両耳間相関度を変化させることができる比較音場を用いた。比較音場は3.4.1項と同じである。すなわち、Fig.3-10に示しように直接音は正面から反射音は方位角 $\pm 45^\circ$ から放射される。反射音の遅れ時間はそれぞれ25msおよび45msである。2本の反射音の音圧レベルは互いに等しく、直接音に対する相対音圧レベルは連動アッテネータを介して被験者によって調整される。

試験音場の時間的構造と空間的構造をFig.3-14に示す。試験音場は直接音と2本の反射音で構成される。直接音の到来方向は方位角 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ の3方向とした。反射音は両耳間相関度を制御しやすいように2本とも正面から放射した。反射音の遅れ時間は25msおよび45msで比較音場と同じである。2本の反射音の音圧レベルは等しく、直接音に対する相対音圧レベルは、試験音場の両耳間相関度が0.6あるいは0.8となるように2種類設定した。ただし、直接音の方位角が $60^\circ$ で両耳間相関度が0.8の試験音場は作成できなかったため、刺激から除外した。

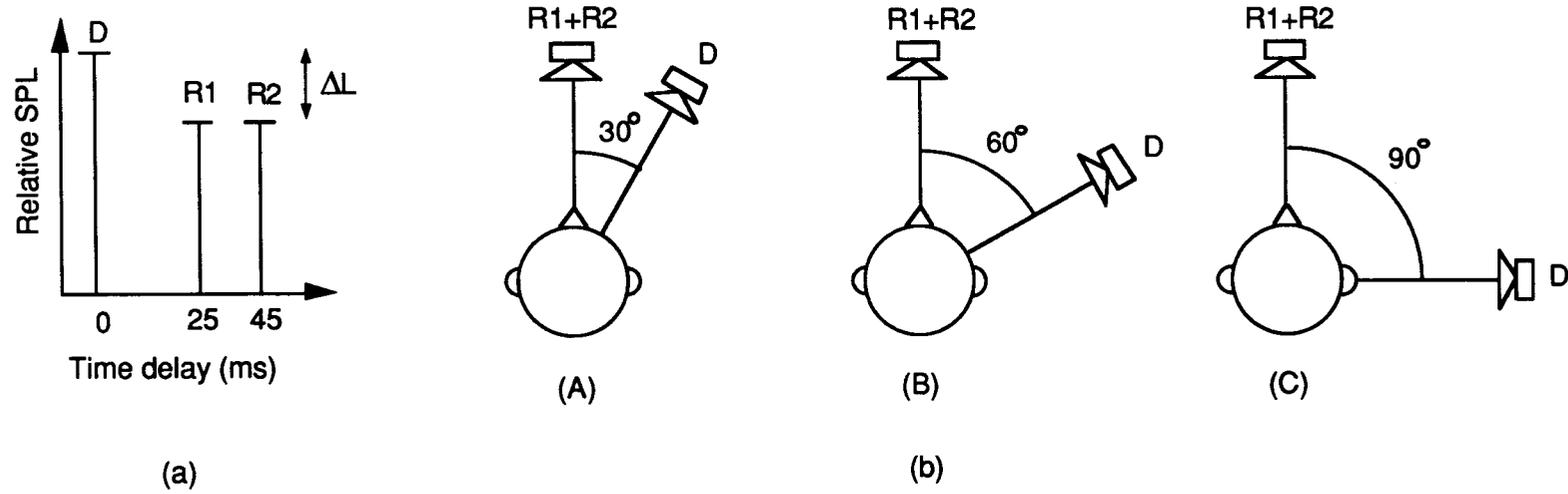


Fig.3-14 Temporal (a) and spatial (b) structure of fixed test fields.  
 D, a direct sound ; R1,R2, reflections ;  $\Delta L$ , SPL relative to a direct sound.

Table 3-5 に試験音場の反射音構造を示す。両耳間相関度の測定には KEMAR 疑似頭を用いた。ただし、2.5kHz付近の外耳道共振の影響を除去するため、疑似外耳(BK DB100)を取外し、マイクアンプの特性を平坦にした状態で測定した。提示音圧レベルは、被験者の頭の中心に相当する位置で67dB A(時定数：slow, RMSの最大値)で一定である。なお、これらの音場ではエコーは知覚されないことを予め確認した。

Table 3-5 Kinds of fixed test fields.

Fixed test field	Degree of interaural cross correlation	Direct sound		Reflection			
		Azimuth (deg.)	Relative SPL (dB)	Azimuth (deg.)		Time delay (ms)	
				R1	R2	R1	R2
A	0.6	+30	-6.0				
	0.8		-13.0				
B	0.6	+60	-8.5	0	0	25	45
C	0.6	+90	-3.5				
	0.8		-12.0				

### C. 刺激の提示方法と回答方法

刺激の提示方法と回答方法は3.4.1項と同じである。ただし、各被験者は各試験音場について10回の実験を行った。実験の回数を多くしたのは、試験音場と比較音場を切り替えると音像方向が変化して判断が難しかったためである。

### D. 被験者

被験者は、23-24才の男子学生5名である。

## (2) 実験結果と考察

各試験音場に対する10個の回答のうち、前半の5回は練習とみなし、後半の5回の回答を結果として採用した。すなわち、各試験音場に対し25個の回答を得た。これらの回答から求めた95%信頼区間をFig.3-15に示す。(a)は試験音場の両耳間相関度が0.8の場合、(b)は0.6の場合である。図の横軸は試験音場の直接音の方位角、縦軸は各試験音場とASWが等しいと回答した比較音場の両耳間相関度である。図中の一点鎖線は設定した試験音場の両耳間相関度を示している。また、2本の点線は3.6節で論述するASWに関する両耳間相関度の弁別限を示す。

両耳間相関度が0.8、0.6のどちらの場合も、全ての試験音場において95%信頼区間は設定した両耳間相関度より高い方にずれている。また、全ての試験音場において、95%信頼区間は弁別限から外れている。したがって、両耳間相関度が等しくても、ここで検討した試験音場のASWは、直接音が正面から到来する音場のASWよりも小さいとみなせる。

## (3) 結論

両耳間相関度が等しくても、直接音が正面以外の方向から到来する場合は正面から到来する場合に比べてASWは小さくなる。したがって、直接音が正面から到来する場合と同じように評価することはできない。

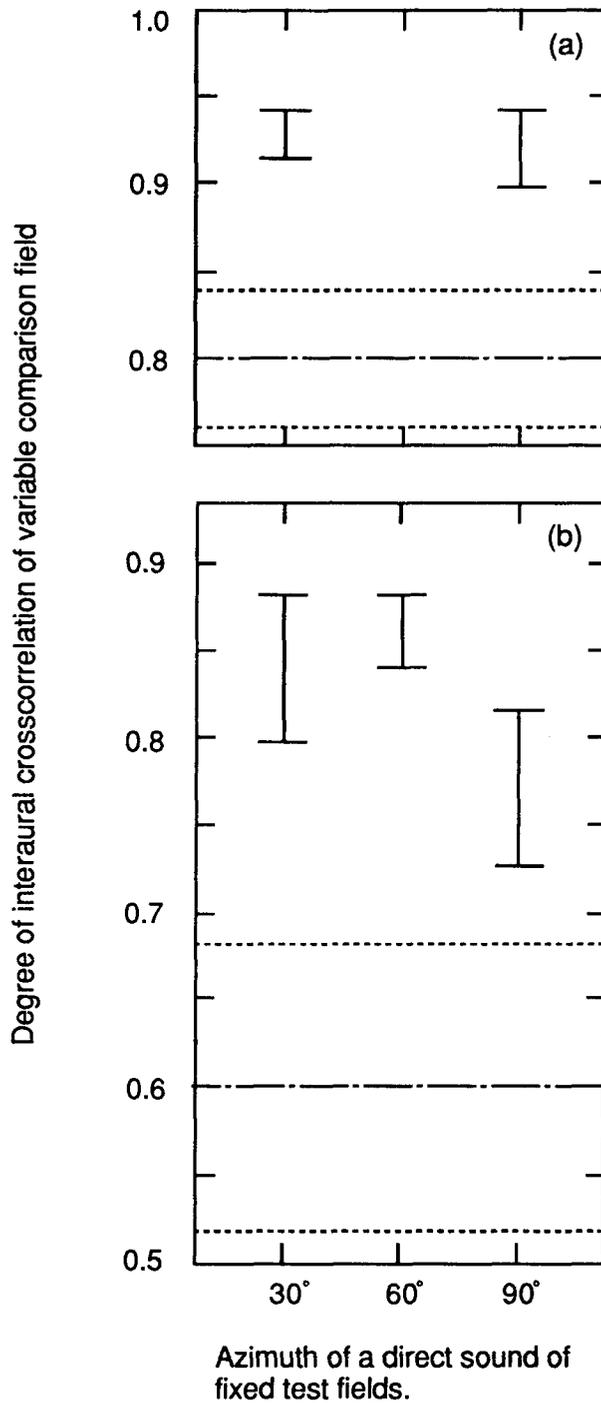


Fig.3-15 95% confidence interval of degree of interaural crosscorrelation of a variable comparison field, ASW for which is equal to ASW for fixed test fields in experiment. Degree of interaural crosscorrelation for fixed test fields is 0.8 (a) and 0.6 (b). Dashed-dotted line is interaural crosscorrelation of fixed test fields. Two dotted lines indicate jnd of the degree of interaural crosscorrelation with regard to ASW measured for the sound field with the same structure of reflections as a variable comparison field(see 3.6).

### 3.6 ASWに関する両耳間相関度の弁別限

両耳間相関度でみかけの音源の幅(ASW)を評価するためには、その弁別限を明らかにする必要がある。しかし、従来の研究で求められている弁別限は、音源がノイズの場合だけで、コンサートホールなどで演奏される音楽の場合については明らかにされていない。ここでは、音楽信号を音源とした場合のASWに関する両耳間相関度の弁別限を明らかにする。

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

音源信号として、Building Research Station による無響室録音のW.A.Mozart, Symphony No.41 "Jupiter" の第4楽章第94小節から約6秒間を用いた。

##### B. 刺激として用いた音場

両耳間相関度を固定した基準音場と両耳間相関度を変化させることができる比較音場を用いた。Fig. 3-16に基準音場と比較音場の時間的構造と空間的構造を示す。いずれも直接音と2本の反射音で構成され、直接音は正面から反射音は方位角 $\pm 45^\circ$ から到来する。また、2本の反射音の遅れ時間は25msと45msで、音圧レベルは互いに等しい。基準音場における直接音に対する相対音圧レベルは、両耳間相関度 0.50, 0.70, 0.90 の3種類を実現するように設定した。比較音場の両耳間相関度は、Table 3-6に示すように0.50の基準音場に対しては 0.301から0.684の範囲の14種類、0.70の基準音場に対しては 0.524から0.837の範囲の14種類、0.90の音場に対しては 0.837から0.936の12種類である。

両耳間相関度の測定には KEMAR 疑似頭を用いた。ただし、2.5kHz 付近の外耳道共振の影響を除去するため、疑似外耳 (BK DB100) を取外し、マイクアンプの特性を平坦にした状態で測定した。提示音圧レベルは、KEMAR疑似頭の左耳で70dBA(時定数: slow, RMSの最大値)で一定である。なお、これらの音場ではエコーは知覚されないことを予め確認した。

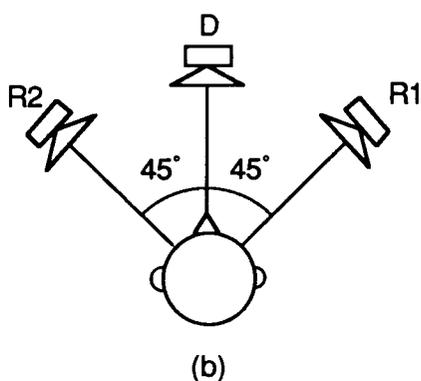
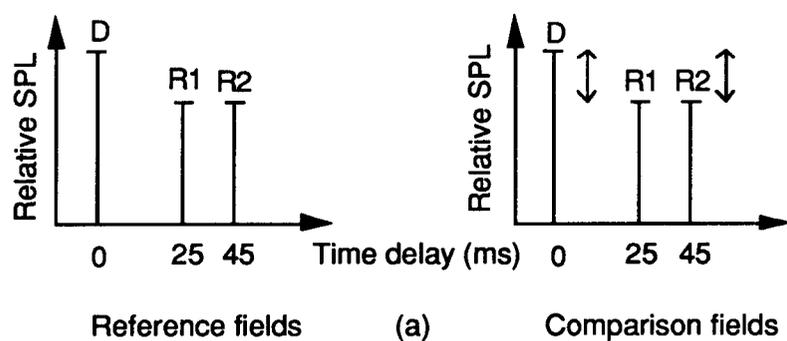


Fig.3-16 Temporal (a) and spatial (b) structure of reference fields and comparison fields. D, a direct sound ; R1,R2, reflections.

### C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は一対比較法を用いて行った。基準音場と比較音場を一対にしたものをランダムな順に提示した。1回の実験で、被験者は3水準の基準音場について合計40対を比較した。基準音場の両耳間相関度は、0.90、0.70、0.50の順で提示し、各基準音場の間では約30秒間隔をあけた。実験時間は1回約13分で、1人の被験者につき16回の実験を行った。

被験者には、対の前の刺激と後ろの刺激のどちらのASWがより拡がっているかを手元のスイッチで回答させた。

Table 3-6 Kinds of comparison fields. DICC for the test field is 0.90 (a), 0.70 (b), and 0.50 (c).

(a) DICC = 0.90		(b) DICC = 0.70		(c) DICC = 0.50	
Degree of interaural cross correlation	Relative SPL of each reflection (dB)	Degree of interaural cross correlation	Relative SPL of each reflection (dB)	Degree of interaural cross correlation	Relative SPL of each reflection (dB)
0.936	-17.5	0.837	-11.5	0.684	-7.5
0.931	-17.0	0.822	-11.0	0.660	-7.0
0.926	-16.5	0.807	-10.5	0.635	-6.5
0.920	-16.0	0.790	-10.0	0.608	-6.0
0.918	-15.5	0.771	-9.5	0.580	-5.5
0.910	-15.0	0.751	-9.0	0.553	-5.0
0.895	-14.0	0.729	-8.5	0.524	-4.5
0.885	-13.5	0.684	-7.5	0.466	-3.5
0.875	-13.0	0.660	-7.0	0.437	-3.0
0.863	-12.5	0.635	-6.5	0.410	-2.5
0.852	-12.0	0.608	-6.0	0.380	-2.0
0.837	-11.5	0.580	-5.5	0.354	-1.5
		0.553	-5.0	0.326	-1.0
		0.524	-4.5	0.301	-0.5

#### D. 被験者

被験者は、男子学生 8 名である。

#### (2) 実験結果と考察

各音場対について得られた 128 個の回答から、比較音場の ASW が基準音場の ASW より大きいと回答した百分率を求め、それを Z 変換した。各基準音場における比較音場の両耳間相関度と Z 値の相関係数は全て 0.98 以上であり、心理実験の結果は正規分布しているとみなした。ここで実験結果の信頼性を確認するために、最小自乗法により回帰式を求め、基準音場と ASW が等しくなる比較音場の両耳間相関度を求めた。その結果

を Table 3-7 に示す。基準音場と比較音場の両耳間相関度の差は最大で0.01であり、実験結果の信頼性は十分高いといえる。

Table 3-7 Degree of interaural crosscorrelation of comparison field, ASW for which is equal to ASW for reference field.

Degree of interaural crosscorrelation	
Reference field	Comparison field of which ASW is equal to ASW for reference field
0.50	0.51
0.70	0.69
0.90	0.90

そこで、各基準音場に対してASWがより拡がっていると知覚する確率が75%以上または25%以下となる比較音場の両耳間相関度を回帰式から求め、基準音場の両耳間相関度との差をとって弁別限を求めた。その結果をFig.3-17に示す。図の横軸は基準音場の両耳間相関度、縦軸は弁別限である。○はASWがより狭いと知覚する場合で、●はより拡がっていると知覚する場合である。

得られた弁別限は、両耳間相関度が0.50の基準音場に対してASWがより狭いと知覚する場合で0.12、より拡がっていると知覚する場合で0.10であり、0.70の基準音場に対してはそれぞれ0.06と0.09である。0.90の基準音場に対してはどちらも0.03であり、この結果は、Pollack and Trittipoe(1959)が基準の両耳間相関度が1.0の広帯域ノイズを用いて求めた弁別限0.04とほぼ一致する。また、弁別限は基準音場の両耳間相関度の+側と-側でほぼ同じであり、ASWを小さく知覚する場合も大きく知覚する場合も同じように扱えることを示している。さらに、基準音場の両耳間相関度が大きいほど弁別限は小さくなっている。そこで、Weber比 R を次のようにして求めた。

$$R = \Delta \text{DICC} / (1 - \text{DICC}_{\text{ref}}) \quad (3-3)$$

ここで、 $\Delta \text{DICC}$  : ASWに関する両耳間相関度の弁別限

$\text{DICC}_{\text{ref}}$  : 基準音場の両耳間相関度

求めたWeber比Rを Table 3-8 に示す。Rは0.20から0.30の範囲にあり、ほぼ一定であるとみなせる。すなわち、両耳間相関度が0.50から0.90の範囲ではWeberの法則が成立する。

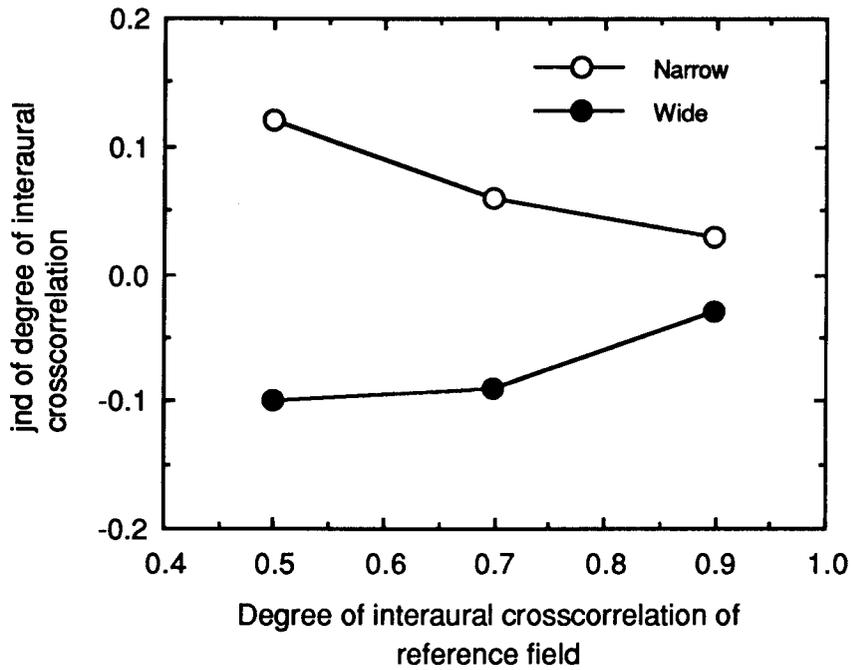


Fig.3-17 jnd of degree of interaural crosscorrelation with regard to ASW.

Table 3-8 Weber ratio of jnd of degree of interaural crosscorrelation with regard to ASW.

interaural crosscorrelation of reference field	Weber ratio, R	
	in case of perceiving wide	in case of perceiving narrow
0.50	0.20	0.24
0.70	0.30	0.20
0.90	0.30	0.30

### (3) 結論

1. 音楽信号を用いた場合のASWに関する両耳間相関度の弁別限は、両耳間相関度が0.50の基準音場に対してASWがより狭いと知覚する場合で0.12, より広がっていると知覚する場合で0.10であり, 0.70の基準音場に対しては, それぞれ0.06と0.09, 0.90の基準音場に対しては, どちらも0.03である.
2. ここで求めた弁別限に関しては Weberの法則が成立し, Weber 比は0.20 - 0.30である.

### 3.7 両耳間相関度の測定方法

聴覚の信号処理過程に則れば，両耳間相関度は臨界帯域ごとに求める必要があるが，工学的には単一数值評価指標が望ましい。

このような観点に立った両耳間相関度の測定方法に関する従来の研究は，森本ら(1990b)の報告以外見当たらない。彼らは，Barron and Marshall(1981)が直接音と左右対称な方位角から到来する2本の反射音を用いて行った音響心理実験の結果に対応する両耳間相関度の測定方法を検討した。その結果，KEMAR疑似頭の疑似外耳(BK DB100)を装着した状態で測定した両耳間相関度は反射音が $20^\circ$ の倍数の方位角から到来する場合に極小値をとり，Barron and Marshall(1981)の実験結果に対応しないが，疑似外耳を取外し，外耳道共振を除去して求めた両耳間相関度はよく対応することを示した。音源信号は Building Research Station による無響室録音の W.A.Mozart, Symphony No.41 "Jupiter" の第4楽章である。ここで，この原因を考えてみる。Fig.3-18とFig.3-19は，それぞれ音源のスペクトルとKEMAR疑似頭の伝達関数である。これらの図より，疑似外耳を装着した状態では2.5kHz付近のエネルギーが外耳道共振により増幅されることがわかる。つまり，疑似外耳を装着して測定した両耳間相関度は，耳入力信号のうちの2.5kHz付近の成分で決定される。

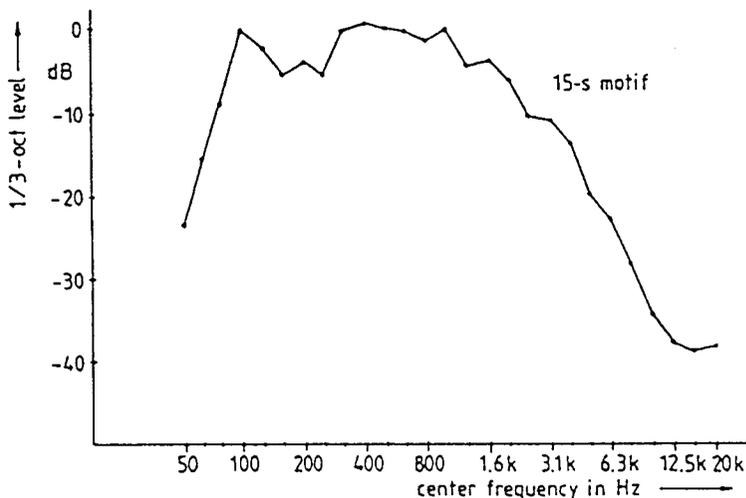


Fig.3-18 One-third-oct spectrum of the musical test material, a motif from Mozart's Jupiter symphony BBC(1969), after Blauert and Lindemann(1986).

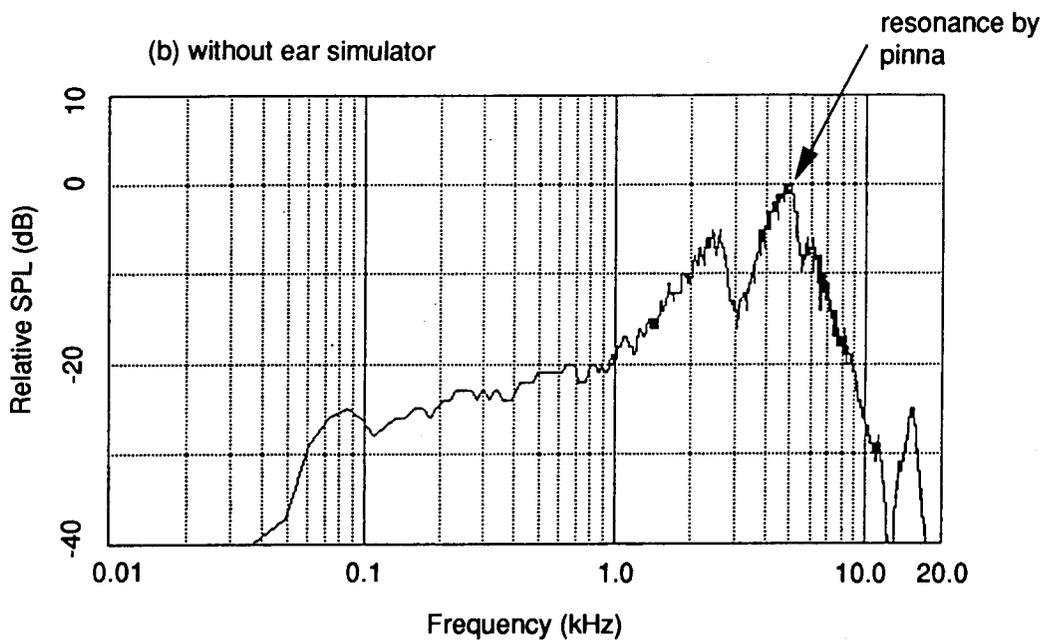
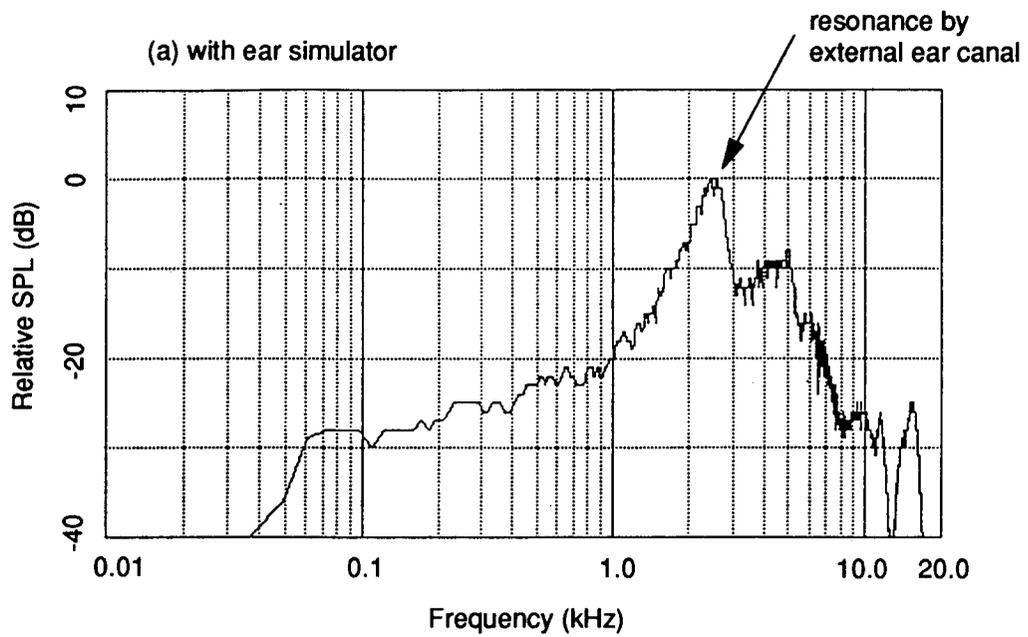


Fig.3-19 Measured acoustical transfer function between sound source and KEMAR dummy head. (a), with ear simulator; (b), without ear simulator.

ところで、2.5kHzの信号の半波長は約8cmであり、両耳間経路差が8cmとなるのは反射音が $\pm 20^\circ$ の倍数の方位角から到来する場合である。つまり、疑似外耳を装着すると反射音の方位角が $20^\circ$ の倍数の場合に両耳間相関度が極小値をとる原因は、直接音と反射音のそれぞれの両耳間相関関数が両耳間時間差 $\tau=0$ において逆相の関係になり、両者の合成で求められる両耳間相関度が小さくなったためである。

しかし、Fig.3-19(b)で明らかなように、音源が広帯域なスペクトルをもつ場合は、疑似外耳を除去しても4-5kHz付近の耳介の共振特性の影響が現れる。したがって、上に述べた方法で広帯域信号のASWを評価することはできないはずである。ここでは、上限周波数を変化させた広帯域ノイズを音源に用いてASWと両耳間相関度の対応関係を求め、ASWの評価指標としての両耳間相関度の測定方法を検討する。

### 3.7.1 広帯域信号を用いた場合のASW

#### (1) 実験方法

##### A. 音源信号

音源信号には、4種類の広帯域のピンクノイズを用いた。通過帯域をTable 3-9に示す。

Table 3-9 Frequency range of source signal

Frequency range (Hz)
200 - 1k
200 - 2k
200 - 4k
200 - 8k

##### B. 刺激として用いた音場

Fig. 3-20に示すように正面と左右対称な方位角から広帯域ノイズを提示する音場を用いた。3つのスピーカーからは、互いにインコヒーレントなノイズを提示するが、左右から提示される音は正面から提示される音より6dB低く設定した。提示音圧レベルは、KEMAR疑似頭の左耳で $65.0 \pm 1.0$ dB(A)(時定数：slow, RMSの最大値)である。

##### C. 刺激の提示方法と回答方法

実験は一対比較法を用いて、各帯域ノイズごとに9種類の刺激について行った。9種類の刺激を継続時間3秒、間隔1秒の対として36対作成した。対と対の間隔を4秒として各刺激対をランダムな順に提示した。また、順序効果を取り除くため、各対で刺激の順序を入れ換えたものも提示した。1回の実験時間は約7分で、1人の被験者につき2回ずつ実験を行った。すなわち、同一の刺激の組み合わせに対して1人あたり4個の回答を得た。

被験者には、それぞれの刺激対のどちらのASWが大きいかを手元のスイッチで回答させた。

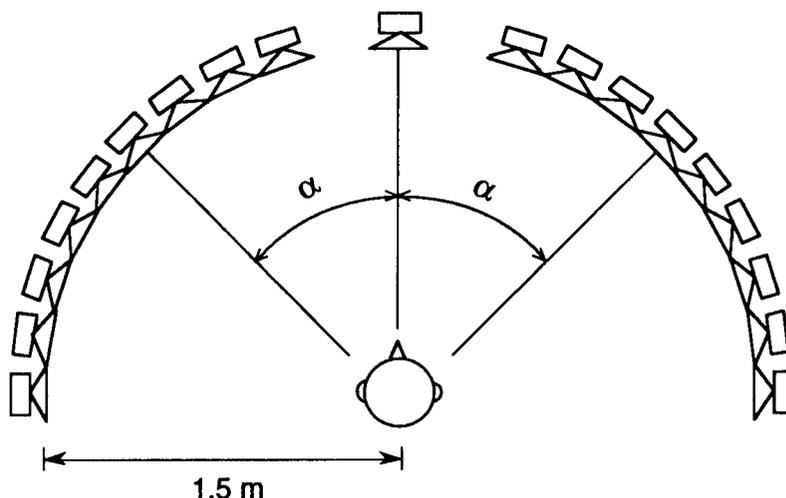


Fig.3-20 Loudspeaker arrangement in experiment. Azimuth of loudspeaker,  $\alpha$  is 0,  $\pm 18$ ,  $\pm 27$ ,  $\pm 36$ ,  $\pm 45$ ,  $\pm 54$ ,  $\pm 63$ ,  $\pm 72$ ,  $\pm 81$ ,  $\pm 90$  (deg.).

#### D. 被験者

被験者は、22 - 28才の男子6名である。

#### (2) 実験結果と考察

距離尺度を構成する前に、まず一意性の検定(三浦ら1973)を行った。その結果、200 - 1kHz および 200 - 4kHz については計24個の全ての回答が、200 - 2kHz および 200 - 8kHz については23個の回答が検定に通った。さらに、この検定を通った回答について、判断の基準に差があるか否かを検討するため一致性の検定を行った。その結果、有意水準5%で被験者の回答の判断の基準が共通であるとみなせた。両方の検定に通った回答を Thurstone(1927) の比較判断の法則 Case V に従って刺激間の距離尺度を構成した。データが不完備になったものについては、Gulliksen(1956)の反復法を用いた。

各広帯域ノイズにおけるASWの距離尺度をFig.3-21に示す。図の横軸は左右から提示するノイズの方位角で、縦軸はASWに関する心理的距離尺度である。この値が大きいほどASWは大きい。いずれの広帯域ノイズの場合でも、左右から提示するノイズの方位角が $90^\circ$  に近づくに従ってASWは増加し、方位角が $18^\circ$  異なれば距離尺度で0.68以上の差が生じるため、ASWを弁別できると考えられる。ただし、 $72-90^\circ$  付近では距離尺度の差が0.2程度であり、ASWを弁別できるとはみなせない。

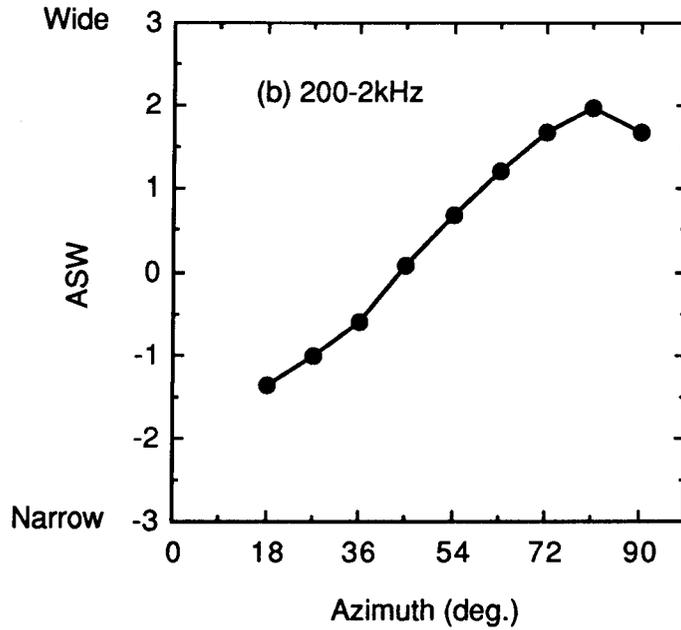
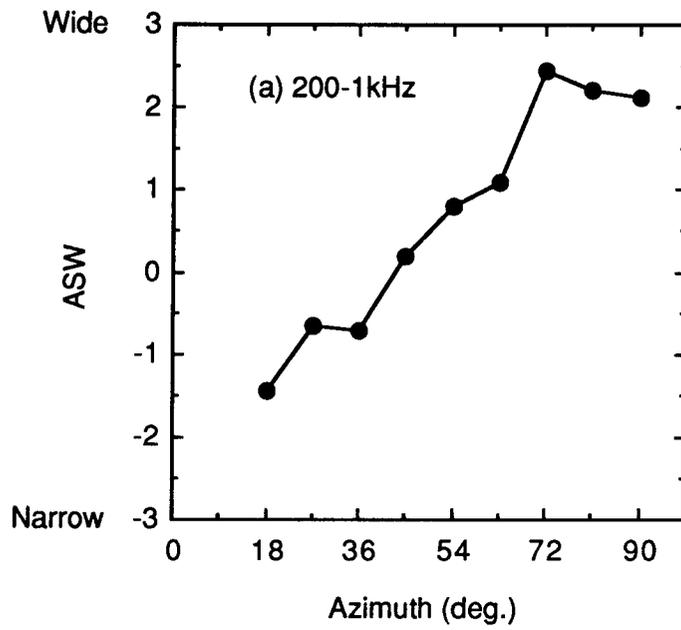


Fig.3-21 Psychological scale value of ASW as a function of azimuth of lateral loudspeakers.

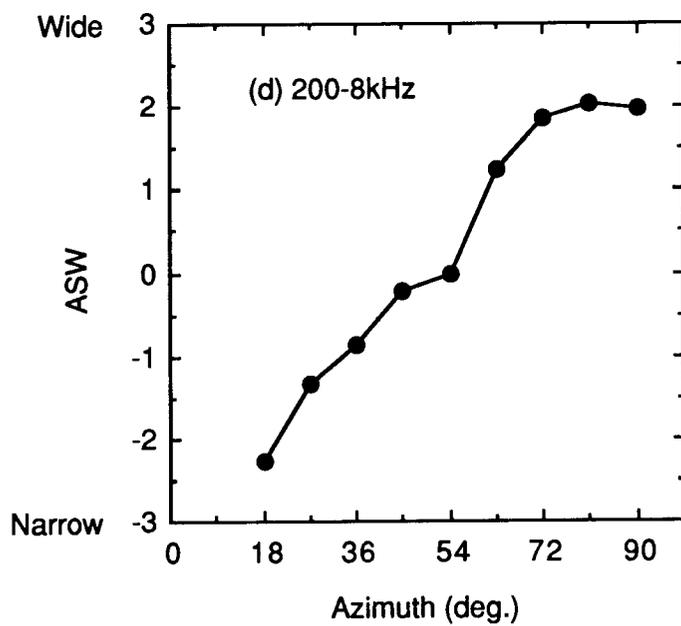
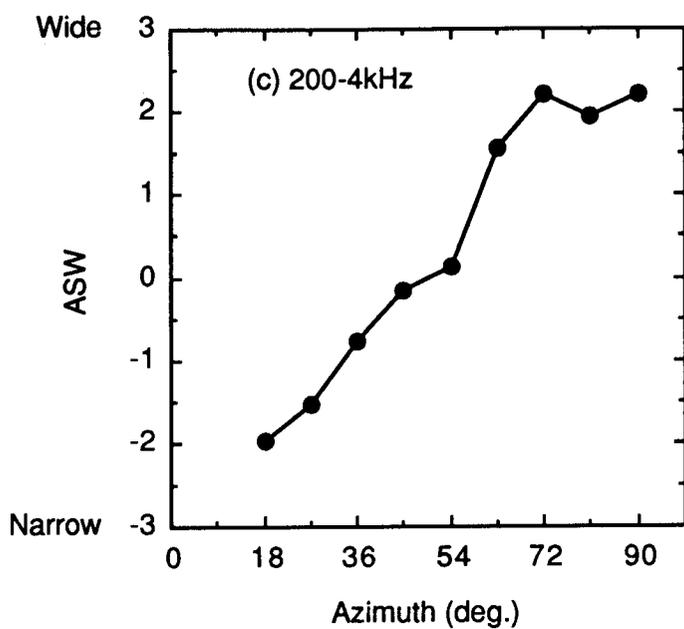


Fig.3-21 Continued.

### 3.7.2 広帯域信号を用いた場合のASWと両耳間相関度の関係

#### (1) ASWと従来の両耳間相関度の関係

まず、森本ら(1990b)の方法、つまりKEMAR疑似頭の疑似外耳(BK DB100)を取外し、外耳道共振を除去した状態で両耳間相関度を測定した。求めた両耳間相関度とASWの関係をFig.3-22に示す。図の横軸は左右から提示するノイズの方位角で、縦軸は左側がASWの心理的距離尺度(●)、右側が両耳間相関度(○)である。

上限周波数が1kHzおよび2kHzの場合は、ASWと両耳間相関度の間には従来示されているとおりの負の相関関係がある。しかし、上限周波数が4kHzおよび8kHzの場合には、入射方位角が変化しても両耳間相関度はほとんど変化することがなく、両者に負の相関関係があるとはみなせない。つまり、このような広帯域信号を用いた場合はASWを従来の両耳間相関度で評価することはできない。

両者に相関関係が得られない原因は、先に述べたように200-4kHz および 200-8kHz の信号を用いた場合、耳入力信号は耳介(pinna)の共振特性により4-5kHz付近が10dB以上卓越した信号となっているためである(Shaw and Teranishi 1968)。この場合の両耳間相関度は耳入力信号のうちほとんど4-5kHz付近の成分で決定されている。

一方、聴覚の信号処理機構は約1600Hz以上の入力信号に対しては、入力波形の微細構造には追随せず、包絡線を検出することが知られている(Leakey *et al.*1958)。ASWの知覚過程においても同様の処理が行われていると推測できる。つまり、ASWと森本ら(1990b)の方法で測定した両耳間相関度に相関関係が得られなかった原因は、耳入力信号の1600Hz以上の成分の処理方法にあると考えられる。

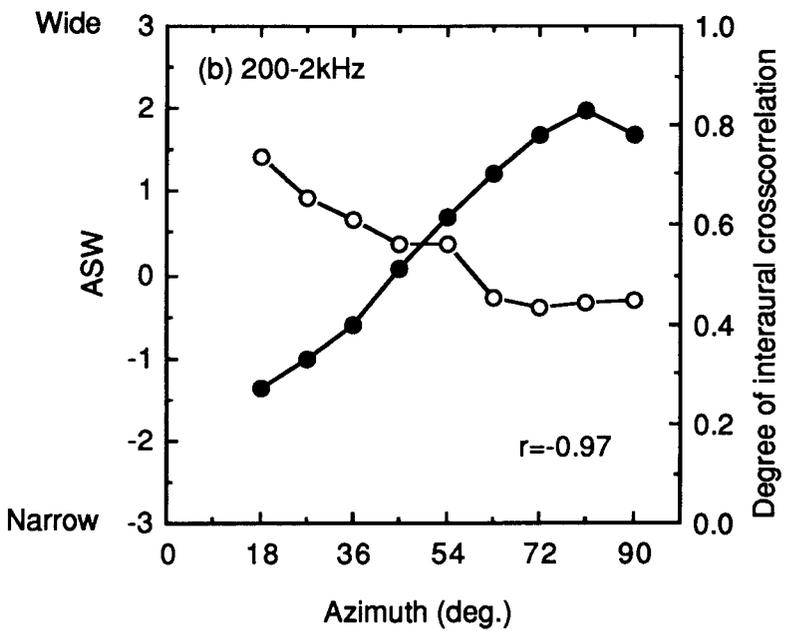
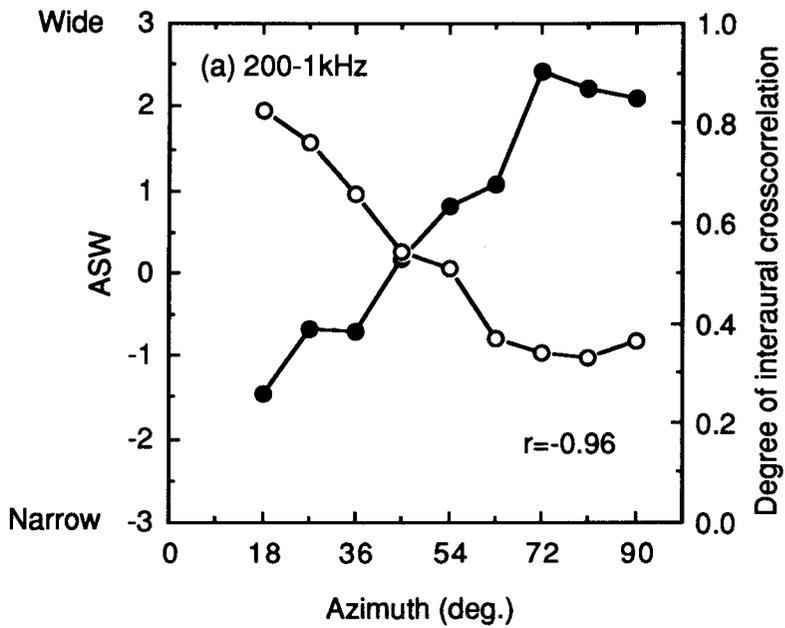


Fig.3-22 Relation between ASW and degree of interaural crosscorrelation.  
 ●, ASW ; ○, degree of interaural crosscorrelation.

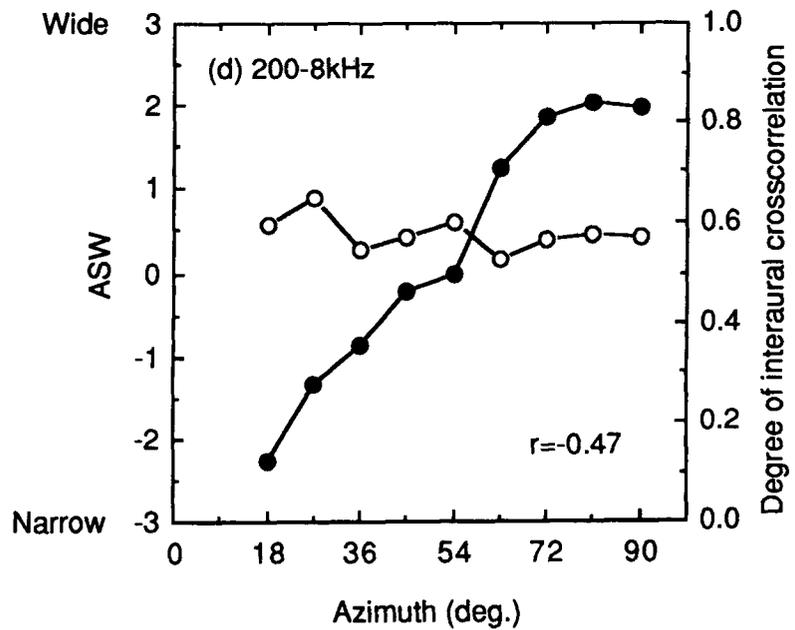
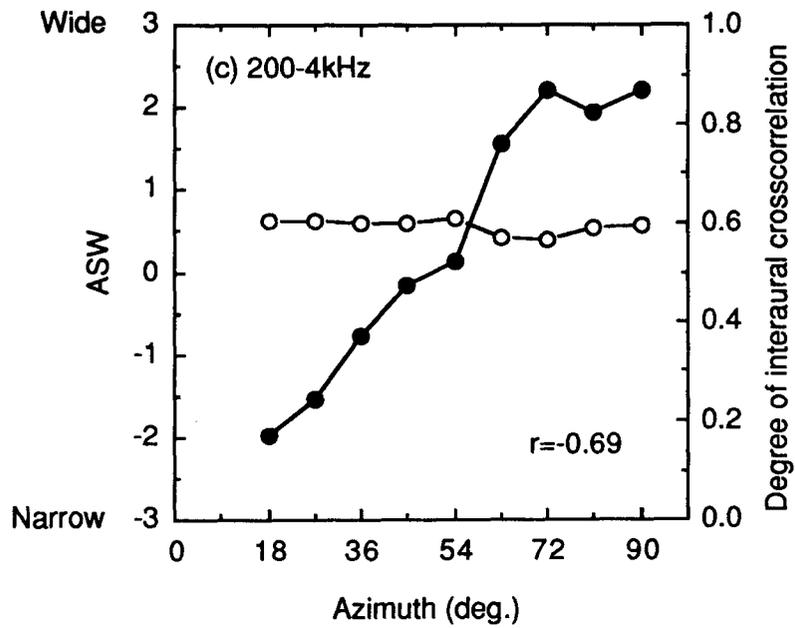


Fig.3-22 Continued.

## (2) ASWと低域通過処理をした両耳間相関度の関係

先の考察で、耳入力信号の約1600Hz以上の成分の処理が重要であること、すなわち、両耳間相関処理の前段に何らかの信号処理が必要であることを述べた。ここでは工学的な見地から、Fig.3-23に示すように内耳の信号処理機能を遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタで第一次近似したモデルを用いて両耳間相関度を算出し、ASWとの対応を検討する。

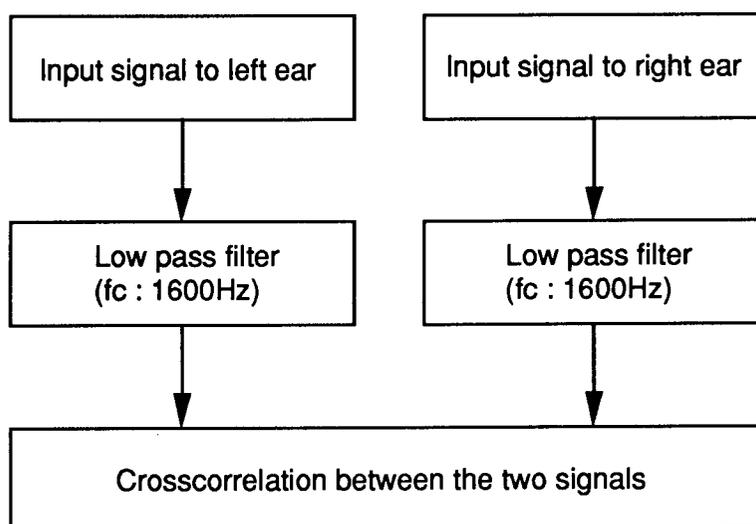


Fig.3-23 Calculation model of degree of interaural crosscorrelation with low pass filter.

従来の両耳間相関度ではASWと対応関係が得られない 200-4kHz および 200-8kHzの刺激について、KEMAR疑似頭により收音した耳入力信号をデジタルフィルタ(遮断周波数 1600Hz, 過渡特性 -192dB/Oct.)で高域遮断した後、左右の信号の相互相関度を算出した。こうして求めた両耳間相関度とASWの関係をFig.3-24に示す。●がASWの心理的距離尺度、○が高域を遮断して求めた両耳間相関度である。この方法で求めた両耳間相関度は、どちらの広帯域ノイズにおいてもASWと負の相関関係にある。

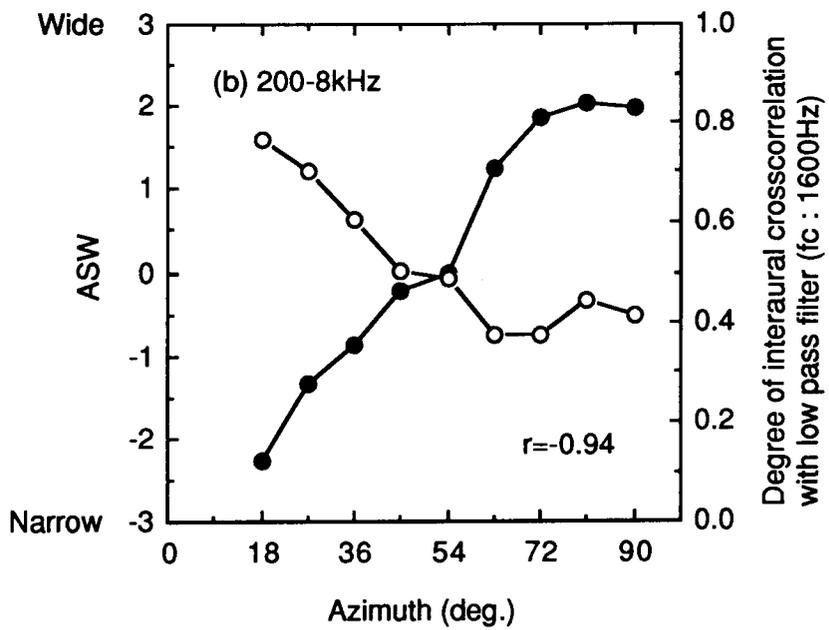
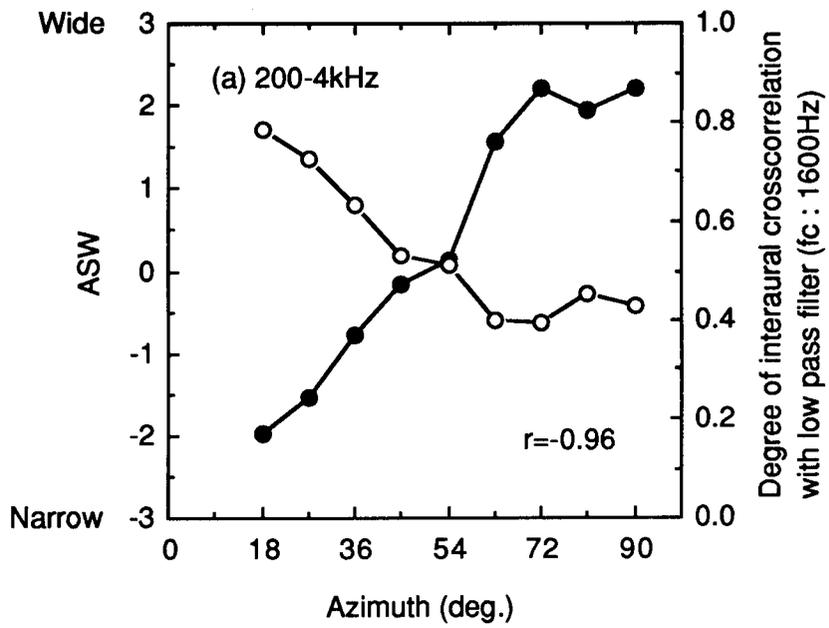


Fig.3-24 Relation between ASW and degree of interaural crosscorrelation.  
 ●, ASW ; ○, degree of interaural crosscorrelation with low pass filter.

さらに、ASWと両耳間相関度の相関係数を求め、両者に相関関係があるか否かの検定を行った。Table 3-10 にその結果を示す。森本ら(1990b)の方法で測定した両耳間相関度では、200-8kHzではASWと相関があるとはいえない。また、200-4kHzの場合は、有意水準5%で相関があるとみなせるが、ASWの距離尺度の変化幅4.21に対して両耳間相関度の変化幅は0.046であり、評価尺度として用いるには測定精度上無理がある。これに対して、新しく提案した測定方法による両耳間相関度は、いずれの帯域においても有意水準1%で相関があるとみなせる。また、両耳間相関度の変化幅も十分大きい。

以上の結果から、耳入力信号が1600Hz以上の高域信号を含む場合のASWは、1600Hz以上の成分を遮断して求めた両耳間相関度で評価する必要があるといえる。ただし、このようにして測定した両耳間相関度で評価できるのは、音源に同一の広帯域信号を用いた場合の音場間のASWの大小関係だけであり、異なる音源を用いた場合の音源信号間のASWの大小を比較することはできない。任意の音源信号を用いた場合のASWの大きさを両耳間相関度から求めるためには、Ueda *et al.*(1992)が試みているように、各臨界帯域で求めた両耳間相関度からASWの大きさを評価する方法を確立する必要がある。

Table 3-10 Correlation coefficient between ASW and degree of interaural crosscorrelation.

Method of calculating degree of interaural crosscorrelation	Frequency range of source signal (Hz)			
	200 - 1k	200 - 2k	200 - 4k	200 - 8k
without low pass filter	-0.96**	-0.97**	-0.69*	-0.47
with low pass filter (fc : 1600Hz)	—	—	-0.96**	-0.94**

\*\* p < 0.01, \* p < 0.05

### 3.7.3 結論

1. 音源信号が広帯域雑音の場合、帯域幅が 200 - 1kHz および 200 - 2kHz の場合は従来の両耳間相関度とASWの間に負の相関関係が認められるが、帯域幅が 200 - 4kHz および 200 - 8kHz の場合は負の相関関係は得られない。したがって、このような音源を用いた場合のASWの評価に従来の両耳間相関度を用いることはできない。
2. しかし、工学的な見地から内耳の信号処理機能を遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタで第一次近似して、耳入力信号の1600Hz以下の成分だけを用いて算出した両耳間相関度とASWには、200-4kHzおよび200-8kHzの音源においても負の相関関係が得られる。したがって、広帯域信号を用いた場合の両耳間相関度の測定法としては、耳入力信号の1600Hz以下の成分だけを用いる方法が妥当である。ただし、このようにして測定した両耳間相関度で評価できるのは、音源に同一の広帯域信号を用いた場合の音場間のASWの大小関係だけであり、異なる音源を用いた場合の音源信号間のASWの大小を比較することはできない。任意の音源信号を用いた場合のASWを両耳間相関度から求めるためには、各臨界帯域で求めた両耳間相関度からASWを評価する方法を確立する必要がある。

### 3.8 第3章のまとめ

両耳間相関度をASWの評価指標として任意の音場に適用するうえで解決すべき4つの課題について音響心理実験を行い、以下のことを明らかにした。

(1) 第一波面の法則の成否にかかわらず、両耳間相関度でASWを評価できるか否かについて。

1. 両耳間相関度が等しくても、第一波面の法則が成立する上限を越える反射音が形成するASWは、同法則の成立範囲内にある同じ音圧レベルの反射音が形成するASWよりも小さくなる。つまり、第一波面の法則が成立しない場合のASWの評価に、同法則が成立する場合と同じように両耳間相関度を適用することはできない。
2. 反射音が第一波面の法則が成立する上限を越える場合、その反射音の第一波面の法則が成立する範囲内に含まれる部分だけがASWの形成に寄与する。したがって、ASWを評価するためには、その部分だけを用いて両耳間相関度を求める必要がある。

(2) 入射音構造が空間的に異なる任意の音場において、両耳間相関度でASWを評価できるか否かについて。

1. 両耳間相関度が一定であれば、反射音の到来方向にかかわらず、ASWは一定である。つまり、反射音の到来方向にかかわらず、両耳間相関度でASWを評価できる。
2. しかし、両耳間相関度が等しくても、直接音が正面以外の方向から到来する場合は正面から到来する場合に比べてASWは小さくなるので、直接音が正面から到来する場合と同じように評価することはできない。

(3) 音源が音楽信号の場合の、ASWに関する両耳間相関度の弁別限について。

1. 音楽信号を用いた場合のASWに関する両耳間相関度の弁別限は、両耳間相関度が0.50の基準音場に対してASWがより狭いと知覚する場合で0.12、より広がっていると知覚する場合で0.10であり、0.70の基準音場に対しては、それぞれ0.06と0.09、0.90の基準音場に対しては、どちらも0.03である。
2. ここで求めた弁別限に関しては Weberの法則が成立し、Weber 比は0.20 - 0.30である。

(4) ASWの評価指標としての両耳間相関度の測定方法について。

1. 音源信号が広帯域雑音の場合、帯域幅が 200 - 1kHz および 200 - 2kHz の場合は従来の両耳間相関度とASWの間に負の相関関係が認められるが、帯域幅が 200 - 4kHz および 200 - 8kHz の場合は負の相関関係は得られない。したがって、このような音源を用いた場合のASWの評価に従来の両耳間相関度を用いることはできない。
2. しかし、工学的な見地から内耳の信号処理機能を遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタで第一次近似して、耳入力信号の1600Hz以下の成分だけを用いて算出した両耳間相関度とASWには、200-4kHzおよび200-8kHzの音源においても負の相関関係が得られる。したがって、広帯域信号を用いた場合の両耳間相関度の測定法としては、耳入力信号の1600Hz以下の成分だけを用いる方法が妥当である。ただし、このようにして測定した両耳間相関度で評価できるのは、音源に同一の広帯域信号を用いた場合の音場間のASWの大小関係だけであり、異なる音源を用いた場合の音源信号間のASWの大小を比較することはできない。任意の音源信号を用いた場合のASWを両耳間相関度から求めるためには、各臨界帯域で求めた両耳間相関度からASWを評価する方法を確立する必要がある。

## 第4章 両耳聴信号処理モデルを用いた音場シミュレーション

音場シミュレーションの目的は、受聴者に原音場で知覚される音像と弁別不可能な音像を再生室において知覚させることである。1.2節で述べたように、従来提案されている方法は、合成音場によるシミュレーションと耳入力信号のシミュレーションの2つの方法に分類できるが、いずれの方法もその目的を達成するには至っていない。

合成音場を用いた音場シミュレーションにより原音場を無響室などの空間に再現するためには、原音場の受聴点における入射音構造、つまりFig.1-1の音環境評価システムにおける $S(\omega) \times R(\omega)$ と入射方向をシミュレートしなければならない。換言すると、全ての入射音について音圧振幅、到達時間、周波数特性、および入射方向を正確に再生する必要がある。初期の離散的反射音に関しては比較的容易にこれらを求めることが可能であるが(Yamasaki and Itow 1989 およびSekiguchi *et al.*1992)、後期残響部の入射音に関してはそれらを正確に求めることは困難である。

また、耳入力信号のシミュレーションは、受聴者の両耳への入力信号が原音場における入力信号と一致するように再生する方法である。換言すると、Fig.1-1の音環境評価システムにおける $P_{l,r}(\omega)$ をシミュレートする方法である。この方法では、收音に用いる疑似頭と受聴者の頭部伝達関数の違いが問題となる。原理的には、いかなる疑似頭を用意しても各受聴者が固有の頭部伝達関数をもっているので收音側と再生側の誤差は避けられない。その結果、音像の頭内定位や前後の誤判定が生じることがある。

本章では、このような、従来の音場シミュレーションの問題点を解決する1つの方法として、時系列両耳間相互相関関数(RCC: running interaural crosscorrelation)を中心とした両耳聴信号処理モデルを設定し、それに基づいた新たなシミュレーション方法を提案する。これは、受聴者が音場において要素感覚を知覚する手掛かり(Cue)をシミュレートする方法、すなわちFig.1-1の音環境評価システムにおける $D_i$ の知覚のCueをシミュレートする方法である。次に、この方法によるシミュレーション精度を明らかにする。さらに、ASWをシミュレートするのに必要なスピーカーの個数とその配置方法について検討する。

## 4.1 シミュレーションの原理

まず、両耳聴信号処理モデルに関する従来の研究を概観する。Jeffress(1948), Licklider(1956), および Sayers and Cherry(1957)は、いずれも「聴覚システムが音像の形成に耳入力信号の時系列両耳間相互相関処理を利用している」という仮説を立て、その仮説に基づいた両耳聴信号処理モデルを提案している。

その後、Blauert and Cobben(1978)は、このモデルにFig.4-1に示すような内耳の信号処理機能を加えたモデルを提案している。この図において、band-passは蝸牛を、rectifierは有毛細胞を、low-passは神経細胞をそれぞれモデル化したものである。彼らはこのモデルによりlateralizationなどの現象を説明できることを示した。

また、Lindemann(1986)は側方抑制(contralateral inhibition)のメカニズムを加えたモデルを提案し、それにより第一波面の法則が説明できることを示している。

本研究では、これらの研究成果を参考にしてFig.4-2に示すような、外耳モデル、内耳モデル、時系列両耳間相互相関機構で構成される簡易モデルを設定して、以下に示す方法で入射方位角を算出する。

- (1) まず、原音場において音源から受聴者の外耳道入口までのインパルス応答 $hl(\xi)$ ,  $hr(\xi)$ を求める。原音場が実在する場合は疑似頭を用いて測定する。設計段階などで、原音場が実在しない場合は予測計算により求める。
- (2)  $hl(\xi)$ ,  $hr(\xi)$ に内耳の信号処理を施した $hl'(\xi)$ ,  $hr'(\xi)$ を求める。
- (3) 正規化時系列両耳間相互相関関数 $\phi_{lr}(t, \tau)$ を以下のように求める。

$$\phi_{lr}(t, \tau) = \frac{\int_{-\infty}^t hl'(\xi) hr'(\xi - \tau) G(\xi) d\xi}{\left[ \int_{-\infty}^t hl'^2(\xi) d\xi \int_{-\infty}^t hr'^2(\xi) d\xi \right]^{1/2} \left[ \int_{-\infty}^t G^2(\xi) d\xi \right]^{1/2}}$$

for  $|\tau| \leq 680\mu\text{s}$

(4-1)

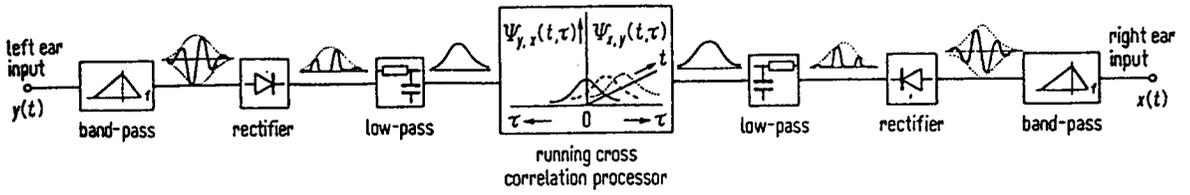


Fig.4-1 Schematic diagram of the binaural cross correlation model, after Blauert and Cobben(1978).

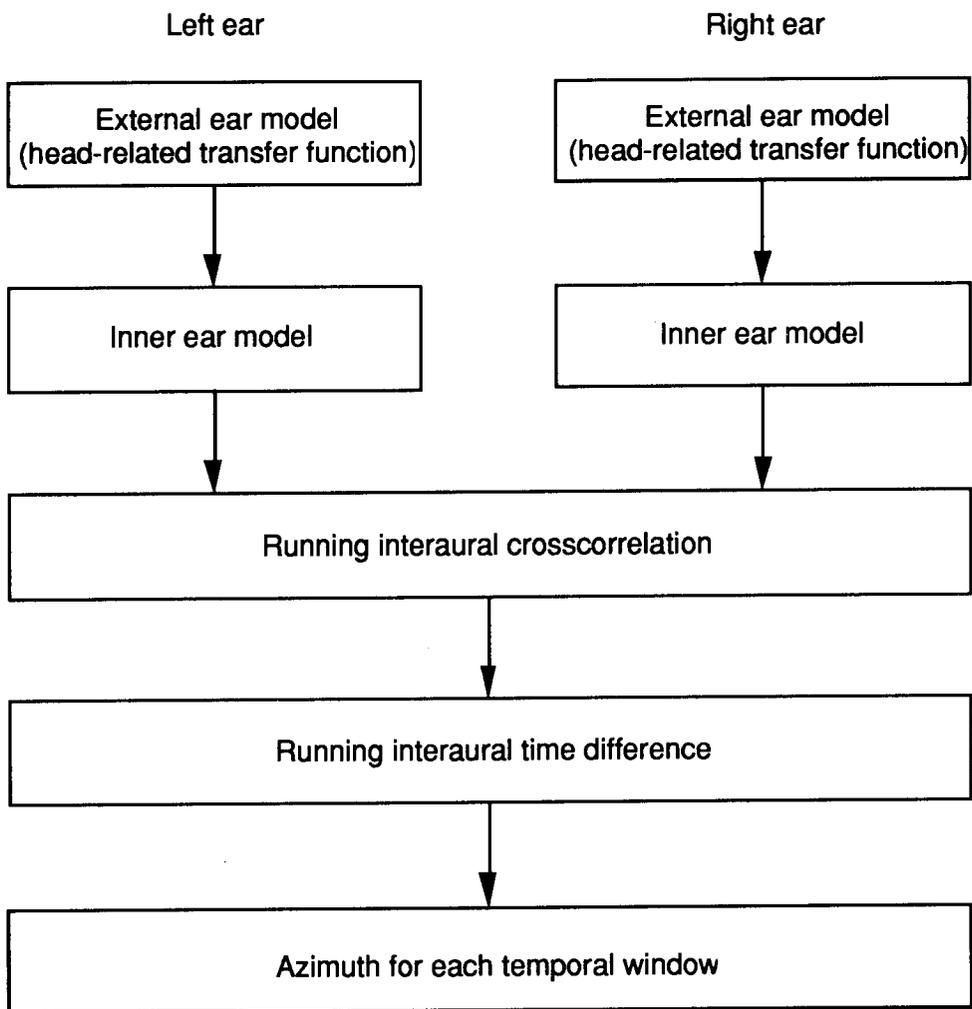


Fig.4-2 Binaural signal processing model for sound field simulation.

ただし,

$hl'(\xi)$  : 内耳におけるインパルス応答(左耳)

$hr'(\xi)$  : 内耳におけるインパルス応答(右耳)

$\tau$  : 両耳間時間差

$G(\xi)$  : 聴覚の時間窓関数

(4) 時系列両耳間時間差  $RTD(t)$  を式4-2より求める.

$$RTD(t) = \tau \quad \text{for } |\phi_{lr}(t, \tau)|_{\max} \quad (4-2)$$

(5) 時系列入射方位角  $\psi(t)$  は  $RTD(t)$  と Fig.4-3 に示すような関係にある. したがって, 式4-3により求められる.

$$\psi(t) + \sin \psi(t) = 2C \times RTD(t) / D \quad (4-3)$$

ただし,

$\psi(t)$  : 時系列入射方位角(rad.)

$C$  : 音速

$D$  : 両耳間距離

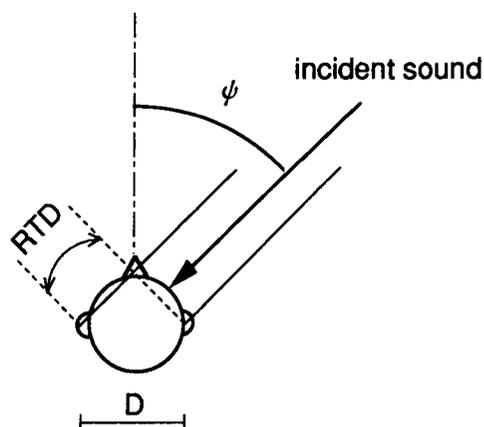


Fig.4-3 Schematic illustration of relation between incident azimuth and interaural time difference.

## 4.2 シミュレーションの可能性の検証

直接音到達後200ms以内の離散的反射音だけで構成される原音場を無響室内に作成し、時系列両耳間相互相関関数(RCC)に基づいたシミュレーション方法で音像がシミュレートできるか否か、その可能性を検証する。

### 4.2.1 多次元尺度構成法を用いた非類似度実験

多次元尺度構成法を用いて、原音場とシミュレーション音場の心理空間における非類似度を求める。

#### (1) シミュレーション方法

原音場のインパルス応答を疑似頭(Neumann KU81i)で測定し、4.1節で示した方法で各時間窓の入射方位角を求めた。シミュレーション音場の方向別インパルス応答作成の模式図をFig.4-4に示す。ただし、シミュレーション音場では配置できるスピーカーの個数が制限されるため、求めた入射方位角は最も近いスピーカーの方位角に丸めた。この場合の丸め誤差の許容範囲、すなわちスピーカーの個数とその配置方法については、4.6節で改めて検討する。

時系列両耳間相互相関関数の算出(式4-1)に用いた時間窓関数 $G(\xi)$ は、工学的見地より式4-4に示すような矩形窓とした。

$$G(\xi) = \begin{cases} 1 & \text{for } t - DTW \leq \xi \leq t \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-4)$$

ただし、

DTW：時間窓関数の継続長

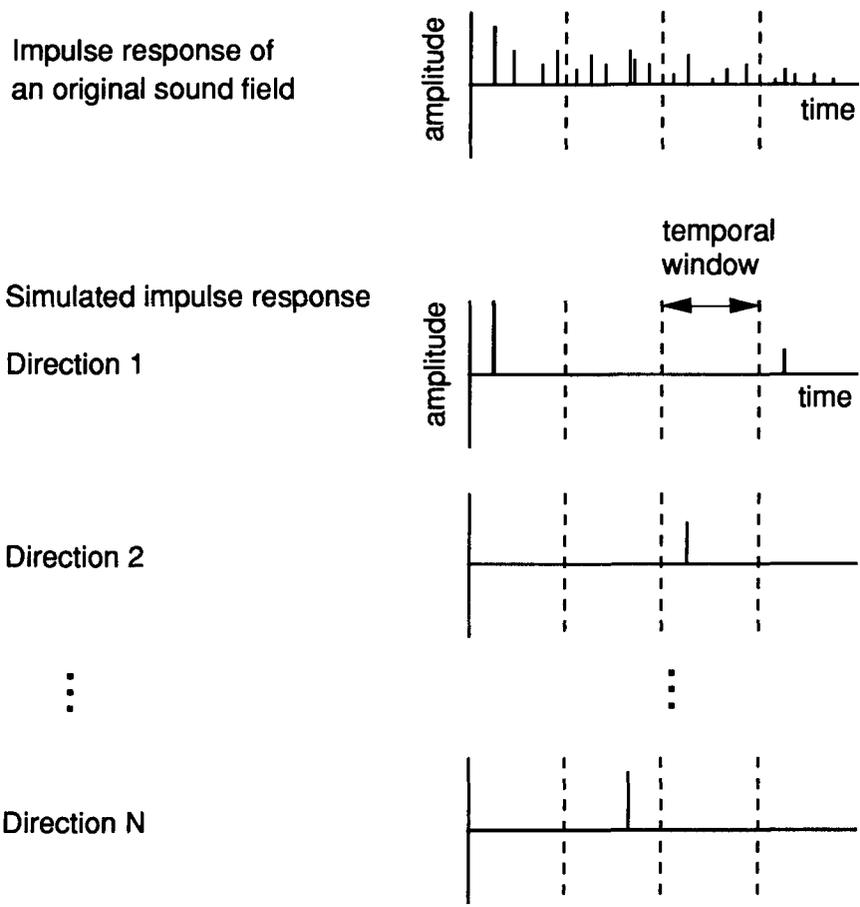


Fig.4-4 Schematic diagram of creating directional impulse responses of simulated sound field.

また、時間窓は時間軸上で重ならず、前の時間窓が終了する時間に次の時間窓が開始されるように移動させた。なお、本実験で用いた疑似頭(Neumann KU81i)には外耳道や耳介による顕著な共振特性はみられないので、内耳の信号処理過程は省略した。

シミュレーション音場では、原音場の各時間窓内の応答を1本の入射音で代表させた。つまり、時系列両耳間相互相関関数を算出する時間窓1つにつきシミュレーション音場の入射音を1本作成した。入射音の到達時刻は、各時間窓で最大振幅をとる時間とし、音圧レベルはRobinson and Whittle(1960)の両耳加算式に基づいて、(式4-5)により求めた。

$$L_{\text{sim}}(i) = 6 \cdot \log_2(2^{L_l(i)/6} + 2^{L_r(i)/6}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-5)$$

ただし,

- $L_{\text{sim}}(i)$  : シミュレーション音場の時間窓  $i$  を代表する入射音の音圧レベル
- $L_l(i)$  : 原音場の時間窓  $i$  の左耳における音圧レベル
- $L_r(i)$  : 原音場の時間窓  $i$  の右耳における音圧レベル
- $i$  : 時間窓番号

## (2) 実験方法

### A. 音源信号

音源信号として、無響室録音のヴァイオリン独奏曲 Saint-Saens, Introduction et Rondo Capriccioso の第4-6小節、約7秒間を用いた。

### B. 原音場

原音場は、直接音と初期200msまでの66本の離散的反射音で構成される音場である。Fig.4-5(a)に原音場のインパルス応答を示す。反射音の振幅と遅れ時間は、ウィーンの楽友協会大ホールで測定したインパルス応答の初期200msまでを参考にして決定した。直接音は正面方向から到来するが、反射音の方位角は、Fig.4-5(b)に示すように8方向(0, ±15, ±30, ±45, +60°)にランダムに振り分けた。

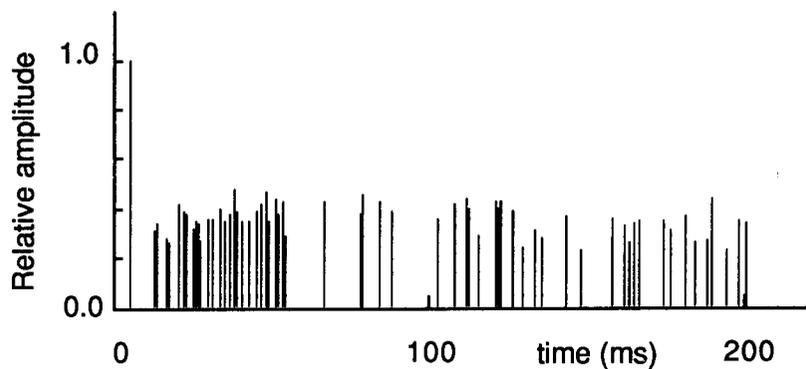


Fig.4-5(a) Impulse response of an original(to be simulated) sound field.

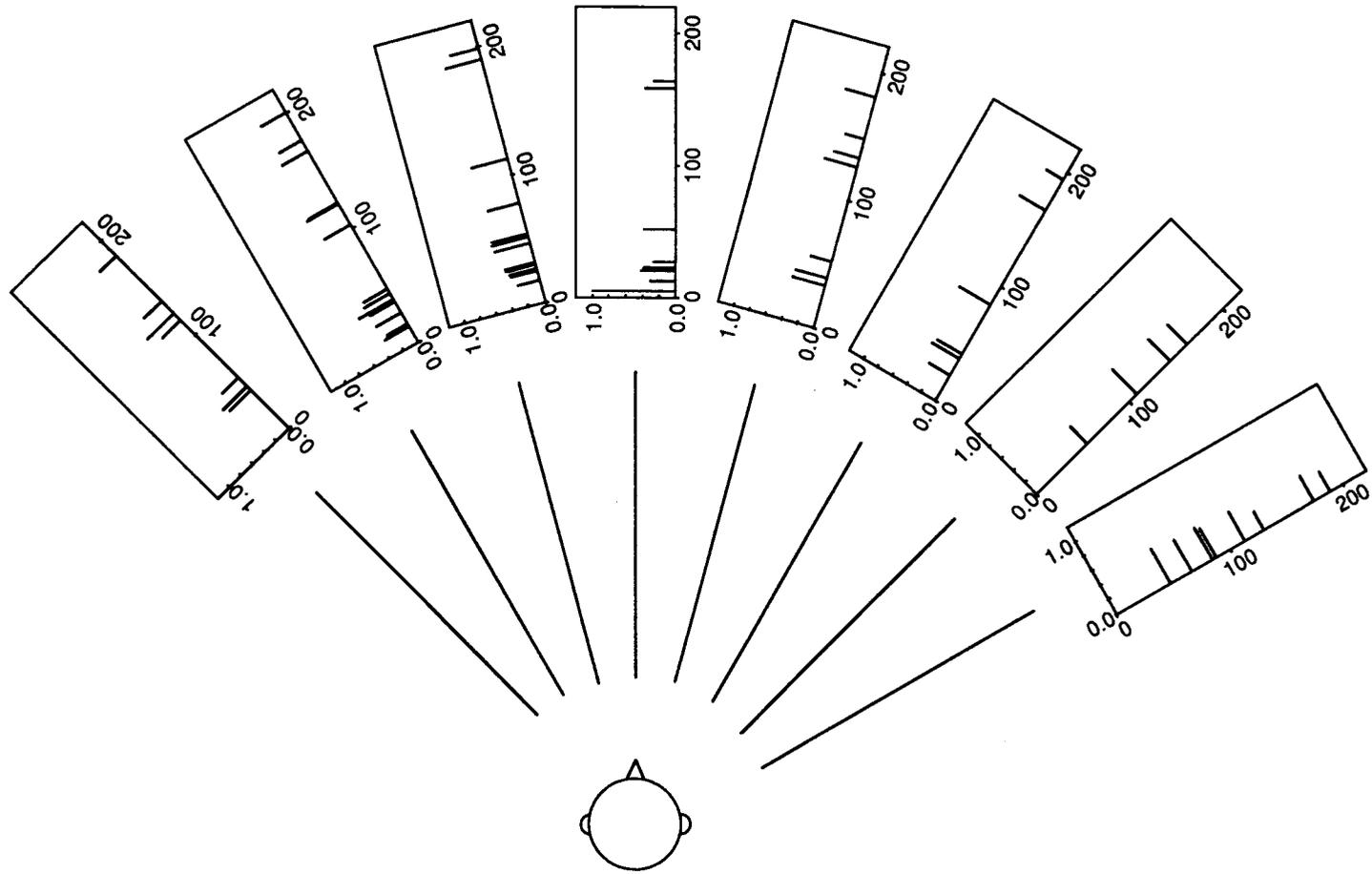


Fig.4-5(b) Loudspeaker arrangement of an original (to be simulated) sound field.

### C. シミュレーション音場

8種類のシミュレーション音場を作成した。このうち4種類は、無響室内に作成した原音場のインパルス応答を疑似頭(Neumann KU81i)で測定し、前述の時系列両耳間相互相関関数に基づいた方法(RCC法)で作成したシミュレーション音場である。ただし、時間窓の継続長を5, 10, 20, 40msと変化させた。これらのシミュレーション音場をそれぞれRCC40, RCC20, RCC10, RCC5と呼ぶ。音場の名前に付けられた数字は入射音の本数を示している。

残りの4音場は、RCC法と比較するために、原音場から振幅の大きい順に選択した入射音で構成した(CGR: Choose the Greatest Reflections)シミュレーション音場である。選択した入射音の本数は、40, 20, 10, 5本であり、それぞれCGR40, CGR20, CGR10, CGR5と呼ぶ。例えば、CGR40は67本の入射音で構成されている原音場のうち、振幅の大きい40本の入射音を正確にシミュレートした音場である。

8種類のシミュレーション音場の構成をTable 4-1に、それぞれの時間的構造をFig.4-6に示す。CGR法によるシミュレーション音場の構造は、入射音線数が増すに従って原音場の構造に近づくことが示されているが、RCC法によるシミュレーションの場合は、原音場に類似の構造をもつ音場はない。

Table 4-1 Eight kinds of simulated sound fields.

Method	running crosscorrelation				choose the greatest reflections			
Simulated sound field	RCC40	RCC20	RCC10	RCC5	CGR40	CGR20	CGR10	CGR5
Number of reflections	40	20	10	5	40	20	10	5
Duration of temporal window (ms)	5	10	20	40	—	—	—	—

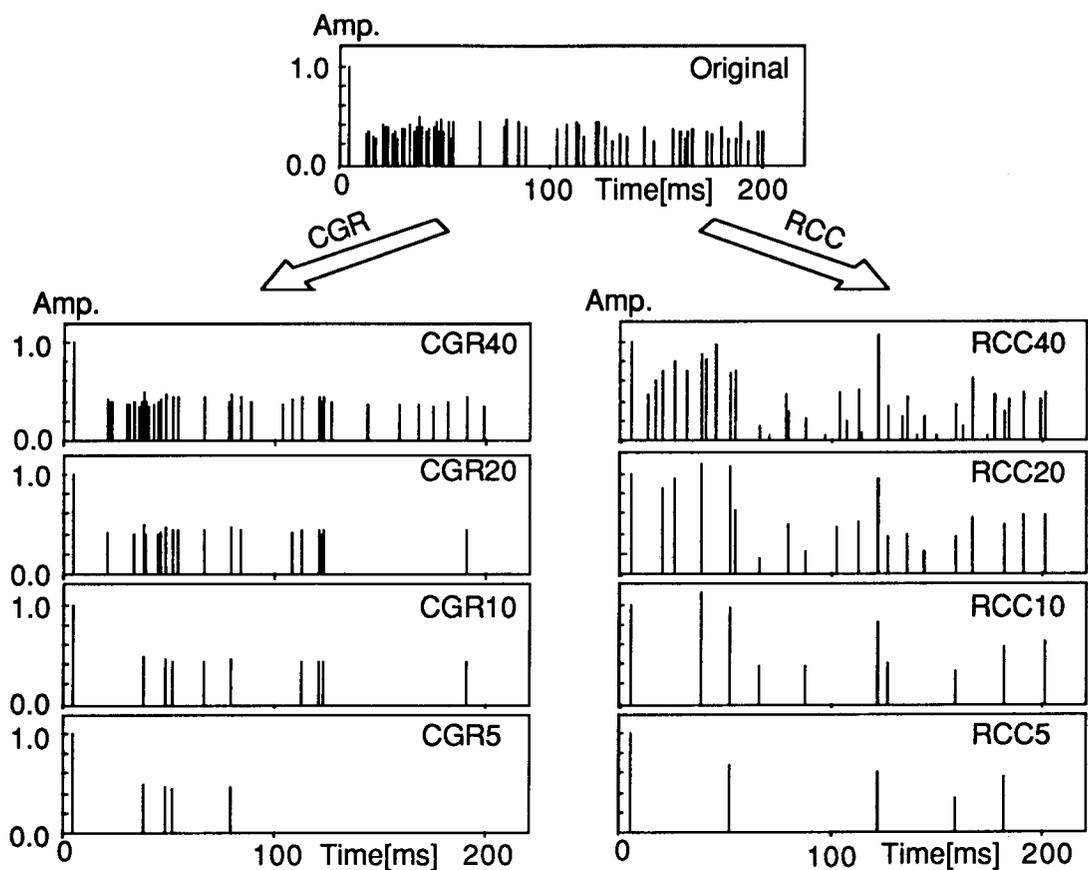


Fig.4-6 Temporal structure of an original sound field and simulated sound fields created by the RCC method(right) and the CGR method(left).

#### D. 刺激の提示方法と回答方法

原音場と8種類のシミュレーション音場の計9種類の音場の8方向のインパルス応答と音源信号の畳み込み積分を実時間畳み込み演算装置(RAMSA WZ-DF28)で行って9種類の刺激を作成した。9種類の刺激から異なる2種類を選ぶ全ての組み合わせ36対と、回答の信頼性を検討するために同一の音場を組み合わせた9対を加えた45対をランダムに提示した。なお、実験の始めに3種類の音場対を練習用として提示した。この3種類の音場対は、(1)原音場対、(2)原音場とCGR5、(3)原音場とRCC5である。

提示音圧レベルは、疑似頭により測定した両耳ラウドネス(Robinson and Whittle 1960)が 83.0dB(時定数:slow, RMSの最大値)で一定である。刺激と刺激の間隔は1秒、対と

対の間隔は4秒である。1回の実験時間は約16分である。1人の被験者につき2回実験を行った。

被験者には、対になった刺激の音像の非類似度をTable 4-2に示す5段階で回答させた。

Table 4-2 Categories for dissimilarity judgements.

Two sound images are
1 : not different
2 : a little different
3 : different
4 : fairly different
5 : extremely different

#### E. 被験者

被験者は、22-26才の男子学生12名である。

### (3) 実験結果と考察

まず始めに、被験者の非類似度判定について以下の3つの基準で検定を行った。

#### 1) 判断の信頼性

同一音場対を類似した音場と判定すること。

#### 2) 判断の再現性

1回目の実験の回答と2回目の実験の回答に高い相関関係があること。

#### 3) 判断の一致性

どの2人の被験者の回答についても高い相関関係があること。

本実験では、1)については非類似度判定の回答の平均値が2(やや異なる)以下であり、2) 3) に関しては相関係数が0.7以上(肥田野ら1961)であることを条件とした。この条件に適合する回答を行った被験者は4名であった。そこで、この4名の回答を合わせてKruskal(1964a,b)の多次元尺度構成法で心理空間を解析した。ただし、同一音

場対および練習用の対は除外した。解析には大阪大学産業科学研究所で作成されたプログラムを用いた。Fig.4-7に示すように、ストレスは2次元で急激に減少して4.7%となり、その後は緩やかに減衰している。ストレス4.7%はKruskal(1964a)が提案する適合度(Table 4-3)では "good" に相当するので、この場合は2次元布置が妥当であると判断した。

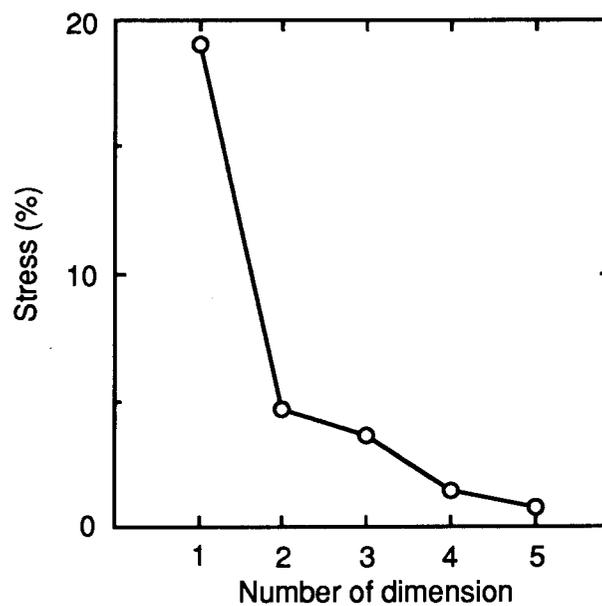


Fig.4-7 Stress curve

Table 4-3 Relation between stress and goodness of fit, after Kruskal(1964a).

Stress (%)	Goodness of fit
20	poor
10	fair
5	good
2.5	excellent
0	perfect

音場の2次元布置をFig.4-8に示す。ここでは原音場を原点とした。2つの軸は任意に設定することが可能であり、特別な意味はない。それぞれの音場の距離は音場間の非類似度を示している。RCC法でシミュレートした音場の括弧内の数値は、時系列両耳間相互相関関数を算出するときに用いた時間窓の継続長である。

全てのシミュレーション音場のうち、最も原音場に近く布置されたのはRCC20であった。このことは、入射音構造が物理的に原音場に最も近いシミュレーション音場(CGR40)よりも、両耳聴信号処理モデルに基づいて20本の入射音でシミュレートした音場(RCC20)の方が、より原音場に類似した音像をシミュレートできることを示している。また、RCC20と原音場の刺激対の非類似度判定の平均評定値は1.63であり、これはTable 4-2の評価カテゴリーにおいて”全く差がない”と”やや差がある”の間である。したがって、67本の離散的入射音で構成される原音場において知覚される音像とほとんど同じ音像が、RCC法でシミュレートした20本の入射音で構成される音場で知覚されるといえる。すなわち、時系列両耳間相互相関関数(RCC)を中心とした両耳聴信号処理モデルを用いた方法は原音場で知覚される音像をシミュレートできる可能性がある。

ここで、RCC法およびCGR法のそれぞれの方法についてシミュレーション音場の布置について考察する。CGR法によるシミュレーション音場は、入射音の本数の多い順に布置されている。つまり、この方法でシミュレーション精度を向上させるためには、できるだけ多くの入射音を正確に再生する必要がある。しかし、任意の原音場を十分な精度でシミュレートするためには何本の入射音を再生する必要があるか、それを決定する科学的根拠は得られない。また、この方法では原音場の全ての入射音の音圧振幅、到達時間、周波数特性、および入射方向を正確に求められることが前提となっているが、本章の冒頭で述べように後期残響部の入射音に関してはそれらを正確に求めることはできない。

これに対して、RCC法のシミュレーション音場は時間窓の継続長が10ms,5ms,20ms,40msの順に布置されている。これに対応する入射音の本数は、それぞれ20本,40本,10本,5本である。したがって、RCC20が最も原音場に近く布置された理由は入射音の本数ではなく、時系列両耳間相互相関関数で用いた時間窓の継続長が適切であったためであると考えられる。以上の結果は、適切な時間窓を設定すれば、RCCに基づく方法で原音場で知覚される音像を精度よくシミュレートできる可能性を示唆している。

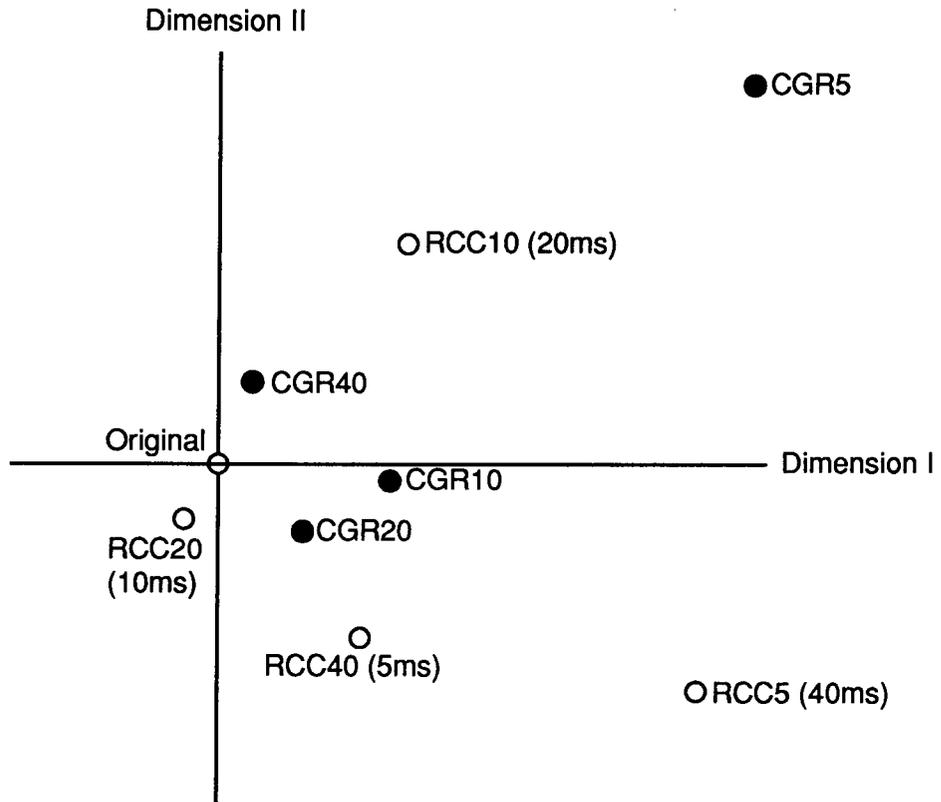


Fig.4-8 Two-dimensional configuration of an original sound field and eight simulated sound fields. The numeric in sound field names represents the number of reflections, and the time in the bracket is the duration of the temporal window.

## 4.2.2 評価語を用いた一対比較実験

4.2.1項で得られた布置を解釈するために、一対比較法を用いて要素感覚に関する距離尺度を求め、重回帰分析を行った。

### (1) 実験方法

#### A. 音源信号

4.2.1項と同じ音源信号を用いた。

#### B. 原音場

4.2.1項と同じ原音場を用いた。

#### C. シミュレーション音場

4.2.1項と同じシミュレーション音場を用いた。

#### D. 刺激の提示方法と回答方法

4.2.1項と同じ刺激を用いた。また、4.2.1項と同様の方法で刺激を提示した。評価した要素感覚は、Table 4-4 に示す5種類で、これらは4.2.1項における被験者の内観報告により設定したものである。

Table 4-4 Elemental senses of sound image used in experiment.

Elemental sense of sound image
1. ASW (Auditory Source Width)
2. Direction
3. Distance
4. Reverberance
5. Softness

被験者には、対にして提示した刺激について以下のように判断させた。

1. どちらがより大きいか(ASW)
2. どちらがより右に定位しているか(方向感)
3. どちらがより遠く感じるか(距離感)
4. どちらがより響きがあるか(響き)
5. どちらがより柔らかいか(柔らかさ)

1人の被験者は、各要素感覚につき2回ずつ実験を行った。

#### E. 被験者

被験者は、4.2.1項で回答が採用された4名である。

## (2) 実験結果と考察

同一音場対および練習用の対の回答を除外して、Thurstone(1927)の比較判断の法則 Case V に従って、それぞれの要素感覚について音場間の距離尺度を構成した。

次に、4.2.1項で得られた音場の布置の座標を独立変数、本実験で得た距離尺度を従属変数として重回帰分析を行い、2次元布置に心理軸を設定した。その結果をFig.4-9に示す。各心理軸の向きは、より小さく(方向感についてはより左に)知覚する方向を表している。いずれの心理軸についても、9種類のシミュレーション音場の布置の順序は、4.2.1項で求めた音像全体の非類似度判定による布置の順序、つまり原点からの順序と一致しており、最も原点に近いRCC20は、5種類の要素感覚のいずれについても、最もシミュレーション精度が高い音場である。したがって、適切な時間窓を設定すれば、5種類の要素感覚のいずれについてもシミュレーション精度は向上する。

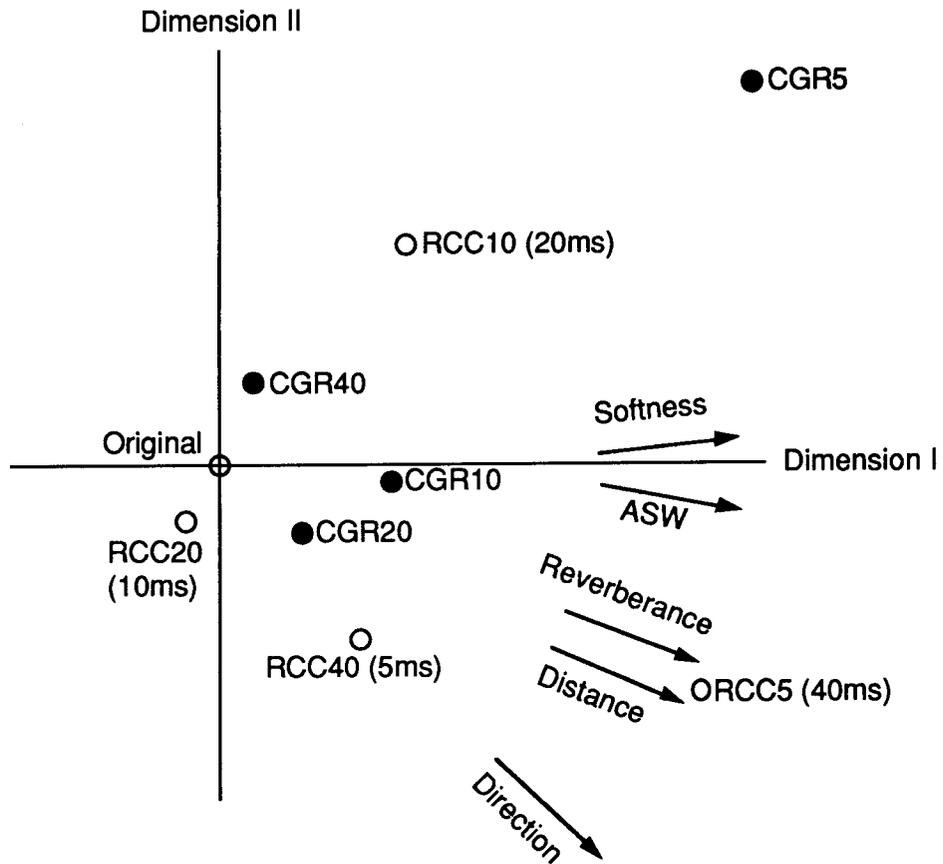


Fig.4-9 Two-dimensional configuration of nine sound fields and psychological axes obtained by multiple regression analysis. The arrow indicates the direction that the subjects perceived less concerning each characteristics of sound image.

### 4.2.3 結論

1. 原音場が離散的反射音で構成されている場合は、時系列両耳間相互相関関数を中心とする両耳聴信号処理モデルに基づいて入射方位角を決定し、インパルス応答を簡略化したシミュレーション音場でも原音場で知覚される音像とほとんど同一の音像をシミュレートすることができる。
2. 時間窓の設定が適切でなければ、本実験で検討した5種類の要素感覚(ASW, 方向感, 距離感, 響き, 柔らかさ)のいずれについてもシミュレーション精度は低いですが、適切な時間窓を設定すれば、いずれの要素感覚についてもシミュレーション精度は向上する。

### 4.3 インパルス応答の簡略化がシミュレーション精度に及ぼす影響

4.2節では、原音場が離散的反射音だけで構成されている場合は、インパルス応答を簡略化したシミュレーション音場でも原音場で知覚される音像とほとんど同一の音像をシミュレートできることを明らかにした。ここでは、原音場が残響音を含む場合に、このようなインパルス応答の簡略化を適用しても同様の結果が得られるか否かを検討する。

#### (1) シミュレーション方法

原音場のインパルス応答をKEMAR疑似頭で測定し、4.1節で示した方法で各時間窓の入射方位角を求めた。ただし、シミュレーション音場では配置できるスピーカーの個数が制限されるため、求めた入射方位角に最も近いスピーカーの方位角に丸めた。また、時系列両耳間相互相関関数の算出に用いた矩形時間窓は時間軸上で重ならず、前の時間窓が終了する時間に次の時間窓が開始されるように移動させた。

4.2節と同様に原音場の各時間窓内の応答を1本の入射音で代表させる方法でシミュレーション音場を作成した。ただし、入射音の到達時刻は、原音場で無指向性マイクロホンを用いて測定したインパルス応答が各時間窓で最大振幅をとる時間とし、音圧レベルは時間窓内の入射音のエネルギー和より求めた。

これとは別に、インパルス応答の簡略化の影響を検討するため、原音場で無指向性マイクロホンを用いて測定したインパルス応答の各時間窓内の応答を、シミュレーション音場のその時間窓内の応答として時系列両耳間相互相関関数で求めた方位角へ振り分けた。つまり、シミュレーション音場の方向別インパルス応答を時間軸上で重ね合わせると原音場で無指向性マイクロホンを用いて測定したインパルス応答と等しくなる。

以上2種類のシミュレーション方法の方向別インパルス応答作成の模式図をFig.4-10に示す。

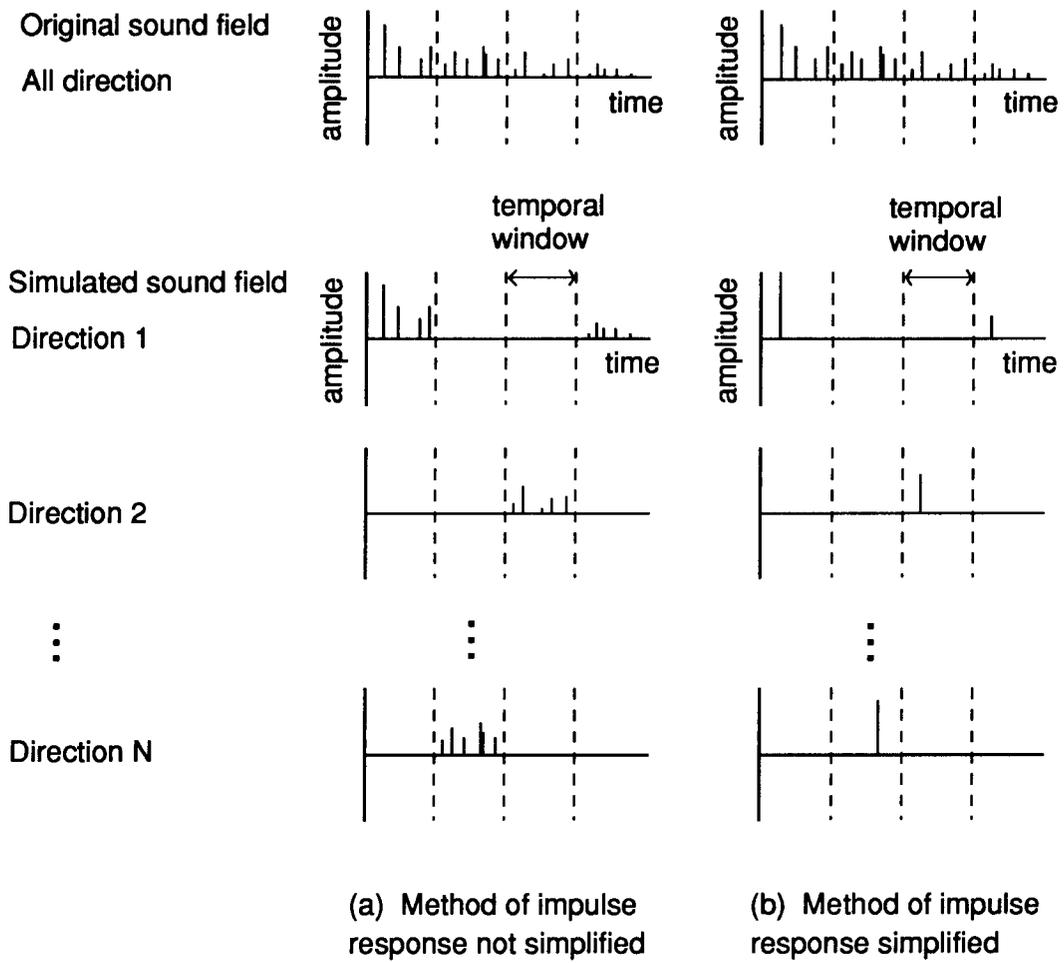


Fig.4-10 Schematic diagram of two methods of creating directional impulse responses of simulated sound field. (a), method of impulse response not simplified; (b), method of impulse response simplified.

## (2) 実験方法

### A. 音源信号

音源信号として、無響室録音のヴァイオリン独奏曲 Saint-Saens, Introduction et Rondo Capricioso の第4-6小節, 約7秒間を用いた。

### B. 原音場

原音場は、ウィーンの楽友協会大ホールの実測インパルス応答(応答長は約2秒)を用いた。入射方位角は7方向( $0, \pm 18, \pm 36, \pm 54^\circ$ )とし、各方向のインパルス応答の総和が楽友協会大ホールのインパルス応答と等しくなるようにランダムに振り分けた。ただし、直接音は正面から到来するようにした。原音場のインパルス応答およびスピーカー配置をFig.4-11に示す。また、原音場の方向別インパルス応答をFig.4-12に示す。

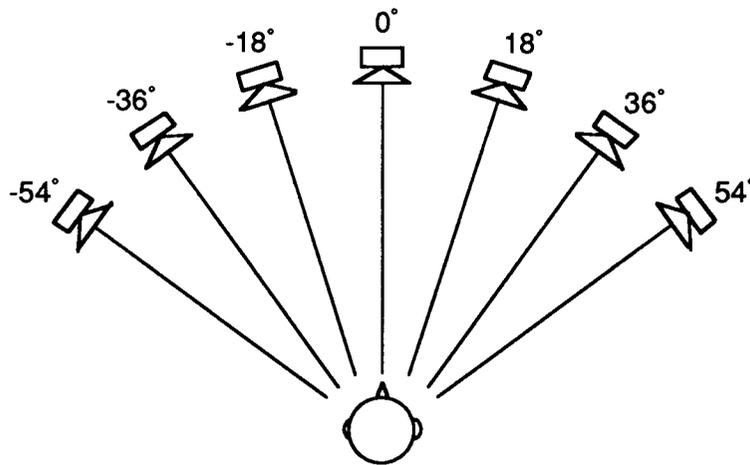
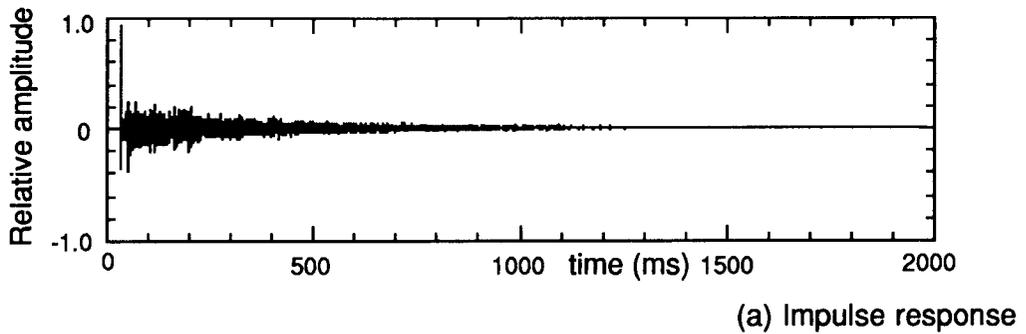


Fig.4-11 Impulse response and loudspeaker arrangement of an original sound field.

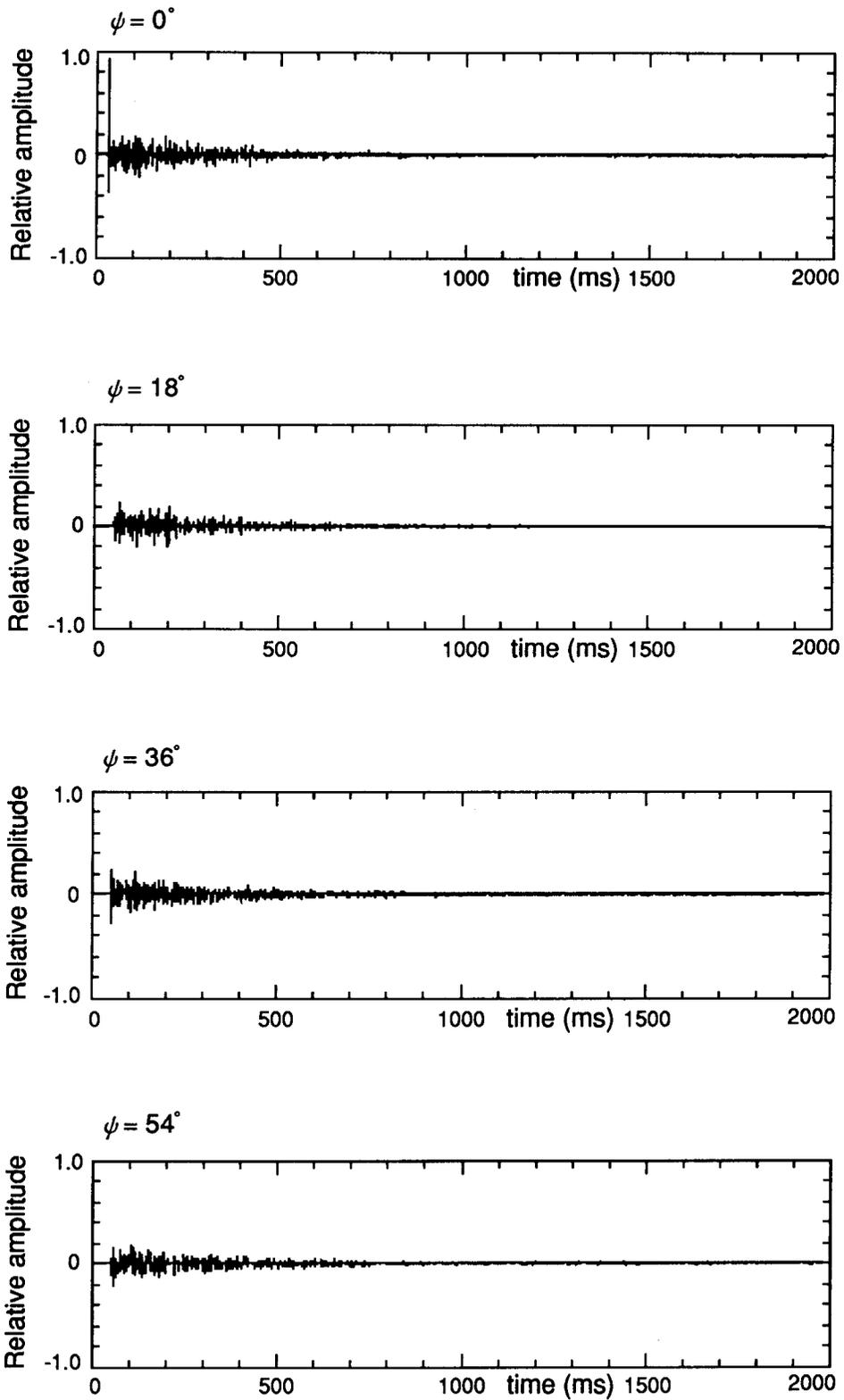


Fig.4-12 Directional impulse responses of an original sound field.

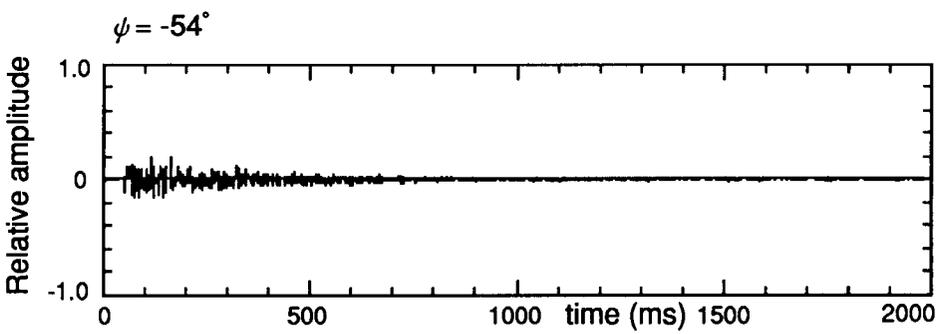
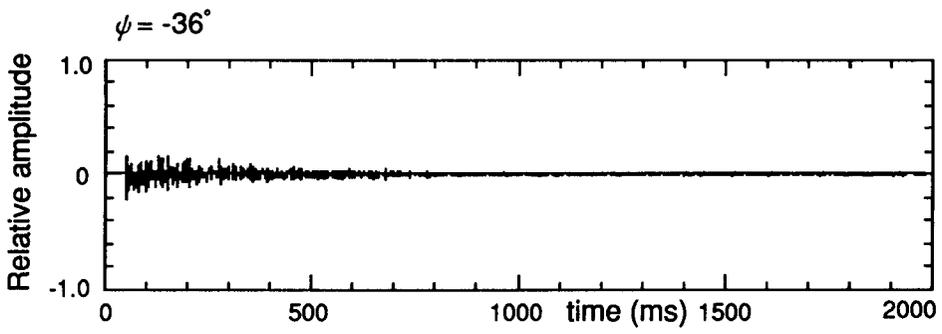
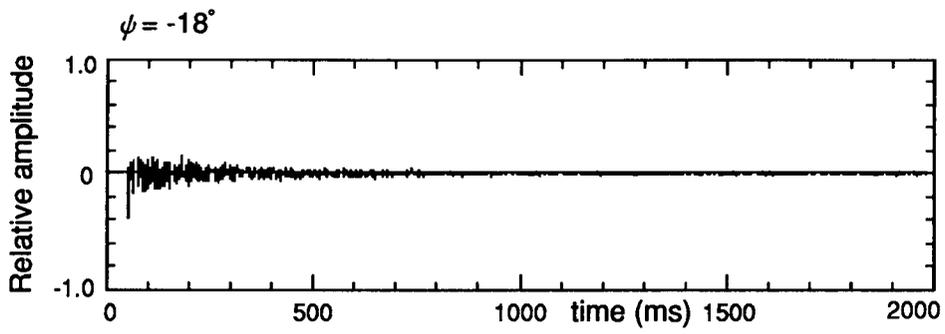


Fig.4-12 *Continued.*

### C. シミュレーション音場

シミュレーション音場は、Table 4-5に示すようなインパルス応答の簡略化の有無と時間窓の継続長をパラメータとした8音場である。また、シミュレーション音場の方向別インパルス応答の例(P2, S2)をFig.4-13に示す。

Table 4-5 Eight kinds of simulated sound fields.

Method	not simplified				simplified			
Name of simulated sound field	P2	P5	P10	P20	S2	S5	S10	S20
Duration of temporal window(ms)	2	5	10	20	2	5	10	20

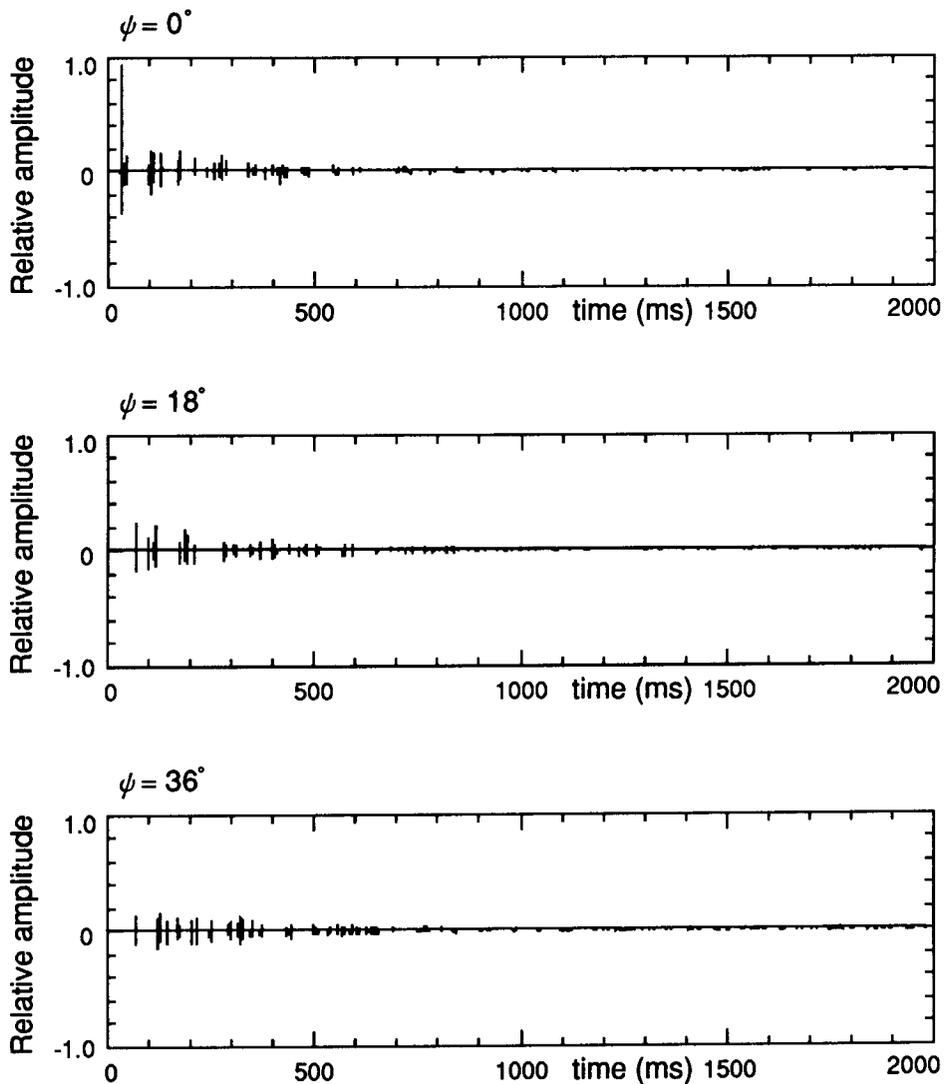


Fig.4-13(a) Directional impulse responses of simulated sound field, P2.

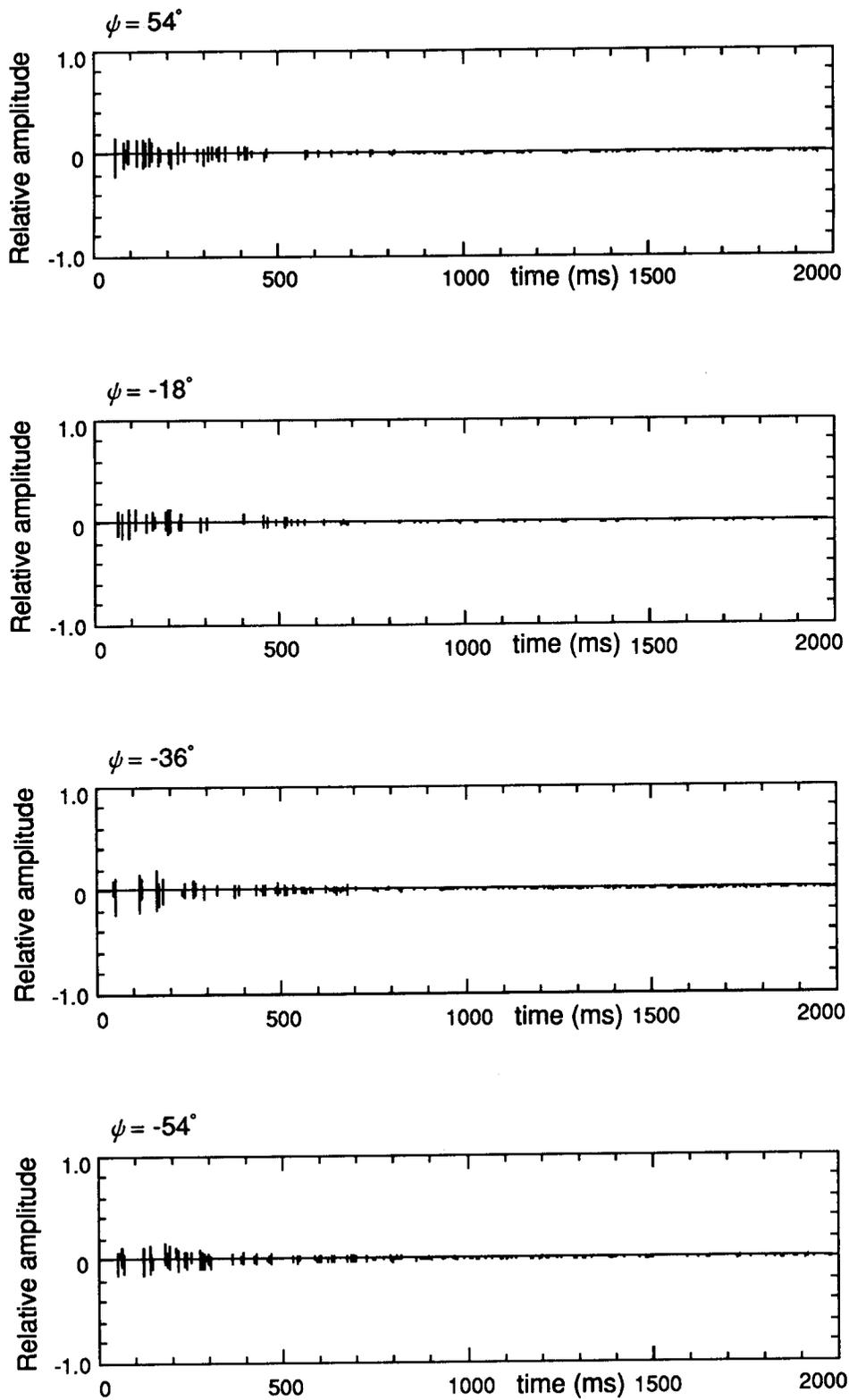


Fig.4-13(a) *Continued.*

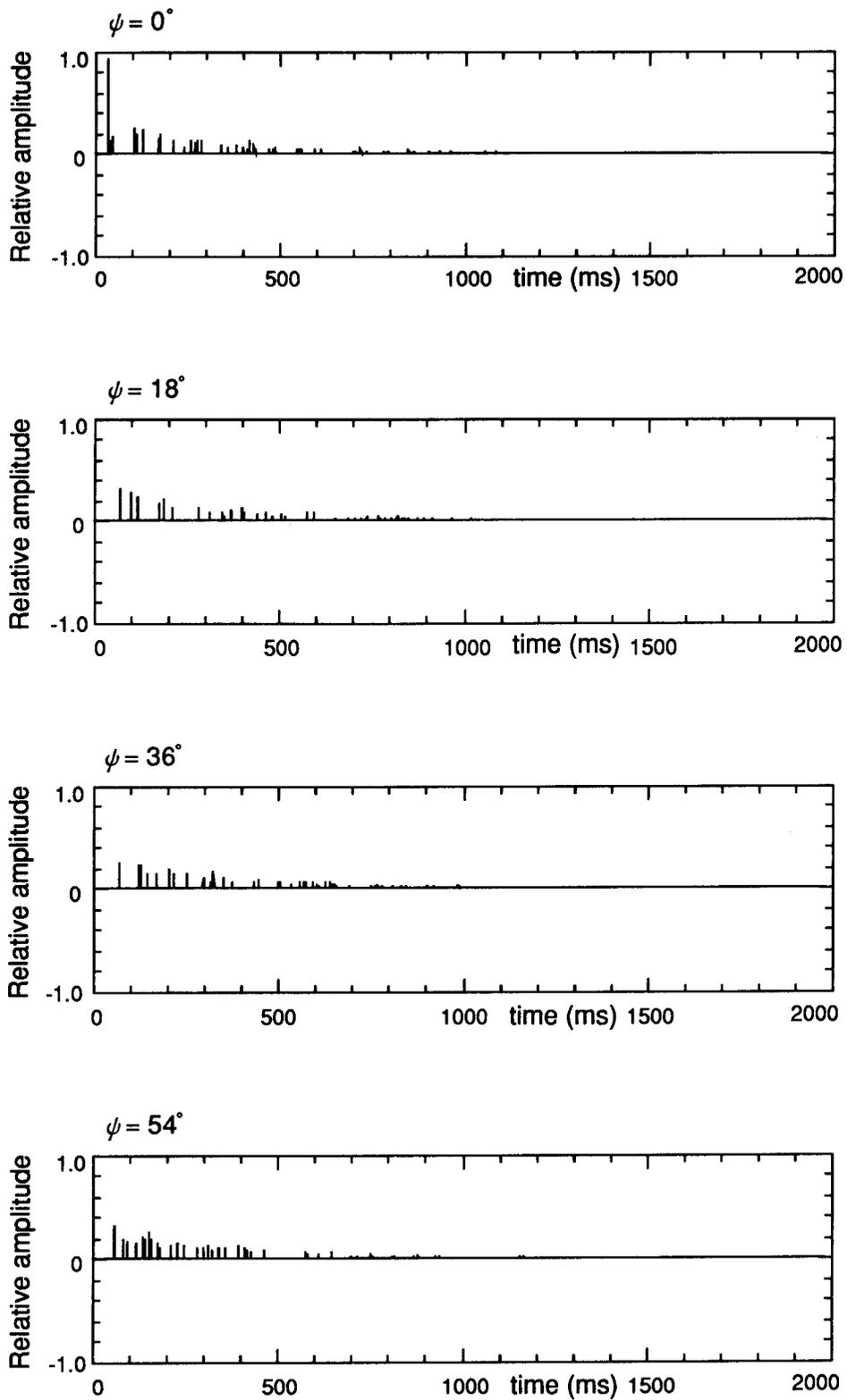


Fig.4-13(b) Directional impulse responses of simulated sound field, S2.

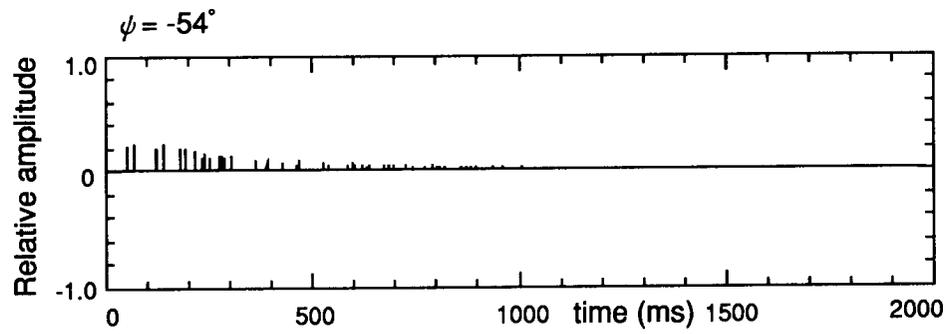
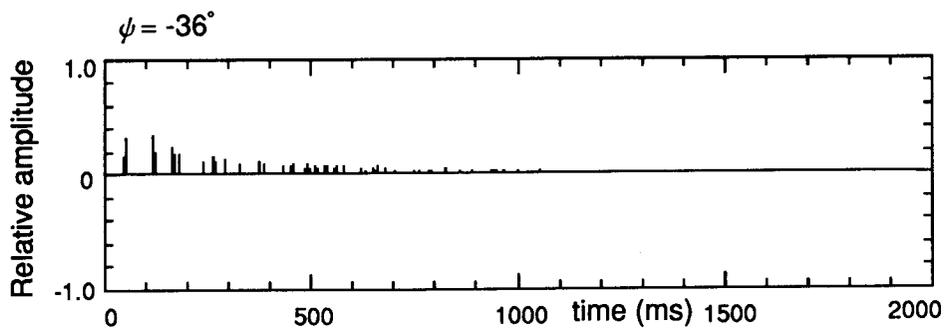
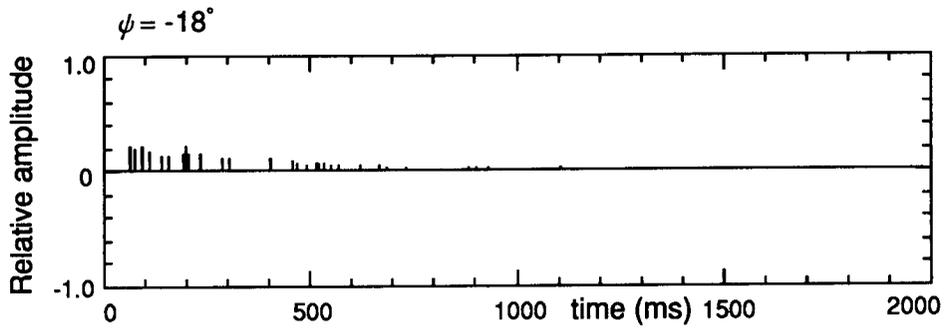


Fig.4-13(b) *Continued.*

#### D. 刺激の提示方法と回答方法

原音場と8種類のシミュレーション音場の計9種類の音場の7方向のインパルス応答と音源信号の畳み込み積分を実時間畳み込み演算装置で行って9種類の刺激を作成した。9種類の刺激から異なる2種類を選ぶ全ての組み合わせ36対と、回答の信頼性を検討するために同一の音場を組み合わせた9対を加えた45対をランダムに編集し、前半23対と後半22対に分けて提示した。なお、実験の始めに5種類の刺激対を練習用として付け加えた。それらは、(1) 原音場とS10, (2) 原音場とP10, (3) 原音場とP20, (4) 原音場とS20, (5) 原音場対である。

提示音圧レベルは KEMAR疑似頭により測定した両耳ラウドネス(Robinson and Whittle 1960)が  $82.7 \pm 0.3$  dBA (時定数: slow, RMSの最大値)である。刺激と刺激の間隔は1秒、対と対の間隔は4秒である。1回の実験時間は約10分である。1人の被験者につき2回実験を行った。

被験者には、対になった刺激の音像の非類似度をTable 4-2に示す5段階で回答させた。

#### E. 被験者

被験者は、21-28才の男女11名である。

### (3) 実験結果と考察

同一刺激対に関する回答が、全ての被験者において5段階評価で2(やや異なる)以下であったので、被験者全員の回答を用いてKruskal(1964a,b)の多次元尺度構成法で心理空間を解析した。ただし、同一音場対および練習用の対は除外した。解析には大阪大学産業科学研究所で作成されたプログラムを用いた。

2次元でストレスが0になったので、2次元布置を採用した。Fig. 4-14は、原音場と8種類のシミュレーション音場を2次元平面に布置したものである。原音場(Original)とインパルス応答の簡略化を行わないシミュレーション音場(P2,P5,P10,P20)が同一の座標に布置されている。また、インパルス応答を簡略化したシミュレーション音場(S2,S5,S10,S20)についても、同一の座標に布置されている。これは、「退化した解(クラスカルとウィッシュ1980)」であり、音場間にクラスター構造があることを示唆している。

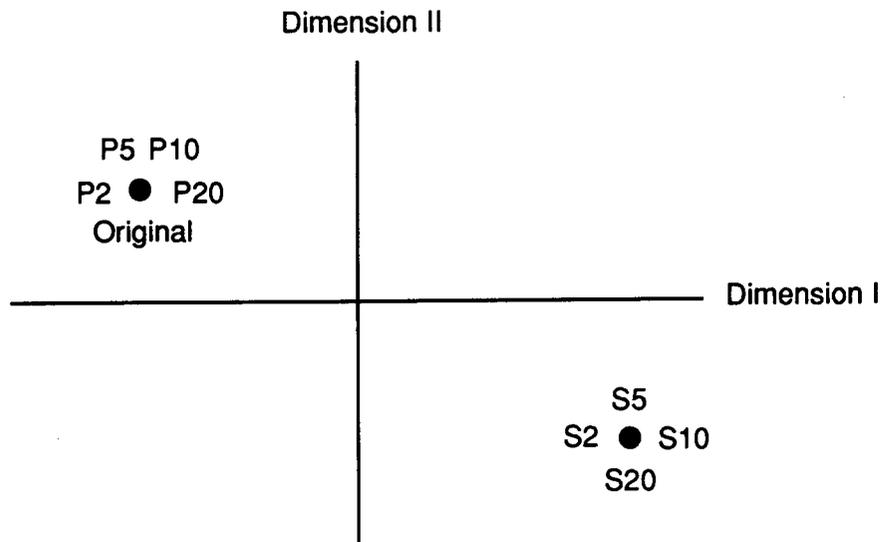


Fig.4-14 Two-dimensional configuration of an original sound field and eight simulated sound fields.

被験者の内観報告で、原音場およびインパルス応答の簡略化を行わないシミュレーション音場とインパルス応答を簡略化したシミュレーション音場では音色が異なることが指摘されており、音色について音場間にクラスター構造が存在すると考えられる。

以上より、原音場が残響音を含む場合はインパルス応答の簡略化をするとシミュレーション精度が劣化するといえる。したがって、4.2節で示したインパルス応答の簡略化は、原音場が初期の離散的反射音で構成されている場合には有効な方法であるが、原音場が残響音を含む場合には適用できない。

#### (4) 結論

原音場が残響音を含む場合は、インパルス応答を簡略化するとシミュレーション精度は劣化する。

## 4.4 時間窓の継続長がシミュレーション精度に及ぼす影響

4.2節では、原音場が離散的反射音だけで構成されている場合は、時系列両耳間相互相関関数の算出過程で用いる時間窓の継続長は10msの場合が最もシミュレーション精度が高いことを示した。ここでは、原音場が残響音を含む場合でも同様の結果が得られるか否かを検討する。

### (1) シミュレーション方法

シミュレーション方法は4.3節で検討した結果を基に、インパルス応答の簡略化を行わない方法とした。すなわち、原音場で無指向性マイクロホンを用いて測定したインパルス応答の各時間窓内の応答を、シミュレーション音場のその時間窓内の応答として時系列両耳間相互相関関数で求めた方位角へ振り分けた。つまり、シミュレーション音場の方向別インパルス応答を時間軸上で重ね合わせると原音場で無指向性マイクロホンを用いて測定したインパルス応答と等しくなる。

### (2) 実験方法

#### A. 音源信号

音源信号は4.3節と同じである。

#### B. 原音場

原音場は4.3節と同じ音場である。

#### C. シミュレーション音場

シミュレーション音場は、Table 4-6に示すような時間窓の継続長をパラメータとした4音場である

Table 4-6 Four kinds of simulated sound fields.

Method	Impulse response not simplified			
	P2	P5	P10	P20
Name of simulated sound field				
Duration of temporal window(ms)	2	5	10	20

#### D. 刺激の提示方法と回答方法

原音場と4種類のシミュレーション音場の計5種類の音場の7方向のインパルス応答と音源信号の畳み込み積分を実時間畳み込み演算装置で行って5種類の刺激を作成した。5種類の刺激から異なる2種類を選ぶ全ての組合せ10対と前後の順序を入れ換えた10対の計20対と、回答の信頼性を検討するために同一の音場を組み合わせた5対を加えた25対をランダムに編集して提示した。なお、実験の始めに3種類の刺激対を練習用として付け加えた。それらは、(1) 原音場とP10、(2) 原音場対、(3) 原音場とP20である。

提示音圧レベルは KEMAR疑似頭により測定した両耳ラウドネス(Robinson and Whittle 1960)が  $82.7 \pm 0.3$  dBA (時定数: slow, RMSの最大値)である。刺激と刺激の間隔は1秒、対と対の間隔は4秒である。1回の実験時間は約10分である。1人の被験者につき2回ずつ実験を行った。

被験者には、対になった刺激の音像の非類似度をTable 4-2に示す5段階で回答させた。

#### E. 被験者

被験者は、18-25才の男女学生23名である。

### (3) 実験結果と考察

まず始めに、被験者の非類似度判定の結果を以下の3つの基準で検定した。

1) 判断の信頼性

同一音場対を類似した音場と判定すること。

2) 判断の再現性

1 回目の実験の回答と 2 回目の実験の回答に高い相関関係があること。

3) 判断の一致性

どの 2 人の被験者の回答についても高い相関関係があること。

本実験では、1)については非類似度判定の回答の平均値が 2(やや異なる)以下であり、2) 3) に関しては相関係数が 0.62 以上( $p < 0.05$ )であることを条件とした。この条件に適合する回答を行った被験者は 5 名であった。

そこで、この 5 名(グループ I) と、さらに被験者間の相関係数が 0.65 以上となる 3 名(グループ II) の回答を用いて Kruskal(1964a,b) の多次元尺度構成法で心理空間を解析した。ただし、同一音場対および練習用の対は除外した。解析には大阪大学産業科学研究所で作成されたプログラムを用いた。

どちらのグループについても、1次元でストレスが 0 になったので 1次元布置を採用した。原音場と 4 種類のシミュレーション音場の布置を Fig.4-15 に示す。グループ I の場合は原音場とシミュレーション音場の 2 つに布置が分離し、シミュレーション音場は同一の座標に布置されている。これは、このグループは時間窓の継続長に関して優劣をつけることができないことを示している。

一方、グループ II の場合は、P2 および P10 が P5 および P20 よりも原音場に近く布置されている。被験者の内観報告によると、この 3 人は特に「ASW」や「残響の空間的な消え方」に着目して非類似度判断を行っていた。したがって、音像の空間的性質のシミュレーションにおいては、2 または 10ms の継続長をもつ時間窓が適合するといえる。

ここで、時間窓の継続長について従来の実験結果と比較してみる。Moore *et al.*(1988) は、継時マスキングに関する矩形時間窓の継続長として 8ms を提案している。また、4.2 節で述べたように原音場が離散的反射音だけで構成される場合の実験では、継続長を 5, 10, 20, 40ms と変化させた結果、最もシミュレーション精度が高いのは 10ms の場合であった。したがって、聴覚の信号処理メカニズムの観点からは、時間窓の継続長は 10ms が妥当であると考えられる。

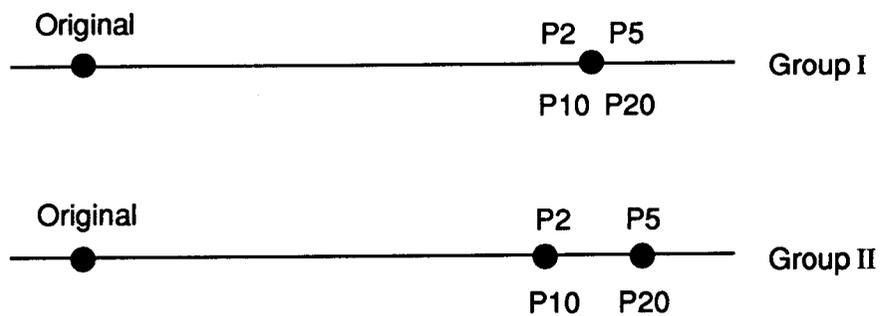


Fig.4-15 Configuration of an original sound field and four simulated sound fields.

#### (4) 結論

時系列両耳間相互相関関数の算出過程に矩形の時間窓を用いた場合、その継続長としては10msが妥当である。

## 4.5 内耳の信号処理機能がシミュレーション精度に及ぼす影響

4.3節および4.4節の実験結果を反映したシミュレーション方法において、時系列両耳間相互相関関数の算出過程における、Fig.4-2に示した内耳の信号処理メカニズムの有無がシミュレーション精度に及ぼす影響を検討する。

### (1) シミュレーション方法

シミュレーション方法は4.3節および4.4節と同じである。ただし、時系列両耳間相互相関関数算出の前処理として、内耳の信号処理機能を考慮する方法と考慮しない方法の2つの方法を比較する。ここでは、3.7.2項で示したASWと両耳間相関度の関係を参考にして、内耳の信号処理機能を遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタで近似する。また、インパルス応答の簡略化は行わず、矩形時間窓の継続長は10msである。

### (2) 実験方法

#### A. 音源信号

音源信号は4.3節および4.4節と同じである。

#### B. 原音場

原音場は4.3節および4.4節と同じ音場である。

#### C. シミュレーション音場

シミュレーション音場は、Table 4-7に示すような内耳の信号処理の有無をパラメータとした2音場である。P10はKEMAR疑似頭で測定した両耳の位置におけるインパルス応答に内耳を近似した遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタ処理を施した後、時系列両耳間相互相関関数を算出することにより作成したシミュレーション音場である。N10は低域通過処理を行わずに時系列両耳間相互相関関数を算出して作成したシミュレーション音場である。シミュレーション音場の方向別インパルス応答をFig.4-16に示す。

Table 4-7 Two kinds of simulated sound fields.

Method	with inner ear mechanism	without inner ear mechanism
Name of simulated sound field	P10	N10
Duration of temporal window(ms)	10	10
Simplification of impulse response	not simplified	not simplified

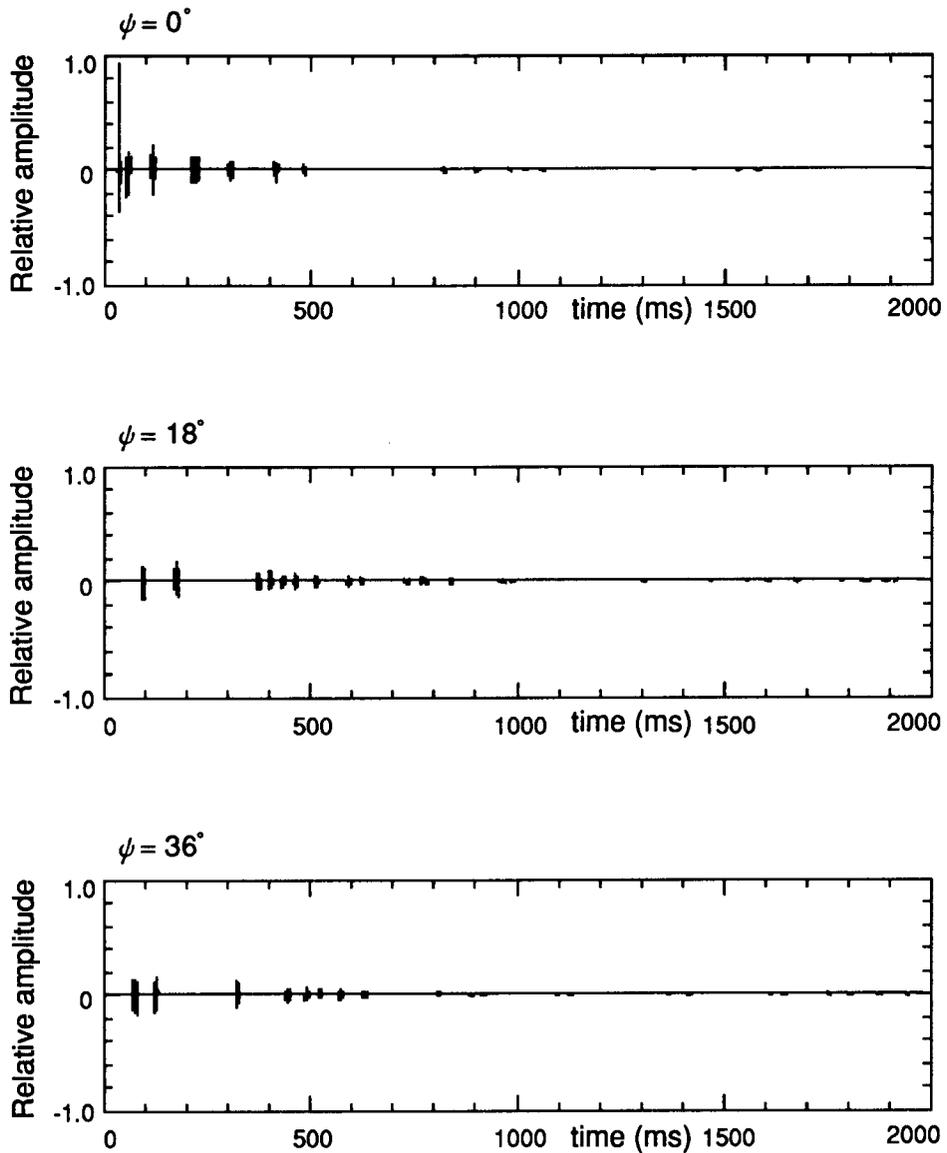


Fig.4-16(a) Directional impulse responses of simulated sound field, P10.

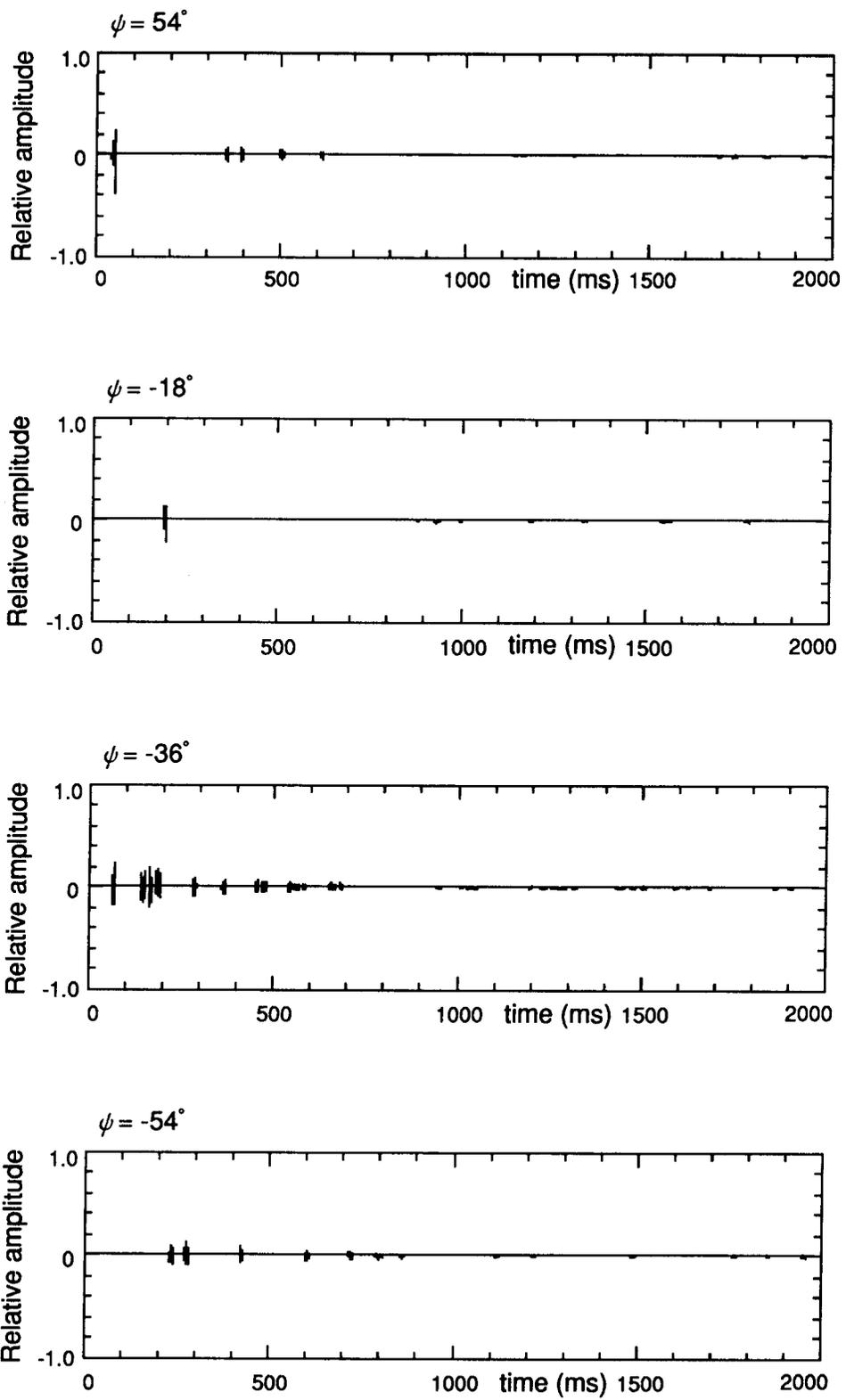


Fig.4-16(a) *Continued.*

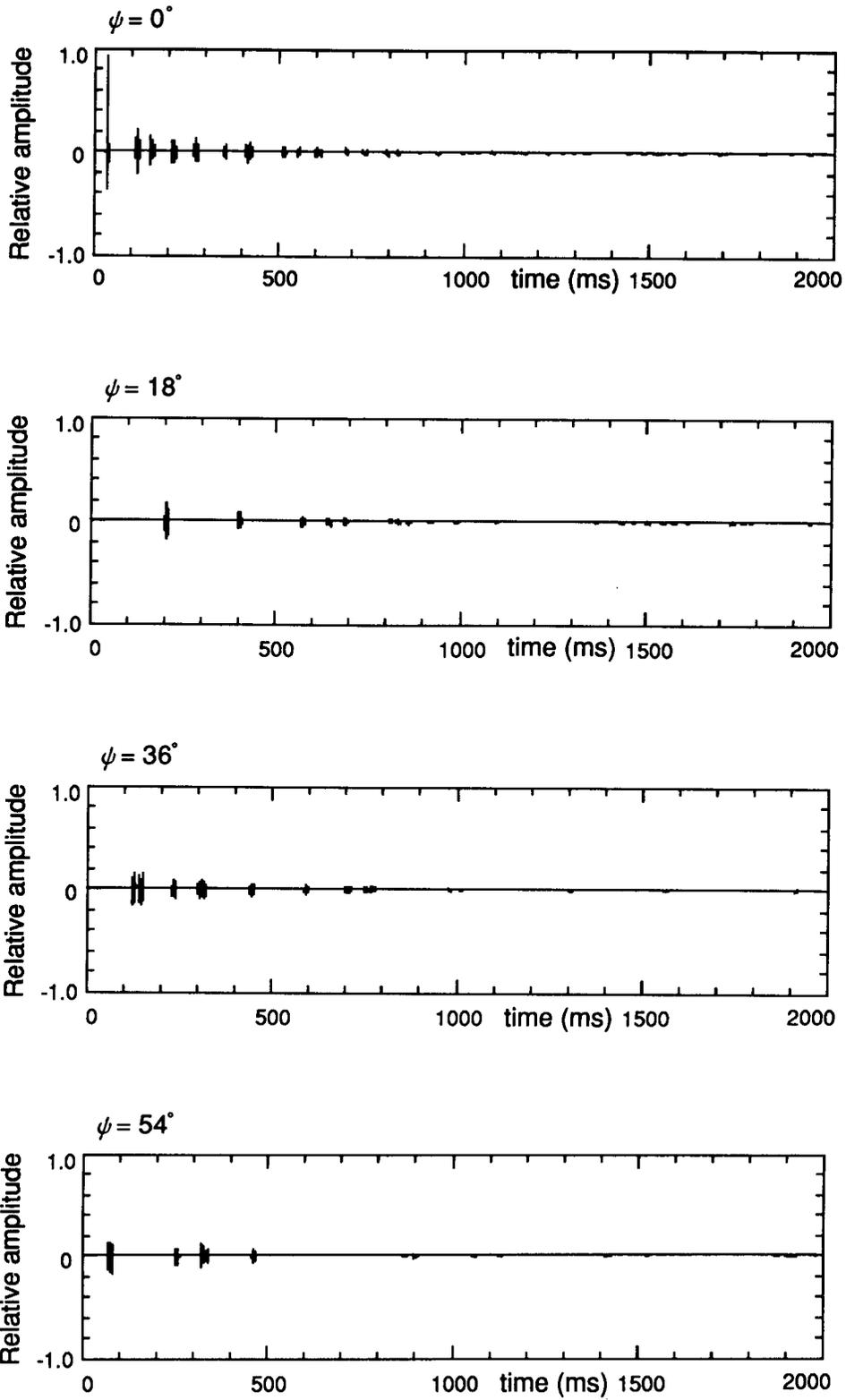


Fig.4-16(b) Directional impulse responses of simulated sound field, N10.

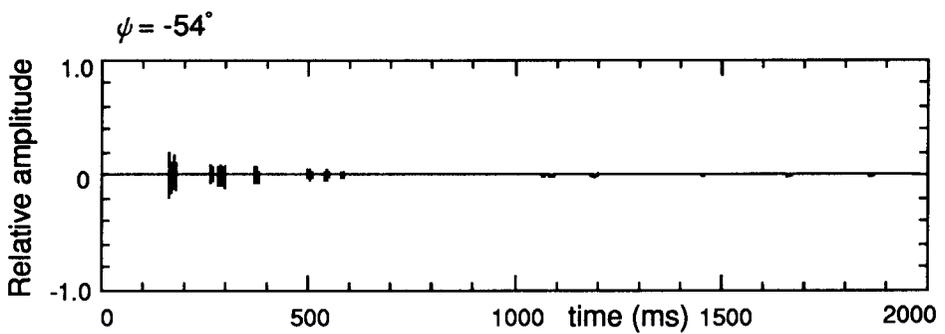
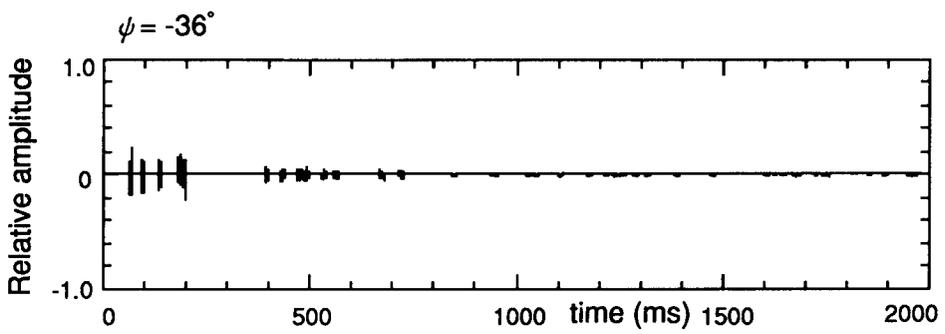
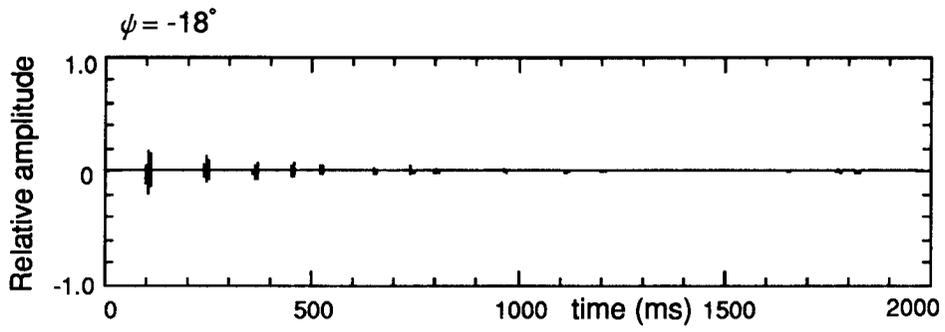


Fig.4-16(b) *Continued.*

#### D. 刺激の提示方法と回答方法

原音場と2種類のシミュレーション音場の計3種類の音場の7方向のインパルス応答と音源信号の畳み込み積分を実時間畳み込み演算装置で行って3種類の刺激を作成した。

被験者には、3種類の刺激から3種類を選ぶ全ての順列6通りを2回ずつランダムに編集して、完全三つ組法(Torgerson 1958)に基づいて提示した。三つ組にして提示した刺激  $S_i, S_j, S_k$  に対して、「 $S_i$ と $S_k$ のどちらが $S_j$ に似ているか」を回答させた。

提示音圧レベルは KEMAR疑似頭により測定した両耳ラウドネス(Robinson and Whittle 1960)が  $82.7 \pm 0.3$  dBA (時定数: slow, RMSの最大値)である。刺激と刺激の間隔は1秒、対と対の間隔は4秒である。1回の実験時間は約6分である。被験者は、各三つ組につき40回の判断をした。

#### E. 被験者

被験者は、22-23才の男子学生5名である。

### (3) 実験結果と考察

被験者の内観報告によると、5名の被験者のうち2名は「音像の空間的な位置」に着目して回答し、他の3名は「響き」や「音色」に着目して回答していた。そこで、被験者をグループ I (音像の空間的な位置に着目した2名)とグループ II (響きや音色に着目した3名)に分類して、グループごとに刺激相互間の心理的距離を求めた。

三つ組にして提示された刺激  $S_i, S_j, S_k$  について、 $S_j$ が $S_i$ より $S_k$ に似ている確率 $jP_{ik}$ と、 $S_j$ が $S_k$ より $S_i$ に似ている確率 $jP_{ki}$ の2つの確率が得られ、それぞれThurstone(1927)の比較判断の法則 Case V と同じ理論的根拠で刺激間の相対距離を求めた。2つの刺激 $S_j$ と $S_k$ の相対距離として  $h_{jk}$ と $h_{kj}$  が得られるが、観測値には誤差が含まれているため、これらは一般には一致しない。そこで、最小自乗法を用いて誤差を含む観測値から刺激相互間の相対距離を求めた。

ところで、刺激間の絶対距離  $d_{jk}$  と相対距離  $h_{jk}$  には式4-6に示す関係があることが知られている。

$$d_{jk} = h_{jk} + C \quad (4-6)$$

ここで、 $C$  は未知の定数であるが、以下のように推定することが可能であり、これを用いて刺激相互間の絶対距離を求めた。

$$C = h_{ij} - h_{ik} - h_{jk} \quad (4-7)$$

ただし、 $h_{ij} > h_{ik}, h_{jk}$

求めた音場間の絶対距離をFig.4-17に示す。この場合、刺激間の距離が0.68以上あれば弁別できるとみなせる。「音像の空間的な位置」に着目して判断したグループ I の場合は、原音場とP10の心理的距離は0.05であり、両者には弁別できる差があるとはみなせない。しかし、原音場とN10およびP10とN10には、それぞれ0.68以上の距離があり、各音場間にそれぞれ弁別できるとみなせる差がある。したがって、音像の空間的性質をシミュレートするためには、内耳の信号処理機能は必要である。

一方、「響き」や「音色」に着目して判断したグループ II の場合は、いずれの音場間にも弁別できるとみなせる差はない。

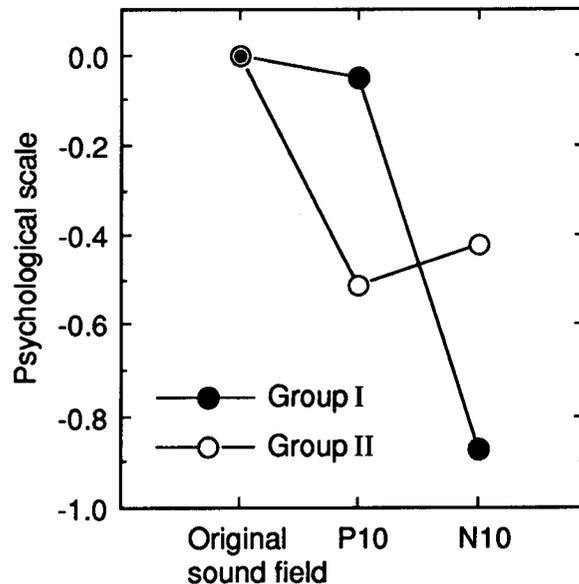


Fig.4-17 Psychological scale value of an original sound field and simulated sound fields.

この結果は、本実験で設定した残響音を含む原音場に対して、内耳の信号処理機能を考慮し、継続時間が10msの時間窓を用いた時系列両耳間相互相関関数で入射方位角を算出し、インパルス応答を簡略化しないでシミュレートした音場は、原音場で知覚される音像の弁別閾内の音像をシミュレートできることを示している。

ここで、シミュレーションシステムに必要とされるハードウェア規模について考察する。田端ら(1992)は、指向性の鋭いマイクロフォンを用いて空間を13-15方向に分割して原音場の方向別インパルス応答を測定し、それを無響室内に再生するシミュレーションシステムを提案している。ここで、原音場のインパルス応答の収束時間を $T_c$ 、サンプリング周波数を $f_s$ とすると、測定した各方向の方向別インパルス応答と音源信号の畳み込み演算には、各方向ごとにサンプル数が $T_c \times f_s$ 個のFIRフィルタが必要になる。したがって、空間分割数を $m$ とするとシステム全体では $m \times T_c \times f_s$ 個必要となる。例えば、原音場のインパルス応答を2秒、サンプリング周波数を44.1kHz、空間分割数を15とすると、シミュレーションシステム全体ではサンプル数が1323000個のFIRフィルタが必要である。

一方、本研究で示したシミュレーション方法では、既に述べたように無指向性マイクロフォンで測定した原音場のインパルス応答を両耳聴信号処理モデルに基づいて聴覚の時間窓ごとに各方向へ振り分けてシミュレーション音場の方向別インパルス応答を作成しているので、シミュレーションシステムに必要となるFIRフィルタのサンプル数は、空間分割数にかかわらず $T_c \times f_s$ である。したがって、上記の例ではFIRフィルタのサンプル数は88200個でよい。

このように、従来の方法では空間分割数が増すに従ってシミュレーションシステムに必要なFIRフィルタのサンプル数は多くなるが、本方法では空間分割数にかかわらず、従来の方法の一方向分のFIRフィルタで全方向のシミュレーションが可能であり、シミュレーションシステムのハードウェア規模を大幅に縮小することができる。

#### (4) 結論

1. 内耳の信号処理機能の第一次近似として遮断周波数が1600Hzの低域通過フィル

タを取り入れ、10msの矩形時間窓を用いて時系列両耳間相互相関関数を求め、インパルス応答を簡略化しないでシミュレートした音場は、残響音を含む原音場で知覚される音像の弁別閾内の音像を再生できる。

2. 従来の方法では空間分割数が増すに従ってシミュレーションシステムに必要なFIRフィルタは多くなるが、本方法では空間分割数にかかわらず、従来の方法の一方方向分のFIRフィルタで全方向のシミュレーションが可能であり、シミュレーションシステムのハードウェア規模を大幅に縮小することができる。

## 4.6 ASWのシミュレーションのための空間分割方法

合成音場を用いた音場シミュレーションにおいて、任意の音場をシミュレートするためには音場をどのような部分空間に分割すべきかという問題、すなわちスピーカーの個数とその配置方法に対して、従来の研究は明確な回答を与えていない。

基本的には、各入射音について求めた入射方向に最も近いスピーカーから再生した場合に知覚される音像が、原音場で知覚される音像の弁別閾内に入るために必要十分なスピーカー配置を求めればよい。したがって、シミュレーションに必要なスピーカーの個数とその配置は、音像を構成する種々の要素感覚の弁別限によって定まる。

音像の空間的性質に関する要素感覚のうち、最も詳しく弁別限が研究されているのは方向感である。例えば Mills(1958)は、正面方向の音源に対する水平面内の方向の弁別限は1kHz純音の場合約 $1^\circ$ であり、音源方向が側方になるに従って弁別限は大きくなり、方位角 $75^\circ$ で弁別限は約 $8^\circ$ であると報告している。このように方向感に関する弁別限は小さいため、正確に方向感をシミュレートするためには多くのスピーカーが必要になる。しかし、シミュレーションの対象となる原音場が第一波面の法則を満たす音場であれば、方向感を決定するのは先行音だけであり、それをシミュレートするスピーカーを1つ用意すればよい。コンサートホールなどをシミュレーションの対象とすれば、第一波面の法則は概ね成立すると考えられるので、方向感の弁別限を基に空間分割方法を論ずるのは無意味である。

ここでは、コンサートホールの評価で重要なASWを正確にシミュレートするための空間分割方法を3.6節で求めたASWに関する両耳間相関度の弁別限に基づいて検討する。また、この方法によるシミュレーションシステムのスピーカー配置を例示する。

### (1) 反射音の入射方位角と両耳間相関度の関係

直接音と単一反射音で構成される音場を用いて、反射音の入射方位角と両耳間相関度の関係を検討した。Fig.4-18に示すように、単一反射音の直接音に対する相対音圧レベルを-6dB、遅れ時間を25msとし、反射音の入射方位角は $0^\circ$ から $180^\circ$ を $10^\circ$ 間隔で変化させた。音源信号に直接音および単一反射音のインパルス応答と予めKEMAR疑似頭を用いて測定した頭部伝達関数を畳み込むことにより得られた左右の耳入力信号か

ら両耳間相関度を求めた。音源信号は、3.6節における弁別限の実験と同じ、Mozartの交響曲第41番の第4楽章第94小節から約6秒間である。求めた両耳間相関度をFig.4-19に示す。入射方位角が0および180°で両耳間相関度は最大となり、70-90°付近で最小となることが示されている。

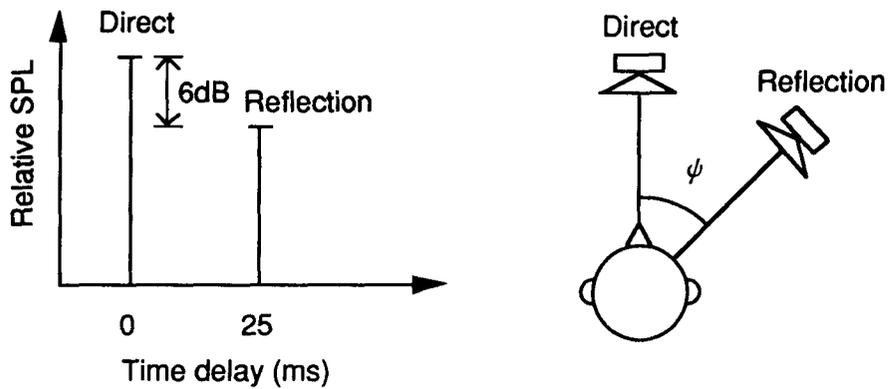


Fig.4-18 Temporal and spatial structure of sound field used in calculation of degree of interaural crosscorrelation.

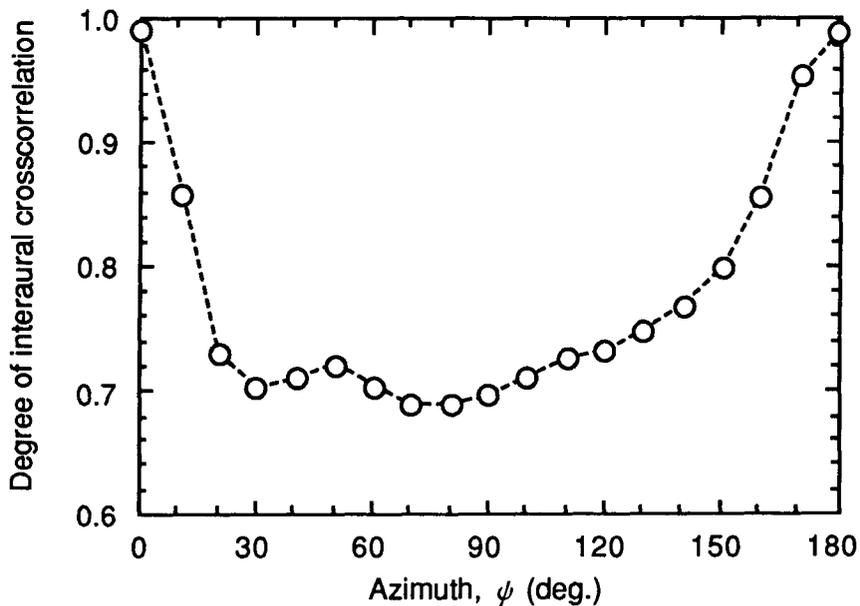


Fig.4-19 Relation between azimuth of a reflection and degree of interaural crosscorrelation.

次に、入射方位角と両耳間相関度の関係の近似式を求める。Barron and Marshall(1981)は直接音と2本の対称な方位角から入射する反射音を用いて実験を行い、反射音の入射方位角と spatial impression にはFig.4-20に示す関係があることを明らかにした。図の横軸は入射方位角、縦軸は90° から到来する反射音と同じ spatial impression を生じさせるのに必要な反射音の音圧レベルである。ここでは、それらが正弦の関係にあることが示されている。

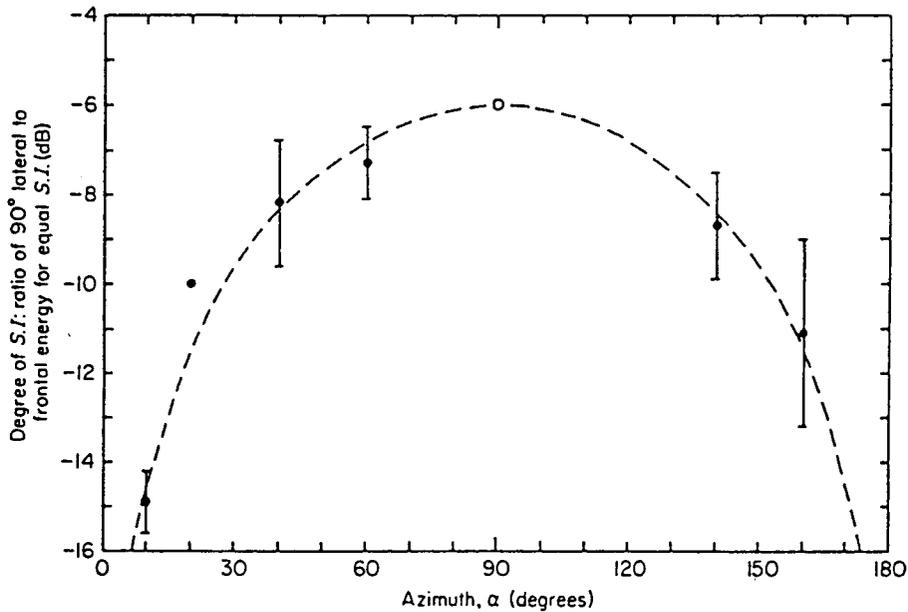


Fig.4-20 Degree of spatial impression for pairs of reflections as the reflection angle of azimuth is varied.  $\bullet$ , Mean and 95% confidence limit of the mean of experiment results ; ---, predicted results for a sine relationship, after Barron and Marshall (1981).

彼らの実験条件のもとで、2本の反射音の相対音圧レベルと両耳間相関度の関係を求めた。その結果を Fig.4-21 に示す。図より明らかなように両者にはほぼ線型といえる関係がある。したがって、入射方位角  $\psi$  と両耳間相関度 DICC の関係は、式4-8に示すように正弦関数を用いて表せる。

$$\text{DICC} = 1 - a \sin \psi \quad (4-8)$$

ただし、

a : 回帰係数

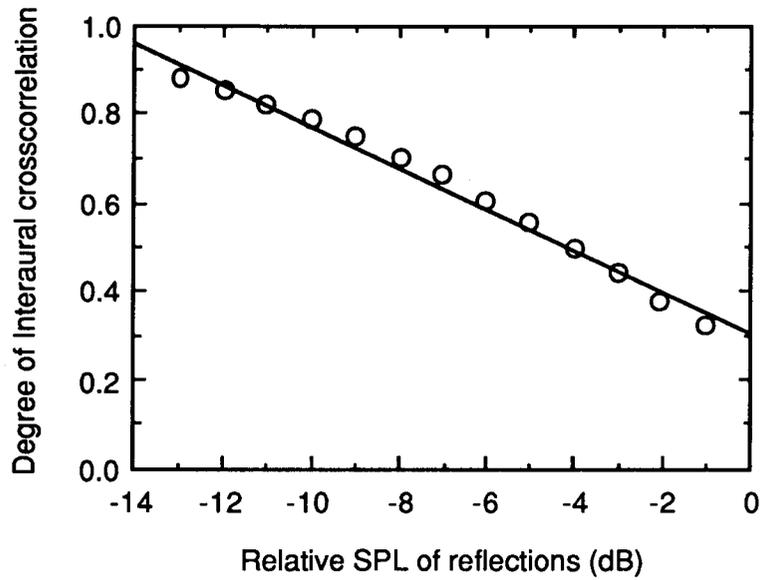


Fig.4-21 Relation between relative SPL of reflections and degree of interaural crosscorrelation.

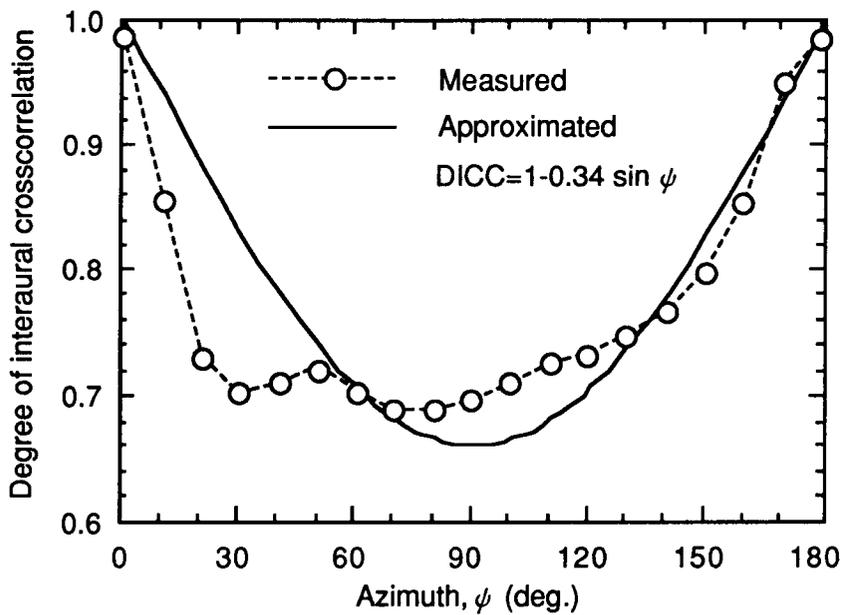


Fig.4-22 Measured and approximated degree of interaural crosscorrelation as a function of azimuth of a reflection.

最小自乗法で求めた回帰係数  $a$  の値は0.34であった。測定値と回帰式の関係を図4-22に示す。入射方位角が小さい場合に回帰精度はやや劣るが、全体的な振舞いについては近似できるとみなせる。

## (2) ASWに関する入射臨界方位角

以上で求めた入射方位角と両耳間相関度の近似式と3.6節で求めたASWに関する両耳間相関度の弁別限を用いて、ASWに関する入射臨界方位角を求める。ただし、ASWに関する入射臨界方位角とは、「その角度を越えるとASWの違いが知覚される限界の角度」と定義する。第3章で明らかにしたように、直接音が正面方向から到来し、かつ第一波面の法則が成立する音場では、両耳間相関度が等しければ反射音の入射方位角にかかわらずASWは等しくなるので、反射音の入射方位角が異なることによって生じた両耳間相関度の違いが先に求めた弁別限を越えると、ASWの違いが知覚されると考えられる。

両耳間相関度の弁別限を $\Delta \text{DICC}$ 、反射音の入射方位角を $\psi$ 、入射臨界方位角を $\alpha 1$ (下側)、 $\alpha 2$ (上側)とすると、

$$1 - 0.34 \sin \alpha 1 = \text{DICC} + \Delta \text{DICC} \quad (4-9)$$

$$1 - 0.34 \sin \alpha 2 = \text{DICC} - \Delta \text{DICC} \quad (4-10)$$

と表せる。

ここで、Weber比を $R$ として式4-9、4-10を解くと、

$$\alpha 1 = \sin^{-1}\{(1 - R) \sin \psi\} \quad (4-11)$$

$$\alpha 2 = \sin^{-1}\{(1 + R) \sin \psi\} \quad (4-12)$$

となる。

Fig.4-23に入射方位角の関数として入射臨界方位角を示す。入射方位角が正面から側方になるに従って入射臨界方位角の幅(許容誤差)は次第に増加し、 $60^\circ$ 付近から急激に大きくなる。入射方位角が $0^\circ$ の場合は $1^\circ$ でも異なるとASWの違いが弁別できるが、 $60^\circ$ の場合は $44-136^\circ$ の範囲であればASWの違いは弁別できない。つまり、前後方向に関しては空間を細かく分割する必要があるが、側方になると粗くてもよいことになる。これは、先に述べた方向感の弁別限と同じ傾向にある(Mills 1958)。なお、得られた入射臨界方位角は、第一波面の法則が成立する範囲であれば、反射音の遅れ時間および相対音圧レベルに依存しない。

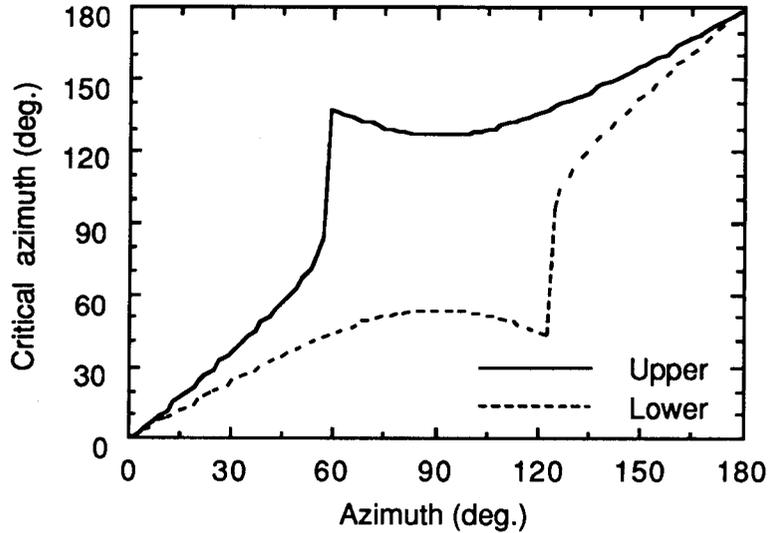


Fig.4-23 Calculated critical azimuth with regard to ASW as a function of incident azimuth.

### (3) 空間分割方法

以上で得られた結果より、ASWのシミュレーションのための空間分割方法を検討する。Fig.4-24を用いて、各部分空間を代表するスピーカーの方位角を求める。ここでは、初期条件として $\psi=90^\circ$ にスピーカーを設置することにする。Fig.4-24より、このスピーカーは原音場で $57\text{-}123^\circ$ に入射する反射音をシミュレートすることができる。次に最大で $57^\circ$ までの入射音をシミュレートできるスピーカーの方位角を図より求めると、 $\psi=44^\circ$ である。このスピーカーがシミュレートできる最小の方位角は $34^\circ$ である。以降同様の手順を繰り返せば( $90^\circ$ 以上についても同様)全体のスピーカー配置が求められる。

いま、無響室内に直径3mの円周上に直径10cmのスピーカーを配置することを想定すると、この場合のスピーカー1個の幅は約 $4^\circ$ に相当する。このような条件において、先に説明した手順で必要最小限のスピーカーの数を求めると24個である。そして、その配置はFig.4-25に示すように $0, \pm 5, \pm 10, \pm 17, \pm 27, \pm 44, \pm 90, \pm 136, \pm 153, \pm 163, \pm 170, \pm 175, 180^\circ$ である。

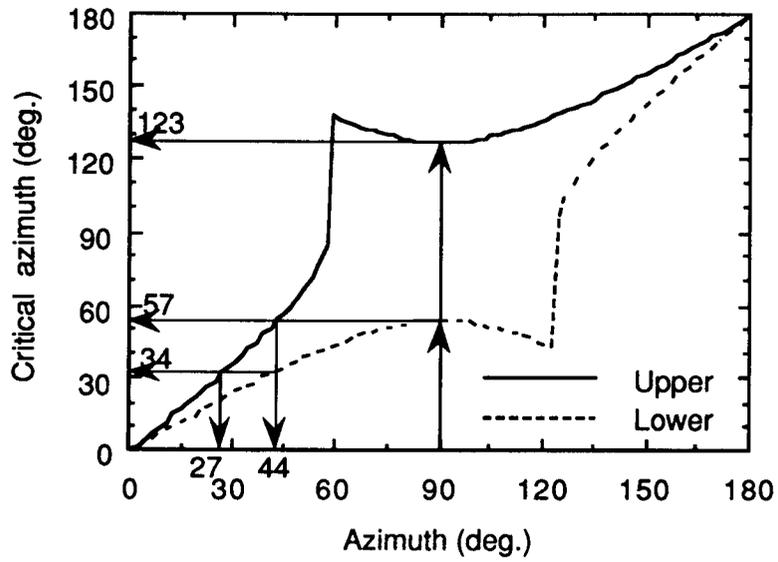


Fig.4-24 Schematic diagram to determine the azimuth of loudspeakers to simulate ASW.

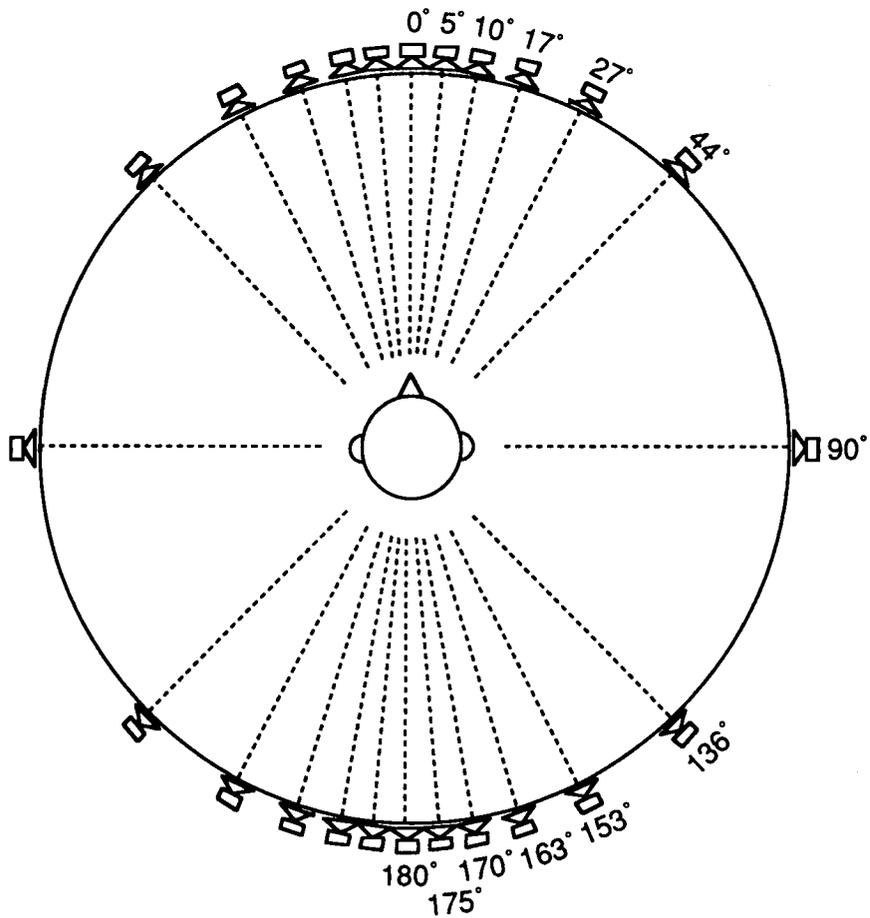


Fig.4-25 An example of arrangement of loudspeakers to simulate ASW.

#### (4) 結論

ASWに関する両耳間相関度の弁別限を基にして，ASWをシミュレートするために必要なスピーカーの個数とその配置方法を明らかにした。

## 4.7 第4章のまとめ

時系列両耳間相互相関関数(RCC : running interaural crosscorrelation)を中心とした両耳聴信号処理モデルを設定し、それに基づいた新たなシミュレーション方法を提案した。そして、この方法による音像のシミュレーション精度を音響心理実験により検討した。その結果以下のことが明らかになった。

1. 原音場が離散的反射音で構成されている場合は、時系列両耳間相互相関関数を中心とする両耳聴信号処理モデルに基づいて入射方位角を決定し、インパルス応答を簡略化したシミュレーション音場でも原音場で知覚される音像とほとんど同一の音像をシミュレートすることができる。
2. 時間窓の設定が適切でなければ、本実験で検討した5種類の要素感覚(ASW, 方向感, 距離感, 響き, 柔らかさ)のいずれについてもシミュレーション精度は低い。適切な時間窓を設定すれば、いずれの要素感覚についてもシミュレーション精度は向上する。
3. 原音場が残響音を含む場合は、インパルス応答を簡略化するとシミュレーション精度は劣化する。
4. 時系列両耳間相互相関関数の算出過程に矩形の時間窓を用いた場合、その継続長としては10msが妥当である。
5. 内耳の信号処理機能の第一次近似として取り入れた1600Hzの低域通過フィルタは、音像の空間的性質のシミュレーションには必要不可欠である。
6. 内耳の信号処理機能の第一次近似として遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタを取り入れ、10msの矩形時間窓を用いて時系列両耳間相互相関関数を求め、インパルス応答を簡略化しないでシミュレートした音場は、残響音を含む原音場で知覚される音像の弁別閾内の音像を再生できる。
7. 従来の方法では空間分割数が増すに従ってシミュレーションシステムに必要な

FIRフィルタは多くなるが、本方法では空間分割数にかかわらず、従来の方法の一方向分のFIRフィルタで全方向のシミュレーションが可能であり、シミュレーションシステムのハードウェア規模を大幅に縮小することができる。

8. ASWに関する両耳間相関度の弁別限を基にして、ASWをシミュレートするために必要なスピーカーの個数とその配置方法を明らかにした。

## 第5章 総括

本論文では、音環境評価の基礎的研究として、音像の空間的性質の評価に関する3つの問題を取り上げ、その評価方法を明らかにした。本論文で得られた研究成果を以下に記す。

第1章では、まず音環境評価における本論文の意義を述べた。次に、本論文で取り上げた3つの問題に関する従来の研究を概説し、本論文で明らかにすべき課題をまとめた。さらに、本論文における音響心理実験の共通事項と使用した座標系について説明した。

第2章では、「音像の方向感における第一波面の法則の適用限界」について検討した。音像が先行音方向と後続音方向に分離して知覚される現象について音響心理実験を行い、従来求められているエコー検知限やパーセントディスタバンスと比較検討を行った。その結果、以下のことを明らかにした。

1. 日本語のスピーチを音源とした場合の音像の分離の割合(パーセントスプリット)を、先行音に対する後続音の遅れ時間と相対音圧レベルで定量的に示した。先行音に対する後続音の相対音圧レベルが一定であれば、遅れ時間が大きくなるに従って音像は分離しやすくなる。音像の分離の割合を一定にするためには、後続音の遅れ時間1msの増加に対して、相対音圧レベルを約0.4dB減少させる必要がある。
2. 10%スプリットとなる場合の後続音の相対音圧レベルをエコー検知限と比較すると、前者は後者より10dB以上大きい。両者の差は遅れ時間が増加するに従って大きくなる。この差は、実験における目的音の違いに起因すると考えられる。オーディトリウムなどでスピーチを聴いている状態を想定すると後続音を目的音としたエコー検知限は過度に厳しく判断しているといえる。したがって、後続音の相対音圧レベルが従来のエコー検知限を越えても、実際の聴取条件では音像が分離して知覚されるわけではない。また、90%スプリットとなる場合の

後続音の相対音圧レベルを従来報告されている10%ディスタージャンプと比較すると、前者は後者より3dB以上小さい。つまり、後続音の相対音圧レベルがエコーディスタージャンプとはならない程度であっても、音像は分離する可能性がある。以上の結果より、第一波面の法則の適用限界に関する音像の分離は、エコーの検知ともエコーディスタージャンプとも異なる現象であり、第一波面の法則の適用限界はここで求めたパーセントスプリットにより規定すべきである。

第3章では、両耳間相関度をみかけの音源の幅(ASW)の評価指標として任意の音場に適用するうえで説明すべき4つの課題について検討した。

まず、「第一波面の法則の成否にかかわらず、両耳間相関度でASWを評価できるか否か」について音響心理実験を行い、以下のことを明らかにした。

1. 両耳間相関度が等しくても、第一波面の法則が成立する上限を越える反射音が形成するASWは、同法則の成立範囲内にある同じ音圧レベルの反射音が形成するASWよりも小さくなる。つまり、第一波面の法則が成立しない場合のASWの評価に、同法則が成立する場合と同じように両耳間相関度を適用することはできない。
2. 反射音が第一波面の法則が成立する上限を越える場合、その反射音の第一波面の法則が成立する範囲内に含まれる部分だけがASWの形成に寄与する。したがって、ASWを評価するためには、その部分だけを用いて両耳間相関度を求める必要がある。

次に、「入射音構造が空間的に異なる任意の音場において、両耳間相関度でASWを評価できるか否か」について音響心理実験を行い、以下のことを明らかにした。

1. 両耳間相関度が一定であれば、反射音の到来方向にかかわらず、ASWは一定である。つまり、反射音の到来方向にかかわらず、両耳間相関度でASWを評価できる。

2. しかし、両耳間相関度が等しくても、直接音が正面以外の方向から到来する場合は、正面から到来する場合に比べてASWは小さくなるので、この場合は直接音が正面から到来する場合と同じように評価することはできない。

さらに「音源が音楽信号の場合のASWに関する両耳間相関度の弁別限」を音響心理実験により明らかにした。得られた結果を以下に示す。

1. 音楽信号を用いた場合のASWに関する両耳間相関度の弁別限は、両耳間相関度が0.50の基準音場に対してASWがより狭いと知覚する場合で0.12、より広がっていると知覚する場合で0.10であり、0.70の基準音場に対しては、それぞれ0.06と0.09、0.90の基準音場に対しては、どちらも0.03である。
2. ここで求めた弁別限に関しては Weberの法則が成立し、Weber 比は0.20 - 0.30である。

最後に「ASWの評価指標としての両耳間相関度の測定方法」を確立するために音響心理実験を行い、以下のことを明らかにした。

1. 音源信号が広帯域雑音の場合、帯域幅が 200 - 1kHz および 200 - 2kHz の場合は従来の両耳間相関度とASWの間に負の相関関係が認められるが、帯域幅が 200 - 4kHz および 200 - 8kHz の場合は負の相関関係は得られない。したがって、このような音源を用いた場合のASWの評価に従来の両耳間相関度を用いることはできない。
2. しかし、工学的な見地から内耳の信号処理機能を遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタで第一次近似して、耳入力信号の1600Hz以下の成分だけを用いて算出した両耳間相関度とASWには、200-4kHzおよび200-8kHzの音源においても負の相関関係が得られる。したがって、広帯域信号を用いた場合の両耳間相関度の測定法としては、耳入力信号の1600Hz以下の成分だけを用いる方法が妥当である。ただし、このようにして測定した両耳間相関度で評価できるのは、音源に同一の広帯域信号を用いた場合の音場間のASWの大小関係だけであり、異なる

る音源を用いた場合の音源信号間のASWの大きさを比較することはできない。任意の音源信号を用いた場合のASWを両耳間相関度から求めるためには、各臨界帯域で求めた両耳間相関度からASWを評価する方法を確立する必要がある。

第4章では、「両耳聴信号処理モデルを用いた音場シミュレーション」について検討した。時系列両耳間相互相関関数(RCC: running interaural crosscorrelation)を中心とした両耳聴信号処理モデルを設定し、それに基づいた新たなシミュレーション方法を提案した。そして、この方法によるシミュレーション精度を音響心理実験により検討した。さらに、ASWをシミュレートするための空間分割方法について検討した。その結果以下のことを明らかにした。

1. 原音場が離散的反射音で構成されている場合は、時系列両耳間相互相関関数を中心とする両耳聴信号処理モデルに基づいて入射方位角を決定し、インパルス応答を簡略化したシミュレーション音場でも原音場で知覚される音像とほとんど同一の音像をシミュレートすることができる。
2. 時間窓の設定が適切でなければ、本実験で検討した5種類の要素感覚(ASW, 方向感, 距離感, 響き, 柔らかさ)のいずれについてもシミュレーション精度は低い。適切な時間窓を設定すれば、いずれの要素感覚についてもシミュレーション精度は向上する。
3. 原音場が残響音を含む場合は、インパルス応答を簡略化するとシミュレーション精度は劣化する。
4. 時系列両耳間相互相関関数の算出過程に矩形の時間窓を用いた場合、その継続長としては10msが妥当である。
5. 内耳の信号処理機能の第一次近似として取り入れた1600Hzの低域通過フィルタは、音像の空間的性質のシミュレーションには必要不可欠である。
6. 内耳の信号処理機能の第一次近似として遮断周波数が1600Hzの低域通過フィルタを取り入れ、10msの矩形時間窓を用いて時系列両耳間相互相関関数を求め、

インパルス応答を簡略化しないでシミュレートした音場は、残響音を含む原音場で知覚される音像の弁別閾内の音像を再生できる。

7. 従来の方法では空間分割数が増すに従ってシミュレーションシステムに必要なFIRフィルタは多くなるが、本方法では空間分割数にかかわらず、従来の方法の一方方向分のFIRフィルタで全方向のシミュレーションが可能であり、シミュレーションシステムのハードウェア規模を大幅に縮小することができる。
8. ASWに関する両耳間相関度の弁別限を基にして、ASWをシミュレートするために必要なスピーカーの個数とその配置方法を明らかにした。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり，終始御指導，御鞭撻を頂いた神戸大学松本衛教授ならびに森本政之助教授に深く感謝します。

また，神戸大学工学部および工学研究科において御指導を頂いた神戸大学前川純一名誉教授ならびに安藤四一助教授に心から感謝します。

実験の遂行に際して御協力を頂いた神戸大学阪上公博助手，出水浩一技官ならびに大学院生であった水島考一郎君，山中猛司君，井口日文君，学部生であった平山敏幸君，児島宏之君，村上隆久君，大塚博美君，杉浦聡君，金辻篤彦君，柏雅之君，小山悦司君に厚く感謝します。

種々の有益な御討論，御助言を頂いた静岡大学工学部後藤敏幸教授に心から感謝します。

研究の機会を与えて頂いた松下通信工業株式会社 松田章社長，吉田登美男取締役(現在拓殖大学教授)ならびに同社AVシステム事業部片倉光宏部長(現在松下システムエンジニアリング株式会社常務取締役)に深く感謝します。また，本研究の推進にあたり，御理解と御援助を頂いた同社小杉健一専務，唐川良一専務，原島進常務，ならびに同社AV&C研究所三浦孝文所長に厚く感謝します。さらに，本論文をまとめるにあたり，適切な御助言を頂いた同社AV&C研究所新居康彦主幹技師ならびに本研究の実験に用いた実時間畳み込み演算装置を開発して頂いた同研究所音響システム開発室の宮川猛室長に心から感謝します。

最後に，本研究を遂行する上で終始的確な御助言と多大な御援助を頂いた松下通信工業株式会社AV&C研究所建築音響開発室の遠藤久雄室長に深謝の意を表します。

## 参考文献

穴沢健明, 柳川博文, 伊藤毅(1970), " 両耳間相関係数と「拡がり感」について, " 電子通信学会電気音響研究会資料 EA70-15.

Y.Ando(1985),"Concert hall acoustics," Springer-Verlag, Tokyo, 39.

M.Barron(1971)," The subjective effects of first reflections in concert halls - the need for lateral reflections," J. Sound and Vib. 15, 475-494.

M.Barron and A.H.Marshall(1981),"Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure," J. Sound and Vib. 77, 211-232.

J.Blauert and W.Cobben(1978),"Some consideration of binaural cross correlation analysis," ACUSTICA 39, 96-104.

J.Blauert(1983),"Spatial hearing: The psychophysics of human sound localization," The MIT Press. Cambridge, 225.

J.Blauert and W.Lindemann(1986),"Auditory spaciousness: some further psychoacoustic analyses," J. Acoust. Soc. Am. 80, 533-542.

イエンスブラウエルト, 森本政之, 後藤敏幸(1986), " 空間音響, " 鹿島出版会, 東京, 168.

R.H.Bolt and P.E.Doak(1950),"A tentative criterion for the short-term transient response of auditoriums," J. Acoust. Soc. Am. 22, 507-509.

M.Camras(1968),"Approach to recreating a sound field," J. Acoust. Soc. Am. 15, 1425-1431.

L.Cremer(1948),"Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik," S.Hertzel, Stuttgart , vol.1 126.

R.I.Chernyak and N.A.Dubrovsky(1968),"Pattern of the noise images and the binaural

summation of loudness for the different interaural correlation of noise," Proc. 6th International Congress on Acoustics, Tokyo, A-3-12.

P.Damaske and V.Mellert(1969/70),"Ein Verfahren zur richtungstreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher," ACUSTICA 22, 153-162.

P.Damaske(1969/70),"Richtungsabhängigkeit von Spektrum und Korrelationsfunktionen der an den Ohren empfangenen Signale," ACUSTICA 22, 191-204.

P.Damaske and V.Mellert(1971),"Zur richtungstreuen stereophonen Zweikanalübertragung," ACUSTICA 24, 222-225.

P.Damaske(1971),"Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction," J. Acoust. Soc. Am. 50, 1109-1115.

P.Damaske and Y.Ando(1972) ,"Interaural crosscorrelation for multichannel loudspeaker reproduction," ACUSTICA 27, 232-238.

古居素直, 北村音一(1983), "音圧レベルが音の拡がり感に与える影響 - 被験者による相違 -, " 日本音響学会講演論文集, 2-7-4(Mar.).

古居素直, 北村音一(1987), "空間音響に関する表現語の因子分析的研究," 日本音響学会聴覚研究会資料 H-83-63.

K.J.Gabriel and H.S.Colburn(1981),"Interaural correlation discrimination : I. bandwidth and level dependence," J. Acoust. Soc. Am. 69, 1394-1401.

H.Gulliksen(1956),"A least squares solution for paired comparison with incomplete data," Psychometrika 21, 125-134.

L.Guttman(1947),"The cornell technique for scale and intensity analysis," Educ. Psychol. Meas. 7, 247-280.

H.Haas(1951),"Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache,"

ACUSTICA 1, 49-58.

H.Hamada, N.Ikesyoji, Y.Ogura, and T.Miura(1985),"Relation between physical characteristics of orthostereophonic system and horizontal plane localization," J. Acoust. Soc. Jpn.(E) 6, 143-154.

Y.Hidaka, H.Yano, and H.Tachibana(1989),"Scale model experiment on room acoustics by hybrid-simulation technique," J. Acoust. Soc. Jpn.(E) 10, 111-117.

肥田野直, 瀬谷正敏, 大川信明(1961), "心理教育統計学," 培風館, 東京, 121.

井上友幸, 西隆司, 三上淳一, 古川宣一, 清水寧, 川上福司(1988), "多方向同時集音装置(MAM)を用いた原音場と再生音場の比較," 日本音響学会講演論文集, 2-8-14(Oct.).

L.A.Jeffress(1948),"A place theory of sound localization," J. Comp. Physiol. Psych. 41, 35-39.

W.de V.Keet(1968),"The influence of early lateral reflections on the spatial impression," Proc. 6th International Congress on Acoustics, Tokyo, E-2-4.

木村陽一, 渡辺公治, 後藤敏幸(1986), "空間音響再生用衝立ステレオの研究," 日本音響学会誌 42, 387-395.

M.Kleiner, P.Svensson, and B-I.Dalenbäck(1990),"Auralization : experiments in acoustical CAD," Proc. Audio Eng. Soc. 89th. Conv. I-I-3.

J.B.Kruskal(1964a),"Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis," Psychometrika 29, 1-27.

J.B.Kruskal(1964b),"Nonmetric multidimensional scaling : a numetric method," Psychometrika 29, 115-129.

J.B.クラスカル, M.ウィッシュュ(高根芳雄訳)(1980), "多次元尺度法," 朝倉書店, 東京, 25.

Kuhl(1978)," Räumlichkeit als Komponente des Raumeindrucks," ACUSTICA 40, 167-181.

黒住幸一, 大串健吾(1983), " 2チャンネル音響信号の相関係数と音像の質, " 日本音響学会誌39, 253-260.

D.M.Leakey, B.M.Sayers, and E.C.Cherry(1958),"Binaural fusion of low- and high- frequency sounds," J. Acoust. Soc. Am. 30, 222.

J.C.R.Licklider(1956),"Audio frequency analysis," in : C.Cherry(Ed.), Information theory, 3d London symp., Butterworth, London, 253-268.

W.Lindemann(1986),"Extension of binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. II. the law of the first wave front," J. Acoust. Soc. Am. 80, 1623-1630.

J.P.A.Lochner and J.F.Burger(1958),"The subjective masking of short time delayed echoes, their primary sounds, and their contribution to the intelligibility of speech," ACUSTICA 8, 1-10.

E.Meyer and G.R.Schodder(1952),"Über den Einfluß von Schallrückwürfen auf Richtungslokalisation und Lautstärke bei Sprache," Nachr. Akad. Wiss. Göttingen No.6, 31.

E.Meyer, W.Burgtorf, and P.Damaske(1965),"Eine Apparatur zur elektroakustischen Nachbildung von Schallfeldern. Subjektive Hörwirkungen beim Übergang Kohärenz-Inkohärenz," ACUSTICA 15, 339-344.

A.W.Mills(1958),"On the minimum audible angle," J. Acoust. Soc. Am. 30, 237-246.

三浦他編(1973), " 新版官能検査ハンドブック, " 日科技連出版社, 東京, 351.

宮島徹, 田原靖彦, 中川清(1990), " 散乱音シミュレーションを導入した室内音場合成システム, " 日本音響学会講演論文集, 3-P-11(Sep.).

B.C.J.Moore, B.R.Glasberg, C.J.Plack, and A.K.Biswas(1988),"The shape of the ear's temporal window," J. Acoust. Soc. Am. 83, 1102-1116.

M.Morimoto and Y.Ando(1980),"On the simulation of sound localization," J. Acoust. Soc. Jpn.(E) 1, 167-174.

森本(1982), "音の方向定位に関する研究," (学位論文) 東京大学.

森本政之, 春藤元宏, 前川純一(1983), "反射音の到来方向がエコーディスタージャンプにおよぼす影響," 日本建築学会建築環境工学論文集, 4, 64-69.

森本政之, 前川純一(1987), "音像の拡がり感について," 日本音響学会聴覚研究会資料 H-87-31.

M.Morimoto and Z.Maekawa(1988),"Effects of low frequency components on auditory spaciousness," ACUSTICA 66, 190-196.

M.Morimoto and C.Pösselt(1989),"Contribution of reverberation to auditory spaciousness in concert halls," J. Acoust. Soc. Jpn.(E) 10, 87-92.

森本政之, 藤森久嘉, 前川純一(1990a), "みかけの音源の幅と音に包まれた感じの差異," 日本音響学会誌 46, 449-457.

森本政之, 藤森久嘉, 前川純一(1990b), "みかけの音源の幅に対応する両耳間相関度の測定法に関する一考察," 日本音響学会講演論文集, 1-2-9(Sep.).

F.Mosteller(1951),"Remarks on the method of paired comparisons : I, II, III," Psychometrika 16, 3-9, 203-206, 207-218.

中山剛, 三浦種敏(1966), "音質評価の方法論について," 日本音響学会誌 22, 319-331.

翁長博, 古江嘉弘, 松浦邦男(1988), "反射音構造の物理パラメータと「拡がり感」について," 日本音響学会誌 44, 658-668.

I.Pollack and W.Trittipoe(1959),"Binaural listening and interaural noise cross correlation," J. Acoust. Soc. Am. 31, 1250-1252.

C.Pösselt, J.Schröter, H.Opitz, H.Divenyi, and J.Blauert(1986),"Generation of binaural signals

for research and home entertainments," Proc. 12th International Congress on Acoustics, Toronto, B1-6.

D.W.Robinson and L.S.Whittle(1960),"The loudness of directional sound fields," *ACUSTICA* 10, 74-80.

佐藤史明, 日高新人, 橘秀樹(1992), " 室内音響模型実験におけるバイノーラル収録・再生法, " 日本音響学会講演論文集, 2-5-16(Mar.).

B.M.Sayers and E.C.Cherry(1957),"Mechanism of binaural fusion in the hearing of speech," *J. Acoust. Soc. Am.* 29, 973-987.

M.R.Schroeder and B.S.Atal(1963),"Computer simulation of sound transmission in room," *IEEE Intern. Conv. Rec.* 11, 150-155.

K.Sekiguchi, S.Kimura, and T.Hanyuu(1992),"Analysis of sound field on spatial information using a four-channel microphone system based on regular tetrahedron peak point method," *Applied Acoustics* 37, 305-323.

E.A.G.Shaw and R.Teranishi(1968),"Sound pressure generated in an external-ear replica and real human ears by a nearby point source," *J. Acoust. Soc. Am.* 44, 240-249.

G.Steinke(1983),"Deltastereophony - a sound system with true direction and distance perception for large multipurpose halls," *J. Audio Eng. Soc.* 31, 500-511.

杉山知之, 木村翔, 関口克明(1982), " 室内音響における音場の評価と拡がり感について, " 日本音響学会聴覚研究会資料 H-82-35.

田端淳, 浜田幸雄, 買手正浩, 田中瑞穂(1992), " マルチスピーカ型音場シミュレータによる再生音場の評価について その1 音響物理指標による評価, " 日本音響学会講演論文集, 2-3-4(Oct.).

L.L.Thurstone(1927),"A law of comparative judgement," *Psychol. Rev.* 34, 273-286.

W.S.Torgerson(1958),"Theory and methods of scaling," John Wiley & Sons, 247-297.

K.Ueda, M.Kiyama, and M.Morimoto(1992)," Basic study of estimation of auditory source width (ASW) (1) ASW of two adjacent 1/3-oct band noise," J. Acoust. Soc. Am. 92, 2434-2435.

H.Wallach, E.B.Newman, and M.R.Rosenzweig(1949),"The precedence effect in sound localization," Am. J. Psychol. 52, 315-336.

Y.Yamasaki and T.Itow(1989),"Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method," J. Acoust. Soc. Jpn.(E) 10, 101-110.

## 本研究に関する発表論文一覧

### A. 学術論文

No.	題目	掲載誌	共著者
1	A chart of %-split of sound image	J. Acoust. Soc. Jpn. (E)11, 157-160 (1990)	森本政之, 前川純一
2	みかけの音源の幅と第一波面の法則の関係	日本音響学会誌 49, 84-89(1993)	森本政之
3	Relation between auditory source width in various sound fields and degree of interaural cross-correlation	Applied Acoustics 印刷中	森本政之, 古江嘉弘
4	Basic study on sound field simulation based on running interaural cross-correlation	Applied Acoustics 印刷中	森本政之

### B. 学術報告

No.	題目	資料名	共著者
1	音場創生と Virtual reality	J. Technology Transfer 14, 19-20(1991)	単著

2	音場の物理および心理特性のコンピュータによるモデル化と予測に関する国際シンポジウム	日本音響学会誌 48, 283-284(1992)	森本政之 他
3	時系列両耳間相互相関度(RCC)の測定	日本音響学会誌 49, 111-116(1993)	単著

### C. 学術講演

No.	題目	資料名	共著者
1	コンサートホールの音場解析の新しい試み	音響学会講演論文集 2-7-18 (1989.Oct.)	森本政之, 水島考一郎
2	RCCに基づいた音場再生に関する基礎実験	音響学会講演論文集 2-7-11 (1990. Mar.)	森本政之, 水島考一郎
3	時系列両耳間相互相関による室内音場の表現に関する一考察	音響学会講演論文集 1-2-11 (1990. Sep.)	森本政之, 水島考一郎
4	反射音構造が異なる音場のみかけの音源の幅と両耳間相関度の関係	音響学会講演論文集 1-2-10 (1990. Sep.)	森本政之, 前川純一, 古江嘉弘
5	みかけの音源の幅と第一波面の法則の関係	音響学会建築音響研究会資料 AA91-7 (1991)	森本政之
6	両耳聴信号処理モデルに基づいた音場再生の基礎的検討	電子情報通信学会 応用音響研究会資料 EA91-54 (1991)	森本政之

- |    |   |  |               |
|----|---|--|---------------|
| 7  | 反射音が第一波面の法則を越える<br>場合のみかけの音源の幅の予測   | 音響学会講演論文集<br>1-2-7 (1991.Oct.)                                     | 森本政之          |
| 8  | 両耳聴信号処理モデルに基づいた<br>音場再生の基礎的研究   | 音響学会講演論文集<br>1-2-21 (1991.Oct.)                                    | 森本政之          |
| 9  | 時系列両耳間相互相関関数に基づ<br>いた音場再生の基礎実験  | 音響学会講演論文集<br>2-5-17 (1992. Mar.)                                   | 井口日文,<br>森本政之 |
| 10 | 時系列両耳間相互相関関数に基づ<br>いた音場シミュレーション   | 電子情報通信学会<br>応用音響研究会資料<br>EA92-4 (1992)                             | 森本政之          |
| 11 | 音場再生における空間分割の基礎<br>的研究  | 音響学会講演論文集<br>2-3-9 (1992.Oct.)                                     | 杉浦聡,<br>森本政之  |
| 12 | The relation between auditory source<br>width and the law of the first wave<br>front.                           | Proceedings Institute of<br>Acoustics(U.K.) vol.14<br>part2 (1992) | 森本政之          |
| 13 | Basic study on sound field simulation<br>based on running interaural cross-<br>correlation.                     | International Congress<br>on Acoustics, Beijing<br>L3-7 (1992)     | 森本政之          |
| 14 | How to measure the degree of interaural<br>cross correlation as a physical factor for<br>auditory source width. | J. Acoust. Soc. Am.<br>92, 2435(1992)                              | 森本政之          |
-