

室内音響設計および音響測定の高精度化に関する研究

西 隆 司

室内音響設計および音響測定の高精度化に関する研究

西 隆 司

DOC
1989
7
電気系

論文目次

1. 序論	・・・	1
1.1. 研究の背景および位置づけ	・・・	1
1.2. 研究の概要	・・・	3
2. 室内音響設計のためのCADシステム	・・・	4
2.1. CADシステム開発の背景	・・・	4
2.2. CADシステムのハード、ソフト構成	・・・	4
2.3. 音響設計用ソフトウェアの処理の流れ	・・・	5
2.4. 反射音線を求める二つの方法	・・・	8
2.4.1. 内部データの構造	・・・	8
2.4.2. 二つの方法に共通する処理	・・・	8
2.4.3. 虚像法	・・・	11
2.4.4. 音線追跡法	・・・	13
2.4.5. 二つの方法の比較	・・・	15
2.5. 出力表示	・・・	17
2.5.1. 単一壁面の影響	・・・	17
2.5.2. 反射音線の時間経過	・・・	17
2.5.3. 交点座標の空間分布	・・・	18
2.5.4. エコータイムパターン	・・・	18
2.5.5. 受音点指向性分布	・・・	19
2.5.6. 物理パラメータ	・・・	19
2.5.7. 残響時間	・・・	20
2.6. 結言	・・・	20
3. 音場シミュレーション（虚像法）を用いた室形状と初期反射音との関係	・・・	24
3.1. 音場シミュレーション研究の背景	・・・	24
3.2. 音場シミュレーション	・・・	25
3.2.1. 物理量とその定義	・・・	25
3.2.2. 基本的な室形の分類	・・・	27
3.2.3. シミュレーション手法	・・・	27
3.3. 長方形と扇形の室形の比較	・・・	28
3.3.1. 天井高の影響	・・・	28
3.3.2. 幅の影響	・・・	31

3.3.3.奥行きの影響	・・・32
3.3.4.基本的な室形比較のまとめ	・・・34
3.4.室形に関する諸問題	・・・35
3.4.1.室容積一定時の(天井高/幅)比の影響	・・・35
3.4.2.室容積一定時の(奥行き/幅)比の影響	・・・37
3.4.3.側壁傾斜の影響	・・・38
3.4.4.扇形の開き角の影響	・・・38
3.4.5.基本的室形の比較	・・・40
3.4.6.音源の位置の違い	・・・41
3.5.結言	・・・43
4.残響時間に関する心理実験	・・・44
4.1.研究の背景	・・・44
4.2.残響時間の弁別限	・・・45
4.2.1.心理実験の方法	・・・45
4.2.2.実験結果(広帯域)	・・・46
4.2.3.実験結果(狭帯域)	・・・46
4.3.好ましい残響時間	・・・47
4.3.1.音源信号の性質を表す各種物理量	・・・47
4.3.2.音源の種類に依存した好ましい響き(心理実験)	・・・54
4.3.3.好ましい響きと物理量との対応	・・・57
4.4.心理実験結果のCADソフトへの適用	・・・61
4.5.結言	・・・62
5.反射音の指向性を考慮した新しい音響測定法	・・・64
5.1.音響測定法開発の背景と位置づけ	・・・64
5.2.測定システム	・・・65
5.2.1.音源系	・・・66
5.2.2.受音系(広帯域アレイマイクロホン, WAM)	・・・66
5.2.3.物理パラメータ	・・・69
5.2.4.従来の物理パラメータとの対応	・・・72
5.3.結言	・・・72
6.実音場における物理パラメータ、心理パラメータの分析	・・・73
6.1.評価対象の音場	・・・73
6.2.物理パラメータの多変量解析	・・・73
6.3.心理実験	・・・76
6.3.1.受音点間の主観的な違い	・・・78

6.3.2.物理、心理パラメータの対応	・・・78
6.3.3.響きと物理パラメータとの関係	・・・79
6.4.結言	・・・81
7.結論	・・・83
謝辞	・・・84
参考文献	・・・85

1. 序論

1.1 研究の背景および位置づけ

コンサートホールに行ってオーケストラが演奏する音を聴いてみると実にさまざまな印象を持つ。聴覚の心理的な印象に限っても、各パートの音像のしまり具合、音像の融合感、音像定位の方向、ホール独特の音に包み込まれた雰囲気、フォルテシモからピアノシモまでの音が聴きとれるダイナミックレンジの広さ、スタッカート音の歯切れの良さ、響きの長さ、音の豊かさ、大きさ等があり、これらの印象が音楽ホールとしての良し悪しを評価する上で重要な要因になっている。これらの要因の中には、たとえば音の歯切れの良さや響きの長さのように各々が互いに独立の心理的な要因でなく、一方が良くなれば他方が悪くなるといった要因も含んでいるため、音場の評価には総合的な視野の広さが必要である。

音場の評価は、Fig.1.1に示すように室内音響の研究の中核をなす重要な位置を占めており、これを取り巻く4つの研究テーマ—音響設計、音響測定、音場シミュレーション、心理評価—相互の橋渡しをする上でも重要である。[1]

4つの研究テーマの現状について以下に述べる。

まず、室内音響設計における設計目標は従来、残響時間がその中心であった。しかし、この物理パラメータは部屋の形や内装材料の配置に依存せず求めることができるため、同じ残響時間であっても部屋の形が異なると違った心理的印象を持ったり、同一音場内の客席間の心理的印象の違いを説明できない等の点から、残響時間だけを設計の目標にするのは不十分である。最近の研究成果から比較的初期の反射音が聴感に大きな影響を持つことが指摘されてきており、この点からも初期反射音を積極的に採り入れた音響設計を行う必要がある。

室内音響測定分野においても、残響時間は過去重要な役割を演じてきた。しかし、これが指向性を持たない物理パラメータであり、室内音場を音源と受音点との中間に位置する線形の伝送系として考えた場合、この伝送系を規定するには空間的な方向性を考慮する必要があるため、この分野においても残響時間だけでは不十分である。従って、音場をより分析的に把握する新しい方法を開発する必要がある。

音場シミュレーションは、音響設計用に開発されたCADシステム（Computer Aided Design System）の発展した形として現在位置づけられているが、吸音率データの精度上の問題、客席の取扱の難しさ、幾何音響の前提条件からくる制約等の理由から、絶対的な音場評価の手段としては実用のレベルまで達していないのが現状である。

音場の心理評価に関しては、音楽が実際に演奏されている原音場を心理評価に用いる方法と、スピーカ等の再生系によって原音場をシミュレートし、これを心理評価に用いる方法の2種類があるが、これらの方法にはそれぞれ一長一短がある。同時に多くの心理評価ができる点では原音場を使う方法が優れているが、同一音場内の座席間差を評価する場合にはこの方法は適さない。一方、シミュレート音場を用いる場合、実際の音場ではあり得ない音を発生する危険性や、音の到来する方向がスピーカの数や配置によって制約を受けるなどの問題点がある。

以上に述べた室内音響における研究の現状を踏まえ、本研究ではその目的を
 (1)音場の心理的な印象の違いをより良く説明する物理パラメータの抽出、
 (2)その物理パラメータを音場内で精度良く測定するシステムの開発、

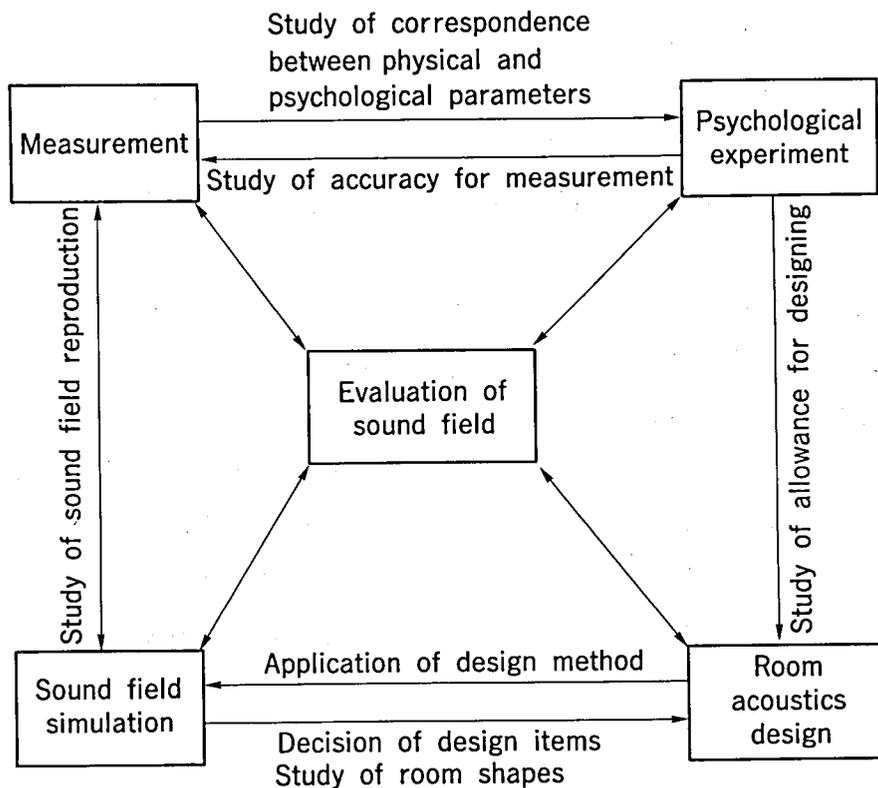


Fig.1.1 Relations between research themes on room acoustics.

(3)音響設計の段階における新しい物理パラメータの導入と評価

において。本研究により従来よりも高い精度の音場評価が可能になるものと期待される。

1.2 研究の概要

第2章では、計算機を使ってコンサートホール等の音場の音響設計を行うために開発したCADシステムについて述べる。

室内音響設計は自由空間に建物という一種の拘束条件を課すことに対応しているが、第3章では、第2章で述べたCADシステムを音場シミュレーションの道具として使い、部屋の基本的な形状と物理パラメータとの対応関係について考察する。

第4章では、室内音響設計の最も重要な物理パラメータの一つである残響時間について、演奏される楽音信号自身の持つ物理的な性質と心理的に好ましい残響時間との対応について検討する。また心理実験で得られた知見が計算機を用いた音響設計にどのように採り入れられているかについてもこの章で述べる。

第5章では、室内の音響測定を高い精度で行うために新しく開発した測定システムについて、このシステムの特徴、新しく提案する7種類の物理パラメータを中心に述べる。

第6章では、前章で述べた測定システムを実音場の測定に用い、測定された物理パラメータをもとにして行った音場の分類について述べる。この結果から、ここで提案した新しい測定システムの有効性を明らかにする。また音場間の心理的な違いについての心理実験を行い、この実験で抽出された心理パラメータと物理パラメータとの対応関係についても明らかにする。

2. 室内音響設計のためのCADシステム[2]-[5]

2.1 CADシステム開発の背景

従来のコンサートホール等の音響設計はほとんど人間が行ってきた。この音響設計の中には、設計者の高度な判断が必要でアルゴリズム化が困難な部分と、人間が行うのに時間のかかる単純作業の部分とがあった。我々はコンサートホール等の音響設計を数多く行ってきた経験を生かして、特に単純作業部分をアルゴリズム化しこれを計算機で肩代りするシステム - CADシステム (Computer Aided Design System) - の開発を行った。研究を始めた当初は、16ビットミニコン(HP1000)、プログラム言語としてFORTRANを使い、主に平面図、断面図の二次元の室形をもとにした設計を行ってきた。このシステムは、コンパイラ言語を使っているためもあって、特にグラフィックを含むプログラム開発に時間がかかる欠点があった。そこでグラフィック処理が容易な32ビットミニコン(HP9000)を導入し、コンパイラ型のBASICでソフトウェアの開発を続けてきた。このソフトウェア開発の目標は、音響設計を実際の室形に即した三次元の幾何学的なモデルを用いて行うことである。室形が二次元から三次元へ進んだ場合、プログラムとして使い回しのきくものではなく、まったく最初から三次元設計のアルゴリズムを考えねばならなかった。開発当初意図したのは、

- (1)誰が設計を行うにしても、座標の入力から修正、処理、出力まで容易に行えること、
 - (2)処理手法として、虚像法、音線追跡法の両手法が可能で、設計者に選択の幅をもたせられること、
 - (3)出力メニューを豊富にそろえること、特に最近重要性が叫ばれている初期反射音についての情報をふやすこと、
- の三点である。

本章では、CADシステムのハード、ソフト構成、室内音響設計の流れについて述べ、更にこの流れに沿った各プログラムモジュールの詳細について述べる。

2.2 CADシステムのハード、ソフト構成

CADソフト開発に用いたシステム構成をFig.2.1に示す。このシステムは、HP製スーパーミニコン9000モデル520を中心に、座標入力用としてデジタイザ、処理結果を格納するための640KB、2ドライブのマイクロ・フロッピーディスク、結果のグラフィック表示のためのグラフィック・ターミナル、XYプロッターから構成されている。プログラム言語は、HP-BASICを使っているが、この言語の特徴は特にグラフィック、マトリクス関連の命令が充実していること、構造化プログラミングが可能なことである。また言語がコンパイラ型のBASICであるにもかかわらず、プログラム作成、テストラン、バグの発見、修正等が容易に行えるため、プログラム開発に要する期間を大幅に短縮できた。プログラム全体は約10,000ラインに及んでいるが、各プログラムがモジュール化されているため、大変見やすいものとなっている。

2.3 音響設計用ソフトウェアの処理の流れ

Fig.2.2に室内音響設計用CADの概念的な流れを示す。CADによる処理は、幾何学的な室形状、内装材料等を入力データとし、その特徴パラメータを抽出する過程であるということができる。特徴パラメータは、単に物理的特徴を表すものというばかりでなく、聴覚上の印象（以後、聴感と略す）とも対応のとれる量でなけ

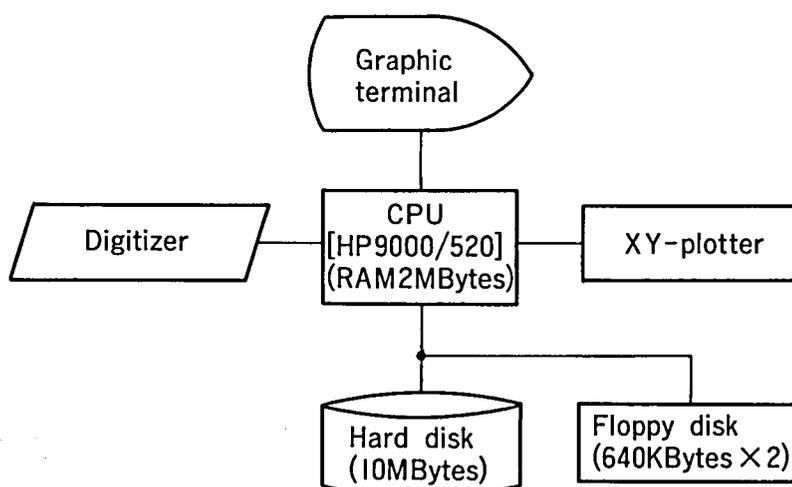


Fig.2.1 Configuration of CAD system for room acoustics.

ればならない。また、処理の結果を見て異常があれば室座標データを修正して処理を繰り返す、一種のフィードバック系を形成しているのも、本システムの特徴である。

Fig.2.2の概念図をもとにした三次元CADソフトの流れをFig.2.3に示す。三次元CADは、大きく分けて三段階から成り立っている。第一段階は室座標データ、内装材料データ、音源・受音点座標データを入力するためのものである。ここでは、ディジタイザを使って平面図、断面図の二次元データから三次元立体を作るという手法を用いている。平面図、断面図から入力することが不可能な室形（例えば複雑な形状を持つバルコニーや反射板）は、上記入力と別に入力できるよう配慮されている。

第二段階は、三次元データをもとにした処理手法の選択と処理の実行である。本ソフトの処理手法としては、虚像法（Image Method）、音線追跡法（Ray-tracing Method）の二種類が使えるようになっている。また、音源の指向特性（全方向一様、カーディオイド型の特性の二種類）の選択や、特定の壁面で反射した音が到達する領域の表示もできるように考慮した。

第三段階は、処理によって得られた結果を視覚的に分かりやすく表示するためのものである。この中には、処理結果の保存、回復や従来法による残響時間設計を含んでいる。

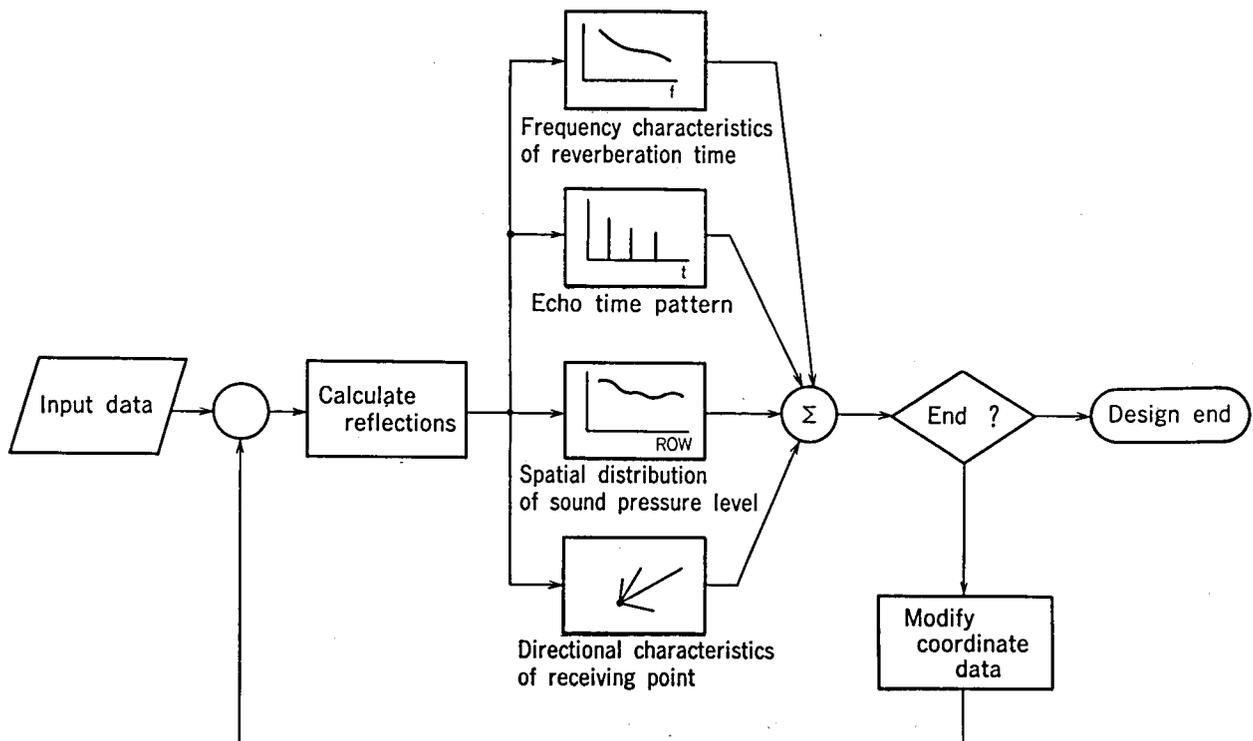


Fig.2.2 Conceptual flow-diagram for CAD software.

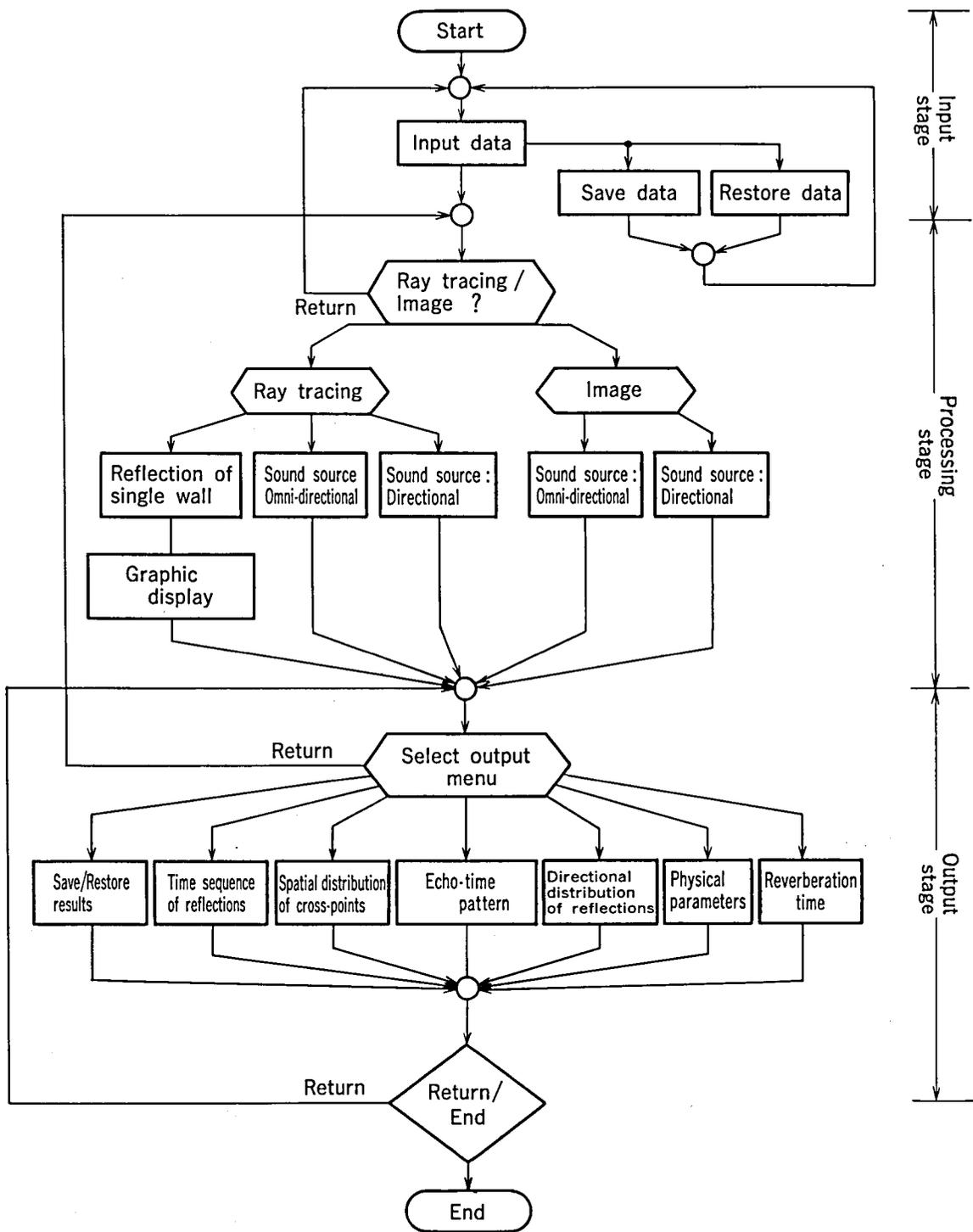


Fig.2.3 Flow-diagram of CAD software.

以後主に第二段階のプログラム・モジュールについて、その基本アルゴリズム、出力例を示す。

2.4 反射音線を求める二つの方法

音源から出た音が受音点に到達するまでの経路すなわち反射音線は、以後の処理を行う際の基礎データとして重要である。本章では、この反射音線を求めるために必要な室データの記述法、処理手法（虚像法、音線追跡法）について述べる。

2.4.1 内部データの構造

三次元の室形を表すには、頂点座標の他、壁面の吸音率データ、面積、法線ベクトルが必要である。頂点のX,Y,Z座標は、Fig.2.4の頂点座標リスト(V-list)中に格納されている。また壁面リスト(F-list)中には壁面の頂点の始めと終わりを表す番号が格納されている。このようにして室形の幾何学的な形状は、F-listとV-listを参照して決定される。また壁面の内装材料の吸音率周波数特性は、125Hzから4kHzまで1/1オクターブの間隔で属性リスト(Attribute)内に格納されている。これらのデータのうち、1kHzの吸音率データを用いて反射音線の計算を行っている。

虚像法、音線追跡法によって処理された結果得られる、壁面との交点座標や音源から受音点までの経路を表すポインターは、それぞれFig.2.5のC-list、Ldc-ptr中に格納されている。また、エコータイムパターン作成の基礎データとなる各音線の相対音圧レベル、遅延時間はLdc-list中に格納されている。

以上の内部データ構造の特徴は、Fig.2.4、2.5に示すように、それぞれのリストの最初の番地にそのリスト中の総データ数を書き込んだ形式となっている点である。

2.4.2 二つの方法に共通する処理

虚像法、音線追跡法ともに幾何音響を前提とした処理法である。この幾何音響では光との類似性を基本にしており、音の直進性、入射角と反射角が等しい正反射性や壁面で反射された音のエネルギーが、壁面の吸音率-残響室法により測定したランダム入射吸音率-だけ入射音に比べて減少するという性質を仮定している。壁面による吸音の他、音のエネルギーは伝播距離の逆二乗則に従って減少することを仮定した。また、取り扱いの難しい客席面は全吸音とし、この面からの反射を無視した。

Number of coordinates

	X coordinate	Y coordinate	Z coordinate
0	n	/	/
⋮			
n			

V-list : 3 dimensional coordinate data of vertexes.

Number of planes

	X coordinate	Y coordinate	Z coordinate
0	N	/	/
⋮			
N			

Nv-list : normal vector of walls.

Number of planes

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	Area	Distance
0	N	/	/	/	/	/		
⋮								
N								

Total surface area
 Total volume

Attribute : Attribute data of planes; frequency characteristics, area and distance from origin.

Number of planes

	First	Last
0	N	/
⋮		
N		

F-list : First and last vertex number of a plane.

Fig.2.4 Format of data for calculating reflections.

Number of crosspoints

	X coordinate	Y coordinate	Z coordinate	Delay
0	p	/	/	/
⋮				
p				

C-list : 3 dimensional coordinate data of crosspoints and delay time.

	Plane #
0	p
⋮	
p	

Number of crosspoints

C-plane : Plane number list.

Number of reflections

	Level	Delay
0	q	/
⋮		
q		

Ldc-list : Relative level and delay time list of reflections.

Number of reflections

	First	Last
0	q	/
⋮		
q		

Ldc-ptr : First and last pointer list of reflections.
 These pointers correspond to C-list data.

Fig.2.5 Structure of stored data.

両手法に共通する処理の中で重要なのは、音線と壁面との交点が壁面内にあるかどうかを判定するアルゴリズムである。この判定条件には、多角形の隣接した二つの頂点と交点とを結んだ線分によってできる内角の合計を用いている。[6] Fig.2.6に示すようなK角形の場合、

$$\text{交点が多角形の内部の時：} \sum_{i=1}^K \theta_i = 2\pi \quad (2-1-a)$$

$$\text{交点が多角形の外部の時：} \sum_{i=1}^K \theta_i = 0 \quad (2-1-b)$$

になる。上式中の θ_i の加算は、 θ_i の方向も考慮している。この方向の検出には、隣接した頂点ベクトル同士の外積の方向と壁面の法線ベクトルの方向が一致するかどうかを用いた。両者の方向が一致している場合、角度の加算を、そうでない場合には、角度の減算を行って(2-1)式を評価した。

2.4.3 虚像法

虚像法は、光学における鏡像法と同様のやり方で、音源の壁面に対するイメージ（虚像）を求めることにより反射音線の経路を決定する方法である。虚像法で反射音線を求める流れ図をFig.2.7に示す。まず、反射次数、計算を打ち切る条件—直接音に対する遅延時間と相対レベル—を設定する。壁面数をN、反射次数をnとすれば、この方法による計算時間は N^n に比例する。打ち切り条件のうち遅延時間は、聴感上特に重要な初期反射音部分—直接音到来後80ms以内—を含むことが望ましい。また、相対レベルとしては、残響時間計算の根拠となっている-60dBを用いた。この値は、反射音の聴感上の閾値とされている-15~-20dBよりも十分小さい値であり、実用上問題ないものと考えられる。[7]

本ソフトがカバーしている最大反射次数は、5次までである。反射次数を多くすればするほど遅延時間の長い反射音まで計算できる。この遅延時間の長い反射音

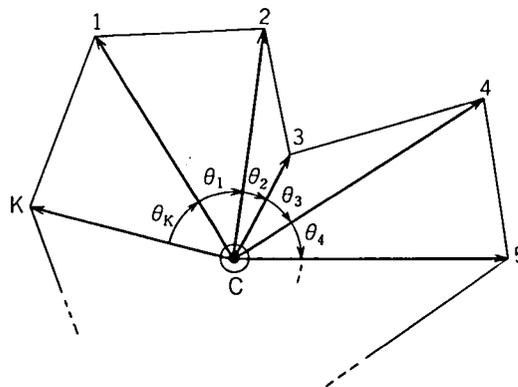


Fig.2.6 Judgement whether crosspoint (c) is within polygon or not.

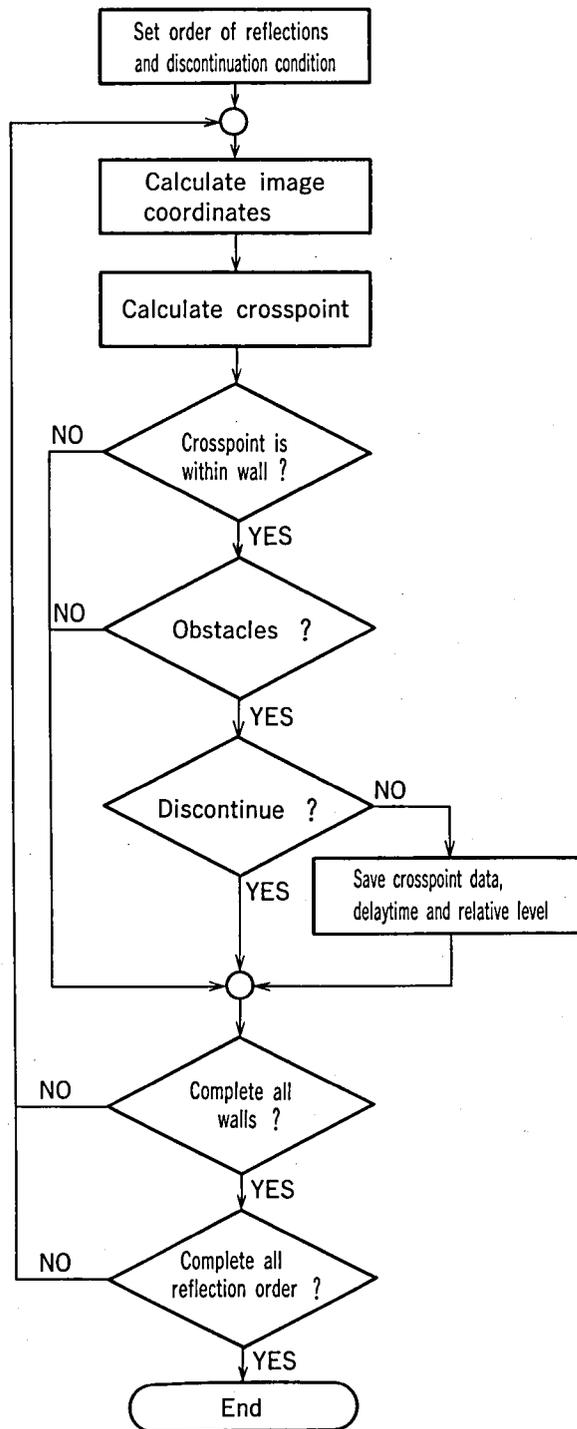


Fig.2.7 Flow-diagram for calculating reflections by image method.

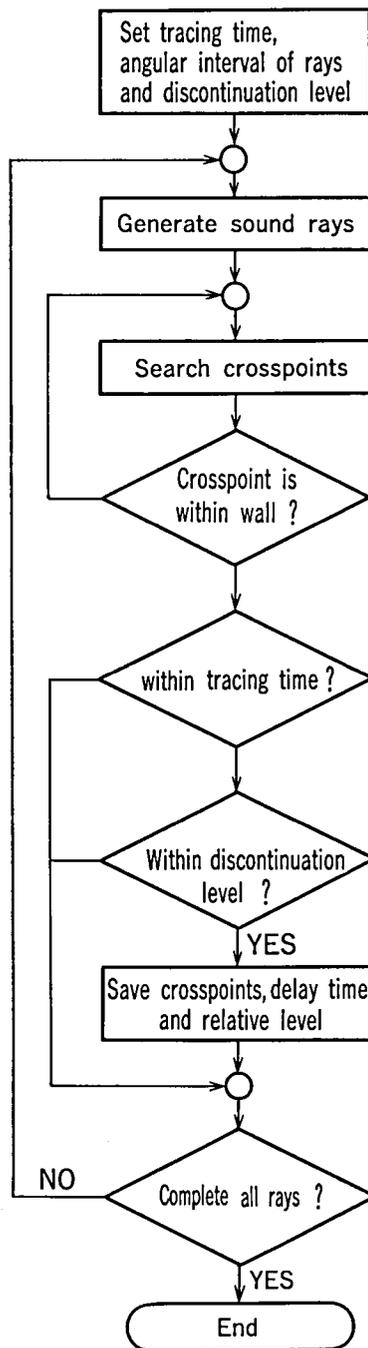


Fig.2.9 Flow-diagram for calculating reflections by ray-tracing method.

$$M = \sum_{i=-m}^m 1 \times \cos(i \times \theta_0) \quad (2-5)$$

但し、 l は、赤道（仮想球と水平面との交線）を含む面内の音線数で $(360^\circ / \theta_0)$ に等しく、 $(2m+1)$ は、 θ_0 間隔の緯線の総数である。

外部から与える条件は、音線を追跡する時間、発射音線の角度間隔、計算打ち切りレベルである。この手法が虚像法と大きく異なるのは、音線を離散的に発射しているために、受音点がある領域（受音エリア）となる点である。受音エリアとしては、さまざまな形状のものが考えられるが、我々は受音点を中心とした球を採用している。離散的な音線が必ず一度は受音エリアに当たるためには、受音エリアの球の半径 r は追跡時間 T 、発射音線総本数 M を使って次式で表される。

$$r = 2cT / \sqrt{M} \quad (2-6)$$

音線追跡法の基本となるアルゴリズムは、一点 x から方向余弦ベクトル a の方向に発した音線が壁面と当たる点 y を求めるものである。点 x と壁面との垂線の長さ d 、壁面の単位法線ベクトル n を使えば、 y は、

$$y = x + \{d / (a, n)\} \times a \quad (2-7)$$

から求めることができる。更に、反射音の方向を表す単位ベクトル b は、

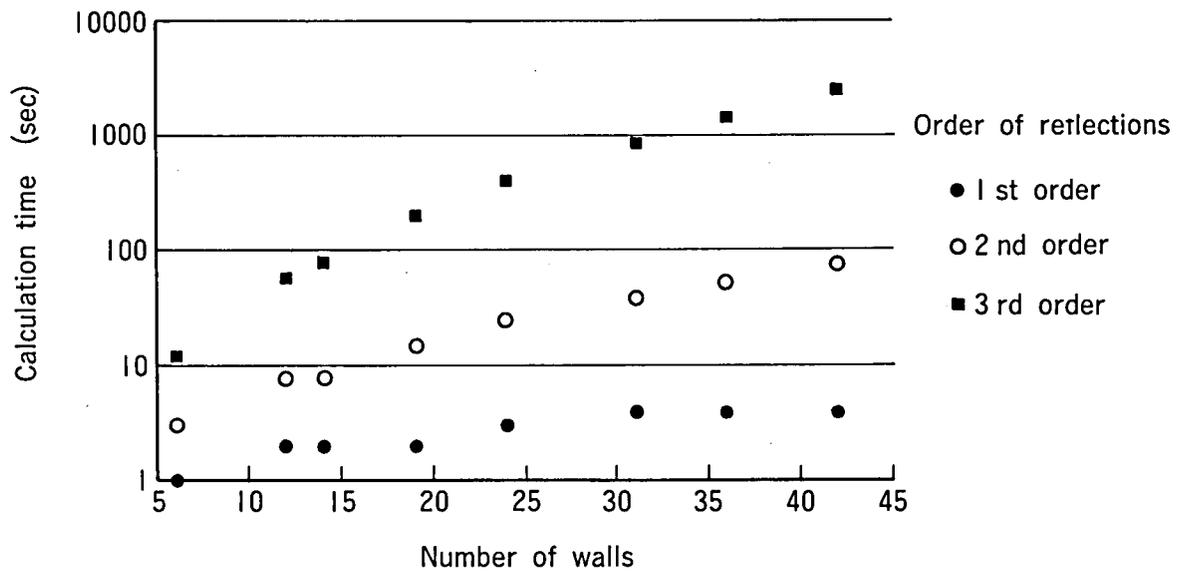
$$b = a - 2 \times (a, n) \times n \quad (2-8)$$

と表すことができる。

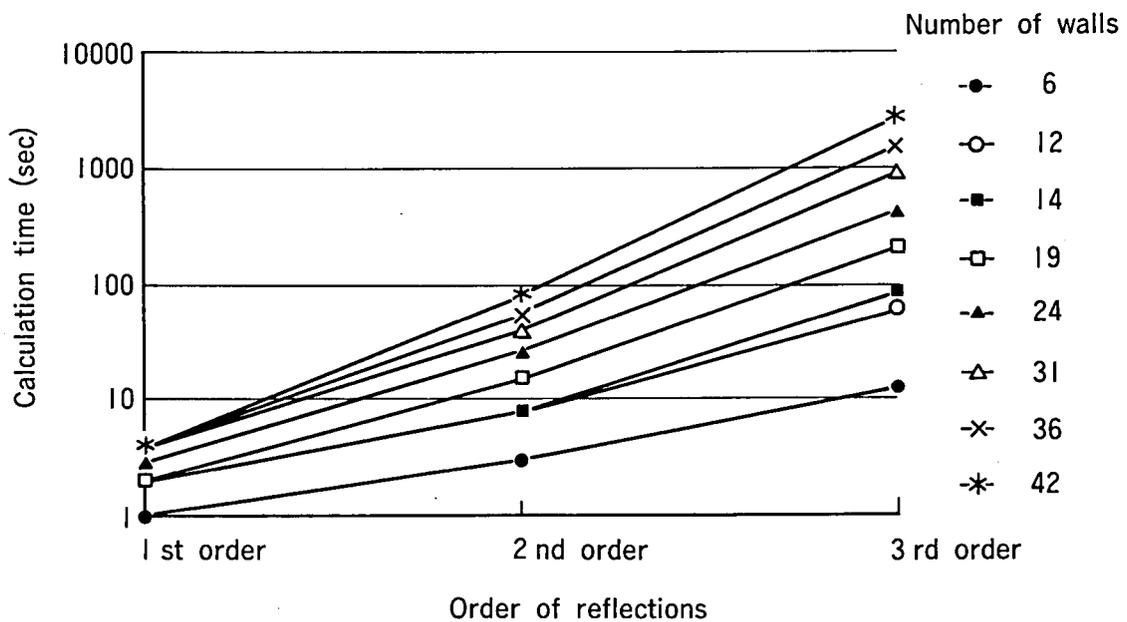
2.4.5 二つの方法の比較

虚像法は音源から受音点までの反射音線の厳密解を得ることができるのに対し、音線追跡法は近似解である。また設計で問題となるのは処理に要する時間である。一般のコンサートホールの場合、壁面数が100以上になることが多く、選択した手法によっては一点の反射音線を描くのに数日を要するという事も予想される。そこで、壁面数、反射回数や音線追跡時間によって両手法の計算時間がどのように影響を受けるか調べるシミュレーション実験を行った。

虚像法で壁面数、反射回数をパラメータとして種々変化させた結果をFig.2.10(a),(b)に示す。この図から虚像法の計算時間がほぼ N^2 に比例していることが分かる。またFig.2.10(b)の曲線を外挿することにより、ここで用いた1 MIPSの処理能力を持つ計算機では、5次以上の反射音を求めるのが計算時間から考えて非常に困



(b) Relation between calculation time and number of walls.



(a) Relation between calculation time and order of reflections.

Fig.2.10 Calculation time by image method.

難であることも分かる。

一方、音線追跡法の場合の、壁面数と計算時間との関係をFig.2.11に示す。この図から計算時間が壁面数に比例して増加している様子が分かる。

以上の実験から、壁面数の少ない小さな部屋の場合、あるいは壁面数の多い場合でも反射次数が2次程度までならば、虚像法の方が適していることが明らかになった。設計者が設計対象や要求される精度を考慮して両手法のうちから選択できることも本ソフトの特徴の一つである。

2.5 出力表示

2.5.1 単一壁面の影響

一般のコンサートホールではステージ側を反射性、後壁側を吸音性にするいわゆるライブエンド・デッドエンドに音場を設計することが多い。そのため、ステージ側の壁面の反射への寄与を調べる必要がある。音源から発した音が単一壁面に当たってどの領域に到達しているかをチェックした例をFig.2.12に示す。この図は、対象とした壁面を11×11のメッシュに分割し、そこでできた100個の交点について音線追跡法により一点ずつ反射音を求めたものである。

2.5.2 反射音線の時間経過

Fig.2.13に虚像法によって得られた2次までの反射音線を示す。グラフィック画面には、経過時間を0～10ms、10～20ms、20～50ms等に分けそれぞれの時間内に受音点に入射する反射音を表示できる。

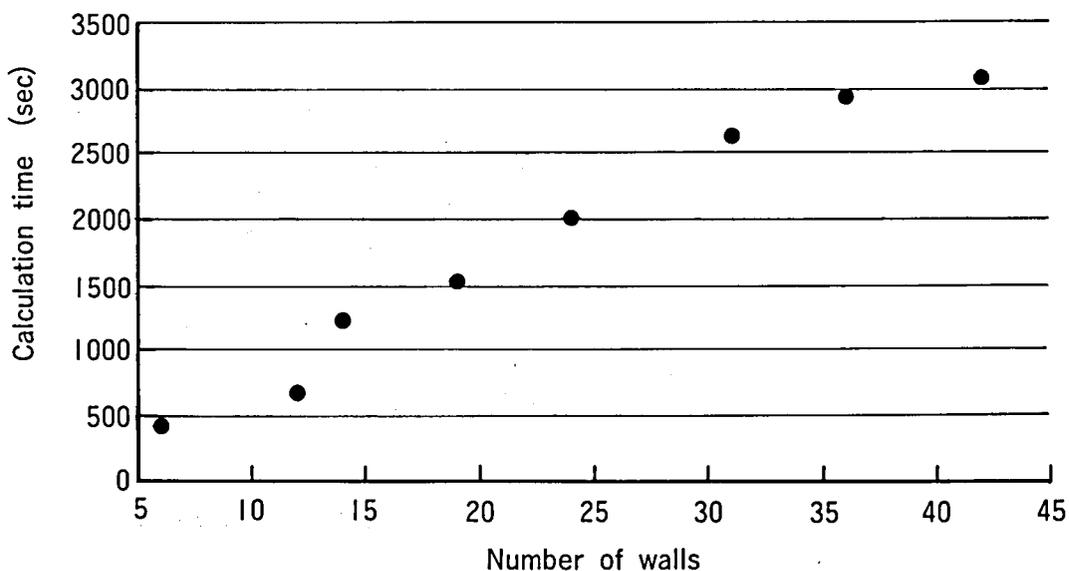


Fig.2.11 Calculation time by ray-tracing method.

2.5.3 交点座標の空間分布

反射音線と壁面との交点の分布はFig.2.14のように表示される。この出力も、経過時間毎に表示できるようになっている。反射音の時系列（エコータイムパターン）を参考にすれば、有害なエコーが発生している場合にそれを引き起こしている壁面を特定する判断材料としてこの図を利用できる。

2.5.4 エコータイムパターン

エコータイムパターンは、反射音の音圧レベルの時系列を表したものである。またこのパターンは、音源から受信点までのインパルス応答であり、物理パラメ

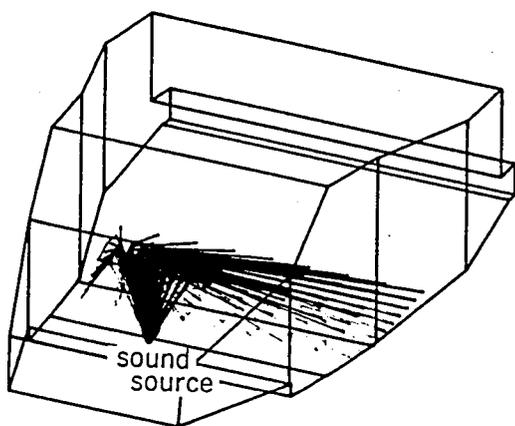


Fig.2.12 Reflection from a single wall.

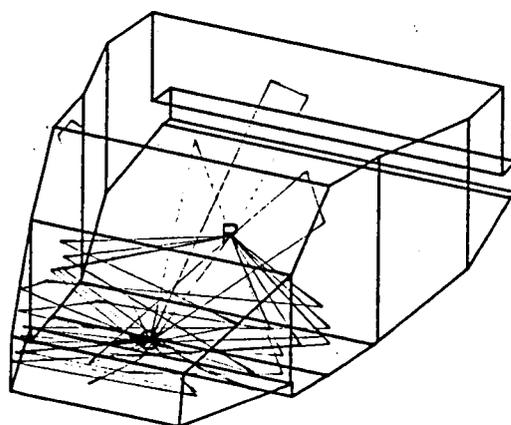


Fig.2.13 Sound-ray path from sound source to receiving point up to second order. (Image method)

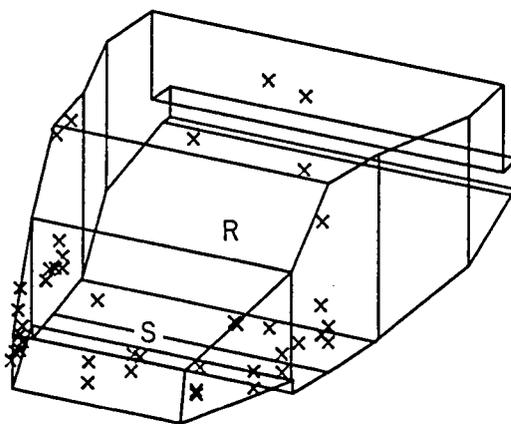


Fig.2.14 Spatial distribution of crosspoints by image method.

一タ抽出の基礎となる重要なものである。Fig.2.15に出力例を示すが、この例に示すような”もみの木”型が一般に良いと言われている。

2.5.5 受信点指向性分布

この出力は、反射音がどの方向からどの位の大きさに到来しているかを指向特性として表示したものである。前述の経過時間毎の出力例をFig.2.16(a)~(e)に示す。この例の場合、初期の段階では、反射音が主に前方から到来し、時間経過とともに全方向から一様に到来している様子が分かる。

2.5.6 物理パラメータ

以上のグラフィック表示は音場の物理的なふるまいを視覚に訴える目的のものであったが、聴感との対応性を考える場合、これらのパターンから特徴量を抽出して設計の妥当性を検討することになる。物理量としては、残響時間、80msec以内の初期反射音対全エネルギー比(D値)、および初期反射音の前方、後方エネルギー、側方エネルギー成分を採用した。これらのうち、D値の算出に必要な計算打ち切り以後の反射音の取り扱いは、次式を使って打ち切り以前の波形の形状を外挿する方法を採った。

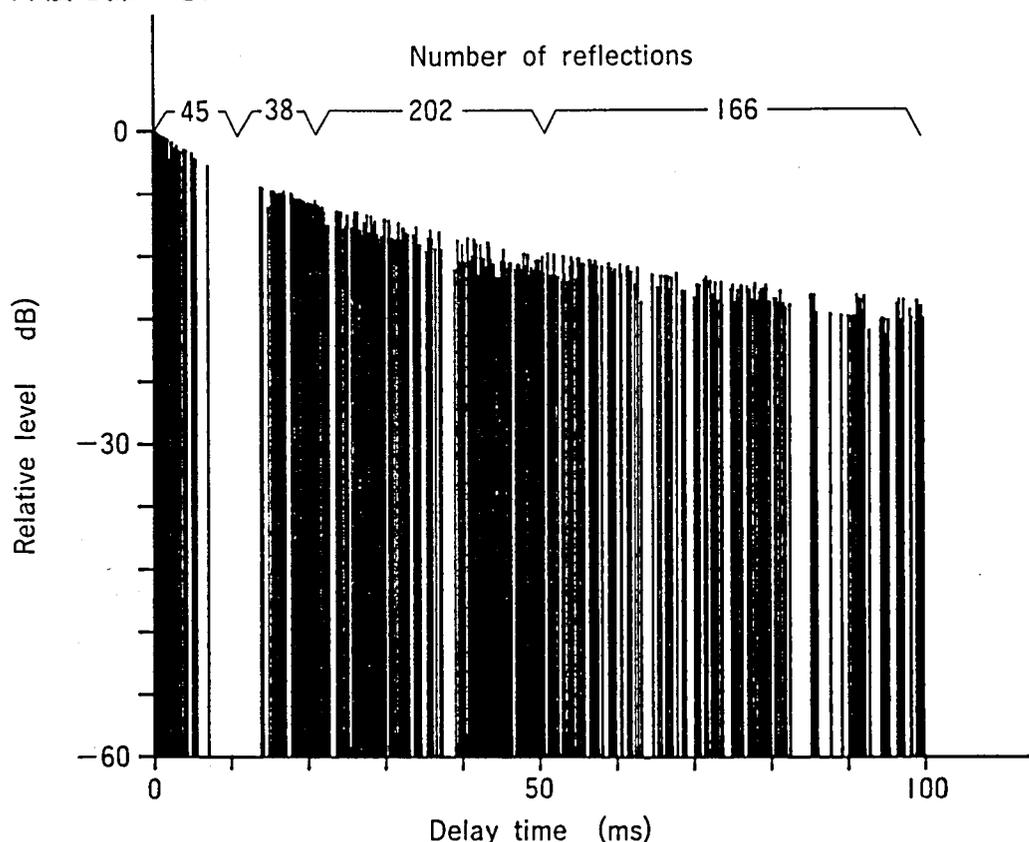


Fig.2.15 Echo-time pattern(time sequence of reflections) by ray-tracing method.

計算打ち切り時刻 (T) 以前のエコータイムパターン波形 (対数目盛り) を直線 (at+b) で最小二乗近似すれば、

$$D = \frac{\sum_{h=0}^{80ms} \epsilon_h}{\sum_{h=0}^{\infty} \epsilon_h} = \frac{\sum_{h=0}^{80ms} \epsilon_h}{\sum_{h=0}^T \epsilon_h + \int_T^{\infty} 10^{(at+b)/10} dt} \quad (2-9)$$

と表される。

上式で、 ϵ_h は、時刻 h におけるエネルギーを表す。

側方エネルギー成分については、最近聴感上の音像の拡がり感と対応することが明らかにされてきており、[10] この物理量をもとにした音場内空間分布から音場を評価することも可能になるものと思われる。

2.5.7 残響時間

Knudsen & Harris 法による残響時間 RT は次式で表される。

$$RT = \frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \quad (2-10)$$

上式で、V、S は室容積、全表面積を表し、 $\bar{\alpha}$ は平均吸音率、m は空気吸収率をそれぞれ表している。室容積 V は、

- (1) 三次元の室内に仮想の中心 (音源位置) を設定し、
- (2) この中心と各頂点とを結ぶ線分によって室内を小角錐の集合に分割し、
- (3) 小角錐の容積を合計する方法により、

算出している。反射音線の計算に用いたと同じ室の残響時間周波数特性の一例を Fig. 2.17 に示す。

2.6. 結言

CAD ソフトは実際に使うことによって使い勝手から見た問題点も出て来ることが予想され、それらをソフト的に改善して行くことが必要である。この CAD ソフトは 2~3 次の反射音を求める比較的マクロな音響設計の道具として十分であるが、絶対的に音場を評価するシミュレーションにこれを用いるには、精度、計算速度の点で更に改良が必要である。音場を絶対的に評価するのではなく、例えば室形状の違いが物理量にどう反映するかといった相対的な音場比較に本ソフトは十分利用できると思う。

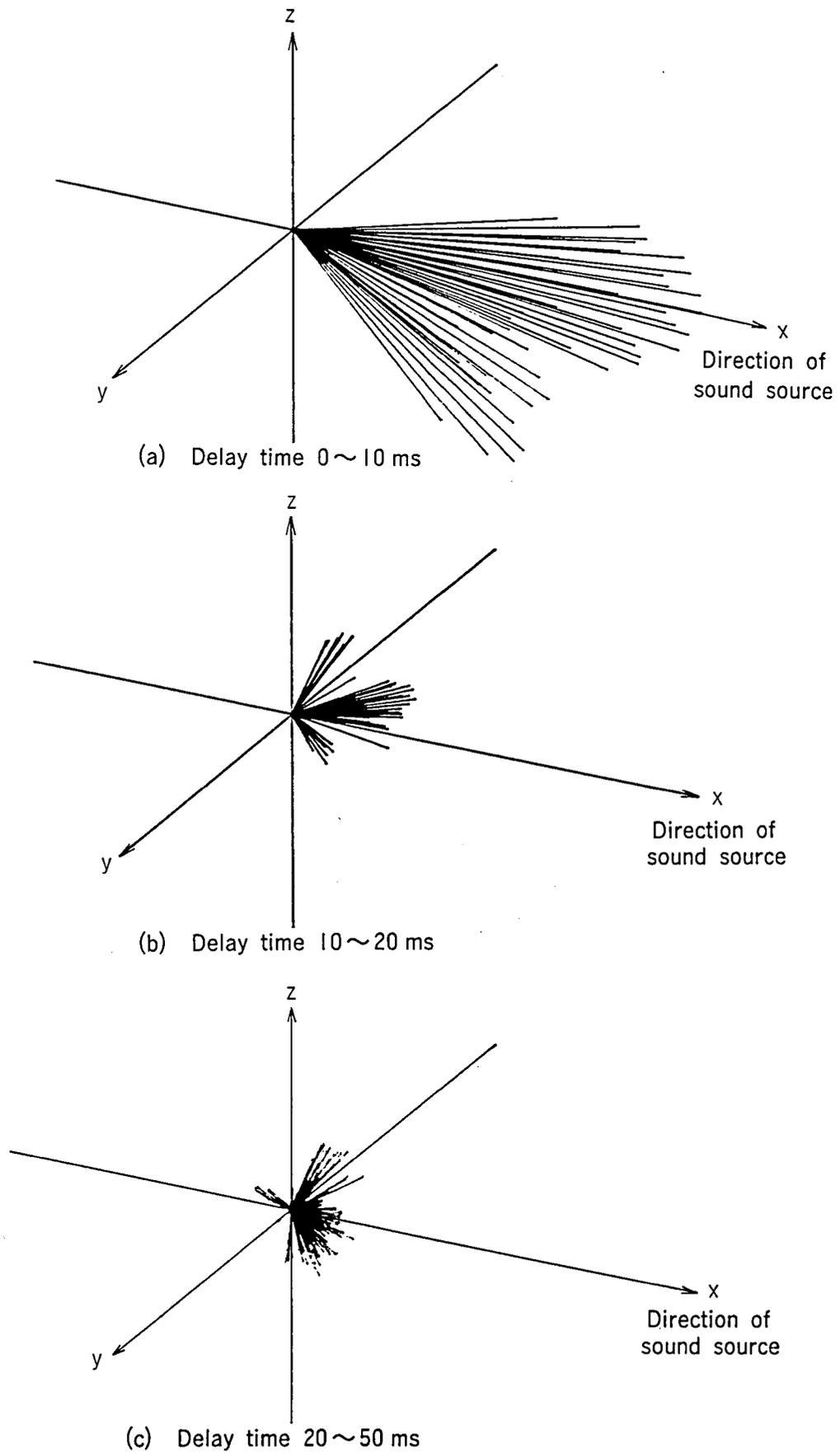
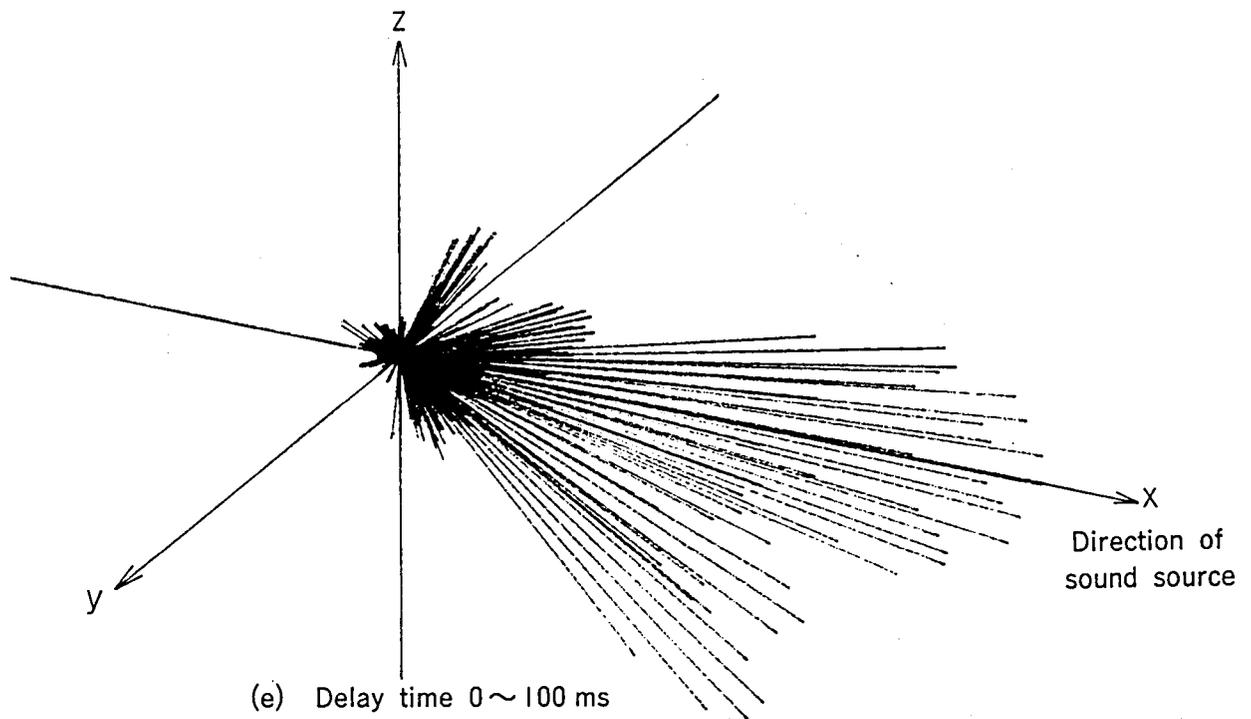
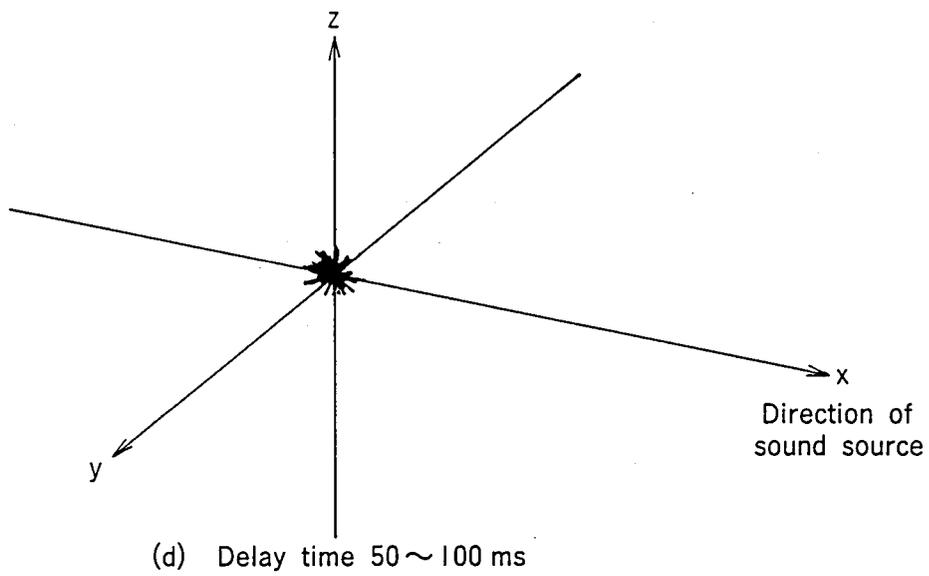


Fig.2.16 Directional characteristics of reflections classified with delay time.



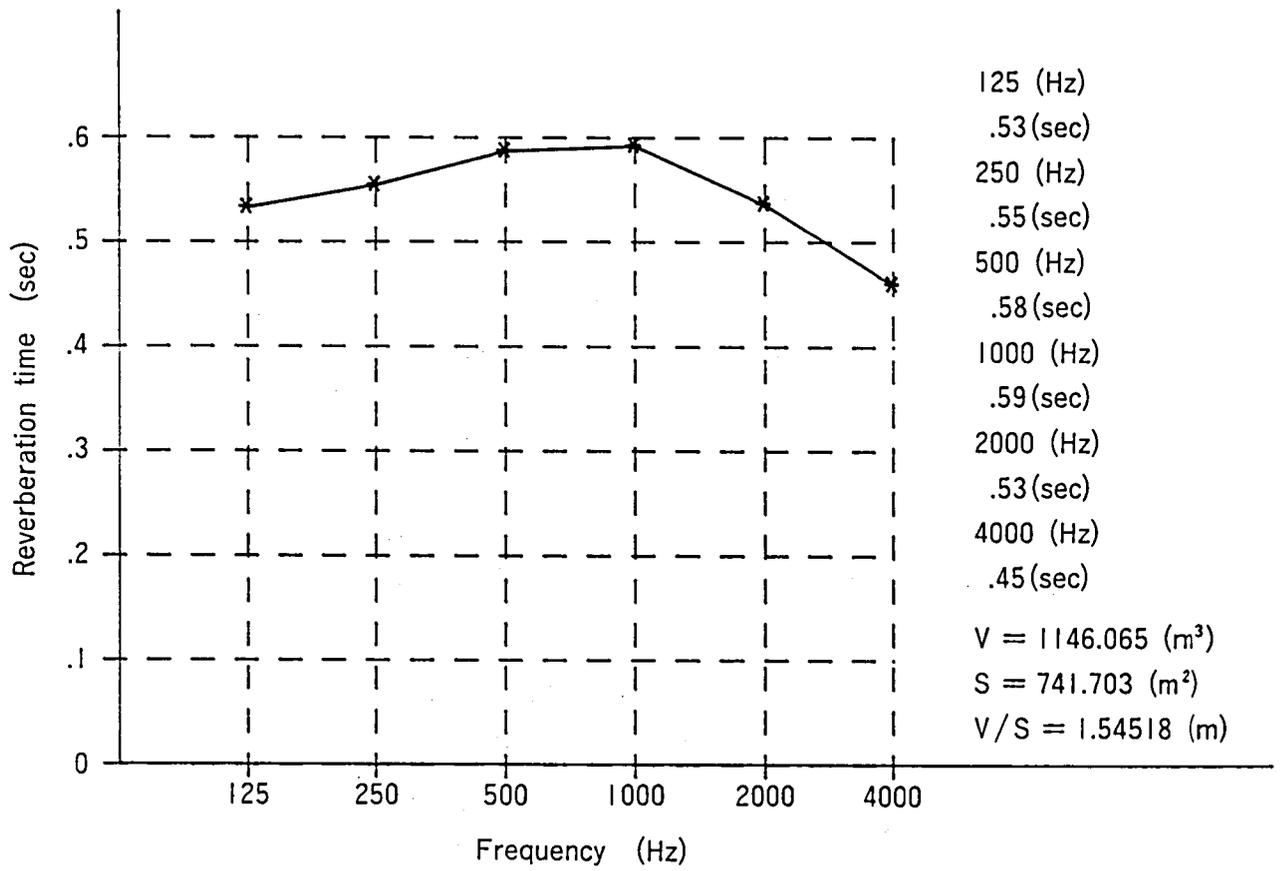


Fig.2.17 Frequency characteristics of reverberation time calculated by CAD system.

3. 音場シミュレーション（虚像法）を用いた室形状と初期反射音との関係[11]

3.1. 音場シミュレーション研究の背景

近年、計算機を用いた音響設計や音場シミュレーションがさかんに行われるようになってきたが[12][13]、幾何音響上の制約、吸音率データの精度の不足、客席空間の取扱いの難かしさ等の問題のため、室のインパルス応答の実測値とシミュレーション結果とを対応づけて評価するのは現時点では困難である。しかし、相対的な室形状の違いを評価するのに音場シミュレーション手法を用いるのは意味のあることである。

室の形状を決定するという事は、音響空間に一種の拘束条件を設定していると考えることができ、室のインパルス応答、更にこれから抽出される物理量もまったく自由な値をとることはできない。

残響時間が現在でも物理量として重要な位置を占めている理由は、これが心理的な響きと対応すること、測定可能な量であることの他に設計段階で予測できることにある。しかし残響時間は音場のマクロな特徴量であり、音場内の座席位置の違いを反映した物理量ではない。同一の音場内でも心理的な印象が異なるのはよく経験することであり、この観点に立った、座席の空間的な位置の違いを反映した物理量の確立が望まれてきた。

受音点における反射音の方向分布を物理指標化する試みはThiele以来行われてきた[14]-[17]が、最近Barron等によって初期反射音の側方効率（Lateral Efficiency、以後LEと略す）が主に音の拡がり感と対応する重要な物理量として提案されるにおよび、特に初期反射音エネルギーの方向特性が脚光を浴びるようになってきた。[18][19]

KuttruffはLEと同じ概念から発した”Seitenschallgrad”(以後Sgと略す)という物理量と基本的な室形との対応関係を音場シミュレーションにより調べた。[20][21] このSgは初期反射音の横方向のエネルギー成分と前後方向のエネルギーの比であるが、一般の音場では両者とも受音位置によって変動する物理量であるため、両者を分離して評価することが望ましい。

音の空間的印象に影響を与える物理量としては、LEの他にも初期反射音の横方

向エネルギー成分対全方向エネルギーの比(Lateral Component,以後L.C.と略す)が提案された。この量を制御することにより音像の空間的な拡がり幅が変わり、音源信号の種類によって好まれるL.C.の値も異なることが明らかにされてきた。

[10]

本研究では、音場の方向特性を表す物理量としてL.C.を単独で採り上げるのではなく、初期反射音の前方エネルギー対全方向のエネルギーの比(Front Component,以後F.C.と略す)、後方エネルギー対全方向のエネルギーの比(Back Component,以後B.C.と略す)、初期反射音エネルギー(Early Energy,以後ENGと略す)の4種を物理量として採用し、これらと基本的な室形との対応を総合的に評価することに主眼をおいた。これらの物理量のうちL.C.は受音空間の左右の位置によって変化し、F.C., B.C.は前後の位置により変化する。従ってL.C., F.C., B.C.の値を知ることにより、その物理量をもつ空間的な位置を予測することも可能である。一方ENGは音場の全体的な特徴を知る上で重要である。

物理量と心理的印象との対応の観点からは、F.C.やB.C.は音の距離感、奥行き感に、ENGは音の大きさの他拡がり幅や距離感に影響を与えるものと予想される。

また本研究では、室の天井高、幅、奥行き等の幾何学的寸法の変化が、初期反射音をもとにした4種の物理量の空間分布にどのように影響を与えるかを系統的に比較検討する。

3.2 音場シミュレーション

3.2.1 物理量とその定義

Fig.3.1に示すように、室の幾何学的形状、内装条件によって音源から受音点までの伝送特性、更にはこれから抽出される物理量は影響を受ける。ここでは直接音到来後80ms以内を初期反射音領域として採用した。第*i*番目の初期反射音がFig.3.2に示す方向から*m*回反射の後入射した場合、4種の物理量は次式で与えられる。

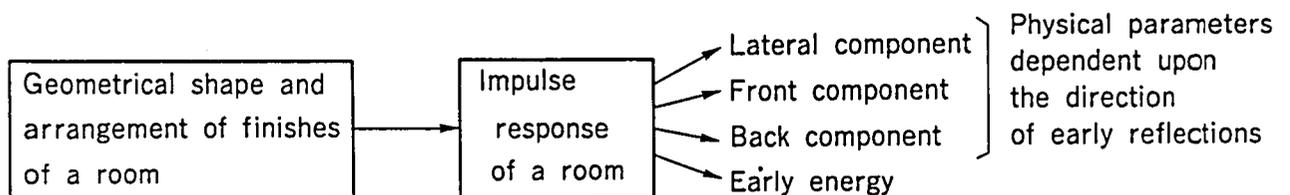


Fig.3.1 Flow diagram extracting physical parameters which relates with early reflections.

$$E_i = \left(\frac{r_{i_1} \cdot r_{i_2} \cdot \dots \cdot r_{i_m}}{d_i} \right)^2 \quad (3-1)$$

$$LC_i = E_i \cdot \sin \theta_i \cdot |\sin \phi_i| \quad (3-2)$$

$$FC_i = E_i \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \phi_i, \quad |\phi_i| \leq \pi/2 \quad (3-3)$$

$$BC_i = E_i \cdot \sin \theta_i \cdot |\cos \phi_i|, \quad \pi/2 < \phi_i < 3\pi/2 \quad (3-4)$$

$$LC = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum LC_i}{\sum E_i} \right) \quad (3-5)$$

$$FC = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum FC_i}{\sum E_i} \right) \quad (3-6)$$

$$BC = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum BC_i}{\sum E_i} \right) \quad (3-7)$$

$$ENG = 10 \cdot \log \left(\sum E_i \right) \quad (3-8)$$

ただし、 d_i は第*i*番目の反射音の伝搬距離、 r_{i_k} は*i*番目の反射音が*k*回目に反射した内装材料の反射係数、 \sum は80ms以内の総和をそれぞれ表す。

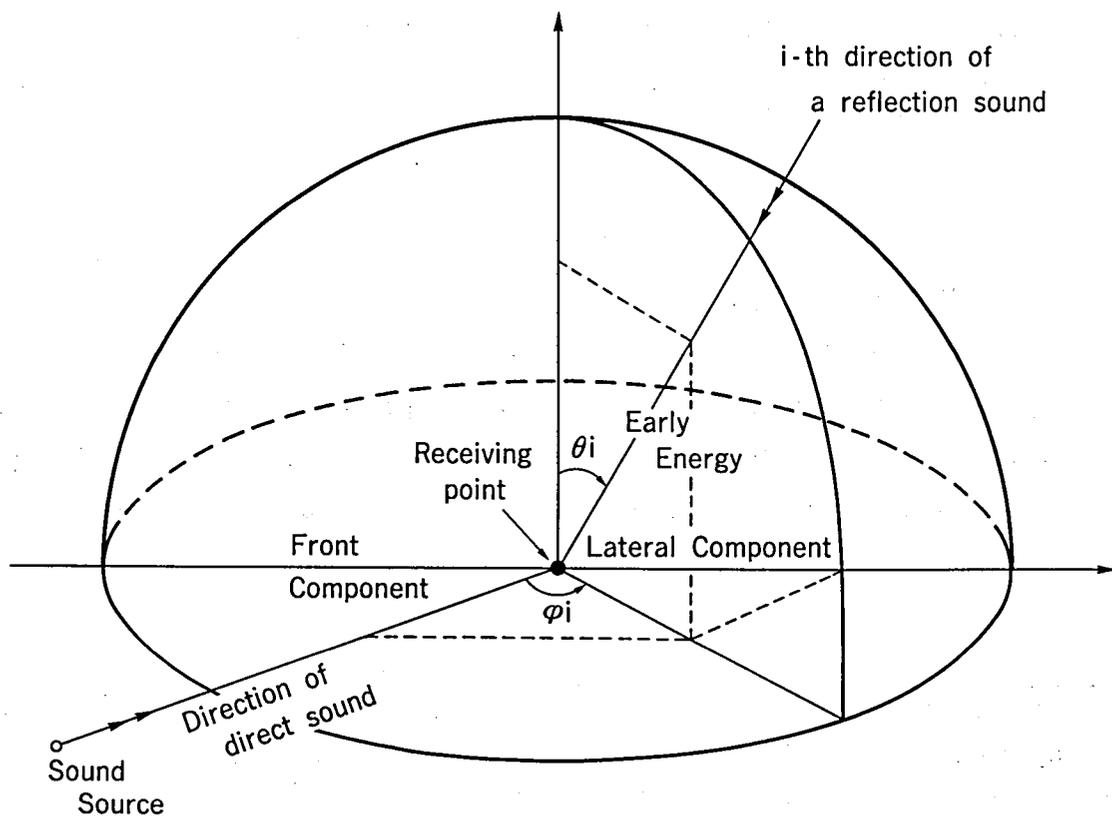


Fig.3.2 Coordinate system utilized for simulation of sound field.

3.2.2 基本的な室形の分類

基本的な室の平面形としては、舞台を含めて長方形(以後 長方形と略す)のいわゆるシューボックス・タイプ、舞台側が扇形で客席側が長方形(以後扇形と略す)の2種類をおもにとり上げることとした。扇形をとり上げた理由は、音源のある舞台側の幾何学的形状が客席にどのように影響を与えるか長方形と比較するためである。基準とした室の寸法は、幅(W)20m、全体の奥行き(L)30m、天井高(H)15m、全室容積9000m³である。天井面、床面はフラットとし、側壁はこれを傾斜させた実験を除き垂直とした。

3.2.3 シミュレーション手法

Fig.3.3に示すように、舞台の奥行きは全体の奥行きの1/3とした。また音源の位置の違いによる反射音への影響を調べる実験を除き、無指向性の音源を舞台中央に置いた。受音点は幅方向19点、奥行き方向20点の計380点を客席内等間隔メッシュ状に配置した。音源、受音点の高さは床上1mである。反射音線は虚像法により求め、直接音到来後80ms以内の初期反射音から算出したLC、FC、BC、ENGを各受音点におけるメッシュ・データとした。基準とした室の平均自由行程は約13mであり、4種の物理量の積分区間である80ms(27.2m)から考えて反射次数を3次まで求めれば十分であるが、シミュレーション実験では4次反射まで計算することとした。また室の形状の違いが物理量に反映するよう、全吸音の床面を除き他のすべての壁面、天井面の吸音率を0.05一定とした。(ただし、3.4.1の実験では、各条件における室の平均吸音率を等しくするため、壁面の吸音率を変更した。)

音場シミュレーションの結果から音場の特徴を評価するため、

(1)0dBから-30dBまでを0.5dB刻みに表した各物理量の等レベル曲線(以後、空間分布と呼ぶ)と、

(2)物理量の各メッシュ点における算術平均値

の2種類を用いた。これらの等レベル曲線、平均値のふるまいからは、音場の詳細な特徴、マクロな特徴をそれぞれ把握できるものと考えられる。音源を舞台中央に置いた場合、音場が対称になるため、4種の物理量の等レベル曲線はFig.3.3に示すように受音領域の半分のみを表示した。また、算術平均値は、4種の物理量全体の様子分かるようすべて対数表示(デシベル表示)とした。(それぞれLC、FC、BC、ENGで表す。) LCと音場の拡がり幅との関係のように、音源信号の種類によって好ましい値も異なるため、一概に物理量の大きな値が望ましいとは言えない。しかし、受動音場では、内装を吸音処理することにより大きなLCを減少させることは可能であるため、大きな値の実現が望ましいと考えて、本論文では、

物理量の等レベル曲線に大きな落込みがない限り物理量の平均値の大きな音場を望ましい音場と評価した。

3.3. 長方形と扇形の室形の比較

長方形と扇形の室形を比較するにあたり、両者の容積を一定にするため、扇形の開き角 ψ (Fig.3.5(a)参照)の時の幅を長方形より $(L/9) \cdot \tan\psi$ だけ長くすることにより調整した。本章における扇形の開き角はすべて 15° 一定とした。

3.3.1. 天井高の影響

幅と奥行きをそれぞれ20m,30m一定に保ち、天井高を5mから35mまで10m刻みで4

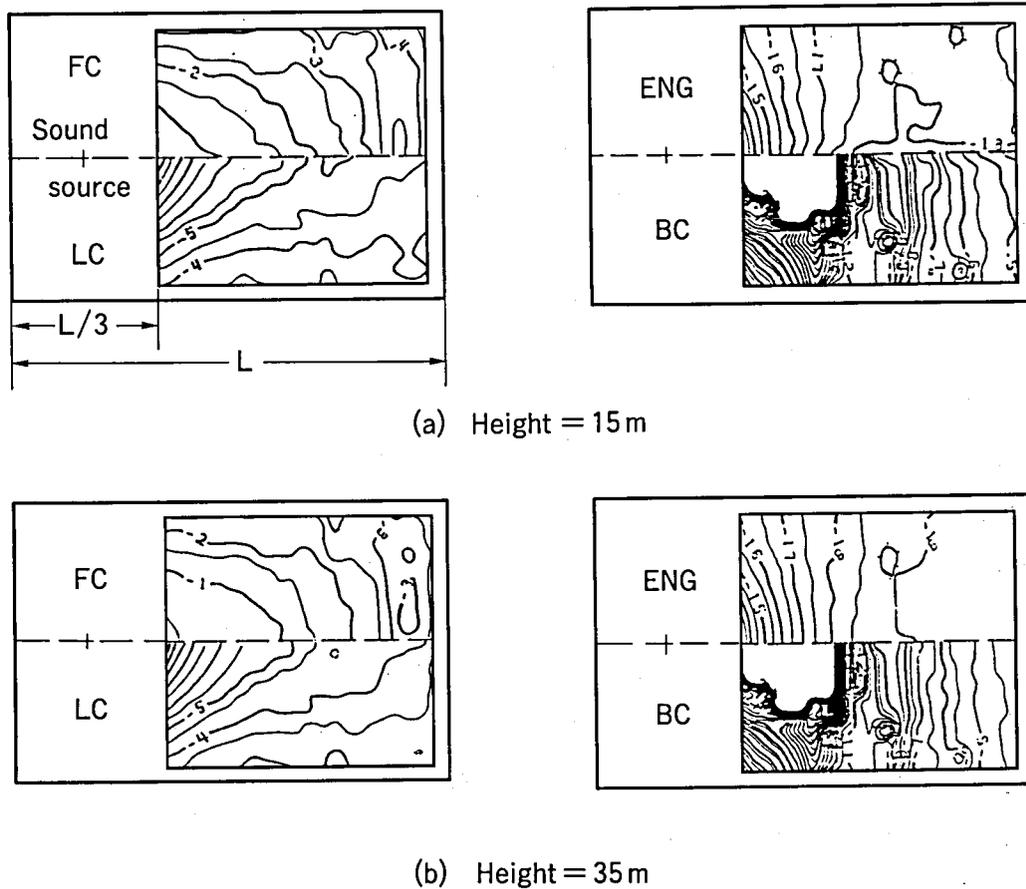


Fig.3.3 Spatial distribution of four kinds of physical values. Ceiling height of rectangular shaped room is varied. (Width = 20m, Length = 30m)

段階変化させた。Fig.3.3(a)(b)に天井高が15m,35mの時の空間分布を示す。この図から、天井高が高くなるにつれて、L.C., F.C., B.C.の大きな領域が若干増すこと、ENG値の小さな領域が増すことが分かる。

Fig.3.4に天井高による各物理量の平均値の変化のようすを示す。この図はFig.3.3のパターンの特徴をよく表しており、天井高が高くなるに従って、 \overline{LC} 、 \overline{FC} 、 \overline{BC} は漸増、 \overline{ENG} は減少と両者が逆の傾向を示していることが分かる。一般には \overline{LC} の増加と \overline{FC} のそれとは逆相関の関係にあることが多いが、天井高を高くした場合 \overline{LC} と \overline{FC} は同じように増加している。この理由は、

- (1)天井高が低い場合L.C., F.C.両者に寄与しない鉛直入射成分が多いため、 \overline{LC} 、 \overline{FC} 両者とも小さな値となるが、
- (2)天井高を高くすると上方からの初期反射音が存在なくなり、音場が2次元音場となって \overline{LC} 、 \overline{FC} の値が増加するためである。

上記の長方形と床面積を等しくした条件下で、扇形の天井高を5mから35mまで10m刻みで変化させシミュレーションを行った。L.C., F.C.の空間分布、各物理量の平均値をそれぞれFig.3.5,3.6に示す。Fig.3.3~3.6を比較することにより、すべての天井高に対して、

- (1)扇形と長方形で分布の基本的な形は変わらないこと、

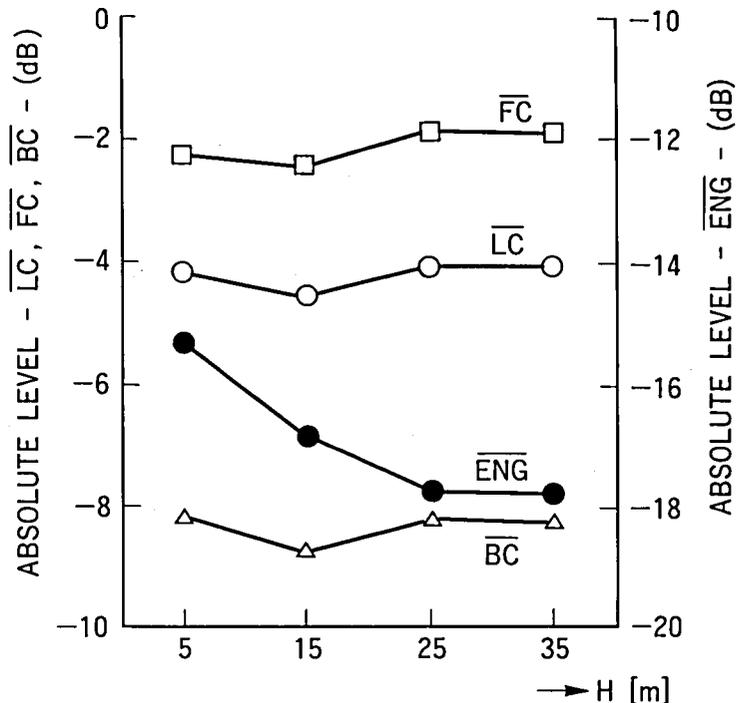


Fig.3.4 Relation between average physical value and ceiling height of rectangular shaped room.

(2)扇形の方が長方形より物理量の平均値はやや大きく、特に \overline{ENG} は0.5dB大きな値となること、
 が分かる。従って、舞台側を絞った扇形の形状が初期反射音の効果を増す上で重要であることが明らかになった。

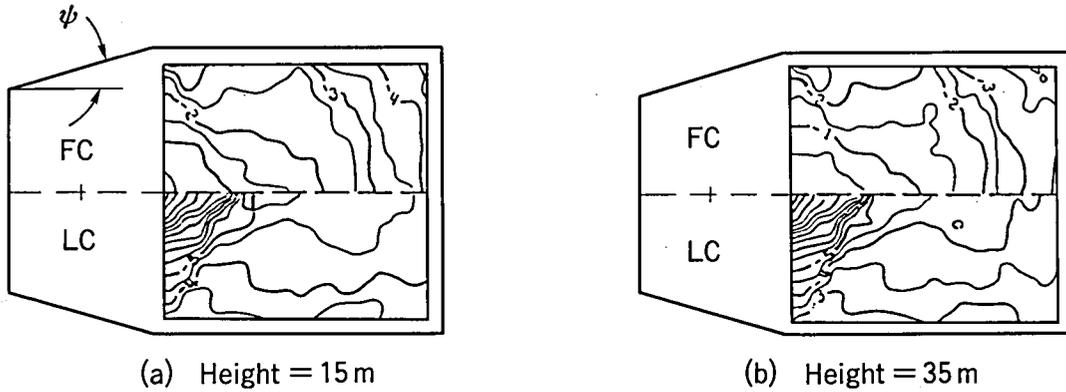


Fig.3.5 Spatial distribution of physical values. Ceiling height of fan shaped room is varied.
 (Width = 20m, Length = 30m)

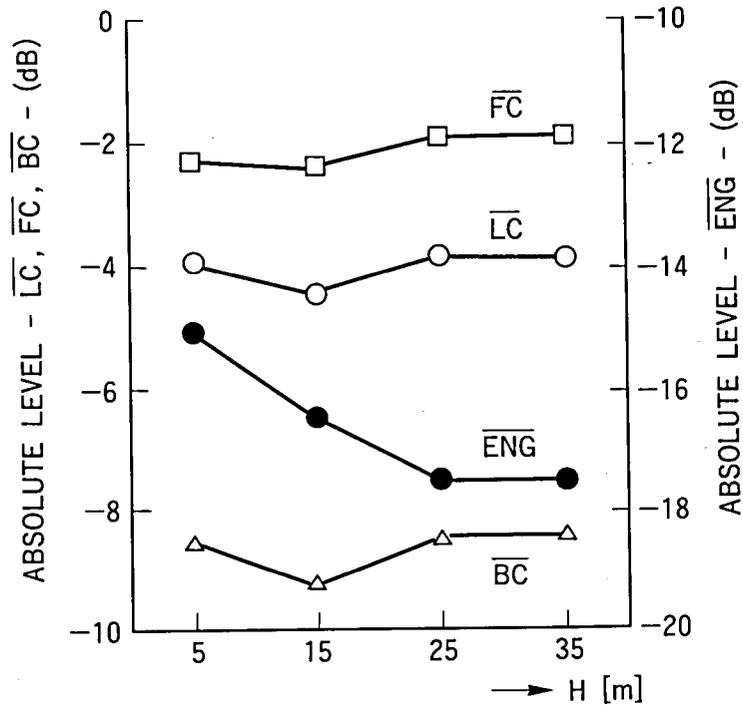


Fig.3.6 Relation between average physical value and ceiling height of fan shaped room.

3.3.2 幅の影響

コンサートホールの幅を増していけば、L.C.の小さい領域が増えることが予想される。そこで、奥行き、天井高をそれぞれ30m,15m一定に保ち、幅を10mから70mまで20m刻みで4段階変化させた時のL.C.,F.C.の空間分布をFig.3.7に示す。この図から、F.C.は幅を大きくしても余りそのパターンが変化しないが、L.C.は幅が50mを越えると、側方からの反射音の遅延時間が80msを越えるため、客席中央部に非常に値の小さな領域ができる。Fig.3.8は物理量の平均値の変化を表す。 \overline{FC} と \overline{BC} は

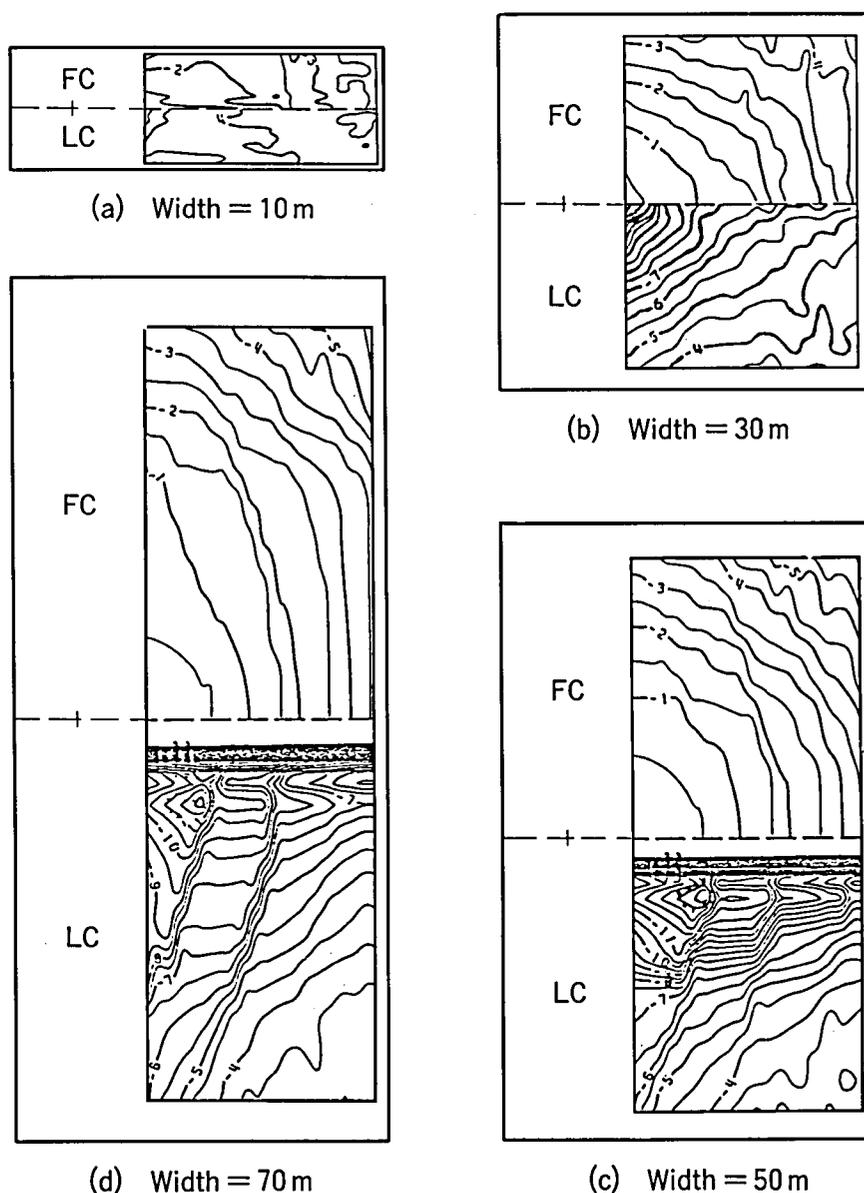


Fig.3.7 Spatial distribution of physical values.
Width of rectangular shaped room is varied from 10m to 70m.
(Length=30m, Ceiling height = 15m)

幅の変化に対して余り変わらないが、 \overline{LC} 、 \overline{ENG} は幅が大きくなるほど平均値が減少する。幅が50mから70mに変わっても \overline{LC} が変化しない理由は、側方からの反射音が80ms以内に入射しない領域が幅50mと70mで幾何学的に相似形になるためである。

扇形の場合についても長方形と同様幅の影響を調べる実験を行った。この結果のうち、物理量の平均値と幅との関係をFig.3.9に示す。物理量の空間分布、平均値ともその幅に対する変化は長方形の場合とほぼ同じであるが、 \overline{LC} 値についてはすべての幅で長方形より0.5dB大きな値となった。

3.3.3 奥行きの影響

幅と天井高をそれぞれ20m, 15m一定にし、奥行きを10mから70mまで20m刻みに4段階変化させてシミュレーション実験を行った。長方形の場合におけるL.C., F.C.の空間分布をFig.3.10に示す。この図からL.C.は奥行きが長くなるほどその分布が音場内で均一化する傾向を示すことが分かる。一方、F.C.は、第一次反射音で決まる前側方からの反射音のために、奥行きが長くなるにつれて、値の大きくなる

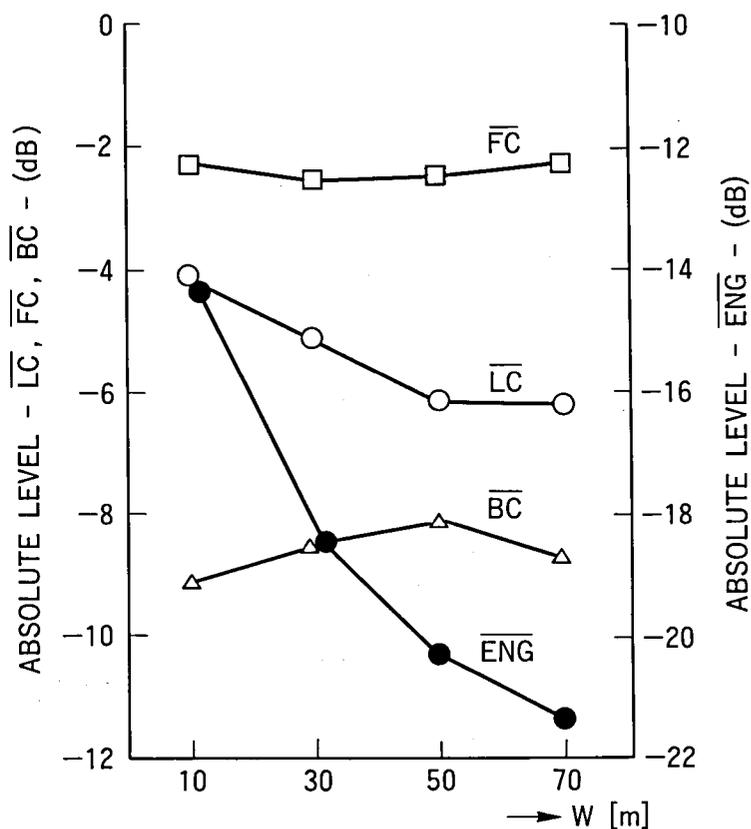


Fig.3.8 Relation between average physical value and width of rectangular shaped room.

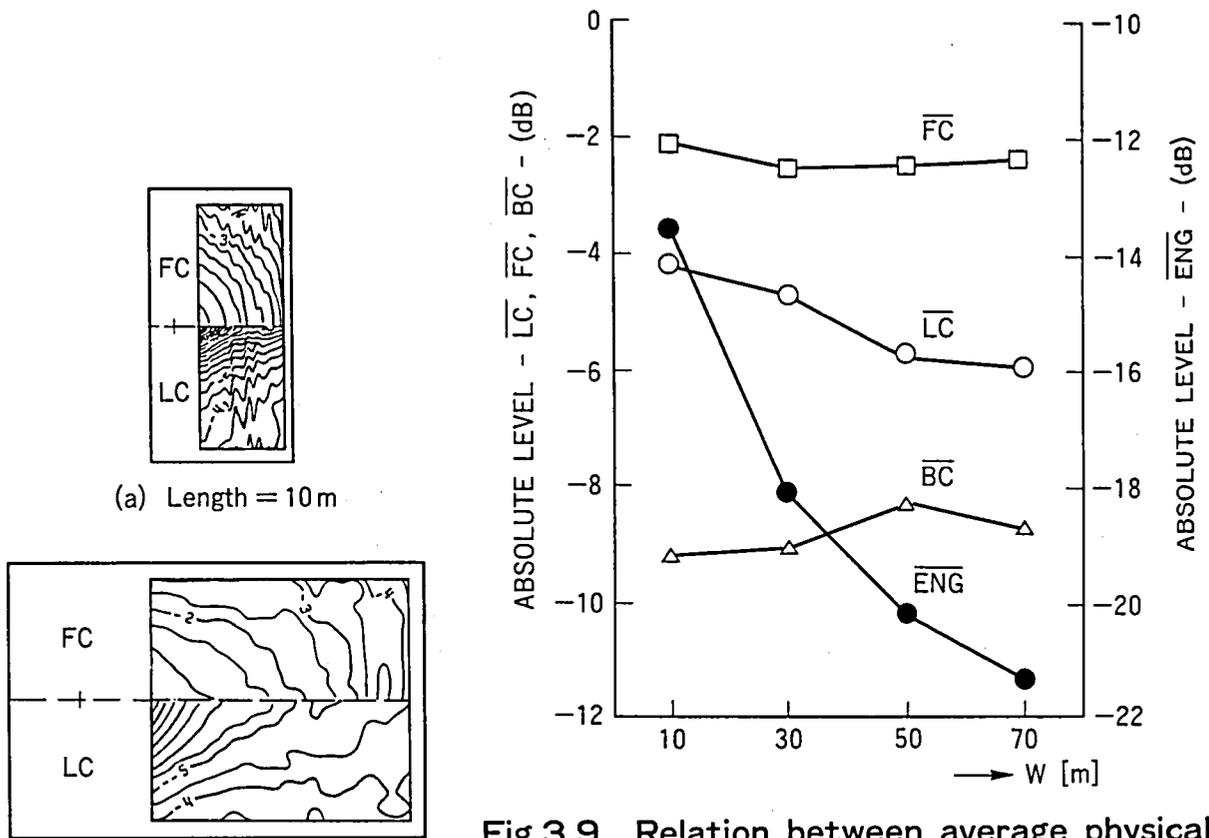


Fig.3.9 Relation between average physical value and width of fan shaped room.

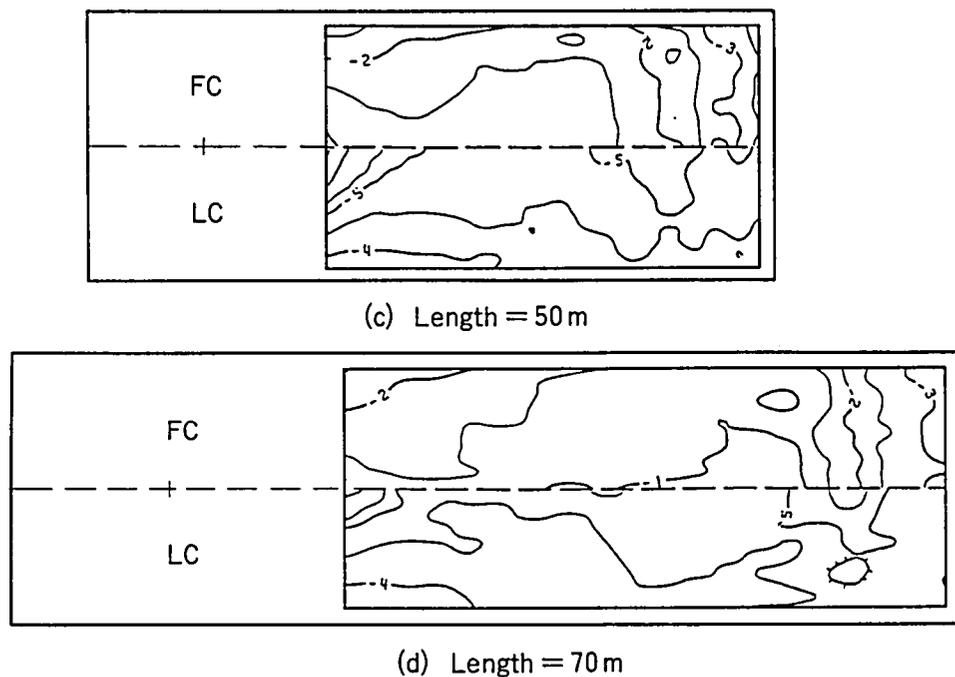


Fig.3.10 Spatial distribution of physical values. Length of rectangular shaped room is varied from 10m to 70m. (Width = 20m, Ceiling height = 15m)

領域がふえる。この様子はFig.3.11に示した物理量の平均値のグラフにもよく反映されており、奥行きが長くなるにつれて、 \overline{LC} はほぼ一定、 \overline{FC} は漸増の傾向を示す。また \overline{ENG} 、 \overline{BC} は奥行きが長くなるにつれて急激に減少する。扇形の場合の物理量の平均値をFig.3.12に示す。Fig.3.11、3.12を比較することにより、長方形、扇形とも奥行きの変化によって物理量はほぼ同じ傾向を示すことが分かる。

3.3.4 基本的室形比較のまとめ

本章で行った一連のシミュレーション実験により、得られた結果をまとめると次の通りである。

- (1) $L.C.$ は主に幅によって変化し、幅が50mを越えると客席中央部に非常に値の小さな領域ができるため、音像の自然な拡がりを実現するのに好ましくない。
- (2) $F.C.$ 、 $B.C.$ は奥行き長さによって最も変化する。
- (3) ENG は室容積、平均吸音率によって変化し、音場を大局的にとらえるのに適している。
- (4) 扇形の方が長方形より特に初期反射音エネルギーを増加するためには適した室形である。

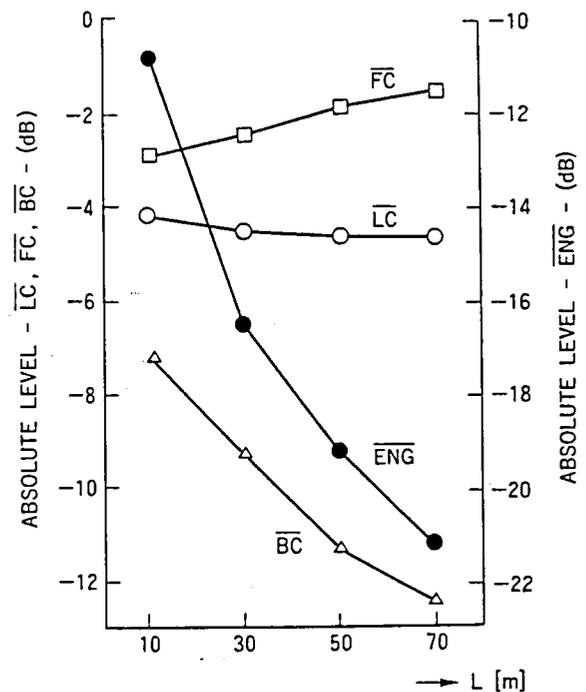
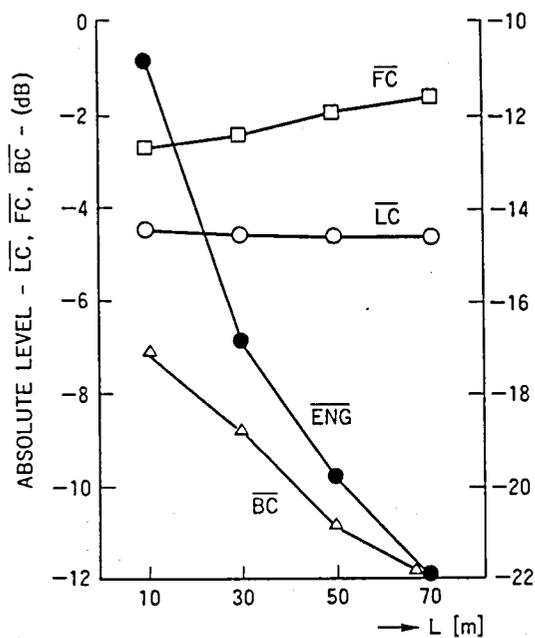


Fig.3.11 Relation between average physical value and length of rectangular shaped room.

Fig.3.12 Relation between average physical value and length of fan shaped room.

3.4 室形に関する諸問題

前章で述べた以外の室形に関する問題点として、(1)室容積一定時の幅、奥行き、天井高の寸法比、(2)側壁傾斜、(3)扇形の開き角、(4)基本的室形の違い、(5)音源の位置の違いをとりあげ、これらによって物理量がどのように影響を受けるかをシミュレーション実験によって検討した。

3.4.1 室容積一定時の（天井高／幅）比の影響

Marshallは、

- (1)種々の方向から到来する反射音の時間分布が一様であること、
- (2)方向性を加味したマスキングの実験結果から、側方からの反射音が上方からよりも先に到達すること、

の二つが自然な音の拡がり(Spatial Responsiveness)を実現するのに望ましいと述べ、更にこの観点から室の横断面(幅、天井高)の重要性を主張した。[22] 彼によれば、幅に対して天井高が高いほど望ましい傾向を示すと報告している。しかし、この結論は中央の客席部についてのみの基礎的な検討から得られたものであり、客席空間全体の物理特性を反映したものではない。そこで、室の横断面形状が物理量に与える影響を調べるため、長方形の室の容積、奥行きをそれぞれ9000m³、30m一定に保ち、(天井高／幅)の比率H/Wをパラメータとしてシミュレーション実験を行った。H/Wの変化幅は0.5から2までの4段階である。Fig.3.13に物理量の平均値を示す。本実験では、客席床を吸音率1、その他の壁面の吸音率を0.05としたため、客席床の面積の大小により平均吸音率 $\bar{\alpha}$ が0.3から0.18まで変化している。従って、ENGもこれにより影響を受けて、Fig.3.13のように $\bar{\alpha}$ が小さいときにENGが増加する傾向を示した。次に、平均吸音率が等しくなるように($\bar{\alpha}=0.3$)各壁面の吸音率を調整し、(H/W)のみの違いが、物理量に与える影響を見るシミュレーションを行った。その結果、Fig.3.14に示すような物理量の平均値が得られた。Fig.3.13とFig.3.14の間で、 \overline{LC} 、 \overline{FC} 、 \overline{BC} はほとんど変化せず、一方ENGは平均吸音率を一定にした条件下では、一定値をとることが明らかになった。また、Fig.3.14から平均吸音率が一定の条件下では、H/Wの増加にともなって \overline{LC} 、 \overline{FC} が漸増することも分かる。L.C.の場合、H/Wを0.5から2に変えると約0.8dB(7%)増加する。従って、

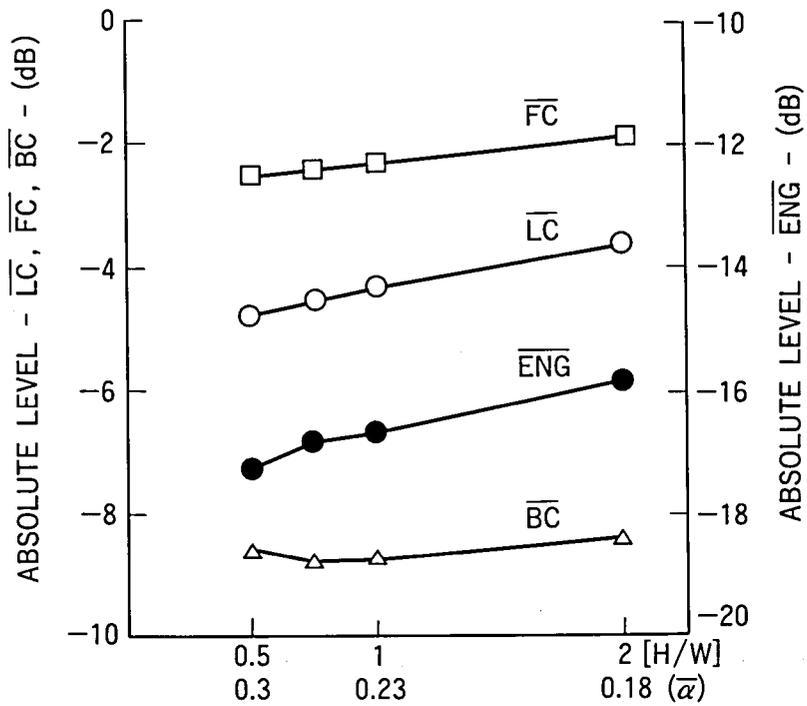


Fig.3.13 Relation between average value and (height/width) ratio. Volume and length of rectangular shaped room are 9000m^3 , 30m constant respectively. Average absorption coefficient is varied from 0.18 to 0.3 .

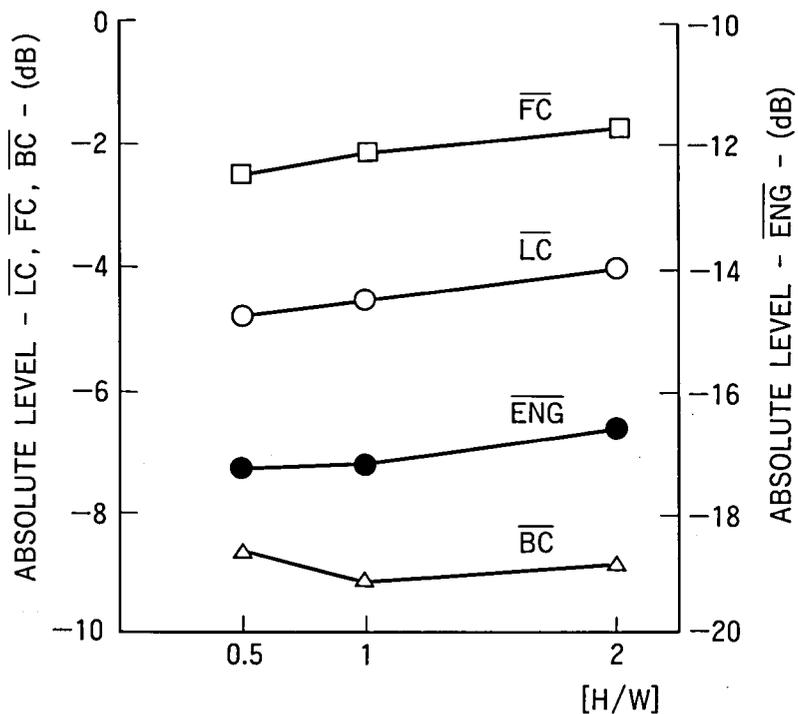


Fig.3.14 Relation between average physical value and (height/width) ratio. Volume (9000m^3), ceiling height (15m) and average absorption coefficient (0.3) are made constant.

横断面の面積が一定の場合H/Wを大きくする、すなわち天井高を高く、幅を狭くした室形の方が音像の拡がりを増す上で好ましい。

3.4.2 室容積一定時の（奥行き／幅）比の影響

長方形の室の室容積を 9000m^3 、天井高を 15m 一定にして（奥行き／幅）比 L/W を 0.5 から 2 まで変化させてシミュレーション実験を行った。この実験の目的は、床面積一定の制約下で、奥行き、幅の比率をどのように選択したら良いかの指針を得ることである。本実験の場合、 L/W を変えても全吸音力の大半を占める客席床面積が変わらないため、平均吸音率は 0.26 一定である。この実験の結果得られた物理量の平均値と L/W との関係をFig.3.15に示す。この図から、 L/W が増加するにつれ、 \overline{LC} 、 \overline{FC} は漸増、 \overline{BC} 、 \overline{ENG} は減少の傾向を示すことが分かる。室容積、平均吸音率一定にもかかわらず、 (L/W) の増加にともない \overline{ENG} が減少するのは、距離減衰によって直接音のエネルギーが減少する受音領域が増えたためである。この傾向は、奥行き(L)を単独で変化させた場合の方が、幅(W)単独の場合より \overline{ENG} の変動がより大きいことから知る事ができる。（Fig.3.8、3.11参照）

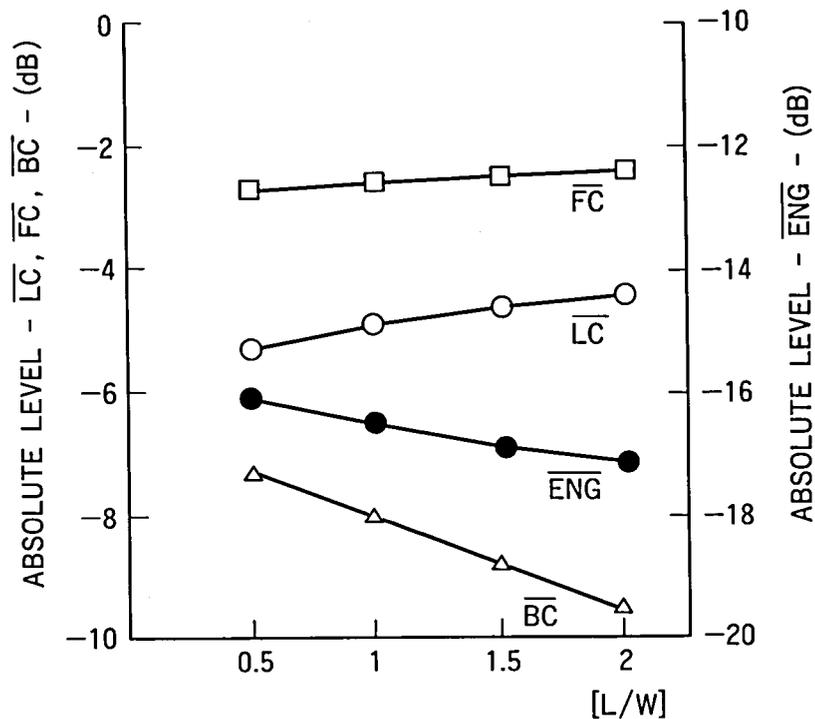


Fig.3.15 Relation between average physical value and (length/width) ratio. Volume (9000m^3), ceiling height (15m) and average absorption coefficient (0.26) are made constant.

3.4.3 側壁傾斜の影響

昨今、側方からの初期反射音を増す目的で側壁を傾斜させることが多い。そこで、長方形の室形を用い、側壁の傾斜角を 0° （垂直）から 15° まで 5° 刻みに4段階変化させて、側壁傾斜の影響を調べる実験を行った。本実験では、幅、奥行きをそれぞれ20m、30m一定とし、更に室容積を 9000m^3 一定とした。Fig.3.16に物理量の平均値を示す。この図から、側壁の傾斜角を増した場合、 \overline{LC} 、 \overline{BC} はほぼ一定、 \overline{FC} がやや増加、 \overline{ENG} が減少の傾向を示すことが分かる。従って、側壁傾斜が当初意図した側方からの初期反射音の増加には直接結びつかないことが明らかになった。

3.4.4 扇形の開き角の影響

3.3.節の一連の実験から舞台側を絞った扇形にした方が長方形より初期反射音エネルギー有効利用の点で優れていることを明らかにした。ここでは更に扇形の開き角の違いが初期反射音にどのように影響するか調べるシミュレーション実験を行った。この実験では、舞台側、客席側の奥行きをそれぞれ10m、20m、天井高を15m、床面積 600m^2 一定とし、この条件下で舞台側扇形の開き角 ψ (Fig.3.5参照) を 0° （長方形）から 15° 刻みに 45° まで4段階変化させた。シミュレーションの結果

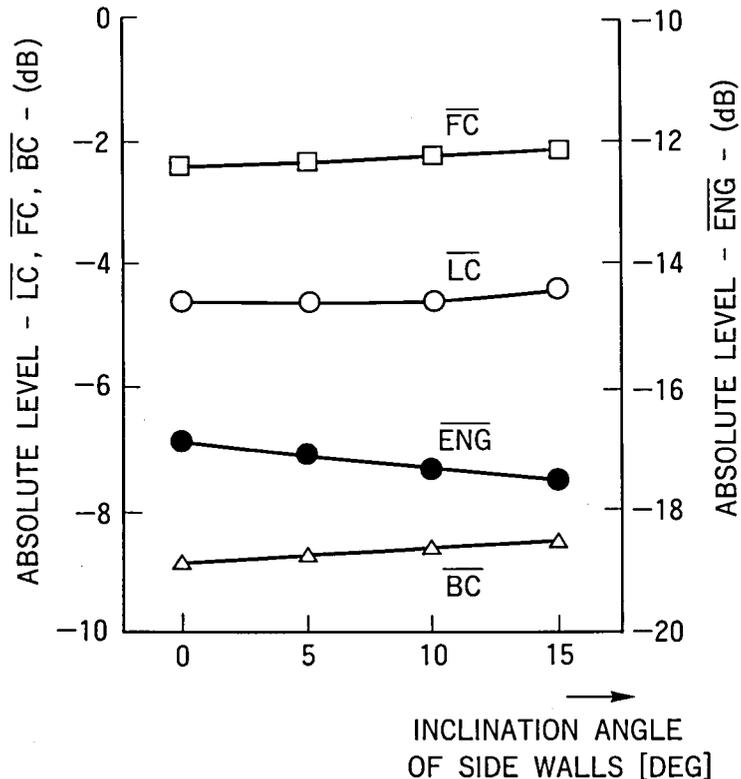


Fig.3.16 Relation between average physical value and inclination angle of side walls.

得られたL.C.,F.C.の空間分布をFig.3.17に、物理量の平均値をFig.3.18にそれぞれ示す。(ψ=0° の場合は、Fig.3.3参照) Fig.3.18から、FCは開き角によらずほぼ一定、LCは15°近辺で大きな値を示し、ENGは開き角の増加にともなって漸増していることが分かる。

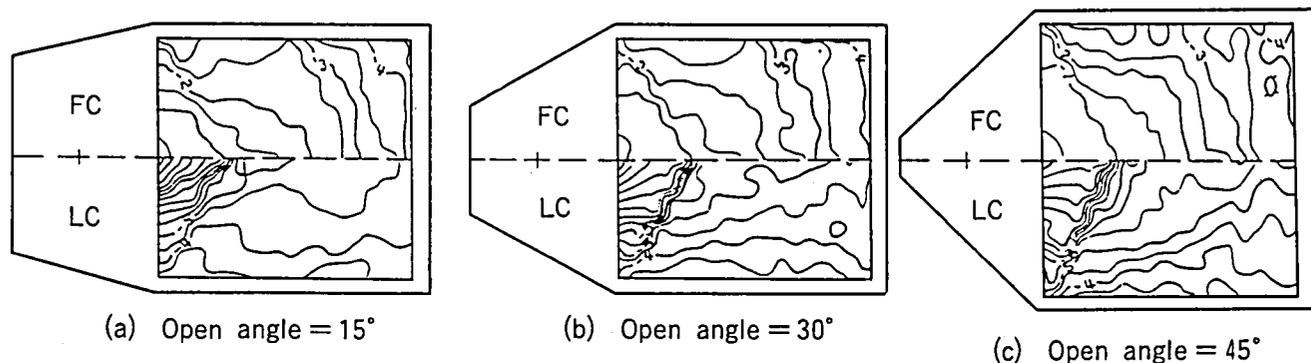


Fig.3.17 Spatial distribution of physical value in fan shaped room whose open angle is varied from 15-degree to 45-degree. Volume (9000m³), length (30m) and ceiling height (15m) are made constant.

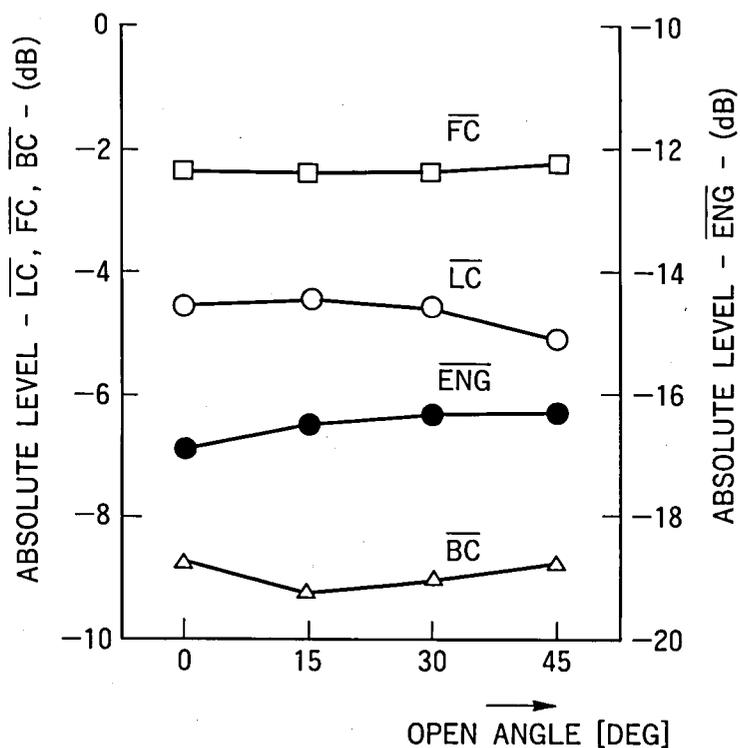


Fig.3.18 Relation between average physical value and open angle of fan shaped room.

3.4.5 基本的室形の比較

床面積 600m^2 、室容積 9000m^3 一定の条件下で、Fig.3.19に示すように3つのタイプの室形を考え、それぞれについてシミュレーション実験を行った。Fig.3.19、3.20にL.C.,F.C.の空間分布、各物理量の平均値をそれぞれ示す。この結果から、音

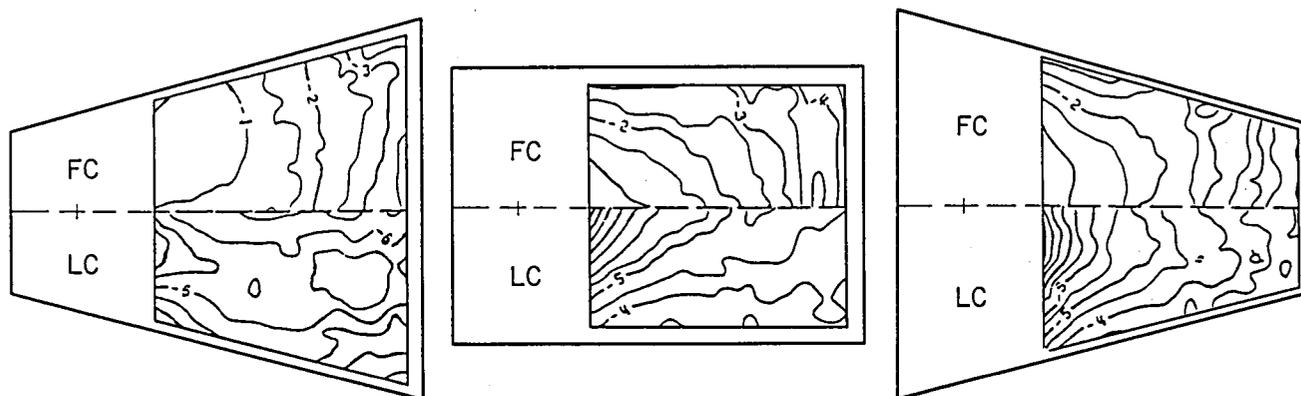


Fig.3.19 Spatial distribution of physical values in three fundamentally different shaped rooms. Volume (9000m^3) and floor surface area (600m^2) are made constant.

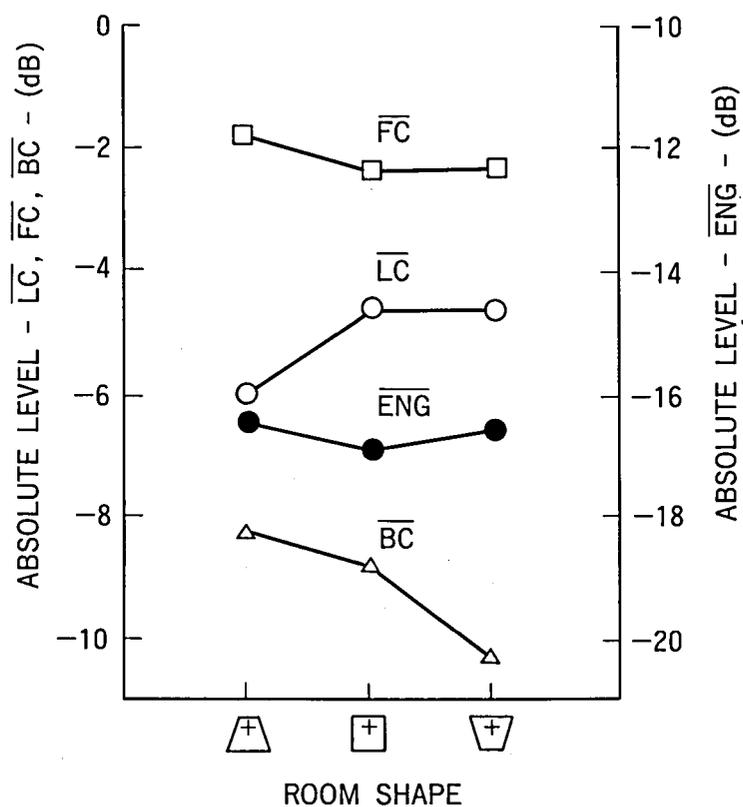


Fig.3.20 Relation between average physical value and fundamental room shapes.

源側より客席側が広い室形の場合が他の2つに比べ、 \bar{LC} が約1.5dB小さく、音像の拡がりの点で望ましくない形状であることが分かる。また、音源側より客席側を狭くした場合、他に比べ \bar{BC} が約2dB低下していることも分かる。従って、L.C.を大きくしたい場合は、音源側に比べ客席側を狭くし、F.C.を大きくしたい場合は、逆に音源側に比べ客席側を広くすれば良いことが分かった。長方形は、3種類の形状の中で初期反射音に関し中間的な性質を持っている。

3.4.6 音源の位置の違い

これまでのシミュレーション実験はすべて音源を舞台中央に置いて行ってきたが、音源の位置によっても物理量の分布が異なることが予想される。

そこで幅20m、奥行き30m、天井高15mの長方形の室形を用い、Fig.3.21に示すように音源の位置をS1からS6まで変えてシミュレーションを行った。L.C.の空間分布をFig.3.21に示す。(音源の位置がS5—舞台中央—の時はFig.3.3(a)参照)この図から、音源が下手側にある場合のL.C.の等レベル分布は、音源が舞台中央にある場合のそれがソフトした形になっていることが分かる。また音源が客席側に近くなるに従って、L.C.の小さい領域が増している。これは、音源が客席から遠い位置の場合、舞台後壁からの反射音が側方成分として有効に作用するためである。Fig.3.22、3.23に各音源位置における物理量の平均値を示す。これらの図から、

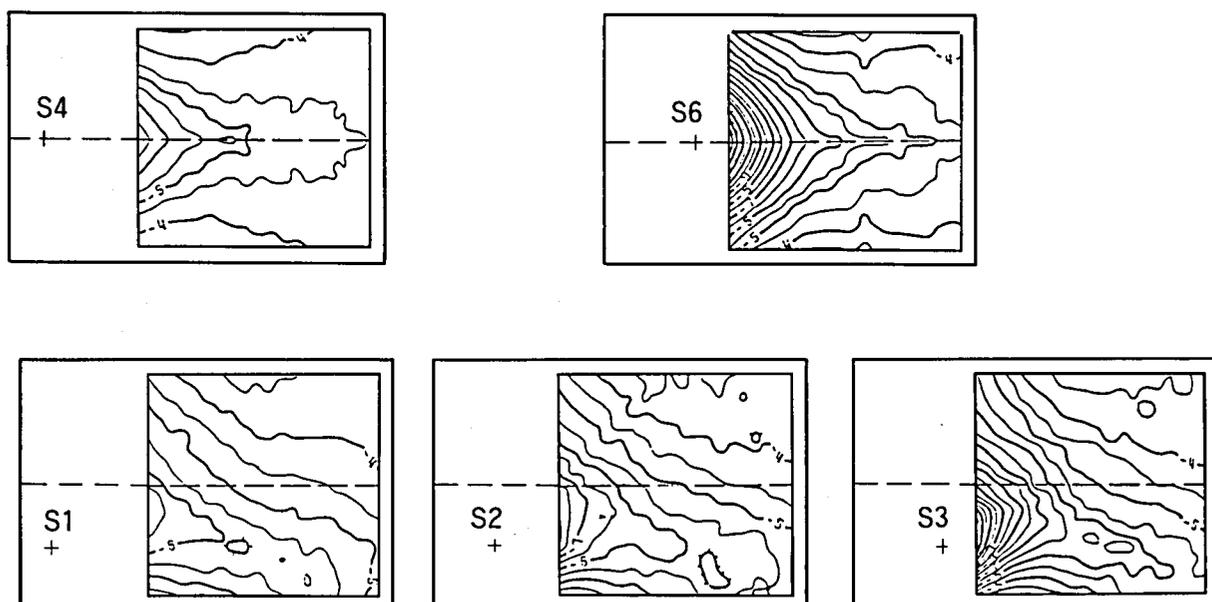


Fig.3.21 Spatial distribution of L.C. in rectangular shaped room. Position of sound source is varied.

(1) 下手側(S1~S3)、中央(S4~S6)とも音源位置の前後によって各物理量は同じ傾向を示すこと、

(2) 音源が客席に近くなるにつれて、 \overline{LC} は減少し、 \overline{FC} 、 \overline{ENG} は漸増すること、

(3) 音源が舞台中央にある方が下手側の場合より \overline{LC} は大きいこと、

が分かった。

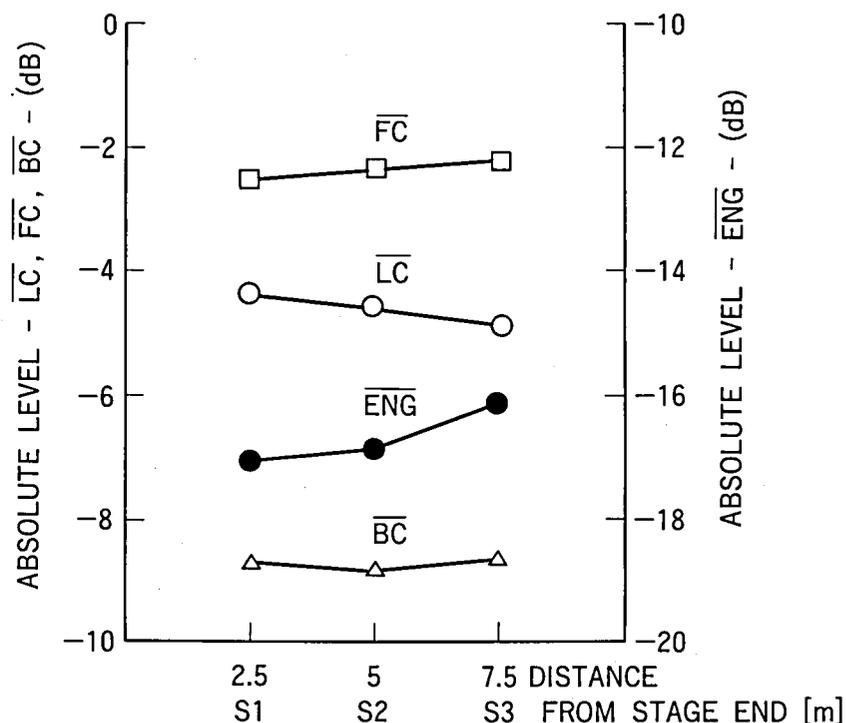


Fig.3.22 Relation between average physical value and position of sound source. (S1-S3)

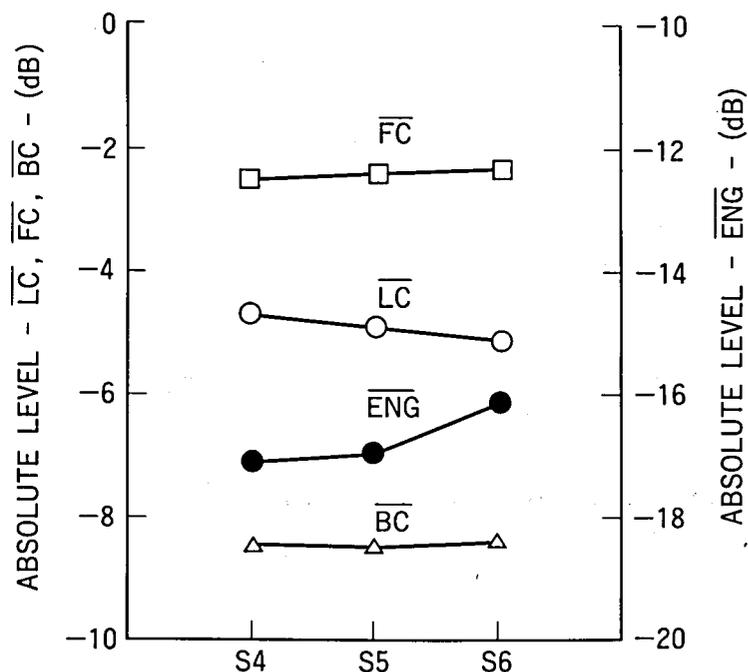


Fig.3.23 Relation between average physical value and position of sound source. (S4-S6)
(S5 is on the center of stage floor. Refer to Fig.3.3 (a).)

3.5. 結言

基本的な室形状を変更することにより初期反射音にどのように影響を与えるかシミュレーション手法を用いて系統的に研究した。初期反射音を代表する評価量として、個別の物理量でなく、L.C.、F.C.、B.C.、ENGの4種をとりあげ、これらを総合して評価した。このようにすることによって、よりバランスのとれた音場評価が可能になった。4種の物理量のうち、L.C.、F.C.、B.C.は、音場の方向特性を表すエネルギーの相対量で、音像の拡がり感、奥行き感、距離感と対応する。一方ENGは、音源の出力パワー一定時の初期反射音エネルギーであり、音の大きさ、距離感と対応する。4種の物理量の空間分布、客席空間の平均値に着眼して複数の音場を比較し、次の結論を得た。

- (1)幅の広さによってL.C.が、また奥行きの長さによってF.C.、B.C.が強く影響を受ける。特に、幅が50mを越えると客席中央部を中心にL.C.の非常に小さな領域ができる。
- (2)天井高を5mから35mの範囲で変えた場合、 \overline{LC} 、 \overline{FC} は25m以上で増加する。
- (3)ENGは室容積、室内の吸音力に大きく依存する。
- (4)舞台側を扇形にした方が長方形の場合より初期反射音を有効に利用する点で優れている。

更に、特定の条件下で行ったシミュレーション実験から次の結果が導かれた。

- (5)室容積、平均吸音率の両者が一定の条件下では、(天井高/幅)の比率が大きくなるほど \overline{LC} 、 \overline{FC} 、 \overline{ENG} が漸増する。一方、(奥行き/幅)比が大きくなるに従い、 \overline{LC} 、 \overline{FC} は漸増、 \overline{BC} 、 \overline{ENG} は減少する。従って、この条件下において、 \overline{ENG} は奥行きの長さによって最も影響を受け、以下幅、天井高の順で影響を受けていることが分かった。
- (6)室容積一定の条件下で、長方形の室形の側壁傾斜角を変えても、 \overline{LC} の増加には直接結びつかない。
- (7)扇形の開き角を0°から45°の範囲で段階的に変えた場合、開き角が15°の場合に、 \overline{LC} が最大となる。一方、 \overline{ENG} は30°、45°で大きな値をとる。
- (8)舞台側に対して客席側が広い室形状の場合、 \overline{LC} は減少するが、 \overline{FC} 、 \overline{BC} はともに増加する。
- (9)音源の位置が客席に近くなるに従って、 \overline{LC} は減少し、 \overline{FC} 、 \overline{ENG} は増加する。また、音源が舞台中央から下手側に移動した場合、 \overline{LC} は減少する。

ここで採用した4種の物理量は音響設計の段階で得ることのできるものであり、音場をチェックする物理量として残響時間とともに活用できるものとする。

4. 残響時間に関する心理実験

4.1. 研究の背景

室内音響設計を行う場合、残響時間は今のところ設計段階でかなり高い精度で予測できる物理パラメータである。また種々の物理パラメータをもとに音場分析を行う際、残響時間は音場を規定する主要な因子として抽出されることが過去に数多く報告されている。[23][24] しかしこの物理パラメータについてはその重要さの割に聴感との対応について余り議論されていないように思われる。過去、残響減衰曲線の弁別限については黒木[25]、Seraphimら[26]によって研究されているが、実験条件が限られていたため、残響時間の設計や測定精度の検討にこれらの結果が十分生かされていない。4.2節では実用性を重視した残響時間の弁別限について、心理実験結果を中心に述べる。

一方、聴取者にとって好ましい残響時間は、音源信号によってかなり異なることが指摘されている。たとえばKuhlは3種類の音楽をそれらの残響時間を種々変えて評定者に提示し、残響が長過ぎるという判断を下した割合から、演奏される音楽によって最適な残響時間が異なることを示した。[27] 彼によれば、最適な残響時間はモーツアルトの ”ジュピター”、ストラビンスキーの ”春の祭典”の場合1.5秒、ブラームスの ”交響曲第4番”の場合2.1秒である。またBeranekは、演奏家や評論家のホールに対する評価をとりまとめた結果から、ロマン派の音楽に適した残響時間として2.1~2.3秒を、バロック音楽の場合1.4~1.8秒を、平均的なシンフォニーに適した残響時間として1.8~2秒をそれぞれ推奨した。[28] 心理的に好ましい残響時間が、音源信号のどのような物理的性質に依存するかという問題は、室内音響の設計に限らず、残響可変設備を持ったホール等で実際に残響時間を設定する際にも重要である。音源信号の物理的性質の代表として自己相関係数（正規化自己相関係数）に着目し、その包絡線のレベルが10分の1に減衰するまでの時間 τ_e と心理的に好ましい残響時間との関連づけを行った研究が過去に発表された。[29] しかし、一般的にこの包絡線が必ずしも単調には減衰しないため、 τ_e を決定する場合に精度や安定性の点で問題がある。音源信号の物理的な性質を表す量としては、自己相関係数の他にも、平均パワースペクトル、瞬時パ

ワー確率密度関数、瞬時パワーレベル分布等がある。4.3節ではこれらの物理パラメータを種々の音源信号について具体的に比較検討する。この結果をもとに決定した音源信号の物理パラメータと聴感上好ましい残響時間との対応関係を求める心理実験を行い、この物理パラメータの有効性を明らかにする。

4.2 残響時間の弁別限

4.2.1 心理実験の方法

心理的な響きの長さは、定常状態における受聴音レベル、周波数、残響時間等の物理的な要因によって影響を受けると考えられることから、これらの要因を考慮した実験計画を立てた。

10kHzに帯域制限した白色雑音信号を量子化数12ビット、標本化周波数50kHzでAD変換し、磁気ディスクに格納した後で次式により一点ずつ残響曲線を算出した。

$$s(kT) = n(kT) \times \exp(-6.9 \times kT / RT) \quad (4-1)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots$$

上の式で、s:試験信号、n:白色雑音、T:サンプリング間隔、RT:残響時間をそれぞれ表す。

残響曲線は、Sabineの定義[30]を考慮して定常状態に対し60dB減衰するまでのものを採用し、標準刺激としては、その残響時間が、0.5秒、1秒、1.5秒、2秒の4種類を選んだ。一方、比較刺激は、0.025秒～0.05秒刻みで標準刺激の近辺を変化させて作り、標準刺激、比較刺激を一對にしてランダムに繰り返し提示した。心理実験は20～30才台の正常な聴覚を有する男女6名を評定者として行った。試験音は無響室内に設置したスピーカ再生によって評定者に提示した。再生音の音の大きさは、受聴位置において60dBA、75dBA、90dBAの3段階とし、周波数の水準としては、中心周波数125Hz、500Hz、2kHz、8kHzの1オクターブ帯域雑音4種類を選んだ。これらの要因について分散分析を行うためには、残響時間(4)×受聴音レベル(3)×周波数(4)の48条件について心理実験をする必要がある。しかし、時間的にもまた評定者の疲労を考慮しても3元配置の実験が困難であると判断し、4×4のラテン方格法を採用して実験回数を削減することとした。この方法は主効果以外の交互作用の検出ができないが、実験回数を大幅に少なくできる利点を持っている。

またこの実験とは別に、広帯域雑音を用いて残響時間の弁別限を検討する実験も行った。

4.2.2. 実験結果（広帯域）

白色雑音を用いた場合の弁別限を、受聴音レベル、残響時間、個人差の3要因に交互作用も考慮して分散分析を行った。その結果、残響時間については危険率1%で有意であったが、他の要因については有意差が認められなかった。Fig.4.1に4水準の残響時間に対する上・下弁別域（ $\pm \Delta RT$ ）の平均値および母平均の95%信頼限界を示す。この図から、上、下の弁別域がほぼ対称な形をしていること、残響時間が長くなるほど弁別域も大きくなり、残響時間に対する比弁別域（ $\Delta RT/RT$ ）が重要な量であることが分かる。

4.2.3. 実験結果（狭帯域）

受聴音レベル、残響時間と周波数を要因として分散分析した結果、残響時間のみが1%で有意であり、他の2つの要因では有意差が認められなかった。この結果は、Seraphimが行った実験結果とよく一致している。[26]

Fig.4.2に残響時間が1秒、2秒の時の上・下弁別域の周波数特性を示す。この図から、弁別能力の高い残響時間1秒で低音域の弁別域が大きく、中・高音域でほぼ一定値をとる傾向にあることが分かる。

Fig.4.3は周波数をパラメータにした時の比弁別域（ $\Delta RT/RT$ ）を示している。この図から、125Hzを除き残響時間1秒近辺に比弁別域の最小値が存在しているこ

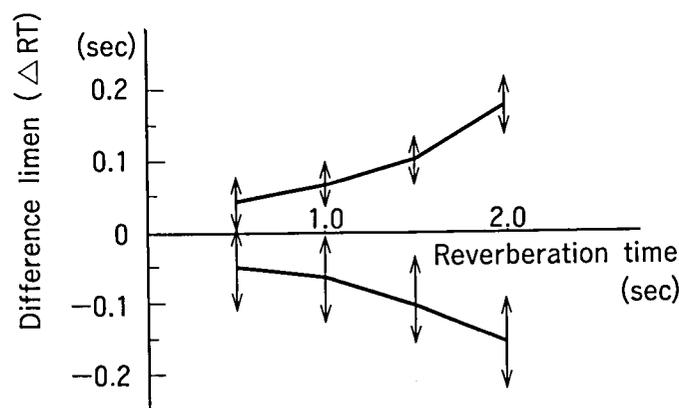


Fig.4.1 Upper and lower difference limen of reverberation time.
(Wide-band characteristics)

とが分かる。Fig.4.4は過去の同種の研究のうち、Seraphim[26]とBekesy[31]のものを選び、ここで得られた結果と合わせて示す。この図から、Seraphimの実験結果が最も厳しいが、実用的な見地からは残響時間の比弁別域として約6~7%が適当であると考えられる。

4.3 好ましい残響時間[32]

4.3.1 音源信号の性質を表す各種物理量

本節では、音源信号自身の物理的性質を知る上で重要な物理パラメータのうち、瞬時パワー確率密度関数、瞬時パワーレベル分布、自己相関係数、パワースペクトルをとりあげ、それぞれの特徴、相互の関係について論ずる。また以後行う心理実験や物理パラメータの分析には、Table 4.1に示す6種類の音源を用いているが、本節では特に各種物理パラメータの違いが明らかになるよう、6種類の音源のうちコンサートホールの音場評価によく用いられるスピーチ、高調波成分の少ないフルート、広い帯域のスペクトルを持つシンフォニーをとりあげ、これらの音源の物理的性質について比較表示する。本節でとりあげた瞬時パワー確率密度関数および瞬時パワーレベル分布はFig.4.5に示す流れに従って処理した。AD変換の量子化数は12ビット、サンプリング周波数は20kHzである。

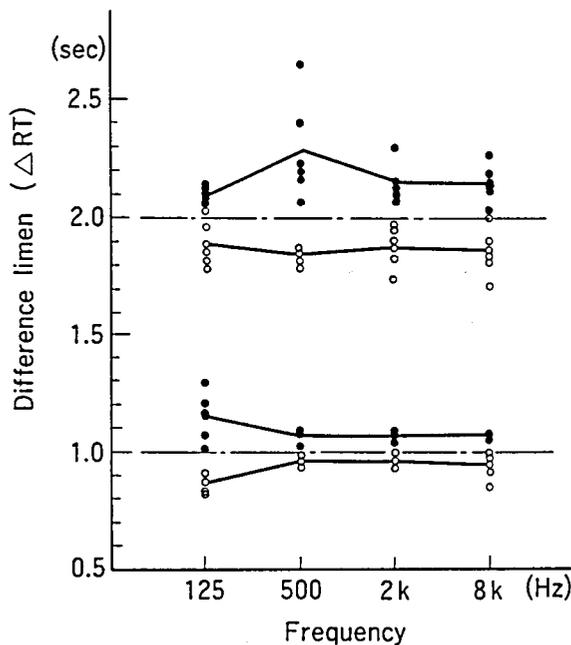


Fig.4.2 Upper and lower difference limen of reverberation time.
(Narrow-band characteristics)

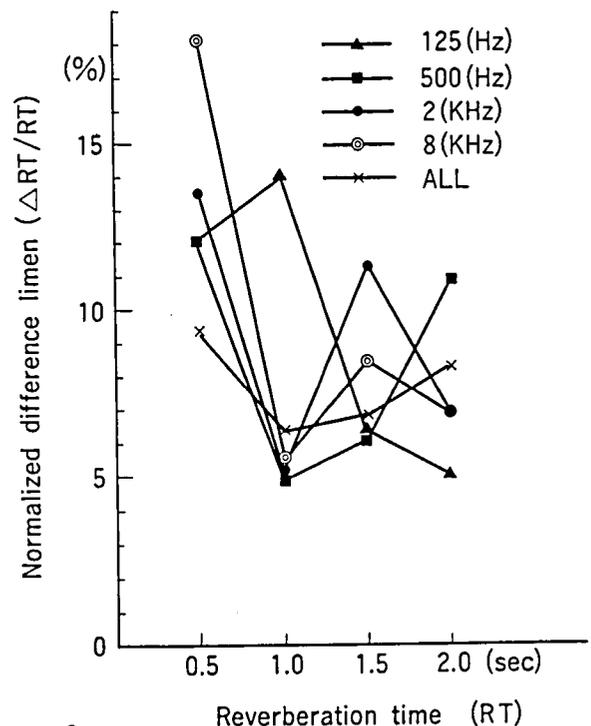


Fig.4.3 Frequency characteristics of normalized difference limen ($\Delta RT/RT$)

(1) 瞬時パワー確率密度関数：p(x)

時刻tにおける信号をs(t)と表したとき、瞬時パワーs²(t)の確率密度関数p(x)は次式で与えられる。[33]

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}[x < s^2(t) < x + \Delta x]}{\Delta x} \quad (4-2)$$

スピーチ、フルート、シンフォニーそれぞれの確率密度関数の測定例をFig.4.6に示す。この図で横軸は、それぞれの音源信号の統計的性質を観測した全区間長5秒の実効値を基準とする(0 dB) 相対レベルを表している。Fig.4.6は(4-2)式でΔxを1dBとして-20dBから15dBの範囲で確率密度関数を描いたものである。-20dB未満のレベルは一括してFig.4.6の左端にプロットした。ここで用いたスピーチは他の音源信号に比べて無音区間がかなり長いことから-20dB未満の確率が高く、一方、フルートは2dB付近に確率密度関数のピークがあり、これより大きいレベルの出現確率が急激に小さくなるのがFig.4.6から分かる。

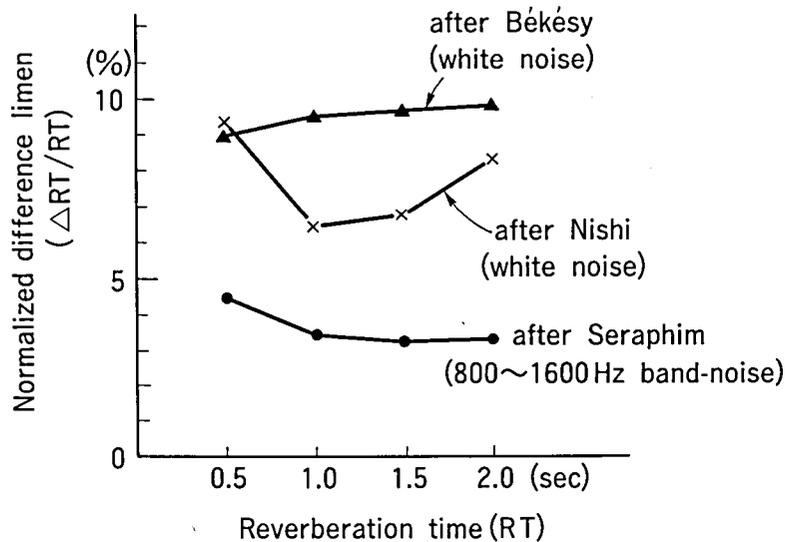


Fig.4.4 Comparison of normalized difference limen of reverberation time reported three researchers.

Table 4.1 Source signals utilized for the evaluation of the physical characteristics and for hearing test.

1. Speech	Speech signal male voice.
2. Piano	Liadov, "Orgel."
3. Violin	Bach, "Unaccompanied violin sonata, gavotte."
4. Cello	Bach, "Unaccompanied cello sonata, No.1."
5. Flute	Debussy, "Syrinx."
6. Symphony	Mozart, "Symphony No.41, Jupiter, 4th movement."

(2) 瞬時パワーレベル分布: $P(x)$

長時間の実効値 x_0 を基準とし、瞬時パワーレベルがこの x_0 を越える時間率 $P(x_0)$ は瞬時パワー確率密度関数 $p(x)$ を使って次式のように表すことができる。

$$P(x_0) = \int_{x_0}^{\infty} p(x) dx \quad (4-3)$$

Fig.4.7(a)~(c)にスピーチ、フルート、シンフォニーの瞬時パワーレベル分布の累積時間に対する推移を示す。この累積レベル分布曲線は全時間長を0.5秒から0.5秒ずつ延長して測定した結果を示して降り、曲線の形状は全時間長1~2秒で一

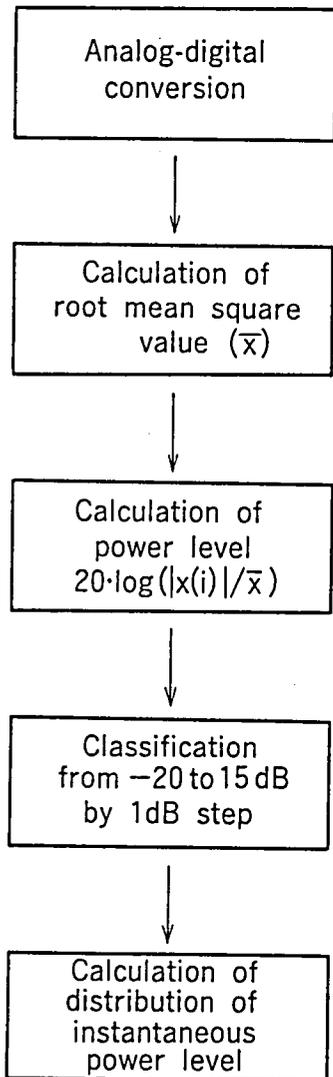
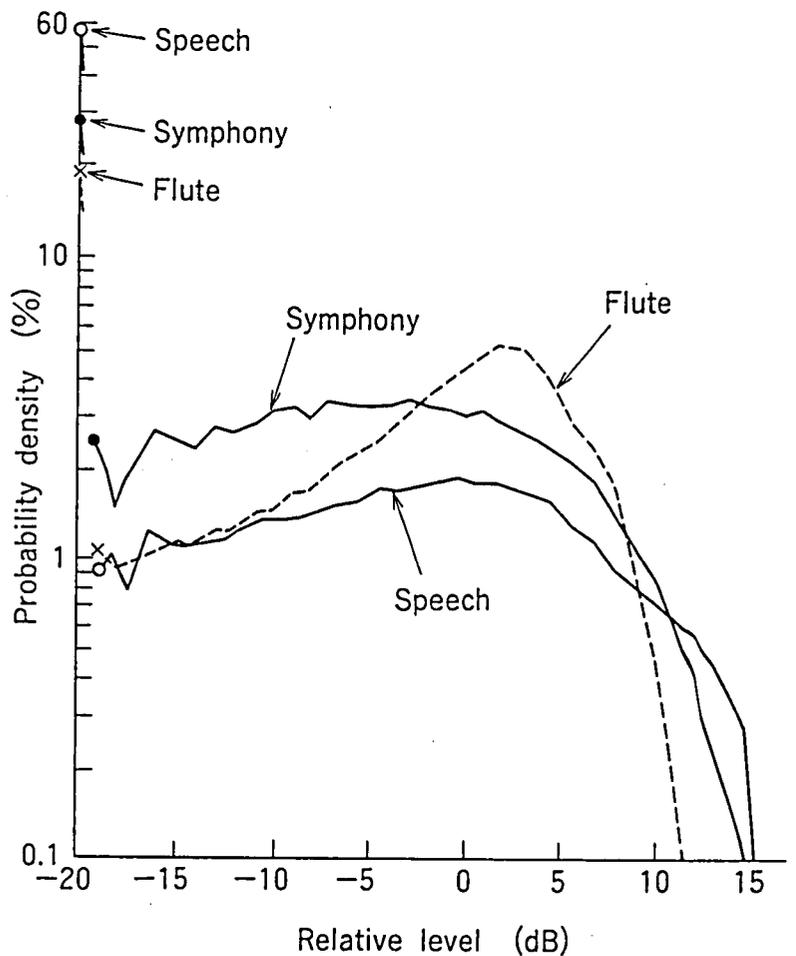


Fig.4.5 Flow chart for calculating the distribution of instantaneous power level.



F.g.4.6 Examples of the probability density functions.

Sound source signals are speech, flute and symphony.

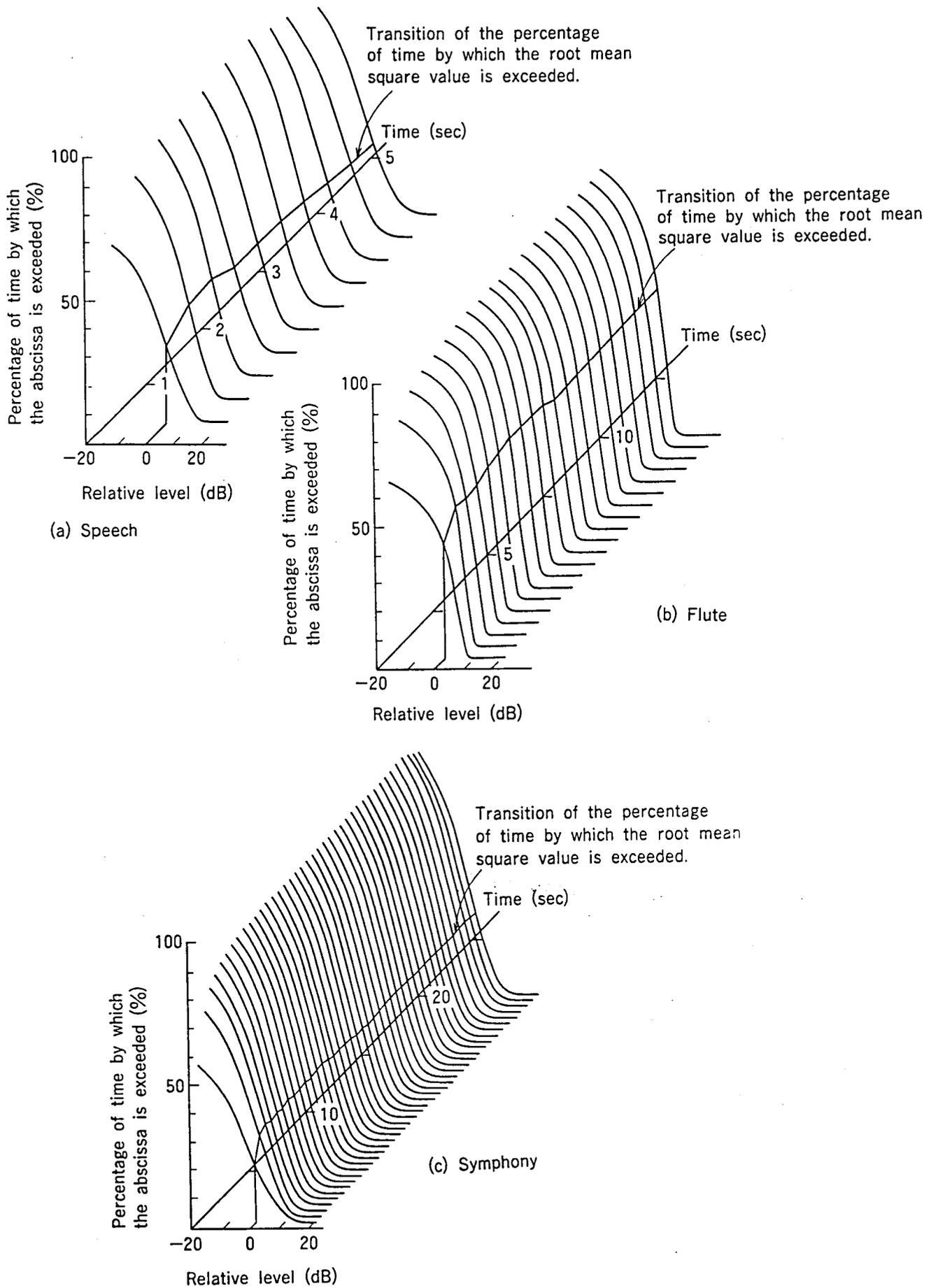


Fig.4.7 Transition of the distribution of instantaneous power level.

定値になることが明らかである。また、Fig.4.7には各時間長に対する実効値を越える時間率の推移も合わせて示している。Table4.1の音源信号について、累積時間長を5秒一定としたときの瞬時パワーレベル分布をFig.4.8に示す。この図から、スピーチ信号は実効値を越える時間率が低く、これに対しフルートは高調波の少ない信号であるから実効値近傍の時間率が増加している。

次にこのレベル分布曲線から特徴量を抽出するため、Fig.4.8の右下がりの曲線を実効値近傍の直線で近似した場合、実効値における切片直線の傾きの二つの量をとって各音源信号について調べた結果をFig.4.9に示す。同図には、音源信号として三味線、ジャズ、トランペットを加えて示している。実効値における切片の値は、実効値を越える時間率の大小を表しており、一方、直線の傾きは $p(x)$ が $P(x)$ の微分となっていることから、実効値における確率密度を表している。Fig.4.9によれば、瞬時パワーレベル分布曲線を直線近似したときの直線の切片と傾きは相関係数0.91の正の相関がある。従って、実効値における確率密度が大きい信号ほど、実効値を越える時間率も大きいことが明らかになり、音源信号は一方の統計量で代表できることが分かった。

(3)自己相関係数： $R(\tau)$

$R(\tau)$ は信号自身の相関を表す量で、次式で定義される。

$$R(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} s(t)s(t+\tau)dt}{\int_0^{\infty} s^2(t)dt} \quad (4-4)$$

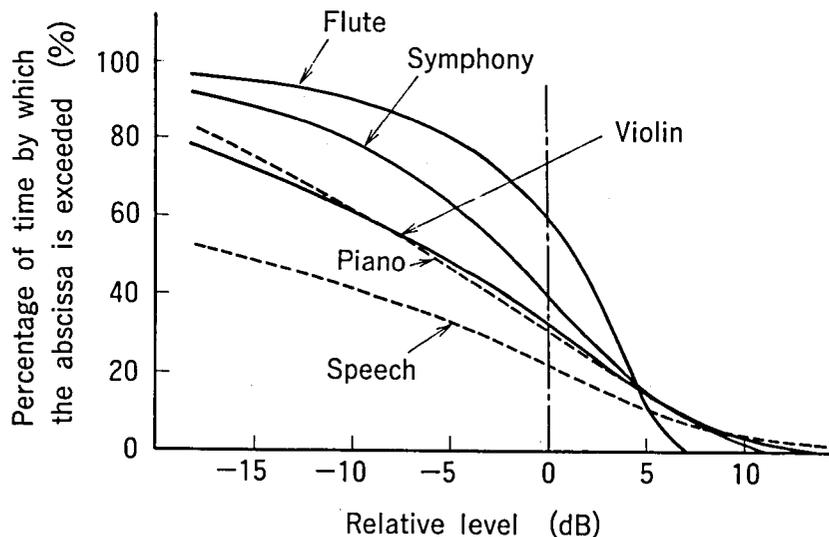


Fig.4.8 Examples of the distribution of the instantaneous power level. (The reference level (0 dB) is the root mean square value for 5 sec.)

$R(\tau)$ は、定性的には信号自身の相関性がどの程度保たれているかを表しており、統計的にはタイムラグ τ だけ離れた2信号の結合確率密度関数の期待値に対応した量である。全時間長5秒、サンプリング周波数20kHz、最大タイムラグ200msの設定条件下で種々の音源について $R(\tau)$ を求めた。Fig.4.10(a)~(c)にスピーチ、フルート、シンフォニーの結果をそれぞれ示す。聴感上好ましい残響時間に対応する物理パラメータとして、自己相関係数の包絡線の絶対値が0.1に減衰するまでの時間を提案している研究もあるが、Fig.4.10から分かるように包絡線の形が一様に減衰するものばかりでないため、この時間を求めるのはかなり難しい。

(4)パワースペクトル:P(k)

音源信号のパワースペクトルを求める際に用いた手法を以下に示す。

- 1)全時間長5秒間の音源信号を20kHzでサンプリングし、4096点ずつ即ち200ms毎にブロック分けした後、それぞれのブロックにハミング窓をかけてFFTを施した。
- 2)このようにして求めた第iブロックの、周波数kにおける振幅 $S_i(k)$ を次式のように全ブロック数Mで2乗平均して平均パワースペクトル $\bar{P}(k)$ を算出した。

$$\bar{P}(k) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |S_i(k)|^2 \quad (4-5)$$

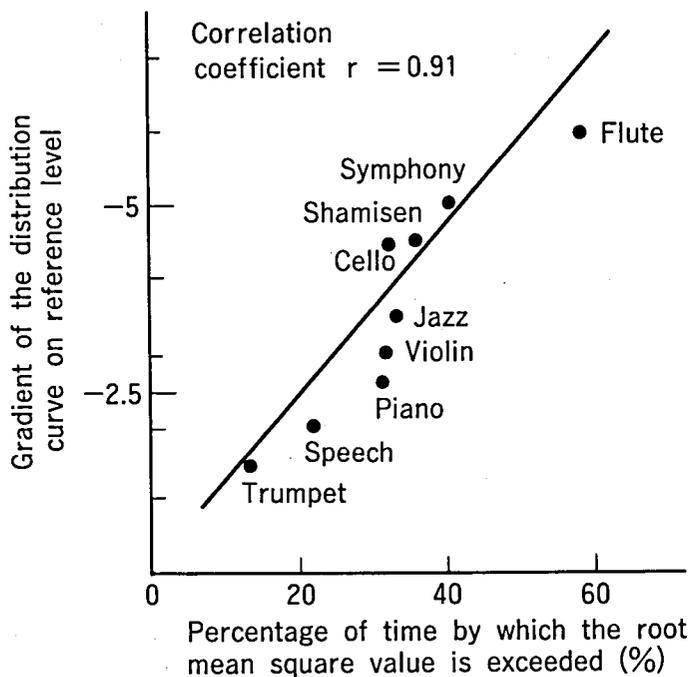


Fig.4.9 Physical characteristics of the sound source signals.
(Statistical values are arranged in two dimensional space.)

Fig.4.11(a)~(c)にスピーチ、フルート、シンフォニーの測定結果を示す。この図から、スピーチは500Hz未満の3つの周波数成分が顕著であるのに対し、フルートは1kHz近辺に多数の周波数成分があり、シンフォニーは $1/f$ で周波数特性が減衰している様子が分かる。

音源信号の性質を表す物理パラメータとして望ましいのは次の点である。

- a)物理パラメータの抽出が容易であること。
- b)抽出された物理パラメータが、再現性、安定性の点で優れていること。
- c)物理的特徴を少ない次元で説明できること。

本節で論じた4種類の物理パラメータのうち、自己相関係数はa),b)の点で、またパワースペクトルはa),c)の点でそれぞれ瞬時パワーレベル分布に比べて劣って

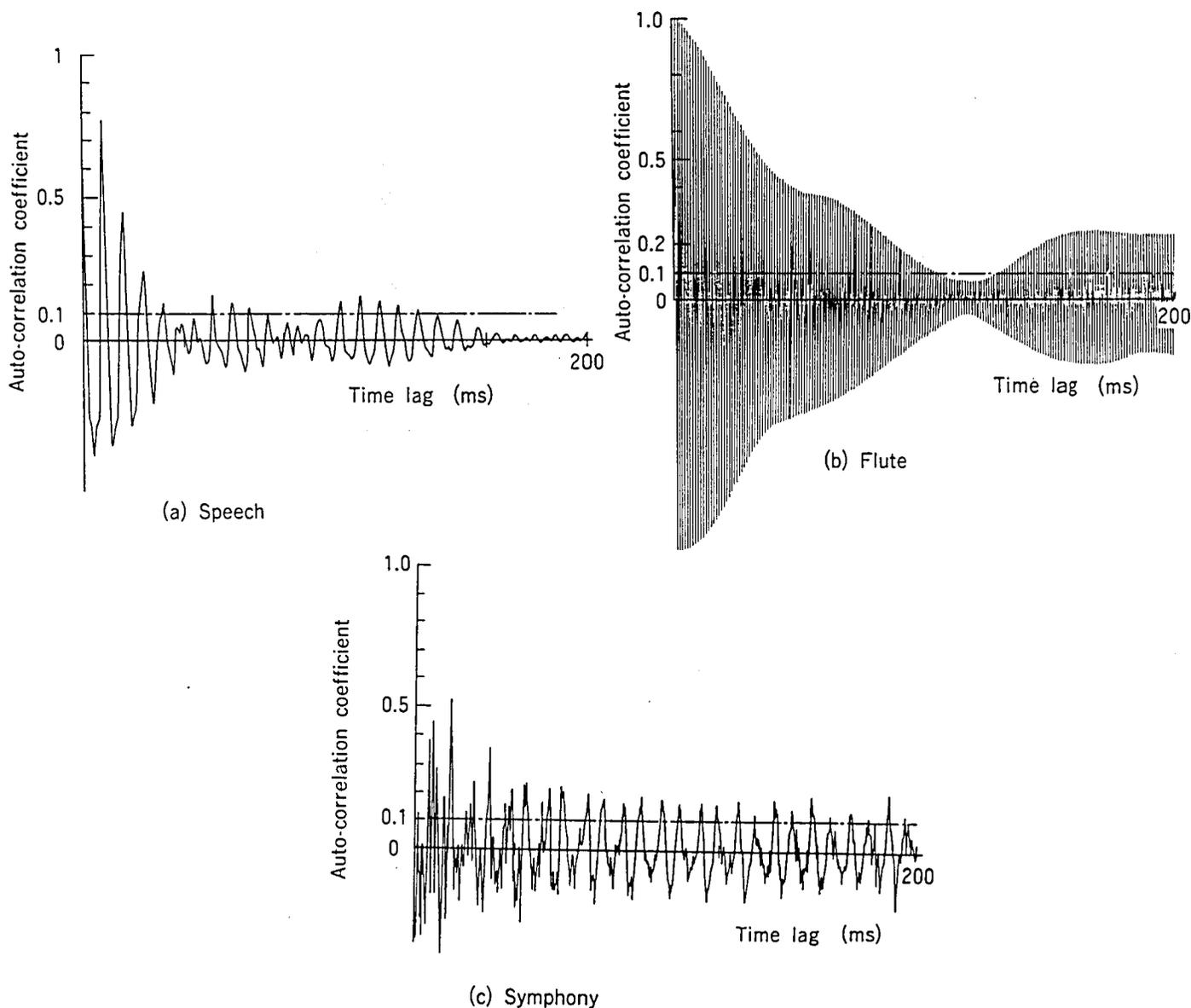


Fig.4.10 Auto-correlation coefficient of various source signals.

いる。また、確率密度関数は、瞬時パワーレベル分布と相関が高い。従って以後、聴感上好ましい響きを与える残響時間との対応を調べるための物理パラメータとして、瞬時パワーレベル分布の特徴量である全時間長5秒の実効値を越える時間率を採用した。全時間長を5秒に選んだ理由は、実効値を越える時間率がすべての音源信号で1~2秒以上の時間長で安定することと、好ましい響きに関する聴感試験を行う際に判断が下せるだけの時間長が必要なためからである。

4.3.2. 音源の種類に依存した好ましい響き（心理実験）

先に述べた物理的性質を測定した音源信号に残響を付加し、この信号を使って好ましい響きに関する聴感試験を行った。残響付加にはヤマハ製REV-1型のデジタ

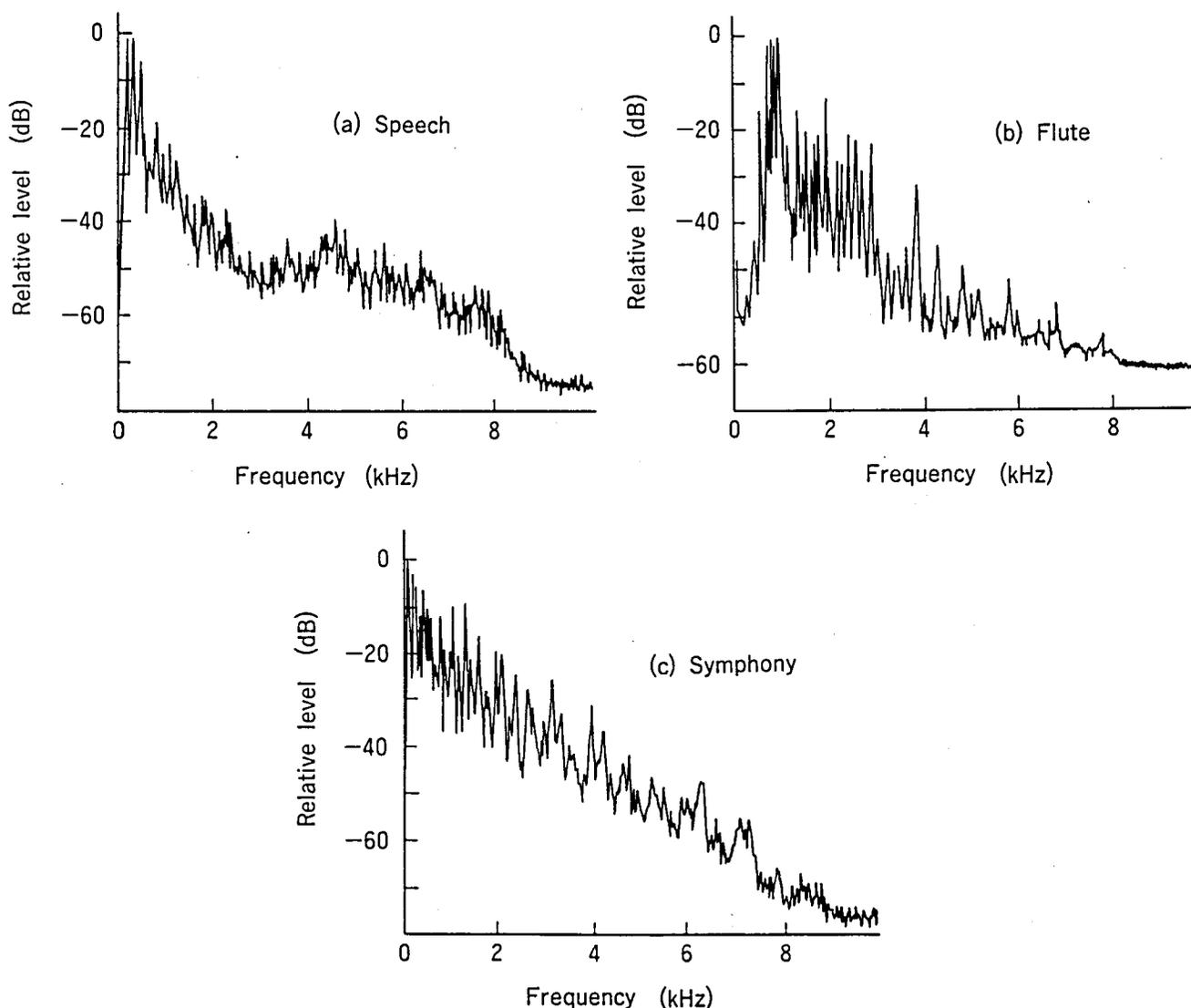


Fig.4.11 Average power spectrum of various source signals.

ル・リバーブレータを使用した。Fig.4.12に示すように、試験信号は直接音からの遅れ時間40ms、直接音に対する相対レベル-3dBの反射音と遅れ時間100ms、相対レベル-6dBの残響音から構成されている。この時系列モデルは、第一次反射音の遅れ時間、レベルが直接音の音色を変化させたり、有害なエコーとならない範囲で選び、残響音については一般の部屋でよく得られる特性を代表するように選んだ。また本実験では残響音が聴感に与える影響をみるため、直接音、第一次反射音および残響音の直接音に対する遅れ時間、レベルを固定し、残響音の減衰特性のみを変化させることとした。残響時間の周波数特性を決定するため、国内の代表的な12のコンサートホールの残響時間周波数特性を調査し、Fig.4.13に示す結果を得た。ここでは、残響時間周波数特性の形状のみを問題にしているため、各周波数における残響時間は、各ホール毎に500Hzの残響時間で125Hz、2kHz、8kHzの残響時間を正規化することによって算出した。12のホールで平均した残響時間周波数特性は、125Hz、2kHz、8kHzの順にそれぞれ1.2秒、1秒、1秒、0.6秒となり、低域でやや残響時間の長いものとなった。また、使用したデジタル・リバーブレータの制約から、上記4つの周波数のうち2kHzの残響時間設定値を使わず、そのかわりに3kHzで残響時間0.9秒とした。Fig.4.13には、デジタル・リバーブレータの残響時間設定値も合わせて示している。周波数特性の比を一定に保ちながら、Table4.2に示すように、500Hzの残響時間を0秒（残響音なし）から4秒まで11段階変化させた残響音を無響室録音の音源信号に付加した。残響時間0秒は、すべての周波数で残響時間0秒、即ち残響音なしを意味している。評定者に提示する信号は、Table4.1の各音源について残響時間の異なる11種類をランダムに並べたものを2系統作成し、評定者個人の、判定に対する一貫性のチェックもできるように考慮した。評定者への提示は、2チャンネルのステレオ・ヘッドホン再生、提示レベル75 dBA相当で行った。評定者は20歳代の正常な聴覚を有する7名である。評定者には、その音源信号を聞いた、響きが “短かすぎる”、“短い”、“ちょうどよい”、“長い”、“長すぎる”の5つのカテゴリーのうちからどれか一つ選ぶように指

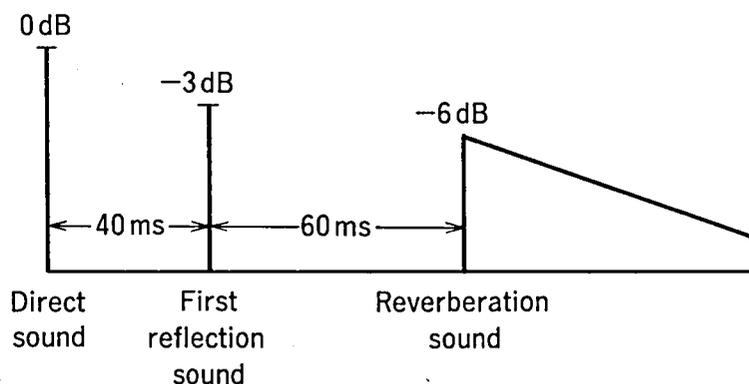


Fig.4.12 Time pattern of test stimuli.

示した。上述の聴感試験結果から、系列範ちゅう法を使って各音源の種類ごとに尺度化を行った。本実験の場合、判定の尺度として両極法を採用しているため、“ちょうどよい”響き、即ち好ましい響きに対応する尺度値は0である。

Fig.4.14(a)にスピーチ、ピアノ、バイオリンの結果を、Fig.4.14(b)にチェロ、フルート、シンフォニーの結果を示す。Fig.4.14には最小2乗法で求めた回帰直線も合わせて示しているが、すべての音源について相関関係数0.97以上と高い相関となった。回帰直線はフルートを除いてその傾きが各音源信号でほぼ同一となった。この理由は、フルート演奏音のエンベロープがゆっくりと変化するため、残響時間を長くしていても、その効果が聴感上響きの違いとして表れにくくなるためと考えられる。

Table 4.2 Reverberation time utilized for hearing test.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Rev. time(s)	0	0.5	1	1.3	1.5	1.8	2	2.5	3	3.5	4

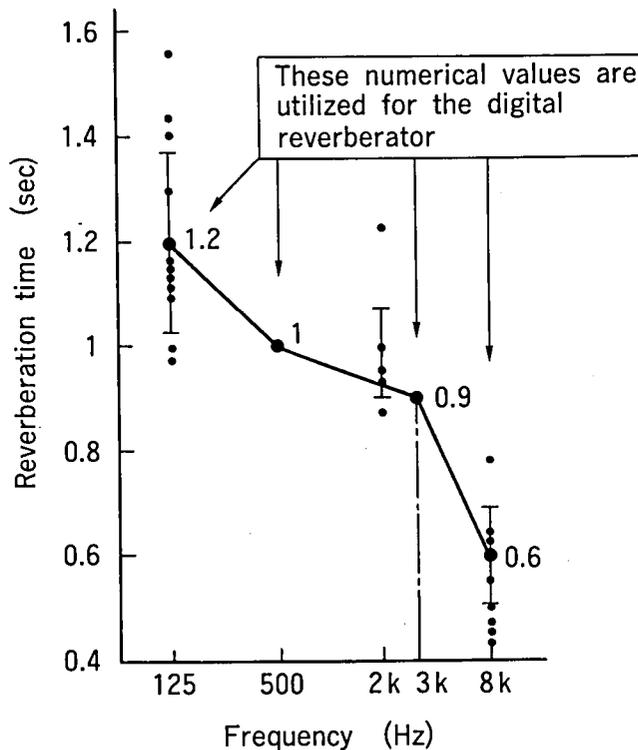


Fig.4.13 Frequency characteristics of reverberation time of 12 halls. (Reverberation time of various frequencies are normalized by that of 500 Hz)

尺度値0に対応する各音源の残響時間を、Table4.3に示す。この表から以下のことが分かる。

1. スピーチ信号に対しては短い響きが好まれる。
2. 楽音については曲目のテンポやリズムに依存するところ大であるが、ここで使ったTable4.1の曲目の場合、鍵盤楽器であるピアノがスピーチに次いで短い残響が好まれ、以下、バイオリン、チェロの単一弦楽器が残響時間1.5秒、1.6秒で続き、シンフォニー、フルートの順となった。
3. フルートは、残響時間の変化に対する聴感上の変化の感度が鈍いばかりでなく、好ましい響きに対応する残響時間も約2秒と最も長くなった。また、系列範囲ちゅう法で得られた各音源に対する尺度値を、提示した残響時間と、音源の種類を要因とする2元配置で分散分析した結果、危険率1%で両者とも有意であった。

4.3.3 好ましい響きと物理量の対応

音源の統計的性質を表す物理量の一つである、5秒間の実効値を越える瞬時パワーの時間率と、その音源に対する心理量の一つである、4.3.2で得られた好ましい

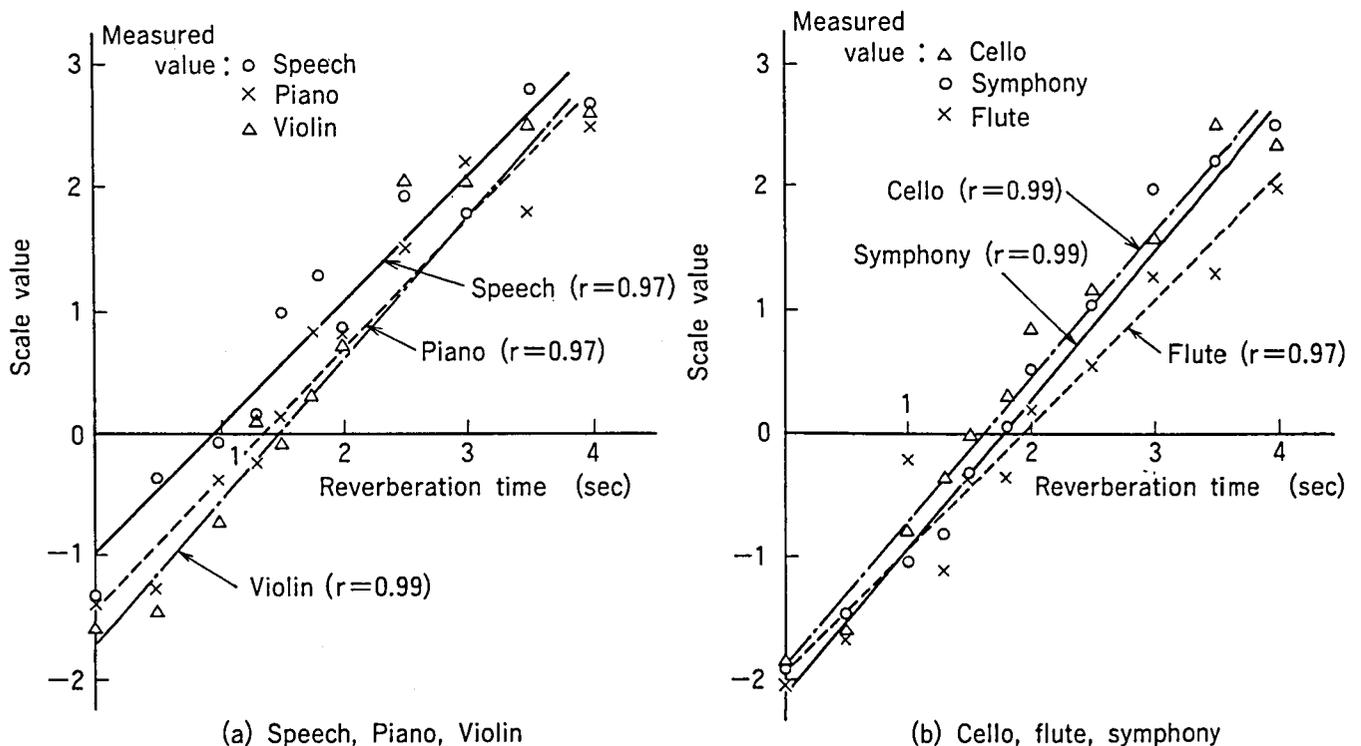


Fig.4.14 Relation between reverberation time and scale value. (These results have been obtained by the method of successive categories.)

響きに対応する残響時間の関係をFig.4.15に示す。物理量、心理量の相関係数は0.88とかなり高い値を示した。従って、ここで得られた回帰直線を用いれば、実効値を越える時間率から、聴感上好ましい響きを与える残響時間の推定も可能である。この好ましい残響時間を推定する際には、無響室で録音された音源信号が必要であるが、無響室録音の音源信号を入手することは困難な場合もあるので、一般の部屋で録音された音源信号がどの程度統計的性質を保存しているか調べる

Table 4.3 Statistical characteristics of various source signals by the method of successive categories. (Reverberation times in this table are calculated on the basis of scale value "0" of the regression line.)

Sound source	Gradient	Intercept	Cor.coef.	Rev.time
1.Speech	1.01	-0.97	0.97	0.96
2.Piano	1.04	-1.42	0.97	1.36
3.Violin	1.16	-1.73	0.99	1.49
4.Cello	1.17	-1.87	0.99	1.60
5.Flute	0.99	-1.94	0.97	1.96
6.Symphony	1.22	-2.09	0.99	1.72

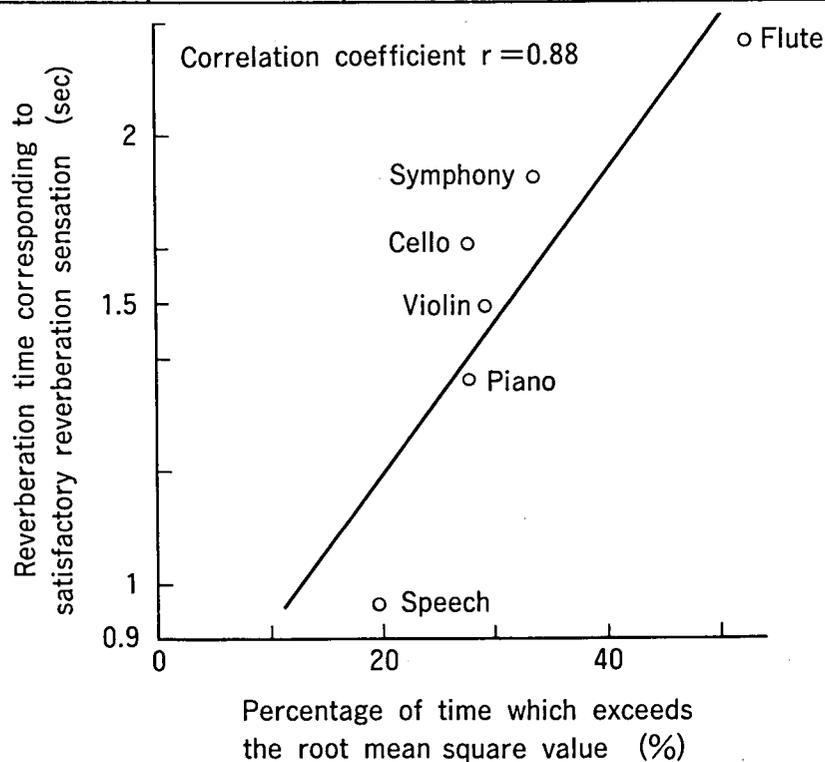


Fig.4.15 Relation between physical and psychological values.

必要がある。そこで、各種音源信号について、初期反射音の他に残響音を付加し、その残響時間を変化させた場合、実効値を越える時間率がどのように変化するかを調べた。ここで用いた信号は、初期反射音、残響音のレベル、直接音に対する遅れ時間すべてFig.4.12に示した条件と同一である。この結果をFig.4.16に示す。シンフォニーとスピーチ信号は、響きを付加していない状態から反響音、残響音を付加するにつれて実効値を越える時間率が激増する傾向にある。

一方、フルートは響きを付加していない場合、時間率50%と高く、初期音のみ付加した場合、および初期音と残響音を付加した場合の時間率は40%ほど一定となっている。バイオリンは、フルート程顕著ではないが、やはり初期音を付加しても時間率は響きを付加しない場合よりも低下している。この原因を更に詳しく調べるため、スピーチとフルートについて無響室で録音した信号に初期反射音を付加した場合の波形上に表れる違いを調べた。Fig.4.17は、音源信号としてスピーチを用いた場合、無響室録音信号とこれに40ms遅れの初期反射音を付加した信号それぞれの瞬時パワーの時間的な変動を示す。Fig.4.18(a),(b)は、音源信号がフルートの場合を示している。Fig.4.17,4.18には、5秒間の実効値レベルも同時に示している。スピーチは、反射音を付加することによって無音区間がなくなり、実

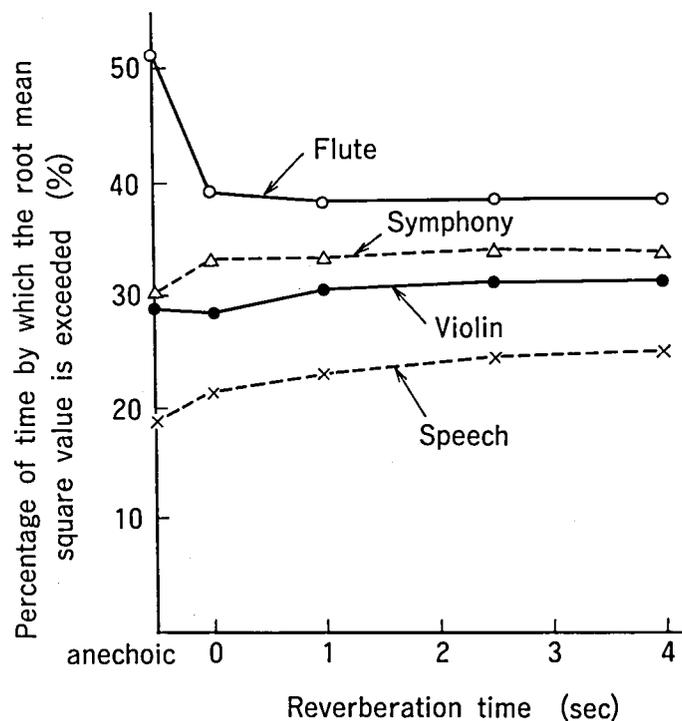
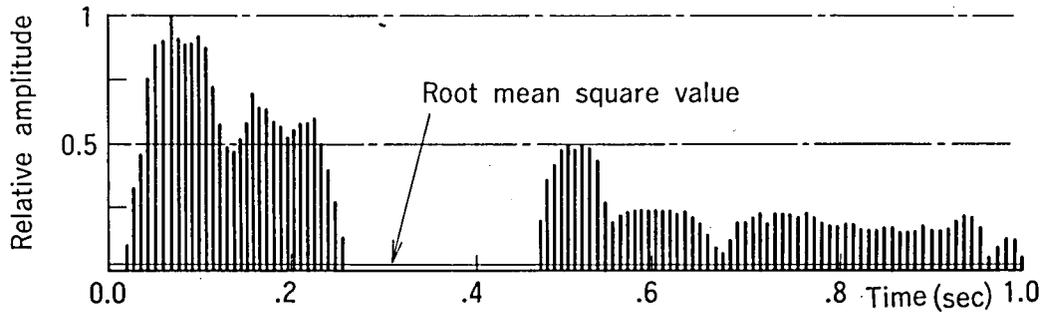
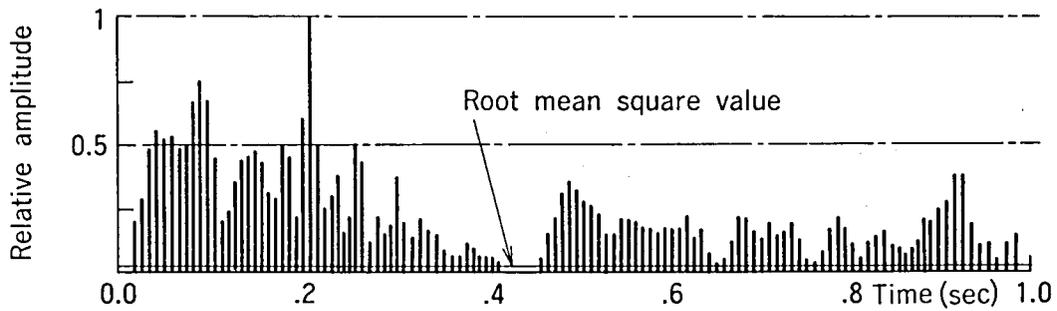


Fig.4.16 Changes in percentage of time by which the root mean square value is exceeded for reverberation time of various source signals.

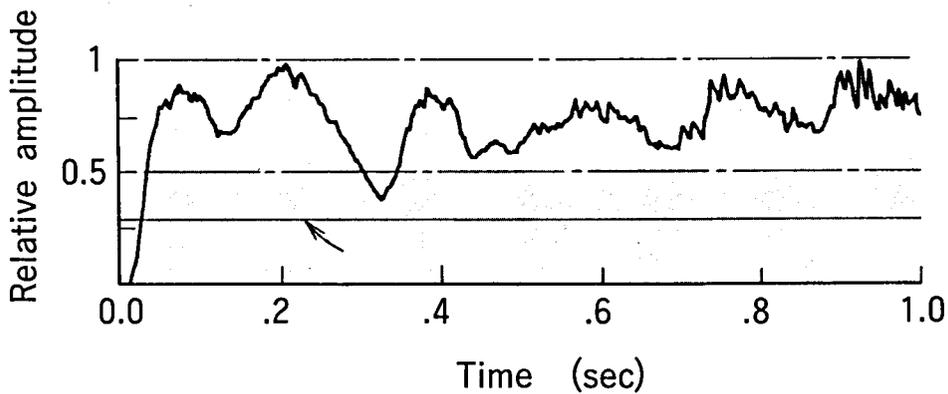


(a) Waveform of the sound signal recorded in anechoic room.

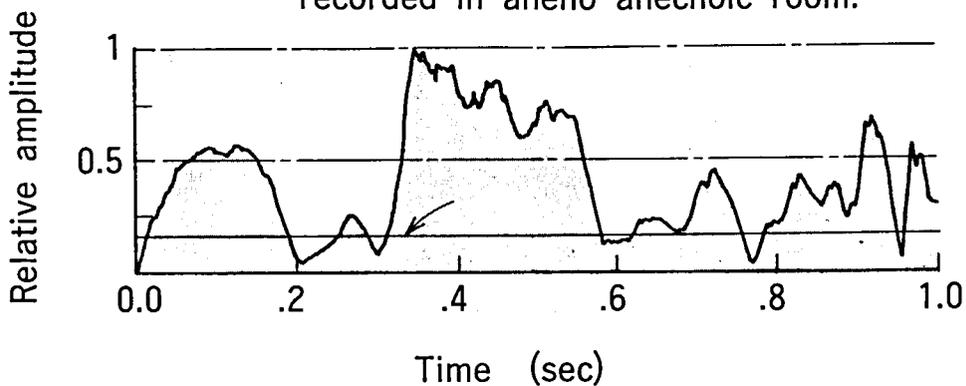


(b) Early reflection sound (40 msec delay) is added to the signal (a).

Fig.4.17 Effects of speech signal waveform by adding early reflection sound.



(a) Waveform of the sound signal recorded in anechoic room.



(b) Early reflection sound (40 msec delay) is added to the signal (a).

Fig.4.18 Effects of flute signal waveform by adding early reflection sound.

効値を越える時間率は高くなる傾向を示すが、フルートの場合は、初期反射音を付加して波形合成すると相対的な振幅差が拡大し、実効値を越える時間率が低下することが分かった。従って、残響付加した一般の信号を使った好ましい残響時間は、フルートを除けば実効値を越える時間率から予測可能であることが結論される。

4.4 心理実験結果のCADソフトへの適用

4.2節で得られた残響時間の弁別限に関する知見は、計算機を使った室内音響設計の中で内装材料の自動選択のアルゴリズムに生かされている。残響時間は部屋の使用目的によって決まり、この設計値の上限、下限を算出する際に弁別限(7%)を用いている。

残響時間を設計する際、部屋の壁面は客席や舞台等の固定吸音面と側壁、後壁等の調整可能吸音面の2種類に分類できる。この調整可能吸音面の内装材料は計算機を用いて、Fig.4.19に示す流れに従い決定している。この決定に当たっては次

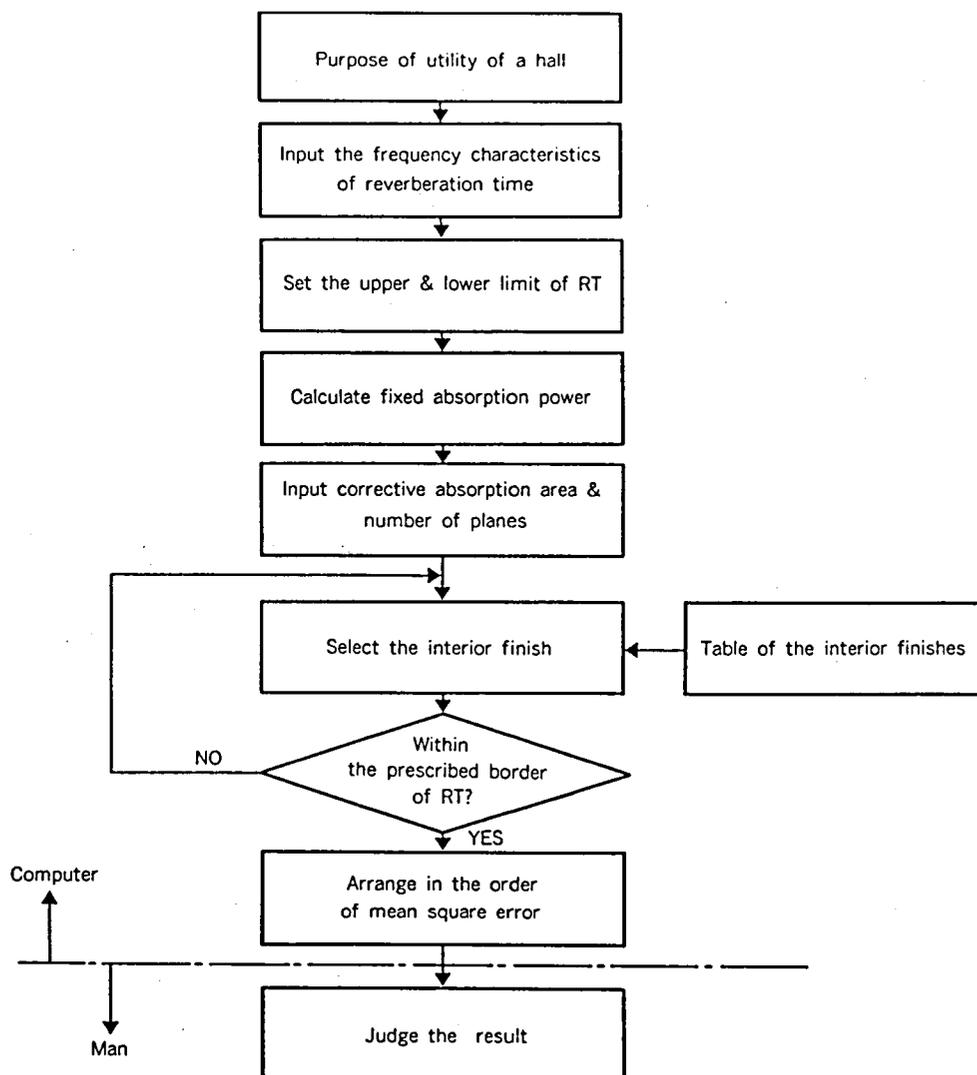


Fig.4.19 Flow chart of interior finish design.

の指導原理に基づいている。

(1)残響時間の周波数特性がすべて所望の周波数特性を中心とした上、下限の範囲内にある。

(2)解が複数組存在した場合は、それらの中で所望の残響時間周波数特性と解との間の2乗誤差が最小のものを選ぶ。

上記のアルゴリズムを適用して、残響設計を行った例をFig.4.20に示す。これは内装材料をFig.4.19の流れに従って検索し、多数回の繰り返し処理の後得られたものである。この図で、中央の実線は最適な残響時間周波数特性を表し、破線は所望残響特性の上下限を表している。

4.5 結言

残響時間の弁別限を求める心理実験結果から、

(1)残響時間が1秒付近で弁別限が最も小さな値となる。

(2)広帯域信号の場合、弁別限は6~7%である。

この知見を実際の残響時間設計用のCADソフトに適用し、内装材料を自動的に選択することが可能になった。

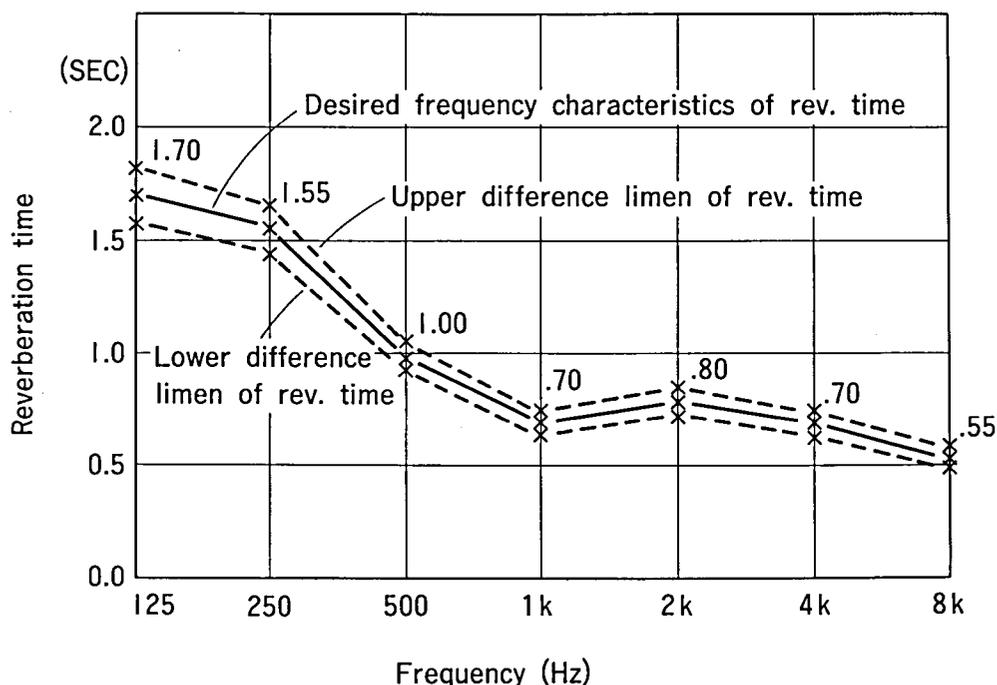


Fig.4.20 Optimal solution of frequency characteristics of reverberation time.

無響室録音した種々の音源信号に、第一次反射音および残響音を付加し、残響時間を変化させてこれらの音源信号に対する好ましい残響時間を調べた。その結果以下のことが明らかになった。

(1)音源信号の特徴を表す物理量である波形の実効値を越える時間率と、好ましい響きを与える残響時間の間にはかなり高い相関関係（相関係数0.88）のあることが明らかになった。この結果は、音源信号に適度の響きを加えることが好ましいことであり、その程度は音源信号のもつレベル変動の激しさ（実効値を越える時間率）に依存することを示唆している。

(2)物理量を観測する時間長は2秒以上でよい。

(3)無響室録音の音源信号だけでなく、響きの付加された一般の信号からも、実効値を越える時間率は推定できる。ただし、反射音や残響音を付加することによって、信号のコヒーレント性が失われエンベロープの最大、最小振幅の差が拡大するフルートのような信号の場合、推定精度が落ちる。

音場の心理的印象を左右する点で、残響時間は重要な物理パラメータであるが、本章の結果は、残響可変装置をもった多目的ホールで残響時間を設定する際の指針となるばかりでなく、電気音響設備を使って音場の残響時間を制御する場合にも適用することが可能である。また、番組の素材音を収録する際、音源信号の実効値を越える時間率から好ましい残響時間を算出し、もし不足している場合には適した残響時間となるように電氣的に付加することも可能である。

5. 反射音の指向性を考慮した新しい音響測定法[34]-[36]

5.1 音響測定法開発の背景と位置づけ

室内音場の物理特性は音源から受音点までのインパルス応答を測定することにより得ることができる。従来から測定されてきた残響時間もこのインパルス応答から抽出できる特徴量の一つである。残響時間は音場の物理的な特徴をマクロに表す重要な量であるが、一つの音場内の異なる座席間の差を表せないのがこの物理パラメータの欠点である。また我々がコンサートホールで音楽を聴く際に経験する心理的な印象は、響きの他にも音量感、豊かさ、音像の適度の融合・分離感、音場の広がり感（音に包まれた感じ）等であり、これらを説明するには残響時間だけでは不十分である。従って、音場をより分析的な見地からしかも統一的に測定、評価できる物理パラメータやシステムの開発が望まれてきた。この問題に対処するため、空間的に多数配置したマイクロホンを用いた位相合成することにより鋭い指向特性を実現する広帯域アレイマイクロホン（Wideband Array Microphone 以後WAMと略す）を新しく開発し、これを收音系に用いた音場計測システムを構築した。

音場を音源と受音点の中間に位置する伝送系と考え、伝送系の物理的な特徴を表す量は、短音に対する系の応答から抽出することとした。物理パラメータは、音場を主観評価した際に得られた心理的印象の種類に関する研究[37]-[43]や物理パラメータと心理パラメータとの対応から得られた研究成果[44]-[50]を踏まえて決定した。これらの物理パラメータは、大きく分けて3つに分類することができる。まず指向性を持たない物理パラメータとして、残響時間、D(80)値、定常状態エネルギーの3種類、指向性を持つ物理パラメータとして、初期反射音エネルギー横方向成分、前後比の2種類、更に伝送周波数特性から抽出した2種類の合計7種類である。

この測定システムを用いることにより物理パラメータをもとにした異なる音場間の差や同一音場内の座席間の差を統一的に論ずることが可能になるものと考えられる。

5.2 測定システム

音場の受音点指向性に着目した計測法として、Thieleはパラボラマイクロホンを用いた方法を1952年に提案した。[14] パラボラマイクロホンはその指向特性が測定周波数によって変化したり、2kHz以上の高音域でしか実用的な鋭い指向特性を得られないという欠点から、主に高音域における音場の指向拡散度を得るために用いられた。最近では、Broadhurstが3次元格子状配列マイクロホンを音場計測に用いているが、マイクロホンの配列が固定であるため周波数による指向性の変化は避けられず、聴覚心理に大きな影響をおよぼす中低音域の反射音に関する情報が得られていない。[51][52] 音場を一種の線形の伝送系と見なし、そのインパルス応答を、空間に接近して配置した4本のマイクロホン出力相互の相関を利用して得る方法が山崎によって提案されているが、聴覚心理上意味のある物理量の抽出にはいたっていない。[53] 本論文で提案するシステムは125Hzから4kHzまでの広い帯域を測定対象の周波数として音場の方向別短音応答を求め、計算機処理によりエネルギー量を基礎にした物理パラメータの抽出を行うことが特徴である。物理パラメータとしては系の過渡特性、定常特性、周波数特性を反映する7種類を採用した。システムのブロック図をFig.5.1に示す。本章では、システムの音源系、受音系、信号処理系について述べる。

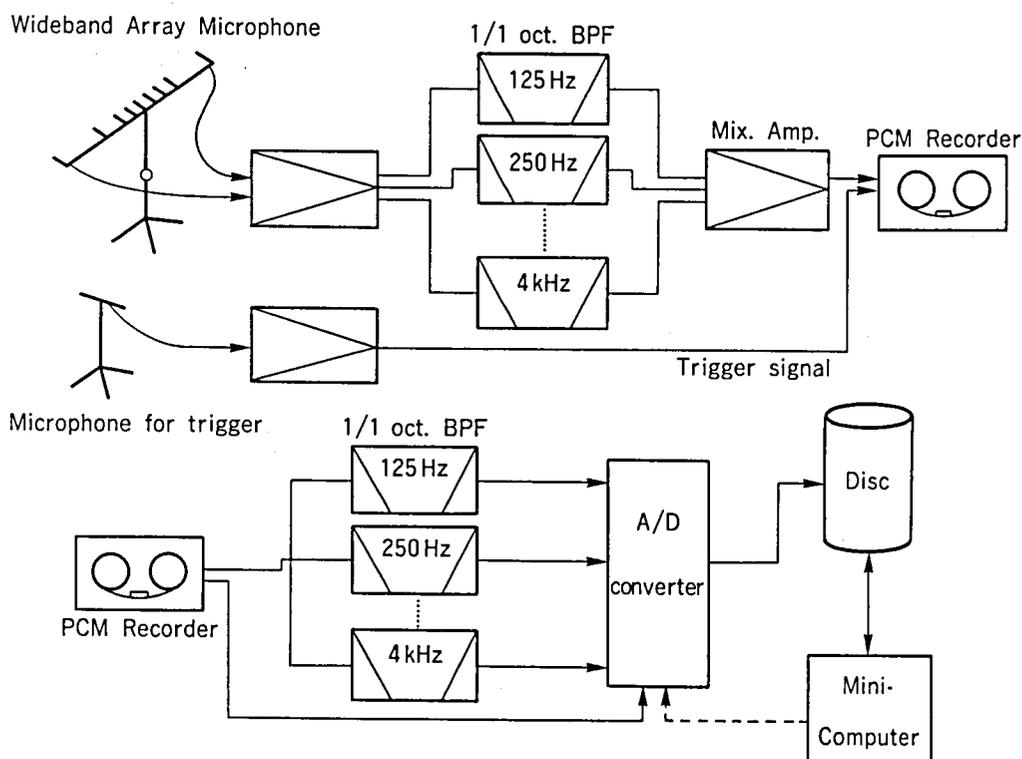


Fig.5.1 Diagram of system for measuring directional characteristics of a sound field.

5.2.1 音源系

測定システムの標準化を図るため、音源として12面体の無指向性スピーカーを用いた。[54] 12個のスピーカーのうちあらかじめ決めたスピーカーがいつも舞台から客席を見て正面に来るように無指向性スピーカーを設置した。Fig.5.1に示したトリガー用マイクロホンは無指向性スピーカーの特定の面から一定の距離（残響半径より十分小さい値）離して置き、AD変換器の外部トリガー用としてこれを用いる他、スピーカー出力パワーの変動の影響を取り除くために用いた。すなわち、トリガー用マイクロホン出力のうち直接音に対応する部分を時間軸上で抜き出し、この部分のエネルギーを使って、各帯域の出力を正規化した。これにより、異なる音場間のエネルギーの絶対的な違いが評価できた。スピーカーから理想的なインパルス信号を出すことは不可能であり、パルス状の信号を出した場合でも十分なSN比を得るためには、同期加算という手法が必要になる。そこで音源信号として、可聴周波数帯域の正弦波を変調した短音を用いることを考えた。短音を用いた場合、音場の過渡特性と周波数特性が同時に測定できる点が利点である。処理時間の短縮を図るため、音源信号は125Hzから4kHzまで1オクターブ間隔で選んだ6周波数の正弦波を多重し、更に6種類の正弦波それぞれに6波長ハミング窓をかけて合成して作成した。測定に用いた広帯域音源信号波形をFig.5.2に示す。

5.2.2 受信系（広帯域アレイマイクロホン，WAM）

直線状のアレイマイクロホンは、狭い帯域内で鋭い指向特性を持つことが知られている。この特徴を持つアレイマイクロホンを広帯域の音響測定に用いるため、

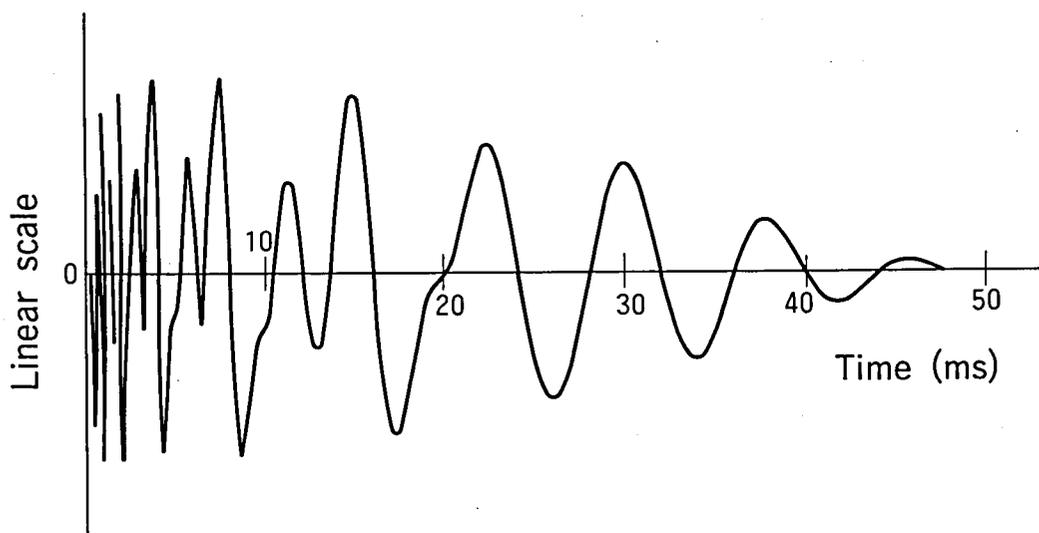


Fig.5.2 Waveform of source signal for measurement.

マイクロホンの配置をFig.5.3に示すようにした。このアレイマイクロホン全体で15本のマイクロホンから構成され、マイクロホン間隔は、空間的なエリアジングを除くため測定周波数の半波長間隔とした。250Hzから4kHzまでの1オクターブ間隔の5周波数についてはそれぞれの周波数ごとに5本のマイクロホン出力を合成

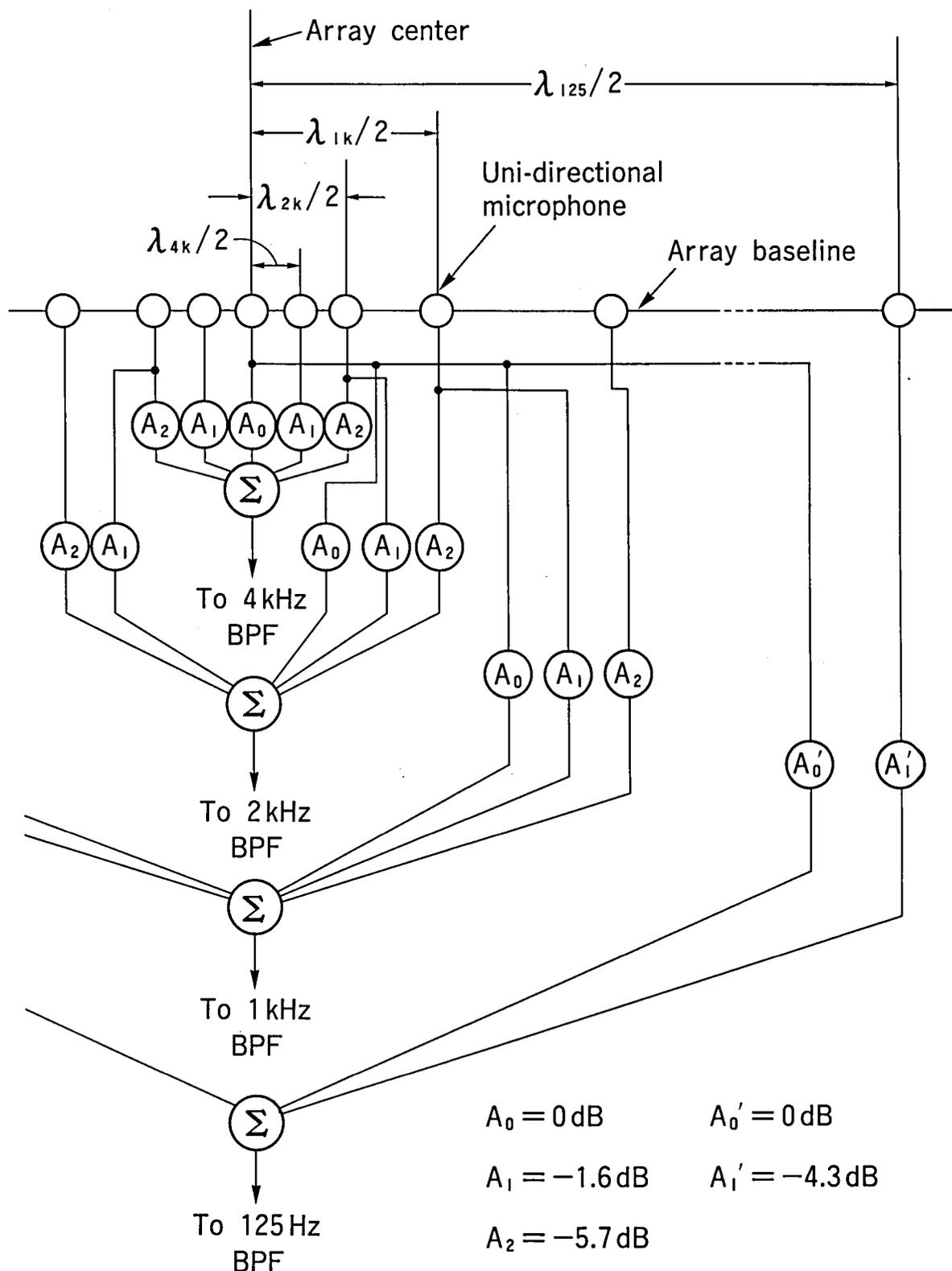


Fig.5.3 Geometrical arrangement and gain settings of WAM.

した。Fig.5.3から明らかなように、各帯域で共通に使えるマイクロホンが存在する（たとえばWAMの中心にあるマイクロホンはすべての帯域で使う）ため、使用するマイクロホン総数を大幅に削減できた。アレイマイクロホンの指向特性の副ローブレベル最大値が-20dB以下になるように各マイクロホン出力を重みづけした。この副ローブレベル-20dBは、Barron等による反射音の有無の検知限レベル約-15dB[7]より小さくなるように決めたものである。副ローブレベル最大値を規定のレベル以下に保ちながら、同時に主ローブの半値幅を最小化する最適な重みづけを行うため、チェビシェフの重みづけを採用した。[55] マイクロホン素子数 5、副ローブレベル最大値-20dBの条件下で算出したマイクロホン素子出力の重みは、 $A_0=0\text{dB}$ 、 $A_1=-1.6\text{dB}$ 、 $A_2=-5.7\text{dB}$ である。このようにして構成されたWAMの合成指向特性は、配列による指向特性と各マイクロホン素子の指向特性との積で表される[35]。直線状アレイマイクロホンは本質的にアレイ基軸に関して回転対称の指向特性をもつため、各マイクロホン素子の指向特性を単一指向性とすることにより合成指向特性の前後比を改善した。またWAMに使用した単一指向性マイクロホンがコンデンサーマイクロホンであり、高音域で指向特性の前後比が劣化するため2kHz以上の高音域で使うマイクロホンの背後にFig.5.4に示すようにコーナー型の反射板を設置して前後比の改善を図った。1オクターブ帯域雑音を音源信号として無響室で測定したWAMの指向特性をFig.5.5に示す。WAMの性能として主ローブ半値幅が30度であること、低音域から高音域にわたって指向特性がほぼ変化しないことが確認された。

Fig.5.1に示すように、WAMを通った信号は、1オクターブの帯域幅をもつ、125Hzから4kHzまでのフィルターバンクを通過後合成され録音される。従って実音場での測定には、WAMを通過した合成信号と、トリガー用の信号のための2チャンネルのトラックを持つ録音機で十分である。

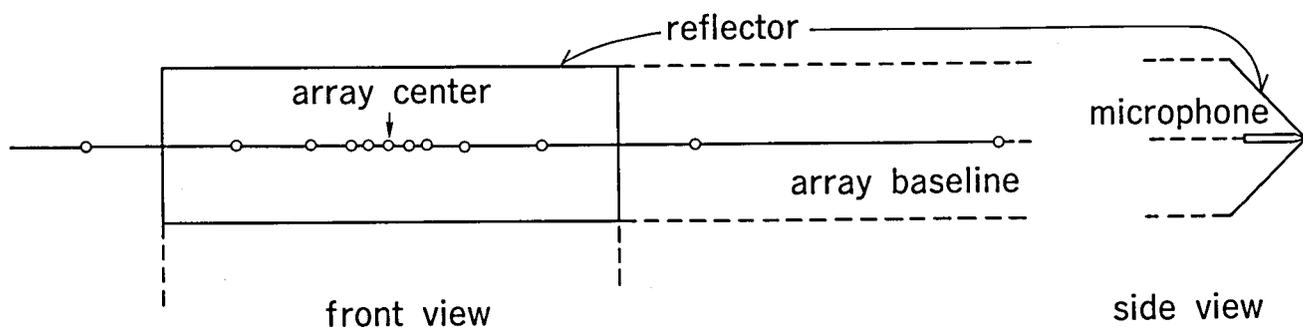


Fig.5.4 WAM's structure for improving front/back ratio.

5.2.3 物理パラメータ

録音された合成信号は、受信系で用いたのと同じフィルターバンクを通過後、125Hzから4kHzの6帯域に分割され、6チャンネル同時にAD変換される。方向情報をもつ短音応答（エコータイムパターン）は、音源から受信点までの部屋の伝達特性を表している。従って、信号を処理する際に重要となるのは、エコータイムパターンから聴覚心理上意味のある特徴量をいかにして抽出するかである。このシステムにおいては、受信点1点につき、WAMを水平面内で30度ごとに回転し、全体で12方向のエコータイムパターンを測定し、この方向別エコータイムパターンをもとに以下に示す7種類の物理量を抽出した。

(1)残響時間 (Reverberation Time) :

$$RT = \frac{\sum e_i \cdot RT_i}{\sum e_i} \quad (5-1)$$

(2)D(80)値 (D(80)value) :

$$D(80) = \frac{\sum \varepsilon_i}{\sum e_i} \quad (5-2)$$

(3)定常状態エネルギー (Stationary Energy) :

$$ENG = 10 \cdot \log(\sum e_i) \quad (5-3)$$

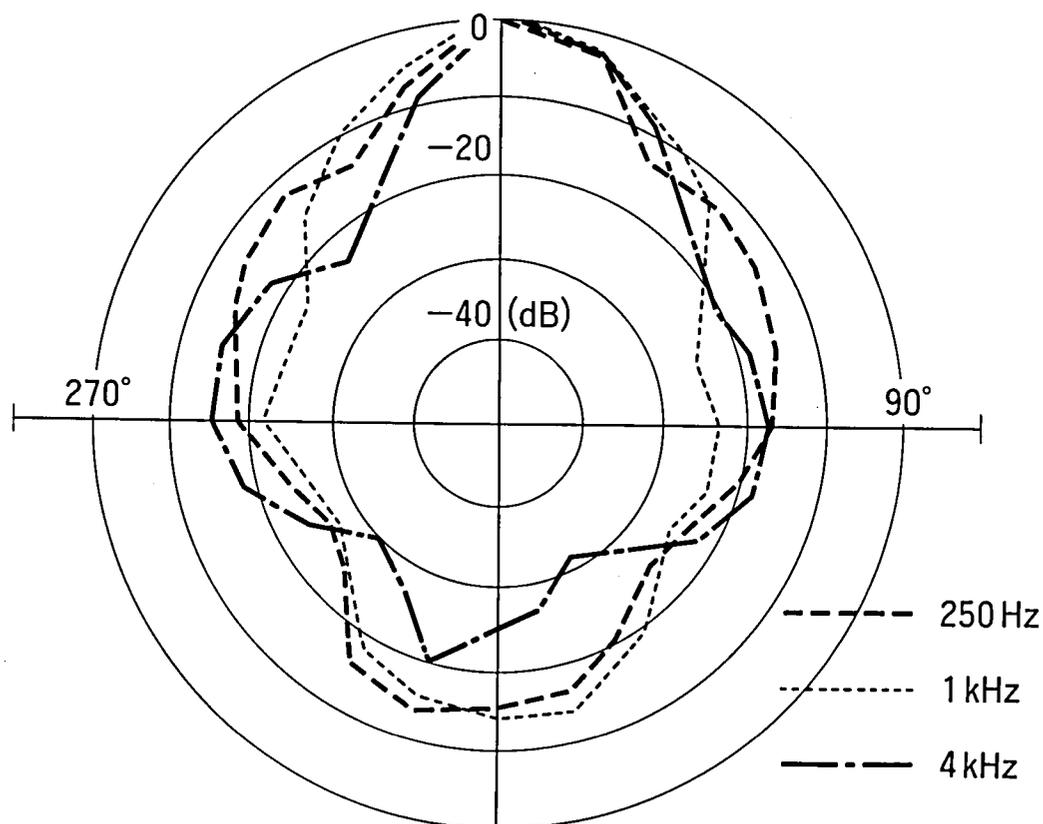


Fig.5.5 WAM's directional characteristics measured in anechoic room (sound source = one octave band-noise)

(4)初期反射音エネルギー横方向成分 (Lateral Component of Early Energy)

$$LC = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum \varepsilon_i \cdot |\sin \theta_i|}{\sum \varepsilon_i} \right) \quad (5-4)$$

(5)初期反射音エネルギー前後比 (Front Back Ratio of Early Energy)

$$FBR = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum_F \varepsilon_i \cdot |\cos \theta_i|}{\sum_B \varepsilon_i \cdot |\cos \theta_i|} \right) \quad (5-5)$$

(6)定常状態 (低音域/中音域) エネルギー比

(Stationary Low/Mid Frequency Energy Ratio) :

$$LMR = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum (e_i(125) + e_i(250))}{\sum (e_i(500) + e_i(1k))} \right) \quad (5-6)$$

(7)定常状態 (高音域/中音域) エネルギー比

(Stationary High/Mid Frequency Energy Ratio) :

$$HMR = 10 \cdot \log \left(\frac{\sum (e_i(2k) + e_i(4k))}{\sum (e_i(500) + e_i(1k))} \right) \quad (5-7)$$

第*i*番目の方向の音圧を*p_i*で表すと、直接音到来後80msまでの初期反射音エネルギー*ε_i*、定常状態エネルギー*e_i*はそれぞれ、

$$\varepsilon_i(f) = \int_0^{80\text{ms}} p_i^2(f, t) dt \quad (5-8)$$

$$e_i(f) = \int_0^{\infty} p_i^2(f, t) dt \quad (5-9)$$

である。(5-1)~(5-8)式中、 \sum 、 \sum_F 、 \sum_B はそれぞれ、12方向、受音点から音源を見て前方5方向、後方5方向の和を表す。RT_{*i*}は第*i*番目の方向のエコータイムパターンからSchroder法[56]により初期の15dB減衰部分を外挿して求めた。従って、(5-1)式のRTは各方向の残響時間RT_{*i*}をその方向の定常状態エネルギー*e_i*で重みづけした平均値を表している。D(80)は初期反射音エネルギーの定常状態エネルギーに対する割合であり、各方向ごとに完全に分離して受音できた場合、この値は従来の無指向性マイクロホンを使って得た値と原理的に一致する。(5-4)、(5

-5)式中の θ_i はWAMのアレイ基軸を音源に対して直角に向けた時を基準方向0度とし30度毎に時計方向に測った第i番目の角度である。初期反射音エネルギーの横方向成分(LC)は、音源と受音点を結んだ線分に垂直な方向(両耳方向)に初期反射音エネルギーを射影して算出した。この物理パラメータは、音像の広がり感に影響を与えることが過去報告されている。またこのLCに類似した物理パラメータとしてJordanの提案した Lateral Efficiencyがあるが、[57] 彼はこのパラメータの測定に双指向性マイクロホンを用いているため、Barronが最初に定義した両耳方向への初期反射音エネルギーの射影[7]とは異なるもの(音圧の射影)となっている。初期反射音エネルギー前後比(FBR)は、受音点からみて音源側(前方)と反対側(後方)のエネルギー比である。LC, FBRはWAMによる指向性受音によって初めて抽出された物理パラメータである。定常状態エネルギー(e_i)がスピーカ・パワーで正規化されているため、音場間の音の大きさを比較することも可能である。Table 5.1にこれら7種類の物理量をその特徴で分類した表を示す。7種類の物理量は従来からの残響時間、D(80)の他、聴覚心理上その重要性が指摘されている初期反射音の方向情報を含み、伝送系である部屋の物理的特徴を多面的に規定している。またWAMを使ってこれら7種類の物理パラメータを測定することにより、音場の過渡特性、定常特性、周波数特性を統一的に把握することができる。

Table5.1 Classification of 7 physical parameters based upon physical characteristics.

	Transient	Stationary
Non-directional	D(80) value	Rev.time Stationary energy Low/mid freq. energy ratio High/mid freq. energy ratio
Directional	Lateral component Front back ratio	

5.2.4. 従来の物理パラメータとの対応

全指向性の物理パラメータのうち残響時間とD(80)値をとりあげ、WAMによるこれらの物理パラメータの測定結果と従来の全指向性マイクロホンによる測定結果とを比較した。この実験の目的は、測定に用いる受音系の指向特性の違いがこれらの物理パラメータにどのように反映するか検討するためである。測定した音場は、室容積247m³、表面積288m²の小会議室である。Fig.5.6(a),(b)に測定結果を示す。この図から全指向性の物理パラメータが両手法間でよく一致していることが分かる。従って、WAMが受音点を中心とする音場空間を正しく分割していることが確認された。

5.3 結言

反射音の指向性を考慮した新しい音響測定法を導入することにより、同一音場内の異なる受音点間の差や異なる音場間の差を統一的に把握できるようになった。音場の特徴を代表する物理パラメータとしては、過去の心理実験の研究成果を踏まえて7種類を採用した。方向毎のエコータイムパターンをもとにして7種類の物理パラメータを抽出し、全指向性の物理パラメータの他、指向性受音によって初めて実現した初期反射音エネルギーの横方向成分、前後比の測定が短時間で行えるようになった。これらの物理パラメータは、音場の過渡特性、定常特性、周波数特性を網羅したものとなっている。また本測定法が、従来からある全指向性の物理パラメータの測定にも十分な精度で適用できることを明らかにした。

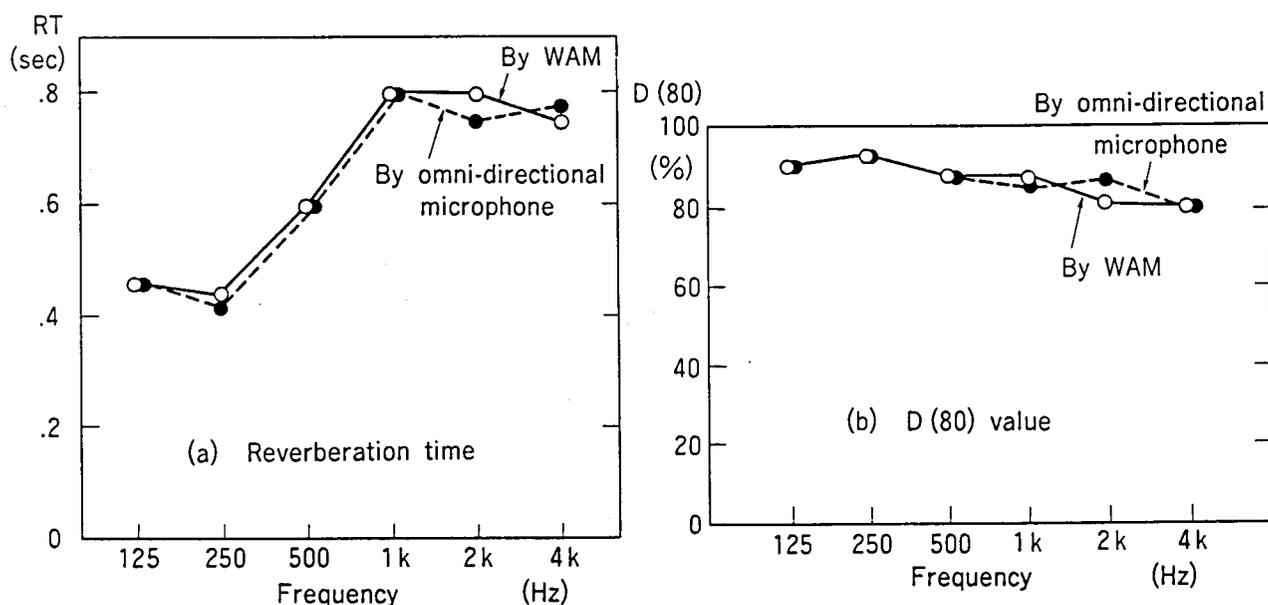


Fig.5.6 Comparison of omnidirectional physical parameters, measured with omnidirectional microphone and WAM.

6. 実音場における物理パラメータ、心理パラメータの分析

6.1 評価対象の音場

Fig.6.1に測定対象となった音場の平面図を示す。この音場は室容積6600m³、客席数660、残響時間を1.8秒（反射性）から1.2秒（吸音性）まで変化できる残響可変装置を設置したコンサートホールである。音源の全指向性スピーカは舞台中央1.5mの高さに置き、受音点は床上1.2mでFig.6.1に示す9点を選んだ。音場は二つの条件（反射性、吸音性）をまとめて比較するようにしたため、受音点番号1～9は吸音性、10～18は反射性の音場にそれぞれ対応している。

6.2 物理パラメータの多変量解析

Fig.6.2に物理パラメータの測定データに基づいた因子分析の流れを示す。ここでは第5章で述べた物理パラメータをすべて採用したが、このうち周波数特性を

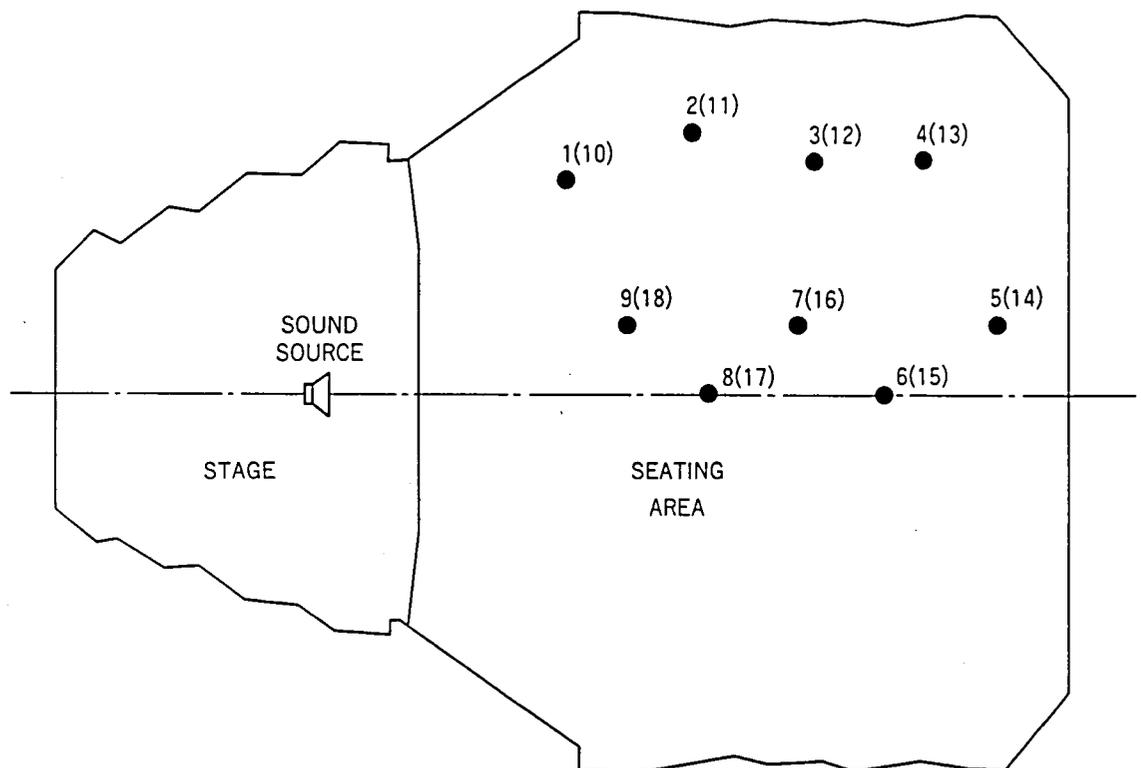


Fig.6.1 Plan of sound field, with arrangement of sound source and receiving points.

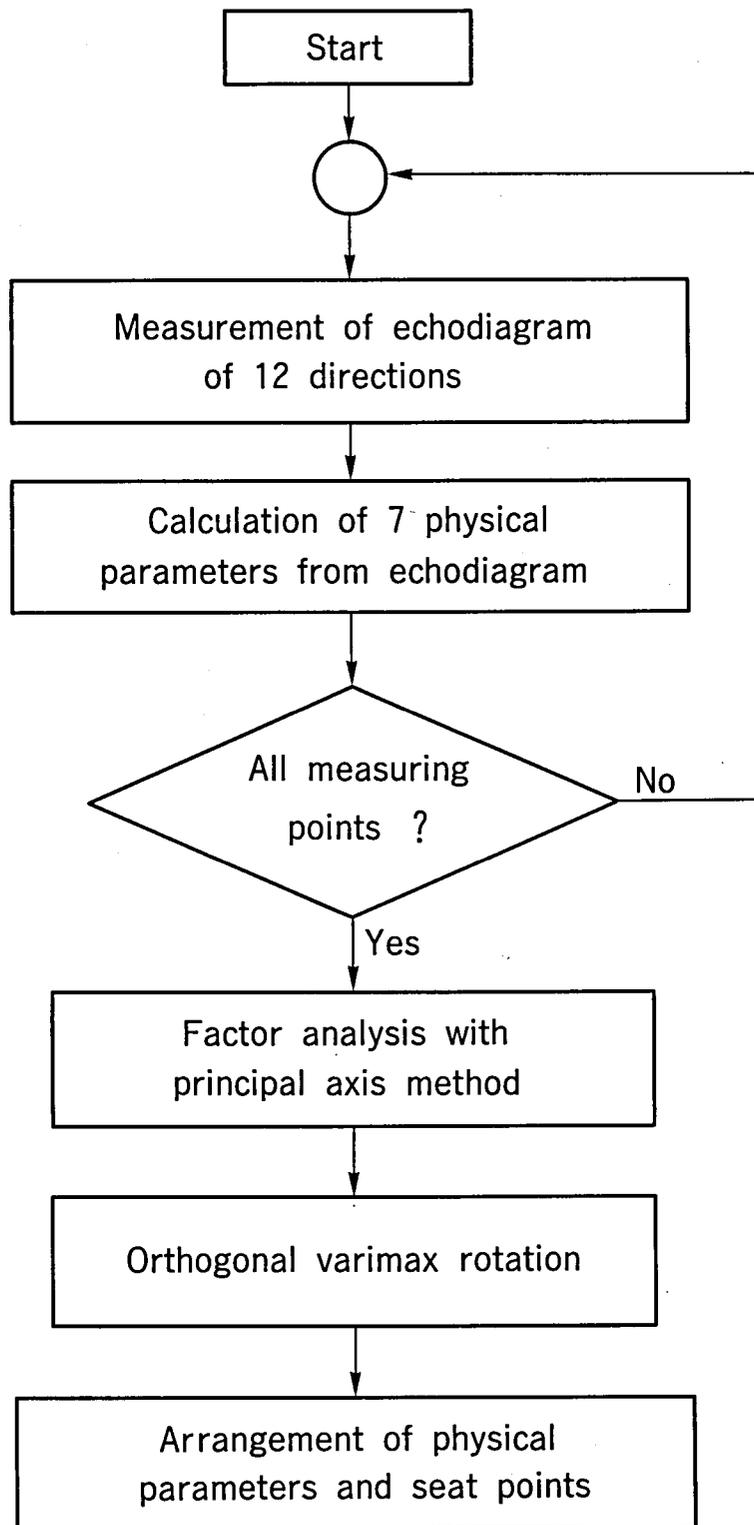
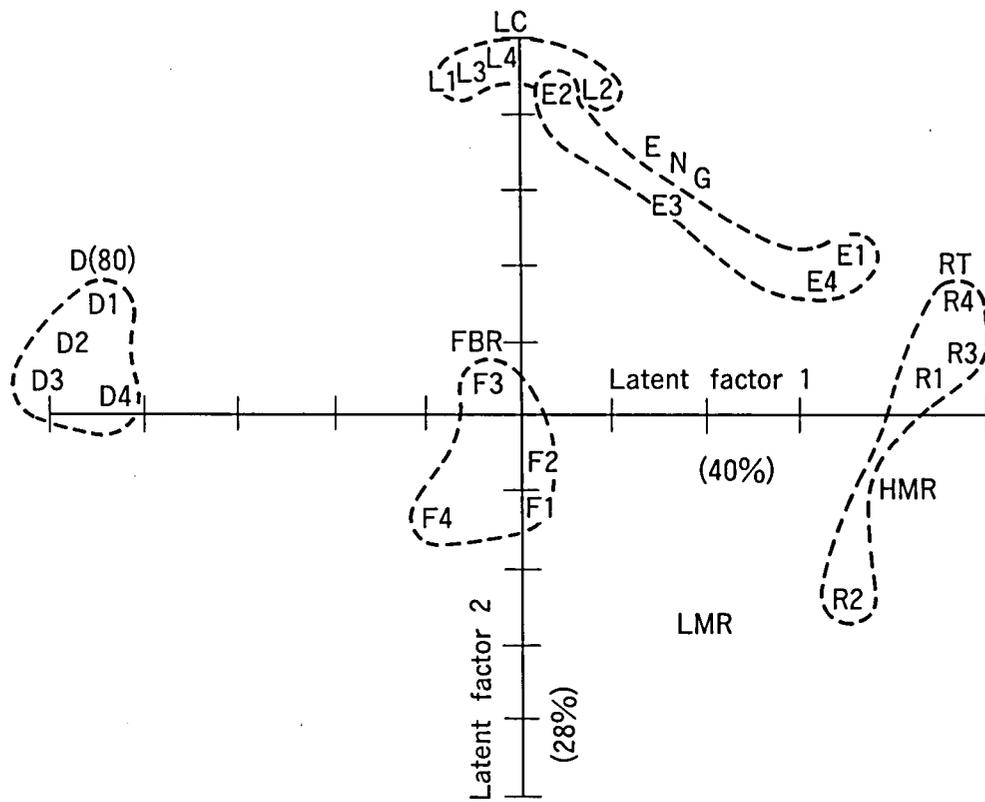
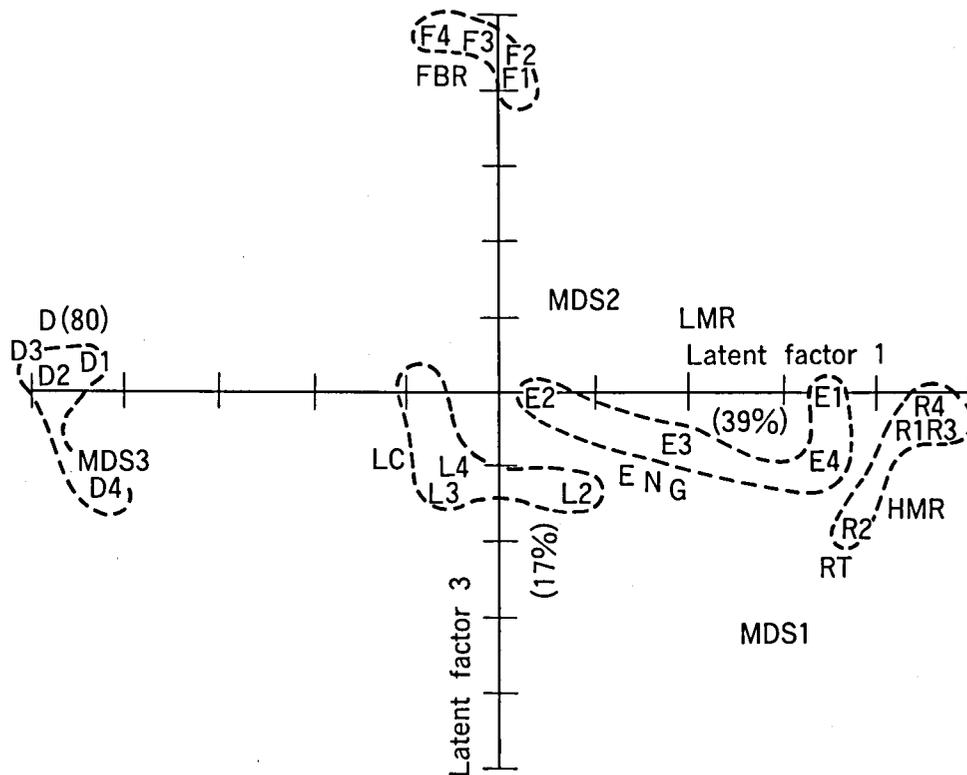


Fig.6.2 Flow diagram for evaluating sound fields, based on physical parameters.



(a) Latent factors 1 and 2



(b) Latent factors 1 and 3

Fig.6.3 Two-dimensional arrangement of physical parameters after factor analysis.

持つ5種類については250Hzから2kHzまでの4帯域とした。125Hzと4kHzを測定から除外した理由は、

(1)WAMが125Hzで3素子の合成となって、その指向特性が他の帯域に比べて劣化すること、

(2)4kHzの場合、空気吸収による減衰のため十分なSNの確保が難しいこと、の2点からである。従って、以後の因子分析に用いた変量の総数は22個（5物理パラメータ×4周波数帯域+2物理パラメータ）である。

Fig.6.2の流れに従って処理した結果、累積因子負荷量は3次元で81%となり、物理パラメータに基づく音場の違いが、3つの潜在因子によってかなりよく説明できることが分かった。潜在因子1-2、1-3に対する22個の変量の2次元布置をそれぞれFig.6.3(a)、(b)に示す。図中、潜在因子軸に沿って表示した数値はその因子の因子負荷量を表し、アルファベットの横の数字は4種類の周波数に対応している。（1:250Hz、2:500Hz、3:1kHz、4:2kHz）この図から、潜在因子1が残響時間、D(80)、HMRと高い相関があることが分かり、過去の研究者の結果ともよく一致している。[24]また、潜在因子2はLCと相関が高く、潜在因子3はFBRのみと相関が高い。ENGは潜在因子1と2の双方との相関が認められる。本章で用いた音場と異なる音場において行った物理パラメータの測定によっても、ここで述べた結果と同様の結果が得られることから、この結果がかなり普遍性の高いものと推測される。更に、潜在因子2や3に関しては、全指向性の物理パラメータに基づいた過去の音場分析では得られなかったものである。[23][24] 指向性受音に基づいた分析的な音場測定によって初めてLCやFBRと相関の高い潜在因子軸が発見された。このことは音場内にある受音点の音源に対する幾何学的な位置の違いが物理パラメータLC、FBRに反映することから説明できる。即ち、LCは音場内における受音点の左右の位置に関係した物理パラメータであり、音源が舞台中央で、受音点が客席空間の中央線近くにある場合にはLCは小さな値をとり、壁際に近づくにつれて大きな値をとる。一方、FBRは前後の位置に関係した物理パラメータであり、受音点が音源に近くなるにつれて大きな値をとり、逆に音源から離れると小さな値をとる。

6.3 心理実験

物理パラメータを測定したのと同じ音場内の受音点において、受音点間の心理的な違いを調べる実験を行った。試験信号として無響室録音の5秒間の男性スピーチを用い、物理パラメータ測定に用いた全指向性スピーカからこの信号を発した。

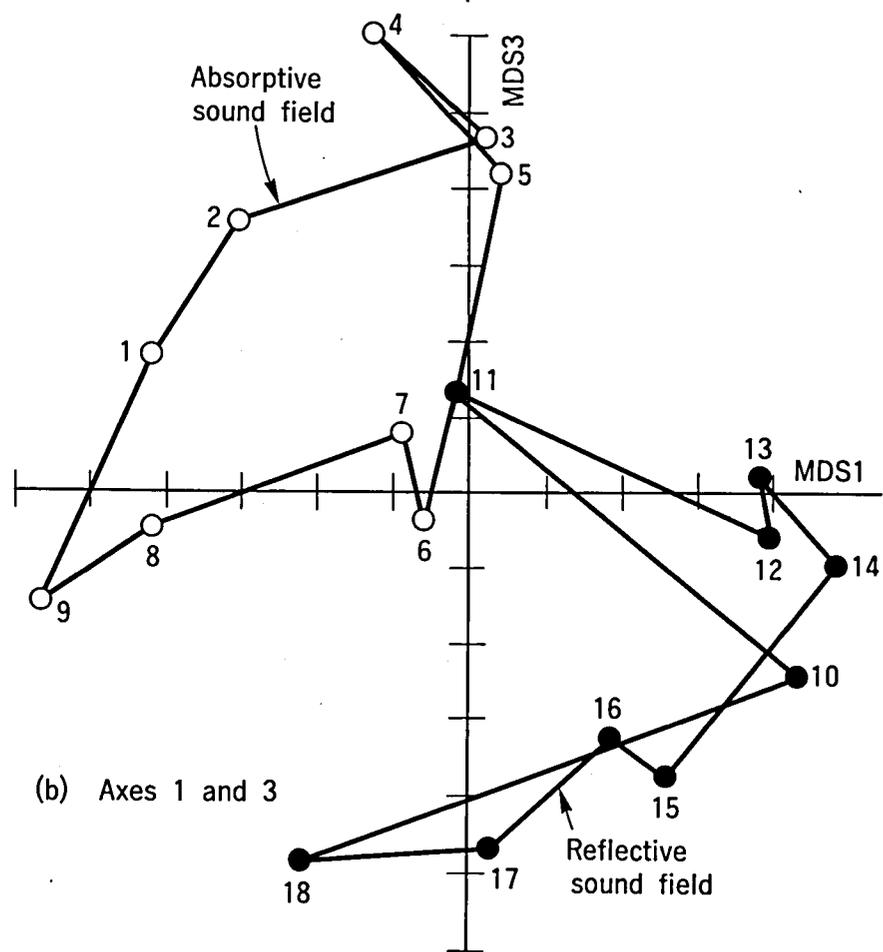
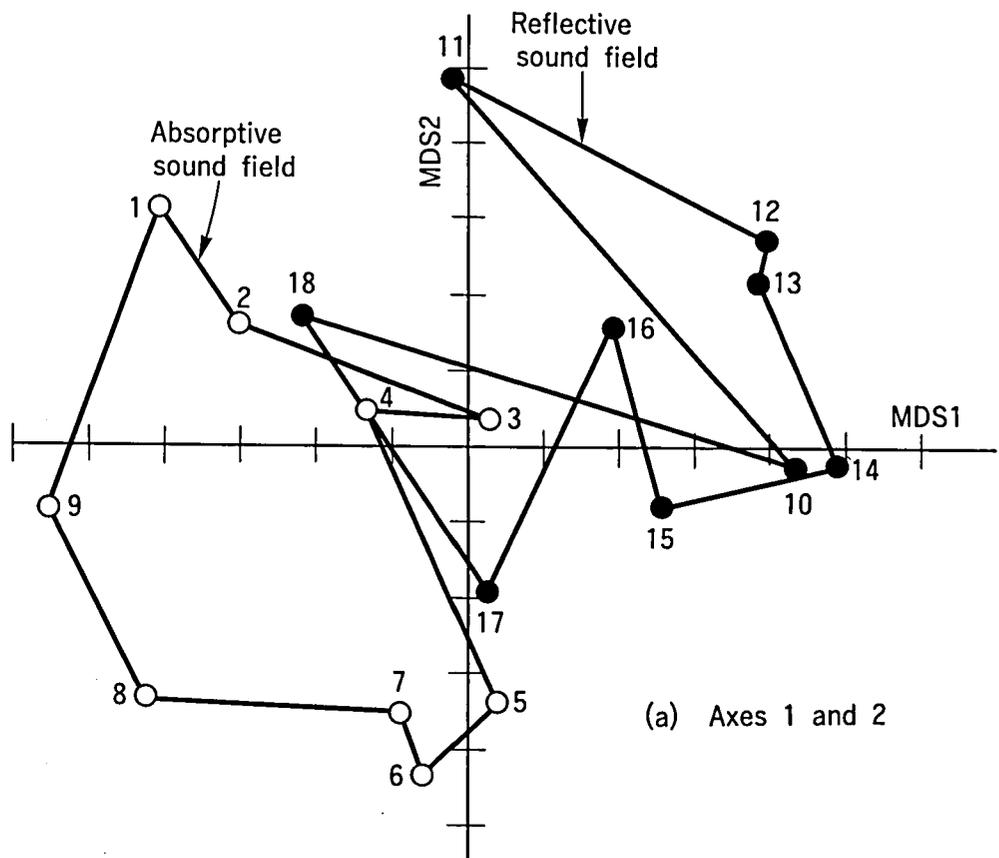


Fig.6.4 Arrangement of receiving positions after processing multi-dimensional scaling.

受音点にはダミーヘッドマイクを床上1.2mの位置において録音した。評価用の信号は、各受音点で録音された信号を一对にして153対(18×17)ランダムに並べて作成し、評定者にヘッドホン再生して評定させた。評定者は正常な聴力を有する9名である。

ヘッドホン再生では、頭内定位が避けられず、音場の広がり感や音場の前後のバランス感を評価するのが困難である。そこで心理実験では、その対象を、

- (1)受音点間の主観的な違い、
 - (2)受音点間の響きの違い、
- の2点に絞って行った。

6.3.1 受音点間の主観的な違い

受音点間の微妙な心理的な違いが何に起因するのかを調べるため、一对で提示した試験信号間の印象の違いについて評定者に、“最も異なる”(評点5)から“同じ”(評点1)までの5段階で評価させた。ここで得られた各受音点における評定者の平均値をもとに非類似行列を作り、Kruskalの多次元尺度構成法[58]を用いて解析した。その結果、2次元でストレス20%、3次元で8%となり、3次元で主観的な受音点間の違いをかなり良く説明できることが分かった。Fig.6.4(a)、(b)は多次元尺度構成法によって得られた受音点の布置にバリマックス変換、直交回転を施した結果を示す。この図から、受音点間の主観的な違いに基づいた場合、音場が大きく二つのグループに分類されることが分かる。そのうちの一つは、受音点1~9に対応する吸音性の音場であり、いま一つは受音点10~18に対応する反射性の音場である。更に詳細にFig.6.4を見ると、それぞれのグループは二つの小グループに分けることができる。即ち、壁際の受音点グループ(1~4、10~13)と音場の中心線に近い受音点グループ(5~9、14~18)である。心理量をもとにした座席の布置は、幾何学的な座席の布置を射影したものと考えることができ、この点からFig.6.4を眺めてみると、音場が吸音性の場合の方が反射性の場合に比べて幾何学的な座席の布置とより対応した形になっていることが分かる。この理由は、音場が反射性の場合、吸音性に比べてより拡散性が良く、物理パラメータ、心理パラメータの両面で座席間の差が少ないためと考えられる。またここで行った心理実験結果から、座席間の心理的な判断基準として響き、音像の定位方向が重要であることが推察される。

6.3.2 物理、心理パラメータの対応

6.3.1で得られた3つの心理軸(MDS1~MDS3)の意味づけを行うため、6.2節で求

めた22種類の物理パラメータと3つの心理軸とを混合して因子分析を行った。受音点の最終の布置は、因子分析結果をバリマックス変換、直交回転して求めた。[59] 潜在因子の増加にともなう因子負荷量、累積因子負荷量の変化をFig.6.5に示す。この結果、3つの潜在因子で80%以上の累積因子負荷量となることが分かった。心理、物理パラメータの布置をFig.6.6(a)、(b)に示す。この図から、MDS1とMDS3は残響時間(R1~R4)、定常状態エネルギー(E1~E4)、D(80)値(D1~D4)と高い相関関係にあることが分かる。またMDS2は、横方向エネルギー成分(L1~L4)、定常状態エネルギーと相関が高い。

6.3.3 響きと物理パラメータとの関係

この心理実験では、一对で提示された男性スピーチの評定用信号に対し、評定者には響きのみに着目させ、一对のうちどちらがより響いている(評点=2)、同じ(評点=1)、響いていない(評点=0)の3段階で評価させた。受音点間の差に関する心理実験同様、153対をランダムに評定者に提示し、各受音点における平均評点をもとに受音点間の距離を算出し、これを心理因子(REV)として採用した。この心理因子と高い相関が予想される物理パラメータとして残響時間(R1~R4)と定常状態エネルギー(E1~E4)をとり、REVと合わせて全体で9個の変量をもとに因子分析を行った。この結果、累積因子負荷量は第1の潜在因子のみの場合67%、第2番目までで87%となった。

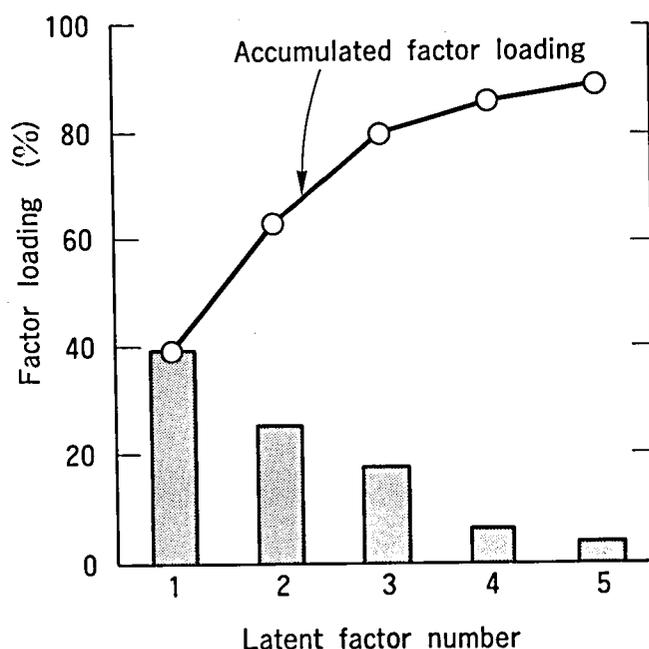


Fig.6.5 Changes in both factor loading and accumulated factor loading in relation to the number of latent factors.

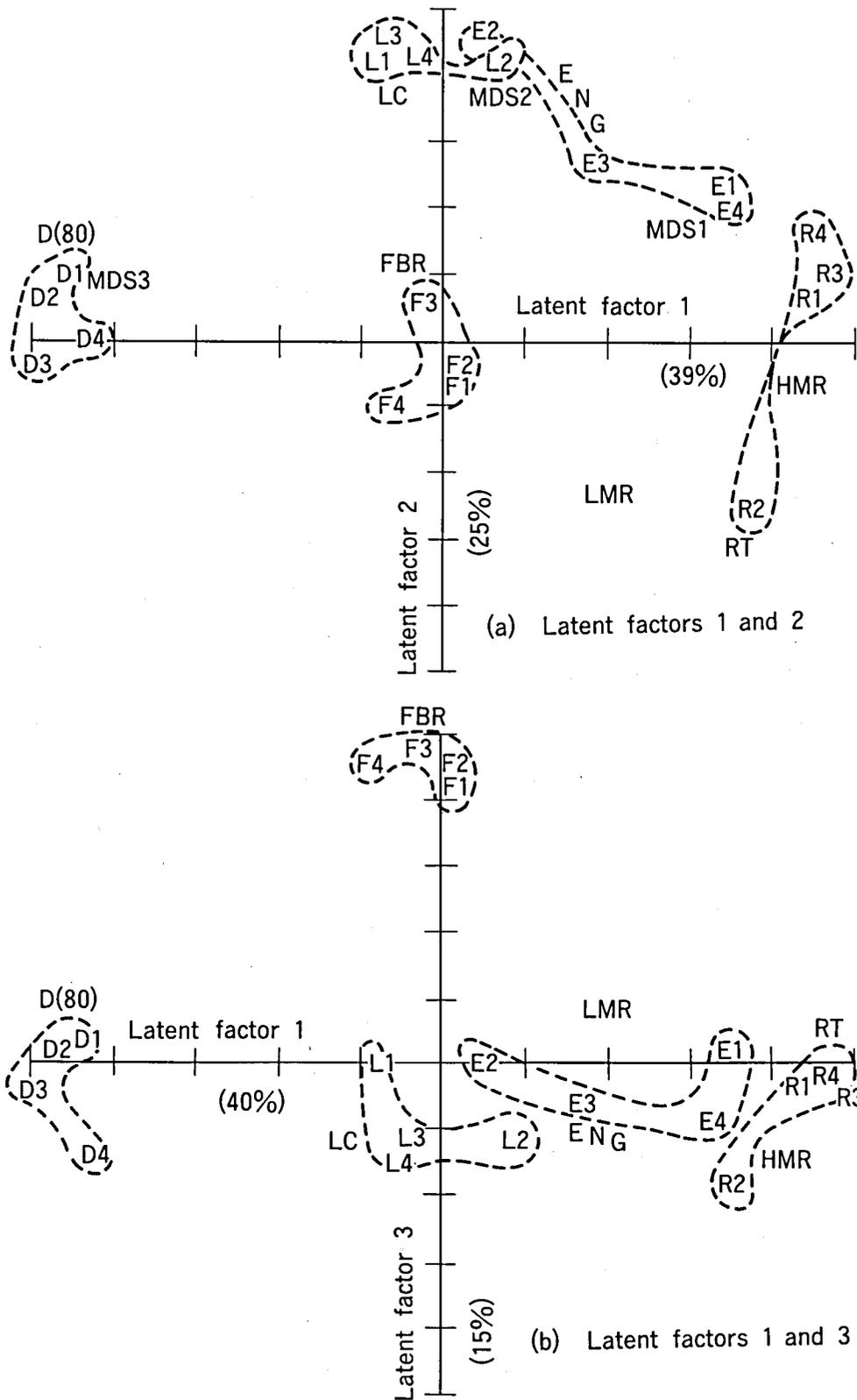


Fig.6.6 Arrangement of physical and psychological parameters after factor analysis (22 physical parameters, and psychological parameters MDS1-MDS3)

Fig.6.7に2つの潜在因子に対する因子得点をもとに算出した受音点の布置を示す。この図から、

- (1)音場が反射性吸音性の2つに大きく分類されること、
 - (2)音場が吸音性の場合の方が反射性の場合より受音点の幾何学的な位置の違いを反映していること、
- が分かった。

6.4 結言

反射音の指向性を考慮した新しい音響測定法を導入することにより、同一音場内の異なる受音点間の差や異なる音場間の差を統一的に把握できるようになった。特定の音場において測定した物理パラメータを因子分析の手法を用いて分析することにより次の結果を得た。

- (1)残響時間、D(80)値は音場をマクロに分類するのに適した物理パラメータである。
- (2)初期反射音エネルギーの横方向成分、前後比は同一の音場内における受音点間の差を説明するのに適した物理パラメータである。

無響室録音の男性スピーチを評価用音源として用いた心理実験から、次の結論を得た。

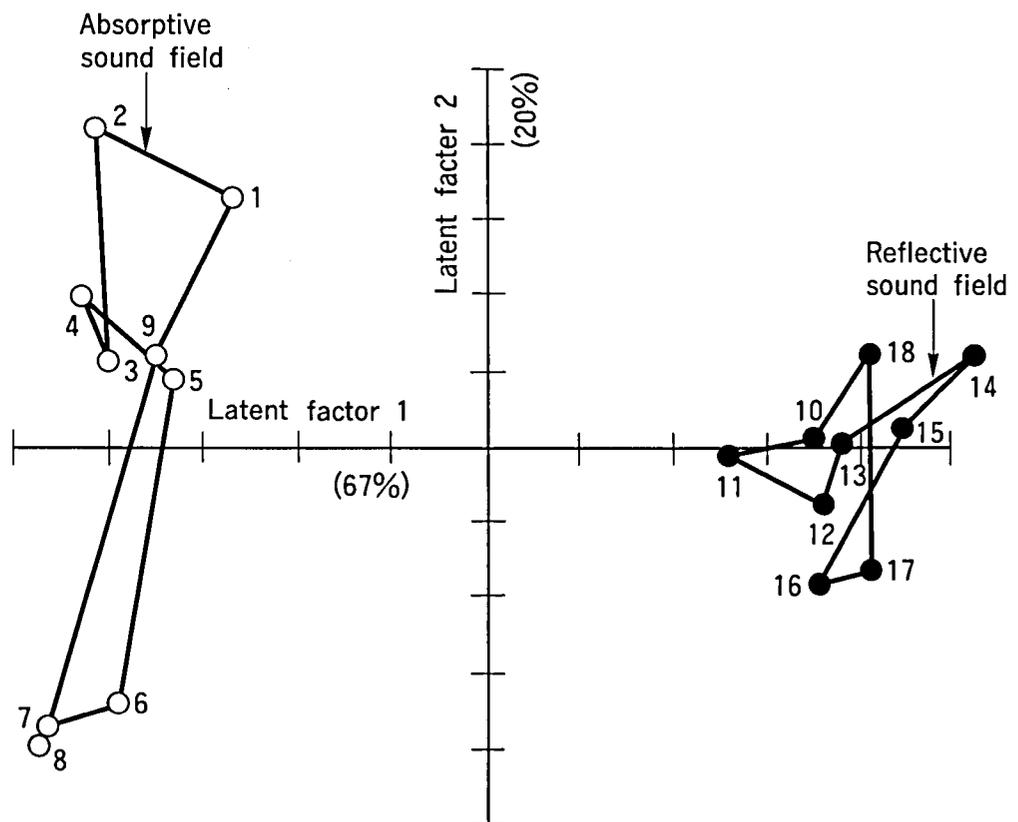


Fig.6.7 Arrangement of receiving positions calculated from scores of two latent factors.

(1)ダミーヘッド收音、ヘッドホン再生を心理実験に用いた制約はあるが、受音点間の心理的な印象の違いはほぼ3次元で説明できる。この心理的な違いを決定する要因は、響きの長さ、音像の定位方向が主なものとして考えられる。

(2)心理的には、主に響きの長さによって音場をマクロに分類する傾向にあることが分かった。

本章で得られた知見から、音響設計を従来より高い精度で行うには、先ず部屋を規定するマクロな物理パラメータである残響時間の設計によって、基本的な部屋の形状、内装条件を決め、この後で客席空間の各受音点において、方向性を持つ物理パラメータ（横方向成分、前後比）のふるまいについて検討することにより、詳細な室形を決定すれば良いことが分かる。

7. 結論

本研究では高い精度の音響測定、音響設計を実現するための新しい手法について実例を交えながら論じた。

音響設計においては計算機を導入することにより特に初期反射音の振舞いを中心とした物理パラメータを得ることができるようになった。このことは設計者に対して室形状や内装材料の種類、配置を決定する上で多くの判断材料を提供したことになる。CADシステムを音場シミュレーションに用いることにより基本的な室形状と初期反射音から抽出した物理パラメータの空間分布、平均値との関係を明らかにした。この結果、舞台側の形状を扇形にした方が長方形にした場合より初期反射音を有効に利用する点で優れていること、天井の高さは方向性を持つ物理パラメータにはあまり影響を持たない等、基本的な室形状を設計する上で重要な知見を得た。

音場のマクロな分類に欠かせない物理パラメータである残響時間について、その弁別限、好ましい残響時間と音源信号自身のもつ物理的な性質との関係について心理実験をもとに論じた。その結果、残響時間の弁別限が約6~7%であること、音源信号の物理的な性質として長時間の実効値を越える瞬時パワーレベルの時間率が有効であることを示し、これが音源信号にどのように対応するかについても明らかにした。また、心理実験の結果得られた知見が、計算機を用いたより高度な音響設計に生かされている例を示した。

音場空間を分析的に捉え、高精度で測定する新しいシステムについて述べた。高精度の音響設計との整合性を考慮し、音響測定の物理パラメータとして7種類を提案した。本システムが音場を統一的な観点から比較するのに適したシステムであることを明らかにするとともに、従来からある全指向性の物理パラメータも本システムを使うことによって得ることができることを示した。

実際の音場における音響測定に本システムを適用し、本測定システムが音場を精度良く分類、評価するのに有効であることを確認した。また音場で測定した物理パラメータをもとに因子分析した結果、音場が残響時間によってマクロに分類されること、同一音場内の場合、初期反射音エネルギーの横方向成分、前後比によって客席空間が分類されることを示した。

謝辞

本論文をまとめるに当たって、懇切なご指導と便宜を賜った京都大学川端昭教授に心から感謝の意を表する。

本研究は、NHK放送技術研究所番組関係技術研究班、音響研究部、および音響聴覚研究部において昭和54年から昭和62年の間に実施したものである。

研究の当初から終始ご指導いただいた牧田康雄先生、山本照二主任研究員、古川宣一主任研究員に深甚なる謝意を表する。

また本研究の機会を与えてくださり、有益な御助言をいただいた氏原淳一研究開発室長、若栗尚音響聴覚研究部部長、大串健吾音響聴覚研究部前副部長、宮坂栄一音響聴覚研究部副部長に謝意を表する。

本研究の遂行に当たり、終始熱心な御討論をいただいた音響聴覚研究部研究員黒住幸一、三上淳一、井上友幸の三氏に深く感謝する。

参考文献

- (1) 西隆司、"ホールの評価法"、音響技術 No57,9-14(1987)
- (2) 西隆司、"NHK技術研究所のコンピュータによる室内音響設計方法"、音響技術 No.45,29-32(1984)
- (3) Nishi,T. and Ogawa,Y., "COMPUTER-AIDED DESIGN FOR ARCHITECTURAL ACOUSTICS", NHK LABORATORIES NOTE No316(1985)
- (4) 西隆司、若栗尚、"室内音響設計のためのCADシステム"、NHK技研月報Vo130 No3(1987)
- (5) Nishi,T.and Ogawa,Y., "COMPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM FOR ARCHITECTURAL ACOUSTICS", 11th ICA, 125-128(1983)
- (6) 山口富士夫、コンピュータディスプレイによる図形処理工学、(日刊工業新聞社、東京、1981)
- (7) Barron,M., "The Subjective Effects of First Reflections in Concert Halls - The Need for Lateral Reflections," J.Sound Vib. 15(4),475-494 (1971)
- (8) Ando,Y., Concert Hall Acoustics,(Springer Verlag,Berlin,1985)
- (9) 森本政之、北谷仁、前川純一、"反射音構造と音の拡がり感について"、聴覚研資料 AA-87-35(1987)
- (10) 井上友幸、西隆司、古川宣一、清水寧、川上福司、"初期反射音の横方向成分と音像の拡がり感との関係"、建音研資料 AA-87-41(1987)
- (11) 西隆司、"ホールの室形と初期反射音の関係の虚像法による検討"、音響学会誌44(4)、300-309 (1988)
- (12) Baxa,D.E.and Seireg,A., "The use of quantitative criteria for the optimum design of concert halls," J.Acoust.Soc.Am. 67(6),2045-2054(1980)
- (13) Borish,J., "Extension of the image model to arbitrary polyhedra," J.Acoust.Soc.Am. 75(6),1827-1836(1984)
- (14) Thiele,R., "Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen," ACUSTICA 3,291-302(1953)
- (15) Meyer,E,Kuttruff,H.,Roy,N., "Raumakustische Untersuchungen an einen

- Modell der Stadthalle in Göttingen,"ACUSTICA19,132-142(1967/68)
- (16) Richardson,E.G.and Meyer,E.,Technical Aspects of Sound Vol.3
(Elsevier,Amsterdam,1962)
- (17) Furduev,V.V.and Tung Cheng,"Measurement of Diffuseness of the
Acoustic Field in Rooms by the Directional Microphone Method,"Soviet
Physics Vol.6,103-111(1960)
- (18) Barron,M. and Marshall,A.H., "Spatial impression due to early
lateral reflections in concert halls;the derivation of a physical
measure,"J.Sound Vib.77,211-232(1981)
- (19) Blauert,J.,Spatial Hearing(MIT Press,1983)
- (20) Kuttruff,H.and Vorlander,M., "Die Abhängigkeit Seitschallgrades von
der Form und der Flächengestaltung eines Raumes,"ACUSTICA 58,118-129
(1985)
- (21) Fasbender,J., "Über Messungen der Seitenschallanteils in
Verschiedenen Sälen und in Raummodellen,"Applied Acoustics 16,11-30
(1983)
- (22) Marshall,A.H., "A note on the importance of room cross-section in
concert halls,"J.Sound Vib.5,100-112(1967)
- (23) Yamaguchi,K., "Multivariate analysis of subjective and physical
measures of hall acoustics,"J.Acoust.Soc.Am.52,1271-127(1972)
- (24) Gottlob,D., "Vergleich objektiver akustischer Parameter mit
Ergebnissen Subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen,"Dissertation ,
Universität Göttingen(1973)
- (25) 黒木総一郎、松尾竹郎、稲村清、"対数減衰の比弁別限界について" ,NHK技術
研究報告書(1954)
- (26) Seraphim,H.P., "Über die Wahrnehmbarkeit mehrerer Rückwürfe von
Sprachschall," ACUSTICA 11,80-91(1961)
- (27) Kuhl,W., "Über Versuche zur Ermittlung der günstigen Nachhallzeit
größer Musikstudios,"ACUSTICA 4,618-634(1954)
- (28) Beranek,L.,Music Acoustics and Architecture(John Wiley & Sons,Inc..

New York,1962)

- (29) 安藤四一、大寺一弘、浜名祐志、“オーディトリウムにおける最も好ましい残響時間の普遍性に関する実験”、音響学会誌39,89-95(1983)
- (30) Sabine,W.C.,Collected Papers On Acoustics (Dover Publications,New York,1964)
- (31) Bekesy,G.V.,Sensory inhibition(Princeton U.Press,Princeton,1967)
- (32) 西隆司、“音源の種類に依存した好ましい残響時間の検討”、音響学会誌43,459-466(1987)
- (33) 日野幹雄、スペクトル解析 (朝倉書店、東京、1979)
- (34) Nishi,T.,"Extraction of fundamental physical parameters in the sound field by multi-dimensional analysis," Proc.of ICASSP86,18A6.1 (1986)
- (35) 西隆司、“マイクロホンアレイの利用”、騒音制御学会誌8,16-22(1984)
- (36) 西隆司、“広帯域アレイマイクロホンを用いた室内音場の物理評価”、音響学会誌44,719-725(1988)
- (37) Hawkes,R.J.,Douglas,H.,"Subjective Acoustic Experience in Concert Auditoria," ACUSTICA24(5),235-250(1971)
- (38) Lehman,P.,Wilkins,H.,"Zusammenhang Subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit Raumakustischen Kriterien,"ACUSTICA15,256-268(1980)
- (39) Niese,H.,"Die Messung der Nutzschall und Echogradverteilung zur Beurteilung der Hörsamkeit in Räumen,"ACUSTICA11,201-213(1961)
- (40) 関口克明、“室内音響設計指標”、建音研資料AA81-37(1981)
- (41) 柳沢武三郎、城戸健一、二村忠元、“室内における音質の主観的評価に関する実験”、音響学会誌19(5)、193-200(1963)
- (42) Edwards,R.M.,"A Subjective Assessment of Concert Hall Acoustics," ACUSTICA30(4),183-195(1974)
- (43) 山本照二、鈴木文吉、“室内の響きに関する心理尺度と諸物理量の相関”、音響学会誌32(10),599-605(1976)
- (44) Meyer,E.,Burgdorf,W.,"Über Zeitabhängigkeit der Schallrichtungs Verteilung in Räumen bei Impulsartiger Anregung,"ACUSTICA7,313-324(1957)

- (45) Bradley, J.S., "Experience with new auditorium acoustic measurements," *J. Acoust. Soc. Am.* 73(6), 2051-2058(1983)
- (46) Schultz, T.J., "Acoustics of the Concert Hall," *IEEE Spectrum*, 56-67 (1965)
- (47) Reichardt, W., Lehman, U., "Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen durch Auswertung von Impulsschalltests," *ACUSTICA* 48, 174-185(1981)
- (48) Reichardt, W., Schmidt, W., "Die Wahrnehmbarkeit der Veränderung von Schallfeldparametern bei der Darbietung von Musik," *ACUSTICA* 18, 274-282 (1967)
- (49) Schroeder, M.R., Gottlob, D., Siebrasse, K.F., "Comparative study of European concert halls; correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters," *J. Acoust. Soc. Am.* 56(4), 1195-1201(1974)
- (50) Damaske, P., Ando, Y., "Interaural Crosscorrelation for Multichannel Loudspeaker Reproduction," *ACUSTICA* 27, 232-238(1972)
- (51) Broadhurst, A.D., "An Acoustic Telescope for Architectural Acoustic Measurements," *ACUSTICA* 46, 299-310(1980)
- (52) Broadhurst, A.D., "Sparse volume Array for Architectural Acoustic Measurements." *ACUSTICA* 50, 34-38(1982)
- (53) 遠藤健二、堀越孝之、山崎芳男、伊藤毅、"デジタル信号処理を用いた音場の空間情報の把握と評価"、音講論集、567-568(1985)
- (54) 橋秀樹、"室内音響特性測定用12面体スピーカ音源について"、音響技術14(3), 64-65(1985)
- (55) 西隆司、"マイクロホンアレイによる音響測定"、建音研資料AA84-04(1984)
- (56) Schroeder, M.R., "New method of measuring reverberation time," *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 409-412(1965)
- (57) Jordan, V.L., "A Group of Objective Acoustical Criteria for Concert Halls," *Applied Acoustics* 14, 253-266(1981)
- (58) Kruskal, J.B., "Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis," *Psychometrika* 29, 1-27(1964)

(59) 芝祐順、相関分析法（東京大学出版、東京、1970）