

# 電算機による音場シミュレーションの建築音響設計への適用

中 川 清  
(技術研究所)

## § 1. はじめに

近年、音楽ホール、多目的ホール等の音響設計に際しては、座席ごとの音の響き、明瞭性、拡がり感等の音の質を定量的に把握できる高度な音場予測技術が必要とされる。一方では、ホールの室形がより複雑化する傾向にあり、室形変更による音場の変化を迅速に把握する技術の必要性が高まりつつある。

室内音場を定量的に予測する技術としては、これまで三次元縮尺模型実験法が主に使われてきたが、近年は電算機シミュレーションが豊富なグラフィック機能を背景に、迅速かつ経済的な予測技術として利用され始めている。現在用いられている電算機による音場解析手法は、音線法(Ray tracing method)と虚像法(Image source method)の2種がある。これらの2法は、幾何音響理論により音の波動性が考慮されておらず適用できる周波数の制約があり、また予測範囲は初期反射部分に限定される。しかしながら、音響設計業務の初期、つまり基本室形の決定から最終的な音の質を表わす音響物理量の予測まで広く利用でき、設計作業へ適用する効果は大きいと考えられる。

今回、音線法と虚像法を基にして、実用性を高めた音場予測システムを開発した。本稿では、音場予測システムの概要と、実際の音響設計へ適用した事例について述べる。また、実測値との比較例から、本シミュレーション技術による音響性状の予測精度を検討した結果について述べる。

## § 2. 音場予測システム

### 2.1 室内音響物理量の計算方法

電算機によって室内の音場を幾何音響学的に解析する研究は、M.C. Gomperts<sup>1)</sup>の音線法による残響室音場の検討に始まり、M. R. Schroeder<sup>2)3)</sup>の室内反射音の減衰

性状の検討、A. Krokstad 等<sup>4)</sup>の三次元空間への拡張等を経て発展<sup>5)</sup>してきている。現在の幾何音響による基本計算アルゴリズムは、音線法と虚像法の2種であり、表一1に両者の特徴比較を示す。

本システムではこれら2法を用いており、以下の仮定条件に従う。

- (1)室形を構成する壁面は平面とする。
- (2)壁面では、音は正反射(入射角=反射角)するとみなす。
- (3)壁面反射時のエネルギーは入射角によらず一定であり、1回反射するごとに壁面の反射率(1- $\alpha$ )を乗じることで計算される( $\alpha$ : 吸音率)。
- (4)反射音相互の干渉は無く、受音位置でエネルギー加算ができる。

音線法は、図一1のように音響エネルギーを分担させた音線を、等しい立体角で室内空間に放射する。これら

	音 線 法	虚 像 法
音線の意味	音源の微小立体角当たりの分担エネルギーの伝播軌跡	音源から受音点に至る音波の伝播経路
検討に必要な音線の数	受音面積と観測時間から決定され、反射回数には依存しない	反射回数によって指数的に増加する
反射音のエネルギー密度	一定	時間の二乗に逆比例
距離減衰量	受音領域に入射する音線の数に逆比例	距離の二乗に逆比例
受音域の設定	面積をもつ領域	幾何学的に決まる点
計算時間( $t_c$ )	$t_c \propto M \cdot N \cdot T$	$t_c \propto M^2$
適用分野	・音の伝播性状の巨視的な把握 ・客席のゾーンごとの音響比較	・初期反射音構造の解析(エコー障害・音響物理量による評価)

注) M: 壁面数, N: 放射音線数, T: 観測時間, k: 反射次数

表一1 音線法と虚像法の比較

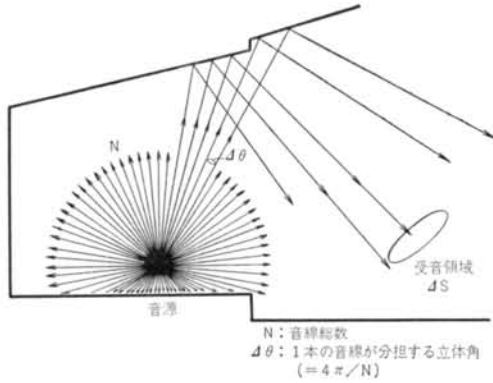


図-1 音線法概念図

の放射された音線を、時間経過とともに追跡 (trace) し、反射情報を得ていく手法である。この手法では、受音エネルギーが音線の密度に比例するため、面積を有する受音領域を設定する必要があり、受音エネルギーは式(1)から計算される。演算時間 ( $t_e$ ) は、壁面数 ( $M$ ) と放射音線の数 ( $N$ ) および観測時間 ( $T$ ) の積 ( $t_e = M \cdot N \cdot T$ ) に比例するため、後述の虚像法に比して有利で高次反射音の予測が可能である。ただし、図-1のように各音線の受け持つ立体角は一定であり、受音領域の面積を固定した場合には、距離に比例して音線相互間の距離が離れていく。この結果、到達時刻の遅い高次反射音は入射せず、計算誤差を生じることになる。受音領域に1本以上の音線を入射させることを条件とすると、音線数 ( $N$ ) は観測時間 ( $T$ ) と面積 ( $\Delta S$ ) から式(2)のように設定することができる。ここで、計算誤差を含めた最適な放射音線の数、受音面積に関しては今後の課題の一つといえる。

$$E_s = \frac{N_{in} W}{NC} \cdot \prod_{k=0}^n (1 - \alpha_k) \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{ここに、} N \geq \frac{4\pi CT}{\Delta S} \quad \dots\dots(2)$$

$$E_i = \frac{W}{4\pi L_k^2 C} \cdot \prod_{k=0}^n (1 - \alpha_k) \quad \dots\dots(3)$$

ただし、 $W$ : 音響パワーレベル(watt)

- $E_s$ : 音線法による受音エネルギー(watt)
- $E_i$ : 虚像法による受音エネルギー(watt)
- $L_k$ : 音源から受音点に至る距離(m)
- $\alpha_k$ :  $k$ 壁面の吸音率 (現状では斜め入射吸音率データが整備されていないため、近似的に残響室法吸音率データを用いている)
- $N$ : 放射音線の総数
- $N_{in}$ : 受音領域へ入射した音線の数
- $\Delta S$ : 受音面積(m<sup>2</sup>)
- $T$ : 観測時間(sec)

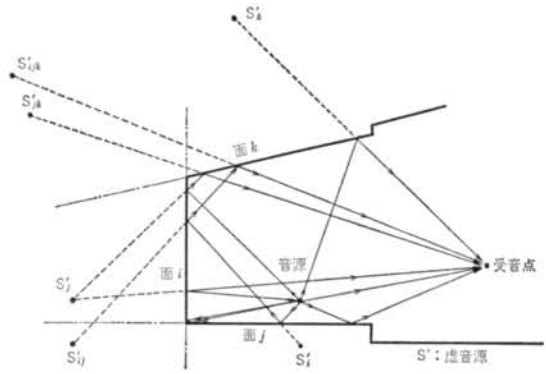


図-2 虚像法概念図

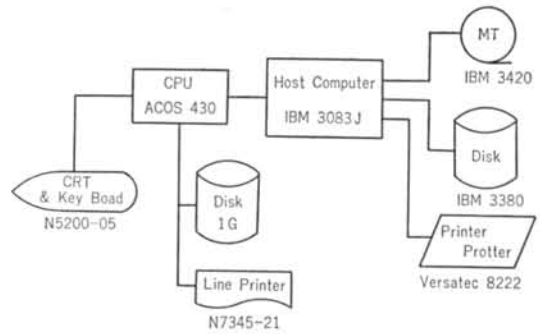


図-3 ハードウェアシステム構成

$C$ : 音速(m/sec)

一方、虚像法は図-2のようにすべての虚像から受音点に達する反射経路を求めて、距離減衰を考慮して受音エネルギーを計算する手法である。この手法では、反射点座標が正確に計算されるため、反射音の予測精度が高く、位相を考慮した計算が容易である。受音エネルギーは式(3)で計算され、距離減衰量は距離の二乗に逆比例する。演算時間は虚像の数に比例し、虚像の数は壁面数を  $M$ 、 $k$ 回反射までの検討では、おおよそ  $M^k$  で与えられる。つまり、壁面数100、4回反射までの検討では虚像の数は約100万に達することになり、演算時間は著しく増加する。実際の200~500面程度のホール等を想定すると、3~4回反射までの検討が実用上の限界といえる。

なお、本システムでは虚像法の演算時間を短縮する方法として、音線法であらかじめ反射経路を計算して、改めて虚像法から受音エネルギーを計算する手法<sup>7)</sup>を併用している。

音線法と虚像法の適用に関しては、主に次の使い分けをしている。すなわち、音線法は空間における音の伝播性状の把握、客席部のゾーンごとの音場比較に、また虚像法は特定位置での音響障害のチェック、音響物理量による音質の評価に用いている。

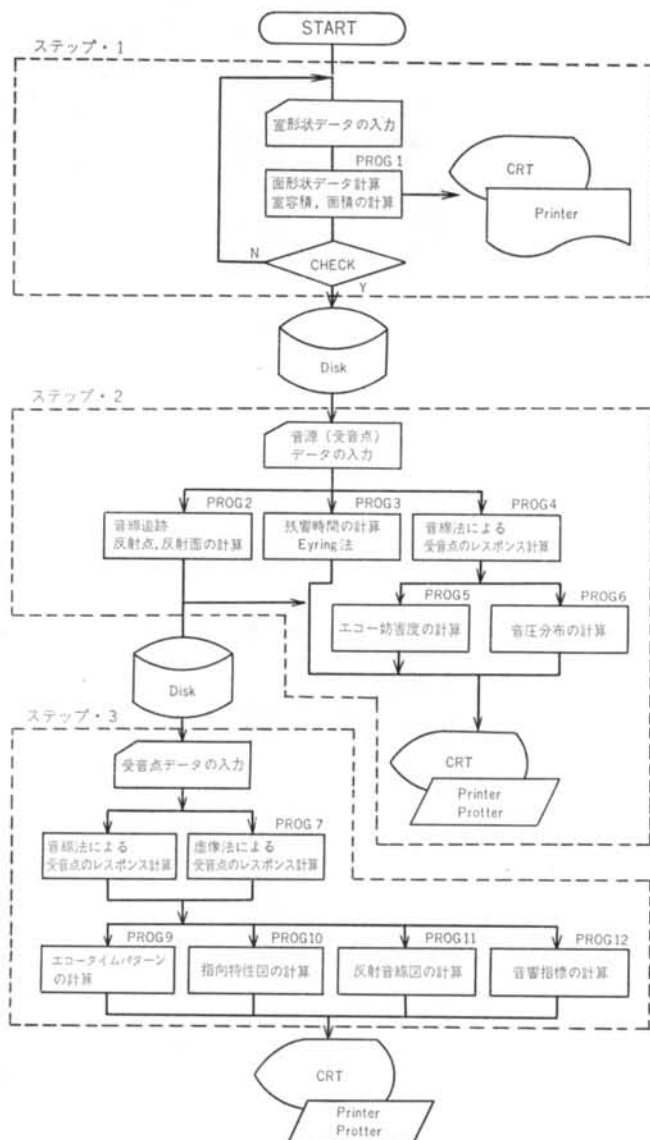


図-4 フローチャート

## 2.2 システム構成

音場解析のシステム構成を図-3に示す。演算・処理の手順は、図-4に示すように入力データの作成・チェック、基本音響解析および詳細音響解析と結果表示(図形処理)の3ブロックで構成し、さらに音響設計の各作業ステップごとに必要な情報が得られるように、解析プログラムを細分化してある。

### (1)ステップ1

音場解析に用いる室形データならびに音響仕様データの作成、チェックを行なう。音場解析は、音響空間を多

角形平面で囲まれた三次元(または二次元)室形で近似するため、多くの壁面ならびに音響仕様のデータを入力することになる。本システムでは、データ入力の時間短縮とエラー検出の機能を充実させて、データ作成の簡便化を図っている。

データは、キーボードから平面を構成する頂点座標、吸音率コード等を入力する。電算機内部では入力データの誤りをチェックし、平面からの座標ズレに対しては頂点座標を同一平面へ移動・修正を行なう。この結果は、室形のグラフィック表示とともにプリントアウトされる

が、視覚的に判断の難しい面の入力漏れ、表裏の逆等についても判断を容易にしている。

図-5 は面の法線による表裏判定の例であり、図-6 は同じ室形に対して切断処理と隠れ線消去を行なって壁面の抜けを検討した例である。また、図-7 はデータの自動生成機能を利用した例であり、円形室形に対して床面を軸対象の片側 1/2、壁と天井は回転中心の 1/24 の入力データから計算によって全体の室形データを得ている。

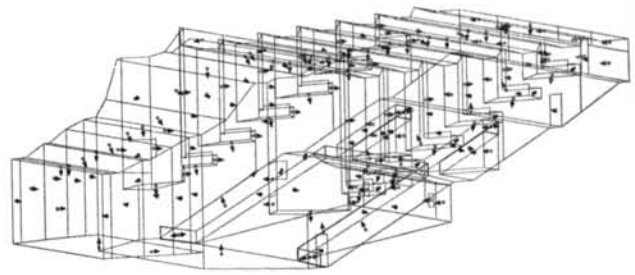


図-5 面の方線ベクトル表示例

(2)ステップ 2

音線追跡から基本的な室形の検討を行ない、エコーに代表される音響障害のチェックを行なう。また、音圧分布、さらに残響時間の概算を行なう。

エコー障害、音圧分布の検討には、各座席位置での反射音の時刻系列のパルス応答を式(1)または式(3)から計算する。図-8 は計算されたパルス応答の例である。図-9 は同時刻に到来する反射音に対して聴感との対応をみるために、積分時間  $\tau=5\text{msec}$  として式(4)から求めた移行平均波形の例を示す。

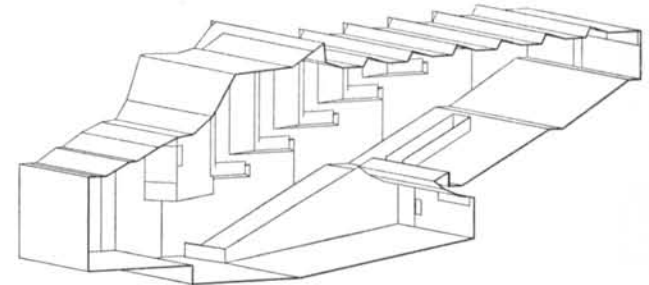


図-6 切断と隠れ線処理例

$$E_m(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t-\frac{\tau}{2}}^{t+\frac{\tau}{2}} \{D_0^2(t) \cdot P^2(t)\} dt} \quad \dots(4)$$

ただし、

$E_m(t)$ : 移行平均エネルギー

$P^2(t)$ : 反射音エネルギー

$\tau$ : 積分時間

$$D_0(t) : \begin{cases} = 0.5 \left( 1 + \cos \frac{\pi t}{\tau} \right); & |t| \leq \tau \\ = 0 & ; |t| > \tau \end{cases}$$

残響時間は、音の響きの長さに関係する音響指標であり、拡散音場理論から導かれている。ホール等の実音場についてもほぼ拡散音場とみなし得ることから、本システムでは式(5)の Knudsen<sup>9)</sup> の空気吸収を考慮した残響公式を用いて計算している。ここでの電算機の利点は、複雑な室形状に対しても精度良く短時間に室容積、壁面積等を計算できることにある。



図-7 回転による室形データ生成例

$S$ : 室内表面積( $\text{m}^2$ )

$\bar{\alpha}$ : 平均吸音率

$m$ : 空気吸収率( $1/\text{m}$ )

$$RT = \frac{0.161V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \quad \dots(5)$$

ただし、 $RT$ : 残響時間(sec)

$V$ : 室容積( $\text{m}^3$ )

(3)ステップ 3

ステップ 2 で計算された反射経路情報を基に、各座席ごとのパルス応答を計算してエコータイムパターン、指向特性図、反射音線図、さらに主観評価に関する音響物理指標<sup>9)10)</sup>を計算する。本システムでは、音の響きや明瞭性に関する指標として Abel 等による  $C$  値 (Clarity)

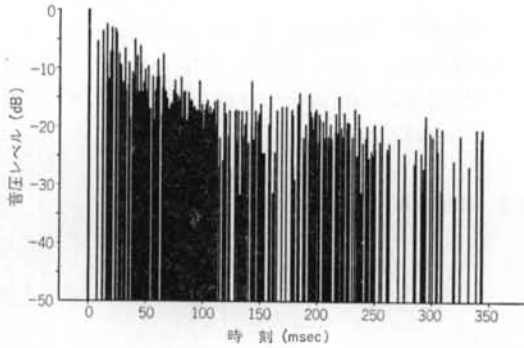


図-8 反射音レスポンス計算例

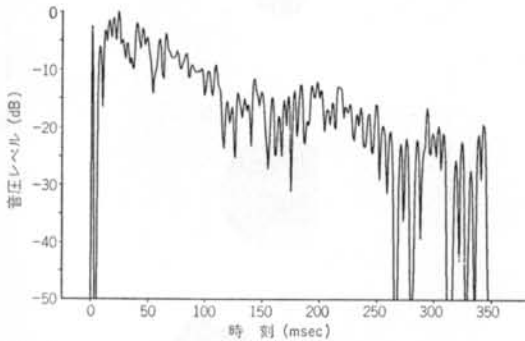


図-9 ハニングウインドウ処理例( $\tau=5\text{msec}$ )

と Thiele による  $D$  値 (Deutlichkeit), また音の拡がり感に関する指標として Reichard 等による  $RR$  (Room response), Jordan 等による  $LE$  (Lateral efficiency) を計算する.

$$C = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{50\text{msec}} P^2(t) dt}{\int_{80\text{msec}}^{\infty} P^2(t) dt} \quad \dots(6)$$

$$D = \frac{\int_0^{50\text{msec}} P^2(t) dt}{\int_0^{\infty} P^2(t) dt} \quad \dots(7)$$

$$LE = \frac{\int_0^{50\text{msec}} P_L^2(t) dt}{\int_0^{80\text{msec}} P^2(t) dt} \quad \dots(8)$$

$$RR = 10 \cdot \log \frac{\int_{25\text{msec}}^{50\text{msec}} P_L^2(t) dt + \int_{80\text{msec}}^{160\text{msec}} P^2(t) dt}{\int_0^{80\text{msec}} P^2(t) dt} \quad \dots(9)$$

ただし,  $P^2(t)$ : 全方向エネルギー  
 $P_L^2(t)$ : 横方向エネルギー

ここで,  $C$  値と  $D$  値は 3 次反射音までを幾何反射シミュレーションで計算し, 4 次反射以降は拡散音とみなして残響理論から求める式(10)からの近似計算を試みた.

$$P^2(t) = P_s^2(t) + P_{rev}^2(t) \quad \dots(10)$$

$$P_s^2(t) \begin{cases} = E_n(t) ; & 0 \leq t < t_{s4} \\ = 0 ; & t \geq t_{s4} \end{cases}$$

$$P_{rev}^2(t) \begin{cases} = E_{CRS} \cdot \exp(-13.8(t-t_{s4})/RT) ; & t \geq t_{s4} \\ = 0 ; & t < t_{s4} \end{cases}$$

ただし,  $P^2(t)$ : 反射音エネルギー

$P_s^2(t)$ : 初期反射エネルギー

$P_{rev}^2(t)$ : 残響エネルギー

$RT$ : 残響時間

$E_n(t)$ : 式(1)または式(3)の幾何音響シミュレーションから計算されるエネルギー

$T_{s4}$ : 式(1)または式(2)の幾何音響シミュレーションから計算される 4 次反射音の時間重心(sec)

$E_{CRS}$ : 拡散音場において, 音のエネルギー密度 ( $E$ ) が下式の不連続な反射音の合成と仮定した, 4 次反射音の時間重心位置でのエネルギー. ここでは, 4 次反射音のエネルギー ( $= \frac{4W}{cS} \cdot (1-\bar{\alpha})^4$ ) が平均自由行程に相当する時間 ( $= \frac{4V}{Sc}$ ) に指数減衰分布するとして, 時間重心位置でのエネルギーを計算した.

$$E = \frac{4W}{cS} \left( \sum_{k=0}^n (1-\bar{\alpha})^k \right)$$

ただし,  $W$ : 音響エネルギー(watt)

$S$ : 室内表面積( $\text{m}^2$ )

$\bar{\alpha}$ : 室内平均吸収率

### § 3. 電算機シミュレーションの適用事例

電算機シミュレーションの利用は, 空間での音の伝播性状を巨視的に把握する目的と, 特定座席位置での反射音の時間, 方向, レベル情報から音響性状を把握する目的に大別される. ここでは, 表-2 に示す多目的小ホール, 講堂および円形催事場の 3 ケースについて, 電算機シミュレーションを適用した事例を述べる.

	Y 多目的小ホール	S 講堂	T 催事場
1) 容積 $V(\text{m}^3)$	3001.9	4932.3	10973.9
2) 表面積 $S(\text{m}^2)$	1549.2	2386.6	3030.0
3) $V/S(\text{m})$	1.938	2.067	3.622
4) 平均自由行程 $4V/S$	7.751	8.267	14.487
5) シミュレーション面数	172	185	146
6) シミュレーション条件	・反射板有り ・床完全吸音	・反射板有り ・床完全吸音	・床反射

表-2 シミュレーション適用例

### 3.1 放射波の追跡

空間における放射波の挙動から、音響集中、エコー等の音響障害をある程度予測することが可能であり、2.1で述べたように音線法は最適な手法といえる。

図-10は、二次元断面モデルから反射面の形状と角度を検討した例である。図はステージ上の音源から1回または2回反射してから客席に至る反射音を表わす。図(a)からはステージ反射板からの反射音が前方客席部へ集中する現象、図(d)からは後壁からの反射音がステージへ直接戻ってくる現象が把握できる。これらは、従来の図面検討からもある程度予測は可能であるが、電算機の利用は室形状変更への対応性、時間短縮の面で有利である。

図-11は、放射波面を時刻系列による挙動から音響集中等の現象把握を行なった例である。ステージから放射された球面波が、時刻とともに全空間へ広がっていく様子が把握でき、この例では音響集中、フラッターエコー等も無く、伝播性は良好であることが示されている。

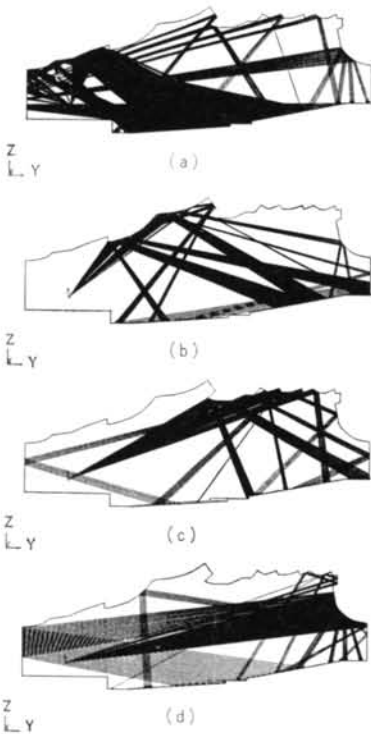


図-10 二次元断面モデルによる反射面の検討例

このように、音響波面による検討は空間での音の挙動を視覚的に訴えるため、建築設計者、施主等へ基本室形に起因する音響伝播性状や、予測される音響障害の説明に有効な手段となり得る。

### 3.2 音圧分布

一般に、ホール内の音圧分布は均一であることが望ま

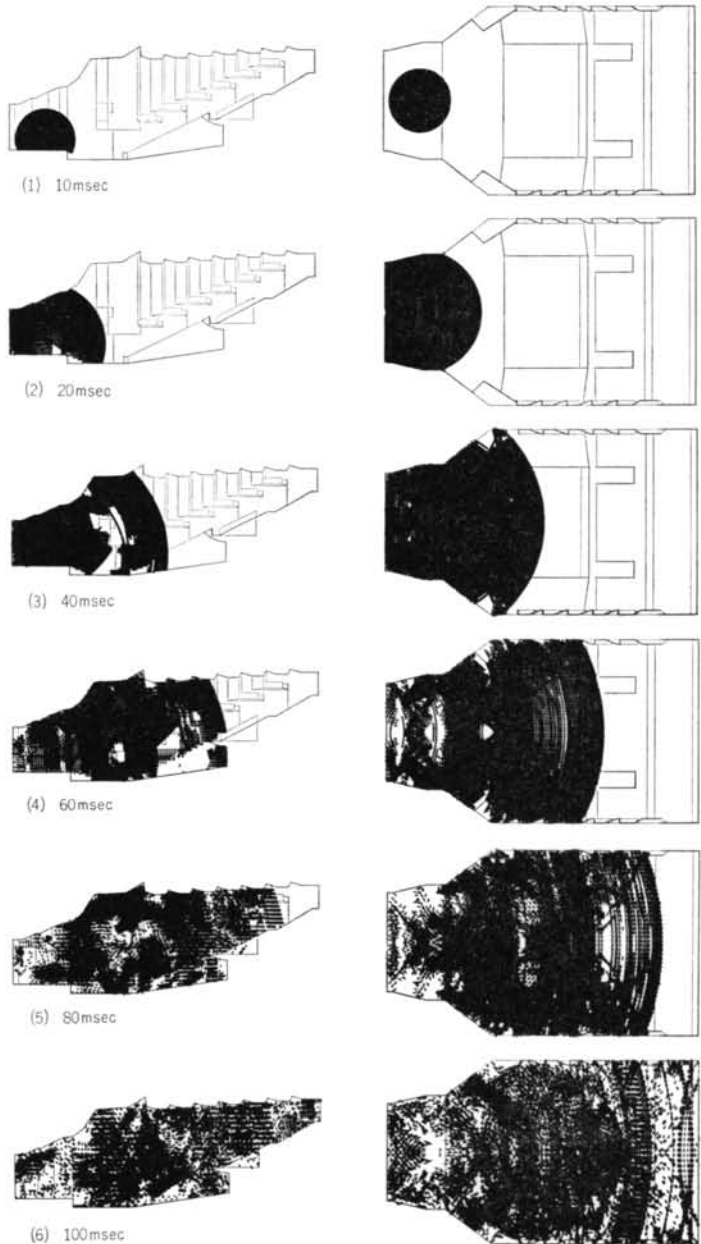


図-11 三次元モデルによる放射波面追跡

しとされる。この音圧分布の均一化に対しては、およその基本室形が決定された後に、座席ごとの音圧レベルの偏差が小さくなるように壁面形状、音響内装によって調整する。図-12は、講堂の三次元室形モデルから中央座席列の音圧分布を計算した例であり、音源から1 m位置の音圧レベルを 0 dB とした相対レベルで表示している。この例では、客席間では  $\pm 5$  dB 以内の範囲に分布すると予測される。

### 3.3 エコー妨害

図-13は、音響的には問題があるとされる円形室形に対して、シミュレーションの予測精度を検討した例である。室中央の音源に対して、近傍に設定した受信位置の 1 kHz 短音のパルス応答を計算した。エコータイムパターンは時定数 5 msec として式(4)から求めた。実測値を下図に示すが、計算値と実測値はともに室の直径(32m)にほぼ相当する 90 msec ごとに反射音のピークが現われており、良い対応を示している。これらの結果に R. H. Bolt 等<sup>11)</sup> によるエコー妨害度曲線 (Echo disturbance

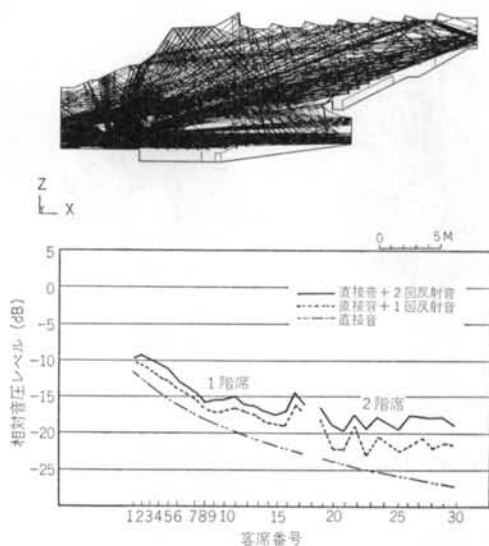


図-12 音圧分布計算例

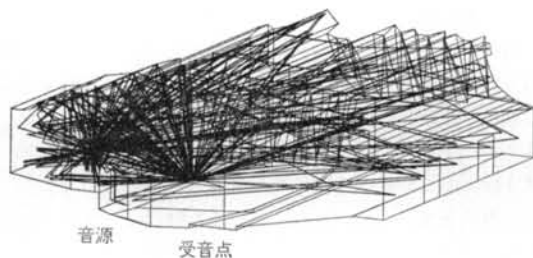


図-14 Yホールの反射音線図

curve) を当てはめると、両者とも妨害度約 70% で評価され、本シミュレーションによる検討が有効であると判断される。

### 3.4 音線図、エコータイムパターン、指向特性図

これらは、特定位置でのパルス応答から反射音の到来時刻、方向、レベルの各情報を視覚的に表示した図であり、音響物理量を算出する基礎データとなる。

図-14は、Yホールにおける前方客席と後方客席での三次元音線図である。この例では、前方席ではプロセニウム天井が反射面として大きく寄与しており、後方席では中央部天井と後方壁が反射面として寄与することが確

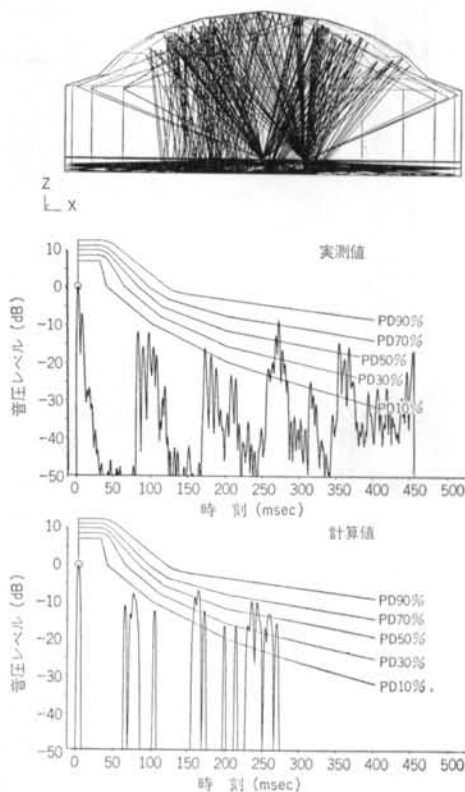
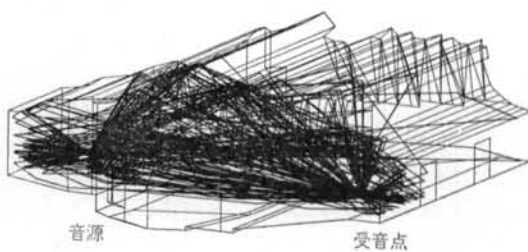


図-13 T催事場のエコー障害検討例





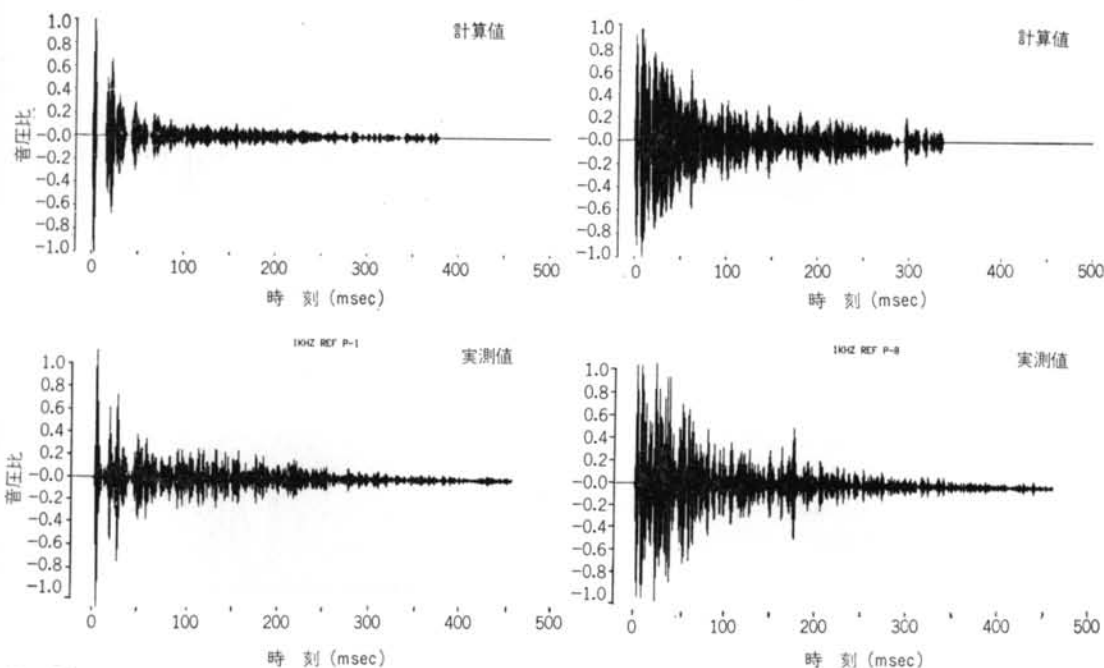


図-15 Yホールのエコータイムパターン

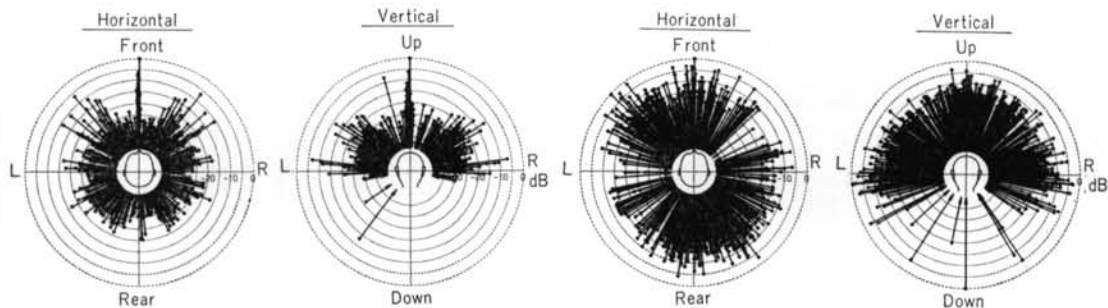


図-16 Yホールの指向特性図

認される。

同じ室内条件でのエコータイムパターンから、シミュレーションの予測精度を検討してみる。図-15の上図には、シミュレーションのパルス応答に対してサイン波5波にハニングウィンドウをかけた波形をたたみ込んで計算した1kHzのエコータイムパターンを示す。また、下図には実測値を示す。この例からは、初期200msec以内のエネルギーの大きな反射音はほぼ正確にシミュレートできていると判断される。

図-16は同じ室内条件での指向特性図であり、側方反射音のエネルギーの比率から拡がり感の傾向を把握できる。左図は水平面上、右図は垂直面上に投影してあり、直接音を0dBとした相対レベルで表示してある。この例では、前方席では側方反射音のレベルが低いのに比して後方席では側方反射音のレベルが高く、かつ入射音線

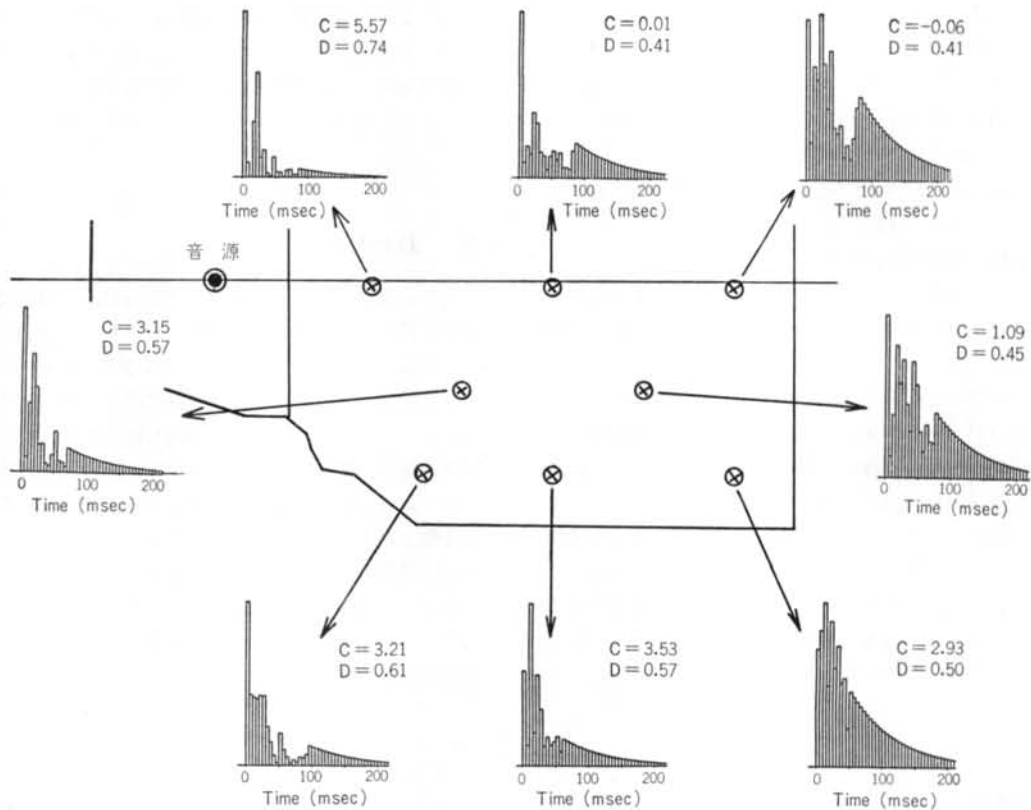
数が多いという場所による特徴が示されている。

### 3.5 C値, D値

YホールのC値とD値の分布を図-17に示す。これらは、パルス応答から積分時定数を2msecとして、式(4)で移行平均したデータから計算している。また、図中には5msec単位のエネルギー分布を併記してある。

図-18には計算値と実測値との比較を示す。D値に関しては計算値と実測値は良く対応しており、計算値から明瞭性の比較が可能であると判断される。しかし、C値は全般に予測値が低く現われる傾向にある。これは、初期反射音間に到来する回折音が考慮されていないことが主な原因と考えられ、さらに計算法を検討する必要がある。



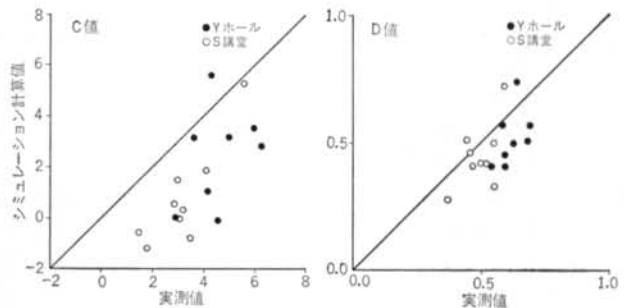


図一七 YホールのC値, D値の分布

### 3.6 LE, RR

図一十九にYホールのLE, RRの計算例を示す。この例では、LEは0.13~0.31で一般的な矩形室ホールの値を示している。また、RRに関しては-5.5~-3.5dBの拡がり感の少ないホールとして評価される。

LE, RRは初期側方反射音から計算されるため、現有シミュレーションの予測精度は比較的良好と考えられる。しかしながら、今後は実測値との対応から、さらに予測精度を検討していく必要があろう。

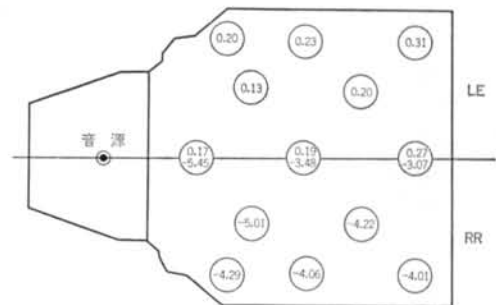


図一八 C値, D値の予測精度比較

## § 4. まとめ

以上、幾何音響理論を基にした電算機による音場解析システムの概要と、実際の室内音響設計への適用事例について述べてきた。今回の適用事例から明らかになった事項を以下に述べる。

- 空間における音の伝播性状を巨視的に把握する手法



図一十九 YホールのLE, RRの計算値

としては音線法が優れており、グラフィック表示による可視化の効果は大きい。

• エコータイムパターンの計算値と実測値の比較からは、初期のエネルギーの大なる反射音がほぼ正確にシミュレートされている。この結果、現有のシミュレーション手法はエコー障害の検討、また *LE*, *RR* 等の音響物理量による音質の比較に有効である。

• *D*値に関しては、初期反射成分を幾何音響シミュレーションで計算して、残響成分を統計的に求めて接続することで、近似予測が可能である。しかし、*C*値は初期反射音間に到達する回折音エネルギーが考慮されないため、予測精度は低下する。

現状のシミュレーションの課題としては、電算機の計算時間の限界等から高次反射音の予測が難しく、さらに初期反射音部分に関しても回折音が考慮されていないために計算誤差を生じることが挙げられる。これらの課題に対しては、木村等<sup>12)</sup>による音の反射点から二次球面波を仮定して回折音を計算する手法の開発、H. Kuttruff<sup>13)</sup>等による壁面拡散係数 (Wall diffusion) の導入、同じ Kuttruff<sup>14)</sup>等による吸音指向性パターンから計算した斜

め入射吸音率の近似値の導入等が試みられている。将来的には、電算機シミュレーションはこれらの研究を含めた波動性あるいは統計的手法を導入することにより、さらに高度の音場解析技術へと発展していくものと考えられる。

## § 5. おわりに

現有の電算機による音場解析システムは、適用周波数の制約、演算時間の限界等の課題は残されているものの、室形ならびに音響仕様に関する入力データから得られる音響情報は多く、室内音響設計に際して有効な手法といえよう。さらに、従来からの縮尺模型実験法に比して時間、経費、場所等多くの利点があり、今後電算機シミュレーション技術の進歩とともに室内音響設計に利用される機会が増していくと考えられる。

一方、近年の音響研究から主観評価と物理量の関係が明らかにされつつあり、今後はこうした主観研究の成果を導入しつつ、総合的かつ高度な音場予測・評価システムを開発していきたいと考える。

## 〈参考文献〉

- 1) M.C. Gomperts: "Do the Classical Reverberation Formulae Still Have a Right for Existence?" *Acustica*, Vol. 19 (1965/66)
- 2) M.R. Schroeder, R.S. Atal & C. Bird: "Computers in Room Acoustics" *Proc. 4th ICA*, M21 (1962)
- 3) M.R. Schroeder: "Digital Simulation of Sound Transmission in Reverberant Space" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 47 (1970)
- 4) A. Krokstad, S. Strøm & S. Sørsdal: "Calculating the Acoustical Room Response by the Use of Ray Tracing Technique" *J. Sound. & Vib.*, Vol. 8 (1968)
- 5) 山本照二, 永田穂: "計算機によるホール室形の検討とその適用結果" 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集 (1971年11月)
- 6) B.G. Watters: "Instrumentation for Acoustic Modeling" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 47, No. 2 (1970)
- 7) 木村, 関口, 杉山, 高久: "オーディトリウム室形の電算機シミュレーション手法による研究" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1979年9月)
- 8) "建築音響ハンドブック" 技報堂 (1968年)
- 9) V.L. Jordan: "Acoustical Design of Concert Halls and Theaters" *Applied Science* (1982)
- 10) 関口克明: "室内音響特性の評価" 日本音響学会誌 第38巻, 11号 (1982年)
- 11) R.H. Bolt & P.E. Dork: "A Tentative Criterion for the Short-term Transient Response of Auditoriums" *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 22, No. 4 (1950)
- 12) 関口, 木村: "音線積分法による閉空間音場のシミュレーションシステムの検討" 日本建築学会大会学術講演梗概集 (1984年10月)
- 13) H. Kuttruff: "On the Dependence of Reverberation Time on the "Wall Diffusion" and Room Shape" *Acustica*, Vol. 45 (1980)
- 14) H. Kuttruff: "Room Acoustics (2nd ed.)" *Applied Science* (1979)
- 15) 高宮, 田中, 川上, 山口: "建築音響設計への電算処理技術の利用" 電子通信学会技術研究報告, EA82-11 (1982年)