

## 室内音場合成システムの開発とシミュレーション精度検証実験

宮 島 徹  
(技術研究所)  
中 川 清  
(技術研究所)  
田 原 靖彦  
(技術研究所)

### § 1. はじめに

音場合成技術はコンサートホール等を建築する際に、設計段階で完成時の音響効果を予測し、実際の音で提示するシミュレーション技術であり、社会的なニーズが近年高まっている。また、デジタル信号処理技術の発達など技術的な環境整備を受けて、建設会社、電機メーカー、大学等の研究機関では室内音場合成システムの開発が行なわれている。現在各研究機関で稼働している室内音場合成システムの多くは、幾何音響理論による予測データを10~30程度の分割された立体角ゾーンに分配し、各方向毎にハードウェアによって畳み込み演算を行なって反射音を生成し、無響室内の多数のスピーカで再生する方式(以下、幾何音響—マルチチャンネル方式)<sup>1)~3)</sup>である。

一方、シミュレーションシステム開発の上で最も重要なことは、シミュレートの基本となる音場(実音場)とシステムで合成された音場(合成音場)がどの程度一致しているか、すなわちシミュレーションの精度を検証し、その適用範囲を知ることであるが、筆者の知る限りでは是永ら<sup>4)</sup>の明瞭度による検証や、飯田ら<sup>5)</sup>による音響心理的な実験などが散見される程度である。

本稿では、まず筆者らが幾何音響—マルチチャンネル方式で構築した室内音場合成システム(以下、本システム)の特徴と構成について述べ、次に心理量および物理量の両面から行なったシミュレーション精度検証実験について述べる。また、その結果よりシステムの適用範囲や課題について考察する。

### § 2. 室内音場合成技術の構成要素と現状の課題

室内音場合成技術は、音場予測演算(インパルス応答予測)、反射音合成、音場再生の3つの要素技術からな

る。

音場予測演算は、音を本来の姿である波動として扱う波動音響理論によるものと、音をエネルギーの流れとして捉える幾何音響理論によるものに大別できる。現状では、コンピュータの演算時間や記憶容量などの制限から幾何音響理論によるものが主に用いられている。

反射音合成は、音場予測演算で得られたインパルス応答の畳み込み演算を式(1)に従って行なう。手段としては多素子の遅延装置を用いる方法と、ソフトウェアによって行なう方法に大別できる。

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) \cdot h(n-m) \quad (-\infty < n < \infty) \dots (1)$$

ここで、 $h$ は系のインパルスレスポンス、 $x$ は系の入力、 $y$ は系の出力である。

音場再生は、合成された反射音を音として再生するプロセスで、無響空間内の多数のスピーカによって音空間そのものを再現しようとするマルチチャンネル方式と、イヤースピーカまたは無響空間内の2本のスピーカによって、人間の両耳入り口における音響情報を再現しようとするバイノーラル方式に分けられる。

前述したように現在、各研究機関で稼働しているシステムの多くは、幾何音響理論—マルチチャンネル方式を採用している。この方式では、実用的な演算時間で複雑な形状の空間の音場予測が可能であり、また方向性を含めた音場が再現でき、頭部形状などの個人差を考慮する必要がない等の利点をもつ。しかし一方では、課題として、(1)幾何音響理論によるデータの予測精度、(2)残響音再生条件の決定方法、(3)空間分割方法、(4)直接音の再生方法等が残されている。

### § 3. 本室内音場合成システムの特徴

今回、§2.で述べた課題のうち、(1)、(2)についての改善案を具現化したシステムを開発した。

本システムは音場予測演算に、幾何音響理論に波動的要素を加味した幾何散乱法を用いている。反射音合成には多素子の遅延装置を、また再生方式は多数の再生システム・スピーカを用いるマルチチャンネル方式で構成している。図-1に、本システムにおける音場のモデル化を示す。直接音 $D$ 、初期反射音 $I$ 、残響音 $R$ の3要素に、散乱音 $S$ を加えた4要素で構成される。次に、本システムの特徴を述べる。

### 3.1 幾何散乱法の導入

幾何音響理論による音場予測演算では、波長に比べて小寸法の壁面からの反射音が過大に計算されることや、回折・散乱成分が算定されない等の課題がある。今回、壁面の寸法と音の入射角を考慮して、幾何反射音と壁面で散乱反射する散乱音を分離して計算する手法（以下、幾何散乱法<sup>6)</sup>を採用した。図-2に、幾何散乱法のエネルギー伝搬モデルを示す。この幾何散乱法によって予測された散乱音を音場合成の一要素として組み入れることで、より実音場に近い音場の合成が期待される。

### 3.2 残響音再生条件の決定方法

図-1に示すように、初期反射音と残響音を別の音場要素として取り扱う場合、何らかの根拠をもってこの両者を接続する必要が生じる。従来は、両者の接続点を聴感上決定する場合が多かったが、本システムでは次に述べる有効最大反射次数の概念を用いて決定している。

拡散音場仮定によれば、直接音のエネルギー密度 $E_d$ 、第 $n$ 次より高次の反射音の定常態総エネルギー密度 $\Sigma E_{n+1}$ 、マクロに捉えた第 $i$ 次反射音（仮想中心）の直

接音を基準とした到来時刻 $t(i)$ は、それぞれ式(1)、式(2)、式(3)で表わされる。ただし、 $Q$ : 指向係数、 $W$ : 音源出力 (watt)、 $d$ : 音源受音点間距離 (m)、 $\bar{\alpha}$ : 平均吸音率、 $S$ : 室内総表面積 (m<sup>2</sup>)、 $c$ : 音速 (m/s)、 $P$ : 平均自由行程 (m) を表わす。

$$E_d = \frac{Q \cdot W}{(4 \cdot \pi \cdot d^2)} \quad \dots\dots(2)$$

$$\sum E_{n+1} = \frac{4 \cdot W \cdot (1 - \bar{\alpha})^{n+1}}{(S \cdot c \cdot \bar{\alpha})} \quad \dots\dots(3)$$

$$t(i) = \frac{(i \cdot P - d)}{c} \quad \dots\dots(4)$$

これらの関係式は、第 $n$ 次反射音で離散的なシミュレーションを打ち切り、第 $n+1$ 次反射音以降を残響音として取り扱う場合の、残響音の発生時刻と発生レベルの決定に対して理論的なよりどころを与えている。

一方、ハードウェアの有効利用を考慮した場合、初期反射音の打ち切りは、反射次数より、直接音からの遅れ時間で行なう方が効率的であるといえるが、その場合には残響音の発生条件を決定する根拠を失う。

ここで、音場合成の初期反射音のシミュレートデータを決定する際に、ある到来時刻以前の反射音を採用し、それ以降の反射音を切り捨てたとする。この打ち切りが、仮想的に第何次反射音までシミュレートデータとして採用していることになるかを求めるために、反射次数の概念を小数点以下に拡張し、ここで求まる反射次数を最大有効反射次数 $n_e$ と定義する。この $n_e$ を求める方法として、現在本システムでは次の方法によっている。すなわち、各反射次数毎に、予測演算で得られた反射音数と、音場合成のシミュレートデータとして採用された反射音数の比率を反射次数 $n$ の関数としてプロットすると、十分な反射音データが計算されていると図-3のようなカーブが得られる。このカーブにおいて、斜線の面積( $S_1$ と $S_2$ )を等しくするという条件から $n_e$ を求めている。この方法で $n_e$ を決定した後、式(2)~式(4)を用いて残響音の発生時刻と発生レベルを決定している。 $n_e$ の理論的根拠に関してはさらに検討を要するが、マクロに

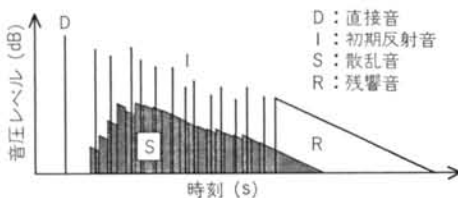


図-1 本室内音場合成システムの時系列音場モデル

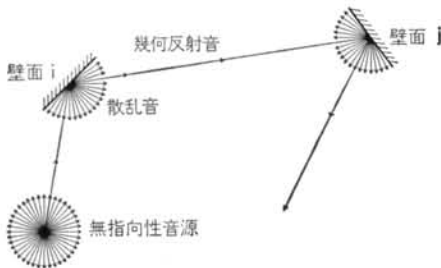


図-2 散乱波の伝搬モデル

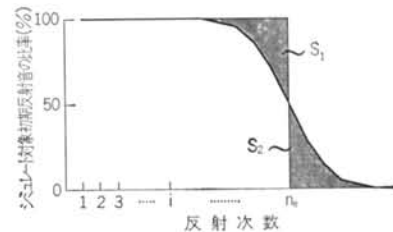


図-3 本システムにおける最大有効反射次数決定方法

捉えた反射音群の姿態は  $n_e$  で打ち切られたものとはほぼ等価であることが期待される。

## § 4. 本システムの構成

### 4.1 ソフトウェアのデータ処理

本システムでシミュレートする音場要素は、直接音、初期反射音、散乱音、残響音である。幾何散乱法による予測演算の結果を受け、次の処理が行なわれる。

#### (1)初期反射音

初期反射音のデータは反射次数  $n$  (次)、直接音からの遅延時間  $t$  (ms)、直接音を基準とした音圧相対値  $p$ 、および到来方向  $\theta$  (方位角)、 $\phi$  (仰角) をパラメータとする反射音列  $f(n, t, p, \theta, \phi)$  である。図-4の空間分割条件に従い、到来方向  $\theta, \phi$  により15の方向  $l$  に振り分けられる。その後、各方向毎に時間的に早期に到来するものから順次シミュレート対象とし、最大304本までのシミュレート対象初期反射音を決定する。さらに、決定されたシミュレート対象初期反射音に対して、有効最大反射次数  $n_e$  の計算を行なう。次に、シミュレートの対象となった全初期反射音列  $f'(n, t, p, l)$  を到来時刻の順に  $f_1'(n, t, p, l), f_2'(n, t, p, l)$  とし、それぞれの系列について式(5)に示す時間重心  $g$  (ms) の時刻における平均的な空気吸収と壁面反射による周波数特性の変化を求め、初期反射音に対する周波数特性の補正值を決定する。ここで、 $p$  は音圧、 $t$  は反射音の到来時刻(ms)を表わす。

$$g = \frac{\sum(t \cdot p^2)}{\sum p^2} \quad \dots\dots(5)$$

#### (2)散乱音

散乱音の入力データは受音点からみて前方、および後方から到来する2つの散乱音列  $S_f(n, t, p), S_b(n, t, p)$  として与えられる。このとき、散乱音は予測演算段階で数万~数十万本のオーダーとなるため、5ms毎に到来する散乱音のエネルギーを積算してデータとしている。

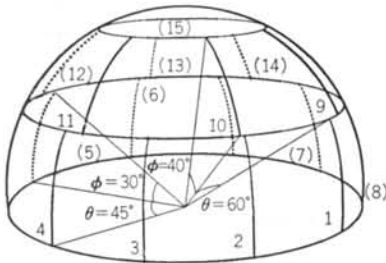


図-4 空間分割条件

この入力データに対して、反射次数が有効最大反射次数  $n_e$  以下のものをシミュレートの対象として決定し、 $S_f'(n, t, p), S_b'(n, t, p)$  とする。さらに、 $S_f(n, t, p), S_b(n, t, p)$  それぞれについて、各19本以内の遅延音列となるようにグルーピングして、 $S_f''(l', p'), S_b''(l', p')$  とする。この際、各グループの  $p'$  は  $\sqrt{\sum p^2}$ 、また  $l'$  はグループ内の散乱音の最も若い時刻としている。また、周波数特性の補正值はシミュレート対象反射音のエネルギー値  $p^2$  を周波数毎に積算した値を用いる。

#### (3)残響音

残響音を決定する上で基本となる残響時間は、式(6)の Eyring-Knudsen の残響計算式を用いる。ここで、 $V$  は室容積 (m<sup>3</sup>)、 $S$  は室表面積 (m<sup>2</sup>)、 $\bar{\alpha}(f)$  は平均吸音率である。また、残響音の発生時刻と発生レベルは有効最大反射次数を用いて式(3)、式(4)より計算され、周波数特性は式(7)に示した定常態残響音レベルによって計算される。ここで、 $Q$  は音源の指向係数、 $d$  は音源と受音点間の距離 (m) を表わす。また、 $(f)$  は周波数の関数であることを表わす。

$$RT(f) = \frac{K \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}(f))} \quad \dots\dots(6)$$

$$L_R(f) = 10 \cdot \log \frac{16 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot (1 - \bar{\alpha}(f))^{n_e + 1}}{Q \cdot S \cdot \bar{\alpha}(f)} \quad \dots\dots(7)$$

### 4.2 ハードウェアの構成

本システムのブロック図を図-5に示す。

入力された信号 (ドライソース) は、デジタルイコライザ1で直接音の周波数特性に応じた補正を行ない、以下の4系統に分配される。

第1系統は直接音用である。信号はマトリックスミキサに入力され、SP 1 (Monaural Mode) または SP 2, 8 (Stereo Mode) から再生される。

第2系統は初期反射音発生用である。信号はデジタルイコライザで  $f_1'(n, t, p, l), f_2'(n, t, p, l)$  に応じた周波数特性の補正が行なわれる。次に、イフェクタ1~16に入力され、 $f'(t, p, l)$  に応じて1台当たり最大19本の遅延音を発生する。その後、マトリックスミキサに入力され、SP 1~15 から再生される。

第3系統は散乱音発生用である。信号はデジタルイコライザ2で前方、後方毎に周波数特性の補正が行なわれる。イフェクタ17, 18ではグルーピングされた  $S_f''(l', p'), S_b''(l', p')$  に応じて遅延音をそれぞれ最大19本発生する。イフェクタ19, 20では、遅延音を入力として残響音を発生する。その後、マトリックスミキサに入力され、SP 2, 4, 6, 8 から再生される。

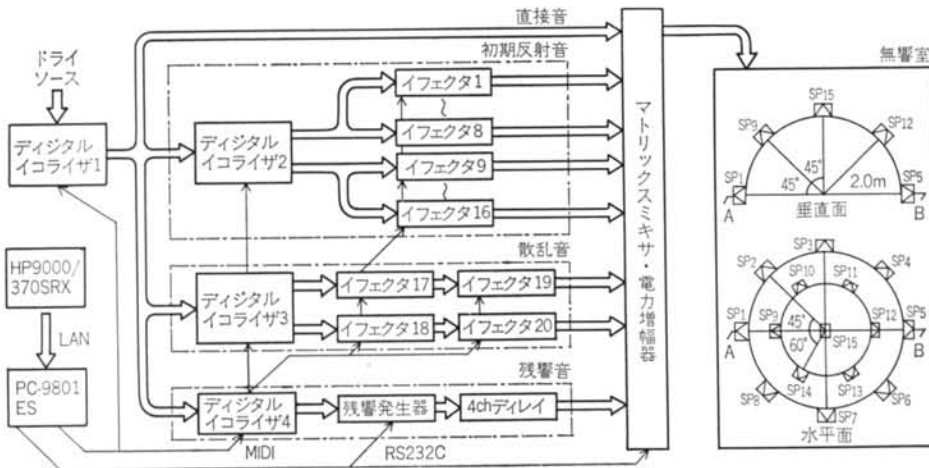


図-5 本システムのブロック図

第4系統は残響音発生用である。信号はデジタルイコライザ3で、定常態残響音レベルに応じた周波数特性 $\Delta L_R(f)$ の補正が行なわれる。次に、残響発生装置で残響音を発生、4ch-ディレイで4ch化される。その後、マトリックスミキサに入力され、SP 10, 11, 13, 14から再生される。

奏、クラリネット独奏)について独立に行なった。刺激音は、実音場6個、合成音場6個で、実音場と合成音場は同じホール、同じ收音位置で対応している。また、録音はダミーヘッド(高研製)を用いて行なった。刺激音の条件を表-1に示す。聴取方法は、周波数特性を補償したヘッドフォン(Yamaha YHD-3)による両時受聴である。また、被験者は18~23才の男性3名、女性7名

## § 5. シミュレーション精度検証実験

開発した室内音場合成システムのシミュレーション精度を検証するために、心理的および物理的な実験を行なった。心理的な実験では、実音場で録音された刺激音と、合成音場で録音された刺激音を被験者に提示し、比較判断させる実験を行なった。これは、音の類似度に関する実験(実験1)により、刺激音の空間布置を行ない、音の表現語に関する実験(実験2)により実験1で得られた空間の解釈を試みて、シミュレーション精度を検討した。

一方、物理的な実験では、音響物理量の実音場と合成音場計測値の対応関係を調べた。

### 5.1 心理実験による検証

#### 5.1.1 音の類似度に関する実験(実験1)

##### (1)実験の目的

この実験では、刺激音の間の主観的な距離である非類似度を求める実験を行ない、多次元尺度構成法による刺激の空間布置によりシミュレーション精度を考察する。

##### (2)実験方法

実験は、3種類の音源(男性ナレーション、ピアノ独

刺激音	録音音場	ホール: 条件	録音位置
a	合成音場	Fホール: 反射性	P-1
b		Fホール: 反射性	P-2
c		Fホール: 吸音性	P-1
d		Fホール: 吸音性	P-2
e		Uホール	P-1
f		Uホール	P-2
A	実音場	Fホール: 反射性	P-1
B		Fホール: 反射性	P-2
C		Fホール: 吸音性	P-1
D		Fホール: 吸音性	P-2
E		Uホール	P-1
F		Uホール	P-2

表-1 刺激音の条件

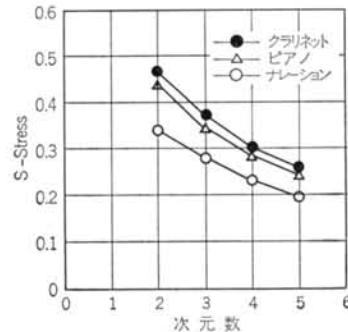


図-6 次元数とS-Stressの関係

である。

刺激音は、実音場と合成音場のランダムな組み合わせで提示した。被験者は提示された一対の刺激に対して、類似度を「まったく同じ」から「まったく異なる」の5段階で判断する。なお、一対の組み合わせに対する繰り返し回数は3回である。

### (3)分析方法

実験結果に系列範疇法<sup>7)</sup>を適用し、各刺激音間の非類似度である距離を算出した。この距離データを、多次元尺度構成法<sup>8)</sup>によりユークリッド空間に布置した。ここで得られた空間布置における刺激音間の距離は、音の非類似度に対応していることから、この空間は音の類似度の知覚空間と考えることができ、実音場と合成音場の刺

激音の相対的な位置関係から、システムのシミュレーション精度およびその特性が考察できる。なお、分析には統計ライブラリ SAS の ALSCAL を使用した。

### (4)実験結果と考察

図-6に、布置の次元数と S-Stress (以下、ストレスと呼ぶ) の関係を示す。多次元尺度構成法では、次元数に対するストレスの急な折れ曲がりをも「肘」と呼び、次元数決定の目安とする。しかし、ここでは「肘」は見られず、またストレスの値も多次元尺度構成法の他の適用例などと比べると大きい。なお、ストレスの値は小さい方が望ましいが、絶対的な基準はない。このような場合最適な次元数の決定は困難であり、得られた空間にはひずみが存在することに注意しなければならない。

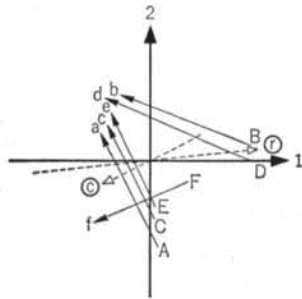


図-7 刺激音の三次元布置と表現語ベクトル(ナレーション)

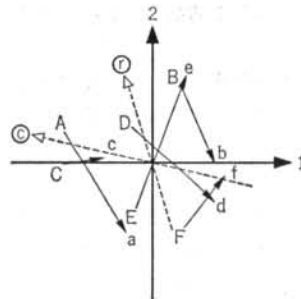


図-8 刺激音の三次元布置と表現語ベクトル(ビアナ)

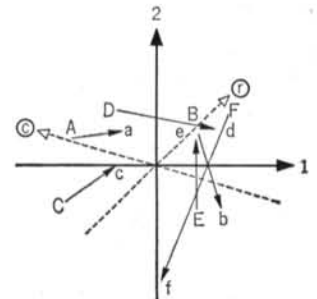


図-9 刺激音の三次元布置と表現語ベクトル(クラリネット)

次元数の増加に対するストレスの減少が小さいことは、被験者の判断が多次的に行なわれたか、被験者個人個人の判断に確固たる基準がなかったかの何れかであると考えられる。ところが、被験者個々のストレスには顕著な差が見られなかったことや、後述のように3種類の音源についての結果が同様の結果を示していることから、被験者の判断に一貫性がなかったとは考えにくい。これらのことより、被験者の判断は実際に多次的に行なわれていたと考えられる。

多次元尺度構成法に関する経験則より、“刺激数-1が少なくとも次元数の4倍なければ、統計的に安定な解は得られない”<sup>9)</sup>ことが知られている。この実験では刺激数が12であるので、次元数を三次元程度に抑えておくのが無難であると考え、以下では三次元解を採用し考察していく。

図-7は、ナレーションを音源とした実験の結果である。これによると、A~Fで示される実音場群とa~fで示される合成音場群が、どの平面上でも明らかに区別されている。両群は被験者にとって、明らかに弁別できる違いがあったと考えられる。図中の実線矢印は、実音場と合成音場の対応を示している。両者を結んだ線分が同一方向を向いていることが、シミュレーション精度の良好さを示唆すると考えられる。図-6ではF→fを除いてほぼ同一方向を向いており、素直な写像が得られている。このことは、実音場と合成音場は弁別できるが、何らかの要素を除いては良好なシミュレーション精度が得られているということを示唆している。

図-8に示したピアノの場合はUホールの刺激(E→e, F→f)は、Fホールの写像と1-2, 3-2軸平面で逆方向を向いている。図-9に示したクラリネットの場合にも、UホールとFホールで写像の方向が異なっている。また、両音源の場合もナレーションの結果同様、実音場群と合成音場群は被験者によって区別されていると考えられる。

## 5.1.2 音の表現語に関する実験(実験2)

### (1)実験の目的

実験1では、実音場と合成音場でそれぞれ録音された刺激音は弁別可能であることが示されたが、そこで被験者はどのような観点から弁別していたのかは考察できなかった。実験2では、表現語を用いた実験を行ない、実験1で得られた空間の解釈を行なう。

### (2)実験方法

実験は、3種類の音源(男性ナレーション、ピアノ独奏、クラリネット独奏)について独立に行なった。刺激音、聴取方法、被験者は実験1と同様である。実験に用

いた表現語は、明瞭性に関するものと響きに関するものである。被験者には、提示される一対の刺激音に対して、明瞭性については最初の刺激音は後の刺激音に対して、“明瞭である”から“明瞭でない”までの5段階で判断させる。また、響きについては最初の刺激音は後の刺激音に対して、“響きが豊かである”から“響きが乏しい”までの5段階で判断させる。

### (3)分析方法

本実験では、シュッフエの方法<sup>10)</sup>によりそれぞれの刺激音の表現語の尺度値を算出し、これを説明変数(従属変数)とし、実験1で得られた三次元の布置における各刺激のx, y, z座標を基準変数(独立変数)として重回帰分析を行ない、刺激音の空間布置の解釈を試みる。この分析は、統計ライブラリSASに含まれるプロシジャREGを用いて行なった。

### (4)実験結果と考察

図-7に音源ナレーションの場合の分析結果を示す。各図中に示したⒸ, Ⓓはそれぞれ“明瞭である”“響きが豊かである”という表現語の尺度のベクトルを示す。ベクトルの向きは、“明瞭である”“響きが豊かである”方向を示している。この図で、響きの豊かさが布置の1軸と相関が高く、明瞭性が3軸と相関が高く、両者は直交に近い関係にある。この図から、実験1で述べた実音場と合成音場の分離は響きの豊かさに起因すること、すなわち“響きが豊かではない”ことに原因があると考えられる。

図-8に音源ピアノの結果を示す。この場合、明瞭性が1軸と近く、響きの豊かさが2軸と3軸の間にあり、ナレーションと同様に両者は直交に近い関係にある。5.1.1(4)で述べたように、写像の向きがUホールとFホールで異なるために、ここでは刺激数の多いFホールについて見てみると、合成音場群が実音場群に比べて響きが豊かではない方向への写像となっている。これは、ナレーションと同様の結果である。

図-9に音源クラリネットの結果を示す。この場合も、響きの豊かさと明瞭性の軸は直交に近い関係にある。Fホールの合成音場群は、ナレーションやピアノに比べると“響きの豊かさ”は損なわれていないと考えられる。この空間では3軸方向の動きが大きいが、3軸に相当する表現語がないため解釈は困難である。

以上の結果から、音源自体に響きがあるものや継続時間が長い音源の場合には、音場合成による響きの印象の欠損が補われているものと考えられる。一方、明瞭性に関しては、どの音源に対しても比較的良好にシミュレートされている。

## 5.2 音響物理量による検証実験

### 5.2.1 目的

ここでは、システムのシミュレーション精度を物理的な面から確認するために、音響物理量を用いて実音場と合成音場の計測値を比較した。

### 5.2.2 実験方法

比較の対象は、心理実験に用いたホール、受音点と同じものを用いた(表-1)。今回比較の対象とした音響物理量はC値(Clarity)、時間重心 $t_s$ (Schwerpunktzeit)、MTI(Modulation Transfer Index)であり、前2者はそれぞれ以下の式によって計算される。MTIは、変調度100%の信号を伝送系を通したときに、系の雑音や残響によってもたらされる変調度の低下の割合によって求ま

る量である<sup>11)</sup>。また、これらの音響物理量は心理的にはそれぞれ明瞭性(C値、MTI)、響き量(時間重心 $t_s$ )に比較的対応する量であるとされている。

$$C = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80\text{ms}} p(t)^2 dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p(t)^2 dt} \quad \dots\dots(8)$$

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p(t)^2 dt}{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt} \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 $p(t)$ は音圧、 $t$ は反射音の到来時刻(ms)を表す。

実音場の計測は、12面体無指向性スピーカ(Fostex UP 103×12)<sup>9)</sup>から、サイン波6波にハミングウィンドを乗じた波形(トーンバースト)を放射し、無指向性マイクロフォンで収録した。一方、合成音場の計測は、音源として12面体無指向性スピーカで放射したトーンバーストを無響室録音したものを用いた。これを本システムに入力し、合成された音場で無指向性マイクロフォンを用いて収録した。

### 5.2.3 実験結果と考察

図-10(a), (b), (c)に各音響物理量の、実音場と合成音場の計測値の対応を示す。図中、○、□で示したUホールは周波数125, 250, 500, 1k, 2k, 4kHz帯域の値である。また、●、×印で示したFホール反射性、Fホール吸音性は周波数1k, 2kHz帯域の値である。図中、右上がり45度の実線は、実音場と合成音場の計測値が等しくなる場所を結んだものである。今回は、これらの音響物理量のシミュレーション精度を定性的に観測した。

図-10(a)に示したC値の結果では、UホールP-2の全周波数とUホールP-1の250Hz, 500Hzのシミュレーション精度は良くないが、それ以外の計測値のシミュレーション精度は比較的良好である。図-10(b)に示した $t_s$ の結果では、Uホールの合成音場の結果が過小に評価されているが、全体的に良好なシミュレーション精度を示している。図-10(c)に示したMTIの結果では、計測値が狭い範囲に分布しているために一概にはいえないが、おおむね良好なシミュレーション精度を示していると考えられる。

### 5.3 精度検証実験に関する考察

心理実験による精度検証では、明瞭性に関して良い精度が得られていること、響きに関するシミュレーションに課題が残されていることが明らかとなった。また、音源によってFホールとUホールの実験結果が異なった傾向を示した。一方、音響物理量による検証実験では、一部

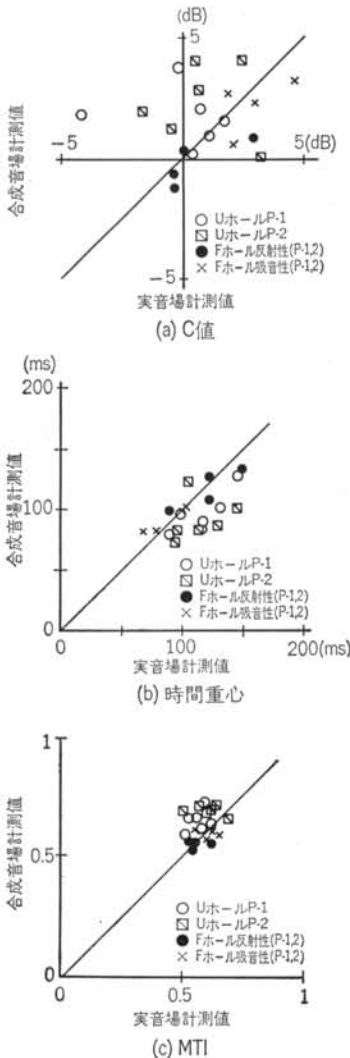


図-10 実音場と合成音場の音響物理量比較

の条件を除いて良好なシミュレーション精度が得られていることが分かった。以下に、2つの検証実験の対応について述べる。

音声や楽音に対する明瞭性は、心理量、物理量(C値, MTI)のいずれについても良好なシミュレーション精度が得られている。また、UホールP-2の明瞭性に対する写像が、他の条件の写像と異なった方向性をもっていたことは、物理面でのシミュレーション精度が心理面に反映された結果と考えられる。また、響きに関する心理量、物理量の相違については、物理量  $t_0$  は響きに関する一つの側面、すなわち反射音の時間上の分布を見ているのに対し、心理実験で用いた「響きの豊かさ」という概念には響きの質、残響感、空間的な広がり感などの印象を包含していたためと考えられる。

## § 6. まとめ

本稿では、今回開発した室内音場合成システムの特徴、

構成について述べるとともに、心理量、物理量の両面から行なった精度検証について述べた。

精度検証の結果より、本システムは響きに関して、実音場と合成音場の印象は現状では必ずしも一致しているとはいえないが、両者の対応関係は音場の違いに対して一定の変化傾向を示しており、建築音響設計のツールとして活用できると考えられる。また、明瞭性に関しては良好なシミュレーション精度を有し、建築音響設計の実務に充分活用できるものであると考える。

今後、心理実験で示された響きに関する課題を受け、残響音の発生方法を中心に検討を行なっていくとともに、UホールとFホールの結果が異なった傾向を示したことに関して、今後音場予演演算段階も含めて検討していく予定である。

**謝辞** 本システムの開発に当たり、熱心な御指導を頂くとともに、心理実験の遂行に当たっては共同実験者として御尽力頂いた、東北大学電気通信研究所の曾根敏夫教授、鈴木陽一教授、小沢賢司助手、高根昭一助手に深謝いたします。

## <参考文献>

- 1) 川上浩, 清水寧, 川上福司: “音場シミュレーションに関する研究” 日本音響学会建築音響研究会資料 AA86-12 (1986年4月)
- 2) 是永雄二, 細野利郎, 菅真一郎, 高久勝彦: “大空間の明瞭度予測に用いる可聴化型シミュレータについて(その1)” 日本音響学会研究発表会講演論文集(1988年10月) pp. 729~730
- 3) 日高孝之, 影山健二, 増田定泰: “室内音場の合成シミュレーション(2)” 日本音響学会研究発表会講演論文集(1988年3月) pp. 569~570
- 4) 是永雄二, 細野利郎, 菅真一郎, 高久勝彦: “大空間の明瞭度予測に用いる可聴化型シミュレータについて(その2)” 日本音響学会研究発表会講演論文集(1988年10月) pp. 731~732
- 5) 飯田一博, 井口日文, 森本政之: “時系列両耳間相互相関関数に基づいた音場再生の基礎実験” 日本音響学会研究発表会講演論文集(1992年3月) pp. 489~490
- 6) 中川清: “散乱波を考慮した幾何音響計算法による室内音響物理量の計算” 日本音響学会誌 第45巻, 第12号(1989年) pp. 934~941
- 7) 例えば, 武藤真介: “計量心理学” 朝倉書店(1982年)
- 8) 例えば, 日科技連編: “新版官能検査ハンドブック” 日科技連出版社(1973年)
- 9) J. B. Kruskal and M. Wish (高根芳雄訳): “多次元尺度構成法(人間科学の統計学・1)” 朝倉書店(1980年) p. 31
- 10) 吉久光一, 木村博行, 橘秀樹, 石井聖光: “定パワー音源による室内音圧レベル分布の測定” 日本音響学会研究発表会講演論文集(1982年3月) pp. 505~506
- 11) T. Houtgoust and H. J. M. Steeneken: “The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility” *Acustica*, Vol. 28 (1973) pp. 66~73