

## 可搬型立体音場合成システムの開発

渡辺 充敏 平野 滋

## Development of a Portable Synthetic Sound Field System

Mitsutoshi Watanabe Shigeru Hirano

## Abstract

This report describes a reverberation addition method for shortening calculation time, and a portable synthetic sound field system, that is little influenced by room acoustics to be easy for actual business. It first describes reverberation addition methods taking the reflection time structure to keep its continuation from early reflections to reverberation part. The effectiveness of reverberation addition methods is established by comparative hearing tests. The portable system is shown to be better than the ordinary system, as to achieve good sound source localization. Finally, it shows an example of this system for noise study programs.

## 概 要

本報告は、実務に適用しやすい音場合成システムとするための、計算時間の短縮を図る残響音付加手法の提案および音場の再生場所の制約を受けにくい可搬型システムの開発について示す。まず、初期反射音から残響音へと連続する反射音時間構造に着目し、一連の反射音時間構造を残響音領域においても考慮することで、初期反射音と付加する残響音の整合性を確保しようとする残響音付加手法を提案し、聴感実験によりその有効性を示した。次いで、本システムの音場の提示方法を実務に適用しやすい形態とするため、再生する室の影響を受けにくい可搬型のシステムとし、音像定位を改善する改良を加えた。さらに、騒音対策に関する受託研究を進めていく過程において、騒音の音質、方向性を含めて体験が可能なシミュレータへと発展させていった。現状における騒音体験システムの構成および適用例について示している。

## 1. はじめに

これまで、図面段階のホールの音を数値シミュレーション結果から合成した三次元の拡がりをもつ音場により、聴感上の検討を加える立体音場合成システムを開発し<sup>1)</sup>、実務へ活用するための改良を加えてきた。

現在、波面積分法と呼称する波動性を考慮した数値シミュレーション手法<sup>2)</sup>を用いて、音場合成に必要な残響音領域までの全時間の室内過渡応答(インパルス応答)を計算している。波面積分法によれば、音場合成に必要な全時間のインパルス応答計算に要する時間はアルゴリズムの工夫により軽減されているが、なお音響設計支援システムの演算系の中で大きな割合を占めていた。実務への適用を考えると、音響設計の過程で生じる試行錯誤に迅速に対応するためには計算時間の短縮が望まれた。

従来から、音場合成に必要な全時間インパルス応答算出に要する計算時間の短縮のため、数値シミュレーションにより初期反射音のみを計算し、これに別途、簡易的に算定した残響音を付加する手法が多く用いられてきたが、初期反射音の性状を考慮せず、残響音にエネルギー減衰のみを与える場合が多く、初期反射音と付加する残響音との整合

性などに問題を残してきた。

本報告では、初期反射音と残響音とに分けて論じられることが多かったインパルス応答に関して、到来する反射音の時間構造に着目し、初期反射音の時間構造が、時間経過に伴い次第に複雑となり残響音を形成すると言う一連の反射音時間構造の変化として捉えることを試みている。初期反射音から連続する反射音時間構造を残響音領域においても考慮することで、初期反射音と付加する残響音の整合性を確保する残響音付加手法を提案している。

次いで、本システムの音場の提示方法を実務に適用しやすい形態とするため、再生する室の影響を受けにくいように頭部近傍にスピーカを設置する可搬型のシステムとし、さらに音像定位を改善する改良を加えている。

需要の多い騒音対策に関連する実務において、対策の効果等を実際に聴いて確認したいとの要望が多くあった。本システムはホール音場を対象とした音場のシミュレータとして開発してきたが、騒音対策に関する受託研究を進めていく過程において、依頼部門の要望に応える形で騒音体験が可能なシミュレータへと発展させていった。

最後に、現状における騒音体験システムの構成および適用例について示す。

## 2. システムの高速化のための残響音付加手法

### 2.1 実測による反射音時間構造

シューボックス型ホールの1階中央付近(Fig. 1)における実測からのエネルギーパルス応答をFig. 2の上側に示す。ある反射音から、次の反射音が現れるまでの時間を反射音時間間隔として、全反射音に対して算出した。その時間変化をエネルギーパルス応答と合わせてFig. 2の下側に示す。反射音時間間隔は当ホールにおいて正四面体頂点法による短時間指向拡散度の時間変化から、ほぼ拡散状態に移行したと見なされる直接音到達後180msec.以降<sup>3)</sup>について示している。

Fig. 2を見ると、反射音時間間隔は不規則に変動しているが、時間経過に伴う一定の変化は認められない。反射音時間間隔による反射音数の度数分布を求めたところ、Fig. 3に示す度数分布が得られた。残響音領域全体の反射音時間間隔の度数分布が、各時間においても同様な傾向を示すのであれば、ある時間幅内の反射音時間構造の度数分布から残響音全体の反射音時間構造を捉えることができることになる。

そこで、残響音領域の反射音時間構造の傾向を把握できる最小時間幅が得られるかについて検討を行った。本音場合成システムは、両耳への信号の入力に着目した処理を行っており、ここでの検討においても両耳間のコヒーレンス関数を用いて、残響音全体の傾向を示すことのできる時間幅検討の手掛かりとした。検討には同じホールの1階中央付近におけるダミーヘッドによる実測のインパルス応答を用いた。

Fig. 4に拡散状態に移行したと見なした直接音到達から180msec.以降全体および180msec.からの50msec.幅、25msec.幅、12.5msec.幅と反射音を切り出す時間幅を次第に狭めていった場合の両耳間のコヒーレンス関数を示す。これを見ると、残響音全体のコヒーレンス関数の傾向が見て取れるのは50msec.までである。

Fig. 2に示したエネルギーパルス応答を用い、直接音から180msec.以降の反射音を50msec.ごとに切り出し、反射音時間間隔の度数分布を求めたところ、度数分布は時間経過によらず残響音全体と同様な傾向を示した。残響音全体の反射音時間構造の傾向は、50msec.幅程度の時間幅における反射音時間間隔の度数分布によって捉えられることが示唆される。

### 2.2 反射音時間構造の作成

Fig. 1に示したホールにおいて、拡散状態に移行したと見なした時刻から50msec.間の反射音時間間隔による度数分布を用いて、それ以降の反射音時間構造を作成する手法を検討した。Fig. 5に用いた指数回帰曲線を示す。

この指数回帰曲線に従う反射音時間構造を作成するため、指数回帰曲線の時間間隔軸(横軸)と正規化した反射音数軸(縦軸)および指数回帰曲線に囲まれた面積(Fig. 5の

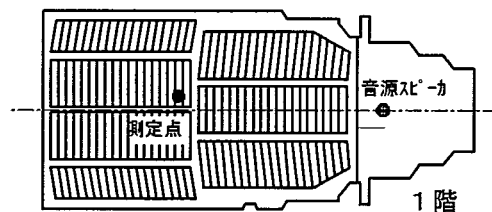


Fig. 1 測定位置  
Receiving Point

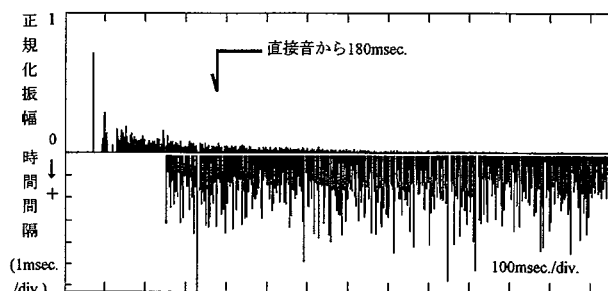


Fig. 2 実測からのエネルギーパルス応答  
および反射音時間間隔  
Energy Pulse Response and Time Interval  
of Reflections from Measured Impulse Response.

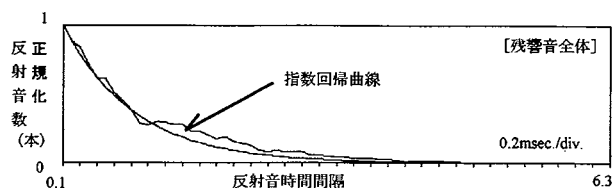


Fig. 3 反射音時間間隔による度数分布  
Frequency Distribution  
by Time Interval of Reflections

網掛け部)を反射音の出現確率と捉え、反射音時間間隔および反射音数を、乱数によって独立に決定し、両者によって示される座標が反射音の出現確率を示す範囲内に存在した場合、座標に対応する反射音時間間隔に基づき反射音位置を逐次時系列上に示していく。この方法によれば、3秒程度の反射音位置を決定するのに必要な計算時間はEWSを用いて数秒程度である。

Fig. 6に得られた反射音位置および反射音時間間隔を示す。またFig. 7には、得られた反射音時間間隔の度数分布を示す。作成した反射音時間構造は実測と良い対応を示しており、拡散状態に到達した時刻から50msec.までの反射音を用いて、実際の残響音と同様な傾向を示す反射音時間構造が近似的に作成できるものと考えられる。

### 2.3 頭部伝達関数の考慮

開発してきた音場合成システムは、数値シミュレーションから音場の受聴者の提示に至るまで両耳への入力に着目した処理を行っている。得られた反射音時間構造に従う反射音を受音点に到達した際に人の頭部の音響特性である頭部伝達関数を考慮して両耳への入力を算出する必要がある。

残響音領域は拡散状態と見なせ、反射音の到来方向に大きな偏りはないと仮定して、各反射音ごとの受音点への到来方向を逐次乱数によって決定し、到来方向に対応する頭部伝達関数データベースから参照し、その応答を時系列上に重ね合わせていった。

2.4 残響音周波数特性の簡易予測

付加する残響音の周波数特性の時間変化を考慮する際に、詳細に予測しようとする多大な計算時間が必要になり、残響付加による計算時間短縮が図れなくなる。そこで、残響音領域における拡散状態を仮定し、空気吸収および壁面の吸音による周波数特性の時間変化を簡易的に予測した。

単一周波数における空気吸収の影響は、ISO/DIS 9613/1に示される減衰率 $m$ 、伝搬距離 $x$  (m)より、式(1)で表される。また、単一周波数における壁面の吸音の影響は、反射回数 $n$ および平均吸音率 $\alpha$ による式(2)を用いた。

$$I = I_0 e^{-mx} \dots\dots\dots (1)$$

$$I = I_0 (1 - \alpha)^n \dots\dots\dots (2)$$

得られた定常的な左右一对の信号は空気吸収と壁面の吸音による周波数特性の変化が考慮されていることになる。この一对の信号に残響時間による指数減衰を与えた上で、初期反射音に付加する。その際、初期反射音との波形の不連続による異音の発生を防ぐため、コサイン窓関数による重み付けを接続部に加え、滑らかに合成している。

2.5 残響音付加手法に関する比較聴感実験

提案した反射音時間構造を考慮した残響音付加手法自体の有効性の検討のため、ダミーヘッドを用いて測定した両耳でのインパルス応答の初期反射音に、提案した手法により作成した残響音を付加し、実測による音場との差異について比較聴感実験を行った。実験はこれまで検討に用いてきたシューボックス型ホールの7点(Fig. 8)を対象とし、Fig. 2に示した正四面体頂点法による測定結果による反射音時間構造を用いて残響音を作成した。また、比較のため、反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮しない信号として両耳における全体域においてコヒーレント度を0.1程度に操作したホワイトノイズ<sup>4)</sup>、反射音の到来方向による頭部伝達関数は考慮するが反射音構造を考慮しない信号を用いて残響音を作成した。比較聴感実験に用いた4音場をTable 1に示す。

音源には、残響部の違いを聴き取りやすいように無響室のオーケストラ曲(オペラ「ルスランとリュドミラ」序曲冒頭0.2秒)による短音を用い、音源を実測および残響音を付加したインパルス応答に畳み込んだ後、無響室において再生した。

実験は一对比較法により、4音場を2秒の間隔において

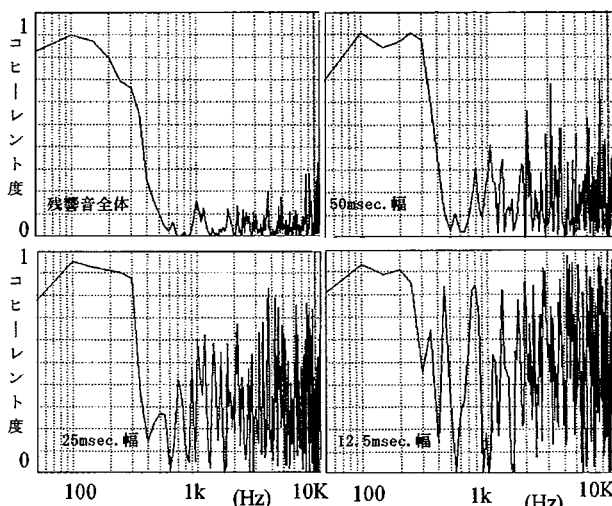


Fig. 4 時間幅による両耳間のコヒーレンス関数の変化  
Change of Coherence Function by Time Width of Reflections

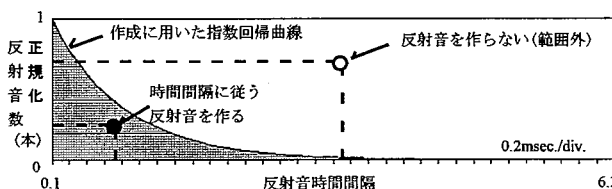


Fig. 5 指数回帰曲線に従う反射音作成方法  
Method of Making Reflection following Exponential Revolution Curve

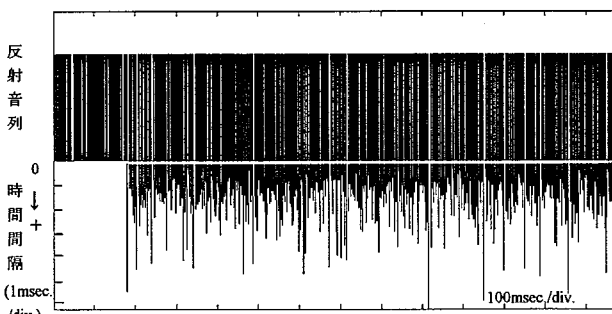


Fig. 6 作成した反射音および反射音時間間隔  
Made Reflections and its Time Interval

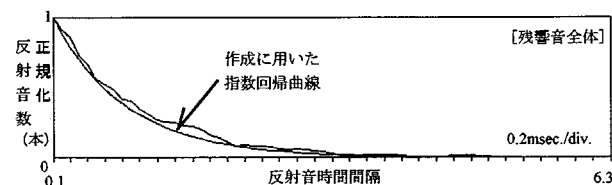


Fig. 7 作成した反射音時間構造の時間間隔による度数分布  
Frequency Distribution by Time Interval of Made Time Pattern of Reflection

対とした12対を作成し、回答の信頼性をチェックするための同一音場同士の4対を加えた合計16対についてTable 2の評価項目について、Fig. 9の5段階のカテゴリによって評価させた。聴取レベルは約65dB(A)、被験者は成人男女17名とした。実験を通して、同一音場対に対して「明らかに先・後」と一度でも評価した2名の回

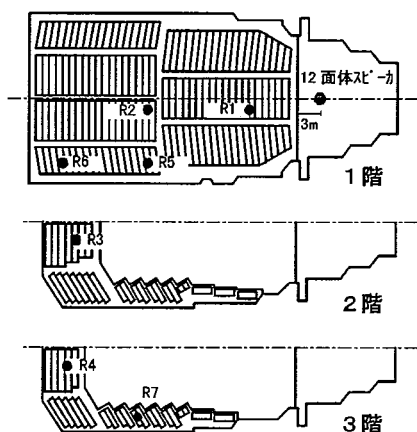


Fig. 8 測定点位置  
Receiving Points

Table 1 比較音場  
Sound Fields for Experiment

A: 実測音場
B: 実測の初期反射音(～180msec.) +ホワイトノイズによる残響音
C: 実測の初期反射音(～180msec.) +頭部伝達関数のみ考慮した残響音
D: 実測の初期反射音(～180msec.) +反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮した残響音

Table 2 評価項目  
Estimation Items for Experiment

どちらの音場が				
1. 音色の連続性が得られているか				
2. 自然な減衰が得られているか				
明らかに 先の音場	どちらかと いうと 先の音場	同じ	どちらかと いうと 後の音場	明らかに 後の音場

Fig. 9 5段階の評定尺度  
Estimation Scale by 5 Steps

答を除き、15名の回答結果についてシェッフエの一对比較法<sup>5)</sup>を用いて分析した。得られた各受音点における4音場に対する心理尺度構成値をFig. 10に示す。図中において、比較する音場同士の心理尺度構成値の差が1以上ある場合、両者に聴感上有意な差があることを示す。

Fig. 10の全体的な傾向を見ると、実測音場Aが聴感上最も自然な音場として評価されているが、反射音時間構造および頭部伝達関数を考慮した音場Dは、実測音場Aと同程度の評価が得られている。頭部伝達関数および反射音時間構造を考慮しない音場Bと頭部伝達関数のみを考慮した音場Cは、実測音場Aとは聴感上有意な差が生じており、反射音時間構造が聴感に与える影響が大きいことが示されている。

今回の検討では、R2付近の測定データからの反射音構造を作成し全受音点に適用させたが、R7を除くいずれの受音点においても音場Dは良好な評価が得られており反射音時間構造を考慮した残響音付加手法の有効性が示されたと考えられる。

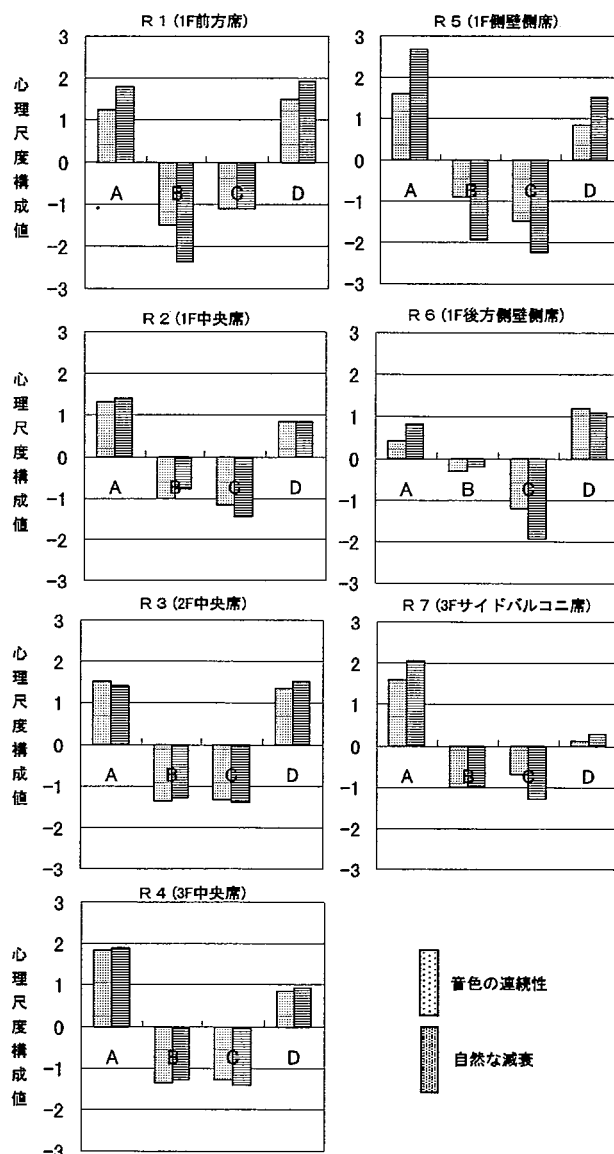


Fig. 10 4音場に対する心理尺度構成値  
Psychological Rating Scale  
by Comparison of 4 Sound Fields

R7は他の受音点と異なり、音場Aと音場Dに聴感上有意な差が生じている。受音点R7は側壁近くの反射音の偏りが生じやすい位置にあり、反射音の到来方向を受聴者を中心とした上半球の範囲内で均一になるようにしたことが、音場Dの評価を下げる原因となったと考えられる。

提案した反射音時間構造を考慮した残響音付加手法は数値シミュレーションの初期反射音に対しても同様に適用でき、また聴感上の精度を向上させるためにも有効であることを確認している。

### 3. 可搬型システムの開発

#### 3.1 可搬型システム概要

合成音場の受聴者への提示は、前方に設置した2つのスピーカを用いてきた。その際、右のスピーカからの音は

右耳だけに、左のスピーカからの音は左耳だけに正確に入力するため、右のスピーカから左の耳へ回り込む音をアクティブに打ち消すと言う信号処理を行っている。回り込む音を打ち消すアクティブな処理を行うためには、壁面からの反射音は好ましくないため、無響室内で再生してきたが、実務的には打ち合わせ現場で音場を再生できることが望まれていた。

可搬型システムでは、前方に離れて設置していたスピーカを受聴者の耳の近傍に設置することで、再生の際の壁面からの反射音を無視できるほど小さくしている<sup>6)</sup>。Fig. 11にヘッドホン形状のイヤースピーカ(製品名: AKG K1000)を装着している様子を示す。ヘッドホンとは異なり、装着時の煩わしさが少なく、両耳部分が開放されているため、音を聴きながら会話することも可能となる。イヤースピーカ以外の再生系は小型データレコーダとアンプだけであり、容易に運搬できる。

### 3.2 音像定位補正方法

また、これまで数値シミュレーションに組み込まれている頭部伝達関数と受聴者の頭部伝達関数の差異に起因する音像定位の曖昧さを補正する処理を再生の度に行っていたが、補正には無響室における受聴者の正面頭部伝達関数の測定が必要であるため、可搬型システムにおいて良好な音像定位を得るためには、あらかじめ汎用性のある補正用のデータを用意しておく必要性が生じる。



Fig. 11 イヤースピーカ装着の様子  
Appearance with Ear Speakers

そこで、23人の成人男女の正面頭部伝達関数を測定し、伝達関数のピーク、ディップに着目し、構造化平均して、4パターンに分類した。それら補正用データの妥当性を検証するために、水平方向の音源に対する方向定位実験を行った。

リファレンスとして実際に被験者を中心とした円周上に、正面から30度おきに左半分(真後ろ)までの7つのスピーカを配置し、各スピーカからランダムな順番で試験音を出力した。音像が定位したと感じられた被験者に正面1番から真後ろの7番のスピーカまでのスピーカ番号を回答させた。

次いで、各スピーカ方向に音像が定位するように意図して作成した試験音をイヤースピーカから受聴者に提示し、音像を定位した方向を回答させた。イヤースピーカによる再生は、4パターンの補正データを用いて補正した場合と、補正しなかった場合の双方について実験した。被験者は成人男女8名である。

実験結果をFig. 12に示す。縦軸が実際のスピーカ方向、また音源が定位することを意図した方向、横軸が被験者が回答した音像の方向であり、丸の大きさは回答率を示す。音源の方向と被験者が回答した音像の方向が一致すると斜め45度に全ての丸が並ぶことになる。なお、音像定位のための補正した時のイヤースピーカによる実験結果は、被験者に最もよく適合した補正データによる平均値を示している。

Fig. 12を見ると、実際にスピーカを配置した場合、音源方向と音像方向はほとんどにおいて一致しているが、音像定位補正を行わないイヤースピーカによる再生では、音源方向と音像方向が大きく異なっている。補正を行ったイヤースピーカによる再生では音像定位の曖昧さは大きく解消されている。

また、正面方向の音源と真後ろからの音源がどの程度正確に判別できるかの簡易的な試験を行えば、被験者に適合する補正データを選択できることを別途確認している。

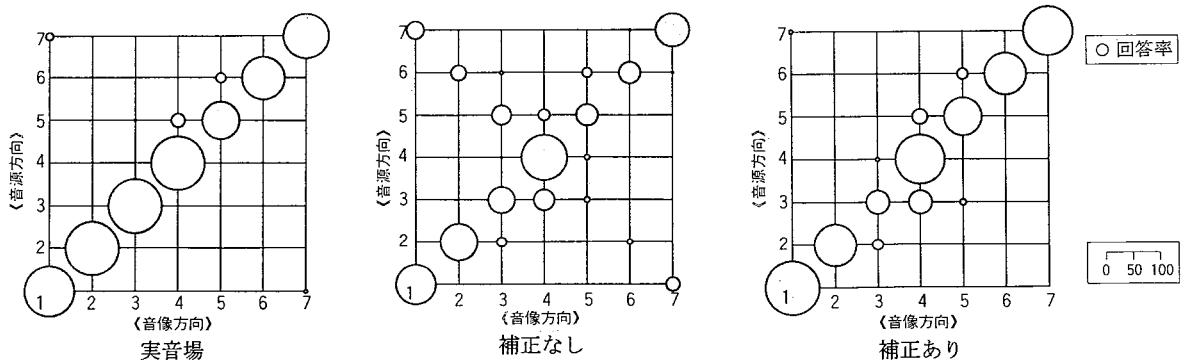


Fig. 12 方向定位実験結果  
Results of Sound Localization Experiment

#### 4. 騒音シミュレータとしての適用例

本音場合成システムは、室内音場のシミュレータとして開発してきたが、騒音対策に関連して、騒音レベル等の数値だけでは感覚的に把握しにくい、また実際にどの様に聞こえるかを知りたいとの要望が多くあった。そこで依頼部門の要望に応える形で、騒音体験が可能なシミュレータへと発展させていった。

Fig. 13に騒音体験シミュレータとしてのフローを示す。以下に、2件の適用例を示す。なお、室内音場に関する適用として、大閲覧室が曲面で構成され、音響障害の発生が問題となった宮城県立図書館における音響障害の発生の様子、また書架が設置された実使用状態における軽減される程度を合成して検討した例がある。

##### 4.1 隣戸からのピアノ騒音

賃貸マンションの入居条件をピアノ可とするかの判断材料を求められていた。アップライトピアノを界壁近傍に設置すると、界壁への入射騒音レベルは、最大で110dB(A)程度となる。

設計仕様に基づく予測の結果、隣戸からのピアノ演奏音は、60dB(A)を超え、クレームの発生する恐れのあるレベルであることが示されたが、同程度の仕様でピアノ可としている賃貸マンションもあり、実際にどのような音として聞こえるかを施主が聴いて最終的な判断を下すこととなった。

そこで、本システムを用いて隣戸からのピアノ演奏音を合成し、施主の事務所内において関係者によって聴試された。騒音レベル自体が高いことに加え、演奏のリズムが聴き取れるため、交通騒音等の無意味騒音に較べて耳に付くなどの点から、当マンションはピアノ不可の判断が下された。

##### 4.2 道路交通騒音

幹線道路の交差点に、不特定の来客を対象とした受付業務も行うオフィスビルが計画されていた。一般にオープンな執務空間の室内騒音は、室内騒音の評価値であるNC値でNC-40程度を目標とする。当物件においてはコスト的に十分な遮音対策を実施するには困難な状況にあった。

当初設計仕様に基づく室内騒音はNC-55、53dB(A)程度と予測され、これは一般的には許容しにくい高いレベルであるが、受付カウンタを兼ねた執務空間であることから、一般より高い騒音レベルも許容するとの意見もあった。そこで、実際に騒音がどの程度になるかを聴いて判断したいとの依頼が寄せられた。

交通騒音の測定結果に基づく予測値から、執務空間内での騒音を作成した。敷地所在地が東京以遠であったため、再生装置一式を送付し、操作は現地の当社職員が行い

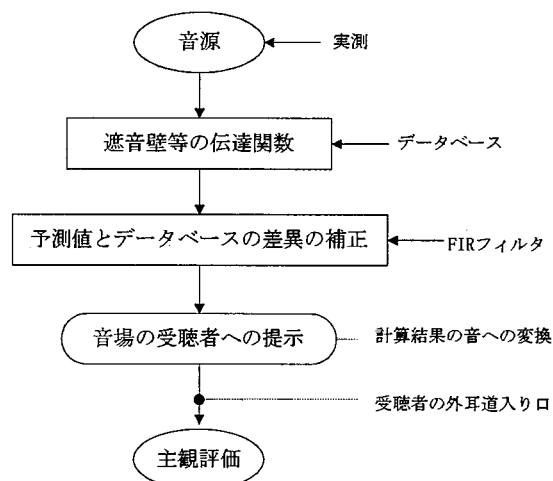


Fig. 13 騒音体験シミュレータのフロー  
Flow of Simulator of Noise

聴試された。

実際に執務空間内での騒音を体験した結果、施主サイドから、当初設計仕様による室内騒音は許容できる範囲であるとの判断がなされた。

#### 5. まとめ

音場合成システムを実務へ適用しやすい形に発展させることを目的に、計算時間短縮方法のための残響音付加手法、また打ち合わせ現場で音場、騒音等を体験できるように可搬型のシステムを開発した。騒音体験シミュレータとしては、現状では基本的機能のみであるので、さらに拡充を図っていきたい。

今後も、聴感上の精度向上、高速化を進め、実務に適用しやすいシステムに改良していきたい。

#### 参考文献

- 1) 坪井, 渡辺, ほか: 波動性を考慮した室内音場シミュレーションシステム, 日本建築学会技術報告集, 第2集, p121-126(1996.3)
- 2) 坪井: 散乱波を考慮した室内音場のインパルス応答予測計算法, 日本建築学会計画系論文集, No. 503, p1-7(1998)
- 3) 羽入, ほか: 音場の過渡応答に着目した拡散性の検討, 日本建築学会計画系論文集, No. 471, p11-18(1995)
- 4) イェンス ブラウエルト, 森本政之, 他編著: 空間音響, p54-55
- 5) 芳賀敏郎, ほか: 実験データの解析(1), 日科技連
- 6) 吉田, ほか: イヤースピーカを用いた新しいOSS再生方式, AESコンベンション91, p138-141(1991)