

## 音響可聴化システムの開発

吉川 淳一郎\* 末永 義明\*

### 要 旨

これまで、残響時間などの室内音響を検討する方法として、音線法や虚像法といった幾何音響解析が用いられてきた。この幾何音響解析の結果は反射経路などを視覚的に表現することが可能で、プレゼンテーションとして有効なものであった。

しかしながら、響きなどの検討時に、数値や視覚的に表現しても、体感として分かりにくいことが多く、音の専門家ではない施主や設計者でも感覚的に評価・検討が行えるものが求められていた。

そこで、既存の解析手法である幾何音響解析と、2台のスピーカで3次元の立体音響を再生できるシステムを利用し、実音によって感覚的に評価できるシステムを開発した。本報では、システムの紹介や精度の検討結果、小型スピーカへの応用、実物件への適用事例などを報告し、設計・施工段階での適用可能ケースなどについても考察を行う。

### 1. まえがき

これまで、室内音響計画では残響時間などのスカラーデータの取得や幾何音響解析による3次元の反射経路検討を行ってきた。また、人間の感覚や聴きとり易さなどの感覚的な指標も用いられている。その結果、最適残響時間との違いやエコーの有無、明瞭度などの項目を数値として比較検討するとともに、目に見える形でプレゼンテーションをすることが可能であった。ところが、それらの指標は室内音響上の性能値であって、対策や変更案の効果や違いを第三者に伝える手段としては専門的で、理解しにくいものであった。

そこで、音響計画の際に音環境の予測結果をより分かり易く表現するために、既存の幾何音響解析結果をもとに、音として表現できる（可聴化できる）システムを開発した。また、再生装置を小型にすることで再生場所の

制約を少なくし、プレゼンテーションツールとして有効なものとした。

本報では、システム全体の構成と各種実験結果を示すとともに、実物件への適用例も紹介する。

### 2. システム構成

#### 2.1 全体構成

開発した音響プレゼンテーションシステムは、大きく分けて図-1に示す3つの部分から構成されている。

- ・音源データおよび録音部分
- ・各種解析部分
- ・再生部分

このうち、録音部分と再生部分には市販の機器を利用し、拡張性を高めている。

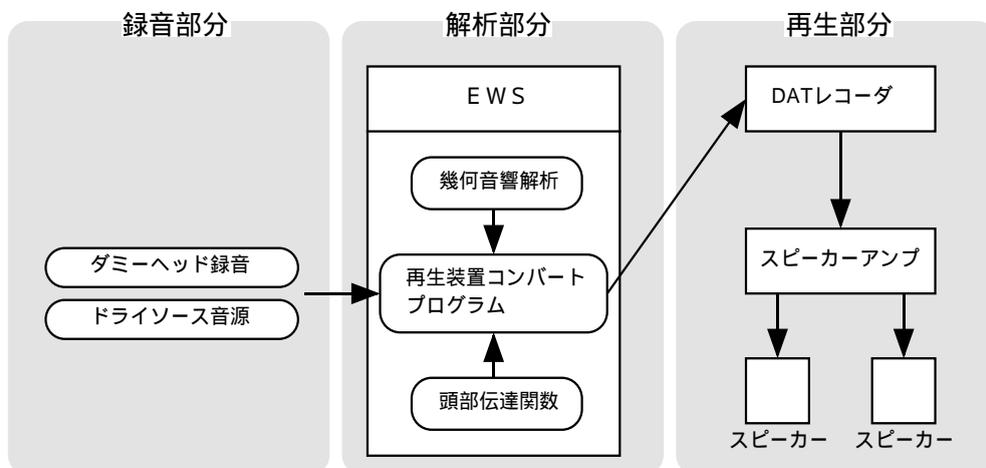


図-1 システム全体構成

\*技術研究所

2.2 録音部分

このシステムの特徴として、解析結果の可聴化のみではなく、実音場の再現が挙げられる。実音場の再現には人が音を聴く状況と同様の音が収録できるダミーヘッドマイクロホン(写真-1)を利用し、別の空間でも両耳に入射する音を同じにすることで、実音場の再現を可能にしている。また、解析結果の可聴化では、ドライソース音源を使用し、響きの違いを感覚的に表現できるようにしている。



写真-1 ダミーヘッドマイクロホン

2.3 解析部分

2.3.1 室内音場解析

音場解析では、幾何音響解析の音線法を用い、方向、周波数および音圧の情報を持った反射音線を受音点毎に得ている。また、タップ数等の制約が無いソフトウェア処理の利点を生かして反射音線のみで残響波形を構成できるようにし、後部残響音の付加は最小限になるようにしている。ただし、解析時間等の制約から、残響時間が10秒を越えるような空間では、後部残響音の付加が不可欠となる。後部残響音は通常の方法で初期反射音に接続すると不自然に聞こえることがあり、初期反射音から得られる空間情報を後部残響音に反映させる研究も行われている<sup>1)</sup>。

また、幾何音響解析では、反射面の大きさと周波数との関係に波動的な考えが考慮されていない。そのため、解析上の下限周波数をあらかじめ設定しておき、モデリング時に反射面の形状や面の構成などを考慮する必要がある。

2.3.2 再生装置へのコンバート

再生装置は2スピーカで3次元立体音響を再現できるOSS<sup>2)</sup>システムを採用している。このシステムは人が両耳で空間的な拡がりを感じていることに注目し、左右

のスピーカからの音が別々に入射するようにフィルタリングを行う。

コンバート計算は、室内音場解析で得られた反射音線を方向別に分け、各方向で頭部伝達関数のフィルタリングを行い、両耳のインパルス応答を得ている。人の感覚として、前方の方向感覚が鋭く、逆に側面の方向感覚は鈍い。そのため、正面方向の音に対しては計算上の方向を決定する面分割を細かくする必要がある。一方、デジタルサラウンドプロセッサ(DSP)とマルチスピーカを組み合わせた音響シミュレータでは、12~20程度の方向分割(スピーカ数)であることなどから、計算時間を短縮し、実用上支障のない分割方法として、本システムでは均等に16分割する方法を採用している。

2.3.3 頭部伝達関数

頭部伝達関数は、左右のスピーカから出る音がそれぞれの耳に到達する特性を知るものである。特性はスピーカの位置や周波数特性、聴受者によって異なるが、プレゼンテーション時に聴受者の頭部伝達関数を計測することは不可能なため、成人の平均値として作成されているダミーヘッドマイクロホン(高研製)の頭部伝達関数を利用している。聴受者の頭部伝達関数を使用しないことで、方向感覚が曖昧になるが、プレゼンテーションを目的としているため、実用性を重視している。

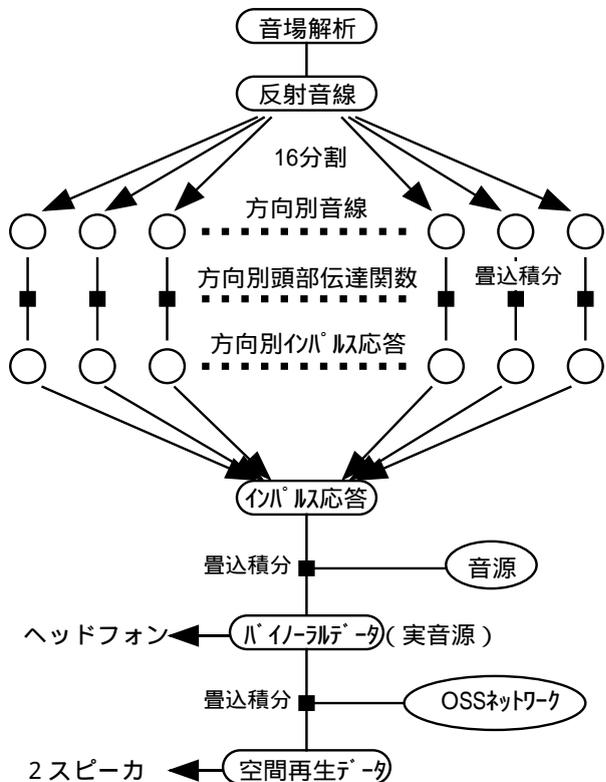


図-2 解析部分計算フロー

2.3.4 OSSネットワーク

OSSネットワークは頭部伝達関数から得られた情報を、計算上のフィルタにしたものである。ネットワークには3つのフィルタ(EL、ER、CL、CR、TL、TR)があり、このフィルタは図-3に示す4つの頭部伝達関数(HLS、HLO、HRO、HRS)から算出する。図-4に示す6つのフィルタから、最終的には図-5に示す4つのフィルタ(計算用OSSネットワーク係数)を用いて、音源と畳み込み積分を行う。また、設計の機能として正面補正(EL、ER)があるが、各種検討時以外では使用していない。

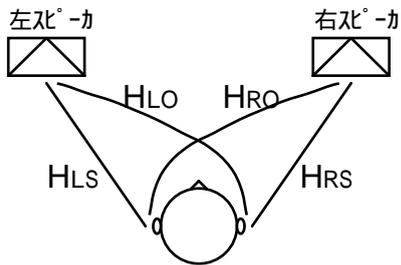


図-3 頭部伝達関数

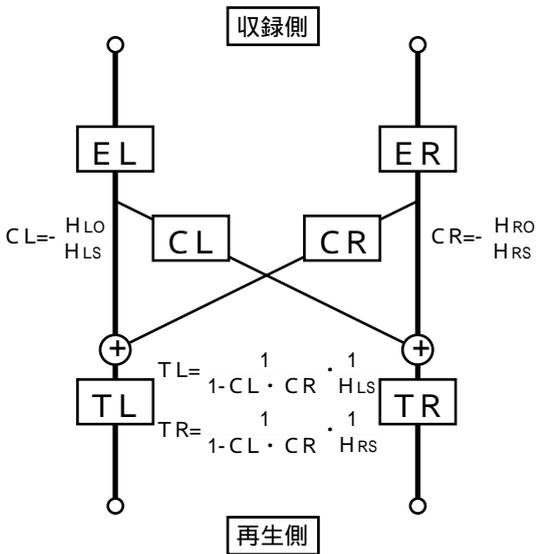


図-4 OSSネットワーク

6つのフィルタから4つの計算用の係数を算出する過程でフィルタの帯域制限等を加える。ただし、補正を行わない場合のELとERは1(単位行列)を与える。

$$LL = TL \cdot EL$$

$$LR = TR \cdot CL \cdot EL$$

$$RL = TL \cdot CR \cdot ER$$

$$RR = TR \cdot ER$$

ここで得られた4つの係数(LL、LR、RL、RR)はそ

れぞれ、左スピーカから左耳、左スピーカから右耳などへの逆フィルタとして機能する。これらのフィルタを通し、収録音源またはバイノーラル音源を再生することで、空間におけるバイノーラル再生系が実現できる。

しかしながら、頭部伝達関数の計測方法や帯域制限などは、画一的な作業ができず、試行錯誤が必要である。そして、最終的な判断は人の聴感で行うため、判断基準となる音源は分かり易さが求められる。本研究では、片チャンネル毎のホワイトノイズを、OSSネットワークで処理し再生することで、音色やキャンセリングの効果などを確かめた。

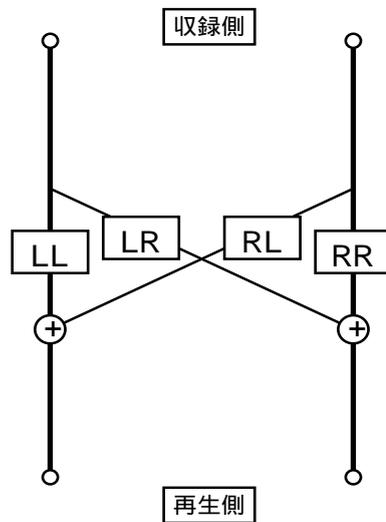


図-5 計算用OSSネットワーク

2.4 再生部分

プレゼンテーションに必要な計算は解析部分で終わっているため、再生部分は市販のスピーカやレコーダ類で構成している。スピーカは、頭部伝達関数の計測にも影響することから、フラットな特性が得られるものを選択している(写真-2)。



写真-2 再生用スピーカ

3. 響きの再現性検証

3.1 収録音源の再生

このシステムを利用してゆく上で、システム全体の能力を把握しておく必要がある。ここでは、実空間における収録音源がどこまで正確に再現できるかを検証した。評価のパラメータは、響きを表す残響時間と初期残響時間(EDT)、明瞭性を表すD値で検証を行った。

検証に使用した部屋は約400m<sup>2</sup>(天井高さ約3m)の空間で、家具等はなく、比較的音が響く空間である。

各中心周波数の残響時間(図-6)と初期残響時間(図-7)からは125Hzを除き、実音場の特性を十分再現しているといえる。特に聴感上の響きを左右する初期残響時間が一致していることから、同様の残響時間を有する空間の響きを再現し、評価できるところがわかる。125Hzで残響時間に約0.4秒の誤差があるが、この原因として、OSSネットワーク設計時の低音域帯域制限を120Hz付近から設定していることと、残響時間をインパルス応答から算出しているため、暗騒音の影響(S/N比の関係)で収束性が悪かったことが挙げられる。

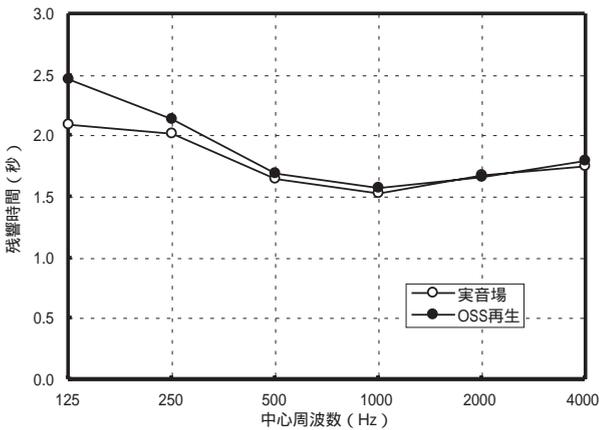


図-6 残響時間計測結果

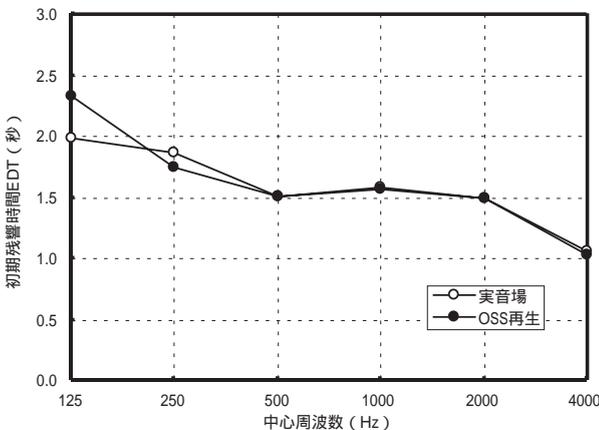


図-7 初期残響時間計測結果

明瞭性を評価するD値(図-8)では、残響時間と同様、低音域に誤差が見られる。他の周波数域ではほぼ一致し、アナウンスなどの人の声が500Hzから1000Hzであることを考慮すると、実用上の問題は無いと考えられる。

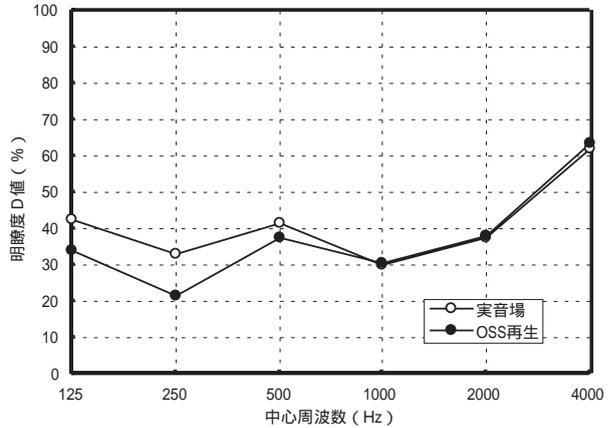


図-8 明瞭度計測結果

3.2 響きの少ない収録音源の再生

一般に響きの調整を行う場合、残響時間を短くするために吸音処理を行うことが多い。このシステムも響きの少ない空間の再現ができることが求められる。検証方法は3.1の場合と同様である。

検証に使用した部屋は、約30m<sup>2</sup>の簡易的なリスニングルームで、500Hzの残響時間が0.25秒の部屋である。

残響時間(図-9)と初期残響時間(図-10)をみると、低音域で誤差が大きい。また、全体的な傾向として、実音場より残響時間が長くなる傾向にある。この原因として、再生する部屋の残響成分が再生音に影響したことが挙げられる。この誤差を少なくする方法として、再生音場の残響時間を短くするか、OSSネットワーク設計時に、再生音場の特性を組み込んで処理を行うことが考えられる。ただし、この差が感覚的に判断できるか

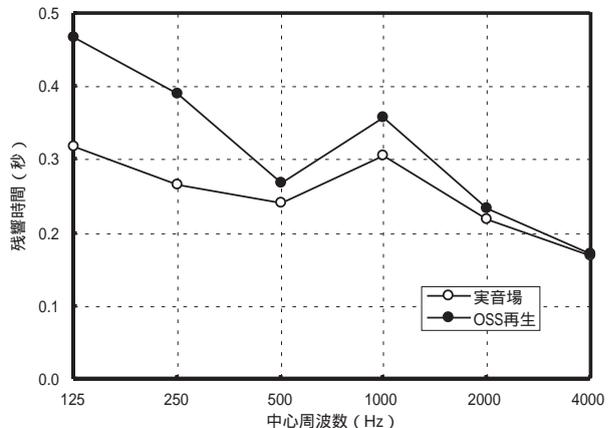


図-9 残響時間計測結果

については検討の余地を残すとともに、今後定量的な把握が必要であると考えられる。

明瞭度(図-11)は、元々響きの少ない空間の計測であるため、非常に高い値を示すが、OSS再生の場合には残響時間が長くなることにより、直接音と残響音のエネルギー比から算出する明瞭度(D値)は逆に低くなる傾向にある。

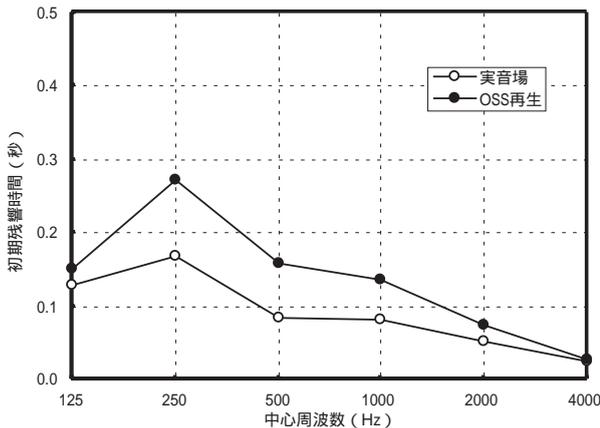


図-10 初期残響時間計測結果

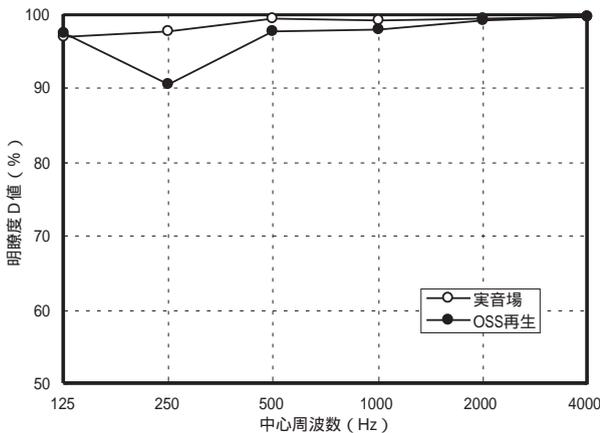


図-11 明瞭度計測結果

### 3.3 解析音場の再生

本システムは、幾何音響解析で求めた音線から仮想空間の音を合成することができる。ここでは某多目的ホールをモデルにして、音響解析で得られた残響時間と、OSS再生で得られる残響時間の相関について検証を行った。

解析から得られる残響時間は空間平均の値とし、OSS再生は、受音点を客席中央で、各周波数の短音を受音点のインパルス応答と畳み込んだ後、再生された音から残響時間を求めた。ここで、OSS再生が2チャンネルであるのと、再生される音にクロストークキャンセルの逆位相成分が含まれることから、再生音の収録にはダ

ミーヘッドマイクロフォンを用い、左右それぞれの残響時間を算出し、平均したものを再生音の残響時間とした。図-12に解析モデルを、図-13に解析で得られたエコーパターンを示す。

検討結果(図-14)から、低音域で若干のばらつきがあるものの、解析と再生音の残響時間がほぼ一致することがわかる。これは、解析結果を忠実に再生することができる反面、解析の精度が再生音の確からしさを左右することにつながり、解析モデルの作成段階での様々な検討が不可欠なことを意味する。

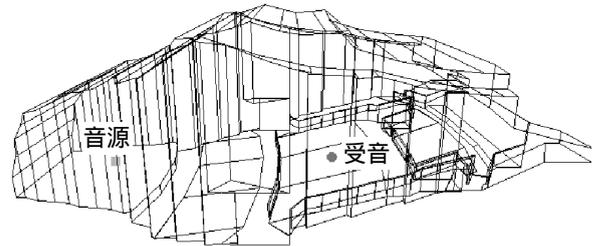


図-12 某多目的ホールの解析モデル

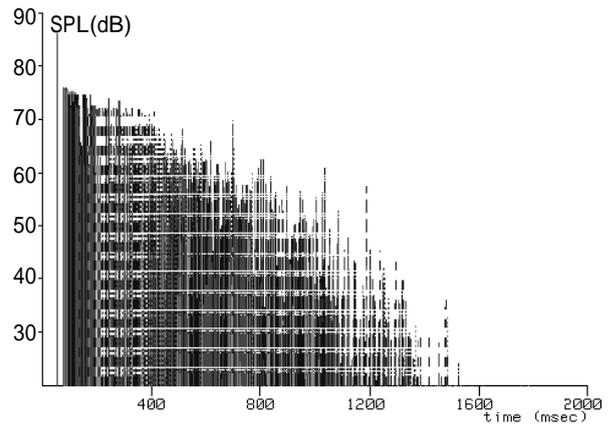


図-13 解析結果から得られたエコーパターン

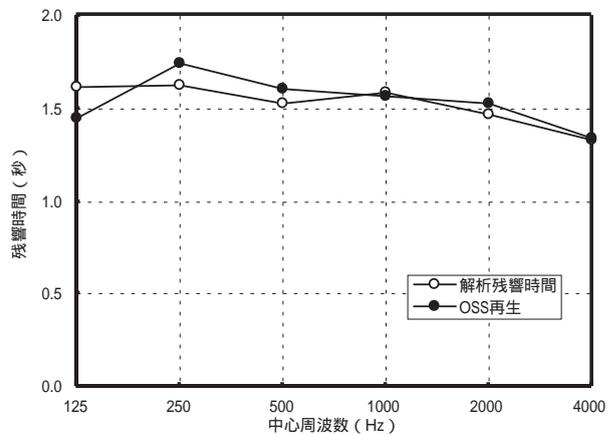


図-14 解析とOSS再生の残響時間比較

4. 方向定位の検証

4.1 実音場収録の音源

本システムの再生部分は2スピーカで3次元の立体音場が得られるようにOSSネットワークを介して音の再現を行っている。ここでは、横や後ろといったスピーカの向きとは関係無い方向からの音を判別できるかどうかの検証を行った。

実験は、図-15に示す位置にスピーカを配置し、被験者を中央に座らせてOSSネットワークを介して再生した音がどの位置から聞こえるかを番号または指を指して回答してもらった。被験者は、成人の男女8名で、実験は比較的響きの少ないリスニングルームで行った。音源には楽音（オペラ：フィガロの結婚序曲）を用い、再生はランダムに10回行い、計80個の回答から比率を算出した。実際の使用状態を想定して、事前の音の呈示などは行わなかった。

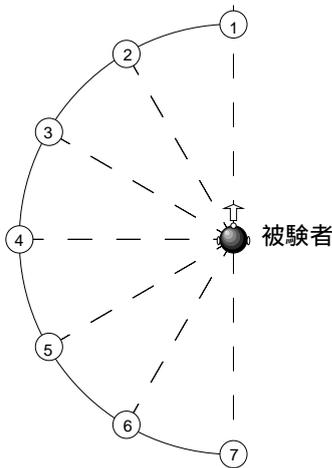


図-15 スピーカ配置

実験を行った8名の結果をもとに、再生した音の方向を音源方向、被験者が回答した方向を映像方向として、その回答比率を円の大きさを示したものが図-16である。

実験結果のうち、音源方向4番から6番では、音源方向と映像方向が一致しないことが多い。そのなかで、5番および6番の音源に対しては、前後の対象位置となる3番、2番と回答するケースが多く見られた。

一般に人間の聴感覚は、正面より側方が低いいため、隣接する映像位置を回答した場合は、聴感覚の曖昧さが原因であると考えられる。また、5番と6番に見られるような前後方向への映像の逆転や距離感の不足は、ダミーヘッドマイクロホンで収録された音の再生（バイノーラル再生）でしばしば報告されている<sup>3)</sup>。主な原因は頭部伝達関数の違いによるものとされている。今回の実験で

も被験者の頭部伝達関数は使用せず、成人の平均値として製作されているダミーヘッドマイクロホンのものを用いていることから、同様の原因であると推測できる。しかしながら、システムを利用する人の全員について、あらかじめ頭部伝達関数を測定することは困難なため、川浦<sup>3)</sup>は動的な頭部伝達関数などを模擬することにより解決を試みた。また、山口<sup>4)</sup>は被験者の正面入射特性に注目し、4つの大きなパターンに分類し、頭部伝達関数に補正を加えることで、音像定位の精度を向上させている。

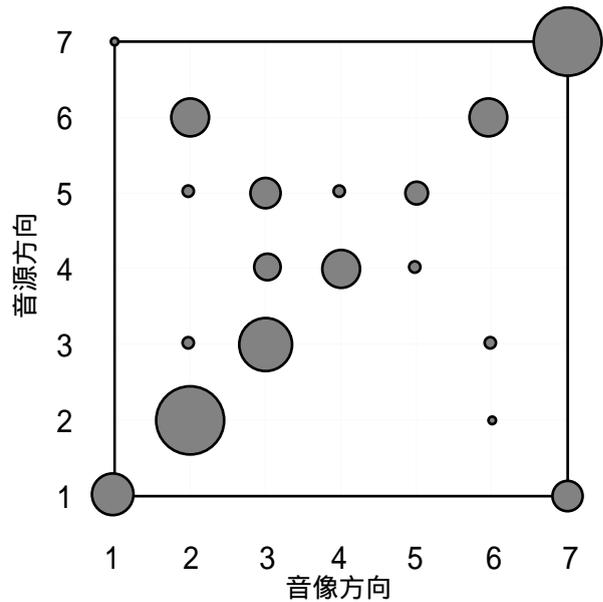


図-16 方向定位実験結果

今回の実験では、前後方向への映像の逆転は全体の約18%であった。また、多くの音源方向に対して逆転現象が見られた被験者の頭部伝達関数を用いて補正を加え、同様の実験を行った場合では、一部の被験者に映像定位の改善が見られたものの、全体として約40%のエラーが生じた。現在のところ、このような現象に対して、正確に映像を定位させるためには、全員もしくは複数の頭部伝達関数や正面入射特性の補正が必要であると考えられる。

本システムの目的や利用を考えると、複数の頭部伝達関数を使用することは有効ではない。頭部伝達関数はスピーカ位置などと密接に関係していることから、逆転現象を中心に今後も検討を加えて行き、エラー率を下げる事が今後の課題となる。

今回の検討は静的な頭部伝達関数のみで、実験したが、この頭部伝達関数のみでも、動きのある音源に対しては比較的映像の定位がはっきりしている。これは、川浦<sup>3)</sup>の動的頭部伝達関数による映像定位の改善と同様の現象が起きているものと予想される。

4.2 解析音場の音源

解析音場の音源位置は、基本的には正面方向である。そのため、再生の際に正面方向の定位が重要で、少なくとも空間内の音源位置を特定できるものでなければならない。

解析音場の再生では、前掲の頭部伝達関数の問題よりも、解析時の反射音線本数や直接音と反射音のエネルギー比に影響する機会が多い。特に音線本数は、音像定位に重要で、音源に近い受音点ほど多くの音線を必要とした。また、音源と受音点の距離感という点では、直接音の音圧レベルが作用し、直接音と全エネルギーとの比率で表される反射音線を用いる場合には、バイノーラルデータ作成時の補正が必要となる。

5. 小型化の検討

これまで、各種検討を行ってきたが、2スピーカーというメリットを活かして、持ち運びが容易なシステムの検討を行った。スピーカーの小型化に際しては、以下の要求項目と問題点がある。

- 要求される性能 -
  - ・ 持ち運びが容易であること
  - ・ 周波数特性が平坦であること
  - ・ 頭部伝達関数の作成が容易であること
- 問題点 -
  - ・ 低域限界周波数の上昇
  - ・ 指向性の増加

今回選定した小型スピーカーは、10cmのフルレンジとポートを有するものである。標準スピーカーとの仕様比較を表-1に示す。

表-1 スピーカー仕様比較

	標準スピーカー	小型スピーカー
メーカー	JBL	JBL
型番	4425	CM40
スピーカー径	300mm	100mm
形式	2ウェイブックシェルフ	フルレンジブックシェルフ
許容入力(RMS)	200W	75W
出力音圧レベル(1W/1m)	91dB	87dB
周波数特性	40Hz~16KHz	70Hz~16KHz
寸法(W×H×D)	406×635×375mm	147×225×140mm
重量	2.6Kg	2Kg

2つの問題点のうち、周波数特性については標準スピーカーとほぼ同様の性能が得られる。スピーカーの仕様では、低域の限界周波数が30Hz程度高くなるものの、OSSネットワーク作成の段階で低域の帯域制限を120Hzに設定することにより、図-17に示すように同様のフィルタ特性を得ている。

指向性の問題については、聴感上も標準スピーカーと比較して指向性が強いことが容易に判断できる。指向性が強くなったことにより、頭部位置のずれによる聴感上の変化が大きくなることが予想される。

この問題を解決する方法として、聴受者から見たスピーカー径の見かけの大きさを合致させることを試みた。この方法を用いると聴受者頭部とスピーカーの位置が標準で約1.5mであったものが、小型スピーカーでは50cmとなる。ところが、スピーカー位置が近くなったことにより、ヘッドフォンによる再生(バイノーラル再生)でみられるような、音像が頭部内に定位してしまう現象が発生した。特に前方の音源に対してその傾向が強く、スピーカー位置を角度で10度浅く、距離を10cm後方に移動することにより調整を行った。

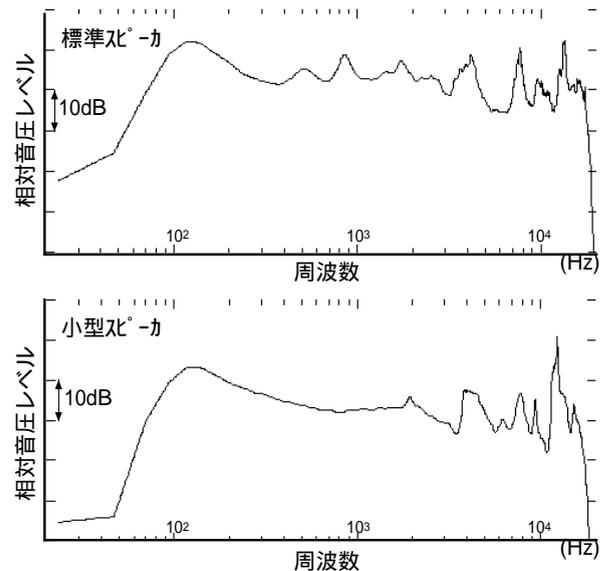


図-17 両スピーカーのOSSネットワーク係数周波数特性(右スピーカーから右耳への特性)



写真-3 小型スピーカーと標準スピーカー

6. 実物件への適用事例

本システムの実際の使われ方を検討するため、某大会議室の仕上げ検討への利用を試みた。

利用した空間は約100名を収容する会議室で、講演のほか、映画の上映などの利用が想定されている。この空間において、原設計では、石膏ボード主体の仕上げとなっていたため、残響過多となり、明瞭性が低いと予想された。変更案として、天井および傾斜壁（壁面上部）を吸音処理したものを提案した。

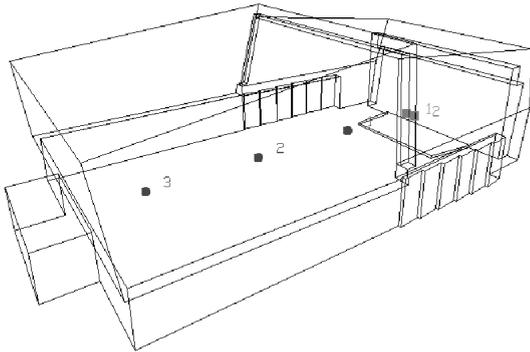


図 - 18 解析モデル

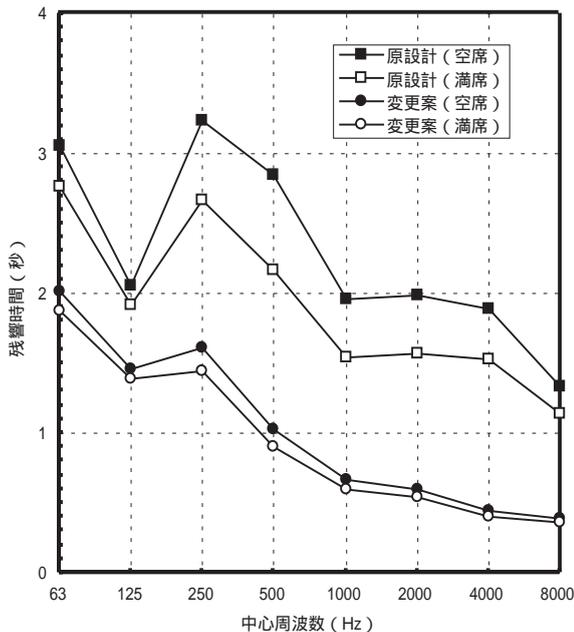


図 - 19 残響時間計算結果

これまでの提案では、図 - 19 に示すような残響時間計算結果と用途、容積から得られる500Hzの最適残響時間などで効果を示していた。そのため、グラフの意味や目標値の妥当性など、専門的な説明が必要であった。この事例では、アナウンスのソース音源と本システムを用い、明瞭性のプレゼンテーションを行った。その結果、原設計と変更案の差を感覚的に表現でき、専門的な説明が無くても、提案内容の主旨や効果が理解された。

今回使用した音源が、アナウンスという非常に分かりやすいソースであったことも、効果が大きかった要因の1つとして挙げられが、従来の数値やグラフによるプレゼンテーションと比較して、本システムは多くの情報を相手に伝えることができ、明快な判断材料を提供できた。また、判断に専門的な知識を必要としない点についても当初目標を実現できた。

7. まとめ

これまでの検討から、本システムの能力や利用方法などを把握することができた。特に、室内音響設計におけるアナウンスの明瞭性などは、プレゼンテーションとしての効果が高く、今後、多目的ホールをはじめ、体育館や室内運動場などへの利用が期待される。また、実収録音源の再生、解析結果との音場合成について、一般的な空間については、整合性を確認でき、少なくとも本システム内の系では、誤差範囲や精度向上のための着目点が把握できた。

その一方で、解析モデルの作成方法や方向定位の問題が残されており、更なる検討が必要である。

今後、上記問題を引き続き検討して行くとともに、遮音等にも応用できるようにシステムを充実させてゆく所存である。

謝辞

本システムの開発にあたりご協力頂いた、日東紡音響エンジニアリング(株)の堤正利、大山宏、小林照二の各氏に敬意を表します。また、社内および社外にわたり、実験や実測にご協力頂いた関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 渡辺充敏・木村翔・山口順・平野滋：OSSを用いた音場合成のための残響音付加手法の検討、日本建築学会計画系論文集、第503号、pp.9~15、1998
- 2) 浜田晴夫：基準的集音・再生を目的とするOrthostereophonic Systemの構成、日本音響学会誌、39巻、5号、pp.337~348、1983
- 3) 川浦淳一・鈴木陽一・浅野太・曾根敏夫：頭部伝達関数の模擬によるヘッドホン再生音像定位、日本音響学会誌、45巻、10号、pp.756~766、1989
- 4) 山口順・木村翔・渡辺充敏・平野滋：頭部近傍に設置したスピーカによる音場再生手法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp.211~212、1996