

視覚化による室内音響設計支援システムの開発

坪井 政 義 池 上 雅 之
平 野 滋 表 佑太郎

Development of a Visible Sound Simulation System for Room Acoustic Design

Masayoshi Tsuboi Masayuki Ikegami
Shigeru Hirano Yutaro Omote

Abstract

For room acoustic design the authors carried out development of both software, HARP, for numerical simulation of room acoustics by supercomputer and a system of audible and visible sound simulation from predictions of sound fields.

This paper describes a part of the abovementioned system, both supporting software for editing three-dimensional room configuration data and a visible sound simulation system for acoustic design speed by Engineering Workstation improving three-dimensional graphic performance.

In the visible sound simulation system, picking up a reflected sound arriving at the sound receiving point by cursor, indications are obtained of the image sound source location of the reflective surface, and the path of the selected sound. Comparisons of visible sound fields according to hall size and configuration can be shown using the visible system.

概 要

室内音響設計段階で室内音場を検討するために、スーパーコンピュータでの音場解析ソフト HARP と予測音場計算結果の視覚化システムとを既に研究開発し実用化しているが、ここでは、この中の要素技術の一つである室内形状等の入力データ作成支援と音場の予測計算結果の分かりやすい表示を目的とする対話型の視覚化システムについて報告する。最近の3次元グラフィック性能が向上したEWSを用いて、より迅速に音響検討が行えるように、計算結果から3次元での反射音分布（あたかもその方向のある位置から音が発生していると感じる虚音源分布等）を表示したり、受音点へ到達する任意の反射音をカーソルにて選択すると、その反射音の反射面、経路、虚音源等の音響情報を瞬時に表示するシステムを新たに開発した。このシステムの有効性をホールの形状、大きさ（規模）により、どのように音場が変わるかを視覚化して比較検討した一例で示す。

1. はじめに

従来からのハードに依存したベクトル化によるスーパーコンピュータに加え、複数のCPU（中央演算装置）を使った並列コンピュータ等のソフト、ハード両面からの発展により、コンピュータの演算能力は飛躍的に向上しつつあり、演算コストも急速に低下しつつある。

また、グラフィックワークステーション（GWS）に代表される3次元グラフィック機能や立体視などの可視化技術も充実し、パソコンクラスまで普及しつつある。

これらにより、従来まで実験に頼っていた物理現象の把握をコンピュータシミュレーションにより行う計算力学という一大分野が形成され発展してきている。風の流れるように人間やセンサーが観測点に直接入ると場を乱すために、実験では観測が困難なものや、直接目で見えない微小現象でも、計算シミュレーションとヴァーチャルリアリティー（VR）との技法を使って直接仮想体験す

ることができる。また、様々な条件に入力データを変えるだけですぐ対応できることでは、実験よりも優れている。

建築音響設計でも従来からの音響模型実験に加えて設計に迅速に対応できるように、室内音響シミュレーションが、有効な設計支援手法の一つになってきている。

当社では、コンピュータを使って迅速に音響設計ができるように、スーパーコンピュータでの音響解析ソフト HARP と音場予測計算結果の視覚化システムとを既に研究開発し、室内音響設計支援システムとして実用化している。

理想的な室内音響設計支援システムとして考えた場合には、これら計算結果の視覚化に音場の評価手法を含めた対話型のシステムが望まれるが、音場の評価手法については客観的な方法がまだ確立されておらず、音響設計者の経験に頼っているのが現状である。

そこで、本報告では客観的でない音場の評価には言及せずに、この中の構成システムの一つであり客観的に音響設計者に判断材料を提供できる、音場予測計算結果をEWSを用いて対話型で分析して視覚化するシステムを中心に、各形状ごとのオーディトリウムと比較事例を通して、このシステムの音響設計における有効性を示す。

2. 室内音響設計支援システムの全体概要

図一に、『室内音響設計支援システム』全体の流れ図を示す。ハード構成としては、科学技術計算用のスーパーコンピュータ(NEC製SX-3)、データの入出力用のエンジニアリングワークステーション(EWS)、計算結果より仮想音場を創成する信号処理用のEWSで構成され、LAN(ローカルエリアネットワーク)で接続されている。機能別には、データの入力部、解析演算部、解析結果表示部の三つに大きく分けられ、解析結果表示部は更に視覚的に表現する『音響情報の可視化システム』と聴覚的に表現する『立体音場合成システム』とに分かれている。

2.1 視覚化による3次元室内形状データ作成支援

室内音響シミュレーションを行うためには、まず3次元の室内形状データ(以下、室形データと略す)を作成して、それぞれの面に吸音率などの音響物理特性データを割り当てる必要がある。

室形データの入力方法としては、デザイン設計のCADデータを流用することも可能だが、見た目を優先したデータであるために室内形状が完全に閉空間になっていない場合が多く、音響計算データとして使うためには、音響反射に有効な寸法に面を細分割したり統合する等、かなりの追加修正を要する。また、図面からのデジタイザ入力や頂点座標のキー入力も可能だが、実務では音響設計が室内のプロポーショナルなどが確定する前の基本設計段階から関与することから、詳細な図面が無くデザインスケッチ程度の意匠図面から室形データを入力しなければならない。

従って、これらのラフな意匠図面から音響設計者が3次元の頂点座標データを読み取り、室形データとして入力した場合において、面のねじれや面の突き合わせ部分の交線が不正確になる場合が多い。

そこで、データ入力作業の効率化を進め、データの追加、修正などの編集作業を迅速に行うために、室形データ作成支援ソフト『Fast Hall』を開発した。

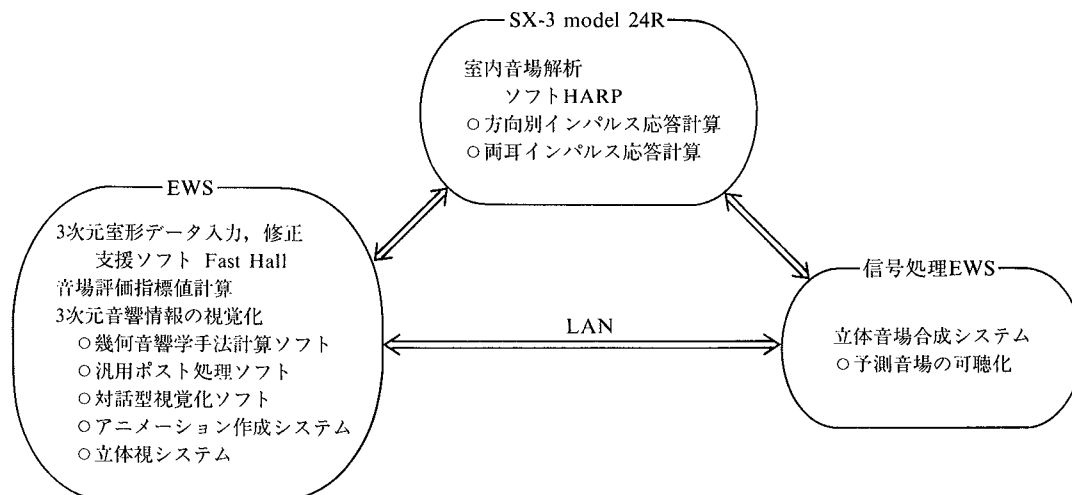
このソフトは、音響設計者が意匠図面から目視によって作成した室形データを読み込み、3次元グラフィックス画面に室内形状モデルを表示するもので、ダイヤルやマウスを使うことで、視点を変えたりモデルの表示サイズを拡大縮小したりして観察できるので、3次元室形データの成否が瞬時に判断可能となる。室内形状モデルでおかしな面があった場合には、その面や線分をマウスでピックアップすることにより、その面や線分を構成する入力データが対話的に表示されるので、迅速にそのデータをエディターで修正できる。

また、室形データの各面に割り当てた吸音率などの音響物理特性データの確認も、仕上げ材料別の色分け表示により、瞬時にデータ割り当ての成否を判断することができる。

2.2 音場計算手法の概要

2.2.1 幾何音響学的手法について 1968年にA. Krokstad 他によって室内音響分野のコンピュータシミュレーションが研究され始めて以来26年、アルゴリズムが確立されており、パーソナルコンピュータでも計算できる手軽さもあって、現在最も多く用いられている手法であり、音線法(Ray tracing method)と虚像法(Image source method)との二つに大別される。

どちらの手法も、音は反射面の寸法や形状に無関係に無限大の面と同じように鏡面反射すると仮定されているので、音場予測精度には限界があるものの、EWSでも演算時間が短く実用的なので、基本設計段階において受音点ごとの検討には虚像法、室内全体のマクロな検討には音線法というように両手法の長所を生かして用いている。



図一 室内音響設計支援システム

基本的な形状を決定する基本設計段階においては、室内形状モデルが比較的ラフで構成面寸法が大きいので、中高音域に限ってこれら手法を適用し、音響情報を視覚化して、舞台上の音響反射板の形状や客席の天井および側壁の形状の検討並びに音の集中現象やエコー等の音響障害の検討をしている。

2.2.2 波動性を考慮した計算法 幾何音響学的手法は、構成面寸法に比べて波長の長くなる低音域に向かうに従って回折等の波動性が考慮されていない分、徐々に誤差が大きくなる。低音域が重要な音場を設計する場合やより詳細な音響設計が必要な場合には、波動性を考慮した計算手法が必要となる。そこで、波長が建築構成面寸法に比べて長く回折等の波動性を無視できない低音域から高音域までの可聴周波数全域が解析できる室内音場の計算法の一つとして波面積分法を研究開発し、室内音場解析ソフト HARP として完成している。

詳細は研究会資料¹⁾に依るとして、計算値と実測値とを比較検討したところ良好な結果が得られている。

2.3 予測音場の視聴覚化システム (AUVIS) 概要

前述の室内音場解析ソフト HARP に加え、地下鉄等の交通機関から発生してビルの構造体を伝わる交通騒音伝搬予測シミュレーション等の騒音防止設計における計算結果も含めた音場解析結果からの視聴覚化システムを開発して、AUVIS (AUdible & VIisible Sound scape) と総称している。これにより予測音場を視聴覚で体験して評価できる。

2.3.1 音場の視覚化システム概要 ソフト面では、音響設計者の希望に近い視覚化表現が迅速にできるように、計算結果を対話型で分析して EWS で音響情報を音響独自の表現で視覚化できるソフトの開発を行い、従来からの汎用ポストプロセッサ (I-DEAS など数種類を使用) と併用している。

ハード面では、時系列上でどの様に音場が変化していくかが良く分かるように、「アニメーション作成システム」が数値解析研究室の GWS に接続されている。また、3次元空間の立体的な音圧などの物理量分布を、両眼での画像データを生成することにより立体的に視覚認識できる「立体視システム」が設置されている。

2.3.2 音場の可聴化 (立体音場合成) システム概要

『立体音場合成システム²⁾』は、音響研究室で開発したもので、方向や臨場感を検知する両耳に忠実に信号を入力する装置である。ハード構成は、予測音場での長時間にわたる楽音の磁気ディスクファイルデータをダイレクトに A/D, D/A できる信号処理用ワークステーション (コンカレント MC-6450) を中心とした位相特性が高精度に保証されているアンプ、スピーカから成り立っており、不要な反射音が無く音場制御の容易な無響室で仮想音場を聴くようになっている。

この装置を使ってシミュレーション (ソフト HARP) で得られた方向や響き具合を表す両耳インパルスレスポンス (時系列応答) に無響音楽 (無響室で演奏した全く

響きの無い音楽) を畳み込み乗算した信号を両耳に忠実に入力して、設計段階でそのホールの音を実際に仮想体験しようとするものである。

4. 音場計算結果からの音響情報の視覚化事例

ここでは、主に基本設計段階において身近な EWS を使い迅速に音響設計者に音響情報を提供できることを目的に開発したソフトでの視覚化事例を中心に述べる。

4.1 音響情報の視覚化での音響検討事例

室内音響設計では、音響反射板や客席天井および側壁の各反射面の角度などの形状を個別に検討して、全体として初期反射音の音圧レベルが舞台と客席にできる限り均一に分布するようにする。この全体とのバランスのとれたベストな状態の形状を探るために、任意の面をマウスでピックアップして選択し、それら反射面から客席への反射音の音圧レベル分布 (サービスエリア) を見て、面の角度や形状を変え試行錯誤しながら音響設計者が検討する。

図-2 に、1,200人収容の多目的ホールモデルでの出画例を示す。この例では舞台上のピンク色の放射線の中心を音源位置とした場合の、舞台上の音響反射板による客席へのサービスエリアを見ている。これでは反射面ごとの反射エリアが明確に分離し表示されるように、舞台上反射板の離れた上部2面を選択して1次反射音のみの音圧分布としたが、舞台奥の面が舞台上をサービスし舞台手前の面が客席前部をサービスしていることが分かる。

音響障害防止設計では、音場予測計算から得られる到達音の時系列で響き具合を表わすエコータイムパターン (ETP) から有害なエコーを発生させる反射音または反射音群を見つけ出し、それらの反射面を特定して、拡散形状にするか、吸音するか等の対策を検討する。

図-3 に同ホール受音点でのエコータイムパターンと音線経路の出画例を示す。エコータイムパターンは横軸に発音からの経過時刻、縦軸に到達音の音圧レベルを表わしているが、エコー等の音響障害を生じる有害な反射音または反射音群をマウスにより選択することにより、

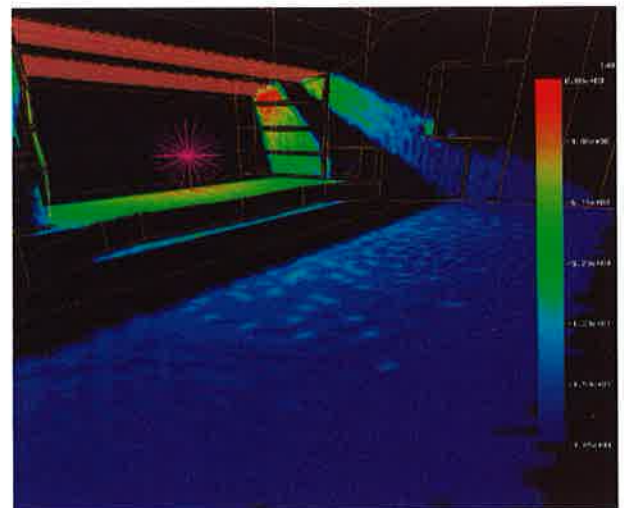


図-2 舞台上音響反射板からの反射音圧分布

それらを発生させる伝搬経路や反射面、後述の虚音源や到来方向などが選択表示される。この例では、朱色の枠内で示される直接音と初期反射音の一部を選択しており、それらの経路が表示されている。

図-4に、同ホール受音点のエコータイムパターンと時々刻々と到達する音の方向と大きさ、経路と反射面、そしてあたかもそちらの方で音が発生しているように聞こえる虚音源の分布などを表示した例を示す。虚音源分布では到達音の大きさを球の大きさ、到達時刻を距離、周波数特性を右下の六角形で示すグレーを基準とした色調で表わしている。音源は前同様のピンク色の球の中心で示す舞台上中央の一点で、受音点は紺色の到達音の方向と大きさを表すハリネズミの中心で示す舞台上音源からおおよそ10mの位置としている（以降の各ホールの計算結果の図は全てこの条件で5次反射まで計算）。

なお、これらの表示では虚音源や経路などの見たい項目の表示スイッチのON/OFFにより、ユーザーが自由に音響情報の出画をコントロールできる。

4.2 舞台上反射板の有無による音響の視覚化比較事例

図-5に、前述の多目的ホールでの演奏会時の舞台上音響反射板の効果について見るために、反射板設置前の虚音源分布とエコータイムパターンを示す。音響反射板を設置した図-4と比較すると、反射板を設置することで反射板近傍に虚音源が多数発生しており、エコータイムパターンで比較しても直接音に続く初期反射音が顕著に多く発生しており、音響反射板の効果分かる。

4.3 異なる形状での音響情報の視覚化比較事例

図-6～8に、以下の3タイプのホールについて室内形状、5次反射までの虚音源分布、エコータイムパターン(ETP)を比較して示す。

- ① ワインヤード型ホール (2,500人収容)
- ② シューボックス型ホール (1,500人収容)
- ③ 拡散型ホール (800人収容)

図-6のワインヤード型ホールは天井が高いので、オーケストラ上部に吊り下げ反射板を設置しているが、エ

コータイムパターンを見ると、各タイプの中で最も規模が大きく反射面までの音の伝搬距離が長いために、直接音に続く初期反射音の到達が他のホールに比べ遅く、初期の到達音密度が少ない。虚音源分布を見ると、上下方向の反射音が多く、吊り下げ反射板や天井や側壁に多用されているボードの反射特性である2kHz周辺の中高音域にピークを持つ反射音が多いことが分かる。

図-7のシューボックス型ホールでは、5次反射までの初期反射成分が比較的 direct 音近傍に集まっており、か

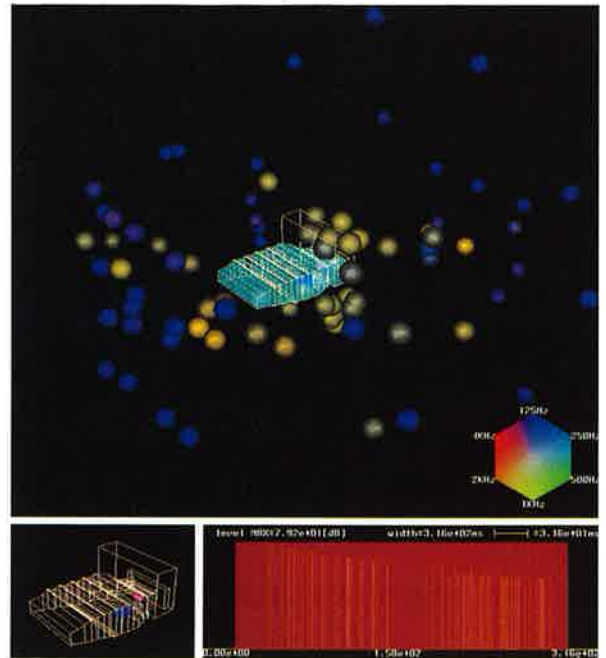


図-4 多目的ホールの虚音源分布と ETP

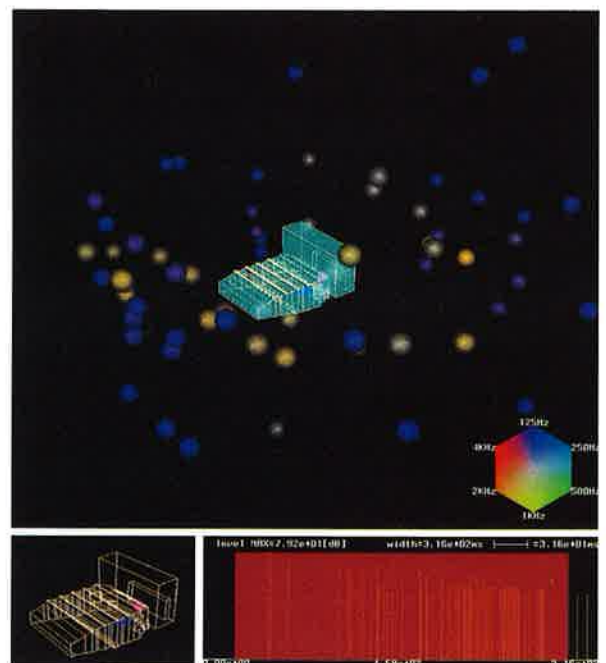


図-5 音響反射板設置前の虚音源分布と ETP

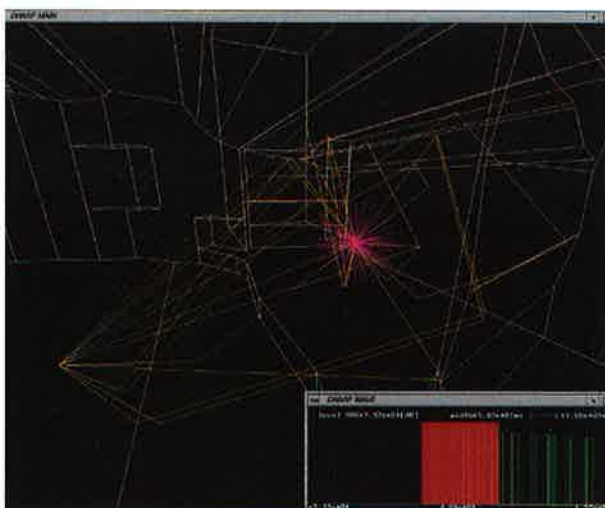


図-3 選択された到達音群の伝搬経路

つ到達音密度が高い。更に高次の反射音まで計算すればより一層到達音密度が高くなると予測される。虚音源分布を見ると、前後左右からの反射音が多く、壁のレンガ下地プラスター仕上げの反射特性である全音域を均一に含む反射音が多いのが分かる。これに続いて低音域の吸音が少ない観客席からの反射特性である低音域にピークを持つ反射音が多いことが分かる。これらより初期反射音の密度が高く側方反射音成分も多いことから、一般にクラシックのコンサートホールはシューボックス型が良

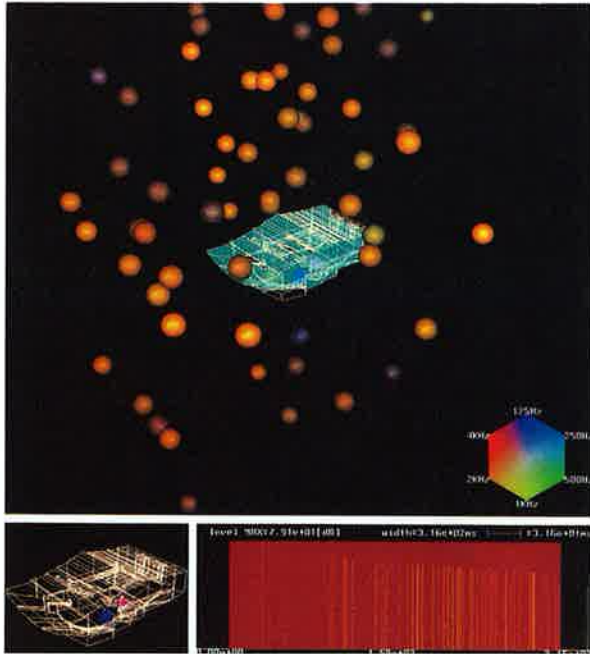


図-6 ワインヤード型ホールの虚音源分布

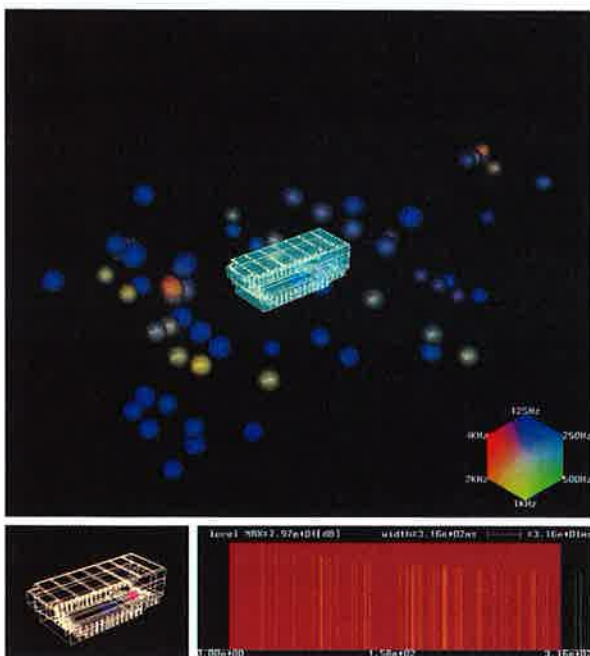


図-7 シューボックス型ホールの虚音源分布

いとされているのを裏付けている。

図-8の拡散型ホールは、音場分布の拡散を意図して反射面として有効な寸法を持つように室内形状の構成面を設計し、かつ音響パワーから考えて適正な音圧が得られる規模に抑えたため、最も到達音密度が高くなっている。虚音源分布を見ると、受音点近傍に数多くのグレーに近い色があり全音域を均一に含む反射音が多いのが分かる。これに続いて前同様に低音域の吸音が少ない観客席からの反射特性である低音域にピークを持つ反射音が多いことが分かる。天井がボード仕上げであるため中高音域にピークを持つ反射音も見られる。

4.4 イベントホールでの音響情報の視覚化比較事例

本来は目に見えない音の波頭面伝搬の様子を可視化することで音の現象が大変分かりやすくなることがある。

図-9に屋根面が上に曲面の膜構造で、かつ平面形がだ円である音の集中が起こりやすいドーム型イベントホールにおいて、展示会を行うためにパーティションを設置することによって音の集中現象が緩和されるのをパーティション設置前後で比較検討するために視覚化した事例を示す。音の波頭面を粒子で表わし、反射回数で赤、オレンジ、黄色、緑と変化させている。計算は3次元で行ったが、ここでは屋根面を取り去って上から見た図で示す。

音の集中が顕著に現れるだ円の二つある片方の右側中心から音を発生させた場合で比較した。空室時のホールでは、音の発生から 80 msec, 110 msec, 130 msec と時間が経過するともう一方のだ円の左側中心付近に音の集中が起こるのが分かる。パーティションを設置すると、パーティションによって音が適度に拡散反射されて音の集中が起こらないのが分かる。

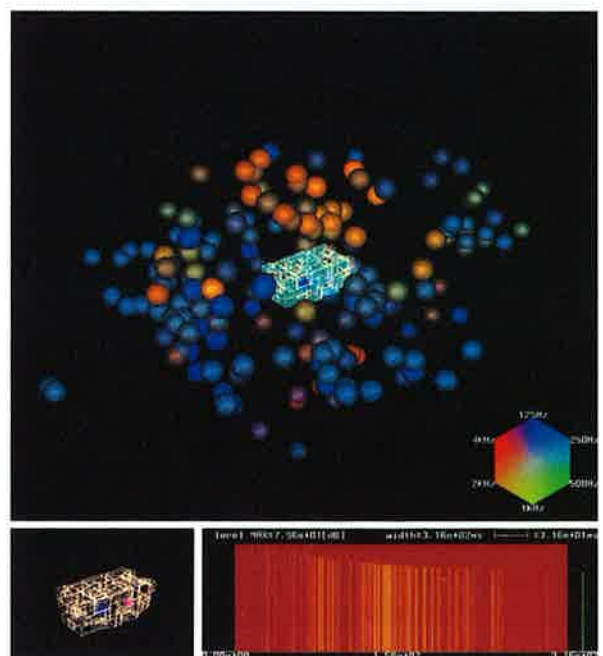


図-8 拡散型ホールの虚音源分布

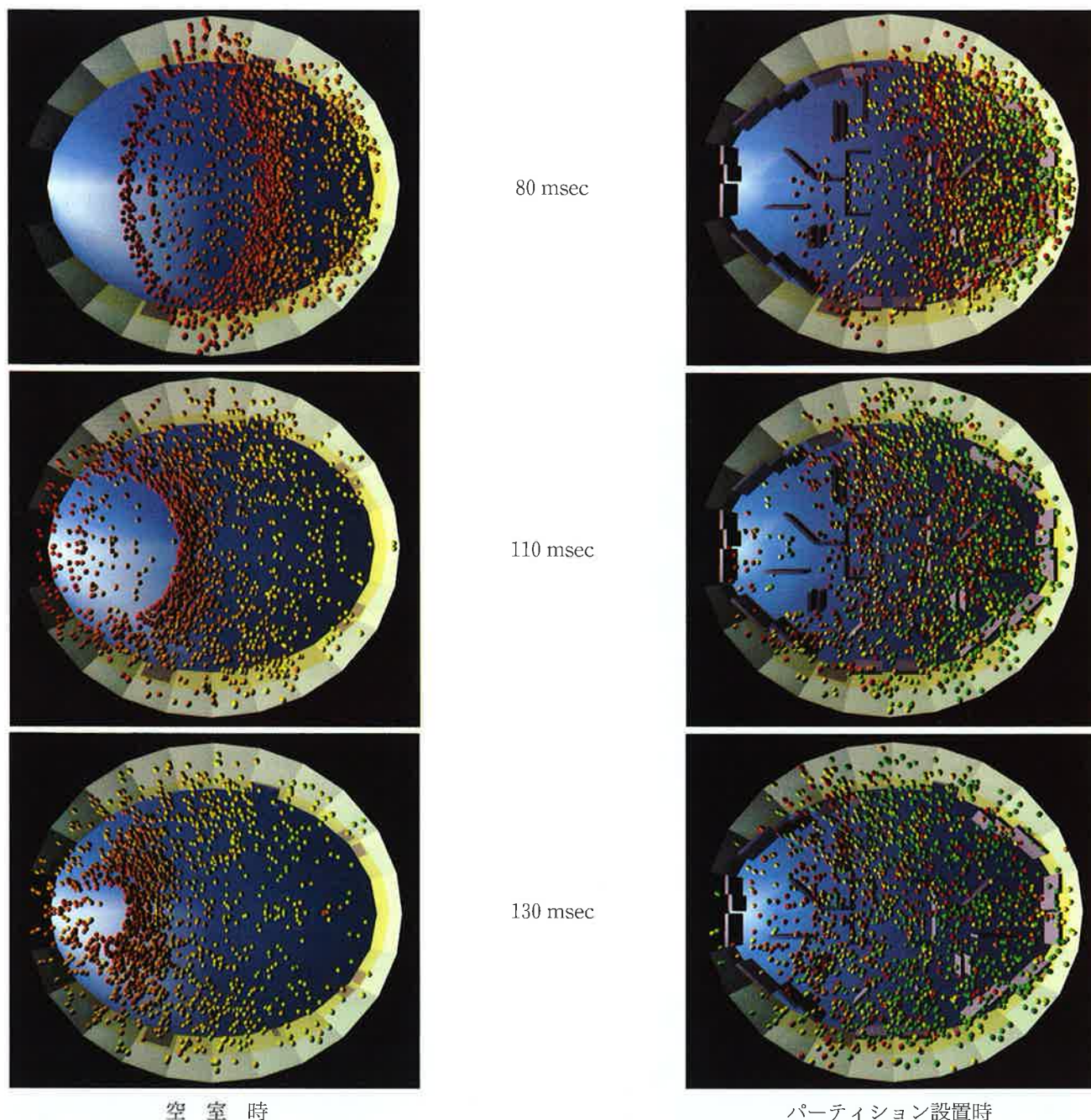


図-9 だ円形イベントホールのパーティションによる音の集中防止効果

5. おわりに

以上、基本設計段階で音響設計を支援する目的で開発したEWSでの音響情報の視覚化ソフトを使って各形状のホールを比較してきた。これにより、音場予測計算結果から数値として理解するのはなかなか困難な音響評価指標値の基となる様々な音響情報を、任意に取り出して適切に分かりやすく視覚化することにより、音響設計者に重要な判断材料を提供できることがわかった。

今後は、この音響情報の視覚化によって、ホールの形状や仕上げ材の違いによってどのように音場が変わるかを立体音場合成システムによる仮想音場の聴感評価も併

用しながら更に調査研究して、ホール形状と音場との関連を音響設計のノウハウとしてデータベース化していきたい。これにより、設計者や施主の要望する多様で个性的な音場を設計支援できるようになると考える。

参考文献

- 1) 坪井政義, 他: 室内音場の長時間インパルス応答予測計算手法について, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA92-28 (1992, 11, 30~12, 1)
- 2) 渡辺充敏, 他: OSSを用いた音場合成システムの開発, 日本建築学会大会講演梗概集, p. 221~222 (1992)