



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	室内音場のシミュレーションと可聴化( fulltext )
Author(s)	田畑, 智史; 植松, 晴子; 鶴, 秀生
Citation	東京学芸大学紀要. 自然科学系, 60: 1-7
Issue Date	2008-09-28
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2309/91027">http://hdl.handle.net/2309/91027</a>
Publisher	東京学芸大学紀要出版委員会
Rights	

## 室内音場のシミュレーションと可聴化

田畑 智史\*・植松 晴子\*・鶴 秀生\*\*

物理科学分野

(2008年5月26日受理)

TABATA, S., UEMATSU, H. and TSURU, H.: Simulation of sound field in acoustics and its auralization. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Natur. Sci., 60: 1 - 7. (2008) ISSN 1880-4330

### Abstract

Simulation of the acoustic field using the current information technology has become a practical method of analyses of acoustics. In the present study, we show that it is possible to speed up such simulation by combining geometrical acoustic and wave acoustic techniques, where the former technique is known to give an approximate solution quickly, while the latter gives an exact solution, but requires much more calculation. In addition, we could recognize the difference of the calculation results as sounds by convolving the results into a sound source. The simulation of the acoustics was done on the art hall, Tokyo Gakugei University, Tokyo, Japan.

Key words: geometric acoustics, auralization, convolution

Department of Physics, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan

**要旨:** 近年のコンピューターの進化と計算方法の工夫により、音響シミュレーションは計算速度の面において実用的な音響解析の方法となってきた。近似解ではあるが計算量の少ない幾何音響的な手法、厳密解が得られるが計算量の多い波動音響的な手法を組み合わせることによって、ある程度の精度を保ちながら計算の高速化を行った。また、そこで得られた結果を音源に畳み込むことによって計算結果の可聴化を行った。シミュレーションの対象は、東京学芸大学の芸術館ホールである。

### 1. はじめに

1日 を無音で過ごす日というのはまずないだろう。しかし身の回りにある建築物について音響を考慮して設計されているものは少ないように思われる。音響というとコンサートホールなどの音楽や歌劇が行われる場所以外ではあまり関心をもたれにくい。しかしそのような特別

な場所以外で音響を考えることにも意味がある。たとえば会議室や教室において、音響を考えた設計を行うことにより声の明瞭度が増し、会議や授業の効率がよくなったり、喫茶店やレストランでは他人のしゃべり声を気にせず友人と話しをしたり、自分の時間を快適に過ごすことが出来たり、といった利点がある。設計の段階で効率よく音響を考慮するためには音響のシミュレーション

\* 東京学芸大学物理科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)  
\*\* (株)日東紡音響エンジニアリング (130-0021 東京都墨田区緑 1-21-10)

を行うことが有効である。

音響のシミュレーションの方法としてはまずその建物と同じ大きさの建物を建てる方法があるが、それは時間と費用がかかり本末転倒な行為である。スモールスケールの模型を作って行うのも実物ほどではないにしろ時間と費用がかかる。そこで理論計算の方法としてコンピューターによる数値計算が簡易で安価な方法として挙げられる。この方法は厳密さという面では前者の方法には劣るが、比較的安易で低予算に行うことができる。また近年のコンピューターの発達により計算速度も向上しており、時間の面でも問題はなくなりつつある。簡単な条件の下でシミュレーションを行う場合には、厳密解が得られるため音の波動性を考慮した計算方法を用いる。しかしすこし形が複雑になると莫大な時間がかかり、実際の建物の形についてのシミュレーションとしては実用的でない。そこで本研究では音の波動性を無視し、粒子性に着目して幾何的に計算する近似解法を工夫することによってその計算の効率化を図り、その結果の有用性を検討した。

## 2. 方法

シミュレーションの対象として東京学芸大学（東京都小金井市）内の施設である芸術館ホール（以下芸術館と呼ぶ）を使用した。計算には室内音響設計支援ソフトウェア「RIMAGE」（日東紡音響エンジニアリング株式会社、東京都墨田区）を用いた。「RIMAGE」は音の伝達経路を波動音響的な手法である虚像法と、幾何音響学的手法である音線法と呼ばれる二つの方法を巧みに組み合わせることによって計算の効率化を図っている<sup>1)</sup>。以下使用する手順を追って簡単に説明する。

最初にシミュレーションする対象の建物（芸術館）の形状データを入力する。データは東京学芸大学施設マネジメント部保全課より入手できたため、それを基に作成した。形状データを画像化したものが図1である。表面に多数の凹凸があり反射経路を分散させるための工夫がなされているのがわかる。ここで比較のために表面の凹凸がないほぼ同体積の箱型の架空の建物（以下箱型と呼ぶ）のデータを用意した。その形状データを画像化したものが図2である。

次に建物の反射面に当たる壁や床といった部分の素材のデータを入力する。これも形状データと同様に図面を基にした。素材の反射にかかわるデータである吸音率については、木村翔<sup>2)</sup>のデータを参照した。最後に音の発音点、受音点を設定した。計算対象がホールなので、発音点はステージ上、受音点は客席上にそれぞれ10箇所

ずつ設けた。それぞれの位置関係については図3に示す。

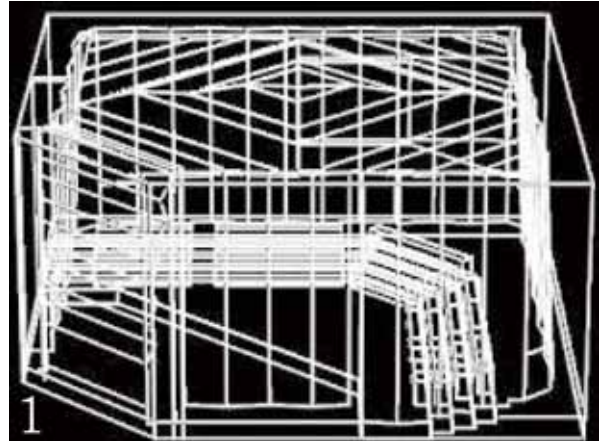


図1 芸術館形状データの画像イメージ。天井、壁面の凸凹が特徴的な建物である。

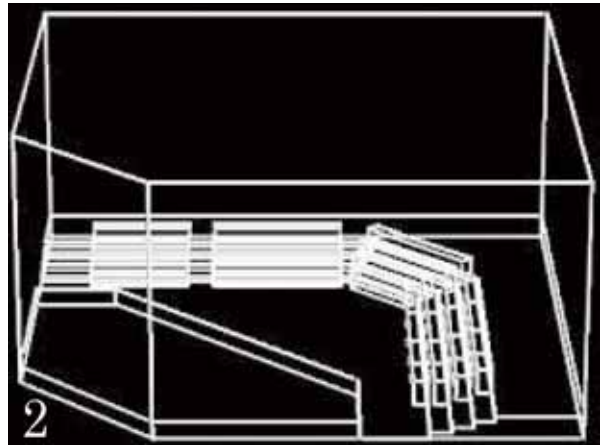


図2 芸術館を元にした箱型の建物の形状データの画像イメージ。構造による音の伝達経路を比較するために、芸術館の特徴である凸凹を取り除いたものである。



図3 発音、受音点の対応表。客席側に受音点、舞台側に発音点を設定し図のように番号を振った。

これらのデータを用いることにより、音の伝達経路とインパルス応答を求めることができる。ここで言うインパルス応答とは、パルスに対する直接音と反射音の重ね合わせである物理指標のことである。

### 3. 結果および考察

ここで受音点、発音点についてはそれぞれ $r, s$ で表し、図3の数字をそれぞれ添えることでその点を表す。そしてたとえば客席の中央前列 $r_1$ へのステージ正面の中央前列 $s_1$ からの音の経路を $r_1s_1$ などと表す。

以下音の伝達経路とインパルス応答に変化を及ぼすと考えられる建物の構造、建物の素材、発音点、受音点の位置について、それぞれの条件を変化させて比較を行った結果を示す。

#### 3. 1 建物の構造による変化

芸術館と箱型について、伝達経路を詳しく検証する。計算には40回反射までを取り入れたが、5回反射までの比較的反射回数の少ない経路を追って比較する。それぞれの構造、反射回数についての伝達経路は図4a,b～9a,bに示す。

芸術館型のほうが箱型よりも反射経路が多様になっていることがわかる。音の伝達経路の偏りは反射音の到達時間の偏りにつながり、エコー障害などの明瞭さを欠く大きな原因になる。

40回反射の計算結果をみると建物全体に音が十分満ちているために40回反射まで考慮して計算すれば十分なデータが得られることがわかる。また反射回数が多くなるほど、その反射音がインパルス応答に与える影響が小さいこともわかる。40回反射までの結果は図10a,bに示す。

次にインパルス応答の波形で比較を行なう。構造のみの変化を見るために、素材はすべて音を完全に反射するものとして計算した。波形の減衰の様子を見ると、箱型の建物については0.1～0.25秒付近に音の偏りの影響が見られる。この偏りの間隔が大きいとそれぞれの音が独立しいくつもの音が重なったように聞こえるため、箱型の建物のほうが音の明瞭さを欠くと予想される。

#### 3. 2 建物の素材による変化

前述の芸術館型の形状データに素材のデータを入れたもので計算を行い比較する。芸術館は1983年に壁面に反射材をまだらに張り増している。それは、これによって全面の張り変えよりコストを削減しつつホール内で適切な残響時間を得ようとしたものだと考えられる。改修

前後のデータを利用して素材によるインパルス応答の変化を比較する。その結果を図11a,bに示す。インパルス応答による比較のみを行なうのは、反射経路が素材によらないためである。改修前後の素材データを考慮したインパルス応答の波形は図12a,bに示す。

二つとも波形の減衰の様子が、素材が全反射のときの図11a,bにくらべ全体的に小さくなっているのがわかる。両者の違いとしては波形の末端に着目すると改修後のほうが、減衰がより滑らかになっていることがわかる。

#### 3. 3 受音点、発音点の位置の変化

ここでは経路の違いによる変化のみに着目するため、形状を芸術館型、素材を改修後の素材データを用いて、伝達経路は経路の偏りを見るのに程よいと思われる3回反射に固定して比較をしていく。

##### 3. 3. 1 発音点の位置による変化

$r_1s_1$ の $r_1s_5$ の伝達経路とインパルス応答の計算結果は図13a,b, 14a,bに示す。 $r_1s_1$ の $r_1s_5$ の計算結果を比べると、 $r_1s_5$ の方が経路が偏っているのが見られる。その結果インパルス応答についても前半に大きなレベルで反射音が到達しているのがわかる。反射回数が少ないものについては、 $r_1s_1$ が対角線上に近い経路をとっているため、多様な面による反射ができる。 $r_1s_5$ では壁面に向かって音を発しているため、少ない面での反射となり伝達経路の多様性がなくなる。

##### 3. 3. 2 受音点の位置による変化

$r_9s_1$ の伝達経路とインパルス応答の計算結果は図15a,bに示す。 $r_9s_1$ については $r_1s_1$ に比べて経路の偏りが見られ、その影響がインパルス応答に現れているのがわかる。 $r_9s_1$ では $r_1s_5$ よりもさらに経路に偏りがあるため、それが波形に影響している。

##### 3. 3. 3 受音点、発音点の位置による変化

様々な受音点、発音点についての計算の結果から良い音がえられる経路を予測できる。音の経路を分散させるには発音点と受音点を結ぶ直線が壁の辺と平行にならず、受音点は反射経路に多くの面を利用するために後ろの席を選ぶ。候補としていくつかあがるだろうが $r_4s_7$ を例にあげる。 $r_4s_7$ の伝達経路とインパルス応答の計算結果は図16a,bに示す。計算結果も反射経路が分散していて、インパルス応答の波形も滑らかに減衰しているのがわかる。

#### 3. 4 音の可聴化

比較的反射音が少ないスタジオや無響室で録音した音源に計算で求めたインパルス応答を畳み込むことによって、そこで実際に鳴ると予想される音を作ることができ

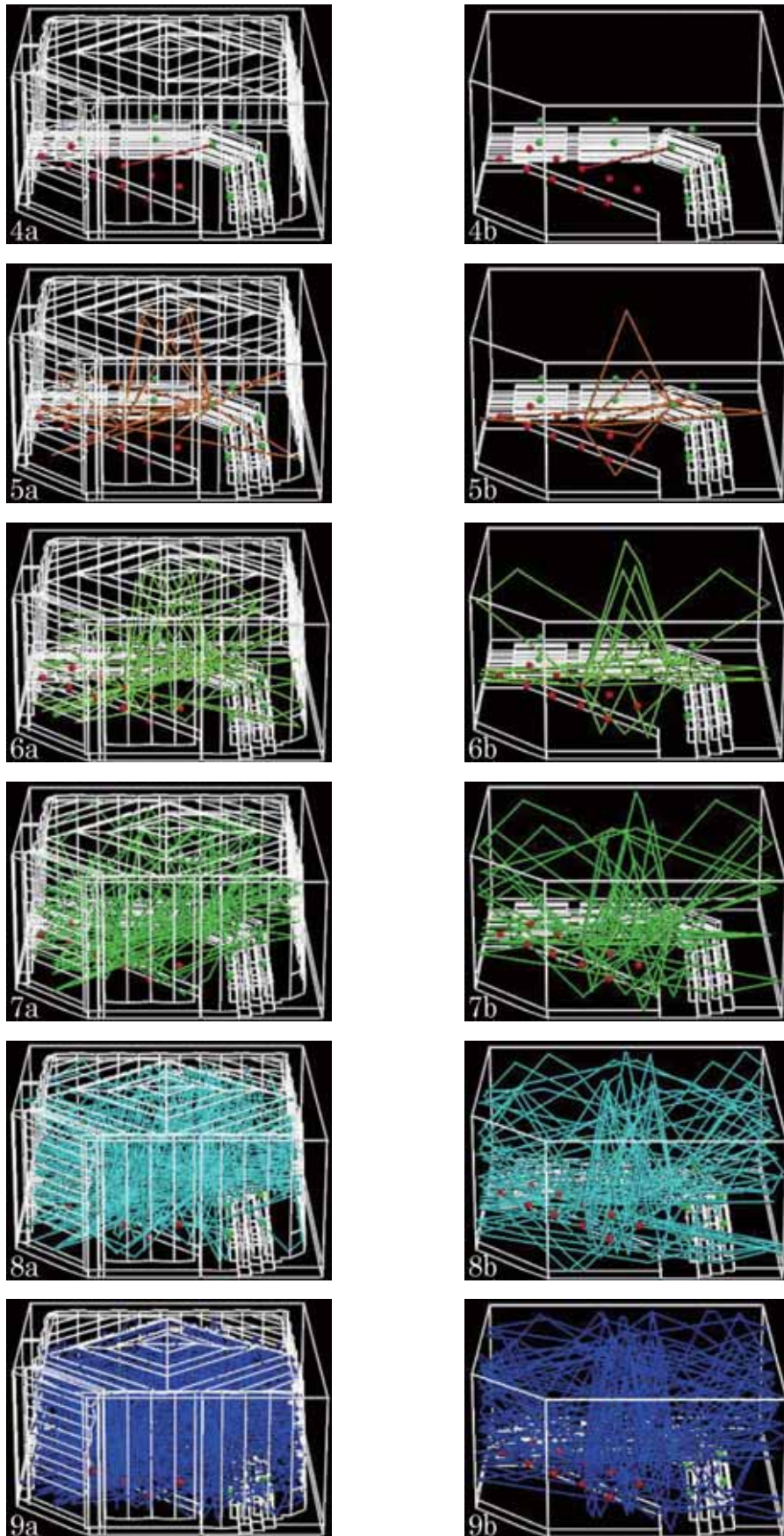


図4-9 図4は $r_1s_1$ における直接音の経路, 図5から8までは1回から5回反射の音の伝達経路, aは芸術館型, bは箱型の建物における伝達経路である。反射回数が上がるほどに反射経路の種類が増えるが, 芸術館型のほうが箱型より多様な経路をとることが図4-9のa, bを見比べることによってわかる。

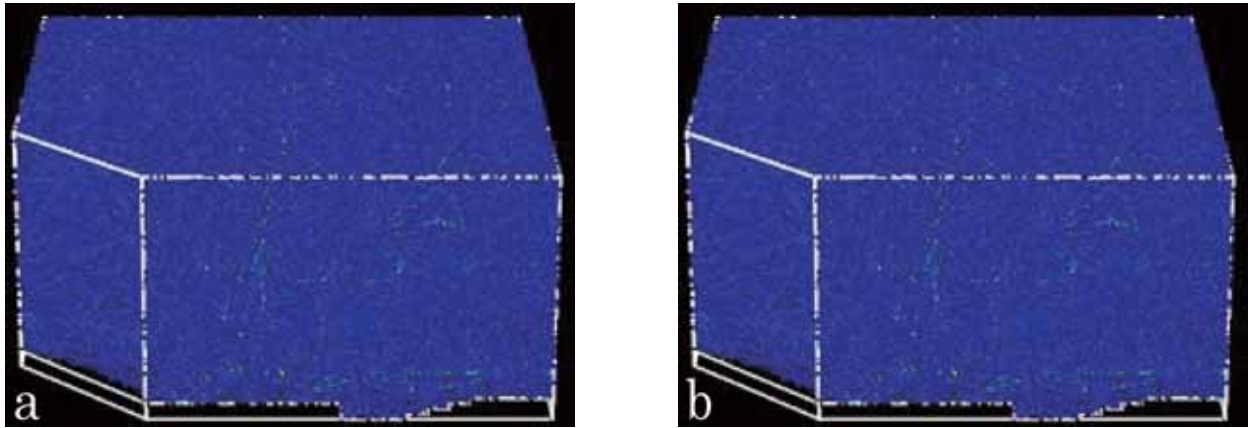


図10  $r_{1S_1}$ における40次までの反射経路の総和である。aは芸術館型、bは箱型の建物における伝達経路である。40次までの計算で求められた伝達経路によって、芸術館型と箱型の両方において建物内に音が十分に満ちていることがわかる。

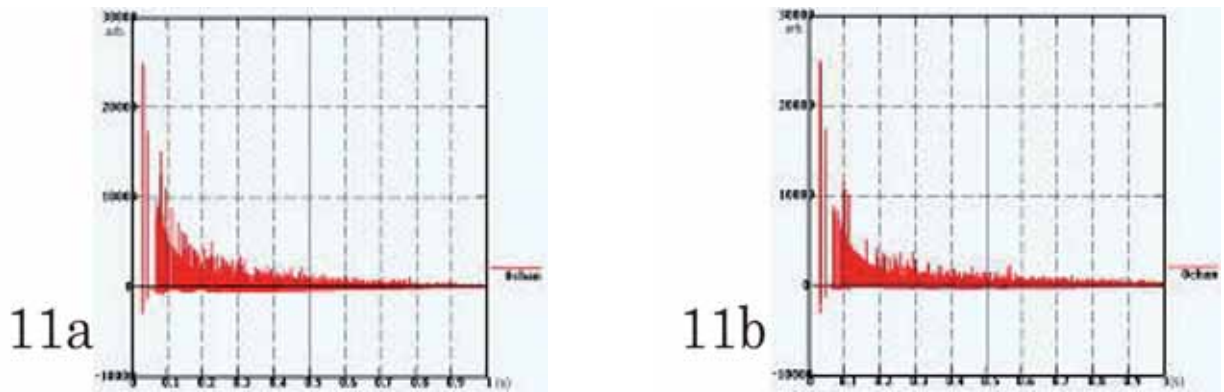


図11 図11-aは反射材のみの芸術館、bは反射材のみの箱型の建物のインパルス応答である。0.1 ~ 0.25秒付近の波形に両者の違いが見られる。

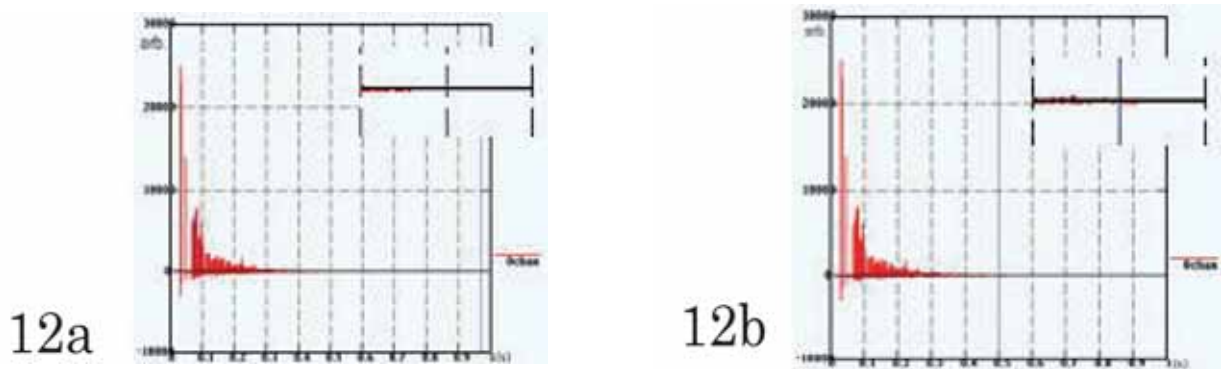


図12 図12-aは改修前、bは改修後の芸術館のインパルス応答である。図の右上は0.6から0.8秒までの波形の拡大図である。aに比べbのほうが波形の持続時間が長いのがわかる。

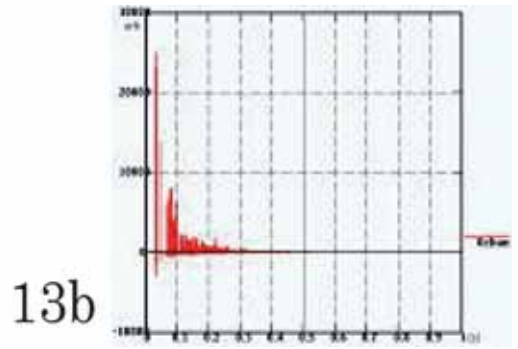
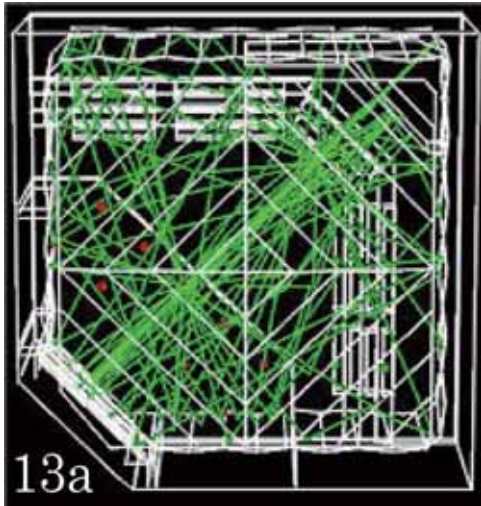


図13 図13-aは $r_{1S_1}$ における芸術館型の3次反射の伝達経路、bは $r_{1S_1}$ における現在の芸術館のインパルス応答である。

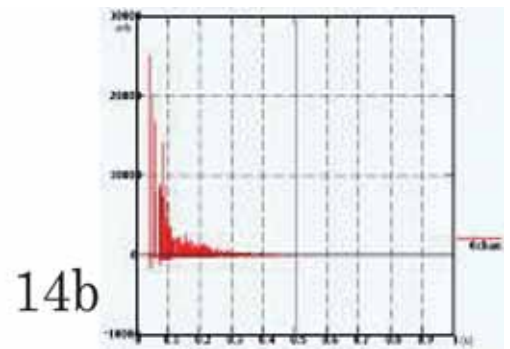
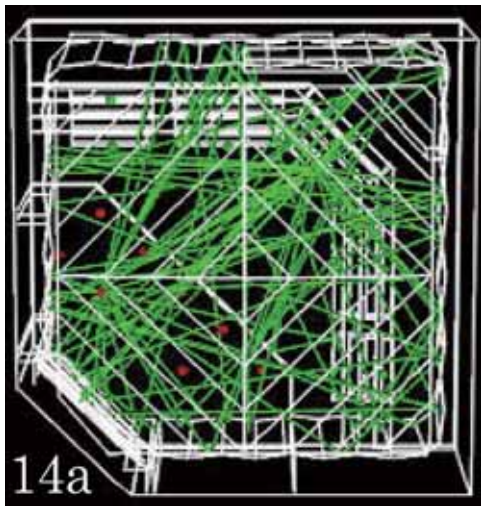


図14 図14-aは $r_{1S_5}$ における芸術館型の3次反射の伝達経路、bは $r_{1S_5}$ における現在の芸術館のインパルス応答である。

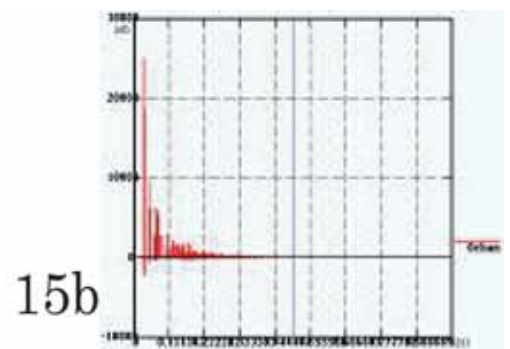
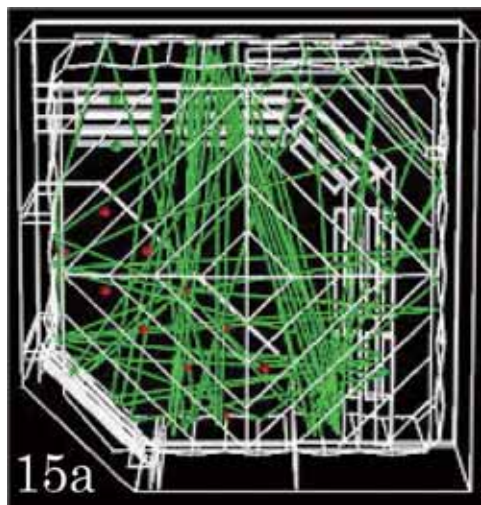


図15 図15-aは $r_{9S_1}$ における芸術館型の3次反射の伝達経路、bは $r_{9S_1}$ における現在の芸術館のインパルス応答である。

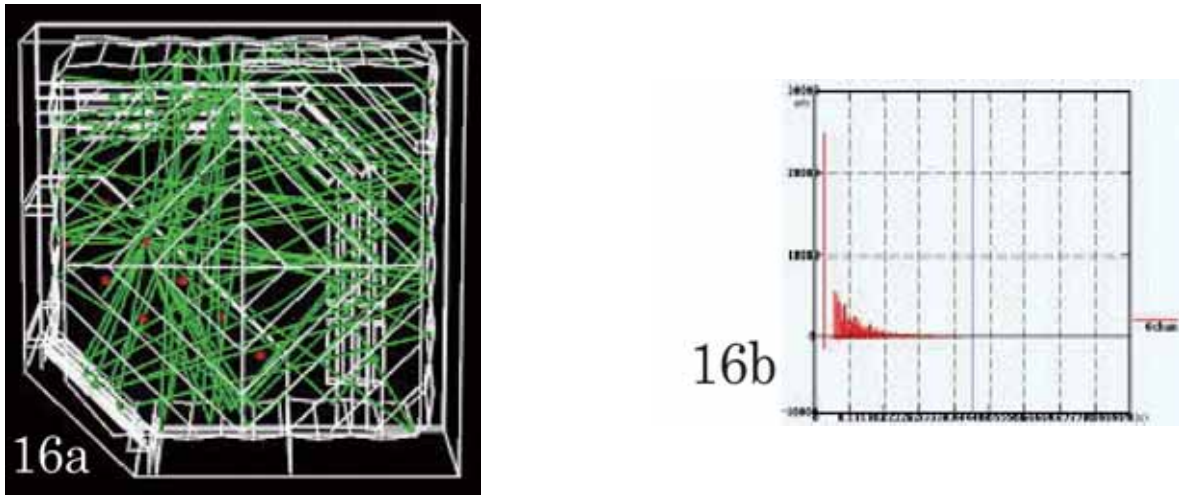


図16 図16-aは $r_{4S_7}$ における芸術館型の3次反射の伝達経路、bは $r_{4S_7}$ における現在の芸術館のインパルス応答である。

る。今回は紙面であるため詳しいことは省略するが、建物の構造や素材、音源や受音点の位置の変化を耳で聞き分けることが出来た。また物理指標では図ることが難しい音色についてもある程度評価が可能なのは重要な利点であった。

#### 4. まとめ

構造や素材、位置など様々な条件に対応した反射経路、インパルス応答の変化が求められた。芸術館は実際にある建物なので、条件の変化による相対的な変化だけでな

く、実測値との比較が出来ればより有意性が確かめられると考えられる。

#### 引用文献

- 1) 鶴秀生, 福山忠雄, 有川禎昭. 2007. 計算工学講演会論文集 vol. 12, 教室音響設計の為の幾何音響数値計算とその可聴化. P.2-4.
- 2) 木村翔. 1982. 新建築技術業書9, 建築音響と騒音防止計画. 第二版. 彰国社. P.193-202.