

## ハイブリッド・シミュレーションによる室内音響の模型実験

Scale model experiment on room acoustics by hybrid simulation technique

橋 秀 樹\*・矢 野 博 夫\*・日 高 新 人\*

Hideki TACHIBANA, Hiroo YANO and Yoshito HIDAKA

## 1. ま え が き

コンサートホールや劇場などの設計のために、スケールモデルによる音響実験がしばしば行われる。このような音響模型実験では、主として各種の聴感的物理量の測定によって音響効果の予測を行っている<sup>1),2)</sup>。しかしそれだけでなく、設計段階でホールの音を実際に耳で確かめることができれば、設計の信頼性は格段と向上する。

そのような目的のために、これまでも速度可変のデータレコーダを利用して、音楽などの音源信号を超音波用スピーカから模型内に高速再生し、それをいったん録音した後に再びもとの速度に戻して再生するという方法が試みられてきた。しかしこのようなアナログ技術のみによる方法ではSN比、周波数特性等の点で限界があった。

一方、最近ではデジタル技術の飛躍的な発達により、各種の信号処理がきわめて容易となった。そこで、模型実験とデジタル信号処理技術を組み合わせたハイブリッド・シミュレーション手法が実現可能となってきた。すなわち、この方法では、複雑な波動現象である室内の音の伝搬特性は模型実験によってインパルス応答として測定し、それと無響室録音の音楽など任意の信号とをコンピュータを利用して合成する。

このような手法については、すでにElsらが最初の試み<sup>3)</sup>を発表しているが、われわれも音響模型実験に関する研究の一環として、1/10縮尺模型を対象として同様のシミュレーション技術の開発研究を行っている。

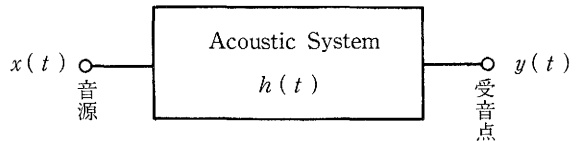
そこで、本報ではこのシミュレーション手法のうち、まず聴感評価用の音響信号を合成する際に必要なインパルス応答の測定、および長時間信号のたたみ込み演算の方法等について検討した結果を述べる。この手法による聴感実験およびシミュレーション精度の検討結果等については別途報告する予定である。

## 2. ハイブリッド・シミュレーションの原理

周知のように、線形・時不変な系の物理特性はすべてインパルス応答に含まれている。そこで図1に示すように、ホール内の音源から受音点に至る音響システムのインパルス応答が正確に測定できれば、それから必要な物理パラメータを計算したり、また任意のサンプル音とのたたみ込み演算により、ホールの音響特性を含んだ音を聞くことができる。

ここで、インパルス応答の求め方としては、最近では音線法に基づくコンピュータ・シミュレーションによる方法も試みられているが、現時点では、複雑な境界条件をもつホールのインパルス応答を波動性まで含めて計算できるまでには至っていない。そこで、材料の吸音率や媒質の音響吸収などに関する相似則を満たすことにより、波動性を含めて音場をシミュレートすることができる模型実験の長所と、いったんインパルス応答を求めておけば、柔軟性のある処理ができるというデジタル信号処理の長所を組み合わせたのがハイブリッド・シミュレーションの手法である。

さて、模型内のインパルス応答の測定および合成した評価音の被験者への提示方法としては、いくつかの方法が考えられるが、ここでは、最も基本的なパイノーラル方式として、ダミーヘッド（擬似頭）による收音、ヘッドホンによる受聴の方法を用いることとした。すなわち、



$$y(t) = h(t) * x(t)$$

$$= \int_{-\infty}^t x(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

図1 音響システムの入力と出力の関係

\*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

模型ホール内の客席に模型ダミーヘッドを置き、音源から両耳を通してのインパルス応答を測定する。この応答をもとに合成した信号をヘッドホンを通して再生するという方法である。現在その基礎的な段階の実験として、直径15mmの球に両耳に相当する二つの1/6in. コンデンサマイクロホン埋め込んだきわめて単純な模型ダミーヘッドを試作し、使用している。

このシミュレーション手法では、縮尺模型および模型ダミーヘッドの精度が問題となるが、ここではひとまずそれらが十分な精度をもつものとし、インパルス応答の測定およびたたみ込み演算による信号合成に重点をおいて、具体的な信号処理方法について検討した結果を述べる。

3. 模型内のインパルス応答の測定

インパルス応答の測定方法としては、矩形パルスなどのインパルスを用いる直接法、スイープパルス<sup>4)</sup>を用いる方法、広帯域ノイズやM系列信号<sup>5)</sup>などを用いる相互

相関法などがある。これらの方法はそれぞれ特徴をもち、実験の目的・内容によって適・不適がある。

本研究では、ホールなどの室内模型内のインパルス応答を測定するための音源について、周波数特性、出力、指向特性、再現性などを検討した結果、現時点ではスパーク放電音源が最も適当であることがわかった<sup>6,7)</sup>。

試作したスパーク放電音源の音圧波形とそのエネルギースペクトルを図2に示す。スペクトルは平坦ではないが、測定に必要な周波数帯域内で極端なディップ点はない。したがって、このパルス音に対する応答が十分なSN比で測定できれば、逆フィルタ処理により周波数特性の補正が可能である。

その方法としては、まず補正目標帯域(音源の周波数特性と1/10縮尺室内音響模型実験で重要な周波数帯域を考慮し、1kHz~80kHzとした)を通過帯域とする直線位相FIRバンドパスフィルタを設計する。つぎに、図2のパルスを入力したときに、このバンドパスフィルタのインパルス応答が出力されるようなフィルタ(逆フィル

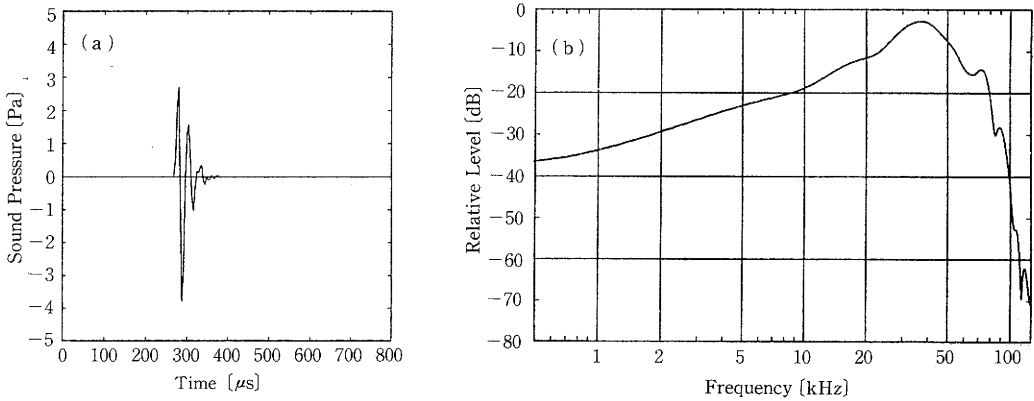


図2 スパーク放電パルス波形(a)とエネルギースペクトル(b) (測定距離: 50cm)

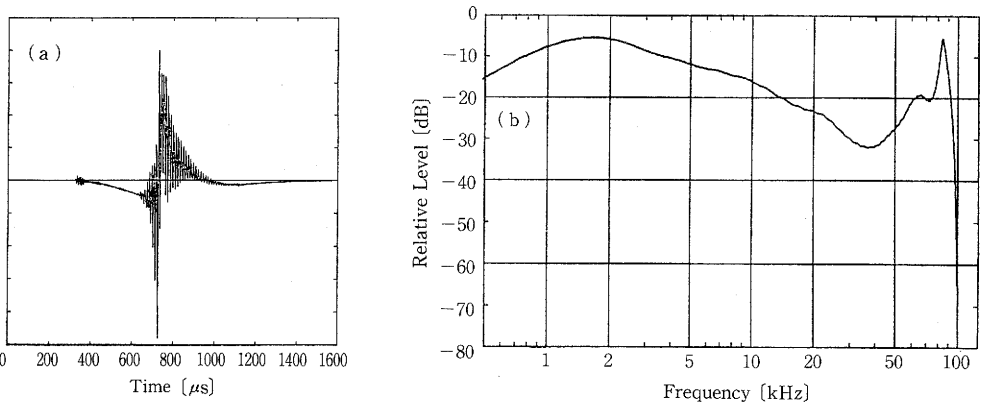


図3 逆フィルタのインパルス応答(a)と周波数特性(b)

研 究 速 報

タ)を求める(図3)。最終的に、模型内で測定したインパルス応答にこの逆フィルタをたたみ込むことにより、必要な帯域の情報を含むインパルス応答が得られる。

4. 信号処理と測定システム

二つの時間信号のたたみ込みにはFFTを用いるが、音楽や音声信号のデータは一般に長大となるため、1回のFFTで処理することは実際には無理である。そこでこのような長時間信号とインパルス応答をたたみ込む方法として、overlap-add method あるいは overlap-save methodが工夫されている<sup>8)</sup>。そのうちここでは前者の方法を用いることとした。この方法は原信号をFFT可能な長さ(セグメント)に分割し、それらの分割信号とインパルス応答とのたたみ込みを順次行い、最後にそれらの結果を加算接続する方法である。その場合、原信号を分割する長さとしては、インパルス応答の測定時間長と同じとした。

以上に述べたたたみ込み演算は大型計算機を用いて行ったが、そのプログラミングにあたっては、演算の効率化をはかるために、1)三角関数のテーブルの作成、2)基数8の実数型ルーチンの使用、3)正変換は周波数間引き型、逆変換は時間間引き型としてビット逆転操作を省

く、などの方法<sup>9)</sup>を採用した。

図4に測定および信号処理システムを示す。この中で、インパルス応答の測定はパーソナルコンピュータ(NEC PC98XL)を使用し、12bit ADコンバータ(最高サンプリング周波数400kHz)を通してのデータの取り込み、および同期加算処理を行う。また音源信号は、いったんデジタルオーディオテープレコーダ(DAT)に録音したあと、DATインターフェース(MTT DAI-98B)を介してデジタルデータの形でPC98XLに転送する。

つぎにこれらのデータをフロッピーディスクを介して生研・計算機室の大型計算機(FACOM M380Q)に転送し、前述の逆フィルタ処理およびたたみ込み演算を行う。その結果を再びPC98XLに転送し、そのままデジタルデータの形でDATに転送する。最終的にこのテープを再生することにより、ホールの音響特性が付加された音を聞くことができる。

たたみ込み演算の実例として、次章で述べる実験で用いたデータ長などのパラメータと演算時間を表1に示す。この例でわかるとおり、ホールなどの聴感評価実験に必要な20~30秒程度の長さの信号についても、前述のアルゴリズムを用いることにより、比較的短時間でたたみ込み演算が可能である。

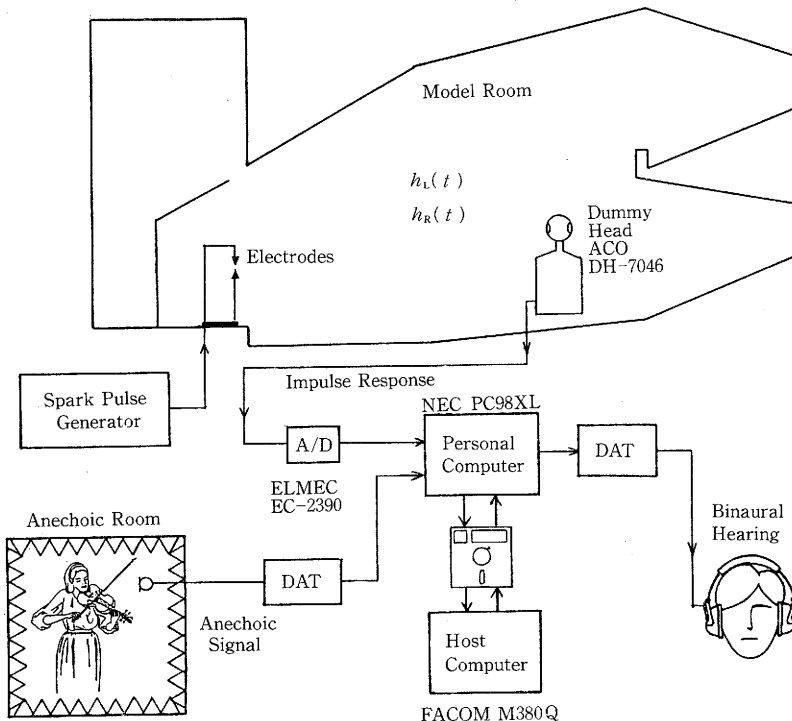


図4 測定・信号処理システム

研究速報

表1 たたみ込み演算の例  
(2chインパルス応答と1ch音源信号の場合、  
時間・周波数は実物換算値)

サンプリング周波数	32 kHz
インパルス応答の長さ	65536 (2.0 s) × 2 ch
音源信号の長さ	1048576 (32.8 s)
セグメントの長さ	65536
FFTの長さ	131072
FFTの計算回数	正変換: 2回 (インパルス応答, 2ch) 16回 (音源信号, 1ch) 逆変換: 32回 (たたみ込まれた信号, 2ch)
計算時間	約120秒 (FACOM, CPU TIME)

5. 縮尺模型コンサートホールにおける実験例

インパルス応答の測定時間長としては、少なくとも残響時間程度の長さは必要と考えられる。そこで、第一段階の実験として、1800人収容のコンサートホールの1/10縮尺模型において、サンプリング周波数320kHzで2<sup>16</sup>の長さ(実物換算で2.048s)のインパルス応答を測定した。予備実験として、前述のスパーク放電音源を用い、同期加算の回数を変えて測定したインパルス応答から楽音を合成した結果、十分なSN比を得るには200~300回の同期加算が必要であることがわかった。256回の同期加算を行った場合、測定所要時間は模型ダミーヘッドの片耳につき約10分である。このようにして測定した模型ダミーヘッドの両耳(L, R)についてのインパルス応答の例を図5に示す。

以上に述べた方法による聴感評価実験はまだ行っていないが、試聴実験の結果、従来のアナログ手法によった場合に比べて音質はるかに改善され、ホール内の場所による聴感的印象の違いなどが十分識別できることが確認された。

6. あとがき

ホールなどの音響設計の段階で、縮尺模型を用いて音響効果を実際に耳で確かめるための方法として、模型内のインパルス応答を測定し、これと無響室などで録音した音楽や音声信号をたたみ込む手法について基礎的検討を行った。その結果、実用的な処理時間で評価用信号が合成できること、また各種の条件の違いによる音の変化を調べるうえで、このシミュレーション手法が有効であ

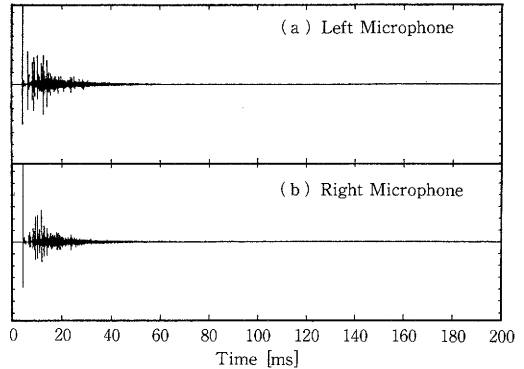


図5 模型ダミーヘッドにより測定した1/10縮尺コンサートホール模型のインパルス応答

ることがわかった。

しかし、実験技術として確立するためにはまだまだ検討の余地があり、理想的なインパルス応答を測定するための音源および受音システムの改良、SN比の改善などについて、今後さらに研究を進める予定である。

(1988年11月29日受理)

参考文献

- 1) 橋, 石井: 「音響模型実験における相似則と実験手法」, 日本音響学会誌, 32巻, 10号 (1976)
- 2) M. Barron: "OBJECTIVE MEASURES IN CONCERT HALLS AND THEIR USE IN ACOUSTIC SCALE MODELS", Proc. Vancouver Symp. (12th ICA), (1986)
- 3) H. Els and J. Blauert: "A MEASURING SYSTEM FOR ACOUSTIC SCALE MODELS", Proc. Vancouver Symp. (12th ICA), (1986)
- 4) N. Aoshima: "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement", J. Acoust. Soc. Am. 69 (1981)
- 5) H. Alrutz and M. R. Schroeder: "A Fast Hadamard Transform Method for the Evaluation of Measurements Using Pseudorandom Test Signals", 11th Int. Congr. Acoust., Paris (1983)
- 6) 日高, 矢野, 橋: 「ハイブリッド音響模型実験に関する基礎的検討」, 日本音響学会講演論文集, 2-7-8 (1988. 3)
- 7) 日高, 矢野, 橋: 「ハイブリッドシミュレーションによる室内音響の模型実験」, 日本音響学会建築音響研究会資料, AA-88-08, (1988)
- 8) A. V. Oppenheim, R. W. Shafer著, 伊達訳: 「デジタル信号処理(上)」, コロナ社