

ホールの音響効果の予測

Estimation of Acoustics in Auditoria

橋 秀 樹*

Hideki TACHIBANA

コンサートホールをはじめ各種のホールの設計のためには、完成後の音響特性を物理的側面から予測する方法と同時に、音響効果を実際に耳で聞いて判断する方法が望まれる。そのために、数値シミュレーションあるいは物理的シミュレーションなど各種の方法が開発されつつある。本稿ではこれらの音場予測法を概説し、模型実験とデジタル信号処理を併用した音場シミュレーションの方法およびその応用例を紹介する。

1. ま え が き

わが国では、戦後全国各地に公共ホールが数多く建設された。そのほとんどは多目的ホールであったが、最近ではコンサートホール、オペラ劇場、演劇ホールなど各種の専門ホールが盛んに建設されており、第2次のホール建設ブームとも言うべき活況を呈している。

一般に建築は一品生産品であるが、特にホールでは個性が重視され、建設のたびに新たな形態がデザインされることながら、その用途から考えて音響的性能が重要であることは論をまたない。ひとたび建設されたホールは長年にわたって使用され、種々の舞台芸術創造の場となるわけであるから、新たなホールの設計・建設にあたっては、その用途に応じて音響的性能を適切に設定し、それを性格に予測する必要がある。そこで本稿では、ホールの音響特性の予測方法について現状の技術を概説する。

2. ホールの音響効果とその定量化

コンサートを考えてみると、ステージで演奏家が楽器を弾いて音を出すわけであるが、その音にホールの響きが加わってのはじめて本来の音楽となる。同じ演奏家が同じ楽器で演奏をしても、ホールの違いによって音楽としてはかなり異なったものとなるし、演奏自体も変わる。

われわれがホールでこのような音を聞く場合、その印象はきわめて主観的であり、ホールの音響効果の良否を客観的に評価することはきわめて難しい。であるからといって、主観的な判断だけに頼っていたのでは常に試行錯誤的にホールを作ることになり、技術としての進歩がないばかりでなく、きわめて危険なことである。そこで

何らかの方法でホールにおける音の主観的印象を客観化、定量化しようという努力が必要となる。

ホールに必要とされる音響的条件はホールの用途によって異なるが、コンサートホールなどでは次のような項目が挙げられる。

- (1) 室内の騒音が低いこと。
- (2) ロングパスエコー（山彦現象）やフラッターエコー（鳴き竜現象）などの音響障害がないこと。
- (3) 音量が豊かで、場所による差が少ないこと。
- (4) 用途に応じて適度な響きがあること。
- (5) 高音と低音のバランスがとれていること。
- (6) 音が明瞭に聞こえること。
- (7) 音の広がり感があること。

上記のうち、まず(1)は当然必要な条件で、これを満たすために建物の遮音構造や建築設備などについて十分な検討が行われる。ホールの騒音でしばしば問題となるのは空調騒音で、最近ではアクティブ制御技術の応用も実用化されつつある。(2)の条件を満たすためにはホールの基本形状がきわめて重要で、拡散や吸音処理についても設計段階で十分に考慮する必要がある。

(3)は室内音響特性として最も基本的な条件で、客席で十分な音量感が得られないことは最大の欠点となる。この条件から、生の音を生命とするコンサートホールやオペラ劇場などでは規模（客席数）には自ら限界がある。またホール内で音が極端に大きい場所や逆に小さい場所ができることも避けなければならない。そのために適当な反射音によって音圧の分布ができるだけ均一になるように室形や反射板の形状が工夫される。

(4)はクラシック音楽などには絶対に欠かせない条件である。この響きに関する研究としては、1900年にハーバード大学の W.C. Sabine が講堂の改装にあたって実験

*東京大学生産技術研究所 第5部

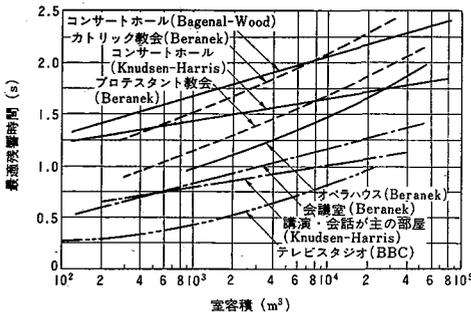


図1 各種ホールの最適残響時間(500Hz)

を行ったのが最初で、パイプオルガンの音が聞こえなくなるまでの時間をストップウォッチで計測するなどの実験結果に基づいて、響きの指標として残響時間を提案した。残響時間は、音源を停止した後、室内の音響エネルギー密度が $1/10^6$ に減衰するまでの時間として定義される量で、室内音響パラメータとしては最も重要なものである。(ただし、同じ残響時間でも室容積や反射音の方向の違いなどによって残響感は異なる。) ホールの残響時間の最適値は、その用途・規模によって異なり、図1に示すような値が提案されている。最近では、一つのホールを多用途に使うために、吸音面と反射・拡散面を転換する機構を用いた残響可変装置を備えたホールも多く作られており、さらに電気音響技術、デジタル技術を利用して残響を付加する方法も種々試みられている¹⁾。

(5)の条件もコンサートホールなどでは特に重要で、室全体の吸音力の周波数特性によるだけでなく、ステージなどの形態にも大きく依存する。特に低音楽器の音がバランスよく聞こえることは重要な条件である。

(6)の条件は劇場や講演会場などでは特に重要で、台詞やスピーチが明瞭に聞き取れる必要がある。一般に音の明瞭性と残響感とは相反する条件であるが、明瞭さは音楽にもある程度は必要で、適度な残響と両立させなければならない。室内における音の明瞭さを表わす物理指標として、次のような量が提案されている^{2),3)}。

$$\text{Definition : } D_{50} = \frac{\int_0^{50\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$$

$$\text{Clarity : } C_{80} = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{80\text{ms}} p^2(t) dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2(t) dt}$$

ただし $p(t)$ は観測点における音圧の瞬時値(インパルス応答、図2参照)である。 D_{50} はスピーチ、 C_{80} は音楽に対する明瞭度を表す指標として提案されている。

(7)の広がり感 (spatial impression, spaciousness) は3次元空間で感じる音の響きの感覚であるが、物理的に

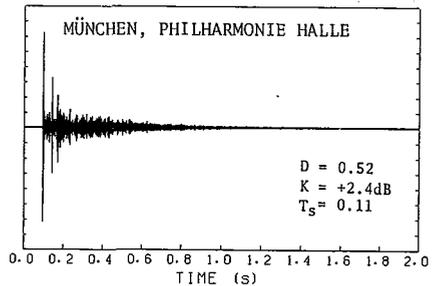
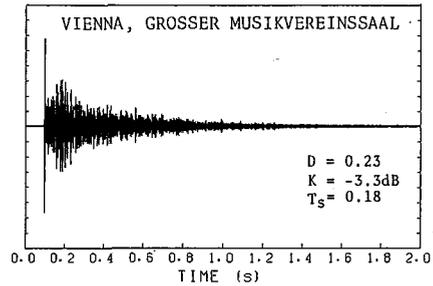


図2 ホールのインパルス応答の例

定義あるいは定量化することはなかなか難しい。(ステレオ装置でもある程度の広がり感は得られるが、それはあくまで二つのスピーカの間での平面的な広がりであり、ホールで音を聞くときのような3次元的な感覚は得られない。) この広がり感については、現在多くの研究が進められつつある段階であるが、一つの有力な主張として、次式で表わされる両耳間相互相関係数の1ms以内の最大値 IACC (Inter-aural cross-correlation) と高い相関があるとされている⁴⁾。

$$IACC = \left| \frac{\varphi_{LR}(\tau)}{\sqrt{\varphi_{LL}(0) \cdot \varphi_{RR}(0)}} \right|_{\max} \quad |\tau| \leq 1\text{ms}$$

ただし、 $\varphi_{LR}(\tau)$: 左右の外耳道入口における音圧の相互相関関数

$\varphi_{LL}(\tau)$, $\varphi_{RR}(\tau)$: それぞれ左, 右の外耳道入口における音圧の自己相関関数

これは、左右の耳に到達する音の間に高い相関があると広がり感は低く、逆であれば空間的な広がり感が大きいということであり、実験的にもある程度は確かめられている。ホールでこのような広がり感を生じさせるためには、特に横方向からの反射音が重要とされている。

以上に示した指標はホールにおける聴感印象を表す物理量のうちのごく一部であり、この他にも多くの指標が提案されている。

さて図3は、ホールでステージ上の音源から音を聞く聴衆個人の心理までをモデル化したものである。この図で考えると、上に述べた内容はわれわれがホールで聞いたときに感じる主観的印象を何らかの方法で定量化したいということであるが、音源から人間の耳元までに限定

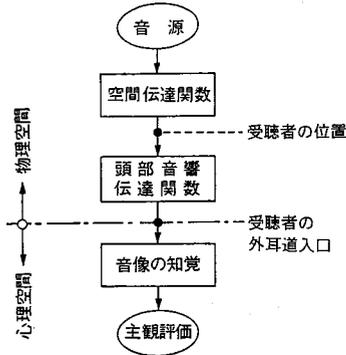


図3 室内音響の評価プロセス (森本)

すると、これは完全に物理事象として扱える。室内音場は一般に線形で時不変性をもった系として考えられるので、その系のすべての物理的情報はインパルス応答に含まれている。上に示した聴感物理量も、音源から受音点に至るインパルス応答から求められるものがほとんどである。また後で述べるように、インパルス応答が求められれば、それと任意の信号（音楽やスピーチなど）をたたみ込み積分の原理によって合成することにより、その音が生きて実際にホールで発せられたときの受音点における音（ホールサウンド）が得られる。したがって、室内音響特性の評価あるいは予測を行う場合、インパルス応答がきわめて重要となる。その予測方法としては、以下に述べるコンピュータを利用した数値的なシミュレーションと模型を用いる物理的なシミュレーションとがある。

3. コンピュータシミュレーション

コンピュータの飛躍的発達を背景として、現在ではいろいろな分野で数値シミュレーションの手法が開発されつつある。

音響の分野における数値シミュレーションの方法としては、有限要素法 (FEM) や境界要素法 (BEM) などの数値解析手法の適用がまず考えられる^{5)~7)}。しかし、これらの方法は小規模な音場を対象とする場合にはきわめて有効で、応用例も多いが、ホールなどの大規模な音場を取り扱うとなるときわめて難しい。その理由は、室内音響で対象とする周波数範囲がきわめて広いためである。たとえば、人間の可聴周波数範囲の上限 2 万 Hz の半分の 1 万 Hz まで扱うとしても波長は 34 mm であり、数千 m³ 以上の室容積について空間的サンプリングの定理を満たすように分割するとすれば要素数はきわめて膨大となり、現在のコンピュータの容量では到底取り扱えない。(この問題以外にも、各種の吸音材料など複雑な境界条件の設定のしかたなど多くの問題がある。)

そこで近似的な方法として、音の波動性を無視してビーム (音線) として取り扱う幾何音響に基づく計算方

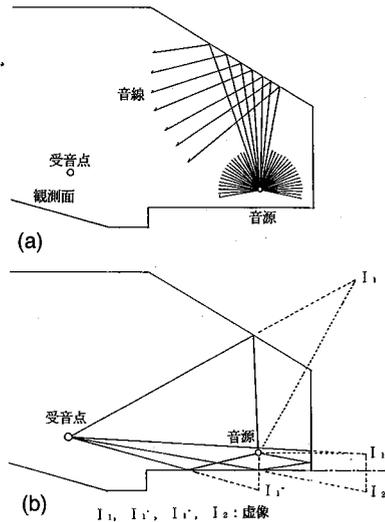


図4 室内音場の幾何音響の取り扱い
(a) 音線追跡法 (b) 虚像法

法が開発されている。その具体的な方法としては二つに大別できる。まず一つは音線追跡法と呼ばれる方法で、音源から等立体角で多数の音線を設定し、それらの一つ一つについて反射経路を追跡計算する (図4(a)参照)。もう一つは虚像法と呼ばれる方法で、室を形成する各要素面ごとに音源の虚像を求め、それらの多数の虚音源から受音点に至る音線を計算する (図4(b)参照)。いずれの方法でも、音線の強さは逆2乗則 (幾何拡散) による減衰と境界の吸音率に応じて減衰させる。虚像法を用いて室のインパルス応答を計算した結果と実物ホールにおいて実測した結果を比較した例を図5に示す。この例では室形が比較的単純であるので、計算結果と実測結果はかなりよく対応している。しかし、室形がさらに複雑になると十分な対応はなかなか得られない。このような音線理論による方法は、基本的に音の波動性はまったく考慮されておらず、また多重反射の取り扱いも難しいので、当然精度的に限界がある。そこで、聴感上重要な初期反射についてキルヒホッフの回折理論などを適用して波動性を考慮する方法も検討されている⁸⁾。また音の波動性が無視できない低音域には FEM や BEM などの計算法を適用し、高音域には幾何音響の近似手法を用いる方法なども考えられる。この種の手法は今後の研究課題である。

以上に述べたように、数値シミュレーションによってホールのインパルス応答を室内音響に必要な周波数範囲全体にわたって正確に求めることは、現段階ではまだ不可能である。しかし、ホールの設計の初期の段階で、おおよその検討を行う場合などにはある程度有効であり、わが国でも建設会社などを中心にして各種のシミュレーションシステムの開発が進められている⁹⁾。その中には、

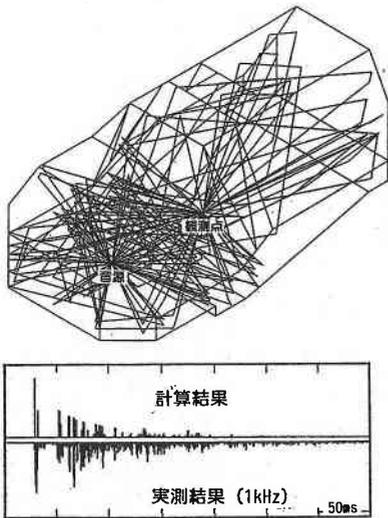


図5 虚像法によるインパルス応答のシミュレーションと実測結果の比較の例

方向別にインパルス応答を近似的に計算し、その結果に音楽などの信号をたたみ込んで多数のスピーカから再生して聞かせる試聴システムも作られている。

4. 模型実験 (物理的シミュレーション)

上述のような理由から、室内音響の分野では物理的シミュレーション、すなわち模型実験の手法がまだまだ有効性を保っている。

複雑な境界で囲まれた室内における音の波動現象を3次元模型を用いて調べる実験としては、1934年の Spandöck による実験が最初と言われている。現在に比べて当時の実験技術ははるかに劣っていたため、この実験ではごく基本的な解析しかできなかったが、その後相似則およびそれを満たすための実験技術が次第に開発され、また最近では音響測定機器の進歩とデジタル信号処理技術の飛躍的發展に支えられて、実験精度もはるかに向上した。本所でも、石井 (聖光) 研究室およびそれを引き継いだ筆者の研究室で、音響模型実験手法の開発研究を行ってきた¹⁰⁾。

ホールの音響特性の予測の際には、設計の段階に応じて種々の縮尺の実験が行われるが、実施設計の最終段階では高い精度が実現できる 1/10 縮尺の模型実験がよく行われる。そこでここでは 1/10 縮尺模型実験の概要について述べる。

(1) 相似則と実験技術¹⁰⁾

音響模型実験における相似則およびそれに基づく実験技術についてはここでは詳細は省略するが、基本的には模型の縮率を $1/n$ とすると、模型における周波数は実物周波数の n 倍 (時間は $1/n$) とする必要がある。ま

たそれに応じて境界条件、媒質条件を整える必要がある。

(2) インパルス応答の測定

前述のとおり、室内音響特性を調べる上で最も基本となるのはインパルス応答である。このインパルス応答を実物ホールで測定する場合には、音源として写真 1 に示すような無指向性スピーカを用い、スイープパルス法や M 系列相関法などデジタル信号処理技術に基づく各種の方法¹¹⁾ が用いられているが、模型実験では周波数特性と無指向性の点で十分な条件を備えたスピーカが現在のところ開発されていない。そこで筆者らの研究室では、再現性の高いスパーク放電パルス (写真 2) を試作し、平均応答処理によって信号対雑音 (S/N) 比を改善する方法を用いている。図 6 はこのスパーク音源の音圧波形を 64 回重ねて記録したものであり、高い再現性が得られていることがわかる。しかし図 7 に示すように、このインパルス音源のエネルギースペクトル特性は平坦ではない。そこでこの周波数特性の逆特性をもつデジタルフィルタ (図 8) をパーソナルコンピュータで設計しておき、測定した応答をそれに通す (実際にはたたみ込み演算による) ことによって音源の周波数特性を補正する方法をとっている。図 9 はこのような方法で補正した結果で、80 kHz (実物換算 8 kHz) まではほぼ平坦な周波数特性が得られている。

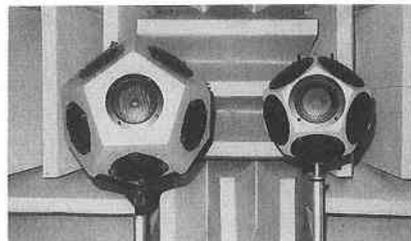


写真 1 実物ホール測定用 12 面体無指向性スピーカ

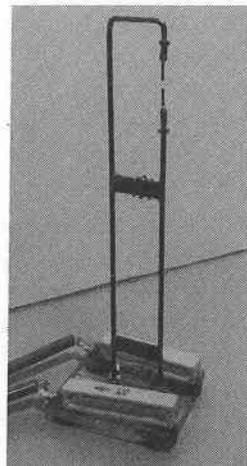


写真 2 模型実験用スパーク音源

つぎに受音系であるが、残響時間をはじめ多くの聴感物理量は無指向性のインパルス応答から求められるので、この種の測定では口径 1/4 あるいは 1/8 インチの小型コンデンサマイクロホンを使用する。一方、後に述べる聴感シミュレーションを目的とする場合には、両耳効果を得るためのバイノーラル受音系として、人間の頭をほぼ 1/10 に縮尺した模型ダミーヘッド (疑似頭) を用いる。写真 3 は最近筆者の研究室で開発した 1/10 縮尺模型実験用ダミーヘッドで、外耳道入口に相当する位置に 1/6 インチ・コンデンサマイクロホンを二つ仕込んである。これを用いて取音することにより、実頭の場合に近い方向定位が得られる¹²⁾。

(3) ハイブリッド・シミュレーション

コンサートホールなどを考えると、当然のことながらそこでの音は音楽としての芸術性をもったものであり、その評価はきわめて高度な心理的 (感性的) 判断を必要とするため、絶対的な判断基準を設けることは難しい。したがって 2 に述べたような分析的な研究も必要であるが、それと同時に室内音場をできるだけ正確にシミュレートし、それを人間が直接耳で聞いて主観的に判断する方法を確立しておくことも重要である。その方法として、かつてはテープレコーダのスピード変換を利用した周波数変換によって、模型の音を実物の音に変換して試聴する方法が種々検討された。しかし、一昔前のアナログ技術では周波数帯域や S/N 比などの制約から音質の点で無理があり、実用技術にはなり得なかった。

ところが最近になってデジタル技術が飛躍的に進歩し、それによって再び音場シミュレーションの可能性が膨らんできた。すなわち図 10 に示すように、線形系におけるたみ込み積分の原理に基づいて、数値計算によって求めることが難しいインパルス応答については物理的シミュレーション (模型実験) によって測定し、それを音楽やスピーチなどの任意の信号とデジタルコンボリューションの手法を利用して合成することによって、模型ホールの響き (音響特性) を伴った音 (ホールサウンド) が得られることになる。コンボリューションの具体的

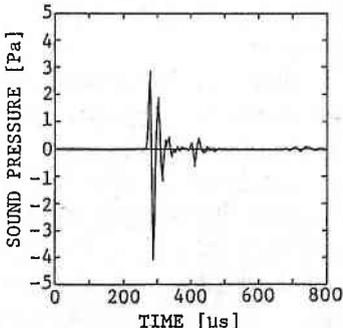


図 6 スパーク音源の音圧波形 (64回, 測定距離50cm)

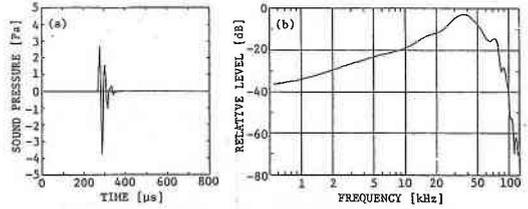


図 7 スパーク音源の音圧波形(a)とスペクトル(b)

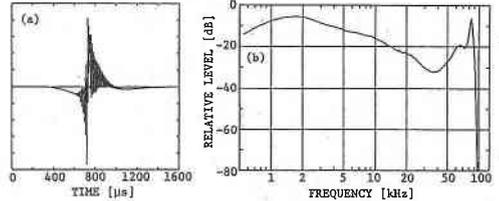


図 8 逆フィルタのインパルス応答(a)と周波数特性(b)

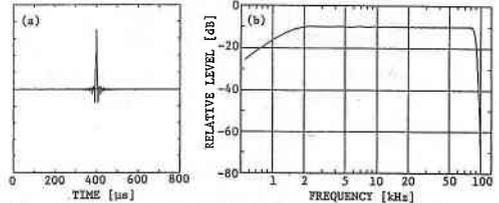


図 9 補正後のスパーク音源の波形(a)とスペクトル(b)

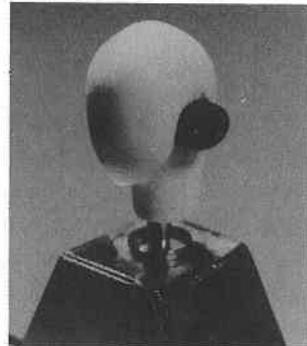


写真 3 1/10 縮尺模型ダミーヘッド

な方法としては、FFT アルゴリズムを利用する方法¹³⁾のほかに、最近では多数の DSP チップを用いた FIR フィルタによるリアルタイム演算装置も開発されている。このように、この方法は物理的シミュレーションとデジタル技術の利点を組み合わせたという意味で、一種のハイブリッド・シミュレーションと言える。筆者の研究室ではこれまでの模型実験手法に関する長年の蓄積と早稲田大学音響研究室との共同研究による信号処理技術の研究成果などに基づいて、この手法の開発を進めてきている。この種の技術が完成すれば、前述のようにきわめて心理的な要素が多い室内音響の研究に役立つだけでなく、各種のホールの設計段階でそのホールの音を直接耳で確かめてみるのが可能となる。

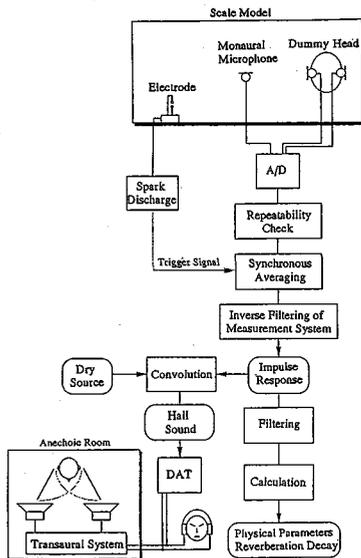


図10 模型実験による室内音場のシミュレーション

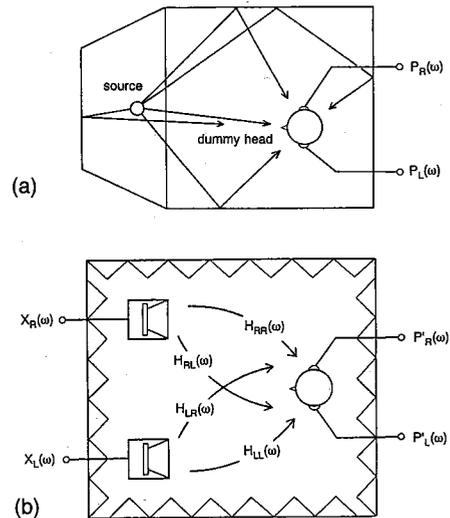


図11 トランスオーラル再生システム
(a) 原音場における收音 (b) 無響室における再生

(4) 試聴方法

上に述べた方法によれば、ホールの響きを伴った音響信号（両耳の入口における信号）が得られるわけであるが、その受聴方法が問題となる。最も簡単な方法としてはヘッドホン受聴があるが、この方法では音像が頭の近くから離れず、空間的な広がり感を得ることが難しい。そこで、図11(b)に示すように無響室にスピーカを二つ設置し、その中央で受聴する方法（トランスオーラル再生法）がある^{12), 14), 15)}。ただし、普通のステレオ再生のようにバイノーラル信号を二つのスピーカからそのまま出したのでは正確な再生にはならない。この方式では、ダミーヘッドの左（右）の耳のマイクロホンで受けた音圧 $p_L(\omega)$ ($p_R(\omega)$) と等しい音圧を受聴者の左（右）の耳元に正確に再現するような信号処理を施した2チャンネルの信号を二つのスピーカから放射する。そのために、左右のスピーカへの入力信号 $X_L(\omega)$, $X_R(\omega)$ はあらかじめ次式に示すような信号処理を施しておく。

$$\begin{vmatrix} X_L(\omega) \\ X_R(\omega) \end{vmatrix} = D^{-1}(\omega) \begin{vmatrix} H_{RR}(\omega) & -H_{RL}(\omega) \\ -H_{LR}(\omega) & H_{LL}(\omega) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} p_L(\omega) \\ p_R(\omega) \end{vmatrix}$$

ただし、 $D(\omega) = H_{LL}(\omega) \cdot H_{RR}(\omega) - H_{RL}(\omega) \cdot H_{LR}(\omega)$

この処理を行うためには、受聴者ごとにあらかじめそれぞれのスピーカから左右の耳までの伝達関数 $H_{LL}(\omega)$, $H_{LR}(\omega)$, $H_{RR}(\omega)$, $H_{RL}(\omega)$ をインパルス応答の形で測定しておく必要がある。このシステムで、模型ホール内で模型ダミーヘッドを通して測定したインパルス応答（2チャンネル）と音楽など任意の無響信号を合成した信号を再生することにより、そのホールの中でその音源

が放射されたときの音を3次元的な響きを伴って聞くことができる。

(5) 応用例

ホールの設計のための模型実験としては、これまでも多くの例があるが、比較的最近のものとしてはザ・シンホニーホール（大阪）、サントリーホール（東京）、オーチャードホール（東京）、東京芸術劇場、日立シビックセンター、愛知芸術センターなどについても設計段階で1/10縮尺模型実験が行われた。これらのうち最後の二つの実験では、筆者らが開発した上述のハイブリッドシミュレーションが実施され、設計段階で音楽演奏音の試聴が行われた。そのうち日立シビックセンターのコンサートホール（写真4、図12）については、実物完成後に模型実験との対応を詳細に検討する機会が得られた。このホールの設計の段階では、満席の状態について実験を行ったが、実物では満席状態について詳細な測定を行うことは難しい。そこで実物ホールの完成後に模型を空席状態に調整しなおし、模型と実物の対応を調べた。以下にその概要を述べる。

a) 残響時間の対応

模型ホールと実物ホールの残響時間を比較して図13に示す。周波数帯域全体にわたって、模型と実物の残響時間はほぼ一致している。

b) インパルス応答の対応

模型実験では前述のスパーク音源、実物測定では12面体無指向性スピーカを用いたスイープパルス法によってインパルス応答を測定した。音源はステージ中央とし、測定点として図12に示す客席部の8点を選んだ。模型実験では空気の音響吸収を補正するために、窒素ガスで置



写真4 日立シビックセンターコンサートホールの1/10縮尺模型

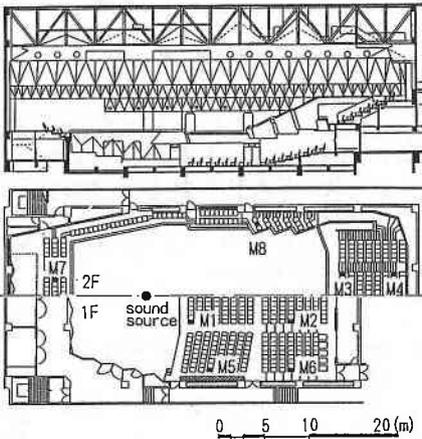


図12 日立シビックセンターコンサートホール (室容積:9,400m³, 客席数:806)

換した。測定結果の一例として、測定点4における模型・実物のインパルス応答のエンベロープ波形 (RMS 検波) を比較して図14に示すが、両者はよく対応した結果となっている。その他の測定点についてもほぼ同様の対応が見られた。このような対応性をさらに細かく検討するために、模型と実物の合計16の測定点におけるインパルス応答のすべての組み合わせについて相互相関係数を求め、これらを類似度データとして多次元尺度構成法による解析を行った。その2次元布置を求めた結果を図15に示すが、実物と模型で対応する測定点は近接して布置しており、それらの点のインパルス応答が類似していることを示している。

c) 聴感物理量の対応

インパルス応答の測定結果をもとに、各種の聴感物理量について実物と模型の対応を調べた。そのうちここでは前述の D₅₀ の値についての結果を図16に示すが、オーバーオール (○印)、500 Hz-1 kHz の 2 オクターブバンド (●印) ともにほぼ45°線に乗っており、実物と模型でよく対応している。

d) 聴感実験による比較

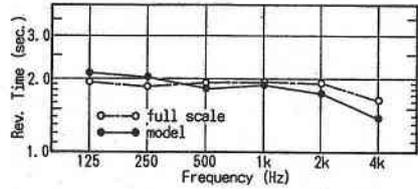


図13 残響時間の対応

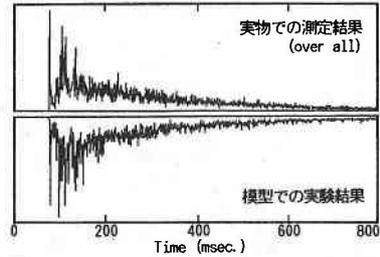


図14 インパルス応答波形の対応例 (測定点 M4)

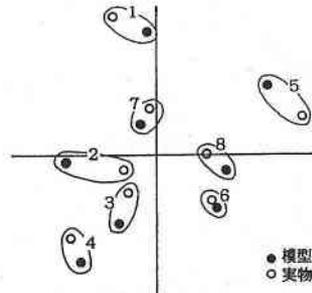


図15 インパルス応答波形の類似度 (MDS 解析)

上述の検討によって模型ホールと実物ホールとの物理的な対応性はある程度確認できたが、やはり実際に耳で聞いたときの聴感的印象の類似性についても調べる必要がある。そこで前述のハイブリッドシミュレーションの手法を適用して、実物、模型ともにダミーヘッドを通して測定したバイノーラル・インパルス応答に同一の音源ソース (女性コーラスを使用) をたたみ込み、トランスオーラルシステムを通して試聴実験を行った。その結果のうち、ここでは2つの実験結果を示す。

図17は“音源からの距離感”の対応性について調べた結果である。この実験では、実物、模型のそれぞれについて座席位置8点の音を組み合わせたペアを被験者に呈示し、一対比較法によって“どちらがより遠く感じるか”を判断させ、“より遠い”に2点、“同じ”あるいは“判断できない”に対して1点を与え、各座席ごとに得点を集計した。被験者は4人であるが、ほぼ同様の傾向を示したのでそれらの平均値を求めた。その結果が図17で、これを見ると模型ホールと実物ホールとで音源からの距離感についてほぼ一致した判断結果が得られている。

もう一つの実験として“音の好ましき (preference)”

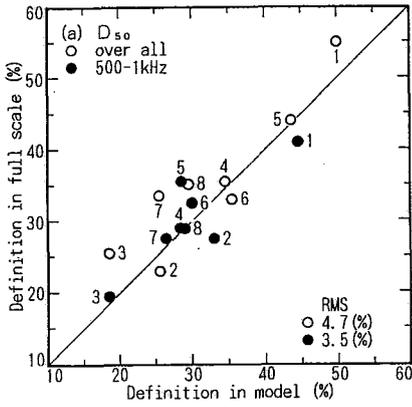


図16 D₅₀の対応

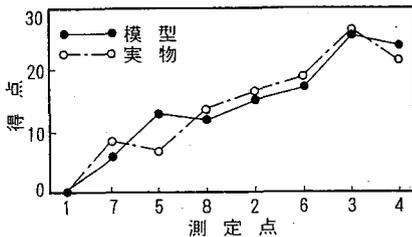


図17 “距離感”の対応 (被験者4人の平均)

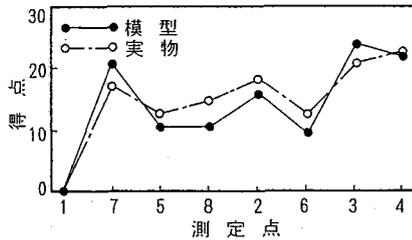


図18 “音の好ましさ”の対応 (1被験者の例)

について調べてみた。この実験でも一対ごとの音を呈示し、“どちらがより好ましいか”を判断させた。その結果、好ましさについては個人差がみられ、平均的には扱えないことがわかった。しかし各被験者についてみると、模型と実物の音に対してよく類似した判断を行っていることがわかった。図18にその一例を示す。この結果も、模型と実物との対応性の一端を示している。

5. む す び

ホールにおける音場および音響効果（聴感的印象）の予測方法について、主として筆者の研究室における研究成果を中心に概説した。

最近、virtual reality（人工現実感）の研究がいろいろな分野で盛んに行われるようになったが、室内音響の

分野では古くからこの種の技術の開発に力が注がれてきた。1934年に Spandöck が行ったホールの模型実験でも、模型ホールの音を試聴する試みが行われている。もちろん当時の音響技術では十分な音質が得られなかったが、その後のアナログ技術の開発、さらに最近のデジタル信号処理技術の進歩によってこの種のシミュレーションの技術は格段に進歩した。

しかし、インパルス応答の測定方法、信号処理の高速化、収音・再生系の高精度化など、今後さらに検討を行わなければならない問題も多く残されている。また室内のインパルス応答を予測する方法については、物理的シミュレーションに代わる数値シミュレーションの手法を開発する必要がある。（1992年12月2日受理）

参 考 文 献

- 1) 永田穂：建築の音響設計，オーム社，1991
- 2) R. Thiele, “Richtungsverteilung und Zeitfolge der Sehallrückwürfe in Sälen”, Acoustica, 3, p. 291, 1953
- 3) W. Reichardt und U. Lehmann, “Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen durch Auswertung von Impulsschalltests” Acoustica 48, p. 174, 1981
- 4) 安藤四一：コンサートホール音響学，シュプリンガー・フェアラーク東京，1987
- 5) 寺井俊夫，河合康人：室内の過渡音場の計算，日本音響学会建築音響委員会資料 AA87-09 1987
- 6) 加川幸雄：有限要素法による振動・音響工学/基礎と応用，培風館，1989
- 7) 田中俊光：境界要素法を用いた音場の数値解析，日本音響学会誌48巻6号，p. 412-419, 1992
- 8) 木村翔，羽入敏樹：室内音場のコンピュータシミュレーション，日本音響学会誌48巻3号，p. 162-169, 1992
- 9) 日本音響学会誌48巻4号（1992）賛助会員のページ，p. 258-282
- 10) 橘秀樹，日高新人，西自由利，石井聖光：建築音響における模型実験法に関する研究，東京大学生産技術研究所報告，第35巻4号，1990
- 11) 橘秀樹，日高新人：実物及び模型ホールのインパルス応答の測定，日本音響学会誌48巻4号，p. 244-249, 1992
- 12) 佐藤史明，嶋田泰，日高新人，橘秀樹：室内音響模型実験におけるバイノーラル収音・再生法，日本音響学会電気音響研究会資料 EA92-5, 1992
- 13) Y. Hidaka, H. Yano and H. Tachibana, “Scale model experiment on room acoustics by hybrid simulation technique,” J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 10(2), p. 111-117, 1989
- 14) P. Damaske, “Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction”, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 50, 1971
- 15) 浜田晴夫：バイノーラル音場再生系について，日本音響学会誌48巻4号，p. 250-257, 1992