

近接4点法による コンサートホールの音響測定

早稲田大学理工学部 山崎芳男・伊藤 毅

1. 近接4点法の原理

最近わが国にも音楽専用コンサートホールが相次いで誕生している。また世界には数多くの著名なコンサートホールがあり、その良し悪しや好き嫌いが盛んに論じられている。

音楽に限らずわれわれが音を聴く場合、音響測定のために作った無響室や新雪の降り積った野原といった特殊な環境 自由音場 を除いては、音源そのものから発せられる音の他に、多かれ少なかれその場所持有の“響き”を必ず聴いている。すなわち、音源から直接届く直接音に続いて壁や床や天井に反射した反射音が、さらに時間の経過とともにさまざまな方向から反射音が到来する。

ところでコンサートホールのような音場の評価パラメータとして残響時間が広く使われている。われわれは残響時間がほぼ等しいコンサートホールで音の違いを感じることがしばしばある。この音の違いは反射音

の時間構造や到来方向や強さの違い、とくに直接音に続く初期反射音の到来方向や密度や強さ、すなわち空間情報の違いに起因しているものと考えられる。

この反射音の到来を把握する方法があれば有効な解析手段となるはずである。指向性の鋭いマイクロホンを使って角度を少しずつ変えて測定したり、マイクロホンを移動しながら音場の沢山の点で測定する方法等が試みられているが、大規模な測定とならざるを得ない。人間はたった2つの耳でこの反射音の空間情報の違いを聞きわけている。何とか簡単な測定で空間情報を把握する方法はないものであろうか。

筆者らは近接4点法と呼んでいる手法により、音場の空間情報を把握する測定を1976年頃から行ってきた。2つの耳では原理的には前後や上下の方向判定はできないはずであるが、人間は頭を少し動かして巧みにこれを判別している。頭を動かさなくとも、たとえ片方の耳をふさいでも、訓練すると方向判別が可能と

なる。うそのような話であるが、実験してみれば明らかである。これは人間の聴覚のすばらしいところで、頭が存在により到来方向の違いにより微妙に変わる音質の違いを記憶しているからである。したがって初めて聞く音に対しては当然方向判定の力はない。コンピューターが驚異的に発展した現代といえども、機械にこのような判断は到底不可能である。そこで4点に置いたマイクロホンを使うことにしたわけである。

この手法は地震の震源を複数の観測点で捉えた同じ振動から決定するように、同一平面上にない4点(通常の測定では写真1に示すように原点および直交3軸上原点から5cm程度の距離にある3点)のマイクロホンでインパルス応答を収録し、その時間構造のわずかな違いに着目して、同一反射音の到来時刻を相関処理等で求め、4つの受音点からの距離を計算し、等価的な反射音・仮想音源の位置を決定しようというものである(図1)。図2に反射板1枚をおいた例を示す。4つのマイクロ

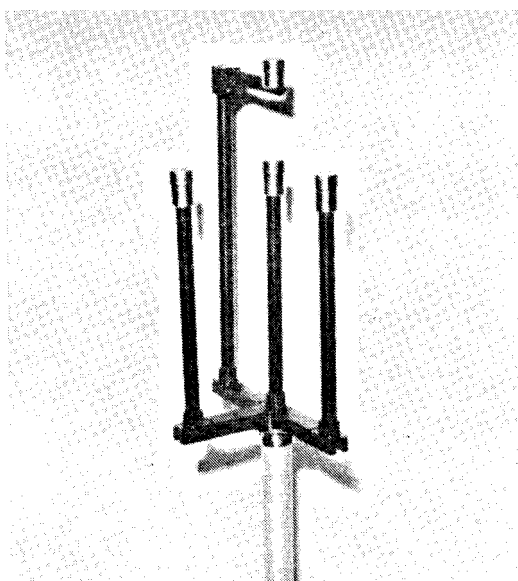


写真1 近接4点法で用いられるマイクロホン
(間隔は50 mm)

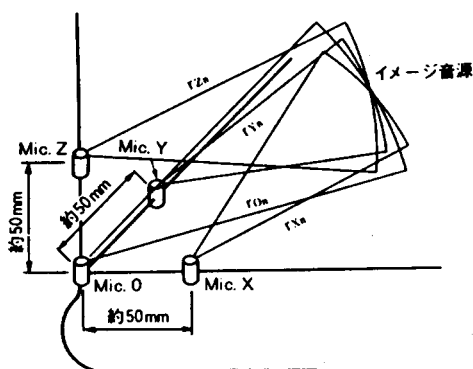


図1
近接4点法による音場測定
のプロック図

ホンで測定したインパルス応答の時間構造は直接音や反射音の位置により微妙に違うものとなる。1つのマイクロホンから、ある反射音までの距離がわかれば、その反射音はマイクロホンを中心とした球の上にあることがわかり、さらにもう1点からの距離がわかれば2つの球の交点として空間上の円周上に反射音があることがわかり、さらにもう1点からの距離がわかると空間内の2点が定

まる。さらに、もう1点、他の3点がつくる平面上でない1点、都合4点からの距離がわかると、空間内の1点を反射音の位置として決定することができるわけである。

2. 測定装置

以前は4チャンネルPCMテープレコーダーでインパルス応答を記録し、大型計算機による後処理で仮想

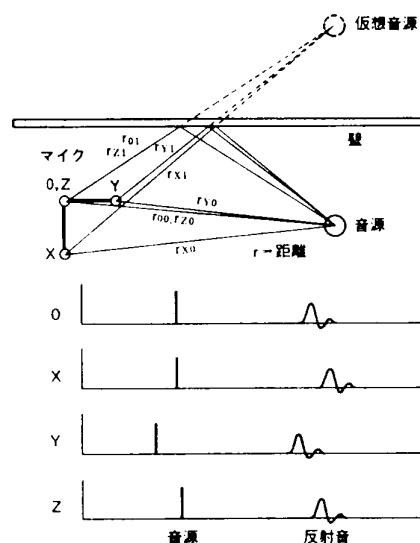


図2 無響室内に板を1枚置いた状態を
近接4点法で測定する

音源を計算していたが、最近インパルス応答の取り込み、仮想音源の計算とともにパーソナルコンピュータで実行が可能になった。

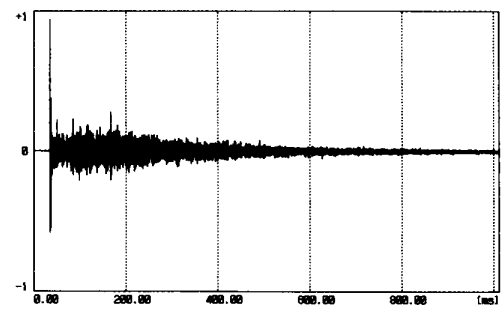
インパルス応答は幅 $2 \sim 10 \mu s$ 、波高値 $50 \sim 100V$ のパルスで対向させた2つの20cm全域スピーカーを駆動し、その応答を4チャンネル同時にパーソナルコンピュータのメモリ(4MByte)に取り込み、測定上時のSN比に応じて32~64回平均化して測定した。パルスの提示間隔は周期的な雑音の影響をも軽減すべく、5~6sの範囲を乱数を使って設定した。インパルス応答はフロッピーディスクに保存するとともに、PCMテープレコーダーにもデータの形で記録している。なお、これとは別に万が一に備え測定中、常に4チャンネルPCMテープレコーダーでマイクロホン出力をバックアップ用に記録している。



図3 アムステルダム・コンサートヘボウ測定結果

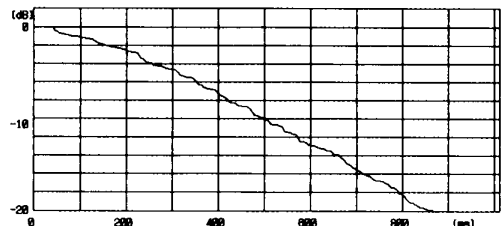
容積：18,700m³
 席数：2,206席
 残響時間：空席時2.61秒
 満席時2.05秒

インパルス応答



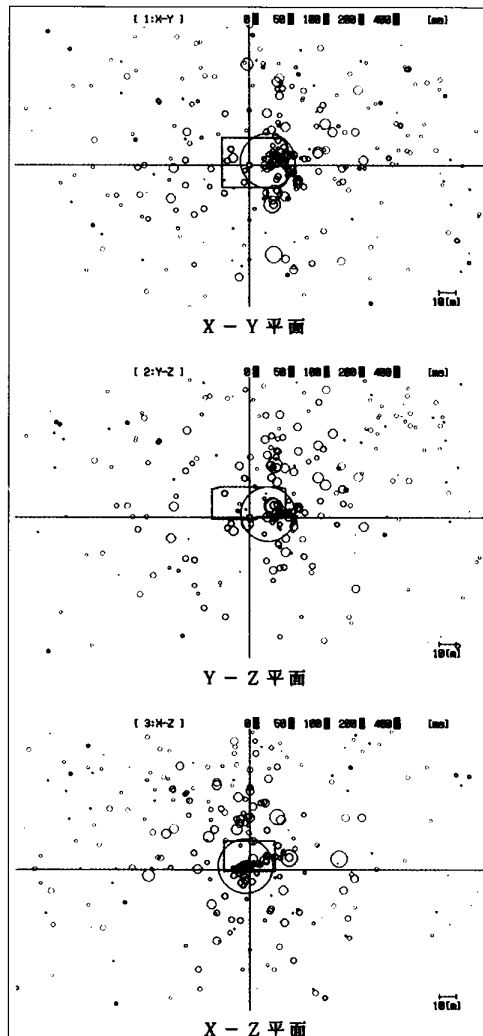
(a)

残響波形
(500Hz)



(b)

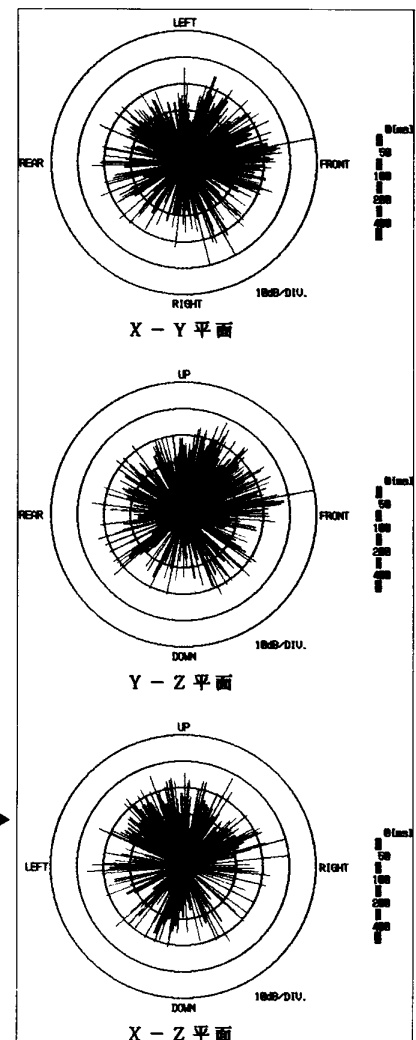
仮想音源分布図



(c)

指向性パターン

アムステルダム
 ・コンサート
 ヘボウ



(d)

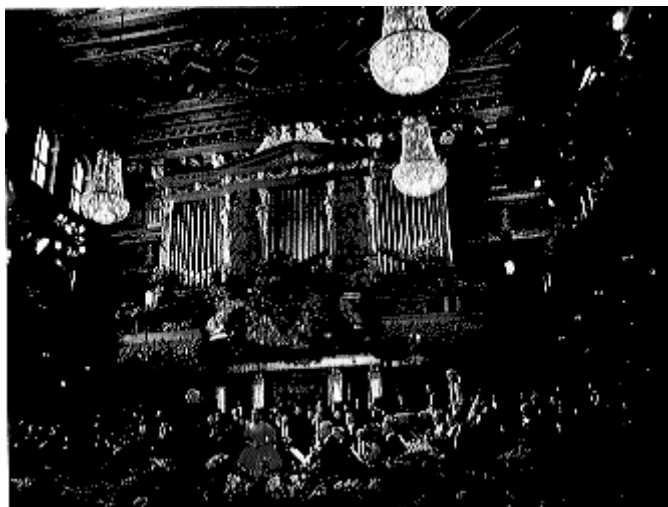
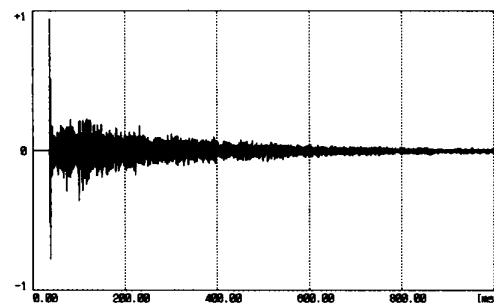


図4 ウィーン・ムジークフェラインザール測定結果

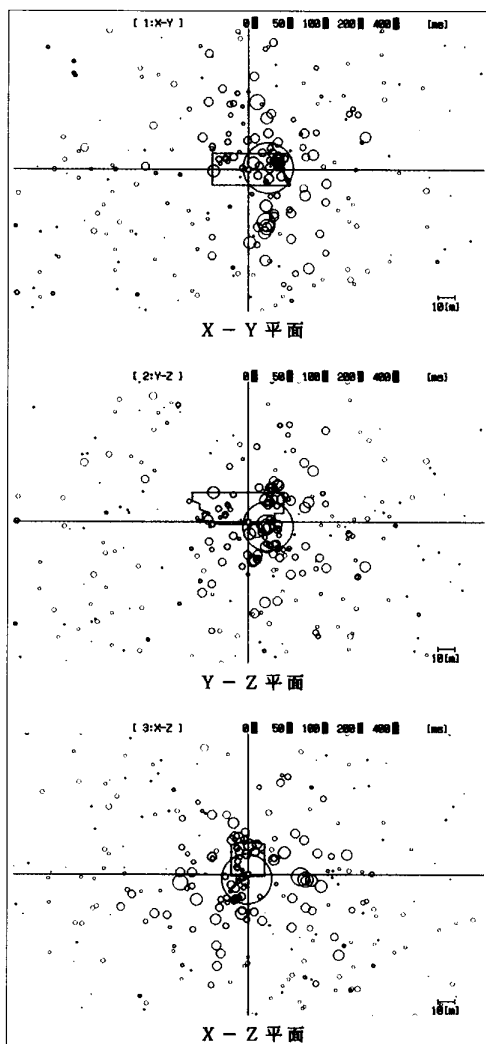


(a)

インパルス応答

▲(b)
残響波形
(500Hz)

容積: 15,000m³
席数: 1,700席
残響時間: 空席時2.85秒
満席時2.02秒



◀(c)

仮想音源分布図

(d)▶
指向性パターン

ウィーン・
ムジークフェラ
インザール

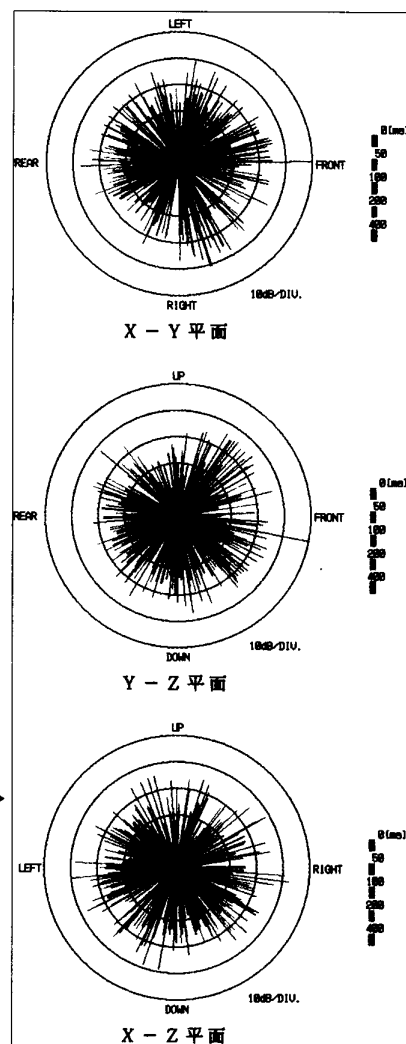
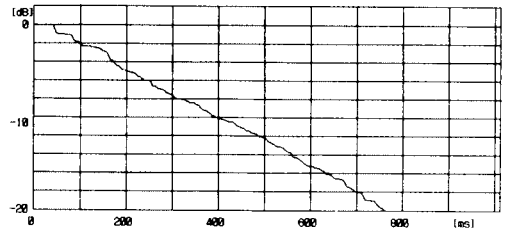
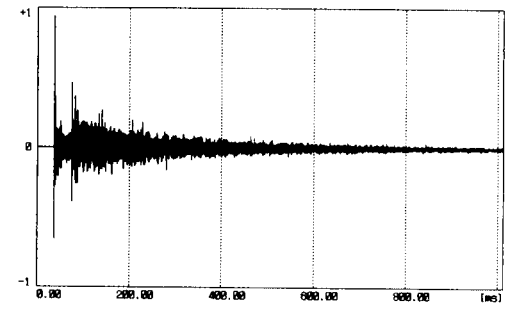




図5 ポストン・シンフォニーホール測定結果

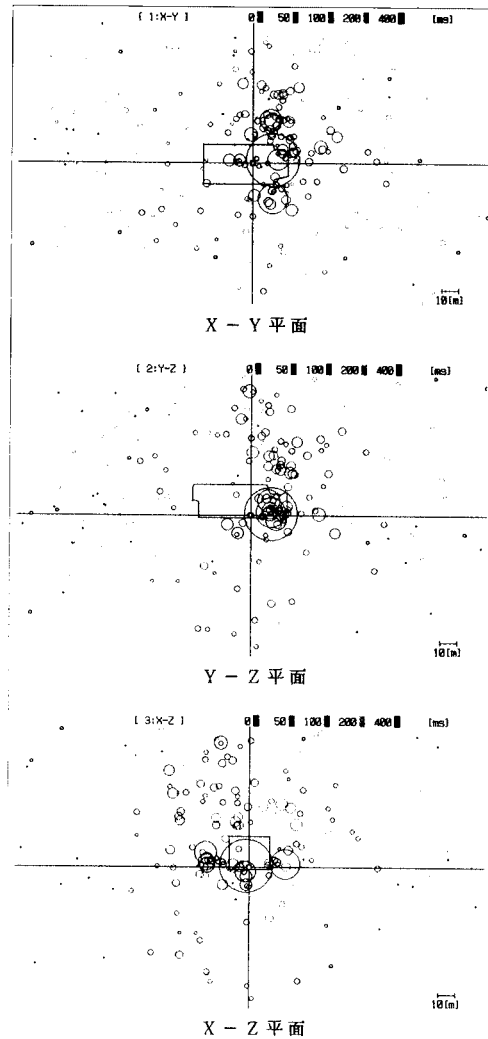


右にa)
インパルス応答

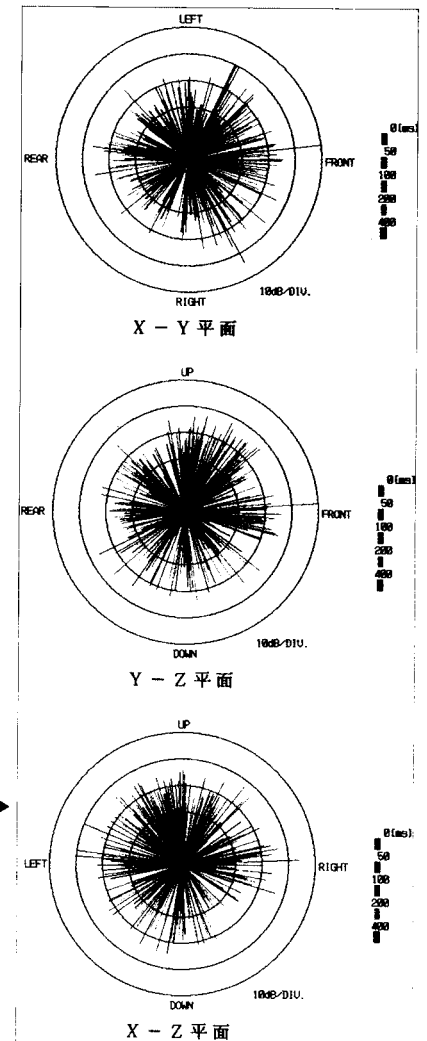
▲b)

残響波形
500Hz

容積：18,700m³
席数：2,631席
残響時間：
空席時2.31秒
満席時1.9 秒



← c)
仮想音源分布図

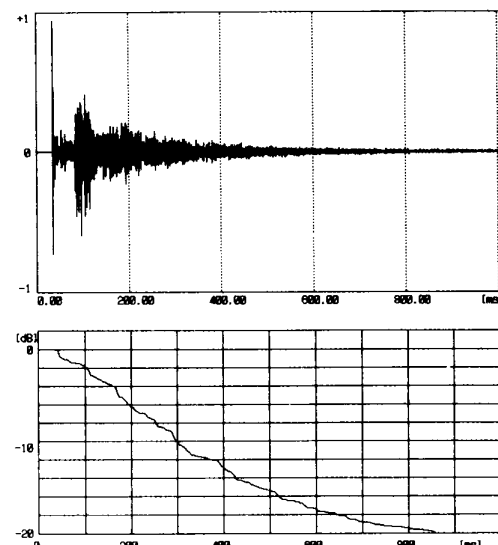


d ▶
指向性パターン

ポストン・
シンフォニー
ホール



図6 シカゴ・オーケストラ・ホール測定結果

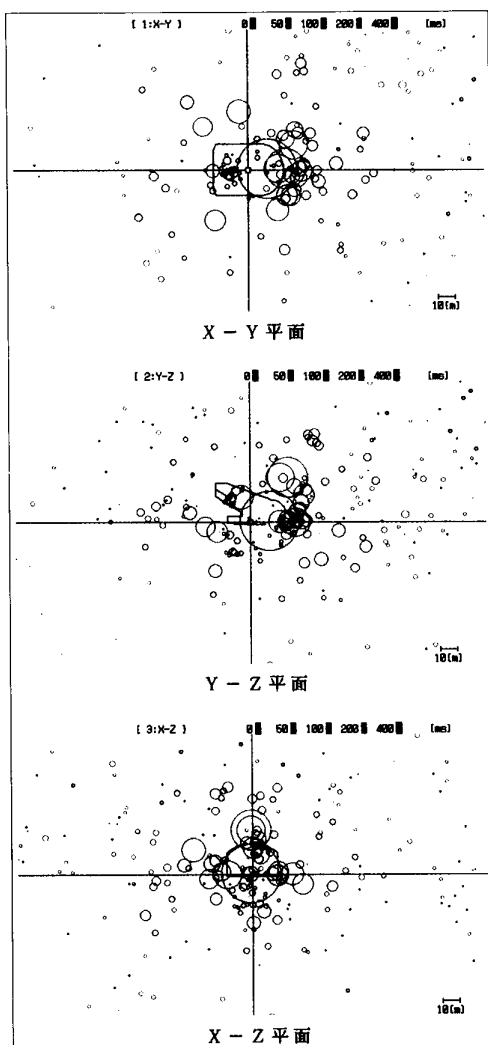


右上(a)
インパルス応答

▲(b)

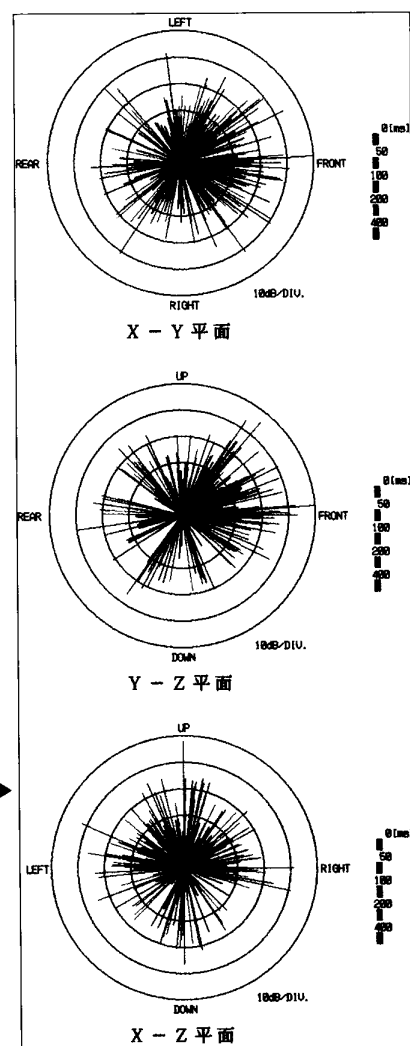
残響波形
(500Hz)

容積: 15,176m³
席数: 2,582席
残響時間:
空席時1.74秒
満席時1.3秒



◀(c)
仮想音源分布図

(d)▶
指向性パターン



シカゴ・
オーケストラ
ホール



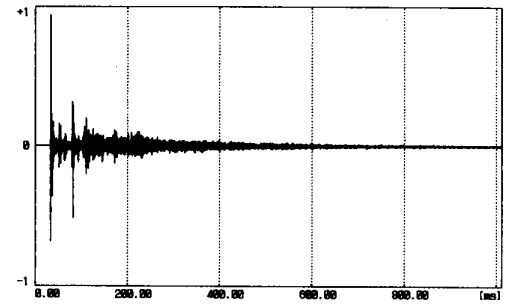
図7 ミュンヘン・フィルハーモニー測定結果

容積：30,000m³

席数：2,500席

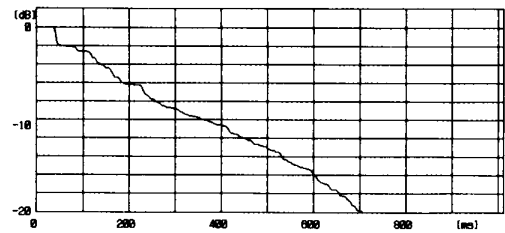
残響時間：空席時2.14秒

満席時1.86秒



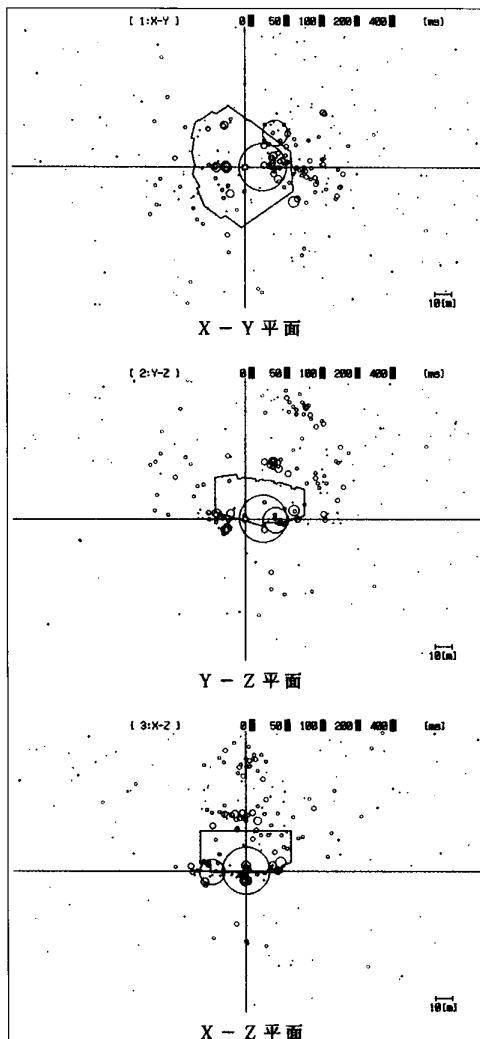
(a)

インパルス応答



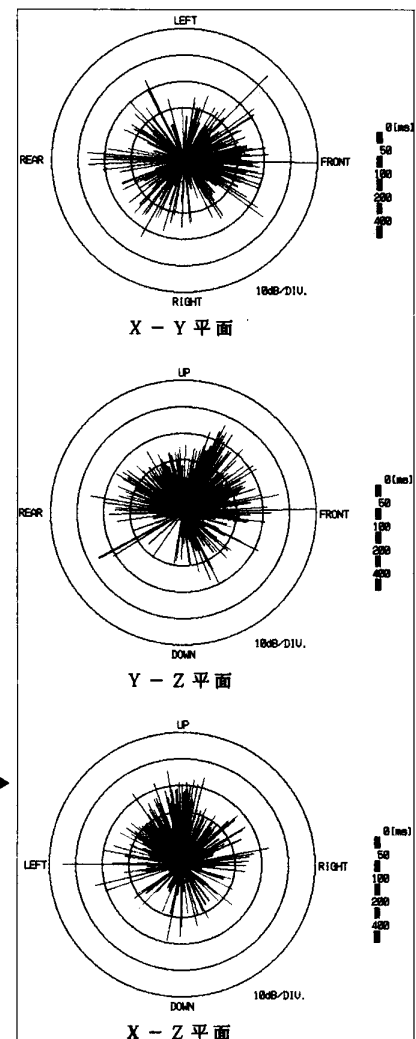
(b)

残響波形
(500Hz)



(c)

仮想音源分布図



(d) 指向性パターン

ミュンヘン・
フィル
ハーモニー

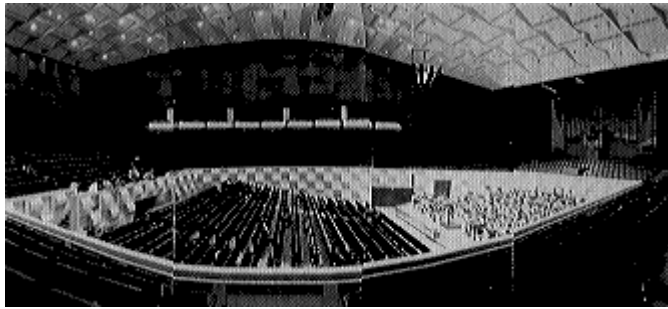
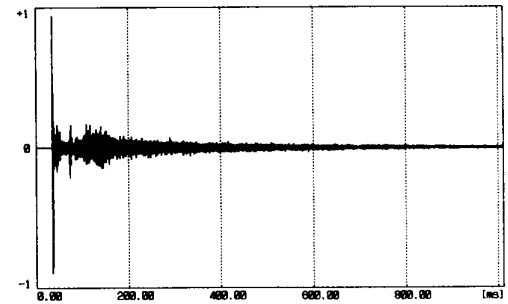


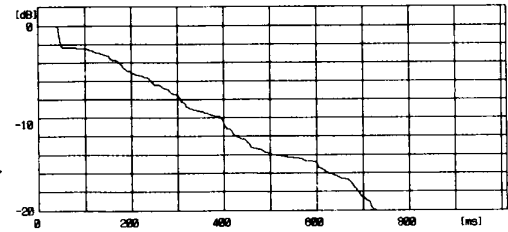
図8 ロッテルダム・デデーレン測定結果

容積：27,070m³
 席数：2,222席
 残響時間：空席時2.32秒
 満席時2.06秒

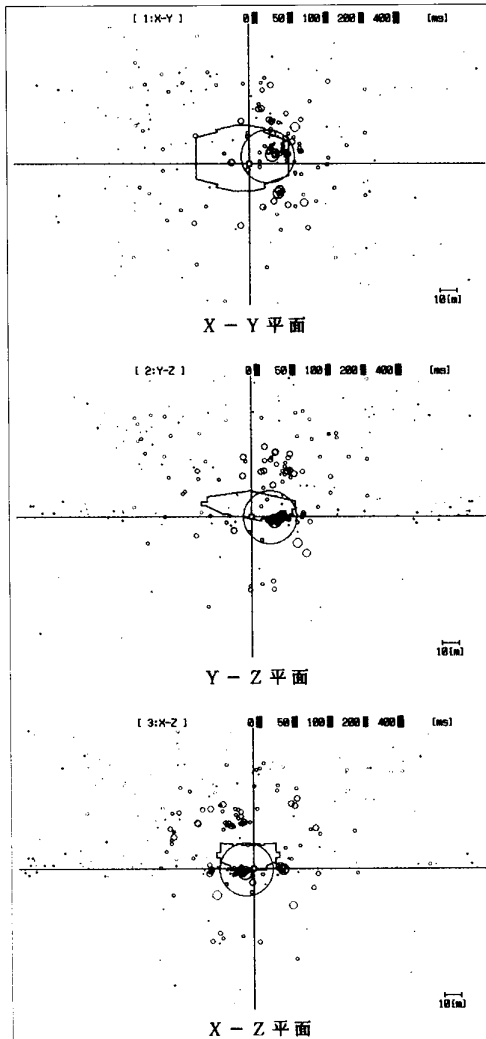
(a) ▶
インパルス応答



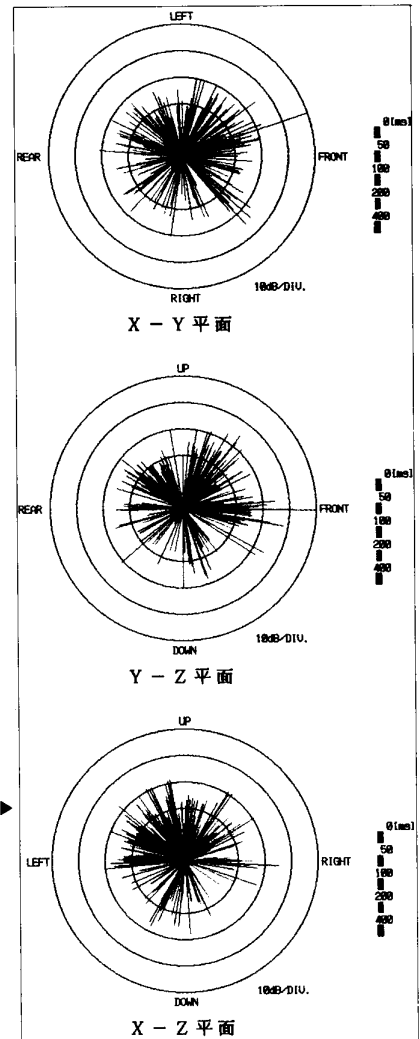
(b) ▶
残響波形
(500Hz)



◀ (c)
仮想音源分布図



(d) ▶
指向性パターン



ロッテルダム・
デデーレン

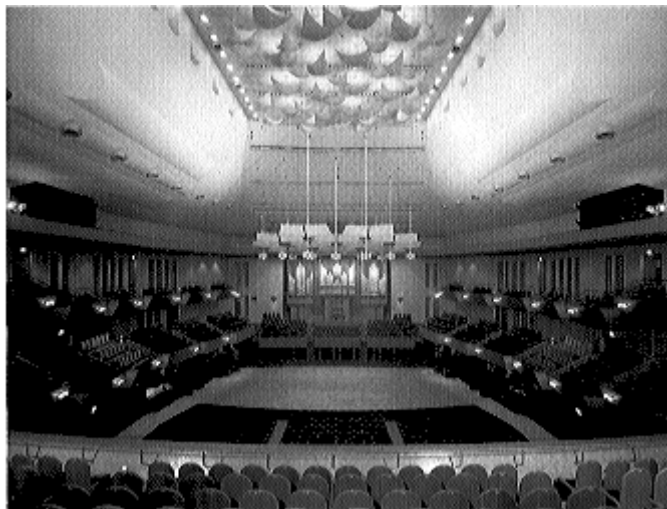
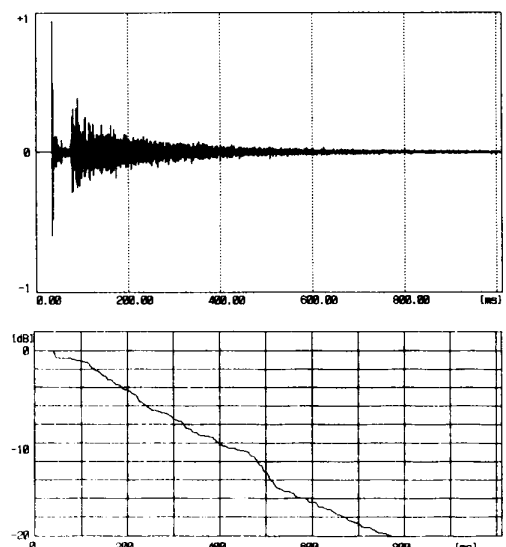


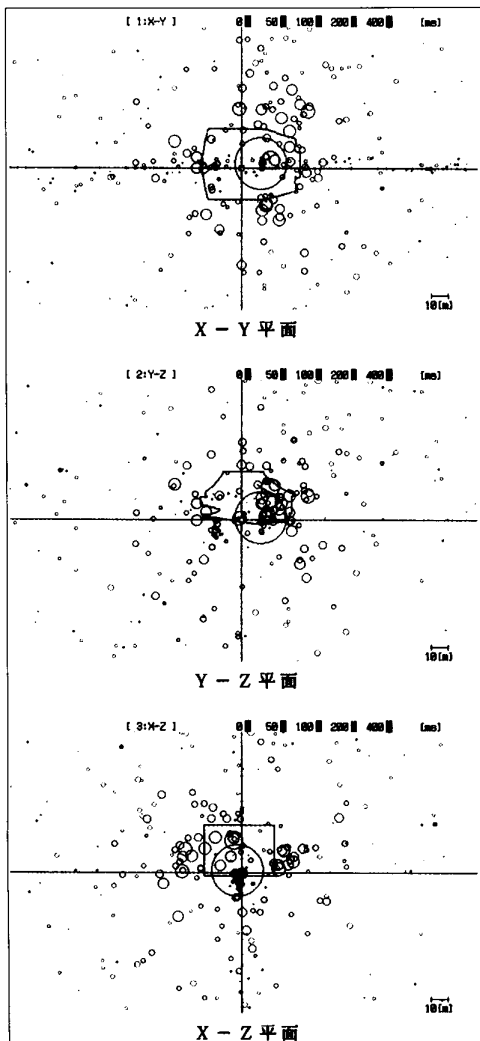
図9 大阪・ザ・シンフォニーホール測定結果



インパルス応答

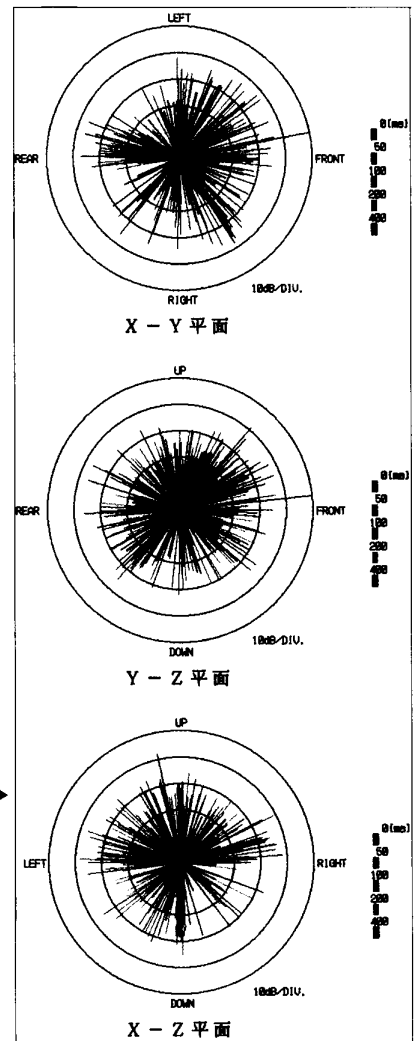
▲(b)
残響波形
(500Hz)

容積：17,800m³
席数：1,702席
残響時間：空席時2.5秒
満席時2.0秒



◀(c)
仮想音源分布図

(d)▶
指向性パターン



大阪・ザ・
シンフォニー
ホール

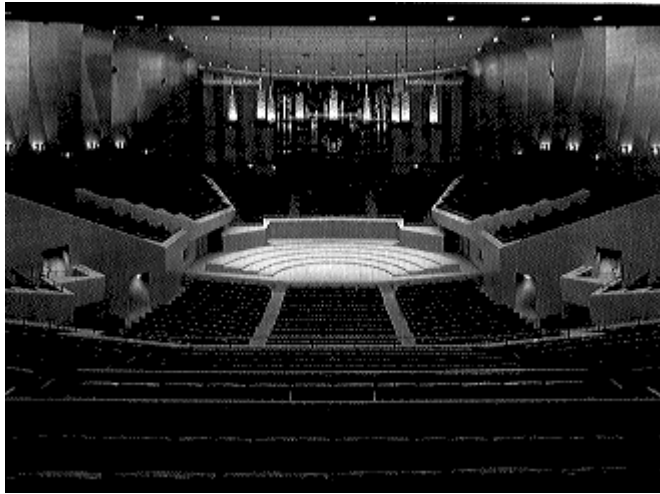
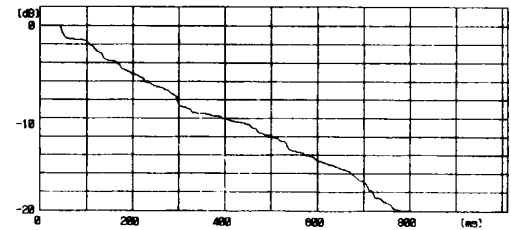
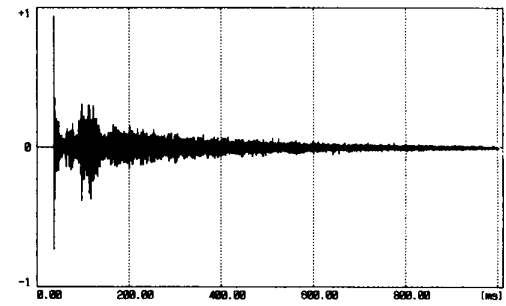


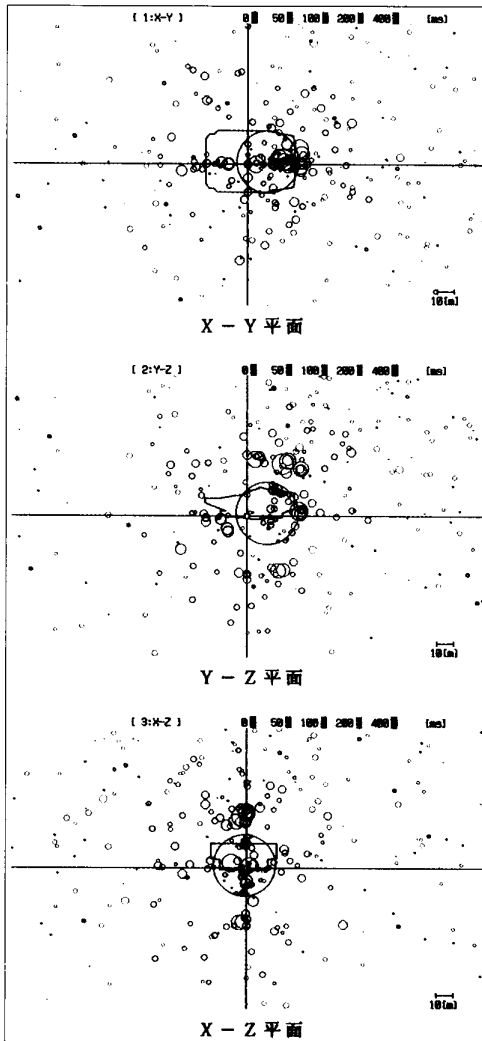
図10 東京・サントリーホール測定結果



(a)
インパルス応答

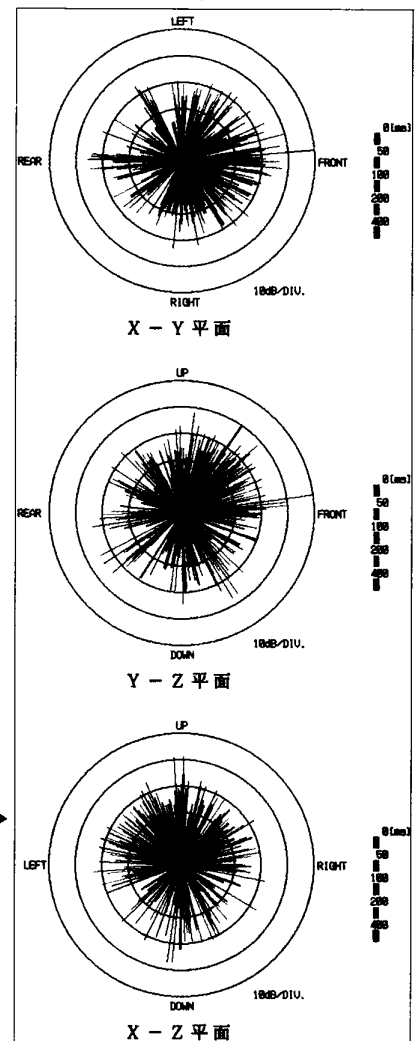
▲(b)
残響波形
(500Hz)

容積：21,000m³
席数：2,006席
残響時間：空席時2.6秒
満席時2.1秒



◀(c)
仮想音源分布図

(d)▶
指向性パターン



東京・
サントリー
ホール

パルスによるインパルス応答の測定の他に、予めスピーカー出力がピンクノイズになるように特性を補正した雑音による伝送特性の測定もSN比の悪い場合などに併用している。しかし、この方法によるインパルス応答の算出は後処理の負担が大きい。パルスによる測定は音源の平均出力が小さいので、雑音には神経は使うが、測定中に耳である程度音響を確かめられるという利点があるので、通常はパルスによる方法を採用している。

3. 測定結果

図3～図11にそれぞれアムステルダム、ウィーンのムジークフェラインザール、ボストンシンフォニーホール、シカゴのオーケストラホール、ミュンヘンのフィルハーモニー、ロッテルダムのデデーレン、大阪のザ・シンフォニーホールと東京のサントリーホールの測定結果を示す。測定点は舞台上の高さ1.5mの音源から12mの距離にある1階の中央からわずかにずれた高さ1.2mの点である。ホール容積と収容人員および500Hzの残響時間を付記した。なお一部ホールに満席時の残響時間を付記した。これは客席で録音したオーケストラの演奏の適当な部分を使って求めた満席時の残響時間をオクターブバンドで分析したものである。

(a)にインパルス応答を、(b)にインパルス応答をデジタルフィルターで500Hz、1/3オクターブに帯域制限したうえ、M. R. Schroeder⁽⁴⁾の自乗積分法で求めた初期残響波形約1sを示す。

(c)は前述の近接4点法により計算された仮想音源をXY平面（ホール上方から下方）とYZ平面（右から左）、XZ平面（後ろから前）に投影したものである。円の中心が投影された仮想音源、すなわち直接音および“反射音”の座標位置、円の面積がそのパワーに比例し、直交軸の交点は受音点を示す。なお図中にホール概形をそえた。

(d)に角平面を回転面とした反射音の指向性パターンを示す。回転方向の開き角1度、回転面に垂直方向の開き角 ± 45 度の範囲から入射する仮想音源のパワーを示したものである。1目盛りは10dBである。仮想音源分布と指向性パターンは直接音から50msを赤、50～100msを緑、100～200msを紫、200～400msを青、400ms以降を黒と色分けして表示した。

4. むすび

仮想音源分布からホール形状の違いによる初期反射音の空間構造の違いが観察される。

たとえば、シューボックス型のムジークフェラインザールやボストンシンフォニーホールでは仮想音源は広く分布し、とくに横方向からの反射音が豊富である。

一方、ミュンヘンのフィルハーモニーでは仮想音源は比較的舞台の近くに集中しており、シューボックス型のホールに比較して横方向からの反射音が少な目である。

また、ムジークフェラインザールにおいて空席時と満席時の残響時間の違いが大きい、仮想音源分布図で下方からの反射音が上方からに比較してはるかに多いことと対応して

いるものと考えられる。ここでは求められた仮想音源のすべての分布と指向性パターンを示したが、それぞれ時間変化や方向や到来範囲を指定して表示することも可能である。また仮想分布からの任意の2点間の相互相関関数や到来方向別の残響特性等の計算も可能である。今後設計に役立つような表現方法を研究していきたい。

謝 辞

本調査の一部は鹿島学術振興財団からの研究助成により、前川・森本・橘・平沢らと実施したヨーロッパのコンサートホールの音響調査の一環として測定したものである。測定にあたってはルール大学のDr. Posselft、アーヘン工科大学のKuttruf教授、プラハのResearch Institute of Sound and PictureのDr. Novakらの力を借りた。関係各位に謝意を表する。

また、近接4点法は早稲田大学理工学部音響研究室の多くの卒業生の力の結晶である。尽力いただいた各位に謝意を表する。

【参考文献】

- (1) 山須田繁，小路法男，安川謙一郎，斉藤博之，山崎芳男，伊藤毅：“デジタル技術を用いた室内の空間情報の一測定法”。音響学会建築音響研究会資料AA 79 03 (1979.5)。
- (2) 橘秀樹，山崎芳男，森本政之，平沢佳男，前川純一：“ヨーロッパのコンサートホールの音響に関する実測調査（第1報）”。音響学会誌，43，118～124，4，23 (1987)。
- (3) 山崎芳男，橘秀樹，森本政之，平沢佳男，前川純一：“ヨーロッパのコンサートホールの音響に関する実測調査（第2報）”。音響学会誌，44，118～124，4，23 (1987)。
- (4) M. R. Schroeder：“New Method of Measuring Reverberation Time”，J. A. S. A. 37，409～412 (1965)。