

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)

近接4点法による測定結果 *1

山崎芳男 *2・ 橘 秀樹 *3・ 森本政之 *4

(早稲田大学理工学部)(東京大学生産技術研究所)(神戸大学工学部)

平沢佳男 *5・ 前川純一 *6

(オンキヨー(株)音響技術研究所)(神戸大学工学部)

1. まえがき

1986年秋に大阪フィルハーモニー交響楽団のヨーロッパ公演が行われた。これを機会に音響調査グループを組織して、同交響楽団の公演が行われるホールを中心に七つのコンサートホールの音響に関する調査を実施した。我々以外にルール大学の Dr. Posselt と早稲田大学の伊勢史郎、清山信正の学生2名が調査に加わった。

第1報で述べたように今回の調査では、(1)通常の方法による室内音響特性の測定、(2)近接4点法による室内空間情報の測定、(3)ダミーヘッドによるインパルス応答及び無響室録音楽器音等の録音、(4)一部のホールにおいては演奏を客席で実耳に装着したマイクロホンによる録音等を実施した。このうち(1)は橘、(2)は山崎、(3)は森本、平沢及び Dr. Posselt、(4)は橘が中心となって実施した。また、極力音楽を耳で聴くよう心掛けると共に、ホール設計関係者、楽団員やホールの運営に携わる方々と話し合う機会を作るよう努力した。

ここでは(2)の近接4点法による測定結果を中心に報告する。

2. 準備

前川を中心に出発の1年半前から準備が進められた。ルール大学に客員研究員として滞在していた森本と Dr. Posselt がホールや大学、ホテル等とのヨーロッパでの折衝、橘と山崎が物理測定の段取り、帰国した森本と平

沢が大阪フィルハーモニー交響楽団の数名の団員の協力を得て無響室録音による評価用音源の制作等の準備を担当し、しばしば打ち合わせを行った。パワーアンプや電圧変換用のトランスなどはルール大学から借用することとした。また、機材が多い上、深夜に及ぶ測定もあるので、全行程を通じてバスをチャーターすることとした。

7月の大阪フィルハーモニー交響楽団の東京公演の際上野の文化会館において予備実験を行った。演奏会当日の測定が2か所予定されているが、すべての測定をリハーサル前に終えるには、測定項目を必要最低限に絞った上、よほど手際良く測定する必要があることが確認された。そこで物理特性測定用の各種の信号と無響室録音の楽音を連続して再生するPCM録音テープを用意したり、同時に2~3測定点で収録するなどの方法を導入することとした。また、音源位置は舞台中央の1点、受音点は6点を基本とし、うち客席中央部の音源から12mの1点をどのホールでも必ず測定する基準測定点と定めた。出発直前に早稲田大学の大隈講堂で最終的な予備測定を行った。

測定開始が丁度秋の学会の直後であったためヨーロッパには三三五五集まる結果となった。ルール大学に送られた機材を点検のうえバスに積み込みウィーンへ、10月5日全員が合流し、その晩プラチスラバで最初の測定を行った。測定したデータはその日のうちに確認、整理するよう努めた。

3. 近接4点法

近接4点法は同一平面上にない4点(今回の測定では原点及び直交3軸上原点から5cmの3点)のマイクロホンでインパルス応答を収録し、4本のインパルス応答から相関の手法で同一‘反射音’を見出し、その到来時間の違いに着目して特定の‘反射音’の空間座標と大きさを計算する測定方法である。ところでこの‘反射音’は四つのマイクロホンの位置から見た等価的な反射音である。すなわちこの手法では4マイクロホン出力をすべて

*1 Survey on the acoustics of concert halls in European countries (The 2nd report) Measured results by four-point microphone method .

*2 Yoshio Yamasaki (School of Science and Engineering, Waseda University, Tokyo, 160)

*3 Hideki Tachibana (Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo, 106)

*4 Masayuki Morimoto (Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe, 657)

*5 Yoshio Hirasawa (Acoustic Research Laboratory, ONKYO Co., Neyagawa, 527)

*6 Zyun-iti Maekawa (Faculty of Engineering, Kobe University, Kobe, 657)

の組み合わせについて、その間隔で決まる範囲の相互相関関数を調べ、相関の強い波形を同一反射音と見なしている。従って初期反射音部分では実際の反射音と一致するが、時間の経過と共に幾つかの反射音が重なると、等価的な‘反射音’が計算されることになる。

以前はPCMテープレコーダ等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音源を計算していたが、今回の測定を含め最近ではインパルス応答の取り込み、仮想音源の計算ともにパーソナルコンピュータで実行している。インパルス応答は幅 $10\mu\text{s}$ 、波高値 70V のパルスで対向配置した二つの口径 20cm の全域スピーカーを駆動し、その応答を4チャンネル同時に取り込み、測定時の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の範囲に乱数を使って設定した。今回の測定では約2.1sの平均化されたインパルス応答をフロッピーディスクに保存すると共にPCMテープレコーダにもデータの形で記録した。なお、これとは別に測定中常にマイクロホン出力を4チャンネルPCMテープレコーダでバックアップ用に記録した。

パルスによるインパルス応答の測定のほか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比の悪い場合や時間に制約がある場合に実施した。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1点の測定に数分を要するが、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。今回の調査にも役立った。

4. 測定結果

図-1～7に各ホールごとの測定結果を示す。その内容は以下のとおりである。

4.1 ホールの概形と残響時間

(8)にホールの平面図(縮尺1/1,000)を示す。音源を \times 、測定点を \circ 、基準測定点を \square で記した。

また、ホール容積と収容人員及び橋が測定・分析した500Hzの残響時間を付記した。空席時の残響時間は1/3オクターブ、客席で録音したオーケストラ音の適当な部分を使って求めた満席時の残響時間はオクターブバンドで分析したものである。

4.2 インパルス応答

基準測定点においた近接4点法用の○マイクロホンのインパルス応答(全帯域:スピーカー,マイクロホン等の測定系を含む)の初期部分440msを(b)に示す。

4.3 ダミーヘッドによる相互相関関数

ルール大学のノイマン型ダミーヘッドで収録した両耳のインパルス応答から求めた相互相関関数(全帯域)を(c)に示す。

4.4 500Hzの残響波形

(d)にインパルス応答をデジタルフィルタで500Hz, 1/3オクターブに帯域制限したうえ、二乗積分法で求めた初期残響波形約1sを示す。

4.5 仮想音源の投影

(e)は前述の近接4点法により計算された仮想音源をX-Y平面(ホール上方から下方)とY-Z平面(右から左), Z-X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のすなわち直接音及び‘反射音’の座標位置、円の面積がそのパワーに比例し、直交軸の交点口は受音点を示す。なお、図中にホール概形を添えた。

4.6 指向性パターン

(f)に基準測定点で各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。

5. むすび

多くの方々のご協力で全ホールとも無事に測定を終えることができた。今回の調査では測定したホールで同じ楽団による同じ曲目を聴くことができた。時には楽団員と演奏直後に印象を語り合えた意義は大きい。

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。例えば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のは、仮想音源分布図で下方からの反射音が上方からのそれに比較して多いことと対応しているものと考えられる。

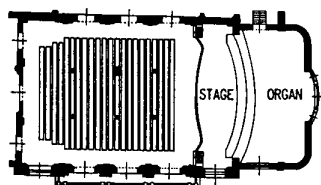
ここでは求められた仮想音源の分布と指向性パターンを示したが、それぞれ時間変化や方向や到来範囲を指定して表示することも可能である。また、仮想音源分布からの任意の2点間の相互相関関数や到来方向別の残響特性等の計算も可能である。今後設計に役立つような表現方法を研究していきたい。

謝 辞

本調査には鹿島学術振興財団から研究助成が与えられた。調査にあたっては大阪フィルハーモニー交響楽団の全面的なご協力をいただいた。また、ルール大学のDr. Posselt, アーヘン工科大学のKuttruff教授, プラハのRISP (Research Institute of Sound and Picture)のDr. Novak 様のお力をお借りした。関係各位に深謝いたします。

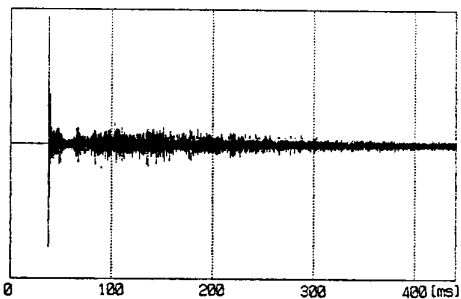
文 献

- 1) 橋 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) 過常の方法による測定結果”, “音響学会誌” 43, 118-124 (1986).

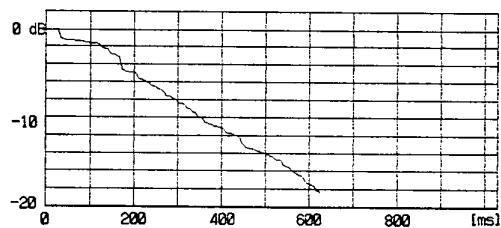


(a) ホール概形と測定点

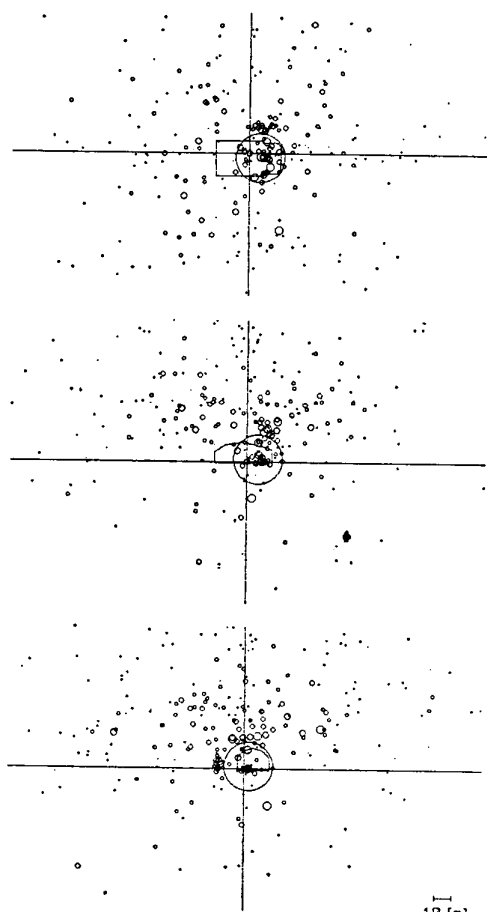
$V: 9,000 \text{ m}^3$, $N: 700$, $T_{500}: 1.97 \text{ s (empty)}$



(b) インパルス応答

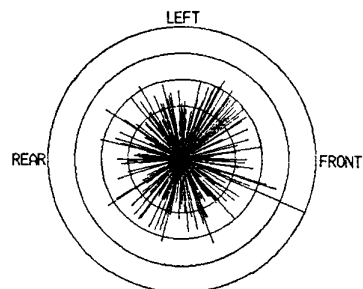


(d) 残響波形

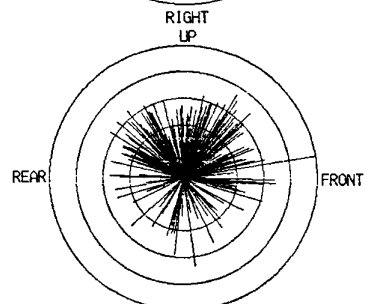


(e) 仮想音源分布図

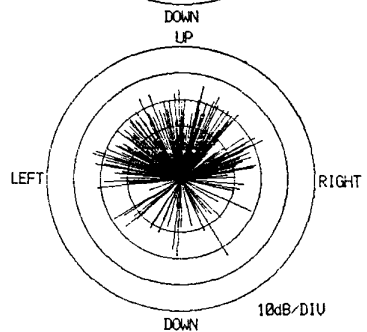
X-Y 平面



Y-Z 平面

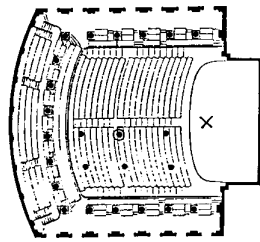


X-Z 平面



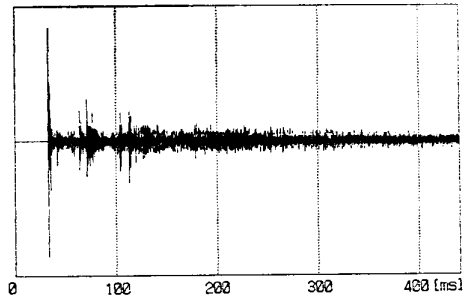
(f) 指向性パターン

図 - 1 Bratislava, Philparmonie Hall 測定結果

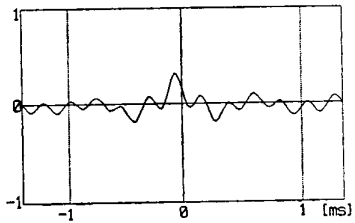


(a) ホール概形と測定点

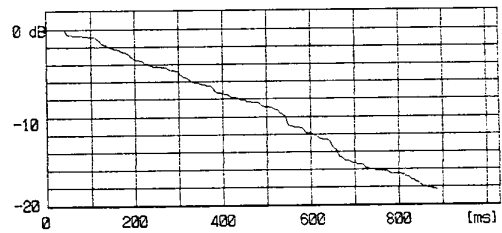
$V: 10,000 \text{ m}^3$, $N: 1,037$, $T_{500}: 2.96 \text{ s (empty)}$



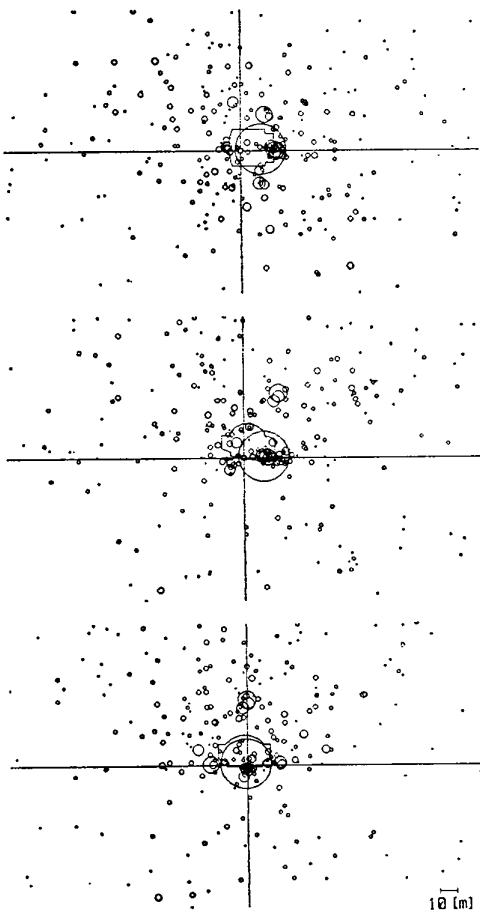
(b) インパルス応答



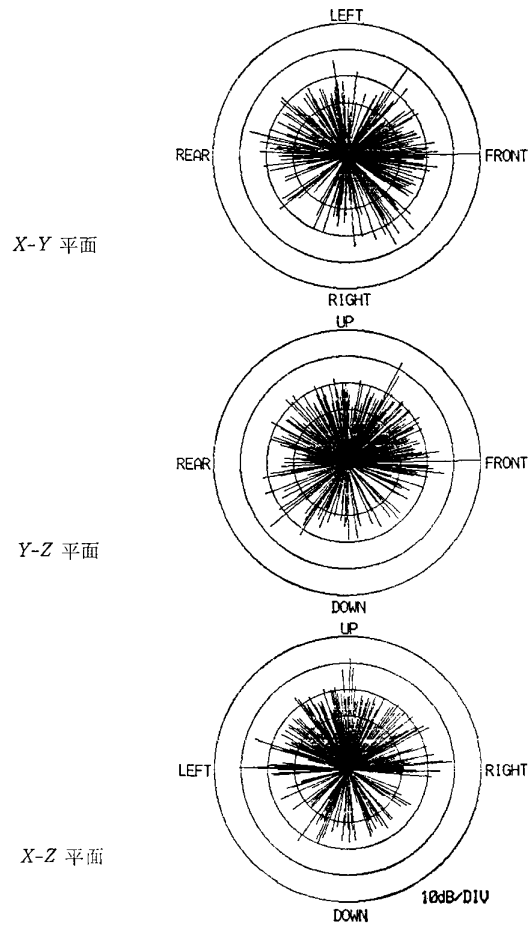
(c) ダミーヘッドの相互相関関数



(d) 残響波形



(e) 仮想音源分布図



(f) 指向性パターン

図 - 2 Praha, Dvorak Hall 測定結果

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)

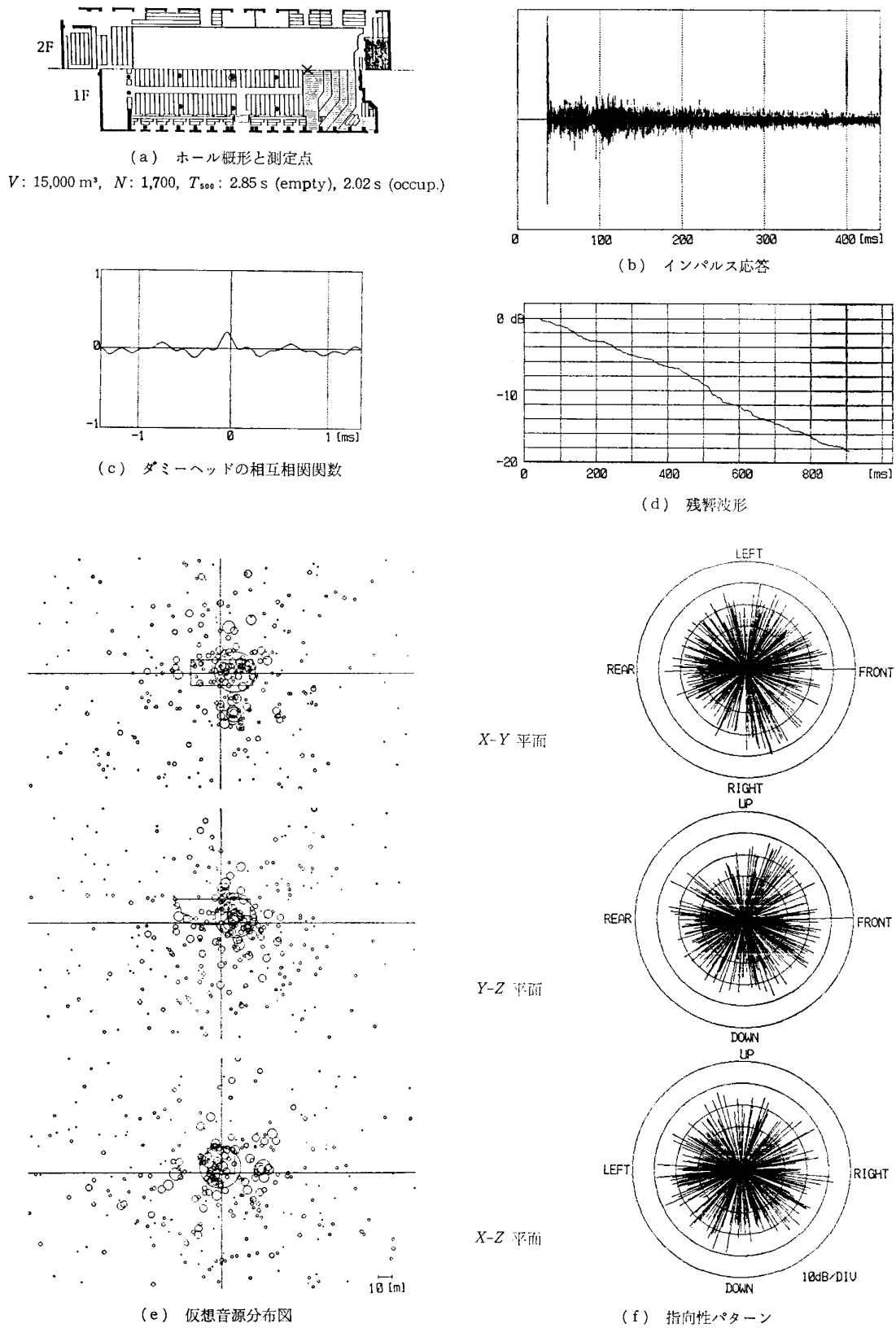
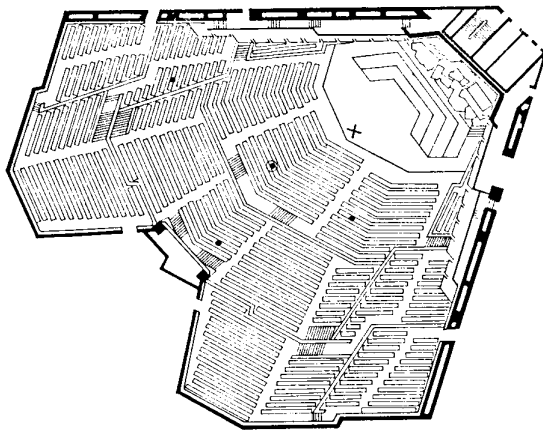
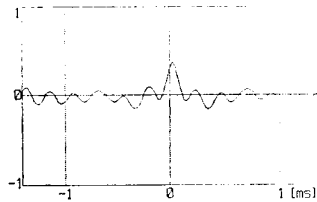


図 - 3 vienna Frosser Musikvereinsaal 測定結果

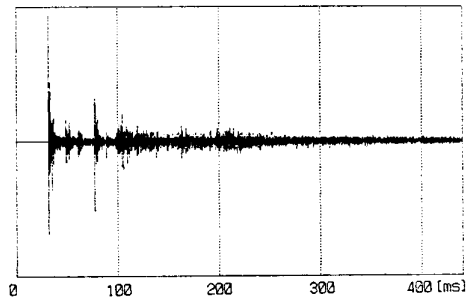


(a) ホール概形と測定点

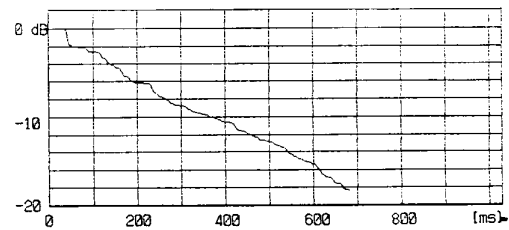
$V: 30,900 \text{ m}^3$, $N: 2,500$, $T_{300}: 2.14 \text{ s (empty)}, 1.86 \text{ s (occup.)}$



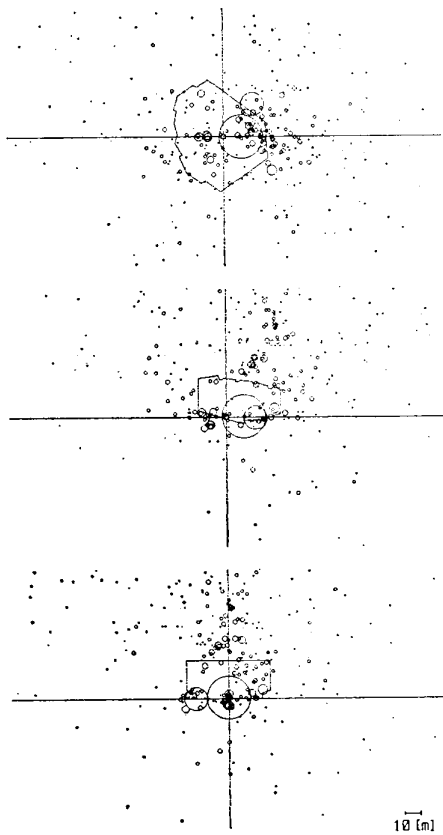
(c) ダミーヘッドの相互相関関数



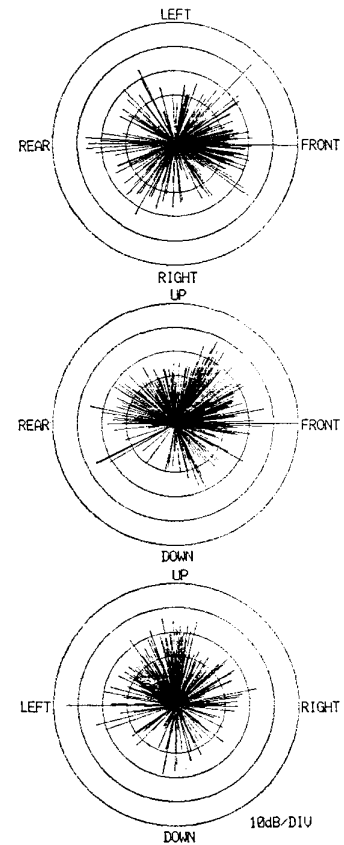
(b) インパルス応答



(d) 残響波形



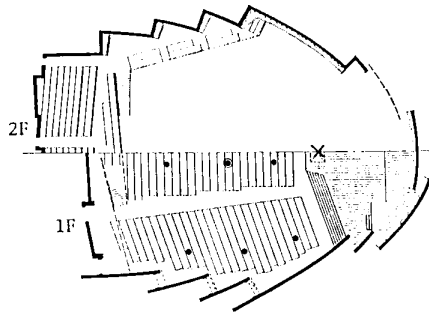
(e) 仮想音源分布図



(f) 指向性パターン

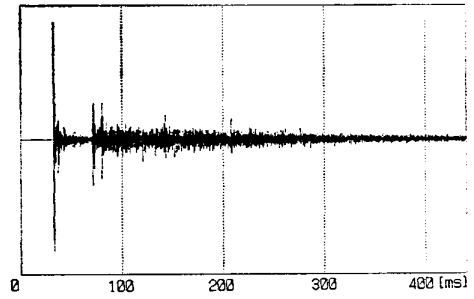
図 - 4 Munchen, Philharmonie Hall 測定結果

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)

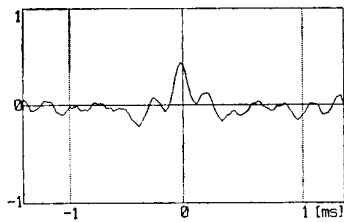


(a) ホール概形と測定点

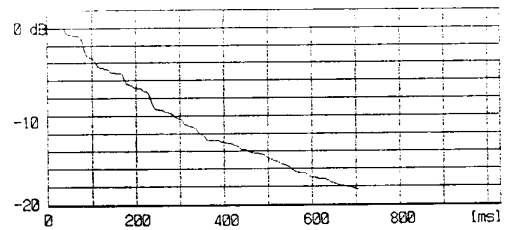
$V: 15,700 \text{ m}^3$, $N: 1,500$, $T_{300}: 1.70 \text{ s (empty), } 1.52 \text{ s (occup.)}$



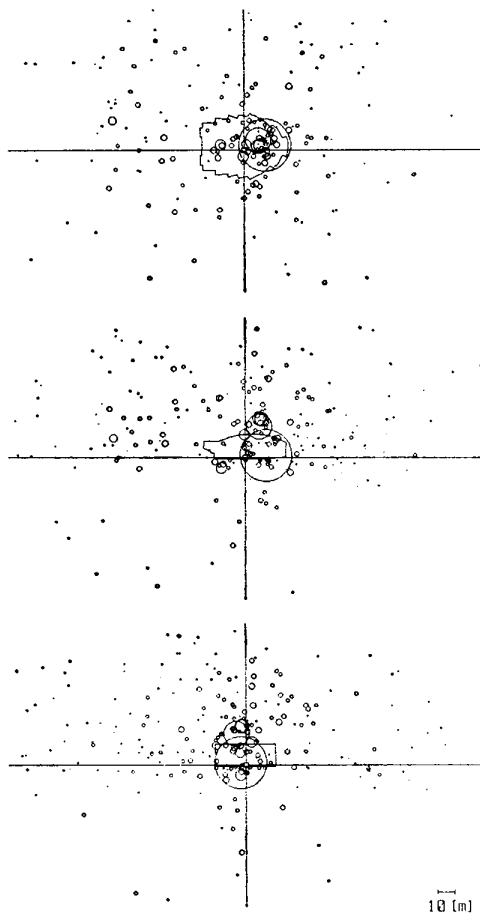
(b) インパルス応答



(c) ダミーヘッドの相互相関関数

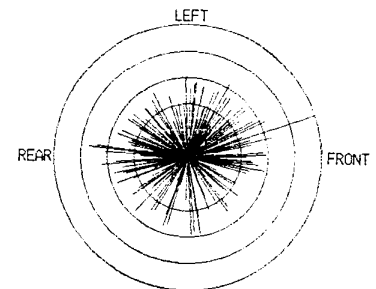


(d) 残響波形

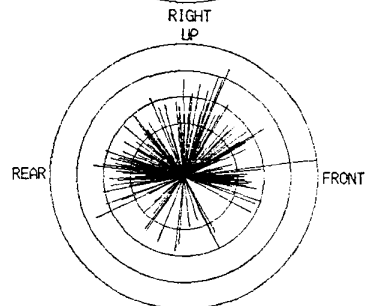


(e) 仮想音源分布図

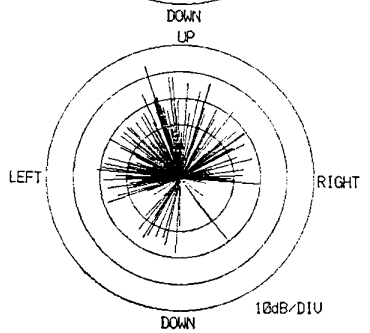
X-Y 平面



Y-Z 平面



X-Z 平面



(f) 指向性パターン

図 - 5 Bonn, Beethoven Hall 測定結果

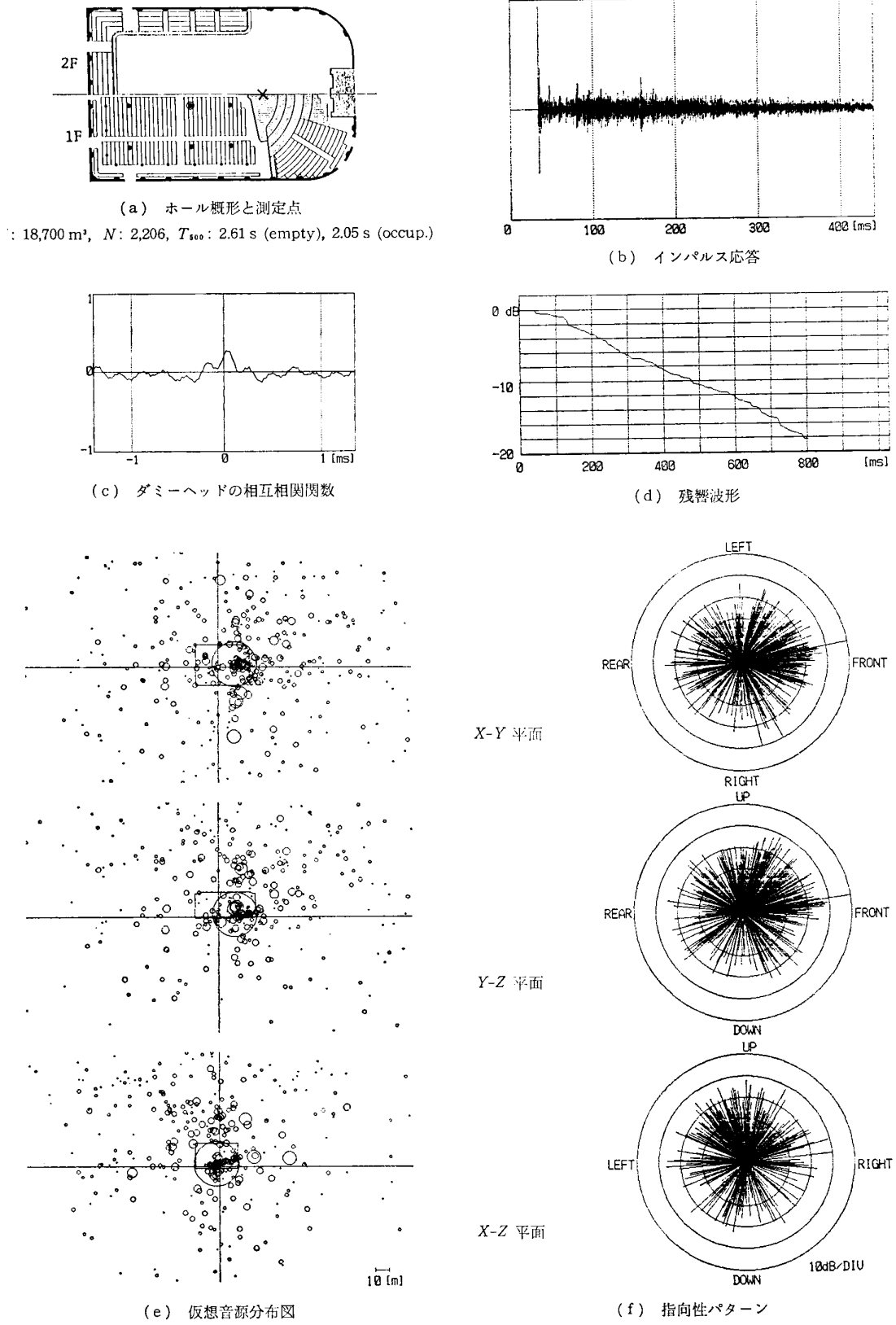
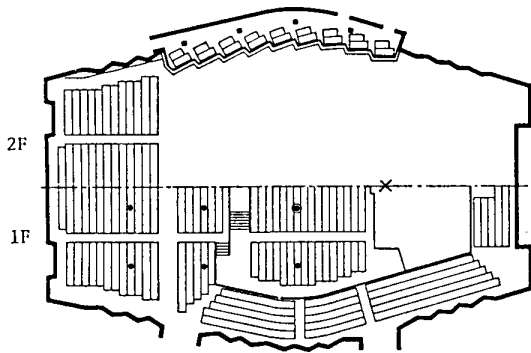


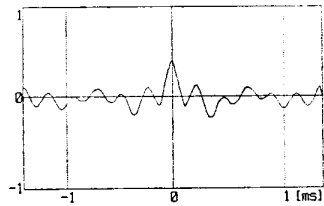
図 - 6 Amsterdam, Concertgebouw 測定結果

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)

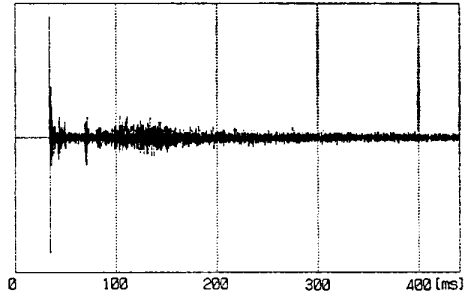


(a) ホール概形と測定点

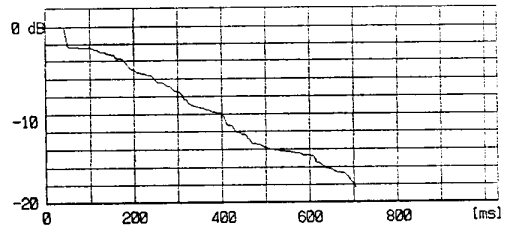
$V: 27,070 \text{ m}^3$, $N: 2,222$, $T_{300}: 2.32 \text{ s (empty), } 2.06 \text{ s (occup.)}$



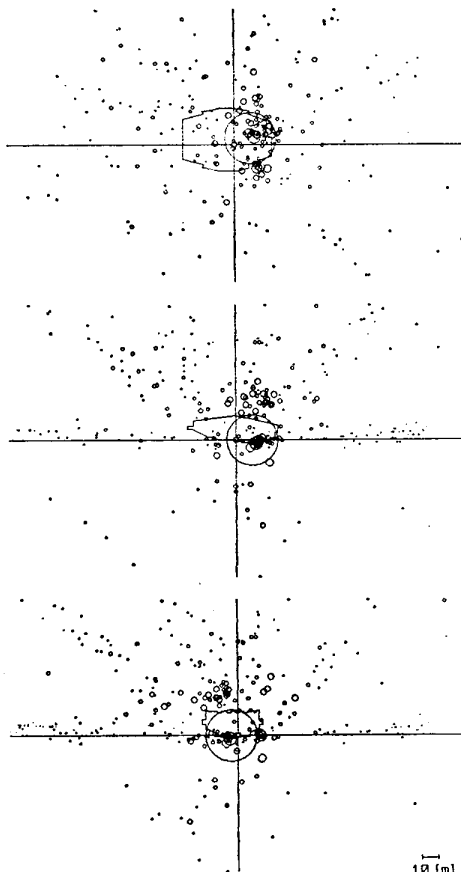
(c) ダミーヘッドの相互相関関数



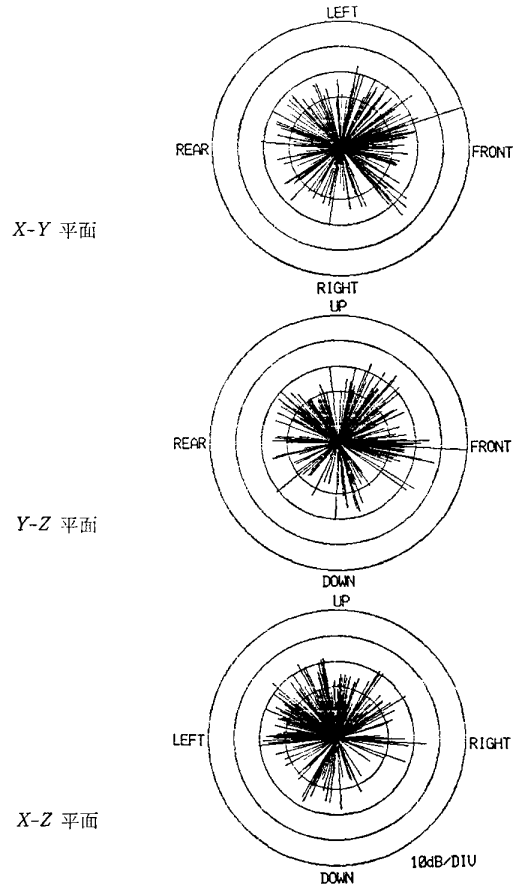
(b) インパルス応答



(d) 残響波形



(e) 仮想音源分布図



(f) 指向性パターン

図 - 7 Rotterdam, De doelen 測定結果