

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)

通常の方法による測定結果 *1

橘 秀樹 *2・ 山崎芳男 *3・ 森本政之 *4

(東京大学生産技術研究所) (早稲田大学理工学部) (神戸大学工学部)

平沢佳雄 *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

昨年 9 月から 10 月にかけて、大阪フィルハーモニー交響楽団による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(代表:前川純一)を組織し、同交響楽団の演奏ツアーにほぼ同行する形で、ヨーロッパ各地のコンサートホールについて実測を主とした音響調査を実施した。この調査グループには、我々以外に、Ruhr 大学の Dr. C. Posselt と早稲田大学・伊藤研究室の伊勢史郎、清山信正両氏が参加した。

この調査では、以下に述べるようにチェコスロバキア、オーストリー、西ドイツ及びオランダの 4 か国における合計七つのホールについて、室内音響特性の物理測定を行うと共に、同交響楽団のリハーサルやコンサートに立ち合い、ホールが実際に使用されている状態についても調査を行った。

今回の調査の内容は多岐にわたり、そのすべてについての解析にはまだかなりの時間を要する。そこで本報では、ひとまず残響時間、音圧分布及び短音応答について通常の方法による実測結果をとりまとめて報告する。

2. 調査の対象としたホール

今回の調査の対象とした七つのホールの概要は以下のとおりである。そのうち形状・寸法が分かっている六つ

のホールの平面・断面図を図 1 に示す。

2.1 ブラチスラバ・フィルハーモニーホール
(Bratislava, Philharmonie Hall)

このホールは、座席数約 700 の中規模のコンサートホールである。図面その他の詳細な資料については、現在調査中であるが、恐らく 100 年以上前に建設されたものと思われる。室形としては、平面がほぼ長方形(幅:約 19 m, 奥行:約 33 m)で、後部にバルコニー席(約 100 席)があり、全室容積は 9,000m³ 強と推定される。内装としては、ステージ、客席部分ともに床は木で、壁・天井は石膏を用いた古典的な装飾仕上げとなっている。このホールでは、毎年秋にブラチスラバ音楽祭が開催され、今回の我々の訪問中も、大阪フィルのほかにフランスのツールーズ交響楽団などによる多くのコンサートが催されていた。

2.2 プラハ・ドボルザークホール (Praha, Dvorak Hall)

このホールについても、詳細は調査中であるが、室容積が約 10,000m³ (推定)で座席数 1,037 (1階席:612, 2階席:425)の中規模のコンサートホールである。このホールはチェコ・フィルハーモニー交響楽団の本拠で、スメタナホールと並んでプラハの代表的なコンサートホールである。

2.3 ウィーン・ムジークフェラインザール大ホール
(Vienna, Grosser Musikvereinsaal)

1870 年に作られたこのホールは、世界でも代表的なコンサートホールの一つとして、また、コンサートホールの一つの基本形である shoe-box style の典型例としてあまりにも有名である。詳細は文献 1), 2) などに紹介されているので、ここでは簡単に述べると、直方体を基本形として四周にバルコニー席(正面はパイプオルガン)があり、室容積は約 15,000m³、座席数は約 1,700 である。床及び天井は木製であり、壁のほとんどはレンガ又は本の下地にプラスタ仕上げ(金箔張り)で、両側

*1 Survey on the acoustics of concert halls in European countries (The 1st report) -Measured results by ordinary methods-.

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

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

*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)

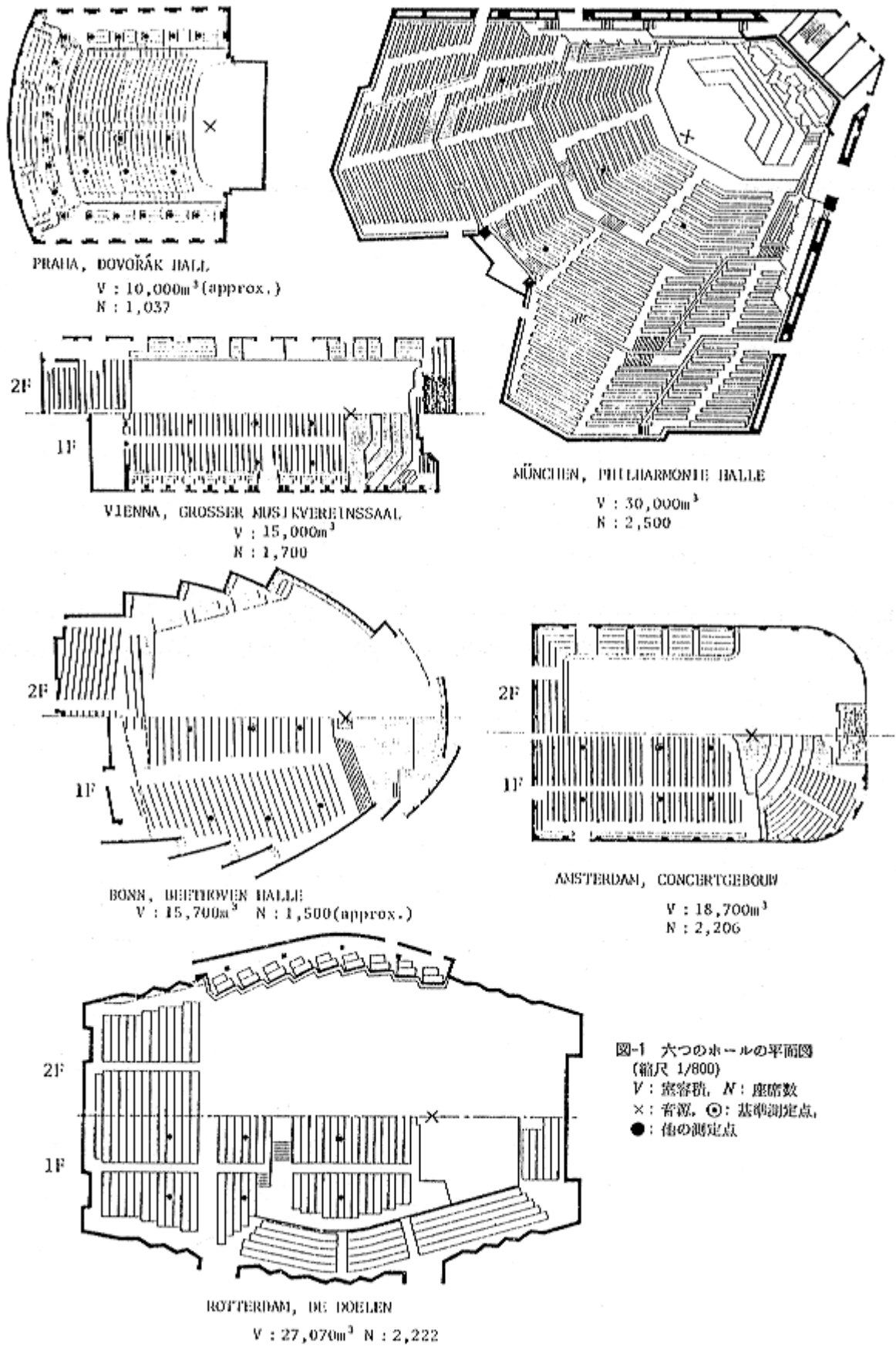


図-1 六つのホールの平面図
 (縮尺 1/800)
 V : 容積, N : 座席数
 \times : 音源, \odot : 基準測定点,
 \bullet : 他の測定点

の側壁には多数の彫像が並んでいる。座席はかつては木製ベンチであったが、座の部分だけを布張りとしたもの(1階席は可動)に最近取り換えられた。

2.4 ミュンヘン・フィルハーモニー・ホール (Munich, Philharmonie)

このホールは、1985年11月にミュンヘンにオープンした復元文化施設の中の代表施設であり、室容積が約30,000m³で約2,500人の収容力を持つ大規模コンサートホールである。平面は扇形をやや変形した形態で、座席の配置は、いわゆるワインヤード形式となっており、客席部分が後部で大きく二つに分かれている。側壁には拡散を目的とした多くのバルコニーが取り付けられている。内装の大部分に木が用いられており、吸音仕上げはほとんどない。このホールの音響設計は西ドイツのMuller B. B. M. 音響コンサルタント事務所が担当し、1/16縮尺の模型実験も行われた。

2.5 ボン・ベートーベンホール (Bonn, Beethovenhalle)^{1),2)}

このホールは多目的ホールとして1959年に建設されその後一度火災に遭っている。現在では、コンサート以外に式典など各種の催物にも用いられている。室容積は約15,700m³で収容力は約1,500人(1階は平土間で、座席は可動)である。平面はほぼ長方形に近いが、両側壁は大きな拡散壁(木製の縦リブの仕上げの内部で吸音・拡散処理)で構成されており、下手と後部に2階席が設けられている。

2.6 アムステルダム・コンサートヘボウ (Amsterdam, Concertgebouw)^{1),2)}

1888年に作られたこのホールも、ヨーロッパを代表するコンサートホールの一つであり、アムステルダム・コンサートヘボウ管弦楽団がこのホールを本拠としている。平面形はやや幅広(約29m)の長方形で、左右及び後部にバルコニー席が設けられている。ステージはアリーナ形式に近く、その後部にも多くの座席(合唱席)が階段状に設けられている。室容積は約18,700m³で収容人員は2,206である。アムステルダムは地盤が悪く、このホールが含まれている建物も木製基礎杭の腐食が著しいため、現在基礎の改修工事が進行中である。それでも、コンサートは休みなく続けられている。

2.7 ロッテルダム・デ・デーレン (Rotterdam, De Doelen)³⁾

このホールは比較的新しく、総合文化施設の中の大ホールとして1966年にオープンした。室容積は27,070m³で、座席数は2,222である。平面的には長方形の長辺が中央でくの字型にやや広がった形状で、ステージはアリーナ形式である。ステージをとりまく1階席の側壁全体にわたって、大理石で作られた起伏の大きい拡散体が一面に取り付けられており、天井も拡散的なデザイン

となっている。かつては、ステージ上に浮き雲が取り付けられていたが、現在ははずされている。

3. 調査内容の概要

今回の調査における測定の内容を項目別に述べれば、以下のとおりである。

3.1 通常の方法による室内音響特性の測定

各ホールの基本的な室内音響特性を調べるために、残響時間、音圧レベル分布、短音応答(エコータイムパターン)などについて通常の方法による測定を行った。具体的な測定方法については、後述するとおりである。

3.2 近接4点法による室のインパルス応答の3次元的測定

山崎らが考案した近接4点法(直交3軸上に四つのマイクロホン近接配置したブローブを用いて、室のインパルス応答を3次元的に測定する方法)⁴⁾を用いて、各ホールの代表的な点におけるインパルス応答の測定を行った。この方法によれば、室境界からの反射音群の方向、大きさ、時間遅れなどの空間情報を3次元的に観測することができ、今回の音響調査でも最も主要な測定として実施した。この方法による測定の結果について、まとめて別の機会に報告することとし、ここではその一部についてのみ報告する。

3.3 ダミーヘッド(2種)による両耳インパルス応答の測定

人間の頭部、耳介などの効果も含めた室のインパルス応答を測定するために、ステージ上の代表点からインパルス音源を放射したときの客席部の数点における応答を2種類のダミーヘッドを用いて測定した。ダミーヘッドとしては、Ruhr大学で標準としているものと、いわゆるそっくりヘッドとして調査メンバーの一員である平沢個人のダミーヘッドを用いた。この測定は、3.2節あるいは次に述べる3.4節の測定結果、あるいはコンピュータシミュレーション技術などと結びつけて、信号合成によるホール音場の主観評価の手法を開発することを目的としている。

3.4 同上ダミーヘッドによるdry musicの録音

ステージ上に置いた12面本無指向性スピーカからdry music、すなわち無響室録音の音楽を再生し、2種類のダミーヘッドによる録音を行った。その場合、音源、受音点は3.3節の測定の場合と同じとした。dry musicとしては、大阪フィルのメンバーによるバイオリン、フルート及び小太鼓の演奏者(独奏)を無響室内でPCM録音したものをを用いた。

3.5 その他

以上の測定のほかに、メンバーの一人(橘)が実頭の両耳に小型エレクトレットマイクロホン(SONY ECM-77)を装着し、各種の試験音や音楽を録音した。

4. 通常の方法による測定結果とその考察

4.1 具体的な測定方法

今回の実測調査における通常の方法による測定では、特に現場での測定時間を短縮し、装置を簡便化する必要から、以下のような方法をとった。

(1) 音源

測定音源については、予めPCMテープレコーダに録音・編集した測定音源信号をステージ上の代表店(床上1.5m)に置いた12面体無指向性スピーカ⁵⁾から一定出力(スピーカ入力電圧をメータで監視)で再製する方法をとった。音源信号としては、ピンクノイズ定常音(継続時間15秒)、2オクターブバンドノイズ断続音(オクターブ中心周波数で125 250Hz, 500 1kHz, 2k 4kHzの3種類を各3発ずつ。on time, off timeともに3秒)及び2オクターブバンドパルス(ユニバーサル型バンドパスフィルタのインパルスレスポンスを使用。周波数帯域は、オクターブバンド中心周波数で250, 500 Hz及び1k, 2kHzの2種類で、各2発ずつ)を用いた。これらの音源の1回の再生時間は、全体で約75秒である。

(2) 受信

受信装置としては、小型の騒音計(RION NL 02)とカセットテープレコーダ(SONY D-3)の組み合わせを2系統使用し、現場ではすべて録音方式によった。その場合、後述のように音圧レベル分布を絶対値として求めるために、測定ごとにキャリブレーション(B & K 4230)を用いて受信形全体の感度校正を行った。

受信点数は6点を基本とし、客席部に一様に分布させた。そのうち1点は基準測定点とし、すべてのホールを通じて客席部中央の音源から12mの点を設定することとした。

(3) 分析

残響時間については、2オクターブバンドノイズ断続音の録音を再生し、1/3オクターブバンドごとに100 Hz ~ 5kHzについて分析した。また、ホールの使用状態(着席時)の残響時間については、前記リアルヘッドによるオーケストラコンサートの録音の適当な部分(プラムス交響曲1番第4楽章の最後など)を選び、オクターブバンドごとの分析を行った。この場合、測定点は1~2点であるため、分析結果は空間平均の点で、空室時の結果に比べて信頼性は劣る。

音圧レベル分布については、ピンクノイズ定常音の録音を再生し、オクターブバンド分析(125Hz ~ 4kHz)を行った。その場合、音圧レベルは録音された校正信号を参照し、絶対レベルとして求めた。また、音源のパワーレベルは、事前に残響室法(ISO 3741)によって測定した。その場合、音源出力及び測定システムのすべてを

通して現場におけるのと同条件とした。このような方法をとることにより、ホール相互の音圧レベルの分布を絶対値として比較することができる⁵⁾。

4.2 測定結果

(1) 残響時間

各ホールの残響時間の分析結果をまとめて図-2に示す。また、代表値として、500Hzにおける残響時間 T_{500} (空室時については、400, 500, 630Hzの1/3オクターブバンドの平均値)を図中に示す。空席次の値を見ると、ドボルザークホール及びムジークフェラインザールが極めて長く、広い周波数範囲で3秒近くになっている。後者については満席次のデータ(500Hzで約2秒)が得られているが、空席と満席とでその変化が極めて大きい。それに比べて、コンセルトヘボウでは空席・満席の差はやや小さく、0.5秒程度となっている。最も新しいミュンヘン・フィルハーモニーでは、空席・満席の差は更に小さい。これは吸音力の大きい座席が用いられているためであろう。また、多目的ホールとして設計されたボン・ベートーベンホールは、今回の測定対象ホールの中では残響時間が最も短く、空席・満席の差も小さい。

満席時の T_{500} は、ムジークフェラインザール、ミュンヘン・フィルハーモニー、コンセルトヘボウ、デ・デーレンでほぼ等しく、約2秒となっている。

残響時間の周波数特性についてみると、まず空席時では、空気吸収の影響が大きくなる2kHz以上の高音域を除いて、ほとんどすべてのホールで極めて平坦な特性となっている。満席時については、測定が行えた五つのホールのうちムジークフェラインザール、ベートーベンホール、コンセルトヘボウでは低音域から高音域にかけて残響時間が徐々に短くなる傾向が見られるのに対して、ミュンヘン・フィルハーモニー、デ・デーレンでは全帯域にわたって平坦な特性となっている。満席時の残響時間及びその周波数特性をみる限り、ムジークフェラインザールとコンセルトヘボウはよく似た結果となっている。

(2) 音圧レベル分布

空席時における各ホールの音圧レベル分布の測定結果の一例として、中心周波数500Hzのオクターブバンドについての結果をまとめて図-3に示す。ただし、横軸は音源から受信点までの距離、また、縦軸は音源のオクターブバンド・パワーレベルを100dBとした場合の音圧レベルを表す。

まず個々のホールについてみると、いずれにおいても音源から遠ざかるに従って音圧レベルが漸減する傾向がみられ、測定した範囲では特に音圧レベルの著しい変化は見られない。

次にホール相互の比較についてみると、例えば音源が

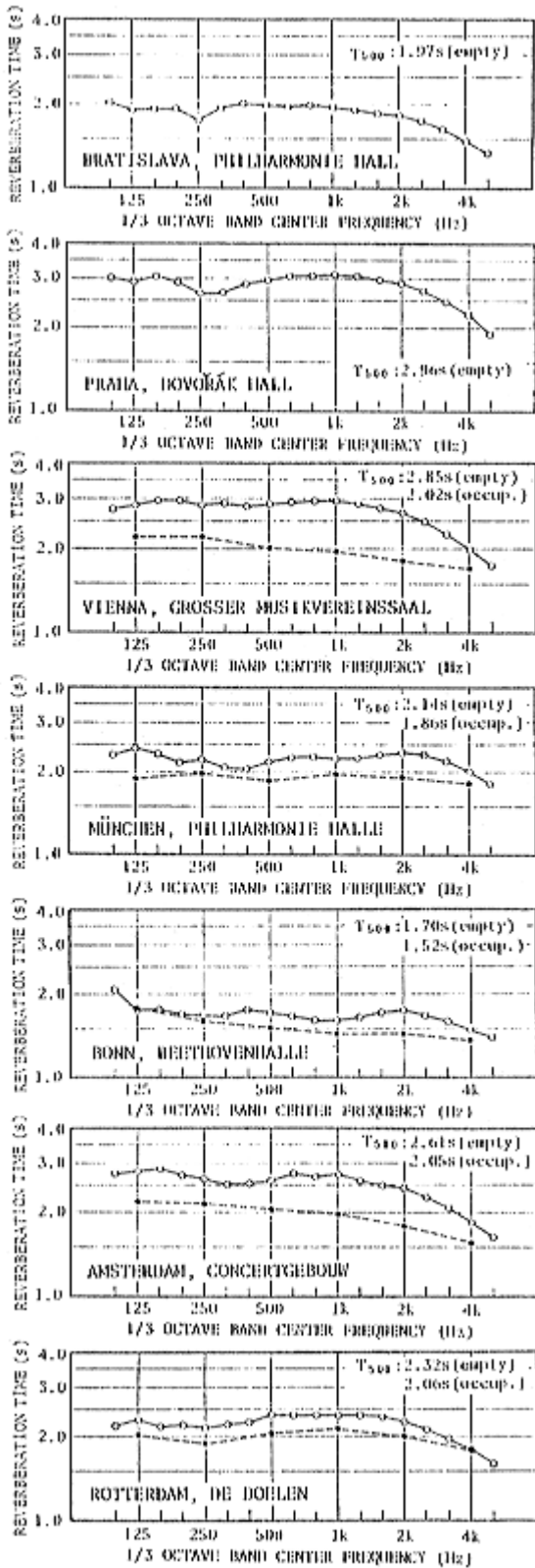


図 2 残響時間

○—○: 空席時 (1/3 オクターブバンド),
—: 満席時 (オクターブバンド)

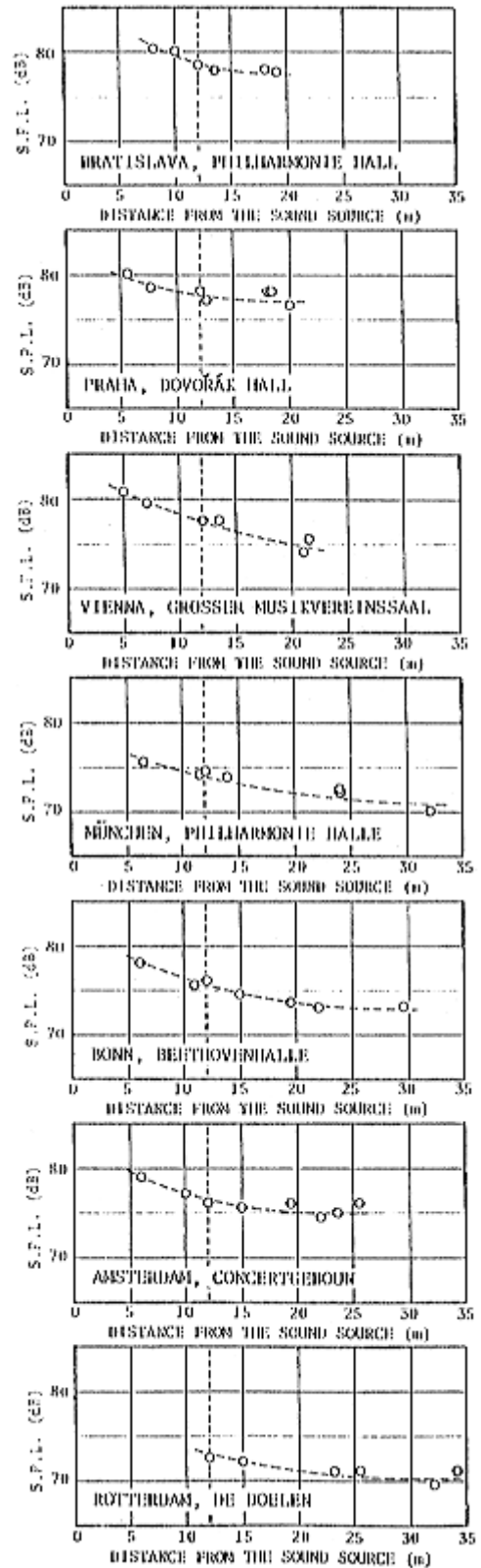


図 3 中心周波数500Hzオクターブバンドについての音圧レベル (S.P.L.) の分布 (音源のオクターブバンド・パワーレベル: 100dB)

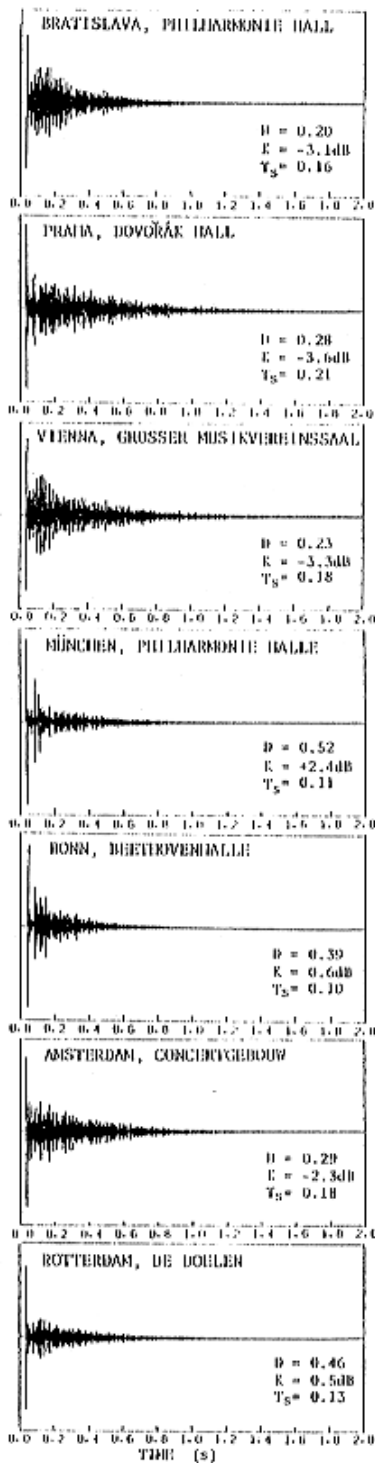


図-4 基準測定点における中心周波数1kHzオクターブバンドのエコータイムパターン
 D : D 値, K : クラリティー, T_s : 時間重心

ら12mの基準測定点における音圧レベルを比較すると、その差は最大5dB程度となっている。音源のパワーレベルを一定とした場合、室容積が大きいほど、また、残響時間が短い(平均吸音率大きい)ほど、音圧レベルが小さくなることは当然予想されることであるが、七つのホールの中では、ミュンヘン・フィルハーモニーとデ・デーレンで、全体的に音圧レベルが小さい。

(3) 短音応答

各ホールにおける短音応答の分析結果との一例として、音源から12m離れた基準測定点における空室時の中心周波数1kHzオクターブバンドのエコータイムパターンをまとめて図-4に示す。また、参考までに、それぞれの波形についての D 値 (D : Deutlichkeit), クラリティー (K : Klarheit) 及び時間重心 (T_s : Schwerpunktzeit) の値を図中に示す。

これらの結果は、各ホールについて空室時の1点における測定結果であり、これから直ちにホールの全体的な特徴を判断することはできないが、プラチスラバ・フィルハーモニーホール、ドボルザークホール、ムジークフェラインザール及びコンサートヘポウなどでは、直達者に続く初期反射音が大きく密であり、減衰も滑らかである。

(4) 近接4点法による測定結果の一例

近接4点法による測定結果の一例として、ムジークフェラインザールにおける分析結果を図-5(a-1)~(b-3)に示す。これらのうち、(a-1)~(a-3)は水平面内 ($X-Y$) について、(b-1)~(b-3)は縦断面内 ($Y-Z$) についての結果である。(a-1)及び(b-1)はそれぞれの面内で求めた仮想音源の空間分布を示す。また、(a-2)、(b-2)は直達音の到達後50msの間、また、(a-3)、(b-3)は全時間についてのそれぞれの軸内において回転方向に 1° 、垂直方向に $\pm 45^\circ$ の範囲から入射する反射音の指向性パターン(はりねずみ)を示したものである。このような分析結果から、反射音構造について各ホールの特徴を3次的にとらえることができる。

5. むすび

今回の調査の対象としたホールは、いずれも音響的にもまた建築的にも評価の高いものが多く、これらについて、我々の手で物理データ及び主観評価実験のための資料を得ることができた。本報告はそのうちの一部であり、これに続いて近接4点法やダミーヘッド受音系による測定結果及び今回得られた資料に基づく主観評価実験などについて別途報告する予定である。

本小特集の別稿でも述べられているように、最近我が国でも本格的コンサートホールが建設されるようになってきた。今回の調査結果が、今後のコンサートホール建設のために役立つ基礎資料となれば幸いである。

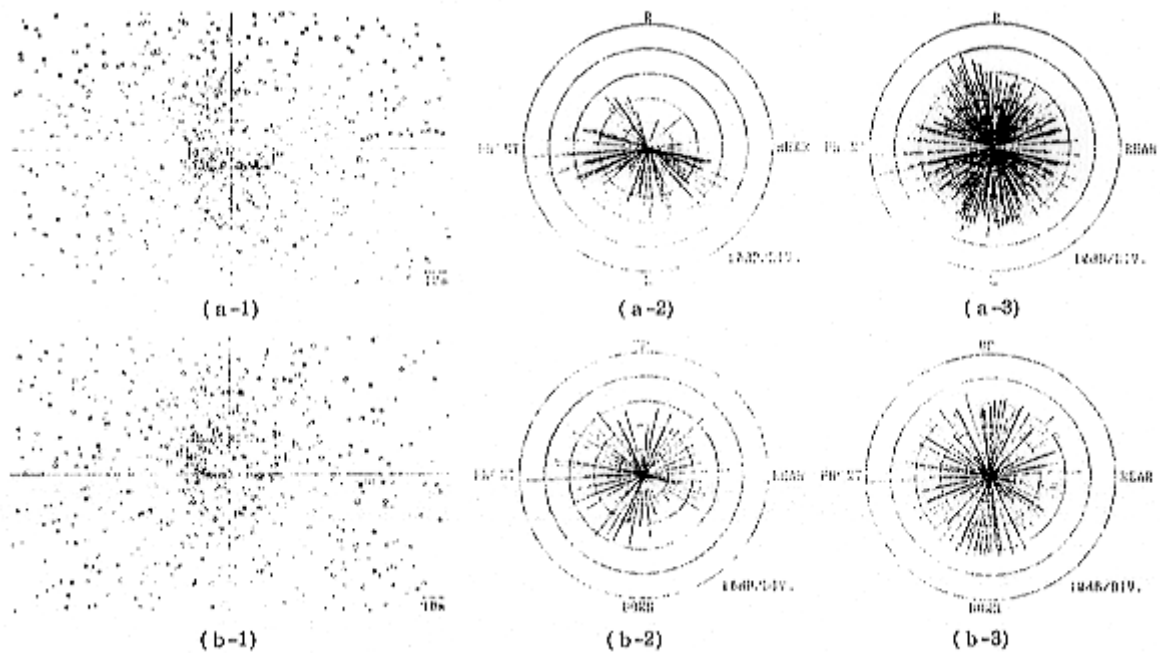


図 - 5 近接4点法による測定結果の例(ウィーン・ムジークフェラインザール)
 (a-1) $X-Y$ 平面上の仮想音源, (a-2) 最初の50msにおける $X-Y$ 平面上の反射音の指向性パターン, (a-3) $X-Y$ 平面上の全反射音の指向性パターン, (b-1) $Y-Z$ 平面上の仮想音源, (b-2) 最初の50msにおける $Y-Z$ 平面上の反射音の指向性パターン, (b-3) $Y-Z$ 平面上の全反射音の指向性パターン

謝 辞

今回の調査にあたっては、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、調査の実施にあたっては、J. Novak 氏(チェコスロバキア)、アーヘン工科大学 Kuttruff 教授並びに V. M. A. Peutz 氏(オランダ)などから現地においてご便宜、ご協力をいただいた。また、リオン株式会社からは騒音計などの提供をいただいた。本報告を結ぶにあたり、以上の各位に対して心から感謝いたします。

なお、この調査研究に対して鹿島学術振興財団の昭和60年度研究助成金が与えられたことを付記し、同財団

に対して深謝いたします。

文 献

- 1) L. L. Beranek, Music, Acoustics & Architecture, (John Wiley & Sons, Inc., 1972).
- 2) 長友宗重, 寺崎恒正訳, 同上邦訳 (鹿島出版会, 東京, 1972).
- 3) L. L. Doelle (前川純一訳), 建築と環境の音響設計 (丸善, 東京, 1974).
- 4) 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の空間情報の - 測定法,” 音響学会建築研資 AA 79-03 (1979).
- 5) 橋 秀樹, “室内音響特性測定用12面体スピーカ音源について,” 音響技術 14(3), 64-65 (1985).