

欧州コンサートホールの音響調査

Survey on the Acoustics of Concert Halls in European Countries

小 脇 宏 ⁽¹⁾ Hiroshi Kowaki	平 野 敏 弘 ⁽²⁾ Toshihiro Hirano	高 島 淳 行 ⁽³⁾ Atsuyuki Takashima
澤 井 利 仁 ⁽⁴⁾ Toshihito Sawai	陰 山 義 広 ⁽⁵⁾ Yoshihiro Kageyama	山 崎 慎 一 ⁽⁶⁾ Shinichi Yamasaki

要 旨

当社が世界初のDSP車室内音場制御装置を発売してから既に2年以上が過ぎ、他社メーカからも同様の製品が出揃った現在、市場でのDSPの評判は必ずしも良いものばかりでは無い。これには各社がコンサートホールなど実際の音場の拡がり感等を表現するためにやや無理な音作りを行っている事や、実際の音場の再現方法についてまだ開発途上である事なども起因していると考えられる。

我々は、実際の音場について解析を深めることによってDSP音場制御はもっと車室内を快適で素晴らしい音場空間に変えてくれると考え、1990年の11月に欧州の著名なコンサートホール等合計8カ所の音響に関する実測調査を行った。

本稿ではこの実測調査を行ったホールの紹介、測定方法、各ホールのデータ解析結果、将来展開等について述べる。

Since our DSP sound field processor was launched in the Car Audio market, two years has passed, and several companies have followed to put the DSP Sound processor on the market. However customers are not always satisfied probably because of the following two reasons. At first, sound is exaggerately effected to present the liveliness in the concert hall. And secondly, the study on reproducing method of sound field is still underdeveloping.

We thought that analyzing the real sound field in detail may make the DSP sound processor able to present more comfortable and fantastic sound field to the car compartment, we investigated the acoustic characteristics of the 8(eight) concert halls including some famous European concert halls in November 1990.

This paper introduces the concert halls we surveyed, measuring methods, analyzed data, and future development.

(1)、(2)、(3)、(5) 開発本部技術開発部 (4) AVC本部第二技術部 (6) AVC本部システム開発部

1. はじめに

自動車の車室内音場は、スピーカ位置に対する聴取位置の非対称性やスピーカ近傍にあるドア、ガラス等の反射物や、シート等の吸音体が狭い空間の中に隣接して存在することなどによってステレオ感や拡がり感の乏しい音場になっており、イコライザ等を用いて周波数特性の補正を行ってもリスニングルームの様な音場感を得ることは大変難しい。

これに対して当社は、1989年に世界初のDSP車室内音場制御装置を発売し、リスニングルームのみならずコンサートホールの音場感をも車室内に持ち込むことを提案した。以来、リスナーの感性をより本物らしく自然かつ快適に刺激する製品作りを目指して研究、開発を進めてきた。しかし我々が目標とする実際のコンサートホールの音場についても、その形状や材質などによってさまざまなホールがあるのが実情である。そこで我々は世界屈指と言われるコンサートホールの音場再生を目標とし、そのための音響データを取得するため1990年11月にベルギー、ドイツ、オーストリア、スイスの4か国をまわり、7つのコンサートホールと1つの教会の音響測定を実施した。

測定は次の3項目について実施した。

- ①近接4点法によるインパルス応答の測定
- ②ダミーヘッドによる両耳インパルス応答の測定
- ③ダミーヘッドによる無響室録音音楽の収録

今回の測定に参加したメンバーは、神戸大学工学部の森本政之助教授と阪上公博助手およびドイツ・ルール大学工学部の助手・学生各1名と当社社員6名の合計10名である（図-1）。測定開始



図-1 出発前（ルール大学にて）
Fig. 1 Departure (at Ruhr University)

に際してはルール大学のメンバーとの合同リハーサルを兼ねて、ルール大学所有のホールであるマキシマム・オーディトリウムにおいて第一回目の測定を実施した。その後の移動に際しては機材保護の面から大型バスを1台チャーターし、延べ4000km以上の行程を走破した。以下の各章では、本論に入る前にまずコンサートホールの音響に関する概論について簡単に述べた後、今回測定を行ったホールの簡単な説明から測定データの解析に至るまでについて述べる。

2. 概 論

2. 1 コンサートホールの形状と音響

我が国では、戦後から各地の公共団体による数多くの公共ホール建設が行われて来た。その多くは県民会館や市民会館ホールなどに代表される多目的ホールと呼ばれるもので、それぞれの地域でのコンサートや講演会など様々な催し物に活用されてきた。しかし最近になって、コンサートホールとしての専用化による運用面での特色の確保と性能の充実に視点を置く自治体等が増えたことなどから、音楽専用のコンサートホールの建設が盛

んに行われるようになってきた。この音楽専用ホールと多目的ホールの一般的な違いについて簡単に述べる。

まず多目的ホールの形状として代表的なものに扇形（ファンシェイプ）と呼ばれるものがある。これは側壁がステージから客席に向かって左右に広がった形状のホールで、音響的特徴としてはコンサートでの残響感だけでなく講演会などでのスピーチの明瞭度も確保する必要があることから、残響時間がコンサート専用ホールに比べるとやや短いことが挙げられる。

次に、コンサートホールの室形として最も古典的な形状は、ウィーンのリッツフェラインザール（楽友協会ホール、1870年完成）やボストンのシンフォニーホール（1900年完成）に代表されるシューボックス形と呼ばれるものである。これはその形状が、丁度靴箱を連想させることに由来するもので、奥行きに比べて幅が狭いため、一般に横方向から到来する初期反射音が扇形のホール内のそれに比べて大きい傾向を示し、これらがホールの空間的印象や音に包まれる感じを与えている。このような特徴を持ったシューボックス形の形状は、19世紀末から今世紀初頭にかけて建てられたホールに多く、この形状をコンサートホールに最適な形として信奉する人も多い。

最近になると観客収容数を増やすことを目的としたホールの大型化が進み、ステージの回りに客席を配したアリーナ形式あるいはワインヤード形式と呼ばれる新しいタイプのホールが生まれている。この代表例としてはベルリンのニューフィルハーモニーホールや東京のサントリーホール等があり、これらのホールに共通する特徴としては、客席のどの位置からもステージが良く見えることとステージの回りや客席同士を仕切っている壁の

形状、角度や、天井から吊り下げられた浮き雲と呼ばれる音響反射板等の工夫を行うことによって、どの客席に対しても初期反射音を得られるように設計されている事である。

このようにコンサートホールの形状に必要な条件は一般に適度な初期反射音と残響音を与える事が出来ることであると言われており、こういった面で音楽専用ホールは多目的ホールに対して音響的に優れていると言われている。

2. 2 残響時間

ここではこの残響音の尺度として用いられる残響時間について簡単に述べる。

ホールの音質を表現する用語には臨場感や残響感、音量感等があり、物理的な尺度として最もよく用いられるのが残響時間である。残響時間は、室内において定常状態で放出している音を急に停止してから、そのレベルが60dB減衰するまでに要する時間として定義されている。これに影響を与える要因としてはホール内容積や表面積、壁面材の吸音率、ホール内容積に対する観客数の割合などが挙げられる。コンサートホールの残響時間については2秒が最適であると言われる事もあるが、これはホール内の容積やそこで演奏される音楽のジャンルあるいは演奏規模等によっても変わる数字であり、実際のホールにおいてもその値は様々である。（500Hzにおける最適残響時間と室の容積との関係についての一例を図-2に示す。）もちろん残響時間が最適であればホールとして完全というものでは無く、例えば容積や残響時間が同じホールであっても、その残響の音色や直接音、初期反射音とのバランス等によって各ホール毎の音質評価が分かれているのが現状である。しかしこれによってそのホールのイメージをある程度察する事ができる。

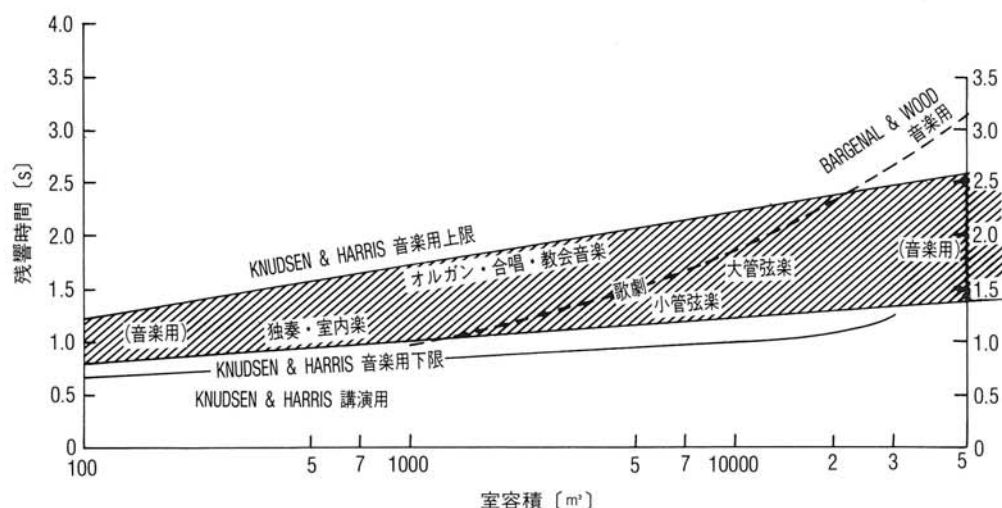


図-2 500Hzにおける最適残響時間と室の容積との関係
Fig. 2 Relation between the most suitable reverberation time and room volume at 500Hz

3. 測定を実施したホールの紹介

3. 1 ブリュッセル美術宮殿

ベルギーのブリュッセルに所在するこのホールは1929年に作られた。形状は上から見ると丁度卵の様な形をしているのが特徴的で、メインフロアは前後2段に仕切られ、ステージ横から客席後方にかけて卵形の側壁に沿った3階建てのバルコニー席が設けられている。容積は12,500 m³、座席数は2,150席で、残響時間は約1.4秒と比較的短い。ウィンケル³⁾の報告によると1945年以前にヨーロッパの指揮者たちに気に入ったホールを挙げさせたところ、このホールは世界3大ホールといわれるウィーンのリムリックフェラインザール、ボストンのシンフォニーホール、アムステルダム・コンセルトヘボウ等と同程度の人気があったということである。

3. 2 ニューフィルハーモニーホール

ドイツの旧西ベルリンに1963年に作られたこのホールは、デザイン性を考慮しながら近代建築音

響設計を施して成功した例として良く知られている。容積は26,000 m³と比較的大きく、室形はワインヤードあるいはアリーナ形式の典型的な形状で視覚的効果と音響的効果の両方を兼ね備えた複雑な客席形状が特徴的である。このホールはベルリンフィルハーモニー管弦楽団の本拠地であり、かつてはフルトベングラー、カラヤンが、そして現在はクラウディオ・アバドが常任指揮を行っているなど世界的に大変有名なホールである。

3. 3 シャウシュピールハウス

このホールは旧東ベルリンに所在し、今は亡きレナード・バーンスタインらによって1989年の東西統一記念演奏会が行われた事などでもよく知られている。1821年にその名の通り、劇場として建てられたこのホールは第二次大戦で焼失しその後1984年にコンサートホールとして生まれ変わった。内装は、ホールの壁や天井から各階のロビーなどあらゆる所が多く胸像や絵画、彫刻で飾られ、座席やシャンデリア、入口のドアに到るまで大変

豪華に作られており、おそらく世界で最も美しいホールの中に数えられるだろうと言われている。形状はシューボックス形で、ステージ後方に一階と、客席の横および後方に2階建てのバルコニーがある。座席数は1,301席で容積等の詳細データは入手出来なかったが、おそらく10,000 m^3 前後と予測される。ちなみにこのホールの本格的な音響測定を行ったのは恐らく我々が初めてであると思われる。

3. 4 パッサウ・聖シュテファンドーム

パッサウはドイツ南部の、ちょうどオーストリアとの国境付近に位置しており、この町でドナウ川とライン川が合流している。聖シュテファンドームは13世紀後半頃に建てられたゴシック様式の教会で、建物はそのほとんどが石で作られている。この内部の大きさは奥にある祭壇も含めると縦約110m、横約30m、高さ約20~30mもあり、普通のコンサートホールの約2~5倍もの容積がある。ここに設置されているパイプオルガンはパイプ数17,388、ストップ数231、チャイム数4で教会の物としては世界最大である。

3. 5 ムジークフェラインザール

ムジークフェラインザールはウィーンフィルハーモニー管弦楽団の演奏会場として1870年に建てられた。先にも述べた通りこのホールは世界3大ホールに数えられる程その響きには定評があり、数々の名演奏、名録音がここで生まれてきた。このホールの内装には金が大変多く使われており、32体の黄金の女性像や多くの彫刻、絵画、シャンデリア等によって大変美しく飾られている。形状は代表的なシューボックス形で容積が15,000 m^3 、座席数が1,680席、残響時間は、空席時約3.3秒と比較的長い。ただし満席時には約2秒と報告されている。

3. 6 トーンハーレザール

チューリヒ湖畔に位置するこのホールは1895年に完成し、1930年に改修された。形状はシューボックス形でステージ横から客席後方にかけてバルコニー席が設けられている。内装は壁に灰色がかった薄茶色と金色が多く用いられ、天井自体を額縁の様に大きく描かれた絵画の下に大きなシャンデリアが2つ下がっている。容積は11,400 m^3 、座席数は1,546席、残響時間は空席時3.5秒と長い。満席時の残響時間は1.6秒と大きく変わる。

3. 7 シュタットカジノ

1876年に建てられたホールで、形状はシューボックス形であり、このホールもトーンハーレザールと同様にステージ横から客席後方にかけてバルコニー席が設けられている。内装はこのバルコニー席から天井にかけて石膏の白色を基調として柱などに赤茶色が用いられ、逆にバルコニー席から下は赤茶色を基調として柱などに白色が用いられている。容積は10,500 m^3 で座席数は1,400席、残響時

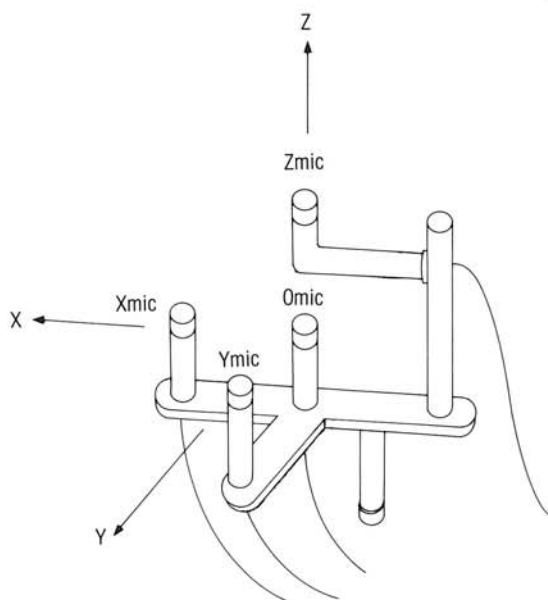


図-3 近接4点法で用いるマイクロホン(5cm間隔)
Fig. 3 Microphones used in closely located 4 points method (distance: 5 cm)

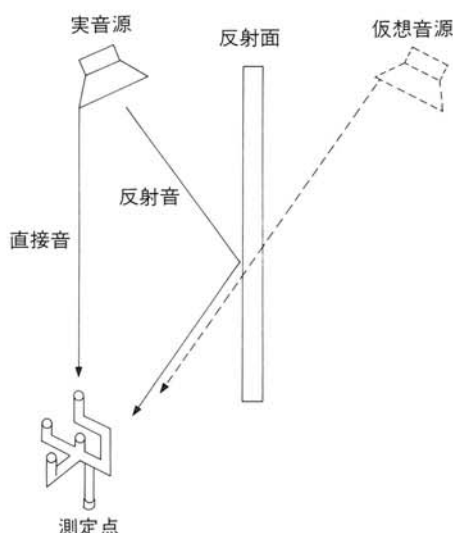


図-4 仮想音源と反射音

Fig. 4 Virtual image source and reflection

間は空席時約2秒であり、長い間スイス最良のホールと見なされてきた。

4 測定方法

4.1 近接4点法による測定

近接4点法については以前にも本技報で紹介した⁵⁾が、図-3のような近接した4本のマイクロホンを用いて、測定点に到来する反射音を立体的に解析する測定法である。当社も近接4点法を開発した早稲田大学理工学研究所の山崎芳男先生の御指導を受けて、音場制御の評価や今回のようなリファレンスデータの測定に利用している。

近接4点法では、反射音を次のように捉える。図-4で、実音源が発した音が壁で反射して、測定点に到来している(実線)。この反射音を、実音源の虚像である仮想音源が、壁を取りはらったときに発した直接音であると考え(点線)。

このように考えると、仮想音源の分布を図示す

ることによって、反射音の強さや多く到来する方向を視覚的に判断することができる。

便宜上、実音源も仮想音源と区別しない。また反射が2回以上起こる時にできる仮想音源の虚像もまた仮想音源である。ホールでは、測定点に到達するまでに何回も反射を繰り返すことが多いので、まるで鏡張りの部屋に無数にできる像のように仮想音源が分布する。

ホールでの測定では、ステージ上に設置したスピーカからインパルス音(単発のパルス音)を発し、客席に図-3のマイクロホンを設置して、音場のインパルス応答を4本同時に記録する。

この4本のインパルス応答から仮想音源を求めるわけであるが、これについては次章で説明する。

近接4点法を用いると、仮想音源分布だけでなく、指向性パターン(針ねずみとも呼ぶ)と呼ばれる到来方向別の反射エネルギー分布も求めることができる。また、インパルス応答を利用したさまざまな解析(残響時間・D値・周波数特性など)を行なうことができる。

4.2 ダミーヘッドの両耳インパルス応答測定

ダミーヘッドは、人間の頭の模型であり、通常は左右両耳の鼓膜の位置にマイクロホンを設置した装置である。

ホールの客席に置いたダミーヘッドの両耳マイクロホンの出力を記録することにより、人が実際に聴いたものに近い音を測定することができる。

インパルス応答を測定しておけば、さまざまな解析を行える。例えば、音楽信号をたたみこんでバイノーラル再生したり、両耳間の相互相関係数を求めたりすることができる。

インパルス応答の測定は、図-5のブロック図に示す装置を用いて行った。

4. 3 無響室録音音楽のバイノーラル録音

4. 2で測定したダミーヘッドの両耳インパルス応答に音楽信号をたたみこめば、現場でバイノーラル録音したのと同等の結果を得ることができる。しかし、インパルス応答の時間長が大きいため、たたみこみ演算に時間がかかることを考慮して、バイノーラル録音を実施しておくこととした。無響室で録音した音楽（バイオリン・フルート・小太鼓のソロなど）をステージ上のスピーカから発し、ダミーヘッドの両耳マイクロホンの出力をDATで収録した。

4. 4 測定条件

測定は、深夜などホールに客が入らない時間帯を選び、空調を切り、暗騒音をできるだけ小さくするようにした。

ブロック図を図-5に示す。近接4点法とダミーヘッドの両耳インパルス応答は、インパルス音ではなく、M系列信号を用いて測定した。M系列信号についても、次章で説明する。S/N比を向上させるための加算平均は、8回行なった。

音源は、できるだけ無指向性に近づけるため、球状のエンクロージャに、二つのスピーカを外向きに取りつけたものを使用した。これを、ステージの中央近くに1.2mの高さに設置した。

近接4点法のマイクロホンは、原点のOマイクが床面から1.5mの高さになるようにし、Y軸が正面を向くよう設置した。

ダミーヘッドは、両耳の高さが床面から1.5mになるように設置した。

測定箇所は、一つのホールで3～7点である。今回紹介する結果は、音源の正面12mで測定したものである。ダミーヘッドの両耳相関係数が1にならないよう客席中央から左右いずれかに少しずつ位置を設定した。測定点は図-10～16（本稿最後に示す）の(b)図の①で示した。

5 解析方法

5. 1 M系列によるインパルス応答測定

通常、ホールのインパルス応答を測定するには、音源（スピーカ）から単発のパルス音（インパル

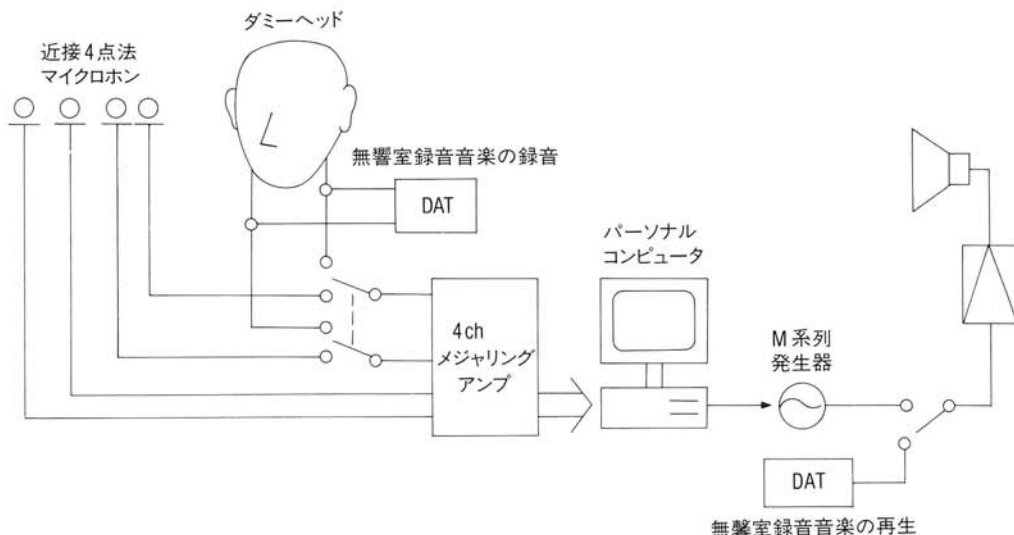


図-5 測定ブロック図

Fig. 5 Block diagram of measurement

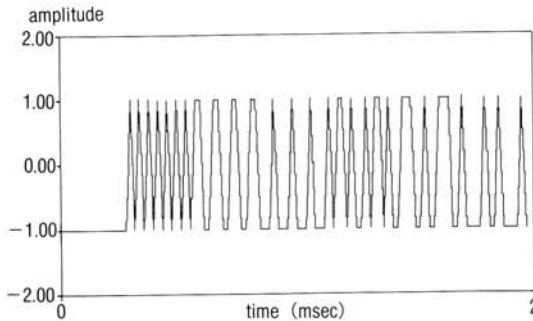


図-6 M系列信号の例

Fig. 6 An example of M-sequence signal

ス音)を出力し、マイクロホンの応答を収録する。しかし、インパルス音はホワイトノイズのような定常音信号に比べてエネルギーが小さく、 S/N 比を向上させるためには、多数回の加算平均(同期加算)を行わなければならない。このため、測定時間が長くなってしまう。

今回のインパルス応答測定では、M系列信号を用いて加算平均の回数を減らし、測定時間の短縮を図った。

M系列信号は、フラットな広帯域の周波数成分を持つ定常音で、ホワイトノイズとして用いられることも多い。図-6にM系列信号の一例を示す。これをスピーカから出力してホールのM系列応答を記録しておき、後で入力したM系列信号との相互相関を計算すれば、インパルス応答を算出できる。

このようにして、近接4点法による4本のインパルス応答とダミーヘッドの両耳のインパルス応答を各測定点ごとに測定し、5.2以降の解析に使用した。

18次のM系列信号を用いて、サンプリング周波数50kHzで約5.4秒のインパルス応答を測定した。

今回の測定では8回の加算平均を行っただけで、インパルス音を用いて128回の加算平均を行なった場合と同等あるいはそれ以上の S/N 比を得ることができた。

5.2 仮想音源分布

近接4点法では、図-7のように4本のインパルス応答を得る。インパルス応答の初期の部分では、到来する反射音が少なく、反射の経路長も一致しにくいため、各反射音を分離したパルスとして観測できる。同じ反射音が、マイクロホンごとにわずかな時間差をもって現れる。

例えば、Y軸方向から来た音の場合、Y点に最も早く到達し、O・X・Zにはそれよりやや遅れて同時に到達する。このように、反射音の到来方向によって、各マイクロホンへの到達時間が、一義的に決まる。

仮想音源の空間座標は、この到達時間の違いか

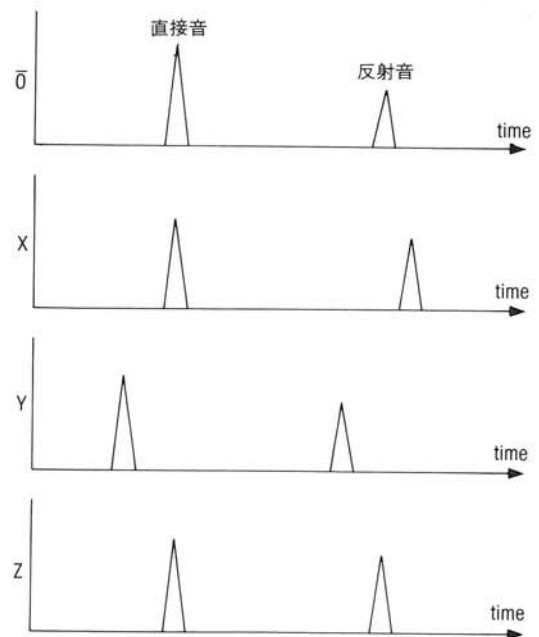


図-7 4本のインパルス応答

Fig. 7 Four impulse responses

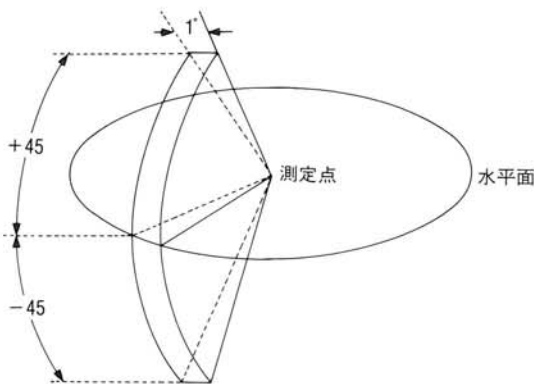


図-8 指向性パターンを求めるための仮想
マイクロホンの指向性

Fig. 8 Directivity of virtual microphone to
compute directional hedgehog

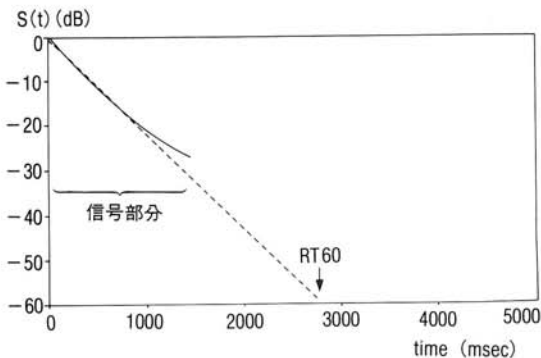


図-9 残響曲線の例 (点線は回帰直線)

Fig. 9 An example of reverberation curve
(dash line is regression line)

ら求めることができる。

また、原点 (O点) のインパルス応答における反射音のエネルギーを求め、仮想音源の強さとする。

以上のように求めた仮想音源の座標と強さを表示したのが、仮想音源分布図である。仮想音源は円で表示されており、中心が座標を、半径がレベルを表している。

5. 3 指向性パターンと指向性拡散度

図-8のように、水平方向に1°、垂直方向に±45°という薄い扇型の指向特性をもつ仮想的なマイクロホンを考える。これを水平方向に360°走査し、それぞれの水平角度のときに、マイクロホンに入射する全ての仮想音源の強さの和を求めた。これが、指向性パターンである。

5. 4 残響時間・D値 (definition)

近接4点法で測定したインパルス応答から、残響時間やD値などを算出した。

残響時間は、次のように算出した。まず、オクターブ帯域フィルタを通したインパルス応答から、次のシュレダの(1)式に従って、図-9のような残響曲線を求めた。

残響時間 $s(t)$ は、

$$s(t) \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{\int_t^{\infty} P^2(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} P^2(\tau) d\tau} \quad (1)$$

P : 音圧

この曲線で、信号の減衰部分に最小二乗法で直線をあてはめて0 dBから-60dBまで減衰する時間を測定した。

また、D値は(2)式を用いて算出した。初期反射音の寄与の大きさを表しているので、D値は音の明瞭度に関係があるといわれている。

$$D \text{ 値}(\%) = \frac{\int_0^{50 \text{ msec}} P^2(t) dt}{\int_0^{\infty} P^2(t) dt} \times 100 \quad (2)$$

6 測定結果

図-10～図-16に、測定結果を示す。一つのホルの結果を1ページにまとめてある。以下、(a)～(e)につきそれぞれの見方を説明する。

(a) ステージ近景

各ホールのステージ付近を中心に撮影した写真である。聖シュテファンドームは、正面を撮影しているため、音源を設置したパイプオルガンに背を向けた写真となっている。

(b)ホール概形と測定点

ホールの平面図に×で音源と測定点の位置を示した。Sは音源を表し、1～4の番号は測定点を表す。今回紹介する結果は、全て測定点1のものである。

また、図の下に容積・座席数・残響時間を記した。残響時間は、中心周波数500Hzのオクターブバンドフィルタを通したインパルス応答から求めた値である（5.4参照）。

(c)インパルス応答波形

横軸の時間はmsで表示している。また、直接音の到達時点を0msとしている。

(d)指向性パターン

各方向のエネルギーのうち最大のものを0dBとして、-50dBまで表示した。上が平面図で、下が側面図である。いずれも図の左側がホール前方にあたる。

また、図右下のDRとある値は、指向性パターンから求めた指向性拡散度で、0～1までの値をとる。1に近いほど、全方向から均等に反射音が到来していることを表す。

(e)仮想分源分布

仮想音源のうち、レベルが最大のものを0dBとして、-50dBまで表示した。

上が平面図で、下が側面図である。いずれも図の左側がホール前方にあたる。

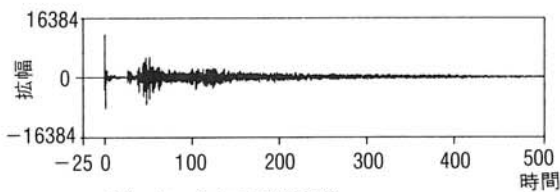
に優れており過去にも音響測定が行われたホールが多く、ここで報告しているデータに関して既に報告されているものもある。しかし一般に公開されているインパルス応答波形データや残響時間等のデータだけではそのホールの音響的な特徴をとらえる事は困難である。例えば前に示した4つのシューボックス形ホールのデータを見ると、側方反射音の到来方向などシューボックス形の特徴はどのホールにも見られる。しかし実際に音を聴いてみると各ホールともそれぞれ音色などに特徴があり、その特徴は前述のデータからはほとんど読み取することは出来ない。実際にそのホールの音響を再現しようとすれば実際に測定して得た生のデータが最低限必要となってくるのが現状である。その意味では今回我々の得たデータは大変貴重なものであり、当社が音場感の向上を目指す上で無くてはならないものである。現在我々はこのデータをDSP音場制御に応用し、単に自然な音場感を目指すだけでなく、DSPチップで各ホール毎の響きの違いや同じホール内での座席位置による響きの違いを再現させる事なども試みており、徐々にその成果が出つつある。またこのようなソフトウェア的な活用だけでなく技術者の育成も含んだ総合的な品質向上を狙った活用も考えている。その一例として例えば今回実施した測定内容のうち、ホールで再生した無響室録音音楽をダミーヘッドで録音したものを、ヘッドフォン再生する事によって、技術者に世界屈指のホール音響を一部でも体験させる事が出来るようになり、技術者の育成によって製品の音決めの際の品質向上も図れるようになると考えている。

7. 考 察

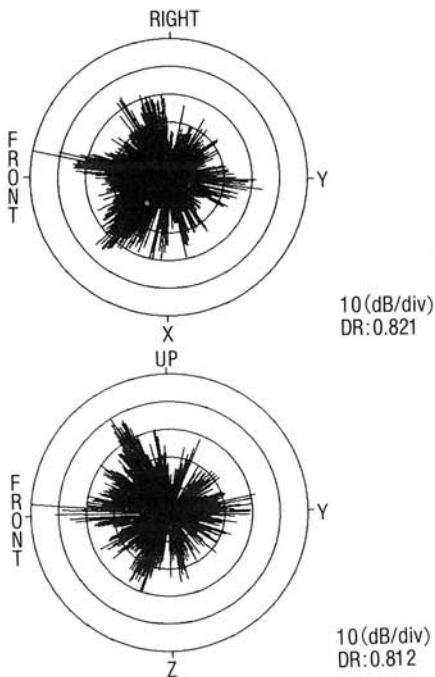
今回測定を実施したホールはほとんどが音響的



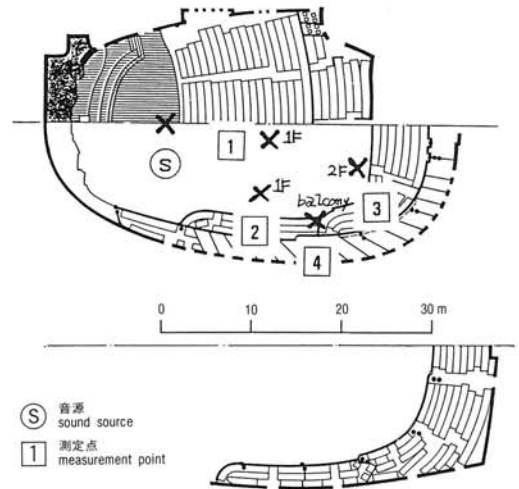
(a) ホール内部
Inside of the Hall



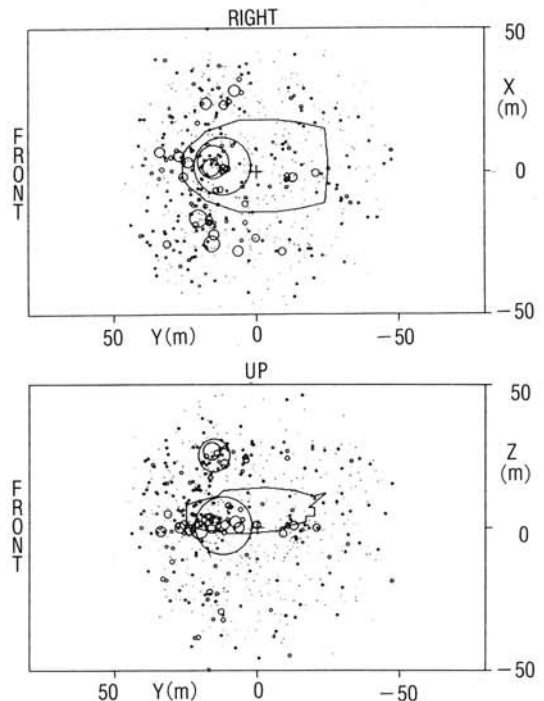
(c) インパルス応答波形
Impulse response waveform



(d) 指向性パターン (上: 平面図、下: 側面図)
Directional hedgehog
(UPPER: top view, LOWER: side view)



(b) ホール概形と測定点
Plane and measurement points
容積 (volume): 12,500 m³
座席数 (seats): 2,150
残響時間 (reverberation time) at 500Hz: 1.55sec

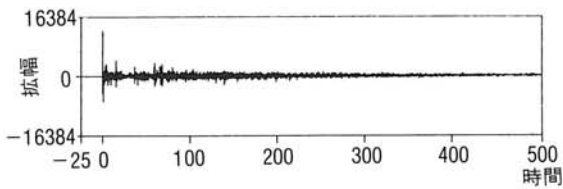


(e) 仮想音源分布 (上: 平面図、下: 側面図)
Distribution of virtual image sources
(UPPER: top view, LOWER: side view)

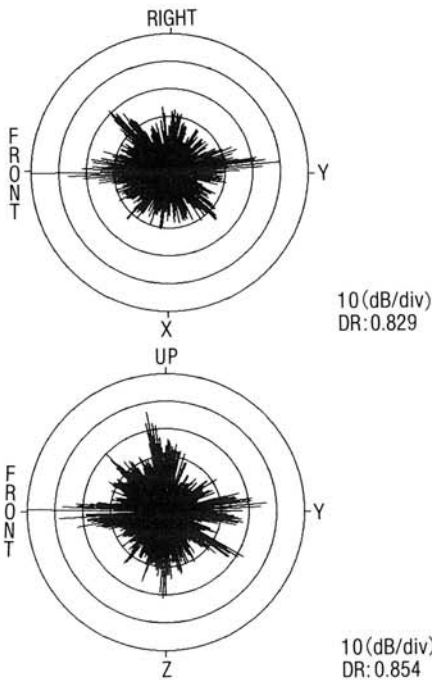
図-10 美術宮殿 (ベルギー、ブリュッセル)
Fig. 10 Palais Des Beaux-Arts (Brussels, Belgium)



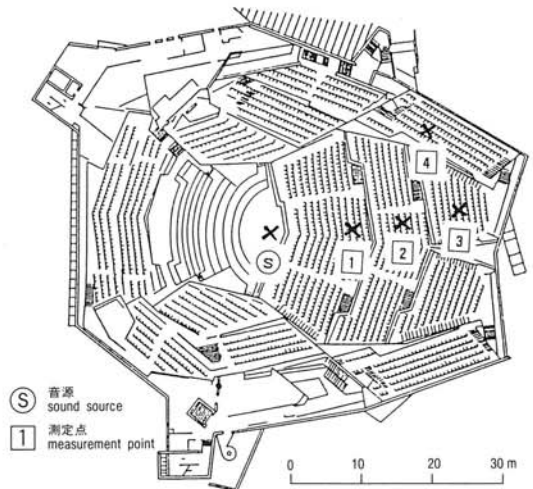
(a) ホール内部
Inside of the Hall



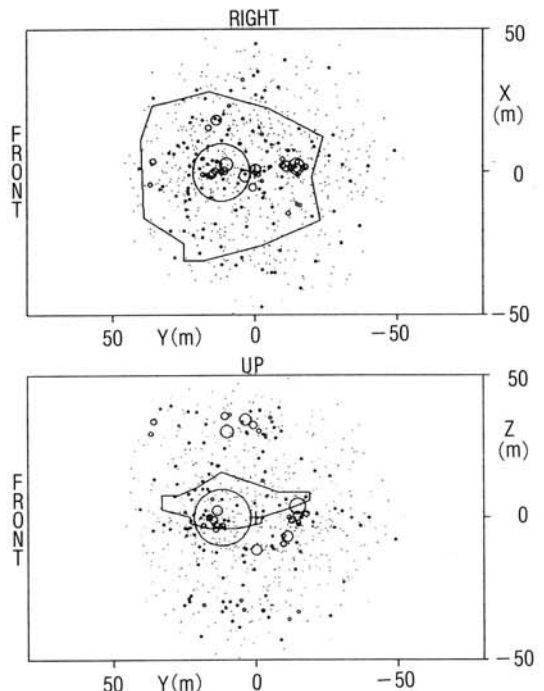
(c) インパルス応答波形
Impulse response waveform



(d) 指向性パターン (上: 平面図、下: 側面図)
Directional hedgehog
(UPPER: top view, LOWER: side view)



(b) ホール概形と測定点
Plane and measurement points
容積 (volume): 26,000m³
座席数 (seats): 2,415
残響時間 (reverberation time) at 500Hz: 2.07sec

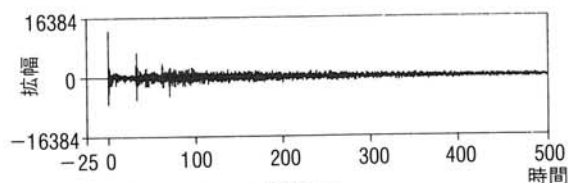


(e) 仮想音源分布 (上: 平面図、下: 側面図)
Distribution of virtual image sources
(UPPER: top view, LOWER: side view)

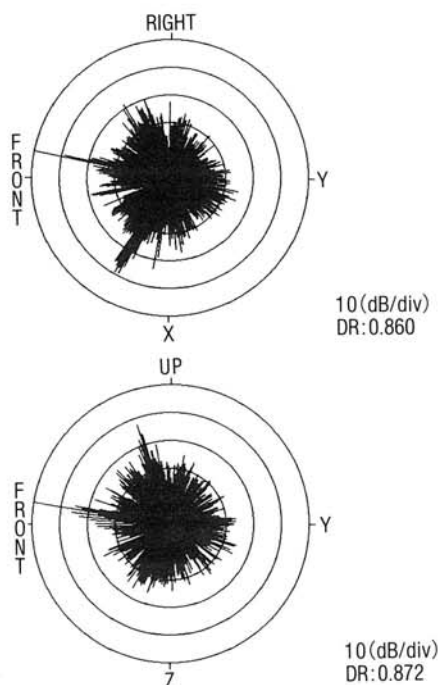
図-11 ニューフィルハーモニーホール (ドイツ、ベルリン)
Fig. 11 New Philharmony hall (Berlin, Germany)



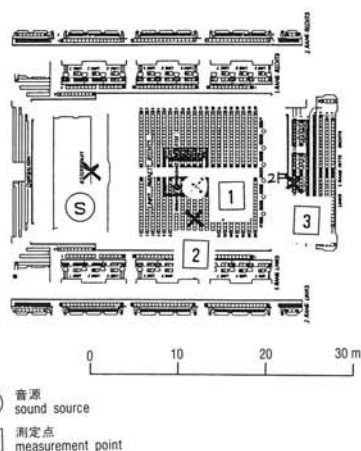
(a) ホール内部
Inside of the Hall



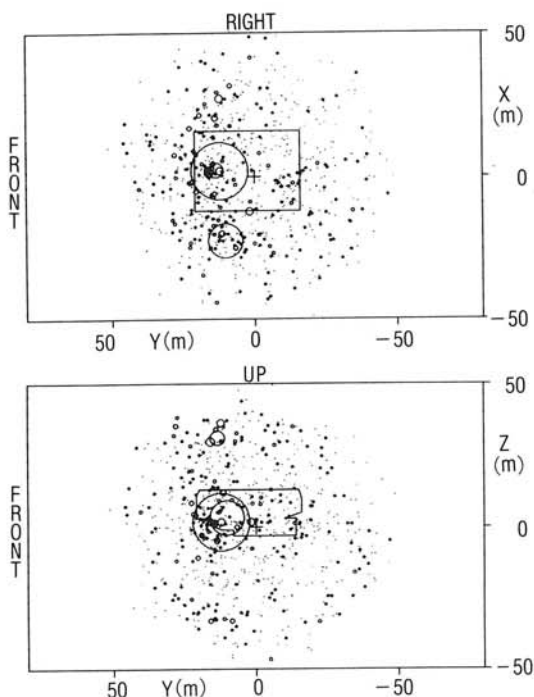
(c) インパルス応答波形
Impulse response waveform



(d) 指向性パターン (上: 平面図、下: 側面図)
Directional hedgehog
(UPPER: top view, LOWER: side view)



(b) ホール概形と測定点
Plane and measurement points
容積 (volume): — m^3
座席数 (seats): 1,301
残響時間 (reverberation time) at 500Hz: 2.70sec

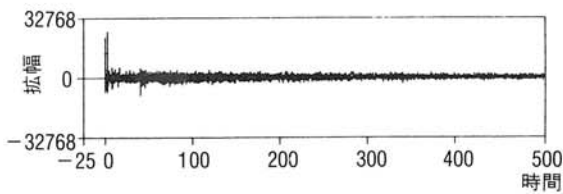


(e) 仮想音源分布 (上: 平面図、下: 側面図)
Distribution of virtual image sources
(UPPER: top view, LOWER: side view)

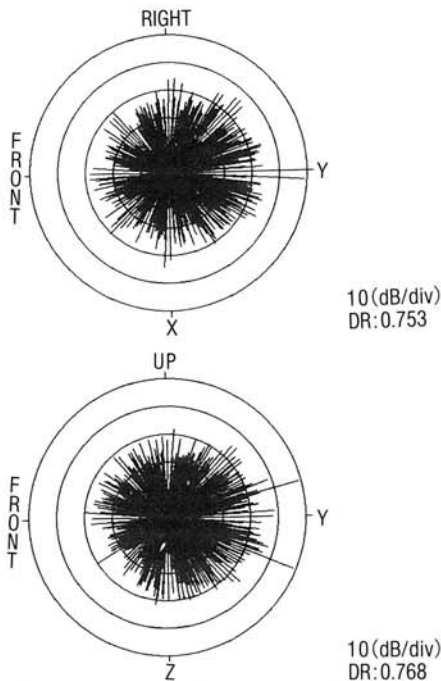
図-12 シュウシュピールハウス (ドイツ、ベルリン)
Fig. 12 Schauspielhaus (Berlin, Germany)



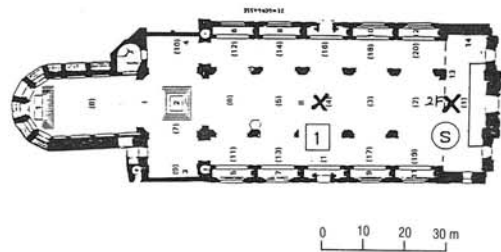
(a) 大聖堂内部
Inside of the Cathedral



(c) インパルス応答波形
Impulse response waveform

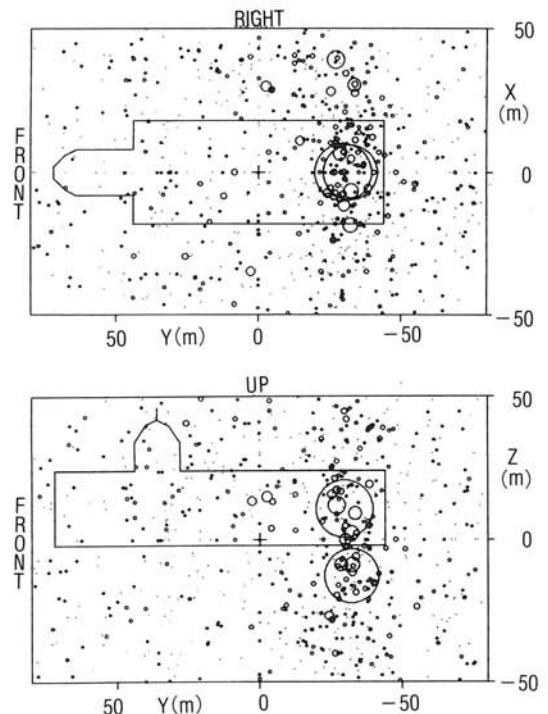


(d) 指向性パターン (上: 平面図、下: 側面図)
Directional hedgehog
(UPPER: top view, LOWER: side view)



⑤ 音源
sound source
1 測定点
measurement point

(b) ホール概形と測定点
Plane and measurement points
容積 (volume): ——— m^3
座席数 (seats): ———
残響時間 (reverberation time) at 500Hz: 4.96sec

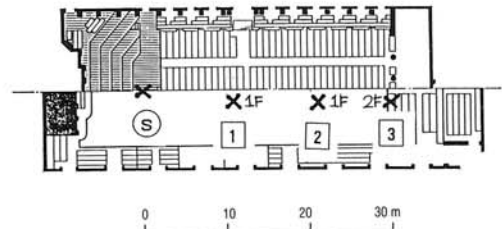


(e) 仮想音源分布 (上: 平面図、下: 側面図)
Distribution of virtual image sources
(UPPER: top view, LOWER: side view)

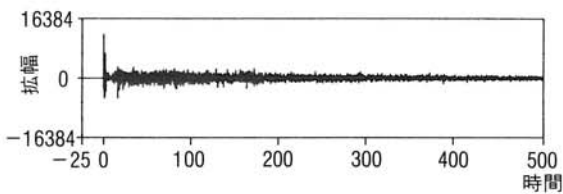
図-13 聖シュテファンドーム (ドイツ、パッサウ)
Fig. 13 Dom Zu Passau (Passau, Germany)



(a) ホール内部
Inside of the Hall



(S) 音源
sound source
1 測定点
measurement point



(c) インパルス応答波形
Impulse response waveform

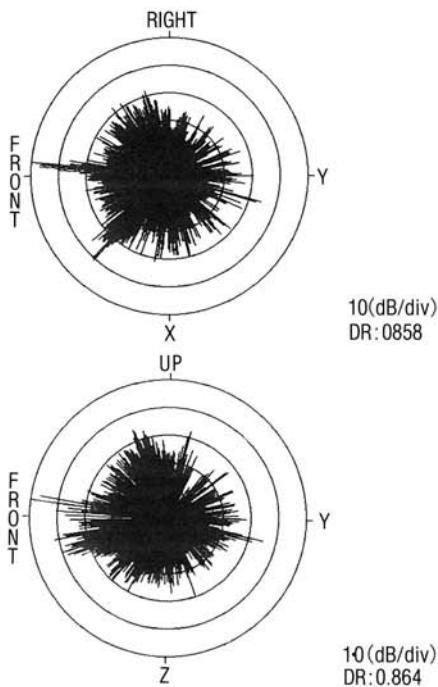
(b) ホール概形と測定点

Plane and measurement points

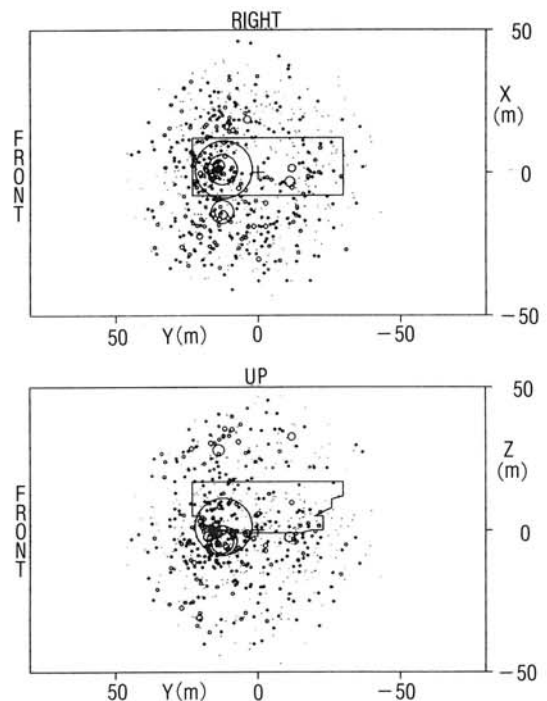
容積 (volume) : 15,000 m³

座席数 (seats) : 1,680

残響時間 (reverberation time) at 500Hz : 3.27sec



(d) 指向性パターン (上: 平面図、下: 側面図)
Directional hedgehog
(UPPER : top view, LOWER : side view)

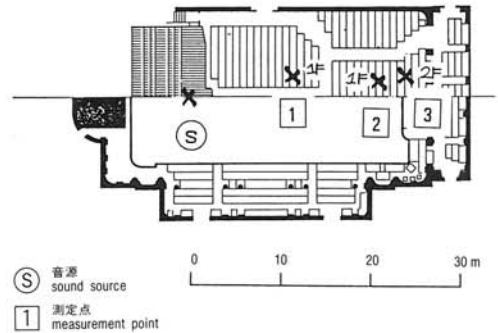


(e) 仮想音源分布 (上: 平面図、下: 側面図)
Distribution of virtual image sources
(UPPER : top view, LOWER : side view)

図-14 ムジークフェラインザール (オーストリア、ウィーン)
Fig. 14 Grosser Musikvereinssaal (Vienna, Austria)



(a) ホール内部
Inside of the Hall



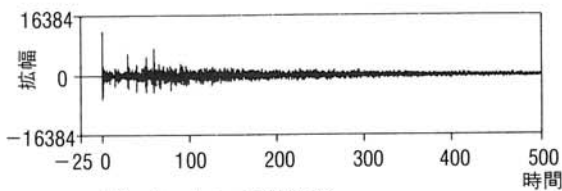
(b) ホール概形と測定点

Plane and measurement points

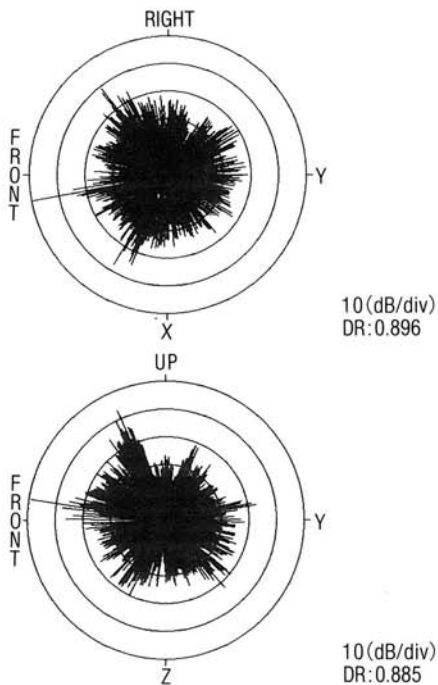
容積 (volume) : 11,400m³

座席数 (seats) : 1,546

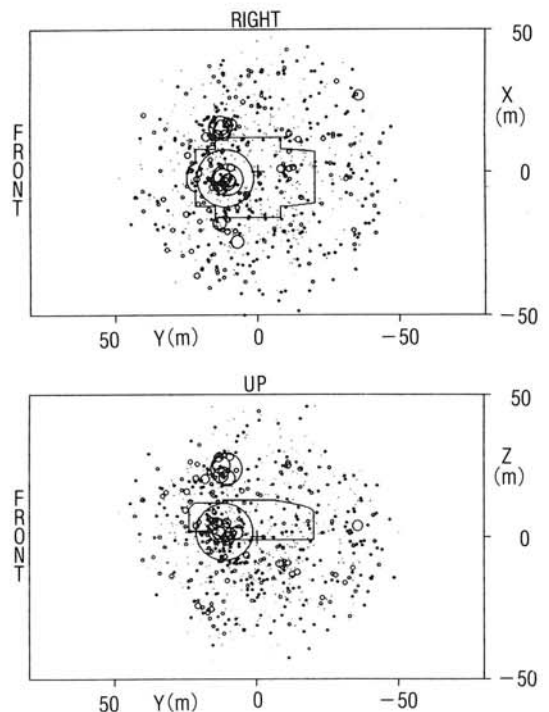
残響時間 (reverberation time) at 500Hz : 3.59sec



(c) インパルス応答波形
Impulse response waveform



(d) 指向性パターン (上: 平面図、下: 側面図)
Directional hedgehog
(UPPER : top view, LOWER : side view)



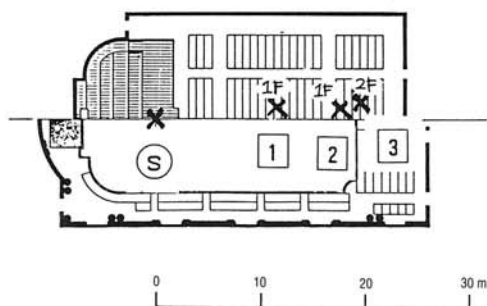
(e) 仮想音源分布 (上: 平面図、下: 側面図)
Distribution of virtual image sources
(UPPER : top view, LOWER : side view)

図-15 トーンハーレザール (スイス、チューリッヒ)

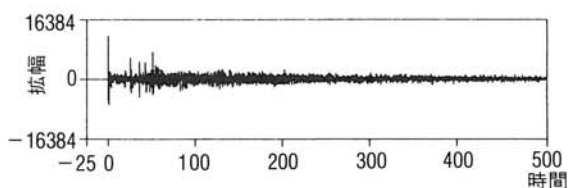
Fig. 15 Grosser Tonhalleaal (Zurich, Switzerland)



(a) ホール内部
Inside of the Hall

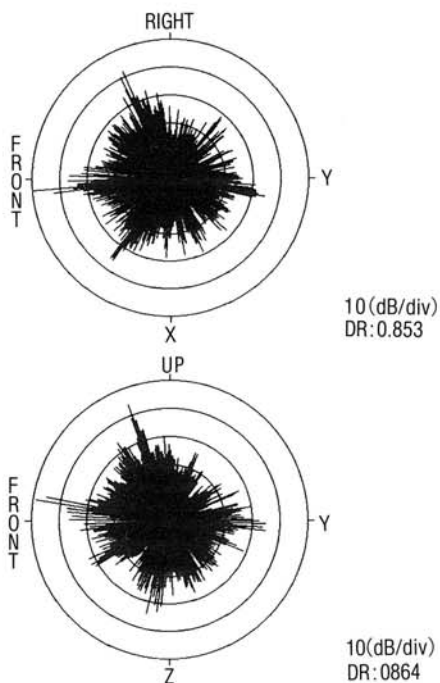


(S) 音源
sound source
(1) 測定点
measurement point

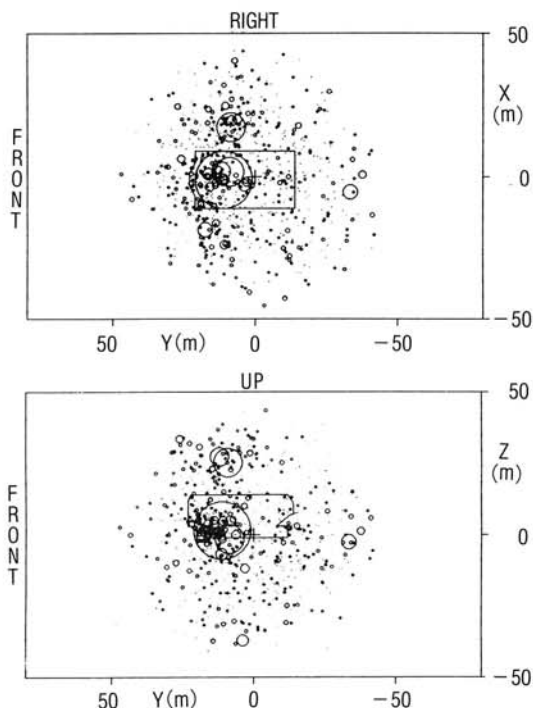


(c) インパルス応答波形
Impulse response waveform

(b) ホール概形と測定点
Plane and measurement points
容積 (volume): 10,500m³
座席数 (seats): 1,400
残響時間 (reverberation time) at 500Hz: 2.02sec



(d) 指向性パターン (上: 平面図、下: 側面図)
Directional hedgehog
(UPPER: top view, LOWER: side view)



(e) 仮想音源分布 (上: 平面図、下: 側面図)
Distribution of virtual image sources
(UPPER: top view, LOWER: side view)

図-16 シュタットカジノ (スイス、バーゼル)

Fig. 16 Stadt-Casino (Basel, Switzerland)

8. あ と が き

今後は、今回得たデータの解析をさらに進め、データと人間の感性との相関を探ることによって車室内で最も好ましい音場感を効率よく再現できる手法について検討を進めて行く考えである。更に、もし機会があれば今回と形状の異なるホールやオペラハウス、ジャズクラブ、スタジオなどの音響特性を測定・解析する事によって、様々な本格的音場再生にチャレンジし、今まで以上に車の中で音楽を聴きたいとユーザに感じさせる様な製品に発展させたい。また将来的には車の中で再生される音楽に最も最適な音場を自動的に再現出来るといった夢の様な製品作りも目指して行きたい。

最後に今回の測定を実施するに当たって、全面的な御指導、御便宜を頂いた神戸大学工学部の森本助教授、阪上助手ならびに現地において御便宜ご協力を頂いたルール大学の皆様に対して心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 山本照二：“最近建設されたコンサート・リサイタルホール” 日本音響学会誌、Vol.43、No.2 P.87-88 (1987)
- 2) 伊藤毅：“音響工学”、電気書院、P.314,316-317,337 (1977)
- 3) F.Winckel：“Der Monat” P.77 (1957)
- 4) LEO L.Beranek：“音楽と音響と建築”、鹿島出版会、P.181-185, 193-196, 359-362, 367-370 (1987)
- 5) 長野、本島、平野：“車室内音場制御と音場解析”、富士通テン技報、Vol.7、No.2、P33-42 (1989)
- 6) 遠藤、山崎、伊藤：“近接4点法による室内空間情報の把握とその展開”、建築音響研究会資料、AA85-21 (1985)
- 7) 伊達、福留、武田：“M系列によるインパルス応答の高速計算について”、電気音響研究会資料、EA86-47