

5-4-2 近接4点法による音場の空間情報の可視化

山崎 芳 男 *

1. 人間の優れた聴覚

音場の響きを表す指標として残響時間が広く使われている。しかし残響時間がほぼ等しい音場で、驚くほどの響きの違いを感じることがしばしばある。これは

建物の形状や材料による反射音、特に直接音に続く初期反射音の時間構造や到来方向、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。

人間はたった2つの耳で巧みにこの空間情報を捉えているが、2つのマイクロホンを使っても前後や上下の方向判定はできない。人間は頭を少し動かすことにより巧みにこれを判断している。そればかりでなく、頭を動かさなくとも、片耳を塞いでも方向判別はある程度可能である。これは人間の聴覚能力のすばらしい

* 早稲田大学理工学研究所
"Visualization of Spatial Information in Sound Fields by Closely Located 4-point Microphone" by Yoshio Yamasaki (Science and Engineering Research Laboratory, Waseda University, Tokyo)

ところであり、聴きなれた音に対しては頭や体の存在により変化する到来方向や距離による微妙な音質の違いを知らず知らずのうちに記憶しているのである。したがって、1つの耳では初めて聴く音に対しては当然方向や距離を判定する力はない。

様々な信号処理技術を駆使して人間の聴覚に一步でも近づけようと種々の努力が払われている。例えば我々は空間情報を把握する手段として2つではなく4つのマイクロホンを使う「近接4点法」という手法を導入し、10年以上にわたり各種の音場を測定してきた^{1)~3)}。

近接4点法の原理は、地震の震源探査あるいは三角測量の原理を空間に拡張したようなもので、同一平面上にない近接した4点で収録した室のインパルス応答の僅かな時間構造の違いに着目して、音場の空間情報を把握しようというものである。

ここでは、この近接4点法を含め自乗分法による残響波形の計算、ウィグナー分布による音場の過度特性の可視化等インパルス応答を展開することにより音場の諸特性を求める手法を紹介し、いくつかのコンサートホールの測定結果を示す。

2. 自乗積分法による残響波形の計算

インパルス応答が充分の精度で記録、保存されていれば、この1本のインパルス応答から周波数帯域別の残響波形を計算することができる。すなわち、M. R. Schroeder は残響波形の集合平均 $\langle S^2(t) \rangle$ がインパルス応答 $h(t)$ の自乗積分を使って、

$$\langle S^2(t) \rangle = \int_0^t h^2(\tau) d\tau \quad (1)$$

と表されることを示している。この積分計算はアナログ測定では一度で行うことは不可能であるが、いったんインパルス応答をデジタル収録しておけば演算は容易である。いわば、デジタル演算にむいた手法といえることができる。図4(b)にこの方法で計算した残響波形を示す。

3. ウィグナー分布

ウィグナー分布は1932年、量子力学の分野でE. Wigner により紹介され、近年、電子計算機の性能向上とともに過渡現象の解析にしばしば使われるようになってきた。

時間信号 $f(t)$ の自己ウィグナー分布 $W(t, f)$ は、

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-j2\pi f\tau) f\left(t + \frac{\tau}{2}\right) f^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) d\tau \quad (2)$$

となる。ここで $*$ は複素共役を示す。 $f(t)$ が $0 < t \leq a$ 以外で0の時間信号であるとすれば、その積分区間は $-a \sim +a$ となる。ウィグナー分布は周波数と時間の2次元関数であり、時間関数やそのフーリエ変換との関係が数学的にも明確であるので大変扱いやすい関数である。

ウィグナー分布を周波数軸方向に積分すると時間信号のインパルス応答に、時間軸方向に積分するとパワースペクトルとなる。ウィグナー分布は周波数成分の時間変化という概念とよく一致している。

ウィグナー分布は信号の過渡状態の周波数解析に使われているが、周波数と時間という本来直交関係にある2変数を使って1つの関数で表しているの、クロス項が生じる。

音場のように複雑な伝送系のウィグナー分布には多くのクロス項が現れる。平均化操作によってクロス項を軽減することもできるが、クロス項を音場の特徴を際立たせる手段として積極的に利用することも可能である。すなわち、音場がデッドで単純な場合にはクロス項が少なく、逆に複雑な場合にはクロス項も多くなり音場の特徴を助長するので、可視化には有効な手段となるのではないかと考えたわけである⁴⁾。

図4(c)に時間幅1.5ms、周波数幅1/12octで平均化を行い振幅の絶対値をデシベル表示したコンサートホールのウィグナー分布を示す。

4. 近接4点法

近接4点法とは同一平面場でない4点、計算の便宜上図1に示すように直交軸上の原点および原点より等距離(3~5cm)の3点のマイクロホンでインパルス応答を測定し、短時間相関あるいはインテンシティの手法により空間情報を得ようというものである。相関による方法は4つのインパルス応答の時間構造のわずかな違いに着目して短時間相互相関係数によって同一反射を特定し受音点から見た反射音(仮想音源)の空間座標と大きさを算出しようというものである。

図2に大きさの異なる各種の音場、一般住宅の居間、コンサートホール(ザ・シンフォニーホール)、教会(フライブルグのミュンスタ)の床平面に投影された仮想音源分布を示す。なお、縮尺がそれぞれ異なるので注意されたい。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。

仮想音源分布から任意の方向や時間で分割したインパルス応答を計算することもできる。図3に示す指向

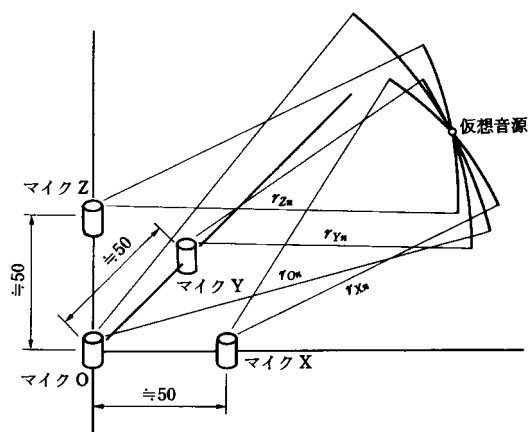


図1 近接4点法の測定原理

性パターンは水平面を回転面と考え、垂直方向の開き角 $\pm 45^\circ$ の範囲から入射する仮想音源のパワーを 1° ごとに dB 表示したもので、いわゆるハリネズミパターンである。1目盛りは 10dB である。

一方、音圧ばかりでなく粒子速度にも着目したインテンシティによる手法は、2つのマイクロホンのインパルス応答から軸方向の短時間インテンシティベクトル成分を求め、3軸方向のベクトル成分を合成することにより、周波数帯域ごとの時間に対する音の到来方向と強さの変化を知ろうというものである⁵⁾。

5. コンサートホールの測定結果

図4に(1) ムジークフェラインザール(ウィーン)、(2) フィルハーモニーホール(ミュンヘン)、(3) ザ・

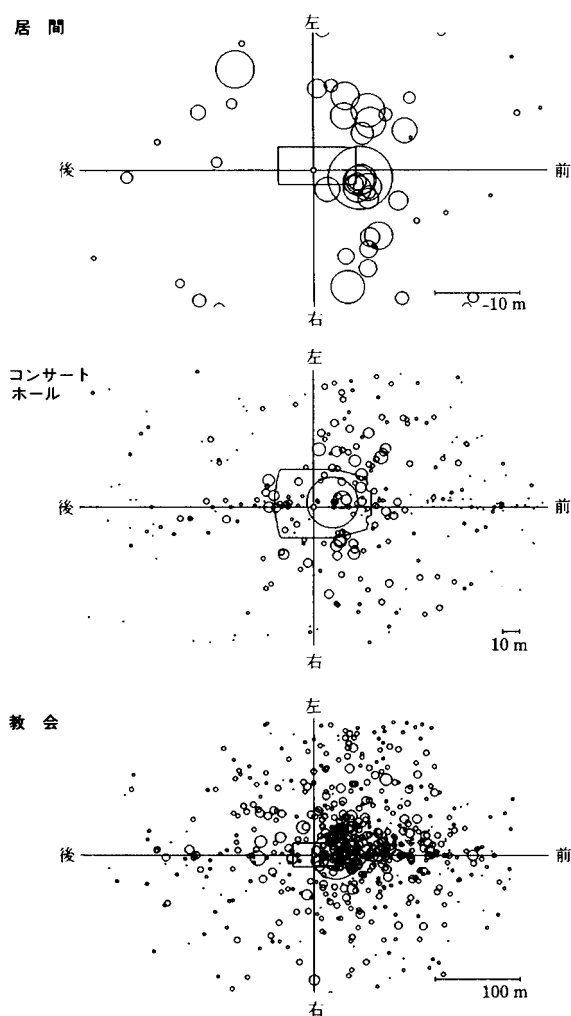


図2 近接4点法で求められた各種音場の仮想音源分布

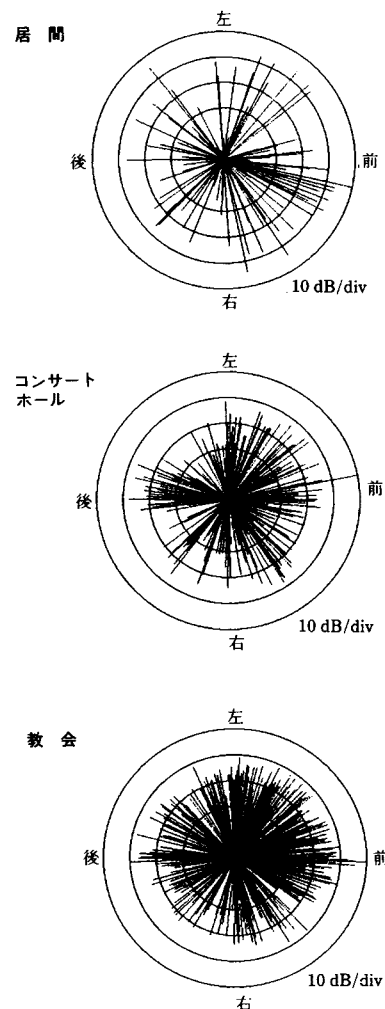


図3 仮想音源分布から計算した指向性パターン

シンフォニーホール（大阪）, (4) サントリーホール（東京）の解析結果を示す。

いずれの場合も音源は舞台上前方ほぼ中央の高さ1.5mの点, 受音点は高さ1.2mの点で音源から12mの距離にある1階の中央からわずかにずれた点である。ホール容積と収容人員および500Hz, 1/3オクターブの残響時間を付記した。満席時の残響時間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1オクターブバンドで分析した結果である。

(a) にインパルス応答を, (b) に前述のインパルス自乗積分法で計算した500Hz, 1/3オクターブバンドの残響波形, (c) に初期反射部分のウィグナー分布を示す。

(d) は近接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）, YZ平面（右から左）とXZ平面（後から前）に投影したものである。

(e) に各45°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 θ , 回転面に垂直方向の開き角 ϕ 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⁶⁾。

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, 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, 特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い目である。

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。

仮想音源分布や指向性パターンあるいはインパルス

応答を時間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。

以上, 音場の空間情報や過渡情報が近接4点法やウィグナー分布を使ってある程度可視化できることを示した。これらをいかに建築音響設計に反映させていくかは今後の大きな課題である。

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故 Dr. Posselt, 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らの力をお借りした。関係各位に謝意を表す。

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辞を表す。 (1990年1月12日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 橘, 山崎, 前川, 森本, 平澤: "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) (第2報)", 音響学会誌, 43, pp. 118 - 124, pp. 277 - 285 (1987)
- 2) 山須田, 小路, 守川, 斉藤, 山崎, 伊藤: "デジタル技術を用いた室内空間情報の一測定法", 音響学会建音研資, AA 79 - 03 (1979)
- 3) Y. Yamasaki and T. Itow: "Measurement of Spatial Information in Sound Fields by Closely Located Four Point Microphone method", J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 10, 2 (1989)
- 4) 伊勢, 清山, 岡田, 山崎: "近接4点法による音場の過渡特性の把握", 音響学会電音研資, EA 87 - 4
- 5) 山崎, 清山, 高林, 伊藤: "近接4点法による室内音場の時間・空間情報の把握", 音響学会建音研資, AA 88 - 13
- 6) 山崎, 伊藤: "近接4点法によるコンサートホールの音響測定", JAS Journal (1987. 10)



山崎 芳男

昭和43年, 早稲田大学理工学部電子通信科卒業。同音響工学研究室, 理工学研究所において広帯域音響信号の高精度・高能率符号化, 信号分離, 建築音響分野へのデジタル技術の導入などの研究に従事。現在, 早稲田大学理工学研究所特別研究員, 工学博士。

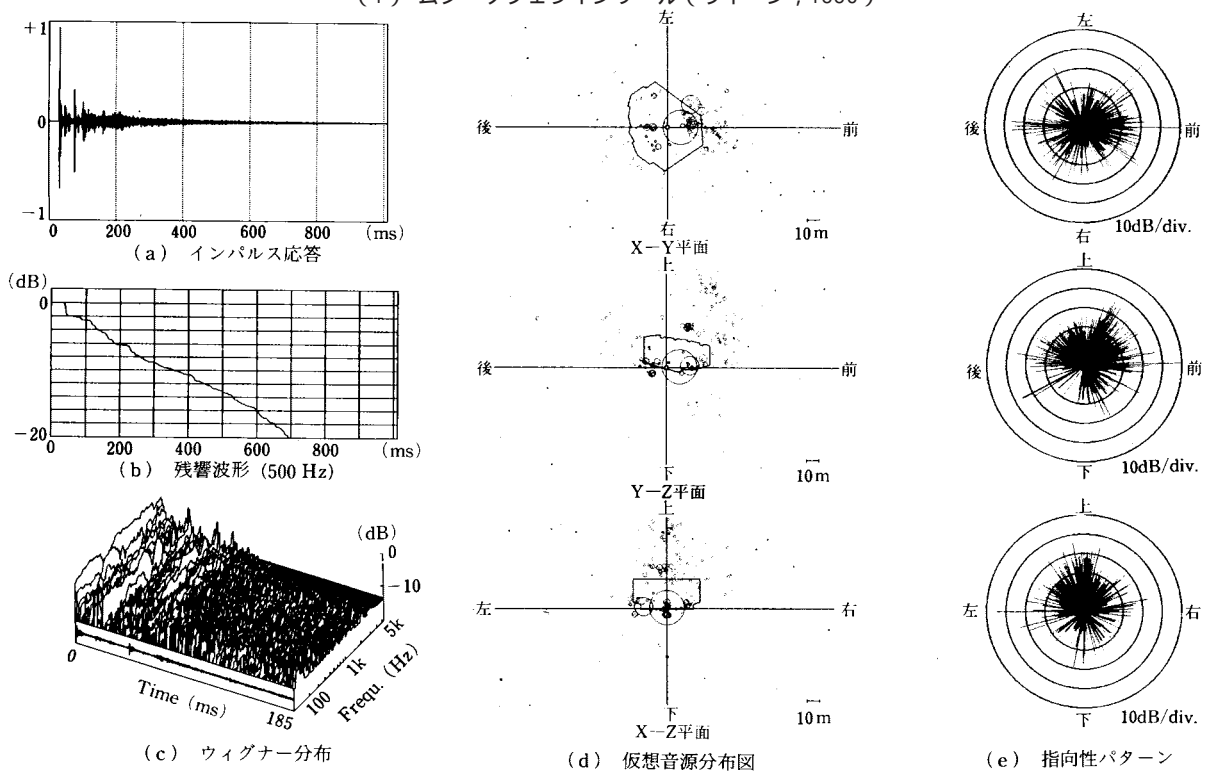
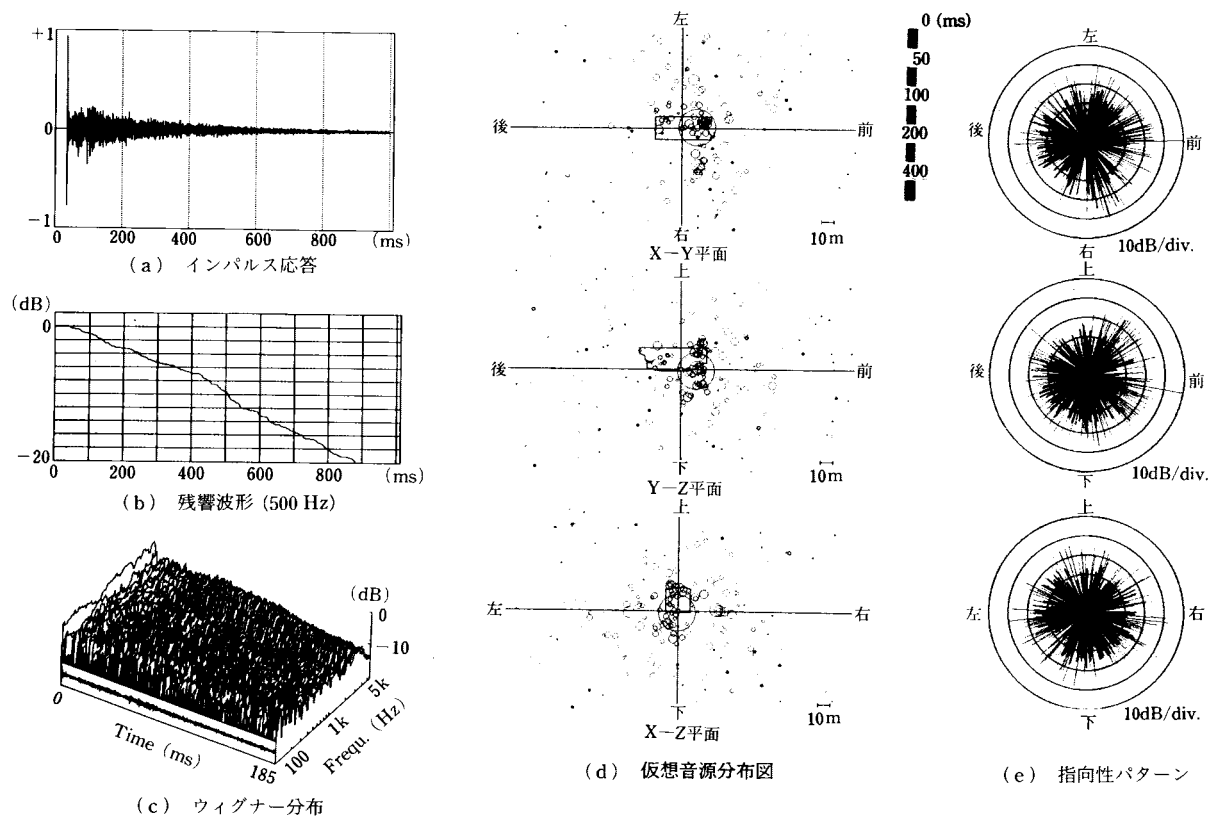
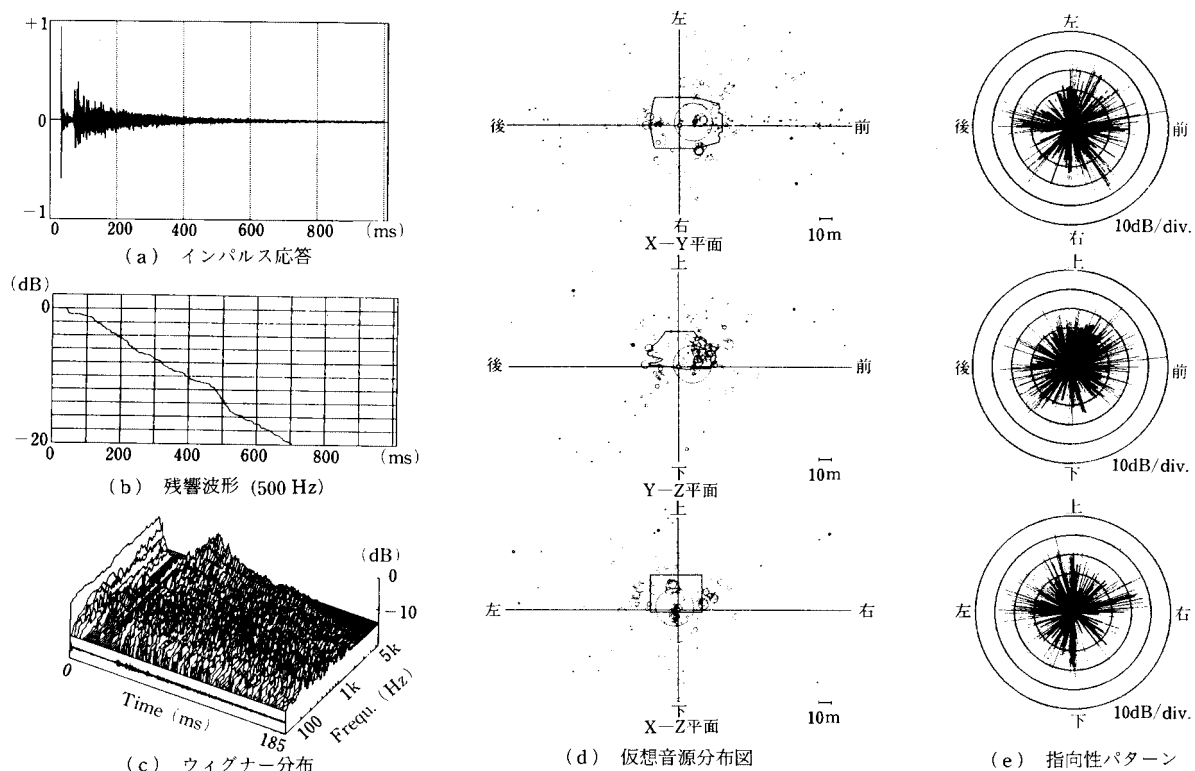
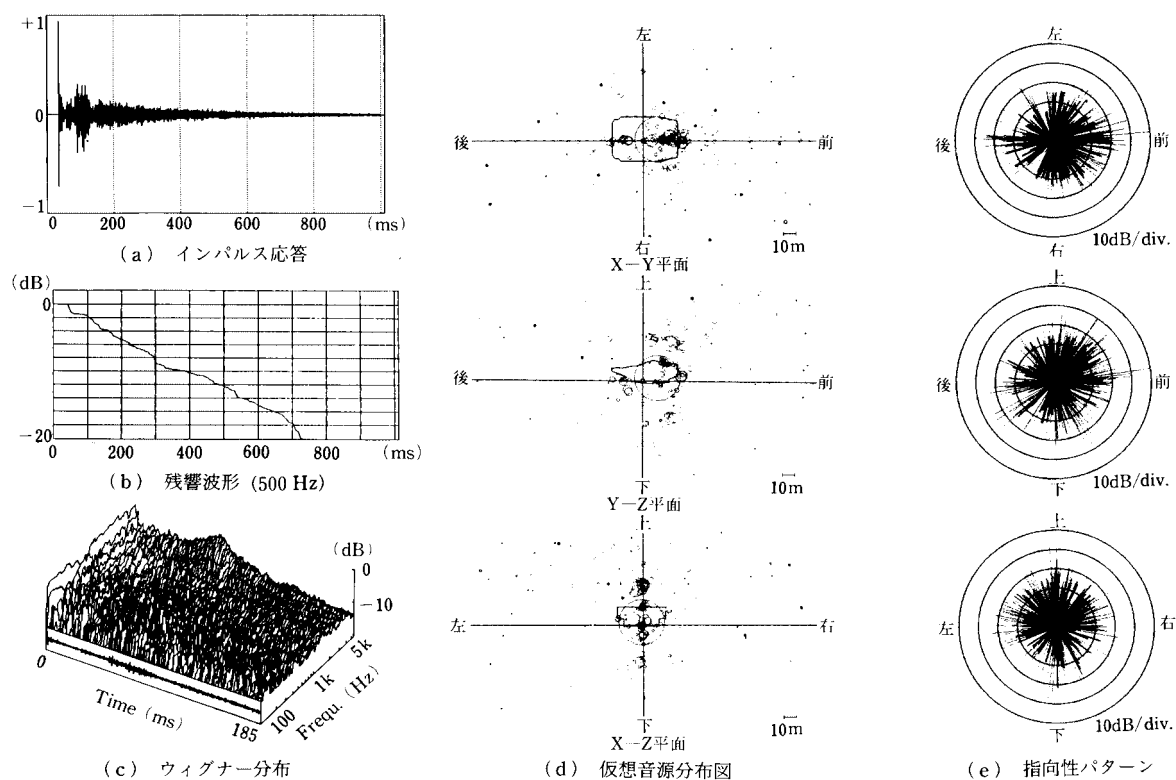


図4 コンサートホールの測定結果 (その1)



容積：17,800m³，席数：1702 席，残響時間：空席時 2.5s；満席時 2.0s
 (3) ザ・シンフォニーホール（大阪，1982）



容積：21,000m³，席数：2,006 席，残響時間：空席時 2.6s；満席時 2.1s
 (4) サントリーホール（東京，1986）

図4 コンサートホールの測定結果（その2）