

車室内音場制御と音場解析

Sound Field Control and Analysis in a Car Compartment

長 野 武⁽¹⁾ 本 島 顕⁽²⁾ 平 野 敏 弘⁽³⁾
Takeshi Chono Akira Motojima Toshihiro Hirano

要 旨

オーディオ再生の究極の目的に、演奏会場でしか体験することができない「臨場感」の再生がある。当社では、従来の車室内ステレオ再生に、反射音を付加して「臨場感」を得ることを試みた。

当社の音場制御方式は、ソースの持つ音楽性を保存すること、前方定位を基本とすること、反射音の到来方向を実際の音場に一致させる等をコンセプトに掲げ開発を進めた。

本稿では、臨場感溢れる音場空間を車室内で創成するための方式について述べる。またその効果を定量的に把握するための測定評価手段についても紹介する。

One of the final purposes of audio playback is a reproduction of "presence" which a listener cannot experience except in a place of performing music. Our company had been trying to get "presence" in a car compartment by the addition of reflective sounds to ordinary stereophonic.

We have developed a sound field control algorithm which design concepts are to keep characteristics of music source, to be front localization basically, and to let incident directions of reflective sounds coincide real sound fields.

This paper describes an algorithm for generating sound field which has good presence in a car compartment, and introducing a method of measurement and evaluation for quantitatively grasping its effect.

1. ま え が き

自動車の車内は一般に特殊な音場と考えられる。すなわち、聴取位置がスピーカから等距離でない左右非対称なレイアウトであり、さらに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。

その結果、ステレオ感のない音、広がり感のない音になってしまう。

当社では、このような車室内音場を改善し、リスナに生演奏の音楽性、臨場感を与えるための音場制御方式の検討を行ってきた。本方式を用いることで、あらゆる車室内において様々な音場をシミュレートすることができるようになった。本稿では、車室内音場制御を行う上での当社のコンセプト、方式、またこのような音場を評価するための測定方法等について述べる。

2. 車室内とホールの音場の違いについて

音場 (SOUND FIELD) とは、音波の存在する空間を意味する。我々が日常音を聴く時は、生の音と一緒にその音が存在する空間が作り出す「響き」を聴いている。この「響き」は、時には音楽に荘厳な艶や奥行きを与え、我々に心地よい臨場感をもたらす。

音場の違いは、その空間が持つ形状や容積と密接な関係がある。図-1、2にコンサートホールとインパルス応答の様子を、図-3、4にリスニングルームの様子を、図-5、6に車室内の様子を示す。また、これらの容積と残響時間を表-1に示す。

図-2、図-4、図-6の様に、各音場の響きの様子はインパルス応答に良く現れている。車室内の内容容積は 3 m^3 程で、平均自由行程が非常に短い。また、シート等の吸音体が多量に存在するため響きがほとんどない。また、直接音と初期反射音が



図-1 コンサートホール室内図

Fig. 1 Concert hall.

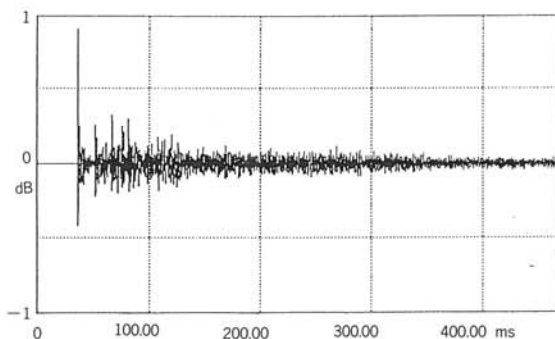


図-2 コンサートホールインパルス応答

Fig. 2 Impulse response a in concert hall.

近接して到来していることがわかる。この場合、反射音は、ホールの様に響きとは感じられずに、直接音の音質が変化した様に感じる。

一方、車載用のスピーカは取り付けの制約からフロントドアやインパネ両サイドに取り付けられることが多い。このため、サウンドステージは聴取者の前下方に広がってしまう。これを改善するためにリアトレイ等にスピーカを取り付けて、サウンドステージを引き上げることが一般的に行われる。しかし、リア席の聴取者にとっては後頭部付近から大きな直接音を聴くことになり不快感を伴う。

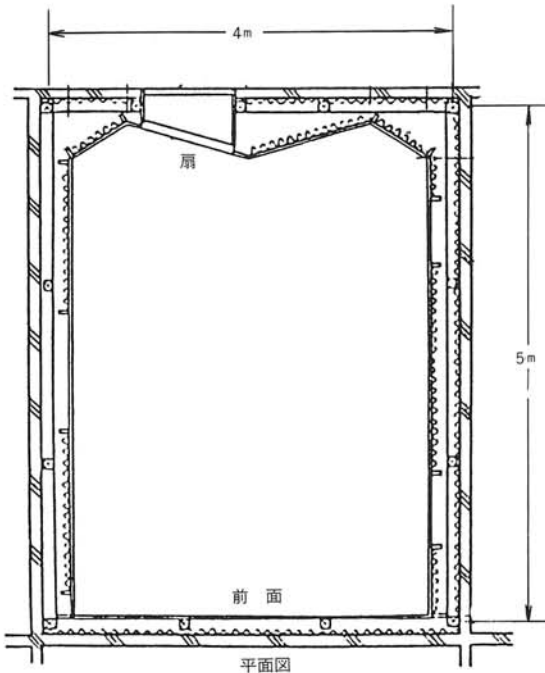


図-3 リスニングルーム室内図

Fig. 3 A Listening Room.

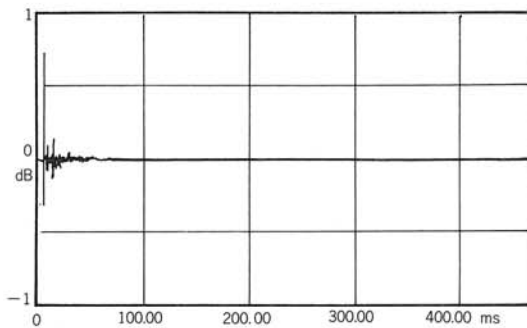


図-4 リスニングルームのインパルス応答例

Fig. 4 Impulse response in a listening room.

3. 音場制御方式

音場制御を行う上での当社のコンセプトは次の通りである。

- ① 従来の車室内再生では得られなかった「臨場感」、「奥行き感」を与える。

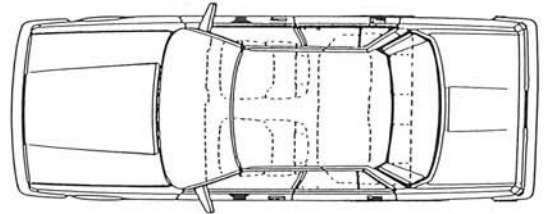


図-5 車室内図

Fig. 5 A car compartment.

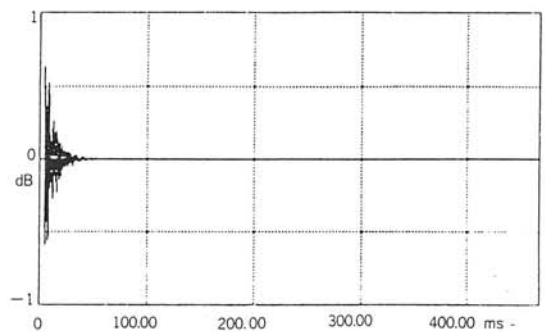


図-6 車室内インパルス応答

Fig. 6 Impulse response in a car compartment.

- ② ソースの持つ音楽性を大切にし、ステレオ信号本来の音質を保つ。
- ③ 前方定位とする。
- ④ 実際の演奏会場のように、初期反射音、残響音の到来方向を考慮する。

表-1 部屋容積と残響時間との関係

	車室内	試聴室	ホール
容 積	約 3 m ³	約 100 m ³	約 15,000 m ³
収容人員	5 人	約 10 人	約 2,000 人
残響時間 (500 Hz)	約 0.04 秒	約 0.3 秒	約 1.6 秒



図-7 測定風景

Fig. 7 Measurement.

⑤ すべての音楽ソースに対応するため、複数の音場パターンを設け、それぞれユーザが可変可能とする。

当社では、実際のコンサートホールを用いて

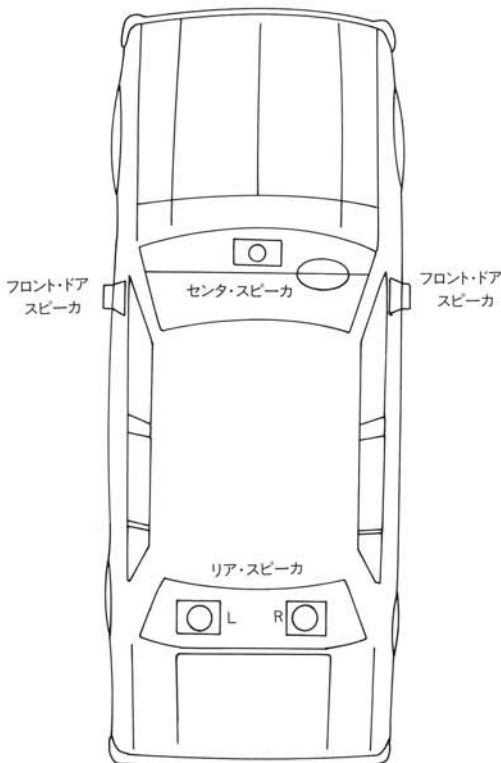


図-8 車室内スピーカーレイアウト

Fig. 8 Layout of loud speakers in a car.

表-2 出力音の構成

出力スピーカー	出力音
フロントドアスピーカー	ステレオ信号
センタスピーカー	モノラル信号+残響音 +初期反射音
リアスピーカー	3D低音 + 残響音

の試聴、検討（図-7）を繰り返し「音場制御」方式開発の参考とした。

図-8に反射音付加による音場制御のスピーカーレイアウトの一例を示す。スピーカーはフロントドア、リアトレイ、そしてインパネ中央上向きに取り付けた。デジタル信号処理により生成した反射音は表-2のように出力される。

車室内でコンサートホールのような響き、広がり感を得ようとする場合、反射音の到来方向全てにスピーカーを取り付ければ良いが、車室内での実現性を考慮し、補助スピーカーはセンタスピーカー²⁾一つとした。このセンタスピーカーは前方定位の確保や、ステレオバランスの改善、初期反射音による臨場感の確保、そして残響音により前方の奥行き感を出す等を目的とした必要最小限のものである。

このスピーカーレイアウトにより、まず前方目の高さから直接音が聞こえる。同じく前方より直接音を追い掛ける様に初期反射音が、そして前後ほぼ同時に残響音に包みこまれ、臨場感を出すことができる。

³⁾ 近接4点法により測定した車室内での反射音の指向性分布図を以下に示す。図-9は従来の4スピーカーステレオ再生、図-10は本システムによる音場制御を施した5スピーカー再生での測定例である。車は2,000ccの4ドアセダンで、運転席での測定例である。通常再生の時、聴取者（運転席）に近い、右前方のスピーカー及び音圧の高いリアスピーカーに偏った分布を示し、左右非対称となってい

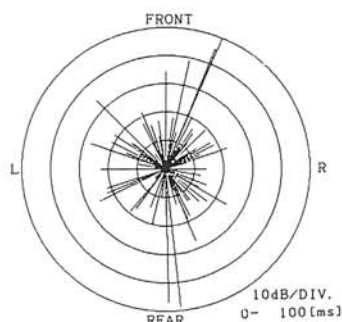


図-9 指向性分布図（4スピーカー：ステレオ再生）

Fig. 9 Directivity pattern (4 speakers: Stereo reproduction).

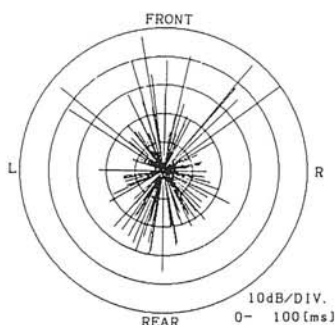


図-10 指向性分布図（5スピーカー：音場制御）

Fig. 10 Directivity pattern (5 speakers: Sound field control).

る。一方、制御を加えた結果では、反射音が多方向から到来している様子がわかる。また、センタースピーカによる前方バランスの改善効果がよく認められる。

車形の違いについては他に、1,300cc, 1,600cc, 3,000ccと数種類の車で検討を行い、音場信号のレベルを可変させることでほぼ同等な効果を得ることができた。車形による効果の差はほとんどなくむしろ直接音を再生するスピーカの実力や、指向性に大きく左右される。

4. デジタル信号処理概要

当社では、ホール等の建築音響特性に目を向け初期反射音や残響音の発生機構について様々な検

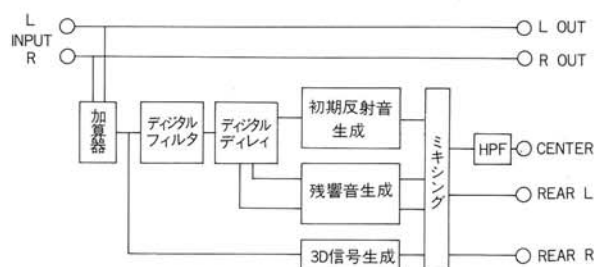


図-11 音場制御信号処理ブロック

Fig. 11 Block diagram of digital signal processing.

4) 討を重ねてきた。これらの結果や再生技術の検討より、車室内で最も効果的に音場制御を行うことができるシステムを開発した。図-11に信号処理ブロックを示す。メインプロセッサは当社オリジナルDSP (FT8800) を使用している。特徴としては、高品質、高精度なデジタル・ディレイ、初期反射音（低次）のたたみこみ演算、残響音生成、各種フィルタ処理、ミキシング等を高速浮動小数点演算器を用いて、リアルタイム積和演算することができる。

音場空間での反射音の生成過程は、放射された音が床、壁、天井などで複雑な反射減衰を繰り返して起こることが知られている。当社の音場制御もこの生成過程を忠実にたどることで処理している。図-12に示す様に、空間を伝播する音の遅延時間を複数に分割して考え、実際の音場空間の持つ音響特性をパラメータとすることでコンサートホールからライブハウス、スタジアム等自然な音場をシミュレート可能である。そして生演奏の持つ豊かなスケール感、繊細な響きを車室内で実現し、聴取者に音楽の持つ「臨場感」、「奥行き感」、「広がり感」を与える。

車室内音場制御では、待来⁵⁾のステレオ再生同様直接音の品質の高さがシステムの善し悪しを大きく左右する。これは、ソースの持つ音楽性を大切にすること、またあらゆるジャンルの音楽に対し

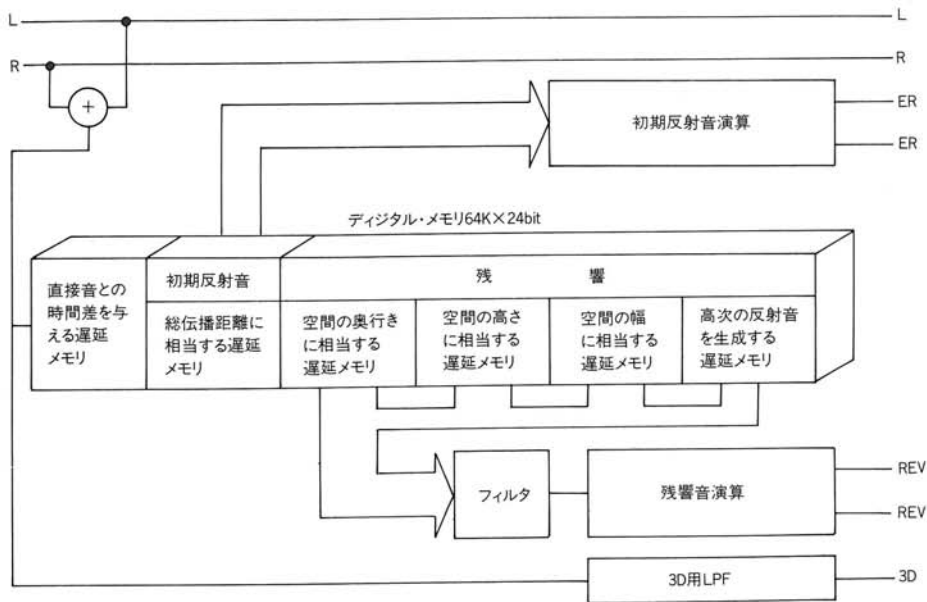


図-12 伝播音遅延時間のメモリへの配置図

Fig. 12 Memory allocation of delay time.

ても音場制御を施すことができる事などにつながり、忘れてはならない大切な姿勢であると当社では考えている。

5. 評価（近接4点法）方法

近接4点法とは、4本のマイクロホンのインパルス応答の時間応答の違いに着目して、受音点からみた等価的な反射音（仮想音源）の、空間座標と大きさを求める測定法であり、早稲田大学の理工学研究所で開発されたものである。当社も早稲田大学の山崎芳男先生の指導を受けて、車室内測定への応用を検討してきた。本章では、近接4点法の原理、測定例等について述べる。

5.1 原理

一般に、ある3点からの距離が決まれば空間内の2点が特定され、さらにこの3点とは別の平面上にある1点からの距離が決まれば空間内の1点を決定できる。そこで後処理を容易にするため図-13に示すように、原点と他の3点（マイクロホン設置場所）を直交座標軸上原点から等距離 d の点

に設定する。

自由音場に反射板1枚を設置した簡単な実験を例に説明する（図-14）。各受音点で収録したインパルス応答は図-15に示すように、その時間構造に僅かではあるが違いを生ずる。この時間差より各反射音に対応する仮想音源の座標 (X_n, Y_n, Z_n)

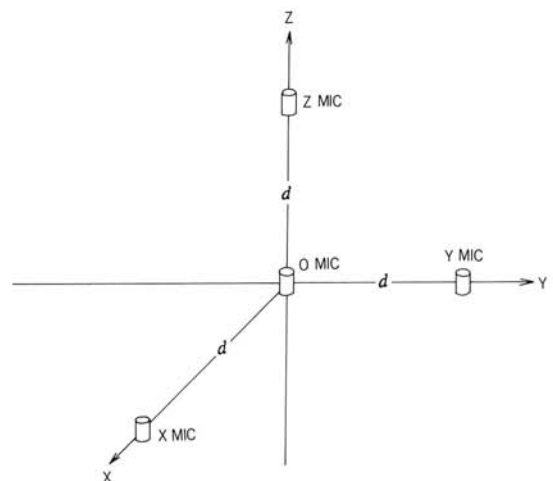


図-13 マイクロホンの配置

Fig. 13 Allocation of four microphones.

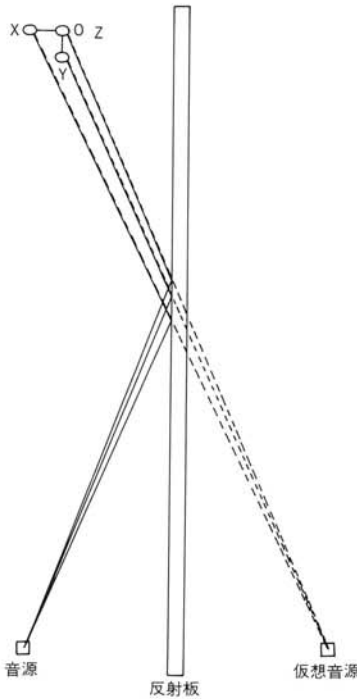


図-14 音源と仮想音源の関係

Fig. 14 Relation between sound source and image sound source.

を求めると

$$Xn = (d^2 + r_{on}^2 - r_{xn}^2) / 2d$$

$$Yn = (d^2 + r_{on}^2 - r_{yn}^2) / 2d$$

$$Zn = (d^2 + r_{on}^2 - r_{zn}^2) / 2d$$

(1)

$$r_{on} = c \cdot t_{on}$$

$$r_{xn} = c \cdot t_{xn}$$

$$r_{yn} = c \cdot t_{yn}$$

$$r_{zn} = c \cdot t_{zn} \quad c: \text{音速}$$

と決定される。

ところで、一般にインパルス応答は図-15に示すような単純な形とはならず、直接音にはスピーカやマイクロホン特性が、反射音には反射面の反射特性がたたみ込まれて波形がなまってしまう。そこで現実のインパルス応答の分析にあたっては

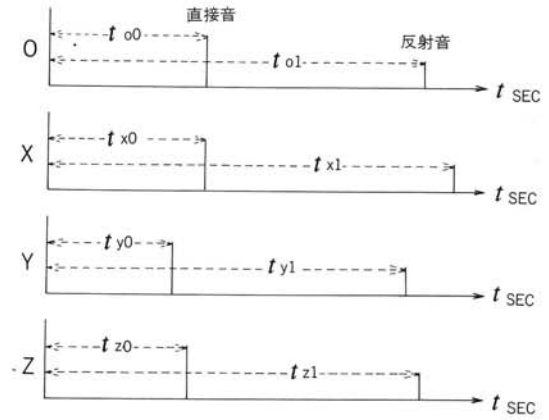


図-15 4点のインパルス応答

Fig. 15 Impulse responses of four points.

短時間相互相関係数を用いて同一反射音を決定する。

仮想音源の座標決定の手順を以下に示す。

- (1) 原点マイクロホンのインパルス応答から適切な窓により、着目する反射音を基準波形として切り出す。
- (2) 切り出された基準波形とXマイクロホンの応答の相互相関係数をマイクロホン間隔で拘束される範囲にわたり求め、極大となる時間差から反射音の到来時間を決定する。
- (3) 同様の操作を別の反射音、さらに、Y、Zマイクロホンについて行う。
- (4) (1)式に従って着目する反射音の仮想音源の座標、切り出した波形と相互相関係数によって仮想音源の空間的な大きさと強さを決定する。

5.2 測定システム

図-16に近接4点法の測定ブロックを示す。インパルス音は、単位標本パルスをD/A変換したものをスピーカ（コンサートホール等の測定では音源として対向させた同相駆動のスピーカを用いている）より再生する。4本のマイクロホンに入るインパルス応答は、測定時のS/N比に応じて同期加算して測定する。

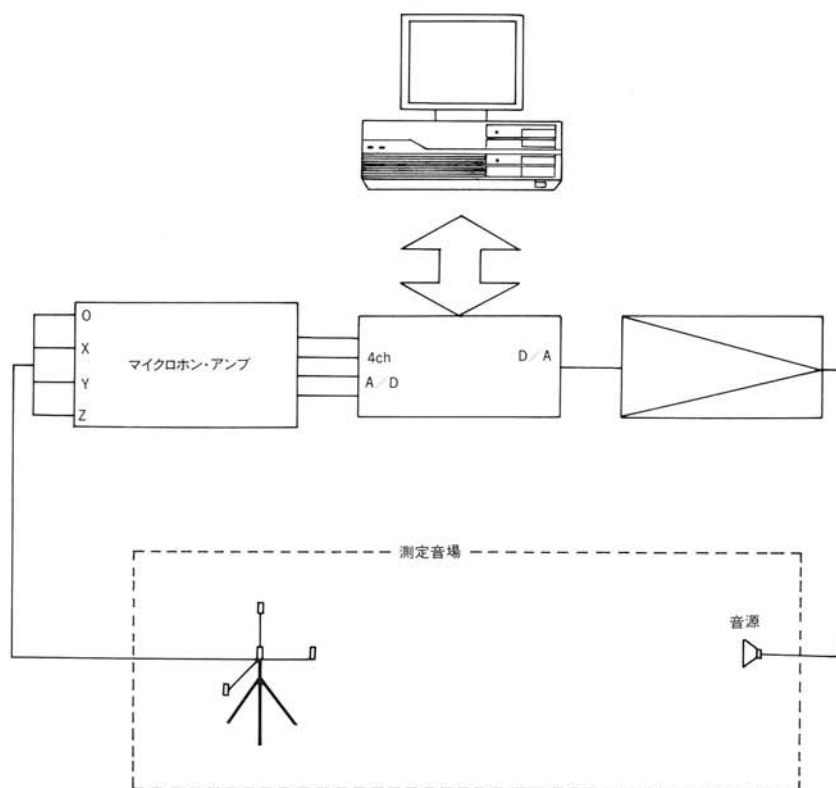


図-16 測定ブロック図

Fig. 16 Block diagram of measuring.

5.3 測定例

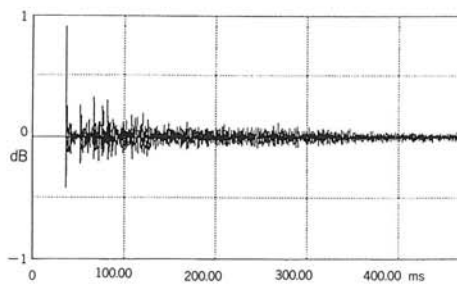
図-17, 図-18に実際のホールでの測定結果（インパルス応答、仮想音源分布図、指向性パターン）を示す。マイクロホンの設定は、正面舞台方向をY軸とした。仮想音源分布図では各円の中心が仮想音源の座標を、半径がパワーを表す。また図中の□は受音点、右下のスケールは10mを示す。

次に指向性パターンであるが、これは表示面と垂直方向の開き角 ± 45 度内に入射する仮想音源のパワーを表示面に投影し、この大きさを線分の長さで示したものである。

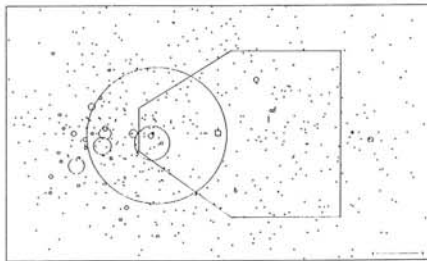
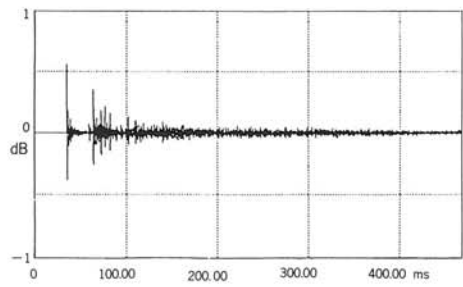
5.4 狭空間測定用インパルス音源

車室内で近接4点法の測定を行う場合には、音源（スピーカ）の取付状態が問題となる。車室内のスピーカ取り付け位置では、普通バッフル面の剛性が不足していることが多く、面の振動等で過

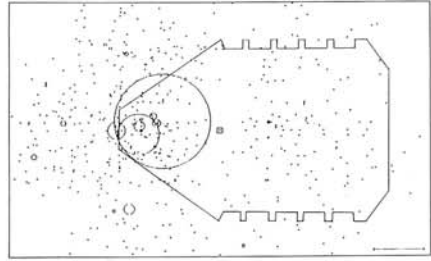
渡特性が悪くなる。車室内のような小空間では直接音と反射音の到達時間差が非常に短いために、過渡特性の悪い音源を用いると反射音の区別が困難となる場合がある。そこで現在、放電インパルス音源を検討している。この音源は、「微小火花放電音源⁶⁾」と呼ばれ、コンデンサに充電した電気エネルギーを電極間隙内に放電させ、間隙の空気を熱膨張させてインパルス音を発生させるものである（図-19）。放電インパルス音源は、スピーカユニットのように機械振動を伴っていないため、車室内に取りつけた場合でもパルス幅が短く、過渡特性に優れたインパルス音を得られる。図-20に現在開発中の音源の外観を示す。これはスピーカユニットと取り替えて使用できるようになっており、同軸型と呼ばれる⁷⁾。



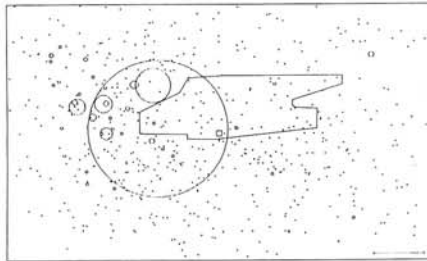
インパルス
応答



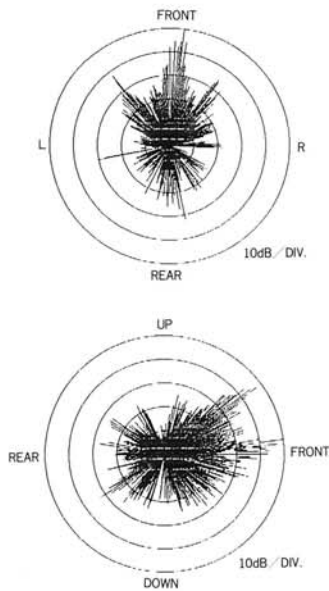
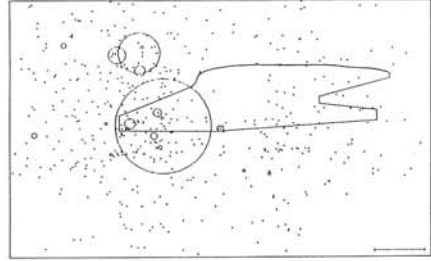
(ホール上から)



仮想音源分布図

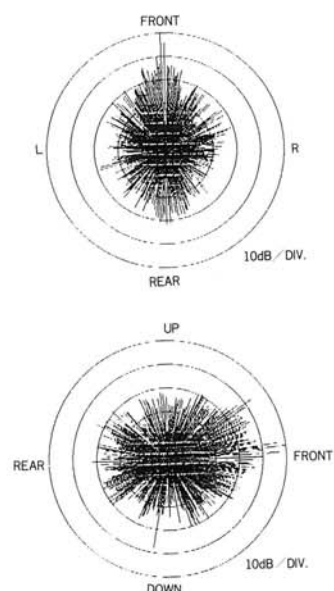


(ホール横から)



X-Y

指向性パターン



Y-Z

図-17 測定例 (ホールA)

Fig. 17 Measured results of A concert hall.

図-18 測定例 (ホールB)

Fig. 18 Measured results of B concert hall.

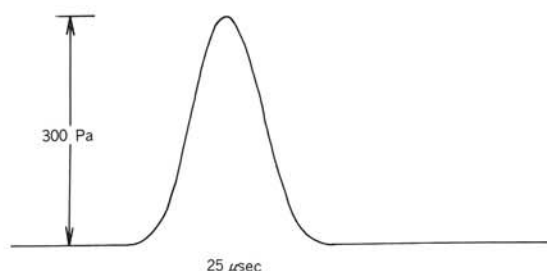


図-19 音圧波形

Fig. 19 Sound waveform.



図-20 同軸型の外観

Fig. 20 Exterior view of coaxial type.

6. あとがき

車室内においてインパネ上向きに設置した補助スピーカと、リアスピーカに反射音を加えることで、臨場感のある音を得られる音場制御システムを紹介した。反射音付加による音場制御は、狭い車室内での音楽聴取に最適な手法として、主流になって行くものと考えている。今後、狭空間での反射音測定方法の研究をすすめ、さらに効果の高い音場制御方式を開発していきたい。

参考文献

- 1) 長野、富田、海上、*汎用信号処理LSI (F DSP-3) を用いた残響付加方式の一検討*; 電子通信学会全国講論集371, (1985. 11)
- 2) 本島、長野、高島、伊藤、*デジタル信号処理を用いた車室内音場制御の検討*; 電子情報通信学会全国講論集A-175, (1989. 3)
- 3) 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*; 建築音研資料A A85-21, (1985. 7)
- 4) T. Chono et al., "Sound Field Control in a Car Compartment," SAE880235, (Feb. 1988)
- 5) M. R. Schroeder, "Natural Sounding Artificial Reverberation"; J. Audio Eng. Soc., VOL. 10, 1962, P219-223
- 6) 山下、大谷、卜部、*衝撃放電によって生ずるインパルス音波の波形について*; 日本音響学会講論集1-2-11, (1975. 10)
- 7) 木下、大谷、*同軸放電電極を用いたインパルス音源*; 日本音響学会講論集3-8-1, (1985. 10)