

# 大空間の音場予測に関する研究

渡辺 充敏 平野 滋

## Study on Prediction Method for Sound Field of Large-Volume Space

Mitsutoshi Watanabe Shigeru Hirano

### Abstract

In acoustic design of a large-volume space like an air dome, prediction of reverberation time and clearness are important. However, the room acoustics of a large-volume space is not generally diffusive. So, the conventional method predicated on diffusive acoustics results in large errors and is not practical. This paper describes the development of a prediction method for reverberation time and clearness of the large-volume space which calculates evaluation parameters from impulse responses by a new sound ray tracing method using random numbers, and which include 3-dimension directional characteristics of speakers. This method makes possible calculation with data 1/100 of what have been used in the conventional sound ray tracing method and in much shorter time. Calculated and measured results in an air dome model showed a significant agreement in shapes of impulse responses, reverberation times, and clearness.

### 概 要

大空間の音響設計では、残響時間、明瞭度の予測が重要となる。しかし、大空間では、一般に拡散音場が得られにくく、拡散音場を前提とした残響式では、誤差が大きくなり実用的でなかった。そこで、今回開発した、乱数を用いた音線法により、インパルス応答を計算し、その減衰過程から残響時間の算定を行なった。この手法により、従来の同様な手法に比べ1/100程度のデータ量で計算可能となり、計算時間も大幅に短縮することができた。また、大空間では、一般に拡声装置の使用が前提となっており、これまでの無指向性音源を用いた予測計算では、実際との対応が得られない。そこで、大空間に用いられるスピーカの3次元指向特性を音線法に組み込んだ明瞭度の予測手法の開発を行なった。これらの手法を用い、当技術研究所の空気膜実験ドームにおいて予測計算を行なったところ、実測値とのよい対応を得ることができた。

## 1. はじめに

近年、ドームのような大空間建築物が建設され、多目的に使われている。このような容積の大きな空間では、吸音材を多く設置して響きを抑え、騒音の低減を図る必要があるが、室内の片寄った部位にしか吸音材を設置できないことが多い。こうした状態では、十分な拡散音場が得られないため、一般のホールの残響時間の計算に用いている拡散音場を前提とした残響式では誤差が大きくなり実用的ではなかった。また、大空間では一般に拡声装置の使用が前提となっているが、場内アナウンス、また非常の際の避難誘導が室内の各所で明瞭に聴こえる必要があり、拡声装置を用いた際の明瞭度の検討が重要になる。

拡散音場が得られない空間の残響時間を予測する手法として、音線法シミュレーションによるインパルス応答から求まる減衰曲線を用いる手法<sup>1)</sup>が知られているが、空間が大きくなるほど、インパルス応答の算出が困難に

なるため、その適用範囲は限られていた。そこで今回、音線法を大空間にも適用できるように改良を行なった。

大空間に用いられるスピーカは、有害な反射音の発生を防ぎ明瞭度を得るために強い指向特性を持つものが使われている。予測計算を行なう場合、一般に音源は無指向性とするが、ここでは実際に大空間に用いられるスピーカの3次元指向特性を前述の音線法に組み込んだ明瞭度の予測手法を開発した。

## 2. 大空間における残響時間の予測

拡散音場の得られにくい大空間において、音線法により音の伝搬の様子を直接追跡し、インパルス応答を求め、その減衰過程から残響時間を算出する手法をとった。

音線法とは、音の波頭を細かく分割し、それぞれの軌跡を幾何学的に追跡することにより、室内の応答を求める手法である。波頭の軌跡を、音源と反射点、または反射点と反射点を結ぶ直線で表せることから、音線法と呼ばれている。

2.1 従来の音線法によるインパルス応答の計算

従来の音線法の中に、音線の反射点によって境界面上の積分範囲を定め、各反射点から受音点へのポテンシャルの積分を行なうことで、インパルス応答を求める手法がある<sup>2)</sup>。原理式を式(1)に示す。

$$\phi_p = \frac{1}{2\pi C} \iint_{S_a} \frac{\sigma}{r_{or}} U_{sa} \cdot \frac{\cos(\vec{r}_o, \vec{n}) - \cos(\vec{r}, \vec{n})}{2} dS_a \dots\dots\dots(1)$$

- $\phi_p$  : 受音点でのポテンシャル
- $U_{sa}$  : 音源のポテンシャル
- $\vec{r}_o$  : 入射音線の方向ベクトル
- $\vec{r}$  : 反射音線の方向ベクトル
- $\vec{n}$  : 境界面の法線ベクトル
- $r_o$  : 音源から反射点までの距離
- $r$  : 反射点から受音点までの距離
- $C$  : 音速
- $S_a$  : 積分範囲

この手法は、音線を境界面を分割するためのガイドとして用いるため、音線本数が精度に大きく影響する。精度よく計算を行なうためには、音線同士の距離が境界面上において、解析周波数の波長の1/4以下である必要があると言われている。

放射された音線は、その追跡時間が長くなるに従いお互いの距離が離れるため、長時間のインパルス応答を計算しようとする、放射する音線の本数を増やす必要がある。このため、長時間のインパルス応答が必要な大空間に適用すると、音線の数は膨大となり、計算時間、データ量の両面で実用的ではなかった。

2.2 乱数を用いた音線法によるインパルス応答の計算

従来の手法では、音線の追跡にほとんどの計算時間とデータ量を費やしており、大空間での計算に対応するためには、少ない音線本数で残響時間の算定に必要な精度を確保する工夫が必要となる。本手法は、反射点から受音点へのポテンシャルを積分していく過程については、従来と同様であるが、境界面上において音線と音線の間に乱数を用いて新たに反射点を発生させることで、従来の1/100程度の音線本数での計算を可能としている。

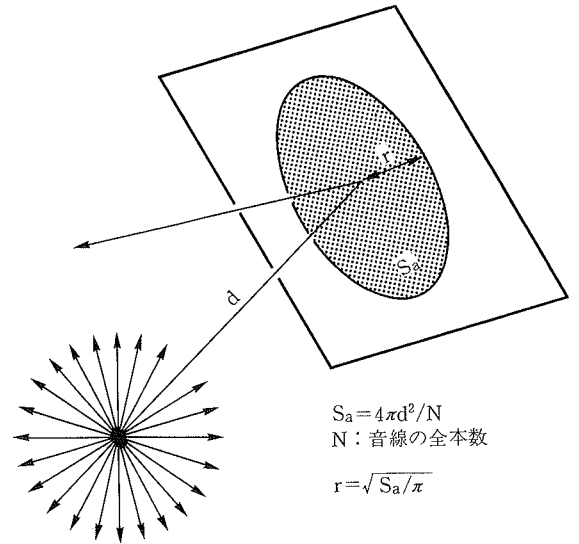
実際の計算は、2つの部分からなる。

まず、音線を式(2)によって決まる本数だけ等立体角に放射し、反射点の座標、どの境界面で反射したか、などのデータを保存する。現在、音線の追跡は、反射回数で制限しており、50回反射まで追跡可能である。

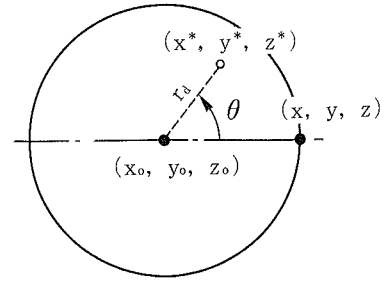
$$N = 4\pi(ct_a)^2 / \pi(4\theta_c/f_a)^2 \dots\dots\dots(2)$$

- $N$  : 総音線数     $C$  : 音速
- $t_a$  : 観測時間     $f_a$  : 解析周波数

次に、音線の軌跡のデータをガイドとして、実際にインパルス応答を求めるための計算を行なう。1本の音線が代表する波面の面積は、伝搬距離を半径とする球の表面積を全放射音線数で割ったものである。これを境界面上に積分を行なうべき面積として投影する際に、乱数に



図一 境界面上の積分範囲

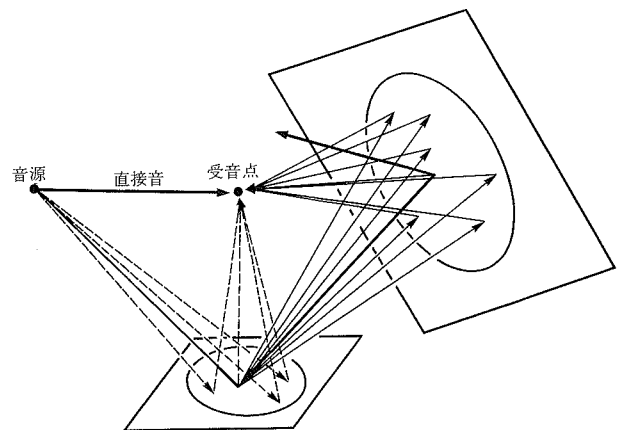


$$r_d = r \cdot RND_0$$

$$\theta = 2\pi \cdot RND_1$$

$$0 < RND_0, RND_1 < 1$$

図二 乱数による反射点の発生



図三 乱数により発生させた反射点からのインパルス応答の計算

による保管を容易にするため、図一に示すように、音線の反射点を中心とする円として表した。円は、1本の音線が代表する波面と同面積であり、反射点と同一平面上

にある。この円の半径を境界面上で隣り合う音線との距離とみなし、音線同士が式(1)を適用できる距離以上離れたとき、円内に乱数により新たに反射点を発生させる。

発生させる反射点は音線と音線の間にある必要があるから、図-2に示すように、円の中心より半径以内の点を、円の存在する平面の法線ベクトルに平行でかつ中心を通る軸の回りに $2\pi$ 以内で回転させ、必ず円内に納まるようにした。この際、中心からの距離と回転角を最大値が1以下の2種類の乱数により自動的に決定させることで、ある点が平面上にあるか否かの判定を不要にし、計算時間の短縮を図った。

このように、新たに発生させた反射点が代表する境界面から受音点へのポテンシャルを時系列上に積分し、インパルス応答を求めることは、図-3に示すように現在計算対象としている反射点の1つ前の反射点を音源として、境界面上の円の内部に向けてランダムに音線を放射しながら計算を行なうのに等しいと考えられる。

2.3 インパルス応答よりの残響時間の算出

残響時間を算出するために、インパルス応答より減衰曲線を求める。ある時刻 $t_0$ での減衰量は離散化したインパルス応答より、式(3)で求まる。

$$L_d = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i - \sum_{i=0}^{N-1-k} x_j}{\sum_{j=0}^{N-1} x_i} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

Ld : 時刻  $t_0$  での減衰量  $x$  : 時間サンプルを表すベクトル

N : サンプル数  $k$  : 時刻  $t_0$  までのサンプル数

計算を行なった全時間について減衰過程を追跡することで、減衰曲線を求め、その単位時間あたりの減衰量から、60 dB 減衰するまでの時間を算定し、残響時間を求めた。

3. 明瞭度の予測

明瞭度の予測は、残響時間と同様の乱数を用いた音線法から計算されるインパルス応答より、明瞭度を表す客観的な指標値を求めることを行なった。

大空間では、拡声装置の使用が前提となっており、そのスピーカは明瞭度を得るために、指向特性の強い定指向性ホーンスピーカが使われている。そのため、ホールなどのシミュレーションに用いる無指向性音源による計算では実際との対応が得られない。そこで、新しく本音線法に、実際に大空間に用いられるスピーカの3次元指向特性を組み込んだ。

3.1 STI 法について

明瞭度を表す客観的評価する手法として STI 法<sup>3)</sup> (Speech Transmission Index) 法を採用した。

この手法は、会話を理解する能力は、会話において発生する変動するリズムに関係する変調信号をどれだけ正確に聴取できるかによって決定される、という考えによるものである。最終的な明瞭度を表す指標である STI 値は、0 から 1 までの値で表され、値が大きくなるほど明瞭度が良いことを示す。

この指標は、100%強度変調された信号が聴取者の位置において、どれだけ変調の度合いが減少するか (変調度伝達関数: Modulation Transfer Function) に、言語によって異なる音声周波数帯域の重み付けを加えることによって求められる。残響、エコー、騒音の妨害を受けることによって得られる値は小さくなる。STI 法の概念図を図-4に示し、日本語による STI 値<sup>3)</sup>算出のためのパラメータを表-1に示す。

STI 値は、変調信号を前提としているが、インパルス応答からも算出可能<sup>4)</sup>である。STI 値算出のもとになる変調度伝達関数 (MTF) とインパルス応答の関係を式(4)に示す。

$$m(F) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi F t} dt \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} \dots\dots\dots(4)$$

$m(F)$  : 変調度伝達関数 (MTF)

$h(t)$  : インパルス応答

3.2 スピーカの3次元指向特性

大空間では、定指向性ホーンスピーカと呼ばれる、指向特性が制御されたスピーカが多く用いられる。これら

表-1 日本語 STI 値算出のためのパラメータ

変調周波数	0.63~20Hz 1/3oct. STEP (16帯域)
音声周波数	500~4KHz 1/1oct. STEP (4帯域)
各音声周波数への重み付け	500Hz=.126 1,000Hz=.204 2,000Hz=.321 4,000Hz=.304

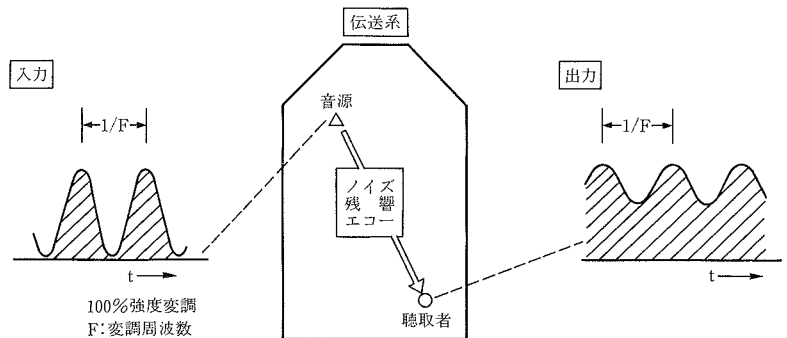


図-4 STI 法の概念図

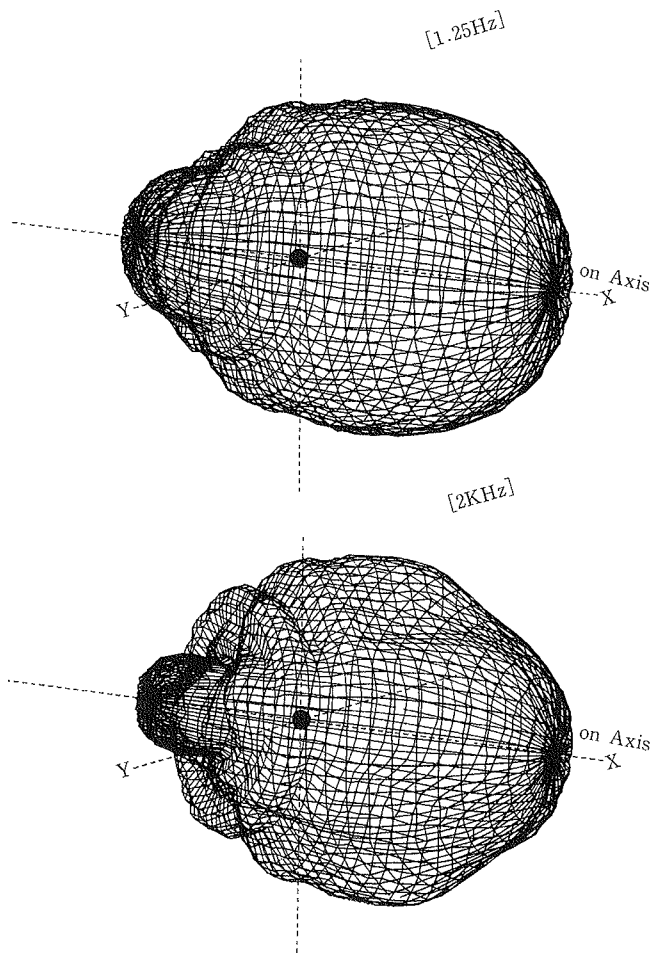


図-5 定指向性ホーンスピーカの3次元指向特性

のスピーカの100 Hzから10 KHzまで1/3オクターブごとの3次元指向特性の測定を無響室で行なった。

座標系に、スピーカの振動板位置、または取り付け位置を原点とした極座標を用い、水平・垂直とも5°おきのデータで表し、これを予測計算ソフトに組み込んだ。

3次元指向特性のデータ例を図-5に示す。極座標で表しているため、原点から引いた直線の長さが、その方向への出力レベルを表しており、音源からある方向に放射される音線との対応が容易に読み取れる。データとデータの間方向へは、必要に応じて直線補完を行ない、得られた値を用いている。

図-5を見ると定指向性ホーンスピーカの軸方向の指向性がよく制御されている様子、また指向特性が周波数によって変化するの分かる。

#### 4. 本手法による予測結果と実測値との対応

当技研の空気膜実験ドームを対象として、実際に聴衆が着席し、吸音力が増したときを想定し、スピーカの直接音が入射する床面にグラスウールを敷きつめた状態において、解析周波数4 KHz、追跡時間1.3秒とし、音線本数約70,000本で計算を行なった。

音源のセッティング、受音点位置およびドーム諸元を図-6に示す。

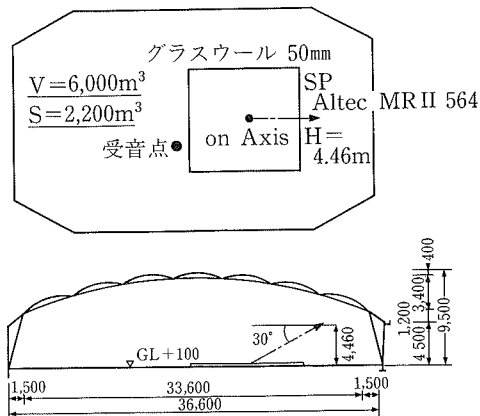


図-6 音源・受音点位置およびドーム諸元

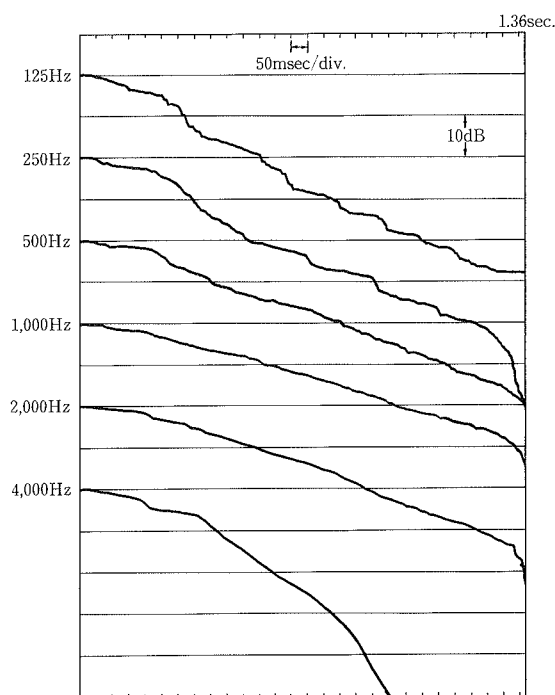


図-7 予測計算による減衰曲線

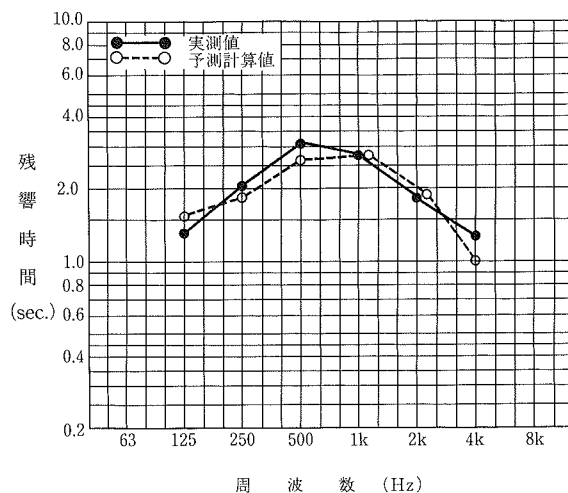


図-8 予測計算および実測値による残響時間の予測

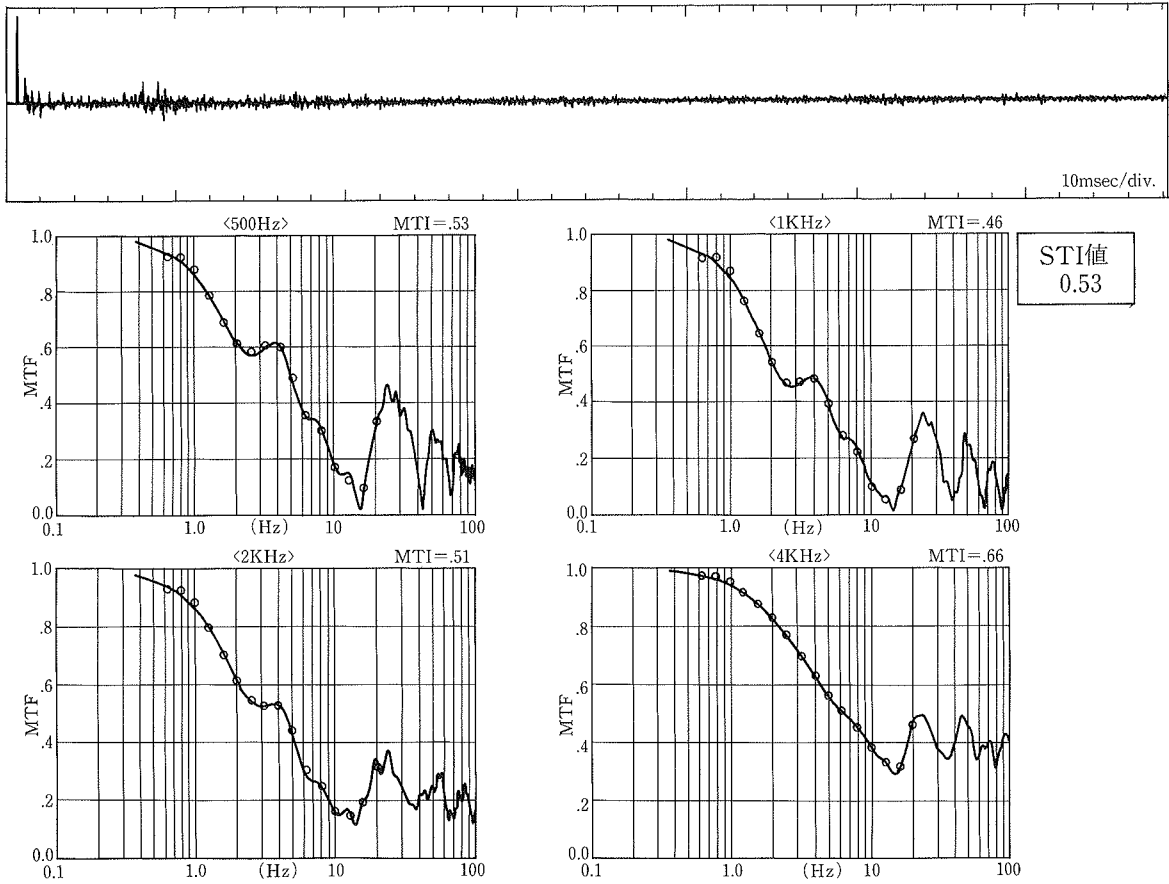


図-9 予測計算によるインパルス応答およびSTI値

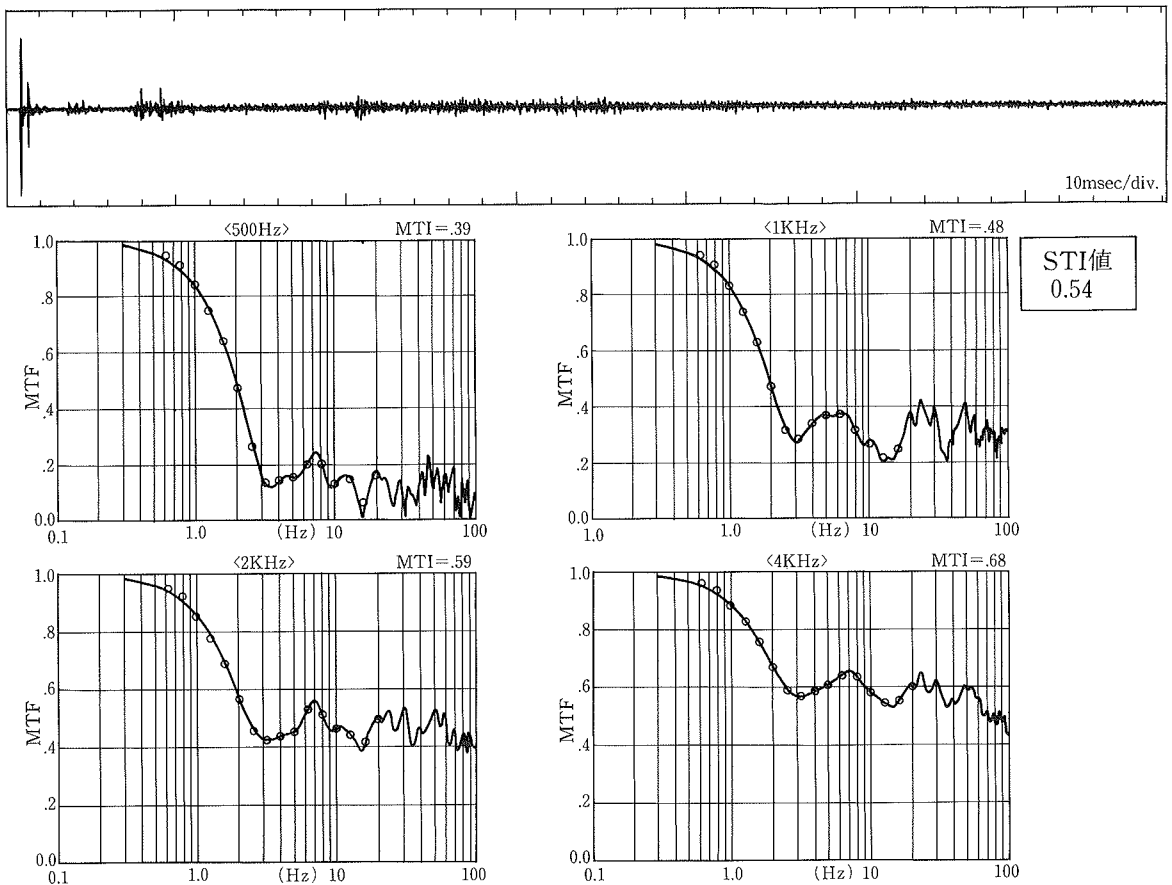


図-10 実測によるインパルス応答およびSTI値

#### 4.1 残響時間

予測計算により求められた減衰曲線を図-7に示す。この曲線の単位時間あたりの減衰量から、算定した残響時間を、実測値と合わせて図-8に示す。

予測計算による残響時間は、500 Hz, 1 KHz 付近が最も長く3秒弱なり、低周波数域および高周波数域に向かって急激に短くなっている。これは、低周波数域は、幕による振動により、高周波数域は、グラスウールおよび空気により吸音されたためと考えられる。

実測値においても同様の結果が得られ、500 Hz 付近が3秒程度の山型の周波数特性となっている。

予測計算値と実測値との対応を見ると、0.3秒程度の誤差で良く一致しており、十分実用的である。

#### 4.2 明瞭度

インパルス応答の初期部分の拡大、インパルス応答より求めた各音声周波数ごとの変調度伝達関数 (MTF) の周波数特性、および日本語 STI 値を図-9に示す。

MTF は、その値が1に近いほど、変調信号が聴取者の位置まで保存され、音声の伝送が良好に行なわれていることを示しており、ある音声周波数を代表する値は、表-4に示したパラメータに示した1/3オクターブごとの値の平均により、平均強度として表される。1/3オクターブごとの値を図中に周波数特性に重ねて丸印で示した。

それぞれの平均強度に、日本語の重み付けを加え、合計したものが最終的な日本語 STI 値である。

図-9に示すインパルス応答を見ると、50 msec 付近以外に、目立った反射音が見られないが、これは、直接音が入射する部分に敷きつめたグラスウールにより、最初に強い音が吸音されたためと思われる。

インパルス応答から算出した各音声周波数についての MTF の周波数特性は、500 Hz から周波数が高くなるに従い上昇している。日本語 STI 値は、0.53となった。

実測値を、図-10に示す。

インパルス応答を予測計算結果と比較すると、50 msec 付近の反射音の様子など、良く対応している。MTF では、低周波数域で食い違いが見られるが、日本語 STI 値は、低周波数域の重み付けが低いため0.53と近い値となっている。

### 5. スピーカのカバーエリア

大空間のアナウンスの明瞭度を得るための電気音響設計において、スピーカの配置の検討が重要である。スピーカの配置は、その指向特性による客席でのカバーエリアが基本であり、先に得たスピーカの3次元指向特性を用いて、任意の客席形状にカバーエリア（音圧の低下が3 dB, 6 dB または 9 dB の範囲）を図示するシステムを開発したので、図-11にカバーエリア（3 dB の範囲）による検討例を示す。

●スピーカ位置

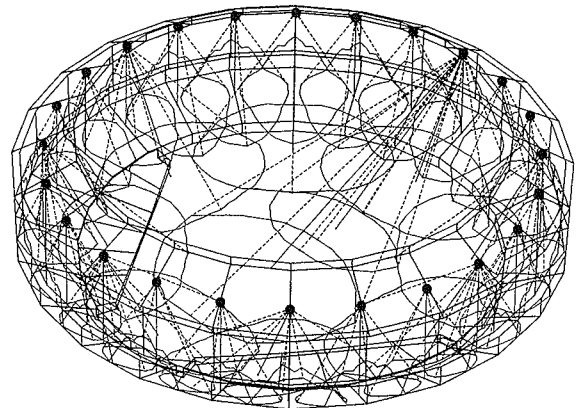


図-11 ドームでのカバーエリアによるスピーカ設置方法の検討

複雑な客席形状においても、カバーエリアを見ることにより、スピーカの設置位置や数の検討を、対話形式で容易に行なうことができる。

### 6. おわりに

大空間における残響時間、明瞭度の予測を実用的な範囲で行なうための予測手法の開発を行なった。本手法は、大空間における計算に対応できるように、改良した音線法により求めたインパルス応答より、残響時間、明瞭度の予測を行なっていることに特徴がある。インパルス応答は、空間の様々な情報を含んでおり、指標値によらず、波形そのものから読み取れるものが多くある。

本手法を用いて予測計算を行なったところ、従来の同様の手法に比べ、1/100程度のデータ量で予測が可能であり、計算時間も大幅に短縮できることができた。

また、空気膜実験ドームにおける予測計算結果は、実測値ともよい対応が得られたが、これからも機会ごとに本手法の検証を行なって行きたい。

#### 参考文献

- 1) 渡辺, 他: 吸音面が集中した空間の有限音線積分法による残響時間予測, 日本音響学会講演論文集, p.625~626, (1986. 10)
- 2) Sekiguchi et al: Approximation of impulse response through computer simulation based on finite ray integration, J. Acoust. Soc. Jpn. (E), Vol.6, No.2 p.103~115, (1985)
- 3) 小椋, 他: MTF と日本語の音節明瞭度, 日本音響学会建築音響委員会資料, AA84-19
- 4) M. R. Schroder: Modulation transfer function: definition and measurement, Acustica, Vol.49, p.179~182 (1981)