

膜構造物の音場について



渡辺 充敏* 坪井 政義*
平野 滋*

概 要

膜構造による大空間は、膜を透過してくる日光により明るく開放的な空間が得られる。しかし、音響の立場から見ると、膜の吸音率が小さいため音の響きすぎるによるアナウンスの明瞭度低下などの問題を生じ易い。また、響きを抑えるために吸音処理が壁面に片寄るため、十分な拡散音場が得られず、従来の拡散音場を前提とした予測手法では、誤差が大きくなり実用的ではなかった。本報告では、膜構造物の音場に対する音響的な対策と予測について述べ、その適用例について示す。

1. はじめに

膜構造物では、膜から透過してくる日光により、明るく開放的な半戸外とも言える大空間が得られる。近年、多雪地帯における冬季の活動の場として、さらにイベントの大型化から、大空間としての膜構造物の需要の増加が見られ、使用目的は野球等のスポーツ、展示会、講演会と様々である。

音響の面から見ると膜構造物は、大きな面積を占める膜自体の吸音率が小さく、そのままでは響きすぎによる明瞭度の低下、歓声などの内部発生音が大騒音になるなどの問題が生じるため、吸音対策は不可欠である。しかし、膜構造物に限らず大空間では、残響時間を短くするため吸音処理を行う際、吸音処理ができる部位に片寄りが生じ易い。そのような空間では、十分な拡散音場が得られにくく、従来の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、大空間では一般に強い指向特性を持つ拡声装置が使用されており、明瞭度の予測には、従来の無指向性音源にかわり、実際に大空間で用いられるスピーカの指向特性を予測計算に組み込む必要がある。

本報告では、膜構造物の音場の特徴、膜面への吸音対策の事例、および予測が難しかった大空間の残響時間、明瞭度の予測手法の開発、その適用例について述べる。

2. 膜構造物の音場

2.1 既存空間の残響時間

残響時間は、音場の性質を左右する重要な指標値である。図-1に示す残響時間の比較は、膜構造物だけではなく、また必ずしも十分な音響対策がなされたものばかりとは言えないが、一つの目安になると考える。

空間がある程度大きくなると、吸音処理をして残響時間を短くしようとして、やり過ぎという事はない。その意味で、膜構造物で全体の表面積で大きな面積を占める膜面の処理が重要となる。

2.2 膜の吸音率

膜構造物の音場を考えるに当たり、まず天井面全体の広い面積を占め、音場に与える影響の大きい膜自体の吸音率が問題となる。そこで、当社技術研究所内の空気膜実験棟において残響時間を測定し、測定結果か

*大林組技術研究所音響研究室

ら室内全体の吸音力を逆算し、膜以外の吸音力を差し引いた残りが膜の吸音力であるとして、膜の吸音率を算出した¹⁾。測定を行った空気膜実験棟の外観を写真-1に、平面図を図-2に、立面図および各部仕様を図-3に示す。

膜以外の吸音力は、吸音率データより算出したが、測定を行った空気膜実験棟は、床はアスファルトにアクリル系塗装 1.5mm、壁は押し出し成形セメント板 50mm で大きな吸音力となるものではなく、膜の吸音率は精度よく得られたものと思われる。膜については、一重のもの、二重にして間に空気を通したものがある。二重膜は、間に音風を通すことにより、結露対策、融雪対策が行え、さらに内側の膜には若干の通気性があるため、一重膜より大きな吸音率が期待できるが、今回測定を行った空気膜実験棟は一重膜である。

空気膜実験棟の残響時間の測定結果を図-4に、この残響時間から算出した膜の吸音率を図-5に示す。

図-4の残響時間周波数特性を見ると、630~1,250 Hzを頂上とした山形の特性となっており、ピークでは6秒程度となっている。

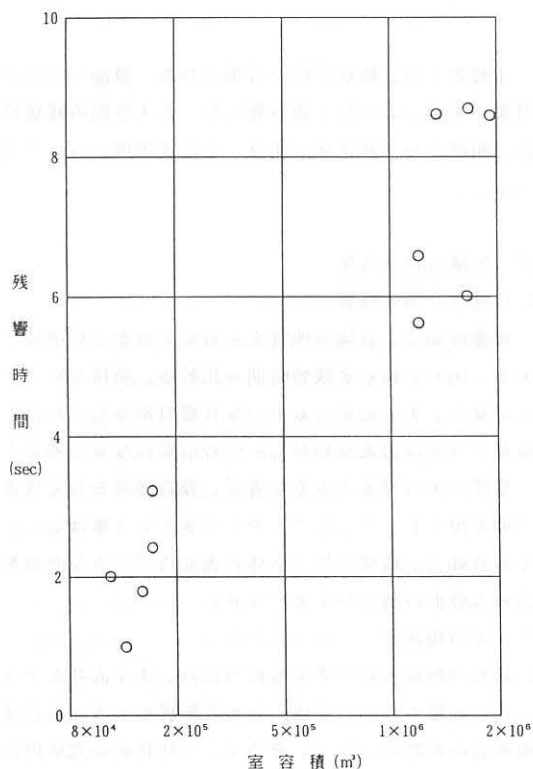


図-1 残響時間の比較



写真-1 空気膜実験棟外観

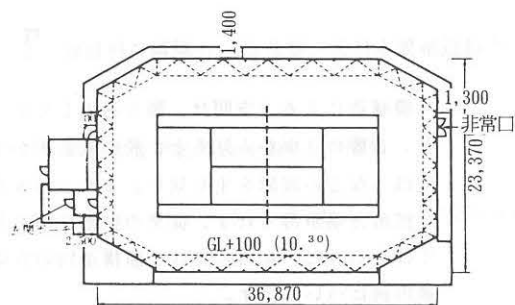


図-2 平面図



図-3 立面図

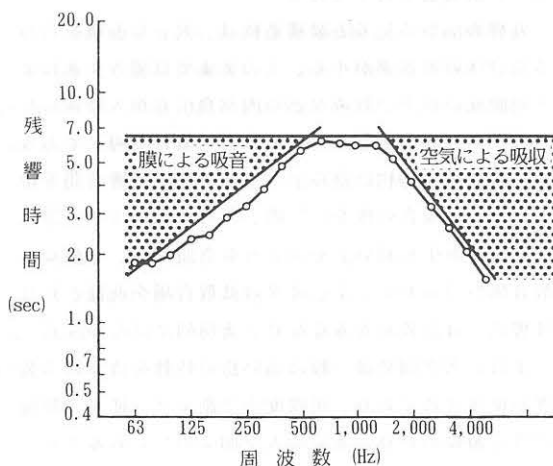


図-4 残響時間周波数特性

図-5 に示す残響時間から算出した膜の吸音率を見ると、低周波数域ほど吸音率が大きく、500Hz 以上の周波数域では10%程度の吸音率しかない。

測定を行った空気膜実験棟は、実験施設であるため音響的な配慮がされていないが、このような吸音対策をしていない膜構造物では、膜の振動による低周波数域の吸音と、空気吸収による高周波数域の吸音は期待できるが、500Hz～2,000Hz の周波数範囲の吸音がないため響きすぎ、6000m³程度の容積規模でもアナウンスなどの明瞭度に支障をきたす。

大規模膜構造物になるほど、残響時間は長くなり、更に明瞭度は低下し、内部での発生騒音も大きな騒音となるなど、吸音対策は不可欠である。

2.3 吸音対策

吸音対策は、壁面と天井である膜面に対して考えられるが、壁面に対しては、観客の有無や壁の高さによった対策できる面積が変化するので、ケースバイケースで検討しなければならない。ここでは、先の空気膜実験棟において行った、室内表面積に占める割合の大きな天井膜面に吸音体を設置する対策についての検討を示す。

膜構造物の膜面に設置する吸音体は、次のような条件を考慮しなければならない。

- ・膜構造物では膜からの採光を一つの特徴としているので、膜からの採光を妨げるものであってはならない。
- ・吸音対策を行っていない膜構造物の残響時間周波数特性は、山形になる特徴があるので、この山形のピークである 630～1,250Hz 帯域の吸音を特に必要とする。

以上のような条件と、さらにコストも考慮したものとして、グラスウールボードを膜の補強ケーブルから垂直に吊り下げたものを採用した。吸音体の吊り下げ状態を図-6 に、空気膜実験棟内部の様子を写真-2 に示す。吸音体は、補強ケーブルの全てに吊り下げ、グラスウールボードは全部で 378枚である。

2.4 吸音体の効果

378枚の吸音体を吊ったときの、残響時間を吸音体がないときと比較して図-7 に示す。これを見ると、最大で 6秒程度あった残響時間が、2.5 秒にまで短くなり、また周波数特性もフラットに近づく良好なものとなっている。

しかし、空気膜実験棟が球状の音の集中が起こりやすい天井形状なのに加え、天井面のみ吸音処理してい

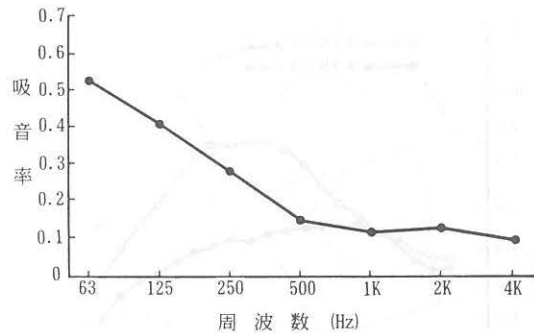


図-5 膜の吸音率

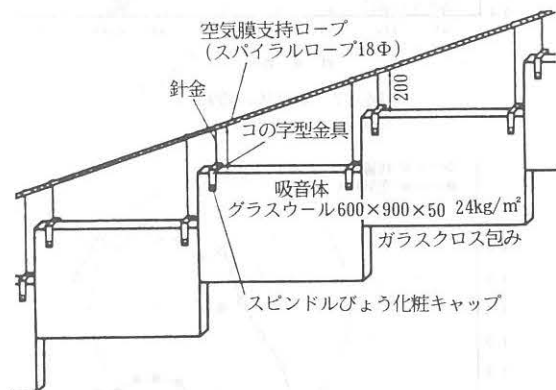


図-6 吸音体



写真-2 空気膜実験棟内部 (吸音体を見る)

るため、壁面間を往復する音がいつまでも残り、一層音の拡散が悪くなっていることが予想された。そこで、図-7 に示した吸音体を吊るしたときの空気膜実験棟の残響時間から逆算した拡散体の吸音率（見かけ上の吸音率）と、十分な音の拡散が得られるように設計された空間である残響室で得られた吸音体の吸音率とを比較した。結果を図-8 に示す。

これを見ると、空気膜実験棟内に吊った時の見かけ上の吸音率は、残響室で得られた吸音率より小さくな

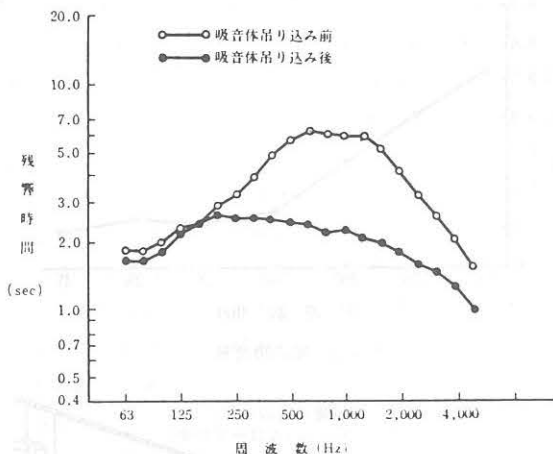


図-7 吸音体の効果

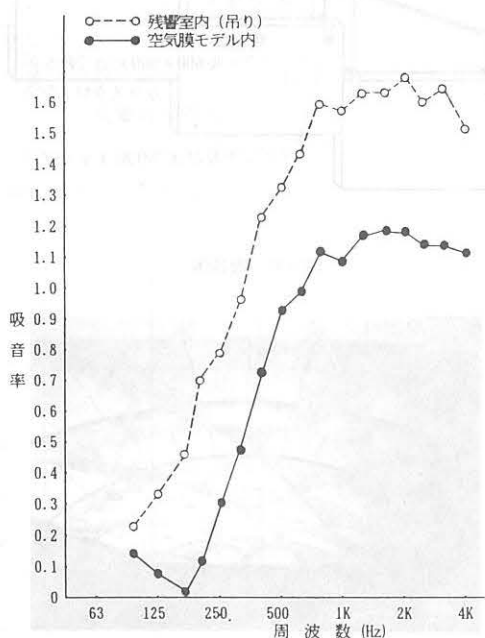


図-8 吸音体の吸音率

っている。これは、実際に実験棟内での音の拡散が悪くなっているため、吸音体の効果が弱められていることを示している。なお、吸音率が1以上になっているのは、吸音率のデータをグラスウールボード片面の面積で整理したためである。

以上は一例であるが、実際に音響設計を行う際にも、膜構造物のように吸音処理を行える部位、方法が制限される場合、特に大空間の場合に使用目的にあった残響時間を得ようとすると、片寄った部位に集中的に吸

音材を配置しなければならず、十分な拡散状態が得られにくくなる。このような音場においては、従来の拡散音場を前提とした残響式では、計算値より実際の残響時間の方が大幅に長くなるなど、誤差が大きくなり実用的ではなかった。

3. 乱数を用いた音線法による残響時間予測

3.1 従来の音線法によるインパルス応答の計算

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り計算されるインパルス応答から導かれる室内エネルギーの減衰曲線を用いる手法が知られている²⁾。

音線法とは、音源から広がってゆく音の波頭を細かく分割し、それぞれの軌跡を幾何的に追跡することにより、室内の応答を計算する手法である。音源から全方向に放射する直線の軌跡にそって計算を行うことから音線法と呼ばれている。また、インパルス応答とは、手を打ち鳴らしたときに生じるような、非常に短い継続時間の音を室内で発生させたときに、ある受音点で記録される音圧の時間変動を示すものである。

音線法の一つに音線が境界面で反射したときに、反射点のまわりに積分範囲を定め、各反射点から受音点へのポテンシャルの積分を行いながら、インパルス応答を算出する手法がある³⁾。原理式を式(1)に示す。

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

ϕ_p : 受音点でのポテンシャル

U_{sa} : 音源のポテンシャル

$\vec{r}_o$: 入射音線の方法ベクトル

$\vec{r}$: 反射音線の方法ベクトル

$\vec{n}$: 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、音線本数が計算精度に大きく影響する。精度よく計算を行うためには、境界面上の音線同士がある一定距離以下で隣り合っていないなければならないが、音源から放射された音線は、その追跡時間が長くなるほどお互いの距離が離れてゆくため、長時間のインパルス応答が必要な残響時間の長い大空間に適用

すると、音線の数膨大となり、計算時間、データ量の両面で実用的ではなかった。膜構造物は大空間に多く用いられるが、吸音対策を行っても前述の吸音面の片寄りにより残響時間は長くなる傾向にあり、従来の手法を適用するのは困難であった。

3.2 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、大空間のような残響時間の長い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ポテンシャルを積分してゆ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 程度の音線本数で計算を可能としている。計算は、大きく分けて 2 つの部分からなる。

まず、音線を空間に均等に放射し、反射点の座標、どの境界面に反射した化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。

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う。1 本の音線が代表する波頭面の面積は、伝搬距離を半径とする球の表面積を全放射音線本数で割ったものである。これを境界面上に積分を行うべき面積として投影する際に、乱数による補完を容易にするため、図-9 に示すように、反射点を中心とする円として表す。円は、1 本の音線が代表する波面の面積と等しく、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、式(1)を適用できる距離以上はなれたとき、円内に乱数により新たに反射点を発生させる。新たに発生させる反射点は音線と音線の間に必要があるから、図-10 に示すように 2 つの乱数を用い、必ず円内に納まるようにした。

このように新たに発生させた反射点を用いて境界面上から、受音点へのポテンシャルを時系列上に積分しながらインパルス応答を求めることは、図-11 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、境界面上の円内に向けてランダムに音線を放射しながら計算を行うのに等しいと考えられる。

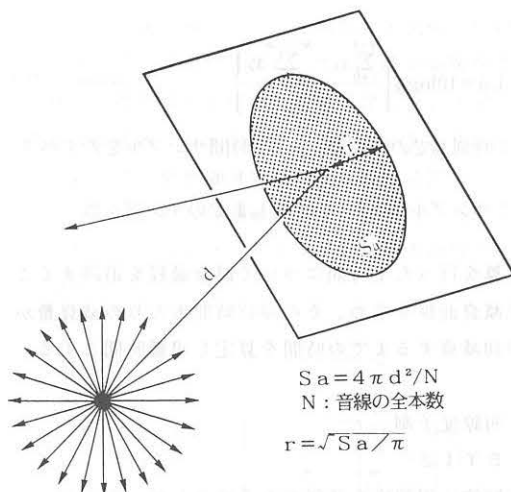


図-9 境界面上の積分範囲

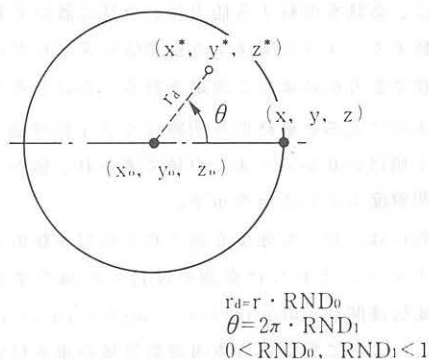


図-10 乱数による反射点の発生

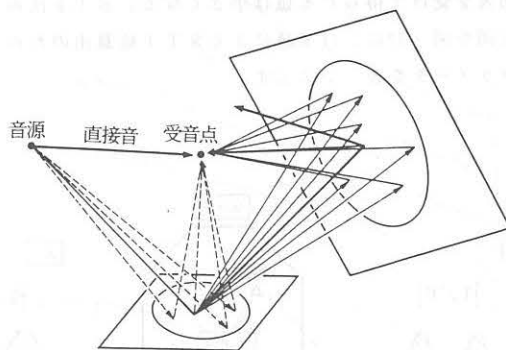


図-11 乱数により発生させた反射点からのインパルス応答の計算

3.3 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(2)で求まる。

$$L_d = 10 \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i - \sum_{j=0}^{N-1-k} x_j}{\sum_{i=0}^{N-1} x_i} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

L_d : 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 60dB 減衰するまでの時間を算定し残響時間とする。

4. 明瞭度予測

4.1 S T I 法

客観的に明瞭度を評価する手法として、S T I (Speech Transmission Index) 法⁴⁾を採用している。この手法は、会話を理解する能力は、会話に置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、という考えによったものである。最終的な明瞭度を表す指標値である S T I 値は、0 から 1 までの値で表され、値が大きいほど明瞭度がよいことを示す。

具体的には、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、残響音、エコー、騒音の妨害を受けて得られる値は小さくなる。S T I 法の概念図を図-12 に、日本語による S T I 値算出のためのパラメータを表-1 に示す。

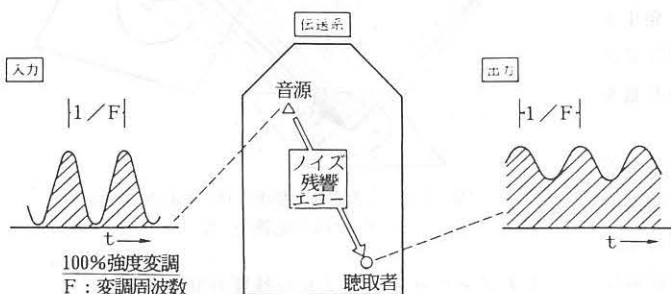


図-12 S T I 法の概念図

4.2 明瞭度予測手法

S T I 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⁵⁾である。S T I 値算出の基となる変調度伝達関数 (M T F) とインパルス応答の関係を式 (3) に示す。

$$m(F) = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi\omega t} dt \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$m(F)$: 変調度伝達関数 (MTF)

$h(t)$: インパルス応答

式 (3) の関係を用い、明瞭度の予測は残響時間と同様に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、S T I 値を求めている。

4.3 拡声装置を用いる際の明瞭度予測

空間がある程度大きくなると、拡声装置の使用を前提として音場の予測を行う必要がある。不特定多数の人が集まる空間では、アナウンス、非常用放送等の明瞭度が問題となるが、このような際、強い指向特性を持つ定指向性ホーンスピーカを用い、ねらった範囲に音を集中させ余分な反射音の発生を防いで明瞭度を確保する方法がとられる。

そこで、実際に大空間などで用いられる定指向性ホーンスピーカの 3 次元指向特性を、前述の乱数を用いた音線法に組み込み、拡声装置の特性を含んだ音場の予測を行えるものとした。

定指向性ホーンスピーカの一例を写真-3 に示す。これらのスピーカの 3 次元指向特性の測定を、100～

表-1 日本語 S T I 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

10,000Hzの 1/3オクターブごととして無響室に置いて行った。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° おきのデータとして取り込み、これを本音線法に組み込んだ。

3次元指向特性の測定データ例を図-13に示す。原点からメッシュまでの直線の長さが出力レベルを表しており、データとデータ間の方向へは、必要に応じて直線補完を行って得られた値を用いている。

図-13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が分かる。

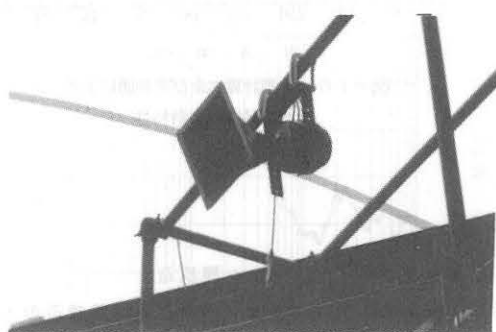


写真-3 定指向性ホーンスピーカ

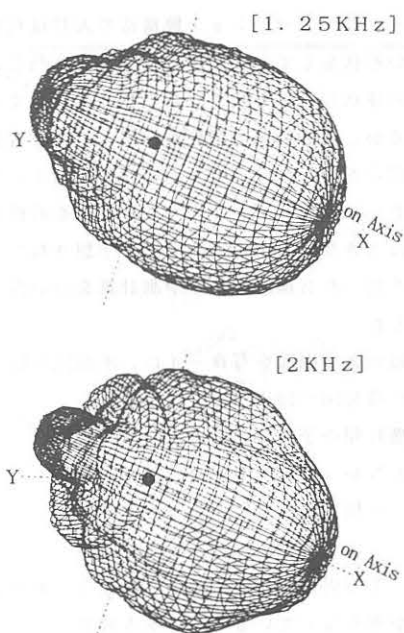


図-13 定指向性ホーンスピーカの3次元指向特性

5. 適用例

5.1 空気膜実験棟における予測値と実測値との対応

前出の空気膜実験等において、実際に聴衆が着席した状態で拡声装置を用いた時を想定して、スピーカの直接音が入射する床面にガラスウールを敷き詰めた状態において、解析周波数4000Hz、追跡時間 1.3秒として、音線本数約70,000本として計算を行った。

音源スピーカのセッティング、受音点位置を図-14に示す。

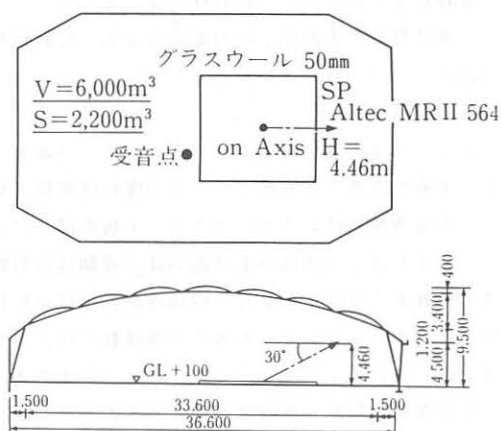


図-14 音源・受音点のセッティング

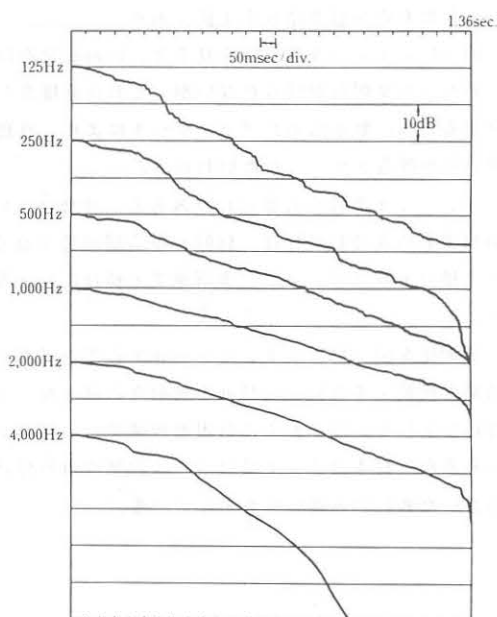


図-15 減衰曲線

5.1.1 残響時間

予測計算より求めた減衰曲線を図-15に、減衰曲線の単位時間あたりの減衰量から算出した残響時間周波数特性を実測値と合わせて図-16に示す。

予測計算による残響時間は、500KHz, 1000Hz 付近が最も長く、3秒弱となり定周波数域および高周波数域に向かって短くなる膜構造物の音場の特徴を示すものとなっている。

実測値においても同様の結果が得られ、500Hz 付近が3秒程度の山形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秒程度の誤差でよく一致している。

5.1.2 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-17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、音声の伝達が良好に行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-1に示したパラメータにより1/3オクターブごとの算術平均から平均強度として求められる。1/3オクターブごとの値を周波数特性と重ねて図中に示した。それぞれの平均強度に日本語の重み付けを加え、合計したものが日本語STI値である。

図-17のインパルス応答を見ると、50msec付近以外にめだった反射音が見られないが、これは直接音が入射する床面に敷き詰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、500Hzから周波数が高くなるに従い上昇しており、日本語STI値は0.54となった。

実測値を図-18に示す。インパルス応答を予測計算結果と比較すると50msec付近の反射音の様子などよく対応している。MTFでは低周波数域で食い違いがみられるが、日本語STI値は低周波数域の重み付けが小さいため0.53と近い値を示している。

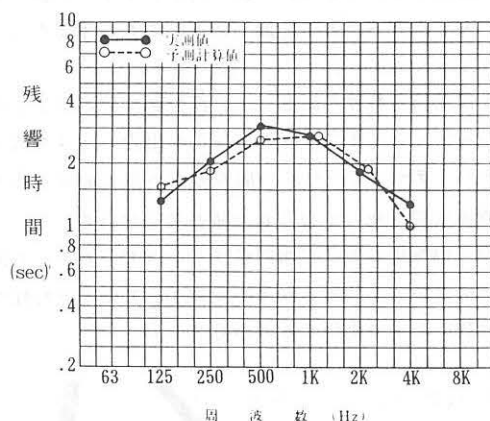


図-16 予測計算および実測値による残響時間周波数特性

5.2 ケーブルサスペンション膜構造

当ドームは、ケーブルサスペンション膜構造の大空間多目的ホールであり、展示場、イベント会場、見本市等の広い用途に対応できるものとして計画された。

ケーブルサスペンション膜構造の天井は双極シェルの近い形状をしており、短軸方向が下に凸と、一般ドームの球状の天井形状より音の拡散を期待できるものであるが、残響時間の調整を行うための吸音部位が壁面に限定されたため、吸音面の片寄りによって十分な拡散音場が得られず、従来の拡散音場を前提した残響式では大きな誤差が生じることが予想された。そこで、乱数を用いた音線法により予測計算を行い内装仕様を決定した。

外観および内観を写真-4に、平面図を図-19に、内装仕様を図-20に示す。

残響時間の予測結果を壁面の吸音対策を行った場合と行わなかった場合を重ねて図-21に示す。吸音対策を行った場合、500Hzで約2秒となっている。従来の残響式による予測値では、500Hzで約1.2秒とかなり短く、また周波数特性も大きく異なっており、音場の拡散が悪くなっていることが示されている。

また竣工後に測定を行った実測値との対応を見ると、実測値は500Hzで約1.8秒と、乱数を用いた音線法による予測値とよい対応を示している。

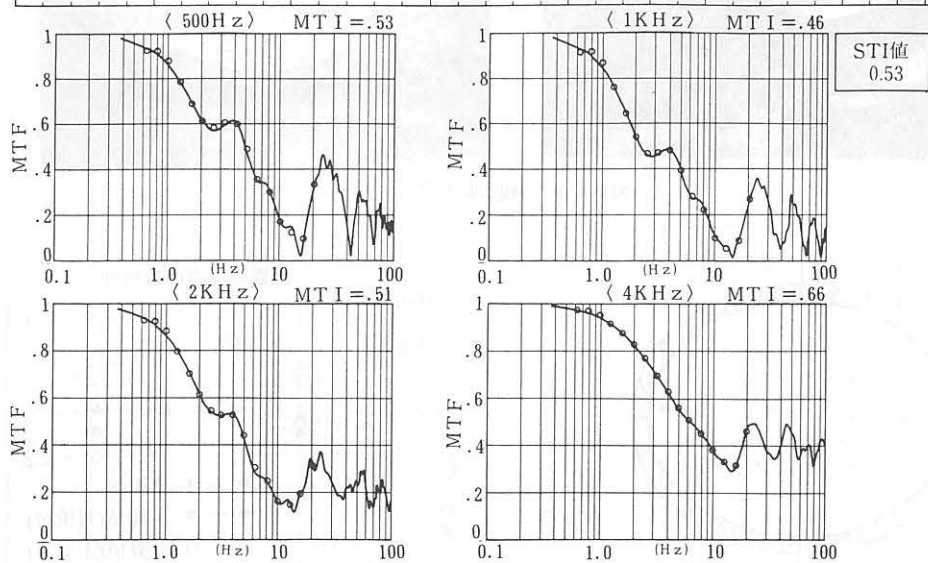
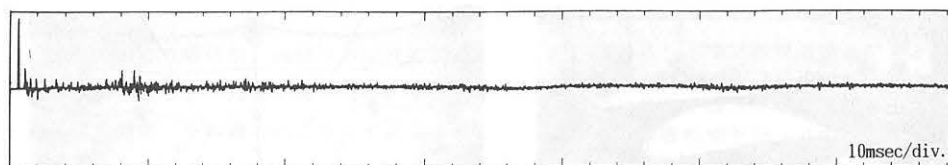


図-1 7 予測計算によるインパルス応答およびSTI値

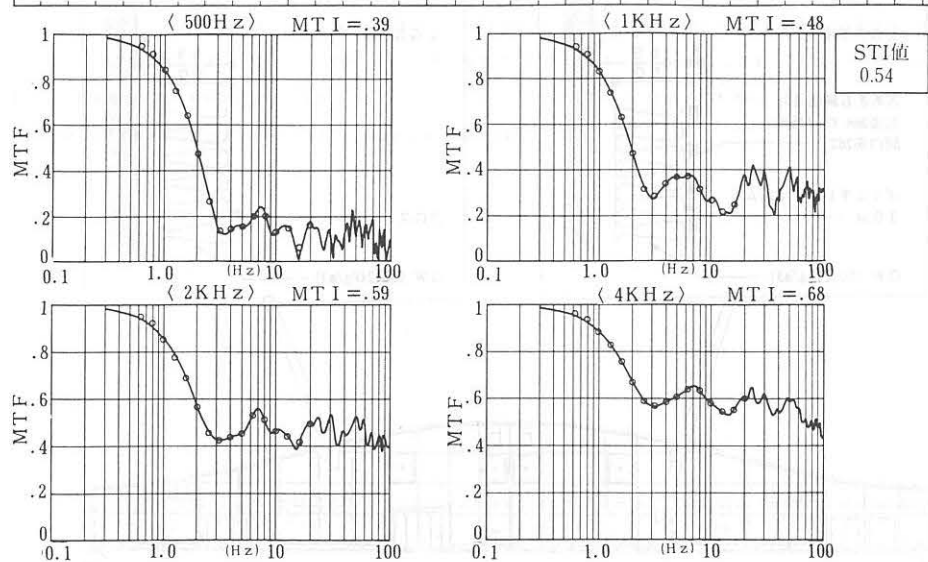
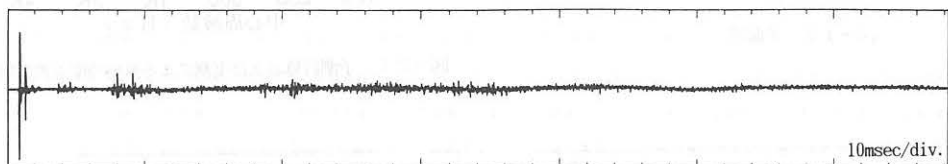


図-1 8 実測によるインパルス応答およびSTI値

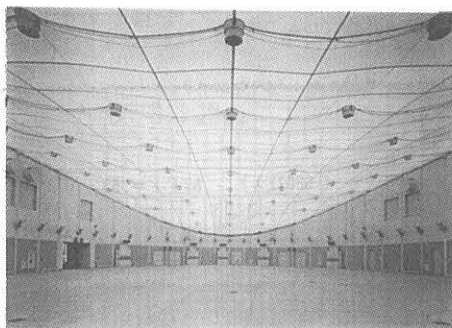
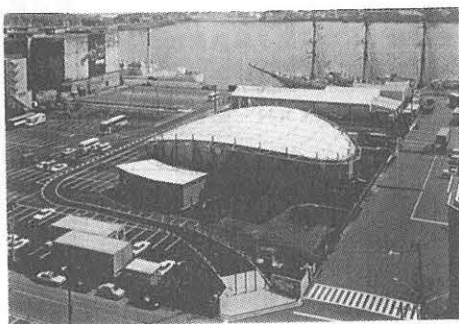


写真-4 外観および内観

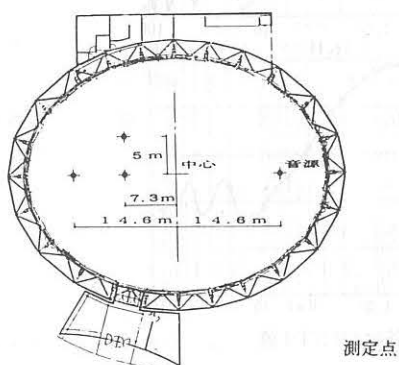


図-19 平面図

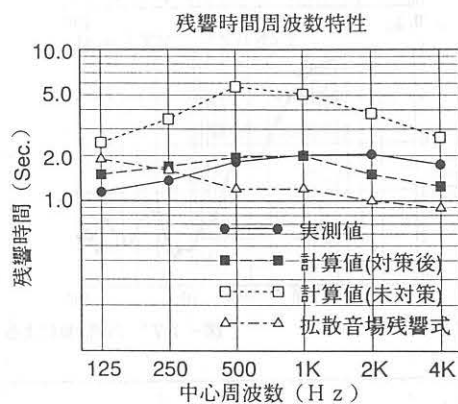


図-21 予測計算および実測による残響時間周波数特性

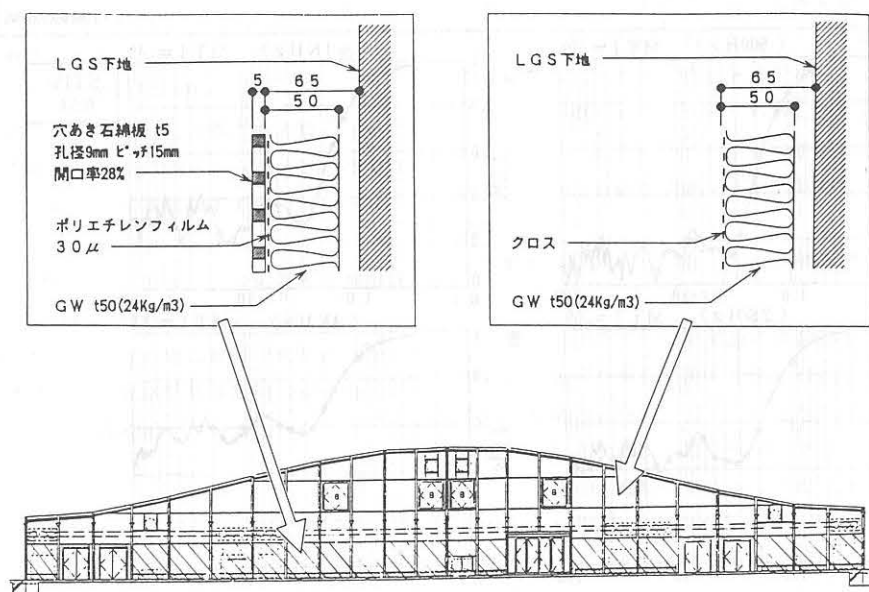


図-20 内装仕様

6. おわりに

以上、膜構造物の音場特徴、膜面への吸音対策の事例、および予測が難しかった大空間の残響時間、明瞭度の予測手法の開発、その適用例について述べてきた。

膜構造物のように空間が大きくなると、残響時間と言った基本的な指標値にしても、通常のホールなどに比べ格段に予測が難しくなる。開発を行った手法は、ある程度の精度を示しているが、引き続き検証、改良を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 中川, ほか: 空気膜構造棟に関する実験・研究(その1), 大林組技術研究所報, No30(1985) P188~192
- 2) 渡辺, ほか: 吸音面が集中した空間の有限音線積分報による残響時間予測, 日本音響学会講演論文集, 1986.10, P625
- 3) Sekiguchi et al: "Approximation of impulse response through computer simulation based on finite ray integration", J. Acoust. Soc. Jpn (E), P103~115, (1985)
- 4) 小椋, ほか: 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
- 5) M. R. Schroder: "Modulation transfer function: definition and measurement", Acustica, vol49, P179~182, (1981)

SOUND FIELD OF THE MEMBRANE STRUCTURE

Mitsutoshi WATANABE* Masayoshi TSUBOI*
Shigeru HIRANO*

SYNOPSIS

Large-volume space of the membrane structure can be a light like an openair by daylight through a membrane. But large-volume space of the membrane structure usually have long reverbration time because absorption ratio is small, and so clearness of announce becomes badly. And the room acoustics of large-volume space is not diffusive, so the conventional method predicated on diffusive acoustics results in large error and is not practical. This paper describes that a countermeaure and prediction method for the room acoustic of the membrane structure, and its application.