

空気膜構造棟に関する実験・研究（その1）

——音響特性——

中川 恭次 真藤 利孝
平野 滋

Experimental Studies on an Existing Air-Supported Structure (Part 1)

——Acoustic Characteristics——

Kyoji Nakagawa Toshitaka Shindo
Shigeru Hirano

Abstract

The Ohbayashi Corporation Technical Research Institute (located at Kiyose in Tokyo) has recently completed an experimental model of an air-supported structure with an area of about 840 m². Special technical development by Ohbayashi has resulted in the Trident System, an outstanding way of employing reinforcement cables to solve the problem of stability caused by wind and other external pressures, which heretofore have been major weak points of this structural type. In this model, the authors conducted several architectural experiments. One of them, on acoustic characteristics, is described in this paper.

Reverberation time of a large-scale air-supported structure using a single layer of roof fabric is generally long because a single layer of roof fabric does not absorb sound very much. The absorption coefficient of the roof fabric was obtained from the reverberation time in the model. Adequately absorbent material was then made with glass wool to gain clarity of public-address system sounds. The effect of absorbents hung from cables was compared with the absorption coefficient obtained in the reverberation chamber.

概 要

昭和58年末に当技術研究所内に空気膜構造棟が完成した。テフロン膜の柔らかい屋根を空気圧で支え、支柱のない大空間を創り出す新しい構造物で、野球場や大規模なイベントの施設を全天候形にすることができ、屋根スパンが大きくなるほど従来の鉄骨造の屋根に比べてコストが安くなる特長がある。この空気膜構造棟は、当社独自の技術開発により、風などの外圧に対して優れた安定性を与える“トライデントシステム”を採用している。この構造棟を使用して各種実験を行なっているが、本報は音響についての報告である。

大空間の構造物内では吸音材を設置しないと残響時間が長くなり、アナウンスの明瞭度が得られなかったり、歓声が騒音になったりする。そこで大規模空気膜構造物を実現したときの対策資料として、構造棟を使用して、空気膜自身の吸音率を求め、次に適当な吸音体を考え、この吸音体を実際に設置して、その効果を残響室で得られた吸音率と比較した。

1. はじめに

空気膜構造物とは屋根面をケーブルで補強された膜でおおい、建物内部に空気を送り込み、空気屋根を支えるもので、1970年大阪万博のアメリカ館で使用されたの

が最初のものである。現在米国では8万名もの観客を収容する大規模なものまで10例ほどが実用されている。近年我が国においても実用化の動きがあり、ゼネコン各社が開発に力を入れてきた。当社も新システムを開発、空気膜構造棟を技術研究所内に建設した。

この空気膜構造棟を使用して、さらに大規模空気膜構造物の実現にそなえ、各種実験を行なっている。本報ではそのうちの音響特性について実験検討した報告である。

2. 空気膜構造物

空気膜構造物の特長を記すと次のようである。

- 大スパン構造ほど鉄骨造屋根より工事費が安くなる。
- 透光性（透光率16%位）が良いので昼間の照明費が大幅に節約できる。
- よごれがつきにくく、錆なども発生しないため、メンテナンスが簡単。
- 膜はガラス繊維にテフロンをコーティングしたもので耐用年数は20年以上。

膜については一重のものと、二重にして間に空気を通したものがある。二重膜は間に温風を通すことにより、結露対策、融雪対策が行なえ、さらに内側の膜には若干の通気性があるため、50%程度の吸音率が得られるようである。一重膜は通気性がないので吸音はほとんど期待できない。今回建設した構造棟は一重膜である。

3. 当社空気膜構造棟

今回建設した空気膜構造棟の内観と外観を写真-1、2に示す。平面図を図-1、立面図を図-2、断面図を図-3に示す。

●概要

規模	床面積 840 m ²	室内容積 6,000 m ³
	最高部高さ GL+9.50 m	
構造	外周部分 鉄骨造	
	屋根 トライデントシステム（耐風安定性を高めるためケーブルを3方向に配置）によるケーブル構造	

●仕上材料

屋根	ケーブルで補強したテフロン一重膜
斜壁	2枚のステンレス板の間にウレタンを発泡させたサンドイッチパネル
壁	押し出し成形セメント板、厚さ 50 mm

●室内圧

常時	25 mm 水柱（1階と7階の気圧差、または2.5ミリバールの気圧差）
台風時	常時に同じ（トライデントシステムにより耐風安定性が良いため内圧を変えない）

積雪時 85 mm 水柱

●設備

送風機	6,000 m ³ /時×2台
常時用	日常の漏気補充用、漏気量が少ない場合は送

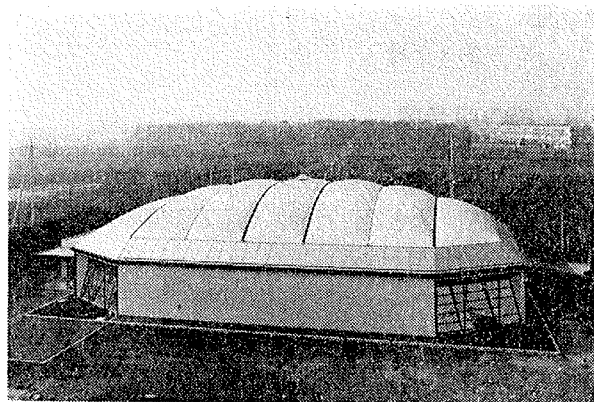


写真-1 空気膜構造棟外観

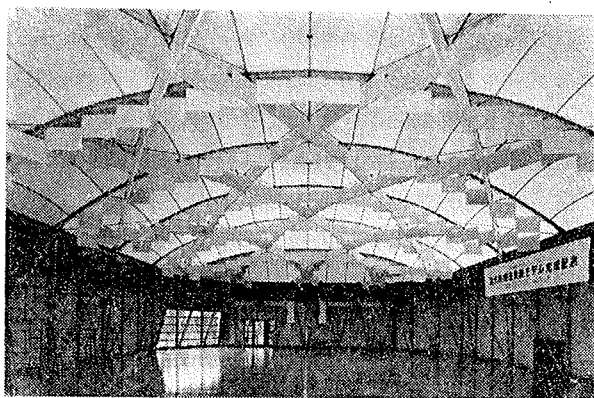


写真-2 空気膜構造棟内部（吸音体を見る）

風機の回転数を少なくしてランニングコストの低減を計っている。

非常用 積雪時の加圧用、何らかの理由で内圧が低下した場合に自動運転となる。

Air up 屋根が下がった状態より完全にふくらませる時間は11分

●特徴

自社技術 万博アメリカ館の経験をもとにして当社独自の技術開発により、設計、施工を行なった。特許出願件数は11件

ケーブル配置 トライデントシステムの使用

●膜材料

膜材料のコストダウンのため、国産膜2種類を試験的に採用し、米国で実用されているケミファブ社のものと合計3種類の膜の比較実験を行なっている。

●出入口

2重扉による前室方式を採用、室内側の扉は内圧が作用していても開閉が簡単なバランスドアとし、通常の片開き扉との比較を行なっている。

● 工期

約3ヶ月

4. 膜の吸音率

空気膜構造物の音響を考えるに当たって、まず屋根全面を占め、面積が大きく、音響に与える影響の大きい膜自身の吸音率が問題となる。

膜の吸音率は、膜が圧力で緊張状態にあり、かつ音が屋外へ透過してしまう状態にあるので、残響室で測定することができない。そこで実験モデル内の残響時間を測定し、残響時間から空気膜構造棟内の吸音力を求め、膜以外の吸音力を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。

膜以外の吸音力は吸音率データより算出したが、床はアスファルトにアクリル系塗装 1.5 mm、壁は押し出し成形セメント板 50 mm で大きな吸音力となるものはないので、膜の吸音率は精度良く得られたと思われる。

構造棟内の残響時間の測定結果を図-4に、この残響時間を用いて算出した膜の吸音率を図-5に示す。

図-4の構造棟内の残響時間周波数特性をみると、630 Hz~1,250 Hz を頂上とした山形の特性で、ピークでは6秒以上になっている。

残響時間から求めた図-5の膜の吸音率をみると、低周波数域ほど吸音率が大きく、500 Hz 以上の周波数域では10%程度の吸音率しかない。

以上のことから、特に吸音対策をしていない空気膜構造物では、膜の膜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が期待できるが、500 Hz ~2,000 Hz の周波数範囲の吸音がなく、この周波数域の残響時間が長くなり、800 m² 程度の規模でも、アナウンスの明瞭度に支障のあることがわかる。

これがスパン 200 m にもなる野球場や競技場のような大規模空気膜構造物になれば、残響時間はさらに長くなり、試算すると、4万人の観客が入っても、10秒を越えてしまい、アナウンスの明瞭度が得られず、観客の歓声や応援が大騒音になるので、吸音対策は不可欠である。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、壁面については観客席の有無や、壁の高さによって、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。ここでは面積が大きく、屋根全面をカバーしている膜面に吸音体を設置する対策を検討した。

5. 吸音体

空気膜構造物の膜面に設置する吸音体として、次のような条件を考慮しなければならない。

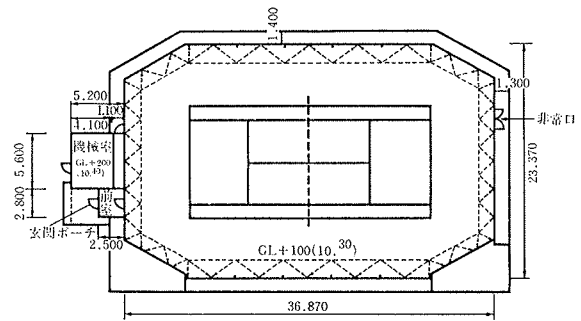


図-1 平面図

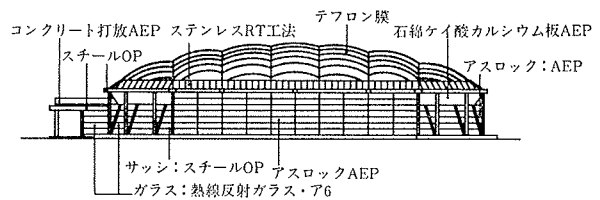


図-2 立面図

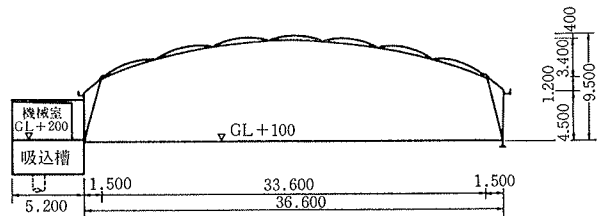


図-3 断面図

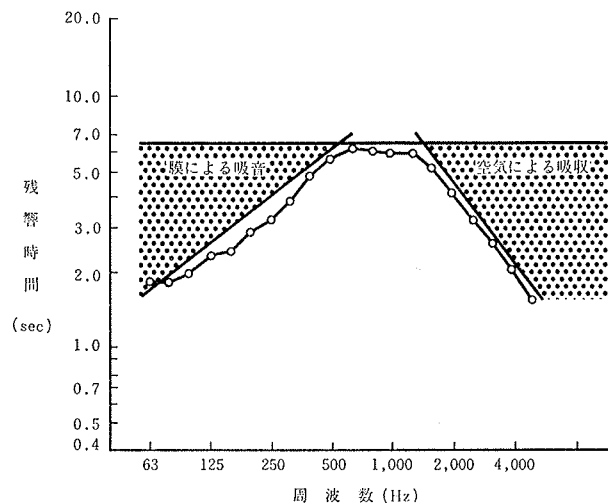


図-4 空気膜構造棟 残響時間

- 空気膜構造物では膜からの採光を一つの特長としているので、透光をさまたげるものであってはならない。
- 吸音対策をしていない空気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、この山の頂部となる 500 Hz～1,250 Hz の周波数範囲の吸音を、特に必要とする。

この透光性と吸音効果と、さらにコストも考えて吸音体を検討した結果、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。

吸音体はグラスウールボード 600×900×50 mm, 24 kg/m³ をグラスクロスで包んだ。

吸音体の吊り下げ状態を図一七に示す。

吸音体はロープのすべてに吊り下げ、グラスウールボードは378枚になった。

6. 吸音体の効果

378枚の吸音体を吊ったときの、空気膜構造棟内の残響時間を、吸音体の無い時と比較して図一六に示す。

これをみると、最大6秒の残響時間が2.5秒になっており、周波数特性もフラットに近づき、期待どおりの結果が得られているが、この吸音体に低周波数域の吸音は意図していないが、低周波数域でほとんど効果がでない。

低周波数域に限らず、空気膜構造棟が球状の屋根形状で、音が拡散しにくいというえに、吸音体がこの面にのみ、設置されていることから一層拡散性が悪く、残響室で得られる吸音率が、そのまま効果として表れないことは、十分予想された。

残響室で得られた吸音率と、実際に吊ったときの効果について、若干検討した。

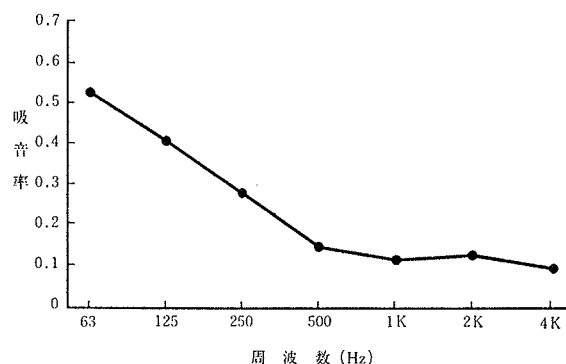
7. 吸音体の吸音率と効果

残響室において吸音体を次の3通りの状態で吸音率を測定した。

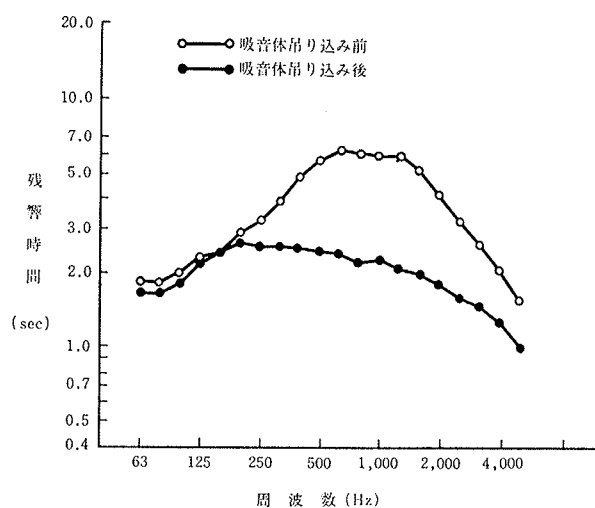
残響室と測定系統は JIS-A-1409 “残響室法吸音率の測定方法” に準拠している。

- 吸音体をロープから吊り下げ、空気膜構造棟内と同様な状態にしたもの。
- JIS-A-1409 に基づき、吸音体を寝かせて、直接床に並べて集中配置し、周辺は反射性の材料で囲んだもの。
- 吸音体を寝かせて、ランダムに直接床面に並べ、周辺はそのままのもの。

吸音体をロープから吊り下げたものは、両面に音波が入射するが、床面に置いたものは片面にしか音波が入射せず、通常示されるグラスウールボードの吸音率に相当する。



図一五 膜の吸音率



図一六 残響時間（吸音体の効果）

吸音率のデータは、すべて片面の面積で整理したので、吊り下げたり、ランダムに配置したものは、吸音率が1以上になっている周波数もある。

次に空気膜構造棟内に吸音体を設置する前後の残響時間の差から、実際に空気膜構造棟内に吸音体を吊ったときの吸音体の効果（見かけ上の吸音率）を算出した。

吸音体の効果（見かけ上の吸音率）は次式によった。

T_0 : 吸音体吊り込み前の残響時間 (S)

V : 空気膜構造棟室容積 (m³)

S : 空気膜構造棟全表面積 (m²)

$\bar{\alpha}$: 空気膜構造棟内平均吸音率

m : 空気吸収率

T_a : 吸音体吊り込み後の残響時間 (S)

S_a : 吸音体の面積 (片面 m²)

α_a : 吸音体の吸音率

$$T_0 = \frac{kV}{-S \log_e(1 - \bar{\alpha}) + 4mV}$$

$$T_a = \frac{kV}{-S \log_e\left(1 - \frac{S\bar{\alpha} + S_a\alpha_a}{S}\right) + 4mV}$$

上記2式より

$$\alpha_a = \frac{S}{S_a} e^{4mV/S} (e^{-KV/ST_0} - e^{-KV/ST_a})$$

残響室で得られた吸音率と、空気膜構造棟内に吊った時に得られた効果(見かけ上の吸音率)を比較して、図-8に示した。

残響室内の測定結果をみると、315 Hz以下の周波数域では、吸音体を吊っても、床に置いても、吸音率に大きな差は出ていない。

400 Hz以上では、吊った場合が最も大きく、床にばら置きしたもの、床に集中配置したもの、の順になっており、かなりの差が出ている。

次に残響室に吸音体を吊った場合の吸音率と、空気膜モデル内に吊って求めた見かけ上の吸音率を比べると、160 Hz以上では、吸音特性を平行移動した形で、実際に空気膜構造棟内に吊った時の方が小さくなっている。ここでは吸音率の大きさに関係なく、平行移動した形でほぼ一律に小さくなっているが、これは空気膜構造棟の形状、吸音体の設置位置による、音の拡散性に関係し、あらゆる場合に当てはまるものではないが、有用な資料が得られた。

8. むすび

空気膜構造棟の吸音対策として、吸音体の一例をとりあげ、一応の資料を得ることができたが、大規模空気膜構造棟の実現に当っては、電気音響設備に関する検討が重要な課題として残されている。

未筆ながら吸音体の設置から測定まで協力いただいた日東紡音響エンジニアリング(株)の関係諸氏に深謝致します。

参考文献

- 1) 中川, 他: 空気膜構造棟に関する研究, その1—建物概要と風観測, その3—煙流動, 排煙に関する基礎的検討, その4—振動特性, その5—膜材料の物性と耐候性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和59. 10), pp. 1037~1038, 979~980, 949~950, 301~302

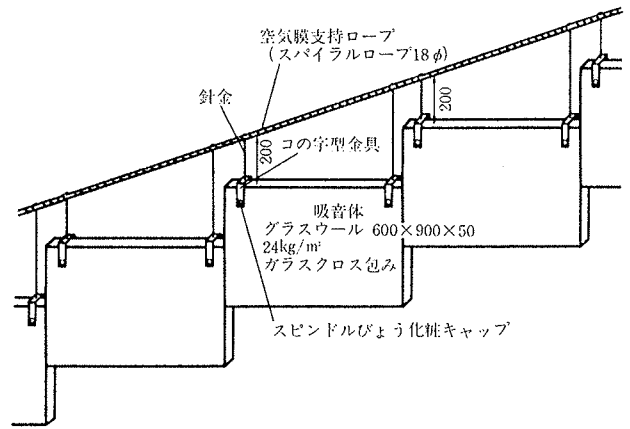


図-7 吸音体

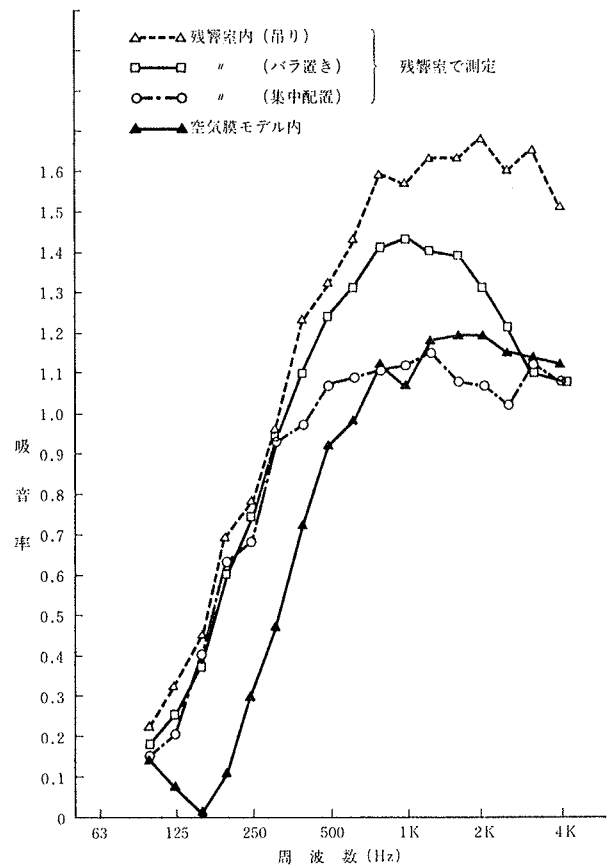


図-8 吸音体の吸音率