

みどりの館の音響設計

真 藤 利 孝
加 藤 幸 雄
吉 田 克 雄
平 野 滋

概 要

三和銀行系32社によるみどり会より、万博に“みどり館”「アストロラマホール」が出展されることになり、当社はホールの内装の施工を含めて全館建築の設計施工を担当した。このホールの超立体音響再生設備に関するコンサルタントは日立製作所が担当し、世界に前例のない新しい問題に対処するため斯界の権威により音響委員会が結成された、当技研環境研究室はこの委員会のもとホール内の音響処理の最適条件とスピーカーの配置を模型実験により検討し、吸音体、拡散体の開発を行なった。ここに我々が担当した検討事項とアストロラマホール完成後の実測結果の概略を報告する。

1. アストロラマ

アストロラマとは図一に示すように直径30m高さ23mの半球形ドームの内面、約2,000m²（シネラマの約12倍の面積）のスクリーンに5台の70mm映写機で全天全周映像を投影する画期的な映画方式で収容人員は1000人のものである。

これに配する音響再生システムとしては次のような幾多の問題が考えられる。

(1) 面積2,000m²のスクリーンは画面効果が高めるため、映像の光を観客席に向け有効に反射し、他方向への反射を防がねばならないが、このスクリーンの音の透過特性、吸音特性が全く未知である。

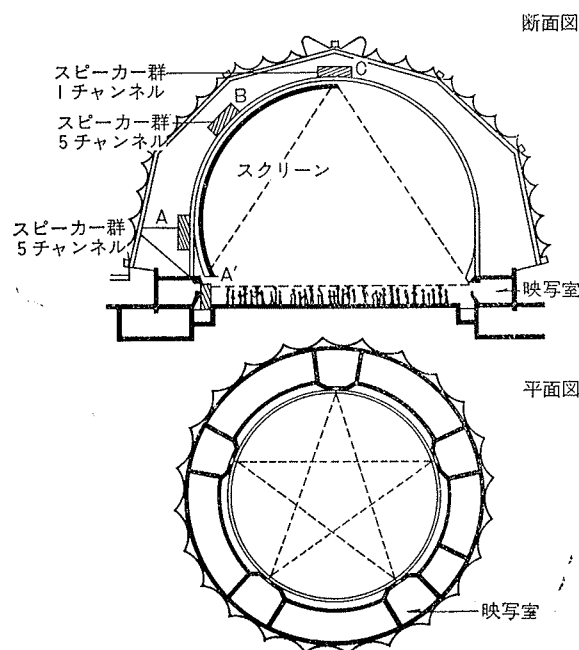
(2) 容積12,000m³の半球形ホールで、観客席における音圧分布をできるだけ均等化し、しかも音の方向性、分離性、明瞭性のよい多チャンネルステレオを実現しなければならない。

(3) プログラムの内容からして迫力のある極めて大きい音響出力が要求される一方、微弱音も信号対雑音比をよく再生しなければならない。またこれにもなって外部騒音に対する建物の遮音と、内部空調設備の騒音対策を考慮しなければならない。

こうした総合音響効果は、再生装置の特性のほかにホール音響処理が密に関連するので、ホール内装、遮音、騒音防止が重要な問題となる。

2. アストロラマ音響設備のねらいと問題点

アストロラマという新しい媒体をもつドームは、み



図一 アストロラマホール平面図、断面図

どり会によると「一步踏み込んだ観客を、そこに展開する映像と音響の世界にすっぱり包みこんでしまいその臨場感は単なる迫力ではなく観客を映像と音響の作り出す小宇宙の中に同化してしまうものである」としている。

このような効果をあげるには勿論適切なシナリオ、企画があって、それを最も効果的に光と音で表現しなければならない。全天全周映像を具現するアストロラマ映写方式に呼応して、音も時には力強く、時には繊

細に澄んだ音を超立体的に再生することを要求される。このような方式を与えられた直径30mの半球内側の空間でどのようにして実現するか、これが世界に先例のない企画だけに、音響技術分野では未知の大きな課題である。内装設計に当たっての問題点を考えてみると、

(1) 超立体音響再生

躍動する全天全周の映像に伴う音を、正しい方向性と分離性をもって実現しなければならない。しかも、1000名の観客にはできるだけ場所によるむらのないことが望ましい。以上から再生チャンネルとしては10チャンネル以上が望ましく、適切な指向性のスピーカを併用することとなる。

(2) 適切な残響と音圧分布

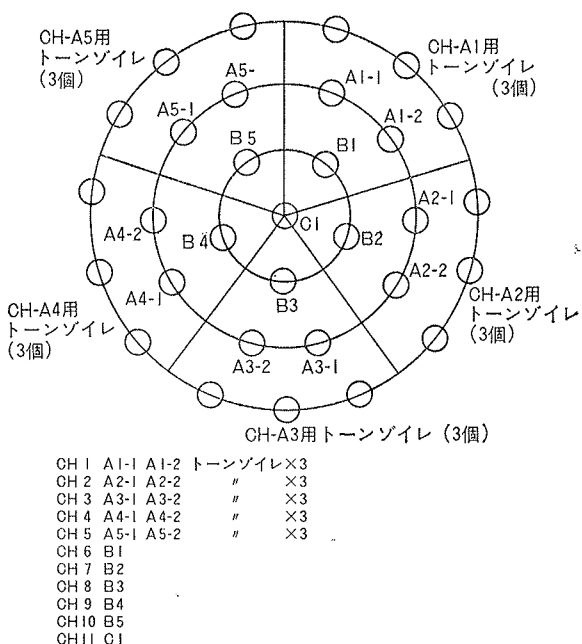
12,000m³ を超える半球形空間のため、ややもすれば残響時間が長くなり、ロングパスエコーが発生し、再生音が明瞭性を欠き、観客席での音圧分布にもむらができる可能性が強い。したがってドーム内装に、スクリーンの音響特性も考慮に入れて吸音、反射、拡散など適切な音響処理を施すことが必要である。

3. 基本検討

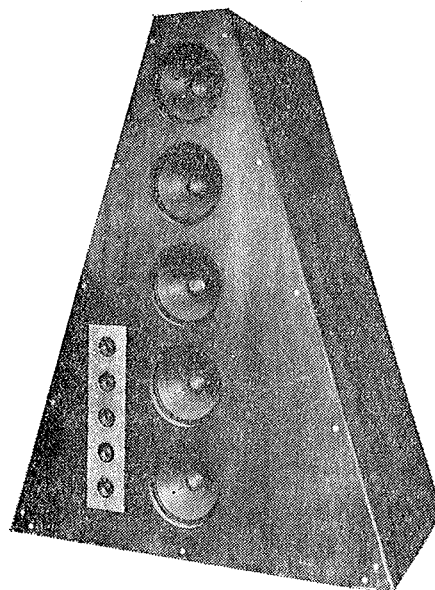
この問題点に対しては、昭和42年10月から44年6月にわたり実験あるいは検討を行なった。

3.1. 再生チャンネル数とスピーカ配置の検討

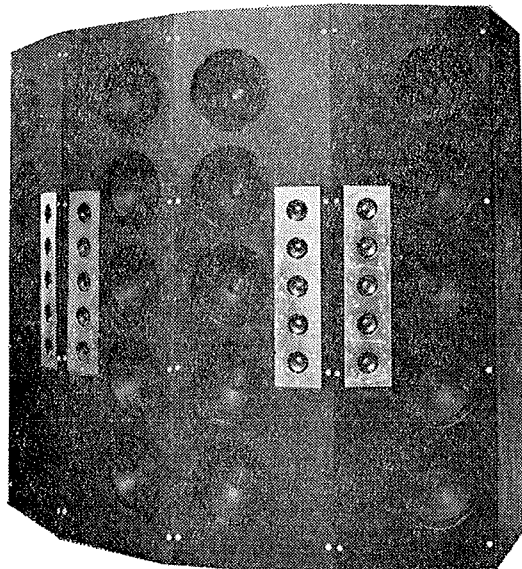
アストロラマ音響設備の何よりの特長は多チャンネルの立体再生にある、再生系のチャンネルを増せば増すほど多様な効果を期待できることはいうまでもないが、一方において、音響設備、とくに録音再生機(テ



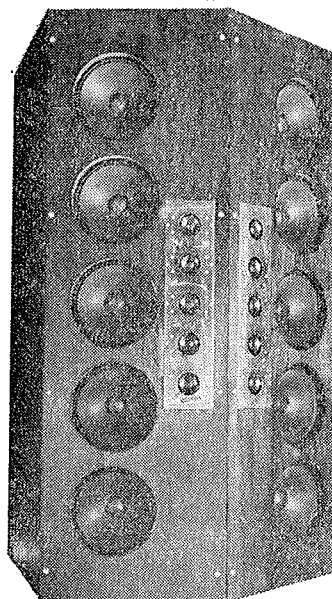
図一2—1 スピーカの種類と配置



図一2—2 C1用スピーカ(5個円状に並べる)



図一2—3 B1~5用スピーカ



図一2—4 A1~5用スピーカ

ープレコーダー)がコスト高となり、また製造時間もかかる、番組の製作編集に費用と時間がかかる、などの点も考慮しなければならない。

以上のような番組の要求する音響効果の多様性、テープレコーダーの発注時期、番組制作期間などより検討し、音響委員会では当初、再生チャンネルとして16～20チャンネルを一応の目標として計画が進められた。しかし映写機がドーム周辺5分割映写方式に決定されたこと、次節で述べる五藤光学ドームにおける試聴試験の結果から、縦方向には天頂を含め3ブロック位で十分であることが確認できたことなどから図-2のような11チャンネルに決定された。Aスピーカーは前面のスクリーンの音響透過率が悪いと音響出力の増加を必要としたこと、さらに上下方向の音像移動の効果を強調することを意図して図-1のようにスクリーン下の壁面にA'ブロックを追加した。

3.2. 模型実験による室内音響条件の検討

全天全周映画という新しい企画に対し、計画の当初からモデル実験の必要性が音響効果、映写効果の両面からとりあげられた。モデルのスケール比について、室内音響設計では1/10が標準とされているが、今回のモデル実験に期待する事項が室内音響特性のみではなく、むしろ電気音響設備からの音に対して聴感上の効果を総合的に把握することであった。したがってモデルのスケールは1/1のモデル、少なくとも1/2スケールモデルが要求された。また光定部門からも別個に1/2モデルが提案されたこともあり、モデル建設の経費、建設に要する時間などから、東京都下府中市の五藤光学のプラネタリウムドーム(直径18m)を利用して、音響、光学両方の実験を行なうことが決定された。そこで43年7月から9月まで日本無線の協力を得て実験を行なった。

(1) 実験の目的

半球形ドームはスペース利用率が高く、建築費が安価である等の理由で、大型の体育館、展示場などで採用される例が多い。しかし十分な吸音処理を行わない限りロングパスエコーが生じ、体操競技や催物においても障害となる。

このような半球状の空間で生じるロングパスエコーは室内を吸音処理することによって除去することができるが吸音処理を極度に実施し、自由音場に近い空間とすると。

- 1) 必要なスピーカー音響出力は非常に大きくなる。
- 2) スピーカー近傍の点と遠い点との音圧レベル差が著しくなる。
- 3) 音場がスピーカーからの直接音だけの音場となり

空間的な印象を得るには、別のスピーカー群により反射音を付与しなければならない。

こうした音響効果の劣化や設備規模の増大など別の意味の障害が生じてくる。したがってこのような球形ドームについては、まず第一にどの程度まで吸音処理を行なえば、形状に起因する室内音響上の障害を除けるかという問題を解決しなければならない。

これが本実験の主要目的であった。

また、壁面で音を再生のたとき、スピーカーの位置、吸音処理の関連で床面上の室内音響特性、室内音響効果の実態(再生音の方向感、自然性など)を把握し、電気音響設備の設計の基礎資料を得るのも目的の一つである。

(2) 実験の方法と結果

五藤光学ドームの内装条件を、現状(トムレックス20mm吹き付け)から全面吸音まで5段階に変化させ(表-1)各状態において室内音響特性の測定およびスピーチ、音楽、効果音などの再生聴感テストを行ない、最適吸音条件、スピーカーの配置条件を検討した。使用した吸音材は厚さ50mm密度32kg/m³のグラスウールを寒冷紗でくるんだもので、寸法は900×600である。このグラスウールの市松配置および集中配置とした場合の残響室法吸音率を図-3に示す。

この吸音材を客席面の床と観客の入らない床周辺部に実物に相当する量を市松配置と集中配置した。天井面の吸音材を天井面の吸音は同一吸音材を天井面積の1/3、2/3、全面、貼りつけたものと、現状のトムレックス25mm吹き付けのもの、以上5段階に変化させた。天井面の1/3、2/3吸音材貼りつけの場合は吸音材を天井全面に分散、貼りつけた。

条件番号	床(容積面)	床周辺面	天井面
No.0	現状のまま	現 状	現 状*
No.1	800人収容相当	全面グラスウール	同 上
No.2	同 上	同 上	1/3グラスウール
No.3	同 上	同 上	2/3グラスウール
No.4	同 上	同 上	全面グラスウール

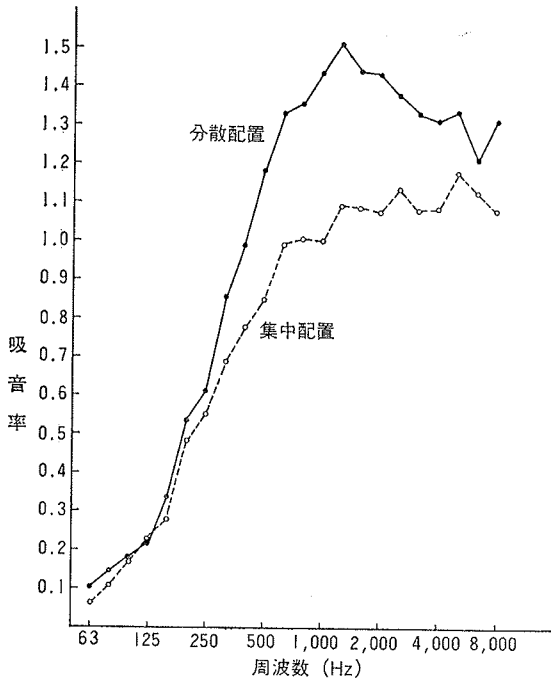
*メタルラス・トムレックス20mm吹付

表-1 モデル実験の内装条件

(a) 残響時間

1/3 オクターブバンド雑音を用い、周波数範囲100Hz～12,000Hzの残響時間を測定した結果を図-3に示す。

空室(条件No.0)の残響時間は、低音域で5秒をこえ、中高音域では1.5秒以下となる。また条件No.1と4の実測値に対して、計算値(図-3に示した吸音率を用いて算出)1', 4'を比較してみると、実測値が



測定は右図グラスウール
24枚を用いて測定

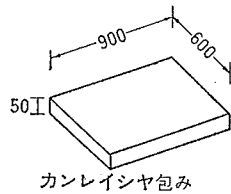


図-3 モデル実験用吸音材グラスウールの吸音率

計算値よりはるかに長い。これはこのような半球状の室では、拡散が極度に悪いため特殊なモードで起振されているためと考えられる。このことは極めて重要な

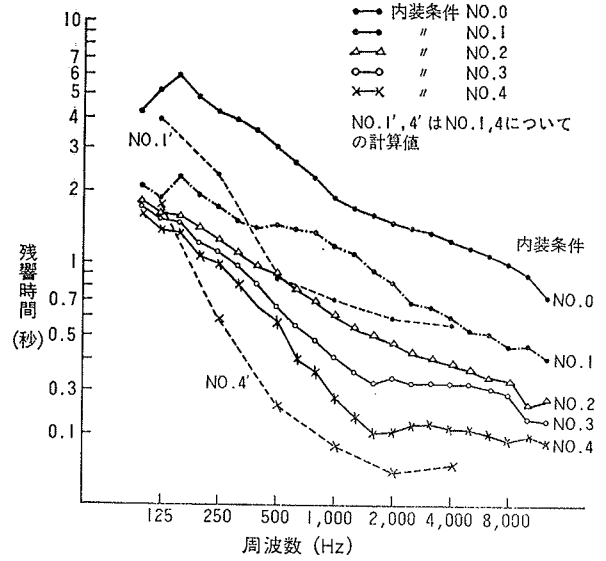


図-5 五藤光学 ドーム残響時間測定結果

ことで、このような半球状空間では普通の残響理論が適用できないことを示唆している。そこで残響理論を適用するにはドーム内の音の拡散を良くすることが考えられ拡散構造体が必要なことが判明した。

ここで寸法比5/3倍のアストロラマホールに同じ材料で内装すると仮定した場合、残響時間周波数特性を相似則から計算して検討した結果、低音域の吸音構造体と拡散構造体を付与すれば、設計目標の1秒という残響時間周波数特性が実現できるであろう。

(b) エコータイムパターン

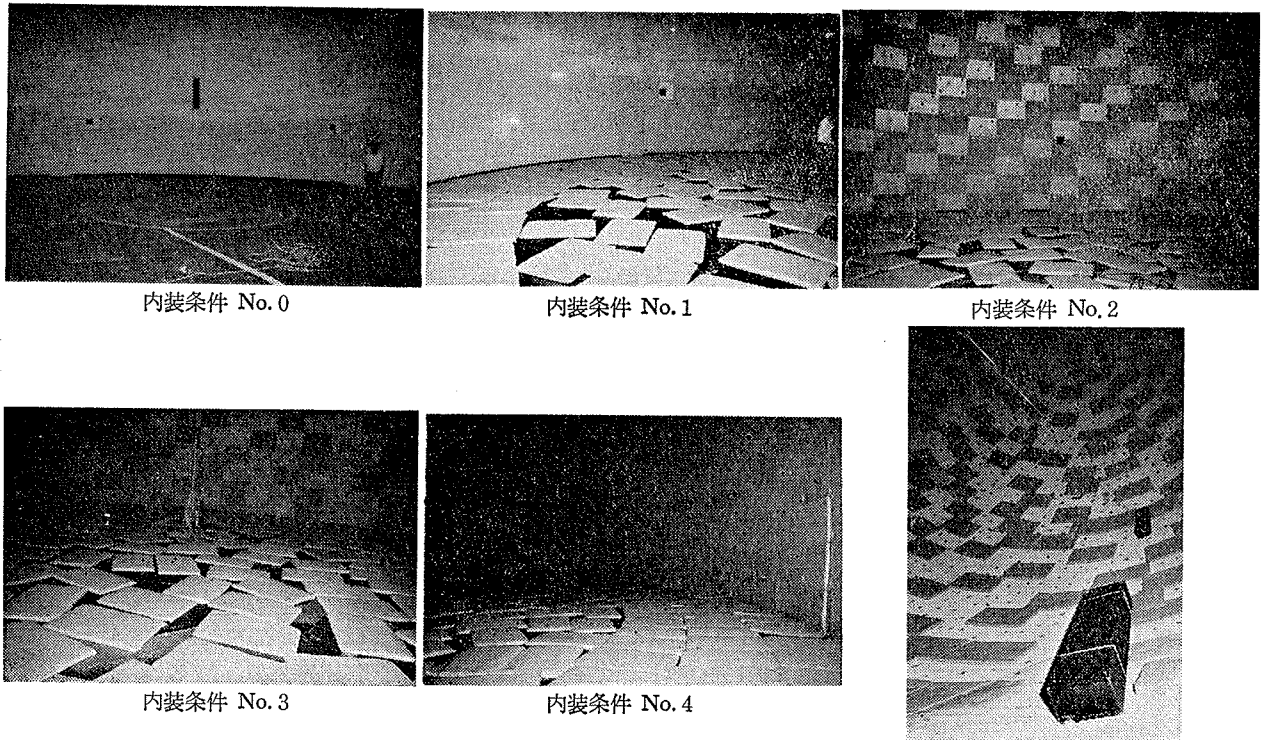


図-4 五藤光学 ドームにおける模型実験

使用スピーカーと天井を見る (No. 3)

純音パルス (200Hz—2.5msec, 800Hz—5msec, を 5,000Hz—5msec) 壁面のスピーカ (天頂, 壁中段部, 下段の3通り) から出し, 床面11ヶ所でエコータイムパターンを記録した。その一例を図-6に示す。これを検討した結果を要約すると,

- i) 普通形状の室に比べて, 反射音の密度が疎であり, しかも第1次反射音の到達時間が50msec前後で, 音響効果上に望ましくないパターンを示している。またほとんどの場所で約100msec前後にレベルの大きな第2次反射音が見られる。
- ii) 内装材の吸音率が0.8をこえる800Hz以上の周波数のパターンに着目すると, 内装面積を増すとともに反射音のレベルは小さくなる。しかし床面の吸音 (人間立位程度の吸音) では場所によってロングパスエコーが残る。
- iii) 天頂スピーカーに対して, 床面中央部においてエコーがもっとも著しい。
- iv) アストロラマドームでは, 反射音のおくれ時間はこの場合の5/3倍となり, 障害はさらに著しくなるので, 反射面には拡散体が必要となる。

(c) 音圧分布

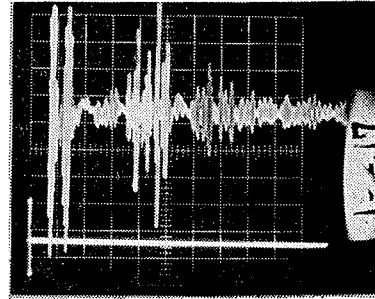
1/3オクターブバンド雑音を用い, 周波数100Hz—12,500Hzの範囲で, 床面23点での音圧を測定した。床面の音圧レベルの最大値と最小値の差を各内装条件ごとに示すと, 図-7のようになる。結果を要約すると,

- i) 床面上の音圧レベルの分布は, 室の吸音力を増すほど, また同一条件では周波数が高くなるほど不均等になる。約1,000Hz—2,000Hzの周波数範囲では, 内装なしの条件 No. 0 の場合で $\pm 5\text{dB}$ が, 全面吸音とした条件 No. 4 の場合で $\pm 10\text{dB}$ となる。
- ii) 床面上の音圧分布はスピーカの軸方向よりも軸と直角方向の方が均一である。壁中段のスピーカではスピーカ真下の音圧レベルが低下する。これらの現象は音源のトーンゾイレの指向性およびスピーカの取り付け方向によるもので, 壁中段および天頂のスピーカはとくに指向性を考慮して取り付け角度をきめることが大切である。

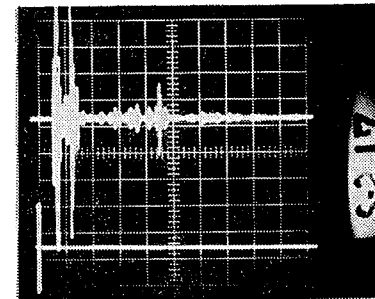
(d) 試聴結果

低音域の吸収が不十分な内装処理では一般の番組音の試聴実験は無理な点があるが, 中高音域の音のひびきの質, 方向感などに着目して評価結果をまとめると,

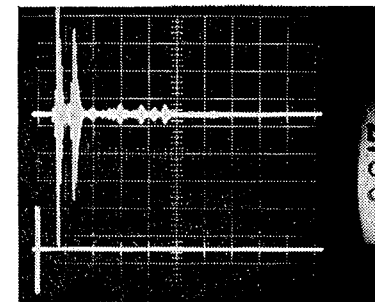
- i) 未処理条件 (No. 0) の状態では音の明瞭性をかき, 使用できる状態ではない。
- ii) これと対称的に全面を吸音処理した場合は, 音の明瞭性は確保できるが, 音楽番組などはひびきが全く



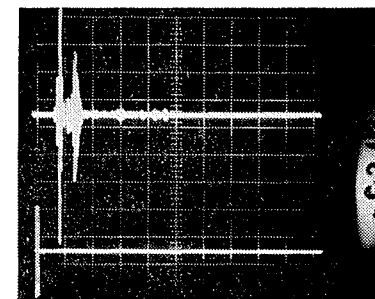
—No. 0 吸音処理なし



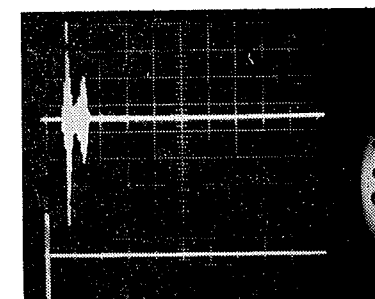
—No. 1 床面のみグラスウール



—No. 2 床面および壁, 天井 1/3
グラスウール



—No. 3 床面および壁, 天井 1/3
グラスウール



—No. 4 床面および壁, 天井
全面グラスウール

スピーカ位置: 壁中段 周波数: 800Hz
マイク位置: 17
パルス幅: 5msec 時間軸: 50msec/div
図-6 エコータイムパターン測定例

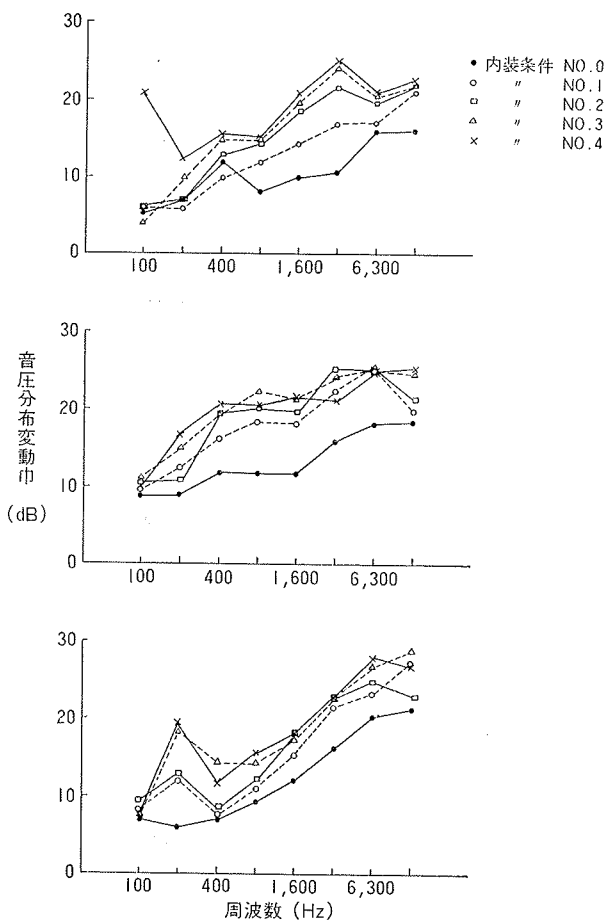


図-7 内装状態と音圧変動巾

伴わないため不自然となる。また場所による音の大きさ、音色の違いが著しい。試聴結果で、もっとも好ましい内装は条件 No. 2, 3 (壁面1/3, 2/3吸音)の状態である。

iii) 壁面 1/3 程度の吸音状態においては、エコータイムパターンでロングパスエコーが多少観測されたが、実際の番組音再生では感知できなかった。また音の方向感も障害されないことがわかった。

(3) 結論

モデル実験で得られた結論をとりまとめると次のとおりである。

a) 半球形ドームの壁面から音を再生する場合は、床面のみの吸音ではロングパスエコーが残り再生音の明瞭性を欠く。

b) 壁面の吸音構造としては、低音域まで含めた全帯域を吸音する構造が必要である。特に低音域の吸収は重要である。

c) 望ましい吸音の程度は、残響時間を約 1 秒としてエコーの状態、床面の音圧分布、再生音の音響効果など多角的に考慮すれば、壁面の 1/3 に吸音率ほぼ 1 に近い吸音構造を設置した程度 (平均吸音率で約 60%)

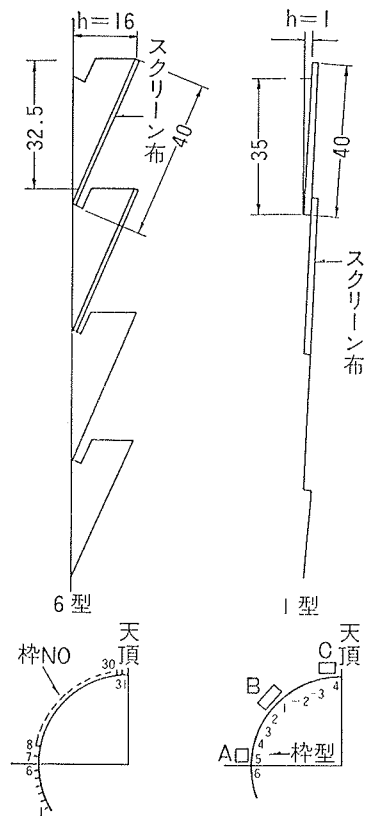


図-8-A スクリーン断面図

アストロラマスクリーン枠寸法

枠NO.	型	h (mm)	1枠内のテープ本数 (本)	枠高さ (mm)	枠幅 (mm)		全周上の枠数
					下	上	
下端 1~6	6型	16	27	882	No 1 .739 No 6 .785	753 786	120
7	"	"	29	939	785	785	"
8~10	5型	13	"	"	No 8 .785 No 10 .772	780 761	"
11~13	4型	10	28	"	No 11 .761 No 13 .730	747 710	"
14~15	3型	7	27	"	No 14 .710 No 15 .688	688 663	"
16~18	2型	4	"	"	No 16 .663 No 18 .605	635 572	"
19~21	1型	1	"	"	No 19 .372 No 21 .501	538 462	"
22~24	逆1型	1	"	"	No 22 .462 No 24 .379	431 335	"
25~26	逆2型	4	"	"	No 25 .670 No 26 .580	580 488	60
27~29	"	"	28	1014	No 27 .488 No 29 .564	385 352	60 30
30	逆3型	7	43	1353		352	68
天頂門蓋 31	逆4型	"	10	323			1

△ 5~2型は6型と1型の間でhのみ上表のようになる。
△ 逆1型は1型を上下逆向で使う、逆2~4同様

図-8-B アストロラマスクリーン枠寸法

が望ましい。

d) ドーム内の音場を拡散させ、普通の残響理論を適用して設計を行なう事を可能にし、音圧を均一化するためにも壁面には拡散体を設置する必要がある。

e) 天頂スピーカからの発生音に対し、床中央部分で

は特にエコーが著しいので中央部の使用はできるだけさけることが望ましい。

f) スピーカの指向性, 取り付け角度に注意すれば, 原則として天頂, 中段, 下段の各スピーカ配置で, 床面上のほぼ均等な音圧分布と自然な方向感が確保できる。

4. スクリーン

アストロラマにおいて映写スクリーンが映写効果, 音響効果を左右する重要なポイントであることは明らかで, スクリーンの開発は光学上からも基本的検討から行なわれた。当初の開発目標として, 音響的には透過率90%以上, 背後の吸音構造体を含む吸音率は95%以上の構造を実現することであり, また散乱光を防ぐため客席面への指向反射性のすぐれた構造のものを実現すること, などが設定された。この目標に対して日本レーヨン(現ユニチカ)よりいくつかの候補が提案され種々検討の結果, 最終的に決定したスクリーン構造は日本レーヨン製ナイロン平織りのものでテープ状とし, 波形木枠に二重に張ったものとなり, 映像の光を観客席に向け有効に反射し, 他方向への反射を防止するためスクリーンの位置により波形の角度が変わったものとなった。図一8に断面図を示す。

5. 吸音構造体, 拡散構造体の開発

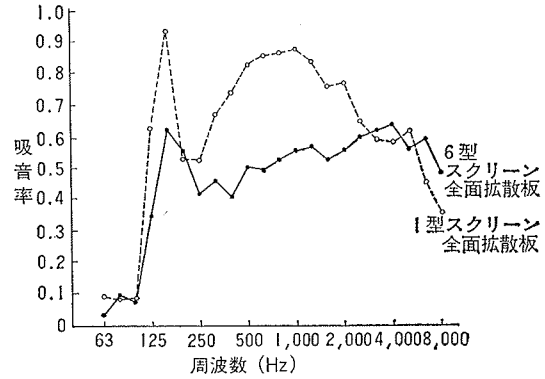
モデル実験の結果から明らかなようにアストロラマホール壁面には全体域吸音構造体が必要である。また拡散体を取り付けることにより音場が改善され, 音圧分布の改善も得られるので目標残響時間の範囲で拡散体を設置することが望ましい。いままでもなくこれら吸音構造体, 拡散体の前面にはスクリーンが設置されるのでスクリーンを含めた音響特性を検討しなければならない。

(1) 吸音構造体の具備条件

- a) 低音域(約100Hz)から中高音域にわたり, 平均吸音率で50~60%の平坦な吸音特性であること。
- b) 建築構造上の制約から, 下地材まで含めて, できるだけ軽量であること。
- c) 映写スクリーン背後の色は映写効果の上から白色であること。

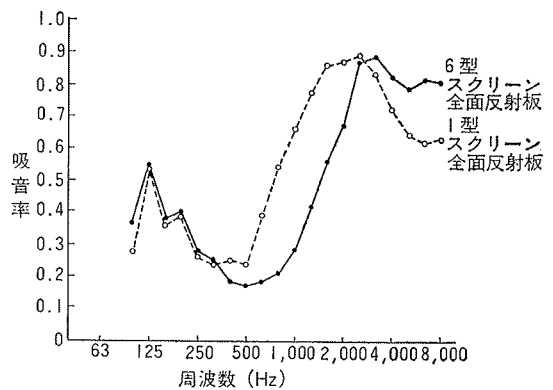
(2) とりあげた主な吸音構造体とその吸音率

吸音率の測定は44年4月から5月にわたり当技研の残響室($V=218\text{m}^3$)で行なった。スクリーンはテープ状の1形, 6形(図一8参照)を用い, スクリーン背後の条件として, 全面吸音材, 1/2吸音材+1/2拡散材, 全面拡散板, 全面木毛板下地, 全面拡散板(ガラスウール裏打ち), 全面反射板の6種類について測定



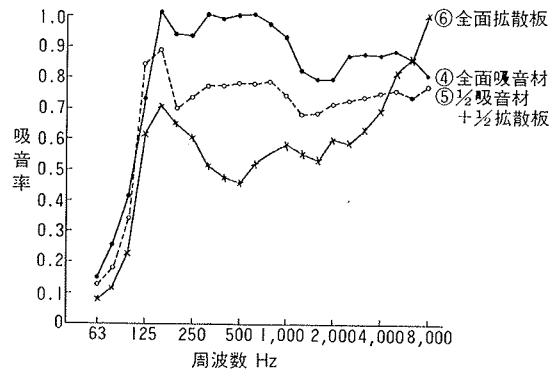
140 I スクリーン
ベニヤ拡散板(5.5mm)
木毛板

図一9-1 拡散体吸音率

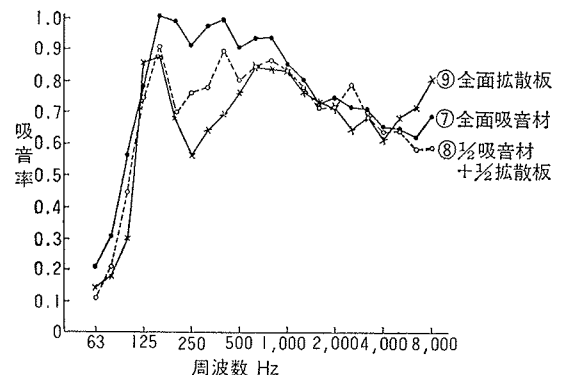


140 I スクリーン
ベニヤ(5.5mm)
木毛板

図一9-2 反射板吸音特性



図一9-3 6型スクリーン吸音率



図一9-4 1型スクリーン吸音率

した。測定結果のうち主なものを図-9に示す。拡散板、反射板は5.5mm厚ベニアで、その大きさは70×85cmである。拡散板は70×85cmの板を傾斜させたもので、一辺を14cm持ちあげた形になっている。測定結果によれば、テープ状二重波形スクリーンそのものの吸音率はかなり大きく平均吸音率を50~60%にもっていくためには吸音体のみでは大きくなりすぎるので拡散体を取り付ける余地は十分であるので、吸音面と拡散面のほかに反射面を設け、これらを分散配置することとした。

6. 内装設計

前節で述べた、スクリーンを表面にもつ吸音構造体の吸音率をもとに内装設計を行なった。

- a) 残響時間は、観客800名収容時にほぼ1秒、全周波数域でできるだけ平坦な特性とする。
- b) 天井面は吸音体、拡散体、反射体をそれぞれ分散配置する。
- c) 壁面（スクリーン下）は吸音面と反射面を分散配置する。
- d) 収容人員は800名位、床は厚さ4.5mmのじゅうたんとする。

以上の設計方針により残響時間の計算を行ない各材料の面積を検討した結果、天井面は吸音体、拡散体、反射体をそれぞれ1:1:1の割合で良い事が判明した。これら吸音、拡散、反射構造体の配置を図-10に示す。

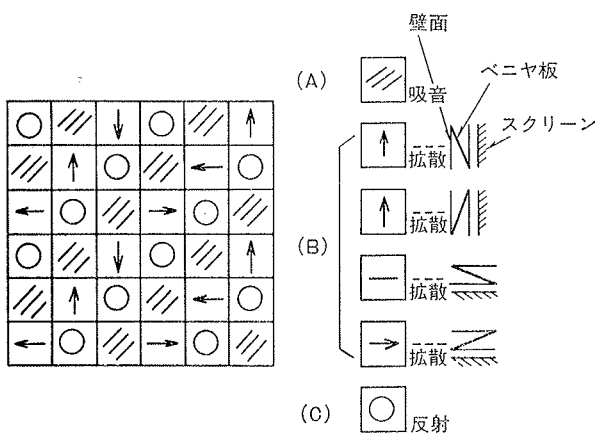


図-10 吸音体、拡散体、反射板スクリーン面分散配置方式

(2) 残響時間の推定

ホール内残響時間を前述の検討結果によって計算し、図-11に示す。この計算結果はホール内が吸音、拡散、反射構造体の分散配置によって拡散状態が得られるならば、かなりの精度で合うはずである。一方拡散が十分でない場合はモデルドームの場合のように計算推定

値は一致しないであろう。アストロラマホールの場合にはドーム内の音場は拡散体、反射体によってかなり拡散状態に近いものとなると考えられる。

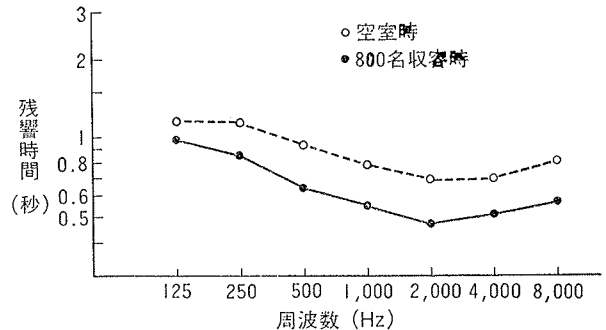


図-11 アストロラマホール残響時間設計値

7. ドームの騒音防止設計

ドーム内の騒音条件は直接映写音響効果に影響する。万博会場の外部騒音に対する外壁の遮音構造の設計と空調設備騒音に対しての必要処置を検討した。

1) 許容騒音レベル

アストロラマホールは立席の劇場であり、観客自身からの発生騒音もかなりのレベルに達すると思われる。しかしプログラムの方ではかなりの微弱音の再生も予定されていることを考慮し、場内の許容騒音をNC-35とした。

2) 関与する騒音源

場外の騒音は全く未知であるが、前回のモントリオール博の場合に準じて会場の騒音規則が行なわれるはずである。そこでヘリコプターなど取材活動による騒音はある程度考慮しておかねばならない。

また場内には空調設備が設置されるが、当然その騒音防止処置を行なわねばならない、さらに5台の映写装置の冷却装置はかなりの騒音源であるが、これは場内に露出せず周辺の映写室に設置されるので映写室内の吸音処理だけの対策をとった。

3) ドーム遮音構造の検討

アストロラマホールは建設費や解体時の費用などから外壁は鉄骨に強化プラスチック F.R.P. 板張りの構造が採用された。これに対して音響的には雨の音に対する対策の必要性から、F.R.P.板構造と独立した遮音層を設けることを強く要望した結果、図-12に示すような外壁構造となった。この構造に対して検討を行なった。

a) 吸音層を除く F.R.P. 板、モルタル遮音構造体の透過損失の周波数特性を計算した。500Hz で約 35dB である。

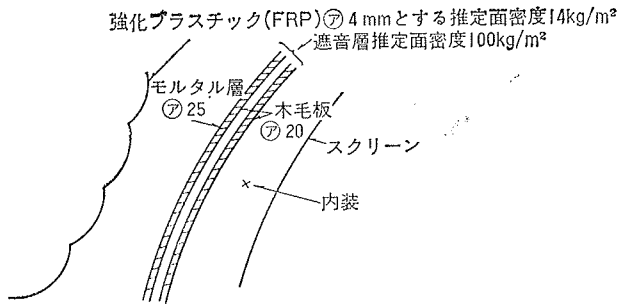


図-12 透過損失の推定にあたって対象とした外壁構造

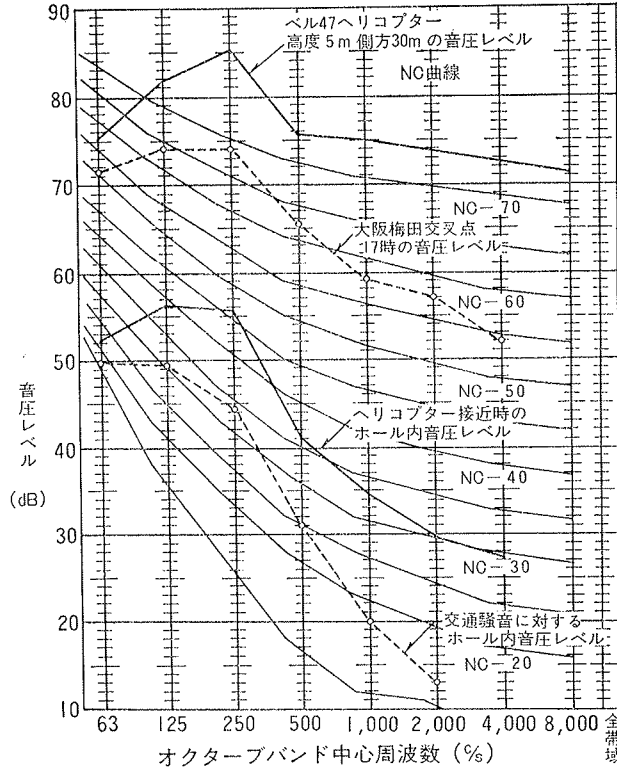


図-13 ホール内騒音レベル推定

b) 通常の外部騒音として都心交叉点程度の街路騒音およびヘリコプター接近時の騒音を考え、ホール内騒音の音圧レベル推定値を図-13に示す。これを見るとヘリコプターの接近というケースを除いて外部騒音の遮音は十分である。

8. ホール完成後実物試験

44年10月、みどり館アストロラマホールが完成したので現場において、音響設計の確認と不備な点をチェックすることを目的として音響特性を測定した。

1) 残響時間

測定法はモデル実験と同じで、測定点は5点、周波数範囲は63~8,000Hz、測定回数は63~250Hzで15回、315~1,600Hzで10回、2,000~8,000Hz 5回である。

測定結果を先に述べた計算結果と比較して図-14に示す。これを見ると半球形ドームの特殊性として予期

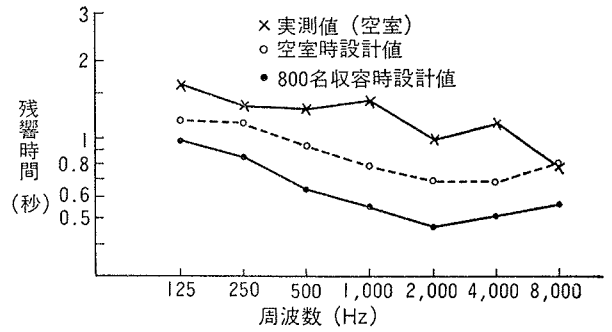


図-14 アストロラマホール残響時間

した通り、計算値よりやや長めの残響時間が得られており、結果的に観客収容時に目標値である全周波数域でほぼ1秒という値になることが確認された。測定結果は計算値よりやや長めであったがモデル実験の時のような大幅な相異ではない。これは実物ホール内の音場がかなり拡散されていることを示しており拡散体の効果も十分認められる。

2) 音圧分布

ホール内4点で、スピーカ天頂、中段、下段からの出力音圧分布を測定した。測定法はモデル実験で用いた1/3オクターブバンド雑音による方法である。これによるとスピーカに垂直な方向では±1.5dB以内に入っており、良好な分布を示している。

3) エコータイムパターン

スピーカ天頂、中段、下段+補助より発音し、床上11点で観測した。その結果を整理すると、

- モデル実験で推定したように100msec以上の時間遅れの反射音が現われているが、そのレベルは時間とともに漸次減衰している。
- 高音域ではモデル実験の場合よりも反射音が密に到来していて、拡散板が有効に作用していることを示している。
- 全般的に見て障害のあるエコーは発生していない。実際のプログラム音を試聴した結果でもエコーは全く感知できなかった。

以上実物ホール測定の結果、アストロラマホールは期待どおりの効果が得られており、ホール内音響処理は所期の目的を達しているといえよう。

結語

42年以来2年半の歳月を費してアストロラマホールとその全般の設備が完了した。われわれがこの企画に参画できた事を喜びとするとともに御指導いただいた委員会の方々および再生装置を担当した日本無線KK、スクリーン担当のユニチカ、映写装置担当の五藤光学

研究所，当社建築部門担当の関係者各位とコージネーターの役割を果たされた渡貫 敏男氏に深甚の謝意を捧げます。

音響委員会のメンバーは下記の方々であります。

九州芸術工科大学 牧田 康雄教授

九州芸術工科大学

東北大学

N・H・K放送科学基礎研究所

NHK総合技術研究所

日立製作所中央研究所

北村 音壹教授

城戸 健一教授

中島平太郎所長

永田 穂部長

三浦 種敏主管