

アストロラマ超立体音響システム

Super Stereophonic System for Astrorama

永 田 穂* 真 藤 利 孝**
 Minoru Nagata Toshitaka Shindô
 船 津 一 満*** 三 浦 種 敏****
 Kazumi Funatsu Tanetoshi Miura

Abstract

Back in September 1967, Midori-Kai (a group of commercial and industrial enterprises) engaged consultants for a superstereophonic system for the Astrorama Hall in the Midorikan Pavilion at EXPO '70. Hitachi, Ltd. was commissioned to undertake system design, coordination of work progress, and inspection of completed work. Ohbayashi-Gumi was assigned to construction of the entire pavilion including the interior of the Astrorama Hall and soundproofing, and Japan Radio to manufacture and install the acoustic equipment. The pavilion was completed in November 1969, equipped with the motion picture projection system covering the dome ceiling and the accompanying superstereophonic system with 11 acoustic channels. The target acoustics were achieved, as reverberation time in the hall was limited to 1 second, noise level was held at a maximum of 40 phons, and the maximum sound pressure level for no-distortion reproduction were at least 100 dB. The superstereophonic system has exhibited excellent performance in terms of sound directionality, separability, clarity, and sound pressure uniformity in all parts of the hall. This paper gives a general description of the sound-reproduction system.

1. 緒 言

昭和42年9月、三和銀行系32社で結成されたみどり会より、全天全周映画システム“アストロラマ”の超立体音響再生設備についてのシステム設計、進行管理、施工検収を内容とするコンサルタントを日立製作所が受けた。

この“アストロラマ”は、図1に示すような直径30m、高さ23mの半球形大ドームの内面、約2,000m²(シネマの約12倍の面積)のスクリーンに5台の70mm(8パーホレーション)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1,000人の予定のものである。

これに配するステレオシステムとしては、次のような幾多の問題に直面することが予想された。すなわち

- (1) 面積2,000m²のスクリーンは画面効果を高めるため、映像の光を観客席に向け有効に反射し、他方向への反射を抑制する設計となろうが、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、明りょう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) プログラムの内容に依存して迫力のあるきわ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。またこれに伴って外部騒音に対する建物のしゃ音と、内部空調設備の騒音抑制も考慮しな

* NHK総合技術研究所 工学博士
 ** 大林組 技術研究所
 *** 日本無線株式会社
 **** 日立製作所中央研究所 工学博士

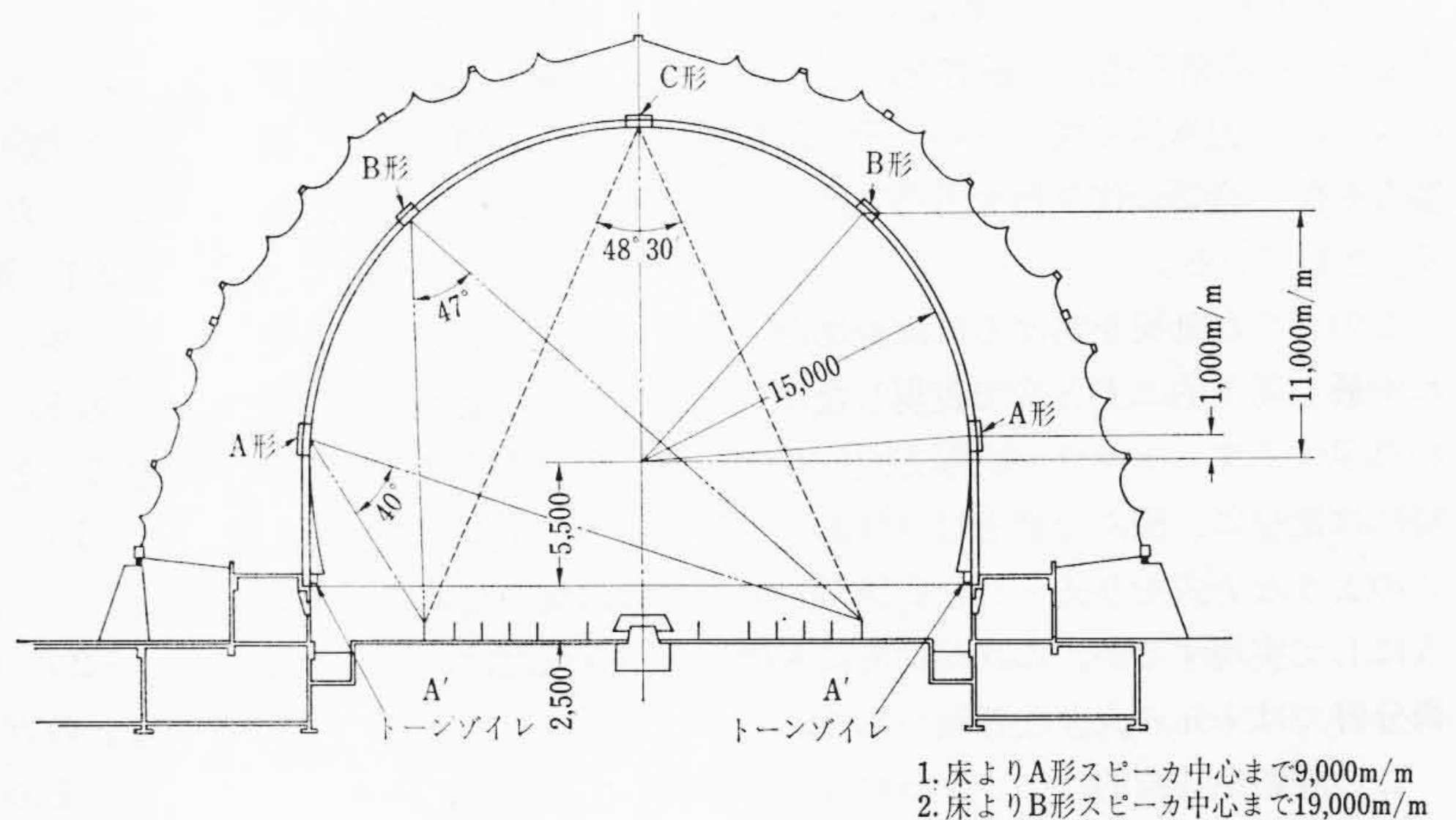
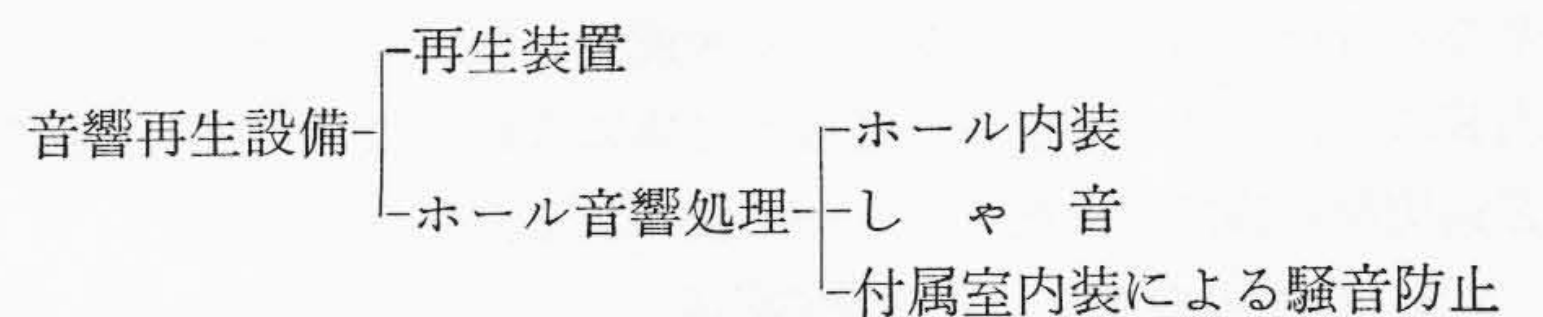


図1 みどり館アストロラマホールの概略図

Fig. 1. Cross Section of Astrorama Hall

ればならない。

以上のように“アストロラマ”の総合音響効果は、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、しゃ音、騒音防止などを含め、下記の各項の相互関係を調整しながら総合的にコンサルタント業務を遂行することにした。



また世界に前例のない新しい問題に対処するため、システム設計当初から斯(し)界の権威である下記のかたがた

九州芸術工科大学 牧田康雄教授
 九州芸術工科大学 北村音壹教授
 東北大学 城戸健一教授

NHK放送科学基礎研究所 中島平太郎 所長

NHK 総合技術研究所 永田穂 部長

にご協力を依頼し、音響委員会を結成して検討を進めた。

仕事の進め方としては、

- (1) 第1次仕様書を作成し、みどり会で音響再生機器のメーカーを決定する。
- (2) 半球形ドームのモデル実験を行ない、基礎資料を収集する。
- (3) スクリーンの担当のかたがたと密接な連絡をとり、サンプルについて音響特性を測定する。
- (4) 本仕様書を作成する。
- (5) 機器検収の援助を行なう。
- (6) 設備施工の検収を行なう。
- (7) 演出・録音担当のかたがたとの打合せおよびダビング立会。
- (8) 最終聴感テストと基本性能の確認、試験運転立会。

の各項目をみどり会の総合スケジュールにそって推進したが、このうちで機器メーカーとしては日本無線株式会社が決定され、ホールのモデル実験には五藤光学研究所のプラネタリウムホールを利用させていただき、スクリーンおよびその背後の音響処理についての基礎実験は大林組技研、NHK技研の実験設備を使用して行なった。

2 個年半にわたる実際の経過は、多少の問題障害に遭遇し曲折を経たが、完成した音響設備はホール残響時間1秒で、無歪(わい)最大出力音圧は100dBを超え、聴感上観客席での音圧分布、方向性、分離性、明りょう性など満足すべき結果を得たものと考えている。

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、みどり会によると「一歩踏み込んだ観客を、そこに展開する映像と音響の世界にすっぽり包み込んでしまい、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が要求される。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。

この課題を技術的にいくつかの問題に分解してみると、

2.1 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1,000名の観客にはできるだけ場所によるむらのないサービスが望ましい。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になる。

2.2 適当な残響と音圧分布

12,000 m³を越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パルスエコーも大きく、再生音が明りょう性を欠き、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。

2.3 ひずみの少ない大音響の再生

壮大なスクリーンを利用した迫力ある映像場面を想定すれば、当然大音響出力を予想しておかなければならない。しかも前項で述べたように残響時間をあまり大きくとれないという条件もある。したがって音色を害さずに大音響を出すためには、再生チャンネルの数を増すのみならず、それぞれのチャンネルがひずみの少ない、良い品質

の音を高レベルまで出すことが必要である。

この問題にもスクリーンの音響特性(透過率)が関係し、光学的問題がからむことが予想される。

2.4 微弱音の再生

シナリオの内容として、アクセントを考慮した動から静、静から動への転換を予想すると、静の中の微弱音の再生も考慮しておかなければならない。前項で述べた大出力装置においては必然的にノイズも増すので、特に微弱音を出す場面では、信号を高レベルで録音しておいて、再生出力増幅器の段階で信号を雑音とともに低レベルに絞るような手段を講ずることが必要となる。

2.5 ドームのしゃ音と付属室設備の騒音防止

上記のような低レベル音または無音時には、ドーム外から騒音が浸入したり、映写機、空調設備などの騒音が漏れて耳ざわりになっては困る。観客が満員になった場合の多少のざわめきを想定(約40ホン程度)し、これに見合った騒音レベルに押えるようにしゃ音ないしは騒音制御が必要である。

2.6 操作の自動化

映像との同期、大音響と微弱音の転換などを考えると、当然音響再生方式は自動制御方式をとらなければならない。また磁気録音テープの自動巻戻しも現場オペレーションでは必要となろう。さらにまた機器の故障時には、手動にしても故障の発見・対策を迅速に行ないうよう考慮しておく必要がある。

同期の問題は映写方式およびシナリオ・演出・録音担当のかたがたとの密接な連絡を必要とするだろう。

3. 基本検討

2. にあげた問題点に対しては、昭和42年10月から44年6月にわたり実験あるいは調査検討を行ない、その結果を逐次実際の設計に導入した。その概要を次に述べる。

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なに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

- (1) 音響設備、とくに録音再生機(テープレコーダ)がコスト高となり、製造に時間がかかる。
- (2) 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くてはならない。

以上のような番組の要求する音響効果の多様性、テープレコーダの発注時期、番組制作期間などを多角的に検討し、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を進めた(42年10月)。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(43年5月)、音響プロデューサの黛敏郎氏から再生チャンネル数は5の倍数+天頂の希望があったこと、3.2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ブロック位でじゅうぶんであることを確認できたことなどから、図2のような11チャンネルを決定した。Aスピーカは、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 モデル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上げられた。

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、むしろ電気音響再生設備からの音に対して聴感上の効果を総合的には握ることであった。したがって音響委員会として

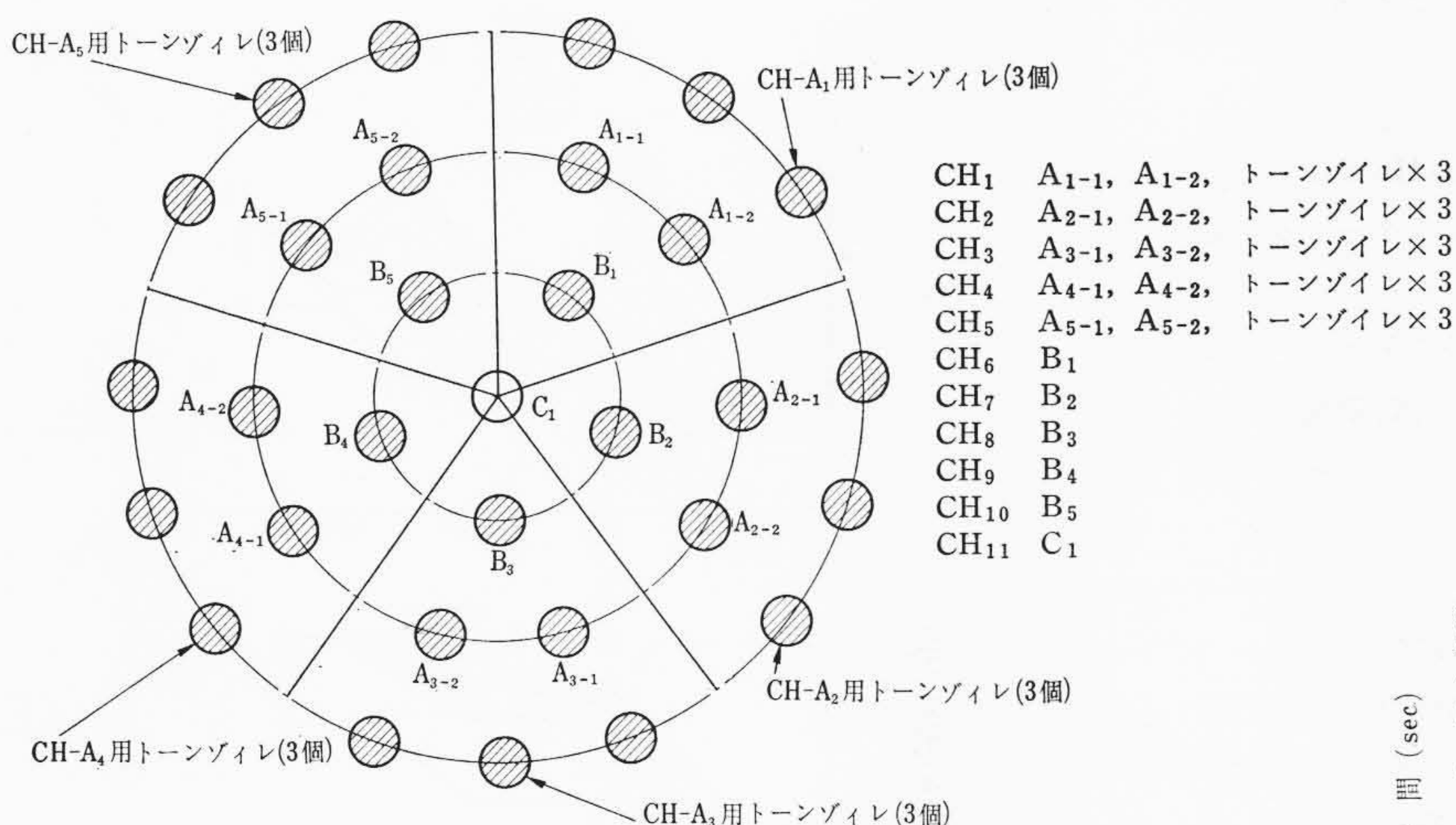


図2 スピーカの種類と配置
Fig. 2. Arrangement of Speakers

は1/1のモデル、少なくとも1/2スケールモデルを要望した。

また光学部門からも別個に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、東京都府中市の五藤光学ドーム(直径18m)を利用して音響・光学両方の実験を行なうことをみどり会が決定した。そこで43年6月モデル音響実験計画を組み、同年7月から9月まで大林技研、日本無線によって実験を行なった。

(1) 実験の目的

半球形のドームはスペース利用率が高く、建築費が安価であるなどの理由で、大形の体育館、展示場などで採用される例が多い。しかしじゅうぶんな吸音処理を行なわない限り、図3に示すようなロングパスエコーが著しく、体操競技や一般催物においても障害となることが報告されている。したがって音響委員会としては当初、みどり館のスクリーン仕上げ面の形状に関係なく、スクリーン背後空間を自由に音響空間として利用できる構造を提案したが、本ドームは万国博期間中だけの建築であり、建築費ばかりでなく万博終了後の解体作業の経費などの条件から、鉄骨FRP板張りの図1のような構造が最終構想として打ち出された。

このような半球状の空間で生ず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。しかし吸音処理を極度に実施し、自由音場に近い空間とすると、

- (i) 必要なスピーカ音響出力は非常に大きくなる。
- (ii) スピーカ近傍の点と遠い地点との音圧レベル差が著しくなる。
- (iii) 音場がスピーカからの直接音だけの音場となり、空間的な印象を得るためには、別のスピーカ群により反射音を付与しなければならない。

など音響効果の劣化や設備規模の増大など別の意味の障害も生じてくる。

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感知できなくな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、壁面で音を再生したとき、スピーカの位置、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)をは握し、電気音響設備の設計の基礎資料を得ることも目的の一つであった。

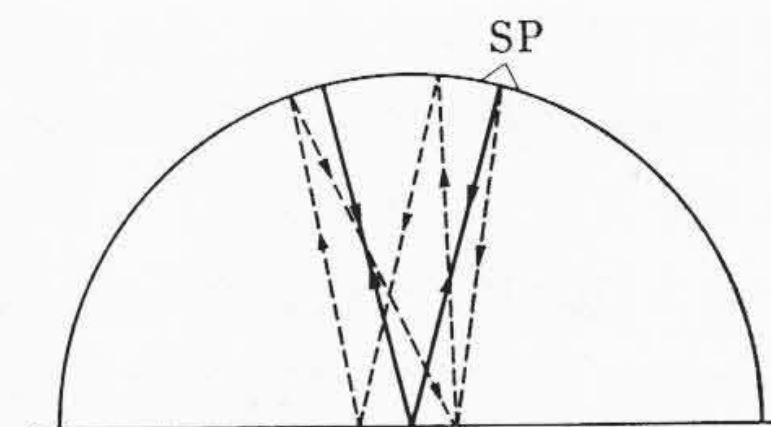
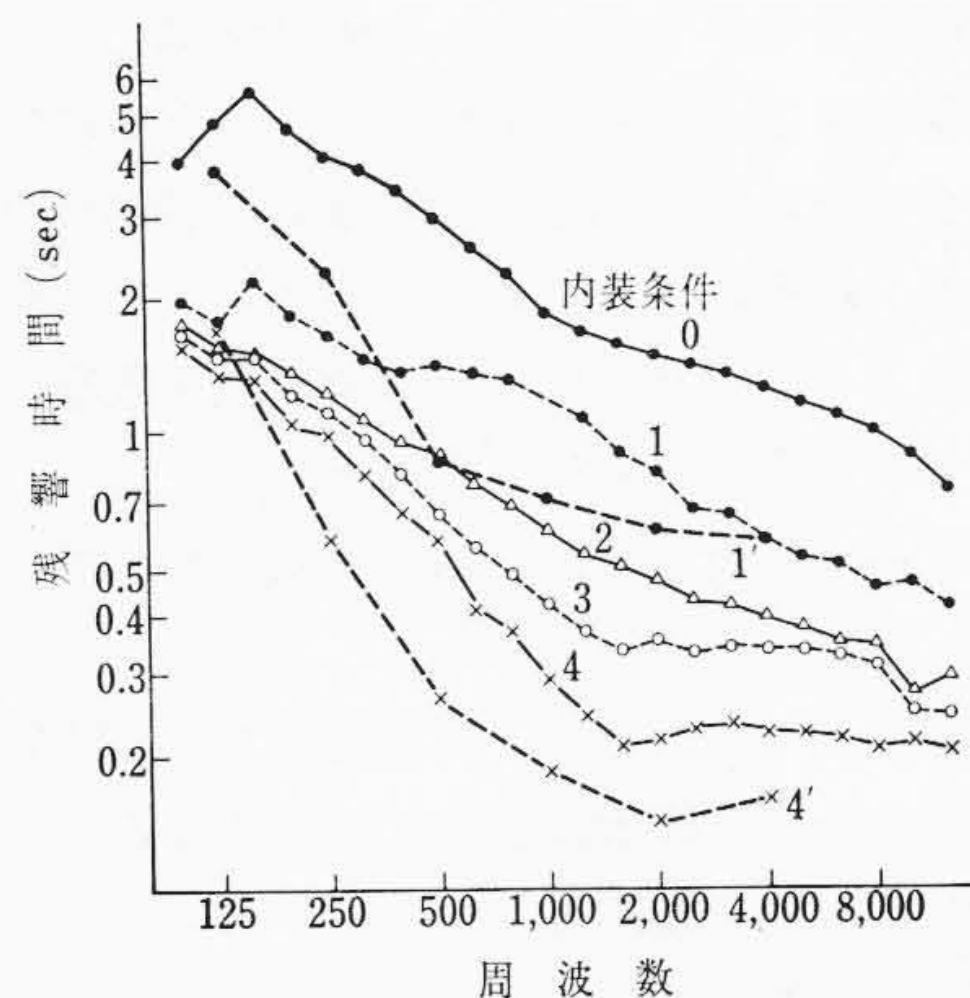


図3 半球形ドームで生じる
ロングパスエコー
Fig. 3. Model of Long Path Echo



(1', 4' は内装条件 1, 4 についての計算結果)

図4 五藤光学ドーム残響時間測定結果

Fig. 4. Reverberation Time Characteristics Measured at Gotô Planetarium Hall

表1 モデル実験の内装条件

Table 1. Acoustical Treatment of Model Hall

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

* メタルラス・トムレックス 20mm 吹付け

(2) 実験の方法と結果

五藤光学ドームの内装条件を、現状(トムレックス吹付け)から全面吸音まで5段階に変化させ(表1参照)、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、スピーカの配置条件などを検討した。

(a) 残響時間

1/3オクターブ雑音を用い、周波数範囲100~12,000Hzの残響を測定した結果は図4のとおりである。

空室(条件No.0)の残響時間は、低音で5秒を越え中高音域では1.5秒以下となる。また条件1と4の実測値に対応して計算値1'と4'を比較してみると、実測値が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。このことはきわめて重要なことで、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の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

散構造体を特別に付与すれば、設計目標の1秒という残響時間周波数特性の音場を実現できる見込みがたった。

(b) エコータイムパターン

純音パルス(200 Hz 25 ms, 800 Hz 5 ms, 5,000 Hz 5 ms)を壁面スピーカから出し、床面11個所でエコータイムパターンを記録した。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、反射音の密度が粗であり、しかも第1次反射音の到達時間が50 ms前後で、音響効果上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100 ms前後にレベルの大きな第2次反射音がみられる。
- (ii) 内装材の吸音率が0.8を越える800 Hz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)程度では、場所によってロングパスエコーが残る。したがってこのような形状の室では、全壁面を吸音性にしない限りロングパスエコーを生ずるおそれが想定された。
- (iii) 天頂スピーカに対して、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ろう。

(c) 音圧分布

1/3オクターブ雑音を用い、周波数100~12,500 Hzの範囲で、床面23個所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との差を各内装条件ごとに示せば図5のとおりである。

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となる。約1,000~2,000 Hzの周波数範囲では、内装なしの条件0の場合で±5 dBが、全面吸音とした条件4の場合で±10 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ほうが均一である。中段のスピーカ(B)ではスピーカ直下の音圧レベルが低下する。これらの現象は音源としたトーンゾイレの指向性およびスピーカの取付方向に依存するもので、中段(B)および天頂(C)のスピーカは、とくに指向性を考慮して取付角度を決めることがたいせつであろう。
- (d) カラーディスプレイ

下段(A)のスピーカから、にわりの鳴き声を再生したときのスペクトログラムを、内装条件0, 1, 2, 3について求め、原テープ音と対比した(表紙の裏・カラー写真4~8を参照)。これでは吸音面積を増すほど破裂音の切れが明りようになってゆく状況が観察できる。

(e) 試聴結果

低音域の吸収が不じゅうぶん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・高音域の音の響きの質・方向感などに着目して評価結果をとりまとめると、

- (i) 未処理(No. 0)の状態では音の明りょう性を欠き、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、音の明りょう性は確保できるが、音楽番組などは響きが全く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。試聴結果で最も好ましい内装は条件2, 3(壁面1/3と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

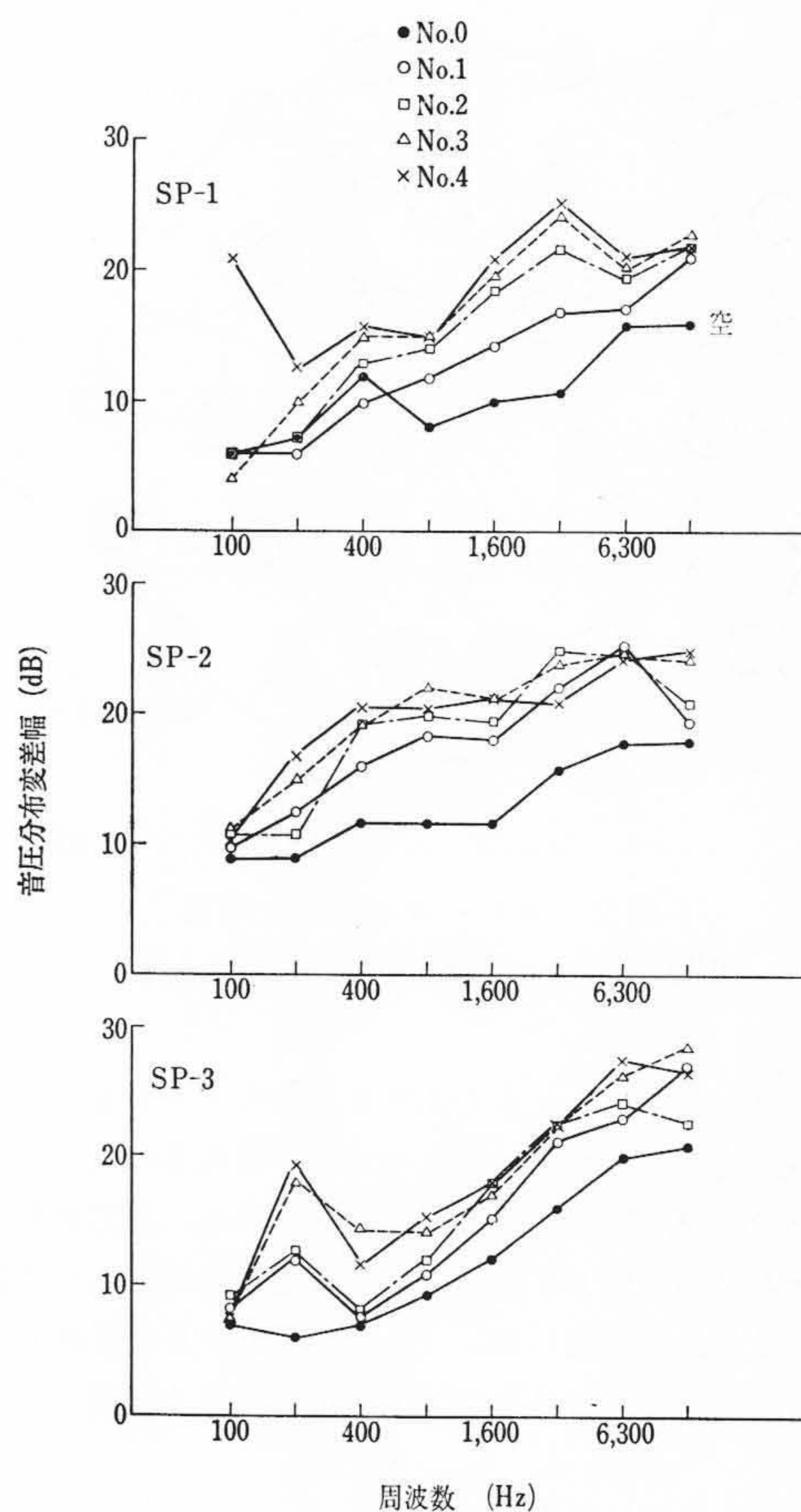


図5 内装状態と音圧分布変差幅

Fig. 5. Sound Pressure Difference Characteristics at Model Hall

再生では感知できなかった。また音の方向感も阻害されないこともわかった。

(3) 得られた結論

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りょう性を欠く。
- (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%)が望ましい。
- (d) 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。中央部の使用はできるだけ避けることが望ましい。
- (e) スピーカの指向性、取付角度に注意すれば、原則として天頂、中段・下段のスピーカ配置で、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と考えられる。

3.3 スクリーンの音響透過率の検討

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音響上からも基本的検討からスタートした。

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、光学的には、映写機入力にもよるが、ドーム頂点で照度50ルクス、壁面で40ルクス以上であり、散乱光を防ぐため客席面への指向反射特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

表2 スクリーン構造の変化の経過
Table 2. Changes of Astrorama Screen

年 月	名 称	構 造	音 響 測 定
43. 1	ディライト・タチ魚のうろこ	平 織 り	透 過 率 吸音特性 } 測定
43. 9	3 号 (日レナイロン製)		
43.11	4 号 (日レナイロン製)		
44. 4	3号改 ₂ (日レナイロン製)	テープ状、波形わく取り付け	透 過 率 吸音特性 } 測定
44. 6	新 1 形 (日レナイロン製)	テープ状、波形わく取り付け (1.5 重)	透 過 率 吸音特性 } 測定

表3 試作スクリーンによる音圧の減少 (単位 dB)
Table 3. Deterioration of Sound Pressure Level
by Tentative Screen (in dB)

スクリーン (スピーカ) の 種 類	音 圧 レ ベ ル の 低 下		最 大 音 圧 レ ベ ル**	
	音 量 (全帯域)	高 音 の み (5~8 kHz)	音 量 (全帯域)	高 音 の み (5~8 kHz)
1 形 (B形)	5~8 (7)*	7~10 (9)*	96	94
6 形 (A, C形)	2~3 (3)*	5~ 7 (6)*	100	97
全 ス ピ ー カ			102	

注：* ()内の数値は平均値を示す。
** 1組のスピーカへの電気入力を100Wとし、同形スピーカ5組を同時駆動した場合。

の目標に対して日本レーヨン株式会社(現ユニチカ)より幾つかの候補が提案され、その都度われわれは音響透過率の測定を行ない、素材の選択、構造の決定、そのほか必要な処置を検討し、逐次これら情報をみどり会に報告してきたが、最終的にスクリーン構造の決定をみたのは44年4月であった。ここには経過の概略と最終形スクリーンの音響特性について述べる。

(1) 採りあげたスクリーンの種類と構造

表2は提案されたスクリーンの経過を示したものである。

(2) 音 響 透 過 率

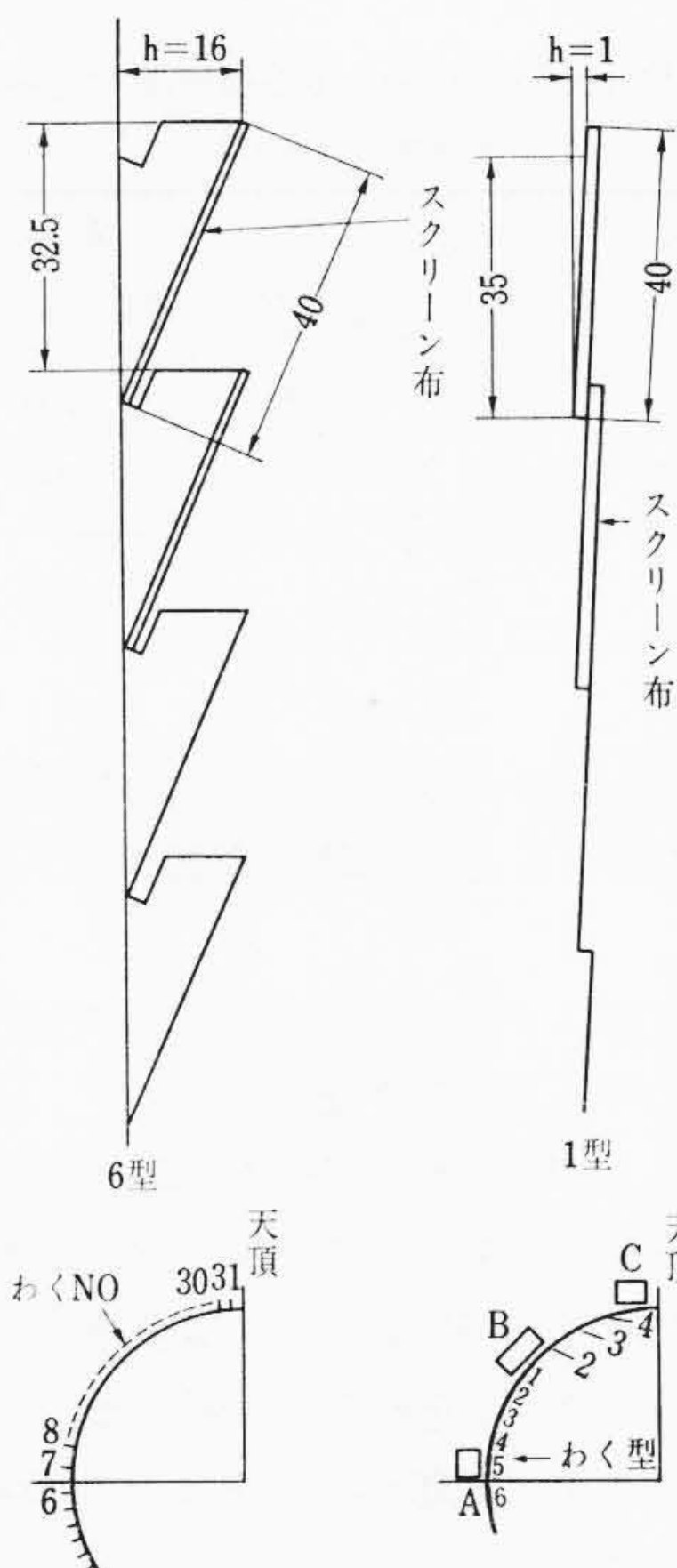
測定は日本レーヨン社製ナイロン手織りの3号、3号改、4号のスクリーンで行なわれたが、高音域の出力音圧に最も影響の少ないものは3号改であった。しかしその後、光の反射率、指向性の向上を図るため、3号改の細い横糸を太くし目のつまった織りの3号改₂が開発され、しかもこれをテープ状として波形木わくに二重に張ったスクリーンが提案されてきた(図6参照)。

このうちで最も透過率の小さい構造である1形と、最も透過率が良い6形について、音圧および音響パワーの両方から透過損失を測定検討した結果は、表3に示すように1形(スピーカBの前に張られる)の損失が特にはなはだしい。すなわち全スピーカを同時に駆動した場合、最大音圧レベルは102dBとなり、変更前(3号改の手織り)の最大音圧レベル106dBに比べて4dBの低下となり、さらに高音レベルは3dBも低下した。

そこで最大音圧レベルをあげるための対策として

- スピーカ前面のスクリーンを音響透過性の良い生地に変更する。
- スピーカ(増幅器を含む)を増設する。
- 上記(a),(b)を併用する。

ことが考えられるが、(b)の場合4dBの音圧レベルの低下を補うには現用の2.5倍のスピーカ(増幅器を含む)が必要になる。したがって予算、工期、施工などあらゆる観点からスクリーンによる対策のほうが比較的容易なので、B形スピーカ前面の1形スクリーンを現用生地1枚にし、これにもっと音響透過性の良い、しかも光学的に



アストロラマスクリーンわく寸法

わ く No.	形	h = (mm)	1わく内の テープ本数 (本)	わく高さ (mm)	わ く 幅 (mm)		全周上の わく数
					上	下	
下端 1~6	6 形	16	27	882	No. 1 739 No. 6 785	753 786	120
7	6 形	16	29	939	786	785	120
8~10	5 形	13	29	939	No. 8 785 No.10 772	780 761	120
11~13	4 形	10	28	939	No.11 761 No.13 730	747 710	120
14~15	3 形	7	27	939	No.14 710 No.15 688	688 663	120
16~18	2 形	4	27	939	No.16 663 No.17 605	635 572	120
19~21	1 形	1	27	939	No.19 572 No.21 501	538 462	120
22~24	逆1形	1	27	939	No.22 462 No.24 379	431 335	120
25~26	逆2形	4	27	939	No.25 670 No.26 580	580 488	60
27~29	逆2形	4	28	1,014	No.27 488 No.28 564	385 352	60 30
30	逆3形	7	43	1,353	352	68	30
天頂円蓋 31	逆4形	7	10	323			1

注：1. 5~2 形は6形と1形の中間でhのみ上表ようになる。
2. 逆1形は1形を上下逆向で使う。逆2~も同様

図6 アストロラマスクリーンの構造
Fig. 6. Construction of Astrorama Screen

はあまり効果の下がらない生地を裏打ちした“1.5重”スクリーンに変更し、なお不足な分は最小限のスピーカおよび増幅器の増設で補うことを提案した。

この結果開発された新1形スクリーンを日本レーヨン社で光学的性能も確認したうえ、音響透過特性を測定した結果は、1形よりかなり改善されほぼ6形の特性に近いことを示した。

B形スピーカの前面のみ新1形スクリーンに変更し、そのほかは二重スクリーンとした場合、スクリーンによる音圧レベルの低下、およびホール内最大音圧レベルの推定値は表4のとおりである。

すなわち、B形スピーカの放射音量が4dB(2.5倍)増加する。しかし全スピーカを駆動したときの最大音圧レベルは、変更前スクリ

表4 最終決定スクリーンによる音圧の減少 (単位 dB)

Table 4. Deterioration of Sound Pressure Level by Final Screen (in dB)

スクリーン (スピーカ) の種類	音圧レベルの低下		最大音圧レベル	
	音量(全帯域)	高音のみ (5~8 kHz)	音量(全帯域)	高音のみ (5~8 kHz)
新1形(B形)	2~3 (3)	5~7 (6)	100	97
6形(A, C形)	2~3 (3)	5~7 (6)	100	97
全スピーカ			103	

ーン(日レ3号改, これによってスピーカ増幅器の設計, 製作を進行させた)の場合に比べると, 3 dB (音響パワーで 1/2) の損失がある。

以上のとおり新1形スクリーンの採用のみでは, 大音響の再生時にまだ音量不足なので, この対策として

- (a) トーンゾイレ (16 cm スピーカ×6, 標準市販品) 15 個をスクリーン下端壁面最上部の円周上に等間隔に配置する。
- (b) これに応じ標準 50 W 増幅器を 5 台増設し, 各増幅器はチャンネル-A1~A5 にそれぞれ接続した。かくすることにより観客に対し至近距離から有効に音響放射を行ない, 音量感を高めることとした。この対策は納期的にも施工の面からも実施することができた。

3.4 吸音構造体の開発

3.2 で述べた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帯域吸音構造が必要である。いうまでもなく吸音構造体前面には映写スクリーンが設置される。スクリーンには 3.3 で述べたように幾度かの変更, 修正があったが, その間とりあげた吸音構造体の吸音率の資料のうち, おもなもののみを次に述べる。

(1) 吸音構造の具備条件

- (a) 低音域(約 100 Hz)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うえから白色であること。

(2) とりあげたおもな吸音構造体とその吸音率

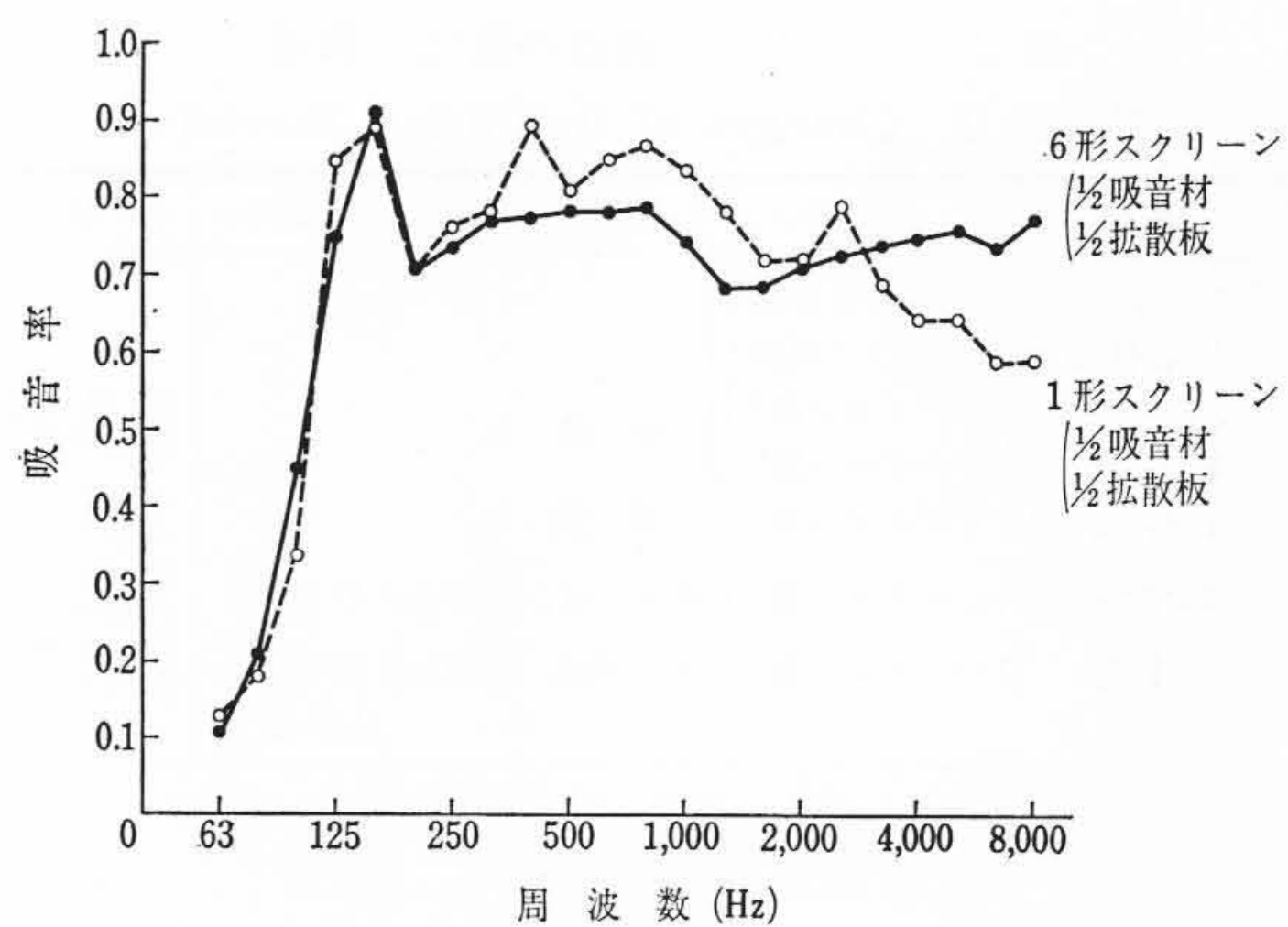
吸音率の測定は 44 年 4 月から 5 月にわたり, 大林組技研の残響室において行なわれた。当時スクリーンとしてはテープ状の 1 形, 6 形を用い(新 1 形は未開発), スクリーン背後の条件として全面吸音材, 1/2 吸音材+1/2 拡散板, 全面拡散板, 全面木毛板下地, 全面拡散板(グラスウール裏打ち), 全面反射板の 6 種類について測定した。その結果のうちおもなものは図 7 に示すとおりである。

測定結果によれば, テープ状二重波形わく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% にもってゆくためには, 吸音面と拡散面のほかに反射面を設け, それらの面積比を 1:1:1 として分散配置することを考えることにした。

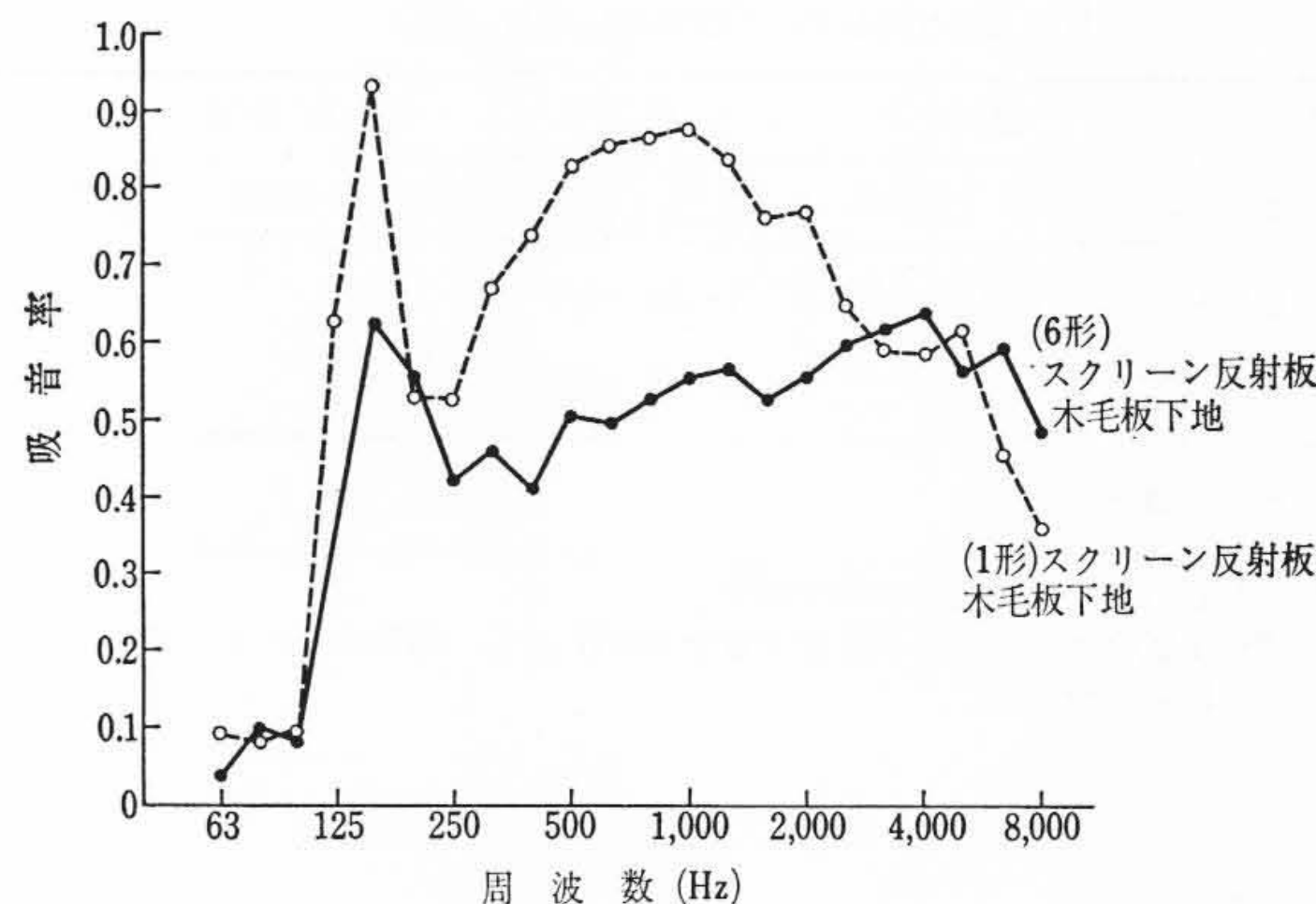
3.5 スピーカの耐温, 耐湿動作試験

アストロラマドーム天頂には C スピーカを設置するが, この付近の温度は特に夏期において 40℃ を越すことが予想されたので, この環境でスピーカの性能を保証できるかどうか動作試験を行なった。

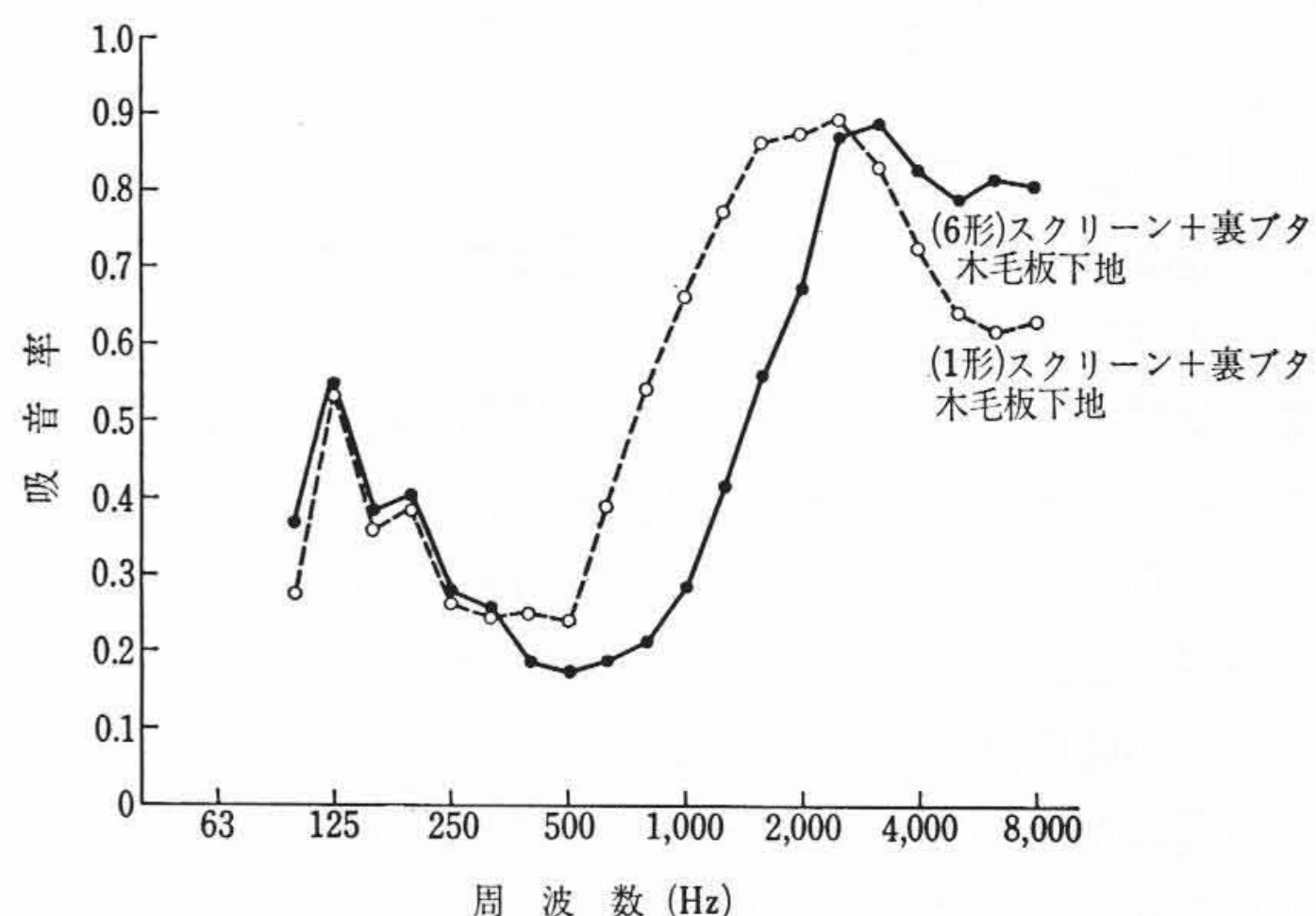
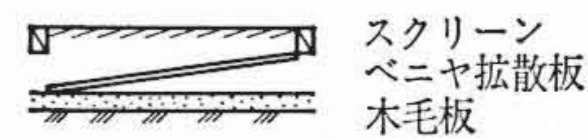
対象としたスピーカは, A, B, C それぞれのシステムに用いた素子スピーカ (20 cm 口径ウーハと 5 cm 口径ツイータの 2 種) 合計 10 個で, 温度 42℃, 湿度 60% の環境の中に置き, 入力信号としては



(a)



(b)



(c)

図7 吸音率測定例

Fig. 7. Absorption Coefficients of Some Sound Absorbent Structures

ストラビンスキー作曲「春の祭典」第2部のクライマックス部分約 12 分を, 繰り返し 100 時間加えた。このときの信号レベルは, 実際レベルより 3 dB 高い(パワーで 2 倍)入力とした。

結果は, 100 時間テストの後において, 全数のスピーカが最低共振周波数および周波数レスポンスなど異常なく合格した。

なお 44 年 8 月上旬, みどり館天頂付近の温度・湿度を大林組で実測したところ, 温度は 37℃ が最高であり, 湿度は 57% 以下であったことから, 使用スピーカの動作は信頼できるものと思う。

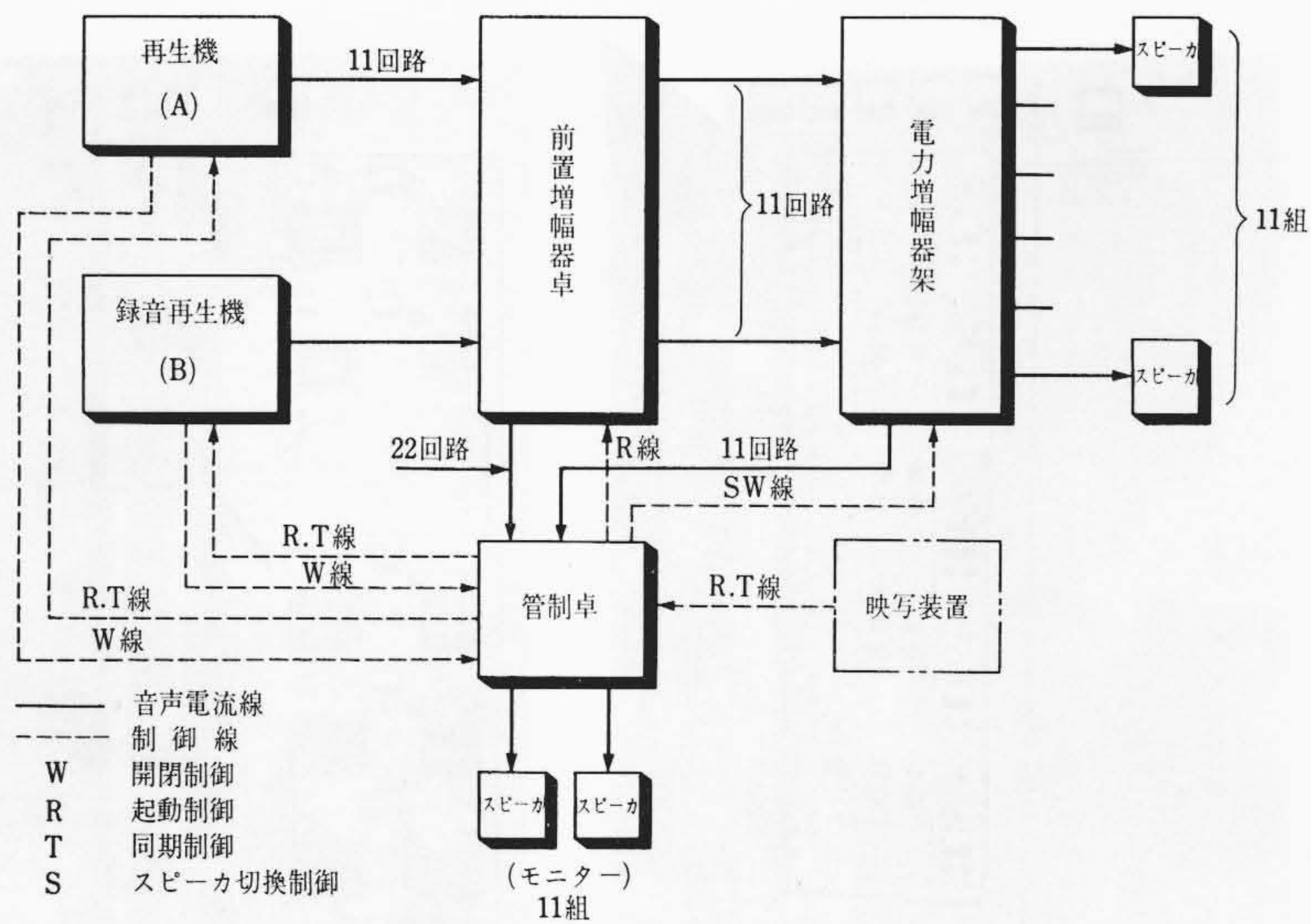


図8 音響再生システム構成図

Fig. 8. Block Diagram of Sound Reproducing System

4. 実施設計と製作

4.1 再生機器の設計・製作

設計に当たっては、ホールの内装条件を含む基本仕様に基づき、さらに保守の簡便さ、故障発見の容易さ、予備機器との切り換えの容易さなどに留意した。図8は全システムの構成ブロック図である。

(1) 磁気録音再生装置

再生装置としては現用および予備の2台を用意し、うち1台は録音機能を有するものにして、プログラムテープの製作をこれにより行なえるようにした。会期中は2台とも純然たる再生装置として使用するもので、図9はその外観を示したものである。

(a) テープ幅と速度

必要なトラックは音響トラックが11、制御トラックが2、計13トラックである。ひずみ率およびS/Nの向上を図るために、トラック幅をできるだけ広くして信号量を増さねばならないので、1インチテープを使用した。

また周波数特性などの要求からテープ速度を38 cm/sとした。

(b) ヘッド構成

トラック間の漏話を極力押えるため、ヘッドはスタガー構成とし、図10に示すように録音ヘッド、再生ヘッドとも各2個で13トラックの録音再生を行なうものとした。このため走行機構上の制限もあって消去ヘッドを組み込むことがむずかしく、消去はバルクイレザによりテープ全体を消磁する方式とした。

(c) 録音方法

設計当初においては、いかなる方式でいかなる種類のプログラムを録音するか不明であったし、また13トラックに同時に録音することは困難であろうとの予想から、偶数音響チャンネルおよび映写同期信号チャンネルをAヘッドによりまず録音し、次にこれをモニタしながら奇数チャンネルをBヘッドで録音できる機能ももたせるようにした。

また音量制御チャンネルはほかの12トラックの録音がすべて終わったあとで、単独に録音できるようにした。

結局、録音機能としては、13チャンネル同時録音、Aヘッドのみの録音、Bヘッドのみの録音および音量制御信号のみの録音の、4種の機能をプリセットで選択できるものとした。

(d) 映写装置との同期

当初、常識的に音響再生装置から映写装置に同期信号を送る方

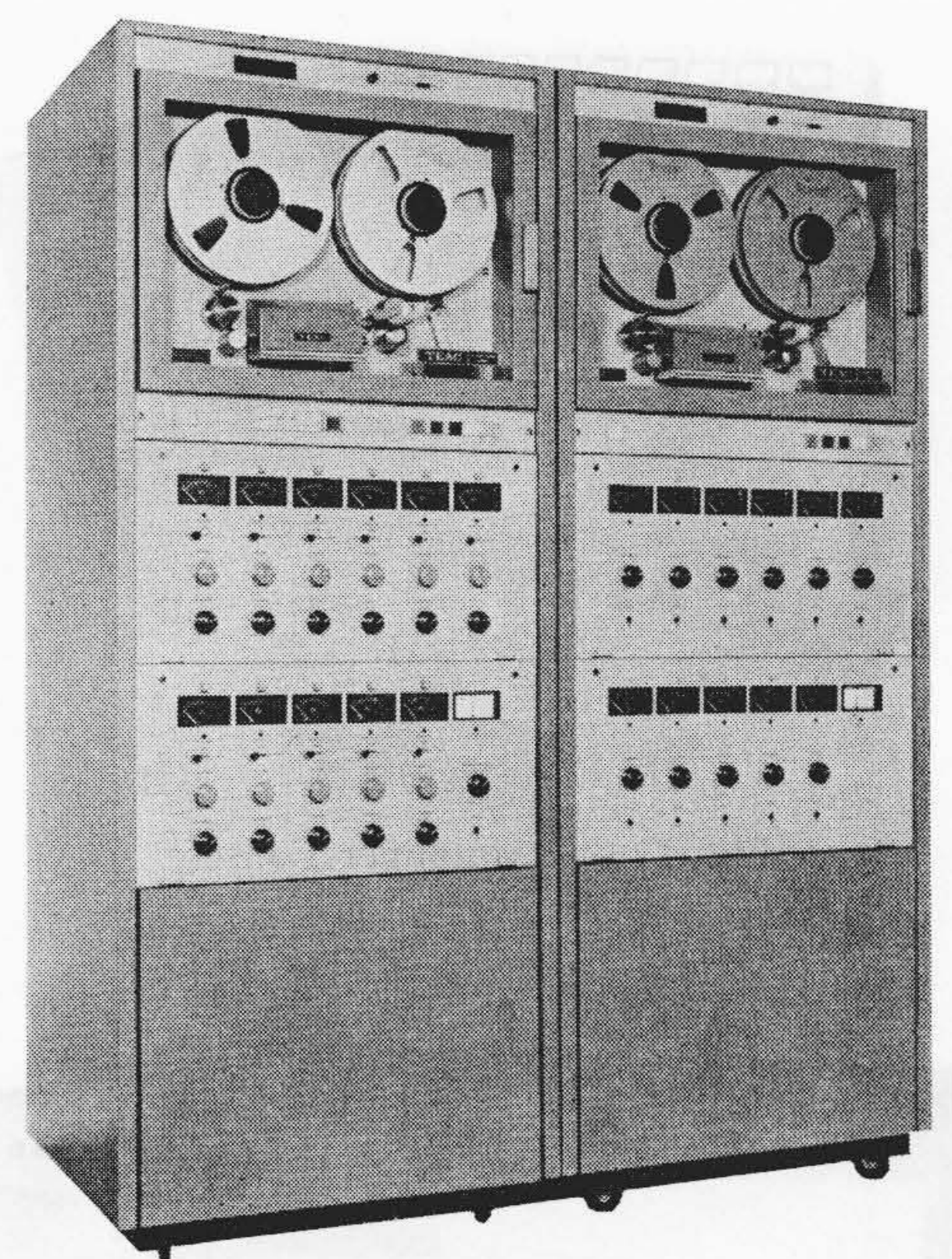


図9 磁気録音再生装置(左)と再生装置(右)

Fig. 9. Magnetic Recording and Reproducing Device (left), and Reproducing Device (right)

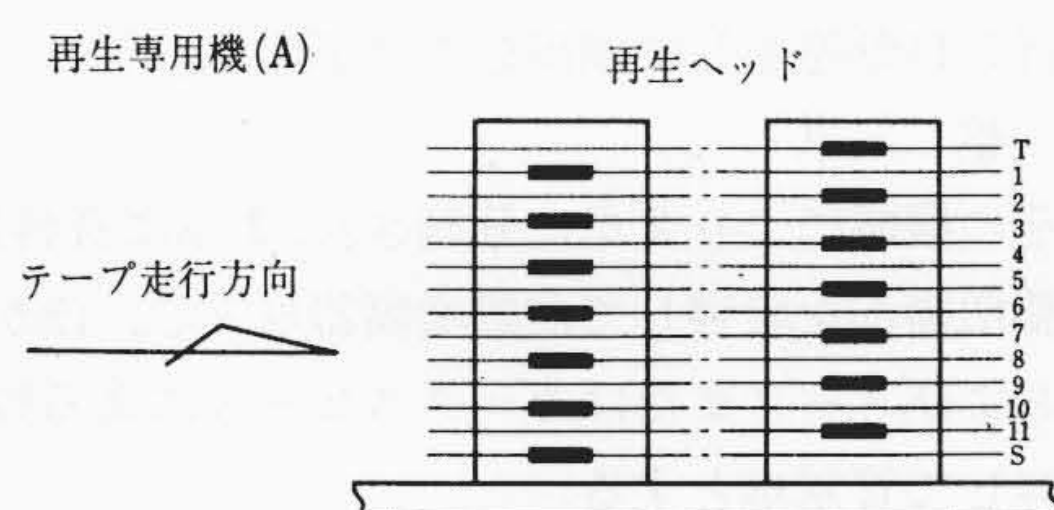
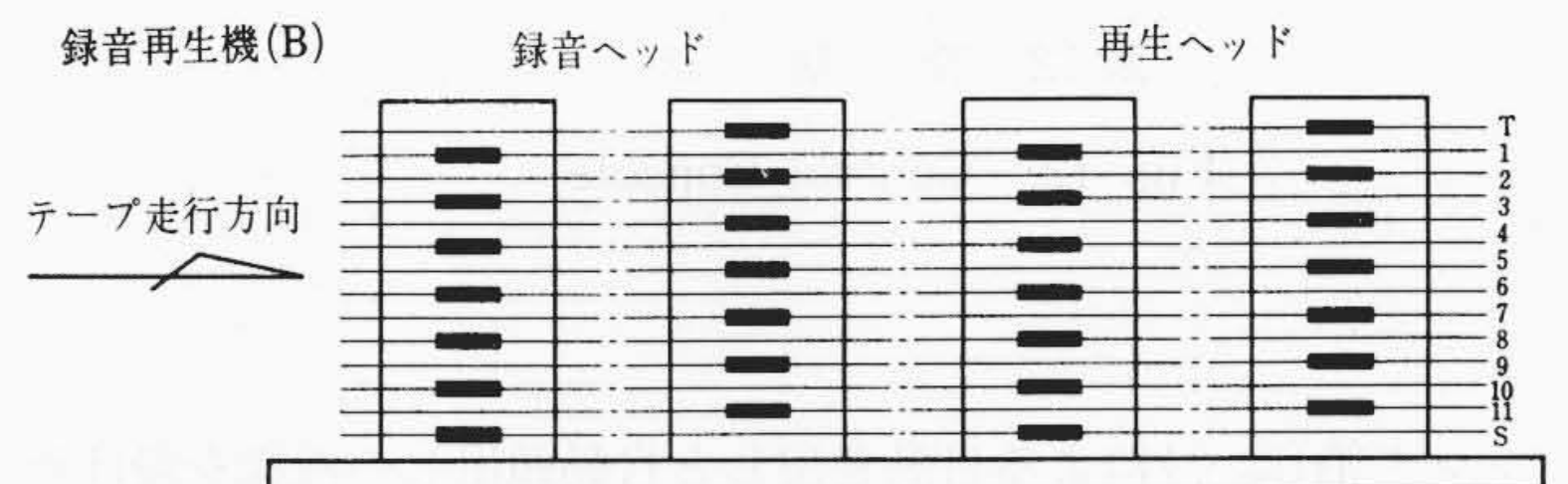


図10 ヘッド配列図

Fig. 10. Arrangement of Tape Heads

式を考えたが、これでは映写装置側で5台の映写機を駆動するための大容量同期信号増幅器を必要とし、この実現が困難であるとの見解から、映写側より音響側に同期信号を送る方式を採用した。

すなわち、録音時には録音装置を映写装置よりの同期信号(約384 Hz)により駆動し、同期信号トラックに基準信号384 Hzを録音する(基準信号発振器は録音装置に内蔵)。再生時にはすでに録音されてある同期信号と映写装置よりの同期信号とを比較し、かりにテープの伸縮があってもこれを補うように再生装置を駆動する。これにより録音時と再生時のテープ速度比と映画フィルム速度比を同じにすることができる。

(e) 自動巻戻し、頭出し機構

万国博会期6ヶ月間の操作をできるだけ簡単にするため、セン

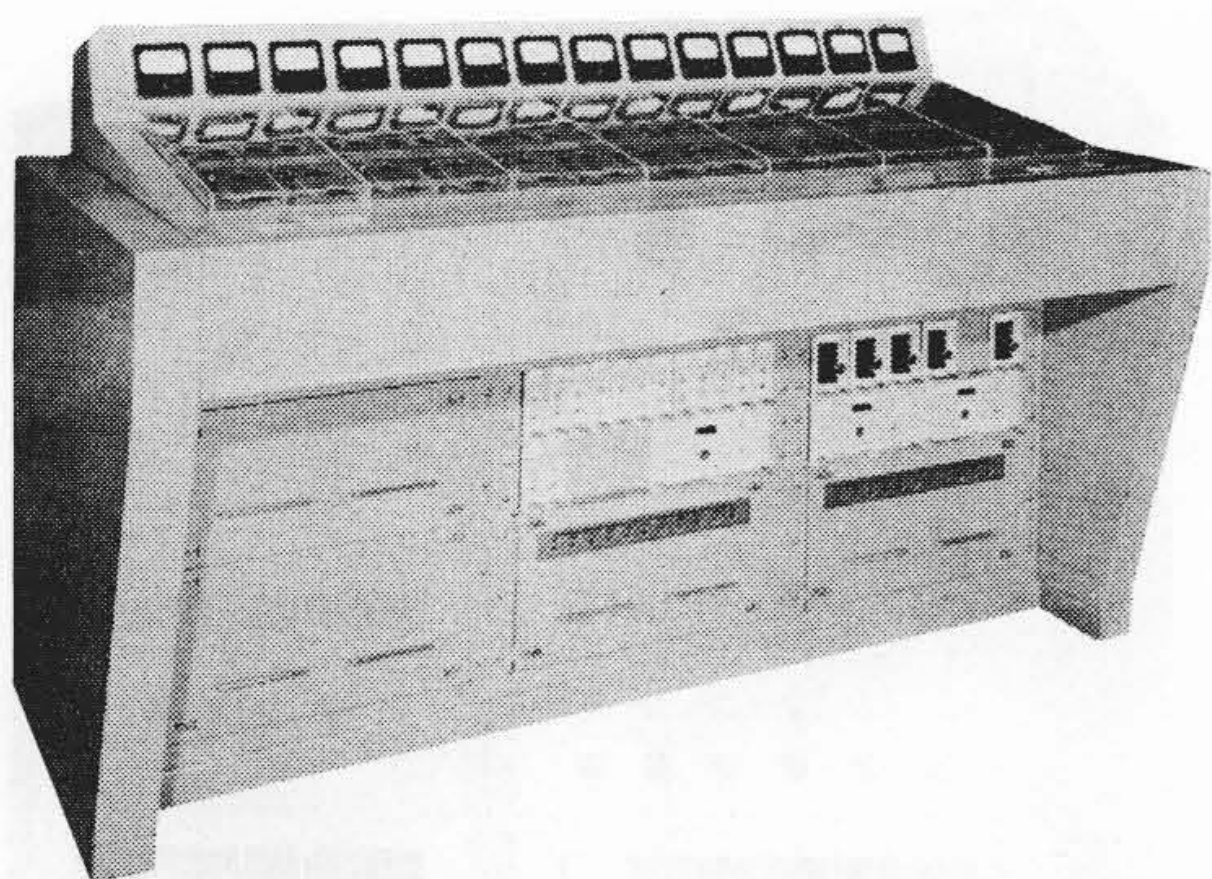


図 11 前置増幅器卓
Fig. 11. Preamplifier Console

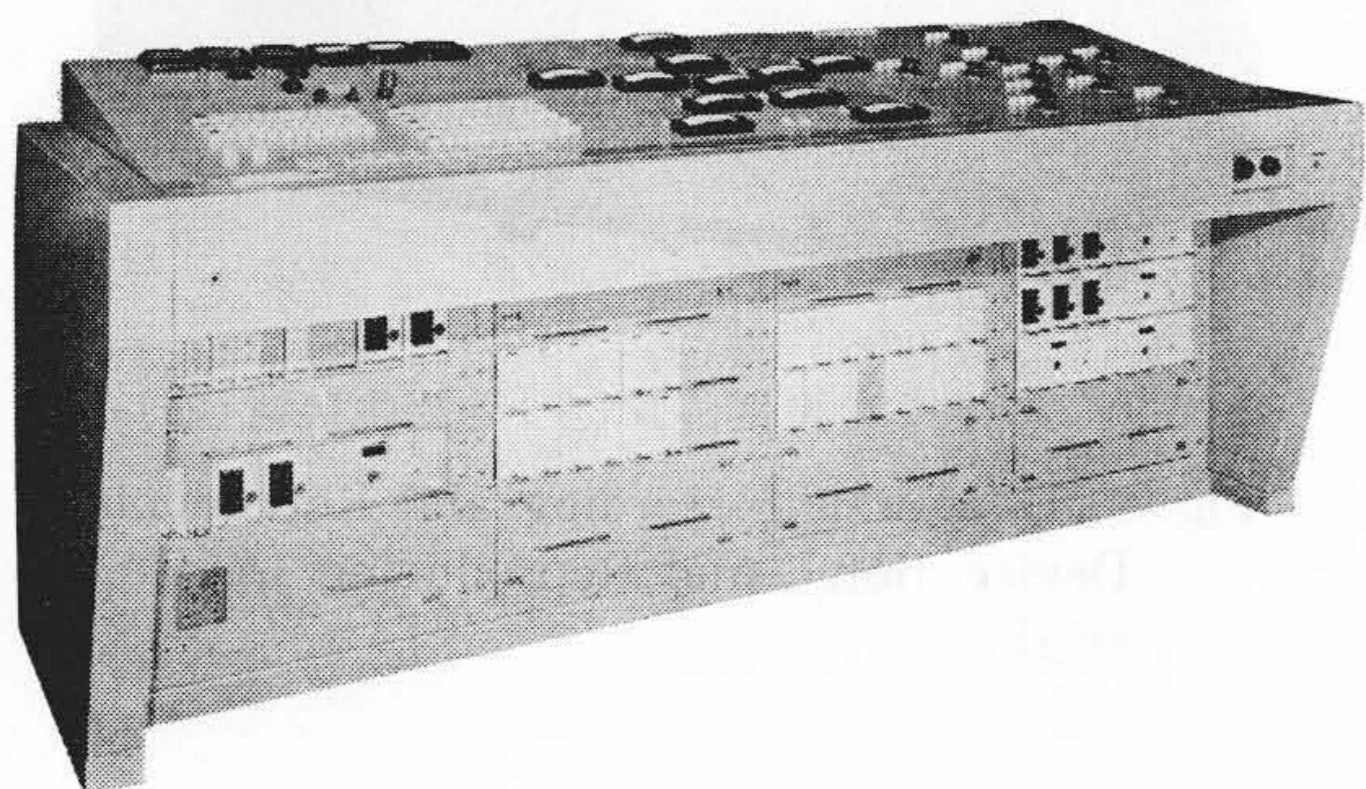


図 12 管 制 卓
Fig. 12. Control Console

シング箔(はく)による自動巻戻しと自動頭出しの機構を設けた。これによりプログラム終了時、再生装置は再生状態から自動的に巻戻し状態に移り、プログラム始点をややオーバーランした付近で巻戻しを自動停止したのち、再び再生状態となって規定スタート位置まで除行し自動停止して頭出しが完了する。

(2) 調 整 卓

調整卓はその機能により 2 卓に分割され、1 卓に音響信号 11 チャンネルの調整増幅部を収容して前置増幅器卓とし、ほかの 1 卓には制御関係およびメータまたはモニタスピーカによる監視を行なう機能を収容して管制卓とする。

(a) 前置増幅器卓 (図 11)

調整増幅部は現用 11 チャンネルのほかに予備 3 チャンネルを実装し、管制卓により任意の現用チャンネルに切り換えることができる。

また調整増幅部はその機能により、音量減衰器、音質調整器、帯域音質調整器およびブースタ増幅器に分けられ、それぞれはプラグイン式ユニットで、故障の際にはほかに用意してあるユニットと簡単に差し換えることができる。また各電源にはそれぞれ別系統のヒューズを設け、一度に複数チャンネルが使用不能になることを避けるようにした。

(b) 管 制 卓 (図 12)

(i) 音響信号監視

音響 11 チャンネルにそれぞれ 2 連 VU 計を設け、前置増幅器卓出力および電力増幅器出力が同時監視できる。またモニタスピーカにより磁気テープ再生装置、前置増幅器卓および電力増幅器のそれぞれの出力を切り換え検聴することもできる。これらの手段により故障の際にどの部分かを迅速、的確に知ることができる。

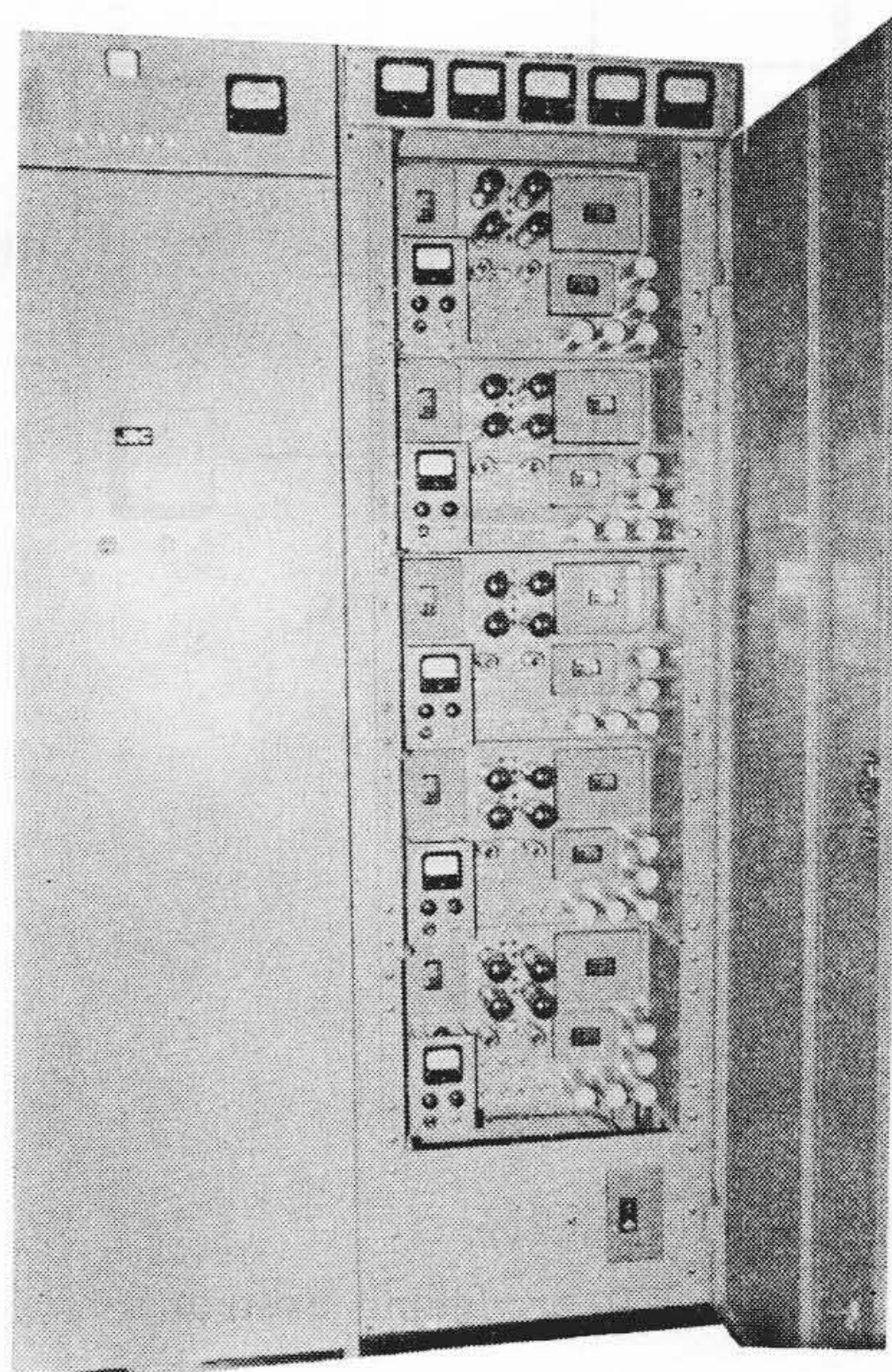


図 13 100 W 電力増幅器架
Fig. 13. 100 W Power Amplifiers

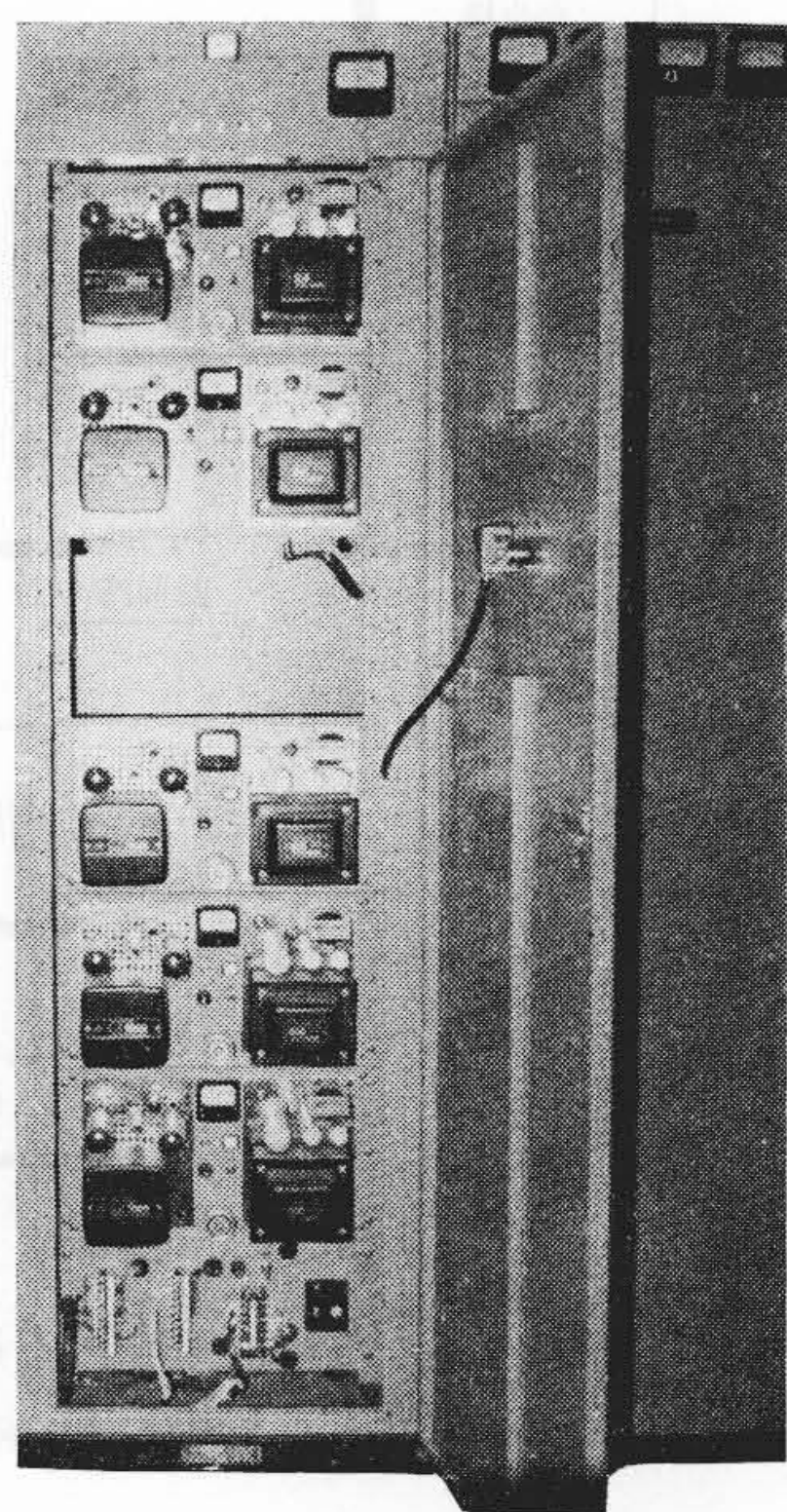


図 14 50 W 電力増幅器架
Fig. 14. 50 W Power Amplifiers

(ii) 電 源 監 視

各増幅器部の電源は表示ランプの点滅により監視される。

(iii) スピーカ音量制御

あらかじめテープの制御トラックに録音された信号により、電力増幅器入力にそう入してある減衰器をオンオフするものとするが、このための制御回路が故障の際は、手動により減衰器の開閉を行なうことができる。

(iv) テープ頭出し位置の微調整

映写装置からのスタート信号によりテープ再生装置を起動させるが、このときテープは自動頭出しによりスタート位置でスタンバイ状態になっている。しかし細かい位置調整は、映写装置よりのスタート信号をプリセットにより、1/60 秒から 199/60 秒まで 1/60 秒間隔で遅延し、フィルムとテープの頭を一致させることができる。

(3) 電 力 増 幅 器 (図 13, 14)

11 チャンネルそれぞれに 100 W 電力増幅器 1 台を使用、ほかに予備として 5 台を実装してある。この予備器は管制卓の切換えスイッチにより現用 11 台のいずれとも置換え可能である。またこの電力増幅器では、出力インピーダンスを下げてスピーカのダンピングファクタを大きくするために 16 dB 以上の負帰還量とした。

なお増設トーンゾイレスピーカのための電力増幅器としては標準形 50 W のもの 5 台を実装し、架内で出力のチェックを行なうようにした。

(4) スピーカシステム

(a) 構 成 (図 15 a, b, c)

下段スピーカ群(チャンネル 1~5)を A 形、中段(チャンネル 6~10)を B 形、天頂(チャンネル 11)を C 形とし、A 形は 2 基で 1 組(1 チャンネル分)、B 形は 1 基 1 組、C 形は 4 基 1 組とする。各組のスピーカシステムは、口径 20 cm のダイアトーン PW-201×20 個、および口径 5 cm のダイアトーン TW-501×20 個により構成した。

これにより最大許容入力 は 200 W となり、使用電力増幅器が 100 W 出力であるから、最大許容入力の 1/2 以下の入力で使用することになり、ひずみ率および過大入力による破壊などの問題がない。

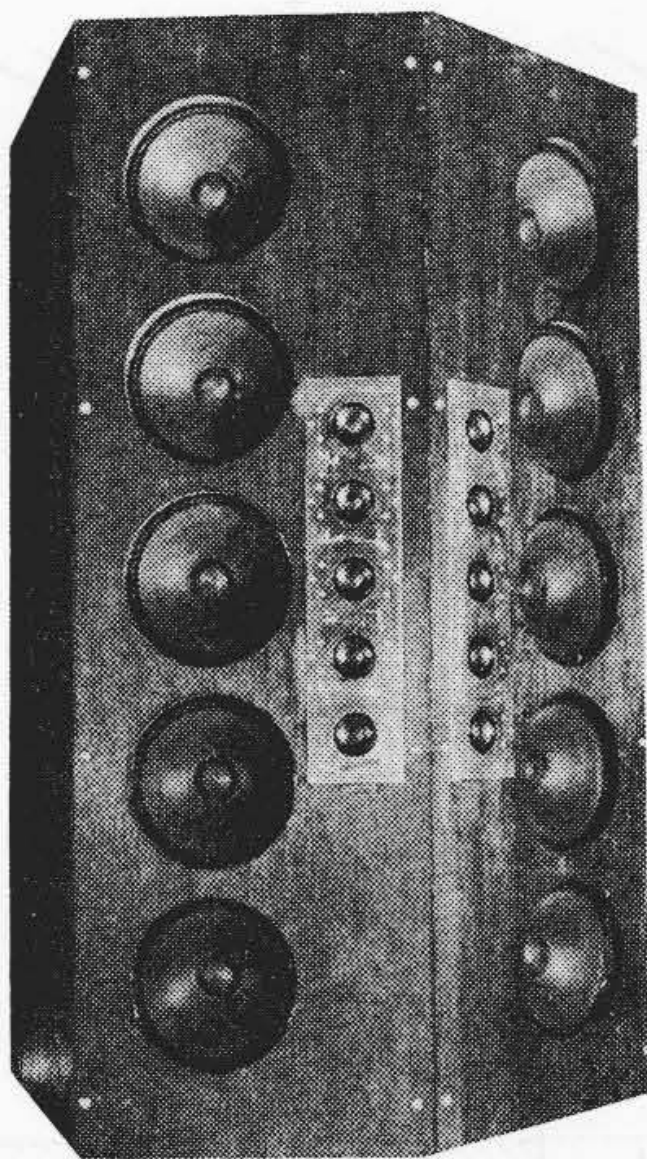


図 15(a) A 形スピーカ
システムのうちの 1 基

Fig. 15(a). A Type Speaker System
(one of a pair)

(b) 音圧の計算

アストロラマホール内容積 $V \approx 12,000 \text{ m}^3$ として、場内音圧を次式で求める。

$$\text{音場音圧} = 10 \log W + 10 \log \left(\frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{R_i} \right) + 120 \quad (\text{dB})$$

ここで、 W : スピーカよりの音響出力 (W)

r : 音源からの距離 (m)

D : 指向性利得

R_i : 散乱音係数 $\approx V/2T$

T : 残響時間 (s)

スピーカ能率を 2% とすれば電気出力 100W 時のスピーカ音響出力は 2W, 指向性利得 $D=5$, $r=25 \text{ m}$, $T=1 \text{ s}$ とすると音場音圧は 94 dB となる。

(5) 自動電圧調整器

電力増幅器や磁気(録音)再生装置は電源電圧変動の影響を直接に受けるので、これらの電源は 10 kVA の磁気増幅器形自動電圧調整器を介して供給するようにしてある。

4.2 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。万国博会場の外部騒音に対する外壁のしゃ音構造の設計、空調設備騒音に対しての必要処理などを検討し、その結果を建築設計側に具申した。

(1) 許容騒音レベルの設定

アストロラマホールは立席の劇場であり、観客自体からの発生騒音もかなりのレベルに達すると思われる。しかしプログラムで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 (約 40 ホン) に設定した。

(2) 関与する騒音源

場外の騒音レベル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会場の騒音規正が行なわれるはずである。ただし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 台の映写装置は付属冷却装置を入れると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、映写室の吸音処理だけの対策をとった。

(3) ドームのしゃ音構造の検討

前述のように建設費や解体時の経費などから、外壁として鉄骨

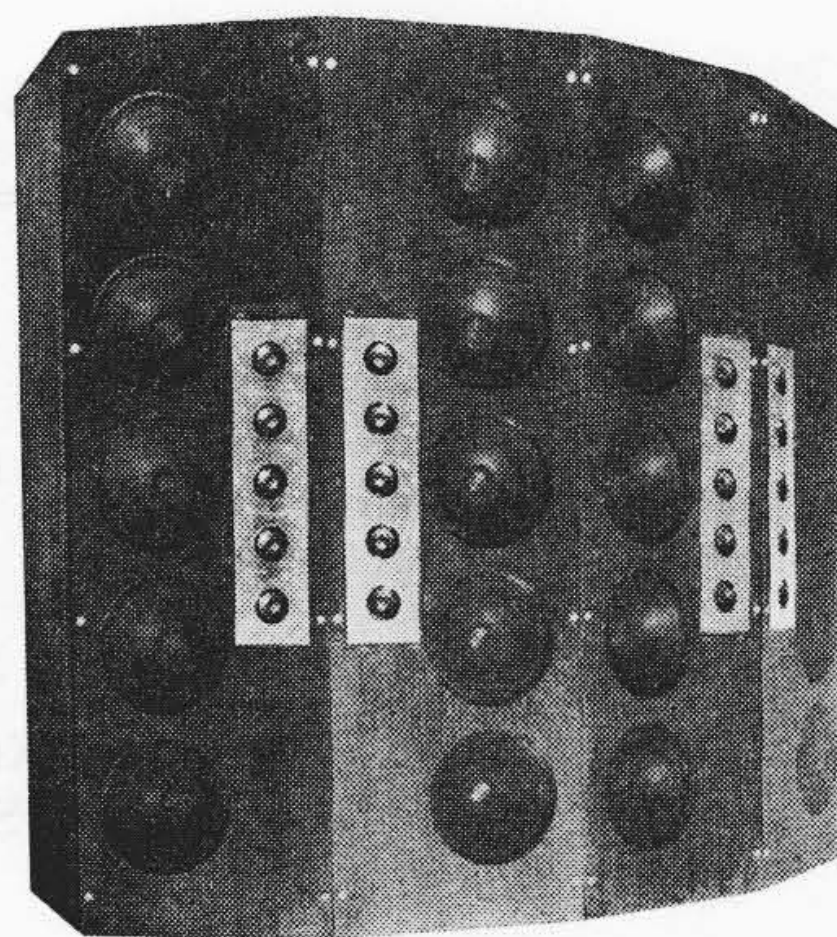


図 15(b) B 形スピーカシステム

Fig. 15(b). B Type Speaker System

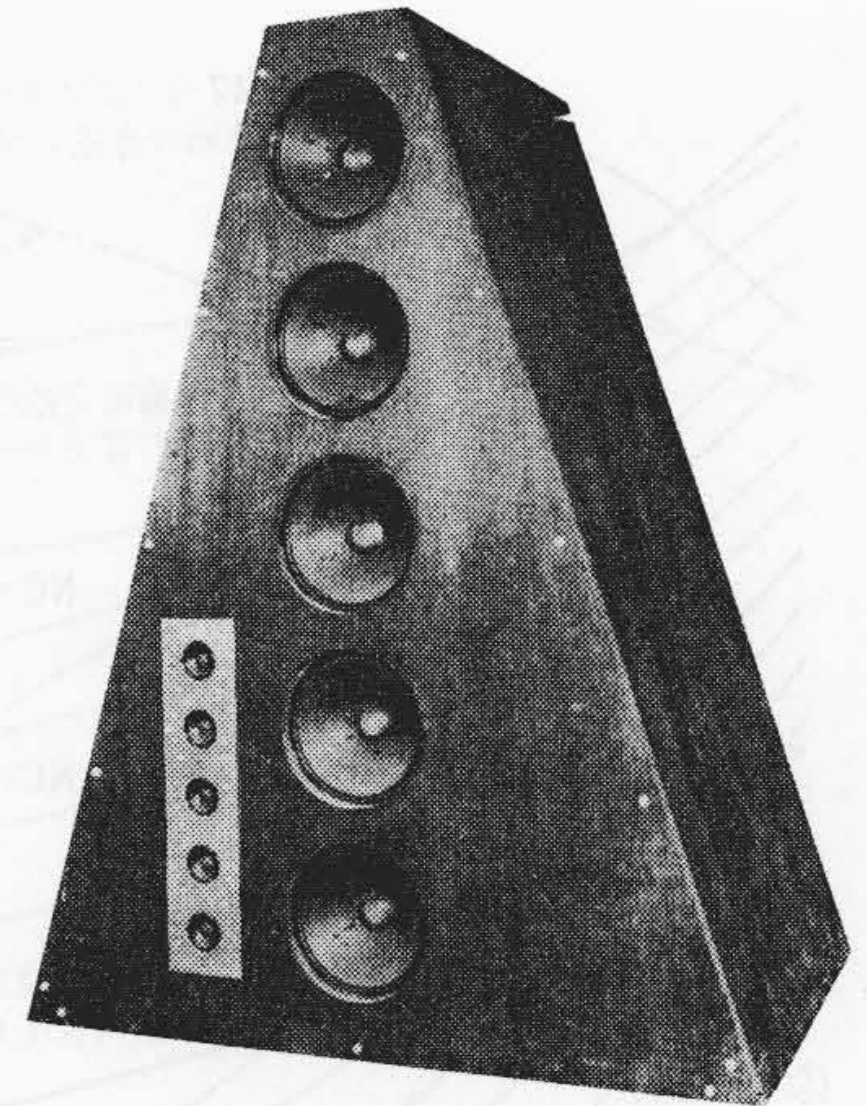


図 15(c) C 形スピーカ
システムのうちの 1 基

Fig. 15(c). C Type Speaker System (a quarter)

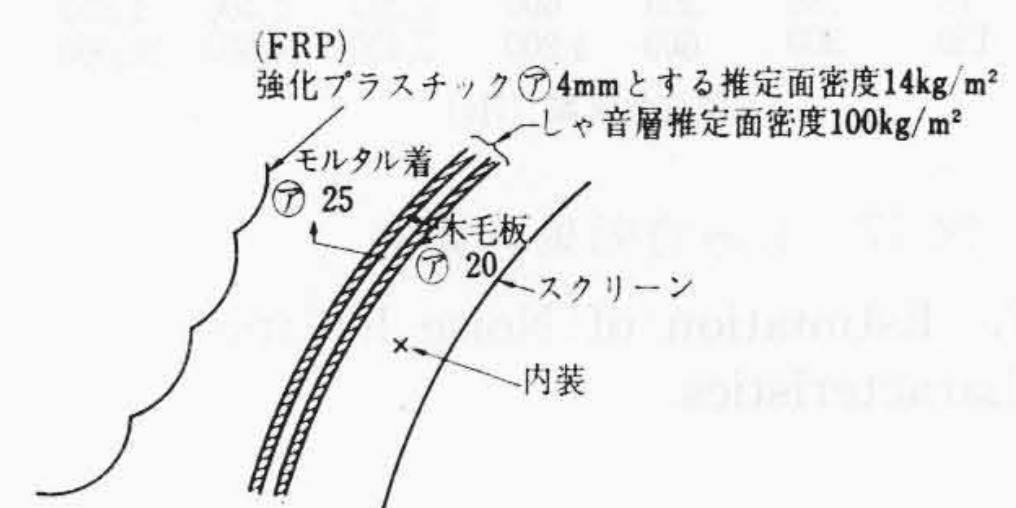


図 16 透過損失の推定にあたって
対象としたしゃ音構造

Fig. 16. Detail of Ceiling Structure

表 5 騒音防止対策

Table 5. Acoustical Treatments for Noise Control of Attached Rooms

場 所	原 案	変 更 希 望
出口、入口ホール	天井・壁コンクリート打放し	木毛板またはドリゾール板 30mm 打込み
映 写 室	壁コンクリート打放し	木毛板またはドリゾール 30 mm 内張り、天井岩綿吹付け
ファンルーム	ガラスウール 10 mm	ガラスウール 50 mm 空気層 50 mm
コントロール室	壁 VEP, 天井トムレックス	ドリゾール空気層 50 mm 内張り、天井岩綿吹付け
吹出口ノズル	—	ガラスウール内張り

FRP 板張りの構造が最終基本構想として打ち出された。これに対し音響委員会として、雨の音に対する対策も考え、FRP 板構造と独立したしゃ音層の必要性を強く要望し、43 年 9 月建築部門より図 16 のような外壁構造が提示された。この構造に対する検討結果について述べる。

(a) 吸音層を除く FRP 板、モルタルしゃ音構造体の透過損失の周波数特性を計算した。500 Hz では約 35 dB である。

(b) 通常の外部騒音として大都市中心交差点程度の街路騒音およびヘリコプタ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示すと図 17 のとおりである。すなわちヘリコプタの近接というケースを除いて外部騒音のしゃ断はじゅうぶんである。

(c) しゃ音壁以外の騒音侵入経路については、原則として入口ドアを二重とし周辺の吸音処理を行なうこと、また通気口についてもしゃ音処置が必要であることを具申した。表 5 がそれである。

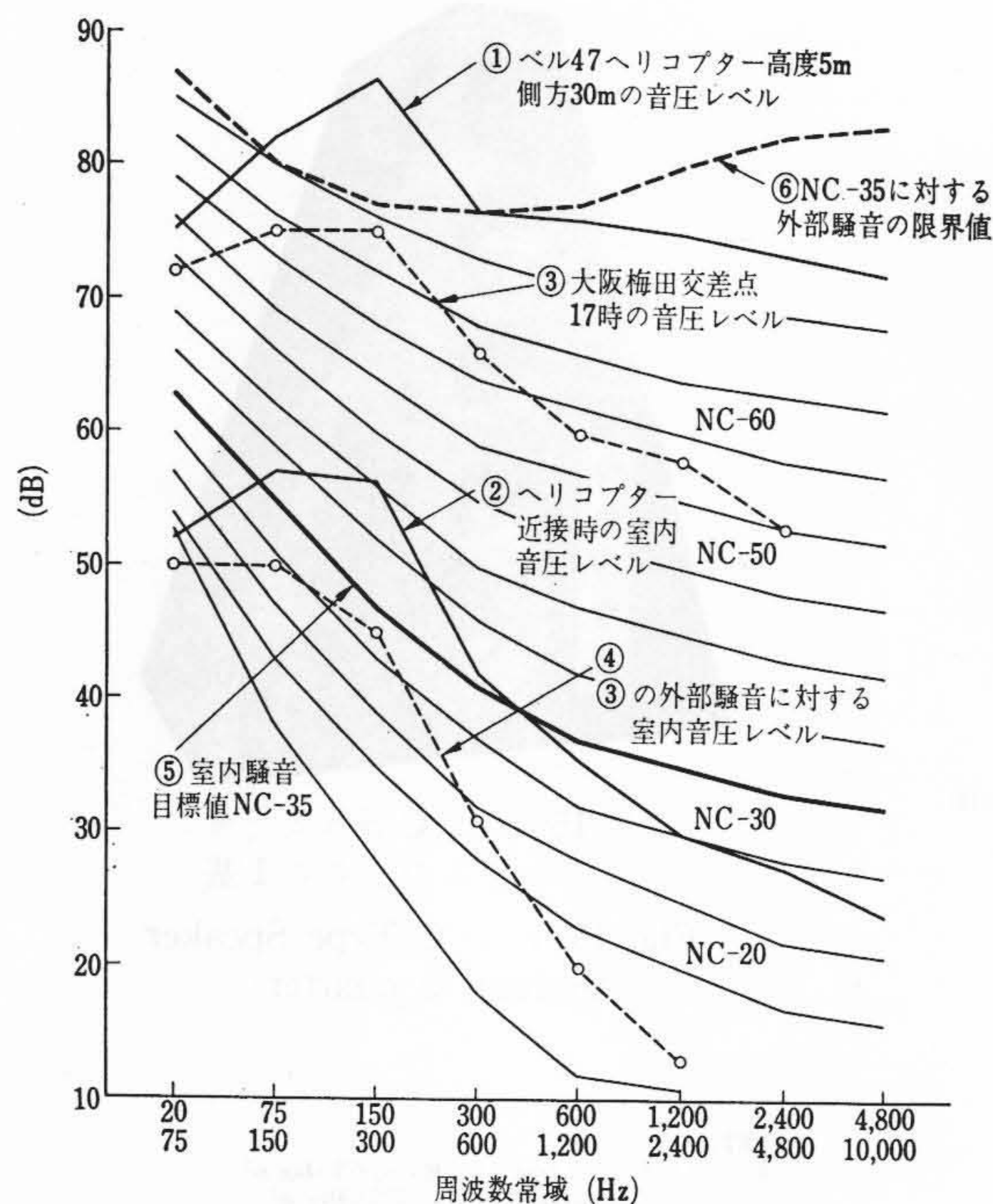


図 17 しや音効果計算例

Fig. 17. Estimation of Noise Isolation Characteristics

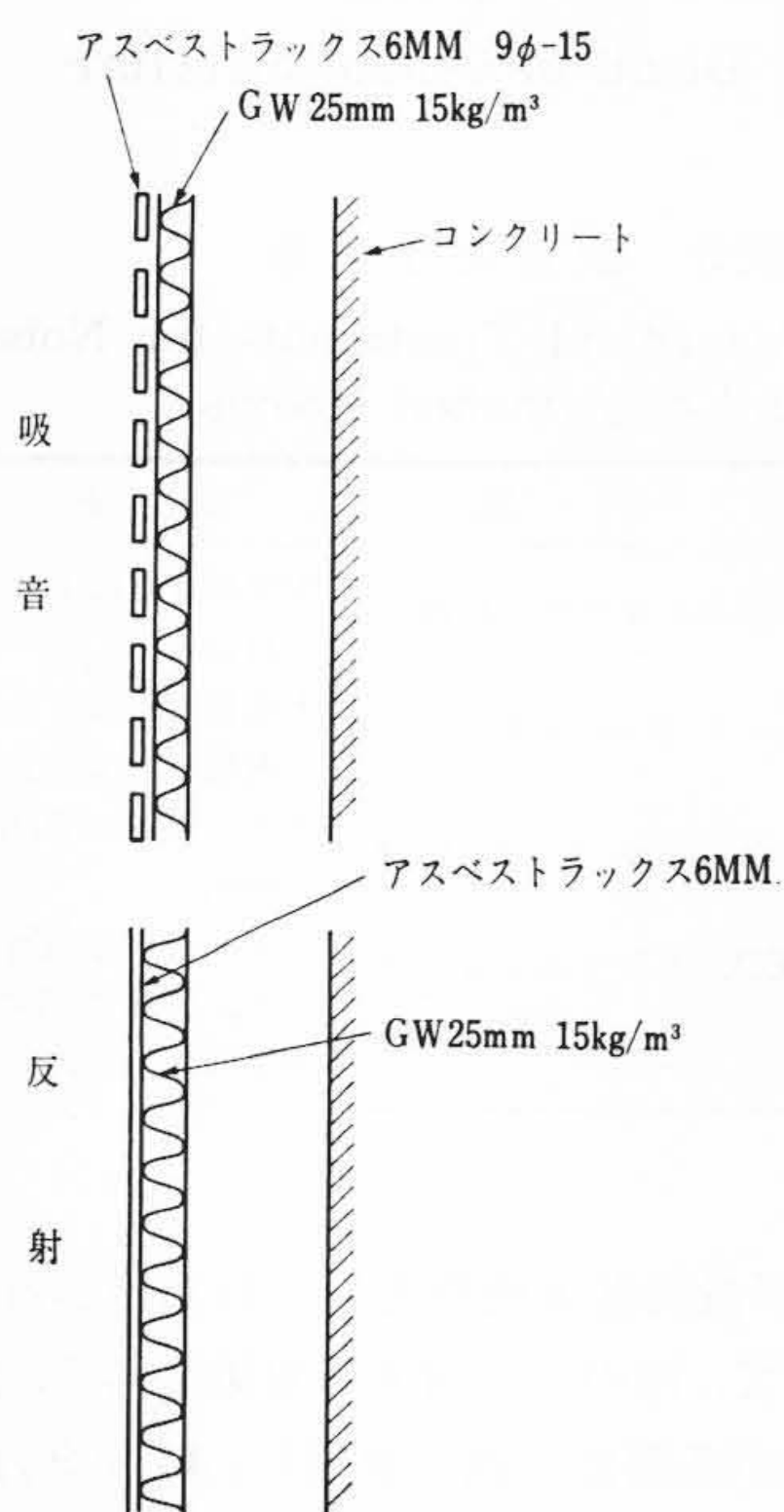


図 19 周壁の吸音, 反射構造体

Fig. 19. Absorption and Reflection Structures of Wall

4.3 内装設計

3.4 で述べたように, スクリーンを表面にもつ吸音構造体の吸音率資料をもとに内装設計を行ない, ドーム内装について建築部門にアドバイスをした。その概要を述べる。

(1) 設計方針

(a) 残響時間は, 観客 800 名収容としてほぼ 1 秒, 全周波数域にわたりできるだけ平坦な特性とする。

(b) 天井面は全域吸音体, 反射体(低音域吸収体), 拡散体をそ

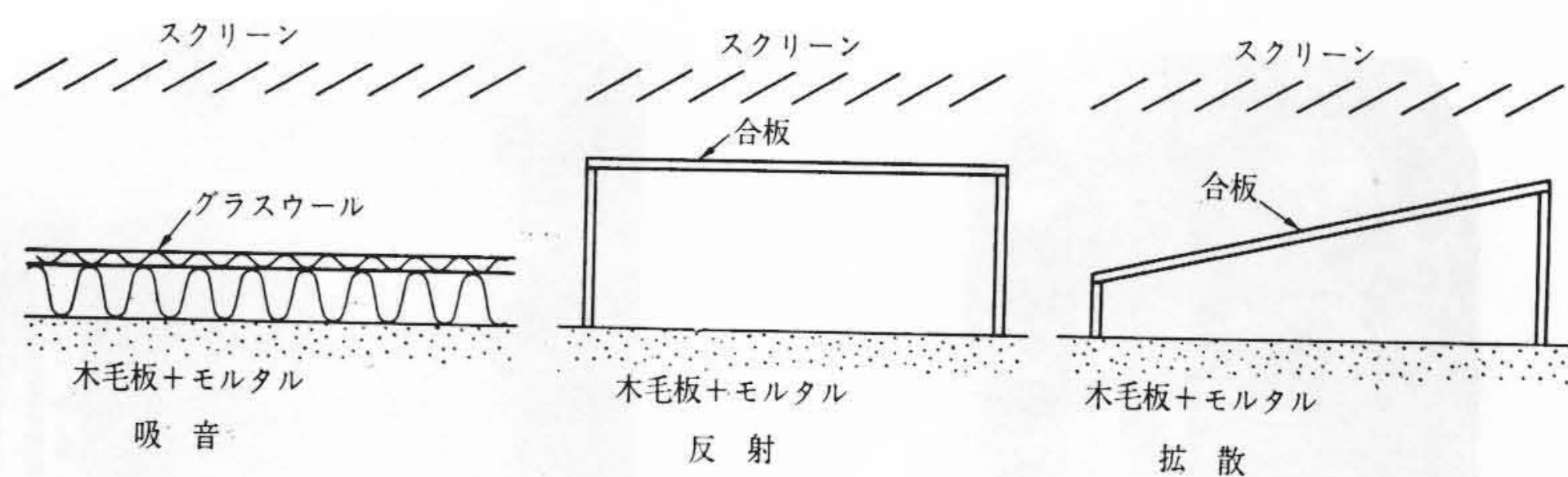


図 18 天井スクリーン裏に用いる吸音, 反射, 拡散構造体

Fig. 18. Absorption, Reflection and Diffusion Structures Used Behind the Screen

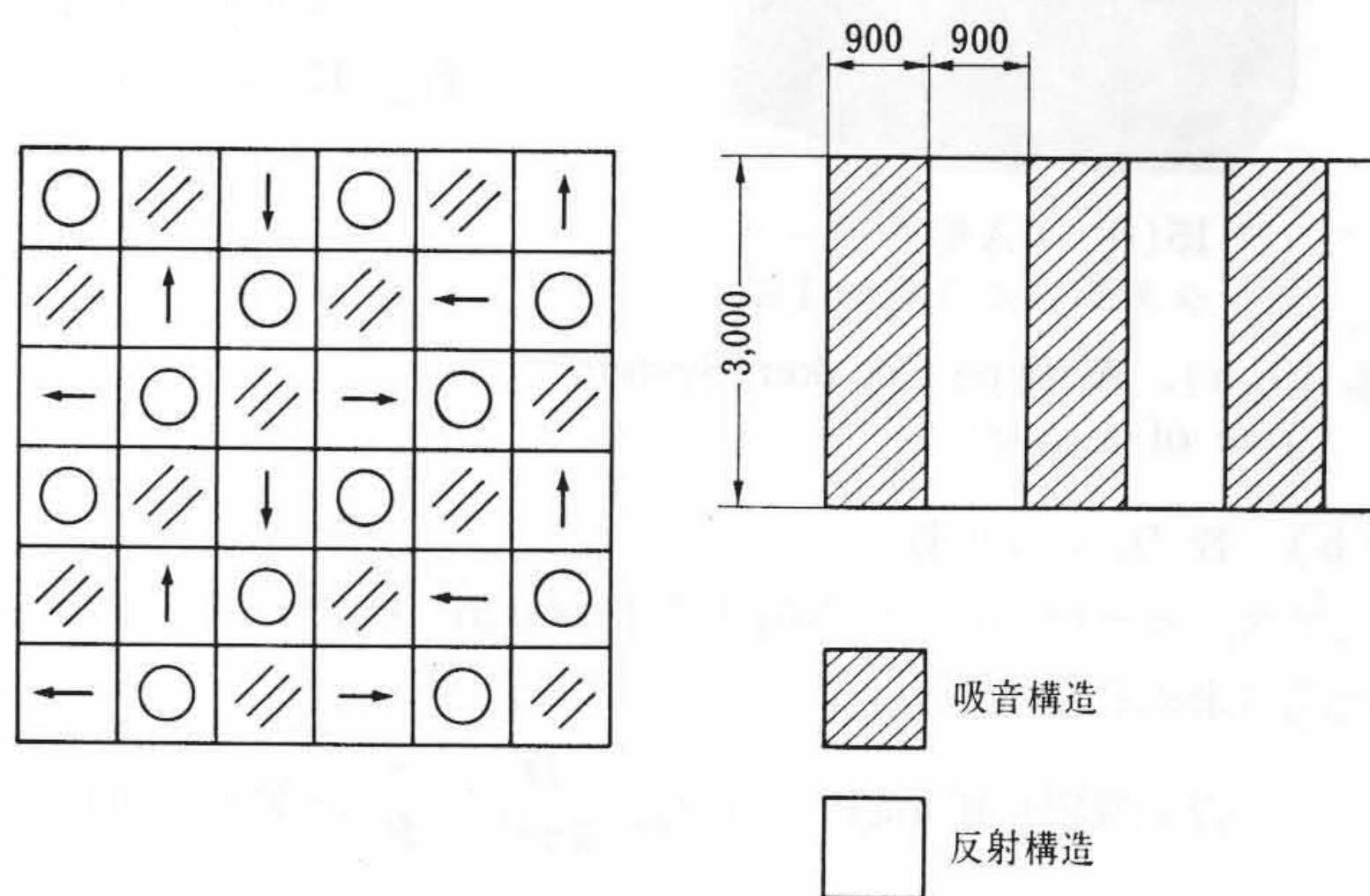


図 20 スクリーン裏分散配置方式と壁面配置方式

Fig. 20. Arrangement of Absorption, Reflection and Diffusion Structures, Behind the Screen and on the Surface of Wall

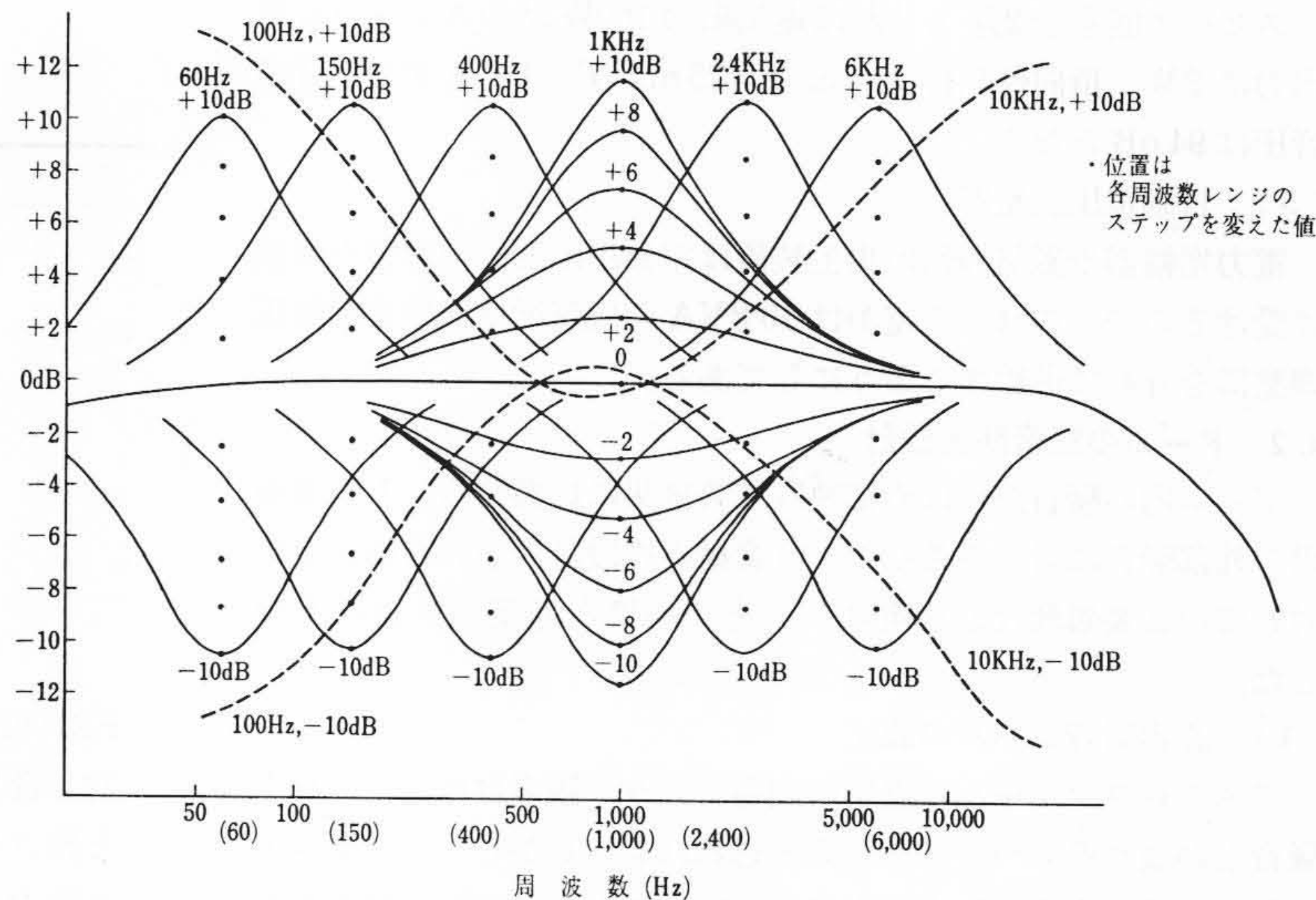


図 21 音質調整器の周波数特性

Fig. 21. Frequency Characteristics of Tone Quality Controller

れぞれ分散配置する。

(c) 壁面は中高音域吸音体, 低音域吸音体を分散配置する。

(d) 収客人員は 800 名立位, 床は厚さ 4.5 mm のじゅうたんとするを条件とする。

(2) 吸音構造とその配置

天井用吸音, 反射, 拡散構造および壁面の吸音, 反射構造はそれぞれ図 18, 19 に, それらの配置は図 20 に示すとおりである。

(3) 残響時間の推定

残響時間を上記条件から計算し図 24 に示す。

5. 得られた性能と特性

5.1 機器の特性

(1) 録音再生機

録音再生の総合レスポンス周波数特性は 50~12,000 Hz で偏差 3 dB にはいった。S/N は標準入力 -20 dBm で 46~49 dB である。またひずみ率も標準出力レベル (-20 dBm) で 0.5%, 標準より 10 dB 高い出力で 5% である。

(2) 前置増幅器卓

本装置に使用した増幅器、電源ユニット類はすべて BTS 規格、BSS 仕様によるもので、その電気的特性はすべて規定の値を満足している。

音質調整器として、低高音調整器および帯域分割調整器の 2 種を用いているが、それらの調整範囲の測定値は図 21 に示すとおりである。

(3) 電力増幅器架

100 W, 11 チャンネル増幅器と 50 W, 5 チャンネル増幅器とからなるが、それらの各特性は規格をすべて満足しており問題がない。前置増幅器卓を含めた総合特性については後述する。

5.2 システムの現場調整

(1) 機器の総合特性

みどり館のコントロール室に全機器を据付後、前置増幅器卓入力および磁気(録音)再生装置入力それぞれから 100W 電力増幅器出力までの総合特性をとり調整を行なった。そのレベルダイヤグラムは図 22 に示すとおりである。ここでは録音時および再生時いずれもピークレベルに注意することが必要である。

(2) 音響特性

ホール内にスピーカ取付けを完了し、A, B, C 形それぞれの角度調整を厳密に行なって固定したのち、スクリーンが予定どおり張られた状態で音響特性の測定を行なった。これによると増幅器の周波数特性がフラットな状態では、予期したとおり大幅な高音域の損失が認められたので、これを 2 種類の音質調整器によって補償し、図 23 のような結果を得ている。

5.3 ホール内装の現場試験

44 年 10 月、みどり館が完成したので、現場において最終的にホールの音響特性を測定した結果の概要は次のとおりである。

(1) 残響時間

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

実測値を 4.3 で述べた推定値と比較して示したのが図 24 であ

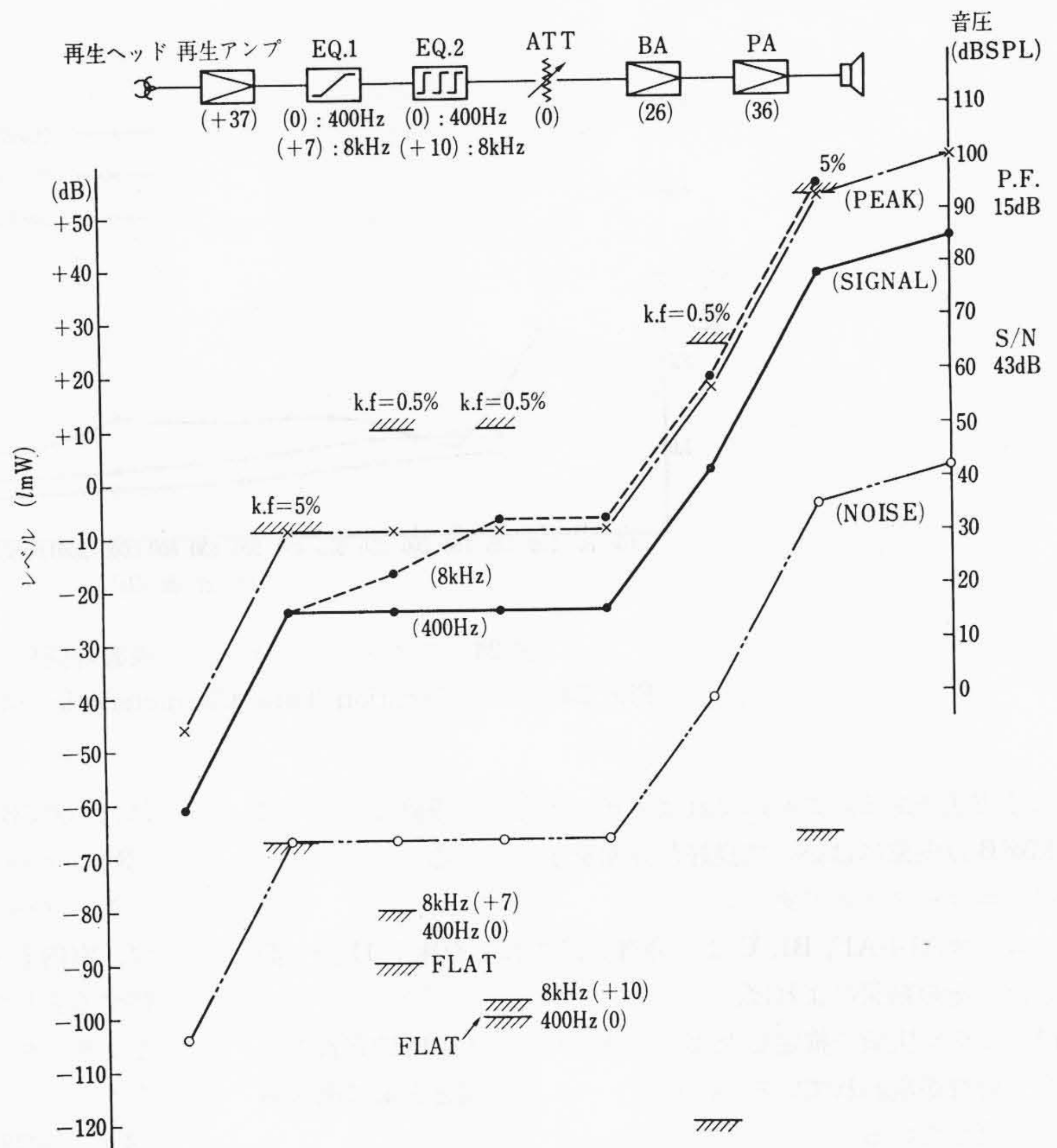


図 22 みどり館音響設備最終調整レベルダイヤグラム

Fig. 22. Level Diagram of Each Channel Finally Adjusted in Astorama Hall

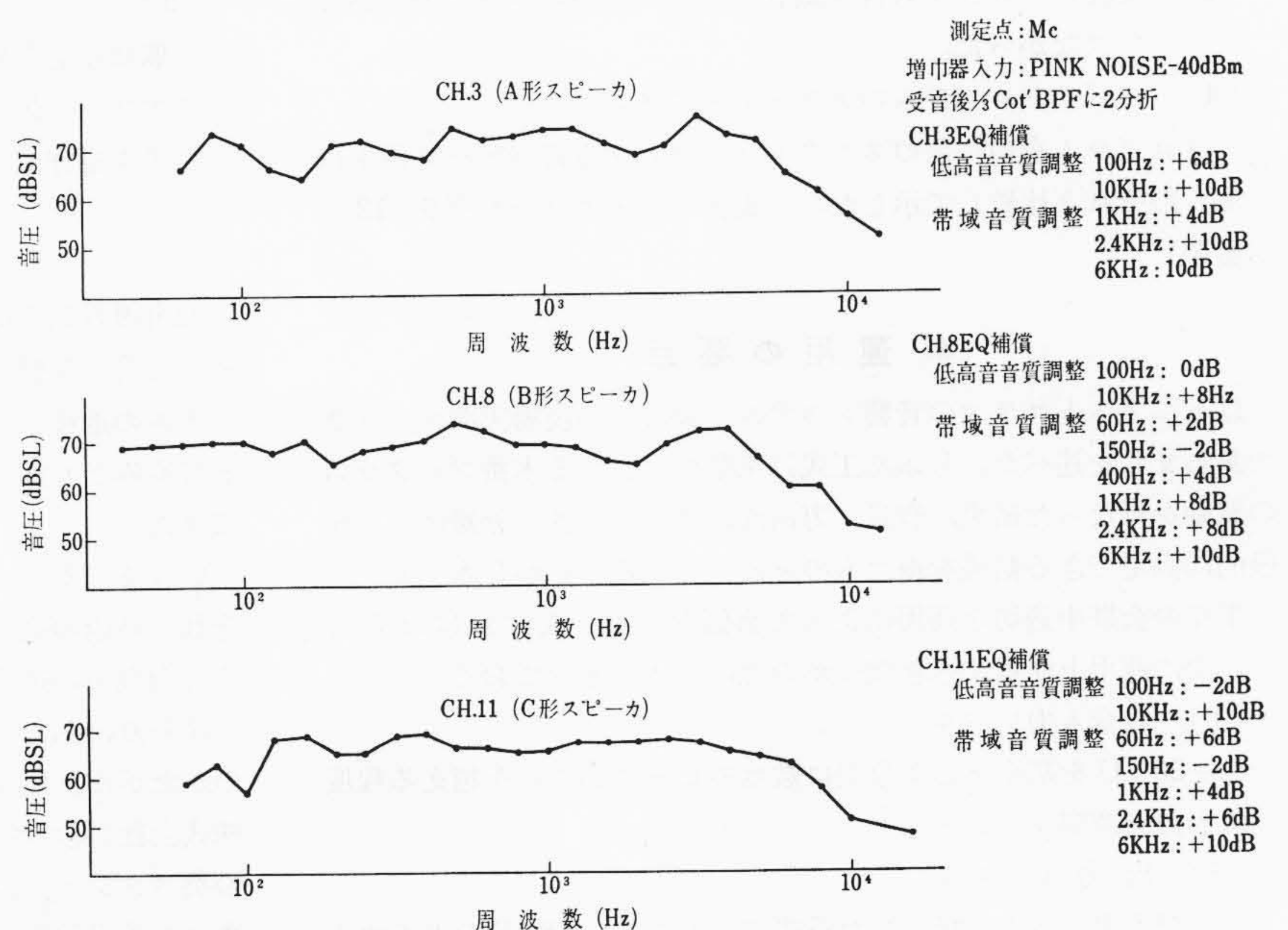


図 23 各種スピーカ周波数特性(増幅器イコライザー調整)

Fig. 23. Frequency Characteristics of Each Speaker Channel

る。これによれば、半球形ドームの特殊性として予期したとおり従来の計算推定よりやや長い残響時間が得られ、結果的に観客収容時に目標の全周波数域でほぼ 1 秒という値となることが確認された。

(2) 音圧分布

ホール内 4 点で、スピーカ A1, B1, C 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

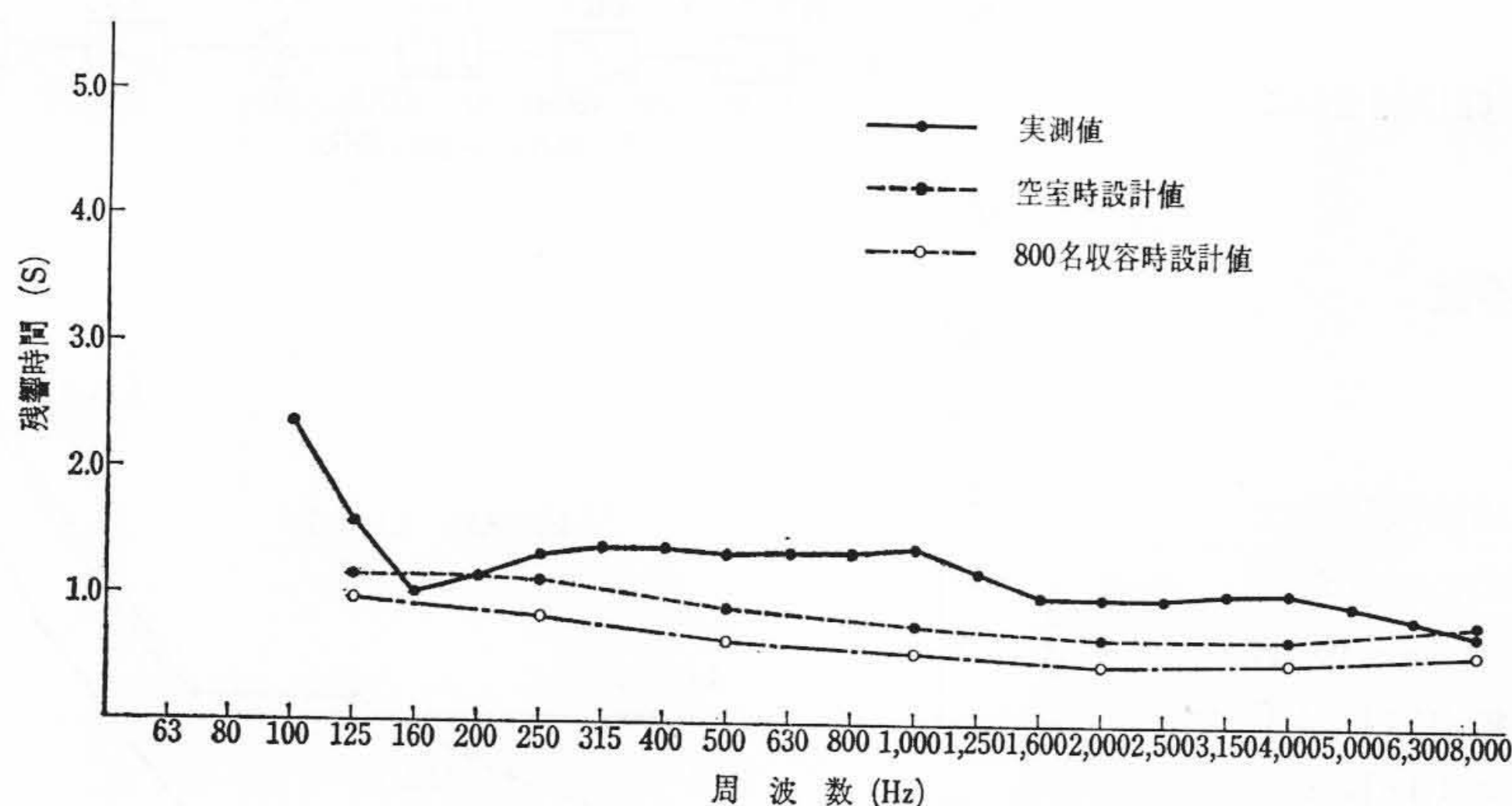


図 24 アストロラマホールの残響時間周波数特性

Fig. 24. Reverberation Time Characteristics of Astrorama Hall

による方法である。これによればスピーカ方向に垂直な方向では ± 1.5 dB 以内位にはいい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 A1+A1', B1, C より発音し、これらを床上 11 点で測定した。その結果によれば、

- (a) モデル実験で推定したように 100 ms 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。
- (b) 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。
- (c) 全般的にみて障害のあるエコーは発生していない。
- (d) 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。

(4) スペクトログラムのカラーディスプレイ

プログラム音の一部のスペクトログラムを原音（テープ再生電流）のそれと比較して示した。（表紙の裏・カラー写真 9～12 を参照）

6. 運用の要点

以上にアストロラマの音響システムの設計から現場実測データまであらましを述べた。しゅん工式以来数度にわたる本番プログラムの試聴を行なった結果、音量、方向性、明りょう性、分離性など全般的に満足できる結果を得たものと考えている。しかし本システムは半年の会期中適切な運用によって真価を発揮しなければならない。次に運用上注意すべき幾つかの点について述べておく。

(1) 録音入力レベル

-20 VU を基準とし 1 分間に数度のピークがこれを越える程度に入力を調節すること。

(2) 出力レベル

上記入力レベルで録音した番組については、58 dB のダイナミックレンジが確保されるが、再生出力のレベルも基準の VU 値を越えないよう監視する必要がある。この条件で全チャンネル駆動時

には 100 dB を越えるレベルの大音響出力が得られる。

(3) テープの寿命

テープヘッドの清掃をできるだけひん繁に実施するのみならず、室内も常に清潔に保ち、テープ使用も連続使用せず適度に交替するとしても、テープの耐用回数は約 500 回と考えるのが妥当なようである。したがって会期中は 12 本準備しておく必要がある。

(4) 各調整器、増幅器の事故

原則として標準設定のとおりとする。事故のときは管制卓からの遠隔操作で系列予備に切り換え、故障ユニットを補用ユニットに取り替えておく。

(5) テープ取扱上の注意

取扱注意を厳重に守る必要がある。保管、かけ替え、モーニングテスト、休憩中テスト、終了時の作業などについては別途マニュアルを作成する必要がある。

7. 結 言

42 年 9 月以来約 2 年半の歳月を費やしてようやくアストロラマホールとその全般の設備が完了した。音響システムとしては、全体システムの進捗（しんちょく）上のいろいろの制限を受けながら、あくまでもみどり館の立場に立って善処するように関係者全員努力してきた。

いうまでもなく、アストロラマの成功は企画、シナリオ、演出、それに技術の完全な協力によってもたらされるものである。なかんずく会期中の運用技術については万全の注意が必要であろう。

終わりにあたって、万般にわたってご指導を仰いだみどり会幹部のかたがた、建築担当の大林組、スクリーン担当の日本レーヨン株式会社（現ユニチカ）、映写装置担当の五藤光学研究所、録音担当の葵スタジオの関係者各位、なかでもコーディネータの役割を果たされた渡貫敏男氏と音楽総合ディレクタの黛敏郎氏に深甚の謝意を捧げたい。