

## 呉市民会館ホールの音響について

正会員 子安 勝\*                      中村 俊一\*\*  
         劔持 富紀夫\*\*                  正会員 北村 脩一\*\*\*

### § 1. まえおき

呉市において、客席数約1,000の多用途オーディトリウムを中心とした市民会館の建設が計画され、坂倉準三建築研究所の設計、株式会社増岡組みの施工で昭和37年4月に完成した。

市民会館の設計計画にあたっては、市庁舎および市議会議場を含めた全体にわたっての造形的な要求と経済的な理由とから、市民会館の外観およびそれともなうてオーディトリウムの平面形を円形にすることが、基本案として考えられた。

一般に円形の断面または平面をもった空間は、音響的に多くの問題を含んでいることはよく知られている。そこで、われわれは計画案について考えられる音響上の欠点を除去する方法の検討を行ない、オーディトリウムの機能に対して障害を与えない実施案の見通しを得た。

この報告では、円形オーディトリウムの処理を中心にして、呉市民会館ホールの音響設計の過程で行なった研究および完成後のホールの音響特性についてのべる。

### § 2. 室内音響設計 - その1. 室形状の設計

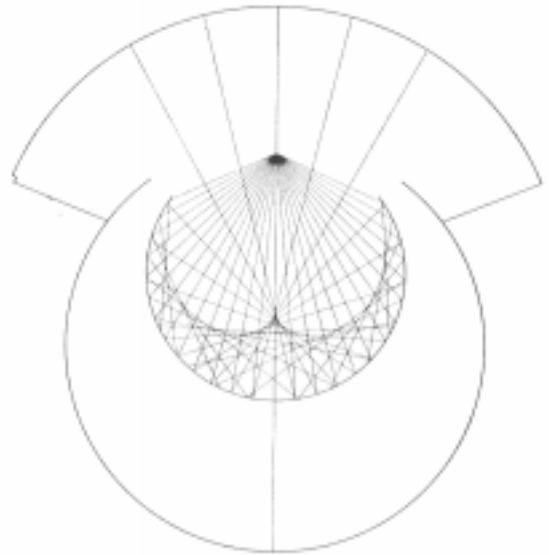
#### 2.1 室形における問題点

基本案として考えられたオーディトリウムの平面形は、1, 2階客席の側壁および舞台側壁ともそれぞれ円形

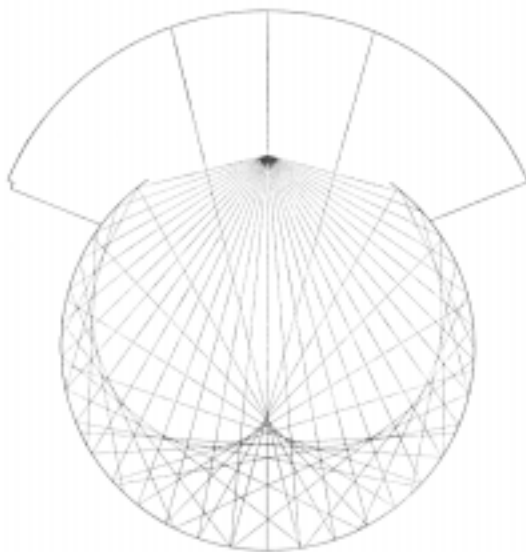
となっている。こうした平面形でおこる音響上の問題点としてまず考えられるのは、特定の場所に対する音の集中、大きな延滞時間をもったエコーの妨害である。

基本案について検討するために、舞台上の音源位置を想定し幾何作図によって2次元反射音線図を作成した。

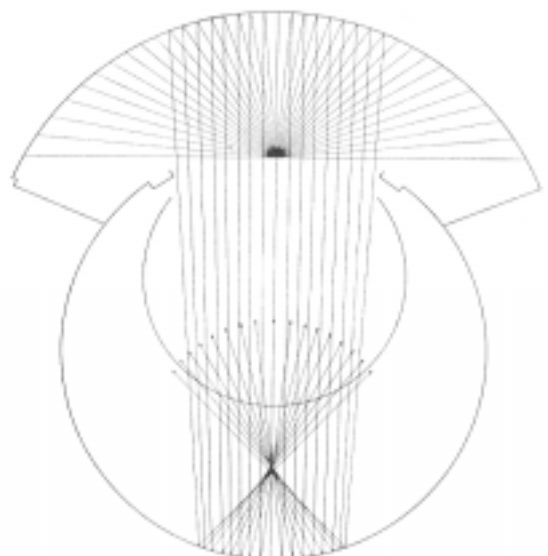
室中心線上で舞台前縁から1.5mの位置に音源をおいたとき、直接音と1次反射音の音線分布の例を第1～



第2図 平面反射音線図(2)



第1図 平面反射音線図(1)



第3図 平面反射音線図(3)

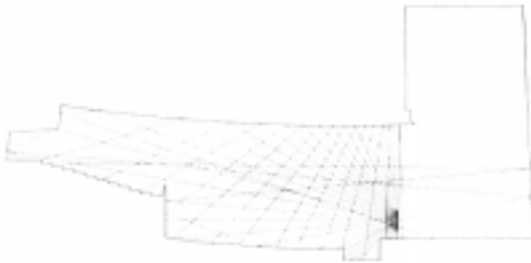
\* 小林理学研究所研究員 理博

\*\* 小林理学研究所研究員 \*\*\* 坂倉準三建築研究所

(昭和39年3月1日日本稿受理, 討論期限39年10月末)

3図に示した。第1図は客席側に放射された音線が2階席側(後)壁で1次反射した経路を,第2図は1階席側(後)壁での反射経路を示したものである。また第3図は舞台壁面で反射した音線が,2階席後壁で反射してからの経路を示した。

また同じ位置に音源をおいたときの,断面についての2次元反射音線図を作図したのが第4図である。



第4図 断面反射音線図

第1,2図についてみると,円形側面からの反射によって壁面にそって1次反射音線が集まっている。そして中心線上で室の後部にとくに音線を集中する場所がみられる。平面反射音線図に示された各音線について,その1次反射音線がつぎに壁面にあたる点までの全行路長と,その点までの直接音の行路長の差を計算した結果を,第1,2表に示した。この結果から明らかなように,多くの音線について1次反射音と直接の行路差が17m以上になっている。さらにこれから舞台方向に戻る2次反射音を考えれば,舞台上に近い前部客席については2次反射音と直接音の行路差はさらに大きくなり,聞こえに対して有害なエコーの存在が予想される。

こうして2次元音線解析の結果からみれば,基本案の円形平面ではオーデトリウムとしていくつかの難点をさげられないことになる。

## 2.2 拡散壁の模型実験

前項で示した室平面形の問題点を原形を変えないで解決するためには,側(後)壁に拡散面と吸音面を使うことが考えられる。

ここでは,意匠的な考慮も合せた基本的な処理方針として,頂点を交互に上下にもった三角錐を壁面にとりつけた変形屏風折ともいえる拡散面を主体として採用し,不十分な箇所には吸音面を併用することにした。

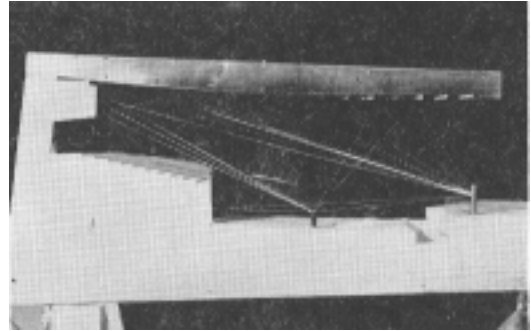
ところで,こうした拡散壁面で構成された室空間については,2次元的な反射音線の考察だけでは正確な音場の予想には不十分である。また3次元の作図を行なうことは,かなり複雑な軌跡を問題にすることになって,重要な経路を見落とすおそれもある。

そのために,ここでは3次元縮尺模型を作り光学的方法によって検討することにした。

この模型実験の目標は,拡散壁面からの反射音線を解析することである。そこで音源に相当する位置におかれ

た光源からの光の反射経路を追跡するための実験用模型および実験の方法を考えた。

もちろん,光学的方法で音の反射を推定するときには,その適用に限界があることは明らかである。しかしここでは3次元反射音線図の幾何作図に変わる方法として採用したので,十分光学的方法を適用できる範囲と考えた。



第5図 光学実験用1/33縮尺模型受音点 $P_1$ (第6図参照)

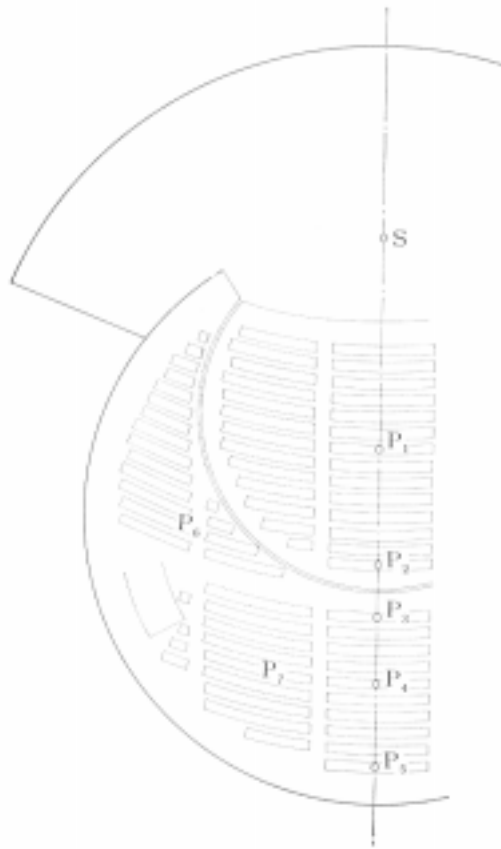
こうした方針にしたがって,第5図の写真に示すように合板と一部に石膏を使って,1/33縮尺模型を作った。ただ計画した光学実験の方法から,写真にみられるようにほぼ中心線にそって縦割りにした半空間模型とした。模型の内面はその反射をできるだけよくすることが必要である。そのために各種塗装や金属箔について比較をした結果から,内表面を黒く塗りさらに透明ラッカーで仕上げをする方法を選んだ。これによって,光源からの2次あるいは3次反射の面までを探知できるようになった。

舞台上の音源に相当する位置に小形電球をおいて点灯する。客席内の任意の位置に目をおくと,その位置に到達する光源からの光の反射点が側壁および天井面にスポットになってあらわれる。2次,3次の反射点ではスポットがかなり拡がりをもつようになるが,十分に検知できる程度であった。実際には受音点に目をおくかわりに小形の凸面鏡をおいて観測するようにした。

客席内に第6図に示すように受音点を選び,それぞれの位置に対する壁面上の反射点の位置をもとめ,光源の位置から糸を張って反射光の経路を示すようにした。このようにしてつくられた反射光経路図の例が第7図の写真である。

この実験から,各受音点について直接音に対する各面からの反射音の関係を,伝搬行路長のさと遅延時間との2つを横軸にとって示したのが第8図である。

第8図の結果を,さきの第1~4図の2次元反射音線図の結果と比較対照して行なった推論をまとめてみると(1)拡散壁の原案は全体として適当なものであり,2次元音線図の解析で示された各階後部での音の集中をさけるために有効であると考えられる。



第6図 光学実験受音点

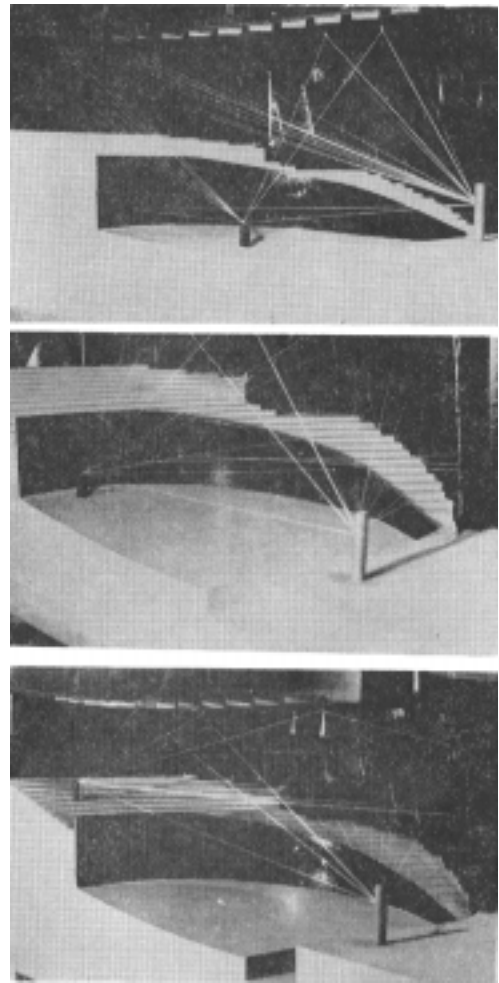
(2) 映写室前面は客席内各点とくに前部客席に対して非常に時間の遅れた反射音を送り、有害なエコーをおこす反射面となる。しかし、機能や意匠上からこの面を拡散だけで処理するのは困難であるので、十分吸音処理することを考える。

(3) 第2図の2次元解析からみると、1階後側壁も音の集中の原因になるように見える。しかしここで行なった2次元音線解析の結果は、舞台から後側壁に向った音線は、反射後その反射点に比較的近いところで床面にあたるような軌跡をとり、客席によって吸収、散乱されることになる。また側壁の高さは前方になるにしたがって小さくなっている。これらの理由から、1階後側壁は平滑反射面のままでよいと考えられる。

(4) 一般に天井面は直接音を增強する1次反射音を客席に送り込むための有効な反射面として利用されることが多い。しかし原案のままでは、天井前部が有効な反射面として役に立たないことになる。

### 2.3 室形状の決定

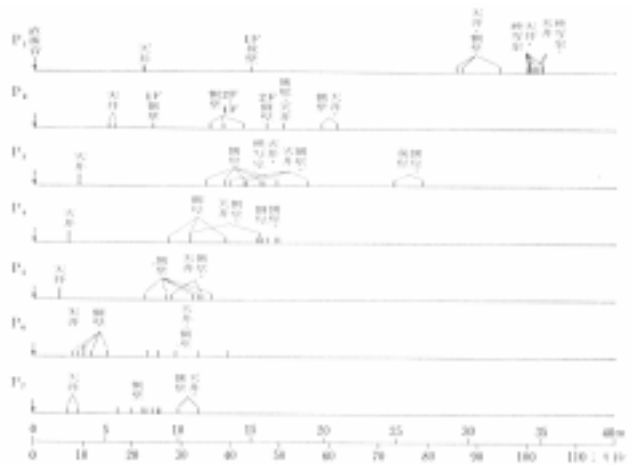
以上にのべた作図および模型実験の結果を中心にして、最終的に決定されたホール平面、断面



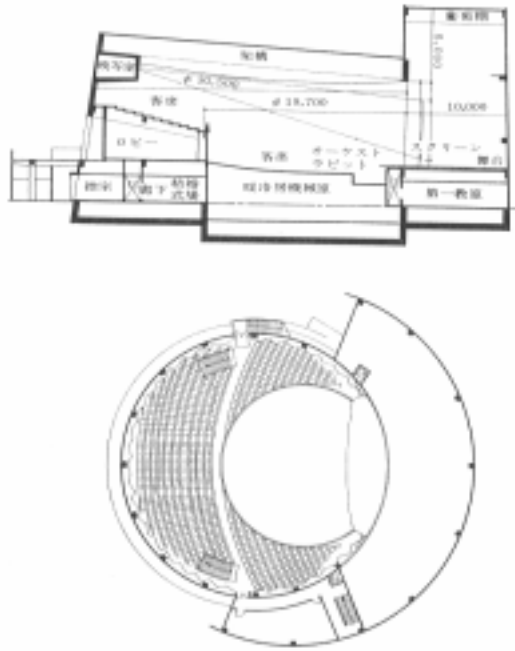
第7図 光学実験による反射音線解析の例  
受音点：上， $P_1$ ；中， $P_2$ ；下， $P_4$

形は第9図に示す通りである。

この最終図面では、さきの2.2でのべた推論の(4)の問題は残されたままである。これは舞台に設備される可



第8図 反射音一時系列



第9図 呉市民館ホール平面および断面図

動反射板の設計によって補うことにした。

第9図の図面にしたがって、客席部容積および各部位表面積を計算した結果が第3表である。

第1表 1階席後壁からの反射音線路と直接音線路長

1次反射音線路長 (m)	直接音線路長 (m)	行路長差 (m)	1次反射音線路長 (m)	直接音線路長 (m)	行路長差 (m)
18.5	15.8	2.7	32.9	15.3	17.6
20.2	16.8	3.4	34.3	13.4	20.9
23.4	18.0	5.4	35.3	11.2	24.1
25.2	18.4	6.8	36.2	8.7	27.5
27.7	18.4	9.3	47.5	13.5	34.0
29.5	17.8	11.7	47.7	11.6	36.1
31.3	16.7	14.6			

第2表 2階席後壁からの反射音線路と直接音線路長

1次反射音線路長 (m)	直接音線路長 (m)	行路長差 (m)	1次反射音線路長 (m)	直接音線路長 (m)	行路長差 (m)
23.0	21.0	2.0	51.2	27.5	23.7
26.8	23.6	3.2	53.6	25.3	28.3
30.7	26.1	4.6	55.8	22.3	33.5
34.4	27.9	6.5	57.4	18.7	38.7
38.0	29.2	8.8	59.0	14.5	44.5
41.2	29.9	11.3	60.0	10.0	50.0
45.2	29.9	15.3	70.3	12.4	57.9
48.0	29.1	18.9			

第3表 客席部容積および表面積

容積	5,160m <sup>3</sup>	1階席	130
表面積	2,428m <sup>2</sup>	2階席	530
天井	696m <sup>2</sup>	映写室前面	53
舞台開口部	130	映写室下面	44
舞台立上り壁	35	階段室	38
床	755	出入口扉	17

### §3. 室内音響設計 - その2. 残響設計

この市民会館ホールは、その性格として多目的ホールとなるので、残響時間の設計目標は500サイクルで満員時に1.1秒とし、また周波数特性はほぼ平坦にすることにした。

客席部分などの固有吸音力と、前項で室の形状に関連して吸音処理を必要とする部分の吸音力とから出発し、残響時間が設計目標値になるように内装の選択配置を行った。最終的な残響計算書を第4表に、この計算に使った各部内装材料表とその吸音率を第5表に示した。

第4表 ホール残響時間計算書(満員)

	面積 (m <sup>2</sup> )	周波数別吸音力					
		125	250	500	1,000	2,000	4,000
天井	696	139.0	104.4	69.6	34.8	34.8	55.6
舞台立上り壁	35	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
床	755	7.6	7.6	15.1	15.1	22.6	30.1
1階席	130	13.6	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0
2階席	530	106.0	79.5	53.0	26.5	26.5	42.4
映写室前面	53	7.9	18.5	42.4	42.4	42.4	42.4
映写室下面	44	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
階段壁	38	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
出入口扉	17	2.6	6.0	13.6	10.2	6.8	3.4
舞台開口部	130	39.0	45.5	52.0	58.5	65.0	78.0
椅子+聴衆	1,014 (席)	253.5	354.9	405.6	425.9	425.9	425.9
計		580.3	641.1	676.0	638.2	648.7	702.5
$\alpha$		0.238	0.264	0.279	0.263	0.268	0.290
$-2.35 \log(1-\alpha) + 4mV$		658	743	790	761	795	955
T(秒)		1.2 <sub>6</sub>	1.1 <sub>1</sub>	1.0 <sub>5</sub>	1.0 <sub>9</sub>	1.0 <sub>4</sub>	0.8 <sub>7</sub>

第5表 ホール内装仕上材料と吸音率

使用箇所	材料名	周波数 (c/s)					
		125	250	500	1,000	2,000	4,000
天井	珪ペニヤペンキ仕上	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05	0.08
舞台立上り壁		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
床	タイル	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
1階壁		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
2階壁	ベニヤクリヤラッカ仕上	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05	0.08
映写室前面	ロックウール下地ラワン材目スカシ張	0.15	0.35	0.80	0.80	0.80	0.08
映写室下面	ベニヤ	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
階段壁		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
出入口扉	ロックウール下地レザー仕上	0.15	0.35	0.80	0.60	0.60	0.20
舞台開口部		0.30	0.35	0.40	0.45	0.45	0.60

第4表に示されるように、ほぼ全周波数域にわたって目標に近い残響時間が得られることが期待された。

### §4. 完成後のホールの音響特性

前2節にのべた室形と内装についての音響上の要求を中心に、市民会館ホールの設計施工が行なわれた。

完成後、昭和37年6月14、15日に、ホールの音響特性の測定を行なった。この測定にあたっては、一般のオーディトリウムにおいて普通に考えられる事項のなか





第10図 市民会館ホール内部

でも、とくに音響設計の中心問題としてとりあげた円形平面ホールとしての特殊な問題に重点をおいた。測定項目は、

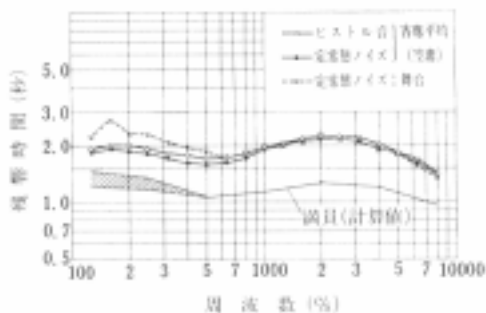
- (1) 残響時間
- (2) 定常音圧分布
- (3) 定常伝送特性
- (4) エコーの検出
- (5) 扉の庶音
- (6) ホール内空調騒音

である。

#### 4.1 残響時間

バンドノイズをスピーカから放射しておき、これを急激にとめたときと、競技用ピストルを鳴らしたときとの2つの場合についてホールの残響特性をしらべた。前者は定常態からの残響に、後者は衝撃音の残響に相当するものである。

いずれの場合にも、音源の位置は舞台中央前縁から約1.5 m とし、測定点は客席内10点と舞台上に1点を選らんだ。また舞台の条件は反射板を使わない劇場形式の場合である。



第11図 残響時間周波数特性

客席時の客席内10点で測定した残響時間の平均を第11図に示した。500 サイクル以上の中高音域での場所によるちがいは、この平均値の  $\pm 0.1$  秒以内で全く問題にならない。500 サイクル以下では  $\pm 0.2$  秒程度の差がみられたが、全域にわたって残響時間の場所による差

はとくに大きくないといつてよいであろう。またこのホールでは、定常態からの残響時間とピストル音によるそれとはほとんど差がみとめられなかった。

舞台上の残響時間は同じ図に示したように、500 サイクル以下の周波数範囲で客席部よりやや長くなっている。舞台天井と側面に反射板をとりつけて音楽堂形式にしたときには、客席内の残響時間は第11図の結果にくらべて低音域で多少短くなることが予想される。

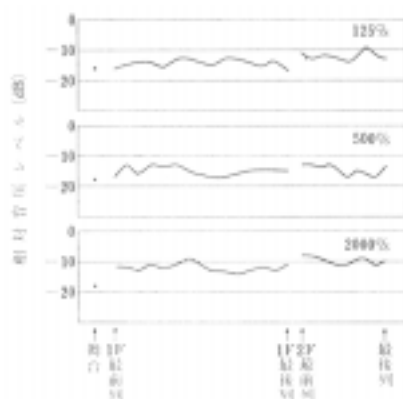
残響時間は観客の有無に関係し、実際に重要なのは人が入ったときの特性である。そこで空席時の残響時間測定結果から、人が席に坐ることによる吸音力の増加を考慮して満員時残響時間を計算によって推定した。計算結果をさきの第11図にあわせて示した。計算値のハッチで示した範囲は、季節による衣服の差を考慮したものである<sup>1)</sup>。

椅子の吸音力が小さいために、空席と満員での残響時間の差はかなり大きくなっているが、人が入ったときの残響時間はほぼ設置値に近いことが予測され、多目的ホールとしては適当な値といつてもよいであろう。

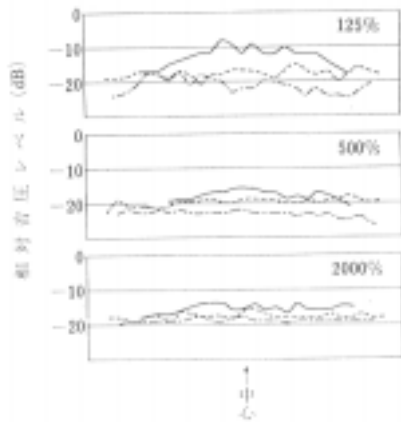
残響時間周波数特性についても、400 ~ 500 サイクルでもっとも短く、1,000 ~ 3,000 サイクルでやや長めの残響になっている。また低音域の残響もとくに長くはなく、周波数特性の面からみてもほぼ妥当な状態であるといふことができる。

#### 4.2 定常音圧分布

まず舞台上から直接に音が出ている場合(拡声装置なし)を想定し、残響時間測定と同じ位置においたスピーカからオクターブバンドノイズの連続音を出した。マイクロホンを客席内通路にそって連続的に移動させ、音圧レベルの場所による変化を記録した。125, 500, 2,000 サイクルをそれぞれ中心にした1/3オクターブバンドノイズについて、前後方向および横方向分布の例を第12, 13図に示した。図に例示した以外の径路についての音



第12図 定常音圧分布(前後方向)  
音源: 舞台中央, 1/3オクターブバンドノイズ  
0 dB: 各周波数についてスピーカ正面1 mでの音圧レベル



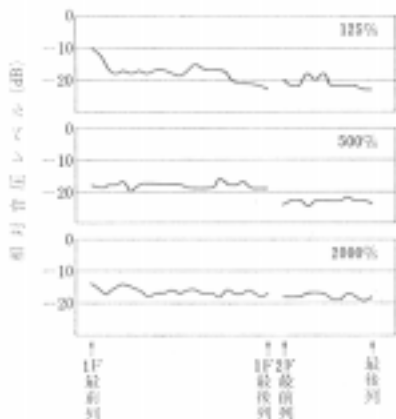
第15図 定常態音圧分布（横方向）  
音源：プロセニアムスピーカ，1/3オクターブ  
バンドノイズ  
0 dB：各周波数について任意の値  
- 1F 最前列，--- 1F 中央列，- - - 2F 中央列

圧分布も全部まとめてみると、125 および 250 サイクル帯域で舞台中央に近い客席の音圧レベルが上がっているのをのぞけば、ホール内全席にわたって音圧分布はかなり均等であり、最後列になってもほとんど音圧レベルの低下はみられない。

つぎに拡声装置を使用し、プロセニアムスピーカから音を放射したときの同様な音圧分布を第14, 15図に示した。舞台上に音源がある場合に比べると、1階席前中央部でもとくに低音域の音圧レベルの上昇はみられない。客席内全体の分布状態からみると、多少不規則な変動がみられるが舞台音源のときとくらべてとくに大きな差はない。

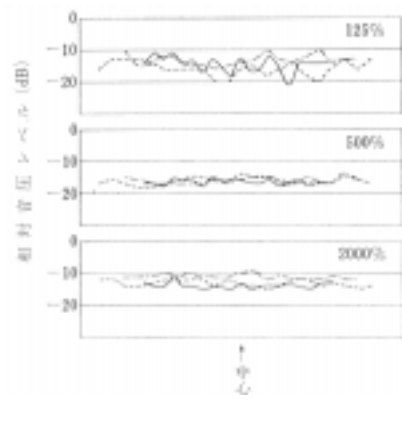
#### 4.3 定常態伝送特性

客席1, 2階各中央部の席と、2階席横中央部1点をそ



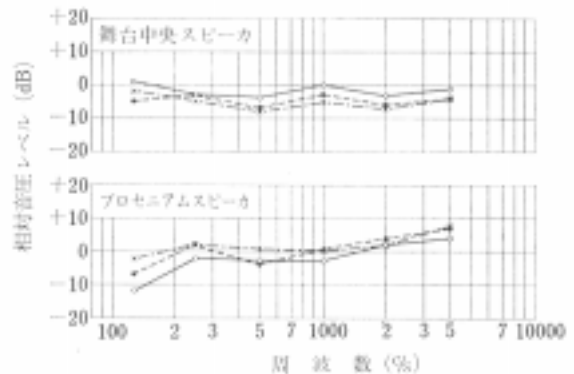
第14図 定常態音圧分布（前後方向）  
音源：プロセニアムスピーカ，1/3オクターブ  
バンドノイズ  
0 dB：各周波数について任意の値

\* プロセニアムスピーカは、第10図の写真にみられるように、舞台両袖の側壁上部に設備されており、それぞれ30 cm、コーン型1個、16cm コーン型2個、5cm コーン型2個を組合せて一組にしたものである。



第13図 定常態音圧分布（横方向）  
音源：舞台中央，1/3オクターブバンドノイズ  
0 dB：各周波数についてスピーカ正面1mでの  
音圧レベル  
- 1F 最前列，--- 1F 中央列，- - - 2F 中央列

れぞれ代表点にとり、音圧分布のときと同様に2つの音源条件での伝送特性を測定した。ここで舞台上の音源のときには、スピーカ正面1 cmで各オクターブバンドの音圧レベルを一定にし、またプロセニアムスピーカを使用するときには、拡声用マイクロホンに入る各オクターブバンドの音圧レベルが一定になるようにした。測定結果を第16図に示す。



第16図 定常態伝送特性  
- - - 1F 中央，- - - 2F 中央，- - - 横中央

#### 4.4 エコーの検出

このホールでは、はじめにのべたように円形平面をもつことが音響上の問題点であり、設計もその処理の重点をおいて進められた。

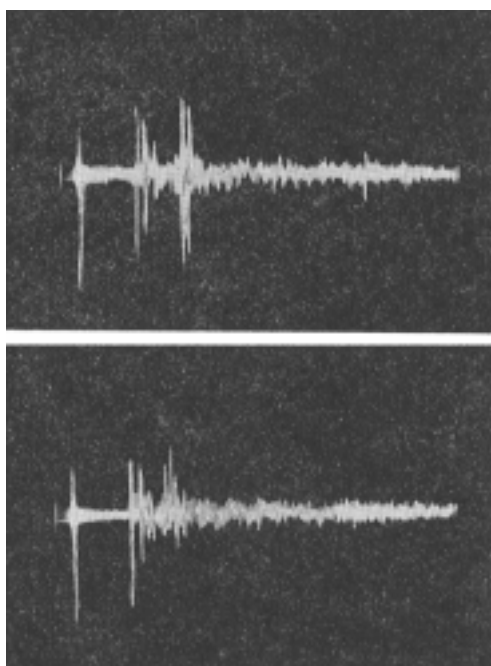
完成したホールについてこの問題をしらべ、模型実験をもとにして決定した拡散および吸音処理の効果をたしかめるための実験を行なった。

実験の方法は、1オクターブバンドノイズ（中心周波数 8,000 サイクル）を約0.5ミリ秒のゲート回路に通してつくった短音信号を、舞台中央においたコンデンサスピーカから放射し、客席内各位置においてエコーの有無を耳で聞き取るとともに、代表的な位置において反射音系列を自製の室内音場観測装置のブラウン管上に示

して観測，写真撮影をした。

その結果，いずれの方法によっても客席内ほとんどの席でエコーの存在はみとめられなかった。こうして円形平面をもったオーデトリウムでも，壁面の拡散や吸音を十分に考慮して設計すれば，エコーによる妨害を受けないようにできることがたしかめられたと考えられる。

ただそのとき，1階席最後部中央と2階席最前部中央についてだけ，わずかにエコーが聞かれた。この条件で撮影したブラウン管上の波形の写真が第17図である。このエコーの原因について現場の状況を検討した結果，舞台後壁が凹面でコンクリート仕上げのままになっているためと考えられた。この面は円形平面としての問題に対する処理の一部として，設計で平面ホリゾンとなる予定であったが，測定時にまだ設置されていなかった。そこでこの面に仮に屏風折の拡散壁をとりつけたところ，さきの特殊な席でもエコーはまったく聞えなくなった。この状態でのブラウン管波形を，さきの拡散壁のないときと比較して同じ第17図に示した。



第17図 エコー・タイム・パターン（2F最前列中央）  
上：舞台後面拡散なし，下：舞台後面拡散あり  
横軸全長：300 ミリ秒，左端：音源放射時刻

こうして舞台後壁の処理さえできれば，この円形オーデトリウムでは全客席でエコーの発生はみられないことがたしかめられた。

#### 4.5 扉の庶音

ロビーで発生したり，外部からロビーに入ってきた騒音は，おもに出入口の扉を通してホール内に入ってくる。これに対する扉の庶音効果をしらべるために，ロビーにスピーカを置いて1オクターブバンドノイズを出し

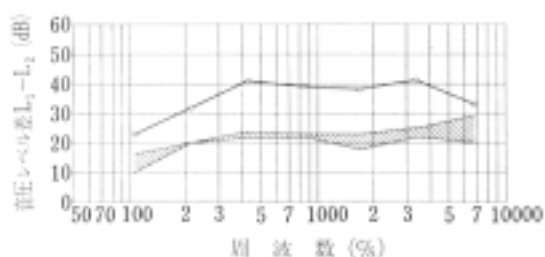
つぎの各条件での音圧レベル差を測定した。このときスピーカの直接音が扉に入射しないように，ロビーでのスピーカの位置を選んだ。

(1) 扉を閉め，その外側2mと内側1mの位置での音圧レベル差。

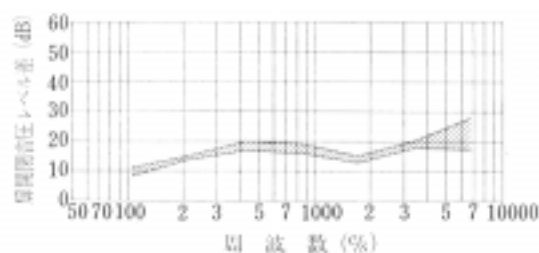
(2) 扉を閉め，ロビー中央部とホール内客席中央部との音圧レベル差。

(3) 扉内側1mの位置での扉を開閉したときの音圧レベル差。この値は扉自体の庶音特性すなわち透過損失を示すものと考えられる。

測定結果を第18, 19図に示す。この結果からみて，このホールに使われている扉の庶音性能はこの種のオーデトリウムの一重扉として普通程度のものといつてよい



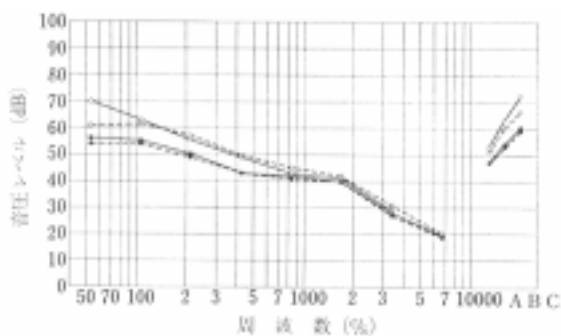
第18図 扉の庶音特性  
 $L_1$ ：扉外2m， $L_2$ ：扉内1m  
- - -  $L_2$ ：ロビー中央， $L_2$ ：1F席中央



第19図 扉の庶音特性

#### 4.6 ホール内空調騒音

このホールの客席において考えておかねばならぬ主要な騒音は空調騒音である。送風機のみを運転して換気を行なったときと，冷凍機と送風機を運転して冷房換気を行なったときとの2条件について，客席内で騒音レベル測定と1オクターブバンド周波数分析を行なった。そ



第20図 ホール内空調騒音  
1F席，2F席，- 冷房換気，--- 換気

の結果が第20図である。

300～600サイクルバンド以下の周波数範囲においては、2階席よりも1階席のほうが騒音が大きくなっている。また送風機のみでの運転に対して、冷凍機を同時に運転したことによる影響は2階席ではほとんどみとめられないが、1階席では37.5～75サイクルバンドのレベルが冷凍機の運転によって上昇している。

第20図に示された空調騒音の実状は、この種のオーディトリウムの空席時騒音許容値として推奨されている値とくらべてみると、必ずしも満足な状態ではない。そのため騒音低減の対策が計画されることになっておりかなりの改善が期待される。

#### §5. むすび

呉市民会館ホールは客席数約1,000の多用途オーディトリウムとして計画されたものであるが、平面の基本形を円形とすることになり音の集中やエコーの妨害などいくつかの音響上の問題点が提起された。

そのため光学的模型実験によって3次元反射音線の解析を行ない、拡散壁と吸音壁面とを併用することによって音響上の問題点を解決できる見通しをうることができた。こうした実験解析の結果を中心に設計したホールについて、完成後に行なった音響測定の結果からも円形平面による欠点は見出されなかった。

すなわち、いくつかの音響上の問題点を含んだ円形平面のオーディトリウムでも、設計計画の段階から十分に

準備された処理を行なうことによって、音響特性にとくに問題点を残さないような室空間が得られることが示されたと考える。しかしまた、このためには一般のオーディトリウム室形のときとくらべて、室内全面にわたっての慎重な処理が必要であり、一部でも残された部分があると室内のかなりの範囲にわたって影響があらわれる可能性があることも明らかにされた。

その他の音響特性についてみると、残響時間は空席で1.5～2.2秒、満員（計算）1.05～1.3秒でほぼ設計目標値になっている。また音圧分布や伝送特性もほとんど均一になっている。

これらを総合して、この市民会館ホールは多用途オーディトリウムとして十分な性能をもったものであると考える。

おわりにこのホールの設計および基礎研究について、建築設計の面で坂倉準三先生に、音響の面で佐藤孝二先生に御指導をいただいたことを感謝する。またホールの音響処理の問題について終始理解ある御援助をいただいた呉市当局の方々に厚く感謝する。

#### 文 献

- 1) 佐藤孝二, 子安 勝: 日本音響学会誌 14 (1958) 227
- 2) 子安 勝, 剣持富紀夫: 日本音響学会講演論文集(昭和36年10月) p.131
- 3) 中村俊一, 子安 勝: 日本音響学会講演論文集(昭和36年5月) p.163