

# 音楽堂の音響設計について

——神奈川県立音楽堂を例にして——

渡 辺 要・石 井 聖 光

“音楽堂は楽器の一部である”と云われている。それはピアノの響板やヴァイオリンの胴にも例えられ、そこで演奏される音楽が美しく聞かれるのも、つまらなく聞かれるのも音楽堂の音響効果に左右されるところが極めて大きい。従って音楽堂の設計は自然科学と芸術の両面から検討してなされなければならないし、その結果の最終的な判断は聴衆の聴覚という主観でなされる。従ってそこにいわゆる理論だけでは解決しにくいいろいろな問題を含んでいる。これから最近手掛けた神奈川県立音楽堂を例にしてわれわれが音楽堂の建設を音響の立場からどのように行っているかを述べ、諸賢のご理解あるご協力をお願いしたい次第である。

## I. 設計はどのように行っているか。

設計はあくまで科学的に行っている。出来上つた音楽堂の良否が主観によつて判断され、時には現在の理論と相反するような批判を受けることもある。こんな場合実験によってどんな物理現象であるかをつきとめ、それと感覚との間の関係を求めてゆく。もちろんこの関係はそう簡単にはわからない場合が多いのであるが、いろいろな音楽堂でのいろいろな現象についての理論と実験との資料を一つ一つ積み重ねてゆくと、やがてはそのうちのある現象について解決の手掛りを得ることが出来る。現在建築音響という学問はこのようにして一步一步進んでゆかなければならない段階にある。

従って設計にあたっては現在までに得られた資料と経験を充分活用する一方、不足している資料については理論と実験の両面から研究しながら進めてゆき、完成後の音楽堂の物理的な諸特性をあらかじめ推定するとともに結果として予期しなかったことが現われても、その原因を検討するのに必要な資料を出来るだけ多く集めておく。

実際に建築工事が始まると工事のいろいろな段階で音響測定を行う。これは工事が設計通り進んでいるか否かを確かめるため、その結果によつて若干の修正を加えてゆく。そうして完成後さらに綿密な測定を行つて設計と結果を比較し、もし相違があればその原因を検討する。この測定は聴衆満員の状態でも行い、さらに演奏会の際聴衆にアンケートを行つて音響効果について回答を求める。そうしてこの結果と物理測定の結果との間の関係を求める。このアンケートは演奏家や聴衆がその音楽

堂に馴れた頃再び行って第 1 回目と比較してその変化とその原因について検討する。

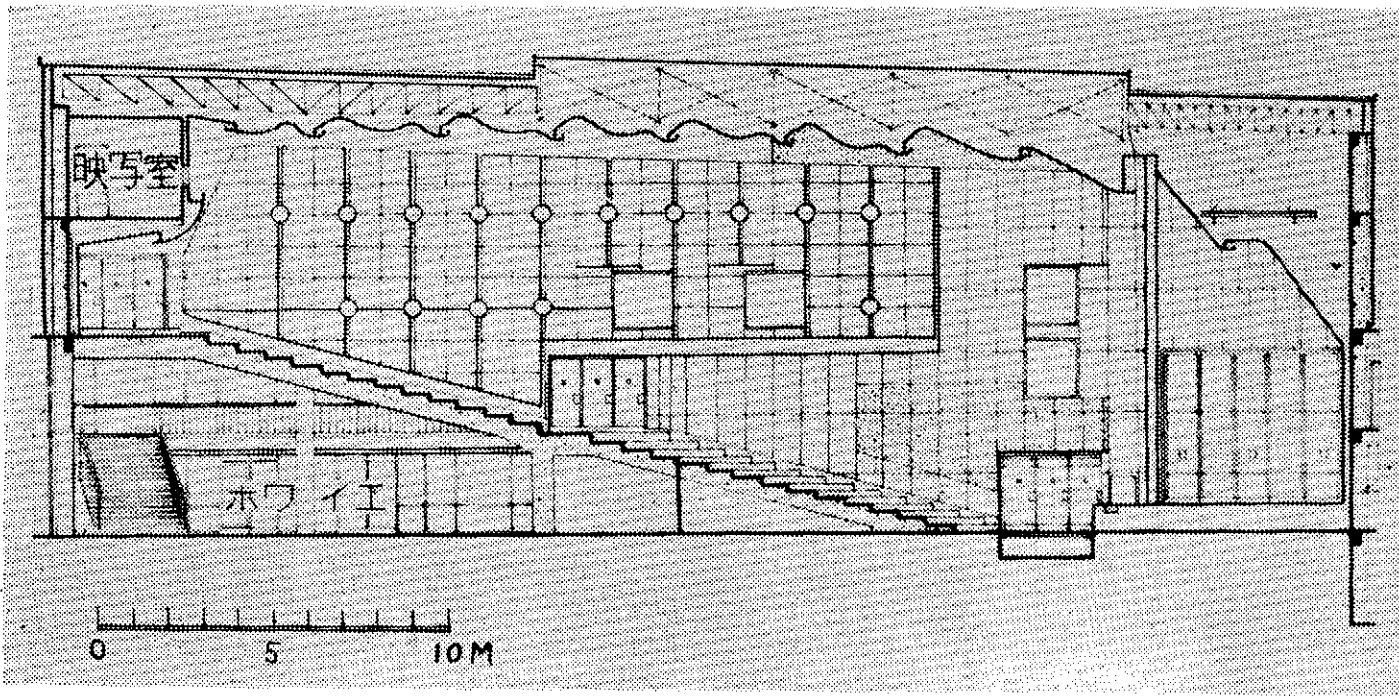
このようにある音楽堂の音響設計はそれ以前に設計したものを資料として行い、それはまた次の設計の基礎となつてゆく。

## II. 神奈川県立音楽堂の音響設計方針と設計概要。

この音楽堂は客席 1331、体積 6550 立方メートルを有する音楽専門のホールであるが、この音響設計に際し、次のような事柄を満足したものにしたいと考えた。すなわち (i) 余韻があつて豊かな音であること。(ii) 音の分離性が良いこと。(iii) 音楽堂内に一様に音がゆき渉ること。(iv) 反響がないこと。(v) 音のバランスが良いこと。(vi) 外部からの騒音の侵入がないこと。等であつた。これらのうち“余韻のある豊かな音”とは適度の残響のある部屋で得られるものとされているが、この適度の残響というものがなかなか定め難い。それは音楽堂の体積により、演奏される曲目により、また聞く人の好みによつて異なるからである。“音の分離”とはオーケストラの個々の楽器の音や、急テンポの曲の前の音と後の音とがはっきり区別して聞き分けられることである。“反響”とは“山びこ”のようなもので音源から直接くる音と、どこかの壁に反射してきた音とが時間的なずれのために別々に聞える現象をいう。この事柄に関連した Haas 氏の最近の研究<sup>1</sup>によると、この音の時差が 3/100 秒以上あるとこの“山びこ現象”を生ずるといふ。

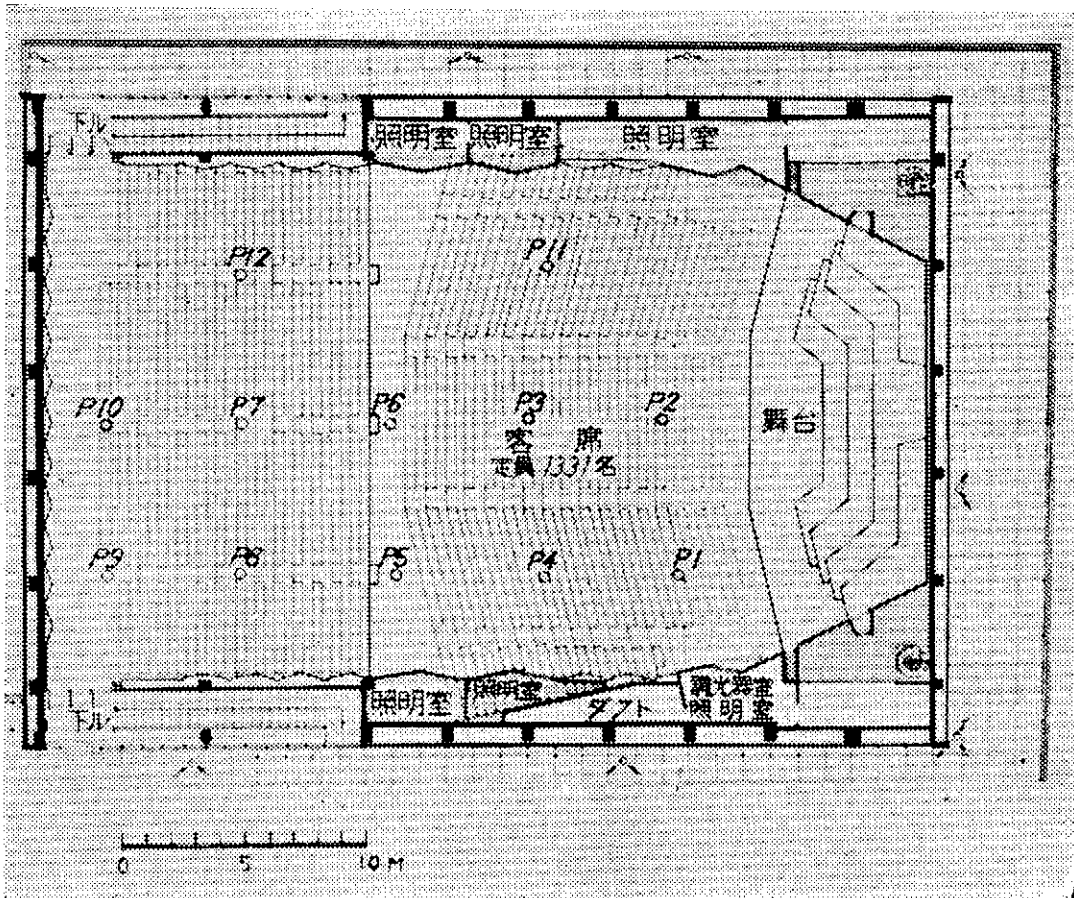
そこで以上のような事柄を同時に満足させるために次のような方法をとつた。

1) 形態について 先ず一般の劇場にしばしば見掛けられるようなバルコニーによる 2 階座席を設けず、第 1 図のように舞台近くからずつと段床とし、後にゆくに従つて客席がずつと高くなつていくような形にした。この音響的な理由は 2 階座席を設けると、その下に当る 1 階座席にはとかく十分な音が達しなくなる。段床にするとオーケストラの各楽器の音が前の人に遮ぎられずに客席に達し音の分離性が良くなるからである。また天井は舞台上とそれに続く二葉を反射板として設計し、舞台から出た音がこれに反射して客席全部に一様にゆきわたるようにし、これ以外の天井は反射性の波形とし音を拡散反射させて音楽堂内の音がよく入りまざるようにしたものである。



第1図 神奈川県立音楽堂断面図

平面形については一般的に云って矩形と扇形の二つが挙げられる。このうちいずれが音響的に優れているかという問題について、実際にこれを比較検討するに足る同じ程度の規模の矩形と扇形のオーディトリウムをわが国に見出すことが出来なかったため、この問題に関する海外の文献<sup>2</sup>を参考にし種々検討した結果矩形の平面形とし、舞台近くに扇形を加味するといった折衷案を採用した。この音響的な理由は、i) 扇形の場合は後壁が凹曲面となり“反響”を生ずる危険性があるが、矩形にはその心配が少ない。ii) 海外の例では矩形の方が扇形に比べて“音の豊かさ”に富む。iii) 矩形の場合舞台側の巾が広くなり過ぎるのでこの部分にのみ扇形を加味すべきである。等であつたがこの平面形についてはいまだ問題が多く、今後の研究課題として残る問題で、今回の設計は今後の資料となるべきものである。

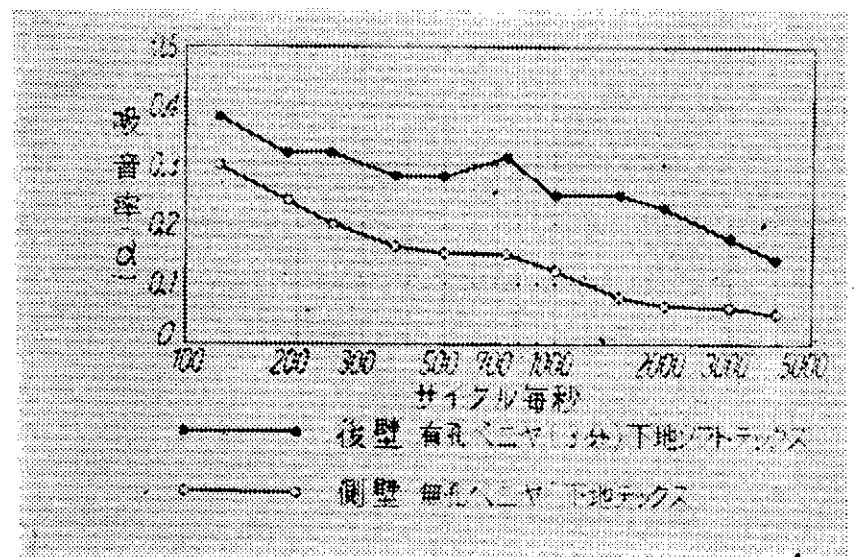


第2図 神奈川県立音楽堂平面図

2) 残響時間について “余韻のある豊かな音”にするためには適度の残響時間が必要であり、わが国の音楽堂は一般に残響が短かすぎることが報告されているので、この設計に際してはいままでより長くすることを目標とし、500c/sで1.4秒と定めた。この値は日比谷公会堂より0.3~0.4秒長いものである。

3) 反響(エコー)の防止について 反響は前に述べ

たように音源から直接きた音と、壁面から反射してくる音との時間差によるものが主であるが、この音楽堂で反響を生じる危険性のあるのは i) 後壁, ii) 側壁の舞台近くの一部, iii) 側壁と天井との交わる部分 (margin), 等からの反射である。そこで後壁には屏風折の凹凸をつけ、当つた音が乱反射するようにし、さらに映写室の下の部分はこの屏風折を孔あきベニヤで作り、その内部にソフトテックスを入れ、ベニヤとテックスとの間隔を密着のもの若干離したものと2種類とし、これが総合されて、低音から中音に涉ってほぼ様な吸音特性を持ち、高音部はあまり吸収しないようにして空気の吸音のために高音部で残響時間が短くなるのを防いでいる。この後壁の吸音率は実験室の測定結果では第3図のようであつた。



第3図 後壁および側壁の吸音率 (実験室での測定値)

舞台近くの側壁からのエコーとは舞台の右端から出た音を右後方の客席で聞いた場合、左側の側壁からの反射がエコーとして現われるもので、これは左側から出た音を左後方の客席で聞いても同様であるが、これを防止するために、平面図および断面図上で幾何学的作図を行って、エコーの原因になると思われる部分の壁を孔あきベニヤとし、その内部にロックウールを入れて充分な吸音率を持たせてある。(断面図の点々を打ってある部分が孔あきベニヤになっている)

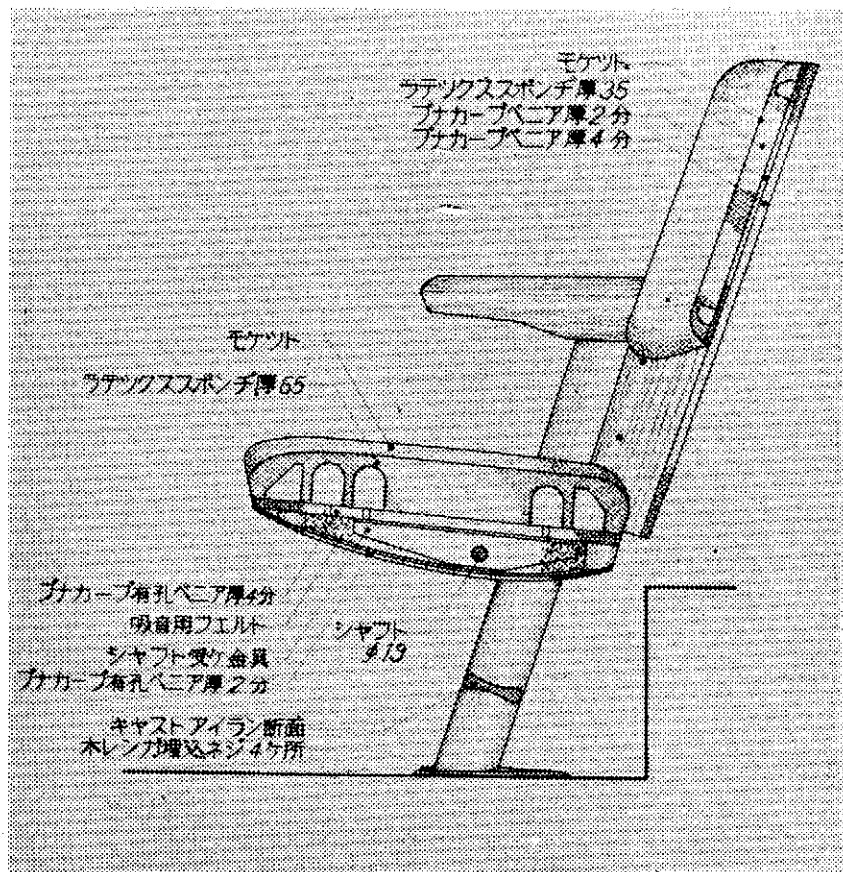
側壁と天井との交わる部分についても同様の方法で、壁側を孔あきベニヤとし、内部にロックウールが入れられている。

4) 天井、壁等の仕上げ材料について 天井特に反射板の役目をさせる部分は出来るだけ反射性のある材料が用いたいところで、これには厚いプラスター、モザイクタイル等を充分しつかりした下地の上に施工したいところであるが、これらは重量の大きくなることおよび地震の際にクラックが入る恐れがあること等の理由でなかなか使用できない。この音楽堂もこのような理由のために全部木製とし、反射板が厚さ1寸3分、波形天井が厚さ5分のものとなった。そのため波形天井は低音部に共鳴による低音吸収が若干生じている。



次に側壁については、この音楽堂の基本形が矩形であるために側壁は舞台の近くを除いて平行となり、鳴き竜 (flutter echoes) を生ずる危険性があるので、後壁同様ベニヤで屏風折の凹凸をつけ (ただし孔はあけてない) 下地にソフトテックスが入れている。この吸音特性は第 3 図の如きものである。

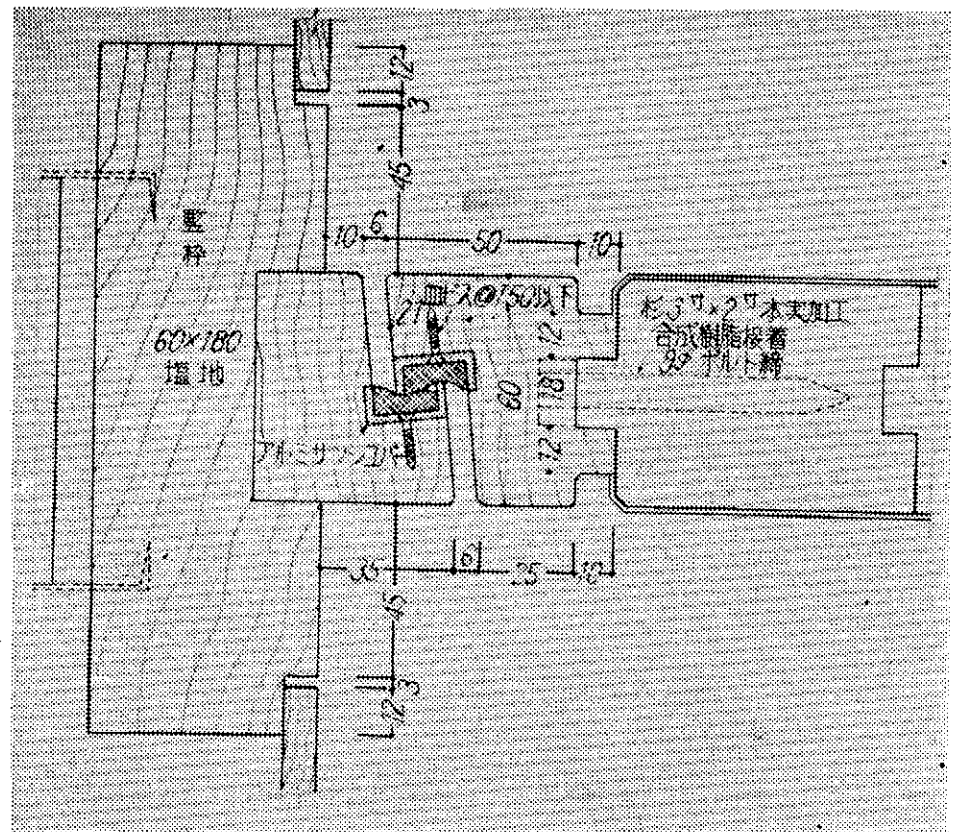
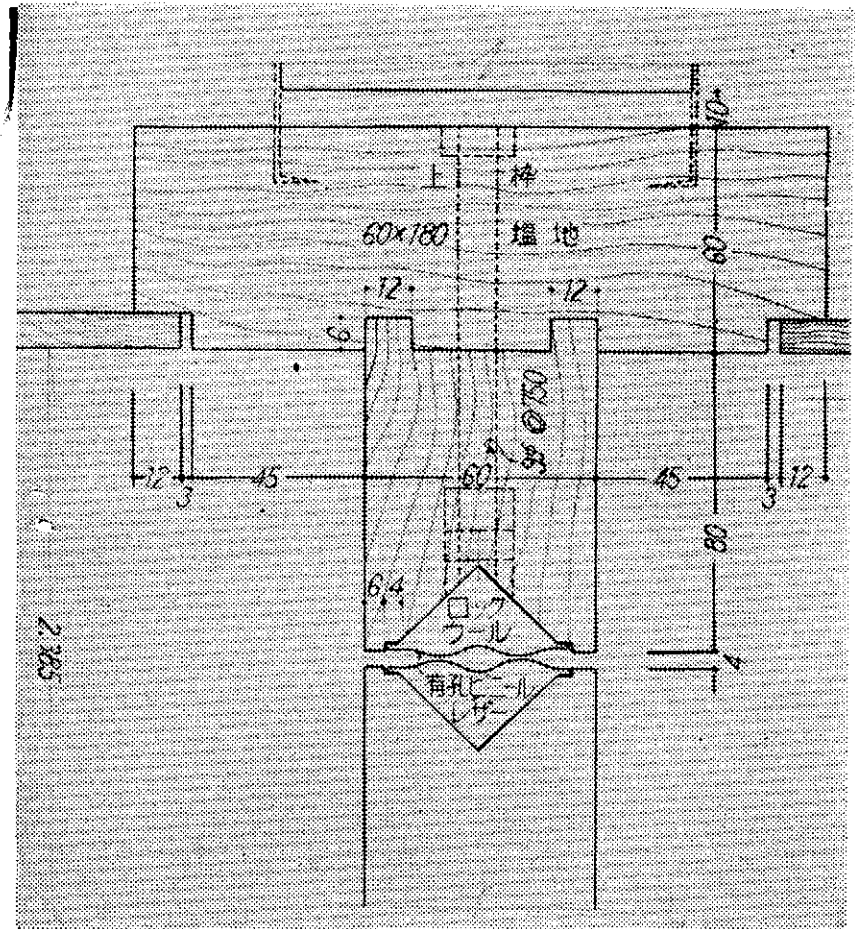
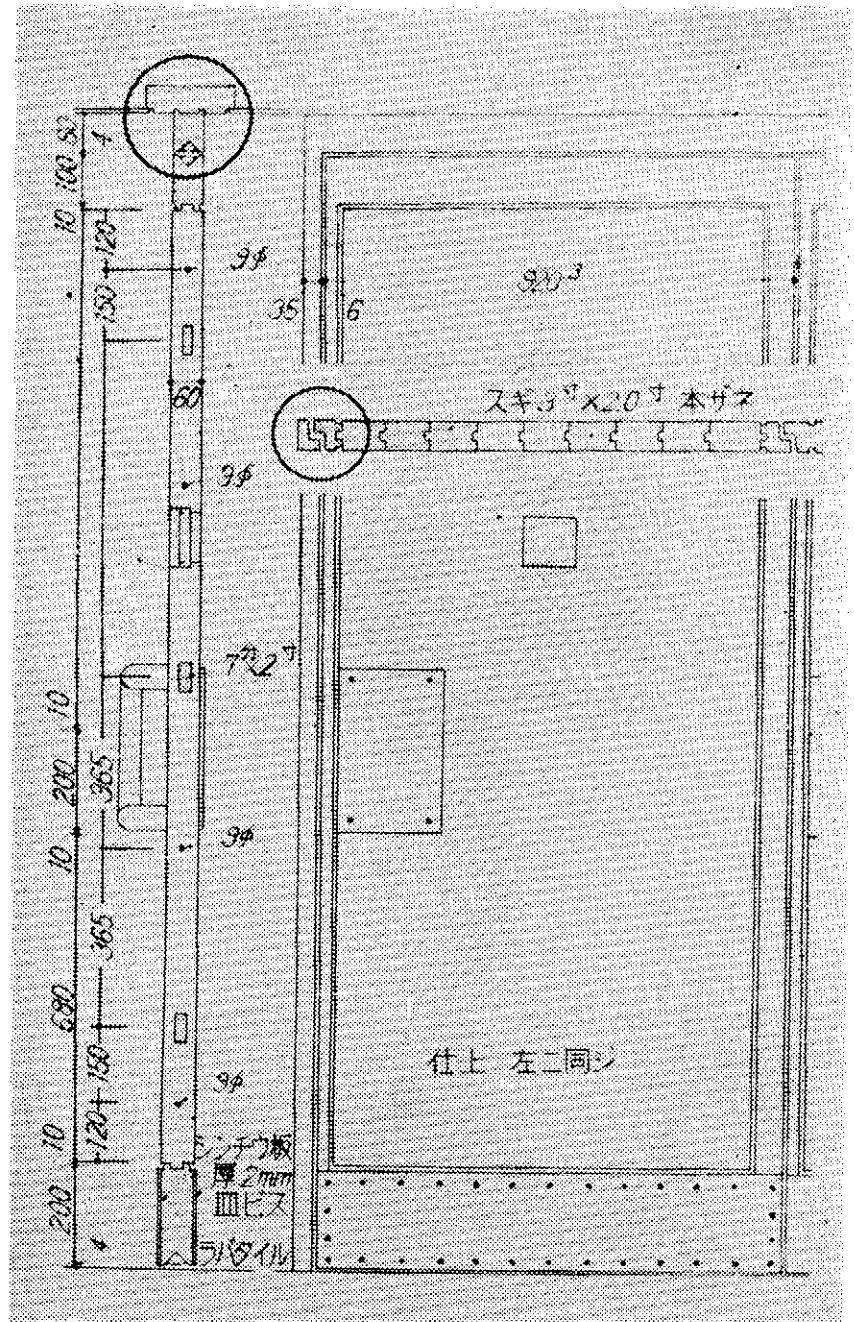
5) 観客用椅子について この音楽堂のようにその体積が観客 1 名当りにして 5 立方メートル程度のもので、残響時間を長く設計しようとする、椅子と観客との占める吸音力が音楽堂内全部の吸音力の  $\frac{2}{3}$  近くにも及び、音楽堂の残響時間に支配的な影響を与えるものである。従って椅子の設計には極めて慎重な考慮を払わなければならないが、椅子は音響的に次のようなものであるべきだと考えている。すなわち観客の多少によって音楽堂の残響時間になるべく変化を与えないようなものであるべきで、これは観客の多少による音響効果の変化を防止する為で、特に観客の全くいない状態で行う練習と実際の演奏会の場合との差を少なくするため特に必要な事柄である。ところがどのようにすればこうした性質の椅子を作り得るかという問題になると資料が極めて乏しい。そこでこのような目的でつくられた海外の椅子の写真を参考にし第 4 図のようなものを使用した。この椅子はシート



第 4 図 観客席詳細図

の裏に孔あきベニヤを用い、その内部にフェルトを入れて吸音を計り、特にシートをあげた場合によく効くようにしたものである。

6) 遮音について 外部の騒音が音楽堂内へ侵入するのを防ぐための遮音は外部の騒音の大きさと音楽堂内で許せる騒音の大きさの差に相当する訳で、音楽堂内は 35 ホン程度の静かさは保ちたい。一方この音楽堂の建てられた場所は丘の上で、この丘の下を横浜の市電が通り、その向うに国電の高架線がありさらにその向側に造船所がある。これらからの騒音は通常 65~70 ホンで最大 75 ホン程度であつたが、例外として造船所のサイレン、ごく近くでの自動車の警笛等はこの値を超えていた。



第 5 図 音楽堂廊下から場内への出入口の扉の詳細図、この構造の扉が 2 重につけてある。

そこでこれらの騒音を防止するために原則として二重壁とし、最も弱点とされている廊下から場内への出入口は木製ソリッドの第5図のような二重扉を取付け万全を期した。

### Ⅲ 音響測定にはどんな方法が用いられるか。

測定の種類と方法は大体次のようなものである。

1) 残響時間の測定：残響時間とは室内で音が鳴り止んでから、室内の平均の音のエネルギーが100万分の1になるまでの時間、すなわち音が60デシベル減衰する時間のことであるが、実際には30~40デシベル減衰する時間を計つて60デシベル減衰する時間を算出しており、音源にはラウドスピーカーから(i)純音、(ii)震音、(iii)ノイズ等を出している。(i)純音とはいわゆる正弦波の音であり、(ii)震音とはある振動数を中心に振動数が絶えず上下に変化している音、すなわち周波数変調をした音のことである。(iii)ノイズは非常に意味が広いけれども通常用いられている意味は周波数スペクトルが連続でかつ広い巾を持つた音のことを云い、この意味で理想的な低音から高音まで一様な連続スペクトルの音のことをホワイトノイズと呼んでいる。実際にはこのホワイトノイズをバンドパスフィルターを通して、ある帯域についてだけ連続スペクトルの音にして用いる場合が多い。

音を受ける側はマイクロホンで受け、以前にはこれをそのまま電磁オシログラフ等で残響波形を画かせていたが、最近では途中で一度整流し、かつ対数目盛にするものが多い。そのため残響曲線は直線となり、かつ広い範囲の測定が可能である。残響曲線の観察法はHigh Speed Level Recorderのように機械的に画かせるもの、われわれの研究室で試作した残響計<sup>3</sup>のようにブラウン管で観察するものがある。

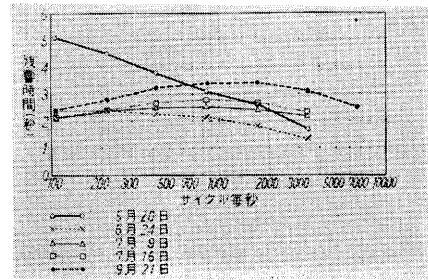
2) 伝送特性の測定 この測定は舞台上の音源から観客席に音の伝わる状態を測定するもので音源から純音、震音、ノイズ等の連続音を出す場合と、短音(パルス)を出す場合とがあり、パルスを用いると、天井、壁等から音が次々に反射してくる状態を観察することが出来る。これらの伝送特性は残響時間とともに音楽堂の音響効果に極めて密接な関係があり、特に主観と物理測定とのむすびつけに重要な役割を演じているが、いまだ明らかなでない点が多い。

3) 遮音の測定 この測定は音楽堂の遮音上の弱点とされている出入口の扉その他についてなされる。音源としては震音、またはノイズが用いられ受音側の測定器には騒音計がしばしば用いられる。

### Ⅳ 神奈川県立音楽堂の音響測定

音響測定は、工事途中は主として工事の各段階における残響時間の測定を行い、完成後はこの外に遮音その他の測定を行った。

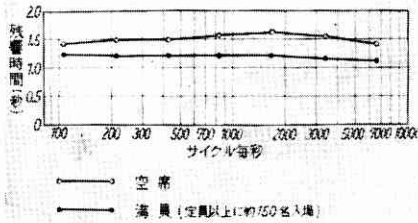
1) 工事の各段階における残響時間 この音楽堂の工事の途中前後5回に渉って残響時間の測定を行った。音源にはオクターブバンドノイズを主として用い、この間の残響時間の変化は第6図の如くであった。i) 第1回



第6図 工事各段階の室内平均残響時間

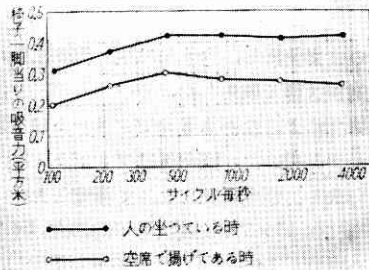
目の測定は昭和29年5月20日で、工事の状態はコンクリート打が完了し、仮枠がとれた直後で、木工事がごく一部始っていたが、この木工事は残響時間の測定に関係するとは思われない程度で、この測定の際の室体積は約10150m<sup>3</sup>であった。ii) 第2回目の測定は6月24日で波形天井が完成し、他は後部の側壁の一部と後壁の下地のテックスが貼ってあり、他の壁面はペニヤを貼るための野縁がほとんど全部取付けてあり、室体積は約6600m<sup>3</sup>であった。iii) 第3回目の測定は7月9日で、後壁、側壁等の木工事はほぼ完成していた。ただ舞台は側壁、床ともに出来ておらず、客席床はコンクリートの上にゴムタイルを貼るためのモルタル下地の施工途中で、出入口の扉は取付けてない。また足場はまだかかっていた。iv) 第4回目の測定は7月16日で第3回目と比較して足場が撤去された以外は同一の状態であった。この二つの測定から足場の影響を求めようとしたのであるが、残響時間の差が低音部で0.1秒、中音部でも0.2~0.3秒であり、残響時間の測定にも±5%程度の誤差を認めなければならぬので、この差から足場の吸音力を求めることはあまり意味があるとも思われなかった。しかし足場による吸音があく僅かであることは確かである。v) 第5回目の測定は9月21日に行われ、客席が取付けてない以外は全く完成した状態であった。第4回目と比較して残響時間は延び、特に中、高音部で著しい。これは建具類の取付が完了して開口部が全く塞がれたこと、床のゴムタイルが貼上って高音の反射性が良くなった等によると思われる。これらの結果から各材料の吸音率を求めたかったのであるが、幾つかの工事が平行して行われた関係から適確な値を求めることは出来なかった。

2) 完成後の測定結果 残響時間の測定結果は第7図のようである。500c/s付近で空席で1.5秒、満員で1.2秒であった。ただ満員の場合の測定は、この音楽堂の落成記念行事の際に行った為、定員1331名の他に通路その他に約150名余分に入場しており、少なくとも10%は定員を超過しており、定員の場合には恐らく残響時間

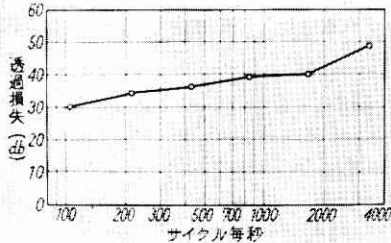


第 7 図 完成後の室内平均残響時間

1.3 秒はあると推定している。高音部、低音部での残響時間の差は極めて少なく、0.1 秒以内であり、フラットな周波数特性を持っている。なお満員の際の測定は、時間の節約のために音源にホワイトノイズを用い、残響音をテープに録音し、再生の際にバンドパスフィルターを通して分析した。



第 8 図 現場測定の結果から求めた観客席の吸音力方で低音部で 30 デシベル、高音部で 50 デシベルに達していた。この結果外来騒音は観客席中央で 35 ホン以下で当初心配した電車や汽車の騒音は全く問題にならなかった。ただ朝夕の造船所のサイレンが 40 数ホンであるのが少々気になった程度である。

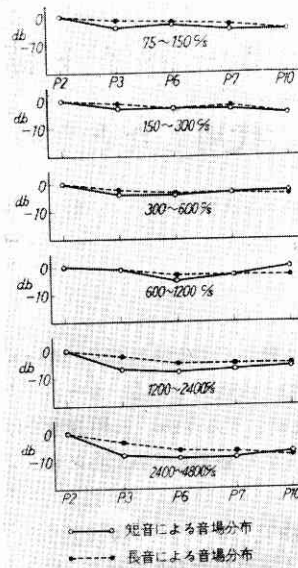


第 9 図 2 重扉の遮音特性

ターバンドノイズの長音と短音(パルス)を使って測定

次の遮音については、観客席出入口の二重扉の遮音特性は第 9 図のよ

伝送特性については空席の場合に音源を舞台中央におきオク



第 10 図 舞台正面の最前列を基準にした距離と音圧の関係

約 0.1 秒短かった以外は、大体設計通りの結果を得ることができ、また将来への多くの資料が得られた。

最後にアンケートによる主観調査であるが、これは (i) 音の大きさ、(ii) 音のバランス、(iii) 余韻、(iv) 音の分離性、(v) 反響の有無、等について OX 式で調査を行っており、神奈川県立音楽堂の場合もこの方法で実施し、各調査項目につき、回答者の 80~90% の人が良いと答えている。これらの結果、および物理測定との対応その他については改めて述べさせて頂くことにする。

また音響設計の例とした神奈川県立音楽堂は前川国男建築設計事務所の設計になるもので、われわれの音響上の要求を快よく容れられ、測定その他の面で協力せられたことに深謝する次第である。(1955. 4. 1)

文 献

1. Haas, H., Acoustica vol. 1, p.49. 1951
2. 例えば Parkin, Allen, Purkis, and Scholes. The Acoustics of the Royal Festival Hall, London, Acoustica vol. 3, No.1. 1953
3. 渡辺, 石井 ブラウン管直視型生研式残響計, 生産研究 昭 28 年 7 月号

