

オーケストラ練習室の音響設計例

真藤利孝
加藤幸雄
平野滋

概要

放送局、音楽大学等においてはオーケストラのための練習室が必要となる。これは客席を持たない舞台で練習することで、練習室は当然小さいものとなるが実際のホールと同様に音響的には特別な配慮が必要となり、特殊な対策を検討しなければ、ならない。すなわち適正残響時間（適正残響時間についても議論のある所であるが）を得るだけでは不十分であり、指揮者がタクトを振って奏者が演奏し、その音が指揮者に到達するまでの時間の奏者位置による差等の問題をチェックしなければならない。本文はこのたび当社東京支店設計部設計の東京文化学園オーケストラ練習室の音響設計をする機会を得たので、当練習室の室形の特殊性、それに対する処置を示したもので、第1章に設計方針、残響時間、音圧分布等の検討、数値計算を示し、第2章として練習室完成後（43年9月）に現場で行なった測定結果を示し、所期の目的を達しているか設計値との比較検討を示したものであ

1. 東京文化学園オーケストラ練習室音響設計

1.1. 東京文化学園オーケストラ練習室

当オーケストラ練習室はコンサートホールの客席部分を除き、舞台部分のみをとり出したもので、フルオーケストラとコーラス席を有し本来のオーケストラの練習と、隣接する録音室により練習中の演奏を録音し、それを即座に再生し、奏者に自分の演奏を聞かせ練習の効果を確認するという目的を有した練習室である。

平面形、断面形の決定に当っては、意匠設計者と種々検討の結果最終的には図-2.3 に示すようなものとなった。このような形に決定したいきさつは、一般建物と特に異なる理由はないが、次のような理由によるものである。

敷地形状（及び道路）による法規制限、既存校舎との関係、練習室という性質から平面的にイレギュラーな形でも良い等で、図に見るような扇型の五角形となった。この五角形の間口の狭い方が客席部分であるがこれは後に理由は述べるが、指揮者と奏者の距離が離れすぎないようにする事と、入口より入室した奏者が指揮者の横を通らずに着席できるようにという理由からこのような配置となったのである。

1.2. 当オーケストラ練習室の音響設計方針

先ず五角形の平面形を検討してみると、この平面形は音が隣接する壁へ次々と反射し、音がまわる傾向が

あり音圧分布のばらつき、エコーの発生（直接音から50msec 以上遅れて到達する反射音の強さがある程度以上だと音が分離して二つの音として聞え有害なエコーとなる）等が生じやすく、いずれかの壁面に吸音または拡散仕上げとする必要がある。（オーケストラ練習室は法規的には教室とみなされ採光面をとらねばならず、五角形の平面形の壁のうち法規上必要な採光面をとらねばならぬから、少なくともその面積はガラス等の音響反射面となる制約もある。）

また、一方扇形の要の方向に指揮者がいるため、概要で述べた指揮者位置の音響状態については、各演奏者位置で発した音が壁で反射し、一次反射音が平均し

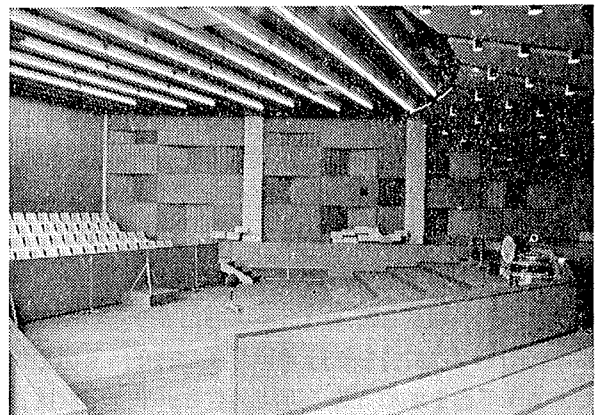


図-1 練習室内を見る

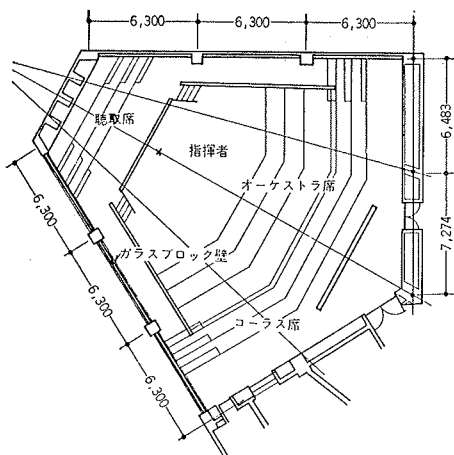


図-2 オーケストラ練習室平面図

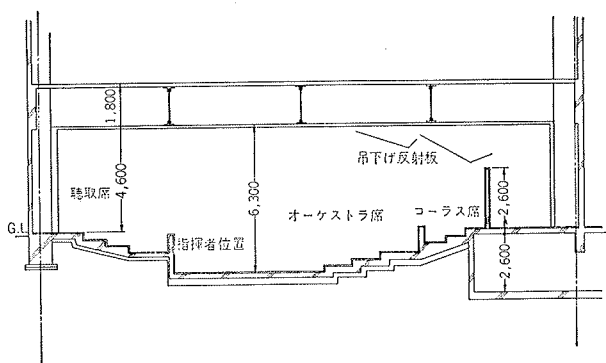


図-3 オーケストラ練習室断面図

で到達する利点もある。

次に断面の形については、先ず天井高が7m弱しかなく一般のホールが9m以上あるのに比して低くなっている。これは、道路による斜線制限により高さが法規的に押えられたためであり、これに起因して室容積が当然不足して音響的には好ましくない結果をもたらしている。後に別に検討するが、フラットな天井はオーケストラ練習室としては障害の生じやすいものであるが、特に奏者上の反射板は奏者自身が自分で発した音を聴取確認し、また、指揮者にも(客席方向)有効な一次反射音を落す必要があり、適当な反射板を適当な角度で吊らなければならない。この反射板は、天井の一部として設けるのが適当であるが、上述した理由により室容積が不足しているため、ここでは反射板は浮雲状に吊り下げて反射板裏の空間も練習室の空間として利用する事とした。

以上、平面形、断面形の検討よりあらまし次のような音響設計方針をたてた。

○エコーの防止、音圧分布の均一化等のためには壁面に凹凸をつけて音を拡散させたり、吸音仕上げとしてエネルギーを弱める等の方法があるが平面図に見るように扇形の一面がガラスブロック(これを拡散的形

にすることは困難)であるので、その対称面は吸音または拡散仕上げとして音のまわるのを防がねばならない。一方、指揮者位置への音の左右のバランスを考えると片面のみを全面吸音することは好ましくないので、一部吸音、一部拡散仕上げとする。

○オーケストラ練習室内音響状態を実物ホールに近似させるため、客席部に相当する壁面、天井は反射音がかえってこないよう吸音仕上げとする。

○室内容積がなるべく大きくなるように(室容積が小さいと音に豊さが欠ける)奏者上の反射板は浮雲状に吊り下げ、反射板裏の空間も室内空間と一体とする。

1.3. 指揮者位置での音響特性

オーケストラ練習室について特異な音響障害として、次のような事が報告されている。

ある練習室において演奏練習時に、奏者が指揮者の指示どおりに演奏を開始しても、各楽器からの発生音の間に時間のおくれがあり、演奏に障害になり、指揮者からクレームが出ている。この障害についていくつかの練習用ホールを調査検討した結果、その原因として、次のような事が指摘されている。

この障害の主原因は、指揮者に近い楽器と遠い楽器との距離差によるものである。一般にテンポの早い曲の進行速度は、一音符あたり100msec程度となるので距離差24m(音速で100msec)以上になれば、一音符以上のおくれが生ずることになる。しかし指揮者と各楽器との距離差はどの練習室においても大きな差はない。そこで演奏者の距離をあまり大きくしない事と次のような事に注目しなければならない。

この障害は指揮者に直接音に続いて次々と到達する反射音の状態に関係があり、これは建築的処理により決まるという事である。練習室のように小さい部屋でも一次反射音は十分検討しなければならない。これを行なわないと直接音から50msec程度遅れた反射音が多い場合は直接音を含む50msec以内の音がマスクされやすく、奏者の発した音があたかも遅れて発せられているように指揮者には聞える恐れがある。

ここで対策としては、天井からの反射音が指揮者位置に、ある特定の角度からしか到達しないというような事がないようにすることで、天井の形はフラットなものとはさけ、あらゆる音源位置からの反射音が均等に指揮者位置に到達するようにしなければならない。

当オーケストラ練習室については、奏者上に吊り下げ反射板を設けるとともに、天井のフラットな部分もオーケストラ前部にかかるため、フラットな天井部も、可能なかぎり拡散の効果があるような形とする。反射板の吊り下げ角度は、指揮者への反射音を考えて決定

する。平面形が五角形であるので、コーラス席背後に空間が生じ、指揮者位置の音響障害の一因ともなり、また、出入口の目隠しになるもので、コーラス席背後に反射スクリーンを立てる事とした。

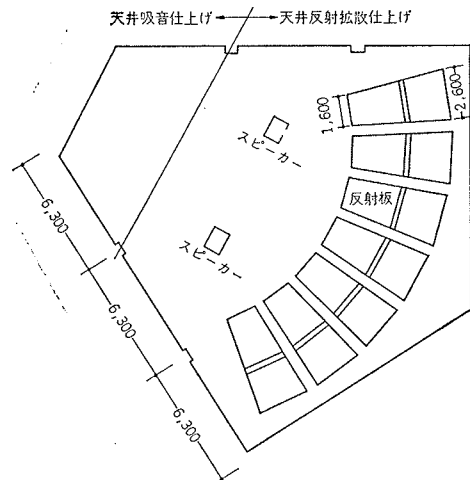
1.4. 吊り下げ反射板の検討

奏者上に吊り下げる反射板については、その形、大きさ、吊り方等意匠設計者と打合せながら決定したが、今回のように反射板としての目的のほか、浮雲状にして背後空間も利用する場合には、その大きさ、吊り方等を検討しなければならない。吊り方については、奏者位置から指揮者への音線経路に、ばらつきが生じてはまずいので、ランダムに吊る事は好ましくなく、一様な高さで吊り、その形も一様なものにした。反射板の大きさが大きく、また、その間隔が小さいと、反射板背後の空間と、練習室側が一体とした空間とならず、いわゆるカップルドルームの現象（残響時間の異なる二室が小さな開口部でつながっていると、残響時間の短い室に長い方の残響音が影響する）を生ずる恐れがある。しかし、あまり隙間を大きくして吊り下げると反射板としての効果と相反する。

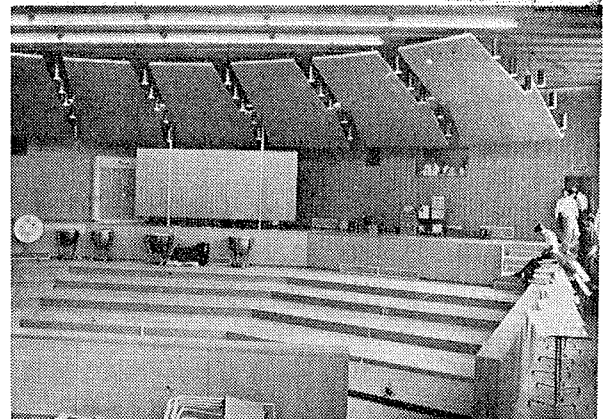
したがってここでは反射板（1.6×2.5m、2.6×2.8mの大きさ）これを七列、計十四枚のものを50cmの間隔で吊り下げる事とした。

吊り下げ角度については、幾可音響的に図面上で音線図を作図し、指揮者へ一次反射音が落ちるよう、その吊り下げ角度を決定した。

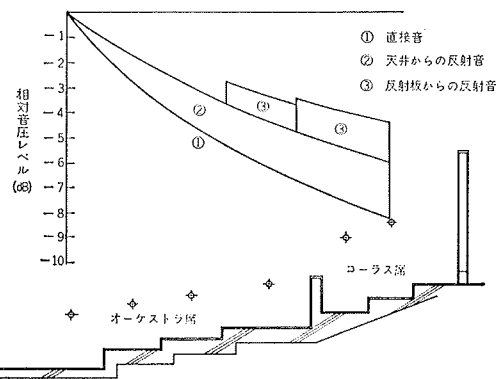
ここで作図した各奏者位置より指揮者位置への音線経路より、直接音と一次反射音の時間遅れは最大で20 msec、最前部と最後部（コーラス席）の直接音の時間遅れは約 20msec である。これらの時間遅れ 20msec は舞台広さからいって当然のものと思われ、良好な結果が得られているといえよう。これは、一般ホールよ



図一四 吊り下げ反射板配置図



図一五 吊り下げ反射板を見る



図一六 指揮者位の相対音圧レベル

りやや低めの天井高が、時間遅れの問題に対しては、むしろ良い結果をもたらしたと考えられる。先に求めた音線径路を用いて、各奏者位置から指揮者位置へ音が到達した時の相対音圧レベル（最前部を基準）を計算して図示して示した（図一六）これを見ると、後部席のものは反射板と天井から反射音が到達しており、相対音圧レベル-4.5dBとなっており、直接音を4dBカバーしている。これにさらに側壁からの反射音が加わるので、実際にはさらに良い結果が得られるものと思われる。

1.5. 残響時間の調整

以上、あらまし決定した練習室の室内表面積、室内容積を計算すると、次のようになる。

$$\text{室容積} \quad V=1546\text{m}^3$$

$$\text{室内全表面積} \quad S=1523\text{m}^2 \quad V/S=1.01$$

（吊り下げ反射板裏表面積を含む）

$$\text{床面積} \quad S=357\text{m}^2$$

最適残響時間は室容積と使用目的によって定まるが、練習室という特殊性を考慮しながら決定しなければならない。この練習室の室容積は、1550m³あるが音楽専用ホールで室容積1500m³ならば、残響時間は1.3秒程

度 (Knudsen & Harris) が推奨されているが、我国のほとんどのオーディトリウムが多目的に使用されるため、残響時間は短めとなっている事などからこのオーケストラ練習室の残響時間の設計目標を次のように決めた。

オーケストラ70名、聴取席42名(全席の7割)以上112名 入室時 500c/s で1秒とする。

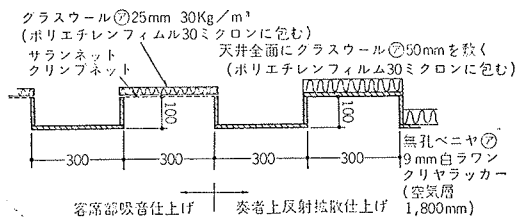
残響時間の周波数特性については全周波数域にわたって著しい凹凸がなく、低音域でやや上昇する特性が推奨されている。低音域の上昇は 500c/s の値を基準として 125c/s 1.5倍以下にしなければならない。

1.6. 室内仕上げ材料の選定

残響時間の設計目標値 500c/s で、1秒と平面形、断面形の検討で明らかになったエコーの恐れのある部位等を考慮しながら各部材料、拡散体を選定しなければならない。材料の選定もあらかじめ設計者と打合せながら進めているので吸音力調整部として側壁、後壁、前壁を残し、他は設計案どおりとして検討する。

天井については先に述べた理由により、奏者上の天井についてある程度の拡散、客席部天井については吸音仕上げが必要であるので凹凸を設ける事にした。

(図一七) この凹凸は、天井全面に30cm幅で交互に、10cm突出させる事とし、奏者上の天井については、無孔 9mmベニヤにて、反射拡散効果を得、客席部1スパンは凹部にグラスウール25mm厚をクリンプネットとサランネットで押え、空気層180cmの効果で低音域より高音域まで大きな吸音力を処理した。



図一七 天井詳細図

残響時間の計算式は空気の吸収を考慮した Eying 式を用いた。

ここで吸音力調整をだいたいどのようにすれば良いか計算してみると次のようになる。

500c/s T=1秒 とすると

$$-\log_e (1-\alpha) = \frac{0.161 V}{ST} = \frac{0.161 \times 1545.5}{1516} = 0.164$$

$\alpha = 0.152$

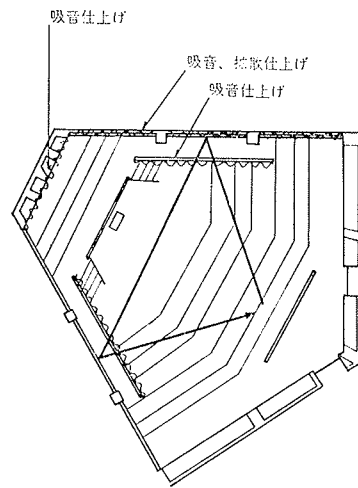
$S\alpha = 230\text{m}^2 \text{ sabin}$

側壁、後壁、前壁 以外の吸音力 $S\alpha = 150$

側壁、後壁、前壁 必要吸音力 $S\alpha = 80$
 側壁、後壁、前壁 必要吸音率 $\alpha = 0.335$

側壁、後壁、前壁の 500c/s における必要吸音力は、80m²sabin となった。この吸音力を各壁面にどのように配分するかが問題となるが、吸音の必要性を整理してみると次のようになる。

1. 前壁部(客席部相当)は実物ホールに近似させるために低音域から高音域まで一様に吸音し、また、その吸音率も大きなものとする事が望ましい。
2. 側壁は(一方はガラスブロックである)オーケス



図一八

トラ奏者中央列位置で発した音が側壁(ガラスブロック)→側壁→奏者位置ともどりエコーとなる恐れがあるため、やはり吸音仕上げとしたい。また一方が、ガラスブロックであるため指揮者位置への音の左右のバランスを考えると、全面吸音仕上げとする事は好ましくなく、一部拡散仕上げとしたい。さらにこの練習室は、他に拡散面がとれないとの理由からも、拡散と吸音仕上げを併用することとする。

3. 同上の理由により、オーケストラピット側壁寄り腰壁は吸音仕上げとする。
4. 舞台後壁は、実際は反射板となっているため反射性の仕上げとする。

以上の事と残響時間の周波数特性から種々の材料を検討の結果、仕上げ材、下地処理を次のように決めた。拡散、吸音仕上げを併用するガラスブロック対向側壁は、吸音面は空気層 400mm で有孔ベニヤ下地として低音域もいくらかは吸音するよう配慮し、拡散面は平坦な吸音面より 1.1×2m の面の中央部で 35cm 壁側へ折った屏風折とし、吸音面と拡散面の面積比は 7 対 3 の割合とした。(図一九)

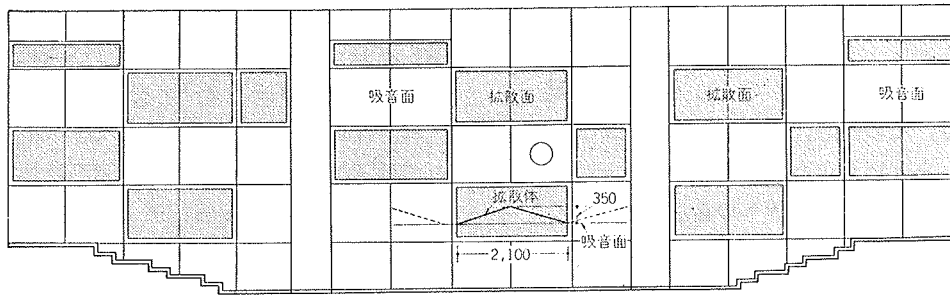


図-9 側壁 展開図

周波数	Hz	125	250	500	1,000	2,000	4,000
残響時間	秒	1.00	0.95	0.94	0.92	0.93	0.83

表-1 残響時間 設計値

- 前壁 9mm有孔ベニヤ (客席部)
 - 6mmφ 15mmピッチ
 - ガラスウール 25mm厚下地
 - 空気層 800mm
- 側壁 9mm有孔ベニヤ
 - 70%
 - 6mmφ 15mmピッチ
 - ガラスウール 25mm厚下地
 - 空気層 400mm
 - 30%
 - 拡散壁 6mmベニヤ
 - 空気層 45~400mm
- 側壁 9mm有孔ベニヤ (オーケストラピット 腰壁)
 - 6mmφ 15mmピッチ
 - ガラスウール 25mm厚
 - 空気層 45mm
- 後壁 9mm無孔ベニヤ 空気層 45mm (コーラス席背後)

客席部は空気層が80cmあるので、穿孔板と下地のガラスウールにより低音域から高音域まで幅広く吸音し客席部天井のガラスウールネット押えとで十分な吸音を得、所期の目的を達している。

側壁については吸音面7割に対して反射拡散面3割の割合で配分し、エコーの除去、拡散効果により練習室内の音場改善に寄与するであろう。

以上の各仕上げ材料により、オーケストラ70名、聴取席42名、計112名入室時の残響時間を計算すると次のようになる。

これを見ると残響時間もその周波数特性も目標値および推奨範囲におさまっており、設計値として満足しうるものとなっている。

奏者に自分の演奏を聞かせるためのスピーカーは、別に音圧分布を計算検討したが、ここでは詳述ははぶ

くが最終的にはオーケストラ席平土間上の天井に2個、コーラス席背後壁に2個、計4個つける事とした。

2. オーケストラ練習室完成後測定結果

43年9月に当オーケストラ練習室が完成したので現場において残響時間、各楽器位置より指揮者位置への高圧分布、エコーパターン、再生スピーカーによる高圧分布を測定し、音響設計の確認を行なった。

2.1. 残響時間測定

残響時間の測定はスピーカーより1/3オクターブバンドノイズを出し、その残響音をオーケストラ練習室内の5点の測点で磁気録音器で録音し、その録音を研究室で再生、1/3オクターブバンドフィルターとレベルコーダーにより残響時間を読みとった。測定はガラスブロック部壁面のカーテンを閉じた場合、開いた場合の二通りの状態について行なった。測定結果を図-10に示す。

測定結果を見てると250Hzで谷ができてているが、315Hz以上では全くフラットな特性となっている。125Hzの低音域ではやや長く1.25秒となっているが、500Hzの残響時間の1.3倍で空室状態においても推奨特性の範囲におさまっている。またカーテンの結束、広げの状態の差は0.01~0.1秒の差が全周波数にわたって認められる。図-10に測定結果と112名在室時の設計値を示したが、測定結果より112名在室時の残響時間を計算してみると250、500Hzを除いて、ほとん

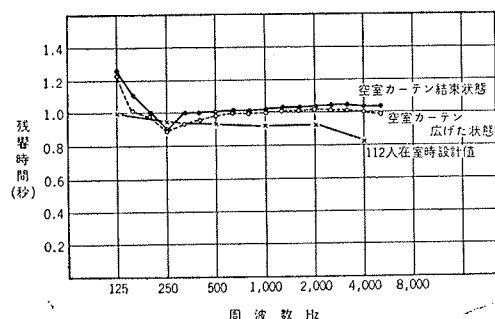


図-10 残響時間 測定結果

ど設計値と一致する。250, 500Hzにおいては0.1秒程短くなってくる。

以上測定結果, および結果からの100人前後入室時の予想残響時間は, その長さ, 周波数特性において十分な結果が得られたといえよう。

2.2. 各楽器位置より指揮者位置への音圧分布

この測定は音源を各楽器位置を次々と移動し, 受音点は指揮者位置で一定で, 音圧分布を測定したものである。音源には無指向性スピーカー(ビクターGB-1)を使用し(高さ0.8m), 受音はコンデンサーマイクロホン(B & K 4131)を水平に(高さ1.6m)

セットして測定した。測定周波数は $\frac{1}{3}$ オクターブバンドで125~4000Hzまでの6バンドについて行なった。オーケストラ最前部(指揮者まで2m), と最後部コーラス席(指揮者まで11m), の間で(測定点28点)相対レベル差で見ると低音域で8dB, 中音域で5dB, 高音域で3dBとなっている。

これは先に計算した結果4.5dBより低音域で大きなばらつきとなっているが, 計算は指揮位置より5mの位置を最前部としたためである。

室内各点の音圧分布はほぼ左右対称となっており特異な音圧を示している所は見当たらない。

2.3. 各楽器位置で発つた短音の指揮者位置でのエコーパターン

先に示した各楽器位置より指揮者位置への音圧分布は定常状態の音場について(音源より連続して発した $\frac{1}{3}$ オクターブバンドノイズ)の検討であったが, 今回特に当練習室の設計時に留意した指揮者位置での音響

障害をチェックする必要と, 各楽器位置でパルス(短音)が发せられた場合, エコーの障害が生ずる場合があるのでエコーパターンを検討した。

検討は125, 500, 2000Hzについて行なったが, ここでは2000Hzのものを示す。音源は純音を使用し, 15msecの短音を各楽器位置より無指向性スピーカー(ビクターGB-1)より発し, 指揮者位置でコンデンサーマイクロホン(B & K 4131)で受け短音の減衰波形をシンクロスコープで写真撮影した。図-11に2000Hzの減衰波形を示すが, 減衰波形は全て指揮者位置でのもので写真は音源位置に貼ってある。シンクロスコープの横目盛は50msec/divである。音の50msecの到達距離は17mであり, 人間の耳が二つの音を別々に聞き分ける時間差の限界が50msecと言われている。そこでエコーパターンで一目盛(50msec)以上離れて孤立した反射音があると, 音がわれたり極端な場合はエコーとなる恐れがある。一般にエコーパターンは直接音に続いて反射音が次々と到達して縦の木形になるのが良いといわれており, 測定結果を見てみるとすべての点が十分理想的な減衰波形をしていないが, 実際に使用している状態では何ら障害はないようである。

3. むすび

以上練習室完成後の測定結果, 使用者の感想等よりほぼ所期の目的は達したオーケストラ練習室となったものと考えられる。これは設計より完成まで我々の要望を十分取り入れていただいた設計部, 松崎主任, 阪東職員および工事々務所, 工藤所長, 大川畑主任等の方々の労によるものであり深謝致します。

参考文献

ホールの指揮者の位置の音響特性(永田, 山本, 室井)
音響学会研究発表会講演論文集 1967年5月

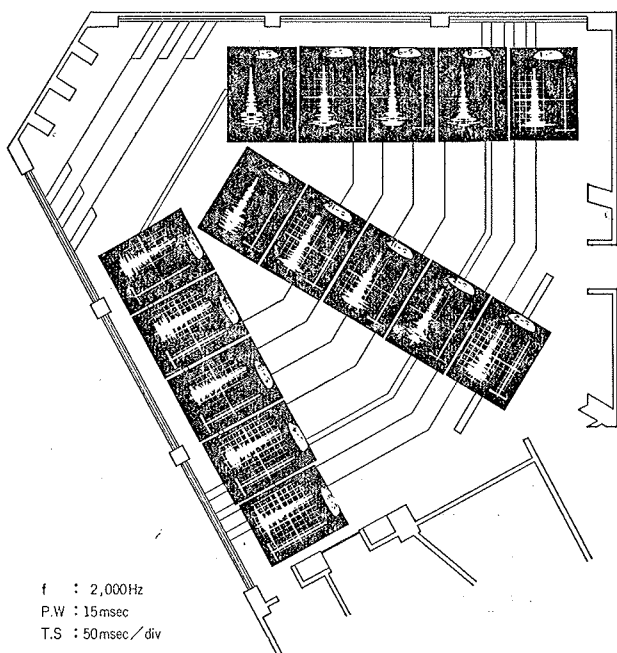


図-11 2000Hz エコーパターン