

甲南女子大学講堂の音響について

平野 滋 坪井 政義
縄岡 好人

Acoustic Design of New Auditorium at Konan Women's University

Shigeru Hirano Masayoshi Tsuboi
Yoshihito Nawaoka

Abstract

This paper describes the acoustic design of the new auditorium at Konan Women's University. As it appeared that difficult acoustics problems would be presented because the auditorium's plan is that of a wide fan shape with a sloped ceiling rising from the stage, acoustic designing was done by means of computer simulations and 1/10-scale model tests. The objectives of acoustic design were to assure good speech intelligibility and provide rich resonance in pipe organ recitals. These objectives were attained by making reverberation time over 2.1 sec through architectural considerations and controlling sounds in low frequencies by aid of electro-acoustical systems. It was ascertained that the auditorium has a nice sound field by acoustic measurements made after completion of the building.

概 要

甲南女子大学講堂の平面形は扇形平面タイプであるが、断面形は一般的なプロセニウムアーチ型の断面とは反対に、舞台上部が迫り上がった形をしている。このような平面と断面の組み合わせによる特殊な形態は音響的には非常に不利であるが建築デザインを生かしつつ、コンピュータシミュレーションと1/10スケールの模型実験によって音響設計を進めた。パイプオルガン演奏で豊かな音量感を得るために残響時間の目標値を2.1秒以上に設定し、壁面は重く硬いものを採用し広帯域にわたって反射性となるようにした。スピーチの明瞭度の確保には、スピーカの分散配置と低音域カットなどの電氣的処理にあわせて、天井面で低音域を吸音することによって音の抜けが良くなるように図った。竣工後の音響測定により、明瞭度を確保し、かづオルガン演奏に豊かな響きを得るという課題を十分満足する良好な音場が得られていることを確認した。

1. はじめに

甲南女子大学講堂は、容積 16,200 m³、収容人員1,784人の講堂であり、村野・森建築事務所により建築設計がなされ、音響設計を大林組技研が協力し、大林組の施工で昭和63年8月に竣工した。講堂という建物の性格のほか音楽演奏の場としても期待され、将来パイプオルガンも設置されるので、講堂としてスピーチの明瞭度を確保することと、オルガン演奏に豊かな響きを得られることが音響設計にあたっての課題であった。

2. 音響設計

音響設計ではパイプオルガンの豊かな響きと講堂としての明瞭度を確保するために、建築的にはエコーなどの音響障害が無く、残響時間は長め(2.1秒・500 Hz・満席時)の音場を設計目標とし、音の抜けを良くし明瞭度を

低下させないためにも中音域に比べ長くなりがちな低音域の残響時間を抑えて平坦な残響時間周波数特性を目指した。さらに、適切なスピーカの分散配置や低音域のカットなどの電気音響設計により、明瞭度の向上を図った。

2.1. 電気音響設計

図-1~2にスピーカの配置図を示す。意匠上の制約からメインスピーカとしてウーハ2台、ホーンスピーカ3台を舞台袖壁の中に設置して、それぞれのホーンスピーカにて平土間部、バルコニー下部、バルコニー前部の席へサービスすることとした。メインスピーカから十分な直接音音圧の得られない席にはメインスピーカからの直接音に応じたディレイを付加した次の三種の補助スピーカを用い音圧を確保した。バルコニー席のために大天井スピーカ、1 Fバルコニー下の席のために低天井スピーカ、並びに1 F客席前部中央の席ためにはハウリング対策を施した大出力の演台スピーカなどを配置している。

2.2. 建築音響設計

2.2.1. 残響時間設計 原設計段階では、意匠上から四周の壁は砂岩割肌、天井は三次元曲面形状の可能なガラス繊維で補強した高密度の石膏成型板、床は全面に任意の着色が可能なカーペットという仕様であったため、残響時間がカーペットなどで吸音されやすい高音域で短くなり過ぎ、吸音されにくい低音域では逆に長くなり過ぎるという問題点があった。そこで、先ず低音域の残響時間を短くするために壁に埋込む低音吸音用のレゾネータなどの検討も行なったが、施工性やコストの面から大天井で吸音することとし、大天井の約2/3を有孔石膏成型板にグラスウールを裏打ちして空気層を設けてフレキシブルボードで密閉する、低音吸音用二重天井に変更した。四周の壁は初期側方反射音周波数特性を平坦とするために、コンクリート壁と砂岩割肌とを一体化するようモルタルを目地も含めて完全充填し、完全反射面とした。さらに高音域の残響時間を長くするために、高音域を吸音するカーペットの面積を最小限に抑え、椅子の下はPタイル、足音の目立つ通路部だけは吸音力の比較的小さいOICカーペットを敷くこととした。また、椅子の仕様においても低音の吸音力を得るために背もたれを厚くしたり、高音域の吸音力を抑えるために座り心地にあまり影響のない部位は木製にするなど、極力吸音力の大きいモケット貼りの面積を減らす仕様とした。

2.2.2. 各形状並びに仕上材の音響設計 この講堂は、天井・壁共に曲面が多く、複雑な形状なので、音の伝搬状態が可視化できるコンピュータシミュレーション手法と、より精度の高い音場予測が可能な実際に音を用いる模型実験手法を併用して音響設計を行なった。模型実験では講堂内部の1/10縮尺音響模型を製作し、種々の相似則を満足するように吸音材を選定し適切に配置して、実物の周波数の10倍の音（波長を1/10とするため）を模型内にて発生させて、残響時間、エコータイムパターン、音圧分布などの種々の音場パラメータの測定並びに女声・男声アナウンス及びパイプオルガンの音による聴感試験を行ない、各形状・仕上材などを比較検討し決定した。次に検討した主なものを述べる。

(1) 舞台上音響反射板について 音楽演奏には自分の音と他の奏者の音がバランス良く聞き取れることが重要であり、そのためには音出しから80ms.(0.08秒)遅れ以内の有効なはね返り音が必要となる。ところが原設計の形状では舞台上部の天井高が23mと高いためあって、奏者に有効なはね返り音を得られない。そこで舞台上部に音響反射板を設置してはね返り音を得ることとした。図-3は音響反射板なしの場合と舞台上部に音響反射板を設置した場合(H=12m・意匠上の最下位置)の

所在地	神戸市東灘区森北町6-2-23
建築面積	1,875m ²
延床面積	5,451m ²
構造	SRC造 地下3階 地上2階
工期	昭和61年7月~昭和63年8月
客席数	1,784席
床面積	1,330m ²
室容積	16,200m ³
全表面積	5,000m ²
舞台面積	170m ²
内装	壁：インド産砂岩割肌 天井：有孔及び無孔石膏成型板

表-1 講堂の諸元

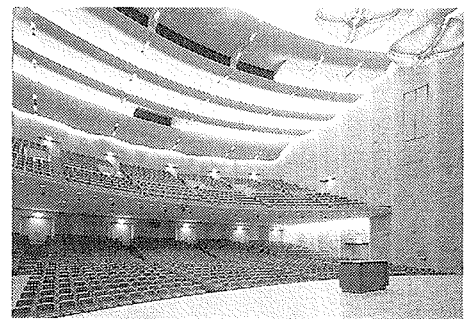


写真-1 講堂内部写真

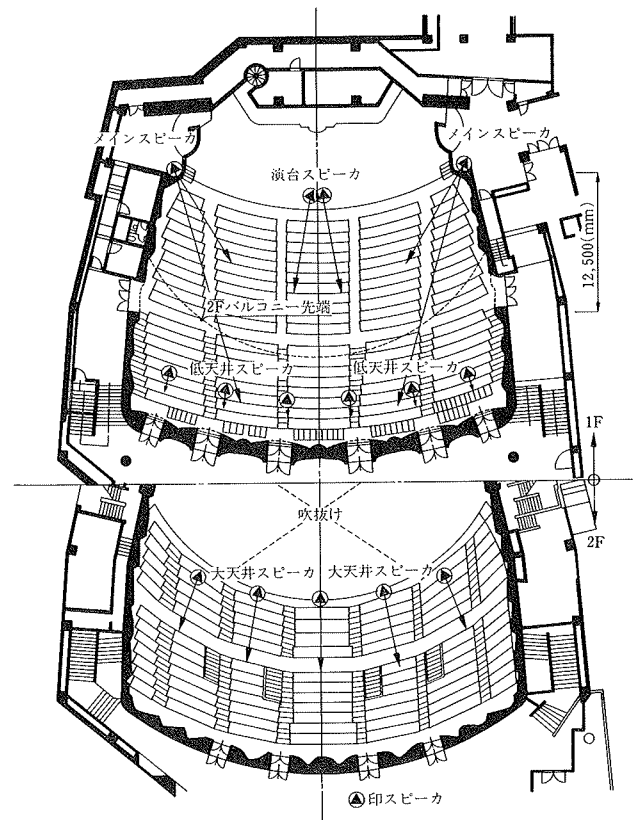


図-1 スピーカ配置図

舞台上で発生した音がどのように伝搬していくかを時刻別に比較表示したものである。音響反射板を設置した場合は、音発生後 40 ms. で反射板下方に舞台への反射音が発生し、70 ms. 後には舞台周辺に有効な反射音が存在しているが、反射板なしではこの時に舞台への反射音が全く無いのが解る。また、図-4に舞台上の受音点での音線経路図とエコタイムパターンを示す。これらより、舞台上部に音響反射板を設置した場合は音を出してから 60~70 ms. 後に有効なはね返り音が舞台奏者へ返ってきていることが分かる。次に音響反射板の最も有効な位置と形状を検討した。図-5に音響反射板の舞台へのはね返り音の音線経路のアイソメ図を示す。これより図-6の舞台からの音を反射する音響反射板自体の有効反射領域、及び図-7の音響反射板のサービスエリアを求め表示した。意匠上からの種々の音響反射板の位置と形状の候補の中からこれらの表示手法並びに模型実験手法を使って比較検討して決定した。

(2) 舞台袖壁について (1)同様に有効なはね返り音をより多く舞台奏者へ返すために舞台袖壁を内向させた場合を原案と比較検討した。図-8に音の伝搬性状を示し、図-9にエコタイムパターンを示す。これらより舞台袖壁を内向させても曲面形状のために音が拡散されてしまい、舞台奏者へのはね返り音が多少大きくなるものの顕著な差は認められないので意匠上から原案通りとした。

(3) 後壁について 講演時には、演台スピーカと舞台両手袖壁のサイドスピーカがメインとなるが、後壁からの反射音でエコーが発生する恐れがあるため、吸音処理と原案をより一層凸凹させた拡散形状とを比較検討した。模型実験により拡散形状でも音がよく拡散されるためエコーなどの音響障害の発生は見られず、アナウンスを使った明瞭度についての聴感試験でも十分満足できることが確認された。そこで豊かな響きが得られる拡散形状とした。

(4) 椅子の背もたれ形状について

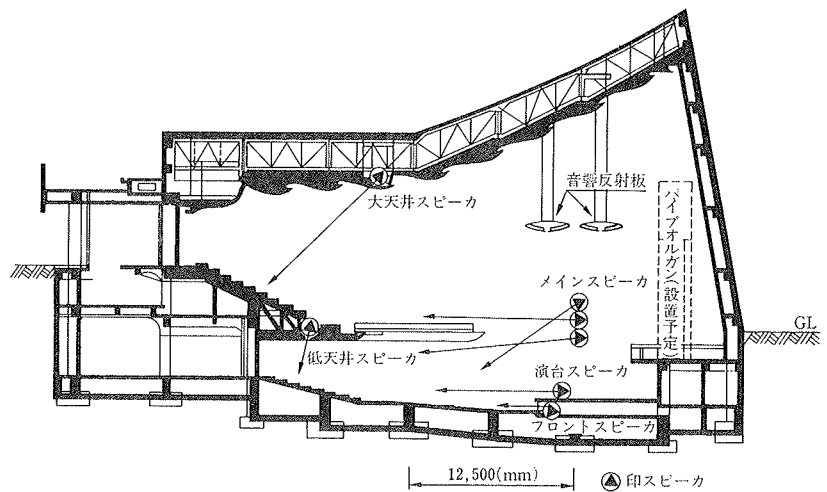


図-2 スピーカ配置断面図

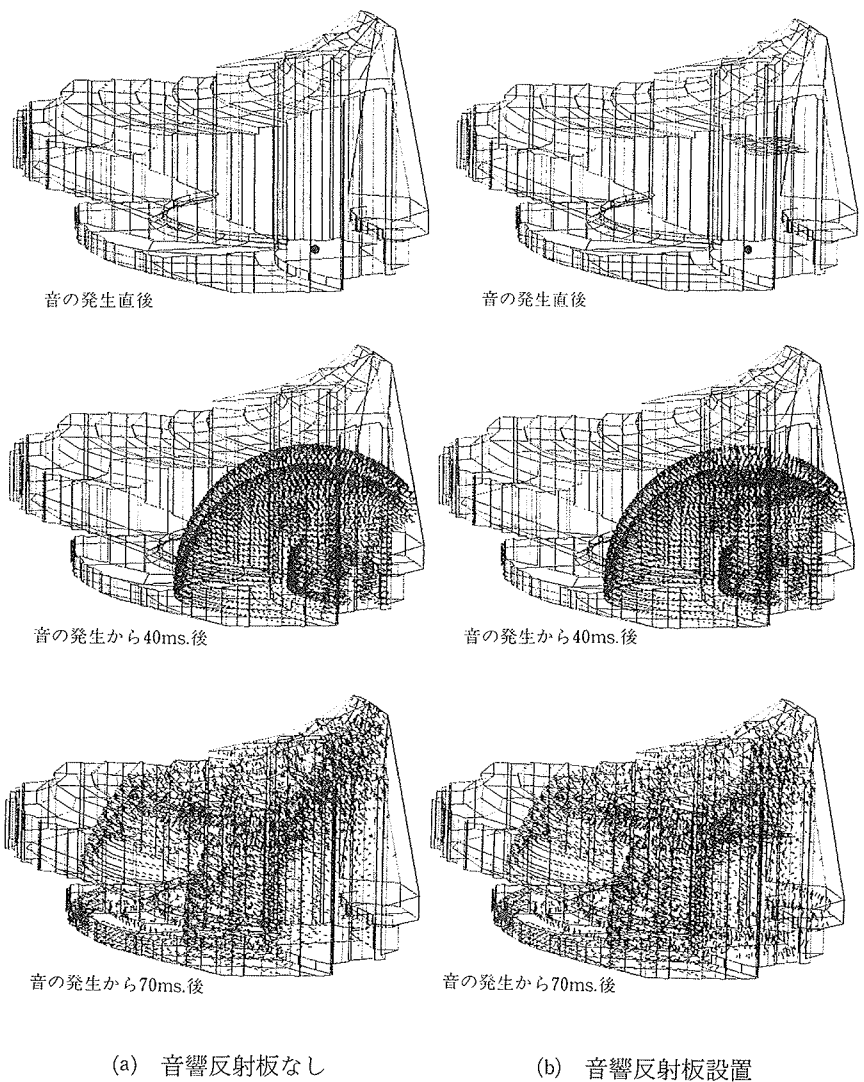


図-3 音の伝搬性状

最近、ホールの客席の中程より後ろの席で低音のある周波数の音が他に比べて異常に減衰する現象（超過減衰）が報告されている。原因としては規則的に並んでいる椅子の背もたれからの反射音が逆相になり客席近傍を通過する音を弱めているとされる。そこで、背もたれ形状の検討のために、1/10の縮尺模型を写真2に示すように無響室に並べて、背もたれ連続型と分離型の椅子席での減衰について実験を行なった。図-10に中心周波数 125 Hz の1/1オクターブの背もたれ連続型と分離型の椅子席での減衰特性を示すが 15 m を超えると 10 dB 以上の差が出てくる。これから明らかに分離型の椅子席の方が低音域（125 Hz）での超過

減衰が少ないことが解り、図-11に示すように座り心地を損しない程度に背もたれ幅を小さくするようにした。

(5) 講演時の明瞭性の検討 講堂の模型内にサイドスピーカ、大天井スピーカ及び演台スピーカを設置してのアナウンスによる了解度の聴感による試験と同時に、直接音と反射音全体の周波数特性（伝送特性）及び直接

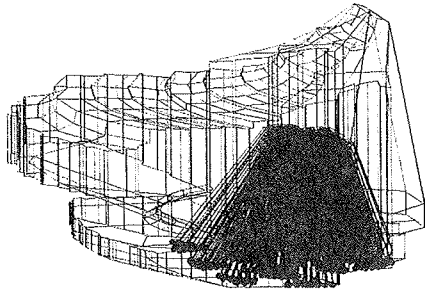


図-5 音響反射板での音線経路図

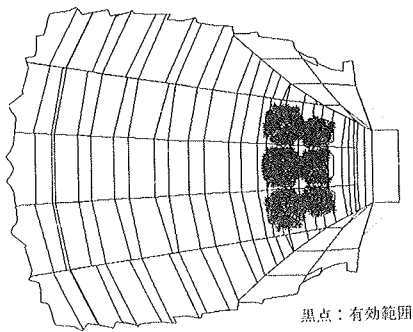


図-6 音響反射板の有効範囲

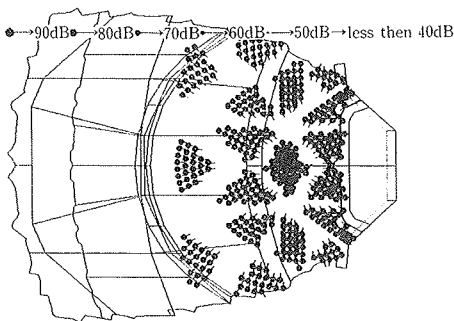
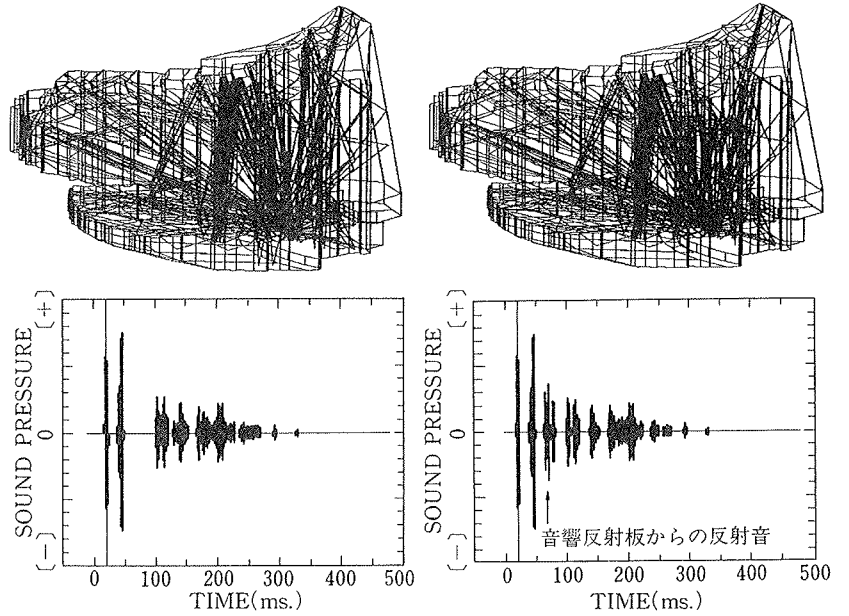


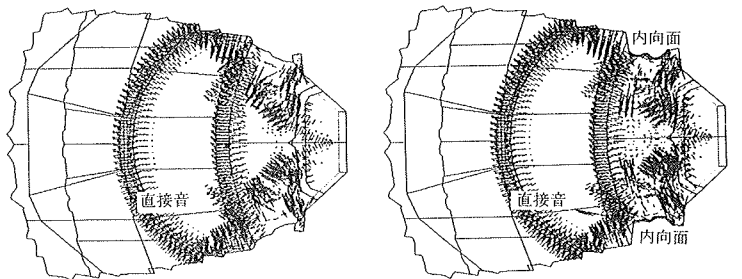
図-7 音響反射板の有効反射領域



(a) 音響反射板なし

(b) 音響反射板設置

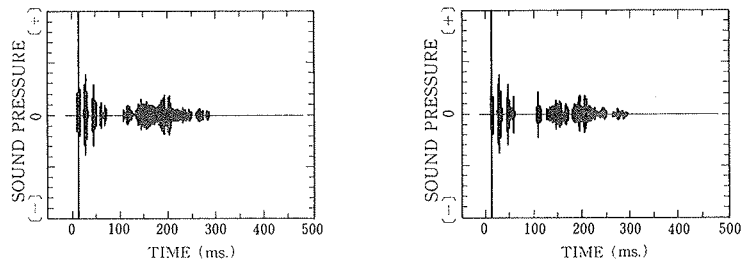
図-4 音線経路図及びエコータイムパターン



(a) 袖壁原案のまま

(b) 袖壁内向

図-8 音出しから 50 ms 後の伝搬性状比較



(a) 袖壁原案

(b) 袖壁内向

図-9 エコータイムパターン

音だけの周波数特性を測定したが、図-12に示すように了解度の良い場合は両特性共に良く似ており、了解度の悪い場合には両者に開きが見られた。そこで両特性が近似するように補助スピーカの位置やディレイタイムなどを検討した。

2.2.3. 実物大モデルでの吸音率測定 パイプオルガン演奏での豊かな音場と講堂としての明瞭度の確保のためには、残響時間は重要な位置を占める。前述の残響時間設計において必要な総吸音力から各部位の大筋の仕様が決定されたが、これをベースとして数種の実物大のモデルを製作し吸音率を測定した。これらの結果をもとに最終仕様を決定して測定し、所定の設計目標を満足していることを確認した。対象とな

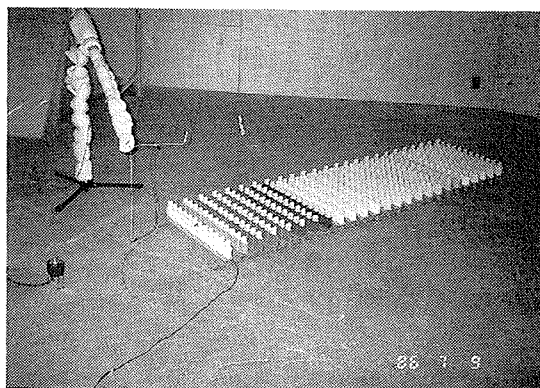


写真-2 椅子の模型実験

ったのは、講堂全体の吸音力に占める割合の大きい大天井パネルとバルコニー下の低天井、並びに講堂全体の吸音力の過半を占める椅子である。図-13~14にそれぞれ大天井パネル、バルコニー下の低天井、並びに椅子の最終仕様の吸音率測定結果を示す。

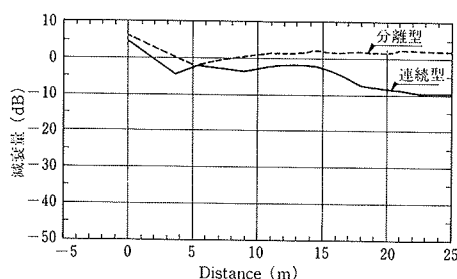


図-10 背もたれ形状の異なる椅子の減衰特性 (125 Hz 1/oct.)

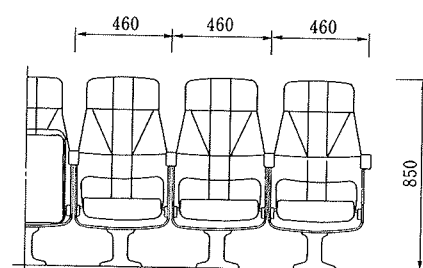


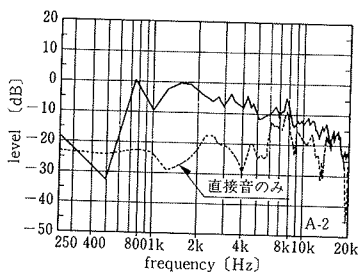
図-11 椅子の背もたれ形状

3. 音響特性

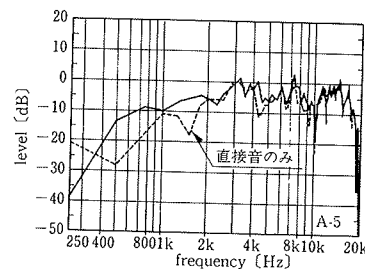
竣工後の音響特性を表-2に示す。

3.1. 音楽演奏に対する特性

(1) 音圧分布と平均音圧レベル
 良い音楽ホールは音量が大きい。大きい音には迫力があり、響きも豊かに聴こえるのにたいして、小さい音は音楽のディテールが分からない。平均音圧レベル¹⁾と音圧分布は、音量の大きさとその分布を表わす。図-15は、講堂の平均音圧レベルを他のホール²⁾と比較したものである。講堂の平均音圧レベルは76.5 dBであり、ミュージックフェラインザールと同等の音圧レベルが得られている。図-16は、講堂のオクターブバンド音圧レベル分布をミュージックフェラインザール及びアムステルダムコンセルトヘボウの分布²⁾と比較したものである。これらの結果より、講堂のどの客席位置へも音量豊かにかつ一様に音が分布しており、こ



(a) 了解度が悪い場合



(b) 了解度が良い場合

図-12 伝送特性と直接音成分周波数特性

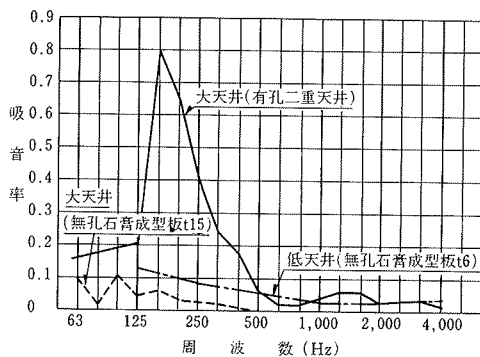


図-13 大天井・低天井の吸音特性

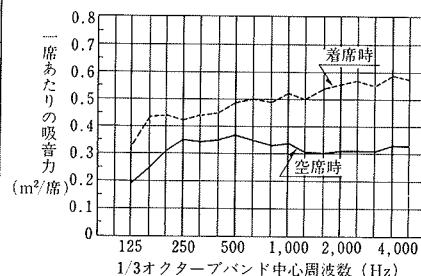


図-14 講堂椅子の吸音特性

これは他の著名なホールに十分匹敵しうるといえる。

(2) 残響時間周波数特性 音楽ホールでは、演奏音が豊かな響きをもって聴こえることが大切である。残響時間周波数特性は響きの量(長さ)を表わす。講堂の空席時残響時間(500 Hz)は2.5秒である。これは、コンサートホールの推奨値(Bagenal & Wood)を満足しており、同様な室容積であるアムステルダムコンサートホールの残響時間³⁾に近い値となっている。講堂の空席時残響時間周波数特性を図-17に示す。

(3) 音響評価指標 音響効果に関する評価量は、ここ30年間の室内音響研究によっていろいろ提案されてきているが、今回は Clarity⁴⁾, Room Response⁴⁾, Lateral Efficiency⁵⁾について測定を行なった。これらの量は、ホールの響きの質を表わす量であり、残響時間を補足する役割を担っている。

Clarity は、80 msec 以降に到達する拡散音成分に対する80 msec 以内に到達する初期反射音成分のエネルギー比であり、響きの明快さにかかわる量である。Room Response は、25~80 msec に到達する横方向の反射音成分と80~160 msec に到達する全方向の反射音成分との和の80 msec 以内に到達する初期反射音成分に対するエネルギー比であり、同様に Lateral Efficiency は、25~80 msec に到達する横方向の反射音成分の80 msec

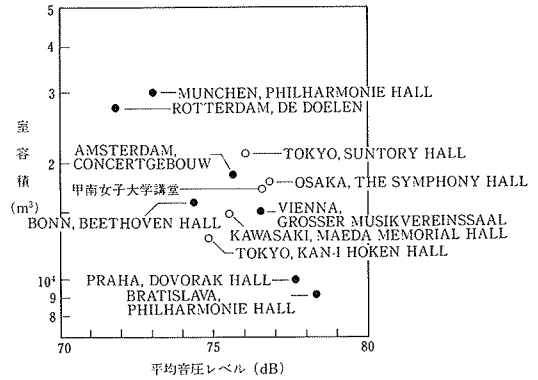
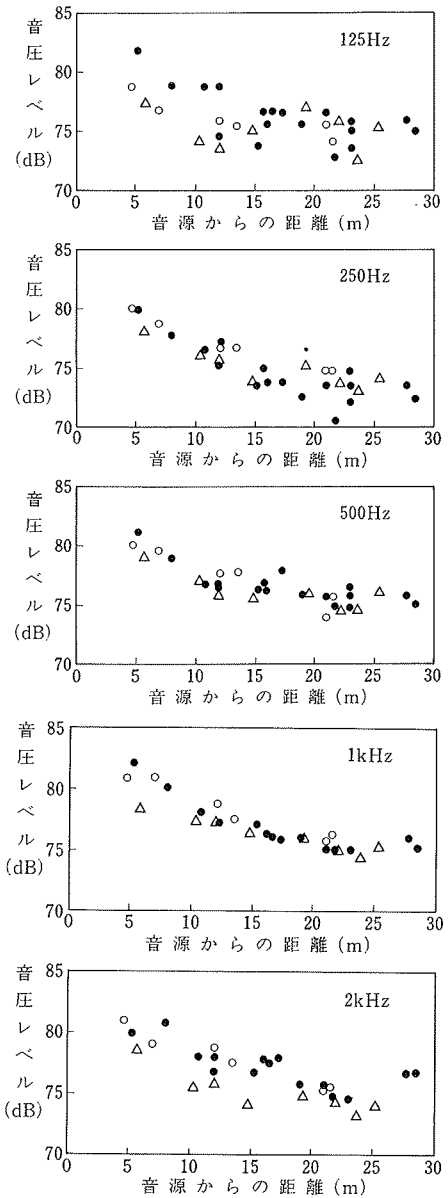


図-15 平均音圧比較 (500 Hz)



● 甲南女子大講堂
○ MUSIKVEREINSSAAL
△ CONCERTGEBOUW

図-16 音圧レベル分布

室内音響特性	
平均音圧レベル	76.5dB
音圧分布 (250Hz 以下)	±2.5dB 以内
音圧分布 (500Hz 以上)	±1.0dB 以内
空席時残響時間 (500Hz)	2.5秒
Clarity	-1.9±0.8dB
Room Response	-0.7±1.1dB
Lateral Efficiency	0.23±0.08
Speech Transmission Index	0.5 以上
Deutlichkeit	0.34
空調騒音レベル	NC-25 以下
電気音響設備	
伝送周波数特性(160~5kHz)	±5dB 以内
音圧分布	+4~-3dB
最大再生音圧レベル	95dB
安全拡声利得	-8dB 以内

表-2 竣工後の音響特性

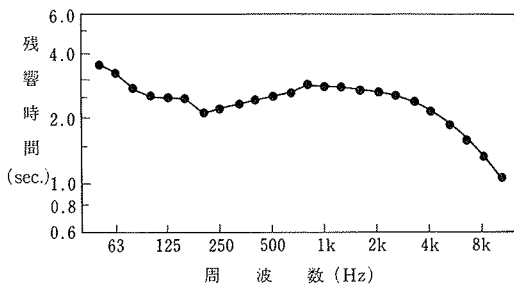


図-17 残響時間周波数特性

以内に到達する初期反射音成分に対するエネルギー比であり、音に包まれた感じを表わす量である。

コンサートホールに対する推奨値として Jordan は³⁾、Clarity が±2 dB 以内、Room Responce が±0.5 dB 以内、Lateral Efficiency が0.2以上としているが、講堂の客席における測定結果は、最前列を除いて推奨値を満足している。また Clarity、Room Responce については、Reichardt などによる別の推奨値もあるが、講堂の測定結果は古典派音楽に対する推奨値範囲に相当しており、講堂は将来設置される予定のパイプオルガンも含めた音楽演奏の場として優れた特性が得られているといえる。

3.2. スピーチの明瞭度に対する特性

スピーチの明瞭度を表わす量として Deutlichkeit⁶⁾と Speech Transmission Index⁷⁾の測定を行なった。

Deutlichkeit は全到達エネルギーに対する 50 msec 以内に到達する初期反射音成分のエネルギー比であり、Speech Transmission Index は100%振幅変調波の変調度の低下量から求められる量であるが、特に Speech Transmission Index は明瞭度と良い対応を示すので、明瞭度の試験方法として最近よく用いられるようになってきた。

Speech Transmission Index の値が0.5以上であればスピーチの明瞭度に対して「わかる」以上の評価が得られるとされており、講堂の Speech Transmission Index の測定結果は、最悪の席でも0.5以上が得られているので、スピーチは実用上全く問題なく聞き取ることができる。

4. 結び

甲南女子大講堂の音響設計にあたっては、講堂としてスピーチの明瞭度を確保することと、パイプオルガン演奏に豊かな響きを得られることが課題であったが、その

目的は十分達成できたと思われる。将来、この講堂がクラシック音楽などのコンサートやオルガンコンサートに広く使われ、音もなじみ、長く愛着され評価されることを願ってやまない。

おわりに、村野・森建築事務所の近藤正志、笹木 篤、柳 真也の各氏に深甚なる謝意を表します。また種々有益なるアドバイスを頂いた大林徳吾郎、真藤利孝の両氏、種々ご協力頂いた大林組甲南現場事務所の大坪孝次所長をはじめとする工事関係者の方々とヤマハサウンドテック(株)の西村岩夫氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 橋：室内音響特性測定用12面体スピーカ音源について、音響技術，vol. 14, No. 3, (1985), pp. 64~65
- 2) 橋，他：ヨーロッパおよび日本のコンサートホールにおける音圧分布の測定結果，日本音響学会建築音響研究会資料，AA 87-49, (1987)
- 3) 橋，他：ヨーロッパのコンサートホールの音響に関する実測調査(第一報)，日本音響学会誌，Vol. 43, No. 2, (1987), pp. 118~124
- 4) Reichardt etc.: Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdardietungen durch Auswertung von Impuisschalltests, Acustica, Vol. 48, (1981), pp. 174~185
- 5) Jordan: Acoustical Design of Concert Hall and Theares, Applied Science Publishers, (1980)
- 6) Meyer: Diffinition and Diffusion in Rooms, J. A. S. A., Vol. 26, No. 5, (1954), pp. 630~636
- 7) Houtgast: The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility, Acustica, Vol. 28, (1973), pp. 66~73