

円形空間の室内音響検討

井上
宮代諭*
豪***杉野
渡辺潔**
透***

要約： 円形プランの講堂の計画において、室形状、残響、吸音材料の仕様及び配置等について室内音響検討を行った。検討では残響計算、および、幾何音響シミュレーションを実施し、スピーチの明瞭性の確保と凹曲面によるエコー障害を回避することに重点を置いた。設計過程においては、残響時間の目標値は本講堂の規模・用途を考慮し1.0秒前後とし、側壁面を屏風折にすることにより凸曲面を設けて音の拡散性を高めることに配慮した。建物竣工後の音響測定の結果、中音域の残響時間は1.0～1.1秒、RASTI値は0.60以上であり、明瞭度を確保していることが確認された。また、有害なエコー障害については観測されなかった。ただし、本空間は音場の完全拡散の仮定を満足しておらず、予測計算値と実測値とがかけ離れる傾向が見られた。音場の拡散状態の度合いや内装材料の拡散効果に関して今後の検討課題が示された。

キーワード： 室内音響、音声伝達性能、幾何音響シミュレーション、円形空間、残響時間

- 目次：** 1.はじめに
2. 室形状の特徴と設計段階での音響検討
3. 室内音響特性
4. まとめ

1. はじめに

凹曲面に囲まれた室内空間は、音の拡散が悪く、焦点やデッドスポットとなる箇所が存在したり、エコーが発生するなど音楽演奏やスピーチに不適当な音場となる可能性がある。そのような音響上の障害を予測できるような建築計画においては、壁面や天井に凸面を設け、音の拡散性を高めるとともに、適所に吸音処理を提案することによって問題を回避することは可能と考えられる¹⁾²⁾。

本稿では、円形プランの講堂の計画において、意匠上の制約を考慮しつつ、平面形状、吸音部位の仕様・配置等について、室内音響計画を行った事例を報告する。

また、建物竣工後の実測により音響性能を評価するとともに、各種音響物理指標の実測値と幾何音響シミュレーションによる予測計算値とを比較し、非拡散音場における室内音響予測に関して考察する。

2. 室形状の特徴と設計段階での音響検討

2.1 室用途と残響時間目標値

検討の対象となった建物は図1に示すように円筒形を天井部で斜めに切った形状で、2階部分にバルコニー席を設けてある。建物の規模の概略は表1に示すとおり収容人数約500人、容積約40,000m³であり、中規模の講堂である。

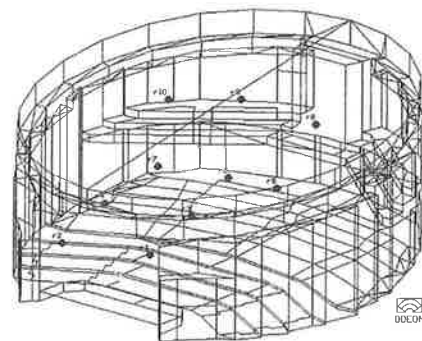


図1 検討対象建物（講堂）概略図（幾何音響シミュレーションモデル）

表1 検討建物概要

用途	室容積	表面積	収容人数
講堂	約3,800m ³	約1,800m ²	491人

本建物の主たる用途は式典・講義であるため、スピーチが明瞭に聞こえることが音響条件として求められた。音声の明瞭度は、直接音と残響音とのレベルの関係によって決まり様々な指標値が提案されているが、計画段階において簡易に検討できるパラメータとしては、響きの基本的性質を表す残響時間において他にない。

室の用途及び室容積に見合う最適な残響時間については、多くの研究者らによって提案がなされており、こ

れらを集約すると最適値は図2³⁾のように表せる。本建物の場合、図中の「講堂」の曲線を参考すると、室容積との関係から導かれる最適な残響時間は約0.9秒となる。しかし、音楽演奏等の利用も考慮した場合、その値よりも若干長めの方が好ましいと判断し、1.0秒前後(1.1秒を上限)を設計目標値として採用した。

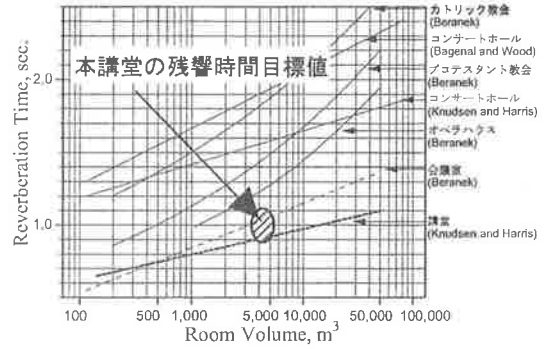


図2 残響時間の目標値

2.2 室形状の特徴と吸音・拡散処理

(1) 折壁の配置と吸音処理

本建物の水平断面は真円に近いので、必然的に室内空間は側壁による凹曲面に囲まれる。凹曲面からの反射音による音響障害を避けるためには、壁面の一部を室内側に折れ曲げることで凸面を形成し、音の拡散性を高めるとともに、適所に吸音処理を施す必要があると考えられた。

検討の結果、図3に示すように、側壁は幅1.5m~4mのランダムな屏風状に折れ曲げ、基本的に座席後部の壁は吸音処理(B)、その他側壁は吸音材料(A, C)と反射性材料とを交互に配置する計画とした。

内装壁の折れ曲げの度合い(室内側への出っ張り度)については、大きいほど音の拡散を良くするが、室内床面積(座席数)を確保しようとする要求と相反するために限界があった。図3中に比較の意味で原設計(基本設計)における内装壁の形状を破線(---)で示したが、最終案では原設計よりも舞台寄りの側壁等の凸度を極力大きくするように配慮した。

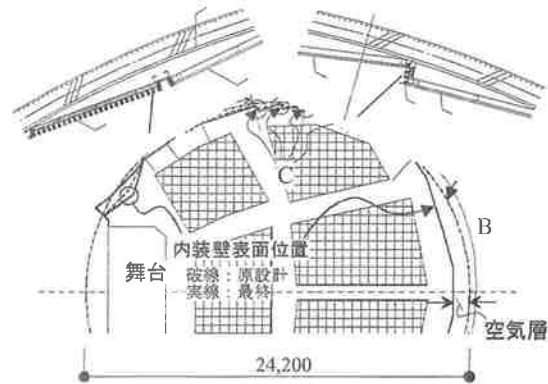


図3 平面形状、および、吸音材料の配置図

(2) スリット構造による吸音処理

壁に用いた吸音材料は、図3、図4に示すパターンA, B, Cのスリット構造とし、施工上の煩雑さを考慮し、1種類の板材(30×45mm角)のみを用いて、その向きや配置ピッチ、背後空気層に違いを設けることにより共鳴域を変化させ、周波数軸上の吸音力のバランスを保った。

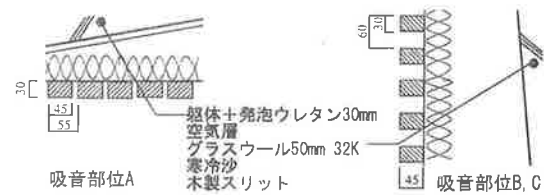


図4 吸音部位に用いたスリットの仕様

躯体と内装壁間の空気層厚は一定でないため、正確な共鳴周波数を求めることは困難であるが、(1)式によって求めた各スリット構造(無限長スリット)の共鳴周波数(f_0)、および、残響室法吸音率の推定値を図5に示す。

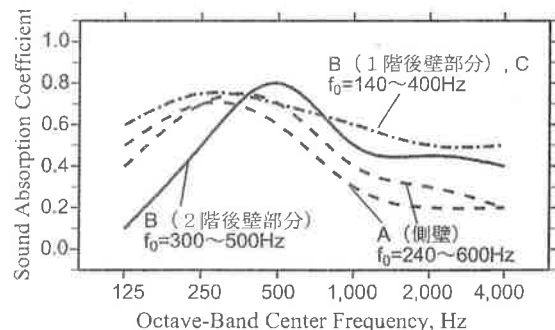


図5 スリットの吸音率の推定値

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{L(l+Kb)}} \quad (1)$$

ただし、

$$K = \frac{2}{\pi} \log_e(\operatorname{cosec} \frac{\pi}{2} P)$$

f_0 : 共鳴周波数、 c : 音速、 P : 開口率

L : 背後空気層厚さ、 l : ネック部長さ

K : 管端補正值、 b : スリット幅

(3) 吸音材料配置のバランス

図2に示した最適残響時間を目標とした必要吸音力の算定、および、吸音材配置を検討した結果、最終的な内装面各部位の仕様を表2に示すとおりとした。

表2 内装仕様

部位	仕様
床: 座席以外	タイルカーペット
座席	1階席: モケット貼り椅子 2階席: 木製椅子
壁: 側壁	吸音部位
	反射部位
吸音部位	スリットA、スリットCz
反射部位	ラワンベニヤ5.0mm下地-シナベニヤ5.5mm塗装仕上げ
座席後壁	スリットB
ダクト側面、下部	岩綿吸音板
キャットウォーク	コンクリート塗装仕上げ
キャットウォークより上部側壁	RC+ウレタン断熱材ボードGL貼り、またはガラスサッシュ
舞台、バルコニ側面	コンクリート塗装仕上げ
天井: 大面	PB12.5mm仕上げ、円周縁部のみ岩綿吸音板(PB粘貼り)
バルコニ下	岩綿吸音板(PB12.5下地)

吸音材料の配置に関しては、幾何音響シミュレーション¹⁾によって時間軸上の反射音エネルギーヒストグラム、および、減衰曲線(残響曲線)²⁾を求め検討した。一例として、天井面に用いる材料を反射性とした場合と吸音性とした場合におけるエネルギー曲線の比較結果を図6に示す。

図6より天井に反射性材料(a)を用いた場合は、吸音性材料(b)を用いた場合と比較して、そのエネルギー曲線には凹凸や不規則な変動が少なく(エコー等が起こり難い)、拡散音場に近い対数減衰(dB尺上では1直線)に近くなっている傾向が読みとれる。

本計画では床面が吸音性(カーペット)であるために、この計算結果は、天井面も吸音性にした場合には上下方向の音波の減衰が水平方向よりも早くなり、拡散性が悪くなることを示唆するものと考えられる。したがって、天井面を全面反射(隅部は吸音)とする方針で最終的な内装面仕様を決定した。

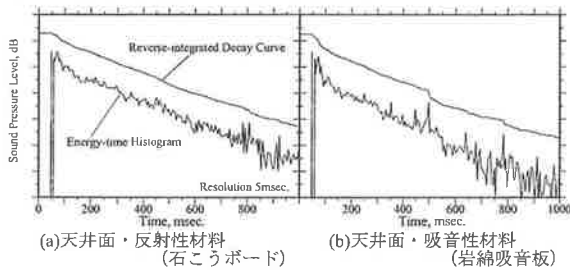


図6 幾何音響シミュレーションによる残響曲線の推定 (1kHz Octave Band)

3. 室内音響特性

3.1 音響特性の評価方法

上述の検討を経て建物竣工後に、室内音響の実測を行い、その音響特性の評価を行った。

実測は、舞台中央に音源スピーカー(12面体スピーカー)を設置しM系列信号変調ノイズを用い(DRA社MLSSA)実施した。測定位置は、座席エリア全体を網羅する10点(1階席7点、2階席3点)とした。また、建築的な音響特性の評価の他に電気音響設備による拡声状態を評価するために、ライン入力、マイク入力時の音響特性についても調査した。

3.2 残響時間

測定条件毎の実測値(平均値)を図7(○印)に示す。また、残響計算、幾何音響シミュレーション¹⁾による計算結果(実測地点に相当する10点の平均値)を併せて示す。

実測結果(○印)より、残響時間は中音域で1.0~1.1秒となり、目標値をほぼ満足する結果となった。また、電気音響設備を用いた測定では、12面体スピーカーを使用した場合と比較して低音域において若干長めの値となった。これは音源位置(天井埋め込み分散配置)、および、測定系の影響を受けたものと考えら

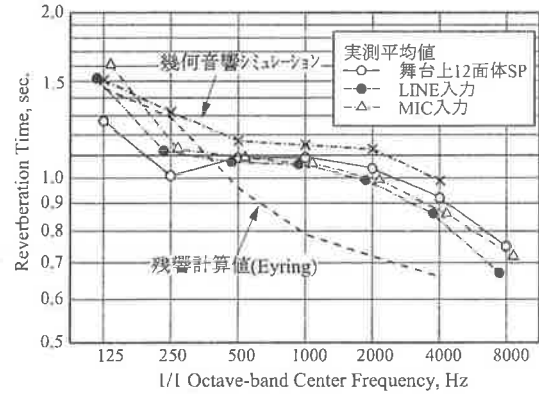


図7 残響時間の実測値、予測計算値

れる。

いずれの計測値とも残響時間の周波数特性は、中・高音域においてフラットであり、周波数による凹凸もなく良好であるといえる。

3.3 実測値と計算値との比較による音場の特性の評価

図7に示すように、残響計算値(破線---)は実測値よりも中・高音域における値が0.1~0.3秒程度小さくなるのが分かった。また、幾何音響シミュレーション計算値は実測値より多少値が大きい、周波数特性はほぼ同じとなる傾向が読みとれる。

残響公式(Eyring-Knudsen)によって求めた時間が実測値、および、幾何音響シミュレーションによる計算結果よりも短くなる理由としては、次に示す2点が考えられる。

- ①計算に用いた吸音率の見込みが実際(材料が持つ本来の吸音率)よりも大きい。
- ②本空間の形状では拡散性が悪く、音波が各壁面に均等に到達せず、吸音材料が有効に機能していない部位がある。

①については、残響公式と幾何音響シミュレーションに用いた吸音率は同じ値を用いているために、両者の計算値の違いを説明する理由とは考え難い。

また、幾何音響シミュレーションでは、音線法により後部残響を求めているため、②に示すような、音の拡散が悪い場合の音響特性は少なからず計算結果に反映されるものと考えられる。一方、残響公式は完全拡散仮定を満足する音場においてのみ成立するため、計算値は実測値から乖離した理由として②の方が有力と考えられる。

したがって、本空間は完全拡散を仮定できない音場であり、予測時には完全に把握できなかった特性を有しているといえる。

3.4 その他の指標による評価

(1) エコータイムパターン

図8に代表地点のエコータイムパターン測定結果を示す。反射音が集中する地点が多少あるものの、顕著に問題になるようなエコーは観測されなかった。

(2) 明瞭度 (RASTI算出結果)

図7にSTI-RASTI測定結果(平均値)を示す。建築音響上のSTI, RASTI値はともに平均で0.6以上であり、この値より判断して、本空間における音声伝達性能はほぼ良好に保たれているものと言える。また、電気音響設備を使用した場合においても良好な値を示し、講演・講義等の使用に耐えうるものと考えられる。

4. まとめ

以上、円形空間の室内音響検討とその実測値の一例を示した。実測により、当初懸念された円形空間特有のエコー障害はなく、音声伝達性能(明瞭度)も保たれていること確認できた。

残響計画において目標とした残響時間はほぼ実現することはできたと考えられるが、本空間は完全拡散を仮定できる音場とは言い難く、屏風折にした壁の拡散性に対する効果を定量的に評価することはできていない。したがって、計画時の予測検討においては、未だ不確定な要素が残っているといえる。

音場の拡散性、および、予測計算時における拡散性材料の効果に関する定量的な評価法の検討を今後の課題としたい。

注1) 幾何音響シミュレーションでは、後部反射音について、逐次反射点に2次音源が形成されると仮定し、j 次の反射の2次音源は右式に基づいたエネルギーを持つものとして取り扱われる。

謝辞

音響実測にあたり高岡法科大学新築工事J V (当時)の和田 哲氏、高橋一光氏に多大なるご協力をいただいた。本稿の結びにあたり深謝の意を表したい。

参考文献

- 1) J H Rindel: Attenuation of Sound Reflections from Curved Surfaces, Proc. of 24th Conference on Acoustics, Strbske Pleso, 1985
- 2) J H Rindel: Acousites Design of Reflectors in Auditoria, Proc. I.O.A. Vol 14 Part2, 1992
- 3) 永田 穂: 建築の音響設計, オーム社, 1991
- 4) G. Naylor: ODEON- Another hybrid room acoustical model, Applied Acoustics 38 131-143
- 5) G. Naylor and J. Rindel: ODEON Room acoustics program Version2.5 User manual

INVESTIGATION OF ACOUSTICAL PROPERTIES IN CIRCULAR ROOM

S.Inoue, K. Sugino, G. Miyashiro, T. Watanabe

A shape, reverberation, and specification of the absorbent material attached into boundary surfaces in circular lecture room are designed for room acoustics. It is predicted that dead spot and focal points occur and echo-problem distorts speech and musical performance in circular room because its boundary surfaces are concave. Therefore, a computer simulation based on geometrical acoustics is used as a reasonable method to keep speech intelligibility and avoid serious echo problem.

As a result of measurement, after this room had been constructed, on the average, RT for mid frequencies is approximately 1.0s, RASTI is higher than 0.60. Then it is confirmed there are not any echo-problems and speech transmission quality is good.

It is appeared that, on comparing measured result with calculated results, RT value for mid and higher frequencies derived from reverberation formula is lower than measured one. This is because the assumption of complete diffuse sound-field is not satisfied in this room. It is the subject for a future study that how much diffusivity is to be expected and how to evaluate the effect of the diffusion material.

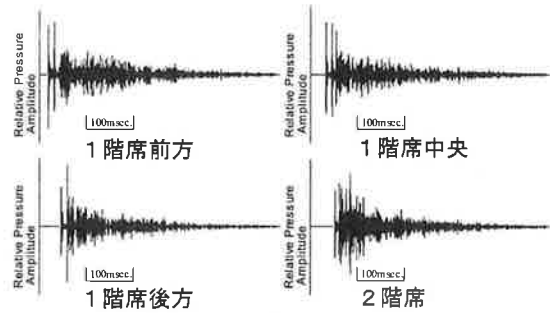


図8 エコータイムパターン測定例(Octave Band 1kHz)

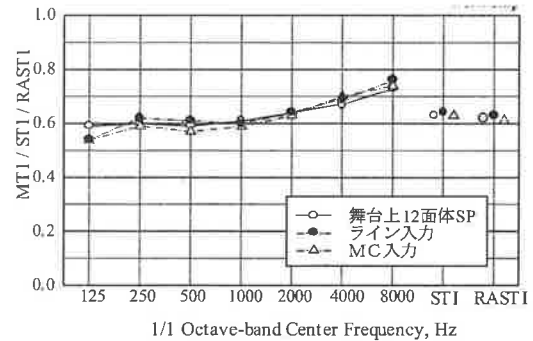


図9 STI, RASTI実測結果

$$E_j = \frac{E_0}{N} \cdot \prod_{i=1}^j (1 - \alpha_i)$$

$$E_j = \frac{E_0}{N} \cdot G \cdot \prod_{i=1}^j M_i \cdot [A \cdot N \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \dots \cdot \alpha_j \cdot E_0 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \alpha_6 \cdot \alpha_7 \cdot \alpha_8 \cdot \alpha_9 \cdot \alpha_{10} \cdot \alpha_{11} \cdot \alpha_{12}]$$