

円形空間の室内音響検討 その2

— 小規模チャペルの室内音響設計 —

井上 諭* 羽染 武則** 杉野 潔**

要約： 円形プランのチャペルの音響計画において、幾何音響シミュレーションを用い、エコー障害の有無の確認、空間の拡散性の評価、残響時間・室内音響物理指標値についての予測検討を行った。また、物理指標の予測計算値について実測値との対応を確認し、予測精度を検証した。

計画では、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目的で壁を屏風折とし、音場の拡散性を高めることに配慮した。その効果は平均自由行路、エコータイムパタン等を算出することで、定性的に捉えることが可能であった。幾何音響シミュレーションによる予測値の精度は、残響時間に関しては、残響式 (Eyring-Knusen) による計算値よりも信頼性が高いことが明らかとなったが、その他の室内音響物理指標値に関しては、後部の反射音の取り扱い次第でばらつく傾向があることが明らかとなった。

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 | 4. 実測値に対する評価 |
| 2. 室形状の検討、内装設計 | 5. まとめ |
| 3. 実測値に対する計算値の整合性 | |

1. はじめに

円形プランの空間やドーム等の凹曲面に囲まれた室内空間は、音場の拡散が悪く、音の集中やデッドスポット、フラッターエコー等の音響障害が起りやすい。そのような障害を避けるためには、室形状の変形が不可欠であり、内装面に凹凸を設けるなどの手段によって、音場をできる限り拡散させる必要がある。

しかしながら、室形状の変化が音場の改善に及ぼす影響を定量的に表す指標はなく、音場がどの程度完全拡散の状態に近づいたかを確認することは困難である。故に、そのような空間は依然として音場の完全拡散の仮定が成立しにくい状態である可能性が残されており、残響理論に基づく室内音響特性の予測には限界があると考えられる。

この点に関して、前報¹⁾では円形講堂の音場検討を例に、Eyring-Knusenの残響式で求めた残響時間予測値が、真値(実測値)と比較して大きく異なるが、幾何音響学(虚像法、音線法)に基づくシミュレーション^{2) 3)}による予測値は実測値と対応が良く、音場の定性的な評価において有用であることを示した。

本稿では、その続報として、小規模の円形チャペルを検討対象例に選び、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た事例を示す。ま

表1 検討対象の規模

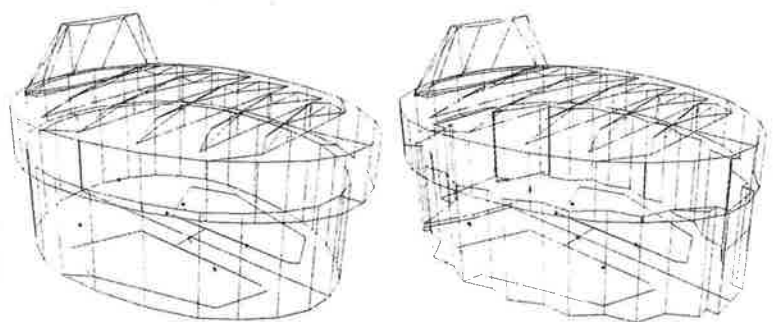
用途	室容積	表面積	収容人数
教会	約760m ³	約610m ²	約90人

た、拡散処理の効果を把握する目的で、幾何音響シミュレーションによって、平均自由行路、エコータイムパタン、室内音響物理指標値等を求めた例を示し、非拡散音場における室内音響予測法について考察する。

2. 室形状の検討、内装設計

2.1 室の特徴、用途、規模

検討の対象とした建物は、図1に示すように曲率の異なる複数の円弧によって形作られた「卵型」の平面を有し、2つの筒状の空間を組み合わせた形状をしている。建物の規模の概略は表1に示すとおりであり、収容人数約90人、容積約760m³の小規模な教会である。



(a) 壁面の拡散なし (b) 壁面屏風折 (最終形)

図1 検討対象モデル

本建物の主たる用途は牧師による説経、オルガン演奏等であり、スピーチが明瞭に聞こえること、また、オルガン等の音楽が豊かに響くことが音響条件として求められた。

室の用途、規模に見合う最適な残響時間については、図2に示す残響時間推奨曲線より、1.1秒～1.5秒前後と判断でき、計画では、ヒトが着座した状態でこの範囲に収まることを設計目標とした。また、残響検討により、内装材料の仕様については、表2に示すとおりとした。

2.2 拡散処理による効果の検討

本空間は曲率の異なる複数の凹面状の壁で囲まれているため、空間内に多数の音の焦点が存在する複雑な音場になることが予測された。計画では、壁面からの反射音による音響障害を避けるために、図1(b)に示すように、内装壁の一部を屏風折とし凸面を形成し、音の拡散性を高めることを意図した。

内装壁の折れ曲げ度は、大きいほど音の拡散を良くすると考えられるが、図1(b)に示す最終形状は、座席数の要求をも考慮して決定されたものであり、その拡散効果を正確に把握した上での結論ではない。

そこで、図1(a)に示す拡散処理を行わないモデルとの比較において、(b)の形状の拡散効果を検証した結果を示す。

(1) 平均自由行路

Eyringの室内音響理論によれば、音場の完全拡散の仮定が成立する空間では、反射音の伝搬距離の平均自由行路は室の形状に関係なく下式で示す一定値となる。

$$p = 4V/S$$

ここに、 p : 平均自由行路, m 、

V : 室容積, m^3 、 S : 室表面積, m^2

言い換えれば、その仮定の成り立たない音場において平均自由行路は、上式の理論値からかけ離れると考えられる。そこで、図1(a)、(b)それぞれのモデルについて、幾何音響シミュレーションによって、2000回反射までの音線の経路を追跡し、平均自由行路(p')を求め、理論値(p)との差異を検討した。

表3に示すように、側壁を曲面のままにしたケース(a)では、 p' は理論値(p)より2.3%程度大きくなる。これは、(a)の空間では音場の完全拡散の仮定が成立せず、残響時間がその割合だけ理論値よりも長くなることを意味する。一方、壁を屏風折りにしたケース(b)では、(a)と比較して値は小さくなり、理論値とほぼ同等となった。また、床の椅子による拡散効果³⁾を考慮したケース(c)では、さらに値が小さくなる結果となった。

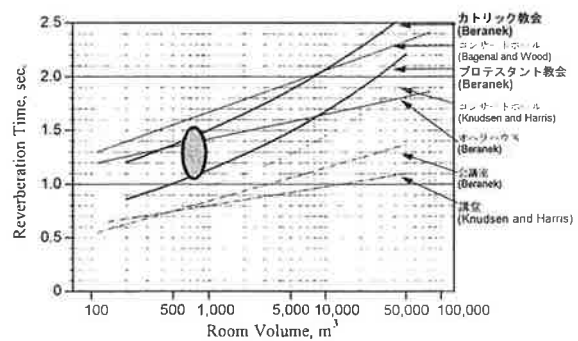


図2 残響時間の目標値

表2 内装仕様概要

部位	仕様
床: 座席以外	石貼り
座席	木製椅子
壁: 屏風折り壁	石貼り
上部曲面	岩綿吸音板
その他	ボード下地、練り付け合板仕上げ
天井	ボード下地 塗装仕上げ (一部、トップライトガラス)

表3 各モデルにおける平均自由行路算出結果

室形状	(a)側壁曲面	(b)壁屏風折	(c)壁屏風折 + 椅子
p' : 平均自由行路, m	5.35	5.00	4.93
p : 平均自由行路理論値, m	5.23	5.01	5.01
$(p'-p)/p$, %	2.20	(0.24)	(1.64)
V : 容積, m^3	761.80	761.80	761.80
S : 全表面積, m^2	582.10	607.98	607.98

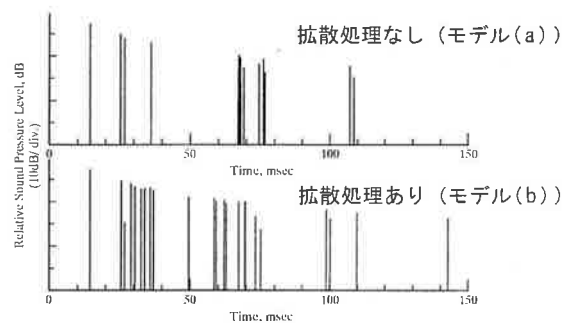


図3 室中央付近におけるエコータイムパターンの比較

(2) エコータイムパターン

幾何音響シミュレーションによるエコータイムパターン計算値の一例として、室中央付近において得られた比較結果を図3に示す。これらのエコータイムパターンは虚像法によって求めた3次までの反射音を含む。

図3より、ケース(a)ではエコー(初期反射音)の本数が非常に少なく、この地点がデッドスポットとなっている可能性を示す結果である。一方ケース(b)では、(a)と比較して反射音本数が多く、屏風折壁を介して拡散された反射音が得られているものと推察される。

(3) 室内音響物理指標

室内音響物理指標値の室内空間におけるばらつきを表す一例としてSTI(Speech Transmission Index)の比較

結果を図4に示す。

図4より、ケース(a)では、室中央付近、および、壁寄りの値が小さく、後壁寄り値が大きいなど室内全体に渡って値がばらついているが、ケース(b)については、そのばらつきはある程度緩和されている傾向が読みとれる。

STI値は明瞭度に貢献する初期反射音のエネルギーの大きさととの相関があることが知られている。したがって、ケース(b)において、値のばらつきが小さくなるということは、初期の反射音の到来エネルギーの偏りが小さくなることを意味するものであり、音場の拡散性が高まった可能性を示すものと考えられる。

以上に示した平均自由行路、エコータイムパタン、室内音響物理指標値(STI値)は、壁の拡散処理の有無に連動する傾向を一様に示しており、このことから、空間の拡散処理の効果を表す定性的な指標に成りうると思われる。

3. 実測値に対する計算値の整合性

(1) 残響時間

建物内に椅子が入った状態での残響時間について、7地点における実測値と予測計算値との比較結果を図5に示す。

図5より、残響計算式(Eyring-Knudsen)は、実測値より大きくかけ離れていることから、本空間は完全拡散状態でないことが推察される。

一方、幾何音響シミュレーションによる計算値は、実測値と比較して、中・低音域においてやや値が短めとなるが、その周波数特性はほぼ同様な傾向を示している。

この傾向は前報に示した例とほぼ同様であり、幾何音響シミュレーションは、ある程度実際の空間の非拡散性を反映し得る可能性を示すものと考えられる。

(2) その他の音響物理指標値

室内音響物理指標の一例として、STI、および、 t_s (時間重心)について、7地点における実測値と幾何音響シミュレーションによる計算値との比較結果を図6に示す。

図6より、STI値については、計算値は実測値よりも若干小さめとなる一方、 t_s 値は計算値の方が大きくなる傾向が読みとれる。また、いずれの指標値においてもこの傾向が逆転するサンプルが一つあるが、これは、音源に非常に近い地点での観測値である。

この2つの指標にみられる実測値-計算値との対応結果より推察できることは、幾何音響シミュレーションでは、初期に到来する反射音を十分に捕らえきれていないということ、あるいは、後部の残響エネルギー

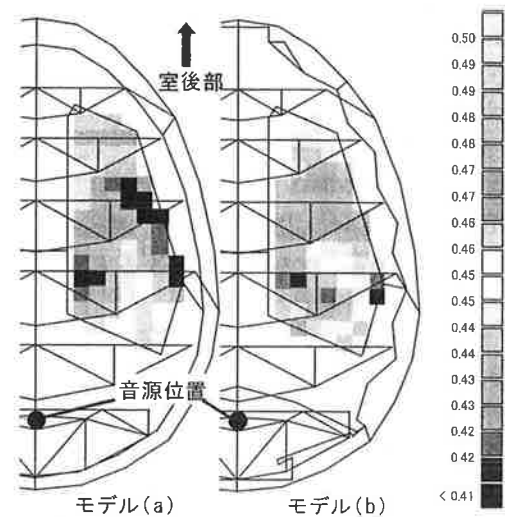


図4 室内音響物理指標値(STI)比較結果

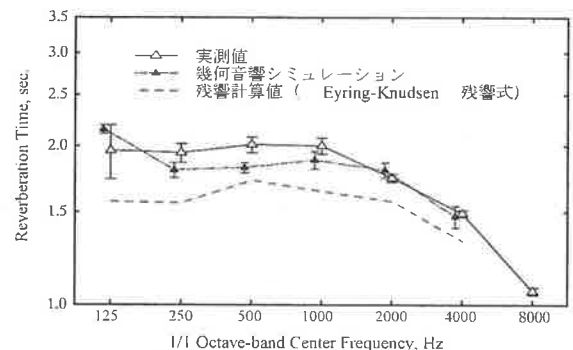


図5 残響時間に関する計算値-実測値の比較

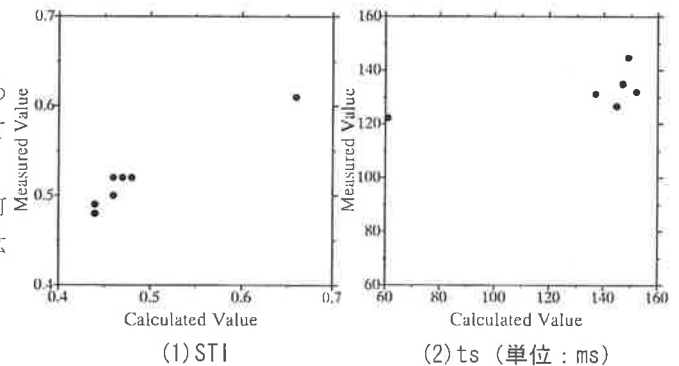


図6 室内音響物理指標値に関する計算値-実測値との対応

を過大に評価している可能性があること、の2点である。

4. 実測値に対する評価

(1) 音声伝達性能

実測結果を基に、本チャペルにヒトが入室(着座)した状態における残響時間の推測値を図7に示す。

これより、本空間の残響時間は、満席の状態では、目標とした推奨範囲内(1.1~1.5秒)に収まる見込みである。

また、STI値は空席の状態において概ね0.5以上であ

ることから、ヒトが入室すれば、この値はさらに大きくなるものと想定され、音声の伝達性能は十分に保たれているものと考えられる。

(2) エコー障害

実測の結果、本空間において音響障害となり得るエコーは観測されなかった。実測値の一例として、室中央、および、後壁寄りの壁際における測定地点のエコータイムパターンを図8に示す。

5. まとめ

円形空間等の音場の予測において、幾何音響シミュレーションを適用することで得られた知見と、今後の課題について以下にまとめて示す。

- (1) 平均自由行路、エコータイムパターン等を算出することにより室形状の拡散処理による効果は定性的に捉えることはできる。しかしながら、音場の拡散状態の改善量を定量的に捉えることは難しい。
- (2) 室内音響物理指標値は、後部反射音の取り扱い（計算条件）次第で、実測値との対応も大きく変わるため絶対量の評価はできない。また、受音点毎に固有の値を求めることができるが、実測値とは必ずしも1対1で対応しない。
- (3) 残響時間については、残響式による予測結果よりも実測値に近い値を得ることができる可能性がある。しかしながら、全ての音場においてこのことが保証されるとは限らない。

謝 辞

チャペルの音響実測にあたり桜丘プロジェクト新築工事作業所の関係諸氏には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) 井上 諭、杉野 潔他：円形空間の音響検討、日本音響学会講演論文集、2000.9
- 2) G. Naylor: ODEON- Another hybrid room acoustical model. Applied Acoustics 38 131-143
- 3) G. Naylor and J. Rindel: ODEON Room acoustics program Version2.5 User manual
- 4) 永田 穂：建築の音響設計、オーム社、1991

INVESTIGATION OF ACOUSTICAL PROPERTIES IN CIRCULAR ROOM PART2 - Room Acoustics Design in Small and Circular Chapel -

S.Inoue, T. Hasome, K. Sugino

The characteristics of the sound field in a small and circular plan chapel are examined at the planning stage. It is predicted that, concave surfaces produce such particular spots as sound focus and dead spots, which make the sound field distribution irregular and create serious problem in the room. In order to avoid this problem, the wall surface shapes are bent random so as to diffuse the incident sound. The effects of that were investigated by using a computer simulation based on geometrical acoustics.

It is indicated that the effect of the treatment is explained qualitatively by the mean free path, echo time pattern, which are derived from the computer simulation, and they probably become the predictor of the acoustical properties in the non-complete diffuse sound-field.

As a result of measurement, after this room had been constructed, on the average, RT for mid frequencies is approximately 2.0s. RASTI is higher than 0.50. Then it is confirmed there are not any echo-problems and speech transmission quality is fair.

今後は、これらの制限事項に留意しつつ、形状、規模の異なる複数のケースについて計算モデルと実測値との対応について引き続き検討を行い、実務的な幾何音響シミュレーションの取り扱い法を突き詰めていきたい。

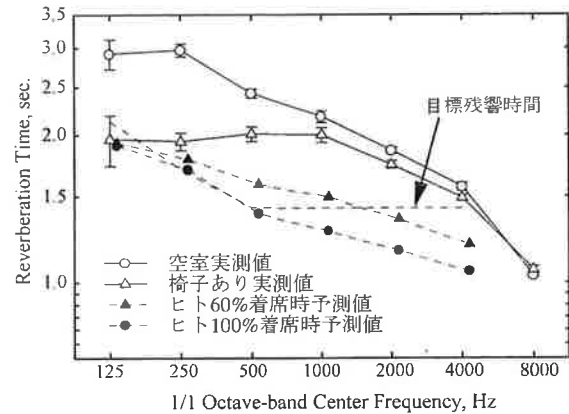
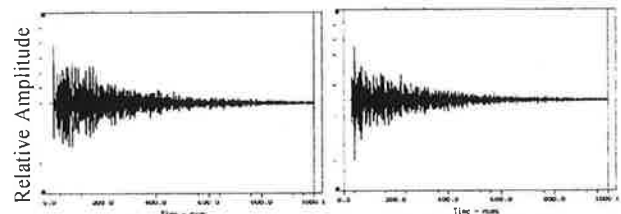


図7 満室時の残響時間予測計算結果



(1) 室中央付近 (2) 室後方壁寄り

図8 エコータイムパターン測定例(Octave Band 1kHz)