

宗像ザピエル聖堂の音響と改修

大場, 梨那
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 | 東急建設株式会社

大庭, ゆかり
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 修士課程

藤本, 一壽
九州大学人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/1515826>

出版情報 : 都市・建築学研究. 26, pp.65-72, 2014-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :

宗像ザビエル聖堂の音響と改修

Acoustics and improvement of Munakata St. Francisco Xavier Catholic Church

大場梨那*, 大庭ゆかり**, 藤本一壽***

Rina OBA, Yukari OBA and Kazutoshi FUJIMOTO

The temple of the Catholic Church is used for not only mass but also the place of listening to priest's speech and religious music. And in recent years, chapel concerts are often held there. The value of the Church, therefore, cannot be talked about without the properties of acoustics. However, acoustic design is actually carried out in only few churches, and the difficulty in hearing of the conversation is frequently pointed out. On the above as background, this research studies the acoustics of Munakata St. Francisco Xavier Catholic Church. The survey reveals that speech intelligibility is poor and disciples wish easy conversation in this temple. On the basis of it, the authors examine how to improve the acoustics by a computer simulation, and propose some ideas reducing reverberations to improve speech intelligibility. They are actually carried out by the church. After the improvement, the authors measure the acoustics again and perform an experiment to confirm the effectiveness of sound absorptions. The results show Munakata Catholic Church turn to acquire a good acoustics.

Keywords : *Catholic church, Acoustic measurement, Sound absorption, Words intelligibility*
カトリック教会, 音響調査, 吸音, 単語了解度

1. はじめに

カトリック教会の聖堂は、礼拝だけでなく司祭や神父の説話や聖歌を聴く場でもある。日本のキリスト教会においても、聖堂はミサにおける説教・聖歌演奏などの宗教行事が主な用途であるが、近年、チャペルコンサートなどの音楽演奏・鑑賞の場に使われることも多くなってきた。したがって、音響特性は聖堂にとって重要な室性能といえる。しかし、聖堂は適切な音響設計がなされていることはごくまれであり、説話の音が聴きにくい、場所によって聞こえ方が異なるなどの問題点が指摘されている^{1) 2) 3)}。

このような背景を踏まえ、聖堂の音響特性を知るため、福岡県宗像市に移築された宗像ザビエル聖堂 (Fig. 1) の音響調査を行った。その結果、音声聴き取りにくいという問題が指摘されたため、その改善方法について幾何音響シミュレーションを用いて検討し、音響改善策を教会に

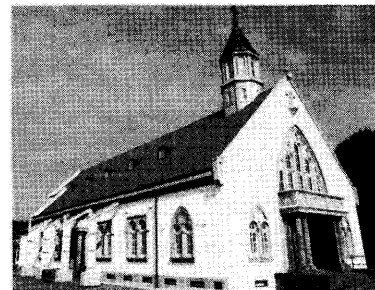


Fig. 1 宗像ザビエル聖堂 (外観)

提案した。筆者らの提案を基に、教会は聖堂の音響改修を行った。そこで、改修後の音響を把握するために再度実測を行うとともに、改修による効果を検証するため、模擬音場を用いて単語了解度試験及び文章の聴き取りにくさ評価実験を行った。

2. ザビエル聖堂の概要

ザビエル聖堂は、衛藤右三郎氏と七田和三郎神父の設計により、1949年に鹿児島市内に建立されたカトリック教会である。新聖堂建設のため当初は取り壊しが予定されて

* 空間システム専攻 (現 東急建設株式会社)

** 空間システム専攻 修士課程

*** 都市・建築学部門

Table 1 ザビエル聖堂の諸元

床面積	S[m ²]	306
表面積	A[m ²]	1218
室容積	V[m ³]	1846

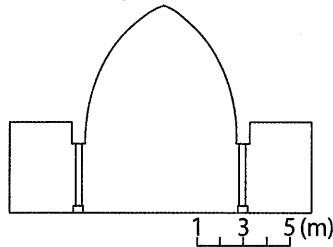


Fig. 2 断面図

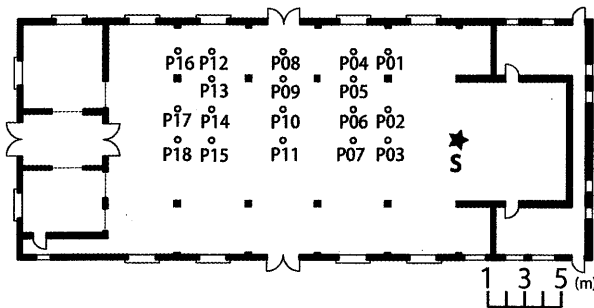


Fig. 3 平面図

いたが、土田充義 鹿児島大学名誉教授らによって、福岡県宗像市の「福岡黙想の家」の敷地内に移築された。移築は、ボランティアの手で行われ、9年の歳月をかけて2013年の春に完了した。

聖堂は、全長約31.5m（聖堂の奥行きは約25.6m）、会堂幅約13m、身廊幅7m、側廊幅約3mの比較的小さな平面である。天井は、身廊部は連続アーチ式（頂点部の高さは約8.5m）、側廊部は平天井（高さは約2.8m）となっている⁴⁾。構造は木造であり、内装は壁と天井はモルタル仕上げ、床はフローリング張りである。また、壁の一部に木造壁が設けられている。聖堂の諸元をTable 1に示す。表に示す床面積、室容積、表面積は、鹿児島大学土田研究室の実測図を基に筆者らが算出した値である。

3. 実測調査

3.1 測定概要

ザビエル聖堂の室内音響特性を把握するため、実測調査を行った。聖堂の平面図及び測定点をFig. 3に示す。測定には統合測定システムIMS Ver.2.0を用いた。音源の位置は会堂前方の説教台（図中のS点）とし、無指向性12面体スピーカよりスイープパルスを発生させ、無指向性マイ

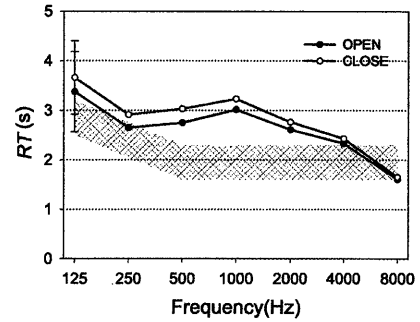


Fig. 4 残響時間

クロフォンを用いてインパルス応答を計測した。同期加算回数は8回とした。音源、測定点は共に床上1.2mの位置とした。測定点は信者席に18点設けた。当聖堂の天井には10個の換気口が設けられており、換気口を閉めたとき（以下、CLOSEと表記）と開けたとき（以下、OPENと表記）では音響特性が異なると考えられるため、音響実測はCLOSEとOPENの2つの条件下で行った。

3.2 測定結果及び考察

3.2.1 残響時間

全測定点（18点）における測定結果の平均値を、同程度の室容積を有するカトリック聖堂の最適残響時間（図中網掛け部）と比較してFig. 4に示す。125Hzの残響時間は測定点によって値が異なったため、平均値とともに標準偏差をエラーバーで示した。残響時間は、換気口を閉めた状態でも開けた状態でも、低音ほど長く125Hzで最大となり、また、1,000Hzでも長い。最適残響時間と比較すると、聖堂内の残響時間は、4,000Hz以上を除いて長めという結果となっている。また、天井換気口を開けたときは、閉めたときよりも250Hz～1,000Hzで0.2s～0.3s程度短くなるが、それでも最適残響時間を満たしていない。

3.2.2 D_{50}

各測定点における D_{50} をFig. 5に示す。前方ほど値が大きくなっているものの、最前列でも0.4にすぎず、後方では0.2～0.1と小さい。このように、本聖堂内の音声明瞭度は、 D_{50} の値からみて決してよいとはいえない。これは換気口を開けた場合も閉めた場合もほとんど変わらない。

3.2.3 C_{80}

各測定点における C_{80} をFig. 6に示す。図中に白字で示す値は C_{80} の推奨値（±3dB以内）を満たしていることを示している。全測定点18点のうち、推奨値を満たすものは、天井換気口を開けた場合13点、閉めた場合11点であった。本聖堂内の音楽の明瞭度は、 C_{80} からみると、天井換気口を開けたときも閉めたときも、前方から中央付

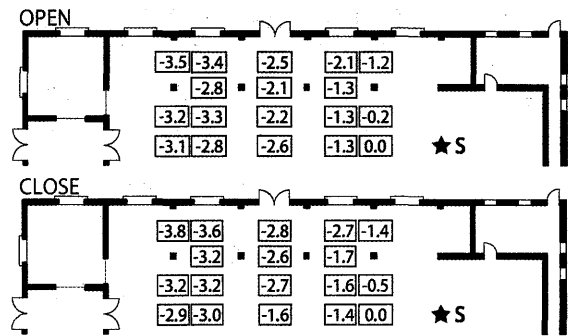
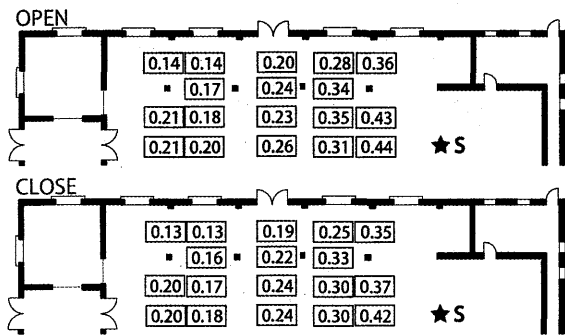


Table 2 各部材の材料と吸音率 (推定値)

部材名	表面積(m ²)	吸音率					
		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
天井	595.9	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03
床	335.3	0.08	0.10	0.10	0.10	0.09	0.07
壁(モルタル部分)	138.0	0.01	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03
壁(木部分)	137.5	0.15	0.25	0.18	0.09	0.15	0.10
柱	46.2	0.01	0.01	0.02	0.03	0.05	0.05
窓	34.4	0.11	0.05	0.04	0.04	0.04	0.03
ドア(入口・祭壇部)	20.7	0.10	0.10	0.09	0.05	0.05	0.10
ドア(側面)	11	0.15	0.15	0.12	0.07	0.07	0.12
換気口	11.2	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06
椅子	62.4	0.14	0.15	0.10	0.08	0.08	0.07

を基準とした相対レベル)を Fig. 8 に示す. 後方は前方に比べて 3.5dB(OPEN) から 3.8dB(CLOSE) のレベル低下となっているが, これは聴感上は有意な差とはいえないであろう.

4. 幾何音響シミュレーション

4.1 シミュレーション概要

前章 3. でみたように, ザビエル聖堂は残響時間が長く, 音声が聴き取りにくい状態であることが示唆された. また, 聖堂関係者からも“音が響いて声が聴き取りにくい”という感想を聞いた.

残響時間が短くなるほど音声の聴き取りにくさが軽減されることはよく知られている⁵⁾. そこで, 響きを抑制して音の聴き取りにくさを改善することを目的として, 聖堂内の吸音処理について幾何音響シミュレーションを用いて検討をした.

幾何音響シミュレーションには音線法によるソフトウェア(CATT-Acoustics)を用いた. シミュレーションの条件は, 放射音線本数 100,000 本, 音線の追跡打ち切り時間 5,000 ms, 空気吸収の影響は無いものとした. 音源と受信点の位置は Fig. 3 に示す実測と同じとし, 図面を基に形状モデルを作成した. 吸音率は, 残響時間が実測結果に近い値となるように設定した. また, 椅子は座面だけで表現(幅 2,000 mm, 奥行き 40 mm, 厚さ 10 mm の木製の平板)し, 30 脚を設置した. 各部材の表面積と吸音率を Table 2 に示す.

近では概ね良好といえるが後方では良好とはいえない.

3.2.4 RASTI

各測定点における RASTI を Fig. 7 に示す. 各測定点の色は評価を示しており, 白字の値は FAIR(0.45 以上), 黒字の値は POOR(0.45 未満)である. FAIR となったのは, 天井換気口を開けたとき(OPEN)2 点, 閉めたとき(CLOSE)1 点である. このように, 本聖堂内の音声の聴き取りにくさは, 天井換気口を開けたときは閉めたときよりもわずかによいものの, 前方の一部を除いて室全体で聴き取りにくい状態であると思われる.

3.2.5 音圧レベル分布

音源位置からホワイトノイズを放射したときの各点の A 特性音圧レベル分布(音圧レベルが最大値となった点(P03))

Table 3 吸音に用いる材料と吸音率 (想定値)

吸音材	表面積(m ²)	吸音率					
		125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz
ポリウール	11.2	0.65	0.70	0.75	0.80	0.75	0.85
フェルトカーペット	77.95	0.05	0.15	0.38	0.65	0.78	0.80
座布団	18	0.05	0.15	0.38	0.65	0.78	0.80

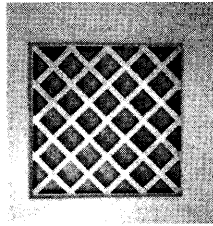


Fig. 9 天井換気口

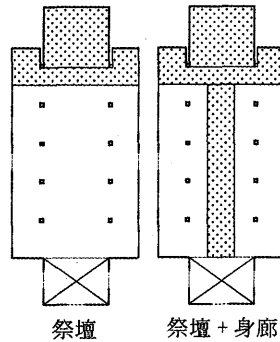


Fig. 10 カーペット位置

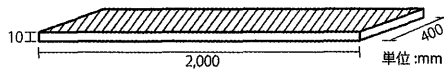


Fig. 11 椅子及び座布団の位置

4.2 聖堂内の吸音

聖堂内の吸音処理として、(i) 天井換気口の蓋 (室内側にポリウール⁶⁾ (以下、PW と表記) を貼る、(ii) 床にカーペットを敷く、(iii) 椅子の座面に座布団を敷く、の3つを想定した。

天井換気口は、Fig. 9 に示すように、1個の面積がおおよそ1.2m²で、合計10個設けられており、背後に換気口を閉じるための蓋 (金属板) が設置されている。蓋を閉じたときは金属板によって音が反射されるため、蓋の室内側をポリウール (密度32kg/m³、厚さ50mm) で吸音することにした。なお、ポリウールと金属板の間には空気層は設けられないため吸音率は“空気層なし”の値を設定した。カーペットはフェルトカーペットとし、Fig. 10 に示す2ケースの敷き方を想定した。座布団は、Fig. 11 に示すように、椅子全面に設置すると想定し、吸音率はフェルトカーペットとした。吸音に用いる材料の吸音率 (想定値) を Table 3 に示す。

現状を Case 0 (換気口 CLOSE) とし、上記吸音処理 (i)、(ii)、(iii) を組み合わせて、次の3ケースについて幾何音響シミュレーションを行った。

Case1 : (i)+(ii) (祭壇のみ)

Case2 : (i)+(ii) (祭壇のみ)+(iii)

Case3 : (i)+(ii) (祭壇と身廊)+(iii)

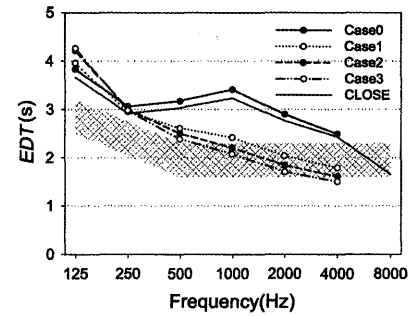


Fig. 12 EDT

Table 4 D₅₀

	CLOSE	Case0	Case1	Case2	Case3
前方	0.36	0.30	0.39	0.41	0.43
中央	0.23	0.21	0.30	0.32	0.34
後方	0.18	0.20	0.27	0.29	0.31

Table 5 C₈₀ (dB)

	CLOSE	Case0	Case1	Case2	Case3
前方	-1.10	-1.54	0.54	0.84	1.31
中央	-2.82	-2.95	-0.98	-0.53	-0.18
後方	-3.95	-3.07	-1.17	-0.80	-0.33

4.3 解析結果及び考察

4.3.1 残響時間

吸音処理した聖堂について、シミュレーションで得られた EDT (18 点の平均値) を実測値 (CLOSE) と比較して Fig. 12 に示す。図中の網掛け部は最適残響時間を示す。

いずれのケースも、低域 (125 Hz ~ 500 Hz) では依然として残響時間が長すぎる (吸音が不足している) が、高域 (1,000 Hz ~ 4,000 Hz) では、3 ケースとも適切な残響時間となっている。音声の主成分は 1,000 Hz 前後であることから、音声受聴に関しては、換気口の吸音と祭壇部分にカーペットを敷く (Case1) 程度の吸音をすれば十分であると思われる。

4.3.2 D₅₀

D₅₀ の結果を Table 4 に示す。室の位置によって傾向が異なったため、受音点 18 点を、前方 (P01 ~ P07)、中央 (P08 ~ P11)、後方 (P12 ~ P18) に分け、それぞれの平均値を示した。吸音処理によって、どの位置においても D₅₀ の値は上昇しているが、最も吸音処理した Case3 においても基準値 (0.5 以上) を満たす点はなかった。とはいえ、Case3 では、後方においても、現状の前方と同程度の D₅₀ の値を確保することができるという結果である。

4.3.3 C₈₀

C₈₀ の結果を Table 5 に示す。受音点 18 点を、前方 (P01 ~ P07)、中央 (P08 ~ P11)、後方 (P12 ~ P18) に分け、

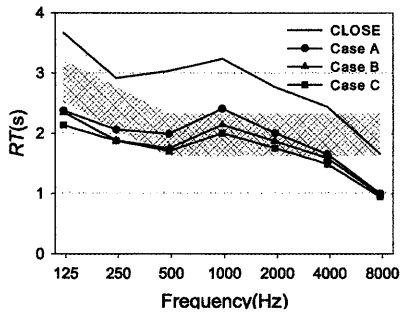


Fig. 18 残響時間

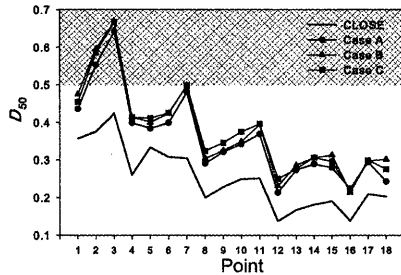


Fig. 19 D_{50}

音声受聴にふさわしい残響時間としては、音声の周波数の主成分は1,000 Hz 前後であることから、その範囲で最適残響時間に近い値となっている Case B と Case C が適切といえよう。すなわち、天井換気口を吸音し、椅子に座布団を敷いて使用するのであれば、床の吸音は祭壇だけでよいと思われる。

6.2.2 D_{50}

各測定点における D_{50} と推奨値 (図中網掛けの範囲) を Fig. 19 に示す。どの測定点の値も、施工前よりも大きくなって推奨値に近づいている。対策による差は最大でも 0.04 程度であり、 D_{50} の値からは適切な対策はどれであるかを明確に判断できない。ただし、対策前は推奨値を満たす点は全く見られなかったが、対策によって P02, P03, P07 の 3 点が推奨値を満たした。聖堂前方の中央付近では音声明瞭度が改善したといえよう。

6.2.3 C_{80}

各測定点における C_{80} を推奨値 (図中網掛けの範囲) と比較して Fig. 20 に示す。どの測定点においても、対策によって値が大きくなっている。聖堂前方の一部 (中央付近) では値が大きくなり過ぎたが、その他の点では推奨値に近い値となった。音楽の明瞭度の観点からは、Case A (天井換気口の吸音と祭壇カーペット) で十分であるといえよう。

6.2.4 RASTI

各測定点における RASTI を Fig. 21 に示す。図中網掛けで示している範囲が FAIR の評価である。どの対策で

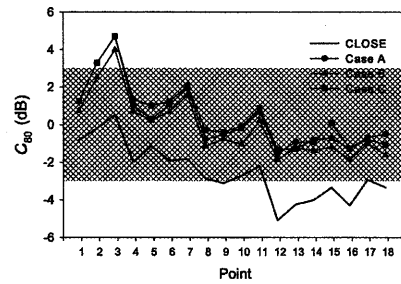


Fig. 20 C_{80}

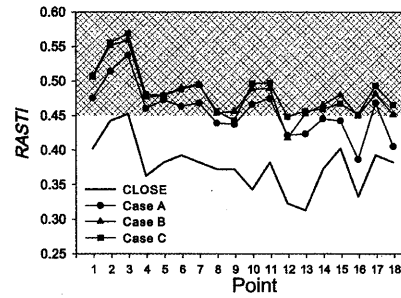


Fig. 21 RASTI

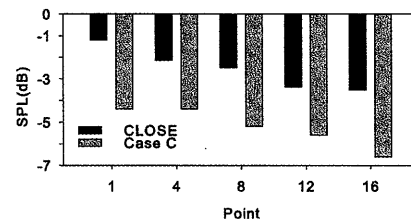


Fig. 22 相対音圧レベル

も CLOSE よりも評価が向上しており、Case C では 1 点を除いて FAIR の評価となり、P09 でもほぼ FAIR に近い値となった。音声の聴き取りにくさは、Case C (天井換気口の吸音、祭壇と身廊のカーペット、椅子の吸音) で最も改善されているといえよう。

6.2.5 相対音圧レベル

吸音対策を行ったことにより音圧レベル分布も変化したと思われる。そこで、最も吸音を施した Case C の音圧レベル分布を測定した。すなわち、音源位置 (Fig. 3 の S) からホワイトノイズを放射したときの各測定点の A 特性音圧レベルを測定した。結果を施工前の換気口を閉めた場合 (CLOSE) と比較して Fig. 22 に示す (P01, P04, P08, P12, P16 の 4 点)。音圧レベルが最大値となった点 (P03) を基準とした相対レベルで示している。

対策前 (CLOSE) には音圧レベル差は最大 3.8 dB あったが、対策後 (Case C) ではレベル差は最大 6.6 dB となり、音圧レベル分布のバラつきが大きくなった。6.6 dB という

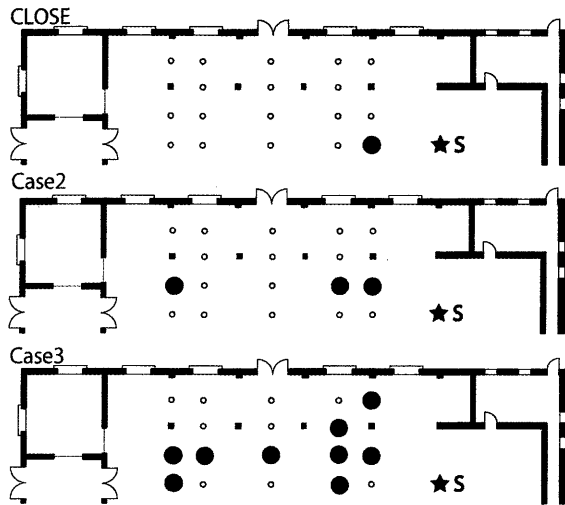


Fig. 13 RASTI

それぞれの平均値を示した。白字の値は推奨値 (± 3 dB 以内) を満たすことを示している。

現状 (CLOSE, Case0) では後方で推奨値を満たしていなかったが、吸音処理によってどのケースにおいても、後方でも C_{80} は適切な値となると推測される。

4.3.4 RASTI

吸音処理によって残響が抑制され、その結果 RASTI の値もよくなると期待される。そこで、特に残響時間において効果の大きい Case2 と Case3 に着目して検討した。Case2, Case3 において、RASTI が FAIR になった点 (図中の●) を CLOSE と比較して Fig. 13 に示す。FAIR となる点は、現状 (CLOSE) では 1 点であったが、Case2 で 3 点、Case3 で 9 点となり、吸音処理により音声の聴き取りにくさが改善されると予測された。

以上から、音声の聴き取りにくさの改善を目的とした対策では、できるだけ残響時間を短くする (フェルトカーペットをできるだけ広く敷く) ことが望ましいといえる。

5. 音響改修

筆者らの提言を受けて、宗像ザビエル教会は次の 3 つの音響改修を行った。

(a) 天井換気口の吸音 (Fig. 14)

天井換気口の蓋 (室内側) にポリウール⁶⁾ を設置

(b) 床の吸音 (Fig. 15, Fig. 16)

祭壇と身廊にカーペットを敷設

(身廊部のカーペットは取り外し可能、位置は前項の Fig. 10 と同様)

(c) 椅子の吸音 (Fig. 17)

座面に座布団 120 枚を設置 (座布団は移動可能)

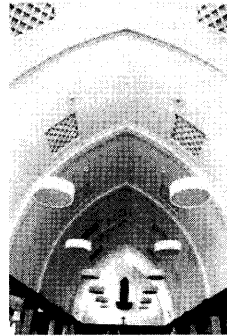


Fig. 14 天井換気口

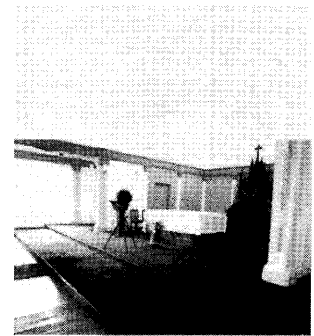


Fig. 15 祭壇の吸音

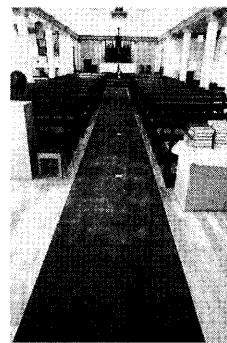


Fig. 16 身廊の吸音

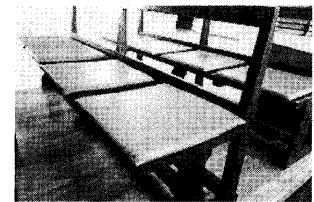


Fig. 17 椅子の吸音

6. 改修後の実測調査

6.1 測定概要

音響改修の効果を確認するために、対策施工後の音響実測調査を 3. と同様の方法で行った。

実測は次の 3 条件で行った。

Case A : (a)+(b)(祭壇のみ)

Case B : (a)+(b)(祭壇のみ)+(c)

Case C : (a)+(b)(祭壇と身廊)+(c)

6.2 測定結果と考察

6.2.1 残響時間

全測定点 (18 点) における測定結果の平均値を、吸音対策施工前の換気口を閉めた場合 (CLOSE) と比較して Fig. 18 に示す。図中の網掛け部は、同程度の室容積を有するカトリック聖堂の最適残響時間である。対策によって残響時間は短くなり、吸音処理が多いほど残響時間は短くなっている。最適残響時間と比較すると、低域と高域では残響時間が短かすぎてしまったが、いずれの対策も最適残響時間となる周波数の範囲が広がった。

Table 6 “聴き取りにくさ”の評価尺度

聴き取りにくさ	評価
1	聴き取りにくくはない
2	やや聴き取りにくい
3	かなり聴き取りにくい
4	非常に聴き取りにくい

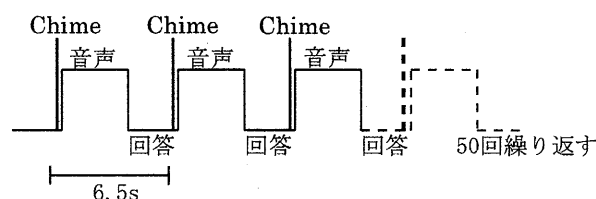


Fig. 23 実験の流れ

差は聴感で感知できる値であり、聖堂の前方と後方で聞こえ方に差が生じるかもしれない。

7. 単語理解度試験と文章の聴き取りにくさ評価実験

7.1 実験の目的と概要

前項では、実測調査によって、聖堂内を吸音対策したことによって、残響時間が短くなり、 D_{50} 、 $RASTI$ も向上したことを確認した。そもそも吸音対策の主目的は聖堂内の音声の聴き取りにくさの改善であるので、音声の聴き取りにくさが改善されたかを、物理指標による確認だけではなく聴感的にも検証したいと思い、被験者を用いた単語理解度試験及び文章の聴き取りにくさ評価実験を行った。音声の聴き取りにくさが改善したか聴感的に確認するには、聴感試験を聖堂内で行うことが望ましいが、今回は第一段階の検討として、無響室内にザビエル聖堂の疑似音場を作成し、実験室内で実験した。被験者には正常な聴力を有する22歳～25歳の男女計6名を用いた。

7.2 試験用音声

単語理解度試験には「NTTアドバンステクノロジー株式会社 親密度別単語理解度試験用音声データベース」⁷⁾に収録されている単語の中から、親密度群3(親密度4.0～5.5)のものを300語、親密度群2(親密度2.5～4.0)のものを300語の計600語を用いた。文章の聴き取りにくさ試験には「NTTアドバンステクノロジー株式会社 音素バランスデータ」⁸⁾に収録されている音源1000文から300文を選んで使用した。インパルス応答は、CLOSE, Case A, Case Cの3条件中から $RASTI$ 値に差のみられたP05(中方), P13(後方)において測定したもの、計6種類を用いた。それぞれの単語及び文章に上記のインパルス応答のいずれかを畳み込んだ。

7.3 実験方法

試験音源を50個ずつに分けてランダムに被験者に提示した。単語理解度試験では、回答用紙に「聞こえた単語」を記入させ、さらに“聴き取りにくさ”⁹⁾を評価してもらった。文章の聴き取りにくさ評価実験では、聴き取りにくさを10段階で評価してもらった。実験の流れをFig. 23に、“聴き取りにくさ”の評価尺度をTable 6に示す。

Table 7 単語理解度 (%)

	CLOSE	Case A	Case C
P05	59.7	69.0	73.5
P13	47.2	58.7	63.2
平均	53.4	63.8	68.3

Table 8 単語理解度 (親密度別)(%)

親密度	CLOSE	Case A	Case C
高	65.6	77.6	78.6
低	41.4	50.2	58.2
平均	53.4	63.8	68.3

7.4 実験結果及び考察

7.4.1 単語理解度

6人の被験者の単語理解度の平均値(%)をTable 7に示す。P05, P13のいずれにおいても、吸音するにつれて(CLOSE → CaseA → CaseC)単語理解度が上昇しており、吸音対策によって音声の聴き取りにくさが低下したことが確認できた。また、これら全ての結果において、統計学的に有意差(有意水準5%)がみられた。単語の親密度別に結果(Table 8)をみると親密度の高い単語は、Case AとCase Cでほとんど理解度に差がみられなかった。これは、親密度の高い単語では、実際にはよく聴き取れなかった単語も推測で回答して正解となり、一方、親密度の低い単語では普段聴きなれない単語が多いため推測による回答が困難であり、その結果、差が生じたと出たと考えられる。

7.4.2 文章の聴き取りにくさ

文章の聴き取りにくさの評価結果を、被験者ごとにFig. 24に示す。被験者ごとに傾向は異なるが、吸音対策するにつれて聴き取りにくさが軽減されていることがわかる。また、これらの結果には統計学的にも有意差(有意水準5%)がみられた。

8. むすび

聖堂の音響特性を知るため、福岡県宗像市に移築された宗像サビエル聖堂の音響調査を行ったところ、明瞭度に問題が見られ、また聖堂関係者からも“音が響いて声が

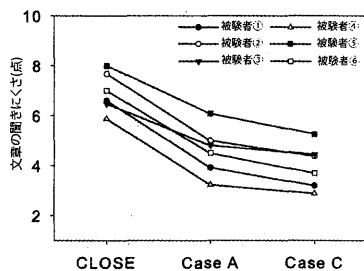


Fig. 24 文章の聞き取りにくさ

聞き取りにくい”という感想を聞いた。これらを解決すべく、幾何音響シミュレーションに基づいて吸音対策案を提示し、実際に改修を行った。改修後に再度実測調査を行った結果、残響時間が低減され、 D_{50} 及び $RASTI$ の向上も確認された。更に、改修後の効果を検証するため無響室内に模擬音場を作成して単語理解度試験及び文章の聞き取りにくさ評価実験を行ったところ、単語理解度は向上し、聞き取りにくさも軽減することが確認された。

謝 辞

本調査研究にお力添えをいただいた NPO 法人文化財保存工学研究室 土田充義理事長 (鹿児島大学名誉教授)、ザビエル聖堂関係者の皆様、信者の皆様に心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 大谷知世, 渡智賀, 安岡正人: 教会の音響特性に関する事例研究-日本キリスト教団中目黒教会 (150 席) の室内音響特性-, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp.299-300, 2001 年
- 2) 向井ひかり, 佐野史郎, 矢野博夫, 橘秀樹: 教会の室内音響特性に対する現状調査, 日本建築学会大会 学術講演梗概集, pp.31-32, 1995 年
- 3) 越智寛高, 藤井広義: 宗教建築の室内音響特性の実測例 日本の教会建築, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp.81-82, 1998 年
- 4) 松山ちあき: 聖堂再生, 文化財保存工学研究室, 2007 年
- 5) 星野知栄, 横山栄, 上野佳奈子, 橘秀樹: 公共空間における拡声放送の了解性に関する主観評価実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境工学), pp.349-350, 2011 年
- 6) 藤本一寿, 穴井謙, 古賀慎一: ポリエステル不織布の吸音率に関する実験的検討, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2004-43, pp.1-8, 2004 年
- 7) 天野成昭, 近藤公久, 坂本修一, 鈴木陽一: 親密度別単語理解度試験音声データベース (FW03), NTT アドバンステクノロジー株式会社, 2003 年
- 8) NTT アドバンステクノロジー: 音素バランスデータ CD-ROM 広帯域版, NTT アドバンステクノロジー株式会社, 1997 年
- 9) 佐藤逸人, 森本政之, 佐藤 洋: “聞き取りにくさ” による音声伝達性能の評価, 日本音響学会誌 63 巻 5 号, pp.275-280, 2007 年

(受理: 平成 26 年 5 月 29 日)