オープンプラン型教室の音環境改善に関するケーススタディ

A CASE STUDY FOR IMPROVEMENT OF ACOUSTICAL ENVIRONMENT OF OPEN-PLAN CLASSROOMS

上野佳奈子 — * 1 中田健一 — * 2

Kanako UENO — * 1 Kenichi NAKATA — * 2

キーワード：
学校音響、オープンプラン型教室、音響伝搬特性、アンケート調査、数値解析

Keywords:
Classroom acoustics, Open-plan classrooms, Sound propagation property, Questionnaire survey, Numerical analysis

In Japan, open-plan type classroom is getting popular in elementary schools. This planning type has various benefits for educational activities. However, sound propagation between adjacent classrooms tends to cause a serious acoustical problem. In this study, a field survey and numerical analysis on acoustical environment of an elementary school, which was newly built with acoustical consideration in its architectural design, were conducted. Based on the results, validity of the acoustical design to mitigate the sound propagation between the classrooms was examined.

1. はじめに

近年、小学校では学習における個人差への対応や個性を尊重した教育活動が重視され、学校の設計にあたっては一斉授業だけではなく、多様な活動を行うための空間を設けることが求められている。こうした状況の下、標準設計型教室にみられる壁や扉で仕切られた閉鎖型教室ではなく、教室が壁を隔てずにオープンスペース（以下OS）を介して空間的に連続したオープンプラン型教室（以下、OP型教室と表記）の小学校が建設されている。OP型教室では必要な遮音性を確保することが難しく、教室間の伝搬音を低減するための手法について音響模型実験や数値解析を用いた検討が行われてきた^{1)~3)}。日本建築学会発行の「学校施設の音環境保全規準・設計指針」⁴⁾においても、OP型教室間の伝搬音低減手法が示されている。これらの多くは、比較的単純な形状のOP型教室に伝搬音低減措置が施された場合の効果について検討しており、教室間のスペースやOSの幅を確保すること、天井やOSの壁の一部を吸音すること、袖壁・腰壁・垂れ壁を設置することなどの有効性が示されている。

OP型教室を設計する場合、上述の既往研究等に応示された伝搬音低減手法を取り入れることで、音環境の改善を図ることができる。しかし、設計段階で各手法の効果を量的に把握して取捨選択したり、複数の伝搬音低減手法による総合的な性能を予測することは困難であり、さらなる知見の蓄積が必要と考えられる。本報では、OP型教室の音環境を改善するための技術資料を提供することを目的として、複数の伝搬音低減手法を取り入れて設計された千葉県流山市立

小山小学校（以下、小山小）を対象としたケーススタディを通じて、音響設計手法の有効性を検証した結果を報告する。現地調査として教室間伝搬音の測定と施設利用者の意識調査を行い、また教室間伝搬音に関する数値解析により各伝搬音低減手法の効果量を検討した。

2. 研究方法

2.1 調査対象校

本研究での調査対象校となる小山小は、PFI事業により計画され、2009年4月に開校した。特徴として、低・中・高学年それぞれの学齢の児童の活動や学習形態に合わせたユニットプランを採用していることが挙げられる⁵⁾。各学年ユニットの特徴を図1に示す。

計画・設計時には、OP型教室の音環境に関する問題点に対して、教室間伝搬音を低減するための音響設計がなされた。具体的には、OSの平面形状に凹凸を設け（以下OSの凹凸と表記）、落ち着きや囲われ感のある教室が求められるとともに発声音量が高い低学年、講義型授業が比較的多い高学年の教室では、教室間にゼミ教室や小部屋を配置して間隔を設けている。また、各教室とOSの間に袖壁を設置している。仕上げ材料としては、教室の後ろ半分（図1中右半分^{注1)}）及びOSの天井に有孔石膏ボード（吸音率0.5^{注2)}）を用いて吸音している。また、OS壁面には、教室からの発生音が反射して隣教室に伝わることを緩和するため、有孔板（吸音率0.4^{注2)}）を設置している（図1中吸音壁部分）。さらに、各学年スペースの間は、昇降口・階段などの配置により教室間に距離を設けることで音の伝

○ 吸音壁 ■ 可動式ロッカー
図1 学年ユニットの特徴 ①②③は図3の測定箇所を示す(S 音源室 R 受音室)

¹⁾ 明治大学理工学部建築学科 准教授・博士（工学）
〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1
²⁾ 明治大学大学院理工学研究科建築学専攻修士課程

¹⁾ Assoc. Prof., School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

²⁾ Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.

搬を低減したり、必要に応じて閉じることのできる引き戸を設置することで、他学年からの音による妨害を防ぐ工夫がなされている。

2.2 調査・検討内容

本報で報告する調査・検討内容を以下に示す。

- (1) 建築音響性能の調査 (2010 年 8 月 26 日実施) : 教室間の音響伝搬特性の測定を行った。
- (2) 意識調査 (2010 年 11 月 18 月上旬～中旬実施) : 全学年の学級担任教師 (計 17 名) を対象とした教師アンケート, 3～6 学年の児童を対象とした児童アンケートを実施した。
- (3) 音響数値解析 : 2.1 項で述べた伝搬音低減手法の効果量について, FDTD 法 (時間領域有限差分法) により検討した。

3. 建築音響性能の調査

3.1 調査内容

測定は図 1 に示す低中高学年ユニットの教室において、家具 (机椅子及び可動式ロッカー) 有りの条件を対象とし、加えて中高ユニットでは、家具無しの条件を測定した。また、中学年ユニットでは、OS の壁に設置された吸音材 (有孔板) の効果を調べるため、ベニヤ板 (吸音率 0.16^{注2)}) 及び多孔質吸音材 (ポリウール, 吸音率 0.9^{注2)}) を貼り付けた条件^{注3)} でも測定を行った。音響伝搬特性の音源点及び受音点を図 2 に示す。音源点に 12 面体スピーカーを床上 1500 mm の点に配置し、音源信号 (White Noise) を放射した。受音点には無指向性マイクロホンを床上 1200 mm の点に配置して音源信号を録音し、後日分析を行った。

3.2 調査結果

教室間の音響伝搬特性について、オクターブバンドごとの音源のパワーレベルを 100 dB として換算した音圧レベル (L_p) を求めた。500 Hz の 1 oct. band における分析結果を、図 3 に示す。学年ユニットを比較すると、低学年ユニットが最も低く、次いで高、中の順となった。低高学年ユニットでは教室間にスペースが設けられていること、低学年ユニットでは教室の約半分に袖壁が設置されていることの効果とみられる。いずれのユニットでも 50 dB 台の値となっており、既往研究⁶⁾に示された OP 型教室における測定結果 (およそ 55～75 dB に分布) と比較すると低い値となった。家具の有無の条件間を比較すると、家具有りの方が約 3 dB 低く、既報²⁾とほぼ等しい値であった。中学年ユニットの OS 壁面の仕上げをベニヤと多孔質吸音材として測定した結果では、伝搬音が高い順にベニヤ>有孔板 (現状)>多孔質吸音材となり、現状との差はそれぞれ 1 dB 程度であった。既報²⁾では OS 壁面の吸音による伝搬音低減効果は約 4 dB と示されているが、今回設計に使われた有孔板による効果量は小さい。これは、有孔板の吸音率が低いことに加え、OS の凹凸があること、教室と OS との間に袖壁が設置されていることにより、教室間の伝搬経路上の壁による反射音成分が低減され、壁の吸音効果が小さくなったためと考えられる。

4. 意識調査

4.1 調査内容

教師アンケート及び児童アンケートは既往の研究⁶⁾を参考に作成した。また、2009 年に行われた POE 調査のアンケート結果と比較するため、一部のアンケート項目を既報⁷⁾に合わせた。

図2 音響伝搬特性の測定点

図3 音響伝搬特性の測定結果

*は図1を参照
**は多孔質吸音材

4.2 調査結果と考察

(1) 音環境に対する評価

図4に教師アンケートの結果を示す。「まわりの音が気になる」の評価が、「気になる」側に評価されている。気になる音として、「同じ階にあるまわりの教室からの音が気になる」との回答が多数みられた。また、「教室から出る音についてまわりの教室に気をつかう」の評価は、「気をつかう」側に評価された。既往研究⁶⁾と比較すると、今回の結果は音響設計がされている OP 型小学校 (M 小) と同程度の評価値であり、これは他の OP 型小学校に比べると好評価である。児童アンケートの結果 (図5) では、55%の児童が「まわりのクラスの音が気になることが非常によくある／よくある」と回答しており、教師同様、まわりの教室からの音を気にしている様子が示され、隣の教室からの伝搬音の影響がみられた。既往研究⁶⁾と比較すると、音響設計がされている OP 型小学校 (M 小) より、低い評価となった。これは、新築校舎を使用する以前は閉鎖型教室を使用していたため、閉鎖型の教室と比較して評価した児童が多かったことが原因と考えられる。

(2) 満足度に関する評価

児童アンケートによる「教室に対する満足／不満足」の回答結果を図6に示す。76%の児童が満足と回答しており、理由としては「明るい」、「教室、黒板が広い」、「きれい」などの記述が多数みられた。自由記述では「前の学校より～」と、閉鎖型教室と比較して回答している児童が多くみられた。不満足の原因としては、「音環境」についての回答が一番多かった。「隣の教室の音がうるさい」、「授業に集中できない」といった意見の他に、4、5年生からは「工事の音がうるさい」という記述がみられた。これは、アンケート実施時期に近隣で建設工事が行われていたことによる。

(3) 二年間の教室環境評価の比較

教室環境に関する評価結果の一部を既報⁷⁾と比較して図7に示す。評価傾向は類似しているものの、「静か／うるさい」という項目では、教師アンケート及び児童アンケートの5年生と6年生の結果で2009年より2010年の方が若干うるさい側に評価された。児童数の増加によりクラス数が増加し (2009年: 14クラス, 2010年: 17クラス),

空き教室が減ったことが一因と考えられる。6年生（2クラス）については、クラス数の関係から1年生（4クラス）と同じユニットの教室を使っており、1年生が音楽の授業を教室で行う様子も観察されたことから、うるさいと評価される要因となったと考えられる。

5. 音響数値解析

5.1 検討内容

小山小で採用された「OSの凹凸」、「袖壁」、「OS壁面の吸音」という伝搬音低減手法について、各手法の効果量と、複合した場合の総合的な効果量について把握するために、中学年ユニット（図1中の3-2、3-3及び対向するOS、3-2を音源室）を対象に数値解析により検討した。解析条件を表1に示す。条件4が設計条件である。条件1、4については、天井の吸音率を0.1～0.7まで0.1毎に変えた条件も検討した。また、天井の一部に吸音材を使用する場合に効果的な部位を調べるため、表2に示す天井吸音部位のパターンについて検討した。条件Eが設計条件である。吸音部位の吸音率は0.5、それ以外の天井の吸音率は0.1とした。

FDTD法を用いた数値解析では、オイラーの方程式と連続の式の空間及び時間に関する微分項を差分近似して解き、音響伝搬過程の各時刻における音圧と粒子速度を求める。本研究では、この数値解析手法を3次元空間に適用し、直交格子で対象音場を離散化した。空間離散化幅は0.05 m、時間離散化幅は0.08 msとした。境界条件については、局所作用性を仮定し、室内表面の材質ごとに所定の音響インピーダンスを設定した。初期条件として、インパルス音源を想定した音圧分布を与えた。解析結果については、床上1.2 mの平面内で0.5 mグリッドの格子点において、500 Hzのオクターブバンドの音圧暴露レベル分布図及び平均音圧暴露レベル（以下平均 L_{pE} と表記）を求めた。平均 L_{pE} の算出には、受音側室内の壁から0.5 m以上離れた6.0 m×6.0 mのエリア（詳しくは文献2）参照）を対象とし、その面内のグリッド上の点における L_{pE} を求め、それらのエネルギー平均値を求めた。解析時に設定した各部位の吸音率を表3に示す。以上の解析は、文献2）における方法を踏襲している。

表1 数値解析条件 *：設計条件

形状条件	OSの凹凸	袖壁	OS壁面吸音率 ³⁾
1	無	無	0.4
2	無	有	0.4
3	有	無	0.4
4*	有	有	0.4
5	有	有	0.1
6	有	有	0.9

表2 天井の吸音部位に関する解析条件 *：設計条件

吸音条件	天井吸音部位			吸音面積[m ²]	
	教室前半分	教室後半分	OS	条件1	条件4
A	—	—	—	0.0	0.0
B	—	○	—	60.5	60.5
C	○	○	—	120.5	120.5
D	—	—	○	60.7	97.3
E*	—	○	○	121.2	157.8
F	○	○	○	181.2	217.8

表3 仕上げ面の条件と想定した吸音率

建築部位	仕上げ材料	吸音率
壁	合板	0.1
床	フローリング	
天井(教室後ろ半分・OS)	特殊(有孔)石膏ボード	0.5
天井(教室前半分)	石膏ボード	0.1
OS壁面/袖壁	有孔板	0.4

図4 音環境に関する項目（教師アンケート）

図5 音環境に関する項目（児童アンケート）
「まわりのクラスの音が気になることがありますか」

図6 教室に対する満足/不満足（児童アンケート）

(a) 教師アンケート (b) 児童アンケート

図7 二年間の教室環境評価の比較

5.2 結果と考察

音圧暴露レベル分布図と平均 L_{pE} を図8に示す。図2の受音点近傍の数値解析結果（条件4）と実測結果を比較すると差は1～2 dBであり、ほぼ近い値が得られた。OSの凹凸の効果については、条件1,3の比較より、平均 L_{pE} で約9 dBの低減効果がみられた。伝搬過程を可視化した結果では、OSの凹凸により音源室窓面と対向するOS壁面間で音が往復反射し、OS壁面で反射して隣接教室へ入射する音が生じにくい様子がみられており、これにより大きな低減効果が生じたものと考えられる。袖壁の効果については条件1,2と3,4の比較により、約3 dBの低減量となった。OS壁面の吸音率を変

えた 3 条件の比較では、実測結果と同様に条件間（条件 4 と 5 及び条件 4 と 6）の差は各 1 dB 程度であった。OS の凹凸、袖壁、OS 壁面吸音が施された小山小の設計条件（条件 4）では、条件 1 に比べて約 13 dB の低減が確認された。

天井吸音率（0.1～0.7）を変化させた受音室の平均 L_{pE} の結果を図 9 に示す。条件 4 では設計条件（吸音率 0.5）の場合、吸音なし（吸音率 0.1）と比較すると、約 7 dB の差が確認された。吸音率による効果量は、既往研究²⁾と同様に、0.6 以上ではほとんど差がない結果となった。

天井吸音部位条件（表 2）の受音室の平均 L_{pE} の結果を図 10 に示す。条件 A～F を比較すると、低減量には最大で 8～10 dB 程度の差がみられた。教室の吸音部位を変えた A～C の比較では、条件 1 では 6 dB、条件 4 では 3 dB の差となっており、天井吸音による低減量は OS も含めた建築条件によって異なることが示唆された。一般的には、吸音面積が増えると低減量が大きくなる傾向がみられたが、条件 4 で C と D を比較すると吸音面積が少ない D（OS 吸音）の方が C（教室吸音）よりも低減量が大きかった。ただし、条件 1 の場合には C（教室吸音）の方が D（OS 吸音）よりも低減量が大きく、教室と OS のどちらの吸音の効果量が大きいかは一概には言えない結果となった。

6. まとめ

建築音響性能の測定結果からは、複数の伝搬音低減措置が採用されたことによって、既往研究に示された OP 型教室に比べて教室間の伝搬音が低い値となっていることが確認された。意識調査からは、広さや明るさなどに対する高評価の一方で、音が気になる程度の評価結果や、教室に対する不満評価の理由には音環境が多くあげられたことから、音響面の課題は解消していないことが窺えた。

数値解析結果からは、今回採用された伝搬音低減措置による低減量は、OS の平面形状の凹凸により約 9 dB、袖壁により約 3 dB、天井吸音により約 7 dB、OS 壁面の吸音により約 1 dB であり、合計で約 20 dB と大幅な低減量が得られていること、OS の凹凸、天井吸音の順に効果が高いことが示された。

謝辞

調査にあたりご協力を頂いた首都大学東京の上野淳教授、佐藤総合計画の長井厚氏、小山小の校長をはじめ教職員・児童の皆様、に謝意を表します。また、数値解析についてご指導頂いた東京大学生産技術研究所坂本慎一准教授及び坂本研究室の皆様、現地調査を担当した明治大学卒論生（H22 年度）田中梨恵氏に感謝いたします。

注

- 1) 教室は図 1 中左側の壁面に固定黒板が取付けられており、方向性は左が前、右が後ろとなっている。
- 2) 中心周波数 500 Hz の 1 Oct. Band 帯域の値を示す。
- 3) 材料の設置部位（数値解析においては吸音率の設定部位）は、図 1 中に示した吸音壁のうち、3-3 に対向する部分（幅 3.5 m × 高さ 2.6 m）とした。

参考文献

- 1) 福山忠雄，土屋裕造，井上勝夫，山崎芳男：学校教室の音環境の実態と模型実験による教室間遮音の検討，日本音響学会建築音響研究会資料 AA2001-36，2001
- 2) 中島章博，上野佳奈子，坂本慎一，橋秀樹：オープンプラン教室配置における音響伝搬特性の検討，日本建築学会環境系論文集，No.626，pp.415-422，2008.4
- 3) 大森恵，杉野潔，近藤靖史：オープンプラン型教室の音環境改善のための遮音・吸音方法の検討，日本建築学会技術報告集第 15 巻，pp.779-784，2009.10
- 4) 日本建築学会：学校施設の音環境保全基準・設計指針，丸善，2008
- 5) 長井厚，八木真爾，上野淳：学齢段階に応じたユニットプランによるオープンプラン小学校ー流山市立小山小学校の試みー，日本建築学会建築デザイン発表梗概集，pp.226-227，2010.7
- 6) 上野佳奈子，橋本都子，倉斗綾子：オープンプラン小学校の音環境に関する研究ー本町小学校・打瀬小学校・美浜打瀬小学校の実態調査ー，日本建築学会環境系論文集，第 74 巻，pp.1033-1041，2009.9
- 7) 平岡祐樹，上野淳：学齢段階に応じたユニットプランによるオープンプラン小学校の POE 研究ー流山市立小山小学校のケーススタディー，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.455-456，2010.9

[2012 年 2 月 19 日原稿受理 2012 年 4 月 3 日採用決定]