オープンプラン教室配置における音響伝搬特性の検討

STUDY ON REDUCTION OF SOUND PROPAGATION BETWEEN OPEN-TYPE CLASSROOMS

中島章博^{*1}, 上野佳奈子^{*2}, 坂本慎一^{*3}, 橘秀樹^{*4}Akihiro NAKAJIMA, Kanako UENO, Shinichi SAKAMOTO
and Hideki TACHIBANA

In Japan, “open-plan” type classroom is becoming popular in elementary schools. Although this planning has various merits for educational activities, sound propagation between adjacent classrooms tends to be a serious acoustical problem. In this study, therefore, the sound propagation between closely located two classrooms connected by an open-space was investigated by numerical simulation using FDTD method. In the simulation, two classrooms and the open-space connecting them were modeled and the configuration of the rooms and sound absorption treatment on the room boundaries were examined. As a result, it has been found that sound absorption treatment on the ceiling and architectural/acoustic treatment for the wall of the open-space which makes mirror-reflection are effective to mitigate the sound propagation between the classrooms.

Keywords : Classroom acoustics, Open-plan classrooms, Sound propagation property, Numerical analysis, FDTD method

学校音響, オープンプラン教室, 音響伝搬特性, 数値解析, FDTD 法

1. まえがき

近年、わが国の小学校では、明治以来学校建築の定型となってきた片廊下型平面に代わって、オープンプラン(以下 OP)教室配置が採用されるケースが増えている^{1),2)}。OP 教室は、空間の連続性や開放性が特徴で、チームティーチングや学年一斉授業などさまざまな学習形態に対応した活動を展開することができる。その一方で、教室どうしが壁を隔てずオープンスペース(以下 OS)を介して空間的につながっているために教室間の遮音性能が低く、隣接教室からの伝搬音が学習活動の妨害となることがある^{3),4)}。この問題に関して、青木ら³⁾や井上ら⁵⁾は、OP 小学校における運用状況の調査を行っており、OP 教室を効果的に活用するためには隣接教室を考慮した時間割を組むなど、OP 教室配置にふさわしい運用を行うことによって音の問題を回避するという運用面での工夫が重要であること、それと同時に、教室間の伝搬音を低減するための音響設計の重要性を指摘している。

学校施設の音環境については、日本建築学会からいわゆるアカデミックスタンダードとして「学校施設の音環境保全基準」⁶⁾の発行が予定されており、普通教室間の遮音性能としては D-30 が推奨値として示されている。しかし、OP 教室でこの遮音性能を満足することはほぼ不可能であり、OP 小学校にそのまま適用することはできない。OP 教室の音響特性に関しては、青木ら³⁾、井上ら⁷⁾、福山ら⁸⁾、中島ら⁹⁾が実測や模型を用いた教室間遮音性能の検討を行っ

ている。これらの測定および実験から、隣接教室からの伝搬音は音響的対策をとっていない教室では非常に大きく、また教室配置や天井および壁面の吸音処理により音の伝搬のしかたに差があることが示されている。したがって、教室配置の工夫や適切な吸音処理を行うことが重要であり、そのためには、実際の設計に応用可能な設計法や有効な対策について、建築的手法と音響性能の関係を定量的に示す設計資料の整備が必要である。

筆者らは、室内音場での音響過渡現象を把握するうえで優れた数値解析手法である FDTD 法(時間領域有限差分法)¹⁰⁾を教室空間の解析に応用し、さまざまな条件で教室間の音の伝搬特性を解析することによって建築的要素と伝搬音の低減との関係を把握し、音響設計に役立つ知見を探ってきた^{11)~13)}。本報では、これらの検討結果をまとめて報告する。その内容としては、まず、この数値解析手法の有効性を確認するため、実測結果と数値解析による結果を比較した。つぎに、隣接教室に伝搬する音の経路に着目し、代表的な教室配置や内装仕上げ等の音響設計要素の各種条件について検討を行った。また、実際の運用時には家具類が設置されることも考慮し、その影響について数値解析および実測調査による検討を行った。

2. 検討方法

2.1 数値解析手法の概要

音響における FDTD 法¹⁰⁾では、音波の挙動を記述する時間領域の

*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 大学院生

*2 東京大学生産技術研究所 助教・博士(工学)

*3 東京大学生産技術研究所 准教授・博士(工学)

*4 千葉工業大学 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture, Graduate School of Eng., Univ. of Tokyo
Research Assoc., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.
Prof., Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

図1 境界面の近似表現

図2 インパルス音源の形状

図4 平均音圧暴露レベル算出に用いた受音点

図3 高さ 1.2 m の平面におけるインパルス音の伝搬の様子（図中の時刻はインパルス音源放射後の経過時間）
境界面吸音率 0.1

微分方程式であるオイラーの方程式と連続の式の空間および時間に関する微分項を差分近似して解くことにより、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ことができる。本報では、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。室の境界面形状が直交格子に一致しない場合には、図 1 に示すように境界面を折れ線近似する方法を適用した。空間格子の寸法は対象とする音波の波長に対して 1/10 程度の大きさに十分小さくする必要があり、本研究では中心周波数 500 Hz のオクターブバンドまでを計算対象としているので、その上限周波数 707 Hz の波長が 0.48 mであることを考慮して空間離散化幅を 0.05 m とした。また、時間離散化幅は 0.08 ms とした。

境界条件については、次式で表される局所作用性を仮定し、室内表面の部位ごとに所定の音響インピーダンスを設定した。

$$u_n|_{\text{boundary}} = \frac{p}{Z_n} \quad (1)$$

ここで $u_n|_{\text{boundary}}$ は、境界上における垂直方向の粒子速度、 p は音圧、 Z_n は境界上法線方向音響インピーダンスである。なお、本研究における解析では、境界上の音響インピーダンスについて実数項のみで近似することとし、部位ごとに設定した吸音率から次式によって音響インピーダンスを計算した。

$$Z_n = \rho c \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_n}}{1 - \sqrt{1 - \alpha_n}} \quad (2)$$

ただし、 α_n は垂直入射吸音率。

初期条件としては、インパルス音源として所定の音源点に次式で表される余弦波形状をもつなめらかな音圧分布(図 2)を与えた。

$$p(r) = \begin{cases} 1 + \cos \pi \frac{r}{10\Delta h} & (r < 10\Delta h) \\ 0 & (r > 10\Delta h) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 r は音源点からの距離、 Δh は空間離散化幅であり、今回の解析では $\Delta h = 0.05$ m としている。上記の条件による音源がもつスペクトル特性は、約 1.2 kHz で最初のディップが生じる周波数特性となっているが、500 Hz のオクターブバンドの周波数帯域で十分なエネルギーを有している。

2.2 解析結果の表示方法

以上の方法で求められた 3 次元の解析結果を可視化するために、対象とする空間の床上 1.2 m の平面内の受音点におけるインパルス応答を出力し、その平面上における音の伝搬の様子および音圧暴露レベルの分布を以下のように表現した。

1) 過渡応答アニメーション

0.05 m の空間グリッドにおける音圧を 0.8 ms ごとに色の濃淡で表現し、アニメーションとして可視化した。標準的な OP 教室配置をモデルとし、音源から放射されたインパルス音の音波伝搬過程をスナップショットで表した例を図 3 に示す。これをアニメーションで観察すると、時間経過に伴う音波の伝搬、反射や回折などの様子が

視覚的に確認できるため、この方法によって各建築部位の寄与が直感的・客観的に把握できる。図3中、インパルス音の放射後24 msの時点では回折音が隣接教室に入射し、36 msの時点ではOS壁面で音波が反射し、60 msの時点ではその音波が隣接教室に入射する様子が見られる。

2) 音圧暴露レベルの空間分布

床上1.2 mの平面内で0.5 mグリッドの格子点ごとに中心周波数500 Hzの1オクターブバンドのインパルス応答の2乗積分値を求めることによって音圧暴露レベル(以下 L_{pE})を算出し、その分布を色の濃淡で図示した(図8, 16)。

3) 受信側室内における平均音圧暴露レベル

受信側室内の壁から0.5 m以上離れた6.0 m×6.0 m(床上1.2 m)のエリアを対象とし、その面内の1.0 mグリッド上の点(図4)における L_{pE} を求め、それらのエネルギー平均値(平均音圧暴露レベル、以下平均 L_{pE})を求めた。その値の表示のしかたとしては、インパルス音源のオクターブバンドあたりの音響エネルギーレベルを100 dBとしたときの各受信点における音圧暴露レベル(L_{pE})を用いた。

過渡応答アニメーションは隣接教室への音波の伝搬における各建築部位の寄与を把握しやすい一方で、定常状態の音圧レベルを知る

ことはできない。そこで、定常状態の音圧レベルを示すために音圧暴露レベルの空間分布を用い、さらに検討条件間の差異を定量的に比較するために受信側室内における平均音圧暴露レベルを求めた。

なお、本研究における数値解析ではインパルス音源による過渡応答を計算しているため、音源の音響放射量については音響エネルギーレベル(L_e)、各受信点における音圧暴露については音響暴露レベル(L_{pE})を用いているが、これらは、バンドノイズなどの定常音源を用いたときの音源の音響パワーレベル(L_w)、受信点における音圧レベル(L_p)にそれぞれ対応している。特に記述のない限り、以下では500 Hzを中心周波数とする1オクターブバンドにおける結果を表すものとする。

2.3 数値解析と実測との対応

以上に述べた方法による数値解析の有効性を確認するために、実在するオープンプラン教室をモデル化して解析した結果と実測結果との比較を行った。検討の対象とした教室配置及び測定点の位置を図5に示す。実測では、音源室内の床上1.5 mの点に無指向性音源として12面体スピーカ(TS-12S)を設置し、ホワイトノイズを放射した。受信には、無指向性マイクロホンを用い、床上1.2 mの点に設置した。測定結果は、音源のパワーレベルを1オクターブバンドご

図5 測定対象校の教室配置および測定点

表1 仕上面の条件と想定した吸音率

建築部位	仕上材料	設定した吸音率
天井	岩面吸音板	0.4
壁	石膏ボード	0.1
床	フローリング	0.1

図6 実測と解析結果の比較

図7 数値解析の検討条件(教室の平面配置)

図 8 音圧暴露レベル(L_{pE})分布図(高さ 1.2 m) (教室の平面配置)

図 9 教室間の距離の差に関する平均 L_{pE} の結果

図 10 オープンスペースの幅の差に関する平均 L_{pE} の結果

とに 100 dB としたときの音圧レベル(以下 L_p)に換算して表示した。対象とした教室の室内仕上げの条件および数値解析で設定した各面の吸音率を表 1 に示す。

各受音点における実測値 L_p および計算値 L_{pE} を図 6 に示す。両者は、すべての点でほぼ一致した結果となっている。したがって、本数値解析法は、オープン教室配置の音響伝搬特性の把握、およびその低減方法を検討する上で有効であると言える。

3. 教室間の音響伝搬の低減方法に関する検討

図 3 に示す数値解析の結果を見ると、OP 教室配置における隣接教室間の音の伝搬では、36 ms 以降に見られる OS の壁面による反射音、24 ms, 36 ms に見られる二つの教室を隔てる壁面の端部における回折音という二つの成分が隣室への音波の伝搬に大きく寄与していることがわかる。そこで、OP 教室配置における隣接 2 教室間の音の伝搬を低減させる方法として、上記二つの成分の低減手法を含めた以下の 5 項目について検討を行った。

- 1) 教室の平面配置の方法
- 2) 天井の吸音と形状変化
- 3) 回折音低減のための工夫
- 4) オープンスペース壁面の工夫
- 5) 家具設置による効果

この検討で対象とした教室配置のバリエーションを図 7 に示す。

そのうち、(A)は典型的な並列型 OP 教室で、これを基本として、(B) 二教室を離れた場合、(C) OS の奥行きを広げた場合、および (D) 教室を雁行配置とした場合の効果を調べた。なお、計算における境界条件としては、天井の吸音率を 0.8、壁・床の吸音率を 0.1 とした。また音源は床上 1.5 m に設定した。

3.1 教室の平面配置

3.1.1 教室間の距離

隣接二教室を離すことによる効果を調べるために、図 7 の(A)を基本条件(0 m)として(B)に示すように教室間の距離を 4 m, 6 m, 8 m と段階的に大きくしたときの隣室への伝搬音の変化を調べた。その結果として、教室間距離 0 m と 8 m の場合の音圧暴露レベル分布を図 8(A)と(B)に比較して示す。また各条件における受音側室内の平均 L_{pE} を図 9 に示す。これらの結果から、隣接教室間の距離を大きくしても、伝搬音の低減効果は基本条件と比較して差が小さいことが分かる。これは、OS 壁面における反射の影響がいずれの条件でもほとんど変化がないためである。

3.1.2 オープンスペースの奥行き

OS の幅の効果を調べるために、図 7(C)に示すように、OS の奥行きを 4 m, 6 m(基本条件)、8 m の 3 段階に変化させて検討を行った。その結果として、まず L_{pE} の分布の変化を図 8 の(A), (C-1), (C-2)に示す。また受音側室内の平均 L_{pE} を比較して図 10 に示す。これらの結果から、OS の奥行きを大きくすることによって、受音側室内への

伝搬音を低減できることが確かめられた。

3.1.3 雁行配置

図 7(D)に示す雁行型の教室配置についても、同様の検討を行った。まず L_{pE} の分布の計算結果として図 8 の(A)と(D)を比較すると、後者の場合に受音側室内のレベルが低くなっている様子が見られ、両条件における受音側室内の平均 L_{pE} の差は 3.8 dB となっている。このことから、雁行配置は伝搬音の低減に効果的であると言える。

3.2 天井の吸音と形状

教室に限らず一般に天井の吸音処理は残響抑制および騒音伝搬の低減の上で重要である。そこで、天井を吸音処理した場合、さらに天井の高さ・形状を変化させた場合の隣接教室への伝搬音の低減効果について、図 11 に示す条件を設定して検討を行った。

3.2.1 天井仕上げの吸音率

天井吸音の効果を確認するために、図 11 に示す教室配置(図 7(A)の基本形と同じで天井高は 3 m)において、天井の吸音率を 0.1 から 0.8 まで変化させて受音側室内の平均 L_{pE} を比較した。その結果を図 12 に示すが、天井面の吸音率が高くなるにつれて受音室の平均 L_{pE} が減少する傾向が明らかで、吸音率が 0.1 の場合に比べて 0.6 以上の条件では約 7 dB の差が見られる。この結果から、天井の吸音処理は教室間の音の伝搬を低減させるためにきわめて効果的であることが確認された。ただし、吸音率が 0.6 以上では平均 L_{pE} にほとんど差がみられない。これは、伝搬音の音圧レベルには吸音率の対数が関係するためと考えられる。この結果から、隣接教室間の音の伝搬を低減するためには、天井面の吸音率が 0.6 以上となるような仕上げとすることが有効であると言える。

3.2.2 天井高

平成 17 年の建築基準法改正によって教室の天井高の最低基準が 3 m から 2.1 m に引き下げられ、天井高について設計の自由度が広がった。そこで、天井高の違いによる伝搬音の変化について検討を行

った。計算条件としては、図 11(F)に示す(F-1, F-2, F-3, F-4)の 4 種類を設定した。その結果を図 13 に示すが、(F-1)と(F-2)を比較すると両者の平均 L_{pE} の差は約 2.1 dB であり、天井高を低くすることで伝搬音が低減した。また、OS の天井高を低くした条件(F-3)と教室の天井高を低くした条件(F-4)を比較すると、(F-4)の方が約 0.7 dB 小さくなっているが、その差はわずかである。

3.2.3 天井形状

木造校舎では、教室の天井を傾斜させている事例がよく見られる。そこで、このような傾斜した天井をもつ OP 小学校をモデル化し、図 11 の(G)に示す 4 条件を設定し、天井の吸音処理の効果も含めて検討した。その結果を図 13 に示すが、天井を吸音処理した条件(G-2, G-4)を比較すると両者の平均 L_{pE} の差は 0.4 dB とわずかである。また、天井を吸音処理していない条件(G-1, G-3)の平均 L_{pE} を比較すると、(G-3)の場合に 1.2 dB 低くなっているが、その差はわずかである。この結果から、天井の傾斜の影響はそれほど大きくないと言える。しかし、条件(G-1)と(G-2)、(G-3)と(G-4)の結果の差が示すとおり、天井の吸音処理の有無の差はきわめて大きい。

3.3 回折音低減のための工夫

つぎに、回折による隣接教室間の音の伝搬を低減するための工夫として、図 14 に示すような T 字型と Y 字型の 2 種類の隔壁の形状を設定し、その効果を検討した。

3.3.1 T 字型

図 14 の(H)に示すように隔壁を T 字型とし、袖壁の長さを 3 段階に変化させた場合(H-1, H-2, H-3)の伝搬音の違いを検討した。その結果として、図 15 に受音室における平均 L_{pE} の計算結果を示すが、袖壁が長いほど、伝搬音が若干低減する傾向がみられる。

3.3.2 Y 字型

図 14(I)に示す三条件について、図 15 に平均 L_{pE} の結果を示すが、T 字型と同様、壁面が長いほど伝搬音の低減量が増す傾向がみられ

図 11 天井の吸音と形状変化に関する検討条件

図 12 天井吸音率の差異の平均 L_{pE}

図 13 天井高および天井形状条件の平均 L_{pE}

●: 音源点 □: 平均音圧暴露レベルを求めた範囲 ※図中数字の単位はmm
 ・天井高はすべて3000 ・各条件の境界面吸音率はすべて基本条件と同じ設定とした

図 14 検討条件(条件 H, I)

図 15 平均 L_{pE} の結果(条件 H-L)

図 18 基本条件(A), デン(K-2)の音響伝搬の様子 (高さ 1.2 m)

図 16 条件 H, I, J の L_{pE} 分布図 (高さ 1.2 m)

●: 音源点 □: 平均音圧暴露レベルを求めた範囲
 ・OS壁面以外の平面形状, 天井高は基本条件に同じ
 ・壁面、床面: $\alpha = 0.1$, 天井面: $\alpha = 0.8$
 ※図中数字の単位はmm

図 17 検討条件(条件 J, K, L)

る。また、Y 字型では、T 字型の結果と比較して効果が大きい。この結果を音圧暴露レベル分布として図 16(H-3)および(I-3)に示すが、この図からも効果の差が確認できる。

3.4 オープンスペース壁面の工夫

OS 壁面における鏡面反射音が隣接教室間の音の伝搬に大きく寄与しているため、この鏡面反射音を低減するため方法として、図 17 に示すように吸音処理および形状に変化をつけた場合の効果を検討した。

3.4.1 壁面吸音

OS 空間の機能上、壁面全体を吸音処理することは難しい。そこで、図 17 の(J-1), (J-2)に示すように吸音部位を壁面全体の半分に限定した 2 条件を設定した。これらのうち(J-1)は二つの教室の境壁が直面する部位を吸音面とした条件、(J-2)はその逆の条件である。こ

れらの条件に対する計算結果を図 15, 16 に示す。両条件の結果を比較すると、(J-1)の方が (J-2) より伝搬音のレベルは 2.2 dB ほど低下しており、この差は図 16 でも明らかである。これは、条件(J-1)では鏡面反射が最も強くなる面が吸音面となっているためである。

3.4.2 デン

児童の交流、休息スペースとして OS の壁に凹み(デン)を設けることがある。このような壁面の変化の効果を調べるために、図 17 の(K-1), (K-2)に示す形態について検討を行った。その結果として、受音側教室にける平均 L_{pE} を図 15 に示す。これらの結果を基本条件(A)の場合と比較すると、条件(K-1)では 3.2 dB、条件(K-2)では 5.5 dB の伝搬音の低減効果が見られる。この結果は、図 18 に見られるようにデンの部分で音が音源側教室の方向に反射され、受音側教室に伝搬しにくくなるためである。

(M-1)：家具なし

(M-2)：OS に備え付けの家具あり (M-3)：開校後（家具、荷物あり）

図 19 測定対象校の各種条件内観写真

図 21 測定対象校の概要

図 20 数値解析モデル概要

図 22 家具の配置の差異に関する実測結果

3.4.3 OS 壁面の傾斜

OS 壁面の反射の方向を変える方法として、その面を傾斜させることも考えられる。その場合、外転びにすることにより反射音が吸音処理された天井で吸音される。この効果を調べるために、図 17 の(L)に示すように OS 壁面を 5 度および 10 度外転びとした条件について検討を行った。平均 L_{pE} の計算結果を図 15 に示す。これを見ると、基本条件に対して 5 度傾斜の条件(L-1)ではほとんど効果は認められないが、10 度傾斜の条件(L-2)では、基本条件に対して 4.4 dB の低減効果が見られた。

3.5 家具類の影響

図 19 の (M-3)に見られるように、教室が実際に使われる状況では、家具類や児童の荷物が OS に置かれる。そこで、これらが音の伝搬にどの程度影響するかを知るために、実在の教室配置をモデル化し、図 20 に示すように家具および児童の荷物（図中、丸で囲んだ部分）の有・無の 2 条件について解析を行った。家具および児童の荷物は、図 19(M-2)の右側に写っているランドセル入れ、(M-3)の右側に写っている荷物をそれぞれ直方体としてモデル化し、吸音率は家具を 0.1、荷物を 0.8 と設定した。その結果、受音側教室内の平均 L_{pE} は家具類なしの条件で 67.1 dB、家具類ありの条件で 61.7 dB となっており、家具類を設置することによって 5.6 dB の低減効果が認められた。

上記の数値解析の結果を確認するため、モデル化の対象とした新築小学校において、開校前後で家具類の設置の状況が異なる 3 条件 (M-1: 教室・OS とともに家具類なし、M-2: OS のみに備え付けの家具あり、M-3: 使用過程で児童の荷物などもある状態) について、2.3 と同様の方法で実測を行った。測定時の OS の状況を図 19 に、教室配置と測定点位置を図 21 に、測定結果を図 22 に示す。図中に示す受音側教室内の平均音圧レベル L_p の値は、定常音源の各オクターブバンドの音響パワーレベルを 100 dB としたときのレベルで表示した。測定結果を図 22 に示すが、この結果を見ると、家具や児童の荷物が増えるほど、隣室への伝搬音が低減する傾向が明らかに認

められる。500 Hz のオクターブバンドの結果を見ると、家具類の設置による伝搬音の低減効果は上述の数値計算の結果とほぼ同様となっている。

4. まとめ

オープンプラン教室では複数の教室が空間的に連続しているので音の伝搬は避けられず、これを緩和するための建築的工夫が必要である。本報では、そのための基礎資料を得るために FDTD 法による数値解析および実測調査によって検討した。その結果を取りまとめると以下のとおりである。

(1) 教室の配置

OP 教室が並列に配置されている場合、教室間の距離を大きくするだけでは伝搬音の低減効果はあまり期待できない。これは、OS 壁面で鏡面反射される音の寄与が大きいためである。

教室の雁行配置は、通常の並列配置に比べて音の伝搬は小さくなる。ただし、そのためには OS の面積が大きくなる。

(2) OS の奥行き

隣接教室間の音の伝搬を緩和するためには、OS の奥行きを大きくすることが効果的である。

(3) 天井面の吸音処理

天井面を吸音処理することは、室内の残響を抑制するだけでなく、教室間の音の伝搬の低減にもきわめて効果的である。そのためには、仕上げ面の吸音率としては、中音域で 0.6 以上とすることが望ましい。

(4) 天井の高さ

天井高の違いによる教室間の音の伝搬の変化に関して、高さ 3 m と 2.4 m の条件の違いについて検討した結果、天井高が低いほうが教室の音の伝搬が緩和されることがわかった。

(5) 教室間の隔壁の形状

隣接教室間の隔壁の先端断面を T 字型および Y 字型にすることに

より、回折伝搬を低減することができる。その程度は、T字型に比べてY字型の方が大きい。

(6) OS 壁面の処理

OS の壁面は隣接教室間の音の伝搬に対する寄与が大きいので、この部分を吸音処理する、あるいはデンなどを設けて形状を変化させることによって、かなりの程度の伝搬音の低減が期待できる。

(7) 家具類の効果

教室および OS に置かれる家具類は、教室間の音の伝搬に対する低減要素となる。さらに、吸音性の高い体操着などの児童の荷物の設置場所を工夫することにより、音の伝搬を低減する要素として利用することができる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、学校建築の実設計および運用面における問題点についてご議論いただいた CA 社の小嶋一浩氏、赤松佳珠子氏、光本直人氏、大鹿智哉氏に謝意を表します。また、実測調査にご協力いただいた小学校関係者各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 長倉康彦：「開かれた学校」の計画，彰国社，1993
- 2) 上野淳：未来の学校建築 教育改革をささえる空間づくり，岩波書店，1999
- 3) 青木亜美，上野佳奈子，橘秀樹：音環境に着目したオープンプラン小学校の実態調査に基づく研究，日本建築学会計画系論文集 No.562, pp. 1-8, 2002.12

- 4) 橋本都子，倉斗綾子，宗方淳，丹沢広行，上野淳：学校教室の印象および環境評価の実態－首都圏の小・中・高等学校の児童・生徒を対象としたアンケート調査結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 E-1, pp. 1121-1122, 2006.9
- 5) 井上勝夫，富田隆太：オープンプラン型小学校における音環境の実態と教師・児童の意識，日本建築学会環境系論文集 No.576, pp. 1-8, 2004.2
- 6) 福地智子，上野佳奈子，井上諭，内田匡哉，佐久間哲哉，土屋裕造，矢入幹記，渡辺充敏：日本建築学会環境工学委員会研究会「学校施設の音環境保全規準」資料，2004
- 7) 井上勝夫，橋本修，富田隆太，福山忠雄：オープン型小学校における音環境の実態と評価，日本音響学会建築音響研究会資料 AA2001-35, 2001
- 8) 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
- 9) 中島章博，上野佳奈子，坂本慎一，橘秀樹：新設小学校の音響性能に関するケーススタディ，日本音響学会建築音響研究会資料 AA2006-29, 2006
- 10) Shinichi Sakamoto, Yasuhiro Tokita and Hideki Tachibana : Calculation of impulse responses of rooms by using of the finite difference method, Proc. of ASA and ASJ Third Joint Meeting, pp. 1307-1310, 1996
- 11) 中島章博，上野佳奈子，坂本慎一，横田考俊，橘秀樹：FDTD 解析に基づくオープンプラン型教室の音響設計，日本音響学会建築音響研究会資料 AA2005-36, 2005
- 12) Akihiro Nakajima, Kanako Ueno, Takatoshi Yokota, Shinichi Sakamoto and Hideki Tachibana : Study on sound transmission between open-type classrooms by numerical analysis, Acoustical Science and Technology Vol. 26 No. 6, pp. 537-539, 2005
- 13) Akihiro Nakajima, Kanako Ueno, Shinichi Sakamoto, Hideki Tachibana : Numerical analysis of sound propagation between open-type classrooms, Inter-noise 2006 No.775, 2006

(2007年9月10日原稿受理，2008年1月15日採用決定)