

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04370

研究課題名(和文)新生活様式における建築音環境改善手法の研究

研究課題名(英文)Challenges in improvement of acoustic environment in buildings in 'new lifestyle'

研究代表者

阪上 公博(Sakagami, Kimihiro)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：90231331

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、以下の課題について研究を行ない、成果を得た。(1)MPPを付加したパーティションの音響特性に関する研究：孔のない単一板の両側にMPP(微細穿孔板)を付加したパーティションを提案し、その遮音性能および吸音性能を詳細に考察した結果、MPPによる共鳴透過のため遮音性を低下させて、会話の障害を緩和できる可能性を示した。また吸音性による効果を、理論解析、数値シミュレーション及び実装実験により検証した。(2)自然換気性を有するプレナムドアの提案：開口を有する2重構造であるプレナム構造を応用したドアを提案し、その遮音性能とパラメータの影響を試作実験及び数値シミュレーションにより明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

COVID-19流行後の新生活様式における、建築音環境の問題のうち、(1)吸音不足の改善、(2)パーティションの遮音・吸音性能の調整、(3)自然換気機能を有する遮音構造の提案について検討を行った。(1)(2)については、MPPを付加したパーティションにより、室内の吸音不足の改善、遮音性能の調整による音声コミュニケーションの改善などが期待できることが示された。また(3)については、プレナム構造のドアへの適用により、自然換気機能を有する遮音構造が得られることが明らかになった。これらは、いずれも新生活様式との関連が深い、広く一般的な建築音環境における課題として、今後さらに有用となりうる成果である。

研究成果の概要(英文)：In this study, the following issues were studied and results obtained. (1) Study on the Acoustic Characteristics of Partitions with Micro-Perforated Panels (MPP): We propose a partition with MPP (Micro-Perforated Panels) attached to both sides of a solid panel without perforations. Detailed analysis of its sound insulation performance and sound absorption performance showed the potential to reduce sound insulation due to resonant transmission by MPP, thereby mitigating conversation interference. The effect of sound absorption was verified through theoretical analysis, numerical simulation, and implementation experiments. (2) Proposal of a plenum door with natural ventilation: We propose a door using a plenum structure, which is a double structure with openings, and clarify its sound insulation performance and the effects of parameters through prototype experiments and numerical simulations.

研究分野：建築環境音響学

キーワード：建築音環境 新生活様式 COVID-19 MPP 自然換気機能 プレナムドア パーティション

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 新生活様式による環境の変化

COVID-19 感染症の流行に伴い、その感染拡大を防止するため、さまざまな生活様式の変化が生じた。その最も顕著なものは、ソーシャルディスタンスであった。これは、人と人の距離を離すことで、感染リスクの低減を狙ったものである。具体的には、飲食店や会議室、ホールなどの人が集まる施設では定員を減らすなどの方策によって、人と人の距離を保つような運用が行われた。また、新生活様式においては、飛沫感染の防止のためにアクリル等によるパーティションを設置して飛沫の拡散を防いだり、ドアの開放などによる換気の促進が広く見られた。このような生活様式の変化によって、人の生活環境にはかなりの変化が見られた。

(2) 新生活様式の音環境への影響

これらの新生活様式は、当然のことながら音環境にも影響を与えていた。ここでは、特に顕著であったものを列挙しておく。

(a) ソーシャルディスタンスと残響過多

建築室内空間では、ソーシャルディスタンス確保のための収容人員の減少によって、空間内の吸音力不足が生じることになる。したがって、いろいろな建築室内空間において、残響過多が生じることになる。これは、COVID-19 感染症流行下においてしばしば生じていた問題であり、例えば無観客収録の番組などで、過剰な残響が聞かれたことも多かった。また、コンサートホールや劇場でも、観客の収容定員を減員していたため、残響過多に基づくさまざまな室内音響の問題が生じていたと思われる。残響過多の問題は、音響設計が不十分な建物では COVID-19 感染症流行以前からしばしば見られたものであり、その点からも建築音環境における重要な問題の一つであると言える。

(b) パーティションによる会話の障害

飲食店や会議室を中心に、主として透明アクリル製の卓上パーティションが設置された。飛沫感染を防ぐのが目的である。透明なものが多かったのは、コミュニケーションをある程度保つ目的であるが、音声の伝達にはパーティションの遮音性により障害が起こっていた。また、アクリルの反射性のため、発した声が発話者に返ってきて話しにくい、他の席の人に聞こえるなどの問題もあった。また、商店のカウンターにおいても、透明な塩化ビニールなどを用いた簡易な飛沫感染防止用パーティションが使われていたが、これも会話の障害となった。これらに対しては、通常とは逆であるが、ある程度遮音性能を低くすることが求められるため、そのような研究もおこなわれた。

(3) 流動的な状況

以上のように、新生活様式による音環境への影響は、さまざまな形で表れていたと考えられる。したがって、それぞれに対して改善のためのアプローチが求められる状況であった。しかし、ここで問題となるのは、新生活様式がどの程度の期間にわたって持続するものかが不明であったことである。上述の問題点のうち、まずソーシャルディスタンスについては、当時と比べて現在(2024年)においては、従来のように戻っているものも多い。例えば、ホールや集会室・会議室など、各種建築空間の利用者定員は、ほぼ COVID-19 感染症流行の前と同じに戻っているものがほとんどである。パーティションについても、現在は飲食店で見られることは非常に少ない。商店のカウンターにもあまり見られなくなっている。このように、数年のうちに変化することを考えると、研究当初においても、不可逆的な改善策を取ることは適切ではないと考えられる状況であった。したがって、比較的軽便な方法で、かつ柔軟なデザインとすることが望まれていたと言える。

2. 研究の目的

以上の研究当初の背景を踏まえ、吸音不足対策をターゲットとした空間吸音体の研究と、パーティションの吸音性能の向上を目的としたが、その後の社会的状況と、COVID-19 感染症流行状況の推移を考えて、より長期的に有効性の高い知見を得ることを目標として、以下の2点を目的として研究を進めることとした。なお、空間吸音体の利用によって、ソーシャルディスタンスのため室内の利用人数を制限したことによる残響過多を解決する問題については、昨今の社会状況からこの問題の重要性が低下していることを鑑みて、実施しない方針とした。

(1) MPP を付加したパーティションの音響特性の検討

パーティションの音響特性の検討としては、当初は飛沫感染防止用の卓上パーティションを想定していたが、それ以外にも一般的にパーティションは広く用いられていることは言うまでもない。特に、COVID-19 感染症の流行以降、一般のオフィスなどにおいても広くパーティションが使われるようになったことを考えると、パーティションの音響特性についての検討は、広く有用な知見になるものと考え、以下の2つの方向性で検討を行った。

(a)付加した MPP による吸音効果の検討

筆者は、当研究課題開始前の 2020 年に、MPP を付加したアクリル製卓上パーティションを、飛沫感染防止用として提案・開発している[1]。これは、図 1 のように孔のないアクリル板を、2 枚の MPP で両面から挟んだ 3 重構造によるものであり、パーティションを挟んで両側の発話者が、自分の声の反射によって話しにくくなることと、反射によって他の席へ伝わることを避けることを目的として開発したものである。開発段階では、理論計算と、残響室法吸音率測定によってその吸音性能を検討してきたが、本研究では、実際の室内に実装して、付加した MPP による吸音効果を検討する。この場合、当初の目的にある発話者の声の反射を抑えるだけでなく、室内音場全体への吸音力の寄与がいかほどであるかも、必要な効果の一部として検討する。

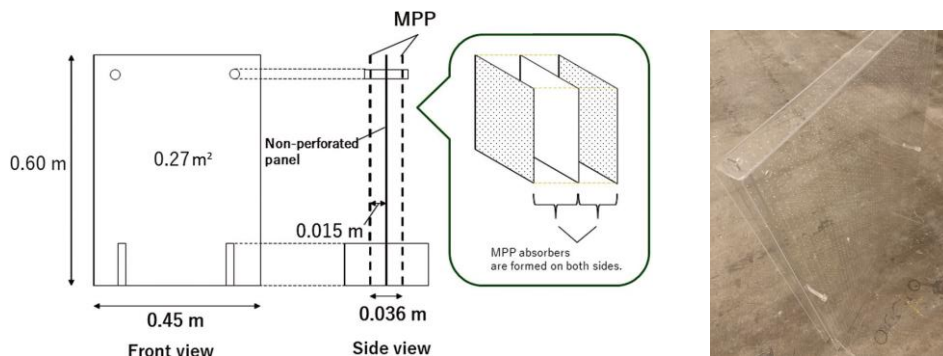


図 1：MPP を付加した 3 重構造のアクリル製卓上パーティションの試作品[1]。

(b)付加した MPP によるパーティションの遮音吸音特性の調整効果の検討

COVID-19 の流行初期の段階から、前述のように商店をはじめ広く用いられるようになった飛沫感染防止用パーティションについて、その遮音性能を意図的に下げることで、パーティション越しの会話をしやすくする方法が杉江らによって検討された[2]。これによると、孔のない均質単板に有孔板を付加することで共鳴透過を生じさせ、それによる遮音欠損を利用してパーティションの音響透過性を向上するというものである。この場合の有孔板としては、孔の大きい従来型の普通有孔板を用いて検討されていたが、より微細孔をもつ MPP でも同様の効果が得られるかは注目されるべき課題であった。すなわち、MPP を利用することによって、共鳴透過による遮音性能低下のみならず、吸音効果も得ることができると予想されるためである。したがって、本研究では、この有孔板を MPP とした場合に、どのような音響的效果が得られ、かつどのようにパーティションの音響特性が調整できるかについて、まず伝達マトリクス法による理論解析によって検討する。より現実的な条件としては、有限なパーティションを空間中に設置した場合の効果の検討として、有限要素法による 2 次元および 3 次元解析によって、パーティションの挿入損失を解析し、MPP を付加することによる音響的效果を詳細に検討した。

(2)自然換気機能を有するプレナム機構のドアへの応用

自然換気的重要性については、COVID-19 感染症の流行以前から指摘されており、これに対して自然換気機能を有する遮音構造がさまざまに提案されてきた。なかでも、構造として最も簡単であるプレナム窓が広く研究され、特に東南アジアなど蒸暑地域を中心として実用化が行われてきた。プレナム窓については、その構造の概略を図 2 に示す。これは、2 重窓の一種であり、2 枚のガラスにそれぞれ開口部を設けることで、空気の流通を確保するが、内部の空間における回折と吸音などの損失によって、遮音効果を生じるものである。

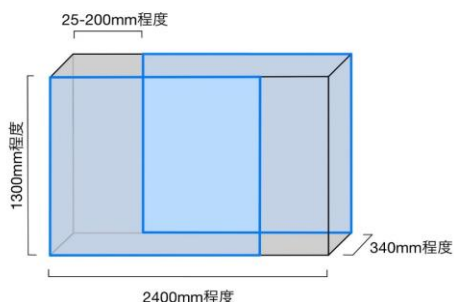


図 2：プレナム窓の概略。

COVID-19 感染症流行時には、換気の必要性が指摘されるとともに、多くの商店などにおいて玄関ドアを開放したまま営業する様子が見られた。この傾向は特に飲食店に顕著であった。こうした場合、換気の必要は満たされるであろうが、遮音の悪化による音環境の劣化は避けられない。したがって、自然換気機能を有しつつ、遮音がある程度確保できる構造のドアがあれば、状況を改善できるのではないかと考えた。この問題は、COVID-19 感染症の流行が収束しても、換気の必要性は変わらないことから、研究する必要性の高い問題であると言える。そこで、本研究では、プレナム構造をドアに応用する可能性を、予備実験により明らかにした。また、有限要素法による数値シミュレーションによって、各パラメータの遮音効果への影響を検

討し、プレナム機構を利用したドア、すなわちプレナムドアの設計に必要な知見を蓄積すること

を目的として検討した。

3. 研究の方法

上記の課題それぞれについての研究方法の概略を、以下に順を追って述べる。

(1) MPP を付加したパーティションの音響特性の検討

(a) 付加した MPP による吸音効果の検討

前述の MPP を付加した 3 重構造パーティションについて、実際の室内環境において、どのような、またどの程度の音響的效果を示すか、実験的に検討した。

まず、残響時間が短く吸音が十分な部屋と、吸音不足のため残響時間の長い部屋の 2 つにおいて、6 人掛けの状況を想定して机とパーティションを設置し、各席におけるインパルス応答を測定する。このとき、MPP の効果を明確にするため、MPP を付加した場合と、取り外した場合について測定した。図 3 に測定系のブロックダイアグラムを示す。図 4 に机および音源、受音点の設置状況を示す。求められたインパルス応答から、室内音響物理指標を算出し、考察を行った。指標としては、以下のものを求めた：残響時間(T20)、EDT(初期残響時間)、 D_{50} 、RASTI。また、残響時間、EDT 及び D_{50} は 125 Hz~4000Hz の 1/3 オクターブバンドにおける値を計測した。

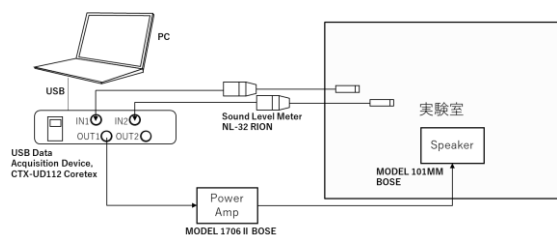


図 3：MPP パーティション実装実験における測定系のブロックダイアグラム。

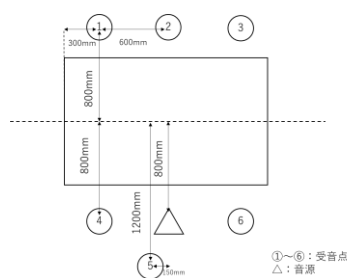


図 4：音源、受音点の状況。

(b)付加した MPP によるパーティションの遮音吸音特性の調整効果の検討

上述の MPP を付加した 3 重構造パーティションの、吸音特性および遮音特性を、伝達マトリクス法によって理論的に解析した。この場合は、パーティションの大きさを無限大として扱うことになる。したがって、実際には生じるパーティション周囲の回折の影響を考慮できない。したがって、あくまで 3 重構造としての吸音、遮音性に着目した検討となる。基礎的知見としては重要であるが、実際の使用状況における特性としては、パーティション周囲の回折の影響を考慮して、上述のような付加した MPP の効果を検討する必要がある。そこで、2 次元および 3 次元空間に、3 重構造パーティションを設置し、その縁辺での回折も考慮した挿入損失を求め、パーティションの効果を検討した。

(2) 自然換気機能を有するプレナム機構のドアへの応用

(a)実験的検討

本研究課題開始前にパイロットスタディとして、2 枚の板で構成した単純なプレナム構造の遮音性能を測定した結果、遮音構造としてある程度の利用が可能であることが示唆されたため、まずは実物大のプレナムドア（図 5）を作成し、その遮音性能を実験的に測定した。隣接する 2 つのオフィスの間の開口部にプレナムドアを設置し、両室間の室間音圧レベル差から、プレナムドアの挿入損失を求め、遮音性能を評価した。

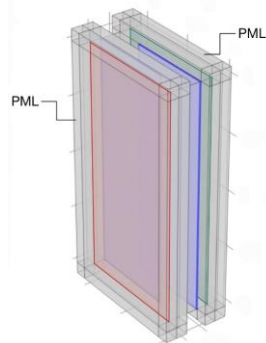


図 6：プレナムドアの解析モデル。赤面に入射波を与え、青面で透過エネルギーを求める。

(b)数値シミュレーションによる検討

プレナムドアについては、音響特性に影響するパラメータとして、開口幅、空気層厚さ、空気層内部の吸音などが考えられる。しかしながら、実験的にこれらのパラメータの影響を考察するには、多数の試作が必要となり容易ではない。そこで、有限要素法による数値シミュレーションによって、パラメトリックスタディを行うこととした。図 6 のようなモデルを作成し、拡散入射時の透過損失を数値解析的に求めた。



図 5：試作した実物大プレナムドア

4. 研究成果

(1) MPP を付加したパーティションの音響特性について

(a) 付加した MPP による吸音効果

実験的検討の結果、以下の知見が得られた。

- 残響が短い室では、付加した MPP の影響は少なく、残響感に関する指標はいずれも顕著な変化を示さなかったのに対し、残響が長く吸音不足の室においては、若干の変化が見られた。また、音声明瞭度に関する指標である D_{50} については、残響が長い室では、MPP の付加による効果は少ないが、残響の短い室では反射音に対する吸音のため上昇するケースが見られた。
- 今回使用した MPP を付加したパーティションは面積が小さかったため、その吸音の影響も少なかったことが考えられ、MPP の仕様についても、改善の余地があったものと考察された。面積については卓上パーティションではなく床置き標準的な大きさのものであれば、ある程度効果が期待できると考えられる。

(b)付加した MPP によるパーティションの遮音吸音特性の調整効果

- まず、伝達マトリクス法による理論解析の結果、均質単板に有孔板を付加することで、共鳴透過を生じさせて遮音性能を低下(透過性を向上)することで音声伝達を有利にする手法について、有孔板を MPP に変えても同様の効果が得られることが分かった。したがって、MPP のパラメータを調整することで、パーティションの遮音性能を調整することが可能である(図 7)。
- 2 枚の MPP に挟まれた均質単板、および MPP のパラメータを調整することで、パーティション全体としての吸音特性を改善できる可能性が示された(図 8)。
- パーティションがあまり大きくない場合を想定して、パーティション縁辺部での回折も考慮した場合における付加した MPP の効果については、数値シミュレーションの結果、パーティションの遮音効果には回折効果の影響が支配的であるため、MPP の付加による遮音性能の変化については顕著な影響が見られないことが分かった。

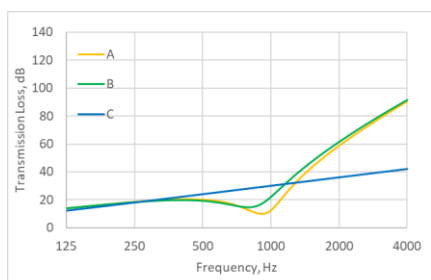


図 7: MPP 付加パーティションの透過損失. A は空気層, B は多孔質層の場合. C は芯材の均質単板の場合. 1000Hz 付近にディップが見られ、遮音効果の低減が生じている。

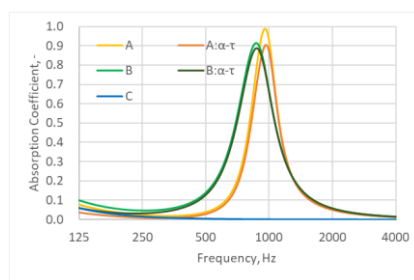


図 8: MPP 付加パーティションの吸音率. オレンジおよび濃緑の線で、エネルギー吸収率(吸音率と透過率の差)を併記. A は空気層, B は多孔質層の場合. C は芯材の均質単板の場合. 1000Hz 付近にピーク吸音が生じる。

(2) 自然換気機能を有するプレナム機構のドアへの応用

- プレナム機構を応用したプレナムドアの、実物大モデルを用いた実験の結果、空気層内部を吸音処理した場合は最大 20dB 程度、吸音処理しない場合でも低音域で 5dB 程度、高音域で 13dB 程度の遮音効果を得られることが分かった。このことから、仕様によってはある程度有効に利用できる可能性が示された(図 9)。
- 数値シミュレーションによるパラメトリックスタディの結果、ドア厚さ(空気層厚さ)が小さい場合は、開口幅が小さい場合に遮音性能が高いこと、内部を吸音処理した場合に特に顕著な遮音性が得られることが分かった。また、内部の吸音処理として MPP を使用することで、特定の周波数帯域における遮音性能の低下を改善できることを示した。

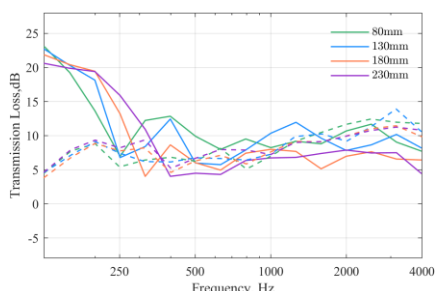


図 9: プレナムドアの遮音性能. 点線: 実物大モデル実験, 実線: FEM による数値シミュレーション。

文献

- [1] Sakagami, K., Kusaka, M., Okuzono, T., Kido, S., & Yamaguchi, D. (2021). Application of transparent microperforated panels to acrylic partitions for desktop use: A case study by prototyping. UCL Open Environment, 2. <https://doi.org/10.14324/111.444/ucloe.000021>
- [2] 杉江聡, 鈴木肇, 新田龍馬, 共鳴機構を付加した単層板の透過音制御, 日本騒音制御工学会秋季講演論文集, 2-3-04, (2020.10).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 阪上公博	4. 巻 51
2. 論文標題 プレナム構造のドアへの適用に関する基礎的検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 音響技術	6. 最初と最後の頁 76-79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 片山開人, 阪上公博, 奥園健
2. 発表標題 MPPを付加した卓上パーティションの音響特性解析と最適化の試み
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 Kimihiro Sakagami, Haruhi Inoue, Takeshi Okuzono
2. 発表標題 A pilot study on the sound insulation performance of plenum doors
3. 学会等名 Inter-noise 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年～2024年

1. 発表者名 阪上公博, 松村宗一郎, 奥園健
2. 発表標題 プレナム構造のドアへの適用に関する基礎的検討 - 実大ドア模型による実験的検討 -
3. 学会等名 日本音響学会2022年春季研究発表会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 阪上公博, 奥園健, 松村宗一郎
2. 発表標題 プレナム構造のドアへの適用に関する基礎的検討
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2021年～2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関