

令和 2 年 5 月 2 日現在

機関番号：14501
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2019
課題番号：17K14771
研究課題名（和文）非拡散音場の音響調整のための吸音処理手法の開発

研究課題名（英文）Development of sound absorption treatment for controlling acoustics in non-diffuse sound fields

研究代表者

奥園 健（Okuzono, Takeshi）

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：40727707

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、環境性や意匠性などの観点から注目を集めている微細穿孔板(MPP)と通気性膜(天然・化学繊維素材の通気性のある織編物・不織布)を用いた吸音体により、建築に一般的な非拡散音場の音環境を快適に調整する手段を探求した。高性能な有限要素法に基づく波動音響解析技術により、空間と吸音体を厳密な波動論に基づきモデル化し、非拡散音場における吸音機構の解明と効果的な吸音処理手法の開発を試みた。吸音体はMPP、通気性膜、多孔質材から構成される多様な構造を対象としている。効果的な吸音構造と吸音体配置を示し、より高性能な吸音体を提案した。さらに、いくつかの効率的な音場と吸音体の解析技術を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は建築において一般的な非拡散音場の音環境を、MPPと通気性膜吸音体を用いて快適に調整する基礎を与えるものとして社会的に有意義と考えている。さらに本研究により空間性能まで考慮した吸音体設計の新たな展開や可能性を示すことができ、建築音響と騒音制御に関わる学術に関して新たな展開が期待できる。また、新規に提案した音場・吸音体解析技術は、波動音響数値解析技術の高性能化に大きく寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：The present study aimed at exploring effective room acoustics control methods with microperforated panel (MPP) absorbers and permeable membrane absorbers to create comfortable sound environment in non-diffuse sound fields. Elucidation of sound absorption mechanism in non-diffuse sound fields and development of effective sound absorption treatments were performed with a wave-based acoustic simulation method based on a high-performance finite element method (FEM). Using the FEM both sound field in rooms and sound absorbers are modeled exactly with a basis of wave acoustic theory. Various sound absorbers composed of MPP, permeable membranes and porous materials were considered herein. Results revealed effective sound absorbing structures and sound absorber placements. In addition, the study proposed some high-performance sound absorbers, and some efficient prediction methods for sound fields and sound absorbers.

研究分野：建築環境音響学

キーワード：室内音響設計 非拡散音場 吸音 微細穿孔板 通気性膜 波動音響シミュレーション 有限要素法

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

建築空間の音響調整において、吸音材は室内の騒音レベルや残響時間の制御のために重要な役割を果たす。近年、環境性、意匠性、衛生面、などの観点から微細穿孔板（MPP）や通気性膜を用いた吸音体が注目を集めており、これらを用いた高性能な吸音体の開発が世界的に活発な研究領域となっている。MPPは、直径1mm未満の微細孔を開孔率1%程度であけた薄板であり、金属・プラスチック・木材など任意の材料で作製でき、古典的な単一MPP吸音体は背後剛壁の空気層の前にMPPを設置することで共鳴器型の吸音機構を形成する。また、本研究では、通気性膜を各種天然・化学繊維素材の通気性のある薄い織編物・不織布と定義する。古典的な単一通気性膜吸音体は多孔質型の吸音機構を示し、音響カーテンがその一例である。これらは共に、吸音性だけでなく様々な機能設計が可能な材料であり、高機能繊維を用いた付加価値の高い吸音体の開発が期待できる。また、透光性を有する材料で製作したり照明機器と組み合わせることで音環境だけでなく光環境の調整にも活用できる。さらに不織布のもつ高い生産性はコストの観点から魅力的である。

一方、一般的に音響設計の現場では、Sabineの残響式などの拡散音場理論に基づき内装設計が行われる。しかし、我々の日常生活の場であるオフィス、講義室、会議室などの矩形室では吸音面が偏在（主に天井面のみ高吸音性）していることが多く、拡散音場理論から期待される吸音性能が得られず残響時間が長大化することが知られている。この原因は吸音処理に必要なスペースや意匠面の観点から吸音面の均等分布が困難になり、音場が非拡散となることで吸音面に擦過角入射する一・二次元モードが卓越するためである。この吸音面が偏在する空間は建築では一般的であり、音響的な問題が生じやすいにも関わらず、非拡散音場に効果的な吸音処理手法については十分に整備されていない。

本研究は、上述のMPPと通気性膜吸音体を用いて、非拡散音場の音環境を快適に調整する手段を探索するものであり、非拡散音場における吸音体の吸音機構の解明から効果的な吸音処理手法の開発までを吸音体の吸音特性の周波数依存性と入射角依存性の両方を考慮し包括的に研究する。なお、近年、国内外で非拡散音場の減衰過程のモデル化や残響理論構築、壁面散乱の有効性に関する研究が盛んであるが、吸音処理に着目したのではなく、また、本研究のように吸音体の吸音特性を厳密に考慮した上で、後述する波動数値解析に基づき建築の音環境を調整する吸音処理について探索した研究は国内外において見当たらない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MPP吸音体と通気性膜吸音体による非拡散音場の音響調整に効果的な吸音処理手法の開発である。高性能な有限要素法（FEM）による波動数値解析を用いて非拡散音場における吸音体の吸音機構を解明するとともに、MPPならびに通気性膜を用いた効果的な吸音体構造ならびに配置を明らかにする。さらに、より高性能な吸音体を開発を試みる。

3. 研究の方法

有限要素解析技術は研究代表者が開発を行ってきた高精度かつ高効率な周波数領域ならびに時間領域FEMを用いる。同FEMにより離散化誤差1%以下の精度の解析が、解析する周波数の音波長に対して4要素程度の離散化で可能となり、室内音場と吸音体との相互作用を効率的に考慮可能となる。また、吸音体は基本的に吸音特性の周波数と入射角依存性を厳密に考慮する拡張作用モデルを使用してモデル化する。吸音体のモデル化においてMPPと通気性膜は柔軟であると仮定した。すなわち音波の入射による振動は質量に起因するものと仮定した。MPPの微細孔による損失はMPPの音響インピーダンス、通気性膜の通気性は流れ抵抗により考慮し、MPPと通気性膜は伝達インピーダンスモデルによりモデル化している。多孔質材は新規に開発した等価流体に基づく吸音要素でモデル化した。主な検討項目の詳細を下記に記す。

(1) 非拡散音場における吸音機構の解明

非拡散音場での吸音体の吸音機構を明らかにし、効果的な吸音処理手法開発の礎とするため、典型的な非拡散音場のベンチマーク問題として天井のみ高吸音の矩形室を設定した。吸音性能への影響因子として、吸音体の斜入射吸音率の大きさ・室寸法・周波数の違いに着目し、得られる吸音効果について考察した。

(2) 効果的な吸音構造・吸音体配置の明確化

実在するMPPと通気性膜を用いた複数の吸音体について、効果的な吸音構造・吸音体配置を実大室、ならびに、各固有振動への吸音体の効果の把握が容易な小矩形室を対象として考察した。対象とした吸音体は、背後空気層ならびに背後多孔質層（GW）の単一MPP吸音体、MPPと通気性膜から構成される二重吸音体3種、比較のためのGW吸音体、の合計6種である。

(3) より高性能な吸音体の開発

研究代表者らが考案し、効果的な吸音体となる可能性をもつ通気性膜吸音体アレイを試作した。通気性膜吸音体アレイは、背後空気層深さの異なる単一通気性膜吸音体を並列配置した吸音構造であり、空気層内の音波伝搬を吸音面に垂直な方向へ制限することで吸音率の入射角依存性を小さくし、さらに、周波数特性の異なる吸音体の並列配置の効果により特定の周波数での吸

音率の低下を防ぐものである。本項目では、その吸音性能を残響室法吸音率の測定により検証した。従来の背後空気層の単一通気性膜吸音体と背後ハニカム構造の単一通気性膜吸音体も試作し、性能を比較した。さらに、FEM 解析により残響室法吸音率の測定を時間領域で直接的に模擬し、数値解析によるモデル化の妥当性ならびに吸音体設計の可能性を検討した。さらに、上述の2項目の結果をもとに、より高性能な吸音体の開発を試みた。

4. 研究成果

上述の検討項目ごとに、本研究で得られた主な成果を記述する。なお、当初予期していなかった研究成果についても記載している。研究成果は、研究期間内に4編の学術論文が出版され、1編投稿中である。また、国際会議にて2編、国内会議にて12編の学会発表を行った。

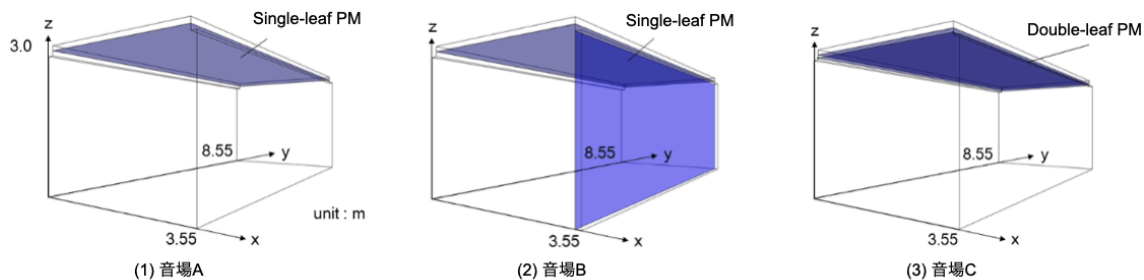


図1 対象音場：(1)音場A, (2)音場B, (3)音場C

(1) 非拡散音場における吸音機構の解明

図1に示す3種の音場を対象に、2 kHz 帯域までの周波数成分を含むインパルス応答を計算し、吸音体の斜入射吸音特性と配置の違いによる減衰性状と音圧レベルの低減効果を比較した。音場Aは単一通気性膜(PM)天井吸音体を設置した矩形室、音場Bは単一PM天井吸音体と壁面吸音体を設置した室、音場Cは二重PM吸音体を設置した室である。吸音体は拡張作用モデルに加え、局所作用に基づく2種の等価インピーダンスモデルを用いたモデル化の合計3種でモデル化した。等価インピーダンスによるモデル化は仮想的なものであるが非常に高い擦過入射吸音率を示す。主な成果は下記の通りである。

- ① 斜入射吸音率の違いはインパルス応答の減衰性状に大きく影響し、吸音体の統計吸音率が同一であっても擦過入射吸音率が高い方が、より大きな減衰が得られる。しかし、その効果は高周波数ほど低下し、吸音体の擦過入射吸音率が大きくとも音場Aや音場Cのように天井面だけの吸音では高周波数までの残響時間の調整は困難である。
- ② 天井高が高くなるにつれ、より低い周波数でも吸音効果の低下が期待される。
- ③ 一方で、擦過入射吸音率の高い吸音体を音場Bのように配置すると非常に大きな初期減衰を得られる。しかし、依然として、吸音体を設置していない壁面に入射する軸波が卓越する。今後の展望として、このような大きな初期減衰が音響調整に効果的であるかを聴感のおよび実験的に検証する必要がある。

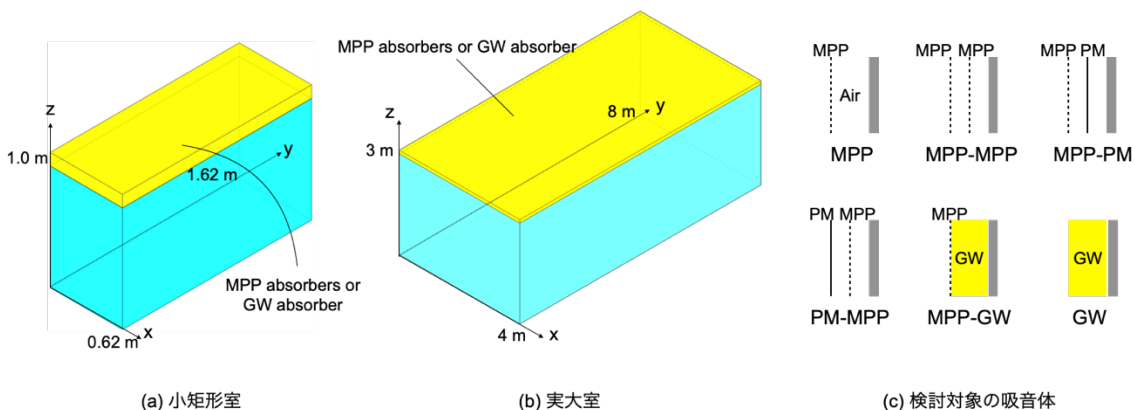


図2 対象とした(a)小矩形室と(b)実大室、ならびに、(c)検討対象とした6種の吸音体

(2) 効果的な吸音構造・吸音体配置の明確化

上記(1)の結果に基づき、実在のMPPと通気性膜を用いた吸音体を対象に効果的な吸音構造と吸音体配置について考察した。図2(a), (b)に示す小矩形室と実大室に図2(c)の6種類の天井吸音体を設置し、その性能を評価した。小矩形室モデルを用いた解析より、これら吸音体の重要な基礎性能として、下記に記す空気層と減衰層の効果が明らかとなった。

- ① 背後空気層をもつ単一ならびに二重MPP吸音体(MPP-PMおよびPM-MPPを含む)は

吸音面に擦過入射する音波に対しては吸音効果を示さない。この短所は単一 MPP については既知であったが、より広帯域化を図った二重 MPP についても該当することが明らかとなった。(図 3a)

- ② 背後 GW の MPP 吸音体と GW 吸音体は吸音面に擦過入射するモードを含め全固有振動モードに対して吸音効果を示し、特に低域において背後を空気層とした場合に比べ、高い音圧レベルの低減効果が得られる。(図 3a, b) すなわち空気層内への何らかの減衰を付与することが吸音性能向上の一つの鍵である。

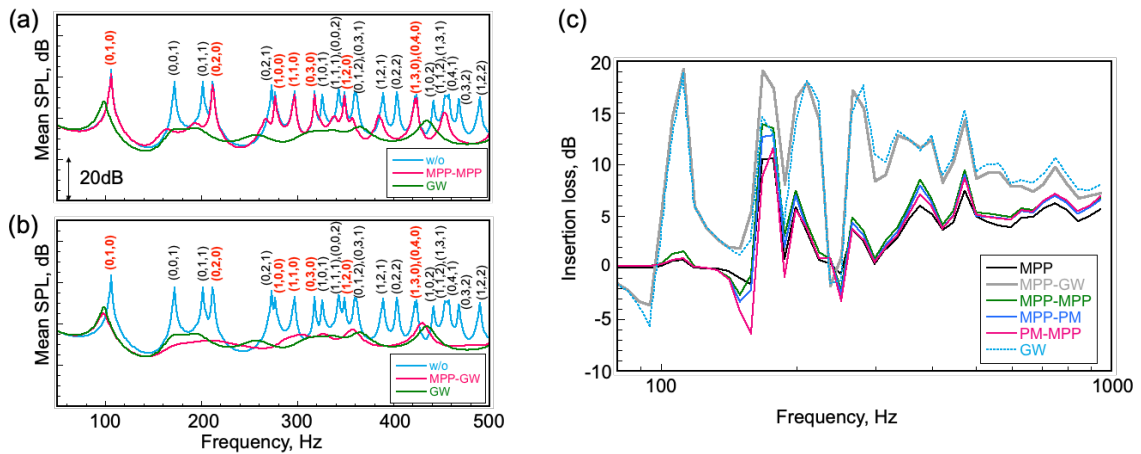


図 3 室内平均音圧レベルの比較 (a) MPP-MPP, (b) MPP-GW と (c) 6 種の吸音体の音圧レベルの低減効果の比較：図中 w/o は吸音体なしの音圧レベルを示す。また音圧レベルの低減効果は挿入損失 (Insertion loss) で評価し、値が大きくな方が低減効果大きいことを示す

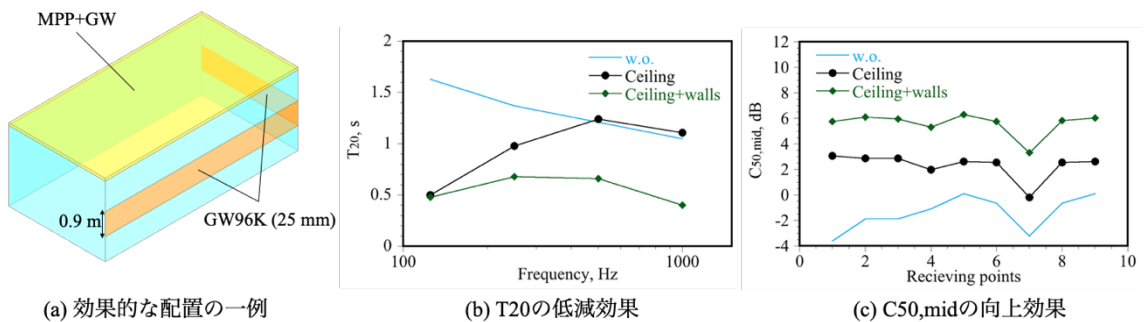


図 4 効果的な吸音体配置の一例とそれによる残響時間の低減効果と音声の明瞭性の向上効果、吸音体なし(w.o.)と天井吸音体のみ(Ceiling)と比べて高い改善効果が得られている

さらに、実大室の 125Hz~1kHz 帯域を対象とした結果から得られた重要な成果は以下である。

- ③ 減衰層を含む吸音体は、空気層を含む吸音体に比べ低域での残響時間と音圧レベルの低減に極めて効果的である。すなわち小矩形室での効果は実大室でも成立している。
- ④ 上記に加え、同吸音体は、音源位置によらず音声の明瞭性指標である $C_{50,mid}$ の向上にも効果的である。
- ⑤ 以上の検討から非拡散音場に効果的な吸音体配置として、天井に減衰層を含む吸音体を低域用に配置し、壁面に中高音域用の薄型吸音体を設置することが考えられる。一例が図 4 に示す吸音体配置である。低域は MPP-GW 天井吸音体、中高音域は壁面の一部に設置した薄型 GW 吸音体で処理する配置であり、室空間のスペースの観点からも有効である。

- (3) より高性能な吸音体の開発

- ① 物性値の異なる 9 種の通気性膜 (汎用合成繊維である PET・PP と無機繊維であるガラス繊維素材の織物・不織布) とセルサイズ 10 mm のペーパーハニカムコアを用いて通気性膜吸音体アレイ (PMAR) を試作し、従来の背後空気層と背後ハニカム構造の通気性膜吸音体 (それぞれ PMSG, PMHC) に比べ高い吸音性能が得られることを明らかにした。(図 5)
- ② 当初予期していなかったが、セルサイズ 10 mm のハニカムコアによるハニカム構造とアレイ構造はそれ自体が高い吸音性能をもつ吸音要素であることが明らかとなった。後述の(4)に記載の通り、同構造の数理モデル自体は構築したものの妥当性が検証できておらず、このため、数値解析による PMAR の非拡散音場での有効性までは検証できていない。今後の重要な課題である。
- ③ 数値残響室を用いて PMSG の残響室吸音率を予測し、実測値・理論値と比較し、広範な物性値の膜に対して良好な結果が得られた。(図 6) このことから、ハニカム構造とアレイ

構造の吸音モデルの必要性が裏付けられた。

- ④ 背後空気層をもつ単一・二重吸音体の空気層内部に減衰を与えるため多孔質仕切りを挿入する吸音体を提案し、空気層全てに多孔質層を充填する吸音体には及ばないものの従来構造に比べ、低域の吸音性能の向上に有効であることを明らかにした。また、背後構造の損失を考慮せずにすむ、仕切り間隔の大きな背後ハニカム構造とアレイ構造の単一 MPP 吸音体についても検討を行い、従来に比べ性能向上が期待できることを確認した。

(4) 予期せぬ研究成果

- ① 高性能吸音体の開発にあたり背後ハニカムおよびアレイ構造自体がもつ吸音のモデル化が必要となった。同構造による吸音がセル内部での粘性と熱伝導損失に起因するものとし、柔骨格多孔質モデルによる数理モデルを構築した。自作音響管による垂直入射吸音率の測定値との比較によりモデル化の妥当性を検証したが、管自体がもつ残留吸音により精密な測定が困難であった。したがって、同構造のモデル化は未だ重要な課題である。
- ② 上記モデル構築にあたり有限要素解析用に新たに等価流体に基づく吸音要素を開発した。さらに従来に比べ、より少ない要素数で高精度な解析が可能な要素を提案した。
- ③ 上記の吸音要素を用いた MPP の新しい有限要素モデルを提案した。本モデルによれば、近年、主に海外で盛んに研究されている非一様な孔分布や孔形をもつ不均質な MPP のモデリングにかかる計算負荷を低減でき有用である。
- ④ (2)の検討において、高吸音性の吸音体を設置した音場を解析する場合、演算部の反復法の収束性が悪化し、計算時間が長大化する場合が確認された。上記検討では、収束性を向上させる工夫によりある程度高速な求解を可能としたが、より大空間問題では困難が予想される。そこで、要素数を劇的に削減できるとされる平面波エンリッチメントを用いる FEM の有効性について検討し、2次元解析においてその有効性を明らかにした。

以上、総括すると本研究により得られた研究成果は、建築において一般的な非拡散音場の音環境を、MPP と通気性膜吸音体を用いて快適に調整する基礎を与えるものとして社会的に有意義と考えている。さらに、厳密な波動論に基づく手法を用いて、空間性能まで考慮した吸音体設計の新たな展開や可能性を示すことができ、また、いくつかの効率的な解析手法を新規に提案することができ、建築音響・騒音制御に関わる学術のさらなる発展に資するものと考えている。

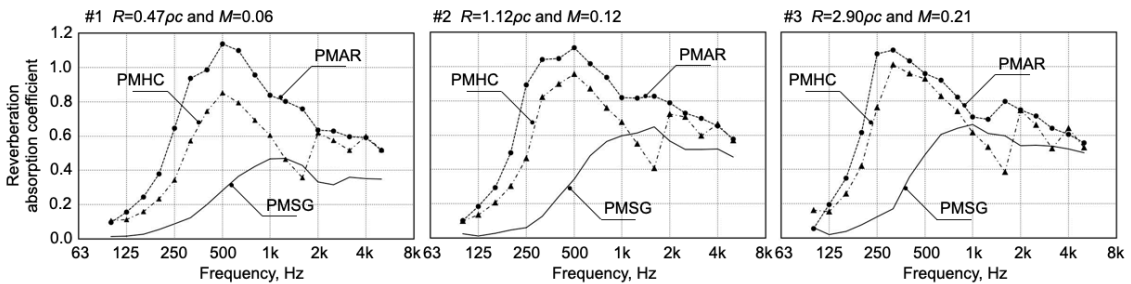


図 5 通気性膜吸音体アレイ(PMAR)の有効性の一例、#1~#3 は物性値の異なる膜を用いた場合の比較であり、いずれも PMSG、PMHC に比べ高い残響室法吸音率を示す。R:流れ抵抗、M:面密度、 pc は空気の特徴インピーダンスを表す。

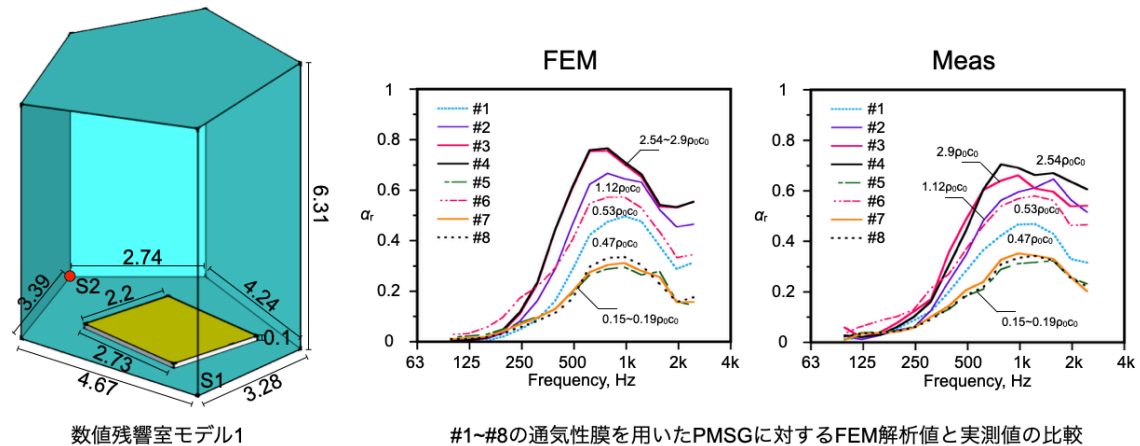


図 6 背後空気層をもつ単一通気性膜吸音体 PMSG に対する FEM による残響室法吸音率の予測値と実測値の比較、FEM 予測値は残響室法吸音率の測定を直接的に時間領域で模擬したものであり、物性値の違いによる吸音性能の違いをよく捉えている

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Okuzono Takeshi、Mohamed M Shadi、Sakagami Kimihiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Potential of Room Acoustic Solver with Plane-Wave Enriched Finite Element Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.3390/app10061969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Takeshi Okuzono、Kimihiro Sakagami	4. 巻 39
2. 論文標題 Dispersion error reduction of absorption finite elements based on equivalent fluid model	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 362-365
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1250/ast.39.362	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Okuzono Takeshi、Shimizu Noriyasu、Sakagami Kimihiro	4. 巻 151
2. 論文標題 Predicting absorption characteristics of single-leaf permeable membrane absorbers using finite element method in a time domain	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 172 ~ 182
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.03.006	査読の有無 有
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 -
1. 著者名 Okuzono Takeshi、Nitta Takao、Sakagami Kimihiro	4. 巻 40
2. 論文標題 Note on microperforated panel model using equivalent-fluid-based absorption elements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 221 ~ 224
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1250/ast.40.221	査読の有無 有
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14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 田丸加奈子 奥園健 向江俊一 阪上公博
2. 発表標題 平面波エンリッチメントを用いたPartition of Unity FEMによる 室内音場解析 その1 精度検証
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向江俊一 奥園健 田丸加奈子 阪上公博
2. 発表標題 平面波エンリッチメントを用いたPartition of Unity FEM による 室内音場解析 その2 低次要素と高次要素の比較
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥園健 阪上公博
2. 発表標題 小規模矩形室に設置した各種MPP 天井吸音体の効果に関する有限要素解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥園健 田丸加奈子 向江俊一 阪上公博
2. 発表標題 平面波エンリッチメントを用いたPartition of Unity FEM による 室内音場解析
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Okuzono Kimihiro Sakagami Toru Otsuru
2. 発表標題 Dispersion-reduced time domain FEM for room acoustics simulation
3. 学会等名 23rd International Congress on Acoustics
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥園健
2. 発表標題 等価流体に基づく吸音要素を用いたMPPの有限要素モデルに関する考察
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥園健
2. 発表標題 通気性膜吸音体アレイの垂直入射吸音特性に関する検討-背後構造による吸音の考慮-
3. 学会等名 日本音響学会2019年春季研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 奥園健
2. 発表標題 等価流体モデルに基づく吸音要素の分散誤差低減
3. 学会等名 平成30年度日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takeshi Okuzono
2. 発表標題 AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE ABSORPTION CHARACTERISTICS OF PERMEABLE MEMBRANE ABSORBERS ARRAY
3. 学会等名 25th International Congress on Sound and Vibration (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥園健
2. 発表標題 等価流体モデルに基づく吸音要素の分散誤差低減
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥園健
2. 発表標題 等価流体モデルに基づく吸音要素の分散誤差低減
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 奥園健 上西宏治 阪上公博 清水ひかる
2. 発表標題 通気性膜吸音体アレイの残響室法吸音率-従来吸音体との比較-
3. 学会等名 日本音響学会2018年春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 清水徳泰 奥園健 阪上公博
2. 発表標題 単一通気性膜吸音体の残響室法吸音率の数値予測
3. 学会等名 日本音響学会2018年春季研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上西宏治 奥園健 阪上公博
2. 発表標題 通気性膜吸音体アレイの吸音特性に関する実験的検討
3. 学会等名 日本音響学会2017年秋季研究発表会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Researchgate https://www.researchgate.net/profile/Takeshi_Okuzono

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