

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04806

研究課題名（和文）可聴全域の室内音響予測を可能とする波動数値解析手法の確立

研究課題名（英文）Development of wave-based numerical methods able to predict room acoustics at full audible ranges

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、コンサートホールや講義室など各種建築空間の音環境をより効率的、かつ、高精度に予測するための新しい波動音響解析技術の開発を試みた。Partition-of-Unity FEM（PUFEM）と呼ばれる音響数値解析手法に基づく音環境予測技術を構築し、頑健な予測を可能とするためのパラメータ設定の確立、各種音響材料を精度よく扱うための境界条件の実装、計算効率化などに関する検討を行い、従来のFEMによる予測技術に比べて、格段に高い精度でより効率的に高周波数までの音環境を予測できる次世代のシミュレーション技術となる可能性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築の音環境設計に活用される数値シミュレーション技術は、幾何音響解析と波動音響解析に大別される。信頼性の高い音環境設計のためには後者の波動音響解析が必要であるが、波動音響解析を用いて広大な建築空間を可聴周波数全域に渡り高精度に予測することは計算コストの観点から未解決の問題であり、より効率的な新しい波動解析技術の開発が望まれている。本研究は、精度・効率・既存技術との親和性などの観点から、次世代の音環境予測技術となりうるPUFEMによる波動音響解析手法に着目し、建築の音環境をより高い信頼性のもと効率的に予測できる可能性を明らかにしたものである。

研究成果の概要（英文）：This study aims to develop a novel wave-based acoustic simulation method for predicting sonic environments in architectural spaces such as concert halls and classrooms more efficiently and accurately. We developed a room-acoustics simulation technology that uses the Partition-of-Unity FEM (PUFEM) with plane-wave-enrichment. We performed studies regarding establishing proper parameter setup for robust simulations, implementing boundary conditions for accurate modeling of acoustic materials, and computational efficiency. We successfully showed that the proposed PUFEM solver has a high potential as a next-generation acoustics simulation method in architectural spaces, with higher accuracy and efficiency than standard FEM technology.

研究分野：建築環境音響学

キーワード：室内音響シミュレーション 波動音響解析 音響解析 Partition of Unity FEM 拡張作用境界 インパルス応答 吸音材料 音環境予測

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

建築の音環境設計において、高精度な室内音響のコンピュータシミュレーション手法を整備することは、室用途に応じた快適な室内音響の確実な提供のために非常に重要である。特に音場の時間情報を含むインパルス応答を高精度に予測するシミュレーション技術の開発は、計算した音環境を実際にヘッドフォンなどを通して聴く可聴化や、音像の各要素感覚に対応した音響物理指標による音環境評価のための重要な課題である。室内音響のコンピュータシミュレーション技術は、音響伝搬を幾何的に扱う幾何音響解析と波動的に扱う波動音響解析に大別できるが、本質的な観点から高精度な予測を行うには音の伝搬を記述する偏微分方程式を解く波動音響解析の使用が不可欠となる。波動音響解析は波動方程式を、有限要素法(以下、FEM)や境界要素法などの何らかの数値解析手法により離散化し、数値的に解く手法である。しかし、波動音響解析を用いたとしても、高い信頼性のもと室内音響を予測するには、解析周波数の音波長に応じた適切な時空間の離散化と室内音響を制御する音響材料の特性を的確に記述する高精度な境界条件の使用が必要である。広大な建築空間を可聴域全域に渡って波動的に予測することは、適切な時空間離散化の問題に起因して、本質的に巨大な自由度を有する大規模問題を解くことにつながることから膨大な計算機資源を必要とする。近年の計算機技術の著しい発展から、国内外において効率的な波動音響解析技術の開発が活発に行われているものの、室内音響を高精度な境界条件のもと可聴域全域に渡って予測することはスーパーコンピュータを用いた大規模並列計算に基づく先進的な手法でも未だ難しく、建築音響分野において、長い間、未解決の問題となっている。そこで、本研究では、その解決に向けて、建築音響分野でこれまでに活用されてこなかった、新しい数値解析手法に着目して、その適用性を評価し、更に効率的な手法の開発を試みた。

具体的には、申請者は、精度、効率、メッシュ生成の容易さ、既存 FEM コードとの親和性などの観点から、将来的に効果的な室内音響解析手法となりうる数値解析手法として、音響伝搬の支配方程式である Helmholtz 方程式の一般解を用いて場の近似を強化する「enrichment」と呼ばれる概念により、従来の FEM に比べて、大幅に少ない自由度で高精度な解析を可能とするとされる Partition of Unity FEM (以下、PUFEM) による周波数領域での音響数値解析手法に着目した。PUFEM による音響数値解析手法は、有限要素解析における要素内での音圧場の近似において、要素節点での音圧を様々な方向に伝搬する平面波の重ね合わせで表現し、場を多項式近似する形状関数に組み込むことで、局所的に場の近似能力を強化する(以下、平面波エンリッチメント)。さらに、古典的な FEM では不可能である音波長よりも大きなサイズの要素で空間を離散化した単一の粗いメッシュを用いて、q-refinement と呼ばれる技術によって高周波数までの音場を予測する。すなわち、従来の波動音響解析で要求される、周波数に応じた複数のメッシュの用意が不要であり、計算アルゴリズムにメッシュ細分化と同等の効果を内包している。しかし、PUFEM を室内音響解析のような広帯域の周波数応答を必要とする大規模かつ複雑な境界条件を持つ問題へ適用した例はこれまでに見当たらず、その性能には不明な点が多い。本研究は、世界で初めて PUFEM を建築の室内音響予測へと応用し、高精度な境界条件のもと飛躍的に高精度なインパルス応答予測を実現する音環境のコンピュータシミュレーション手法の開発を目指すものである。

2. 研究の目的

本研究の最終目的は、「高精度な境界条件のもと可聴全域での高精度な室内音響予測を可能とする平面波エンリッチメントを用いた PUFEM による周波数領域での音場解析手法の開発」である。特に高精度な境界条件として、音響材料のもつ波動的な特性を的確に記述できる拡張作用境界を用いた手法の開発を試みた。なお、研究着手時は、より効率的な 3 次元室内音響シミュレーション手法の確立を目的としたが、インパルス応答計算に必要な多周波数解析を頑健に行うためのパラメータ設定に関する検討に時間を要したため、主に 2 次元室内音響シミュレーションでのインパルス応答計算を頑健に実施可能な音響 PUFEM の開発にとどまった。ただし、2 次元室内音響シミュレーションにおいては、ホール規模の音場に対しても、従来の FEM に比べて、より少ない自由度の単一メッシュによる、飛躍的に高精度なインパルス応答の計算を達成している。頑健な 3 次元解析手法は、本研究の成果を基礎として、今後開発していく予定である。

3. 研究の方法

本研究では、Helmholtz 方程式を基礎式として、インパルス応答予測が可能な PUFEM による室内音響シミュレーションコードを開発した。なお、平面波エンリッチメントによる PUFEM は本質的に周波数領域解析に適した手法であるため、インパルス応答は、計算した周波数応答をフーリエ逆変換することで計算する。開発したコードは、理論解析、ならびに、1 次及び 2 次のラグランジュ多項式を形状関数として音圧場の近似に用いる FEM コードとの比較により検証した。主に、(1) 多周波数解析を効率的、かつ、頑健に実施するためのパラメータ設定の確立、(2) 各種吸音材を扱うための拡張作用境界条件の実装、(3) 疎行列解法、及び、OpenMP による並列計

算による効率化、について検討した。

4. 研究成果

(1) 多周波数解析を効率的、かつ、頑健に実施するためのパラメータ設定の確立

①PUFEMによる音響解析手法においては、要素質量行列や要素剛性行列などの要素行列の計算部分が演算のホットスポットとなり、効率的な多周波数解析のためにはこの部分の効率化が重要となる。一般に要素行列の計算には、曲面境界への対応が可能な高次の Gauss-Legendre 積分が使用され、その積分点数は周波数や要素サイズに応じて設定する必要がある。先行研究では、この積分点数は、以下の式のように高周波数域では、要素内に含まれる波長あたり 10 点程度あれば良いとされていた。

$$n_g = \text{int}(10n_w + 1) \quad (1)$$

ここで、 n_w は波長と要素長の比、 int は切り捨てによる整数化を表す。しかし、室内音響解析のように低周波数から高周波数までの広帯域の応答が必要な場合、このルールが適用できるかは不明であった。そこで、進行波と後退波の重ね合わせによって、音場を完全に記述できるダクト内の平面波伝搬問題を考え、本ルールを検証したところ $n_w < 1$ となる範囲では大きな誤差が生じることが明らかとなった。また、この結果を踏まえ、室内音響解析に適した新たなルールを以下のように提案した。

$$n_g = \text{int}(5n_w + 6) \quad (2)$$

申請者の研究室を模した単一室と結合室の 2 種の室内音響問題を用いて式(2)の有効性を検証した結果、式(2)によれば、従来ルールに比べて、 $n_w < 1$ の範囲を扱えるだけでなく、 $n_w > 1$ となる範囲においても精度を犠牲にすることなく、より高速な計算が可能となることを明らかにした。さらに、式(2)は拡散体を含むオフィス、残響室、ホールなど、多様な室形状・境界条件をもつ問題においても有効であることを確認している。本検討の成果の一部は、日本音響学会の英文誌に掲載された[1]。なお、式(2)は $0.01 < n_w < 10$ の範囲において開発したものであり、この範囲外では検証されていないことに注意されたい。

②PUFEMを用いて、広帯域の周波数応答を安定して予測するには、平面波エンリッチメントにおいて、要素節点に適切な数の平面波数を重畳する必要がある。先行研究では、波数 k_0 と要素サイズの関数として定義された以下のルールが 2 次元解析を対象に提案されているものの、それには精度を制御するための定数 C の設定が事前に必要となる。

$$q_i = \text{round}[k_0 h_{\max,i} + C(k_0 h_{\max,i})^{1/3}] \quad (3)$$

ここで、 q_i は節点に重畳する平面波数、 $h_{\max,i}$ は節点に接続している最大の要素長である。室内音響解析においては、室形状、周波数、メッシュによらず適切な数の平面波数を節点に付与する頑健な方法が不可欠であるが、このルールの頑健性は十分に検証されておらず、特に C を適切に設定する方法は未確立であった。そこで、形状の複雑さの異なる 2 種類のオフィスモデルを用いて、多周波数解析においてメッシュの解像度と室形状が頑健性に与える影響について検証し、以下を明らかにした。

- PUFEM の頑健性は、特に高周波数域で室形状とメッシュの空間分解能の影響を受ける。
- 上限周波数の波長よりも大きなサイズの要素を含む粗いメッシュを用いた解析では頑健性が低く適切な C を設定することが著しく困難となる。この傾向は室形状が複雑である場合に顕著である。
- 室形状が複雑な場合、メッシュにおける最大要素サイズを解析上限周波数の波長と同程度とすることで高精度な解析を可能とする C の範囲が広がる。加えて、この場合、計算時間に関しても、より効率的な解析が可能である。

端的に言うと、PUFEMを用いた音響解析において、効率的、かつ、頑健な解析を行うには、メッシュ作成の指針として「メッシュにおける最大要素サイズは上限周波数の波長と同程度とした方が良い。つまり、パラメータ n_w に関して上限周波数で $n_w \cong 1$ とするとよい」ことを明らかにした。さらに、従来の 2 次 FEM との比較から、2 次 FEM では経験則の 2 倍の解像度をもつメッシュを用いたとしても、空間離散化に起因する分散誤差の蓄積によって、時間とともにインパルス応答波形が劣化するのに対して、PUFEM では長時間にわたって劣化のない高精度な波形を保つことを明らかにした。本研究成果は学術誌[2]にて公表した。なお、本指針のもと、図 1、図 2 に示す一例のように点音源を含む 2 次元ホール音場の伝達関数・インパルス応答の予測が広帯域に渡って極めて高精度に可能であることを確認しており、今後、論文にまとめる予定である。

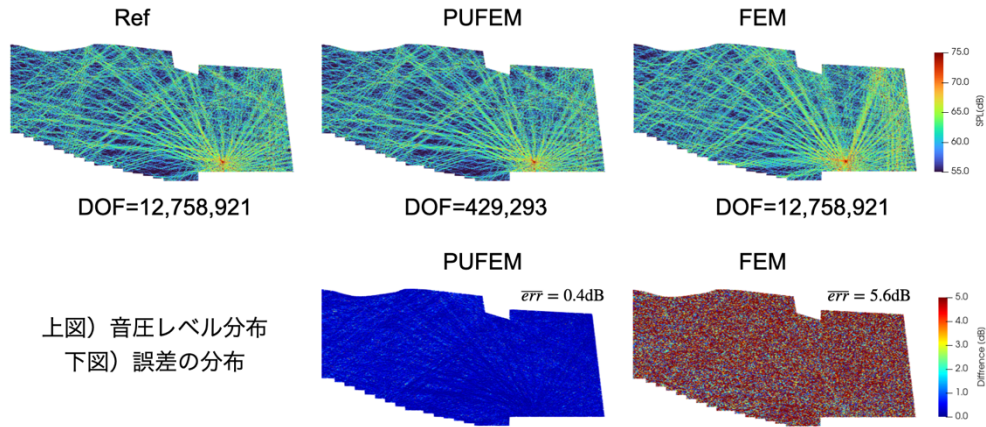


図1 PUFEMとFEMによる2.5 kHzにおけるホール内音場の音圧レベル分布、並びに、誤差分布の比較、Refは参照解をあらわす。PUFEMはFEMに比べて、より少ない自由度（DOF）で高精度な予測が実現できている。

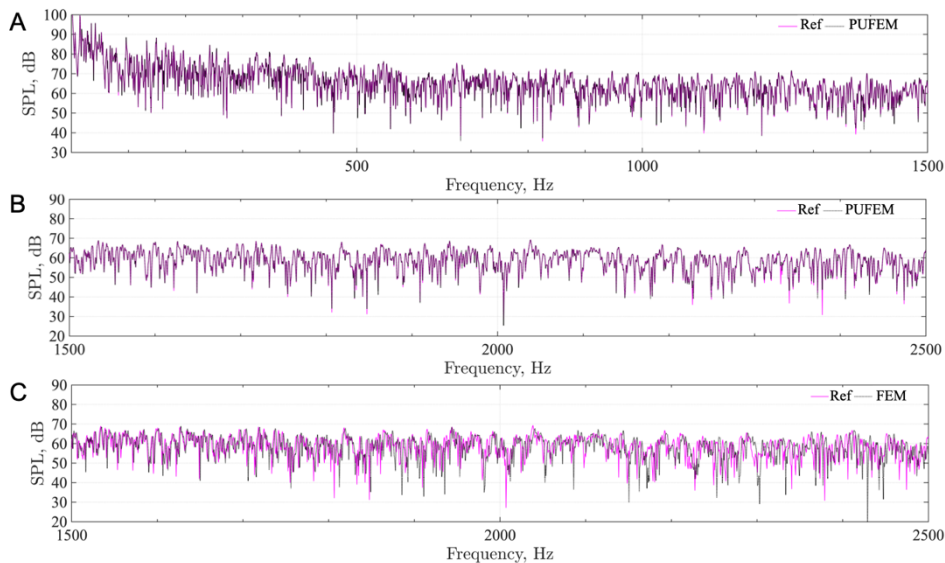


図2 PUFEMとFEMによるホール内音場の伝達関数の比較、PUFEMは広帯域に渡って、FEMよりも、高精度な予測が実現できている。

③3次元のPUFEMによる音響数値解析においては、平面波エンリッチメントのために単位球を離散化する必要がある。単位球の離散化には様々な方法が存在し、選択には任意性があるものの、どの方法が有効であるかは十分には検証されていない。また、2次元解析と同様に、多周波数解析のための、要素節点への適切な数の平面波を重畳するためのルールについても未確立である。そこで、3次元解析のための適切な平面波エンリッチメント手法を確立することを目的として、立方体室の音場解析を対象に、3種類の単位球の離散化手法について、平面波数と誤差の収束性の関係を検討した。検討した単位球の離散化手法の中では、N個の荷電粒子系の一般化された静電ポテンシャルエネルギーを勾配降下法を用いることで最小化し、単位球の様なテッセレーションを生成する方法が最も良好な性能を示した。あわせて、3次元PUFEMにおいても、適切な平面波エンリッチメントのもと、従来FEMに比べ著しく少ない自由度で、より高精度な解析が可能であることを明らかにした。しかし、平面波数の増加に対して誤差が単調に減少せず、離散的な収束を示すことが明らかとなったことから、現段階では誤差が収束する平面波数を事前に予測することは未だ困難といえる。今後、これを克服するためのいくつかのアイデアを検証していく予定である。

(2) 各種吸音材料を扱うための拡張作用境界条件の実装

信頼性の高い音環境予測のためには、室内音響を調整するための音響材料の特性を的確に数値シミュレーションに組み込む必要がある。本研究では音響材料の中でも、拡張作用の扱いが必要となる微細穿孔板吸音体と通気性膜吸音体を的確に扱うために、内部吸音境界条件に基づく定式化を新たに提案し、伝達マトリクス法による理論解析と音響管法による実測値との比較からその基礎的な妥当性を明らかにするとともに、2次元オフィスモデルを対象とした数値実験により、従来FEMと比べて、単一の粗いメッシュのもと、より高精度な解析が可能であることを明らかにした。なお、本定式化は、あらゆる有限要素を用いたPUFEMに適用可能である。更に、音響管法シミュレーションによる不均質な構造を持つ吸音体の吸音特性予測への適用性を検証した。不均一な孔分布をもつ微細穿孔板吸音体を対象として、提案法を用いることで、従来FEM

やアドミタンス合成法による理論予測に比べ、より実測値に近似する吸音特性予測が可能であることを示した。なお、PUFEM によれば、音響管内音場は、均質な吸音体の場合、進行波と後退波の重ね合わせで十分表現可能であり、メッシュについても、波長よりも数倍大きなサイズの要素で離散化したメッシュを用いて、従来 FEM に比べて飛躍的に高精度な予測が可能である。また、不均質な吸音体の場合においても、比較的少ない平面波数の重ね合わせで管内音場を表現できることを確認した。成果の一部については、英文学術誌 *Applied Acoustics* 誌[3]に掲載されている。なお、本研究では、共鳴器型吸音体として、微細穿孔板吸音体を対象としたが、基本的に使用するインピーダンスモデルを変更することで、あらゆる共鳴器型吸音体をモデル化できる。例えば、近年、メタサーフェスを構成する要素として多用される、マイクロスリットパネル吸音体などもモデルすることが可能である。

(3) 疎行列解法、及び、OpenMP による並列計算による効率化

PUFEM による音響数値解析手法は、従来 FEM に比べ、全体行列が密となるもののスパース性の高い行列構造をもち、この行列構造をうまく活用することで、計算の効率化が期待できる。そこで、係数行列の非ゼロ要素成分のみの保持で連立一次方程式を解くことができる疎行列解法の適用を行なった。疎行列解法として、ロバストな計算が可能な疎行列直接解法である PARDISO と反復解法の 2 種について検討した。いずれも非ゼロ要素の格納は CRS 形式に基づく。このうちより省メモリな反復解法については、簡単な前処理では収束せず、高度な前処理が必要であることを確認した。一方、疎行列直接解法は反復解法に比べ多くのメモリを必要とするものの、PUFEM では必要な自由度を大きく圧縮できることから、FEM に比べ、より高周波数までロバストな直接解法を活用できる利点があることを明らかにした。また、PUFEM では要素行列生成部が演算のホットスポットとなるため、この部分の効率化が極めて重要となる。そこで、共有メモリ型並列計算機での並列化に有用な OpenMP を用いて要素行列生成部を含む PUFEM コードの並列化を実施した。結果として、PUFEM による音響数値解析手法では、要素行列生成部の並列化によって、FEM と比べて大幅な計算時間の短縮ができる可能性を明らかにした。

以上、本研究によって、将来的に効率的な室内音響シミュレーション技術となりうる新しい波動音響解析手法の基礎を構築できたものと考えている。近年の波動音響解析による室内音響解析技術の研究動向については、FEM による室内音響解析技術の歴史・課題・最先端技術・今後の方向性をまとめた 2023 年公表のレビュー論文[4]にもあるとおり、国内外において、時間領域での手法開発が活発である。一方、本研究は位置づけとして、時間領域解析技術に比べ、音響材料のモデリングにより優位性のある周波数領域解析技術に着目し、より効率的な周波数領域での次世代の室内音響予測技術の開発を目指したものである。国内外でのインパクトについても、先のレビュー論文[4]において、本研究の成果[1-3]が「6.Challenge and State-of-the Art」の章に引用されており、高い注目を集めているとともに、今後の周波数領域での室内音響予測技術の一つの方向性を提案できたのではないかと考えている。今後の展望として、本研究によって、適切なパラメータ設定に基づく PUFEM による音響数値解析手法によれば、従来 FEM に比べ、極めて高精度なインパルス応答の予測が可能であることが明らかとなったことから、頑健な 3 次元解析手法に関する研究を進めることで、極めて信頼性の高い室内音響の予測が実現できるものと考えている。また、申請者は別プロジェクトにおいて、あらゆる時間及び周波数領域有限要素解析による音圧波形を用いて、空間音響を再現するための手法を提案している。この手法によれば、球面調和展開に基づく音場再現法であるアンビソニックスと頭部伝達関数を用いて、バイノーラル可聴化が可能である[5]。この可聴化技術に PUFEM により計算した高精度なインパルス応答を用いることで、例えば、今後更なる発展が期待できる VR 空間において、より信頼性の高い音環境の提示が可能であると考えており、今後、研究を進めていく予定である。

参考文献

- [1] K. Tamaru, T. Okuzono, S. Mukae, K. Sakagami, Exploration of efficient numerical integration rule for wideband room-acoustics simulations by plane-wave-enriched finite-element method, *Acoustical Science and Technology*, 2021, 42(5), 231-240 (2021) <https://doi.org/10.1250/ast.42.231>
- [2] S. Mukae, T. Okuzono, K. Sakagami, On the Robustness and Efficiency of the Plane-Wave-Enriched FEM with Variable q-Approach on the 2D Room Acoustics Problem. *Acoustics*, 4, 53-73 (2022) <https://doi.org/10.3390/acoustics4010004>
- [3] S. Mukae, T. Okuzono, K. Tamaru, K. Sakagami, Modeling microperforated panels and permeable membranes for a room acoustic solver with plane-wave enriched FEM, *Applied Acoustics*, 185, 108383 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108383>.
- [4] A.G. Prinn, A Review of Finite Element Methods for Room Acoustics, *Acoustics*, 5, 367-395 (2023) <https://doi.org/10.3390/acoustics5020022>
- [5] T. Yoshida, T. Okuzono, K. Sakagami, Binaural Auralization of Room Acoustics with a Highly Scalable Wave-Based Acoustics Simulation, *Appl. Sci.* 13, 2832 (2023) <https://doi.org/10.3390/app13052832>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tamaru Kanako, Okuzono Takeshi, Mukae Shunichi, Sakagami Kimihiro	4. 巻 42
2. 論文標題 Exploration of efficient numerical integration rule for wideband room-acoustics simulations by plane-wave-enriched finite-element method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Acoustical Science and Technology	6. 最初と最後の頁 231 ~ 240
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1250/ast.42.231	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 Mukae Shunichi, Okuzono Takeshi, Tamaru Kanako, Sakagami Kimihiro	4. 巻 185
2. 論文標題 Modeling microperforated panels and permeable membranes for a room acoustic solver with plane-wave enriched FEM	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Acoustics	6. 最初と最後の頁 108383 ~ 108383
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apacoust.2021.108383	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 Mukae Shunichi, Okuzono Takeshi, Sakagami Kimihiro	4. 巻 4
2. 論文標題 On the Robustness and Efficiency of the Plane-Wave-Enriched FEM with Variable q-Approach on the 2D Room Acoustics Problem	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acoustics	6. 最初と最後の頁 53 ~ 73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/acoustics4010004	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 向江俊一、奥園健、阪上公博
2. 発表標題 Partition of Unity FEMによる室内音場解析-頑健な平面波数の設定に関する検討-
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022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-微細穿孔板と通気性膜のモデル化-
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 向江俊一、奥園健、草鹿みどり、田丸加奈子、阪上公博
2. 発表標題 Partition of Unity FEMによる不均質なMPP吸音体の吸音特性の予測
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 奥園健、阪上公博
2. 発表標題 Partition of Unity FEMによる室内音場解析-従来FEMとの計算コストの比較-
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

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 Partition of Unity FEMによる3次元室内音場解析に関する基礎的研究
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 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 FEM による 2 次元室内音響解析手法の頑健性と効率に関する検討
3. 学会等名 建築音響研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥園健、吉田卓彌
2. 発表標題 室内音響の高精度かつ高効率な可視化・可聴化のための波動音響解析技術-PUFEM と時間領域 FEM-
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2023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
---------	---------