

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18167

研究課題名(和文)波動数値シミュレータによる次世代吸音構造を有する建築の音響設計手法の開発

研究課題名(英文) Development of acoustic design methods of architectural space with next-generation sound absorbing structures using wave-based numerical simulator

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)：近年、衛生面・リサイクル性・デザイン性などに優れた微細穿孔板(MPP)と通気性膜(PM)を用いた吸音構造の開発が活発に行われている。本研究では、これらMPP・PM吸音構造を有する実大の室内音場を有限要素法により周波数領域・時間領域において効率的に予測する手法を開発した。また、数種のMPP・PM吸音構造を対象に実装時の吸音性能を評価すると共に、効果的な設置形態を検討し、これらの吸音構造を室内音響の調整において効果的に活用するための知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Recently, microperforated panel (MPP) and permeable membrane (PM) sound absorbing structures, which have superior material properties from the perspective of hygiene demands, recyclability and flexibility of design, have been developed intensively. In this research, prediction methods of sound field in practical sized rooms with MPP and PM sound absorbing structures were developed using finite element methods in time and frequency domains. In addition, the absorption performance of some absorbing structures was evaluated under actual installed conditions, and the effective sound absorber location was explored, in order to use MPP and PM absorbing structures effectively in room acoustic applications.

研究分野：建築環境工学 建築音響学 計算音響学

キーワード：室内音響 吸音材料 波動数値解析 有限要素法 微細穿孔板 通気性膜

1. 研究開始当初の背景

快適な音環境を有する建築空間の実現には、室容積・室形状の適切な設計とともに、吸音材・拡散体・平坦面を適切に組み合わせ配置した内装設計が重要である。中でも吸音材は残響調整や騒音レベル低減に重要な役割を果たす。近年、この吸音材に関して、健康面への配慮から従来のグラスウールに代表される繊維系多孔質材を使用せずに、比較的広帯域な吸音性能を得られる MPP (直径 1 mm 未満の微細孔を開孔率 1%程度で開けた厚さ 1 mm 未満の薄板材料) と通気性膜 (各種樹脂、ガラスなどの繊維素材で作成された通気性膜材) の 2 種が次世代吸音材料として注目を集めている。これらはデザイン性・リサイクル性・耐久性・衛生面にも優れ、かつ、軽量で施工性も良いため、積極的な活用が期待されており、国内外の多くの研究機関において、MPP と通気性膜を用いたより高性能な吸音構造の開発が行われている。しかし、これまでに提案されている各種 MPP・通気性膜吸音構造を室内音響の調整に効果的に活用し快適な音環境の空間を作るには、これら吸音構造を実装した空間の音響性能予測手法を設計ツールとして整備すると共に、効果的な吸音処理を可能とするために実装時における吸音性能を評価し効果的な設置形態を明確化することが重要である。しかし、現状、これらについて十分な研究開発は行われていない。

2. 研究の目的

以上の背景を鑑み、本研究では音響伝搬の支配方程式である波動方程式を有限要素法 (FEM) などの計算力学的手法により数值的に解く波動音響解析手法に基づき、次世代吸音構造を有する建築の高精度な音環境予測技術を構築する。さらに、同吸音体を適切に使用するための室内音響設計指針の確立を目指す。

3. 研究の方法

研究代表者は、波動音響数値解析手法の中でも、本質的に複雑形状の取り扱いに優れ、汎用性の高い FEM に着目し、高性能な音場解析手法を開発してきた。具体的には、高性能音響要素 (1 次、2 次)、クリロフ部分空間反復法、各種並列計算法、の使用を核とした大規模音場解析のための時間・周波数領域 FEM を開発しており、これを基礎とし研究の効率化を図る。

本研究では、まず技術的基盤となる実用性重視の低計算コストな FEM 音環境予測技術を構築する。次に、応用的展開として、各種次世代吸音構造を適用した実大の建築音場を開発手法により解析し、音響設計の初期段階で活用可能な設計指針の整備を試みる。具体的には、以下の通り研究開発を展開する。

- (1) 研究代表者が開発してきた手法の中から、単位自由度あたりの計算コストが最も低

い修正積分則 (MIR) を利用した高性能 1 次要素に基づく時間・周波数領域 FEM を基礎とし、MPP・通気性膜を有する室内の音響伝搬を時間・周波数領域において高精度に予測する手法を開発する。時間領域解析手法については、事前検討において基礎的な有効性を確認した 1 階常微分方程式に基づく陽的な手法についても新たに提示する。

- (2) 開発手法の妥当性は、音響管法を模擬した数値実験を通して、解析解 (等価電気回路理論値) との比較により確認し、併せて、開発手法の誤差特性を検証する。さらに、現場での吸音特性測定手法である EA 法による測定値との比較により吸音モデルのさらなる妥当性を示す。
- (3) 開発手法の優位性を示すため、波動音響数値解析における従来の吸音体の吸音モデルである表面インピーダンスモデルとの比較を実施する。表面インピーダンスモデルは、吸音体の表面インピーダンスの入射角依存性を無視した簡略化モデルであるが、この入射角依存性を無視する影響について、数值的・理論的に検討する。
- (4) 開発手法を用いて、各種 MPP・通気性膜吸音体を設置した実大室内を対象とした音場解析を実施し、実装時の吸音性能を各種音響物理指標 (残響時間、EDT、 C_{50} など) により評価するとともに、効果的な設置形態・より高性能な吸音構造を明らかにする。

4. 研究成果

本研究の主要成果は下記の通りである。

- (1) 時間・周波数領域 FEM による次世代吸音構造を有する建築の音環境予測技術の構築

- ① 周波数領域解析手法について、MPP と通気性膜吸音構造を有する室内音場を予測するための 3 次元解析手法を開発した。空間の離散化には、MIR を用いた高性能 8 節点一次六面体要素、MPP・通気性膜の離散化には、それぞれ 8 節点一次六面体 MPP 要素、同通気性膜要素、を用いるものである。MPP・通気性膜ともに材が非常に薄いことから質量のみを考慮した運動方程式により、材の振動の影響を考慮した。MPP の微細孔の効果は Maa のインピーダンスモデル、通気性膜の通気抵抗に関しては流れ抵抗の定義式により考慮している。開発手法では、MPP・通気性膜両面に対する振動境界条件式により、室内音場と吸音体背後の場を結合し、従来の表面インピーダンスモデルでは考慮できない吸音体内部の音波伝搬を考慮可能とした。

また、本手法による multi-frequency analysis 効率化のための線形方程式の反復解法を選定した。同方程式の係数行列が複素対称行列となることから、同行列

用の4種の解法(COCC法, COCR法, CSQMR法, CSQMOR法)を選択し、MPP天井吸音体を有する室内音場の解析を通して性能を比較した。結果として、CSQMOR法が最も効果的であることを明らかにした。(図1)

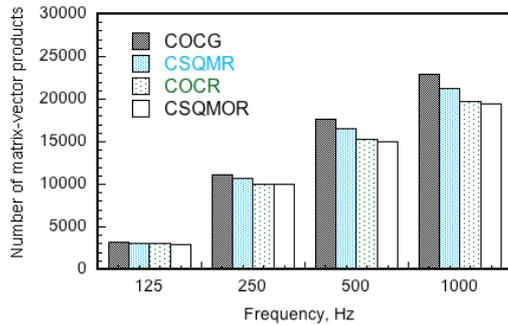


図1 CSQMOR法が周波数によらず最も演算量(行列ベクトル積数)が少ない。

さらに、開発手法の妥当性を、音響管法を模擬した数値実験を通して確認した。解像度の異なる3種のFEメッシュを使用し、単一MPP吸音体の吸音特性を求め、等価電気回路理論値ならびに従来の8節点六面体要素を用いるFEMと比較した。開発手法の解はメッシュ解像度の向上に従い理論値に収束し、従来要素における経験則(波長あたり10要素程度)でのメッシュの解より高精度な解が波長あたり5要素程度でのメッシュで得られること(図2)を示した。また、提示した吸音モデルの妥当性を背後ハニカム構造としたMPP吸音体のin-situ測定値との比較により示した。(図3)

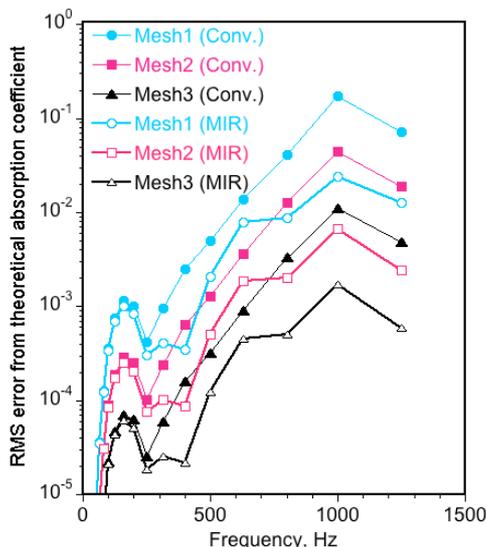


図2 開発手法(MIR)は波長あたり5要素程度でのメッシュ(Mesh1)で、従来法(Conv.)での経験則によるメッシュ(Mesh2)より誤差(垂直入射吸音率の理論値からの差)が小さい。

② 時間領域解析手法については、通気性膜吸音構造を有する室内音場予測のため

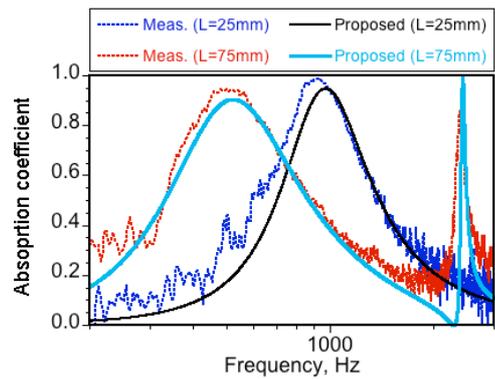


図3 背後ハニカムコアとした吸音体(厚さ25mmと75mm)に対するMPPの提案モデル(Proposed)とEA法によるin-situ測定値(Meas.)の比較。

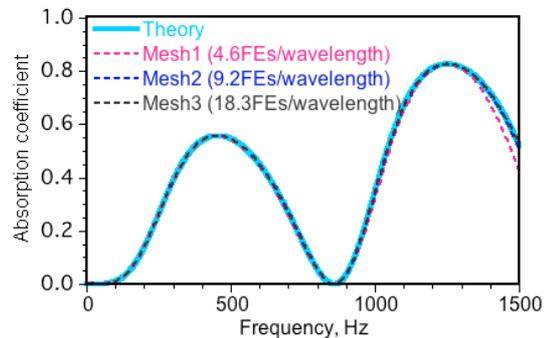


図4 開発した2階ODEスキームにおける解の収束。より高解像度のメッシュ使用により理論吸音率に収束し、波長あたり5要素程度のメッシュでも良好な結果が得られている。

の1階・2階常微分方程式(ODE)に基づく3次元解析手法を開発した。いずれも分散誤差低減のためのMIRを用いた8節点六面体要素により空間を離散化し、通気性膜モデル化のための時間領域FEモデルを提示した上で3次元解析用の8節点六面体膜要素を導出した。周波数領域解析同様、膜両面に振動境界条件を課し、室内音場と吸音体内部場を結合することで吸音体内部の音波伝搬を考慮できる。

なお、当初提案の1階ODEに基づく陽的スキームは、減衰項に関わる音圧の時間微分項への後退差分近似の適用に起因して、安定性が境界面のインピーダンス値に依存し、吸音が大きい場合、非効率となることが判明した。そこで、この安定性悪化を克服するため1次精度前進・後退差分近似の併用と集中減衰行列の使用による新たな陽的スキームを構築し、その有効性を示した。ただし、この新スキームは膜を考慮した場合、減衰行列の集中化ができず、陰的なスキームとなる。しかし、演算部に適用した線形方程式の反復法の収束性は2階ODEに基づくスキームに比べ良好であり、今後の展開として、さらなる効率化につい

でも見通しを得ている。

提案法の妥当性・メッシュの解像度向上に伴う解の収束は音響管法に基づく数値実験により確認した(図4)。ただし、1階ODEに基づくスキームでは、2階ODEスキームに比べ、メッシュの解像度に対する解の収束が遅く、膜に接する要素においてMIRが機能していない可能性が示唆され、この克服が今後の課題となった。

- ③ MPP・通気性膜吸音体のモデル化に関して、その吸音を適切に扱うには、背後空気層の直接的なモデル化(拡張作用モデル)が必要であることを明らかにした。背後空気層の音響インピーダンスの入射角度依存性の無視は、大きな誤差を生じること、等価電気回路理論を用いた解析により理論的に示し、MPP・通気性膜天井吸音体を実装した矩形室の音場解析を通してその影響を数値的に示した(図5)。特に従来の表面インピーダンスモデルは、低域において、擦過角入射の音波に対して吸音を過大評価する。

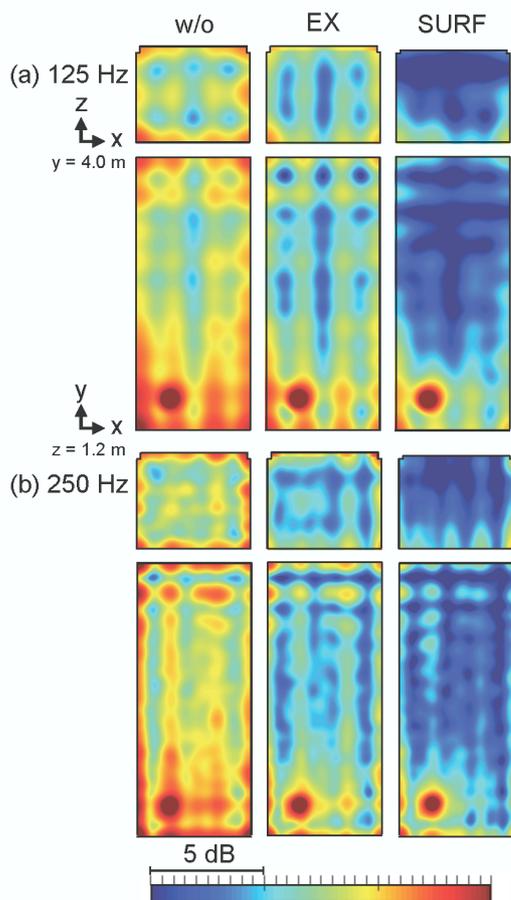


図5 背後空気層内の音波伝搬を適切に扱う拡張作用モデル(EX)と表面インピーダンスモデル(Surf)による室内音圧レベル分布の比較。MPP天井吸音体未設置時(w/o)と比べ、SurfはEXより吸音を過大評価している。

(2) 室内音響設計指針の確立

- ① 会議室程度の矩形室に設置した単一MPP天井吸音体に吸音性能について、中音域では減衰曲線の湾曲により残響時間の低減は期待できないものの、主観的な残響感や音声明瞭度に関しては知覚できる改善効果が得られることを示した。効果的な吸音体配置に関して、背後ハニカム構造としたMPP吸音パネルを対象に3種の吸音体配置(図6)を設定しそれぞれの吸音性能を比較した。配置によらず、典型的な非拡散音場の減衰性状を示したが、湾曲の生じる時間は吸音体配置により変化し、天井面のみ処理に比べ、天井・側壁処理の方がより遅い時間に湾曲が生じ、さらに側壁上部より中央部を処理する方が、湾曲がより遅れることを示した(図7)。主観的な残響感や音声の明瞭性の改善効果についても、天井と側壁中央部の処理が最も効果的であった。

- ② 従来の単一通気性膜吸音体の欠点である特定周波数で吸音率が0となるノッチを解消する、より高性能な吸音体として、異なる厚さの複数の局所作用性空気層をもつ通気性膜吸音体アレイを提案し、従来の吸音体に比べ、広範な入射角度の音波に対して、広帯域に高い吸音率を示すことを数値的に明らかにした。また、その吸音メカニズムとして、ある厚さの空気層が持つノッチでの吸音率低下を他の厚さの空気層による吸音で補償することで、広帯域な吸音を得られること(図8)、膜の面密度あるいは流れ抵抗が小さい場合に吸音体表面での粒子速度に大きな差が生じ、過剰吸音が生じること、面密度が $0.5, 1.0 \text{ kg/m}^2$ の膜で流れ抵抗が空気特性インピーダンスと同程度あるいは2倍程度の場合には過剰吸音は抑制されること、を明らかにした。

(3) 総括

以上、実大の建築音場を対象に、MPP・通気性膜吸音体の吸音特性の周波数・入射角依存性を考慮した波動数値解析を可能とする技術基盤を構築し、数種の吸音体に対して実装時の吸音性能・効果的な設置形態を検討した。実大音場を対象としたこのような試みは国内外において現状見られないことから、本研究成果は先駆的と考えている。開発した技術は、今後、室内音場予測技術としてだけでなく、吸音体実装時の吸音性能の評価まで含めた吸音体開発技術としての活用も期待される。また、ここで提示したMPPのモデル化技術は、従来の共鳴器型吸音体(孔あき板、スリット型吸音体)のモデル化においても、低計算コストな拡張作用性境界モデルとしての活用が期待でき、今後その適用性についても検討を進める予定である。

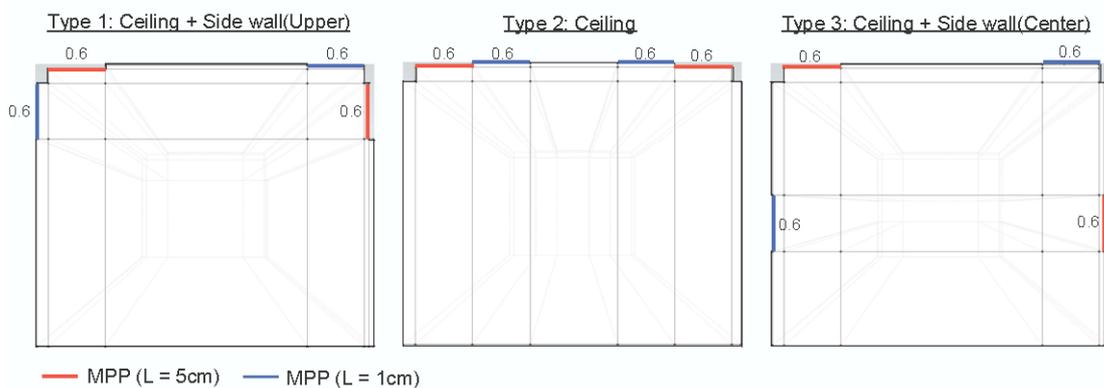


図 6 3 種の吸音体配置 ; Type1: 天井+側壁上部を部分的に吸音処理、Type2:天井のみを部分的に吸音処理、Type3:天井+側壁中央部を部分的に吸音処理、吸音体サイズは、幅 0.6m x 奥行 8.55m。主要吸音帯域が異なる厚さ 0.05m (赤色) と 0.01m (青色) の 2 種の吸音体を設置。

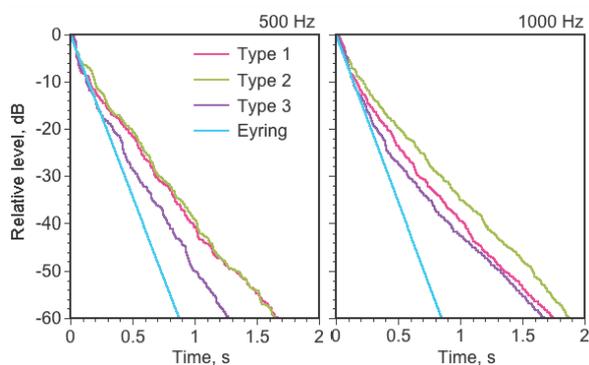


図 7 中音域における 3 種の吸音体配置での減衰曲線の比較。Eyring の理想的な減衰曲線と比較して減衰曲線の湾曲が生じているが、Type3, 1, 2 の順で湾曲の生じる時間が遅くなっており、Type3 が最も受音点近傍の x 軸方向 (短辺方向) 軸波を低減できている。

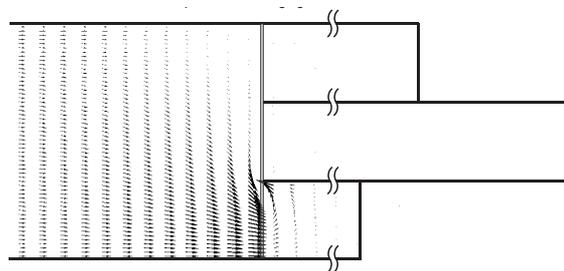


図 8 通気性膜吸音体アレイにおけるノッチ周波数での音響エネルギーの流れ (過剰吸音が生じる場合)。上から 3 番目の空気層への激しい音響エネルギーの流入が確認できる。上から 2 番目の空気層のノッチでの吸音率低下を 3 番目の空気層による吸音で補償している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① 吉田卓彌、奥園健、阪上公博、長方形要素を用いた陽的時間領域有限要素法による室内音場解析のための修正積分則、日本音響学会誌、査読有、72(7)、2016、367-373
- ② Takeshi Okuzono, Takumi Yoshida, Kimihiro Sakagami, Toru Otsuru, An explicit time-domain finite element method for room acoustics simulations: Comparison of the performance with implicit methods, Applied Acoustics, 査読有、104, 2016, 76-84
DOI: 10.1016/j.apacoust.2015.10.027
- ③ Takeshi Okuzono, Kimihiro Sakagami, A time-domain finite element model of permeable membrane absorbers, Acoustical Science and Technology, 査読有、37, 2016, 46-49
DOI: 10.1250/ast.37.46

- ④ Takeshi Okuzono, Kimihiro Sakagami, A comparison of absorption models of microperforated panel absorbers on room acoustics simulations using finite element method, Proceedings of the 12th Western Pacific Acoustics Conference, 概要査読有、2015, 63-66
DOI:10.3850/978-981-09-7961-4_O4000037
- ⑤ Takeshi Okuzono, Kimihiro Sakagami, A simple frequency domain finite-element formulation for predicting absorption characteristics of microperforated panel absorbers, Proceedings of the 22nd International Congress on Sound and Vibration, 概要査読有、2015, 1-8

[学会発表] (計 19 件)

- ① 奥園健、小規模矩形室に設置した MPP 吸音体の吸音効果に関する有限要素解析、2017 年日本音響学会春季研究発表会、2017.3.16、明治大学 (神奈川県)
- ② 吉田卓彌、奥園健、阪上公博、一階常微分方程式に基づく 3 次元時間領域有限要素

解析による通気性膜吸音体の取り扱い、
2017 年日本音響学会春季研究発表会、
2017.3.16、明治大学（神奈川県）

- ③ 上西宏治、奥園健、阪上公博、通気性膜吸音体アレイの吸音メカニズムに関する有限要素解析、2017 年日本音響学会春季研究発表会、2017.3.16、明治大学（神奈川県）
- ④ 奥園健、阪上公博、新田堯央、MPP 吸音体の吸音特性の in-situ 測定に関する研究-局所作用性材料を対象とした検討-、2017 年日本音響学会春季研究発表会、2017.3.15、明治大学（神奈川県）
- ⑤ Takeshi Okuzono, Kimihiro Sakagami, Numerical study on the absorption performance of MPP sound absorber installed in small rectangular rooms, 5th Joint Meeting ASA and ASJ, 2016.12.1, ホノルル（アメリカ）
- ⑥ Takeshi Okuzono, Kimihiro Sakagami, Limp microperforated panel finite elements and its application, 5th Joint Meeting ASA and ASJ, 2016.11.28, ホノルル（アメリカ）
- ⑦ 奥園健、阪上公博、MPP 吸音体を有する室内音場の 3 次元有限要素解析、2016 年日本音響学会秋季研究発表会、2016.9.15、富山大学（富山県）
- ⑧ 奥園健、阪上公博、勝山晃裕、通気性膜吸音体の吸音特性予測のための時間領域有限要素解析手法、2016 年日本音響学会春季研究発表会、2016.3.9、桐蔭横浜大学（神奈川県）
- ⑨ 吉田卓彌、奥園健、阪上公博、吸音を有する室内音場解析のための安定的な陽的時間領域有限要素法、2016 年日本音響学会春季研究発表会、2016.3.9、桐蔭横浜大学（神奈川県）
- ⑩ 奥園健、吉田卓彌、阪上公博、大鶴徹、An explicit time-domain finite element method for room acoustics simulations with frequency-independent finite impedance boundary, 建築音響研究会、2015.12.22、舞鶴工業高等専門学校（京都府）
- ⑪ 奥園健、阪上公博、吉田卓彌、陽的時間領域有限要素法による室内音場解析-分散誤差の理論解析、2015 年日本音響学会秋季研究発表会、2015.9.17、会津大学（福島県）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

奥園 健 (OKUZONO, Takeshi)
神戸大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：40727707

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()