

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04460

研究課題名（和文）建築材料のランダム入射吸音率の実用的評価法の開発

研究課題名（英文）Development of practical evaluation method of random-incidence absorption coefficient of building materials

研究代表者

岡本 則子 (Okamoto, Noriko)

大分大学・理工学部・准教授

研究者番号：00452912

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、アンサンブル平均による建築材料の吸音測定法（EA法）により測定された吸音特性から、ランダム入射吸音率の近似値を得る手法を提案した。具体的には、EA法により測定されるランダム入射時のノーマル音響インピーダンスから統計入射吸音率を算出した。拡散音場と見なせる残響室で測定した残響室法吸音率と比較した結果、吸音率の低い材ではParisの式、吸音率の高い材ではLondonの式を用いた統計入射吸音率が、残響室法吸音率に近似した。また、音響管法に比べ、EA法による統計入射吸音率は、残響室法吸音率との対応が良好であった。以上、提案手法によりランダム入射吸音率を予測できる可能性を示唆する結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案手法は一部の研究機関のみに設置されている残響室等の音響実験室を必要としないため、従来の残響室法に比べ、飛躍的にランダム入射吸音率の取得が容易になると考えられる。これまで吸音材料の開発は主に建材メーカーや音響の研究者によって行われてきたが、建築設計者や建築材料の研究者にとっても比較的身近な存在になる可能性があり、既存の材料を組み合わせた意匠性・吸音性の優れた内装仕上げや力学的性能に加え環境的性能も良好な多機能型材料など、健康で文化的な豊かな生活につながる技術開発の一助になると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the authors proposed a method to obtain an approximate value of random incidence absorption coefficient from the value obtained by sound absorption measurement method of materials using ensemble averaging, namely EA method. Specifically, the statistical absorption coefficient using the normal surface impedance of material obtained by EA method is calculated. The correlation coefficient between the statistical absorption coefficient by EA method and the absorption coefficient by the reverberation room method was 0.98, and values by EA method showed a higher correlation with the reverberation absorption coefficient compared to the impedance tube method. Therefore, the proposed method provided results suggesting the predictability of the random incidence sound absorption coefficient.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：吸音率 建築材料 in-situ測定 ランダム入射 アンサンブル平均

1. 研究開始当初の背景

近年、省エネルギーや健康性への意識も相まって、熱、空気、光環境など建築環境への取り組みが活発に行われている。ところが、建築環境の一要素である室内の音環境については、他の環境要素に比べ位置付けが低く、意匠性の観点から、コンクリートやガラスといったほとんど吸音が見込めない建築材料が利用され、残響過多な空間が存在している。また、室内の騒音レベルの増加にも繋がり、特に教育関連施設では、精神・身体機能の発達への影響が危惧されている。このような空間に対して音響設計を行う際、残響時間等の音場の予測が行われるが、用いる予測手法によらず、パラメータとして建築材料の吸音特性は必要不可欠である。その評価量として吸音率が広く用いられ、音波の入射条件からみると、図1に示す3種が定義されている。

これらのうち、ランダム入射吸音率は、材料面に対して、全ての方向から等しい確率で音波が入射する吸音率とされる。室内において常にこのような入射条件を満たすとは限らないが、大きな室ではほぼランダム入射に近い状態が実現されることが多いと考えられるので、実用面で最も重要な吸音性能の評価量となっている。

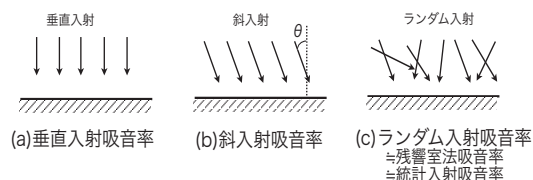


図1: 音の入射条件と吸音率

同吸音率を求める方法として JIS や ISO で規格化された残響室法が挙げられる。この方法は、大型設備である残響室および 10m² 程度の試料が必要である上、測定機関や測定の設定等で測定値が数十%ばらつく[1]とされ、室内音響設計や騒音制御の現場で非効率・資源の浪費が生じる原因となっている。この他、垂直入射吸音率または斜入射吸音率から統計的処理を行うことで算出する、すなわち、ランダム入射吸音率として統計入射吸音率を求める方法があるものの、局所作用性材料への適用に限られる。その上、垂直入射吸音率の測定法である音響管法は、多孔質材料の測定には有効とされるが、試料の支持条件による測定値のばらつきや、実際の施工状態と異なる測定値となることが指摘されている。斜入射吸音率の測定法は、測定で使用する音源や受音点の位置関係の制約があることや反射音の多く存在する実際の建築空間では測定が困難であることが課題であり、無限大と仮定できる大きな試料や無響室が必要とされる。

一方、申請者らはアンサンブル平均による建築材料の吸音特性測定法 (EA 法) の開発を行っている ([2], [3])。同手法は、材料周辺に存在する環境騒音 (三次元空間におけるランダム入射音源と仮定)、受音センサ、周波数分析器のみで測定が行えるため、音響実験施設を必要とせず、材料の吸音特性 (ノーマル音響インピーダンス) を得られる特徴を持つ。また、一般的な建築材料を用いて、種々の室に対するラウンドロビンテストを行い、基本的な普遍性・再現性が得られることを確認している。さらに、材料開発の現場へ EA 法を試行的に適用し、材料表面の仕上げを変化させた場合の測定値の変化や背後構造の違いによる測定値の差異も捉えられることを確認している[4]。しかし、EA 法では、物理的にはランダム入射時のノーマル音響インピーダンス ($Z_{n,EA}$) が測定されることを確認しているものの、 $Z_{n,EA}$ から吸音率を算出する方法は暫定的なものであった。また、前述の残響室法吸音率との関係も、十分に明らかにされていない。

2. 研究の目的

本研究では、現場測定が可能な EA 法の吸音特性を利用することで、特別な音響実験室を必要とせず、室内音響設計に直ちに適用できる「建築材料のランダム入射吸音率の実用的評価法の開発」を目的とする。具体的には、EA 法によるランダム入射時のノーマル音響インピーダンスを用いたランダム入射吸音率の評価手法を構築し、従来法として JIS や ISO で規格化されている残響室法や音響管法による吸音率との比較を通して、適用範囲を明らかにすることを目標とする。

3. 研究の方法

まず、EA 法の概要を示す。図2のように、EA 法は、材料への音波の入射条件としてランダム入射を想定し、材料表面近傍に設置したセンサで測定される伝達関数からアンサンブル平均ノーマルインピーダンスを算出する方法である。ランダム入射音源として、測定対象の周辺に存在する環境騒音を使用するが、不足する場合は、ピンクノイズを出力するスピーカ等の補助音源を使用して測定を行う。

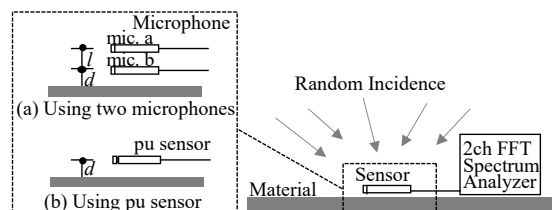


図2 EA 法の測定系のブロックダイアグラム

同方法は、受音センサに2本のマイクロホンを用いる EA_{pp} 法および音圧-粒子速度センサ (pu センサ) を用いる EA_{pu} 法の2種が提案されている。EA_{pp} 法は原理的な曖昧さが含まれるため、本研究では EA_{pu} 法を採用する。EA_{pu} 法は、材料表面の音圧 p と材料に対して法線方向の粒子速度成分 u_n を直接測定できる。従って、 p 、 u_n の伝達関数がインピーダンスとなる。ただし、pu センサは使用前に校正が必要であり、実際には $\langle \cdot \rangle$ をアンサンブル平均として、次式のように補正

値 C_H を乗じて真のインピーダンス Z_{EA} を求める.

$$Z_{EA} = \frac{\langle p \rangle}{\langle u_n \rangle} \cdot C_H \quad (1)$$

なお, 既報[2]では, Z_{EA} を用いて, ρ を密度, c を音速として, 次式に示す Corresponding absorption coefficient : $\langle \alpha \rangle$ を算出している.

$$\alpha_{EA} = \langle \alpha \rangle = 1 - \left| \frac{Z_{EA} - \rho c}{Z_{EA} + \rho c} \right|^2 \quad (2)$$

局所作用性の材料を対象とする場合, 材料表面のノーマルインピーダンス Z_n は, 入射角度に関係なく一定の値となる. すなわち, 同材料の吸音率の算出には(2)式が適用可能で, EA 法の Z_{EA} を(2)式に適用した吸音率と音響管法による垂直入射吸音率は一致すると予想される. また, この EA 法による吸音率にさらに統計的処理を施して求めた統計入射吸音率は, ランダム入射吸音率に相当するので, 残響室法吸音率と一致すると考えられる.

他方, 一般的に使用される建築材料には, 局所作用性でない材料も存在するため, 次に示す方法で統計入射吸音率を算出する.

局所作用が成立する特性インピーダンス Z_n の材料に平面波が角度 θ で入射する場合, 斜入射吸音率 α_θ は次式で表される.

$$\alpha_\theta = 1 - \left| \frac{Z_n \cos \theta / \rho c - 1}{Z_n \cos \theta / \rho c + 1} \right|^2 \quad (3)$$

しかし, 多孔質材等, 一般に使用される材料の多くは入射角によって Z_n が変化する可能性がある. この場合の入射角 θ のノーマルインピーダンスを $Z_{n,\theta}$ とすると, (3)式を次のように書き換えられる.

$$\alpha'_\theta = 1 - \left| \frac{Z_{n,\theta} \cos \theta / \rho c - 1}{Z_{n,\theta} \cos \theta / \rho c + 1} \right|^2 \quad (4)$$

一方, EA 法により測定される Z_{EA} は, Z_n の入射角 θ 依存性を含んだ平均的な吸音特性, すなわち, (4)式の $Z_{n,\theta}$ のアンサンブル平均である. そこで, (3)式の Z_n を Z_{EA} に置き換えると, 次式となる.

$$\alpha_{\theta,EA} = 1 - \left| \frac{Z_{EA} \cos \theta / \rho c - 1}{Z_{EA} \cos \theta / \rho c + 1} \right|^2 \quad (5)$$

本研究では, Paris 並びに London により提案された次式に対し, α_θ を $\alpha_{\theta,EA}$ に置き換えてそれぞれの統計入射吸音率を算出する.

$$\text{Paris: } \alpha_s = \frac{\int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (6), \quad \text{London: } \alpha_s^* = \frac{\int_0^{\pi/2} \alpha_\theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta} \quad (7)$$

4. 研究成果

本研究で用いる試料は, 一般的な建築材料を含む, タイルカーペット (CT), 化粧岩綿吸音板 (DR), グラスウール (GW25), ニードルフェルト (NF), 化粧石膏ボード (GB-D) の 5 種とした. EA_{pu} 法, 音響管法, 残響室法のそれぞれで吸音特性測定を行った.

[EA_{pu} 法] 測定は北九州市立大学の研究室 (室容積:67 m³, 表面積:30 m²) で実施した. 試料サイズは 600 mm×900 mm とし, 室の中央付近の床面に材料を設置した. 音源には, 相互に無相関なピンクノイズを出力する 4 個のポータブルスピーカを用い, ランダムに手で移動させた. 受音点を材料の中央 1 点として 3 回の測定を行い, 評価には 3 回の平均値を用いた. pu センサは, 上限周波数が約 3000 Hz の校正用の音響管で校正した. (2)式により α_{EA} を算出し, 統計入射吸音率として, Paris の式により $\alpha_{s,EA}$ を, London の式により $\alpha_{s,EA}^*$ を求めた.

[残響室法] JIS および ISO を参考に大分大学不整形残響室 (室容積:168 m³, 表面積:180 m², 拡散板設置) で測定した. 材料のサイズは, CT : 10.5 m², DR : 10.8 m², GW25 : 9.9 m², NF : 10.3 m², GB-D : 9.9 m² とした. インパルス応答積分法を用いて, 残響時間 (T_{30}) を算出した. 12 受音点分の T_{30} を算術平均し, 各帯域の残響時間を求めた. 残響室内に試料を設置した状態と空室時の残響時間から残響室法吸音率 α_r を算出した.

[音響管法] 音響管法による広帯域の測定には, 一般的に径の異なる複数本の音響管が必要である. 本研究では, 管の材料や管径の異なる音響管を複数個試作して測定を行った後, 太管には, 内径 100 mm の円形の音響管 (AIT100:日本音響エンジニアリング) を使用し, 細管は, JIS を参考に作製した砲金製で内径 35 mm の円形の細管を使用することとした. 管の一端は密閉型のスピーカユニットになっており, 音源信号としてピンクノイズを出力した. 材料は, 管の内径に合うように切り出した. また, 伝達関数法を用い, ノーマルインピーダンス $Z_{n,0}$ を測定し, 垂直入射吸音率 α_0 を算出した. 太管, 細管でそれぞれ 3 サンプルずつ測定し, 評価には 3 サンプルの

α_0 の平均値を用いた。

図3に、(2)式を用いた α_{EA} および α_0 を材料毎に比較して示す。GB-Dを除く材料・周波数で、 α_0 に比べ α_{EA} は値が若干高くなっている。NFについては、両者は概ね一致しており、局所作用性の材料であることが示唆される。続いて、図4に、(6)式、(7)式を用いたEA法による統計入射吸音率 $\alpha_{s,EA}$ 、 $\alpha_{s,EA}^*$ を残響室法吸音率 α_r と材料毎に比較して示す。比較のためEA_{pu}法は1/3オクターブバンドに含まれる周波数に対し算術平均した値を用いている。CT、GB-Dでは、 $\alpha_{s,EA}$ と α_r は全周波数で概ね同様の吸音率となった。DR、GW25、NFにおいて、吸音率が0.6以下の周波数帯域では $\alpha_{s,EA}$ と α_r が近く、吸音率が0.6を越える帯域では、 $\alpha_{s,EA}^*$ と α_r が近い値となった。

続いて、EA_{pu}法による統計入射吸音率と残響室法による吸音率の相関図を図5に示す。EA_{pu}法と残響室法の関係について、統計入射吸音率の算出にParisの式を用いた場合は0.98、Londonの式を用いた場合は0.97といずれも強い相関を示した。参考として、音響管法による統計入射吸音率と残響室法による吸音率の相関図を図6に示す。音響管法に比べ、EA法による統計入射吸音率の方が、残響室法吸音率との対応が良好である。

以上、今後、回帰式を用いることで、EA法による統計入射吸音率からランダム入射吸音率を予測できる可能性を示唆する結果を得た。ただし、低周波数域で、EA法による測定値と残響室法吸音率に差が生じているため、EA法の測定精度向上や、共鳴器型吸音機構の材料に対する実験など、適用範囲の明確化に向けたさらなる検討が必要であると考えられる。

<引用文献>

- [1] 牧田他, 残響室法吸音率の測定精度に関する研究(I) 第3回協同比較試験と音場拡散条件の検討, 日本音響学会誌, 24(6), 381-392, 1968
- [2] Takahashi, et al., In situ measurements of surface impedance and absorption coefficients of porous materials using two microphones and ambient noise, Appl. Acoust., 66, 845-865, 2005
- [3] T. Otsuru, et al., Ensemble averaged surface normal impedance of material using an in-situ technique: Preliminary study using boundary element method, J. Acoust. Soc. Am., 125(6), 3784-3791, 2009
- [4] 岡本他, 建築材料の吸音特性の現場測定法による施工状態管理システム開発に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 23(54), 517-520, 2017

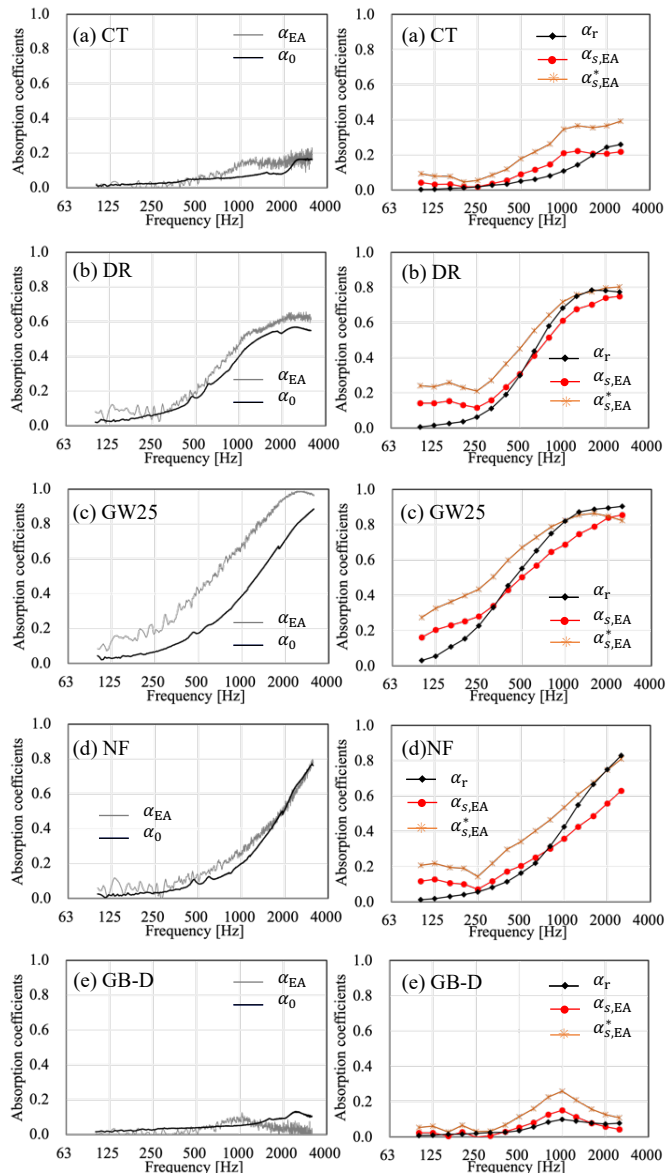


図3 EA_{pu}法による吸音率と垂直入射吸音率の比較

図4 EA_{pu}法による統計入射吸音率と残響室法吸音率の比較

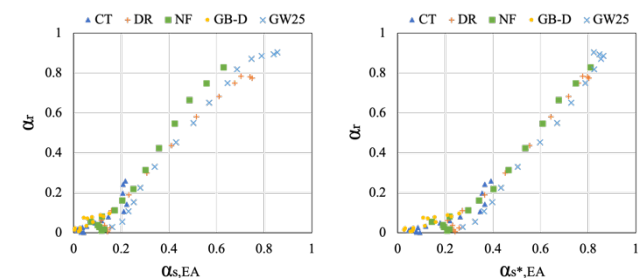


図5 EA_{pu}法による統計入射吸音率と残響室法吸音率の相関図

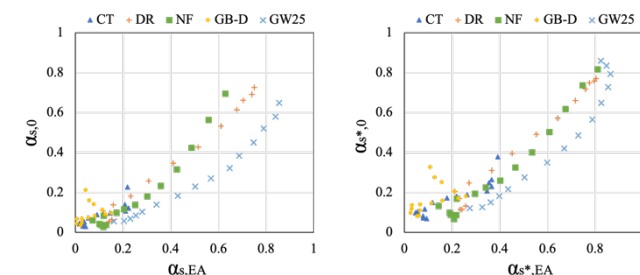


図6 音響管法による統計入射吸音率と残響室法吸音率の相関図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 伊藤歌保, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性のin-situ測定法に関する研究 -音響管法との比較-
3. 学会等名 2018年度第58回日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀池信芳, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性のin-situ測定法 -環境条件と受信センサに関する基礎的検討-
3. 学会等名 2018年度第58回日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Noriko Okamoto, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Kaho Ito
2. 発表標題 In-situ sound absorption measurement method of materials using ensemble averaging - Comparison of proposed method with tube method or reverberation room method -
3. 学会等名 23rd international Congress on Acoustics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤歌保, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性測定法に関する研究 -高周波数域までを対象とした垂直入射吸音率との比較-
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀池信芳, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性のin-situ測定法に関する研究 - 気流の影響に関する基礎的検討 -
3. 学会等名 2019年度日本建築学会大会(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀池信芳, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性のin-situ測定法に関する研究 - 簡易的な音響管を用いるpuセンサの校正に関する検討 -
3. 学会等名 日本音響学会九州支部第13回 学生のための研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤歌保, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次, 堀池信芳
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性測定法に関する研究 - 高周波数域までを対象とした音響管法および残響室法による吸音特性との比較 -
3. 学会等名 2019年度第59回日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀池信芳, 岡本則子, 大鶴徹
2. 発表標題 音圧-粒子速度センサを用いたアンサンブル平均による建築材料の吸音特性のin-situ測定に関する研究 - センサの校正への簡易的な音響管の適用 -
3. 学会等名 2019年度第59回日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Noriko Okamoto, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Kaho Ito, Nobuyoshi Horiike
2. 発表標題 Comparison between ensemble averaged absorption characteristics of materials using an in-situ technique and those of conventional methods
3. 学会等名 INTERNOISE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Nobuyoshi Horiike, Noriko Okamoto, Toru Otsuru, Reiji Tomiku
2. 発表標題 Ensemble averaged absorption characteristics of materials using an in-situ technique: investigations on influence of wind-induced noise
3. 学会等名 INTERNOISE2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀池信芳, 岡本則子, 富来礼次, 大鶴徹
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性のin-situ測定法 音響管を用いたpuセンサの校正の再現性に関する検討
3. 学会等名 日本音響学会九州支部 第14回学生のための研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀池信芳, 伊藤歌保, 岡本則子, 富来礼次, 大鶴徹
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性測定法に関する研究 残響室法および音響管法との比較
3. 学会等名 日本音響学会建築音響研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀池信芳, 岡本則子, 大鶴徹, 富来礼次, 益田雅大
2. 発表標題 アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性のin-situ測定法に関する研究 高周波数域までを対象とした統計入射吸音率の算出
3. 学会等名 日本建築学会九州支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Noriko Okamoto, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Masahiro Masuda, Arisa Tabaru
2. 発表標題 Calculation of statistical absorption coefficient using ensemble averaged surface normal impedance of material
3. 学会等名 INTERNOISE2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	富来 礼次 (Tomiku Reiji) (20420648)	大分大学・理工学部・教授 (17501)	
研究分担者	大鶴 徹 (Otsuru Toru) (30152193)	大分大学・理工学部・客員教授 (17501)	

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
---------	---------