

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01488

研究課題名（和文）建築部材遮音性能の実験室測定法の信頼性向上と適用範囲拡大に関する研究

研究課題名（英文）Reliability improvement and application scope expansion in the laboratory measurement of sound insulation of building elements

研究代表者

佐久間 哲哉（Sakuma, Tetsuya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：80282995

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、建築部材の遮音性能の実験室測定法に関して、第一に、基準試料を対象とした試験測定および数値解析により音響透過損失の測定精度の検証を行い、測定法および試験室の各種要因の影響を明らかにした。第二に、100Hz以下の低周波域における新たな測定法を試行的に導入し、適用範囲拡大の可能性を検証したところ、特定の条件で若干の精度改善が現れたが、全体として十分な改善に至らなかった。第三に、低遮音性試料の測定精度改善を目標として、小面積試料を用いた測定方法を検証し、音源と試料の位置関係によっては全面試料よりも精度が若干改善される可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建築部材の遮音性能を表す音響透過損失の測定は、建築物の音環境設計や性能評価の根幹となるため信頼性の向上が求められ、特に近年は低周波音問題の増大に伴い、国内外規格の測定法の適用範囲を100Hz以下に拡大することが急務となっている。本研究では、従来法の誤差を定量的に明らかにした上で、新たな測定法を試行し、十分な改善効果は得られなかったものの、測定法の更なる改良の方向性が示された。また、連結試験室まで含めた音響透過損失測定法の数値モデルを構築し、全周波数帯域で解析を実現したことにより、遮音性能予測の実務的利用に近づいた。

研究成果の概要（英文）：Regarding the laboratory measurement method of the sound insulation performance of building materials, we first verified the measurement accuracy of sound transmission loss through test measurements and numerical analysis on reference samples, and clarified the influence of various factors in the measurement procedure and test room. Second, we incorporated a new measurement procedure for the low frequency range below 100 Hz, and verified the possibility of expanding the applicable range. Although a slight improvement in accuracy appeared under certain conditions, sufficient effect was not observed overall. Third, with the goal of improving measurement accuracy for samples with low sound insulation properties, we verified the possibility of measurement using small-area samples. As a result, it was found that depending on the positional relationship between the sound source and the sample, accuracy may be slightly improved compared to full-surface samples.

研究分野：建築音響学

キーワード：建築環境・設備 音・振動環境 遮音 数値解析 音響計測

## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

#### (1) 建築部材の遮音性能測定の実況

建築部材の遮音性能を表す音響透過損失は、隣接する音源室と受音室の開口部に試料を設置し、各室で測定した平均音圧レベルから室間レベル差を求め、試料面積の基準化と受音室の吸音面積の補正により同定される。このような連結試験室を用いた「残響室-残響室法」は国内外で規格化され、従来日本では不整形残響室、海外では吸音体を設置した矩形室が用いられてきたが、今世紀に入り JIS の国際整合化を受けて日本でも後者の矩形試験室が徐々に増えるとともに、試験機関によって室寸法も異なる現状がある。

#### (2) 残響室-残響室法の根本的課題

上記の残響室-残響室法は音源室と受音室の各々において拡散音場を仮定した方法であり、波動モード場が生成される低音域ではその仮定が成立せず、誤差(偏りとばらつき)が増大する。現行規格では経験的に 100Hz 以下を適用対象外としているが、試験室条件と誤差の定量的関係は十分に検証されていない。また、遮音性能が低い部材では音源室と受音室の音場が連成状態に近づくため、二室独立の前提条件が成り立たず、一般に音響透過損失の過大推定が生じる問題も残されている。

### 2. 研究の目的

以上の背景を鑑み、本研究では建築部材の遮音性能の実験室測定法に関して、測定法の信頼性の向上と適用範囲の拡大を目指して、次の3つの課題に取り組む。

- ① 近年日本でも導入が進む矩形試験室において、遮音性能が理論的に明確な膜材料を基準試料として、実験・数値解析により音響透過損失の測定精度を検証する。なお、従来の残響室-残響室法(音圧法)に加えて、部材からの透過パワーを直接計測する音響インテンシティ法についても比較検証を行う。
- ② 室内平均音圧レベルの新たな推定方法として、受音点を従来の室中央部に加えて室隅部にも配置したコーナー法を試行的に導入し、実験により 100Hz 以下を含む低音域における音響透過損失の測定精度の改善効果を検証する。
- ③ 低遮音性試料を対象として、室間の音場の連成を弱めるために試料面積を縮小した上で上記のコーナー法も組み合わせた測定方法を試行し、音響透過損失の過大推定の抑制効果を検証する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 矩形試験室における音響透過損失測定の実験・数値解析

JIS A 1416 のタイプ II 試験室(音源室 64 m<sup>3</sup>、受音室 58 m<sup>3</sup>)において開口部全面(10 m<sup>2</sup>)に基準試料として膜材料を設置し、現行規格に準拠した音源・受音点の配置により音響透過損失測定を実施する(図 1)。試料はポリエステル織物の基材両面を PVC で被覆した非通気性膜とし、面密度は 1.2 kg/m<sup>2</sup> 及び 3.2 kg/m<sup>2</sup> の2種類とする。数値解析では高速多重極境界要素法を適用し、拡散体を含む詳細モデルと含まない簡略モデルにより音源室・受音室と膜材料を連成した定常音場解析を 100~4000 Hz 帯域で実施する。また、音響透過損失の同定では、従来の音圧法に加えて音響インテンシティ法も模擬した計算も行い、質量則に基づくランダム入射時の理論値と実測値・解析値との対応を検証する。

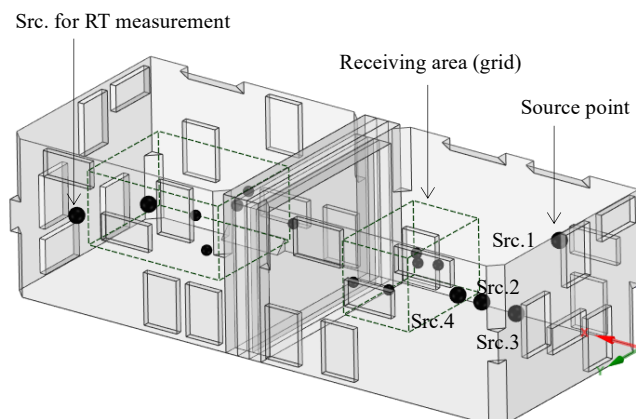


図 1 矩形結合室

(2) 低音域におけるコーナー法及び小面積試料測定の実験

前述の矩形試験室における従来法の測定に対して、周波域範囲を 50~80 Hz 帯域まで拡張した上で、音源及び受音点の配置、室内平均音圧レベルの算出方法を変更したコーナー法による測定を実施し、両者の実測値の理論値との対応性を検証する。コーナー法では、音源室における試料面の反対側の隅部床面上 2 カ所に順次サブウーファを設置し、従来法の中央部 5 点に加えて、音源室では音源及びその直上を除く隅部 6 点、受音室では全ての隅部 8 点に受音点を配置する (図 2)。なお、各室の室内平均音圧レベルの算出では ISO 16283-1 に倣い、中央部と隅部各々の平均音圧レベルをさらに 2:1 でエネルギー重み付き平均を取ることとする。続いて、室間に調整壁を設置し、小面積試料設置用の小開口 (0.76 m<sup>2</sup>) を 3 カ所に設け、従来法及びコーナー法による測定を実施する。測定法に加えて小開口の位置による影響を全面設置時との比較し、小面積試料測定による精度改善を検証する。

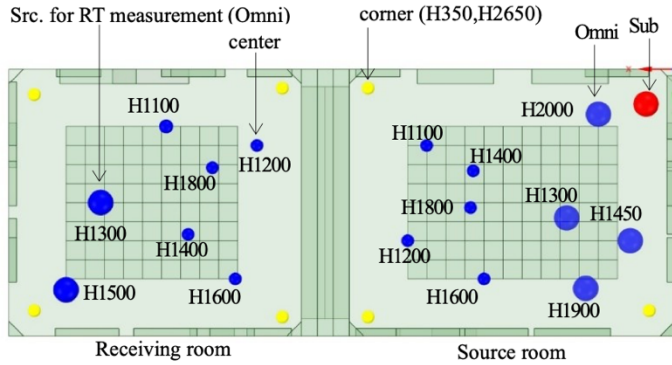


図 2 コーナー法の音源・受音点配置

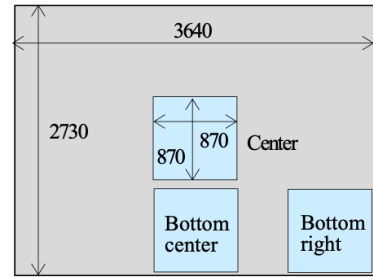


図 3 試料設置用開口部の配置

4. 研究成果

(1) 矩形試験室における音響透過損失の測定・解析精度

①音響透過損失測定の解析方法

試験室の数値モデリングに関して、要素寸法を 1/8 波長以下として、詳細モデルの要素数は 100 Hz では約 2,000、1 kHz では約 140,000、4 kHz では約 2,500,000 となり、簡略モデルの要素数は中高音域で詳細モデルの約 95% となった。室内の境界条件としては残響時間計測から吸音率を同定し、詳細モデルでは拡散体表面の吸音率を 0.5~0.6 程度、簡易モデルでは壁面全面の吸音率を 0.1 程度に設定した (図 4)。最終的な 1/3 オクターブ帯域の音響透過損失の同定にあたり、1/12 オクターブ中心周波数の合成値から概ね 1dB 程度の誤差で算出可能となることが確認された。

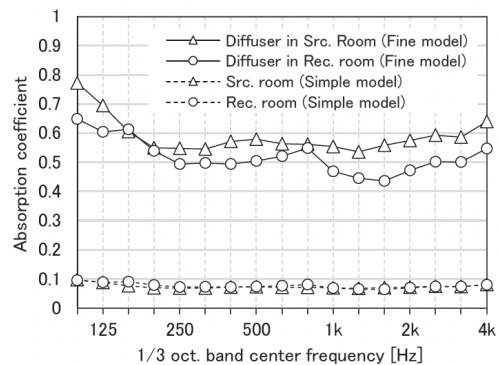


図 4 壁面・拡散体の吸音率

図 4)。最終的な 1/3 オクターブ帯域の音響透過損失の同定にあたり、1/12 オクターブ中心周波数の合成値から概ね 1dB 程度の誤差で算出可能となることが確認された。

②音圧法の模擬精度

音圧法による音響透過損失の詳細・簡略モデルの解析値及び実測値を図 5 に示す。解析値と実測値の誤差は 3 dB 以下となり、全周波数域にわたって良好な対応が得られた。詳細モデルで

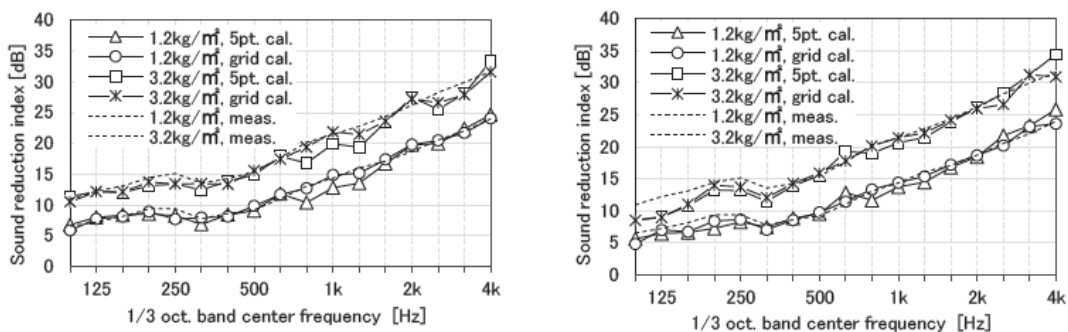


図 5 音響透過損失の解析値・実測値 (左: 詳細モデル、右: 簡易モデル)

は受音点 5 点の場合に中高音域で過小評価が生じたのに対して、簡略モデルでは受音点を多点グリッド配置としても低音域で過小評価の傾向が認められた。数値解析では受音点をある程度増やしても計算負荷はあまり増大しないため、数十 cm 間隔の受音点配置が適当であり、低音域の予測精度を確保する上では詳細モデルが必要であることが確認された。

### ③音圧法と音響インテンシティ法の測定精度

音響インテンシティ法による音響透過損失の解析値、音圧法の実測値及び理論値（ランダム入射・音場入射条件）を図 6 に示す。低音域では音圧法の実測値が理論値より 5 dB 以上過大評価となったのに対して、音響インテンシティ法では理論値に比較的近い値となることが判明した。また、中高音域では音響インテンシティ法の値はランダム入射の理論値にほぼ一致するのに対して、音圧法の値は若干高めとなることも確認された。ただし、315 Hz 帯域では音圧法・音響インテンシティ法ともにディップが生じており、室寸法と関係するものと推測されるが、現時点で発生メカニズムは不明であり、100 Hz 以下の低周波域における音響インテンシティ法の適用性については計測システムも含めて今後の検討課題である。

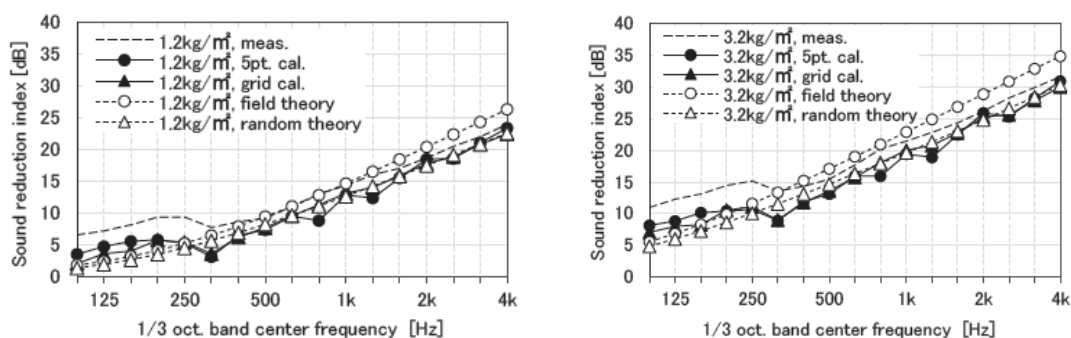


図 6 音響透過損失の解析値（インテンシティ法）・実測値（左：1.2 kg/m<sup>2</sup>、右：3.2 kg/m<sup>2</sup>）

## (2) 低音域における音響透過損失の測定精度改善

### ①コーナー法の適用方法

音響透過損失測定を低周波側に拡張するにあたり、残響時間計測により等価吸音面積を同定した（図 7）。100 Hz 以上とは異なり、50~80 Hz 帯域では値が大きく変化する傾向が現れ、帯域幅が狭いため測定の不確かさが懸念されたため、以降では 63 Hz オクターブ帯域値を用いることとした。コーナー法に関しては、室内平均音圧レベルを従来法と比較したところ、隅部受音点の平均値を導入した場合、音源室・受音室ともに 125 Hz 以上では 5 dB 程度の上昇に対して、100 Hz 以下では 10 dB 程度の上昇となることが確認された。

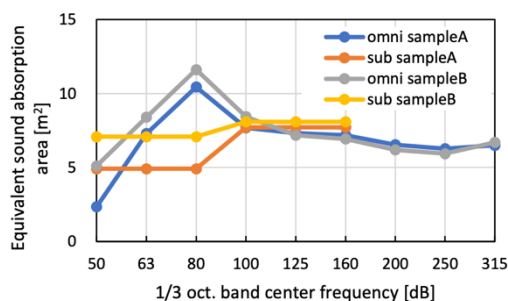


図 7 受音室の等価吸音面積

### ②コーナー法による測定精度改善

試料を室間全面に設置した条件における従来法とコーナー法による音響透過損失の実測値を図 8 に示す。従来法では 250 Hz 以下で理論値を 5~10 dB 程度上回り、特に 80 Hz 帯域では顕

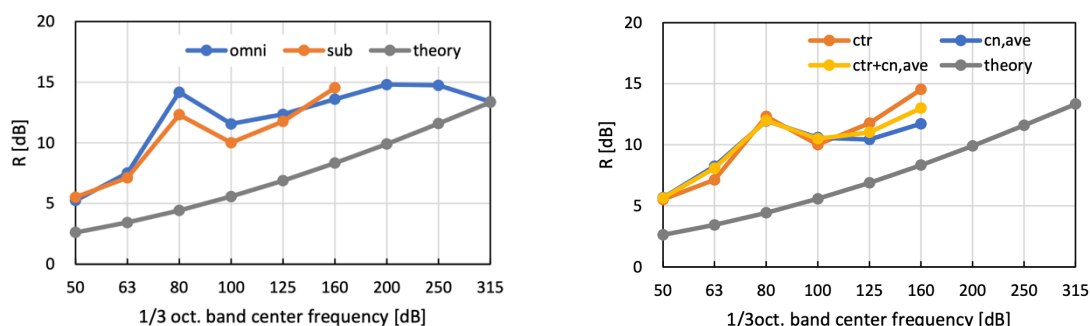


図 8 音響透過損失の実測値（面密度 3.2 kg/m<sup>2</sup>）（左：従来法、右：コーナー法）

著なピークが生じている。このピークは図7の等価吸音面積と対応していることから、吸音面積の1/3オクターブ帯域値を用いる必要性が示唆された。一方、コーナー法に関しては適用を試みたが、100 Hz 以下では過大評価の抑制効果は現れず、むしろ125~250 Hz 帯域で若干効果が得られる結果となった。100 Hz 以下では音源室・受音室ともに室内平均音圧レベルが 10 dB 程度上昇したが、両者が相殺されたものと考えられ、特に入射条件に関する理論的な見直しが必要となった。

### ③低遮音性試料の小面積測定による精度改善

低遮音性の膜材料を図3に示す3カ所の小開口に設置した各条件における従来法とコーナー法による音響透過損失の実測値を図9に示す。従来法では設置位置によらず80 Hz 以上で理論値より顕著に高いのに対して、コーナー法では開口が右下隅部の場合に理論値に比較的近い結果となった。ただし、隅部のサブウーファに対して中央部受音点から算出した場合でもコーナー法に近い結果となっていることから、スピーカと試料の位置関係による効果と推察される。また、開口を中央に設置した場合、コーナー法の効果は全く現れなかった。隅部は室内固有モードの影響を受けにくいことから、開口位置として適切である可能性があるが、今回は開口面積の影響は未検討であり、より詳細な検討が必要である。

### (3) まとめ

本研究では建築部材の遮音性能の実験室測定法に関して当初掲げた3つの課題に対して以下の成果を得た。

- ① 矩形試験室における音響透過損失測定の数値シミュレーションを全周波数域で実現し、特に低音域における従来の音圧法による測定誤差が再現可能となった。また、音響インテンシティ法の模擬により、低音域における過大評価抑制の可能性を示した。
- ② 低音域におけるコーナー法による測定を試みたところ、従来適用範囲外の50~80 Hz では測定精度の改善は現れなかったが、100~250 Hz 帯域では若干の改善が得られることを明らかにした。
- ③ 低遮音性試料を対象とした小面積測定を検討し、スピーカ及び試料用開口を室隅部に設置した場合、低音域における測定精度向上の可能性を示した。

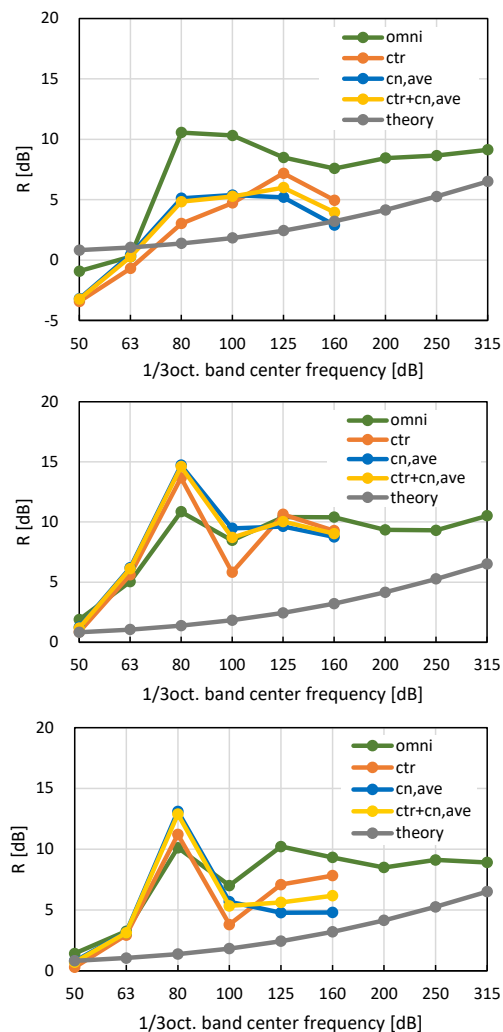


図8 音響透過損失の実測値 (面密度 1.2 kg/m<sup>2</sup>)  
(上段：右下、中段：中央、下段：中央下)

## 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 Aida Yu, Inoue Naohisa, Sakuma Tetsuya	4. 巻 5
2. 論文標題 An experimental study on the influence of incident characteristics on sound insulation between rooms: Study on the incident sound field in the insulation performance measurement for partition walls. Part 2	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW	6. 最初と最後の頁 494 ~ 506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2475-8876.12276	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 西沢啓子, 井上尚久, 佐久間哲哉	4. 巻 Vol.28 No.68
2. 論文標題 矩形試験室における膜材料の音響透過損失測定に関する数値モデリング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 251-254
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijt.28.251	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 J. Liu, N. Inoue, T. Sakuma	4. 巻 Vol.11
2. 論文標題 Validation of the low-frequency procedure for field measurement of facade sound insulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Buildings	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/buildings11110547	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 1件）

1. 発表者名 J. Liu, N. Inoue, T. Sakuma
2. 発表標題 Experimental study on vibration response of wooden house facade to low-frequency outdoor sound
3. 学会等名 Inter-Noise 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 劉金雨, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 外周壁から室内への低音域音響透過に関する数値解析的検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 西沢啓子, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 矩形試験室における低周波域の音響透過損失測定に関する実験的検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 會田祐, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 残響室における壁体の音響透過損失測定の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本建築学会第81回音シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 壁体の音響透過損失測定の一ツシェ効果にする数値シミュレーション
3. 学会等名 日本建築学会第81回音シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎泰知, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 直方体室の入射指向性に基づく音響透過損失の重付き平均に関する検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西沢啓子, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 矩形試験室における音響透過損失測定法に関する数値解析的検討
3. 学会等名 日本騒音制御工学会秋季研究発表会
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	井上 尚久 (Inoue Naohisa) (00755803)	九州大学・芸術工学研究院・助教  (17102)	
研究分担者	西沢 啓子 (Nishizawa Keiko) (90570416)	地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・研究開発本部物理応用技術部高音技術グループ・副主任研究員  (82670)	

#### 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
---------	---------