

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13878

研究課題名（和文）遮音性能測定における多点計測に基づく入射及び透過波の分離手法の確立

研究課題名（英文）Establishment of the incidence- and transmission-wave decomposition method for the sound insulation measurement based on the multipoint measurement

研究代表者

井上 尚久（Inoue, Naohisa）

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任助教

研究者番号：00755803

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）：本研究は多点計測と矩形室のモード展開理論を組み合わせた音場の分析手法を提案し、遮音性能の計測へ応用したものである。提案する分析手法における細かなパラメータの設定方法や誤差要因を予め数値解析により整理した後に、実際の住宅居室を想定した空間において計測実験を行った。その結果、同一の壁構造でも室形状が異なると音源室からの音波入射特性が変化すること、また壁が持つ共振特性と入射・放射場のモードの整合性などに起因して遮音性能が変化することを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では同一の界壁構造であっても、それを挟む室形状の違いにより遮音性能が異なることを実証した。従来のエネルギー論的な方法によると十分には説明できなかった点を明確に説明することが出来た点は、学術的価値が極めて大きい。集合住宅隣戸間での遮音性能劣化は重大な苦情となりやすく、このような現象に対して学術的裏付けを与えることでユーザへの説明責任を果たすことができる。この点においては学術的価値だけでなく、社会への還元も極めて大きい。

研究成果の概要（英文）：A sound insulation performance is measured by a proposed method that combines the multipoint measurement and the modal analysis of the rectangular sound field. First, the proposed method is numerically investigated to clarify the appropriate parameter setting and the error factors. Then, the method is applied to the sound insulation measurement for the experimental rooms constructed with assuming the actual living spaces. This measurement demonstrates the followings. The sound insulation performance depends on the sound incidence characteristics determined by the geometry of the source room as well as the wall composition. Furthermore, it also depends on the matching between the wall's resonance characteristics and the propagation mode characteristics of the source and receiving rooms.

研究分野：建築音響学

キーワード：多点計測 遮音性能測定 モード解析 有限要素法 実験

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の都市部での高密度居住の増加、騒音源の多様化などの社会的要因に加え、個人レベルにおいてもプライバシー保護や QOL を重視する傾向が高まっており、建築物内部においては一層に静謐性の確保が重要になってきている。住宅性能表示制度においては空気音遮断性能として界壁、外周部開口の遮音性能が評価項目として挙げられ、その部材性能により等級が定められ、消費者に提示される。しかし、現状では音環境に関する項目は実際の施工状態での遮音性能のバラツキの多さ、専門性の高さから選択項目となっており、消費者保護が十分であるとは言えない。このような背景から、遮音構造体の実際の施工状態での現場性能を明らかにすること、性能劣化のメカニズムを明らかにすることは社会的ニーズが高く、住宅性能表示制度における音環境評価項目の必須化に貢献するものと考えられる。

一般に、同一の界壁構造であるにも関わらず、それを挟む室形状・容積の違いにより遮音性能が大きく異なることがあり、複雑な音場・振動場の波動的な連成現象により遮音性能が決定されているものと考えられる。しかし、このような現象がいかなる条件において生じるかについては、不明な部分が非常に多いのが現状である。ISO、JIS 等の工業規格に規定される遮音性能の測定手法は音波の波動性を考慮しない、エネルギー論及び拡散音場仮定に基づいている。そのため、特に音波の波動性が顕著である低音域においては、現象の理解及び、遮音性能の計測自体が難しいことが根本的な課題として知られている。

音場内のいくつかの点の音圧の計測値から壁面への入射エネルギーを算出する際、エネルギー論的計測手法では拡散音場仮定により、波動論的計測手法では波動方程式に基づく音場モデルに基づき算出することとなる。一般に音源からの直接音、壁面からの反射音で形成される室内音場では、様々な方向へ伝搬する音波が重ね合わさった状態での音圧が計測される。そのため、波動論的に遮音性能を評価する際、壁面への入射音圧の算出(各方向へ伝搬する音波振幅への分解)が最も大きな課題となり、これまでも数件の先行研究しか見られず、実用的な手法は模索状態といえる。

2. 研究の目的

本研究では、多点計測と矩形室内音場のモード展開理論を組み合わせた音場の波動論的分析手法を遮音測定に応用する。その上で、波動論的な矩形室間界壁の音響透過現象の把握、及び計測手法の有効性の検証を目的とする。

3. 研究の方法

はじめに、本研究で用いた手法の概要をまとめておく。室間遮音性能の測定時における音源室として、図 1 に示す矩形室を想定する。

入射特性の評価対象とする界壁面に対し、直交する側壁 4 面を剛境界条件と仮定した場合、室内音圧は $\pm z$ 方向の無限長ダクトにおける、伝搬モードおよびエバネッセントモードの重ね合わせとして、下式により表される。

$$p(x, y, z) = \sum_{m,n=0}^{\infty} [a_{m,n} f_{m,n}^+(x, y, z) + b_{m,n} f_{m,n}^-(x, y, z)] \dots (1)$$

$$f_{m,n}^{\pm}(x, y, z) = \exp(\mp j k_z^{m,n} z) \cos(k_x^m x) \cos(k_y^n y)$$

$$k_x^m = m\pi/L_x, k_y^n = n\pi/L_y, k_z^{m,n} = \sqrt{k^2 - k_x^{m2} - k_y^{n2}}$$

ここで、 m, n はそれぞれ x, y 方向における室内音圧のモード次数、 $a_{m,n}, b_{m,n}$ はそれぞれ z 軸正および負方向のモード振幅である。実測(数値解析)において各点の音圧 $p(x, y, z)$ を測定(計算)し、有限項で打ち切った上式を元にしてモード振幅 $a_{m,n}, b_{m,n}$ を最小自乗法により推定を行う。尚、

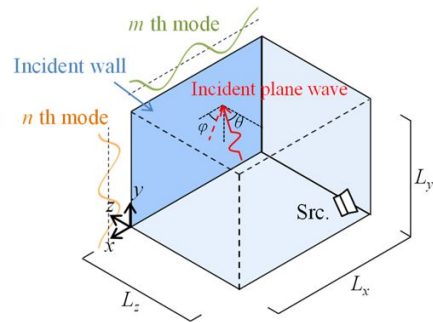


図 1 解析対象の矩形室内音場

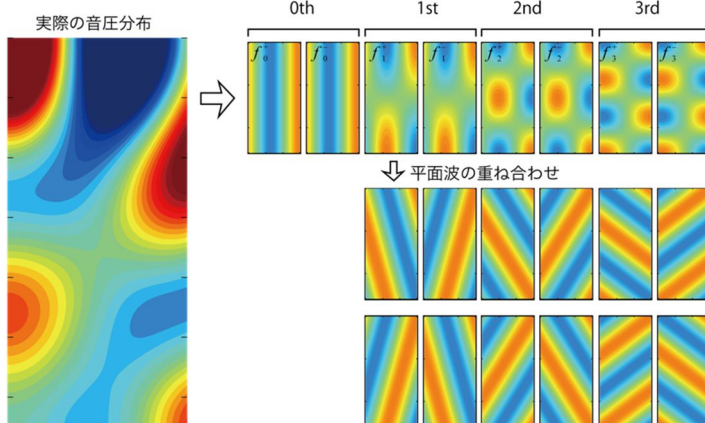


図 2 矩形室音場の平面波への分解

各モードは下図のように斜方向に伝搬する平面波の振幅とみなすことができ、これにより対象壁面に対する各入射角度での入射波の音響インテンシティを計算することができる。

前節に述べた目的に対応し、本研究で提案する上記手法の検証研究を以下の2段階に分けて進めた。

- 1) 計測手法の適用性に関する数値解析的検証
- 2) 実測による音場分析・遮音性能計測の実証

4. 研究成果

4.1 計測手法の適用性に関する数値解析的検証

研究の端緒として、有限要素法を用いて実験を模擬した数値解析を実施し、実験・分析方法に関する妥当性の検証を行った。本項の検討は、寸法 $4.82 \times 2.53 \times 3.49 \text{ m}^3$ の矩形室に対する結果である。先述の通り、各モードの振幅を抽出する際には室内の音圧の多点計測の結果から最小二乗法により決定する。その際にモード展開を有限項で打ち切ったモデルから最小二乗係数を算出するが、この時の打ち切り次数に関して検討を行った。その結果、分析対象周波数の波数 k に対して、モード格子を考えた際の最も低次の斜めモード (k) 程度大きい半径の円内のモードで打ち切り次数を設定することで、十分な精度でモード振幅が同定できることが明らかになった(図3)。

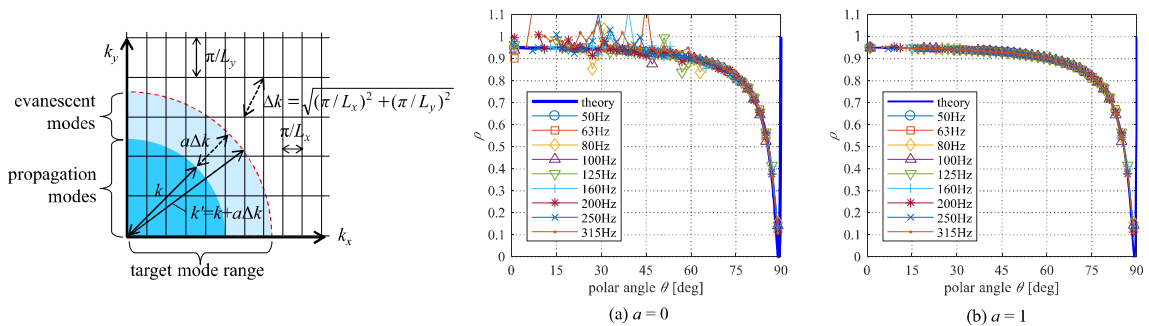


図3 モード次数の打ち切りに関する検討。解析対象面への斜入射吸音率の理論値と比較。

また、モード分布は側壁が剛な場合の矩形室のものを想定することとなる。実際の音場では側壁における反射時の減衰と位相回転が無視できないため、この影響を数値解析により具体的に把握した。矩形室内全壁面に対して、垂直入射吸音率が0.05、反射時の位相回転が45, 80となるようインピーダンスを与えて解析対象壁面への斜入射吸音率を提案手法により計算した。その結果、吸音性自体は大きな問題とはなりにくい、位相回転による影響は比較的大きいことが明らかとなった。ただし、モーダルな挙動が重要となる低周波数域では大きな問題とはならないため、実際の音場でも十分な精度が期待されることも明らかとなった(図4)。

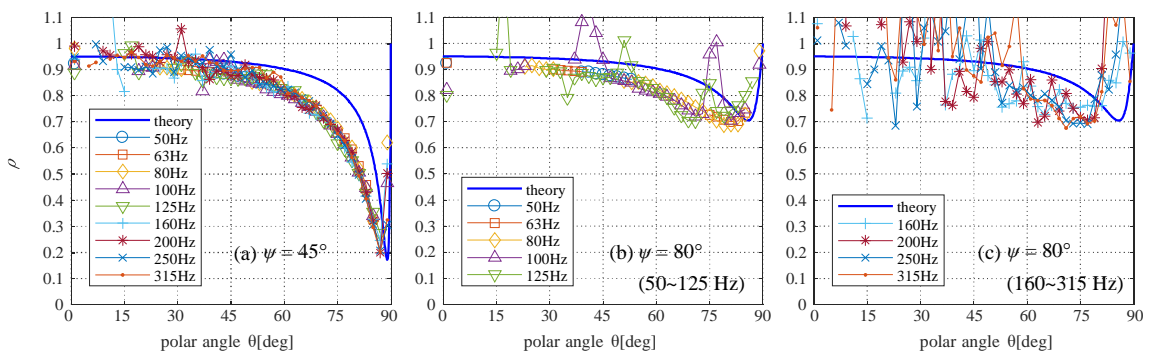


図4 壁面での吸音・位相変化がモード振幅の同定精度に及ぼす影響。斜入射吸音率の理論値との比較。

モード分解の結果から、矩形室における界壁面への実際の音波入射エネルギー分布を算出した結果を図5に示す。特に63, 125 Hz帯域において大きく拡散音場仮定(一様な入射角度分布)と異なることが明らかとなった。この点は拡散音場に基づくエネルギー論的な評価が実際の波動論的な挙動と異なることを直接的に意味する結果であり、本研究の大きな成果といえる。

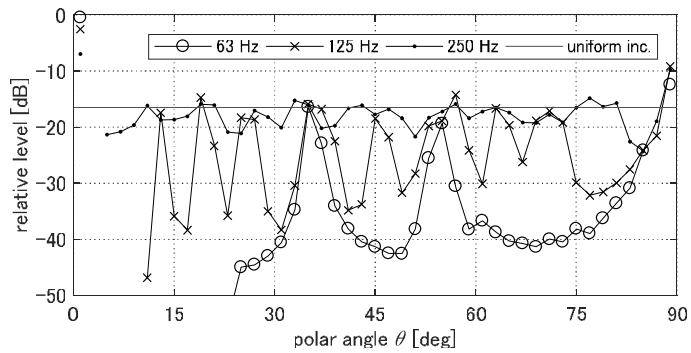


図5 各帯域における入射エネルギーの角度分布（側壁面は全面剛）

4.2 実測による音場分析・遮音性能計測の実証

測定システムの概要

住宅居室を想定した空間において室間遮音性能の検討を行うため、RC造実験建物内に住宅居室の形状および室内仕上げを概略的に再現した室を整備し、実験を行った。実験室の概要を図6に示す。音源室は可動式間仕切壁により3パターンの平面形状に変化させることで、同一の界壁に対して異なる入射条件を考えた。Case 1の音源室は前節の数値解析モデルと同一の概略矩形寸法を有する。

測定対象とした界壁

構成は、RC造集合住宅

で一般的に想定される界壁構造として、クロス直貼り仕上げを想定し界壁に仕上げを設けない条件(以下、RC単層壁)、ならびにRC壁の両面にふかし壁を設置した条件(以下、複合壁)を対象とした。

測定では8チャンネルの計測システムを用い、マイクロホン1点を室隅部に固定したうえで、y方向7点のマイクロホンアレイを各平面位置に移動させ、 $\Delta x \times \Delta y = 0.4 \times 0.3 \text{ m}^2$ の格子点上で音圧を同時計測した。図7に計測の様子を示す。各点の測定時間は20秒とし、時間内でのFFT分析結果より、固定点を基準とした各点の伝達関数の同期加算平均から複素音圧を算出した。多点計測は音源側、受音側の両室で行った。

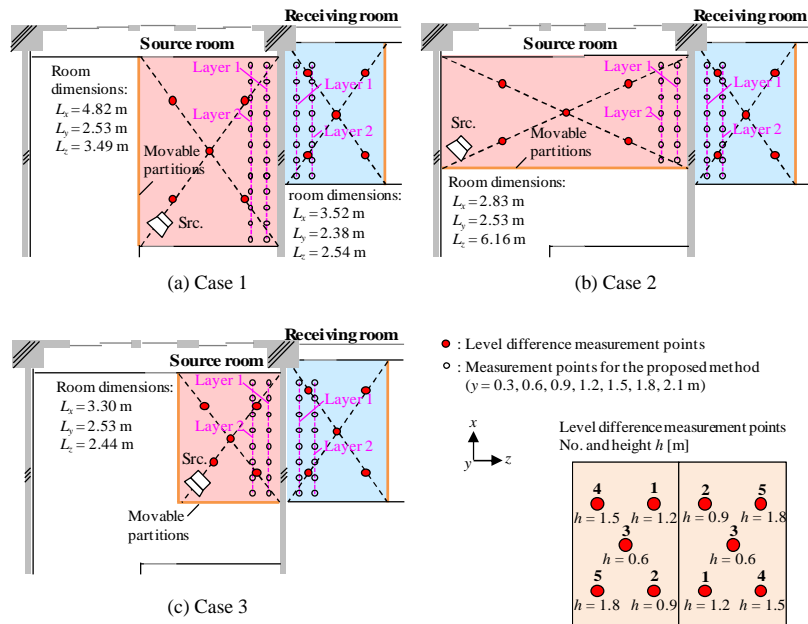


図6 測定実験を行った室の概要



図7 マイクアレイと対象のRC壁(右)・複合壁(左)

測定結果の概要

計測結果の分析に先駆け、最小二乗法により推定された係数を式(1)へ代入することで、測定した格子点上の音圧分布が精度良く再現されることを確認した。その後、Case 1の室における入射エネルギー分布について実測と数値解析の比較を行った。尚、数値解析は全面垂直入射吸音率 0.05、位相回転はなしの条件で行ったものである。結果を図8に示す。解析と実測の結果は入射角のピークディップが良く対応しており、今回対象とした実験室空間について、提案手法の適用結果は概ね妥当であり、本手法に基づいた音響透過現象の分析が可能であると判断された。

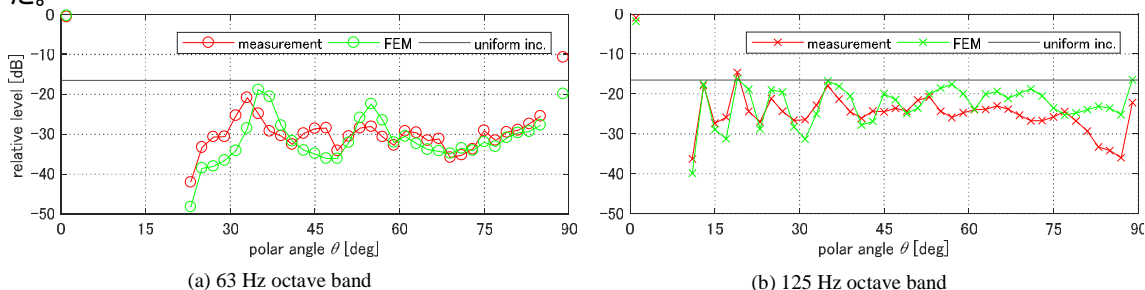


図8 実測・数値解析による各帯域における入射エネルギーの角度分布の比較

図9に50~315 Hz帯域の室間音圧レベル差 D を示す。各 Case の結果を比較すると、両界壁条件とも低音域の周波数特性が大きく変化する傾向がある。音圧計測位置に起因する D のばらつきがあるものの、更に各 Case での入射条件の違いにより室間の遮音特性が変化している可能性が示唆される。

本研究における分析手法では各モードの入射及び透過インテンシティが算出できることから、これを角度に関して積分することで、各周波数での実際の入射条件での全入射及び透過インテンシティが算出できる。これより算出した音響透過損失 R を図10に示す。同図にはコンクリート板厚さ 180 mm(面重量 414 kg/m²)での質量則によるランダム入射音響透過損失も参考として示す。各 Case での変動は、RC 単層壁の 80 Hz 帯域等では D に比べ縮小しているものの、他では依然確認でき、入射条件による遮音特性への影響がみられる。RC 単層壁についてみると、 R は概ね質量則程度の値であるが、一部でピーク・ディップにより乖離が生じている。ピーク・ディップの程度は Case 1, 3 では顕著だが、Case 2 では目立たず、各 Case で傾向の違いが認められる。また、複合壁の結果についても、Case 1, 2 では低音域共鳴透過によるディップの中心が 100 Hz 帯域にあるが、Case 3 では 80 Hz 帯域にあり相違がみられる。

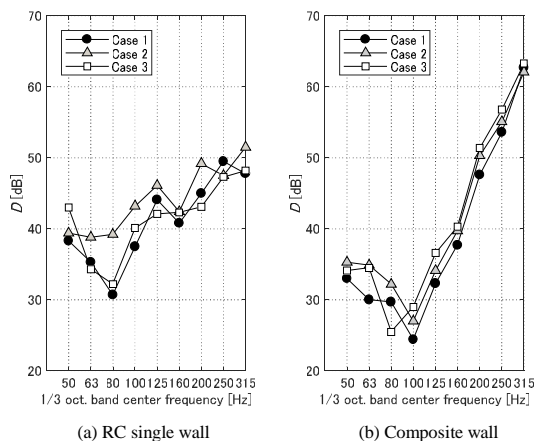


図9 室間音圧レベル差

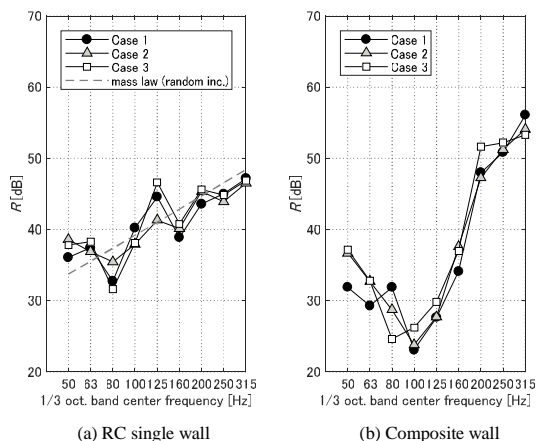


図10 提案手法による実際の入射場における音響透過損失

さらに、各周波数帯域・各入射モードを詳細に検討した結果、以下のような結論が得られた。

- 提案手法を用いた音場解析の結果、RC 単層壁における低音域の透過音には室間のモードのマッチングの影響があり、とくに壁面垂直入射方向に近いモードの近接度が強く作用することがわかった。
- 複合壁の性能を、RC 壁単体の音響透過損失 R と、ふかし壁の付加による音響透過損失改善量 R に分離した結果、入射音場の違いにより、RC 壁単体の R のほか、 R についても変化が生じることを明らかにした。提案手法を用いて複合壁の斜入射吸音率を観察した結果、複合壁の低音域共鳴透過が、壁体の斜入射共鳴周波数と入射特性とのマッチングにより影響され、壁の垂直入射共鳴周波数付近で強い垂直入射がある場合 R が低下する傾向を確認した。

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 0件）

1. 著者名 AIDA Yu、INOUE Naohisa、SAKUMA Tetsuya	4. 巻 83
2. 論文標題 AN EXPERIMENTAL ANALYSIS METHOD FOR AN INCIDENT SOUND FIELD USING PROPAGATION MODE EXPANSION	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 821 ~ 829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aije.83.821	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 AIDA Yu、INOUE Naohisa、SAKUMA Tetsuya	4. 巻 84
2. 論文標題 AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF INCIDENT CHARACTERISTICS ON SOUND INSULATION BETWEEN ROOMS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 893 ~ 902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aije.84.893	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 AIDA Yu、INOUE Naohisa、SAKUMA Tetsuya	4. 巻 85
2. 論文標題 NUMERICAL SIMULATION ON SOUND INSULATION MEASUREMENT OF WALLS IN REVERBERATION ROOM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 115 ~ 124
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3130/aije.85.115	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 會田祐
2. 発表標題 界壁遮音性能測定時における入射音場の解析手法に関する検討 - 室内吸音による影響の考察 - ,
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2018年 ~ 2019年

1. 発表者名 會田祐
2. 発表標題 実験室測定における界壁部材の音響透過現象に関する数値解析
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 井上尚久
2. 発表標題 粘性境界層を考慮した音響振動連成境界条件の導出
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 會田祐
2. 発表標題 残響室における界壁部材の音響透過損失測定に関する数値解析
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 山崎泰知
2. 発表標題 残響室における音響透過損失計測に関する有限要素解析 - 計算条件に関する基礎的検討 -
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 山崎泰知
2. 発表標題 音響透過損失計測における残響室の形状および吸音条件の影響に関する数値解析
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Naohisa Inoue
2. 発表標題 inite element analysis on the surface characteristics of acoustic resonators with thermal land viscous boundary layers
3. 学会等名 23rd Int'l Cong. Acoust.
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Yasutomo Yamasaki
2. 発表標題 Numerical investigation of the reverberation method for measuring the total loss factor of plate-like structures
3. 学会等名 23rd Int'l Cong. Acoust.
4. 発表年 2019年～2020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
---------	---------------------------	-----------------------	----