

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03350

研究課題名(和文)低周波音の家屋内外伝搬特性の解明及び遮音対策の効果検証

研究課題名(英文)Clarification of low-frequency noise transmission into house and validation of its soundproofing measures

研究代表者

佐久間 哲哉 (Sakuma, Tetsuya)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：80282995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、屋外から住宅内に伝搬する低周波音を対象として、1)家屋周辺における騒音伝搬性状の把握、2)家庭用設備機器の音源対策の検証、3)家屋内への音響透過現象の解明、4)低周波領域の外周壁遮音性能の測定法の検証、5)木造家屋の各種防音対策の効果検証、以上を数値解析・模型実験・実大実験を通して多面的に進めた。家屋周辺では隣戸・外構塀との位置関係により騒音分布が大きく変動し、設備機器の配置による騒音低減の可能性を明らかにした。また、低周波領域の現場遮音測定法の改良を提案した他、壁の内張工法による重量化および内窓設置による二重窓、両者の組合せによる防音効果を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年家庭用設備機器や風力発電所等の低周波音が社会問題となる中、居住者側の住宅防音対策の必要性も高まっている。本研究では、隣戸間の設備機器と外構塀の配置により騒音低減の可能性が示され、設備機器の設置指針に資する情報を提供した。また、新たに国際規格となった低周波領域の現場遮音測定法の問題点を指摘し、改良点の提案を行った。さらに、低周波音に弱い軽量木造住宅の防音対策として、従来経験的に行われてきた壁の内張工法による重量化および内窓設置による二重窓の効果に関して、行政の防音対策指針や建材メーカーの部材開発に役立つ系統的な測定例が得られた。

研究成果の概要(英文)：Regarding low-frequency sound from outdoors into house, a series of research was conducted by numerical analysis, scale model and real scale experiments: 1) clarification of noise propagation characteristics around house, 2) examination of sound source measures for household equipment, 3) clarification of sound transmission phenomenon into the house, 4) verification of field measurement method of low-frequency sound insulation performance of facade, 5) verification of the effects of various soundproofing measures for wooden house. It was clarified that noise distribution around house changes drastically due to the adjacent house and the fence, and the possibility of noise reduction by the position of equipment. Regarding sound insulation of house, a low-frequency procedure for field measurement method was proposed, and the experiments demonstrated the soundproofing effects of the combination of wall lining and double window system.

研究分野：建築音響学

キーワード：音環境 低周波音 遮音 騒音伝搬 音響計測 数値解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 低周波音問題の社会的状況

2000年以降、住宅地では家庭用設備機器や風力発電施設などの100Hz以下の低周波音に対する苦情件数が急増し、社会問題となっている。この状況に対して、環境省は低周波音苦情の参照値や問題対応の手引きを公表しているが、未だ苦情件数の増加に歯止めが掛かっていない。直近では消費者庁が家庭用設備機器の健康影響に関する調査報告書を公表し、国に対して関連研究・技術開発の推進を提言している。

(2) 住宅周辺における低周波音の伝搬性状

住宅地では隣接する家屋や塀の位置関係により騒音の伝搬性状は変化する。特に低周波音では音波の波動性（干渉性）によって、家庭用設備機器からの音響放射効率が変化し、加えて家屋や塀の間の空間において共鳴が生じる可能性もある。ただし、現時点ではこれらの住宅周辺の音響伝搬現象に関する究明は行われておらず、その影響の程度は不明である。

(3) 低周波音に対する住宅の遮音性能

一般に木造住宅は軽量構造であるため、低周波音の遮音性能は相当低い。そのため、低周波音に対する従来の住宅防音工事では、壁・天井・窓の重量化が行われている。しかし、中高音域とは異なり、低周波音では音響・振動連成系の複雑な波動現象となるため、重量化工法の遮音効果は確実とはいえない。また、現在規格化されている遮音性能測定法は低周波音を適用対象外としており、測定法に関する課題も残されている。

2. 研究の目的

以上の研究背景を鑑みて、本研究では、低周波音に対する家屋の遮音性能に関わる以下の4つの課題に取り組む。

- ① 家屋周辺における低周波音の伝搬性状の解明
- ② 屋外から室内への低周波音の透過現象の解明
- ③ 低周波音に対する外周壁遮音性能測定法の改良
- ④ 木造家屋の各種防音対策の効果検証

上記の課題群を通して、低周波音に対する建築物の測定・評価方法を確立するとともに、家屋内外の各種防音対策の知見を整理し、新たな工法・部材の開発の指針を提示する。

3. 研究の方法

(1) 家屋周辺における低周波音の伝搬性状に関する数値解析

家庭用設備機器から発生する低周波音を想定し、地面を反射性と仮定した半自由空間に隣接する家屋および外構塀をモデル化し、有限要素法による数値シミュレーションを実施する。隣戸間との距離、塀の高さや配置、音源位置を変化させたケーススタディを行い、各々の要因が敷地内の騒音伝搬に及ぼす影響を検討する。特に、音源位置による音響放射効率の変化、隣戸外壁面上の音圧分布に着目して分析を行い、設備機器の配置計画および外構壁の設計に関する知見を収集する。

(2) 屋外から室内への低周波音の透過現象に関する模型実験・数値解析

軽量構造の木造家屋を想定し、外壁・屋根・床下・窓・換気口の各部位をモデル化した1/4縮尺模型を製作し、半無響室において遮音実験を行う。模型は建物を木材・アクリル板、窓をガラス板で構成し、外壁倍厚のモデル、無窓モデル、床下開放モデルの3種類を製作する。室内では多点計測を行い、室内音圧レベル分布の性状を把握するとともに、各モデルの遮音性能の比較より各部位の寄与を検証する。平行して、家屋部位の振動と室内外音場の連成系をモデル化し、有限要素法による数値シミュレーションを実施し、音響透過現象を分析する。

(3) 低周波音の外周壁遮音性能測定法に関する模型・実大実験

JIS規格による外周壁の遮音性能測定法では、室内平均音圧レベルを室中央部5点の測定値から算出しているが、拡散音場の仮定が成り立たない低音域では誤差が生じる。最新のISO規格では低周波音用の測定手順として、室隅部の測定値を加えた平均化（コーナー法）が提案されており、その手順の妥当性を模型実験および実大実験で検証する。模型実験は上記(2)の測定データを用いることとし、実大実験は屋外に新たに木造試験家屋を建設して実施する。コーナ

一法に関しては、室隅部の測定点の位置、室中央部と室隅部の平均化などの詳細設定をケーススタディにより明らかにする。

(4) 木造家屋の各種防音対策に関する実大実験

屋外に建設する木造試験家屋は、一般的な軽量構造の外壁（面密度 25kg/m²程度）、普及型サッシ（単板ガラス 5mm）を基本条件とした上で、各種の防音対策を施し、屋外実験により遮音性能の変化を測定する。防音対策として、外壁に関しては室内側のボード増し張りによる面密度の倍増（面密度 50kg/m²程度）、窓に関しては防音型サッシ、複層ガラス、内窓設置による二重窓化、以上の改造を順次行う。なお、遮音性能の測定は上記(3)の検討結果に基づくコーナー法により実施する。

4. 研究成果

(1) 家屋周辺における低周波音の伝搬性状

①音源・外構塀の配置の影響：一般的な2階建て戸建住宅の外壁と塀との間に音源として家庭用設備機器を配置した解析モデルを設定した（図1）。地面は反射性、解析領域の周囲は人工吸音層を設定して屋外音場を模擬し、空間を有限要素により離散化した。音源の配置は家屋中央部および端部、塀の配置は三面（正面・両側面）および正面のみの2条件を設定した。

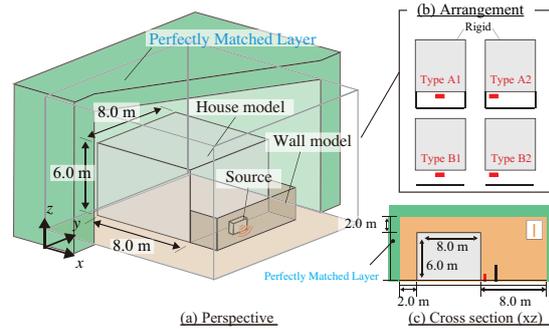


図1：家屋周辺の解析モデル

音源の放射効率を算出した結果（図2）、塀が三面の場合、塀の長さに対応する固有周波数でピークが生じ、塀が高くなるほど顕著となることが判明した。また、音源を中央部に配置した場合、特定の固有モードは励振されず、放射効率が低下する周波数帯域が生じることも明らかとなった。家庭用設備機器の騒音は特定の周波数成分を持つことから、音源と塀の配置によって放射音を低減できる可能性が示唆された。

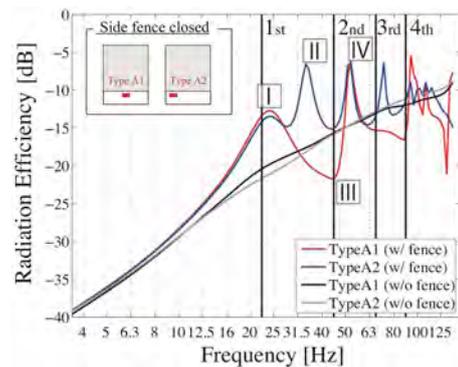


図2：音源の放射効率

②隣戸の影響：上記解析モデルに同形状の隣戸を配置し、隣戸間の距離や塀の高さの影響についてケーススタディを行った。

数値解析の結果、隣戸間の空間の音圧レベル分布は塀の設置によって大きく変化し、音波の干渉縞が別方向に移動する周波数も確認された（図3）。隣戸の外壁面上の音圧レベルを隣戸が無い条件と比較すると、塀が無い場合では周波数によらず概ね6dB上昇したのに対して、塀が有る場合では40Hz付近で顕著な上昇が生じるものの50~100Hzでは概ね低下した（図4）。音源の卓越周波数によっては塀の設置により騒音伝搬の低減が見込まれる。

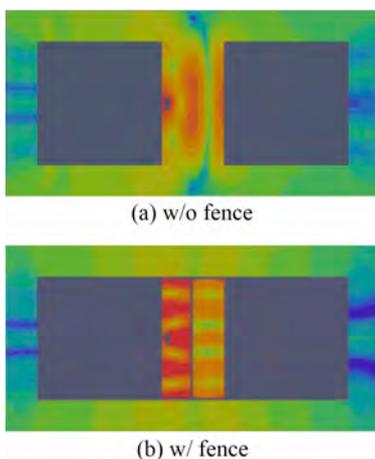


図3：隣戸間の音圧レベル分布

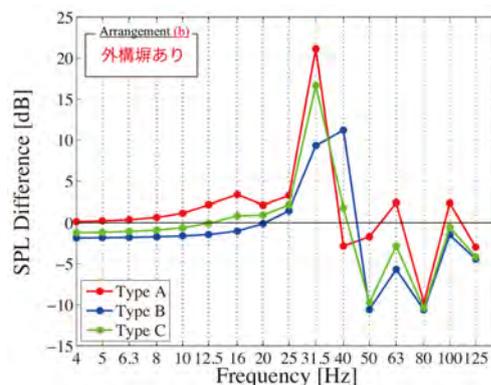


図4：隣戸壁面の音圧レベル上昇量

(2) 屋外から室内への低周波音の透過現象

①家屋モデルの音響振動連成解析：低周波音の外周壁の音響透過現象を模擬するため、屋外・室内の音場および外周壁の振動場を連成した解析モデルを設定した(図2)。(1)の屋外伝搬解析と同様、地面は反射性、周囲は人工吸音層を設定し、空間を音響要素、部材をシェル要素により有限要素解析を行った。外壁は軽量構造、一面に窓のある部屋を想定し、窓の正面近傍に家庭用設備機器を音源として配置している。

室内外の音圧分布および外壁の振動分布の計算結果より、100Hz以下の低周波数域では窓のガラス面だけでなく建物全体が振動し、室内の波動場と連成する様子が確認された(図6)。柱・梁を剛骨格とした場合、外壁の振動分布とともに室内の音圧分布が大きく変化したことから、低周波音では外壁の質量だけでなく剛性が遮音性能に大きく影響するものと考えられる。

②家屋モデルの1/4縮尺模型実験：上記解析モデルに対応した1/4縮尺家屋模型および家庭用設備機器を模擬したスピーカを半無響室に配置し、40~500Hz帯域(実大10~125Hz帯域相当)の遮音測定を行った(図7)。室内では移動マイクロホンアレイにより175点の音圧レベルを計測し、室内平均音圧レベルと家屋の無い状態との基準点との差により挿入損失を算出した。

各種条件の実験結果より、まず低周波音では換気口・床下空間の影響は比較的小さいことが確認された。次に、外壁の厚さを倍増させた場合、無窓条件では明確に遮音性能の上昇が確認されたが、窓閉じ条件では40Hz以上でほとんど効果は現れなかった(図8)。従って、窓からの音響透過が支配的となるものと考えられる。ただし、超低周波音を含む40Hz以下では、上記数値解析の結果と合わせると、外壁の増厚や骨格の補強により剛性が高まり、遮音性能が高まるものと予想される。

(3) 低周波音の外周壁遮音性能測定法

①模型実験による予備検討：室内平均音圧レベルの算出方法に関して、ISO 16283-3に新たに導入されたコーナー法の予備的検討を(2)の模型実験の室内多点計測データを用いて行った。その結果、低周波数域では室中央部に加えて室隅部の測定データを平均化に含めることで、概ね推定精度が向上したが、室隅部の最大値を用いた場合に若干過大推定となり、室隅部の平均値を用いる方が良好な推定となった。ただし、室中央部と室隅部のエネルギー加重平均の重み付けに依存する点は今後の検討課題となった。

②実大実験による詳細検討：コーナー法の詳細な検討のため、屋外に建設した6畳二間の木造試験家屋

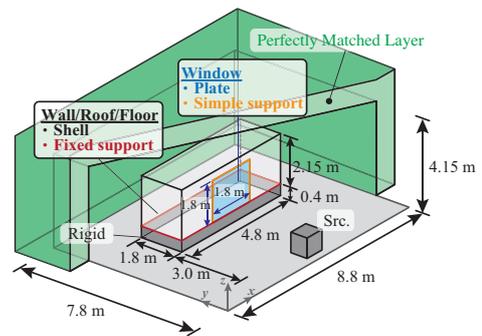


図5：家屋内外の音響振動連成モデル

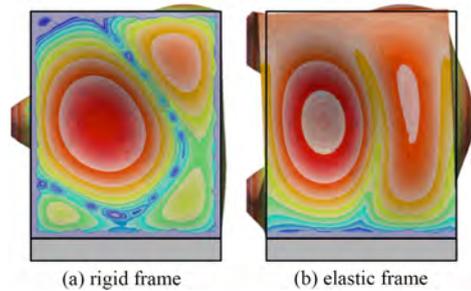


図6：外壁振動・室内音圧の分布

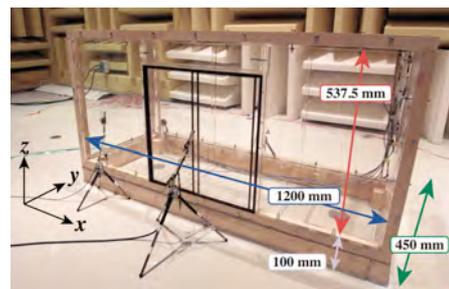


図7：家屋の1/4縮尺模型

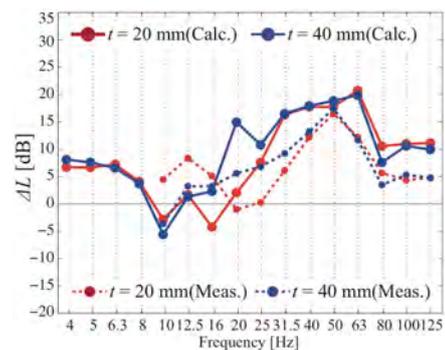


図8：家屋の挿入損失：壁厚2条件

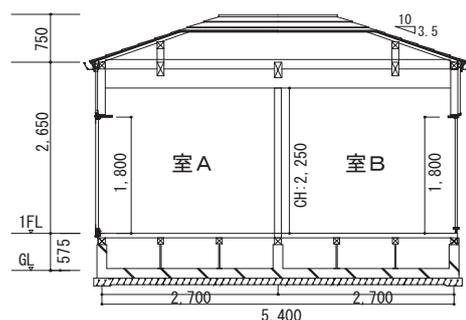


図9：木造試験建屋

においてスピーカ外部音源法による実大遮音実験を実施した(図9)。先ず室隅部の受音点位置の影響を確認するため、隅部近傍において境界面から距離を変化させて、音圧レベルの変化を確認した(図10)。その結果、境界面から離れるにつれて100Hz以下では音圧レベルが単調低下する傾向にあり、ISO規格が指定する30cm離れでは80Hzで3dB低下することから、境界面にできるだけ近接すべきことが明らかとなった。

次に、室内240点の音圧レベルの計測値に基づき、コーナー法による室内平均音圧レベルの推定方法を検証した。その結果、模型実験と同様に、250Hz以下では室隅部の最大値を用いると過大推定となり、室隅部の平均値を用いた場合は1dB以下の誤差に抑えられた(図11)。なお、従来法では低周波域で最大4dB程度の過小評価となり、コーナー法の有効性が確認された。

(4) 木造家屋の各種防音対策の効果

上記の木造試験家屋では、基本条件として外壁の面密度を25kg/m²程度の軽量構造とし、アルミ製引違いテラス窓(単板ガラスFL5mm)を設置して遮音測定を行った。その後、低周波音の防音対策を想定し、外壁には室内側の石膏ボードの増張り工法により面密度を50kg/m²程度に倍増した条件を設定した。加えて、外壁の2条件において、外窓の複層ガラス(FL3mm+A6mm+FL3mm)への交換、樹脂製内窓の設置(単板ガラスFL5mm、空気層95mmおよび190mm)の組み合わせにより計6条件を設定し、各条件で遮音測定を行った。

外壁対策に関しては、面密度倍増による音響透過損失の変化を窓の各条件で算出した結果、31.5Hzでは10dBを超える大幅な増加が生じ、100~160Hzでも5dB程度の増加が認められた。前者は外壁構造全体の剛性制御によるもの、後者は基本条件における二重壁共鳴透過現象が抑制されたものと解釈できる。しかし、外壁の重量化では低周波音の限定的な帯域でしか対策効果が得られず、質量則に基づく6dB増加は必ずしも期待できないことが示された。

窓対策に関しては、低周波数域において基本条件では外壁の遮音性能が低いため、遮音性能の向上はほとんど現れなかった。一方、面密度倍増の外壁条件では、内窓設置により低周波数域において音響透過損失の増減が生じ。空気層が厚い場合に63Hz周辺で増加が生じたもの、空気層が薄い場合には63~100Hzでは逆効果となる傾向が確認され、二重窓の共鳴透過現象に関連するものと解釈できる。

以上、木造家屋における外壁重量化と二重窓化の防音対策効果を検証したが、現時点では効果は限定的であり、新たな対策方法の開発が課題である。

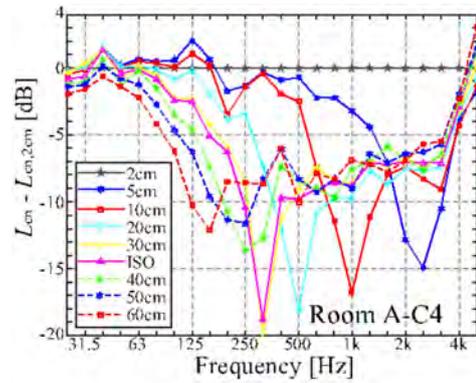


図10：室隅部の音圧レベル低下量

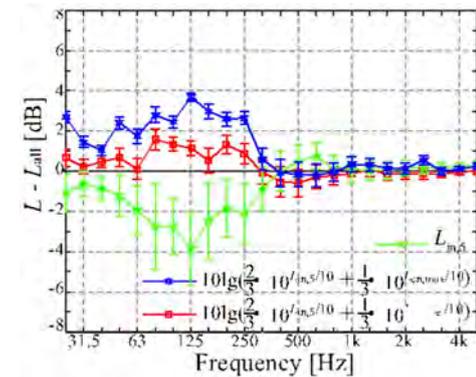


図11：室内平均音圧レベルの推定誤差

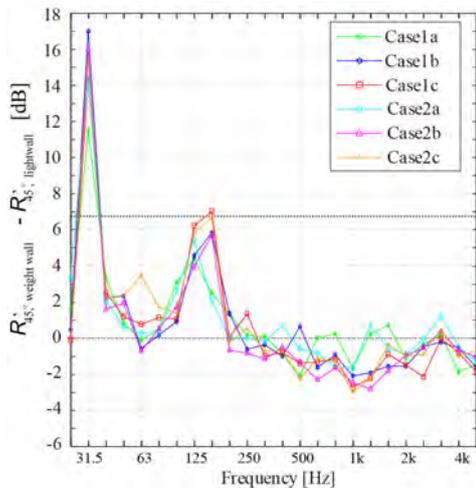


図12：外壁対策による透過損失増加量

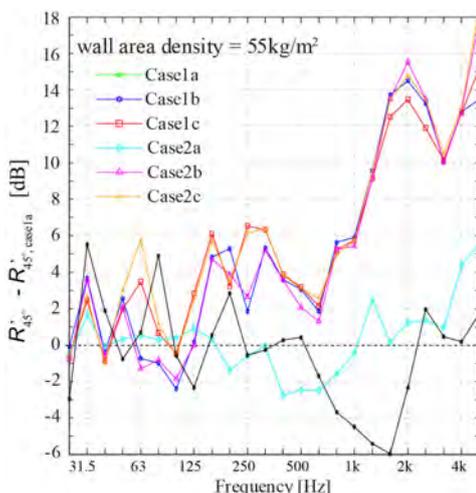


図13：窓対策により透過損失増加量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 大嶋拓也, 黒坂優美	4. 巻 83
2. 論文標題 地表面上の点音源による音場の拡張・局所作用理論モデル解析および有限差分値解析の適用性に関する検討	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会環境系論文集	6. 最初と最後の頁 355-363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aije.83.355	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29件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 J. Liu, N. Inoue, T. Sakuma
2. 発表標題 Experimental study on low-frequency averaging of indoor sound pressure level in facade sound insulation measurement
3. 学会等名 23rd Int'l Cong. Acoust. (Aachen) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐久間哲哉, 劉金雨, 井上尚久
2. 発表標題 低周波領域の外周壁遮音性能の測定法に関する検討 その1 - 木造試験家屋における基礎実験 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉金雨, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 低周波領域の外周壁遮音性能の測定法に関する検討 その2 - コーナー法の検証 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉金雨, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 低周波領域の外周壁遮音性能の測定法に関する検討 - 室内多点計測による検証 -
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 劉金雨, 井上尚久, 佐久間哲哉, 鐘築吉文, 秋光昂, 塚本陽平
2. 発表標題 木造家屋の低周波防音対策に関する研究 - 二重窓の効果検証 -
3. 学会等名 日本騒音制御工学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横川大幹, 大嶋拓也
2. 発表標題 コンクリートブロックを利用した吸音先端部を有する遮音塀の2次元数値解析
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉金雨, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 壁面音圧計測と境界要素法解析に基づく低周波音の室内音圧分布推定
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 劉金雨, 佐久間哲哉
2. 発表標題 低周波領域における室内平均音圧レベル計測に関する実験的検討
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Sakuma, N. Inoue, K. Kami
2. 発表標題 Numerical simulation and scale model experiment of low-frequency noise transmission into house
3. 学会等名 Inter-Noise 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 - 外構塀の影響 -
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 - 音源と外構塀の配置の影響 -
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 家庭用設備機器からの低周波音屋外伝搬の数値解析 - 外構塀の影響 -
3. 学会等名 日本騒音制御工学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 角谷純平, 井上尚久, 佐久間哲哉
2. 発表標題 家屋周辺における低周波音伝搬の数値解析 - 隣戸と外構塀の配置の影響 -
3. 学会等名 日本音響学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐久間哲哉, 井上尚久, 加美梢
2. 発表標題 低周波音の家屋内への透過に関する数値解析および模型実験
3. 学会等名 日本音響学会騒音・振動研究会
4. 発表年 2017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	大嶋 拓也 (Oshima Takuya) (40332647)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	

6. 研究組織（つづき）

	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	安田 洋介 (Yasuda Yosuke) (90456187)	神奈川大学・工学部・教授 (32702)	