

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 21 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289193

研究課題名(和文) 数値音響試験室における建築部材の音響性能予測法の確立

研究課題名(英文) Establishment of acoustic performance prediction methods for building elements using numerical testing rooms

研究代表者

佐久間 哲哉 (Sakura, Tetsuya)

東京大学・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) 9,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、第一に「数値音響試験室」という概念を掲げて、現実の残響室・無響室における実験室測定モデル化を行い、建築部材の遮音・吸音・拡散性能予測法の体系化を進めた。特に、試験室音場と建築部材を構成する膜・板・弾性体・多孔質材の各種振動場に関して、有限要素法・境界要素法の基本コードを整備した上で、様々な部材形状・材料構成に対応可能な連成解析プログラムを統合し、音響性能予測システムを構築した。ケーススタディとして積層材料の透過損失・吸音率、新型の拡散体の乱反射率・指向拡散度の予測を実施し、実測データとの比較により予測システムの妥当性及び有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：Based on the concept of “numerical acoustic testing room”, the laboratory measurements in reverberation room and anechoic room were modeled, and numerical methods for predicting acoustics performance (insulation, absorption and scattering) of building elements were systemized. Using our in-house FEM and BEM codes, a variety of vibration fields for membrane, plate, elastic body and porous material were coupled with acoustic systems for testing rooms, and an integrated prediction system was developed which is applicable for various element shapes and material compositions. In case studies on transmission loss and absorption coefficient of multi-layer materials, and scattering and diffusion coefficients of new-type diffusers, the prediction system was validated in comparison with measured data.

研究分野：建築音響学

キーワード：建築音響 遮音 吸音 音響拡散 数値解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 建築部材音響性能の数値予測の可能性

波動音響学に基づく音響数値解析技術は、1980年代以降に計算機の性能向上と計算力学の確立を受けて格段の進歩を遂げ、特に2000年以降は大規模計算の普及により様々な音環境問題への適用が実現化している。具体的な応用として、室内音響シミュレーションや騒音伝搬シミュレーションが筆頭に挙げられるが、材料・部材・機器などの部位音響性能シミュレーションにも多大な期待が寄せられ、既に音響機器や自動車部材などの開発現場での利用は進んでいる。一方、建築分野では試験体となる部材や試験室の寸法が大きく、部材のモデル化も複雑なため、音響性能の数値予測は実用化に至っていない。ただし、研究レベルでは建築部材の遮音・吸音・拡散性能の各々について数値解析が試みられ、筆者らも十数年間にわたり解析手法の開発に取り組み、プロトタイプは整いつつある。計算機の着実な性能向上により、ここ数年で建築部材の音響性能数値予測は実用レベルに達することが予想される。

(2) 遮音・吸音・拡散性能の数値予測の現状

壁材・窓・扉などの遮音性能の数値予測に関しては、入射側・透過側各々の音場と部材の振動場との連成解析が必要となる。2000年頃は計算機性能の制約から2次元解析にとどまっていたが、2005年以降は3次元解析も可能となり、最近では現実の試験体設置状況の模擬も試みられている。ただし、一連の研究では理想的なランダム入射条件(完全拡散音場)をモデル化した解析に基づくため、現実の残響室(不完全な拡散音場)における音響透過損失の測定値との対応を精査する必要がある。

内装材・家具などの吸音性能の数値予測に関しては、材料内部の複雑な音響現象のモデル化が重要課題として残されている。一般に吸音材料は通気性と弾性の両方を考慮する必要があり、特に積層材料などの部材開発には不可欠となる。筆者らは最近、多孔質材の精緻なモデルである Biot 理論に基づく固体流体連成解析プログラムを実装し、音響管内の小型試料に対して適用を試みた所である。この多孔質材モデルと膜・板モデルの組み合わせを建築部材スケールで適用し、数値試験室との連成解析を行うことで、吸音率予測の実用性が格段に高まるものと考えられる。

壁面の拡散性能の数値予測に関しては、筆者らがここ数年間重点的に研究開発を進め、国際的にも先駆的な成果を挙げている。自由空間内の平面波入射を想定した理想条件において試験体の音響散乱の指向特性を解析し、拡散性能の指標である乱反射率が予測可能となった。遮音・吸音性能予測に比べて解析が比較的容易であり、実用化に最も近いことから、今後は室内音響設計実務に供する予測システムとしての整備が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、第一に「数値音響試験室」という概念を掲げて、現実の残響室・無響室における実験室測定モデル化を行い、数値計算上の音響特性を明確化する。特に、国際規格となっている不整形・矩形残響室に関して、理想的な完全拡散音場からの乖離を定量的に検討する。

第二に、数値音響試験室における建築部材の遮音・吸音・拡散性能の解析技術を整理し、予測法の体系化を図る。具体的には、試験室の音場と建築部材を構成する膜・板・弾性体・多孔質材の各種振動場に関して、有限要素法・境界要素法の基本コードを整備した上で、様々な部材形状・材料構成に対応可能な連成解析プログラムを統合し、シミュレーションシステムの構築を目指す。

最終的に、

- ・ 遮音性能解析システム
- ・ 吸音性能解析システム
- ・ 拡散性能解析システム

以上3つの解析システムを実際の各種建築部材の性能予測に適用し、数値音響試験室の妥当性と適用性を検証する。

3. 研究の方法

上記の3つの音響性能に関する解析システム構築に向けては、

- 1) 測定法の理論的検討に基づく数値音響試験室のモデル化
- 2) 建築部材と音響試験室の音響振動連成解析コードの開発
- 3) 遮音・吸音・拡散性能解析システムの実装
- 4) 実測データに基づく各種性能解析システムの妥当性検証

以上の4段階を順次進める。各性能解析システムの具体的な開発方針を以下に示す。

(1) 遮音性能解析システムの構築

透過損失の実験室測定法としては、残響室-残響室法(JIS A 1416, A 1428; ISO 10140)と音響インテンシティ法(JIS A 1441-1; ISO 15186-1)が規格化されている。一方、数値解析では計算負荷軽減を第一に考えると、音源側・受音側ともに半自由空間の想定が合理的である(図1)。この場合、透過パワーの同定は音響インテンシティ法を模擬すればよいのに対して、入射パワーの同定には議論の余地は残るが、通常は平面波入射を想定し、開口面に対する見掛け入射パワーの理論値が用いることとする。

開口部および試料のモデル化については、複雑形状や積層構造の取扱い、実試験室のニッシュ効果も含めた予測の観点から、開口部に壁厚に相当する領域を設定し、板・膜・多孔質材・弾性体・空気などの各種有限要素が適用可能とする。開口部の両側には境界要素の適用が効果的であり、特に均等メッシュにより計算量の大幅な低減を図る。現在の市販

ワークステーションを用いた場合、JIS A 1416が規定する開口部面積 10m^2 に対しては500Hz程度、一般的な窓では1kHz程度、ガラス用開口部 $1.25\text{m}\times 1.5\text{m}$ であれば2kHz程度が大凡の上限となる。

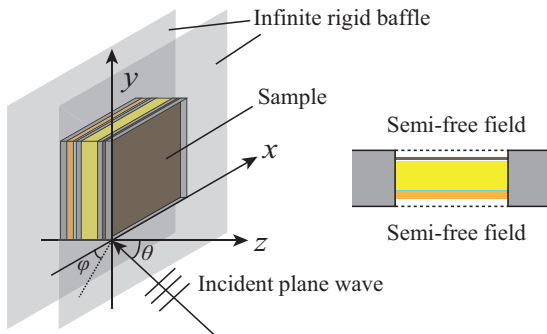


図1：遮音性能解析モデル

(2) 吸音性能解析システムの構築

吸音率に関しては垂直・斜め・ランダム入射の実験室測定法が存在し、建築部材としては残響室法 (JIS A 1409; ISO 354) が一般的である。一方、数値解析ではここでも計算負荷軽減から半自由空間を想定し、試料を剛壁のニッシュ部に設置すると、遮音解析と同様に試料を含むニッシュ領域には各種有限要素、開口面には境界要素が適用可能となる (図2)。ただし、実試験室では試料を剛床面上に設置するため、面積効果は若干異なることが予想される。上記モデルでは、吸音パワーは開口面の音響インテンシティから同定可能であり、入射パワーには開口面に対する見掛けの理論値を用いることとする。

平面波入射を想定して、任意入射角の吸音率を算出可能とし、統計平均によりランダム入射値を推計する。ただし、残響室法吸音率とは異なる値となることが予想されるため、実測データの比較検証を行う。試料のモデル化については遮音解析と同様とし、本研究では多孔質型・板 (膜) 振動型の吸音材料に関してケーススタディを行う。

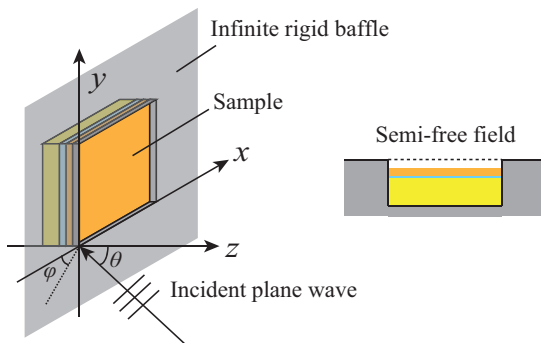


図2：吸音性能解析モデル

(3) 拡散性能解析システムの構築

壁面の拡散性能に関しては、ISO 17497において乱反射率および指向拡散度の実験室測定法が規定されている。前者は吸音率の残

響室法の原理に基づきランダム入射値を同定する方法であるのに対して、後者は特定入射角の斜入射値を同定する方法である。数値解析では自由空間中の試料と基準平板の各々を対象として、平面波入射における反射指向特性を算出し、両者の指向性相関から乱反射率を同定する方法を採用する (図3)。また、同時に反射指向特性の偏差から指向拡散度も同定可能であり、本研究ではケーススタディを通して算出を試みる。

拡散体試料は表面が反射性の凹凸形状から構成されることが一般的であるため、境界条件として完全剛を仮定し、縮退要素を用いた薄板モデルに対して法線微分型境界要素法を適用する。その結果、計算負荷は大幅に軽減されるため、ISO 17497が規定する直径3mの試料面積に相当する3m四方に対して、4kHzまでの解析を実現する。

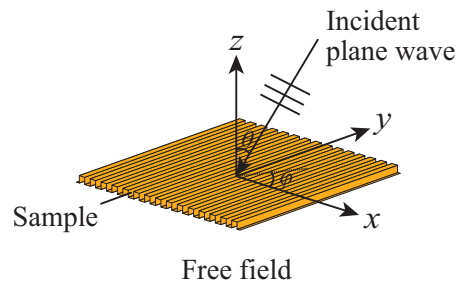


図3：拡散性能解析モデル

4. 研究成果

(1) 遮音性能解析システムの検証

(1-1) ニッシュ効果の解明

現実には残響室と残響室を隔てる壁体の開口部に試料を設置するが、壁体には相当の厚さがあり、試料は両室からみて凹み部分 (ニッシュ) に配置される。この透過損失値への影響はニッシュ効果と呼ばれ、測定上の誤差要因となることが知られている。そこで数値解析では窓用板ガラスを対象としてニッシュ効果の詳細な検討を行った。通常の凹み型に加えて、張り出し型 (開口部から室内側に枠を取り付けたタイプ) の解析モデルを設定し (図4)、ニッシュ内の試料設置位置を変化させ、ニッシュ無しに対する音響透過損失値の変化量を算出した。その結果、ニッシュ効果によりコインシデンス周波数以下において値が低下し、特に凹み型の方が顕著となることが明らかとなった (図5上)。また、試

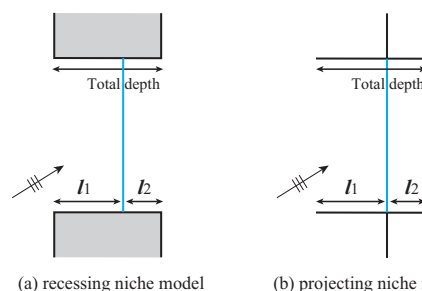


図4：ニッシュのモデル化 (凹み型・張り出し型)

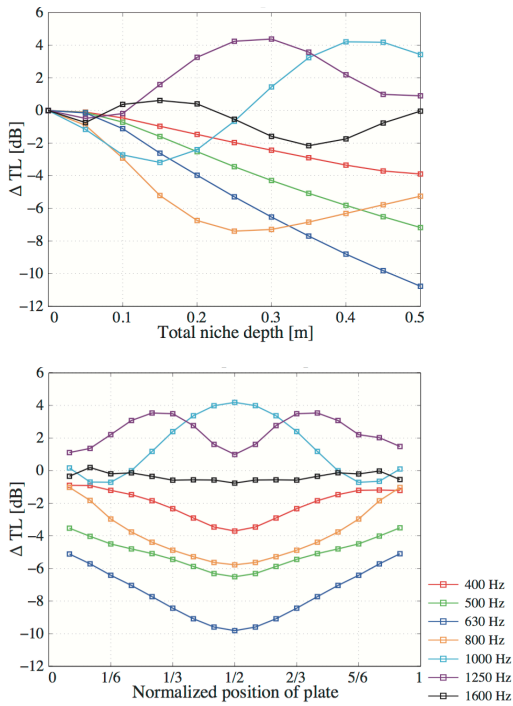


図 5：凹み型ニッシュの透過損失変化量
(上：壁厚変化、下：位置変化)

料を開口部中央に設置した場合、変化量は最大化し、いずれかの室内側端部に設置した場合に最小化することが明らかとなった(図 5 下)。従って、予測システムとしては測定法で規定する複雑なニッシュ形状の精緻なモデル化が不可欠となることが示唆された。

(1-2) 積層材料の透過損失解析

近年自動車分野を中心に音響材料として多孔質材・膜材・板材による積層材料の開発が進んでいる。そこで実用的な積層構造を対象として、新規に開発した音響材料用 FEM プログラムを導入して透過損失解析を行い、実測値および理論値(伝達マトリックス法: TMM)との比較検証を行った。一例として、鉄板・低密度フェルト・膜・高密度フェルトの 4 種の材料と空気層からなる積層構造の解析結果では、実測値・理論値と非常に良い対応が確認された(図 6)。特に、中間膜の接着面の違いにより遮音性能が大きくことなる傾向が再現され、遮音性能の音波入射角の依存性や層間共振のメカニズムを詳細に観察することができた。以上により、積層材料開発における材料物性のパラメトリックスタディが容易に実現可能となった。

(2) 吸音性能解析システムの検証

(2-1) 積層材料の吸音率解析

透過損失解析と同様に、積層材料を対象として吸音率解析を行い、実測値および理論値との比較検証を行った。一例として、低密度フェルト・膜・高密度フェルトの 3 種の材料と空気層からなる積層構造の解析結果では、垂直入射条件において理論値と非常に良い対応が見られたものの、ランダム入射条件に

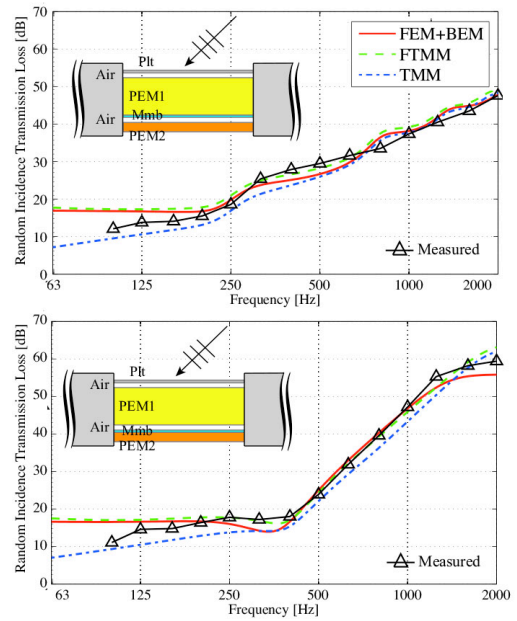


図 6：4 層材料の透過損失の計算値と実測値
(低/高密度多孔質材(PEM1/2)、板、膜)

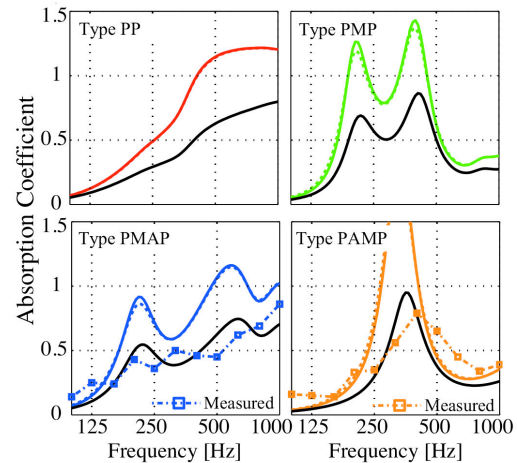
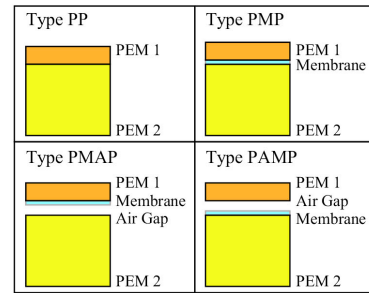


図 7：積層材料の吸音率の計算値と実測値
(低/高密度多孔質材(PEM1/2)、膜)

おいては面積効果により実測値・理論値を大きく上回る値が算出された(図 7)。乖離の原因として、入射パワーに開口面に対する見掛けの理論値を用いていることが考えられ、入射パワーの適切な算出が今後の課題として残された。なお、多孔質材と膜の接着条件や微小空気層が吸音率に大きく影響することが確認され、現実の積層材料の性能予測では接着状態の定量的把握とそのモデル化が重要となることが示唆された。

(2-2) 試料端部処理の影響検討

実際の測定および吸音率解析モデルにおいて、試料端部と凹み側壁との間の隙間や積層材料の表面膜材の側面被覆が吸音率同定に及ぼす影響を検討した。試料四周の隙間幅を増加した場合、低音域のピーク値は低下し、高音域の値は全体的に上昇する傾向が確認された（図 8 左）。低音域のピーク周波数では共振現象が生じているが、隙間からの空気漏れにより共振が弱まったものと考えられる。一方、高音域では側面からの音波の回り込みにより、吸音率が見掛け上増大したものと推察される。また、隙間がある状態で表面膜材の側面被覆幅を増加した場合、高音域の吸音率増大が若干抑制されるが、低音域の吸音率低下はほとんど変わらないことが確認された（図 8 右）。なお、表面膜材の面密度が大きい場合や高密度の多孔質材の場合、隙間の影響が顕著となることも確認された。

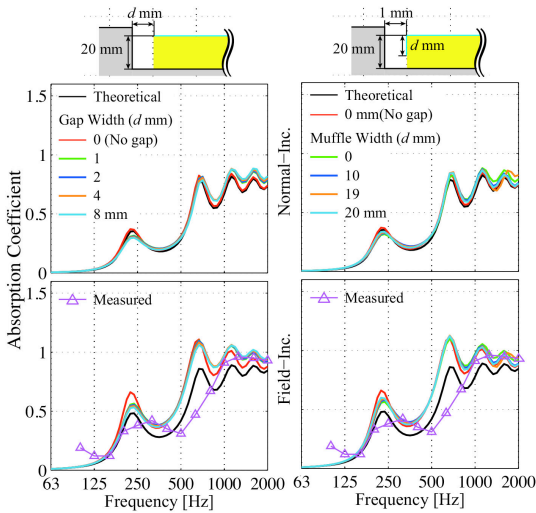


図 8：積層材料の垂直入射・音場入射吸音率の計算値と実測値
（左：側面隙間の影響、右：側面被覆の影響）

(3) 拡散性能解析システムの検証

(3-1) 各種拡散体の乱反射率解析

これまでに開発済の拡散性能解析システムを用いて、各種拡散体の乱反射率の計算を行い、データベースの収集を行った。一例として、一次元リブ型、二次元格子型、非周期ペンローズタイル型の3種の拡散体を比較したところ、新規に提案したペンローズタイル型の乱反射率が最も高く、拡散体として優れた性能を有することが検証された（図 9）。追加検討として、ペンローズタイル型のタイル形状を3次元的な凹凸とすることで、さらに高い乱反射率が得られることから、凹凸の高さに関してパラメトリックスタディを行い、タイル幅に対して高さ 15%程度が最も効果的であることが判明した。この結果に基づき拡散体の試作を行い、模型実験による比較検証も別途実施したところ、解析結果との良好な対応が確認された。

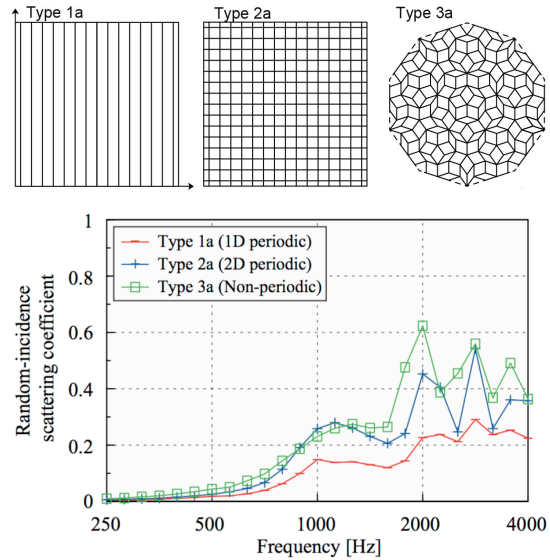


図 9：拡散体3種のランダム入射乱反射率の計算値（リブ型・格子型・非周期型）

(3-2) 各種拡散体の指向拡散度解析

前述の各種拡散体を対象として、乱反射率とともに指向拡散度の算出を試み、その性状を検証することとした。指向拡散度は反射指向特性の均一性に関する指標であり、散乱成分の総量に関する乱反射率との関係性が不明であったため、両指標の対応についても確認した。先ず、指向拡散度の算出においては、試料端部からの回折波が低音域ほど増大するため、その影響の除去が不可欠であることが判明した。端部回折波の影響を除去した規準化指向拡散度を算出し、乱反射率の入射角依存性の対応を確認したところ、全体的には比較的類似した分布性状が見られるものの、細部においては異なる分布となることが確認された（図 10）。従って、二つの指標は各々拡散性能の異なる性質を評価する指標として算出の意義があるものといえる。なお、前述のペンローズタイル型拡散体は、指向拡散度も総じて高く、加えて入射角依存性がほとんどない極めて均一な散乱特性を有することが実証された。

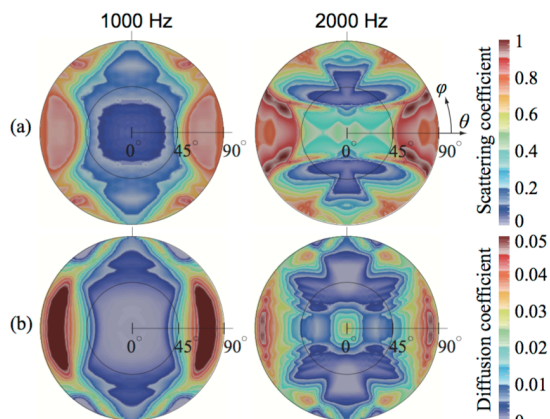


図 10：リブ型拡散体の (a) 乱反射率・(b) 指向拡散度の入射角依存性

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① T. Oshima, Y. Hiraguri, T. Okuzono: Distinct effects of moisture and air contents on acoustic properties of sandy soil, *J. Acoust. Soc. Am. Express Lett.* Vol. 138, EL258-EL263, 2015. 査読有
- ② T. Asakura, T. Seike, N. Inoue, T. Sakuma: Computational benchmark on sound transmission through an elastic plate: Comparison between frequency-domain and time-domain approaches, *Acoust. Sci. Tech.* Vol.36, pp.355-357, 2015. 査読有
- ③ H. Lee, T. Sakuma: Numerical characterization of acoustic scattering coefficients of one-dimensional periodic surfaces, *Appl. Acoust.* Vol.88, pp.129-136, 2015. 査読有
- ④ T. Sakuma, N. Inoue, T. Seike: Numerical modeling of mounting for plate-like elements in sound insulation prediction, *Proc. Inter-Noise 2015 (San Francisco)*, No.888, 9p., 2015. 概要査読有
- ⑤ T. Sakuma, H. Lee: Recent topics in acoustic scattering coefficient determination for wall surfaces, *Build. Acoust.* Vol.21, pp.105-116, 2014. 査読有
- ⑥ N. Inoue, T. Sakuma: Numerical models for predicting absorption/insulation performance of acoustic elements, *Proc. 21st Int'l Cong. Acoust. (Montreal)*, POMA Vol.19, No.0515119, 8p., 2013. 概要査読有

[学会発表] (計 19 件)

- ① 佐久間哲哉、数値音響試験室における建築部材の音響性能予測、日本音響学会秋季研究発表会、2015年9月16日、会津大学(会津市)
- ② 李孝振、壁面の指向拡散度の数値予測 - 試料・計算パラメータの適用条件について、日本音響学会秋季研究発表会、2015年9月16日、会津大学(会津市)
- ③ N. Inoue, Simple estimation of absorption coefficient of porous materials in tube-based measurement under constraint/gapped edge conditions, *Inter-Noise 2015*, 2015年8月9日、サンフランシスコ(アメリカ)
- ④ T. Sakuma, Numerical modeling of mounting for plate-like elements in sound insulation prediction, *Inter-Noise 2015*, 2015年8月9日、サンフランシスコ(アメリカ)
- ⑤ 井上尚久、任意音響材料の部材性能予測に関する研究 その4 - 積層材料の端部処理の影響、日本音響学会秋季研究発表会、2014年9月3日、北海道学園大学(札幌市)
- ⑥ 井上尚久、任意音響材料の部材性能予測に関する研究 その3 - 積層材料の透過

損失、日本音響学会春季研究発表会、2014年3月10日、日本大学(東京都)

- ⑦ 井上尚久、任意音響材料の部材性能予測に関する研究 その2 - 積層材料の吸音率、日本音響学会秋季研究発表会、2013年9月25日、豊橋科学技術大学(豊橋市)
- ⑧ 井上尚久、数値解析による任意音響材料の部材性能予測 - 単層多孔質材の吸音率、日本騒音制御工学会秋季研究発表会、2013年9月5日、熊本大学(熊本市)
- ⑨ 井上尚久、数値解析による任意音響材料の部材性能予測 - 単層多孔質材の吸音率、日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道大学(札幌市)
- ⑩ T. Sakuma, Recent topics in acoustic scattering coefficient determination for wall surfaces, *Int'l Sympo. Room Acoust. 2013*, 2013年6月9日、トロント(カナダ)
- ⑪ N. Inoue, Numerical models for predicting absorption/insulation performance of acoustic elements, *21st Int'l Cong. Acoust.*, 2013年6月6日、モントリオール(カナダ)

[図書] (計 1 件)

- ① T. Sakuma, S. Sakamoto, T. Otsuru, Eds.: *Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics - Methods and Applications of Wave-Based Computation*, Springer, Tokyo, 2014.

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

安田 洋介 (YASUDA, Yosuke)
神奈川大学・工学部・准教授
研究者番号：90456187

大嶋 拓也 (OSHIMA, Takuya)
新潟大学・大学院自然科学系・准教授
研究者番号：40332647

(3) 研究協力者

土屋 裕造 (TSUCHIYA, Yuzo)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程

井上 尚久 (INOUE, Naohisa)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・博士課程