

令和元年6月18日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04465

研究課題名(和文) 不確かさを制御した吸音測定を基盤とする建築音響シミュレーション技術の確立

研究課題名(英文) Finite element room acoustics simulation based on measurement method using ensemble averaging technique with uncertainty control

研究代表者

大鶴 徹 (Otsuru, Toru)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：30152193

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：建築音響分野で喫緊に解決すべき課題とされている、不確かさを制御した材の吸音特性手法の開発と、測定された吸音率を活用した音響数値シミュレーション技術について検討を行った。まず、アンサンブル平均を用いる吸音特性測定手法(EA法)におけるPUセンサ校正手法の改良を行い、100Hz～3000Hzの測定を可能とした。改良された校正法を用いた場合、吸音率の不確かさが0.04以下に収まることを残響室や一般音場で実証した。音響数値シミュレーションに関し、EA法で求めた境界条件の効果、温度勾配を有限要素法で的確に処理する手法の提示、室内の温度勾配が残響曲線へ及ぼす影響、軟壁境界が水中音場へ及ぼす影響等、示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンピュータの発達により高精度の音響シミュレーションが可能になったが、その有効性は与える吸音特性の不確かさに大きく依存する。本研究では、既存の測定法では達成が容易ではない不確かさ(<0.04)のもとで、吸音特性を測定する手法を開発し、測定された値を用いた音響シミュレーションの精度等を検証しようとするものである。さらに、数値解析の特長を活用し、近年、国際的に課題とされている室内の温度勾配が室内音響へ及ぼす影響について検討し、温度勾配の存在が残響曲線の折れ曲りを緩和する傾向を明らかにする等、建築音響の新たな展開の契機を提示した。測定法、解析手法ともに、音響技術全般に革新をもたらすものである。

研究成果の概要(英文)：A series of measurements revealed that the proposed method (EA method) results sound absorption coefficient values with uncertainties less than 0.04, provided PU sensor is calibrated on site following the procedure presented in the study. Design of an acoustic tube for PU sensor calibration was presented that is effective in the frequency region between 100 Hz and 3000 Hz. Measured impedance values were provided to construct the boundary conditions for room acoustics simulation by finite element method (FEM) and the results were compared with measured values. The effect of a soft boundary condition onto sound field was also examined by FEM to show specific changes in sound pressure distributions. A dissipation matrix was newly constructed and the effect of the temperature distribution onto sound absorption measurement in reverberation room was revealed that the existence of temperature distribution contributes to improve the diffuseness of the room.

研究分野：建築環境工学

キーワード：吸音率 表面インピーダンス 不確かさ 有限要素法 音場 数値解析 音響シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

M. Vorlander (独) は 2013 年、建築音場の数値シミュレーションに含まれる不確かさに関わる課題を示した。すなわち、一般的な室の残響時間を、人の JND(just noticeable difference) 5%以下の不確かさのもとで求めるには、平均吸音率の不確かさ(測定値の標準偏差) を 0.04 以下に抑える必要がある。しかし、一般的な残響室法(ISO や JIS で規定)の測定値には $\sigma = 0.1 \sim 0.2$ の不確かさが避けられない。従って、残響室法に替わり「 $\sigma \leq 0.04$ 」を実現する吸音測定手法の開発が急務である。さらに建築音場の数値シミュレーションに関し、室内温度分布が室の音場へ及ぼす影響や幾何音響と波動音響の棲み分けるべき周波数の明示などが重要、と、問題提起を行った。

2. 研究の目的

実験と数値シミュレーションを研究の 2 本の柱として、それぞれ以下を目的とした。

- (1) 実験：建築音響学分野で喫緊に解決すべき国際的課題とされる、不確かさを制御した吸音測定法を確立し有効活用のための指針を整備する。
- (2) 数値シミュレーション：実験で確立した測定法で求めた吸音特性をもとに構成した境界条件を用い、音場の温度分布が室内音場へ及ぼす影響の有無や、幾何音響と波動音響が棲み分けるべき限界周波数を示す。

3. 研究の方法

(1) 実験：代表者らが開発してきた「アンサンブル平均による吸音特性測定手法(EA法)」を活用し、校正方法や音場の制御方法と吸音率に関する不確かさを、実験室実験と現場実験の両方で求めていく。

EA法には、2本のマイクロホンを用いる EApp 法と、音圧 粒子速度センサ(PUセンサと略す)を用いる EApu 法の 2 者がある。これら 2 者には一長一短あるものの、測定原理上、EApu 法の測定精度が EApp 法のそれを上回ることが期待できることから、本研究では EApu 法を主とした検討を実施した。ただし、PUセンサを用いる測定ではセンサの校正が重要であるため、最初に 3000Hz までの周波数領域での校正を可能とする音響管の開発を行った。

続いて、開発された音響管と校正法を用い、EA法の再現性について検討を行った。対象音場は、残響室内拡散音場 3 室、並びに、一般の音場(in-situ) 5 室である。また、グラスウール、ニードルフェルト等、同じ試料を各音場へ持ち回り、吸音特性(表面インピーダンス、吸音率)を求め、その不確かさを標準偏差として求め比較している。

(2) 数値シミュレーション：数値解析では、大分大学で開発整備してきた有限要素法による音場解析(FE-SFA)を用いた。FE-SFAには周波数領域解析、時間領域解析、モード解析の 3 者があり、その特徴を活かして適用している。EA法のシミュレーションのための境界要素解析を付随的に実施している。

音場のシミュレーションでは、模型室、プール内水中音場等を対象に、壁面の表面インピーダンスを変化させ、インパルス応答等を求め、実験値等と比較した。なおモード解析は、解析に要する記憶領域が他の 2 者に比し飛躍的に大となるため、固有モードの影響に関する検討が必要な場合に限り実施し、得られた結果を EA法の測定精度向上に活用することとした。

4. 研究成果

得られた成果のうち主要なものを以下に記す。なお詳細は、日本建築学会、日本音響学会、騒音制御工学会、Applied Acoustics、ICA、Internoise、ICSV、WESPAC 等、内外の権威ある学会で論文(うち、オープンアクセス論文 3 編)として公表している。

(1) PUセンサ校正法：音響管を用い 100Hz から 3000Hz までの周波数域で校正可能な手法として提案した。なお EApu 法(図 1)による測定の際は、音響管内の湿度を測定試料周辺と近似の状態に保った上で、校正を実施することが重要である。また、校正時の環境騒音について、本手法は既往の Piston on a sphere を用いる手法に比し、影響を小さくできる点も重要である。

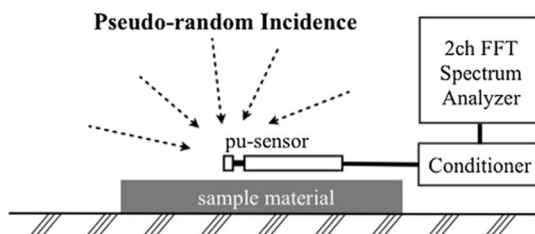


図 1 EApu 法による吸音特性測定の概要。

(2) EApu 法の不確かさ：上記の音響管による校正法を適用した PUセンサを用い、EApu 法による吸音測定を、3 箇所(大分大学、九州大学、熊本大学)の残響室で実施し、各残響室における測

定吸音率の不確かさ（標準偏差）とともに、残響室の相違に関するばらつき（最大偏差）を求めた。測定対象試料は、グラスウール(32 kg/m³、0.5 m × 0.5 m × 0.05 m)とニードルフェルト(0.5 m × 0.5 m × 0.01 m)の2者である。求めた結果の中から代表例として、グラスウールに関する EApu 法の不確かさを図2に示す。この図のとおり、全ての残響室で、125 Hz から 2500Hz の 1/3 オクターブバンドに関し、吸音率の不確かさは 0.04 以下に収まった。また、3 残響室における測定吸音率の相違についても、最大偏差 0.04 以下であることが示されている。

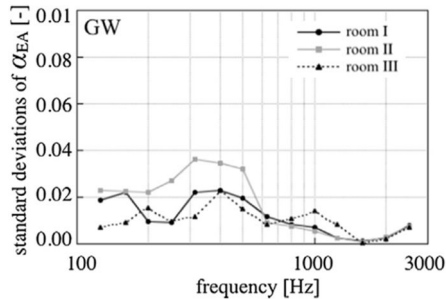


図2 EApu 法により求めた吸音率の不確かさ。

続いて一般的な音場である大分大学学生食堂、廊下、屋外テラス、RC 造住宅居室、研究室において、上記の試料の吸音特性を EApu 法で測定した (in-situ 測定)。その結果、全ての音場で < 0.04 の不確かさのもとで残響室で求めた値とほぼ等しい吸音率が得られた。さらに、従来の手法では測定困難とされる液体 (水) の吸音特性について、残響室内で EApu 法を適用し、簡易な装置にも関わらず有意と認められる値が求められることを実証した。

以上、EApu 法は不確かさの観点とともに、現場を含めた広い適用可能性から、音響数値シミュレーションの境界条件に用いる材の吸音特性を求める実験手法として有効な手法であることが確認された。

(3)有限要素法による音場シミュレーション：既存の方法では解析が困難であった軟壁を含む音場の例としてプール内の水中音場を対象に、FE-SFA による解析を行った。その結果、軟壁の影響で 31、63Hz 帯域では音エネルギーが伝搬せず、25、250Hz 帯域では音源の設置位置で著しく音源の効率が低下すること等、音場の特徴を明らかにした。

(4)温度分布のある音場の有限要素解析に関する基礎的検討：温度分布を有限要素法を用いた波動解析に簡便に導入する方法とその解析精度について検討し、Gauss-Legendre 求積を用いた場合、温度勾配が小さく、また周波数が高いほど、温度勾配を表現する特殊なマトリクス of の省略が可能であることを示した。

(5)室内音場へ及ぼす温度勾配の影響：残響室法による吸音率測定へ及ぼす影響を対象として FE-SFA による解析を行った。その結果、残響室内が上層高温である場合、室内の吸音力の偏りによる拡散性の悪化が緩和される傾向が認められた (図3)。

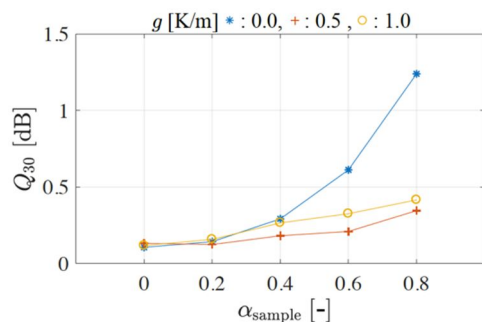


図3 残響室内の温度勾配 g[K/m]が残響曲線の折れ曲りへ及ぼす影響。

以上、音場の温度勾配の影響や軟壁の吸音特性の影響等、数値シミュレーションをはじめとする建築音響の新たな展開の契機とすべき有意義な成果を得たものと考えている。なお、音場の温度分布の精密解析のためのマトリクス方程式構築等、当初計画に比しより深い検討を追加したため、応用的な幾何音響と波動音響が棲み分けるべき限界周波数について今後の課題とした。しかし、本研究で提案した EA 法は、既往の測定法に比し、簡易な測定装置、試料、治具等のもと

で安定した吸音特性を与え得る画期的な手法であり、建築音響のみならず国際的にも多方面での応用が期待できるものである。特に、吸音率のみならず表面インピーダンスが得られる点は、音の波動解析全般で利用可能な長所として強調しておきたい。併せて、PU センサに関しても、音の粒子速度を直接計測可能とする画期的センサとして de Bree (蘭) により開発・販売され、世界的に利用されつつある反面、その安定性を含めた情報は不足していた。この点、本研究で提案した校正法は、既にオープンアクセス論文として広く公表しており、現場測定を含め広い応用の基盤となるものと期待している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 39 件)

1. Sakamoto N, Otsuru T, Tomiku R, Yamauchi S. Reproducibility of sound absorption and surface impedance of materials measured in a reverberation room using ensemble averaging technique with a pressure-velocity sensor and improved calibration. Appl Acoust 2018;142:87-94. (オープンアクセス、査読有)
2. Sakamoto N, Otsuru T, Tomiku R, Yamauchi S, A general description of measurement method for sound absorption and surface impedance of materials using ensemble averaging, Journal of Physics: Conference Series, 1075, 012069~012069 (2018). (オープンアクセス、査読有)
3. Otsuru T, Tomiku R, Okamoto N, Yamauchi S, Sakamoto N, Takenaga N, A fundamental discussion on boundary modeling by ensemble averaging for room acoustics simulations, 25th International Congress on Sound and Vibration 2018, 8pages (2018). (査読有)
4. 星野嗣人, 大鶴徹, 富来礼次、有限要素法を用いたスイミングプール内に形成される音場に関する研究、日本音響学会建築音響研究会資料、AA2018-17、1-8(2018). (査読無)
5. Otsuru T, Tomiku R, Okamoto N, Yamauchi S. Sound absorption deviation measured using pressure-velocity sensors by ensemble averaging technique under different relative humidity conditions. Appl Acoust 2017;122:121-7. (オープンアクセス、査読有)
6. Otsuru T, Tomiku R, Okamoto N, Ueda E, Nakamura A, An discussion on the uncertainty of absorption characteristics measured by ensemble averaging technique for room acoustics simulations, Proc. 22th International Congress on Acoustics (CD-ROM), 8 pages (2016). (査読有)

他

〔学会発表〕(計 49 件)

1. 星野嗣人, 大鶴徹, 富来礼次、有限要素法を用いた媒質不均一場の室内音場解析-温度分布の導入方法と精度検証-、日本音響学会 2019 年春季研究発表会(2019).
2. Otsuru T, Tomiku R, Sakamoto N, A TRIAL APPLICATION OF SOUND ABSORPTION MEASUREMENT METHOD USING ENSEMBLE AVERAGING TECHNIQUE ONTO LIQUID WATER, WESPAC2018 (招待講演) (2018).
3. 星野嗣人, 大鶴徹, 富来礼次、スイミングプール内に形成される音場の有限要素解析—RC 壁境界条件を対象とした検討、日本音響学会 2018 年秋季研究発表会 (2018).
4. 大鶴徹, 富来礼次、山内沙紀、吸音測定における pu センサ校正結果が与える影響、日本建築学会第 77 回音シンポジウム(2017).
5. 大鶴徹, 富来礼次、岡本則子、奥園健、有限要素室内音場解析における室形状及び境界条件の取り扱いに関する検討、日本建築学会大会 (招待講演) (2017).
6. Otsuru T, Tomiku R, Okamoto N, Saigo S, Yamauchi S, A Synthesized Boundary Condition for Wave-based Room Acoustics Simulations using Ensemble Averaged Impedance Measured In-situ, ASA-ASJ Joint Meeting 2016 (2016).

他

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 <http://www.arch.oita-u.ac.jp/o2l/hp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：富来 礼次

ローマ字氏名：TOMIKU, Reiji

所属研究機関名：大分大学

部局名：理工学部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：20420648

研究分担者氏名：岡本 則子

ローマ字氏名：OKAMOTO, Noriko

所属研究機関名：北九州市立大学

部局名：国際環境工学部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：00452912

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。