

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360238

研究課題名(和文) 建築環境の波動音響数値解析のためのマクロ的境界モデリング

研究課題名(英文) Macroscopic boundary modeling of acoustic environment for wave-based computational simulations

研究代表者

大鶴 徹(Otsuru, Toru)

大分大学・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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：快適な音環境を実現する上で、コンピュータシミュレーションは不可欠な技術である。本研究では、高精度なシミュレーションを効果的に実施する際に不可欠な境界モデリングに関し形状と吸音の両側面から検討し、室内音響の現場へ適用可能な空間分割の基準IGと吸音測定のためのEA法、ならびに、画像計測法の提案を行い、得られる精度等、基本的な特性を指針として示し、総合システム構築の基盤とした。

研究成果の概要(英文)：A new 27-node finite element constructed with the modified integration rule is proposed for computational simulations of room acoustics, and excellent accuracy is proved. To evaluate the fineness of the spacial mesh division, we proposed an index Ig and a suit of the finite element simulations constructed using IG proved that the resulting room acoustics parameters show clear linearity to IG if the value is less than 0.8. Subjective experiments of the simulated acoustics proved that the boundary settings with the IG less than 1.2 cause smaller difference than just noticeable difference. A new measurement method using ensemble averaging is proposed for measuring the boundary's absorption. A series of measurement using the method proved the uncertainties of the method stay the level with the standard deviations less than 0.04. A simple method to measure the boundary's geometry using a camera with fish eye lens is given. A trial measurements are conducted with a calibration technique.

研究分野：建築環境・設備

キーワード：建築音響 建築環境 波動音響解析 シミュレーション 有限要素法 モデリング 吸音測定

1. 研究開始当初の背景

コンサートホールや講義室等、音が主役を演じる室のみならず、事務室や工場等の作業効率向上、さらには、居室の快適性向上のため、室内音響の予測と制御は重要である。

今日、室内音響を予測・制御する際に、コンピュータシミュレーションは重要かつ不可欠なツールとなった。計算機のハード面の性能はギガ・テラのオーダーの速度や容量が実用化され、ソフトの面でも有限要素法等波動音響数値解析技術が相当のレベルまで発展しつつある。他方、人の聴感覚は、芸術を聴き分ける程の繊細ささえも稀なものではなく、その繊細さに見合う室内音響シミュレーションの実現には、未だ解決すべき大きな課題が残されている。

2. 研究の目的

室内音響シミュレーションに関し解決すべき喫緊の課題は、解析対象のモデリングに関する適切なガイドラインの確立である。本研究では、境界形状と吸音に関するモデリングについて、音響シミュレーションの精度との関連から指針を与える。また、現場におけるそれらの計測手法について、不確かさとの関連から指針を与える。

なお、建築の音響の空間性能と最終的には聴取者の感覚に注目する立場を「マクロ的」と呼び、材料などの局所的挙動に注目する立場と区別する。

3. 研究の方法

理論・数値解析的検討では、有限要素法による音場解析システム(LsFE-SFA)の高精度化・効率化を図るとともに、50m³規模の事務室内の音場に関するパラメトリックスタディを実施した。検討パラメータとして、周波数 f [Hz]、解析精度 Res [%]、要求性能 $1/d$ [-]、空間分解能 F [1/m]を選定し、モデリングの詳細さを示す基準値 I_G を用い検討した。また、室内音響の主観的評価指標について、シェッフェの対比較法・浦の変法による被験者11名に関する実験とあわせ、モデリングと聴感覚の対応関係を明らかにしている。

吸音に関する実験的検討では、残響室、講義室、廊下において代表的な建材を対象に、研究代表者等が提案してきたアンサンブル平均による手法(EA法)によるノーマルインピーダンスの測定と吸音率の算定を行い、結果の不確かさを明らかにした。また、従来の研究で測定が難しいと言われてきた低吸音性材の現場測定の場合スタディとして、屋外における路面の吸音特性をEA法により求めている。比較のため、JIS・ISOで規定された音響管による管内法・残響室法を併用した。

境界の形状計測に関する検討では、カメラによる画像処理技術の応用を図る。従来の標準レンズに加え、魚眼レンズによる効率的な計測についてレンズの校正法を含めた実用的手法の開発を行い、効率化の程度や実用性

を明らかにしている。

4. 研究成果

(1) 研究代表者等が開発してきた27節点スプライン音響要素へ修正積分則を適用し、より高性能な要素を開発した。図1は、その性能確認のため、同一の空間分解能、波長/節点間長 ($1/d$) と分散誤差の関係性を算定した結果である。この図で示されるとおり、修正積分則による要素(Improved)は、3種の積積分点(0.8558, 0.8669, 0.8700)の別に関わらず、同一の空間分解能における誤差が従来要素(Conventional)より小さい。また、LsFE-SFAでAIJ Bench Mark問題を用いた音場算定結果からも、修正積分則による要素の精度の高さが、示された。

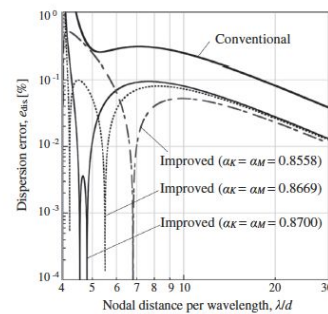


図1 有限要素解析における空間分解能と分散誤差：従来要素と修正積分則による要素の比較

(2) 50m³規模の事務室を対象に、直交グリッド用の基準値 I_G を用い8種のモデリングに関するLsFE-SFA音場解析を行い、得られたインパルス応答から残響時間 T_{30} とクラリティ C_{80} の2種の室内音響指標を算出した。最も精密なモデリングによるそれらの値を基準とし、基準との差 (dT_{30} , $C_{80, r.m.s.}$) を求め I_G との関係として図2、3に示す。

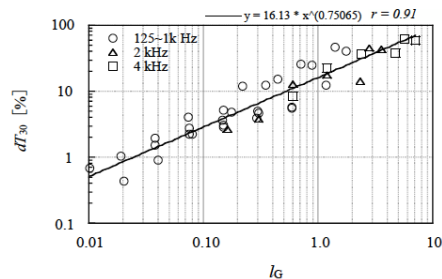


図2 I_G と dT_{30} の関係

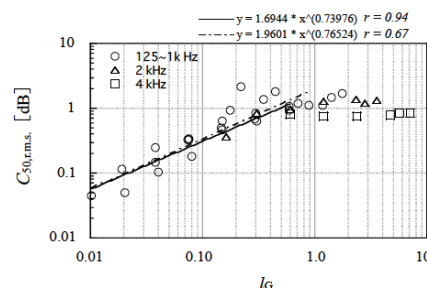


図3 I_G と $C_{80, r.m.s.}$ の関係

図2より、 dT_{30} については0.01 I_G 7.0、図3より、については0.01 I_G 0.8の範囲で、 I_G と2種の音響評価指標に線形関係が認められた。

これらの結果をもとに、シェッフェの対比較法・浦の変法により、上記の8室における音声（男・女）聴取時の相違を比較した。図4に結果の一例を示すが、 I_G 1.2の場合、「残響感」や「音声の明瞭さ」について主観的差があると認め難いことが統計的に明らかとなった。

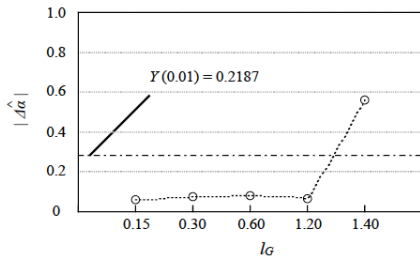


図4 I_G と明瞭性の差

さらに、部材形状の奥行きを省略するケースについて、パラメータスタディを実施したところ、 I_G 0.3で T_{30} , C_{50} が全て弁別閾未満となること等を明らかにした。

(3)音響管による音圧-粒子速度センサ(PUセンサ)校正法の改良を行い、400 Hz以下の低周波数領域での特性改善を図った。これにより、低吸音性材の測定に関する精密な検討が可能となった。この結果を踏まえ、EA法により屋外における道路面を含む材の特性を測定し、結果の再現性等を確認した。

得られた結果の一例を図5に示す。図5では、コンクリート道路表面の吸音率（左軸）とその標準偏差（右軸）を、PUセンサによるEA法(EA_pu)、2マイクロフォンによるEA法(EA_pp)、現場における管内法の3種の測定法で複数回求め比較したものである。

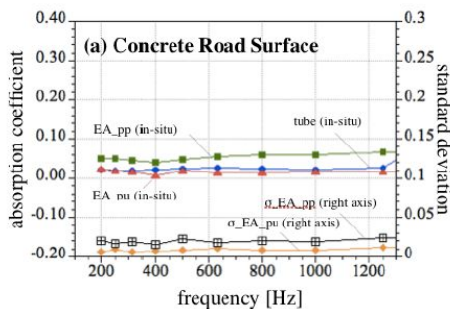


図5 コンクリート道路表面の吸音特性の現場における測定結果の比較。EA_pu法、EA_pp法、管内法（吸音率（左軸）標準偏差（右軸））。

図5から、200 Hzから1250 Hzまでの全周波数域について、EA_pu法により得られた吸音率は、管内法の結果とよく近似している。EA_pp法の結果は、それらより0.01程度高い

値を示すものの、全周波数域にわたる周波数特性の傾向は、他の2つの測定法による結果と一致している。

標準偏差について、EA法の結果はセンサの種類によらず、全周波数域で0.04以下の値を示した。すなわち、EA法による測定は、吸音率が1を下回る低吸音性材の測定であっても、十分小さな不確かさのもとに結果を与え得ることが示され、実用化のための基盤が構築された。

(4)魚眼レンズを利用する簡易な境界形状計測法について、図6の室（容積129.5 m³）を対象に、レンズの校正法（図7）とカメラ位置の推定を行い、測定に必要な基線長について検討した。

その結果、基線長が1.3 mの場合でも、提案手法によるレンズの適切な校正を施せば、基線長が3.0 mの場合と同等の精度が確保可能なこと等が示された。

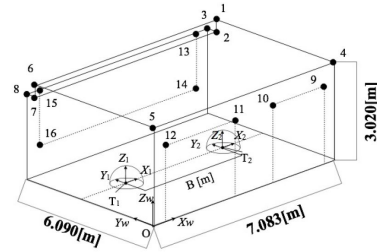


図6 境界形状測定対象



図7 魚眼レンズの校正

以上、本研究により、形状と吸音に関する境界モデリングを主題に、音響シミュレーション技術の基盤を整備した。まず、シミュレーションの精度と効率を高めるため、修正積分則による高精度な音響要素の開発を行い、その性能を確認した。続いて、境界モデリングに関する空間分割に関するガイドラインとして提案する直交グリッドの基準値 I_G を用いパラメトリックスタディを実施し、被験者実験を行った。一連の計算と実験結果をもとに、境界モデリングの指針を示した。また、境界モデリングで不可欠な材の吸音特性を現場測定する手法として、EA法の応用を提案した。また、PUセンサの校正法の改良と低吸音性材の現場測定を含めた測定結果の不確かさを明示し、EA法活用のための基盤とした。さらに、境界形状を簡易に測定するため、魚眼レンズによる画像計測システムの構築と基礎的な校正法と試行結果を示し、総合システムの基盤とした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

Takeshi Okuzono, Toru Otsuru, Kimihiro Sakagami, Applicability of an explicit time-domain finite-element method on room acoustics simulation, *Acoustic. Sci. & Tech.* 査読有, (2015, 掲載決定).

<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/ast>
大鶴徹、音圧-粒子速度センサによる吸音測定、*日本音響学会誌*、査読無、70 巻、pp. 554-559 (2014).

<http://id.ndl.go.jp/bib/025838687>

Takashi Takikawa, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, IMAGE PROCESSING TECHNIQUE FOR SOUND FIELD ANALYSIS IN ROOMS-BASIC INVESTIGATIONS OF INTRODUCTION AND CALIBRATIONS OF FISH EYE LENS-, *Proc. KYJCA*, 査読有, No.227, pp.30-31 (2015).

Emi Ueda, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Noriko Okamoto "REPRODUCIBILITY OF IN-SITU MEASUREMENT METHOD USING ENSEMBLE AVERAGING TECHNIQUE APPLIED ONTO REFLECTIVE MATERIALS, *Proc. KYJCA*, 査読有, No.226, pp.157-160 (2015).

Takeshi Okuzono, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Noriko Okamoto, A finite-element method using dispersion reduced spline elements for room acoustics simulation, *Appl. Acoust.* 査読有, 79, pp.1-8 (2014). doi:10.1016/j.apacoust.2013.12.010

Toru Otsuru, Computer simulation and modeling techniques of sound fields for sustainable environmental architecture,, *International Conferences on 15th SENVAR and 2nd AVAN*, 査読有, CD-ROM (10 pages), Keynote Lecture (2014).

Toru OTSURU, Reiji TOMIKU, Takeshi OKUZONO, Absorption modeling with ensemble averaged impedance for wave-based room acoustics simulations," *Proc. of Internoise*, 査読有, CD-ROM (7 pages), (2014).

Takeshi OKUZONO, Toru OTSURU, Kimihiro SAKAGAMI, An explicit time-domain finite-element method for room acoustics simulation, *Proc. of Internoise*, 査読有, CD-ROM (6 pages) (2014).

Takeshi Okuzono, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Noriko Okamoto, Relationship between dispersion error and accuracy of room acoustics parameter in time-domain finite-element room acoustics simulation, *Proc. Internoise*, 査読有, No.570, p8 (2013).

Toru Otsuru, Kusno Asniawaty, Reiji Tomiku, et al., Humidity effect on pressure-velocity sensor examined in sound absorption measurement with

ensemble averaging technique, *Proc. Internoise*, 査読有, No.467, p1-7 (2013,9).

Tomohiro Oda, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Takeshi Okuzono, Image processing technique for sound field analysis in rooms, *Proc. YKJCA*, 査読有, No.211, pp.53-56 (2013).

Kusno Asniawaty, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Takeshi Okuzono, Kazuki Nakano, Stability examination on pressure velocity sensor by absorption coefficient of ensemble averaging method-Effect of humidity and time parameters-, *Proc. YKJCA*, 査読有, No.213, pp.28-31 (2013).

Nazli Bin Che Din, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Noriko Okamoto, Kusno Asniawaty, Reproducibility and applicability of ensemble averaged surface normal impedance of materials using an in-situ technique, *Acoust. Aust.*, 査読有, 41(3), pp.207-212, (2013).

http://www.acoustics.asn.au/journal/2013/2013_41_3_Din.pdf

Takeshi Okuzono, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Noriko Okamoto, Dispersion-reduced spline acoustic finite-elements for frequency-domain analysis, *Acoustical Sci. & Tech.*, 査読有, 34(2), pp. 221- 224 (2013).

DOI: 10.1250/ast.34.221

アスニアワティ クスノ、大鶴徹、富来礼次、岡本則子、ナズリピンチェディン、音圧-粒子速度センサの安定性への湿度の影響-アンサンブル平均を利用した建築材料の吸音特性測定法-、*日本建築学会技術報告集*、査読有、19 巻、41 号、pp179-184 (2013 年)。DOI: 10.3130/aijt.19.179

Takeshi Okuzono, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, Noriko Okamoto, Application of modified integration rule to time-domain finite-element acoustic simulation of rooms, *J. Acoust. Soc. Am.*, 査読有, 132(2), pp.804-813 (2012).

DOI: 10.1121/1.4730920

〔学会発表〕(計 41 件)

板井健、大鶴徹、富来礼次、松本史、時間領域有限要素法による室内音場解析の室形状モデリングに関する研究-その 7 中高周波数帯域における解析精度の検討-、*日本建築学会九州支部研究発表会*、2015 年 02 月 28 日~2015 年 03 月 01 日、熊本県立大学(熊本県熊本市)

松本史、大鶴徹、富来礼次、板井健、時間領域有限要素法を用いた波動音響シミュレーションの室形状モデリングに関する研究-部材の奥行きの有無による音響指標の差異-、*日本建築学会九州支部研究発表会*、2015 年 02 月 28 日~2015 年 03 月 01 日、熊本県立大学(熊本県熊本市)

滝川宇志、大鶴徹、富来礼次、画像処理技術を利用した室内音場予測に関する研究
魚眼レンズの校正に関する検討-、建築学会九州支部研究発表会、2015年02月28日～2015年03月01日、熊本県立大学(熊本県熊本市)

大鶴徹、富来礼次、奥園健、招待講演 音場シミュレーションの現状と課題・展望、日本音響学会研究発表会(秋季)、2014年09月03日～2014年09月05日、北海学園大学豊平キャンパス(北海道札幌市)

上田笑、大鶴徹、富来礼次、柳池将俊、アンサンブル平均を利用した材料の吸音特性の in-situ 測定に関する研究-その1 音響管を用いた音圧-粒子速度センサの校正-、日本建築学会大会、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

柳池将俊、大鶴徹、富来礼次、奥園健、上田笑、アンサンブル平均を利用した材料の吸音特性の in-situ 測定に関する研究-その2 Piston on a sphere 法による音圧-粒子速度センサの校正-、日本建築学会大会、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

中村麻美、大鶴徹、富来礼次、奥園健、アンサンブル平均を利用した in-situ 吸音測定法の応用-天井改修による実在カフェ空間の音響改善-、日本建築学会大会、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

加津山裕太、大鶴徹、富来礼次、松本史、時間領域有限要素法を用いた波動音響シミュレーションの室形状モデリングに関する研究-その2 部材形状の省略を考慮した中高周波数帯域を含めた解析精度の検討-、2014年09月12日～2014年09月14日、神戸大学(兵庫県神戸市)

奥園健、大鶴徹、大嶋拓也、富来礼次、平栗靖浩、岡本則子、アンサンブル平均を利用した測定法による地表面の吸音特性の in-situ 測定、日本音響学会研究発表会(春季)、2014年03月10日～2014年03月12日、日本大学理工学部(東京都千代田区)

原千晶、大鶴徹、富来礼次、音響管を用いた建築材の吸音率の測定に関する研究-試料サイズ及び支持条件に関する基礎的検討-、日本建築学会九州支部研究発表会、2014年03月02日～2014年03月02日、佐賀大学(佐賀県佐賀市)

他

〔図書〕(計1件)

Sakuma, Tetsuya, Shinichi Sakamoto, Toru Otsuru, Reiji Tomiku, et al., Computational Simulation in Architectural and Environmental Acoustics, Springer Japan, 2014年、324ページ.

〔その他〕

ホームページ等

<http://acoust.hwe.oita-u.ac.jp/otsurula>

b/research.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大鶴 徹 (OTSURU, Toru)

大分大学工学部教授

研究者番号：30152193

(2) 研究分担者

富来礼次 (TOMIKU, Reiji)

大分大学工学部准教授

研究者番号：20420648