

平成22年5月31日現在

研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19206062
 研究課題名(和文) 大規模音響数値解析技術による建築音響シミュラークルデータベース構築
 研究課題名(英文) Constructing simulacres database on architectural acoustics by large-scale computational methods
 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

研究成果の概要(和文)：コンサートホールをはじめ講義室や住宅などの音場(音波が伝搬している空間)を、科学的な波動音響的手法により解析するシミュレーション技術の開発と、特徴的な音場に関するデータベースの収集・構築を行った。建築音場はしばしば大規模で、複雑、かつ、雑多な形状と吸音性状を有する。その効果的な計算には、目的に応じた計算手法の開発・選択とともに境界条件の処理も重要である。本研究では、基盤となる知見を求めデータベースを構築している。

研究成果の概要(英文)：Computer simulation techniques based on the wave equation are investigated to analyze large-scale sound fields in built environments and a database of sound fields in typical sound fields is constructed. Due to the largeness as well as the complexness of the sound field in an actual room, highly efficient computational techniques for solving the math-physical system are required. Appropriate numerical solvers that suit for each sound field to be analyzed are given including the adequate parameter settings. The boundary modeling techniques are also discussed on the problems relating with shape modeling and with absorption modeling. The constructed database consists of six types with eleven rooms. Impulse responses are measured in the rooms and included into the database as well as the other information like CAD data and photographs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2008年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2009年度	10,300,000	3,090,000	13,390,000
年度			
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築環境・設備

キーワード：建築環境・設備、建築音響、シミュレーション、可視化・可聴化、バーチャルリアリティ、スーパーコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

「シミュラクル」は一般に、また、現代哲学で用いられる用語だが、その定義は必ずしも明確ではない。本研究では、コンピュータ・シミュレーションの結果やシミュレーションにもとづく生成若しくは再生物を総称して「シミュラクル」と呼ぶ。

L. Beranek(MIT、米)は”How They Sound CONCERT AND OPERA HALLS”の第1章に「もしもこの先、マルチチャンネル録音とサラウンド装置付きの大型テレビが普及したら、音楽はコンサートホールで演奏されなくなるかもしれない。(中略)コンサートホールがオーケストラやホールの職員とともに街並から消え去ると考えられようか?きっとコンピュータやCD(若しくはその後継機器)、・・・そしてインターネット・・・、が取って代わるのだろう!」と記した(研究代表者が和訳の上、要約)建築音響学の大家が発するこの問いかけへ答える際の確固たる基盤を与えよう、とするのが本研究の根底に流れるモチベーションである。具体的には、建築空間を舞台とする音響に関する実在の系とそのシミュラクルの、科学的比較を行う基盤技術とデータの提供である。

上記L. Beranekの著書を嚆矢とするように、ホール音響に関する実測データは既に多くの蓄積があり、インパルス応答データをもとにホームオーディオなどのサラウンド機器が製作・市販されている。そのデータはしばしばコンピュータ・シミュレーションの結果で代替されるが、その場合の科学的根拠は後述の理由で希薄と言わざるを得ない。

シミュレーションは、複雑な対象の数理解物理的・体系的考察に不可欠な技術で、単に実在を模倣するだけでなく、パラメトリックスタディによる科学的考察の手段として重要となる。

建築音響分野では、幾何音響理論にもとづくシミュレーション(幾何音響シミュレーション)が開発され実用化されて既に久しい。例えばA. Gade, J. Rindel(デンマーク工科大)らの研究のようにシミュレーション結果と実測の、ある程度の一致も報告されている。上記ホームオーディオでも幾何音響シミュレーションのシミュラクルが用いられるのが現状である。

しかし幾何音響シミュレーションでは音波の波動性が無視され回折など重要な現象を記述できず、特に低周波数域での精度は原理的に保証されない。研究代表者自身も、図-1に示すホールにおける検討で確認済みである。

即ち、一般に「腹に響く重低音」などと表現されコンサートホールの音響の特徴として特に重要な低周波数域に関し、幾何音響シミュレーションは確固たる科学的基盤を与えるものではあり得ず、その結果やそれにもとづく再生音場も実在との近似の程度は不明である。それを可能としL. Beranekの問いかけへ科学的に答えるものとして、波動音響数値解析技術こそが重要と考えられ、本研究を企画・実施した。

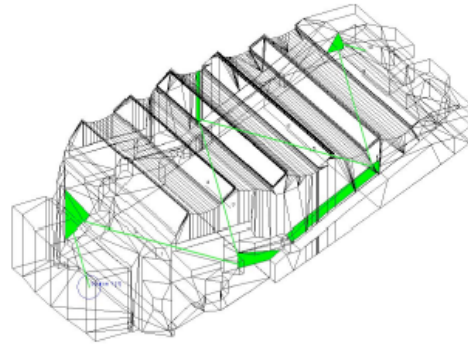


図-1 コンサートホール。

2. 研究の目的

建築空間を舞台とする音響に関する実在の系とそのシミュラクルを科学的に比較するための基盤技術整備とデータの提供を行う。即ち：

- (1) 容積 10000m³規模の建築空間の周波数 10Hz~4000 Hz 領域にわたる音響数値解析技術の確立(パラメータ設定と算定精度に関する知見の整備)
- (2) ホールや居室空間のシミュラクルに関わる音響データベースの構築(各種空間の形状や音響特性等をデータベース化)を行う。

3. 研究の方法

基本的体制として、九州、関西、東京の各地域ユニットごとに以下の研究を推進し、地域ユニット相互間の日常的連絡にはインターネットを活用する。また必要に応じ、全体会議や分科会を開催した。

(1) 音響数値解析技術

計算の効率化のため、主に反復法を活用し計算メモリ縮小と演算時間の短縮を行う。大規模計算を可能とするため、九大情報基盤研究開発センタ機器を本研究グループとしてCPU占有契約し、各地域ユニットからネットを介して活用する。

(2)境界モデリング

形状モデリングと吸音モデリングの2点を検討する。前者について、レーザー計測の建築音場解析への応用と細かな形状の相違が音場解析へ及ぼす影響の解明を行う。後者についてはノーマルインピーダンスによるモデリングの精度等を明らかにする。

(3)データベース

一般的なホール、居室、講義室等に加え、寺社建築など特徴的な建築物内の音場について形状データとインパルス応答の測定データを収集しデータベース化を行う。

4. 研究成果

以下、大規模音場解析のための音響数値解析技術、並びに、建築音場解析に資するデータベース構築に関し実施した研究の主たる成果の概要を記す。

(1)音響数値解析技術

まず解析に先立ち、大分大学開発の音響要素 Sp127 を用いる有限要素音場解析に必要な計算機の記憶容量 RM を示したものが図-2 である。これより例えば、今日のパーソナルコンピュータで実装が容易な 16 GB の主記憶容量の場合、 $38,000 \text{ m}^3$ の建築空間を約 500 Hz 以下の周波数領域まで解析可能であることが分かる。

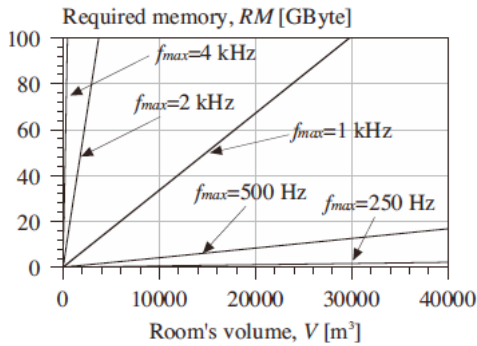


図-2 室容積 V 、解析上限周波数 f と Sp127 を用いた FEM 音場解析に要する記憶容量 RM 。

続いて、時間領域有限要素法 (TDFEM) による実大建築音場の効率的な解析のため、適用にあたり問題となる反復解法の収束性について、図-3に示す 70 m^3 と $3,000 \text{ m}^3$ の実大建築の音場解析を対象に明らかにした。その結果、
 ① TDFEM に現れる $[A]\{x\} = \{b\}$ の $[A]$ は反復解法の収束に対して良好な性質を持つ。
 ② Ads 付き COCG 法は、音場や解析自由度数によらず安定的に収束し、1 ステップあたり

反復回数は20 回程度 (収束判定値 $\delta \leq 10^{-6}$) である。

③ Ads 付き COCG 法を適用した TDFEM の演算量は解析時自由度数とそれまでの反復回数の積に比例し、計算時間の予測が容易である。

これらを総合して TDFEM への反復解法の適用は、TDFEM による音場解析の効率化に有効と結論された。

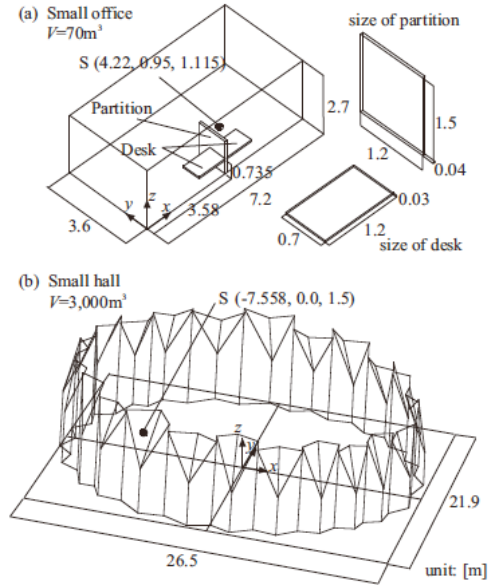


図-3 解析対象。(a):事務室、(b):音楽ホール。

さらに、室内音場解析へ Newmark β 法を利用した TDFEM を適用する際の、効果的な β の設定について、以下の知見を見出した。

- ① 無条件安定性を保持する $\beta = 1/4$ (Constant averaging acceleration method) は、 $\beta = 1/6$ (Linear averaging method)、並びに、 $\beta = 1/12$ (Fox-Goodwin method) に比べより細かい時間刻み幅が必要とされる。
- ② 条件安定ではあるが $\beta = 1/12$ によれば、より大きな時間刻み幅が設定可能で、計算時間短縮に効果的である。
- ③ 併せて、立方体室 ($V = 64 \text{ m}^3$) の音場解析を実施し、解析音波長の最大値/最大要素長 (λ/d) が 5~6 程度以上であれば十分な精度が期待できることを確認した (図-4)。

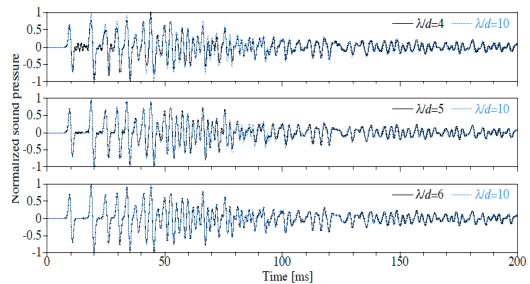


図-4 TDFEM に要する要素分割数の検討結果。立方体室のインパルス応答算定結果。

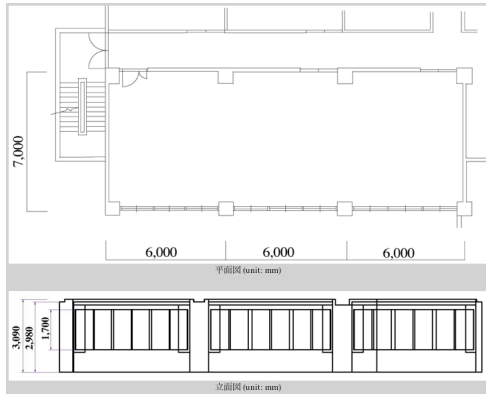


図-9 講義室（大分大学 VBL セミナー室）の平面図。

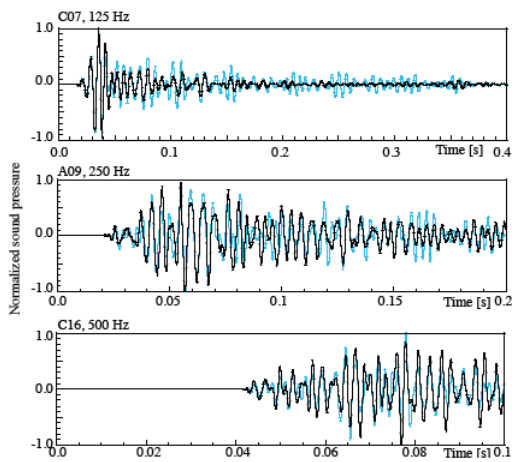


図-10 講義室（大分大学 VBL セミナー室）のインパルス応答（実測値(青線)と TDFEM 解析値(黒線)）。

③ドーム建築（大分スポーツ公園総合競技場）
大規模建築音場であるドーム競技場の音場データを収集した。収集した図面の一部を図-11 に、また、インパルス応答の一例を図-12 に示しておく。

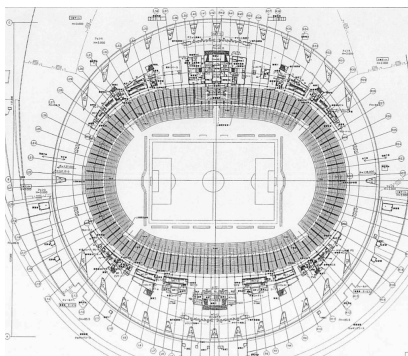


図-11 大分スポーツ公園総合競技場の平面図。

全体として 11 室内の音場に関わる情報を収集しデータベースとした。このデータベースは、解析結果の検証や相互比較等、音場の数値解析に関わる研究における活用はもと

より、建築音響技術の基盤となるものである。一部、データ量が大きいためネットからの利用に制約が伴うものの、ウェブ上に公開し活用を期している。

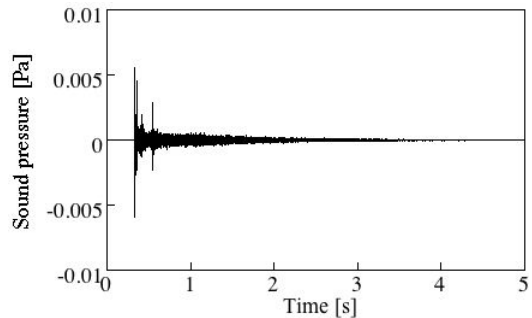


図-12 大分スポーツ公園総合競技場のインパルス応答測定結果の一例（All pass）。

以上、本研究により得られた成果は下記の論文として公表している。特に、内外の権威ある学会誌での査読論文 13 件、国際的な著書 1 件、を含む全 85 件の論文等は、当該分野で世界をリードするものである。

今後は、得られた基盤的成果が建築音響設計等の実務の現場で活用されるよう、研究のさらなる応用的展開を果たすべき、と考えている。併せて、得られた成果を技術者・初学者等の教育で活かすことも重要であろう。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 84 件）

- ① T. Okuzono, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, Accuracy and efficiency of time domain finite element method for sound field analysis of rooms, Proc. Internoise2009, 概要査読有, Published by CD-ROM, 2009, 9p
- ② T. Otsuru, T. Okuzono, R. Tomiku, N. Okamoto, T. Imai, Large-scale finite element sound field analysis of rooms with ensemble averaged impedance and 3D laser scanner modeling, Proc. WespacX, 概要査読有, Published by CD-ROM, 2009, 8p
- ③ T. Asakura, S. Sakamoto, Finite-difference time-domain analysis of sound insulation performance of wall systems, Building Acoustics, 査読有, 16 巻, 2009, 267-281
- ④ 鬼束崇博, Moe Thuthu, 阿部邦美, 尾上勇介, 藤野清次, A^T のべき乗を用いた初期シャドウ残差による BiCG, CGS 法の収束性の向上, 日本応用数学会論文誌, 査読有, 19 巻, 2009, 121-142
- ⑤ S. Sakamoto, Calculation of sound propagation in three-dimensional field with constant cross section by Duhamel's efficient

- method using transient solutions obtained by finite-difference time-domain method, Acoustical Science and Technology, 査読有, Vol.30, **2009**, 72-82
- ⑥ S. Sakamoto, H. Nagatomo, A. Ushiyama, H. Tachibana, Calculation of impulse responses and acoustic parameters in a hall by the finite-difference time-domain method, Acoustical Science and Technology, 査読有, Vol.29, **2008**, 256-265
- ⑦ T. Okuzono, T. Otsuru, R. Tomiku, N. Okamoto, T. Minokuchi, Speedup of time domain finite element sound field analysis of rooms, Proc. Internoise2008, 概要査読有, Published by CD-ROM, **2008**, 10p
- ⑧ T. Sakuma, K. Egawa, Y. Yasuda, Numerical analysis of sound transmission loss of glass pane - On the treatment of edge damping, Proc. Internoise2008, 概要査読有, Published by CD-ROM, **2008**, 9p
- ⑨ 奥園健、大鶴徹、岡本則子、富来礼次、反復解法を適用した時間領域有限要素法による室内音場解析、日本建築学会環境系論文集, 査読有, 73 巻, **2008**, 701-706

[学会発表] (計 78 件)

- ① 大鶴徹、建築音響数値解析におけるシミュラクルとシミュレーション、日本音響学会 2009 年秋季研究発表会、2009 年 9 月 15 日、日本大学工学部、福島県
- ② M. Akita, The basic measurement of the sounds in human body for detecting the sleep-in sleep state, Wespac X, 2009 年 9 月 22 日, Beijing Friendship Hotel, Beijing, China
- ③ 河井康人、局所作用の仮定とその妥当性について、日本音響学会建築音響研究会、2010 年 1 月 20 日、キャンパスポート大阪、大阪県
- ④ 藤野清次、IDR ベースの非定常反復法 SOR 法の性能評価、大規模音響数値解析技術による建築音響シミュラクルデータベース構築」に関する科研費分科会、2009 年 7 月 9 日、福岡建築会館、福岡県
- ⑤ 堀之内吉成、「局所作用の仮定」により生じる誤差に関する基礎的検討、日本音響学会・研究会、2008 年 10 月 24 日、広島市まちづくり市民交流プラザ、広島県
- ⑥ 緑川洋一、ウェーブレットを用いた波形分解による耐雑音音声認識の検討、日本音響学会春季研究発表会、2009 年 3 月 17 日、東京工業大学岡山キャンパス、東京都
- ⑦ 富来礼次、音響数値解析ベンチマークプラットフォームフォームと Krylov 部分空間法を利用した大規模音場有限要素解析について、クリロフ別府フォーラム、2007 年 9 月 28 日、ビーコンプラザ、大分県

[図書] (計 1 件)

- ① S. Marburg, B. Nolte, T. Otsuru, T. Sakuma, Y. Yasuda, Springer, Computational Acoustics of Noise Propagation in Fluids, 2008, 578p(T. Otsuru, 57-67), (T. Sakuma, Y. Yasuda, 333-366)

[その他]

ホームページ等

<http://gacoust.hwe.oita-u.ac.jp/simulacres/databas e09.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

河井 康人 (KAWAI YASUHIITO)

関西大学・工学部・教授

研究者番号：70121796

藤野 清次 (FUJINO SEIJI)

九州大学・学内共同利用施設等・教授

研究者番号：40264965

秋田 昌憲 (AKITA MASANORI)

大分大学・工学部・教授

研究者番号：40192900

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

坂本 慎一 (SAKAMOTO SHINICHI)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：80282599

福田 亮治 (FUKUDA RYOUJI)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：70238492

堀之内 吉成 (HORINOUCI YOSHINARI)

京都大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：20199558

緑川 洋一 (MIDORIKAWA YOICHI)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：90315317

富来 礼次 (TOMIKU REIJI)

大分大学・工学部・准教授

研究者番号：20420648

大嶋 拓也 (TOMIKU REIJI)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：40332647

(3) 連携研究者

()

研究者番号：