

有限要素法による室内音場の時間応答解析に関する研究

奥園, 健
大分大学大学院工学研究科

大鶴, 徹
大分大学工学部

岡本, 則子
大分大学ベンチャービジネスラボラトリー

<https://doi.org/10.15017/1467689>

出版情報 : 九州大学情報基盤センター広報 : 全国共同利用版. 6 (3), pp.185-187, 2007-03. Computing and Communications Center Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

有限要素法による室内音場の時間応答解析に関する研究

奥園 健 (大分大学大学院工学研究科), 大鶴 徹 (大分大学工学部),
岡本 則子 (大分大学ベンチャービジネスラボラトリー)

1 はじめに

建築音響分野において、有限要素法（以下、FEM）等の波動音響学に基づく数値解析手法は計算コストの高い手法とされ、これらの手法の適用は、一般に小規模空間、あるいは低周波数域へと限られるとされる [1].

しかし、近年の計算機の発達並びに効率的なアルゴリズムの開発により、波動音響学に基づく数値解析手法を用いて、コンサートホール規模の建築空間の音場予測も試みられるようになってきた [2]. 筆者等も、FEMにより約 12000 m³ のコンサートホールを対象に約 1k Hz 周波数領域までの周波数応答解析を行っている [3].

一方、FEMによる時間応答解析を対象とした場合、未だ小規模空間を対象とした検討が多く、コンサートホール規模の建築空間内部の音場予測を行った例は見当たらない.

本研究では、時間領域を対象にFEMによる大規模建築空間内部の高周波数域までの音場予測の実現を目指している. 既報 [5] では、大規模解析に向けた基礎的検討として、連立一次方程式の解法への反復解法の適用、OpenMPによる並列計算の適用など計算の効率化を図ってきた. ただし、200m³程度までの建築空間を対象としており、コンサートホール規模の建築空間の時間応答解析は試みていない. 本稿では、約 3000 m³ の小ホール内音場の時間応答解析を行った事例を示す.

なお、本報告集別項 [4] では、約 37000 m³ の大規模多目的ホールを対象に周波数応答解析を試行している. これに比べ、本稿で対象としている空間は約 3000 m³ と小規模なホールである. しかし、解析の規模は約 900 万自由度の連立一次方程式を約 13000 回解く大規模なものに設定しており、数万 m³ 規模の建築空間の解析に向けた第一歩と位置づけている.

2 FEMによる室内音場の時間応答解析手法

FEMによる音場の離散化運動方程式は次式で表される.

$$[M]\{\ddot{p}\} + [C]\{\dot{p}\} + [K]\{p\} = \rho\omega^2 u\{W\} (= \{f\}). \quad (1)$$

ここで、 $[M]$, $[C]$, $[K]$ はそれぞれ音響質量, 同減衰, 同剛性マトリクスを表す. また, $\{p\}$ は複素音圧振幅ベクトル, ρ は媒質密度, ω は角周波数, u は振動変位, $\{W\}$ は節点への配分ベクトルである. なお, \cdot , $\ddot{\cdot}$ はそれぞれ時間に関する 1 階微分, 2 階微分を表す. さらに (1) 式の時間方向へ線形加速度法を適用すれば, ある時刻 t における $\{p\}_t$, $\{\dot{p}\}_t$, $\{\ddot{p}\}_t$ が既知の場合, Δt を時間刻み幅とし, 時刻 $t + \Delta t$ における $\{p\}_{t+\Delta t}$, $\{\dot{p}\}_{t+\Delta t}$ はそれぞれ次式で表される.

$$\{p\}_{t+\Delta t} = \left\{ \{p\}_t + \Delta t \{\dot{p}\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{3} \{\ddot{p}\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{6} \{\ddot{p}\}_{t+\Delta t} \right\}, \quad (2)$$

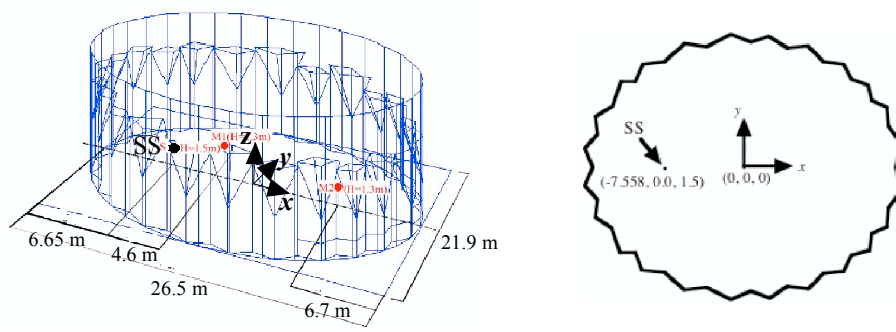


図 1: 解析対象の小ホール. (左) 鳥瞰図, (右) 平面図

$$\{\dot{p}\}_{t+\Delta t} = \left\{ \{\dot{p}\}_t + \Delta t \left(\frac{\{\ddot{p}\}_t + \{\ddot{p}\}_{t+\Delta t}}{2} \right) \right\}, \quad (3)$$

続いて, (2), (3) 式を (1) 式に代入すると次式の連立一次方程式を得る.

$$\left[[M] + \frac{\Delta t}{2}[C] + \frac{(\Delta t)^2}{6}[K] \right] \{\ddot{p}\}_{t+\Delta t} = \left\{ \{f\}_{t+\Delta t} - [C]\{P\} - [K]\{Q\} \right\}, \quad (4)$$

ただし,

$$\{P\} = \left\{ \{\dot{p}\}_t + \frac{\Delta t}{2}\{\ddot{p}\}_t \right\}, \{Q\} = \left\{ \{p\}_t + \Delta t\{\dot{p}\}_t + \frac{(\Delta t)^2}{3}\{\ddot{p}\}_t \right\}. \quad (5)$$

時間ステップ毎に (2), (3), (4) 式を繰り返し解き時間応答を導出する. なお, (4) 式の求解には COCR(Conjugate A-Orthogonal Conjugate Residual) 法 [6] を使用した.

3 小ホール内音場の時間応答解析

解析対象は「音響数値解析ベンチマークプラットホーム」 [7] から, 図 1 に示す B1-1T (複雑な境界形状を持つ小ホール) を選定し, 室内に設置した点音源からの時間応答を算定した. 音源はトーンバースト (12 波, 中心周波数 250 Hz) である. 壁面の吸音条件は天井のみ完全吸音とし, 床・側壁は完全反射とした. 音響要素には 27 節点スプライン要素 [8] を使用し, 総自由度数は 8926001 である. 時間刻み幅は 0.023 ms とし, 解析時間長は 0.3 s (全 13230 ステップ) とした. なお, 解析プログラムには OpenMP による並列化を施し, 計算には 8CPU を用いた. また, 最適化オプションは -O2 を使用した.

図 2 に小ホール内部の音波伝搬の様子を示す. 時間経過と共に, 音源から音が円状に広がっていく様子や, 側壁・床からの反射音により生じる複雑な干渉模様をよく捉えており音波伝搬の傾向が得られている. なお, 解析に要した記憶容量は 14.2 GByte, 計算時間は 421568 s であった.

4 まとめ

本稿では, 小ホールを対象に FEM により時間応答を算定した. 音波伝搬の可視化から, 妥当な解析結果が得られたと考える. 今後は, 室内に座席等を配置したより現実に近い音場への適用を図る予定である.

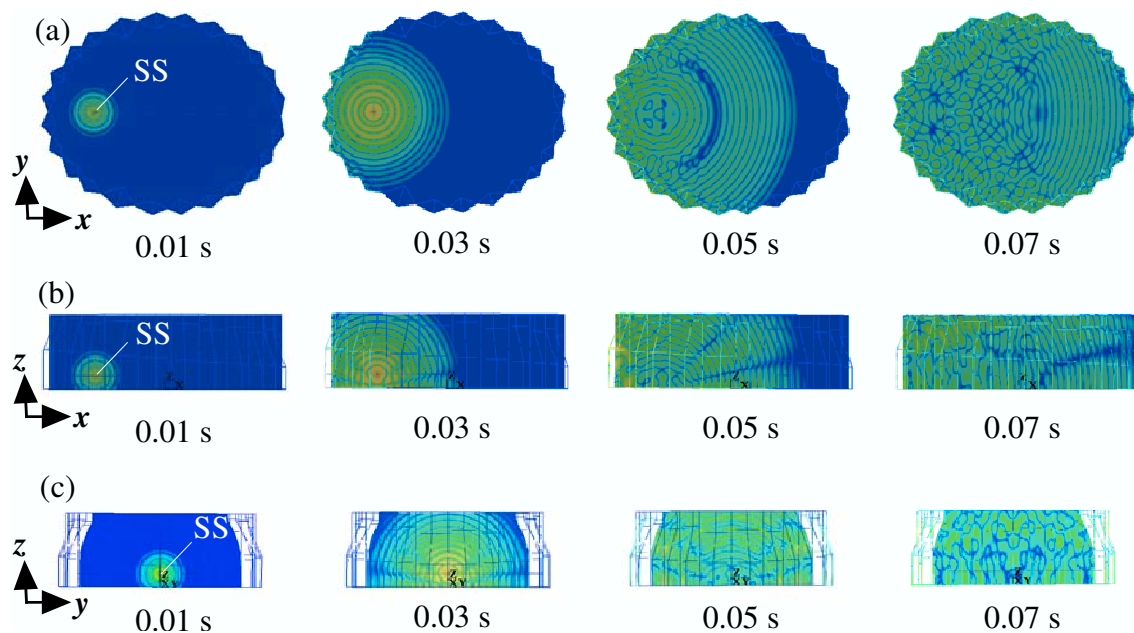


図 2: 小ホール内部の音波伝搬の可視化. (a) x - y 平面 ($z=1.5$ m) , (b) z - x 平面 ($y=0.0$ m) , (c) y - z 平面 ($x=-7.56$ m)

参考文献

- [1] Andrew Wareing *et al.*, Beam-tracing model for predicting sound fields in rooms with multilayer bounding surfaces, J. Acoust. Soc. Am. 118(4), pp 2321-2331, 2005
- [2] 安田他, 境界要素音場解析への Krylov 部分空間法の適用 - 反復解法を利用した大規模音場数値解析 その 1 , 日本建築学会環境系論文集, 第 605 号 pp 15-22, 2006.7
- [3] Otsuru T *et al.*, Basic concept, accuracy and application of large-scale finite element sound field analysis of rooms, Proc. ICA 2004, pp IV-2477-2480, 2004
- [4] 岡本則子, 本報告集別項
- [5] Okuzono T *et al.*, Time domain finite element sound field analysis of rooms using iterative methods and parallelization, Proc. Inter-noise 2006, Published by CD-ROM, 2006
- [6] Sogabe T *et al.*, A COCR method for solving complex symmetric linear systems, Journal of computational and applied mathematics, 199(2), pp 297-303, 2007
- [7] <http://gacoust.hwe.oita-u.ac.jp/AIJ-BPCA/>
- [8] Otsuru T *et al.*, Basic characteristics and accuracy of acoustic element using spline function in finite element sound field analysis, J. Acoust. Soc. Jan.(E), 21(2), 87-95, 2000