

有限要素法による音場解析手法の構築とその可聴化
(シンポジウム講演概要)

Development of Acoustic Analysis Method using the Finite Element Method and
its Auralization
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

深澤 一志 (中央大・理工) 宮内 暖季 (中央大・理工) 檜山 和男 (中央大・理工)
吉川 仁 (京都大・情報)
Kazushi FUKAZAWA, Chuo University
Haruki MIYAUCHI, Chuo University
Kazuo KASHIYAMA, Chuo University
Hitoshi YOSIKAWA, Kyoto University
E-mail: kaz@civil.chuo-u.ac.jp

This paper presents a noise evaluation system based on the finite element method using impulse response analysis and its auralization. The time-variant convolution is employed to treat the moving sources problem such as traffic noise. The PML boundary condition is employed to treat the open boundary condition. The system exposes to users the computed noise level with both the auditory information using sound source signal and the visual information using CG image. The computed results are compared with the measurement results in VR space.

1. はじめに

著者らは、外部波動問題に適している境界要素法に着目し、時間域高速多重極境界要素法 (FMBEM) を用いた音場解析手法の構築を行ってきた¹⁾。しかし、現状の計算リソースでは、計算コストの増加から高周波成分を含んだ解析や、より大規模な解析への適用が難しいという問題が存在した。

そこで本研究では、インパルス応答解析に基づく有限要素法 (FEM) による音場解析手法の構築とその可聴化を行った。開境界処理には高精度な吸収が可能な PML 法 (Perfectly Matched Layer Method) を用い、先端形状改良型遮音壁のモデルを作成し、遮音壁周辺の音場解析を行った。解析の妥当性を検証するため、解析解および従来の高速多重極境界要素法との比較を行った。また、交通騒音などの移動音源問題に適用するため時変量み込み演算を適用し、計算結果を HMD (Head Mounted Display) により可聴化するシステムを構築した。

2. 数値解析手法

2.1. 支配方程式

本研究では開境界の処理に PML 法²⁾ を使用する。支配方程式の修正波動方程式と移流方程式、式中の変数と行列を以下に示す。

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \beta p - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x_j^2} - c^2 \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_j} = 0 \text{ in } D, \tag{1}$$

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \Phi_i + \mathbf{B} \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \text{ in } D_{\text{PML}}, \tag{2}$$

$$\alpha = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z,$$

$$\beta = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x,$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sigma_x & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \sigma_x - \sigma_y - \sigma_z & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y - \sigma_z - \sigma_x & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z - \sigma_x - \sigma_y \end{bmatrix},$$

Table 1 Calculation cost.

	計算時間[分]	使用計算機 容量[GB]	解析モデル 容量[GB]
FEM	8分	46.7	7.55
FMBEM	90分	73.4	0.07

ここに、 D は解析領域を、 D_{PML} は PML 領域を、 t は時間を、 c は音速を、 Φ_i は補助変数を表す。 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ は各方向の減衰パラメータを表し、PML 領域では非 0、非 PML 領域では 0 となり音波を吸収する役割をもつ。また、領域 D 内では Φ_i, σ_i が 0 となるため通常の波動方程式を解くことに等しい。

2.2. 有限要素法に基づく数値解析

式 (1), (2) に対して Galerkin 法に重み付き残差法を適用し、導いた弱形式に対し、空間方向に四面体 1 次要素を用いた有限要素法を適用し、以下の方程式を得る。

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \alpha \mathbf{M}_e \frac{\partial p}{\partial t} + \beta \mathbf{M}_e p + \mathbf{K}_e p - \mathbf{S}_e \Phi_j = \mathbf{F}_e, \tag{3}$$

$$\mathbf{M}_e \frac{\partial \Phi_i}{\partial t} + \mathbf{A} \mathbf{M}_e \Phi_i + \mathbf{B} \mathbf{S}_e p = 0, \tag{4}$$

ここで $\mathbf{M}_e, \mathbf{K}_e, \mathbf{S}_e, \mathbf{F}_e$ はそれぞれ各要素の質量行列、拡散行列、移流行列、境界積分項を表す。また、本解析では陽解法を用いるため質量行列に集中化を施す。時間方向の離散化には中心差分を用い、音圧と補助変数を求める。

また、移動音源問題を取り扱うために、時変量み込み演算手法³⁾ を導入した。

3. 高速多重極境界要素法と計算効率の比較

本手法と高速多重極境界要素法 (FMBEM) を用いて同規模のインパルス応答解析に基づく音場解析を行った。計算コストの比較を Table.1 に示す。FEM は領域型の解法であることから容量は大きくなるもの、計算時間および計算機容量の点では FMBEM に比べて優れるという結果になった。なお、計算自由度は FEM では約 2,200 万、FMBEM では約 39 万である。比較の詳細については講演時に述べる。

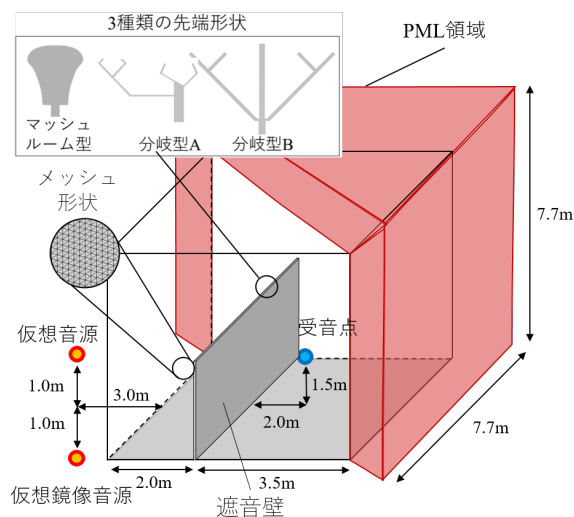


Fig. 1 Computational model.

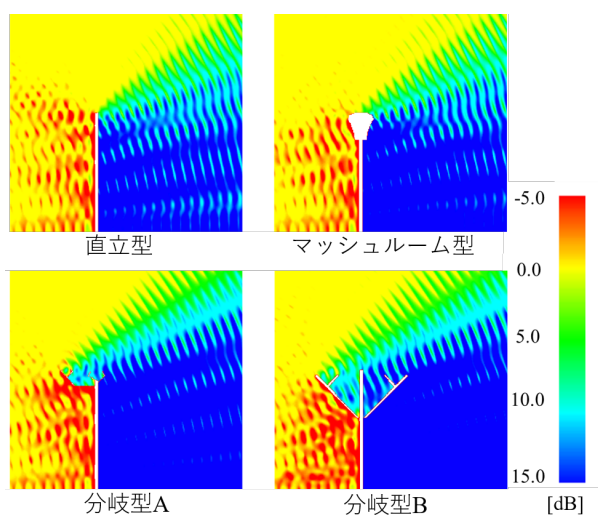


Fig. 2 Distribution of noise.

4. 数値解析例

4.1. 工事騒音問題への適用

Fig. 1 に解析モデルを示す，遮音壁周辺の音場解析を行う．その際，先端形状の違いによる音の低減効果を確認するため4種類の遮音壁モデルで比較を行う．最小空間離散化幅は0.022m，時間離散化幅は 6.67×10^{-5} s，音速は340m/sとし，境界条件は地面部，遮音壁ともに完全反射，PMLのパラメータは $L_i = 1.1, R = 10^{-6}$ とする．なお，解析に使用したコンピュータは東京大学のスーパーコンピュータシステム，Oakbridge-CXであり，8ノード(448cores)を使用し，領域分割に基づく並列計算を行っている．また，自由度は約8,000万である．

Fig. 2 にインパルス応答に対し工事騒音の実音源を畳み込み，遮音壁がない場合との音圧レベル差を可視化した図を示す．コンターは音の低減量を示し，青色に近いほど遮音壁がない場合に比べ音を低減できていることを表す．図より，遮音効果の定量的な確認や先端改良型遮音壁の効果的な音の低減を確認できる．

4.2. 移動音源問題への適用

道路交通騒音解析を行うために時変畳み込み演算法を



Fig. 3 Noise evaluation system using VR.

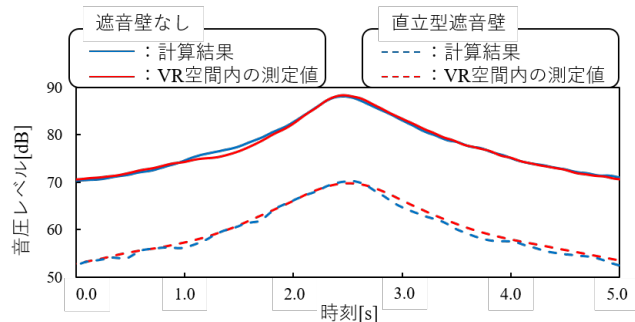


Fig. 4 Comparison of sound pressure level.

導入した．可聴化対象としては，移動音源として大型車を仮定する．走行距離は80km/h，150mで走行するものとし，走行音を定常音化したデータを使用する．VRデバイスとシステム利用中の様子をFig. 3に示す．

また，装置から発せられる音をHMDの録画機能により測定し，計算結果との比較を行った．Fig. 4に示す通り，VR空間内の可聴化結果は計算結果通りの音場が再現できていることが分かる．

5. おわりに

本研究では，インパルス応答解析に基づく有限要素法による音場解析の構築とその可聴化を行った．また，VR技術を用いて計算結果を可聴化し，騒音評価システムの構築を行った．結論を以下に述べる．

- 有限要素法は高速多重極境界要素法に比べ計算時間の点で大幅に優れる
- 開境界の処理にPML法を適用することで，反射波の発生を抑えることができる
- VR技術により計算結果を可聴化した結果，構築したシステムはVR空間において計算結果通りの音場が再現ができる

今後の課題として，実測値との比較が挙げられる．

参考文献

- 1) 庄子諒，深澤一志，吉川仁，高橋徹，檜山和男：インパルス応答解析に基づく高速多重極境界要素法による音場解析とその可聴化，土木学会論文集A2(応用力学)，土木学会，Vol.77，No.2，pp.171-182，2021．
- 2) Kaltenbacher, B. Kaltenbacher, M. and Sim, I., "A modified and stable version of a perfectly matched layer technique for the 3-d second order wave equation in time domain with an application to aeroacoustics," *J. Comput. Phys.*, Vol.235, pp.407-422, 2013.
- 3) 今井啓太，吉町徹，檜山和男：吸音モデルを考慮したインパルス応答解析手法の構築とVR技術を用いた可聴化，土木学会論文集A2(応用力学)，土木学会，Vol.75，No.2，pp.1259-1267，2019．