

# 音場解析における高速多重極境界要素法を用いたメッシュ分割幅の検討

中央大学 学生員 ○ 深澤 一志  
中央大学大学院 学生員 庄子 諒  
中央大学 正会員 檜山 和男

## 1. はじめに

騒音は典型 7 公害の 1 つとして定められており、近年の都市開発や都市部の活性化に伴い、騒音被害は増加している。よって音場解析は重要な課題である。騒音評価手法は実験的手法と、数値解析手法に大別されるが、大規模な実験設備を必要とせず、解析条件の変更数が容易な数値解析手法での騒音評価システムの構築が望まれている<sup>1)</sup>。著者らは、数値解析手法の中で外部問題に適している境界要素法<sup>2)</sup>を用い、要素数が増加するにつれ、記憶容量が著しく増加するという問題点を改善した時間域高速多重極境界要素法を用いて音場解析手法の構築を行ってきた<sup>3)</sup>。しかし、既往の研究では大規模解析のメッシュ分割に関して具体的な評価、検討してこなかった。そこで、本研究では、遮音壁を有する 3 次元非定常の音場解析をモデルとし、メッシュ分割幅の検討を行った。

## 2. 境界要素法による音場解析

本研究で取り扱う 3 次元非定常波動問題の外部問題の支配方程式および、境界条件、初期条件を以下に示す。

・支配方程式 (波動方程式)

$$\nabla^2 u(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(\mathbf{x}, t) \quad : \Omega \text{ 内} \quad (1)$$

・境界条件

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}, t) \quad : \Gamma 1 \text{ 上} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t) \quad : \Gamma 2 \text{ 上} \quad (3)$$

( $\Gamma 1$ : Dirichlet 境界条件,  $\Gamma 2$ : Neumann 境界条件)

・初期条件

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad : \Omega \text{ 内} \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad : \Omega \text{ 内} \quad (5)$$

ただし、 $\Omega$  は解析領域、 $\Gamma 1$ ,  $\Gamma 2$  はその境界を表す。 $u$  はポテンシャル、 $\frac{\partial u}{\partial n}$  は  $u$  の法線微分であり、 $n$  は解析領域から外向きの法線ベクトルである。

続いて式 (1) に対応する境界積分方程式を以下のように導出する。

・境界積分方程式

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} u(\mathbf{P}, t) &= \int_0^\infty \int_{\Gamma} u^*(\mathbf{Q}, t) \nabla u(\mathbf{Q}, t) d\Gamma dt \\ &\quad - \int_0^\infty \int_{\Gamma} \nabla u^*(\mathbf{Q}, t) u(\mathbf{Q}, t) d\Gamma dt \\ &\quad : \Gamma \text{ 上} \end{aligned} \quad (6)$$

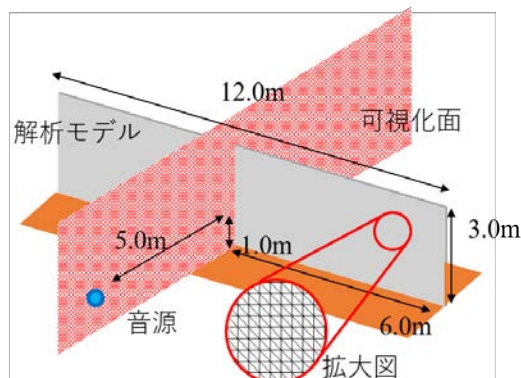


図-1 解析モデル

ここで  $u^*(\mathbf{x}, t)$  は波動方程式の基本解であり、次式で表される。

$$u^*(\mathbf{x}, t) = \frac{\delta\left(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c}\right)}{4\pi |\mathbf{x}|} \quad (7)$$

ここに  $c$  は波速、 $\delta$  は Dirac のデルタ関数を表す。

式 (6) より求めた境界値を、以下の式に代入することにより、領域内の任意の点で物理量  $u(\mathbf{x}, t)$  が求まる。

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, t) &= \int_0^\infty \int_{\Gamma} u^*(\mathbf{x}, t) \nabla u(\mathbf{x}, t) d\Gamma dt \\ &\quad - \int_0^\infty \int_{\Gamma} \nabla u^*(\mathbf{x}, t) u(\mathbf{x}, t) d\Gamma dt \\ &\quad : \Omega \text{ 内} \end{aligned} \quad (8)$$

## 3. 数値解析例

### (1) 解析条件

今回の解析に用いる解析モデルを図-1に示す。図-1は一般的な直立型遮音壁のモデルである。音速、時間増分はそれぞれ、340m/s, 0.0000512ms, 壁面の境界条件は完全反射とし、1000Hz 程度まで一定の周波数解析を持つように生成した、lubich の疑似インパルスを入射させた。

・Lubich の疑似インパルス

$$u(\Delta t) \cong \sum_{L=0}^{L-1} \left( \frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{\Delta t}{c}} \right) e^{(-2\pi i \frac{L}{T})} \quad (9)$$

メッシュ分割幅は、1000Hz の解析を基準とし、1000Hz の音の 1 波長 (音速 340m) を 20 分割, 10 分割, 5 分割した,  $\Delta x = 0.017\text{m}, 0.034\text{m}, 0.068\text{m}$  の 3 通りとした。

**キーワード：** 高速多重極法, 境界要素法, 音響学, 遮音壁

**連絡先：** 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 E-mail: a17.kfgc@chuo-u.ac.jp

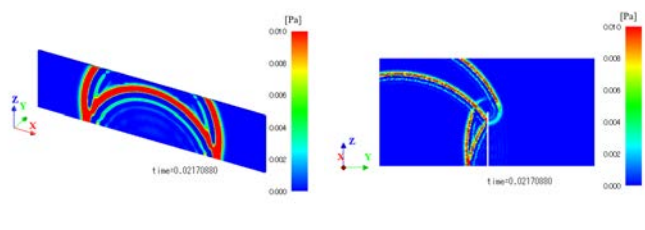


図-2 境界値計算の可視化図 図-3 内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.017$ )

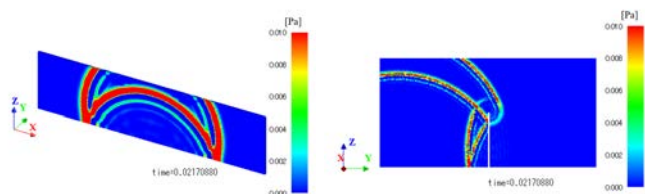


図-4 境界値計算の可視化図 図-5 内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.034$ )

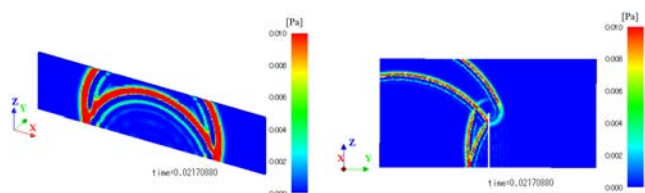


図-6 境界値計算の可視化図 図-7 内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.068$ )

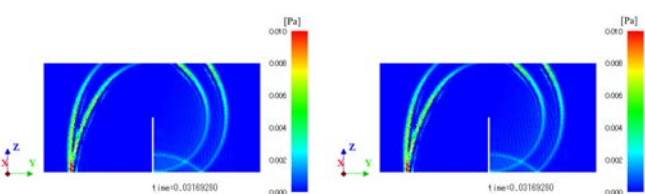


図-8  $t=0.0316928s$  の内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.017$ ) 図-9  $t=0.0316928s$  の内点計算の可視化図 ( $\Delta x=0.068$ )

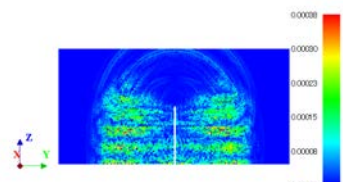


図-10  $t=0.0316928s$  の  $\Delta x=0.017$  と  $\Delta x=0.068$  の音圧値の差

## (2) 解析結果

擬似インパルスを伝播させたときの境界値計算，内点計算の音圧分布 (時刻  $t = 0.0217088s$ ) をそれぞれ図に示す。可視図では明確な差異は見受けられないことが分かる。同時刻での  $\Delta x=0.017m$  と  $\Delta x = 0.068m$  の内点計算の音圧値の差を図-10に示す。差はごくわずかであることが確認できる。

続いて，図-12に示すように，遮音壁から音源と逆側に3.0m，高さ0～6mに受音点を配置し(0.1mごと)，時刻

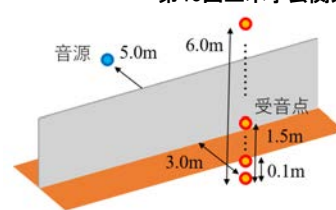


図-11 受音点の位置

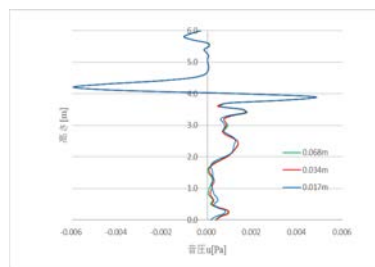


図-12  $t=0.0316928s$  の音圧値比較

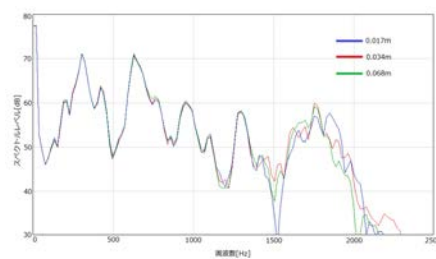


図-13 周波数解析

$t = 0.0316928s$  での音圧値分布を比較した。また，図-12よりメッシュ分割幅での違いはほとんど見受けられないことが分かった。擬似インパルスを図中の点音源からの入射波とし，受音点での応答に対して音のデータの畳み込みを行った。代表点として，高さ1.5mの受音点で受け取る音の時刻歴波形を周波数解析した。原因として  $\Delta t$  を条件で変えていない，このモデルの条件では1波長を5分割するメッシュ分割幅でも十分メッシュが細かい，などが挙げられる。また，図-13の周波数特性の解析から，1000Hzまでは3つのグラフがほぼ一致するが，それ以上高周波になると成分がカットされることが確認できた。

## 4. おわりに

本研究では，遮音壁を有する3次元非定常の音場解析において，メッシュ分割幅の検討を行った。今後は，複雑形状でも今回の結果が適用できるかの確認を行う。また，より実地形に近い，反射率の考慮，移動音源，高周波での解析を行うことを予定している。

## 参考文献

- 1) 安田洋介：高速多重極法による大規模音場予測に関する研究，東京大学学術機関リポジトリ，2021-01-04，<https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/>(参照 2020-10-30)
- 2) 神谷紀生，田中正隆，田中喜久昭：境界要素法，培風館，pp1-2，1980。
- 3) 岡村理一郎，吉川仁，高橋徹，高木貴弘，檜山和男：安定化手法を用いた時間域多重極境界要素法に基づく道路交通騒音解析とその可聴化システム，土木学会論文集 A2(応用力学)，土木学会，Vol.72，No2，pp257-264，2016。