

道路交通騒音予測システムの構築のための境界要素法による音場解析

中央大学 学生員 金井 淳
 京都大学 正会員 吉川 仁
 中央大学 正会員 櫻山 和男

1. はじめに

近年、都市人口の増加、交通機関の過密化、建設工事の増加などが原因で、騒音は大きな社会問題となっており、高精度な騒音の予測手法が必要とされている¹⁾。著書らはこれまで、VR 技術を用いた幾何音響理論に基づく騒音予測システムの構築を行ってきた。しかし、幾何音響理論は計算時間の点で有利であるが、複雑な幾何形状を有する都市空間への適用性に難がある²⁾。そこで本研究では、VR 技術を用いた騒音予測システムの適用性の向上を目的として、波動音響理論に基づいた数値シミュレーションを行う³⁾。数値シミュレーション手法としては、領域型の解法と比べて外部問題を解くうえで優位となる境界要素法を用いる。計算手法の妥当性を確認するために、遮音壁を有する 3 次元非定常波動場の騒音解析を実施した。

2. 境界要素法を用いた騒音解析

遮音壁を有する 3 次元非定常波動場の騒音解析を行ううえで、図-1 にそのモデル図を示す。本研究で扱う非定常波動問題における支配方程式及び、Neumann 型境界条件、初期条件は式 (1) ~ (4) で表わされる⁴⁾。

・支配方程式:

$$\frac{\partial^2 u(\mathbf{x}, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(\mathbf{x}, t)}{\partial x_i \partial x_i} \quad (\text{in } D) \quad (1)$$

・Neumann 境界条件:

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (\text{on } \partial D) \quad (2)$$

・初期条件:

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad (\text{in } D) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad (\text{in } D) \quad (4)$$

ここに、 u は音圧、 $\frac{\partial u}{\partial n}$ は u の法線微分であり、 n は領域からの外向き単位法線ベクトルである。 D 、 ∂D はそれぞれ解析領域、解析境界を示す。Neumann 型境界条件は実際の遮音壁を考慮するために、 $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$ を与え、完全反射とする。ま

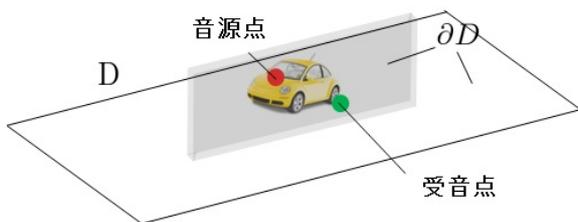


図-1 遮音壁を有する音場問題

た、初期条件は全領域で 0 とする。続いて式 (1) に対応する境界積分方程式は次式で得られる。

・境界積分方程式:

$$\frac{1}{2} u(\mathbf{x}, t) = \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) dS ds - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds + u_{inc}(\mathbf{x}, t) \quad (5)$$

ここに、 u_{inc} は入射波を示す。 Γ は、3 次元波動問題の基本解であり、次式で表される。

・基本解 (3 次元):

$$\Gamma(\mathbf{x}, t) = \frac{\delta(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c})}{4\pi|\mathbf{x}|} \quad (6)$$

ここに、 c は波速、 δ は Dirac のデルタ関数を示す。空間を区分一定要素、時間を区分線形補間で離散化し、数値的に u を求める。また、境界全体における u の値を用いて、式 (7) より、領域内部の任意の点での音圧 u を求める⁵⁾。

・積分方程式:

$$u(\mathbf{x}, t) = u_{inc}(\mathbf{x}, t) + \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) dS ds - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds \quad (7)$$

3. 数値解析例

精度検証のための数値解析例として、遮音壁を設けない 3 次元非定常波動問題を取りあげる。

(1) 遮音壁を設けない場合

a) 解析条件 1

解析メッシュは図-2 に示すように、三角形 0 次要素を用いる。空間離散化幅を x_1 、 x_2 各方向に 0.5、総要素数は 3600 とし、時間離散化幅を 0.2、音源点を (0.0, -3.975, 1.0)、受音点を (0.0, 3.975, 1.5) に設定する。また、本研究で用いる入射波を以下に示す。

$$u_{inc}(\mathbf{x}, t) = \frac{1 - \cos 2\pi(t - r)}{4\pi r} \quad (0 < t - r < 1) \quad (8)$$

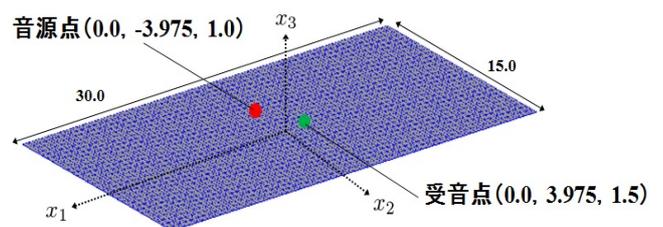


図-2 遮音壁を設けない解析メッシュ

KeyWords: 境界要素法, 音響, 遮音壁

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 E-mail: kana6atu@yahoo.co.jp

ここに、 r は音源点から要素の重心までの距離を示す．波速を 1.0，総ステップ数を 50 として解析を行う．

b) 解析結果 1

図-3 に受音点における厳密解と解析結果を示す．解析結果は厳密解と概ね良い一致を示しており，本手法の妥当性を確認することができた．

(2) 遮音壁を有する場合

a) 解析条件 2

続いて，遮音壁を有する 3 次元非定常波動問題を取り上げる．本研究で扱う遮音壁の寸法は，長さ 15.0，高さ 4.22，幅 0.45 とする．解析モデルは，解析条件 1 のモデルに遮音壁を加え，解析メッシュを図-4 のように三角形 0 次要素で分割する．空間離散化幅，時間離散化幅は解析条件 1 と同様の値を用いる．また，領域内部の任意の点を $x_1 \sim x_3$ の各方向に 0.375 に設定する．領域内部の総節点数 135669 点で音圧を求め，音圧分布の可視化を行う．

b) 解析結果 2

図-5 に $t=1.8, t=2.8, t=4.5$ における音圧分布 ($x_1=0$ での鉛直断面) の可視化結果を示す．半無限境界かつ遮音壁により反射する音圧と，遮音壁により回折する音圧が確認できる．

4. おわりに

本研究では，波動音響理論に基づく VR 技術を用いた騒音シミュレーションシステムを構築することを目的とし，その第 1 段階として，境界要素法による遮音壁を有する 3 次元非定常波動場の騒音解析を行い，以下の結論を得た．

- 遮音壁を設けない 3 次元非定常波動問題において，厳密解とほぼ同様の結果が得られ，計算手法の妥当性が確認できた．
- 遮音壁を有する 3 次元非定常波動問題において，定性的に妥当な結果を得ることが確認できた．

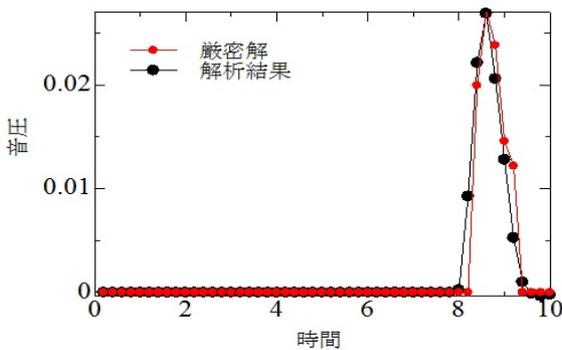


図-3 解析結果と厳密解の比較

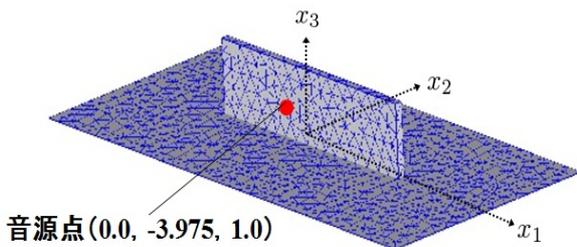


図-4 遮音壁を有する解析メッシュ

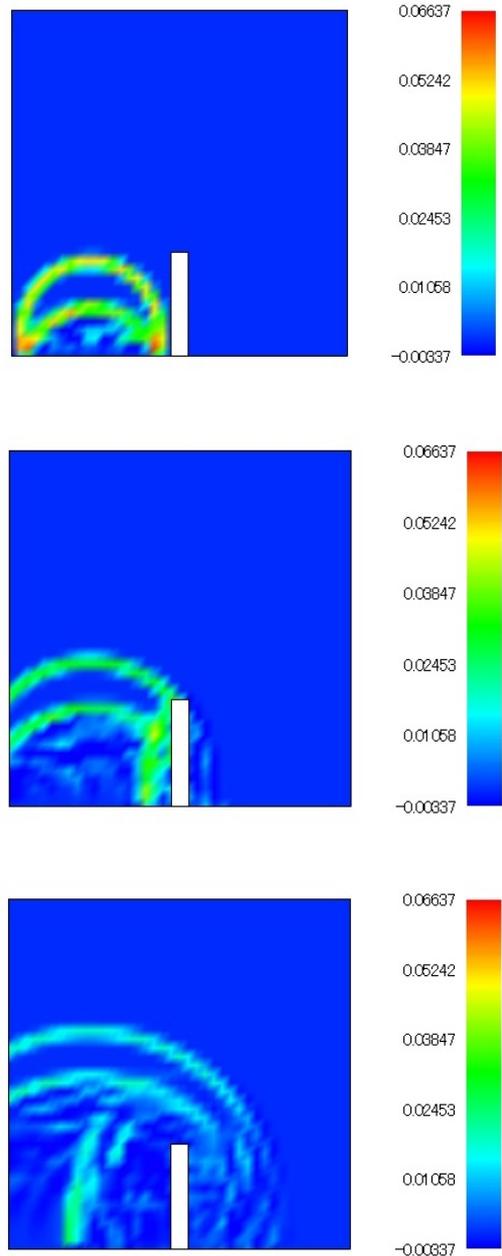


図-5 解析条件 2 における $t=1.8, t=2.8, t=4.5$ の可視化結果

性が確認できた．

- 遮音壁を有する 3 次元非定常波動問題において，定性的に妥当な結果を得ることが確認できた．

今後の課題として，移動音源を用いた遮音壁を有する 3 次元非定常波動場の騒音解析を行う予定である．

参考文献

- 1) 田近伸二，櫻山和男，志村幸行：VR 技術を用いた対話型道路交通騒音評価システムの構築，応用力学論文集，土木学会，Vol.13，pp.231-240，2010．
- 2) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会：道路交通騒音の予測モデル "ASJ RTN-Model 2008"，日本音響学会誌，Vol.65，pp.1-4，2009．
- 3) 日本建築学会：音環境の数値シミュレーション 波動音響解析の技法と応用，pp.3-4，2011．
- 4) 小林昭一：波動解析と境界要素法，京都大学学術出版会，pp.37-38，2000．
- 5) 神谷紀生，田中正隆，田中喜久昭：境界要素法の基礎と応用，培風館，pp.33，1980．