

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 ○岡村 理一郎
 京都大学 正会員 吉川 仁
 中央大学大学院 学生員 江嶋 孝
 中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

近年のコンピュータの発展に伴い、波動音響理論に基づく高精度な音場解析手法として、境界要素法¹⁾²⁾や有限要素法、差分法等が提案されている。著者らは、これまでVR技術を用いた幾何音響理論に基づく道路交通騒音予測システム³⁾の構築を行ってきた。しかし幾何音響理論は、複雑な幾何形状を有する問題への適用に難がある。そこで本研究では、VR技術を用いた騒音予測システム³⁾の適用性の向上を目的として、波動音響理論に基づいた境界要素法¹⁾²⁾による音場解析を行う。

本報告では、計算手法の妥当性の検証を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。また、メモリ削減手法の導入を行った。

2. 境界要素法を用いた騒音解析

本研究で扱う非定常波動問題における支配方程式及び、境界条件、初期条件は式(1)~(4)で表わされる²⁾。

支配方程式:

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

Dirichlet 境界条件:

$$u(\mathbf{x}, t) = \bar{u}(\mathbf{x}, t) \quad (\text{on } \partial D_1) \quad (2)$$

Neumann 境界条件:

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = \bar{q}(\mathbf{x}, t) \quad (\text{on } \partial D_2) \quad (3)$$

初期条件:

$$u(\mathbf{x}, 0) = u_0 \quad (\text{in } D) \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, 0) = v_0 \quad (\text{in } D) \quad (5)$$

ここに、 u は音圧、 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。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:

$$\frac{1}{2}u(\mathbf{x}, t) = u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) + \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) dS ds - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds \quad (6)$$

ここに、 u_{in} は入射波を示す。 Γ は、3次元波動方程式の基本解であり、次式で表される。

基本解 (3次元):

$$\Gamma(\mathbf{x}, t) = \frac{\delta(t - \frac{|\mathbf{x}|}{c})}{4\pi|\mathbf{x}|} \quad (7)$$

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、式(6)により求められた境界全体における u 、 $\frac{\partial u}{\partial n}$ の値を用いて、式(8)より、領域内部の任意の点での音圧 u を求める。

積分方程式:

$$u(\mathbf{x}, t) = u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t) + \int_0^t \int_{\partial D} \Gamma(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) \frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{y}, s) dS ds - \int_0^t \int_{\partial D} \frac{\partial \Gamma}{\partial n}(\mathbf{x} - \mathbf{y}, t - s) u(\mathbf{y}, s) dS ds \quad (8)$$

3. メモリ使用量削減

境界要素法は係数行列が密行列になるため大規模問題を取り扱う場合、必要なメモリ量が膨大化してしまう。この問題を解消するために本解析では、以下の2つのメモリ削減手法を用いた。

(1) 疎行列化

時間域の境界要素法において離散化により得られる係数行列の影響係数は、ソースと観測点間の距離と時間差により波動の影響が及ぶ点のみ非ゼロ成分となる⁴⁾。そこで、非ゼロ成分のみメモリに記憶することでメモリを削減できる。

(2) cast forward

影響係数行列と既知の解との行列ベクトル積演算を、代数方程式を作成するタイミングよりも前に計算しておく手法(cast forward)を適用する⁴⁾。この手法を用いることにより全時間ステップの半分より上のステップの影響係数行列はメモリに記憶する必要がなくなり、メモリを削減できる。

4. 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上げる。

(1) 遮音壁を設けない場合

解析メッシュは図-1に示す。一辺の最大空間離散化幅を0.25[m]とする三角形メッシュを用い、総要素数は10,208とし、時間離散化幅を0.4[ms]、音源点を(0.0,-4.0,1.0)、受音点を(0.0,4.0,1.5)に設定する。また、境界条件と初期条件、入射波を以下に示す。

Neumann 境界条件:

$$\frac{\partial u}{\partial n}(\mathbf{x}, t) = 0 \quad (\text{on } \partial D) \quad (9)$$

初期条件:

$$u(\mathbf{x}, 0) = 0 \quad (\text{in } D) \quad (10)$$

キーワード: 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: okamura-r@civil.chuo-u.ac.jp

$$\frac{\partial u}{\partial n}(x, 0) = 0 \quad (\text{in } D) \quad (11)$$

入射波:

$$u_{\text{in}}(x, t) = \frac{1.0 \cdot \sin 2\pi \cdot 100 \cdot (t - \frac{r}{c})}{4\pi r} \quad (0 < t - \frac{r}{c}) \quad (12)$$

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 $340.0[\text{m/s}]$, 周波数を 100Hz , 総ステップ数を 112 として解析を行う. また, Neumann 型境界条件は, $\frac{\partial u}{\partial n}=0$ を与え, 完全反射とする.

図-2 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. また, メモリ削減手法の導入により, 影響係数行列のメモリ数はメモリ削減前の約 2.8% となっており, メモリ削減の効果が大きく現れている.

(2) 遮音壁を有する場合

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. 解析モデルは, 前例題のモデルに遮音壁を加え, 解析メッシュを図-3 のように三角形 0 次要素で分割する. 遮音壁の寸法は, 長さ $10.0[\text{m}]$, 高さ $3.0[\text{m}]$, 幅 $0.4[\text{m}]$ とする. 最大空間離散化幅は $0.25[\text{m}]$, 総要素数は $23,892$, 時間離散化幅は $0.15[\text{ms}]$ とする. 境界条件, 初期条件, 入射波は前例題と同様のものを用いる. また, 領域内部を四面体メッシュで分割し, 音圧の可視化を行う.

図-4 に $t=20.7[\text{ms}]$ における音圧分布の可視化結果を示す. 可視化結果より遮音壁により音の回折, 反射が再現できていることが確認できる. また, メモリ削減手法の導入により, 影響係数行列のメモリ数はメモリ削減前の約 1.7% となっており, 前例題と同様にメモリ削減の効果が大きく現れている.

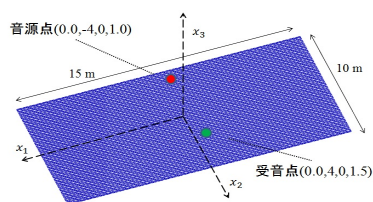


図-1 遮音壁を設けない解析メッシュ

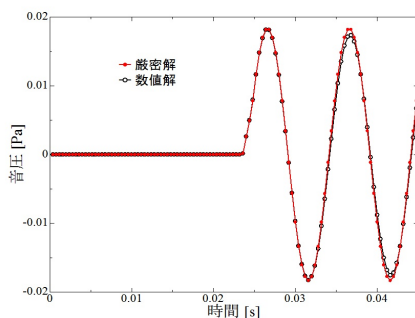


図-2 解析結果と厳密解の比較

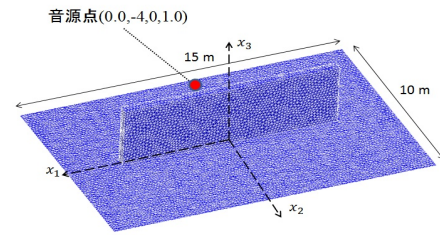


図-3 遮音壁を有する解析メッシュ

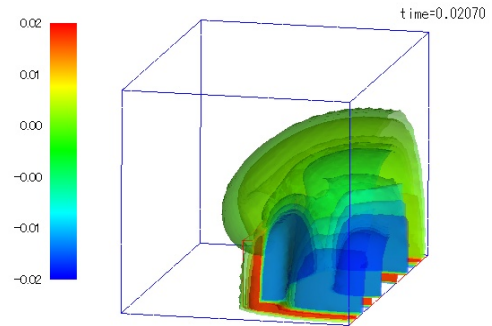


図-4 解析条件 2 における $t=20.7[\text{ms}]$ の可視化結果

5. 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, その基礎段階として, 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 次元非定常音場問題に関して, 厳密解と数値解が良い一致を示し計算手法の妥当性が確認できた.
- 遮音壁を設けた 3 次元非定常波動問題に関して, 定性的に妥当な結果を得られた.
- メモリ削減手法の導入により, 大幅なメモリの削減が実現できた.

今後は, 3 次元非定常波動問題の定量的な評価を行うとともに, 道路交通騒音システムへの実装を行う予定である.

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.147-153, 1980.
- 3) 田近伸二, 樫山和男, 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.
- 4) 吉川仁, 松浦京介: 影響波動の到達時間を考慮した Lubich の CQM を用いた時間域境界積分方程式, 計算数理工学論文集, 日本計算数理工学会, Vol.12, pp.73-78, 2012.