

境界要素法による道路交通騒音予測システムの構築

東京工業大学大学院 学生会員 ○金井 淳
 京都大学大学院 正会員 吉川 仁
 中央大学大学院 正会員 檜山 和男

1. はじめに

道路交通騒音は大きな社会問題となつて久しい。著者らは、これまでVR技術を用いた幾何音響理論¹⁾に基づく道路騒音予測システムの構築を行ってきた²⁾。

本論文は、騒音予測システムの精度および適用性の向上を目的とし、波動音響理論³⁾に基づく音場解析手法の実装を行うべく、その第一段階として、無限領域の取り扱いが容易な境界要素法に基づく手法の導入の検討を行うものである。

2. 境界要素法を用いた騒音解析

3次元非定常波動場の騒音解析を行う上で、図-1に本論文における音場問題のモデル図を示す。本研究で扱う非定常波動問題における音圧 u 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、 $\frac{\partial}{\partial n}$ は法線微分であり、 c は波速、 $\mathbf{n}$ 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して、 $\frac{\partial u}{\partial n}=0$ と、完全反射とする。続いて式(1)

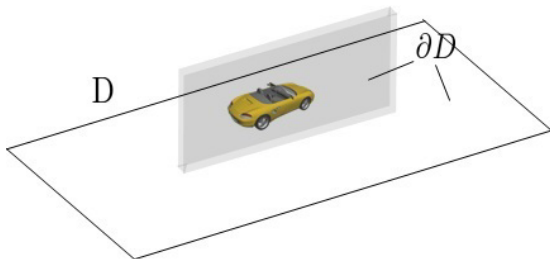


図1 本研究における音場問題のモデル図

に対応する境界積分方程式は次式で得られる。

$\mathbf{x}$ on ∂D ,

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

ここに、 u_{inc} は車両からの入射波を示す。 Γ は、3次元波動方程式の基本解であり、次式で表される。

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

ここに、 δ はDiracのデルタ関数を示す。境界を区分一定要素、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⁾。

$\mathbf{x} \in D$,

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

3. 数値解析例

(1) 静止音源における3次元非定常波動問題

解析領域は図-2に示すものであり、本論文で扱う遮音壁の寸法は、長さ15.0m、高さ3.28m、幅0.45mとする。空間離散化幅を $x_1 \sim x_3$ 各方向に0.5m、時間離散化幅を0.589ms、音源 $\mathbf{x}_s$ を(0.0, -3.975, 1.0)mに設定する。また、本研究で用いる入射波を以下に示す。

$$u_{\text{inc}}(\mathbf{x}, t) = \frac{1.0 \cdot \sin 2\pi \cdot 200 \cdot (t - \frac{r}{c})}{4\pi r} \quad (0 < t - \frac{r}{c}) \quad (8)$$

音源は時間分布のsin波を用い、周波数を200Hzとする。また、 $r = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_s|$ 、波速を340.0m/s、総ステップ数を50として解析を行う。

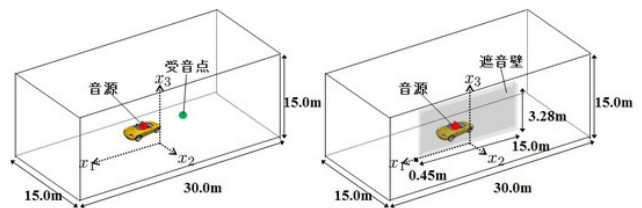


図2 解析領域

Key Words: 境界要素法, 波動音響理論, 騒音

〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1, W8-22

E-mail: kanai.a.ad@m.titech.ac.jp

図-3 と図-4 にそれぞれ、 $t=0.027694\text{s}$ 時における音圧の伝搬の様子 ($x_1=0$ での鉛直断面) を示す。両者を比べると、遮音壁がない場合では地面のみで音圧が反射しているのに対し、遮音壁がある場合では地面の他に、遮音壁により音圧が反射、回折、減衰しているのが見られる。

(2) 移動音源における 3 次元非定常波動問題

続いて、移動音源における 3 次元非定常波動問題を取り上げる。解析領域、空間離散化幅、時間離散化幅、入射波は先程と同様なものを用いる。また、音源 $\mathbf{x}_s$ を $(1.2-vt, -3.975, 1.0)\text{m}$ に、受音点 $\mathbf{x}_r$ を $(-2.0, -3.975, 1.0)\text{m}$ に設定する。進行速度 v を時速 100km/h 、進行方向は x_1 軸とは逆方向とし、総ステップ数 150 で解析を行う。

図-5 に遮音壁がない場合での受音点における移動音源と静止音源の計算比較を示す。移動音源は静止音源に比べて、時間の経過と共に波長が短くなり、周波数が高くなっていることから、ドップラー効果の影響を受けているのが

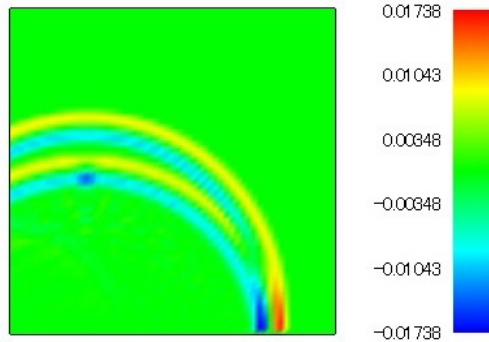


図 3 遮音壁がない場合での伝搬の様子 ($t=0.027694\text{s}$)

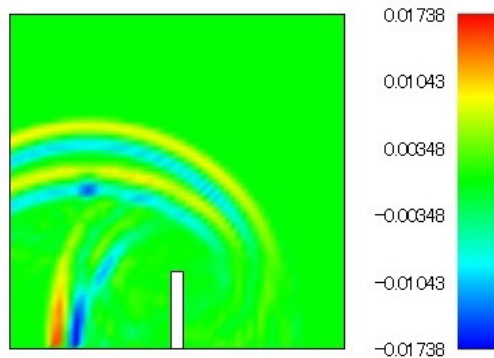


図 4 遮音壁がある場合での伝搬の様子 ($t=0.027694\text{s}$)

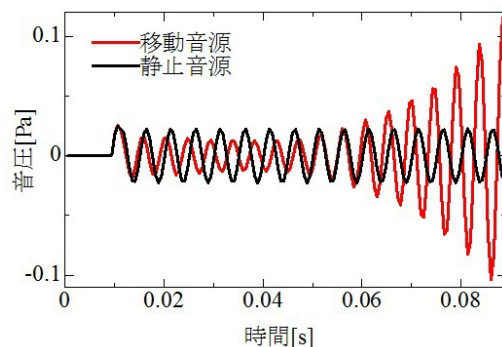


図 5 受音点における計算比較

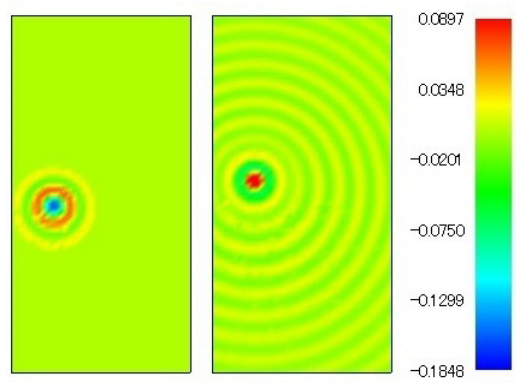


図 6 遮音壁がない場合での伝搬の様子 ($t=0.010606\text{s}$ と $t=0.087796\text{s}$)

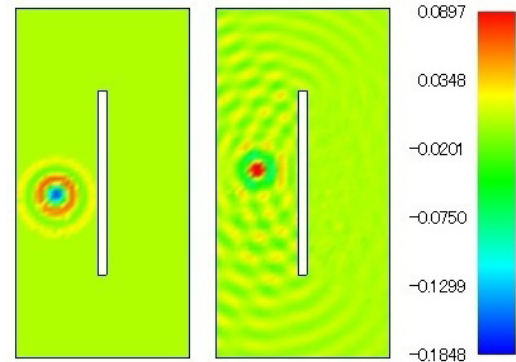


図 7 遮音壁がある場合での伝搬の様子 ($t=0.010606\text{s}$ と $t=0.087796\text{s}$)

確認できる。また、図-6 と図-7 にそれぞれ、 $t=0.010606\text{s}$ と $t=0.087796\text{s}$ 時における音圧の伝搬の様子 ($x_3=1.0$ での水平断面) を示す。両者を比べると、遮音壁がない場合では音圧が滑らかに拡散しているのに対し、遮音壁がある場合では遮音壁により音圧が反射、回折、減衰している様子が確認できる。また、入射波と反射波が重なり合い、干渉している様子も確認できる。

4. おわりに

本論文では、波動音響理論に基づく高精度な騒音予測システムの構築を目的とし、その第一段階として、境界要素法に基づく手法の導入の検討を行った。数値解析例を通じて、音源の移動速度に応じたドップラー効果が得られ、妥当性を示すことができた。また、遮音壁により音圧が反射、回折、減衰、干渉される様子を捉えられることを確認した。

今後は、計算結果の定量的な妥当性の検証および可聴化について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 田近伸二，榎山和男，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.
- 3) 日本建築学会：音環境の数値シミュレーションー波動音響解析の技法と応用一，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.33-34，1980.