

境界要素法による任意形状を有する遮音壁周辺の音場解析

中央大学大学院 学生員 ○ 庄子 諒
 京都大学大学院 正会員 吉川 仁
 中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

騒音とは一般に、人にとって不快な音のことを指す。騒音問題が深刻化すると身体的、精神的な被害に発展する恐れがあり、騒音の発生を事前に予測することは重要であるといえる。騒音の評価には、近年のコンピュータ技術の向上に伴い、波動音響理論や幾何音響理論に基づく数値シミュレーションが広く用いられている。本研究では、高精度なシミュレーションが可能な、波動音響理論を採用している。

著者らは、外部問題に適している境界要素法¹⁾に着目して、並列計算に基づく時間域高速多重極境界要素法を用いた音場解析手法の構築を行ってきた²⁾。そこで本研究では、近年多く用いられている先端改良型の遮音壁を模した解析モデルを有する3次元非定常の音場解析を行い、遮音壁の先端形状の差異による影響の検討を行う。

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：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_i \partial x_i}(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(\mathbf{x}, t) = 0, \quad \mathbf{x} \text{ in } D, t > 0 \quad (1)$$

境界条件：

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

$$u(\mathbf{x}, t) = u_{\text{in}}(\mathbf{x}, t), \quad |\mathbf{x}| \rightarrow \infty \quad (3)$$

初期条件：

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

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

ここに、 D , ∂D はそれぞれ解析領域と、その境界を表し、 u は音圧、 n は解析領域からの外向き法線ベクトル、 u_{in} は入射波を示す。

続いて、式(1)に対応する境界積分方程式を以下に示す。

境界積分方程式：

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

ここに、 Γ は3次元波動方程式の基本解であり次式で表される。

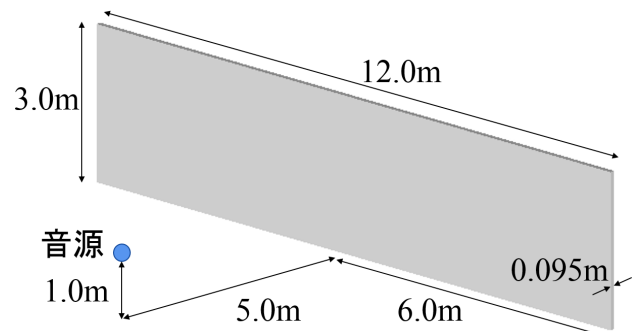


図-1 直立型の解析モデル

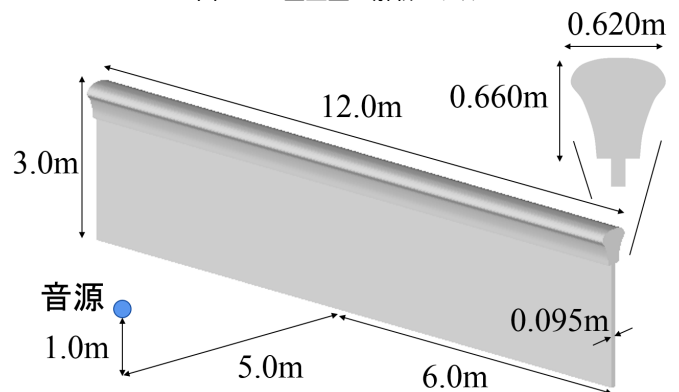


図-2 先端改良型の解析モデル

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

ここに、 c は波速、 δ は Dirac のデルタ関数を表す。

式(6)を離散化し、境界上での u 、 $\frac{\partial u}{\partial n}$ を時間域の高速多重極法を用いて求め、それらを以下の式に代入することにより、領域内の任意の点での音圧 u を求める。

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

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、図-2に示す。図-1は先端がフラットな遮音壁のモデル(以下、直立型)であり、図-2は先端改良型の遮音壁の一つである、マッシュルーム型のノイズリデューサーを装着した遮音壁³⁾のモデル(以下、先端改良型)である。両モデルとも、壁面上の要素分割幅は0.022mとする。音速、時間増分はそれぞれ、340m/s、0.0667msとし、壁面の境界条件は簡単のため完全反射とする。

キーワード：境界要素法、音響、騒音、遮音壁

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 CS5-15 E-mail: a15.dg8m@chuo-u.ac.jp

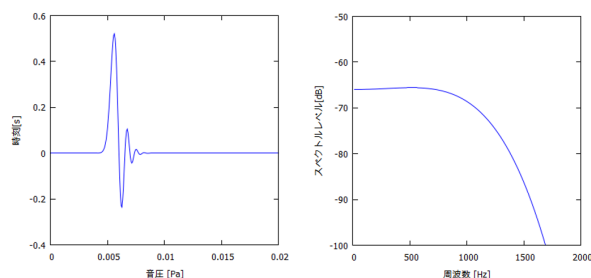


図-3 入力波形 (左) とその周波数特性 (右)

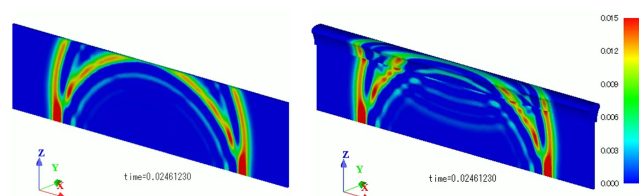
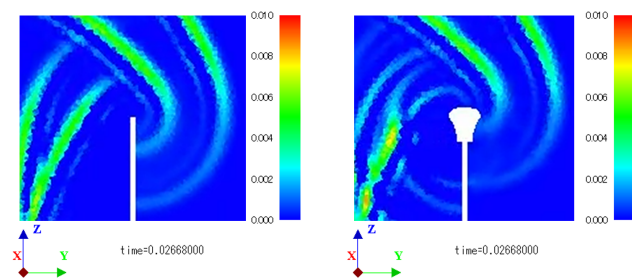
図-4 時刻 $t = 0.0246123$ s の壁面の音圧分布図-5 時刻 $t = 0.0266800$ s, 遮音壁の上端近傍の音圧分布 (左: 直立型, 右: 先端改良型)

図-1, 図-2 に示された点音源から発信される入力波には, Lubich が提案した畳み込み積分の近似解法である CQM(Convolution Quadrature Method) に基づく擬似インパルスを用いる。入力波形とその周波数特性を図-3 に示す。図-3 より概ねフラットな周波数特性を有する 1000Hz 程度までを検討の対象とする。各受音点での応答に対して音源データを畳み込み, その結果を直立型の場合と先端改良型の場合で比較する。畳み込みに使用する音源データは, 杭打機の声 (6 秒間) である。

(2) 解析結果

各遮音壁モデルに対し, 擬似インパルスを伝播させたときの壁面上での音圧分布 (時刻 $t = 0.0246123$ s) を図-4 に示す。ここに, 左の図が直立型, 右の図が先端改良型の結果である。両者を比較すると, 先端改良型の遮音壁では複雑な反射が生じていることが確認できる。また, 遮音壁の上端近傍での音圧分布 (時刻 $t = 0.0266800$ s) を図-5 に示す。図-5 より, 先端改良型の遮音壁ではその先端形状により, 音源側 (図中では壁の左側) に反射波が発生し, 音波が拡散されている様子が確認できる。

続いて, インパルスに対する応答に音源データを畳み込み, 遮音効果の比較を行う。図-6 に直立型と先端改良型

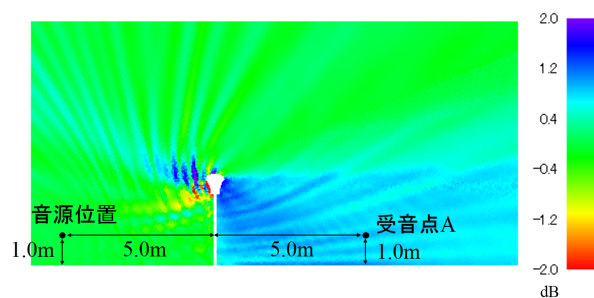


図-6 減音量の分布

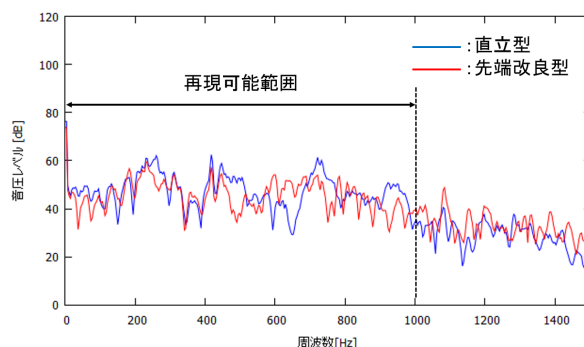


図-7 受音点 A における周波数分析の結果

の解析結果の音圧レベルの差の分布を示す。青色に近いほど, 直立型に比べて先端改良型の音圧レベルが小さく, 先端形状の改良によって音圧レベルが低減されていることを示す。図より, 遮音壁の背後において, 直立型に比べ先端改良型の減音効果が概ね 1~2dB 程度高くなっており, 遮音壁から離れるにつれて先端形状の違いが減音効果に及ぼす影響は小さくなることが確認できる。

また, 図-6 中に示す, 遮音壁からの距離が 5.0m, 高さ 1.0m の受音点 A での結果に対して周波数分析を行った結果を図-7 に示す。図-7 より, 今回の入力波の再現可能範囲である 1000Hz 以下の領域では, 大部分の周波数帯で直立型に比べ先端改良型の音圧レベルが下回っていることが確認できる。

4. おわりに

本研究では, 先端改良型遮音壁を解析モデルとする 3 次元非定常の音場解析を行い, 遮音壁の先端形状の改良により遮音壁裏において 1~2dB 程度遮音効果が高まることが確認できた。

今後は移動音源問題への適用と, 吸音モデルの導入による遮音壁の物性の考慮を予定している。

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) 岡村理一郎, 吉川仁, 高橋徹, 高木貴弘, 榎山和男: 安定化手法を用いた時間域多重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, pp.257-264, 2016.
- 3) 庄野豊, 落合博明, 高木興一: 遮音壁の形状と厚さについての境界要素法による減音効果の考察, 騒音制御, Vol.22, No.5, pp.288-298, 1998.