

# 有限要素法を用いた騒音伝播解析手法に関する構築研究

中央大学大学院 学生員 中村 和寛  
 中央大学 正会員 櫻山 和男  
 (株)建設環境研究所 正会員 志村 正幸

## 1. はじめに

近年、低周波音に関する騒音が問題となっている。平成24年度に地方公共団体が受理した低周波音に係る苦情の件数は258件であった。この苦情件数は増加の一途をたどっており<sup>1)</sup>、社会的に注目を浴びている。このように低周波音のみならず、都市部での騒音被害は増加傾向にある。騒音被害を定量的に評価するために、既往の研究<sup>2)</sup>では六面体要素を用いた有限要素法の振動解析や振動による騒音伝播解析の研究がなされている。

本研究では、より複雑な形状を有する問題へ適用することを目的として、四面体要素を用いることとする。本論文では、本手法の妥当性の検討として2次元円筒波の伝播問題を取りあげ、応用例として、長方形断面の橋梁を仮定し、この橋梁振動に伴う低周波騒音問題を取りあげた。

## 2. 数値解析手法

本研究で扱う支配方程式は、完全流体の渦なし流れを前提とした速度ポテンシャル  $\Phi$  に関する波動方程式とする。

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_i^2} = 0 \tag{1}$$

式(1)に対して Galerkin 法に基づく重み付き残差法を適用し、Green-Gauss の定理、Gauss の勾配定理を用いると、以下の弱形式が得られる。

$$\int_{\Omega_e} \Phi^* \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} d\Omega + c^2 \int_{\Omega_e} \frac{\partial \Phi^*}{\partial x_i} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} d\Omega = - \int_{\Gamma_q} \Phi^* q_n d\Gamma \tag{2}$$

ここに、 $\Phi^*$  は速度ポテンシャル  $\Phi$  の重み関数である。 $\Omega_e$ 、 $\Gamma_q$  は要素の領域、自然境界条件が考慮される境界である。 $n$  は境界からの外向き単位法線ベクトルである。式(2)右辺の境界積分項における  $q_n$  は、以下の式を用いて各種境界条件を規定する。

$$q_n = - \frac{\partial \Phi}{\partial n} = \hat{q}_n \quad \text{on } \Gamma_q \tag{3}$$

$$q_n = \frac{p}{\rho c} = \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad \text{on } \Gamma_q \tag{4}$$

式(3)は床板、遮音壁、防音タイル等で規定した音響粒子速度に関する条件と地表面、建物等における音の反射条件を規定する。式(4)は開境界への透過条件を規定する。空間方向の離散化<sup>4)</sup>には、三角形1次要素を用いて行う。なお、式(2)右辺の境界積分項の  $q_n$  に関しては要素辺で一定値(0次補間)とする。時間方向の離散化には差分法を用

い、2階の時間微分に対して2階中央差分を、未知量  $\Phi$  については1次精度の前進差分をとる。本研究では式(2)の未知量  $\Phi$  を陽的に求めるため、質量行列に関しては集中化を行う。

## 3. 数値解析例

### (1) 2次元円筒波の伝播問題

本手法の妥当性の検討として2次元円筒波の伝播問題を取りあげる。解析モデルを図-1に示す。 $\lambda$  は計算条件の波長であり、本数値解析例では10mとする。1波長間の分割数は20とし、Courant 数は0.4とする。音源境界条件に規定する粒子速度は周期  $T=0.29s$  の孤立波 ( $\hat{q}_n = 0.1 \cos(\frac{2\pi t}{T} - \pi) + 0.1$ ) とする。透過境界条件に規定する  $q_n$  は式(5)を用い、反射境界では  $\hat{q}_n = 0$  とした完全反射の条件とする。なお、1周期後の音源境界は完全反射条件として取り扱う。初期条件は  $\Phi^n = 0.0$ 、 $\Phi^{n-1} = 0.0$  とする。 $n$  ステップにおける既知量  $\Phi^n$  と  $\Phi^{n-1}$  より、粒子速度  $q^n$  と音圧  $p^n$  を算出する式を以下に示す。

$$q^n = \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi^n}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\Phi^n - \Phi^{n-1}}{\Delta t} \tag{5}$$

$$p^n = \rho \frac{\partial \Phi^n}{\partial t} = \rho \frac{\Phi^n - \Phi^{n-1}}{\Delta t} \tag{6}$$

図-2に示すように、音波が円筒波状に伝播し解析領域外へ透過していることが確認できる。また、各受音点における音圧の時刻歴の結果を図-3に示す。横軸は計算上の時刻  $t$  を音源境界条件に規定する粒子速度の周期で除した無次元時間である。受音点1と2における音圧レベルの最大値の

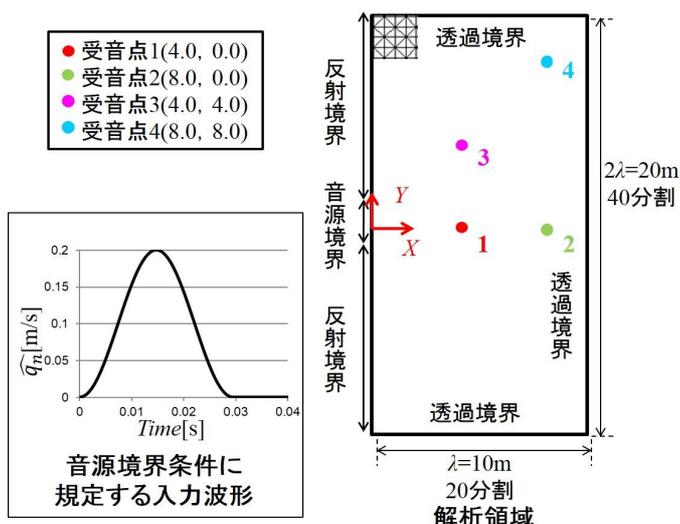


図-1 解析モデル1

KeyWords: 有限要素法, 騒音, 陽解法, 橋梁振動

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL. 03-3817-1815

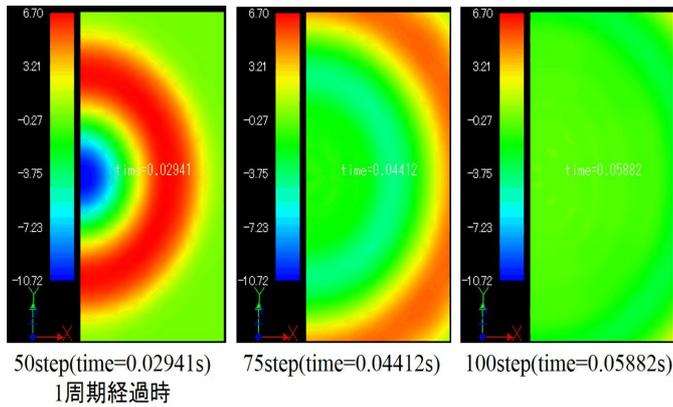


図-2 各 step における音圧のカラー面コンター図

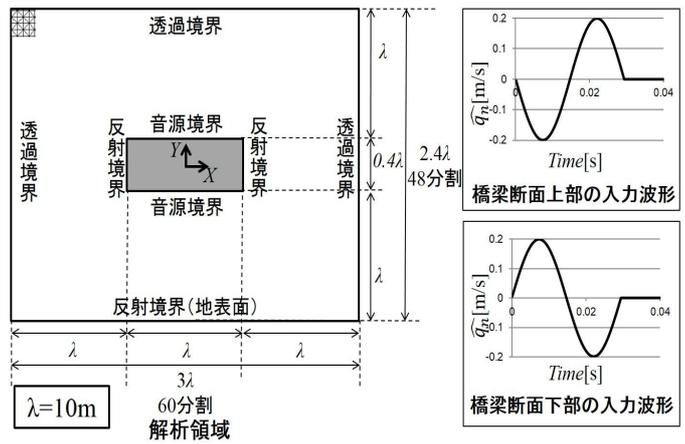


図-4 解析モデル

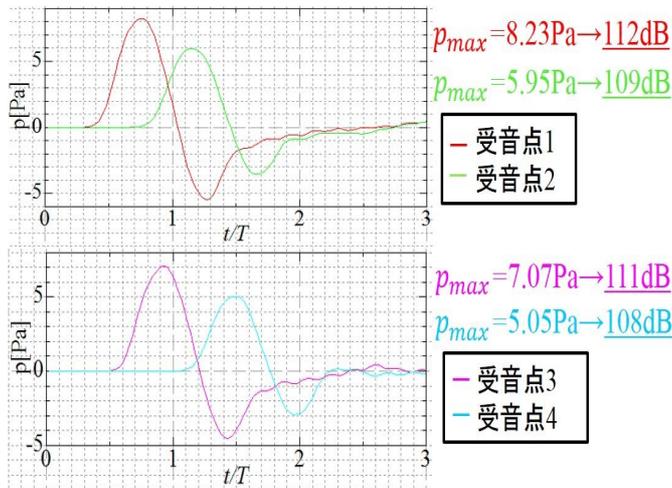


図-3 各受音点における音圧時刻歴

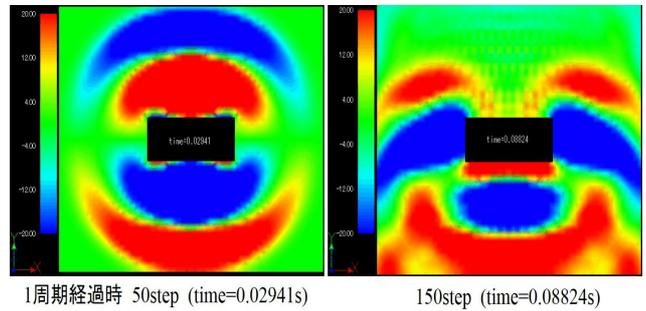


図-5 各 step における音圧のカラー面コンター図

差と受音点3と4における音圧レベルの最大値の差がともに3dBであることから、円筒波における距離減衰が正しく計算されていることが確認できる。

(2) 橋梁の低周波騒音問題

応用例として、長方形断面の橋梁を仮定し、この橋梁振動に伴う低周波騒音問題を取りあげる。解析モデルを図-4に示す。λは計算条件の波長であり、本数値解析例では10mとする。1波長間の分割数は20とし、Courant数は0.4とする。音源境界条件に規定する粒子速度  $\hat{q}_n$  は周期  $T=0.29s$  のsin波とし、これを橋梁の上部と下部に規定する。透過境界条件に規定する  $q_n$  は式(5)を用い、反射境界では  $\hat{q}_n = 0$  とした完全反射条件を地表面に規定する。なお、1周期後の音源境界は完全反射条件として取り扱う。初期条件は  $\Phi^n = 0.0, \Phi^{n-1} = 0.0$  とする。各 step における音圧のカラー面コンター図を図-5に示す。音の基本的な性質である反射・回折・干渉・減衰が定性的に確認できる。

4. おわりに

本論文では、本手法の妥当性の検討として2次元円筒波の伝播問題を、応用例として橋梁の低周波騒音問題を取りあげ、以下の結論を得た。

- 2次元円筒波の伝播問題の解析より、距離減衰と音の透過が精度よく行えていることが定性的にも定量的にも確認でき、本手法の妥当性が認められた。
- 橋梁振動に伴う低周波騒音問題の解析より、音の基本的な性質である反射・回折・干渉・減衰が定性的に確認できた。

今後は、本手法の精度検証を行うとともに、大規模かつ複雑形状を有する3次元問題を解析するための並列計算法の導入を行う予定である。

参考文献

- 1) 環境省 平成24年度騒音規制法施行状況調査について <http://www.env.go.jp/air/noise/>
- 2) H.Iwabuki, T.Osafune, M.Shimura, N.Kamiakito, A.Aoki, M.Kobayashi and H.Niwa: Numerical simulation for low frequency sound emitted from viaduct of the road by the vehicle load, *Proceeding of Inter-Noise 2013, Innsbruck, Austria*, 2013.
- 3) T.Nomura, K.Takagi and S.Sato: Finite element simulation of sound propagation concerning meteorological conditions, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.64, pp.1296-1318, 2010.
- 4) 櫻山和男, 野村卓史, 藤間昌一(編著): 続・有限要素法による流れのシミュレーション, pp.1-100, 丸善, 2010.