

インパルス応答解析に基づく騒音シミュレーションの 移動音源問題への適用について

中央大学大学院 学生員 ○今井 啓太
清水建設(株) 正会員 谷川 将規
(株)JSOL 正会員 吉町 徹
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

著者らは既往の研究¹⁾において音場解析を効率的に行うため、波動音響理論に基づいた AMR(Adaptive Mesh Refinement:解適合格子法) 法と CIP 法を用いたインパルス応答解析手法と可聴化システムの構築を行ってきた。既往の手法では工事騒音問題を対象にしてきたため音源は固定としてきたが、交通騒音を対象とした防音対策の設計や計画へ応用するには移動音源の導入が必要である。

本研究では解析手法に移動音源の導入を行い、道路交通騒音問題への適用を行う。

2. 数値解析手法

(1) 支配方程式と特性曲線法

空気中の波動伝播は運動方程式 (1), と連続式 (2) で表され、1次元の場合は以下になる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

ここで、 p は音圧 [Pa], u は粒子速度 [m/s], ρ は空気の密度 [kg/m³] である。式 (1) に音速 c [m/s] を掛け、式 (2) との和と差を作ると

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u + p) + c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u + p) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c u - p) - c \frac{\partial}{\partial x}(\rho c u - p) = 0 \quad (4)$$

と表すことができる。この $\rho c u + p$, $\rho c u - p$ を特性曲線に沿って移流させる。 $\rho c u + p$ を f_x^+ , $\rho c u - p$ を f_x^- とおくと、各地点、各時間ステップにおける音圧 p と粒子速度 u は以下の様に求まる。

$$p = \frac{1}{2}(f_x^+ - f_x^-) \quad (5)$$

$$u = \frac{1}{2\rho c}(f_x^+ + f_x^-) \quad (6)$$

(2) CIP 法

CIP 法は特性曲線に沿って物理量を移流させる移流方程式の差分を用いた高精度の解法である。本論文では三次元伝播問題に対してより高精度な解析が可能な C 型 CIP 法を用いている。詳細は参考文献²⁾を参照されたい。

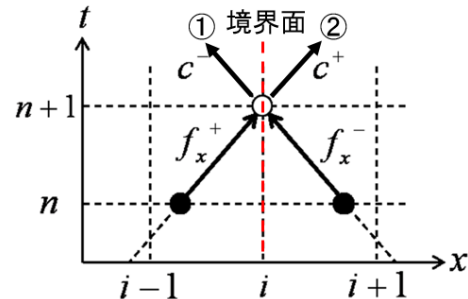


図-1 特性曲線と境界面

3. インパルス応答解析

インパルスとは非常に短い波であり、本手法では式 (3), (4) に基づきこれを伝播させる。伝播に際し、AMR (解の勾配を指標とし部分的にメッシュの粗密付けを行う方法) を適用することで、使用メモリと計算時間の大幅な縮小を行うことができる。

本手法では、離散化の精度の観点から擬似インパルスを採用する。数値計算で使用する擬似インパルスには畳み込み積分の離散近似手法である Lubich の Convolution Quadrature Method(CQM) で提案された式の重み式を用いる。

$$\omega_n(\Delta t) \cong \frac{R^{-n}}{L} \sum_{L=0}^{L-1} \left(\frac{1}{4\pi r} e^{-\frac{sr}{c}} \right) e^{(-2\pi i \frac{nl}{L})} \quad (7)$$

詳細は参考文献³⁾を参照されたい。

4. 時変畳み込み演算

インパルス応答解析における移動音源の抽出方法として、時変畳み込み演算が提案されている。ここで移動音源の位置を $p(t)$, その信号を $s(t)$ とすると、任意の位置における音圧 $x(t)$ は離散化されたシステムにおいて以下の式で表される。

$$x(k) = \sum_{ks=0}^{\infty} s(ks)h(k-ks, p(ks)) \quad (8)$$

この時、 $h(t, p)$ は位置 $p(t)$ にある固定音源から受音点位置までのインパルス応答であり、音源が取りうる位置からのインパルス応答が既知であれば、移動音源の出力信号が得られることを意味している。

式 (8) はベクトルと行列の演算を用いて図-2 示す様に表

KeyWords: AMR 法, CIP 法, インパルス応答解析, 時変畳み込み演算

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1815 E-mail a13.apg4@g.chuo-u.ac.jp

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}\mathbf{s}$$

$$\mathbf{s} = [s(1) \ s(2) \ \cdots \ s(L_s)]^T$$

$$\mathbf{x} = [x(1) \ x(2) \ \cdots \ x(L_s + L_h - 1)]^T$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h(1, \mathbf{p}(1)) & 0 & \cdots & 0 \\ h(2, \mathbf{p}(1)) & h(1, \mathbf{p}(2)) & \ddots & \vdots \\ \vdots & h(2, \mathbf{p}(2)) & \ddots & 0 \\ h(L_h, \mathbf{p}(1)) & \vdots & \ddots & h(1, \mathbf{p}(L_s)) \\ 0 & h(L_h, \mathbf{p}(2)) & & h(2, \mathbf{p}(L_s)) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & h(L_h, \mathbf{p}(L_s)) \end{bmatrix}$$

図-2 時変量み込み演算

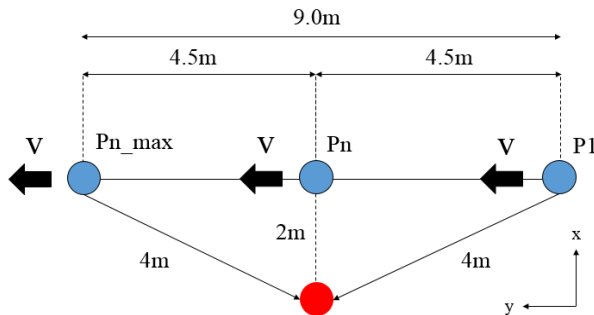


図-3 解析領域

される．この時， $\mathbf{s}$ が音源信号ベクトル， $\mathbf{x}$ が受信信号ベクトル， $\mathbf{H}$ が時変量み込み行列である．音源の移動パターンの離散時間 t における位置ベクトルを $\mathbf{p}(t)$ としており，行列 $\mathbf{H}$ は移動パターンと受信点位置により定まる．ここで L_s は音源信号長， L_h はインパルス応答長である．詳細は参考文献⁴⁾を参照されたい．

5. 適用例

本手法への移動音源の導入を行うために以下に示す条件で解析を行った．

(1) 解析条件

解析領域は図-3 に示す通りである．P1: $x=0.0\text{m}$ の地点から Pn_max: $x=9.0\text{m}$ の地点まで音源が移動するとする．移動音源の速度 $v=10.0\text{m/s}$ ，音速 $c=340.0\text{m/s}$ としている．受信点は音源が最も受信点に近づく位置（図-3 中の Pn）からの距離が 2m となるように設置した．音源から伝播するインパルス波には，図-4 に示すクロネッカーのデルタに基づく単位インパルス波を入力波として採用している．音源信号長 $L_s: 9.0\text{s}$ を離散幅 0.0005s で，インパルス応答長 $L_h: 0.015\text{s}$ を離散幅 0.0001s として入力している．

(2) 解析結果

音源から伝播する音源信号には，図-5 に示す 400Hz の $\sin$ 波を採用している．図-2 に基づく時変量み込み演算結果の時刻歴を図-6 に示す．遠方から音源が近づくにつれて音圧値が大きくなり，遠ざかるにつれて再び音圧値が小さくなる移動音源の傾向を表していることが確認できる．実際の可聴化音並びに実際の道路交通騒音問題を想定した解

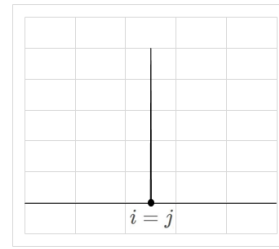


図-4 クロネッカーのデルタに基づく単位インパルス波

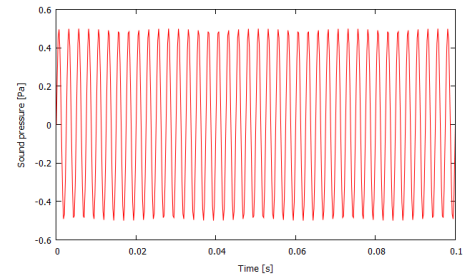


図-5 音源信号の波形 (sin 波:400Hz)

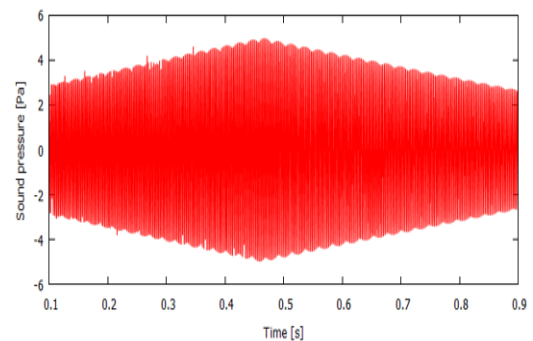


図-6 受信点での音圧の時刻歴

析結果は発表当日に示すものとする．

6. おわりに

本研究では，インパルス応答解析に基づく騒音シミュレーション手法を移動音源問題に適用するため，単位インパルスを用いた解析手法を提案した．

今後の課題として，本解析手法の移動音源問題への適用に際し，音源として実際の道路交通騒音を用いて解析を行っていく予定である．

参考文献

- 1) 吉町徹，谷川将規，櫻山和男：波動音響解析における擬似インパルス応答解析手法，土木学会論文集 A2 (応用力学)，Vol. 71，No. 2，pp.349-357 2015．
- 2) H.Takewaki, A.Nishiguchi and T.Yabe: Cubic interpolated pseudo-particle method (CIP) for solving hyperbolic-type equations, J. Comput.Phys., 61, (1985), pp. 261-268.
- 3) Lubich, C.: Convolution quadrature and discretized operational calculus I Numer. Math., 52, (1988), pp. 129-145.
- 4) 中島 弘史，中臺 一博，長谷川 雄二，辻野 広司：時変拡張ビームフォーミングによる移動音源の抽出，人工知能学会全国大会論文集，Vol.21，3C8-4 2007.