

トンネル坑口放射音の予測方法に関する一検討*

○藤本卓也（西元音響設計事務所）

1. はじめに

ASJ MODEL1998（以下 ASJ1998）の付属資料に記載のトンネル騒音予測法^①は、多重反射を考慮したイメージ音源法^②をベースとし、「吸音に関するパラメータ」の導入により実用的な坑口周辺の騒音予測法となっている^{③④}。ただし、イメージ音源法はトンネル断面が整形な場合に適用しやすく、このため ASJ1998 では半円形および矩形の場合について予測式が示されているが、馬蹄形など実際のさまざまな断面形状に対する適用限界は明確でない。また、路面は完全反射性であることを前提としており、吸音性路面に対しては予測式をそのままの形で適用することができない。

そこで今回、拡散理論に基づいたイメージ拡散法による坑口放射パワーの予測法^⑤を ASJ1998 の手法に取り入れて、任意な断面形状・吸音条件に適用できるよう拡張するための検討を行った。

2. 坑口放射パワーの予測計算式の整理

トンネル坑口から距離 x に音響出力 P の点音源がある場合に坑口から放射される全音響出力 P_T を予測する方法として、これまでに発表されたイメージ音源法とイメージ拡散法による計算式を表1にまとめる。

3. 多重反射式の結果比較

イメージ音源法の式(1)(3)と、イメージ拡散法の式(5)による計算結果の比較を図1に示す。図中のパラメータ α は側壁と天井の平均吸音率を示し、路面は剛とした。半円形トンネル（半径 5m）と矩形トンネル（幅 8.5m、高さ 4.6m）のそれぞれで両手法の計算結果はほぼ一致しており、その差は半円形で最大 1.8dB、矩形で 1.1dB であった。このように、どちらの手法を用いても大差ない結果が得られることから、イメージ音源法が適用しにくい不整形断面や吸音性路面に対しては、イメー

表1 トンネル坑口放射パワーの予測計算式

イメージ音源法	半円形断面	仮想音源群からの寄与を表す多重反射式^② $P_T = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\alpha_0 (1 - \alpha_0)^m x}{\sqrt{(2m+1)^2 r^2 + x^2}} \right\} \quad (1)$ r: トンネル半径, α_0: 路面を除く周壁の平均吸音率, a: 吸音に関するパラメータ 近似式 (ASJ1998 で使用) ^③ $P_T = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \frac{ax}{\sqrt{r^2 + (ax)^2}} \right\} \quad (2)$
	矩形断面	仮想音源群からの寄与を表す多重反射式^② $P_T = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{P}{4\pi} \cdot (1 - \alpha_1)^{ m } \cdot (1 - \alpha_2)^{ n } \times \sum_{k=1}^4 \tan^{-1} \frac{(1 + f_{m,k}) \cdot (1 + g_{n,k}) wh}{x \sqrt{x^2 + (1 + f_{m,k})^2 w^2 + (1 + g_{n,k})^2 h^2}}$ $f_{m,1} = f_{m,3} = -2m, \quad f_{m,2} = f_{m,4} = 2m, \\ g_{n,1} = g_{n,2} = -2n, \quad g_{n,3} = g_{n,4} = 2n \quad (3)$ α_1: 側壁の平均吸音率, α_2: 天井の平均吸音率, w: トンネル幅 $\div 2$, h: トンネル高 近似式 (ASJ1998 で使用) ^③ $P_T = \frac{P}{\pi} \tan^{-1} \frac{wh}{\sqrt{(ax)^4 + (w^2 + h^2) \cdot (ax)^2}} \quad (4)$ a: 吸音に関するパラメータ
イメージ拡散法	任意断面	仮想音源分布からの寄与を表す多重反射式^{⑤⑥} $P_T = \frac{P}{2} \int_0^{\infty} \frac{x r e^{-\pi}}{r^2 + x^2} \frac{dx}{x} = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \frac{\pi}{2} \gamma x [H_0(\gamma x) - N_0(\gamma x)] \right\} \quad (5)$ H_0: 0 次の Struve 関数, N_0: 0 次の Neumann 関数 $\gamma = -\frac{1}{p} \ln(1 - \bar{\alpha}), \quad p = \frac{\pi S}{L}, \quad \bar{\alpha}: \text{路面を含む周壁の平均吸音率}, S: \text{断面積}, L: \text{断面周長}$ ※文献^⑦では坑口のインフィニティの計算式を与えているが、比較のため坑口放射パワーに置き換えて示すとともに、拡散音場で重要なパラメータとなる断面内の平均自由行路 p を用いて整理した。空気吸収の項は省いた。 近似式^{⑦⑧} $P_T = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \frac{\gamma x}{\sqrt{2 + (\gamma x)^2}} \right\} \quad (6)$

* A Study on Prediction of Sound Radiation from Tunnel Mouth.
By T.Fujimoto(Yotsumoto Acoustic Design Inc.)

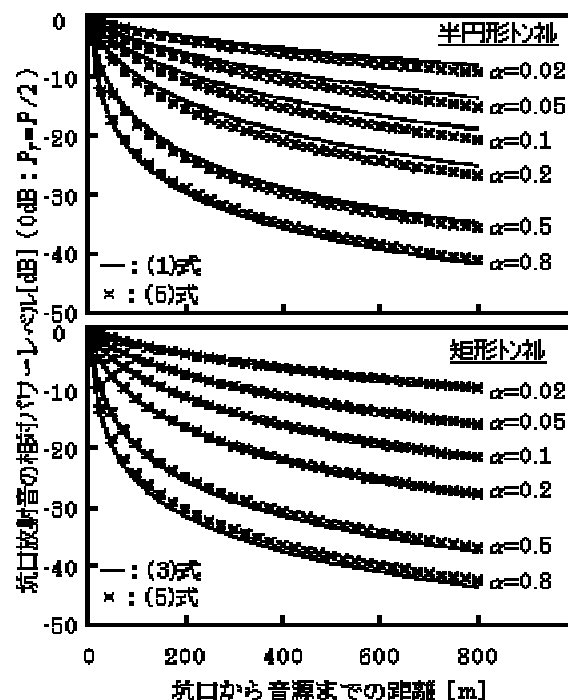


図1 イメージ音源法とイメージ拡散法の比較

拡散法の導入が有効であると考えられる。

4. 吸音に関するパラメータの算出

ASJ1998で坑口放射パワーの計算に使用される式(2)と式(4)は、トンネル断面積が同じ場合に計算値がほぼ等しくなることから⁴⁾、まとめて式(2)で代表できるものとする。今、イメージ音源法とイメージ拡散法の計算結果が整合することから、それらの近似式である式(2)と式(6)の値も整合するものとする。断面積を等しく設定して両式を比較すると、断面積 S 、平均自由行路 p 、全周壁の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ によって吸音のパラメータ a を表現する次式を導くことができる。

$$a = -\sqrt{\frac{S}{\pi}} \cdot \frac{1}{p} \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (7)$$

矩形トンネル($w=4.25$, $h=4.6$)を対象とした式(7)の計算例を図2に示す。路面を除く吸音率 α_w との関係は文献[4]の計算式とほぼ一致した。

5. 坑口からの伝達予測

ASJ1998では直接音に係る仮想点音源を位置 ax に、多重反射音に係る仮想面音源を坑口に配置する。仮想点音源位置を規定する a は式(7)で求められるが、その導出過程では路面を剛として扱った式(2)との整合を前提とした。したがって、仮想点音源は「剛な路面を持つ仮想トンネル」と組で設定すべきものと判断され、計算対象のトンネルの路面が吸音性であっても、坑口までの地表面効果は $\Delta L_g=0$ とするのが妥当と考えられる。なお

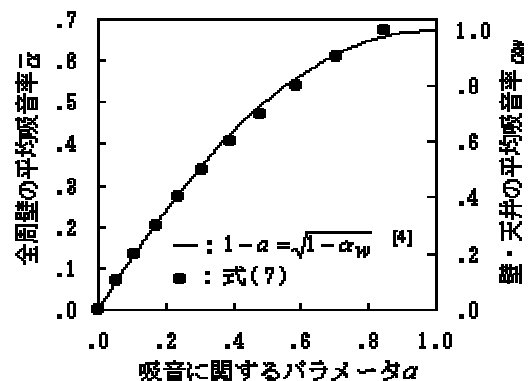


図2 吸音率とパラメータ a の関係(計算例)

横断面内での仮想音源位置については、実音源に準じた位置とすることで、音源が坑口に近づいた場合の実用性が確保できると考えられる。

一方、トンネル坑口の仮想面音源の出力は、 P_T から実音源の直接音響 P_D を差し引いた値とされる。実音源は剛な路面上にあるとは限らないため、 P_D の計算には次式を用いることを提案する。

$$P_D = P[Q/(4\pi)] \cdot Q \quad (8)$$

ここで Q は実音源の指向係数で、剛な路面上では $Q=2$ 、吸音率 α_r の路面上で $Q=2-\alpha_r$ 、路面から浮いている場合 $Q=1$ の値をとる。 Ω は実音源から坑口を見込む立体角で、音源が半径 r の半円形トンネルの路面中心にあると近似すると、

$$\Omega = \pi \left(1 - x / \sqrt{r^2 + x^2} \right) \quad (9)$$

で与えられる。式(9)を式(8)に代入し $Q=2$ とすると、ASJ1998の直接音の式と一致する。

ところで、全周壁の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ が0.7程度を越える場合、式(7)による a の値が1を越え、さらに式(2)による全坑口出力 P_T が式(8)による直接音出力 P_D を下回るケースがあり得るが、実用性を確保するため a の上限値を $P_T=P_D$ となる臨界点で決定すべきであろう。

6. まとめ

イメージ音源法とイメージ拡散法はトンネル坑口放射パワーの計算結果が一致することを示し、ASJ MODEL1998のトンネル騒音予測法にイメージ拡散法を導入することで、任意な断面形状・吸音条件のトンネルに適用できることを示した。

文 献

- [1]音響学会誌, Vol.55, No.4, pp.316-318 (1999)
- [2]土木研究所資料, 第1845号(1982)
- [3]三宅他, 騒音振動研究会資料, N-99-19(1999)
- [4]三宅他, 騒音制御, Vol.24, No.2, pp.127-135 (2000)
- [5]久野他, 騒音振動研究会資料, N-98-47(1998)
- [6]高木, 騒音振動研究会資料, N-98-65(1998)