

トンネル騒音予測に関する一検討

～ イメージ拡散法を用いた ASJ モデルの拡張 ～

A Study on Prediction of Tunnel Noise.

～ Extension of ASJ-Model by Diffused Image Method ～

藤本 卓也

Takuya Fujimoto

(株)四元音響設計事務所

Yotsumoto Acoustic Design Inc.

内容梗概：ASJ Model1998に記載のトンネル騒音予測法は、イメージ音源法をベースとすることに起因する制約があり、不整形断面のトンネルや吸音性路面に対してはそのまま適用することができない。そのようなトンネルに対しては、拡散理論に基づいたイメージ拡散法の適用が有効と考えられる。試算の結果、イメージ拡散法による坑口放射パワーの値がイメージ音源法によるものと良い一致を示すことが判明した。これに基づき、イメージ拡散法の理論を応用した具体的予測方法について検討を行った。さらに、イメージ拡散法によりトンネル坑内の空気吸収の影響について試算した結果、車両走行による全坑口放射エネルギーに対する影響はさほど大きくないことがわかった。

1. はじめに

ASJ MODEL1998（以下 ASJ Model）の付属資料 C-3 に記載されているトンネル坑口周辺部の騒音予測計算方法は、「吸音に関するパラメータ」を導入することで、坑口周辺部に対する実用的な騒音予測法となっている^{[1][2][3]}。その中で採用されている坑口放射パワーの計算式は、トンネル断面形状が整形な場合に適用しやすいイメージ音源法^[4]をベースとしており、このため ASJ Model でも半円形および矩形断面について計算式が示されている。しかしながら、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く、また多重反射の理論モデルの前提条件から路面は完全反射性として扱われ、排水性舗装など吸音性路面に対しても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、断面形状等の制約を受けない手法として、拡散理論に基づいたイメージ拡散法^[5]に

着目し、そのトンネル坑口放射パワーの予測法を ASJ Model 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。さらに、イメージ拡散法を用いてトンネル内の空気吸収について試算を行い、坑口放射パワーおよび全区間走行時の総放射エネルギーに及ぼす影響について検討した。

2. 既存の坑口放射パワー予測式

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トンネル坑口放射パワーの計算式を整理する。ここでは、トンネル坑口からトンネル内の点音源までの距離を x 、点音源のパワーを P 、坑口放射パワーを P_T で表す。

2.1 イメージ音源法

半円形トンネルの多重反射式^[4]は、

$$P_T = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\alpha_0 (1 - \alpha_0)^m x}{\sqrt{(2m+1)^2 r^2 + x^2}} \right\} \quad (1)$$

ここで、 α_0 は路面を除く周壁の平均吸音率、 r はトンネル半径である。ASJ Model で用いられる近似式^[6]は、

$$P_T = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \frac{ax}{\sqrt{r^2 + (ax)^2}} \right\} \quad (2)$$

ここで、 a は「吸音に関するパラメータ」である。(2)式は、坑口から距離 ax にある仮想点音源からの、直接音と路面反射音による坑口放射パワー（以後、直達パワーという）を示しており、距離 x にある実音源からの多重反射音を含んだ坑口パワーと等しくなるようにパラメータ a を算定しなければならない。

矩形トンネルの多重反射式^[3]は、

$$P_T = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{P}{4\pi} \cdot (1-\alpha_1)^{|m|} \cdot (1-\alpha_2)^{|n|} \\ \times \left\{ \tan^{-1} \frac{(1-2m) \cdot (1-2n)wh}{x\sqrt{x^2 + (1-2m)^2 w^2 + (1-2n)^2 h^2}} \right. \\ + \tan^{-1} \frac{(1+2m) \cdot (1-2n)wh}{x\sqrt{x^2 + (1+2m)^2 w^2 + (1-2n)^2 h^2}} \\ + \tan^{-1} \frac{(1-2m) \cdot (1+2n)wh}{x\sqrt{x^2 + (1-2m)^2 w^2 + (1+2n)^2 h^2}} \\ \left. + \tan^{-1} \frac{(1+2m) \cdot (1+2n)wh}{x\sqrt{x^2 + (1+2m)^2 w^2 + (1+2n)^2 h^2}} \right\} \quad (3)$$

ここで、 α_1 は側壁の平均吸音率、 α_2 は天井の平均吸音率、 w はトンネル幅÷2、 h はトンネル高さである。ASJ Model で用いられる近似式^[6]は、吸音に関するパラメータ a を用いた次式が示されている。

$$P_T = \frac{P}{\pi} \tan^{-1} \frac{wh}{\sqrt{(ax)^4 + (w^2 + h^2) \cdot (ax)^2}} \quad (4)$$

2.2 イメージ拡散法

坑口におけるインテンシティ I は、イメージ拡散法によると次式で与えられる^[5]。

$$I = \frac{P}{2S} e^{-\beta x} \int_0^{\infty} \frac{x e^{-\gamma \rho}}{(\rho^2 + x^2)^{3/2}} \rho d\rho \\ = \frac{P}{2S} e^{-\beta x} \left\{ 1 - \frac{\pi}{2} \gamma x \cdot [H_0(\gamma x) - N_0(\gamma x)] \right\} \quad (5)$$

ここで、 S はトンネル断面積、 β は空気吸収による減衰率、 γ は坑内のトータルの吸音を表す係数で、

$$\gamma = -\frac{L}{\pi S} \ln(1-\bar{\alpha}) + \beta \quad (6)$$

ここで、 L は断面周長、 $\bar{\alpha}$ は全周壁の平均吸音率を表す。また(5)式の H_0 は Struve 関数、 N_0 は Neumann 関数である。坑口におけるインテンシティが一樣であると仮定すると、 $P_T = IS$ が成り立ち、

$$P_T = \frac{P}{2} e^{-\beta x} \left\{ 1 - \frac{\pi}{2} \gamma x \cdot [H_0(\gamma x) - N_0(\gamma x)] \right\} \quad (7)$$

また、特殊関数を含まない近似式として次式が示されている。

$$P_T = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \frac{\gamma x}{\sqrt{2 + (\gamma x)^2}} \right\} e^{-\beta x} \quad (8)$$

このようにイメージ拡散法では、距離 x 、係数 γ および空気吸収率 β で坑口放射パワーが求められ、また係数 γ は $p \equiv \pi S / L$ 、平均吸音率 $\bar{\alpha}$ および β で決定される（ここで p はトンネル断面を2次元拡散音場としたときの平均自由行路を意味する）。したがって、不整形な断面形状や吸音性路面のトンネルに対しても適用が可能である。

3. イメージ音源法／拡散法の整合性

ASJ Model の手法のなかで、坑口放射パワーの計算式としてイメージ拡散法による(7)式あるいは(8)式を用いようとする場合、現行の(2)式および(4)式との整合性が問題となる。そこでまず、吸音に関するパラメータを含む近似式(2)(4)ではなく、明確な物理量である吸音率を用いて計算できるイメージ音源法の多重反射式(1)および(3)式と、イメージ拡散法の(7)式を同一条件の下で比較することにより、両手法による計算結果が本来どの程度の違いを持つものか検証を行った。

半円形断面トンネル(半径 5m)と矩形断面トンネル(幅 8.5m, 高さ 4.6m)の両トンネルを対象とし、音源位置と坑口放射パワーの関係について計算した結果を図1に示す。パラメータ α_w は路面を含まない周壁の平均吸音率を示し、路面は反射性とした。イメージ拡散法では、側壁+天井と路面の面積比から全周壁の平均吸音率

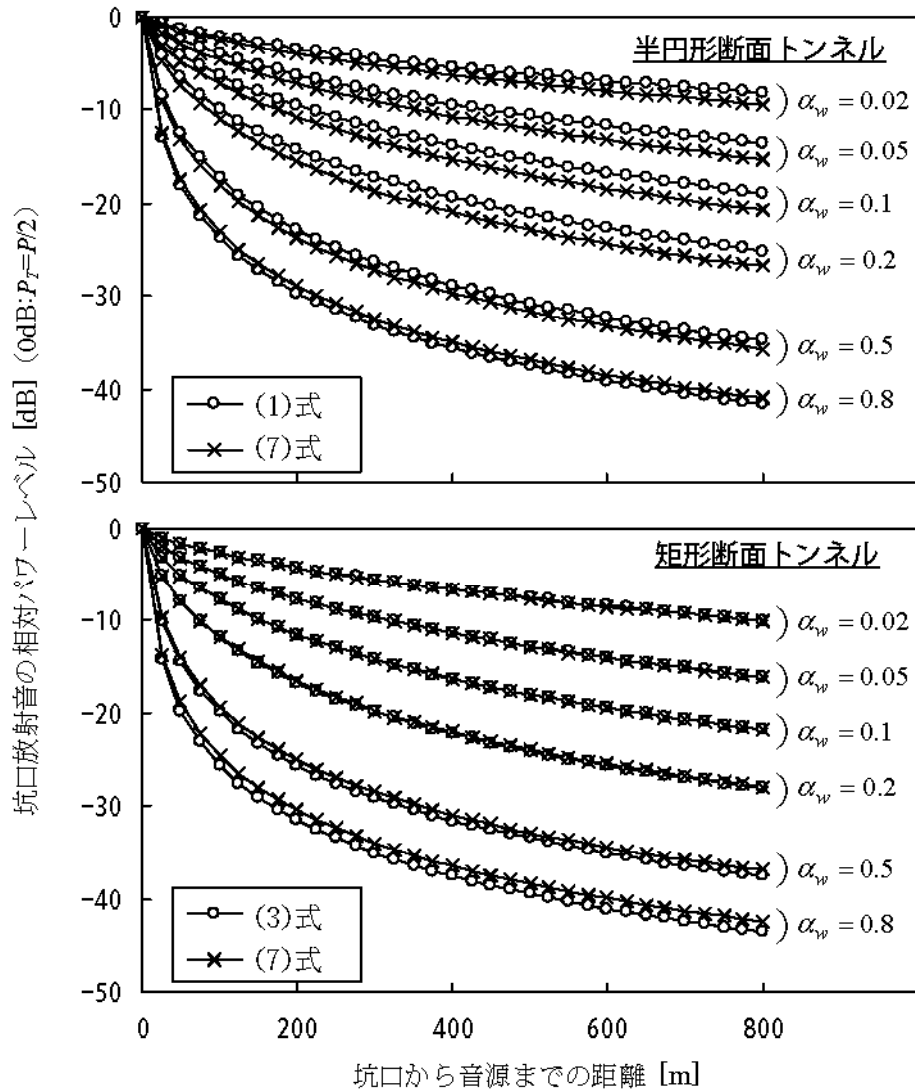


図1 イメージ音源法(1)(3)式とイメージ拡散法(7)式の比較

を求めて計算に用いた。また空気吸収による減音率 β は、条件を描えるためにゼロと設定した。

図1からわかるように両手法の計算結果はほぼ一致し、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、坑口放射パワーに関しては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、特に不整形断面や吸音性路面を持つトンネルに対しては、イメージ拡散法の適用が有効になると考えられる。

4. ASJ Model への適用

ASJ Model では、トンネル坑内の点音源が放射した騒音の坑口周辺予測モデルとして、トンネル内に仮想点音源、トンネル坑口に仮想面音源がおかれる。ここでは、吸音性路面をもつ任意断面形状トンネルの予測を、現行モデルに置

き換えて行うことを目的とし、その過程においてイメージ拡散法を適用するものとする。また、前提としてトンネル坑内の空気吸収の影響は無視して検討を進める。

4.1 仮想面音源のパワー

ASJ Model において、仮想面音源のパワーは坑口放射パワー P_T から、実音源からの直達パワー P_D を差し引いた値とされる。このうち P_T についてはイメージ拡散法の(8)式で計算した値を用いることができる。 P_D は、吸音性路面をもつ任意形状トンネルに対し、次式で計算できる。

$$P_D = P[\Omega(x)/(4\pi)] \cdot Q \quad (9)$$

ここで、 $\Omega(x)$ は点音源から坑口を見た立体角、 Q は音源の指向係数であり、音源が吸音率 α_r

の路面上にある場合は次式で表すことができる。

$$Q=2-\alpha_r \quad (10)$$

ところで、ASJ Model における半円形トンネルの近似式(2)と矩形トンネルの近似式(4)の値が、坑口距離 α にある音源からの直達パワーを示す式であり、トンネル断面積が等しい場合は両者がほぼ同じ値を示すことが知られている^[3]。このことから、坑口の断面形状が違ってても、断面積が同じであれば $\Omega(x)$ は等しくみなせるものとする。このとき、任意形状のトンネルに対して、断面積の等しい半円形トンネルに対する $\Omega(x)$ を用いることができる。

計算対象のトンネル断面積を S_0 とすると、同面積の半円形トンネルの半径 r は、

$$r = \sqrt{2S_0/\pi} \quad (11)$$

で与えられる。一方、半径 r の半円形トンネルにおいて立体角 $\Omega(x)$ は、

$$\Omega(x) = \pi \left(1 - x / \sqrt{r^2 + x^2} \right) \quad (12)$$

であり、(11)式を代入すると次式を得る。

$$\Omega(x) = \pi \left(1 - \frac{x}{\sqrt{2S_0/\pi + x^2}} \right) \quad (13)$$

(9)式に(10)式と(13)式を代入すると、

$$P_D = \frac{P(2-\alpha_r)}{4} \left(1 - \frac{x}{\sqrt{2S_0/\pi + x^2}} \right) \quad (14)$$

このように P_D が求められ、 $P_T - P_D$ により仮想音源のパワーが与えられる。

4.2 半円形トンネルへの変換

仮想点音源による直接音と地面反射音の伝搬予測を行うとき、トンネル坑内の路面は反射性である方が取扱いが容易となる。また断面形状も半円形であれば見通しが良くなる。そこで、全坑口放射パワー P_T を変えることなく、吸音性路面の任意形状トンネルを、反射性路面の半円形トンネルに変換する方法を考える。

前述したように、イメージ拡散法では周壁の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ 、空気吸収率 β 、平均自由行路 p が一定であれば坑口放射パワーに変化は生じない。この特徴を活かし、元のトンネルと同じ $\bar{\alpha}$ 、 β 、 p を持つように半円形トンネルの半径と、路面以外の吸音率を定める。なお空気吸収を考慮

しないため、 $\beta=0$ とする。

元のトンネルが断面積 S_0 、断面周長 L_0 をもつとき、その平均自由行路は、

$$p_0 = \pi S_0 / L_0 \quad (15)$$

で与えられる。一方、半円形トンネルの平均自由行路は、

$$p_1 = \pi^2 r / (2\pi + 4) \quad (16)$$

$p_0 = p_1$ において整理すると、変換後の半円形トンネルの半径が得られる。

$$r = 2(1 + 2/\pi) S_0 / L_0 \equiv 3.27 S_0 / L_0 \quad (17)$$

一方、反射性路面の半円形トンネルに対して全周壁の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ が与えられたとき、側壁と天井の平均吸音率は、

$$\alpha_w = (1 + 2/\pi) \bar{\alpha} \equiv 1.64 \bar{\alpha} \quad (18)$$

で表される。

このようにイメージ拡散法の理論に基づき、坑口放射パワーを変えることなく、反射性路面の半円形トンネルに変換することができる。

4.3 仮想点音源の位置

仮想点音源は実音源と同じパワー P を持ち、その直達パワーが P_T と等しくなる位置におかれる。いま、仮想点音源が反射性路面をもつ半径 r の半円形トンネルにおかれ、坑口からの距離が x' であるとき、その直達パワー P_{Di} は次式で与えられる。

$$P_{Di} = \frac{P}{2} \left(1 - \frac{x'}{\sqrt{r^2 + x'^2}} \right) \quad (19)$$

この P_{Di} が(8)式で与えられる P_T と等しいとき、

$$\frac{P}{2} \left(1 - \frac{x'}{\sqrt{r^2 + x'^2}} \right) = \frac{P}{2} \left(1 - \frac{\gamma x}{\sqrt{2 + (\gamma x)^2}} \right) \cdot e^{-\beta x} \quad (20)$$

$\beta=0$ を代入して整理すると、次式を得る。

$$x' = \frac{r\gamma}{\sqrt{2}} x \quad (21)$$

一方、(6)式から

$$\gamma = -\frac{L_0}{\pi S_0} \ln(1 - \bar{\alpha}) \quad (22)$$

であり、(17)式と(22)式を(21)式に代入すると、吸音に関するパラメータ a の算定式が得られる。

$$\begin{aligned} a &\equiv \frac{x'}{x} \\ &= -\frac{\sqrt{2}(\pi+2)}{\pi^2} \ln(1-\bar{\alpha}) \\ &\cong -0.737 \ln(1-\bar{\alpha}) \end{aligned} \quad (23)$$

これで、仮想点音源の位置を示す ax も定まったことになり、後は ASJ Model に準じた伝搬予測を行えば良い。

4.4 適用限界について

吸音に関するパラメータは(23)式で算定できるが、反射性路面の半円形トンネルに変換されたことで、文献[3]に示された従来の式

$$a = 1 - \sqrt{1 - \alpha_w} \quad (24)$$

を用いることもできる。(18)式を代入すると、

$$a \cong 1 - \sqrt{1 - 1.64\bar{\alpha}} \quad (25)$$

(23)式による a の計算値と(25)式による値の比較を図2に示す。横軸に示す全周壁の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ が約 0.61 で打ち切りとなっているのは、(18)式による α_w が 1 を越えない上限値である。すなわち $\bar{\alpha}$ が 0.61 よりも大きな場合には、「反射性路面+半円形トンネル」への変換が不可能となるので本手法は適用できない。

図2では両式の計算値はよく似た特性を示すものの、 $\bar{\alpha}$ が大きくなるに従って乖離する傾向がみられる。ここで(25)式が、(2)式による坑口放射パワーの減衰特性が(1)式によるものと整

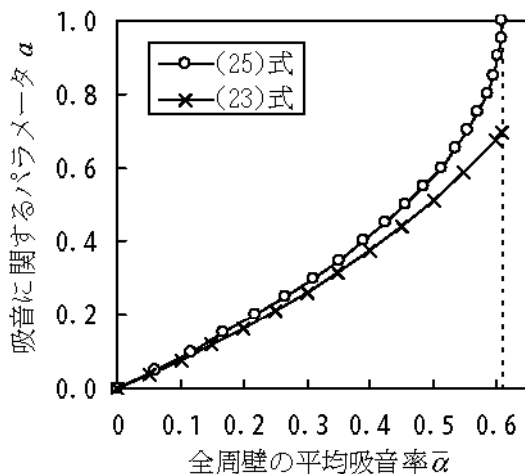


図2 吸音率 $\bar{\alpha}$ とパラメータ a の関係

合するように定められたこと、原理として路面以外の吸音率 α_w が 1 となる $\bar{\alpha} \cong 0.61$ においては $a=1$ となるべきことを考慮すると、高い吸音率に対する(23)式の値に疑問がもたれる。特に $\bar{\alpha}$ が 0.5 を越えるあたりから(25)式との差が目立ち始めるが、これは $\alpha_w > 0.82$ となる条件であり、側壁～天井がほぼ吸音性となる場合といえる。すなわち、路面の反射性を保つために吸音力が偏って音場の拡散性が悪くなり、イメージ拡散法の適用が限界に近づくことを意味していると解釈できる。

このことから、全周壁の吸音率が 0.5 を越える場合には、イメージ拡散法の原理に基づいた半円形断面+反射性路面への変換手法に限界が生じるものと判断される。

5. 空気吸収の影響について

ここまでの検討は、空気吸収による減衰率を無視して進めてきたが、トンネル坑内を多重反射する音波は、その行路が長距離となるため、空気吸収の影響を無視してよいかどうか検討しておく必要がある。

そこで、イメージ拡散法の(8)式における空気吸収率 β に標準状態 (20℃, 60%) の値を持たせた場合と、 $\beta=0$ とした場合について、坑口放射パワー減衰特性を計算した。音源には便宜上 100dB の A 特性パワーレベルと ASJ Model の周波数特性 (速度区分無し) を与え、坑口放射パワーをオクターブバンド毎に計算した後、合成した。トンネルは $r=5\text{m}$ の半円形とし、路面以外の吸音率を3通りに変化させた。結果を図3に示す。吸音率によって若干の差はあるものの、音源位置が坑口から 850m で 5dB 程度、2500m で 10dB 程度の差が生じることがわかった。

図3の結果を元に、音源がトンネル内を走行した際に坑口から放射される全エネルギーレベルを計算した結果を図4に示す。横軸はトンネル全長を示し、エネルギーレベルの基準値は 10^{-12} [Joule]、走行速度は 50km/h とした。全放射エネルギーでみた場合、空気吸収の影響は吸音率が小さいほど目立つが、それでも 2500m トンネルで 3.4dB の差が生じただけであった (吸音率 0.02)。また、この影響が予測の立場からは安全側であることを考慮すると、坑口周辺の騒音を L_{eq} で評価する場合には、トンネル内の空気吸収の影響については無視しても差し支え

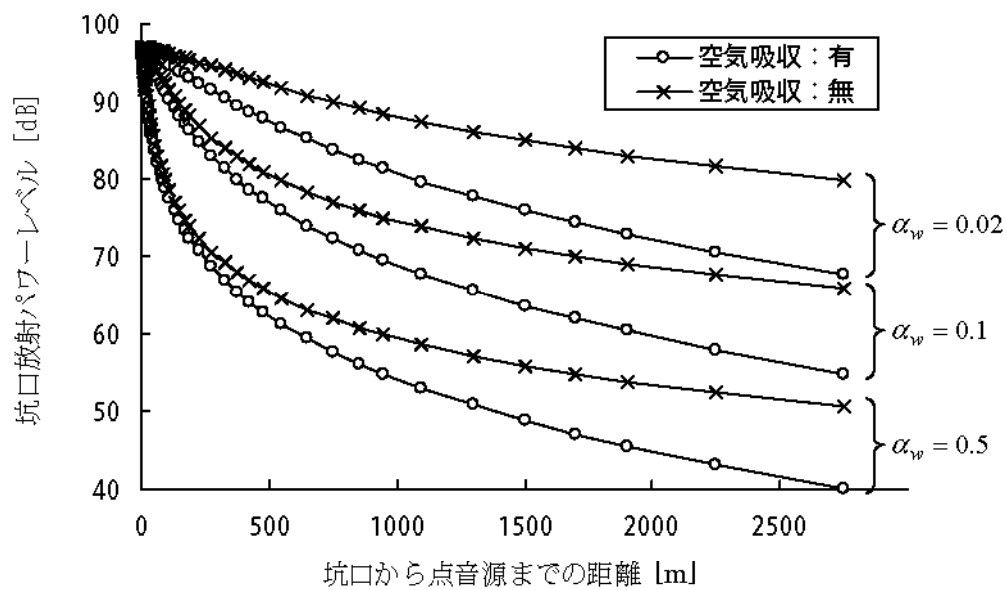


図3 空気吸収が坑口放射パワー距離減衰に及ぼす影響

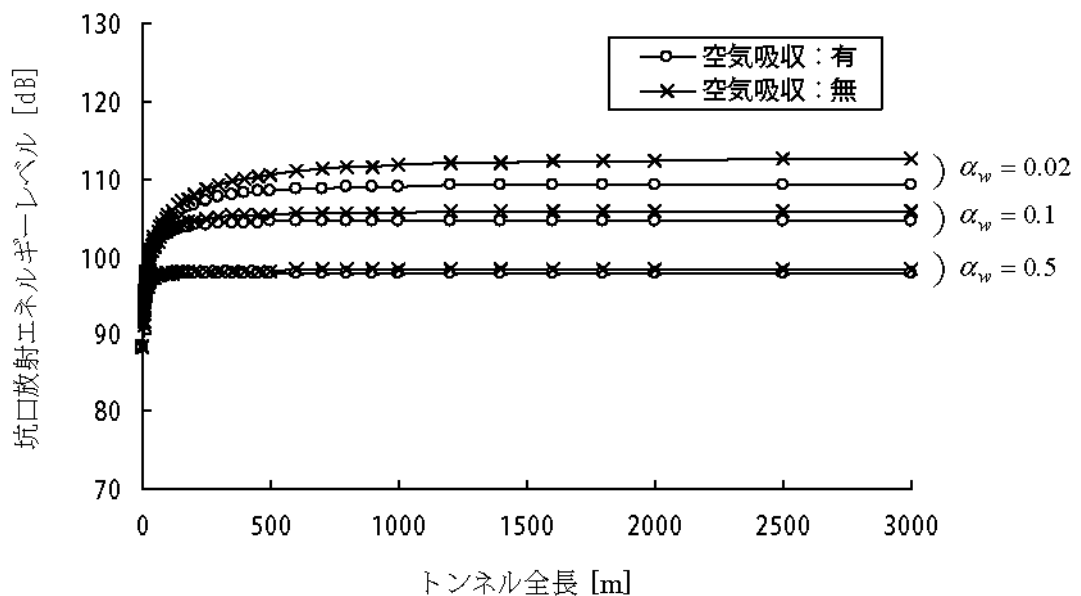


図4 空気吸収が全坑口放射エネルギーに及ぼす影響

ないものと判断される。

6. まとめ

イメージ拡散法の理論を応用し、吸音性路面を持つ任意断面形状トンネルを、反射性路面の半円形トンネルに坑口放射パワーを変えことなく変換し、現行の ASJ Model に準じて計算する方法を示した。なお、全周壁の平均吸音率が 0.5 程度以上では適用に限界があることがわかった。一方、トンネル坑内の空気吸収については、坑口放射パワーのユニットパターンには影響を及ぼすものの、トンネル内走行車両からの

全エネルギーレベルに及ぼす影響はさほど大きくないことが明かとなった。

平均吸音率 0.5 以上の任意断面形状トンネルに関する予測方法の検討は、今後の課題である。

参考文献

- [1] 音響学会誌, Vol. 55, No. 4, pp. 316-318 (1999)
- [2] 三宅他, 騒音振動研究会資料, N-99-19(1999)
- [3] 三宅他, 騒音制御, Vol. 24, No. 2, pp. 127-135 (2000)
- [4] 土木研究所資料, 第 1845 号(1982)
- [5] 久野他, 騒音振動研究会資料, N-96-47(1996)
- [6] 高木, 騒音振動研究会資料, N-98-65(1998)