

◎林大志, 寺尾道仁, 関根秀久, 大川真平 (神奈川大)

1. はじめに

トンネル坑口から放射される騒音の予測に関しては、模型実験[1]や幾何音響理論[2]などの応用について研究がなされている。その何れにおいてもトンネル内壁面への吸音処理の効果に関する予測が課題とみられる。そこで吸音処理に関する知見を得るため、本研究では境界要素法数値解析の適用を試みる。解析対象としては、橋らのトンネル(模型実験, [1])を選んだ。これは波動性を含めた結果と比較したかったからである。

2. 検討対象トンネル

図1に解析対象とした橋らのトンネル、また、図2にそれに対応する境界要素形状モデルを示す。

ここで部分領域11は部分領域10の外部領域である。また、(c)は各部分領域の面素分割の例(125Hzの場合)である。面素最大寸法は波長の1/6を目安とした。125Hzの場合、面素最大寸法は0.45m、総要素数は54880である。

部分領域1の終端側壁面は、比音響インピーダンスを ρc とした。ただし、一部、これと比較のため部分領域10と同じ坑口条件の場合を解析に加えた。

トンネルの曲面(天井および壁)の吸音条件を非吸音処理(トンネル全区間剛壁)、全長吸音処理(トンネル全区間吸音処理)、部分吸音処理(坑口より24m部分のみ吸音処理)の3タイプとして、それぞれ解析を行い模型実験値と比較する。そのときの吸音処理の吸音特性は、局所作用モデルとして表面インピーダンスを与えた。その値は橋らの吸音率実験値に対応する値(後述)を基礎として幾つかの値を試みた。

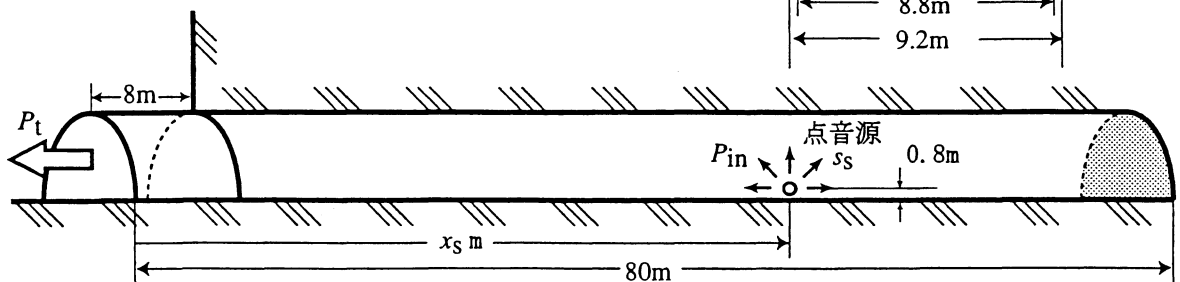


図1 解析対象としたトンネル

3. 境界要素解析方法

ここでは、部分領域境界要素法[3]により、各領域について Kirchhoff-Helmholtz の積分方程式

$$p_i = G_s + \int_{\Gamma} [hp - gu] d\Gamma \quad (1)$$

を適用する。ここで、 p_i は着目点 r_i の音圧(滑らかな境界上の場合には $p_i/2$ とする)、 p は境界上の音圧、 u は境界上それに垂直な外向き速度成分である。また、 r を点 r_i と境界上の点 r の距離、 r_s を点 r_i と点音源位置 r_s の距離、 θ を点 r における法線と $r_i - r$ とのなす角として

$$h = \frac{e^{-jkr}}{r} \left(\frac{1}{r} + jk \right) \cos \theta \quad (2)$$

$$g = j\omega\rho \frac{e^{-jkr}}{r} \quad (3)$$

$$G_s = \frac{S_s e^{-jkr_s}}{r_s} \quad (4)$$

と置いた。ここで、 j は虚数単位、 ρ は密度、 ω は各周波数、また、 c を音速として、 $k = \omega/c$ である。音源は簡単のためモノポール音源とした。 S_s は点音源振幅である。

図2(c)に示すように、トンネル坑口は地平面と鉛直面に挟まれる1/4自由空間(領域11)に開放される。このとき、地平面と鉛直面の剛壁条件は、対象物体

*A boundary element approach on sound radiation from tunnel mouths

表面(地平面と鉛直面を除く)からの寄与(式(1)の右辺)のほかに、その(地平面と鉛直面に対する)鏡像からの寄与を式(1)の右辺に加え込むことにより(それらの面に関する座標入力や計算をすることなく)達成される。

計算処理は東京大学情報基盤センターのSR8000により実行した。1周波数当たりの実行時間は125Hz帯域(自由度数約22万)において約40分であった。250Hz帯域では自由度数がその4倍、1周波数当たりの実行時間は約1日を要することになる。ここでは、250Hzオクターブ帯域の解析は断念し、中心周波数125Hzのオクターブバンド以下を検討範囲とした。

4. 相対放射レベル

音源として、ここでは点音源振幅 S_s のモノポール音源を用いている。その自由音場における放射パワー P_{in} は、

$$P_{in} = 2\pi S_s^2 / \rho c \quad (5)$$

である。これに対し、坑口からの放射音響パワー P_t は、

$$P_t = \sum_{k=1}^N I_k S_k \quad (6)$$

により得られる。ただし、 N は坑口を囲む閉曲面の面素数、 S_k は第 k 面素の面積、また、 I_k は第 k 面素のネットインテンシティで

$$I_k = \text{Re}(p_k^* u_k) / 2 \quad (7)$$

により求めることができる。ここで、 p_k および u_k は第 k 面素の音圧および粒子速度(面素に対する垂直成分)の複素振幅である。(*)は共役複素数を意味する。

相対放射レベル(以下では R と書く)は

$$R = 10 \log_{10}(P_t / P_{in}) \quad (8)$$

により定義する。

5. 音圧分布

図3に数値解析の結果得られた坑口周辺部の音圧分布の例として、63Hz純音、トンネル内壁面が全面反射性(非吸音処理)の場合を示す。

(a)と(b)はトンネルの一端を低反射端条件(表面の比音響インピーダンス $Z_n = \rho c$)としたとき、(c)は、両端をトンネル中心に対称な坑口としたときである。

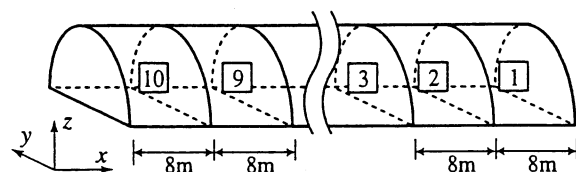
(a)は音源が音圧アンチノード付近にあるとき、(b)は音源が音圧ノード付近にあるときである。

(c)は、(a-3)と同じ音源位置の場合であるが、(a-3)

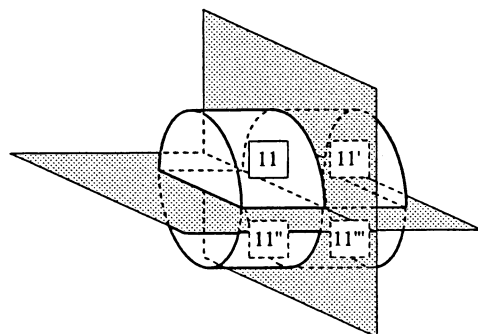
の場合と異なり、音源が音圧ノード付近に当たる。

(a)、(b)、(c)の間には、音圧分布に大きな違いが見られる。

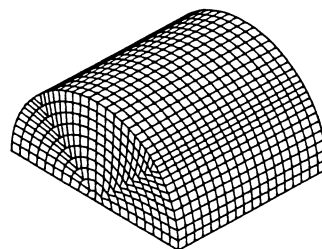
純音の場合には、(a)と(b)とで R は20dB程度も違う場合がみられた。このような坑口放射音響パワーの大きな変動は、より低周波数領域において重要になると考えられる。



(a) トンネル内部領域



(b) トンネル外部領域



(c) 部分領域と境界要素モデルの形状

図2 部分領域分割

6. 音響パワーと駆動点インピーダンス

表1に、両端がトンネル中心に対称な坑口の場合について、両坑口からの放射音響パワー($x=0\text{m}$ における P_t を $P_{t,x=0\text{m}}$ 、 $x=80\text{m}$ における P_t を $P_{t,x=80\text{m}}$ とする)を比較して示す。両坑口からの放射パワーの和は必ずしも自由音場音源パワーに一致しない。また、それぞれの坑口からの放射パワーも一致しない。これは両坑口方向への駆動点インピーダンスが異なることによるものと考えられる。

以上、モノポール音源としたため、音源からの音響パワー、また、坑口からの放射パワーは駆動点インピーダンスの影響を強く受けている。次の、オクターブ帯域の坑口放射音響パワーについては、中心周波

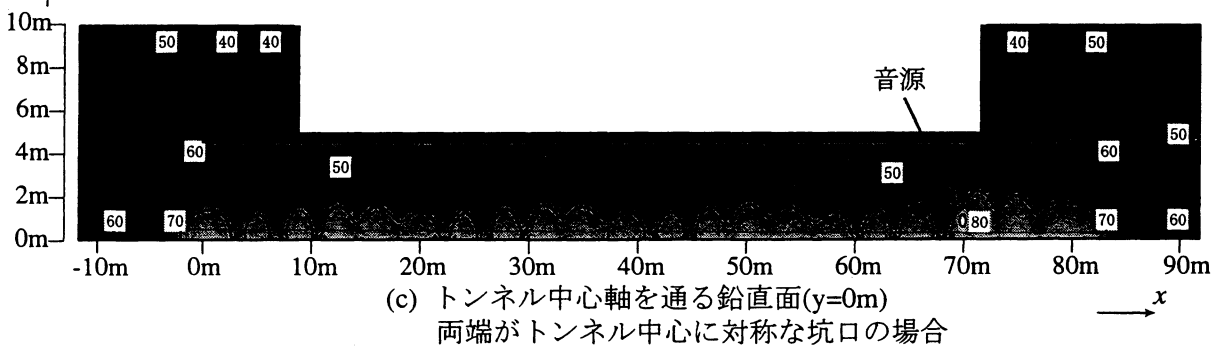
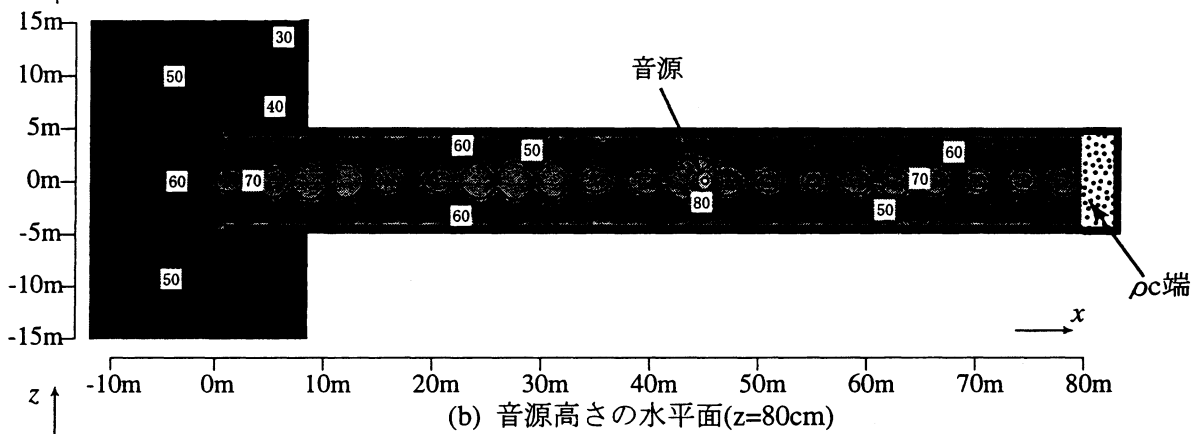
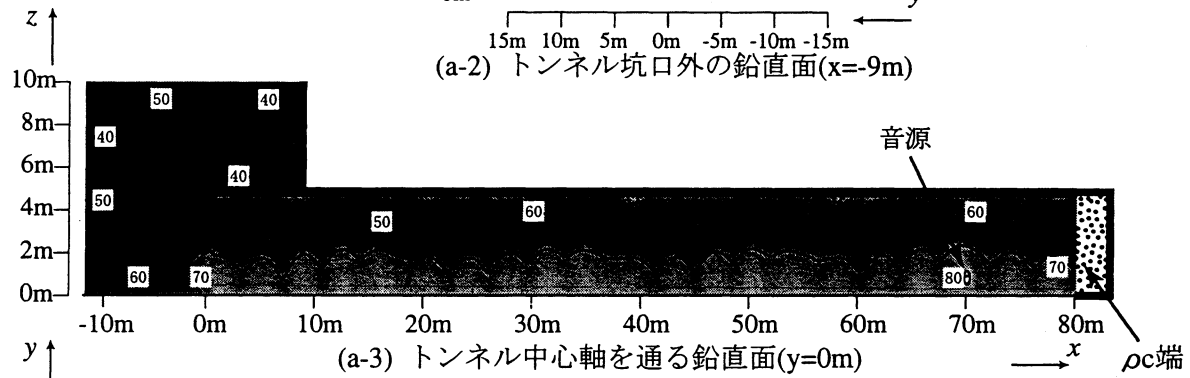
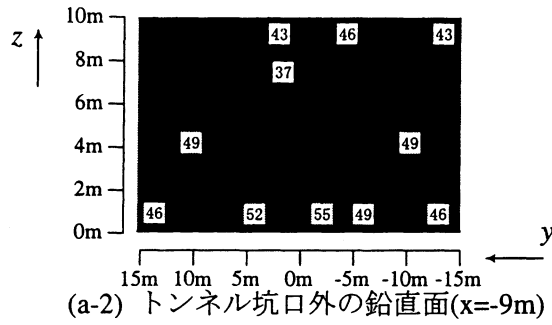
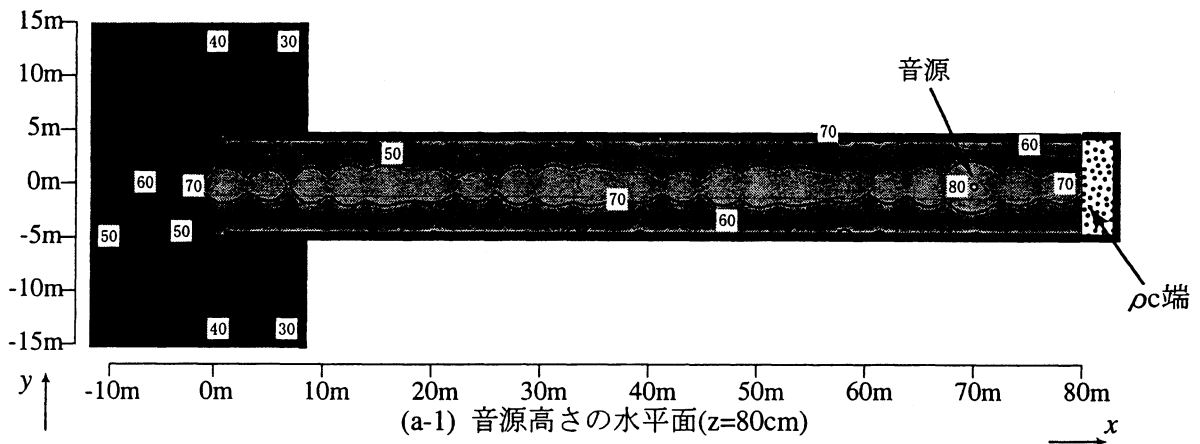


図3 音圧分布 [dB]

数63Hzのオクターブ帯域では5Hz刻み、中心周波数125Hzのオクターブ帯域では10Hz刻みで、各周波数

について点音源振幅を同一として解析し、その結果得られた坑口放射音響パワーのオクターブ帯域にわたる和を取っている。

7. 音源位置と坑口放射音響パワー

図4に音源の坑口からの距離と相対放射レベルとの関係を橋らの実験値と比較して示す。

7.1 63Hz帯域の場合

図4(a)から以下のような考察が得られる。

(1)非吸音処理の場合 数値解析では、完全な剛壁条件を与えた。模型実験との違いは大きい。その理由としては、模型実験との末端吸音条件のや壁面吸音条件の違いが考えられる。

(2)全区間吸音処理の場合 模型実験における拡散音場吸音率を0.03程度とみなせば、吸音材表面の比音響インピーダンスは100ρc程度以上となる。それが100ρcのときの音源位置70mに対する結果を▼印で示す。これは模型実験値に比べ非常に吸音が小さい。そこで吸音処理の表面比音響インピーダンス20ρc(垂直入射吸音率0.18)で数値解析した結果を▲で示した。それでもまだ、模型実験よりも距離減衰が小さい。なお、吸音材が1ρcとした場合には音源位置70mで-35dB程度になる。

(3)部分吸音処理の場合 全区間吸音処理における吸音材と同じく比音響インピーダンス20ρcとして数値解析した結果である。模型実験値と比較すると数dBの違いがあるが、減衰の大きな傾向については概ね対応している。

7.2 125Hz帯域の場合

図4(b)から以下のような考察が得られる。

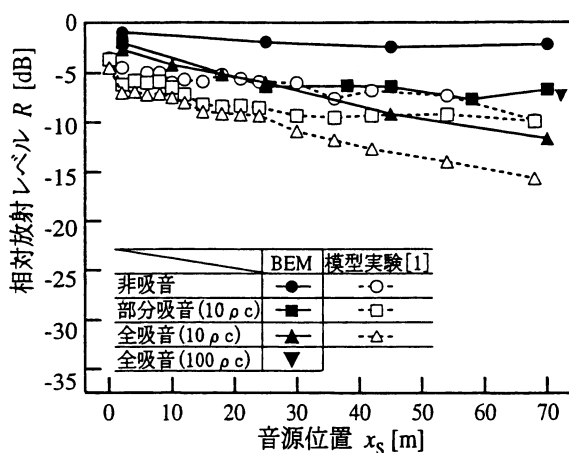
(1)非吸音処理の場合 数値解析では、完全な剛壁条件を与えたが、模型実験とはよく一致している。

(2)全区間吸音処理の場合 模型実験における拡散音場吸音率を0.12程度とみなせば、吸音材表面の比音響インピーダンスは大雑把に40ρc程度になる。それが40ρcのときの音源位置70mに対する結果を▼印で示す。これも模型実験値に比べ非常に吸音が小さい。そこで吸音処理の表面比音響インピーダンス10ρc(垂直入射吸音率0.33)で数値解析した結果を▲で示した。

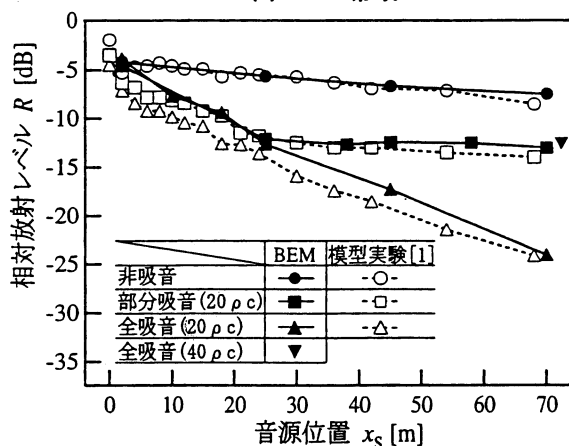
(3)部分吸音処理の場合 全区間吸音処理における吸音材と同じく比音響インピーダンス10ρcとして

表1 両端がトンネル中心に対称な坑口からの放射音響パワー $P_{t,x=0m}$ と $P_{t,x=80m}$ との比較

| x_s | $P_{t,x=0m} / P_{in}$ | $P_{t,x=80m} / P_{in}$ | $(P_{t,x=0m} + P_{t,x=80m}) / P_{in}$ |
|-------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|
| 10 | 0.552 | 0.269 | 0.821 |
| 30 | 0.665 | 0.417 | 1.082 |
| 50 | 0.417 | 0.664 | 1.082 |
| 70 | 0.269 | 0.552 | 0.821 |



(a) 63Hz帯域



(b) 125Hz帯域

図4 音源の坑口からの距離と相対放射レベルの関係

数値解析した結果である。減衰の傾向は模型実験値とよく対応している。

8. まとめ

トンネル坑口周辺部の音場の性質を調べる上で、部分領域境界要素法による数値解析の基本的な有効性を確認した。

参考文献

- [1] Hideki Tachibana et al., Proc., inter-noise 99, pp1-6, 1999.
- [2] 三宅龍雄ほか, トンネル坑口周辺部の騒音予測方について, 騒音制御, Vol.24, No.2, (2000) pp.127-135.
- [3] 寺尾道仁ほか, 日本計算数理工学会, 境界要素法論文集, 第4巻, pp179-184, 1987