

境界要素法による2層道路構造の騒音予測計算法の研究

西山 均¹・小川 哲也²・西山 文男³・村坂 宗信⁴¹正会員 博士(工学) 富士技研センター株式会社 (〒150 東京都渋谷区東1-22-11渋谷三信ビル6F)²富士技研センター株式会社 (同上)³フェロー会員 富士技研センター株式会社 (同上)⁴正会員 富士技研センター株式会社 (同上)

著者が示したモンテカルロシミュレーションによる簡易騒音計算法(モンテカルロ法)は、多重反射音が比較的容易に考慮できるので、実用的な2層道路構造の騒音評価手法として有効である。しかし、この方法は幾何音響的なシミュレーションを用いているため、波動音響的要因が顕著となる条件下では適用が制限される。例えば、多重反射音(残響音)の回折音が支配要因になる場合や、高架橋桁下と遮音壁の間の開口量が狭くなり、開口部における拡散放射が顕著となる場合などは原理的に誤差が大きくなる。本論文では境界要素法による波動音響的なシミュレーションを応用し、騒音レベルの中央値 L_{A50} 及び等価騒音レベル L_{Aeq} に対する2層道路構造の騒音予測計算法の1つを提案する。本法によれば、モンテカルロ法では適用限界を超えていた波動音響的要因が大きいモデルでも原理的に適用が可能と考えられる。

Key Words : boundary element method (BEM), road traffic noise, elevated tracks, multi reflection, reflective noise, Monte Carlo simulation

1. まえがき

2層道路構造は自動車専用道路(専用部)の高架下一般国道(一般部)などが配置されるため、道路用地の活用効率に優位性があり、近年、特に都市圏で多く採用される構造である。このような道路の騒音対策は従来においては設計計画段階における環境アセスメント時に、いわゆる既往の音響学会式(ASJ Model 1975)による予測計算により設定されるのが一般的であった¹⁾。しかし、この方法では、2層道路構造に対する計算方法が具体的に示されていないため、一般部、専用部のそれぞれの回折音の計算値を単純に重ね合わせることで計算が行われていることが多かった。従って、桁下反射音の様な一般部音源と専用部桁下の相互作用による騒音伝搬の影響値を考慮しないため、予測した値よりもはるかに大きな騒音レベルが2層道路構造の沿道で観測され、場合によっては沿道住民から苦情が発生する問題が生じている。特に遮音壁が高くなり、直接音の回折減衰が増加し、回折音よりも桁下反射音が卓越するような場合には予測値と実測値の間には大きな差異が生じ、最大10~15 dBもの超過が生じる場合も珍しくない²⁾。

このような道路構造の環境対策において、設計段階で騒音対策方法を設定するには反射音を考慮できる有効な予測手法が必要となる。2層道路構造の反射音の解析法として

は、スリット法³⁾、実測の回帰式によるもの⁴⁾、ランベルのコサイン則の応用⁵⁾⁷⁾など、従来よりいくつかの方法が提案され、応用されている。また、最新の音響学会式(ASJ Model 1998)では、ミラーイメージを用いた2層道路構造の簡易計算法が示されている⁶⁾。しかしながら、これらの方法は比較的低次の反射音しか考慮できないことや扱える道路断面形状に対し適用範囲が狭いなどの制限がある。また、桁下裏面反射に加えて、遮音壁間の反射を考慮するには、計算手順が複雑になりすぎるため、実行上困難である。

このような背景から、著者らは乱数を用いた汎用的数値解析手法の1つであるモンテカルロシミュレーションを応用した2層道路構造の簡易騒音計算法(以降モンテカルロ法と称する)を提案し、実際の2層道路構造沿道の騒音実測値による複数の比較により妥当性を得ている⁸⁾。この方法によれば、高架橋、遮音壁、路面の位置関係、桁形状、周囲の地形、吸音材の配置位置等について包括したモデル形成による評価が比較的容易に可能であり、多重反射を考慮できる簡易的な2層道路構造での騒音計算法として実用上有効である。また、モンテカルロ法により2層道路構造に対する種々の騒音特性を計算し、反射騒音に対する有効な騒音対策方法も幾つか提案されている⁹⁾¹¹⁾。

しかしながら、モンテカルロ法は、幾何音響的な方法を

用いているので、音の波動現象の影響が顕著となる条件下では誤差が大きくなる要因を原理的に含んでいる^{20,21)}。例えば、多重反射音の回折音が支配要因になる場合や、高架橋桁下と遮音壁の間の開口量が狭いとき、開口部における拡散放射が顕著となる場合などは、原理的に誤差が大きくなる。そのため、モンテカルロ法では実際の2層道路構造の騒音測定の結果を基に、開口量 D をパラメータとした補正係数を設けているが、その適用範囲には限界があり、 $D \geq 2.0\text{m}$ の条件を設けている²⁾。さらなる適用範囲の拡張と計算精度の改善を実現させるためには波動音響的解析が必要と考えられる。

道路交通騒音に対し、波動音響的解析を行うには、設定された境界条件のもとに波動方程式を解くことになるが、対象とする2層道路構造では境界条件が非常に複雑になるため、解析的に解くことは一般的に困難である。このような問題の場合、数値解析手法が有効となる。境界要素法^{12),13)}は、複雑な騒音伝搬モデルを解析できる有効な手法の1つとして、いくつかの道路構造の音場解析の研究に適用されている¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。

境界要素法は要素分割が境界面のみでよいこと、無限領域に対する配慮が定式化の中に自然と組み込まれているなどの利点があり、有限要素法など他の数値解析手法などと比べると遙かに計算時間、メモリーを少なくできる利点を有する¹⁷⁾⁻²⁰⁾。特に本論文で考える道路断面モデルは、形状が大きく、しかも開空間のモデルとなるので上記の境界要素法の利点が効果的に発揮される。現実上、有限要素法など空間内を要素化する必要がある解法では、2層道路構造の解析を行うことは計算実行が困難である。

一方、境界要素法を使用した従来の研究では遮音壁¹⁴⁾、堀割構造、低騒音舗装¹⁵⁾、高架橋桁下の反射特性¹⁶⁾などの相対的な減音効果に対する評価に使用されているが、道路計画の実用上は L_{A50} ・ L_{Aeq} の様な道路交通騒音の評価値の絶対量を予測計算できるモデル手法としての確立が重要と考えられる。

本論文では、境界要素法を用いて2層道路構造に対する音場解析を行い、ASJ Model 1975または1993と組み合わせることにより、騒音レベルの中央値 L_{A50} 及び等価騒音レベル L_{Aeq} を算出する計算方法の1つを提案する^{22),23)}。また、この境界要素法による計算結果とモンテカルロシミュレーションによる計算結果あるいは実測値と比較考察した。この方法によれば、モンテカルロ法など従来法では適用限界を超えていた波動音響的な要因が大きいモデルでも原理的に適用が可能と考えられる。

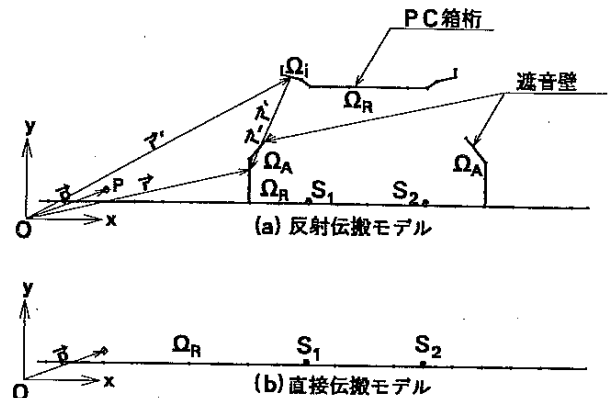


図-1 2層道路構造の境界要素法モデル

2. 境界要素法による2層道路構造の音場解析の定式化

本論文では道路進行方向にその断面形状が変化しないものとし、図-1(a)の様な高架橋桁と左右遮音壁及び路面で構成される様な反射伝搬を伴う2次元の道路断面モデルを考える。ここに、 Ω_A は吸音板などの吸音型境界条件、 Ω_R はコンクリート、鋼材などの高反射型境界条件を表す。本モデルで予測位置 $P(\vec{r})$ ($\vec{r}=(x,y)$)の時刻 t における速度ポテンシャルを $\phi(\vec{r},t)$ とおけば、本問題の基本式である2次元の波動方程式は以下で示される。

$$\frac{\partial^2 \phi(\vec{r},t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi(\vec{r},t)}{\partial y^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi(\vec{r},t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

速度ポテンシャル $\phi(\vec{r},t)$ より、予測位置 $P(\vec{r})$ における粒子速度 $v(\vec{r},t)$ 、音圧 $\bar{P}(\vec{r},t)$ は以下で与えられる。

$$v(\vec{r},t) = -\frac{\partial \phi(\vec{r},t)}{\partial x} - \frac{\partial \phi(\vec{r},t)}{\partial y} \quad (2)$$

$$\bar{P}(\vec{r},t) = \rho \frac{\partial \phi(\vec{r},t)}{\partial t} \quad (3)$$

ここに、 c は空気中の音の伝達速度、 ρ は空気密度である。空間座標 \vec{r} と時間 t の変数を分離するため $\phi(\vec{r},t)$ を複素実行値が Φ で角周波数が ω の複素正弦波として以下のように表せば、

$$\phi(\vec{r},t) = \sqrt{2} \Phi(\vec{r}) e^{j\omega t} \quad (4)$$

式(1)の波動方程式は以下のようなヘルムホルツ方程式

に書き改められる。

$$\frac{\partial^2 \Phi(\vec{r})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi(\vec{r})}{\partial y^2} = -\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \Phi(\vec{r}) \quad (5)$$

ここに、 ω/c は音の波数、 $j(\sqrt{-1})$ は虚数記号である。図-1(a)においてASJ Model 1975による音源の設定と同様に路面より30 cmの位置に一般部車両による走行音を線音源 S_1, S_2 で設定する。それぞれの音源は円筒音源によって以下の式で設定する。

$$\bar{P}_0 = -jAH_0^{(2)}\left(\frac{\omega\zeta}{c}\right) \quad (6)$$

ここに、 \bar{P}_0 は円筒中心から距離 ζ における音圧、 $A(=1.0$ Pa)は単位半径 $\zeta(=1.0$ m)上での音圧、 $H_0^{(2)}(\cdot)$ は0次の第2種ハンケル関数であり、 ω の1/2乗に反比例する。よって、この音源の音圧は周波数に反比例して減少する周波数特性を有する。予測点 $P(\vec{r})$ をモデル空間内の任意の点に設定する。騒音は一般部のみの音が専用部下の半閉鎖空間で残響するものとし、境界要素法の数値解析モデルの中では専用部の音源は省略する(但し、全体の騒音計算の中では音響学会式の音源設定を行い計算に考慮する)。図-1(a)は2層道路構造の音の反射面を境界 $\Omega(=\Omega_R \cup \Omega_A)$ で構成したものである。各境界 Ω に対する境界条件を式(7)により複素音響インピーダンス $Z(\vec{r}, \omega)$ で規定する。

$$Z(\vec{r}, \omega) = \frac{1+R(\vec{r}, \omega)}{1-R(\vec{r}, \omega)} \rho c \quad (7)$$

ここに、 $R(\vec{r}, \omega)$ は複素音圧反射係数である。吸音率 $\alpha(\vec{r}, \omega)$ との関係は、以下の式で示される。

$$\alpha(\vec{r}, \omega) = 1 - |R(\vec{r}, \omega)|^2 \quad (8)$$

構成される主な境界 Ω のうち、桁、床版、路面などの高反射型境界 Ω_R は表面の状態などにより変化するため、厳格な設定はかなり難しいが、基本的には完全反射に近い性質であるので、本論文では通常は簡単に完全反射壁($\alpha(\omega)=0$)を設定するものとする。一方、遮音壁の吸音

板、裏面吸音板などの吸収型境界条件 Ω_A は残響室法吸音率の規格 $\alpha(\omega)=0.8$ や斜入射吸音率の規格 $\alpha(\omega)=0.9$ などを用いて設定する。複素音響インピーダンスの虚部は入射波に対する反射波の位相差を決定するので、回折伝搬と反射伝搬における予測点位置での干渉特性に影響を与える。このため、予測点位置での周波数特性のピーク(特に極小値)周波数に多少のずれを生じさせるが、オーバーオール値(全周波数成分のエネルギー和)を考えた場合この影響は小さいので、本論文では虚数項を0(入射波と反射波の位相が一致する事を意味する)として計算を行った。このインピーダンス境界条件は境界要素法による数値解析上ではロビン型境界条件^{12),13)}として以下で規定される。

$$\frac{j\omega\rho}{Z(\vec{r}, \omega)} \Phi(\vec{r}, \omega) - \frac{\partial \Phi(\vec{r}, \omega)}{\partial \vec{n}} = 0 \quad (9)$$

境界要素法では、全ての境界 Ω を考慮し境界積分方程式の形に式(5)のヘルムホルツ方程式を以下のように展開する。ここで、無限遠点における境界積分は0に収束するため省略できる。

$$\frac{1}{2} \Phi(\vec{r}, \omega) = \int_{\Omega} \left[\Phi(\vec{r}', \omega) \frac{\partial G(\vec{r}-\vec{r}', \omega)}{\partial \vec{n}'} \right] d\Omega - \int_{\Omega} \left[G(\vec{r}-\vec{r}', \omega) \frac{\partial \Phi(\vec{r}', \omega)}{\partial \vec{n}'} \right] d\Omega \quad (10)$$

ここに、 \vec{r} は境界要素上の観測点、 \vec{r}' はソース点の位置ベクトル、 $G(\vec{r}-\vec{r}', \omega)$ はヘルムホルツ方程式に対する2次元のグリーン関数であり以下で与えられる。

$$G(\vec{r}-\vec{r}', \omega) = \frac{-j}{4} H_0^{(2)}\left(\frac{\omega}{c} |\vec{r}-\vec{r}'|\right) \quad (11)$$

境界面 Ω は解析対象とする最大周波数 f_{\max} における音の波長の1/6程度の大きさに細分化され、境界要素 Ω_j を得る。式(10)を離散化すれば以下の式が得られる。

$$\frac{1}{2} \Phi(\vec{r}_p, \omega) = \sum_{i'=1}^N \int_{\Omega_{i'}} \frac{\partial G(\vec{r}_i - \vec{r}_{i'}, \omega)}{\partial \vec{n}_{i'}} d\Omega_{i'} \Phi(\vec{r}_{i'}, \omega) - \sum_{i'=1}^N \int_{\Omega_{i'}} G(\vec{r}_i - \vec{r}_{i'}, \omega) d\Omega_{i'} \frac{\partial \Phi(\vec{r}_{i'}, \omega)}{\partial \vec{n}_{i'}} \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N H_{i,i'} \Phi(\vec{r}'_{i'}, \omega) = \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N G_{i,i'} \frac{\partial \Phi(\vec{r}'_{i'}, \omega)}{\partial \vec{n}} \quad (13)$$

ここに、 N は境界要素の分割数、 $H_{i,i'}$ 、 $G_{i,i'}$ はそれぞれノイマン及びディレクレ型境界条件における境界積分である。式(9)より、ソース点でのポテンシャル値 $\Phi(\vec{r}', \omega)$ あるいは、法線方向の流束値 $\partial \Phi(\vec{r}', \omega) / \partial \vec{n}$ の何れかは規定できるので、境界要素法では式(13)の線形方程式を解くことにより、各周波数における全ての要素上での速度ポテンシャルの実効値 $\Phi(\vec{r}, \omega)$ を算定する。空間上の任意の予測点 $P(\vec{p})$ 上での速度ポテンシャルの実行値 $\Phi(\vec{p}, \omega)$ は得られた境界上のその値 $\Phi(\vec{r}, \omega)$ より以下で求められる。

$$\begin{aligned} \Phi(\vec{p}, \omega) = & \int_{\Omega} \left[\Phi(\vec{r}, \omega) \frac{\partial G(\vec{p}-\vec{r}, \omega)}{\partial \vec{n}} \right] d\Omega \\ & - \int_{\Omega} \left[G(\vec{p}-\vec{r}, \omega) \frac{\partial \Phi(\vec{r}, \omega)}{\partial \vec{n}} \right] d\Omega \end{aligned} \quad (14)$$

以上より、予測位置 $P(\vec{p})$ での音圧 $\bar{P}(\vec{p}, \omega)$ 及び音圧レベル $L_P(\vec{p}, f)$ を以下で算定する。

$$\bar{P}(\vec{p}, \omega) = j\omega\rho\Phi(\vec{p}, \omega) \quad (15)$$

$$L_P(\vec{p}, f) = 20 \log \left[\frac{\bar{P}(\vec{p}, f)}{\bar{P}_R} \right] \quad (f = \omega/2\pi) \quad (16)$$

$$f_{i''} = f_{\min} + \Delta f(i'' - 1) \quad (i'' = 1, 2, \dots, M) \quad (17)$$

ここに、 $\bar{P}_R (= 20 \mu\text{Pa})$ は基準音圧である。本論文では対象とする周波数帯の間を周波数刻み幅 Δf ごとに音源 S_1, S_2 に対する予測点 $P(\vec{p})$ での音圧レベル $L_{P,1}(\vec{p}, f)$ 、 $L_{P,2}(\vec{p}, f)$ を境界要素法による数値解析により算出する。得られた予測位置での音圧レベル $L_{P,1}(\vec{p}, f)$ 、 $L_{P,2}(\vec{p}, f)$ に対し、自動車騒音の代表スペクトル³⁾、

$$W_c(f) = -10 \log \left[1 + \left(\frac{f}{2000} \right)^2 \right] \quad (18)$$

やA特性の聴感補正 $W_A(f)$ 及び設定した円筒音源の周波数

特性の補正值 $W_s(f) (= 10 \log f)$ で校正し、道路交通騒音の重みづけを考慮した各周波数での音圧レベル $L_{P,1}^*(\vec{p}, f)$ 、 $L_{P,2}^*(\vec{p}, f)$ を以下で計算する。

$$L_{P,k}^*(\vec{p}, f) = L_{P,k}(\vec{p}, f) + W_c(f) + W_A(f) + W_s(f) \quad (k=1,2) \quad (19)$$

既往の報告では、ある単一周波数¹⁴⁾¹⁵⁾か、ある一定の中心周波数に対するオクターブバンドの合計¹⁶⁾で解析評価している。しかし、 L_{A50} 、 L_{Aeq} など道路交通騒音の評価値を算定する場合、少なくとも自動車騒音の影響が大きい周波数帯域を包括して評価する必要があると考えられる。よって、本論文では、対象とする周波数帯域を同一周波数間隔 Δf で解析する。予測点 $P(\vec{p})$ での音源 S_1 、 S_2 に対するオーバーオールレベル $\bar{L}_{P,1}(\vec{p})$ 、 $\bar{L}_{P,2}(\vec{p})$ は、

$$\bar{L}_{P,k}(\vec{p}) = 10 \log \left[\sum_{i''=1}^M 10^{\frac{L_{P,k}^*(\vec{p}, f_{i''})}{10}} \Delta f \right] \quad (20)$$

で計算される。次に、図-1(b)に示す様な直接伝搬するモデルに対して、境界要素法を用いた全く同様な手順により予測点 $P(\vec{p})$ での $\bar{L}'_{P,1}(\vec{p})$ 、 $\bar{L}'_{P,2}(\vec{p})$ を計算する。以上、同じ予測位置での直接伝搬モデルに対する反射伝搬モデルのインサージョンロス $\Delta L_{P,k}(\vec{p})$ (直接伝搬モデルに対して2層道路構造における遮音壁や裏面吸音板の効果を考慮した反射伝搬モデルの挿入損失)を以下で算出する。

$$\Delta L_{P,k}(\vec{p}) = \bar{L}_{P,k}(\vec{p}) - \bar{L}'_{P,k}(\vec{p}) \quad (k=1,2) \quad (21)$$

3. 境界要素法による2層道路構造の騒音レベルの計算法

(1) 騒音レベルの中央値 L_{A50} の計算法

現行の「騒音に係わる環境基準」および音響学会式で用いている評価量は L_{A50} から L_{Aeq} に既に移行している。しかしながら、当該分野に関する過去の研究成果の蓄積は L_{A50} に基づいて為されているものも多い。特に、モンテカルロ法については当初は L_{A50} ベースで定式化しているので、本論文で示す境界要素法による騒音予測計算法についても、モンテカルロ法との比較計算のため、 L_{A50} についても定式化を行うものとする。

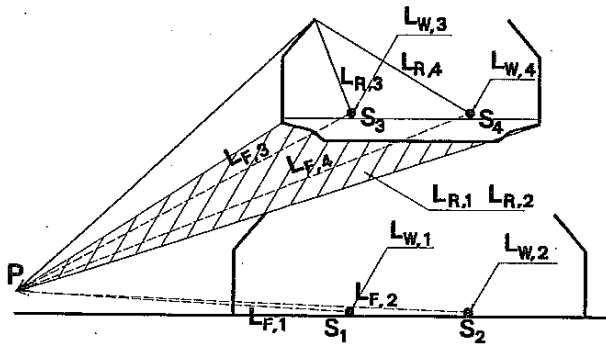


図-2 騒音伝搬のモデル図

本計算法で L_{A50} を計算する場合は、ASJ Model 1975に式(21)に示す予測点位置でのインサージョンロス $\Delta L_{P,k}(\bar{p})$ を考慮して計算を行う。図-2は2層道路構造の騒音伝搬ルートを模式的に示したモデル図である。一般部の音源として S_1, S_2 、専用部の音源として S_3, S_4 を設定する。予測地点 $P(\bar{p})$ で距離減衰のみにより、直接伝搬される一列等間隔モデルでの騒音レベル $L_{F,k'}(k'=1-4)$ はASJ Model 1975により以下の式で算定できる。

$$L_{F,k'}(\bar{p}) = L_{W,k'} - 8 - 20 \log_{10} l_{k'} + 10 \log_{10} \left(\frac{\pi l_{k'}}{d_{k'}} \tanh \frac{2\pi l_{k'}}{d_{k'}} \right) \quad (k'=1,2,3,4) \quad (22)$$

ここに、 $l_{k'}$ は音源 $S_{k'}$ から予測点 $P(\bar{p})$ までの距離、 $d_{k'}$ は音源 $S_{k'}$ を走行する車両の平均車頭間隔である。 $L_{W,k'}$ は各々の音源 $S_{k'}$ の騒音パワーレベルで、例えば第2段階規制式では以下で与えられる。

$$L_{W,k'} = 86 + 0.2 V_{k'} + 10 \log_{10} (a_{1,k'} + 5a_{2,k'}) \quad (23)$$

ここに $V_{k'}$ は平均自動車走行速度、 $a_{1,k'}$ は小型車混入率、 $a_{2,k'}$ は大型車混入率である。一般部の音源 S_1, S_2 による反射を考慮した予測点位置での騒音レベル $L_{R,1}(\bar{p}), L_{R,2}(\bar{p})$ は前節で示した境界要素法の計算によるインサージョンロス $\Delta L_{P,1}(\bar{p}), \Delta L_{P,2}(\bar{p})$ にASJ Model 1975による直接伝搬での騒音レベル $L_{F,1}(\bar{p}), L_{F,2}(\bar{p})$ を考慮し、以下の式によって算出する。

$$L_{R,k}(\bar{p}) = L_{F,k}(\bar{p}) + \Delta L_{P,k}(\bar{p}) \quad (k=1,2) \quad (24)$$

今回考慮したモデルでは道路進行方向にその断面が変化しない設定である。ASJ Model 1975による式(22)は円筒音源(線音源)としての仮定で一致する。よって、境界要素法で求められた円筒音源によるインサージョンロスと式(22)で与える騒音レベルとのモデル上での整合性は得られている。

専用部より遮音壁を介して予測点に伝搬する騒音は、ASJ Model 1975より以下で計算する。

$$L_{R,k''}(\bar{p}) = L_{F,k''}(\bar{p}) + \alpha_{D,k''}(\bar{p}) + \alpha_{I,k''}(\bar{p}) \quad (k''=3,4) \quad (25)$$

ここに $\alpha_{D,k''}, \alpha_{I,k''}$ はASJ Model 1975による回折減衰及び種々の要因による補正值である。以上より、全ての音源を考慮した予測地点での騒音レベルの中央値は、

$$L_{A50}(\bar{p}) = 10 \log_{10} \left(\sum_{k'=1}^4 10^{\frac{L_{R,k'}(\bar{p})}{10}} \right) \quad (26)$$

で与えられる。

(2) 等価騒音レベル L_{Aeq} の計算法

本計算法ではASJ Model 1993に式(21)に示す予測点位置でのインサージョンロス $\Delta L_{P,k}(\bar{p})$ を考慮し、等価騒音レベル L_{Aeq} の予測方法を示す。本論文では簡単のため、道路進行方向に対して道路断面形状や交通条件が変化せず一定なものとする。予測点を含む断面を中心に道路方向に左右に長さ Δl で一定間隔の m 個の区間を設定する。 i^* 番目の区間の中心から予測点 P までの距離は式(28)で示される。計算対象とする道路方向の長さは $\bar{l} = (2m+1)\Delta l$ である。予測点 P までに距離減衰のみにより、直接伝搬される1台当たりの騒音レベル $L'_{F,k',i^*}(\bar{p}) (k'=1-4)$ はASJ Model 1993では以下で規定される。

$$L'_{F,k',i^*}(\bar{p}) = L_{W,k'} - 8 - 20 \log l_{k',i^*} \quad (27)$$

$$l_{k',i^*} = \sqrt{l_{k',0}^2 + (i^* \cdot \Delta l)^2} \quad (i^*=0,1,2,\dots,m) \quad (28)$$

ここに、 $L'_{w,k}$ はASJ Model 1993による各々の音源 S_k の自動車1台当たりのA特性騒音パワーレベル(人の聴感補正後の騒音パワーレベル)で、2車分類(音響学会式で通過車両を大型車と小型車の2種に分類する評価法)では以下で与えられる³⁾。

$$L'_{w,k} = 65.1 + 20 \log V_{k'} + 10 \log (a_{1,k'} + 4.4 a_{2,k'}) \quad (29)$$

一般部音源 S_1, S_2 による予測点位置 $P(\bar{p})$ での多重反射音を考慮した騒音レベルのユニットパターン $L_{R,1,i}(\bar{p}), L_{R,2,i}(\bar{p})$ は前節で示したインサージョンロス $\Delta L_{P,1}(\bar{p}), \Delta L_{P,2}(\bar{p})$ に直接伝搬騒音レベル $L'_{F,1,i}(\bar{p}), L'_{F,2,i}(\bar{p})$ を考慮し、以下の式によって算出する。

$$L'_{R,k,i}(\bar{p}) = L'_{F,k,i}(\bar{p}) + \Delta L_{P,k}(\bar{p}) \quad (k=1,2) \quad (30)$$

ASJ Model 1993においても断面が変化しないという条件では円筒音源としての仮定が成立するので、境界要素法で求めたインサージョンロスを適用する妥当性はある。

一方、専用部音源 S_3, S_4 に対する予測地点で遮音壁による回折及び地表面効果等を考慮した騒音レベルのユニットパターン $L'_{R,k'',i}(\bar{p}) (k''=3,4)$ は、

$$L'_{R,k'',i}(\bar{p}) = L'_{F,k'',i}(\bar{p}) + \Delta L_{D,k'',i}(\bar{p}) + \Delta L_{G,k'',i}(\bar{p}) + \Delta L_{M,k'',i}(\bar{p}) \quad (31)$$

で求められる。ここに、 $\Delta L_{D,k''}(\bar{p}), \Delta L_{G,k''}(\bar{p}), \Delta L_{M,k''}(\bar{p})$ はASJ Model 1993の回折減衰、地表面効果及び気象条件の要因による補正值であり、今回は $\Delta L_{M,k''}$ は0とした³⁾。本論文では道路進行方向に道路断面、交通条件が変化しないと仮定しているため、予測点 $P(\bar{p})$ での等価騒音レベル $L_{Aeq}(\bar{p})$ は、

$$L_{Aeq}(\bar{p}) = 10 \log \sum_{k'=1}^4 \left[\frac{\bar{N} \cdot \Delta t}{\bar{T}} \left(2 \sum_{i=1}^m 10^{\frac{L'_{R,k',i}(\bar{p})}{10}} + 10^{\frac{L'_{R,k',0}(\bar{p})}{10}} \right) \right] \quad (32)$$

で与えられる。ここに、 \bar{N} は3600sec当たりの交通量、 $\bar{T}(=3600\text{sec})$ は積分時間である。

4. 境界要素法による2層道路構造の騒音予測計算例

(1) 2層道路構造における遮音壁位置の影響(モンテカルロ法との比較計算(L_{A50} での比較))

筆者らはモンテカルロ法により一般部に遮音壁を伴った標準的な2層道路構造の遮音壁位置に対する特性を示した。その結果、従来の概念とは相反し、遮音壁設置位置を民地側にセットバックした方が、騒音レベルが減少するという極めて興味深い結果を得た²⁾。本論文では同じモデルに3。(1)で示した計算方法に従い、境界要素法を用いて騒音レベルの中央値 L_{A50} に対して計算を行いモンテカルロ法の結果と比較する。

図-3には解析する架空の2層道路構造のモデル例を示す。桁構造としては、PC箱桁を設定し、一般部遮音壁高さは、8.0mに設定している。このモデルは既往の論文²⁾で設定したものと全く同じである。また、遮音壁天端から下フランジまでの隙間を D とする。音源として一般部上下車線の道路中心に2つ、専用部上下道路車線の道路中心に2つ考慮する。一般部音源 S_1, S_2 として1時間当たりの車両通過台数 $\bar{N}_G=1500$ 台、走行速度 $V=60$ km/h、大型車混入率 $a_2=0.2$ を設定する。同様に、専用部音源 S_3, S_4 として1時間当たりの車両通過台数 $\bar{N}_R=2000$ 台、走行速度 $V=100$ km/h、大型車混入率 $a_2=0.2$ を設定する。また、PC桁と路面 Ω_R の吸音率は $\alpha=0$ 、遮音壁 Ω_A は吸音板の残響室法吸音率の規格値の $\alpha=0.8$ に設定した。一般部遮音壁位置については、専用部遮音壁位置直下を $B=0$ mに、民地側を負、道路側を正に設定し、前後に変化をさせて計算結果を評価した。予測位置 P は公民境界とする。本モデルは道路中心に対し構造が線対称であることから、ミラーイメージにより半分のモデルを設定している。この設定により境界要素の数を半分に減らすことが可能となる。また、最大要素長さは解析する最高周波数(1kHz)の波長(34cm)の1/6である5.6cmに設定した。

2つの音源の位相を変えることにより、干渉特性が変化するので、図-5の音圧の周波数特性は幾分変化すると考えられる。計算例ではミラーイメージを用いているので、左右の音源は同位相である。道路交通騒音の場合、左右音

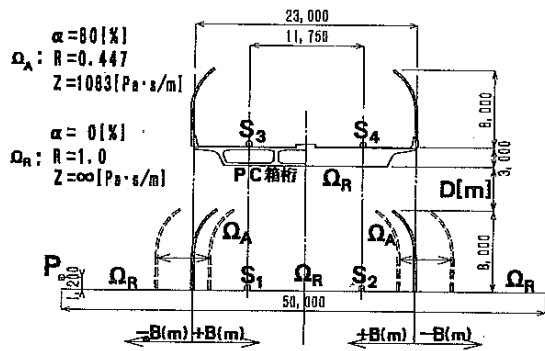


図-3 遮音壁位置による2層道路構造の解析モデル

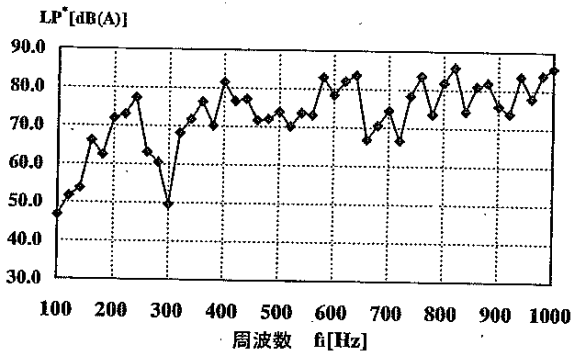


図-4 予測位置での周波数特性 ($D=5.0\text{m}$, $B=0.0\text{m}$)

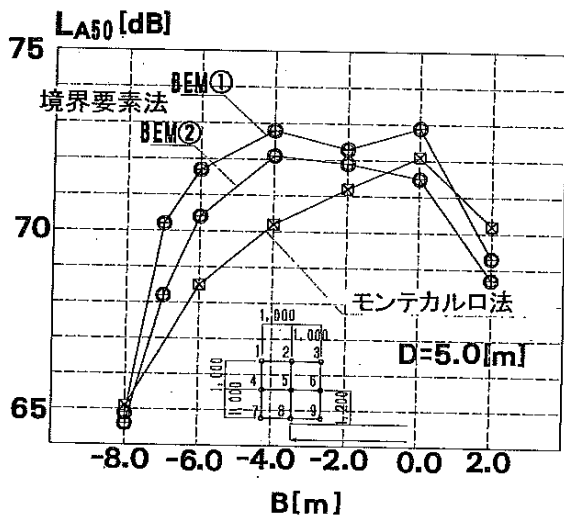


図-5 騒音レベルの中央値 L_{A50} の計算結果

源の間に位相の相関性はなく、原理上は各音源の位相は各周波数で不規則に与えられる。理想上は不規則な位相の雑音音源（無相関な位相特性）を設定することが望まれるが、現在の解法では困難である。方法としては、左右音源の位相差が異なる計算ケースを複数設定し、その平均値をもって代表値とする考え方もある。しかし、この計算を行うことは、非常に大きな労力を伴うので、現実的とは言えない。2層道路構造内で残響する音は非常に複雑な反射経

路を経て伝達されるので、実際には非常に様々な位相を持つ反射音同士での干渉波が生じており、等価的に内部残響音は無相関に近い状態になっている。左右音源の位相条件による影響は、民地側に伝搬する音に対しては、ほとんどないと考えられる。よって、本論文ではミラーイメージを用いて同位相扱いとしても、近似的に妥当であると考えている。

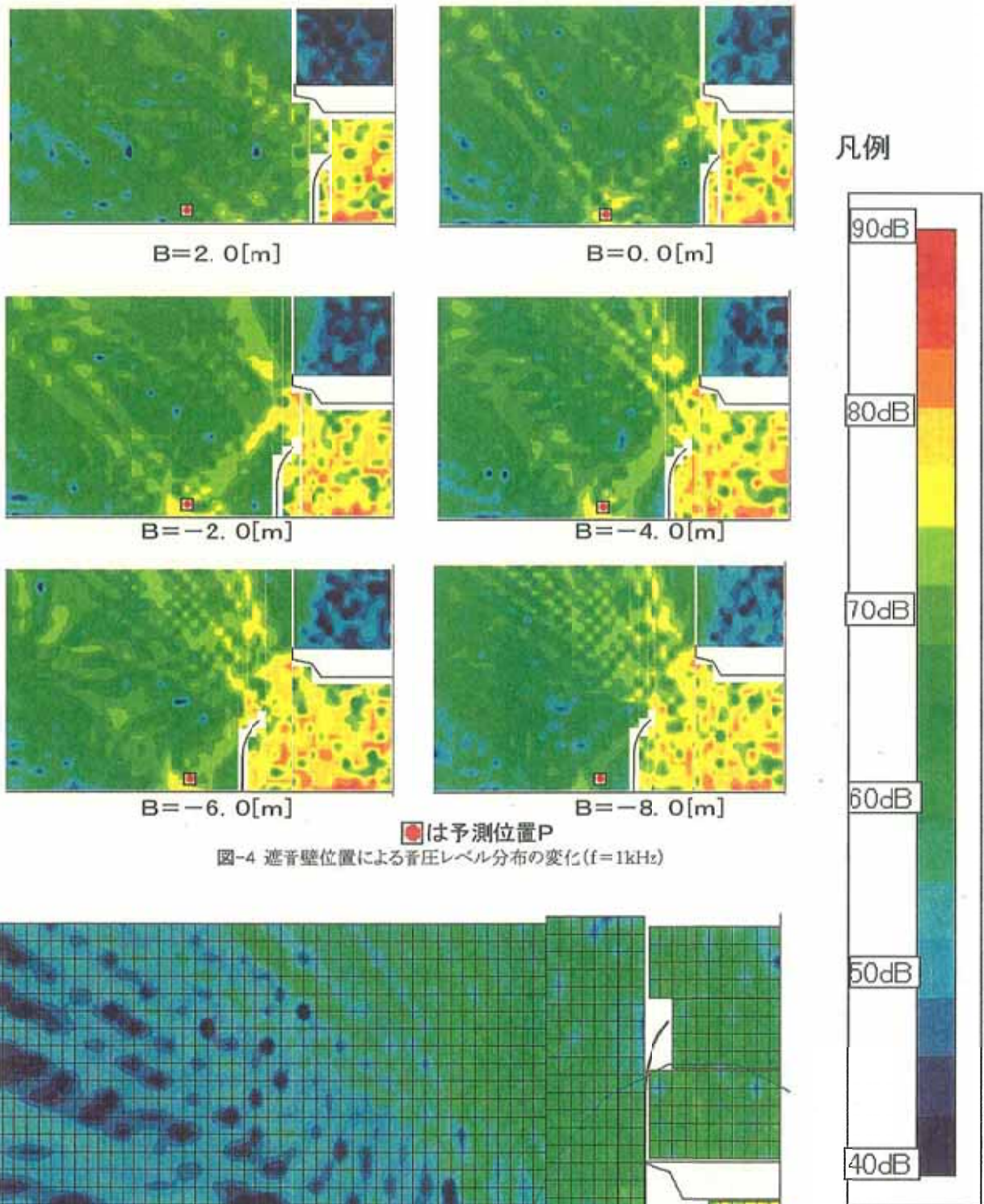
図-4は $B=+2.0\sim-8.0\text{m}$ での境界要素法により得られた1kHzでの音圧レベルのコンタ図である。境界要素法の解析モデルの中には専用部音源は考慮しないので、コンタ図上の専用部道路内の音圧レベルは非常に低い値となっている。桁下裏面により反射が生じ、民地側に騒音が伝達している様子が分かる。また、一旦桁下裏面で反射した音が地面で再度反射している現象が見える。遮音壁が民地側にセットバックすることにより、桁下裏面での反射パスが遮られ、反射音が抑制されていく様子が確認できる。

図-5は横軸に解析周波数、縦軸に音源 S_1, S_2 を同時に考慮した補正後の音圧レベル $L_p^*(f)$ をプロットしたものである。この周波数特性を見ると、音の干渉により、それぞれの周波数近傍で音圧レベルは大きく変動しており、精度良く解析を行うには周波数刻み幅 Δf をある程度細かくする必要があることが分かる。

図-6には予測点Pである公民境界高さ1.2m地点での騒音レベル L_{A50} の境界要素法（BEM①）とモンテカルロ法による計算値を縦軸に、遮音壁位置 B を横軸にとりプロットしたものである。ここで示した計算範囲では、境界要素法とモンテカルロ法の偏差は $-1.5\sim+2\text{dB}$ 程度である。全体的には境界要素法による結果とモンテカルロ法による結果は同様な傾向を示すが、 $B=-3.0\sim-7.0\text{m}$ では境界要素法の方がやや高い値になった。

モンテカルロ法では計算手段として境界に接触するベクトルのエネルギー量を計数する²⁾。検出境界は有限の長さを持つ線分で構成され、その大きさは通常 $3\sim 10\text{m}$ 程度に設定される。モンテカルロ法では、反射騒音レベルは有限の大きさを持つ検出境界の平均値として評価される。一方、境界要素法は原理上スポット点での値を得るので、モンテカルロ法に比べより端部凹曲面の反射による予測点付近の音の集中を細かく評価することになる。

このことを確かめるため、図-6には予測点Pを中心に上下左右 1.0m の格子状に合計9点を取り、これらの点の平均値（BEM②）を計算してプロットした。この結果（BEM②）とモンテカルロ法を比較すると、前者



●は予測位置P
 図-4 遮音壁位置による音圧レベル分布の変化($f=1\text{kHz}$)

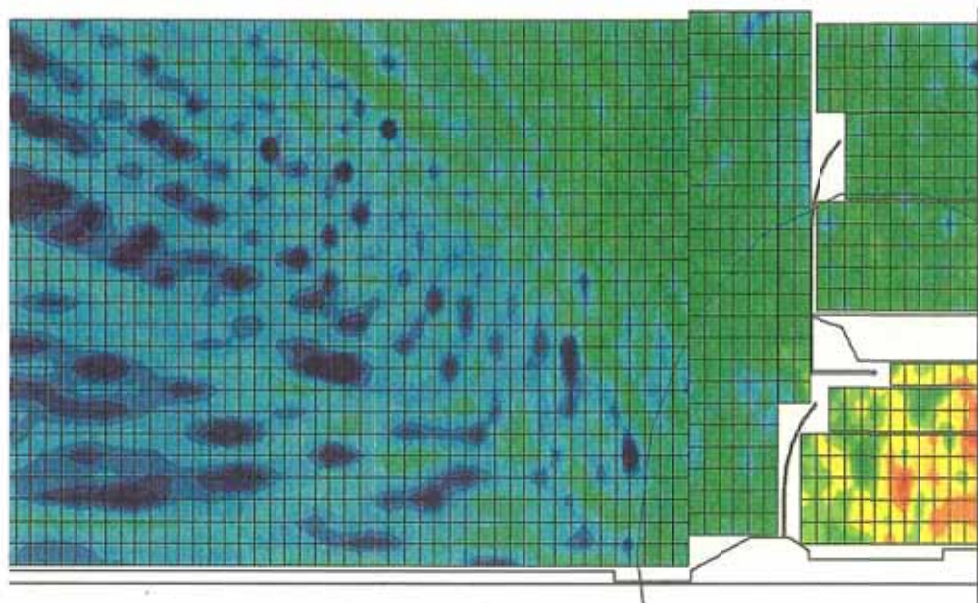


図-9 裏面吸音板適用断面の音圧レベル分布($f=500\text{Hz}$)

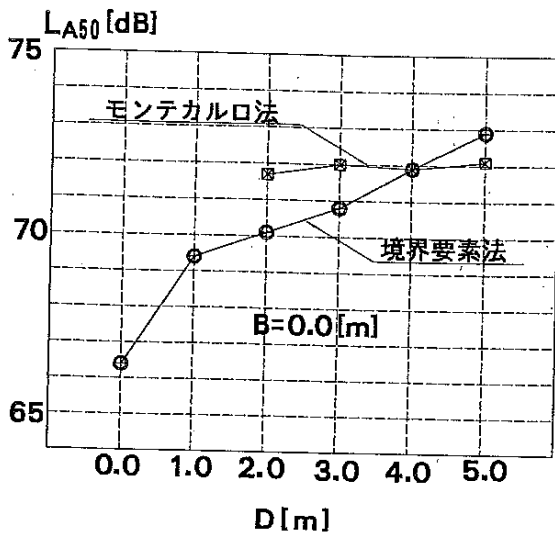


図-7 開口量 D に対する騒音レベル

(BEM①)よりも一致してくることがわかる。結果として、一般部遮音壁位置を外側(民地側)に移動させると、騒音レベルは遙かに減少することが、境界要素法による計算方法でも確認できた。

次に、桁下開口量 D の変化に対する騒音レベルの変化について比較検討を加える。図-7は図-3のモデルに対して、縦軸に騒音レベルの中央値 L_{A50} 、横軸に桁下開口量 D を設定し、境界要素法とモンテカルロ法の計算値をプロットしたものである。

本モデルの場合モンテカルロ法による計算結果は $D \geq 2.0$ mの範囲では72 dB程度でほとんど変化がない。一方、境界要素法は $D \geq 1.0$ mの領域では開口量 D の減少1 mに対し、概ね1 dB程度の騒音レベルの減少が認められる。1.0-0.0 mまでは3 dB程度減少している。

(2) 裏面吸音板対策を伴った2層道路構造の騒音分布 (実測値との比較)

次に、3. (2)で示した L_{Aeq} ベースでの予測計算を行い、実測値との比較により検討を加える。図-8の断面図は実際に供用中のある2層道路の断面構造を示したものであり、この道路の沿道において騒音実測を行った。桁構造としては、同様にPC箱桁であり、一般部遮音壁高さは、6.0 mである。また、桁端部には裏面吸音板が敷設されている。音源として一般部上下車線道路中心に2つ、専用部上下道路中心に2つ考慮する。一般部音源 S_1, S_2 として、実際の交通量調査結果より、1時間当たりの車両通過台数 $\bar{N}_G = 1120$ 台、走行速度 $V = 64$ km/h、大型車混入率

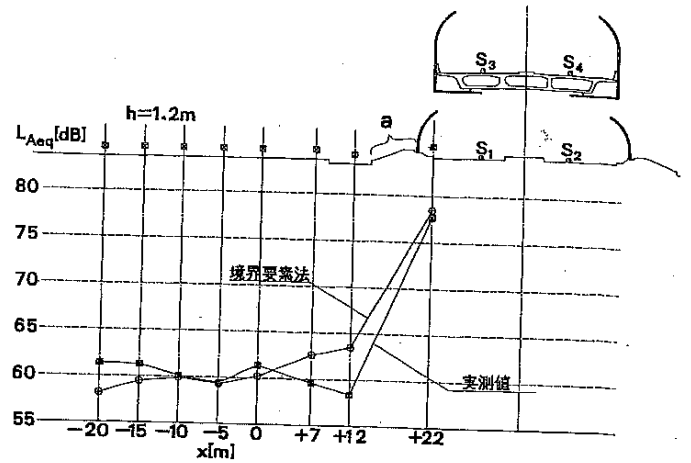


図-8 裏面吸音板を伴った2層道路構造の等価騒音レベル

$a_2 = 0.33$ を設定する。同様に、専用部音源 S_3, S_4 として1時間当たりの車両通過台数 $\bar{N}_H = 1800$ 台、走行速度 $V = 80$ km/h、大型車混入率 $a_2 = 0.28$ を設定する。また、PC桁 Ω_R の吸音率は $\alpha = 0$ 、遮音壁 Ω_A は吸音板の残響室法吸音率の規格値の $\alpha = 0.8$ に設定した。本モデルも道路中心に対し構造が線対象であることから、ミラーイメージにより半分のモデルを設定している。本モデルでは実際の道路構造にあわせ、PC桁端部に吸音率 $\alpha = 0.8$ の裏面吸音板を適用する。一般部の断面については排水性舗装の吸音性を考慮し、周波数別垂直入射吸音率の実測値²⁹⁾にA特性をかけた平均化した平均垂直入射吸音率 $\alpha = 0.23$ で設定した。予測点としては、公民境界を0 mとし、道路側を+、民地側を-に設定し、それぞれの高さ $h = 1.2$ mを設定した。

図-9は500 Hzでの音圧分布のコンタ図を示したものである。専用部の音圧は図-4で示したコンタ図よりやや高めの値になっているが、これは表示したコンタ図の周波数の違い(図-4では1 kHz、図-9では500 Hz)が1つの要因になっているものと考えられる。一方、民地側へ伝達する騒音は、裏面吸音板の効果により桁下裏面による反射騒音が図-4のモデルに比べてはるかに減少していることが分かる。

図-8は横軸に公民境界からの距離、縦軸に等価騒音レベル L_{Aeq} をとり、路肩、民地側の各点での等価騒音レベル L_{Aeq} の計算値および実測値の値をプロットしたものである。全体的には、計算値と測定値とは良く一致しているといえる。しかしながら、公民境界より道路側の2点については、計算値に比べて実測値が幾分低くなっている。この要因は遮音壁の後面(a部)が実際には緑地帯になってお

り、この部分の減衰効果が生じているものと考えられる。

5. まとめ

本論文では境界要素法による波動音響的なシミュレーションを応用し、騒音レベルの中央値 L_{A50} 及び等価騒音レベル L_{Aeq} に対する2層道路構造の騒音予測計算法の1つを提案した。本論文の内容として、以下のような結果が得られた。

①境界要素法を用いた予測計算法は実用上は L_{A50} ・ L_{Aeq} の様な道路交通騒音の評価値を算定できる手法としての確立が重要と考えられるが、本論文では、ASJ Model 1975または1993と組み合わせることにより、騒音レベルの中央値 L_{A50} 及び等価騒音レベル L_{Aeq} を算出する計算方法の1つを提案した。

②計算例で示したモデルの場合、モンテカルロ法の計算値は $D \geq 2.0$ mの範囲では $L_{A50} = 72$ dB程度でほとんど変化がない。一方、境界要素法は $D \geq 1.0$ mの領域では開口量 D の減少1 mに対し、概ね1 dB程度の騒音レベルの減少が認められる。1.0~0.0 mまでは3 dB程度減少している。

③モンテカルロ法ではある程度の大きさを持った領域での合計値として評価しているが、境界要素法ではスポット点での値となるため、多少差異が生じる。原理的にモンテカルロ法が平均的な値となる。

④従来モンテカルロ法で用いていた開口量に対する補正係数 α_R は、境界要素法による計算法では不要となる。

⑤本方法によれば、高架橋、遮音壁、路面の位置関係、桁形状、周囲の地形、吸音材の配置位置等について包括したモデル評価が容易に可能である。

⑥波動音響の解析をしているので、開口率が小さくなくても音の波動性による拡散放射の効果は考慮されているので、原理的な適用範囲の制限はない。

⑦モンテカルロ法では考慮できなかった多重反射時の回折や干渉が考慮できると考えられる。

⑧高い遮音壁を伴った2層道路構造では、モンテカルロ法の計算結果と同様な傾向を示し、受音点側に遮音壁を近づけたほうが全体の騒音レベルは遙かに減少することが確認できた。

⑨実測値との比較では良い整合性が得られた。しかし、地面の境界条件により変化が生じるので留意が必要である。

本計算法の今後の課題、研究問題として、以下に示す項

目が挙げられる。

①開口量 D が制限されたケースでの本計算法の妥当性の検証が不十分である。実際の道路断面形状では、開口量をパラメータとした実測結果を同一条件で実測することが困難であるので、模型実験などと比較を行い、全体の計算手法としての信頼性を確認、向上させる必要がある。

②桁、路面、遮音壁、裏面吸音板など道路断面を構成する境界面の条件を示す音響特性（音響インピーダンス、吸音率など）が不明確な部分がある。今後、このような部材について測定を行い明確化する必要がある。

③2層道路構造に限らず、原理的には堀割など他の特殊な道路構造にも適用は可能である。しかし、計算手法としての妥当性の検証を行ってゆく必要がある。

④本論文では専用部がP C箱桁のみを計算例に示したが、本計算法は原理的には鉄桁、鋼箱桁についても適用は可能である。しかし、これらの桁構造に対する計算方法の妥当性の検証は行っていないので今後速やかに行っていく必要がある。

⑤実測結果との整合による信頼性の向上はこれからの課題である。色々なケースと整合を図り予測手法としての精度の向上に努める必要がある。

⑥モンテカルロ法に比べて境界要素法による方法は計算労力は遙かに大きい。計算規模の節約も今後の課題である。

特に開口量 D が制限されたケースでの本計算法の妥当性の検証は速やかに実施する必要性を感じる。実際の道路断面形状では、開口量をパラメータとした実測結果を同一条件で実測することが困難であるので、模型実験を利用して比較を行い、全体の計算手法としての信頼性を確認、向上させる必要がある。この問題については次回報告する。

参考文献

- 1) (社)日本音響学会：道路交通騒音の予測計算方法に関する研究報告書、1975年2月、1976年3月、1977年2月、1978年3月。
- 2) 西山 均、西山 文男：モンテカルロシミュレーションによる多次反射を伴う2層道路構造の簡易計算法と騒音特性、土木学会論文集、NO.588/VI-38、pp.103-111、1998年3月。
- 3) (社)日本音響学会： L_{Aeq} による道路交通騒音予測、第5回音響技術セミナー、1996年10月。
- 4) Anderson, G. : Noise studies for the San Antonio "Y" project, Transportation Research Record 983, pp.1-8, 1984.
- 5) Fukushima, A., Itiki, T. and Konishi, K. : On traffic noise

- calculation methods about double decks road, Inter-Noise 94, Proceedings, pp.307-310, 1994.
- 6) 福島 昭則, 金治 英貞: 乱反射を仮定した高架裏面反射音の予測モデル, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 1994年10月.
 - 7) 福島 昭則, 小西 一生: 高次の反射音を考慮した高架裏面反射音の予測手法に関する研究, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, 1995年9月.
 - 8) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会 : 小特集-新しい道路交通騒音予測法, 日本音響学会誌, 55巻4号, pp.281-324, 1999年4月.
 - 9) 村坂 宗信, 西山 均, 西山 文男: 道路2層構造における桁下多次反射の騒音対策と基本特性(その1), 第20回土木計画学研究発表会講演集, pp.163-166, 1997年.
 - 10) 小川 哲也, 西山 均, 西山 文男: 道路2層構造における桁下多次反射の騒音対策と基本特性(その2), 第20回土木計画学研究発表会講演集, pp.167-170, 1997年.
 - 11) 酒井 利忠: 反射音を考慮した2層道路構造の騒音対策における最適化設定に関する考察, 土木学会論文集, NO.616/VI-42, pp.13-20, 1999年3月.
 - 12) Brebbia, C. A., Telles, J. C. F. and Wrobel, L. C. : Boundary Element Techniques-Theory and Applications in Engineering, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984.
 - 13) Brebbia, C. A. : The Boundary Element for Engineers, London, U.K.: Pentech, 1978.
 - 14) 田村 政行: 境界要素法による屋外騒音伝搬の予測, 日本音響学会誌, 48, pp.451-454, 1992年.
 - 15) 堀田 竜太, 畑中 尚, 木村 和則, 山本 貢平 : 半地下構造における排水性舗装の効果について-2次元境界要素法による検討, 日本音響学会, 平成10年度秋季研究発表会講演論文集, pp.741, 1998年9月.
 - 16) 福島 昭則, 一木 智之, 小西 一生 : 高架橋裏面反射の予測モデルに関する検討-種々の予測モデルの相互比較- (社)日本音響学会, 騒音・振動研究会資料, N-97-53, 1997年12月.
 - 17) Nishiyama, H. and Nakamura, M. : Capacitance of a strip capacitor, IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., CHMT-13 pp.417-423, 1990.6.
 - 18) Nishiyama, H. and Nakamura, M. : Capacitance of disk capacitors, IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Technol., CHMT-16, pp.360-366, 1993.5.
 - 19) Nishiyama, H. and Nakamura, M. : Form and capacitance of parallel-plate capacitors, IEEE Trans. Comp., Pack., Manuf. Technol., Part A, CPMT-17, NO.3, 1994.9.
 - 20) Nishiyama, H. Nakamura, M. and Minowa I. : Constriction resistance of two conducting spots, IEICE Trans. Special Issue on Resent Electromechanical Devices, E77-C,10, 1994.10.
 - 21) 西山 均, 中添 淳 : 結合ストリップライン形伝送路の導体相互間静電容量と特性インピーダンスの簡易計算法の提案, 信学論 (C-I), vol.J79-C-I, no.1, pp.1-10, 1997年1月.
 - 22) 小川 哲也, 西山 均, 西山 文男 : 境界要素法による反射騒音を伴う2層道路構造の騒音特性, 日本音響学会講演論文集, pp.725-726, 1999年3月.
 - 23) 西山 均, 松下 哲也, 小川 哲也, 村坂 宗信 : 2層道路構造近傍の騒音減衰特性について, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.133-136, 1999年9月.
 - 24) (社)日本音響学会 : 道路交通騒音の対策手法, pp.29-41, 1999年1月.

(1999.5.17 受付)

A STUDY OF CALCULATION METHOD FOR ROAD TRAFFIC NOISE BY BOUNDARY ELEMENT METHOD ALONG ELEVATED TRACKS

Hitoshi NISHIYAMA, Tetsuya OGAWA, Fumio NISHIYAMA
and Munenobu MURASAKA

In this paper, a calculation method of the road traffic noise along elevated tracks for L_{A50} and L_{Aeq} using boundary element method (BEM) is presented. We have already proposed other numerical calculation method using Monte Carlo simulation (MCS). The MCS is very suitable to calculate the values of L_{A50} and L_{Aeq} , because it can be easily simulate the direct transmission of the multi-reflection waves. However, the MCS is based on geometrical acoustics, and is difficult to compute the diffracted transmission of multi-reflection waves. Therefore, when the space between bottom of the girder under elevated road and top of the noise barrier on plane road is small, the numerical errors of L_{A50} and L_{Aeq} computed using the MCS increase. Overcoming this difficulty, the BEM based on wave equations is applied to the calculation method of the road traffic noise.