

簡易計算機シミュレーションを用いた 高架道路裏面反射音の影響評価

今井章久 今泉信夫
(武蔵工業大学)

1 ま え が き

近年、道路交通網の整備に伴い、一般道路の立体交差あるいは高速自動車道路などが在来の一般道路の上に高架道路として建設されることが多い。この場合、新設される道路を走行する車の騒音とは別に、新設高架道路の床版裏面での反射による在来道路走行車の騒音の増加についても考慮する必要がある。

道路新設に対する騒音予測は、現存の数多くの道路における実測結果に基づいた予測式による方法¹⁾、模型実験による方法²⁾、計算機シミュレーションによる方法³⁾などがある。そして、予測式は複雑な道路構造には適用できない、模型実験は模型の製作に費用、時間がかかる、などの欠点があり、計算機シミュレーションにも騒音を波動として厳密に表現しようとすると長大な演算時間と記憶容量を必要とする欠点がある。しかし道路構造を単純化し、音波の波動性を無視し、音波を光のように扱う幾何音響学的手法によるなどすれば、小型のディスクトップコンピュータを利用することもできる。

ここでは小型ディスクトップコンピュータを使用して、高架道路床版裏面の反射の影響についてのシミュレーションを試み、その実用性と共にその影響についての検討を行った。

2 計算機シミュレーション

音の反射、回折、減衰、透過、吸収を含んだ音の伝搬に関する計算機シミュレーションは工場騒音予測、建設工事騒音予測においては既に実用されており^{4),5)}、また数多くの複雑な反射音の追跡を必要とするホール内の音場予測にも使用され始めている⁶⁾。ここで用いる手法は後者におけるものに近い。

(1) 音源のモデル化

実際の道路交通騒音の音源は不連続に通過する個々の車であり、ある一点での騒音は時刻 t [s] と共に変化するが、ここではそれらを平均化し、単位長さの強さが \bar{W} [W]、すなわち強さ \bar{W} [W/m] の連続した無限長線音源とみなす。長さ ℓ [m] の車線に音響出力 W_i [W] の車が n 台走行しているとすると

$$\bar{W} = \frac{1}{\ell} \sum_{i=1}^n W_i \quad [W/m] \quad (1)$$

であり、このような音源から r [m] 離れた点の音響エネルギー密度 E_x [J/m²] は

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{W} dx}{4\pi c (r^2 + x^2)} = \frac{\bar{W}}{4rc} \quad [J/m^2] \quad (2)$$

c : 空気中の音速 [m/s]

となる。

一方、これらの車の速度が v [m/s] であるとすると

$$\bar{W} = \frac{1}{vT} \sum_{i=1}^n W_i \quad [W/m] \quad (3)$$

$T = \ell/v$: n 台の車が通過するに要する時間 [s]

であり、図1のようにこのような交通流が無限に連続しているとすると、時間平均音響エネルギー密度 E_t [J/m²] は

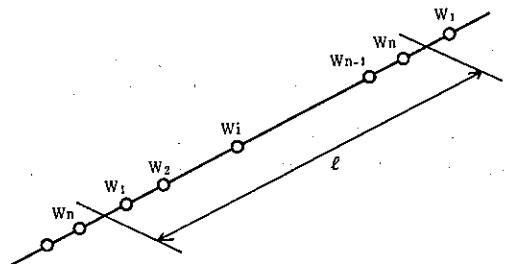


図1 音響出力が等しい線音源

$$Et = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{W_i dt}{4\pi c \{r^2 + (vt)^2\}}$$

$$= \frac{1}{vT} \sum_{i=1}^n W_i \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{4\pi c \{r^2 + x^2\}}$$

$$= Ex \quad [J/m^2] \quad (4)$$

となる。また、ある点の音圧 p [Pa] と音響エネルギー密度 E [J/m²] との間には、

$$p^2 = \rho c^2 E \quad [Pa^2] \quad (5)$$

ρ : 空気の密度

の関係があることから、音源をこのように仮定して、ある点の音響エネルギー密度を求めるということは、その点の等価騒音レベルを求めることと等しい。なおこの場合の線音源の強さ \bar{W} [W/m] は数多くの実測結果に基づく予測式¹⁾から(6)式によって求めることができる。

$$L\bar{W} = 10 \log_{10} (\bar{W} / W_0)$$

$$= 87 + 0.2V + 10 \log_{10} (a_1 + 10a_2) - 10 \log (d/d_0) \quad (6)$$

- V : 平均車速 [km/h]
- a₁ : 小型車混入率
- a₂ : 大型車混入率 (a₁ + a₂ = 1)
- d : 平均車頭間隔 [m]
- L \bar{w} : 音源の強さのレベル [dB]
- W₀ = 1 [pW/m]
- d₀ = 1 [m]

なお、時間率騒音レベルを求める場合には、当然のことながら、騒音の時間変動を表現しなければならず個々の車を点音源として、それらの間隔分布、音響出力分布を考慮するなどしなければならない。

(2) 高架道路床版による虚音源

実際の高架道路床版裏面には桁その他が存在するが、ここでは地表に平行な平面であるとし、更に音波はそこで鏡面反射するとすると、地面と床版との間の多重反射によって鉛直方向に無限個の虚線音源が生じる。図2のように高架道路の高さを h [m]、実線音源の高さを y_{s0} [m] とし、上方に生じる虚音源を順に 1, 2, 3……、下方に生じる虚音源を -1, -2, -3…… とし、実音源を 0 番目の虚音源とすると、 j 番目の虚音源の高さ y_{sj} [m] は

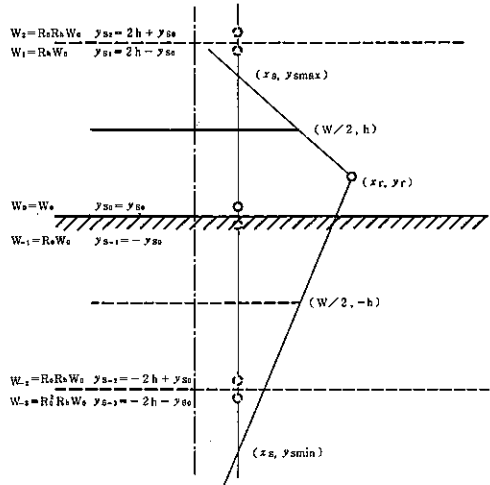


図2 受音点から見える虚音源

$$y_{sj} = jh + h/2 - (-1)^j (h/2 - y_{s0}) \quad (7)$$

として求められ、また地面及び床版裏面の音の強さの反射率を R_0, R_h とすると、 j 番目の音の強さ W_j [W/m] を

$$W_j = \bar{W} \sqrt{R_0 R_h}^j \frac{1}{(\sqrt{R_h/R_0})^2} \{1 - (-1)^j\} \quad j \geq 0 \text{ の時}$$

$$= \bar{W} \sqrt{R_0 R_h}^{-j} \frac{1}{(\sqrt{R_0/R_h})^2} \{1 - (-1)^j\} \quad j \leq 0 \text{ の時} \quad (8)$$

とみなすことができる。

(3) 受音点の音源エネルギー密度

ある受音点 (x_r, y_r) の音響エネルギー密度 E [J/m²] は、回折を無視すると、その点から見えるそれぞれの虚線音源による音響エネルギー密度 E_j [J/m²] の総和として求められる。

$$E = \sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} E_j = \sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} \frac{W_j}{4r_j c}$$

$$r_j = (x_r - x_s)^2 + (y_r - y_{sj})^2$$

: 虚線音源と受音点との距離 [m]

ここで、 j_{\min}, j_{\max} は受音点から見えることができる最小および最大の番目である。すなわち j_{\min} は

$$y_{sj} > y_{s\min} = (y_r + h) \frac{x_s - W/2}{x_r - W/2} - h \quad (10)$$

を満たす最小の j , 同様に j_{max} は

$$y_{sj} < y_{smax} = (y_r - h) \frac{x_s - W/2}{x_r - W/2} + h \quad (11)$$

を満たす最大の j である。ここで W は高架道路幅 [m] であり, その中心を $x = 0$ とする。

(4) 音響エネルギー密度の空間平均化

(1), (2), (3)の手法によって道路に垂直な面の音響エネルギー密度分布, すなわち等価騒音レベル分布を求めることができるが, 鏡面反射とし, 回折を全く無視しているために, 実音場には存在し得ない不連続や細かな変化が現われてしまう。これを防ぐために, ある点の音響エネルギー密度をその点に対して求められる値そのままとせず, その点の周辺に対しても求められるいくつかの値の平均値とする。例えば図3のような重みを掛けた平均値とする。この場合, 空間平均された音響エネルギー密度 E は次式によって表現される。

$$E(x, y) = \frac{1}{4} E(x, y) + \frac{1}{8} \{ E(x + \Delta x, y) + E(x - \Delta x, y) + E(x, y + \Delta y) + E(x, y - \Delta y) \} + \frac{1}{16} \{ E(x + \Delta x, y + \Delta y) + E(x - \Delta x, y + \Delta y) + E(x + \Delta x, y - \Delta y) + E(x - \Delta x, y - \Delta y) \} \quad (12)$$

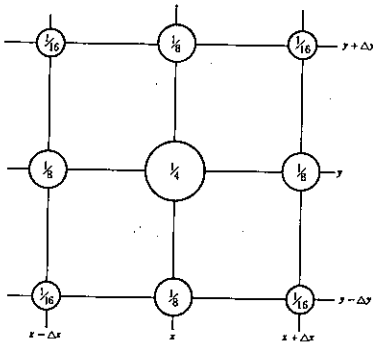


図3 空間平均化の重み

(5) 使用プログラム

ここでは, 道路に垂直な面上の道路中心から水平方向80m, 地上高60m内の騒音分布を示す等騒音レベル曲線及び一定の地上高での騒音レベルの距離減衰曲線を求めた。音源近傍, 更に床版裏面と地面の音響反射率が1の場合には高架下部分すべての騒音は無限大に

まで大きくなるので, 高架道路端から外側0.5mまでの範囲は除外した。等騒音レベル線は図4のように水平, 鉛直方向それぞれに2m間隔のおよそ1,000の受音点の騒音レベルを算出し, それぞれについて空間平均化を行い, 更にそれらの間を直線補間して描いた。

2m間隔の受音点の騒音レベルを順次求めることとしたが, この際に演算時間を短縮するために j 番目の虚音源の高さ y_{sj} とその見掛けの強さ W_j をあらかじめ求めておいた。この時, 求めておく j の範囲として, j の最小値 j_{min} は(10)式より, 道路に最も近く, 地上高が最も高い受音点における j_{min} であり,

$$j_{min} \approx \left(\frac{y_{rmax}}{h} + 1 \right) \frac{x_s - W/2}{x_{rmin} - W/2} - 1 \quad (13)$$

最大値 j_{max} は道路に最も近い地表面上の受音点の j_{max} であり,

$$j_{max} \approx (0 - 1) \frac{x_s - W/2}{x_{rmin} - W/2} + 1 \quad (14)$$

となる。ここで高架道路端から最も近い受音点までの距離; $x_{rmin} - W/2 = 0.5$ [m], 騒音レベル分布を求める高さの範囲; $y_{rmax} = 60$ [m] とし, 更に高架道路端から車線までの距離; $W/2 - x_s \leq 40$ [m], 高架高; $h \geq 5$ [m] とすれば,

$$j_{min} \geq -1041$$

$$j_{max} \leq 81$$

となる。

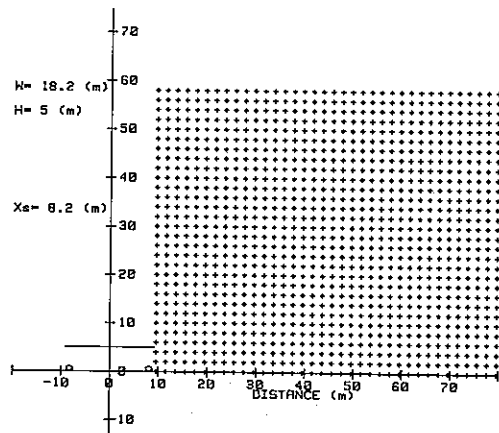


図4 騒音レベル算出点 (2m間隔)

(6) シミュレーション法の検討

高架道路幅18.2m, 高さ5m, 床版裏面の反射率は地表面と共に0.9, 車線が道路中央から8.2mの点にある場合を例に検討を行った。図8(a)が今回実用した方法によるものであるが, 図5は平均化を行わない場合, 図6は騒音レベル算出の間隔を4mとした場合である。

平均化を行わないと, 回折を無視したことによる受音点位置の僅かな違いによる騒音レベルの急激な変化更にそれが騒音レベル算出間隔より細かく存在することによる不自然な曲線が現れてしまっている。平均化を行うことによってこれらを隠すことができるが, 到来する反射音の数が少ない部分などでは, その有無の境界付近に騒音レベルの急激な変化が表れてしまっ

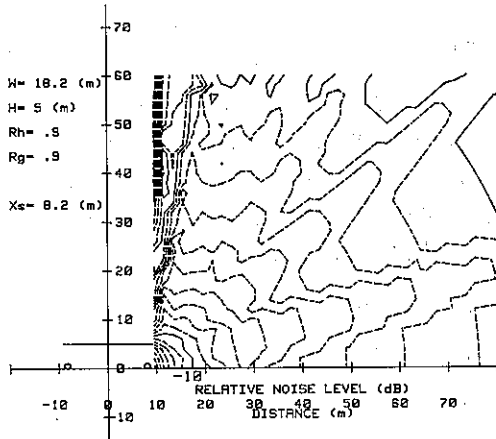


図5 平均化しない場合

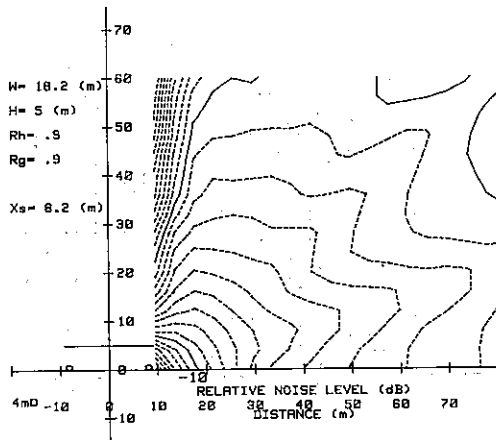


図6 騒音レベルを4m間隔で算出した場合

ている(図8(a))。

騒音レベル算出間隔を4mにすると演算時間はおよそ1/4に短縮され, また周囲8点を加えた平均化を用いると, 平均化範囲が広がるので, 騒音レベルの変化は滑らかになるが, 等騒音レベル曲線を直線で近似して描いたために不自然な形となってしまっている。

図7は受音点が地上高1.2mの場合と0mの場合の騒音レベルの距離減衰を比較したものであり, ここでは空間平均化は行っていない。地上高0mでは, ある反射音とその地面での反射音との到達範囲が同一であるために, 反射音の有無による騒音レベルの変化が集中して大きく表れるが, 地上高1.2mではそれらの到達範囲がずれるので階段的な変化の大きさは小さくなる。なお, このような変化は実音場では回折があるために存在しない。これは等騒音レベル曲線を描く時と同様に空間平均化することによって隠すことも可能である。

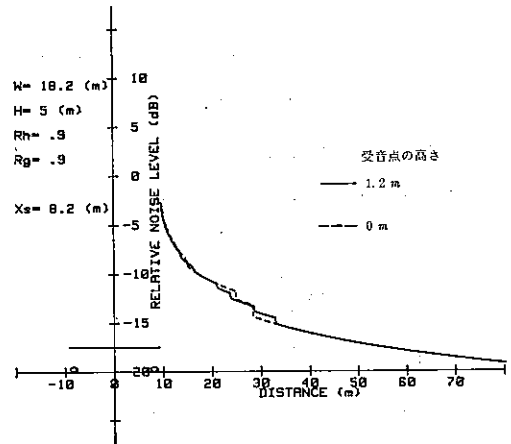


図7 受音高さによる騒音レベル距離減衰曲線の差

3 高架道路床版裏面の反射の影響

前述のプログラムを用い, 地表面の音の反射率を0.9, 音源の高さを0.5mとして計算機シミュレーションを行った。

高さ5m, 幅18.2m及び30.1mの高架道路の有無, そして高架道路床版裏面の吸音処理の有無に対する騒音の分布を図8及び図9に示した。床版裏面に完全な吸音処理がなされている場合には, 高架高より下の地表部分には高架の影響は全く現れず, それより上で高架道路によって音がさえぎられる部分では, 騒音レベ

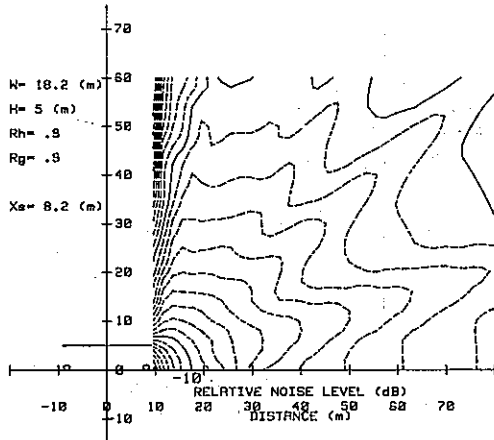


図8 (a)高架道路幅18.2m, 吸音処理なし

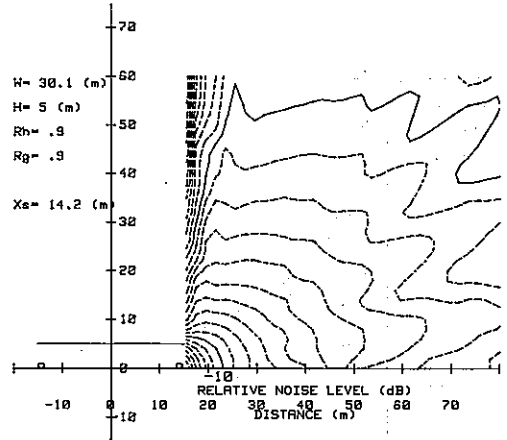


図9 (a)高架道路幅30.1m, 吸音処理なし

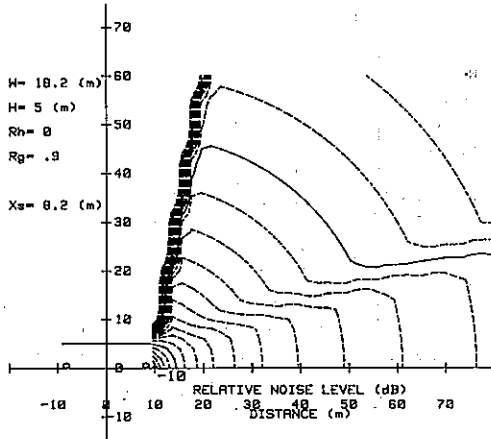


図8 (b)高架道路幅18.2m, 吸音処理

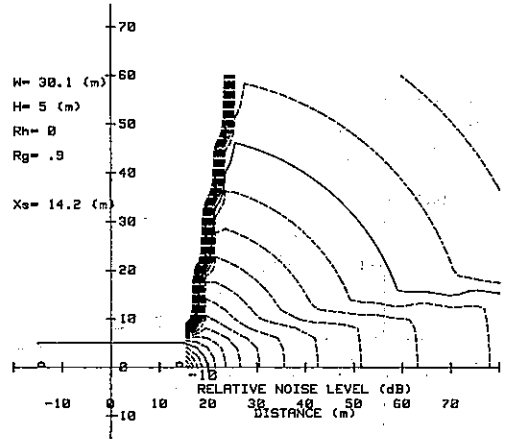


図9 (b)高架道路幅30.1m, 吸音処理

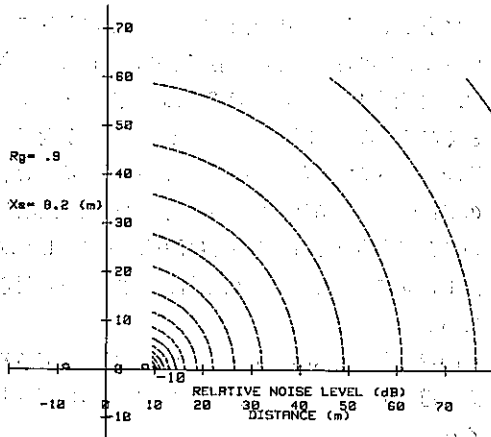


図8 (c)高架道路なし

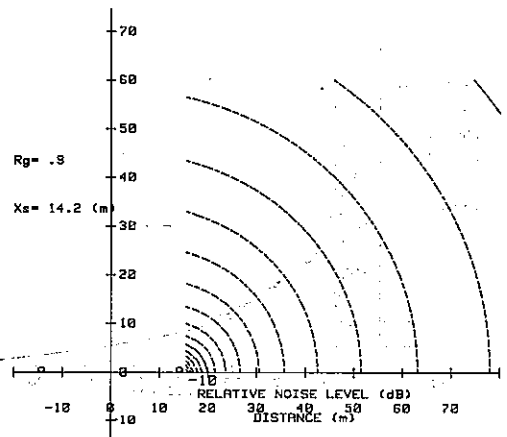


図9 (c)高架道路なし

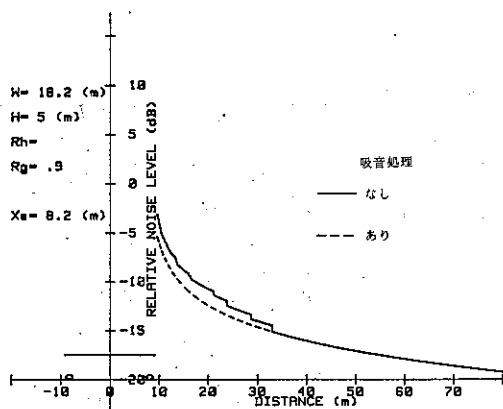


図10 騒音レベル距離減衰 (高架道路幅18.2m)

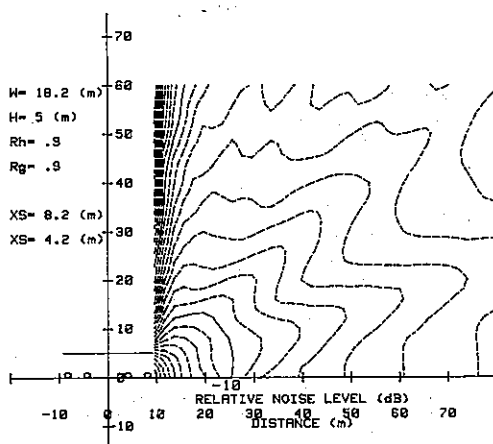


図13 (a)不等間隔4車線の場合(高架道路幅18.2m)

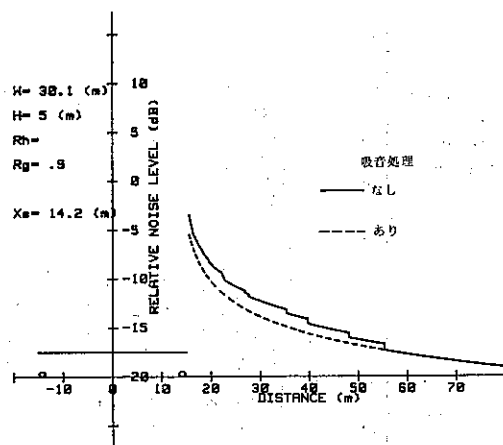


図11 騒音レベル距離減衰 (高架道路幅30.1m)

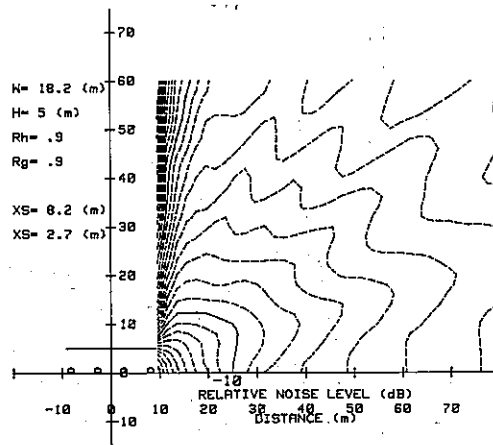


図13 (b)等間隔

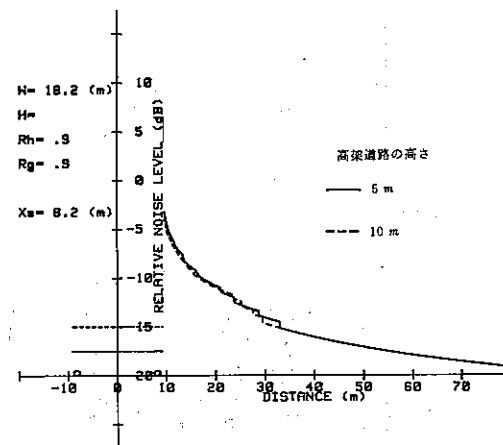


図12 高架道路高さによる騒音レベル距離減衰の差

は小さくなる。床版裏面に吸音処理がなされていない(ここでは音の強さの反射率を0.9とした)場合には、地表面付近では最大で2.5dB程度騒音レベルが大きくなる。この範囲は床版での1回反射音が到達する範囲において、およそ高架道路端に対する反対車線の対称点までであり、高架道路幅及び在来道路幅が広いほど広範囲となる。これらは図10, 11に示した地上高1.2mでの騒音レベルの距離減衰曲線からも明らかである。

図12は高架道路高を10mとした場合の比較である。高架道路が高くなると床版裏面での反射の影響は小さくなる。

図13は在来道路の車線数が多い場合であり、高架道

路高より高い部分では細かな部分で等騒音レベル曲線に差が見られるが、高架高より低い部分ではその差はほとんど無く、図8(a)に比べると、音源の増加(2倍)による騒音レベルの上昇(3dB)だけが見られる。

なお図8～13はすべて騒音レベルの相対値を示しているが、これらの数値に(6)式で得られる1車線についての音源の強さのレベルを加算することによって騒音レベルを得ることができる。

4 あとがき

道路交通騒音における高架道路床版裏面での反射の影響を検討するために、実音場に忠実であることよりは簡易であることに重点を置き、実音場に存在する回折すなわち音波の波動性を無視することによって、小型ディスタップコンピュータで実行可能なプログラムを用いた計算機シミュレーションを行った。

到来反射音の数の少ない受音点では、回折を無視したことによる不連続さが表れてしまうが、数の多い部分では、それらが互にランダムに存在するために大きくは表れない。これらの不自然さは空間に対して小部分ごとの平均化を行うことによって取り除くこともできる。

高架道路床版裏面を吸音処理すると高架道路での反射の影響は全く無くなるが、処理を行わない場合には

道路周辺で最大2.5dB程度騒音レベルが上昇し、その範囲は道路幅や高架道路幅が広いほど広がる。高架高が高いとその影響は小さくなる。

鏡面反射による最も簡単なモデルによって高架道路床版裏面での反射の影響を検討した。今後のモデルの実用化のためには、現実の高架道路床版裏面に存在する桁の影響、周辺建物の影響、時間率騒音レベルでの評価などについても更に検討の必要がある。

参 考 文 献

- 1) 石井聖光：道路交通騒音の予測計算方法に関する研究，日本音響学会誌，31，507，(1975)。
- 2) 山下充康：騒音予測のための模型実験技法の研究，小林理学研究所報告，19，No 1，(1979)。
- 3) 末岡伸一ほか：自動車交通騒音予測の検討，東京都公害研究所年報，217，(1982)。
- 4) 井川敬之助：各社のプラント騒音予測プログラムの比較，日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集，157，(1979)。
- 5) 伊東勝利：建設工事に伴う騒音と近隣問題，騒音制御，7，97，(1983)。
- 6) 小川有子，西隆司：CADによる室内音響設計，日本音響学会建築音響研究委員会資料AA 82-33，(1982)。