

郊外の直線道路区間における道路交通騒音の予測

(昭和53年10月31日 原稿受付)

開発土木工学教室 渡 辺 義 則
開発土木工学大学院 石 村 和 寿Prediction of Road Traffic Noise at a Straight Road
in the Suburbsby Yoshinori WATANABE
Kazuhisa ISHIMURA

The calculation model, where an infinite number of point sources equally spaced on a straight line move at constant speed, radiating the same acoustic power, is broadly used as a method of practical calculation of road traffic noise. But a significant difference is recognized between the value calculated with the model and the experimental value.

In this paper, the authors try to explain the cause for the significant difference by predicting road traffic noise absolutely. As a result it is clarified that grasping not only the fluctuation of acoustic power of noise sources but also the propagation characteristic from the noise source to the observing point is very important for accurate prediction. And on this investigation a new calculation model is proposed.

1. まえがき

道路交通騒音を予測計算する方法は、¹⁾²⁾ 数学的モデルによる予測、経験式による予測、電子計算機を用いた予測、スケールモデルによる予測など種々提案されている。そのなかで数学的モデルによる方法は、予測対象の現実の状況がモデルの仮定に適合していれば有用な手法でありとくに騒音評価量の距離減衰の傾向、あるいは交通量などとの関数関係を導き出すのには優れているので、様々な角度から研究されている。数学的モデルの中で、現在最もよく知られ、利用されているのが等間隔モデルであり、そこでは無限に長い一車線上を音響出力の等しい無指向性の点音源とみなせる車が等間隔等速度で走行しているという仮定のもとに解析が行われている。この等間隔モデルがよく利用されるのは、その他のモデルと比較して、モデルの骨組が単純明確である、予測の対象とする騒音評価量のほとんどが比較的簡単な関数で陽表示できるなどの特長を持つからであるが、しかし一方では、融通性に乏しい、現実の道路交通騒音に関する極め

て複雑な要因を過度に理想化しているなどの短所も持っている。そして要因の過度な理想化によって騒音評価量（この場合、騒音レベルの中央値）の予測計算値と実測値の間には有意な差が生じていて、現状では多数の実測結果から逆算した補正值を導入して、両者をできるだけ一致させるということが行われている。両者に有意な差を生じさせる原因の解明は、より合理的な予測計算をするためには不可欠であるが、容易ではないために、車輛の車頭間隔分布や音響出力の変動などの要因に研究者がそれぞれの判断で着目し、等間隔モデルより現実に近づけた仮定をした数学的モデルを数多く提案している。しかし現状ではこれらの数学的モデルも予測計算の強力な手段となっていない。

そこで本研究では、最初に道路交通騒音の予測計算値と実測値の間に有意な差を生じる原因について、本研究での実測結果ならびに既往の研究成果を利用して考察した。この時数学的モデルに各種の要因を導入すれば、それだけ解析が困難になり、必ずしも十分な検討ができない恐れがあるので、ここでは道路交通騒音と車輛の交通

特性を同時に測定して、その結果に基づいて観測点の騒音レベルを絶対的に予測し、それを実測値と比較するといった方法を用いた。なお計算は全て電子計算機を利用して行った。次にこの考察をもとにして、騒音レベルを絶対的に予測できるモデルを新たに示した。いかなる数学的モデルでも、現実の道路交通騒音に関する複雑な要因をかなり理想化せざるを得ないので、現実の状況がモデルの仮定に適合しない状況が生じる可能性が十分ある。しかし新たに示したモデルでは、実際の交通特性に関する情報が得られ、また車輛が定常走行すれば、原理的に幅広いケースに対処できる。ただし、このモデルでは騒音レベルの絶対値が算出されるので、必要に応じて適当な騒音評価量に換算されなければならない。

2. 騒音並びに交通特性の測定

測定は国道10号線朽網地区の直線道路区間(対向2車線)で行った。測定現場付近では道路に勾配はなく、また周辺が農地(青田)で構造物は殆んどない。このように道路、沿道要因が簡単な場所を選択したのは、種々の要因を考慮する必要がある場合の予測計算手法を取り扱う前に、理想に近い条件においては交通要因を適確に把握することによって精度よく騒音を予測可能であるのか、あるいはそれ以外の要因を追加して考えるべきなのか、またそれによって予測計算値は実測値にどの程度近づくのかということなどを定量的に検討する必要があると考えたからである。

騒音は図-1に示す箇所に精密騒音計を設置して測定し(地表面からの高さ1.5m)、その出力をデータレコーダに一旦収録した。後日レベルレコーダに動特性 fast で出力し、そのレベルを5.5秒間隔で約50回読み取って騒音レベルの累積度数分布曲線や時間変動を求めた。騒

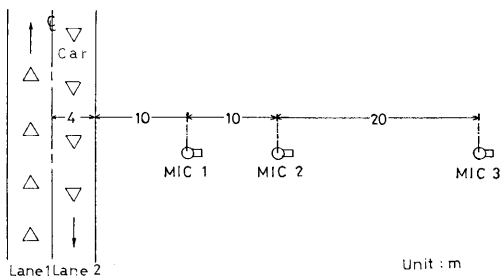


図-1 騒音測定位置

音レベルの累積度数分布曲線を図-2に示す。なお MIC 1, 2, 3の各ケースについて2~3回の測定を行ったが、同じケースについては曲線相互の相違は少なかった。一方各車輛の相対位置、走行速度などの交通特性はカメラ(8mm, シャッター間隔1コマ1.1秒)を用いて求めた。表-1に全ケースの測定結果をまとめて得た交通特性を示す。ここで車頭間隔は指数分布、速度は正規分布することが認められた。なお騒音レベルと車輛位置を対応させるために、騒音と交通特性は同時に測定した。

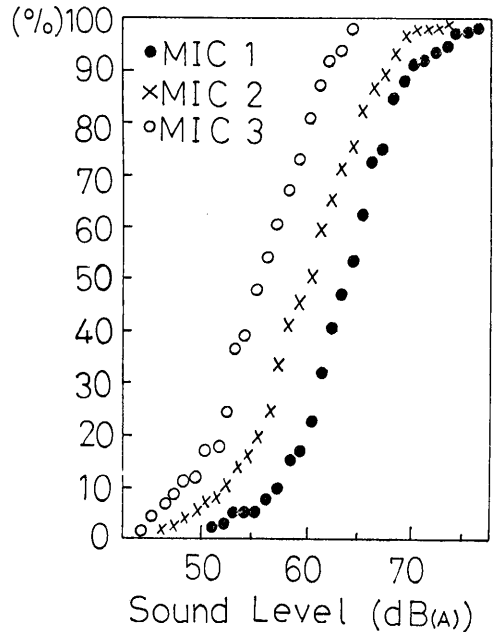


図-2 騒音レベルの累積度数分布曲線

表-1 交通特性

| 交通量 (V.P.H) | 速度(km/h) | | 平均 車頭 間隔(m) | 混入率 (%) | | |
|----------------|----------|----|-------------------|---------|----------|-----|
| | 平均値 | 分散 | | 大型車 | 小型 貨物 | 乗用車 |
| 1350 | 40 | 24 | 59 | 23 | 10 | 67 |

注) 全測定時間43分 全測定台数967台

3. 騒音予測計算値に影響を及ぼす要因の検討

本研究での測定結果並びに既往の研究成果に基づいて、各車輛(音源)と観測点の相対的な位置関係や、音源の音響出力を現実に近い形で表現し、また必要に応じて他の要因も導入していく。そしてこれから騒音レベルの時

間的な変動パターンはどの程度予測可能であるのか、更には騒音レベルの予測計算値と実測値の差はいかなる要因によって短縮可能であるかということ定量的に検討する。

3.1. モデルの概要

3.1.1. 基本式

車輛は点音源とし、各車線の中央線上に仮定する。したがって本研究の場合には図-1の Lane 1, 2 に音源の流れが存在する。図-3は車線 k の、ある時刻 t における車輛と観測点の相対的な位置関係を示している。この時、図中の i 番目の車輛から観測点に伝搬する騒音レベルは

$$SL_{i,t}(t) = PWL_i - 8 - 10 \log_{10}(\ell_k^2 + x_i^2) + DI(\theta_i) - C\sqrt{\ell_k^2 + x_i^2} \quad (1)$$

ただし PWL_i : i 番目の車輛の音響出力
 $DI(\theta_i)$: 同車輛の指向性指数
 C : 過減衰による定数

また車線 k の全車輛から観測点に伝搬する騒音レベルは

$$SLT_k(t) = 10 \log_{10}(\sum_i 10^{SL_{i,t}(t)/10}) \quad (2)$$

また全車線の全車輛から観測点に伝搬する騒音レベルは

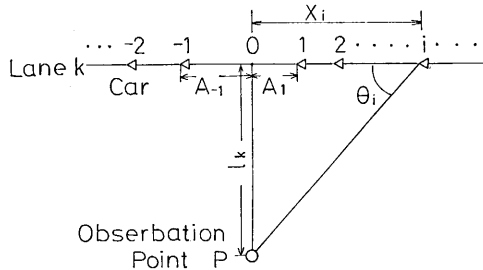
$$L(t) = 10 \log_{10}(\sum_k 10^{SLT_k(t)/10}) \quad (3)$$


図-3 車輛と観測点の位置関係

3.1.2. 車輛と観測点の相対的な位置関係

騒音レベルは5.5秒間隔で観測しているの、それに対応する騒音レベルを予測計算するためには、5.5秒毎に各車輛と観測点の相対的な位置関係を決定する必要がある。これは観測点に最も近い車の位置(図-3では A_{-1} , A_1)を5.5秒毎にフィルムから読み取り、それをあらかじめ電子計算機にデータとして入力しておいて、それに各車輛の車頭間隔を次々に加算するという方法で行った。

3.1.3. 音源の音響出力

音源の音響出力(PWL)は全ての車輛について1つ1つ算定する。つまり音響出力は実測から得られた各車輛の速度 V km/h と車種によって、式(4)から決定する!

$$PWL = 0.2V + K \quad (\text{dB(A)}) \quad (4)$$

ただし 大型車類 $K = 97$
 小型貨物車類 $K = 90$
 乗用車類 $K = 85$

音響出力と速度の関係は予測計算上重要であるので、2章で行った測定とは別に路肩から4.5m離れた位置で騒音レベルと速度の測定を行い、両者の直線回帰式を求めた。その結果を式(5)に示す。

$$\left. \begin{aligned} \text{大型車類} & \quad PWL = 0.12V + 101 \\ \text{小型貨物車類} & \quad PWL = 0.12V + 94 \\ \text{乗用車類} & \quad PWL = 0.11V + 91 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

しかし、本研究のように速度が殆んど30~50 km/hの範囲にある場合には、式(4)と式(5)から算出した音響出力の間には大差がなく(大型車類、小型貨物車類で最大1dB、乗用車類で最大2.5dBの差)、式(4)の汎用性が認められる。それゆえここでは従来からよく用いられる式(4)から音響出力を算出する。

3.1.4. 水平断面指向特性

各車種について水平断面指向特性を定量的に求めた実験は少く、その値についての統一された見解は見当たらない。したがって本研究では従来の実験結果を参考にして大型車類、小型貨物車類についての指向性指数 $DI(\theta)$ は図-4に示すように、また乗用車類については $DI(\theta) = 0$ (無指向性)を仮定した。なお θ は観測点から車輛を見通す線と各車線の中心線とはさむ角度である。

図-4は次のようにして求めた。車輛が定常走行する時の水平断面指向特性(地表面から1.2mの高さ、車輛から12m離れた場合)については金安らが実測した結果

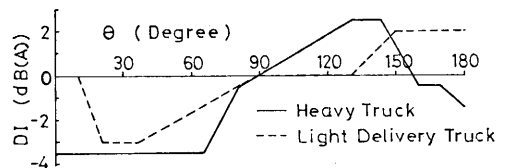


図-4 指向性指数

がある³⁾。この結果から車種別に指向性指数を算出した⁴⁾

$$DI(\theta) = SPL(\theta) - \overline{SPL} \quad (\text{dB(A)}) \quad (6)$$

ただし $SPL(\theta)$: θ 方向の騒音レベル

\overline{SPL} : $\theta = 0 \sim 180^\circ$ の各方向の騒音レベルの平均値

この実験結果で

$$SPL(\theta) = \overline{SPL}$$

が成立するのは、大型車類、小型貨物車類ともに $\theta \approx 80^\circ$ である。逆にいえばこの方向の $SPL(\theta)$ を測定すればその値が \overline{SPL} であり、これからその車種の平均的な音響出力 PWL' が算出される。

$$PWL' = \overline{SPL} + 20 \log_{10} r_0 + 8 \quad (\text{dB(A)}) \quad (7)$$

ただし r_0 : 音源から観測点までの直線距離

ここで問題となるのは、 PWL' と式(4)から算出される PWL の関係である。式(4)の PWL は金安の実験とは全く

別の実験から得られたものであり、両者を整合させるには論理的に無理が生じる。しかし実用上は次のように近似できると考えられる。式(4)の PWL は、1つ1つの車輛を無指向性の音源と仮定すれば、実測した騒音レベルの最大値は、車輛と観測点間の距離が最短になった時に生じると考えて算出したものである⁵⁾。ところでいま車輛を指向性のある音源と仮定すれば、騒音レベルの最大値が生じる位置は、車輛と観測点間の距離だけではなく指向特性にも関係する。そこで図-4のような指向特性を仮定して計算すると(車輛と観測点間の最短距離7m)、式(4)の PWL は $\theta \approx 80^\circ \sim 130^\circ$ の方向から伝搬してきた音から算出していることが推定できる。以上のことを考慮すれば、水平断面指向特性を次のように近似しても事実と大きく異なることはないものと考えられる。

- ① 指向性指数 $DI(\theta)$ は $\theta = 90^\circ$ のときを0として、図-4のように仮定する。
- ② 音源の平均パワーレベルは式(4)から算出した値を用いる。

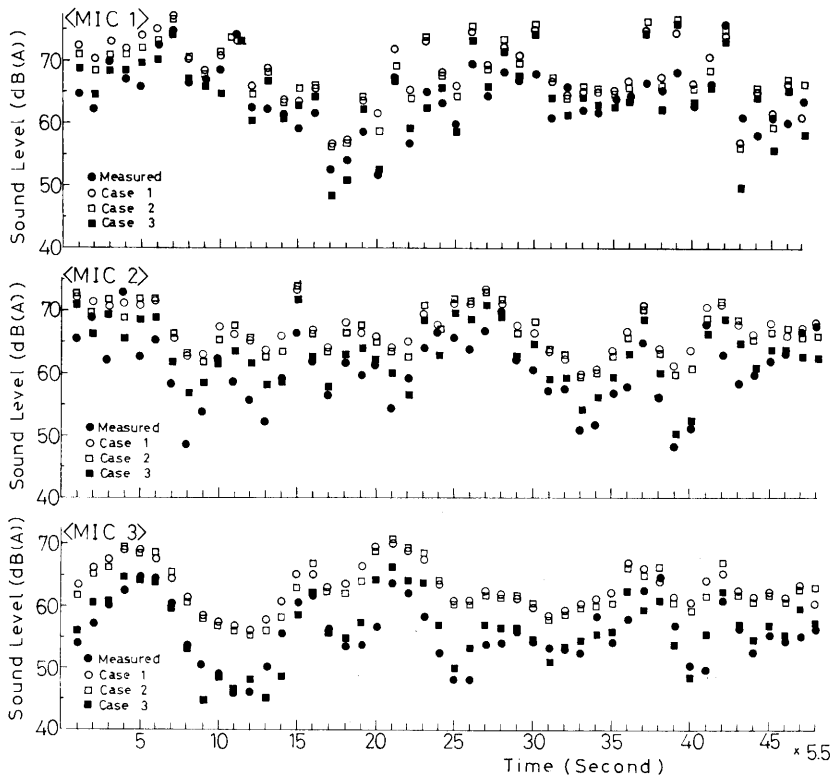


図-5 騒音レベルの時間変動

3.1.5. 地表面性状による減衰

地表面が草で覆れている場合には、地表面付近の観測点では音が幾何学的に減衰するだけでなく、他の原因によってもかなり大きく減衰（過減衰）することが従来の実測で確認されている。たとえば英国の B.R.S. では伝搬経路の平均高さ 1.5 m で 4 dB/100 m⁶⁾、他の例では 8 dB(A)/100 m⁷⁾、15 dB(A)/100 m⁸⁾などの数値が報告されている。しかしその数値については統一された見解がまだない。したがって本研究では、その数値を前述の範囲で仮定して計算する。

3.2. 結果並びに考察

図-5に騒音レベルの時間変動を実測した結果と、前述の各種要因を順次導入して変動を予測計算した結果を比較して示す。図中の Case 1 では車輻と観測点の相対的な位置関係と音響出力、Case 2 では更に水平断面指向特性、Case 3 では更に地表面性状による減衰などの諸要因を順次追加した。なお地表面性状による減衰は 8 dB(A)/100 m と仮定して計算した結果を示している。これらの結果から、音響出力の大きさに従って車輻を分類するとともに、車輻（音源）と観測点の相対的な位置関係をモデルに反映させれば、騒音レベルの時間的な変動パターンをかなり適確に表現できることがわかる。また Case 1 と実測値の差は、騒音レベルの値の大きいものより小さいもののほうが著しい傾向が認められる。図-6は予測計算値と実測値の差を、各ケース毎に全観測点についてまとめて、両者の間に有意な差を生じる原因について定量

的に示したものである。これから車種、速度によって1台1台の車輻の音響出力を求め、かつ車輻と観測点の相対的な位置関係を適確に表現しても、予測計算値と実測値の間には有意な差が生じること、水平断面指向特性を考慮しても予測精度の向上は小さいこと、地表面性状などに起因する過減衰を従来示されている範囲の値で導入すれば、予測精度は著しく向上することがわかる。前述の諸要因が予測精度に与える影響は、音源の流れからの離れ、つまり観測点によっても異なるので、図-7に各観測点別に予測計算値と実測値の差のヒストグラムを示した。これから Case 1, 2 ともに音源に近い観測点 (MIC 1) では、かなり予測計算値と実測値の間の差は小さいが、観測点が音源の流れから離れるに従ってその差は拡がること、地表面性状による減衰という要因を考慮した Case 3 では、観測点と音源の流れの遠近にかかわらず予測精度は著しく向上することがわかる。

本章で得られた結果をまとめると、

- ① 音響出力の大きさに従って車輻を分類するとともに、車輻と観測点の相対的な位置関係をモデルに反映させれば、騒音レベルの時間的な変動パターンをかなり適確に表現できる。
- ② 単一の車輻が走行した時の音源と観測点間の音の伝搬特性を適確に表現できれば、騒音レベルの絶対値をかなりの精度で予測できる。
- ③ 音の伝搬特性には幾何学的な減衰だけでなく、地表面性状などによる減衰を考慮する必要がある。

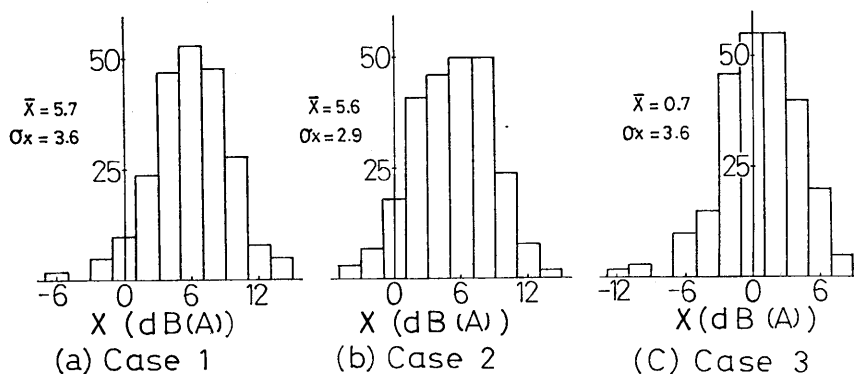


図-6 予測計算値と実測値の差のヒストグラム（ケース別）

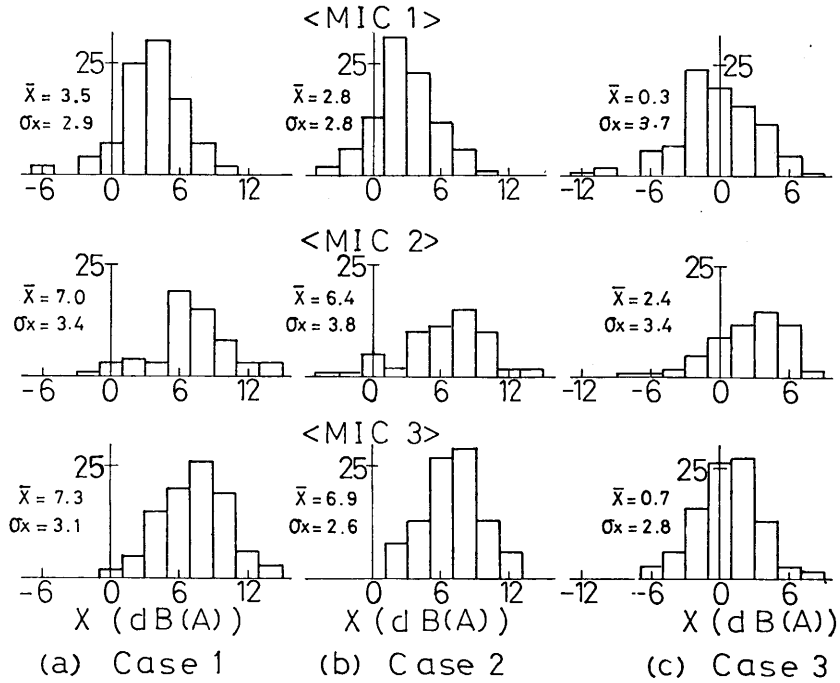


図-7 予測計算値と実測値の差のヒストグラム (観測点別)

4. 騒音レベルを絶対的に予測するモデルの提案

道路交通騒音の予測計算を、音源の音響出力の時間的な変動パターンをモデルに反映する方法と、単一の車輛が走行した時の音源と観測点間の音の伝搬特性の把握という2つの問題に別けて考えられれば、その取扱いが多少なりとも簡単になる。本研究ではこのような観点から線形系の応答に関する諸性質を利用した騒音予測計算モデルを提案して、その適合性を検討してみた。

4.1. モデルの概要

4.1.1. 基本的な考え方

車輛は点音源とし、各車線の中央線上に仮定する。このとき現実には多数の音源が各車線の中央線上を時々刻々と移動し、それに伴って観測点の騒音レベルも時間的に変動する。そしてこのことは3章のモデルでも、従来提案されたモデルにおいても解析計算上の1つの立脚点である。しかし、本章のモデルではこの過程を線形系の応答計算に類似させて、次のように考えた。

- ① 音源は車線の中央線上を移動するのではなく、車線の中央線と観測点からそれに下した垂線との交点に、瞬間的に現われては消えていく。
- ② この音源の出現に対応して観測点に適当な履歴曲線を仮定する。この曲線は単位の音響出力を持つ音源が、1つだけ車線の中央線上を移動したときに、観測点に生じる音の強さが時間的に変化するのと同じ形をもつ。
- ③ 出現する音源の音響出力は、車種や交通量などの要因によって時間的に連続に変動する。

4.1.2. 基本式

図-8に示すような多入力線形系においては次式が成立する⁹⁾¹⁰⁾

$$\left. \begin{aligned} z(t) &= \sum_{k=1}^n z_k(t) \\ z_k(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} g_k(\lambda) y_k(t-\lambda) d\lambda \quad k=1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} (8)$$

ただし $y_k(t)$: 入力

$z_k(t)$: $y_k(t)$ のみによって生成された出力

$g_k(t)$: $y_k(t)$ に対する荷重関数

$z(t)$: n 個の線形系の出力の和

t : 時間

いま式(8)において n を道路の全車線数, $z_k(t)$ を k 車線の中央線上を移動する多数の音源によって時間 t に観測点に生じる音の強さに対応させる。また入力 $y_k(t)$ としては音源の音響出力の時間変化率を考える。つまり

$$y_k(t) = W_k x_k(t) \quad (\text{W/sec}) \quad (9)$$

$$W_k = 10^{-12} \times 10^{(0.2V_k + 85)/10} \quad (\text{W/Vehicle})$$

ただし W_k : k 車線における乗用車1台当りの音響出力

V_k : k 車線の平均速度 (km/h)

$x_k(t)$: 単位時間当りに k 車線を通過する換算車輛台数 (Vehicle/sec)

ここで W_k の算出には式(4)を利用した。また $x_k(t)$ はある時間 t の交通量に相当するものであるが、このとき大型車種の1台は16台, 小型貨物車種の1台は3台の乗用車に換算して車輛台数を算出する。この換算当量は音源の音響出力の大きさという観点から, 大型車種並びに小型貨物車種と乗用車種のパワーレベルの差はそれぞれ 12 dB (A), 5 dB (A) であるという経験的事実に基づいて算出した。

荷重関数 $g_k(t)$ は 4.1.1. の②の要領で決定する。 $g_k(t)$ は音源と観測点間の音の伝搬特性を表わす関数である。ただし現時点においては特殊な場合を除いてこの関数は求められていない。たとえば音源から発生した音は幾何学的な減衰だけをして, 観測点に伝搬する場合には

$$g_k(t) = \frac{1}{2\pi\{\ell_k^2 + (\bar{v}_k t)^2\}} \\ = h_k(t)/2\pi \quad -\infty < t < \infty \quad (10)$$

ただし \bar{v}_k : k 車線の平均速度 (m/sec)

次に $z(t)$, $z_k(t)$, $h_k(t)$, $x_k(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $Z(f)$, $Z_k(f)$, $H_k(f)$, $X_k(f)$ とすると, 式(8)は

$$Z_k(f) = W_k \cdot X_k(f) \cdot H_k(f)/2\pi \quad (11)$$

ただし f : 周波数 (c/sec)

したがって全車線について合計したものは

$$Z(f) = \sum_{k=1}^n Z_k(f) \quad (12)$$

最後に $Z(f)$ を逆フーリエ変換すれば, 全車線上の全音源によって観測点に生じる音の強さの時間変動 $z(t)$ が算出できる。

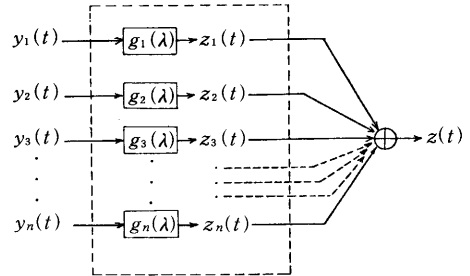


図-8 多入力線形系

4.2. 計算例並びに考察

荷重関数 $g_k(t)$ が式(10)のように得られている場合について, 4.1. の手順に従って計算モデルの適合性を検討してみた。ただしこのような場合についての実測結果は得られていないので, 比較の対象として3章の Case 1 の計算結果を用いた。本節のモデルは3章の Case 1 のモデルに比べて, 次のような近似を行っている。

① 車輛のパワーレベルを算出する時各車線の平均速度を用いているので, パワーレベルに差が生じる要因は車種だけとなり, 同一車線の同一車種はパワーレベルが全て等しいことになる。

② 式(8)のたたみ込み積分は $y_k(t)$ (つまり $x_k(t)$) が連続関数の場合に成立する。しかし実際には $x_k(t)$ は, ある時間間隔に車輛が図-3の0点を通過する時の台数を数えて算出されるので, あまりその時間間隔が長くなると, 前述のように仮定した荷重関数を用いるのは適当でなくなる。

4.1. の手順に従って観測点の音の強さを表わすと

$$z(t) = \sum_{k=1}^n z_k(t) = \sum_{k=1}^n \frac{W_k}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x_k(t-\lambda)}{\ell_k^2 + (\bar{v}_k \lambda)^2} d\lambda \quad (13)$$

この式をフーリエ変換すると

$$Z(f) = \sum_{k=1}^n Z_k(f) \\ = \sum_{k=1}^n \frac{W_k X_k(f)}{2\bar{v}_k \ell_k} \exp\left(-\frac{2\pi \ell_k |f|}{\bar{v}_k}\right) \quad (14)$$

ここで W_k , \bar{v}_k , ℓ_k は車線 k に対応して決定される定数であり, また $X_k(f)$ は $x_k(t)$ を電子計算機で高速フーリエ変換して求めた。なお $x_k(t)$ を算出する時の時間間隔は 2.75 秒とした。最後に $Z(f)$ を逆フーリエ変換して音の強さの時間変動を求め, それを騒音レベルに換算した

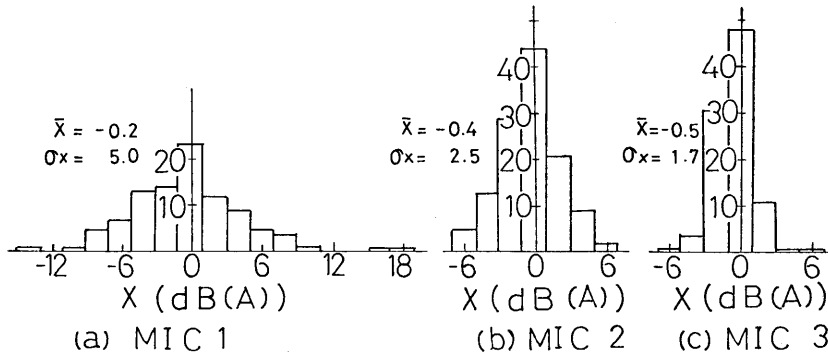


図-9 Case 1 の計算結果との差のヒストグラム

ものと3章の Case 1 の結果との差をヒストグラムにして図-9に示す。これから両者の差は MIC 1, 2, 3 とともに小さく、本章で提案したモデルでもかなり適確に騒音レベルを予測できることが認められる。ここで音源の流れに近い観測点ほど差の分散が大きくなっているのは、本節の②で指摘したように荷重関数の設定方法と $x_n(t)$ の時間間隔の相対的な関係に起因するものと考えられる。

本章で得られた結果をまとめると次のようになる。道路交通騒音の予測計算は音源の音響出力の時間変化率を入力として、単一の車輛が走行したときの音源と観測点間の伝搬特性を荷重関数とすれば、線形系の応答に関する諸性質を利用したモデルを考えることができる。そしてこのモデルは荷重関数が適確に把握できれば、かなりの精度で騒音レベルを予測できるものと思われる。

5. まとめ

本研究では従来からよく用いられる仮定に従って道路交通騒音を予測計算した値と実測値の間に有意な差を生じる原因について考察し、その結果に基づいて新しい予測計算方法を示した。この方法に従えば道路交通騒音を音源の時間変動の把握と単一の車輛が走行した時の音源と観測点間の伝搬特性（本研究では荷重関数に相当）の決定という2つの問題に分離して取扱うことができ、問題をより簡単にすることができる。とくに荷重関数を決定する問題は道路交通騒音を精度よく予測計算するためには重要であるが、まだ特殊な条件における荷重関数しか得られていない。今後、現場実験あるいは理論によって荷重関数を推定する方法を開発すれば、道路・沿道要因などの条件が複雑な場合にもこのモデルを適用できると

考えられる。また本研究では、他研究者の報告に基づいて過減衰が全て地表面性状に起因するとして問題を扱っているが、厳密に言えば音源と観測点間の距離に比例して減衰する性質をもつ過減衰を考えればかなり予測精度があがるということであり、その過減衰に地表面性状がどの程度寄与しているのかということを明確にするためには、今後詳細な検討が必要である。

終りに、本研究に対して御援助、御助言を賜った本学開発土木工学教室の佐々木昭士助教授、大学院生北崎孝洋氏に心からの謝意を表します。

参考文献

- 1) 石井聖光：道路交通騒音予測計算方法に関する研究，日本音響学会誌 31 巻 8 号，pp. 507～517，1975.
- 2) 池谷和夫：数学的モデルと評価量について，日本音響学会誌 31 巻 9 号，pp. 559～565，1975.
- 3) 金安公造・金泉昭：交通公害，技術書院，1976.
- 4) 中野有朋：騒音源のパワーレベルと使用上の注意点，日本音響学会誌 31 巻 4 号，pp. 278～282，1975.
- 5) 渡辺好章他：自動車走行時における騒音のパワーレベル，日本音響学会誌 32 巻 3 号，pp. 156～160，1976.
- 6) 田村幸久：高速道路の騒音，土木学会誌 59 巻 10 号，pp. 45～58，1974.
- 7) A. Alexandre et al.: Road Traffic Noise, Applied Science Publishers LTD, 1975.
- 8) 野中宏：沿道の地表面性状と道路騒音の距離減衰，土木技術資料 17-2，p. 86～92，1975.
- 9) 吉村功・石井泰・大岡崇：測定値の統計的処理，電気学会，1971.
- 10) J.S. Bendat・A.G. Piersol: Random Data: Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons, Inc., 1971.
- 11) 渡辺義則・石村和寿・北崎孝洋：道路交通騒音予測計算方法に関する考察，昭和 51 年度研究発表会論文集土木学会西部支部，pp. 277～278，1977.