

建設省土木研究所 正員 ○ 足立 義雄
石田 喬
総合技術コンサルタント 正員 三宅 龍雄

まえがき

わが国では、道路交通騒音の評価量としてJIS Z 8731「騒音レベルの測定方法」に規定されている騒音レベルの中央値 L_{50} を用いており、公害対策基本法や騒音規制法に基づく騒音の基準値もこれによって定まっている。 L_{50} は測定、算出が容易であり、これまでに道路交通騒音の L_{50} 予測計算手法は日本音響学会などにより整備されている。建設省所管事業についても事業実施前の環境影響評価や環境管理においては、 L_{50} にもとづいて行っている。

一方、騒音レベルの評価法には等価騒音レベル(Leg)で表わす方法もあり、諸外国の多くはこの Leg を騒音レベルの評価として用いている。わが国ではこれについてまだ調査研究の段階にあるが、 L_{50} と Leg の両者を含めるように現在JIS規格の改訂が進められている。JISの改訂に関連して、行政関係での基準値等を Leg で表現することの是非についてはいくつかの問題があり、議論を要する面が多い。しかし、今後の道路環境影響評価や環境管理が多様性をもって行われるには、 Leg についてその基礎的特性を検討しておくことも重要であると考えられる。本報告は道路交通騒音を対象として、それを実測し、その調査結果を分析することにより、 Leg の測定、予測に関する基礎的特性をまとめたものである。

1. 騒音データの処理方法と精度

1.1 測定分析の概要

分析の対象は、周囲に建物などの障害物のない直線平坦道路区間で測定された道路交通騒音データである。沿道周辺は草地及び裸地であり、車道端から5～80m、高さ1.2～12mの10数点で測定されている。また、騒音レベルの分析は基本的には0.1秒間隔のサンプルを500秒間連続してとり、 L_5 、 L_{50} 、 L_{95} 、 Leg を求めた。 Leg は次式によって求めている。

$$Leg = 10 \log_{10} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \quad (1)$$

ここに、 N ：サンプル数、 L_i ： i 番目のサンプルの騒音レベル

1.2 サンプル間隔と精度

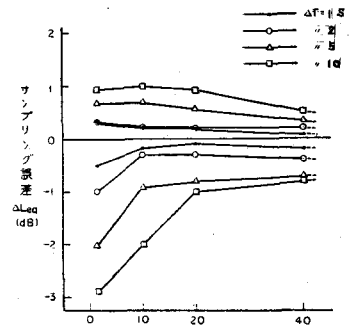
測定時間500秒間の道路交通騒音の Leg を騒音レベルのサンプリングによって求める場合について、サンプリング間隔 ΔT と精度との関係を測定位置、交通条件を含めて検討した。

サンプリング間隔0.5～10秒で求められる Leg 値について、 $\Delta T = 0.1$ 秒で求められる Leg を基準値とし、これに対する誤差 ΔLeg の平均値及び標準偏差を表一に示す。サンプリング間隔を大きくすると、誤差の分散が大きくなり、さらに誤差の平均値は負側に大きくなっている。道路端から受音点までの水平距離 ΔL とサンプリング間隔別の ΔLeg の90%レンジを図一に、また平均車頭間隔 ΔL と ΔLeg の関係をサンプリング間隔別に図二に示す。 ΔL が大きいほど ΔLeg のばらつきが大きく、誤差の平均値が負側に偏っている。

一般に、受音点が道路端近くにある場合や交通量が非常に少ない場合には、騒音レベルの分布が正の歪をもつようになり、サンプリング処理を行うと高レベル側の測定度数が不安定になる。したがって、騒音レベル分布の

表一 サンプル間隔と Leg の誤差

サンプリング間隔 ΔT	0.5	1	2	5	10
ΔLeg の平均値	-0.003	0.003	-0.040	-0.105	-0.221
ΔLeg の標準偏差	0.109	0.172	0.272	0.574	0.859



図一 距離、サンプリング間隔と ΔLeg の90%レンジ

高レベル値の頻度に左右される Leg 値は、分布が正側に大きく歪んでくるほど誤差が生じやすくなる。また、変動騒音について、あるサンプリング方法によって得られる音の強さの平均値を $\bar{I}_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{si}$ とし、これに対応する Leg 値を Leg_s とすると、サンプリング判定による Leg_s の平均値 (期待値) は

$$\begin{aligned} E[Leg_s] &= \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n Leg_s = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n 10 \log_{10} \bar{I}_s / I_0 \\ &= 10 \log_{10} (\bar{I}_1 \cdot \bar{I}_2 \cdots \bar{I}_n)^{1/n} / I_0 \\ &= 10 \log_{10} (\prod_{i=1}^n \bar{I}_i)^{1/n} / I_0 \end{aligned}$$

Leg の真値は

$$Leg^* = 10 \log_{10} \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \bar{I}_i} / I_0$$

(I_0 : 音の強さの基準値)

となり、 $E[Leg_s]$ は $\bar{I}_s$ の相乗平均で与えられ、 Leg^* は $\bar{I}_s$ の相加平均で与えられるので、 $E[Leg_s] \leq Leg^*$ となる。したがって、サンプリング誤差 ΔLeg は負側に偏ることになる。

1.3 サンプリング時間長と Leg 判定値

道路端の1時間連続測定データを用いて種々のサンプリング時間長による Leg の変動と Leg 1時間値との対応を検討した。図-3は $T=3,000$ 秒、 $\Delta T=0.1$ 秒で算出される Leg を基準としたときのサンプリング時間長による誤差 ΔLeg の分布の中央値と90%レンジ値を表わしている。サンプリング間隔が5秒以内の場合、 $T=500$ 秒のときの Leg 誤差はおおむね3 dB(A) 以内となっている。

2. Lx と Leg の関係

2.1 道路交通騒音の Lx と Leg の関係

等間隔モデルや指数分布モデルの理論式によれば、 Leg と Lx のレベル差は、発音点からみた交通量の相対的な密度を表わす指標といえる変数 d/l によって影響を受ける。道路端における Lx 、 Leg と平均車頭間隔(d)の関係を図-4に示す。 $L50$ と Leg を比較すると、路端付近では $d=15.5$ m (時間交通量約2,000台) の時4 dB(A)、 $d=270$ m (時間交通量210台) の時には11 dB(A) 以上も Leg が大きい。

道路交通騒音の Leg 、 $L5$ 、 $L50$ 、 $L95$ について ($Lx-Leg$) と d/l の関係を図-8に示す。($L5-Leg$) は $\log d/l$ にほぼ比例して減少しているが、($L50-Leg$) と ($L95-Leg$) は $\log d/l$ と指数的な関係がみられる。

2.2 理論モデルにおける Lx と Leg の関係

道路交通騒音を予測する場合、自動車交通流とその放射音の伝播特性をモデル化し、騒音レベルの確率変量 (平均値、時間率レベル Lx 等) が解析される。交通流モデルの代表例に車頭間隔が一定値 d であるとした等間隔モデルがあり、パワーレベル(PWL)の等しい車が一車線上を走行するときの Lx と Leg の間に式が成立する。

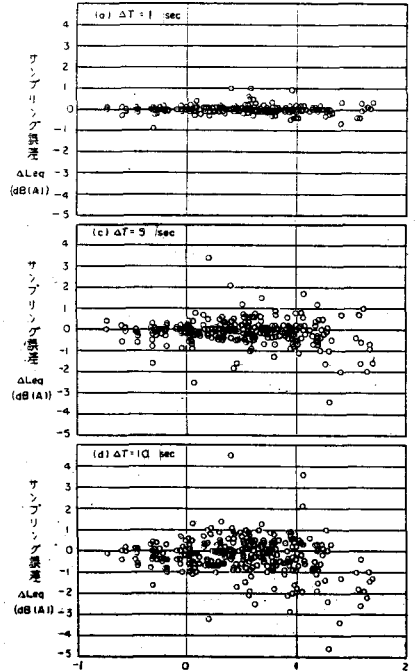


図-2 $\log_{10} (d/l)$ と ΔLeg

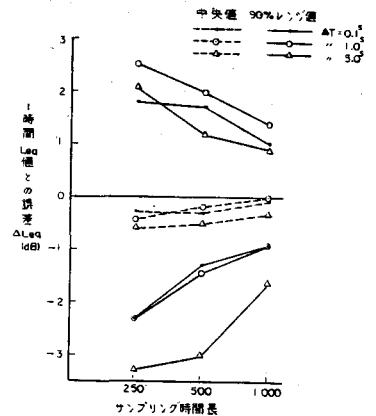


図-3 サンプリング時間長と ΔLeg の中央値、90%レンジ値

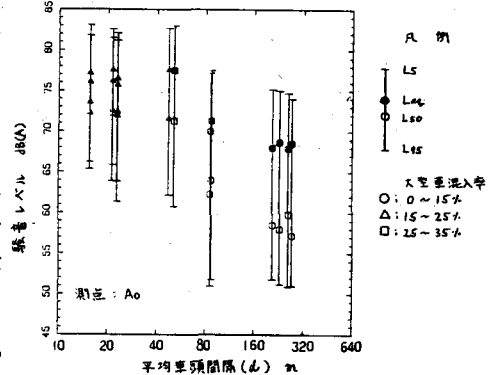


図-4 Lx 、 Leg の関係

$$L_x = L_{eq} + 10 \log_{10} \{ \sinh(2\pi l/d) / [\cosh(2\pi l/d) - \cos(x\pi/100)] \} \quad (3)$$

さらに現実に近い交通流モデルとして指数分布モデルがあり、このモデルにおける L_x と L_{eq} の間には(3)式のような簡単な関係式が導かれていないが、 L_x の近似計算法はいくつか発表されている。ここでは、独立な確立変数の和の分布関数は各々の分布関数の合成積で計算できることを利用して、音圧レベルの数値計算を行い、($L_x - L_{eq}$)の交通条件に応じた変動特性を実測値との適合性を含めて調べてみた。

一車線上を走行する車の車頭間隔が平均 d の指数分布に従う場合、長さ T の区間に n 台の車が存在する確率は平均 $\lambda = T/d$ のポアソン分布 $P_\lambda(n) = \lambda^n \cdot e^{-\lambda} / n!$ となるので、区間 T から生じる音圧レベルの分布関数 $F_\lambda(x)$ は次式で与えられる(図-5参照)

$$F_\lambda(x) = \sum_{n=0}^{\infty} P_\lambda(n) \cdot G^{(n)}(x) \quad (4)$$

ここで $G^{(n)}(x)$ は区間 T 内の n 台の車による音圧レベルの分布関数であり、 $PWL = 0 \text{ dB}$ とすると、 $n=1$ の場合には次のようになる。

$$G^{(1)}(x) = 1 - \sqrt{10^{-x/10} / 2\pi} \cdot l^2 / (T/2) \quad (5)$$

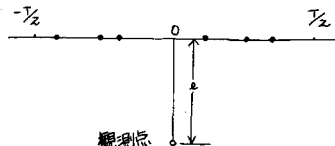


図-5 指数分布モデルの模式図

$$\text{ただし、} -10 \log_{10} 2\pi [l^2 + (T/2)^2] \leq x \leq -10 \log_{10} 2\pi l^2$$

また指数分布モデルでは、各車の位置は互いに独立であることから、 n 台の車による音の強さの分布関数 $H^{(n)}$ は $H^{(1)}$ の合成積を繰返すことによって得られる。したがって、 $n \geq 2$ における $G^{(n)}$ を等間隔のレベル $x_k = x_{k-1} + \Delta x$ ($\Delta x > 0$, $k = 1, 2, \dots$)で求めるものとすれば、対応する等比間隔の音の強さ $y_k = y_{k-1} \cdot 10^{\Delta x/10}$ において、 $H^{(n)}$ を以下の分布合成計算によって算出すればよい。

$$G^{(n)}(x_k) = H^{(n)}(y_k) = \sum_{i=1}^k [P_\lambda^{(n-m)} P_\lambda^{(m)} X_i * X_i(y_k) + \sum_{j=1}^{i-1} (P_\lambda^{(n-m)} P_\lambda^{(m)} + P_\lambda^{(m)} P_\lambda^{(n-m)}) X_i * X_j(y_k)] \quad (6)$$

ただし、 $P_\lambda = H(y_k) - H(y_{k-1}) = G(x_k) - G(x_{k-1})$ であり、 $X_i * X_j(y_k)$ は区間 $(y_{k-1}, y_k]$ と区間 $(y_{k-1}, y_k]$ にそれぞれ一様分布する2つの音の強さ Y_i と Y_j の和が y_k 以下になる確率を与えており、 $n \geq 2$ の場合には、 $t = 10^{-x/10}$ として、次式で与えられる。

$$X_i * X_j(y_k) = \begin{cases} 0 & ; y_k \leq y_{k-1} + y_{j-1} \\ (k-r-i-k-t-i)^2 r^{2k-i-j} / 2(r-1)^2 & ; y_{k-1} + y_{j-1} < y_k \leq y_{k-1} + y_j \\ (2r-2r-i-k-r-j-k-t-i)^2 r^{k-i} / 2(r-1) & ; y_{k-1} + y_j < y_k \leq y_i + y_{j-1} \\ 1 - (r-i-k+1+r-j-k+1-r)^2 r^{2k-i-j} / 2(r-1)^2 & ; y_i + y_{j-1} < y_k \leq y_i + y_j \\ 1 & ; y_k > y_i + y_j \end{cases} \quad (7)$$

なお、 $F_\lambda(x)$ は(4)式で示されるように無限級数となるが、実際の数値計算では次の有限級数で近似される。

$$F_\lambda(x) = \sum_{i=1}^N P_\lambda'(n_i) \cdot G^{(n_i)}(x) \quad (8)$$

$$P_\lambda'(n_i) = P_\lambda(n_i) \cdot w_i$$

ただし、 $m_i < \lambda < m_N$ であり、ポアソン確率 $P_\lambda(n_i)$ に乗じる重み w_i は、 $\sum_{i=1}^N P_\lambda'(n_i) = 1$ 及び $\sum_{i=1}^N (\lambda - n_i) P_\lambda'(n_i) = 0$ となるように定めればよい。一般に $F_\lambda(x)$ は、(8)式により数項の級数和で十分な近似精度が得られ、 λ が大きくなるにつれて $G^{(N)}(x) \rightarrow F_\lambda(x)$ となる。図-6は $l = 10 \text{ m}$, $d = 25, 50 \text{ m}$ の場合について(8)式による分布合成計算とモンテカルロシミュレーション計算とによる音圧レベルを比較したものであり、両者はよく一致している。

以上までの音圧レベル分布の計算は $PWL = \text{const.}$ として求められにものであるが、より現実に近いためには PWL も確率変数として取り扱う必要がある。この場合、1台の車による音圧レベル分布は PWL の分布関数と距離減衰の分布関数(5)式と同一)との合成積で

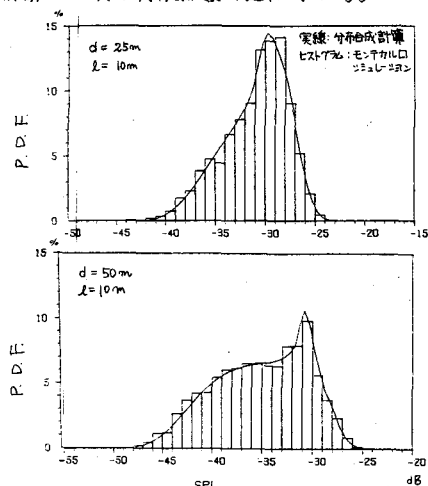


図-6 分布合成計算とモンテカルロシミュレーションによる音圧レベル分布

得られる。図-7は、 PWL が平均 PWL 、標準偏差 σ dB の正規分布に従うとした場合の音圧レベル分布の計算例であり、 σ が大きくなるに従、分布形状がなめらかになる。

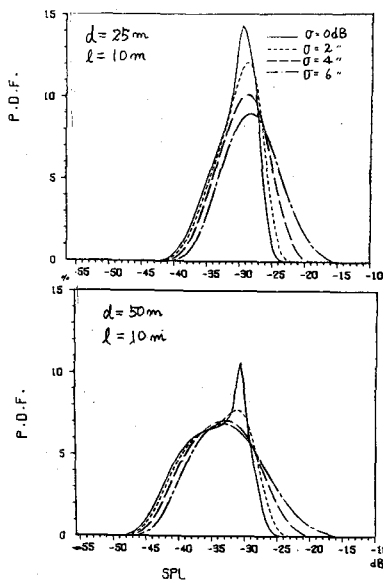


図-7 PWL が正規分布に従う音圧レベル分布

図-8は横軸に l/d をとり、 $(L_x - Le_g)$ の変動状況について、上述の理論モデル値と実測値を比較したものであり、等間隔モデルなどの単純なモデルの計算値 $|L_x - Le_g|$ は実

測値より小さい傾向にある。しかし、指数分布モデルを用いて、大型、小型の又重複混入と PWL の変動を考慮に入れた計算値は実測値とよく一致するという結果が得られている。

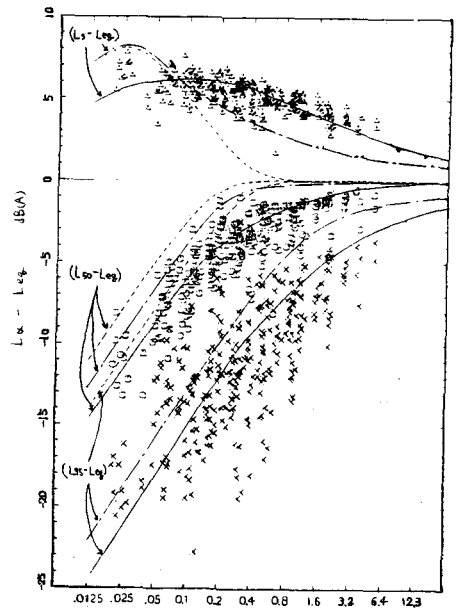


図-8 $L_x - Le_g$ と l/d の関係
 実測値 Δ $L_x - Le_g$
 $\circ$ $L_{50} - Le_g$
 $\times$ $L_{95} - Le_g$
 理論値 $\cdots$ 等間隔モデル
 $\cdots$ 指数分布モデル ($\sigma = 0dB$)
 $\cdots$ 指数分布モデル ($\sigma = 4dB$)
 (重複混入 ($\alpha_2 = 10\%$), $\sigma_1 = \sigma_2 = 4dB$)

3. L_x による Le_g の推定

3.1 騒音レベル分布による推定

L_x から Le_g を推定するには、騒音レベルの分布を想定すれば、その分布に即した Le_g を算出できる。ここでは騒音レベルの分布を正規分布と仮定して導かれた (9)、(10) 式と歪をもった分布と仮定して導かれた (11) 式¹⁾ について実測値をあてはめ、検証した。

$$Le_g = L_{50} + \frac{(L_5 - L_{95})^2}{94} \quad (9)$$

$$Le_g = L_{50} + \frac{(L_5 - L_{50})^2}{23.5} \quad (10)$$

$$Le_g = m + 10 \log_{10} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} (\sigma_1 + \sigma_2) \times \left\{ \sigma_1 e^{a^2 \sigma_1^2} \operatorname{erfc}(a \sigma_1) + \sigma_2 e^{a^2 \sigma_2^2} \operatorname{erfc}(a \sigma_2) \right\} \right\} \quad (11)$$

記号：説明略

図-9は推計式別の推計値と実測値の関係を示している。(9)式による推計値は実測値に比べて若干低く算出される傾向にあるが、これは交通量が少ない時や路線近くで測定される場合には、騒音レベルの分布が一般に正の歪 ($L_5 - L_{50}$) $>$ ($L_{50} - L_{95}$) をもつため、標準偏差 $\sigma = (L_5 - L_{95}) / 3.3$ の正規分

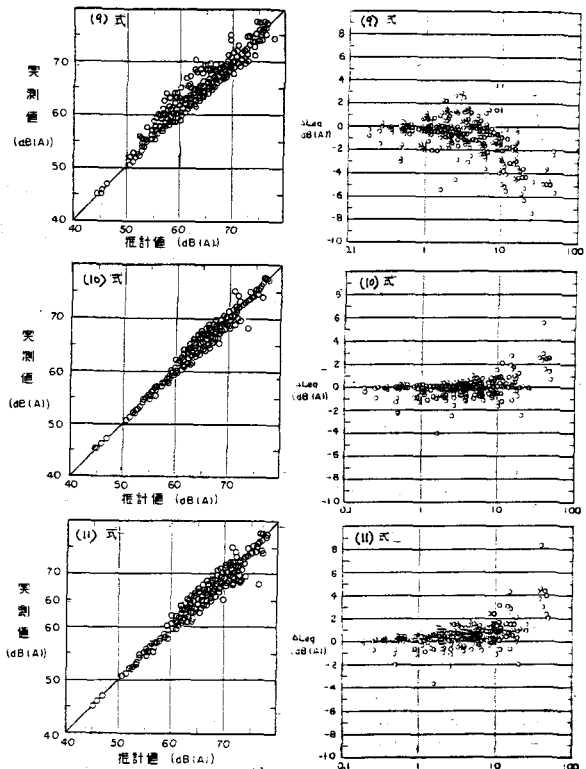


図-9 実測値と L_x による推計式の関係

図-10 推計誤差 ΔLe_g と l/d の関係

布をあてはめると、高レベル側の相対頻度が過少評価されることによるものと考えられる。

図-10に推計誤差 ΔLeg （推計値-実測値）と d/l の関係を示す。 d/l が小さい時は誤差が小さいが、 d/l が大きくなるにつれて(9)式による ΔLeg は負側に大きくなり、(10)、(11)式による ΔLeg は正側に大きくなっている。

3.2 実測値による回帰分析

($L_{50} - \text{Leg}$)と $\log d/l$ の回帰分析を行った結果を図-11に回帰式を(12)式に示す。

$$\begin{aligned} L_{50} - \text{Leg} &= -10^{0.29 - 0.47 \log_{10} d/l} \\ &= 1.9 (d/l)^{-0.47} \end{aligned} \quad (12)$$

この回帰式では、 L_{50} と Leg の関係が d/l によりある程度の精度で求められるが、指数関数の形をとっているので適用範囲(%)のデータ範囲は0.02～5.5)に注意する必要がある。

4. 計算値と実測値の差

4.1 Leg 計算式

道路交通騒音について、ある受音点の Leg を計算するために、自動車は無限長の一車線(直線)上を定常走行しており、自動車を音響パワーの等しい無指向性点音源とみなし、各音源からの音は路面反射によらず半球面状に伝播するものと仮定すると次式のようになる。

$$\text{Leg} = \overline{\text{PWL}} - 10 \log_{10} 2ld \quad (13)$$

$\overline{\text{PWL}}$: 1台の車から発生する騒音のA特性によるエネルギー平均のパワーレベル $[\text{dB(A)}]$

4.2 計算値と実測値の差

実測道路交通騒音について、サンプリング間隔0.1秒で算出された Leg と(13)式による計算値を比較し、実測値と計算値の差 ΔL の検討を行った。検討に用いる実測値は、平坦道路で各測定点から道路を広く見通せる場所で実測されたものであり、音の回折は無視できる。なお、 $\overline{\text{PWL}}$ は54～55年に実測されたパワーレベルをエネルギー平均した式を用いている。

$$\overline{\text{PWL}} = 89 + 0.15V + 10 \log_{10} (a_1 + 2a_2 + 13.8a_3) \quad (14)$$

a_1, a_2, a_3 : 乗用車類, 小型貨物車類, 大型車類の混入率

$$(a_1 + a_2 + a_3 = 1)$$

計算値と実測値(データ数326)の散布図によると、比較的高いレベルの範囲では良い対応がみられるのに対して、低レベルの領域では実測値の方が低くなる傾向があるが、これらのデータはほとんど道路から離れた地上1.2mで測定されたものである。

図-12は受音点の地上高さH別に実測値と計算値の差 ΔL (実測値-計算値)と車線中心からの距離 l との関係を示したものである。受音点高さ別の ΔL の平均値は、道路端に近い距離では $\Delta L \approx 0 \text{ dB}$ であり、遠くなるに従って $\log l$ にほぼ比例して小さくなっており、その傾きはHが高くなると0に近づいている。

受音点高さ別に $\log_{10} l$ による ΔL の回帰式を求めたものを表-2に

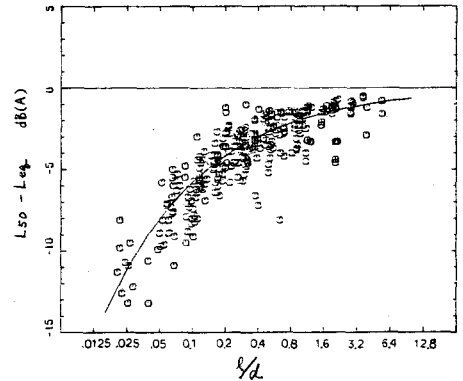


図-11 L_{50} と Leg の関係

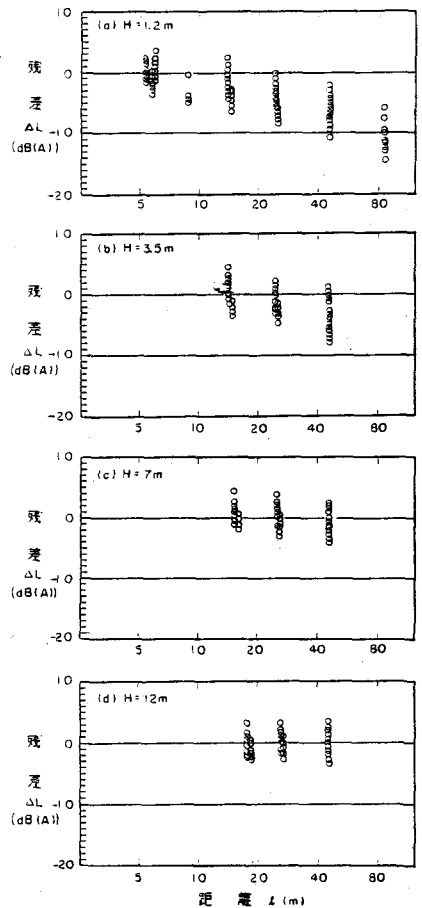


図-12 残差(ΔL)と距離(l)の関係

示す。この回帰係数によれば、 ΔL は $H = 1.2$ mのとき倍距離2.4 dB、3.5 mで2.3 dB、7 mで1.0 dB、12 mで0.1 dBであり、伝播経路が地表面の影響を受けないと考えられるような高所にあるときは、 ΔL がほぼ0になっている。

表-3は $h = 5$ mを路肩端位置として、表-2の回帰式から ΔL を推定したものである。

参考として、過去の道路交通騒音調査の L_{50} 、 L_{95} 値から、前出の(10)式で Leg 値を推定し、これと計算 Leg 値によって ΔL を検討した。実測値は昭和47~49年に2車線平坦道路2ヶ所(周辺地表面は草地5、裸地4、不明2ヶ所)で測定されたものであり、受音点はすべて地上1.2 mの高さにある。この結果、実測値(推定 Leg)と計算値の差 ΔL は図-12と同様に $log d$ にほぼ比例して小さくなっている。また ΔL の回帰式の係数によれば、 ΔL は草地で倍距離2.5 dB、裸地で1.8 dBとなっている。なお、 ΔL の値は表-2より少なめに算出されたが、これは測定時期が古いため、当時のPWLが(14)式より大きいと思われること、5秒間隔100回サンプリングの L_{50} 、 L_{95} 値で推定される Leg は多少大きく推定されることによると考えられる。

4.3 周波数別の検討

前項で算出された ΔL は、ほぼ地表面による超過減衰と考えられるが、これを更に検討するための資料として、周波数別の超過減衰量を算出した。ただし、自動車のパワーレベルの周波数特性については資料がなく、車種毎の平均レベル及び分散が不明であるため、ここでは各周波数帯域においてもA特性と同一の車種間レベル差及び分散を持つものと仮定し、道路端を基準とした相対的な超過減衰量を求めた。図-13はこの仮定により、中心周波数63~5,000 Hzの1/3オクターブバンドのうち、125、500及びオールパスA特性における相対超過減衰量を求めたものを示す。250 Hz以下の低周波域における超過減衰量は、同一高さで距離にかかわらずほぼ一定となっているが、315 Hz以上では概ね周波数が高くなるほど距離による超過減衰の増大が顕著になっているようである。なお、各周波数帯域のうちA特性騒音の超過減衰と最も似ているのは400 Hz前後のものである。

あとがき

本調査によって Leg のサンプリング測定値、 Leg と L_x の関係における交通条件や測定位置に関する変動特性の関係は把握できたと考えられる。また、平坦道路の街道における道路交通騒音の Leg 値について実測値と計算値との間に生じる差を示した。この結果から、 Leg はサンプリング時間、交通条件、受音位置、などの影響を受けるので、現在の基準 L_{50} を単に Leg におきかえるのでは不十分であり、条件に合致するように修正しなおすことが重要である。 L_{50} の基準値を見直す必要があるならば、これらの考えが当然導入されなければならないと考えられる。本文が今後の Leg 評価の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 高木興一：環境問題の把握に関するいくつかの問題点とその考察、環境技術Vol. 8(10) (1980)

表-2 受音点高さ別回帰式(実測値-計算値)の回帰式
 $\Delta L = b_0 + b_1 \log d$
 ΔL : dB(A) 単位
 d : m

H(m)	データ数 n	回帰係数	
		b_0	b_1
1.2	122	5.77	-7.42
3.5	68	9.07	-7.61
7.0	67	4.40	-3.23
12.0	69	0.44	-0.43

表-3 地上高さ別推定 ΔL

受音点高さ (m)	路肩端からの距離(m)					
	0	5	10	20	40	80
12.0			-0.1	-0.2	-0.3	
7.0			0.5	-0.2	-1.0	
3.5			0.0	-1.6	-3.5	
1.2	0.2	-2.2	-3.6	-5.3	-7.3	-9.5

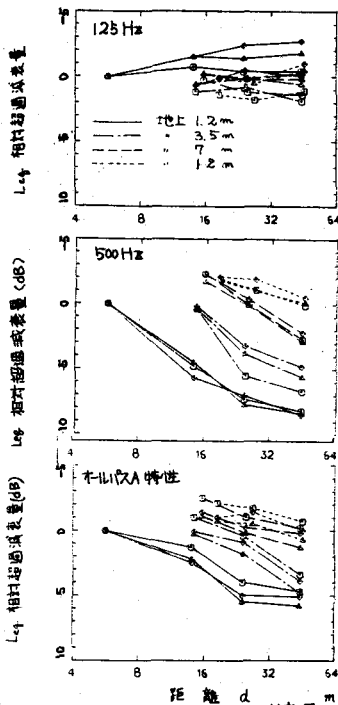


図-13 Leg の周波数別相対超過減衰量