

道路交通と鉄道による複合騒音の予測モデルに関する研究

名古屋大学 正員 河上省吾
 福井大学 正員 青島縮次郎
 名古屋大学 学生員 浅野俊樹

1. はじめに

従来交通騒音のやかましさを評価については、その発生特性によって個々の交通機関に対し種々の指標が提案されており、これらの評価は単一の交通騒音の影響を受けるようなケースに適用される。しかし、例えば騒音評価に際し複数の交通機関が想定されて、これらの騒音がいずれも無視できない影響を及ぼすようなケースでは、それらによって複合された騒音をどのように予測し、あるいは評価するかが問題となってくる。

本研究では、そのような複合された騒音（以下複合騒音と記す）の予測と評価の方法に関して、アンケート調査に先立ち検討したもので、まず新交通機関（中量輸送機関）鉄道・道路交通騒音の個々の発生パターンの特性の把握とモデル化も、さらにそれに基づき複合騒音予測のモデル化を試みたものである。

2. 新交通機関・鉄道・道路交通騒音の予測モデルとその検討

新交通機関鉄道騒音のような向欠騒音のうるささは、ピークレベル、その継続時間および騒音レベルの立ち上がり時間などが、また道路交通騒音のような不規則な変動を示す騒音は、騒音レベルの頻度分布が決定要因となる。そこで前者については、時間をパラメータとする列車通過に伴う騒音レベルの予測モデルを、後者については頻度分布の関数モデルとその代表値について検討した。

2.1 新交通機関の騒音

新交通機関騒音実測は、南栄会社の実験線で地表上約0.5mの直線軌道上で単車走行させてもらい行なった。その速度別のピークレベルの距離減衰性状を図-1に示した。これから、およそ6dBA/倍距離の点音源の距離減衰性状を示していることが分かる。また図-2は2種類の型の新交通機関の力行（モーター作動状態）・惰行別の速度とパワーレベルとの関係を示したものであるが30km/hあたりから力行惰行時のパワーレベルの差が小さくなる傾向を示す。以上のような特性は、新交通機関の一車両長が約6mで、マイクロバス程度のものであり、コンクリートあるいは鋼製の軌道上を走行するため、鉄道のようにはレールと車輪間が発生する走行音がほとんどなく、騒音発生源は主に駆動装置のモータ・ギヤ音であるためと考えられる。

このような特性と将来新交通機関は40~50km/h、3~6両編成で走行するというような点を考慮し、予測モデルは図-3に示したように、各車両を点音源と仮定し、それらが等間隔に連結されて一定速度Vで走行する連結点音源モデルも考えた。ここで各音源は無指向性、音場は自由音場、先頭車中心点から0点に達した時を $t=0$ (sec)とし、列車通過に伴う騒音レベルの予測式を、次式で与えた。

$$L = PWL + 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\{Vt/3.6 - d(i-1)\}^2} - 11 \quad (dBA) \quad (1)$$

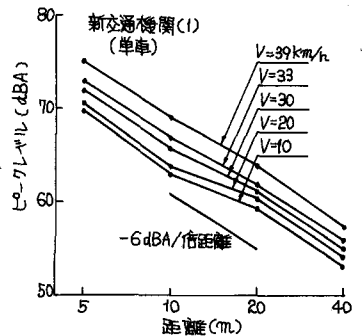


図-1 新交通機関騒音の距離減衰（力行）

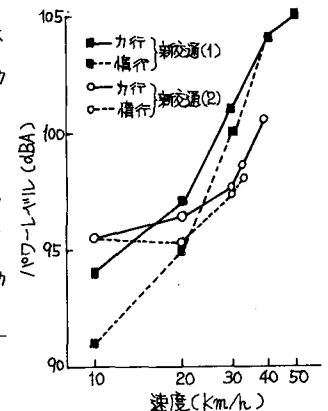


図-2 新交通機関(1),(2)騒音の速度とパワーレベルの関係

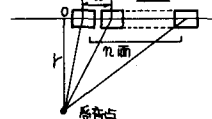


図-3 連結点音源モデル

$$PWL = 10 \log_{10} (W/10^{-12}) \quad (dBA)$$

ここに、PWLは一車両についての点音源パワーレベルである。

式(1)で求めた予測値と実測値との比較結果の一例を図-4に示した。実測値(*印)は、カ行で単車走行させ得られたものである。また予測におけるPWLは、4実測地点で得られたピークレベルを式(1)に代入して求めたもの、先頭車両および後続車両にはそれぞれカ行時および惰行時のPWLを与えた。図-4より、実測、予測値はほぼ一致した変化のパターンを示している。

b) 在来鉄道

鉄道騒音の実測は、名古屋鉄道小牧線(単線)の平坦無障害地点で行なった。

実測によって得られた速度別ピークレベル距離減衰性状を図-5に示した。これとみると距離が遠くなるに従い-6dBA/倍距離減衰になる傾向が分かる。ただしこの結果で10から20mの減衰がほとんどなく、一般的な性状を示してゐらず、これに關しては、今後の検討及び再実測が必要であろう。いずれにせよ、このような鉄道騒音の距離減衰性状は、近接点で線音源的に遠くなるに従い、点音源的になることを示している。また、鉄道の列車は一車両長約20m程で複数両編成があり、走行中に列車から放射される騒音は、車輪とレール間が発生する走行音とモーター・ギヤーなどから発生する駆動装置音が主体となるが、その他に集電装置騒音、スパーク音、補助装置音や空気が動的騒音など列車全体に散在している。

以上の点を考慮し、鉄道騒音の予測モデルは図-6に示すように、音源・音場は前述のモデルと同様である一定速度V(km/h)で直線軌道上を走行する有限線音源モデルを考えた。予測式は、列車最先端の0点に達した時をt=0(sec)とし次

$$式で与えた。L = PWL + 10 \log_{10} \left\{ \tan^{-1} \frac{Vt}{3.6r} - \tan^{-1} \left(\frac{Vt}{3.6} - \frac{l}{r} \right) \right\} - 11 \quad (dBA) \quad (2)$$

ここに、PWLは単位長さ当りのパワーレベル、lは列車長(m)である。

式(2)より求めた予測値と実測値との比較結果の一例を図-7に示した。ここでPWLは、新交通機関の場合と同様に実測値から求めた。これとみると、両者の立ち上がりにかんがりの差があり、実測値のレベル変化は予測に対し急激に現れその継続時間が短い。これは実測地点が刈り入れ後の田であったことから地表面による吸音効果、空気による減衰効果または音源の指向性(軌道に垂直方向の広がりに対し軌道方向の広がり車体自体による防音効果がある)によるものではないかと考えられる。これについては、近接点における距離減衰の問題も含め、今後の再実測と研究が必要である。

c) 道路交通

道路交通騒音は、騒音レベルの頻度分布が評価のベースになるものであり、ここでは複合騒音の予測モデルに必要な騒音の確率分布モデルを検討した。

名古屋市内を走る往復8.64車線道路交通量はそれぞれ2838、1972、1904台(時間)

での実測(30分間360個データ)で得られた騒音頻度分布に正規分布仮定を適用し、χ検定により適合度を検討した結果を表-1に示す。このうち、有意水準5%に対し正規分布仮定が捨てられないとする結果が2に4車線(路側からの距離15m)の一例を図-8に示した。

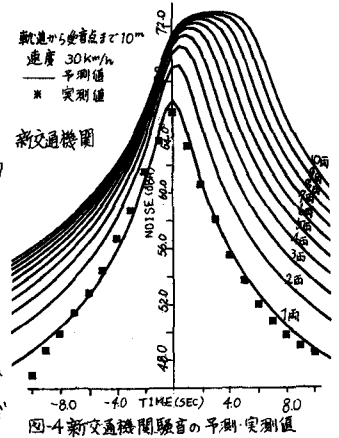


図-4 新交通機関騒音の予測・実測値

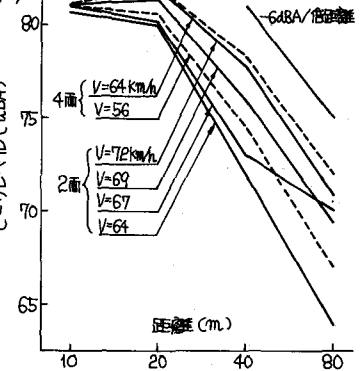


図-5 鉄道騒音の距離減衰

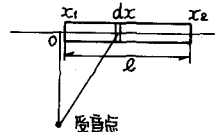


図-6 有限線音源モデル

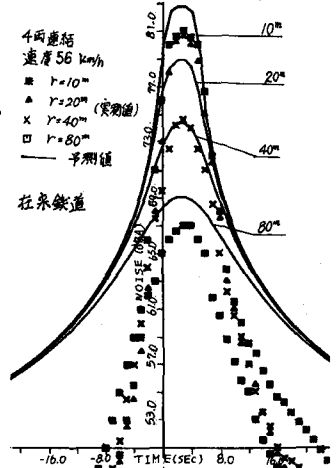


図-7 鉄道騒音の予測・実測値

一般に、道路交通騒音の頻度分布は交通流のパターンによって変わってくる。例えば、信号・交差点附近や交通渋滞などによってランダムな交通流にある強制力がかかる場合や、交通量が極めて少ない場合には頻度分布に偏りが生じ、正規分布仮定も適用できない。したがって、どのような交通流パターンに対して正規分布モデルが適用できるか、すなわちこのモデルの適用限界について他の分布モデルの適用も含め今後検討する必要があることをまず銘記しておく。そこで、ここではまず実測によって得られた騒音頻度分布に正規分布仮定も適用した場合、道路交通騒音の指標値である中央値(以下 L_{50} と記す)と90%レンジ上端値(以下 L_5 と記す)の予測精度と分布の標準偏差の特性について検討した。その結果が図9~図11である。正規分布では L_{50} が平均値に一致する。そこで実測分布における両者の値を比較したものが図9である。ここで χ^2 検定で5%有意なものは1dBA程度、1%有意なものは1~2dBA程度の差が出ている。次に L_5 について予測値と理論値の比較を図10に示した。これも同様な傾向を示しており5%有意のものを除けば差は小さい。いずれにせよ、有意性が認められないもの、すなわち正規分布仮定の適合性の高いもの程よい予測結果を示している。この予測モデルで最も問題となるのは σ (標準偏差)の予測である。

図11に示したように、距離減衰は平均値(または中央値)と対応した減衰性状を示しているが、交通量との相関はみられない。したがって、ここでは、平均値は L_{50} の騒音響学公式で求められるので L_{50} が得られれば、 σ は次式によって求めることができる。 $\sigma = (L_5 - \mu) / Z_2$

ここに、 Z_2 は標準正規分布における $\alpha = 5\%$ における値である。そこで、 L_5 の予測モデルとして、交通量 Q (台/時間)、路側からの距離 m および大型車混入率を説明変数とする重回帰モデルを考え次式のように与えた。

$$L_5 = a \log_{10} Q + b \log_{10} A + c \log R + d \quad (3)$$

実測データを用い、各偏回帰係数及び重相関係数も求めた結果が表-2である。

3. 複合騒音の予測モデル

複合騒音の予測モデルとして、以上検討してきた交通機関別予測モデルを用い、複合騒音頻度分布の予測モデルと等価騒音レベルに換算するモデルを検討した。これらのモデルの前提として、騒音のやがましさは、交通機関の種類にかかわらず、騒音の大きさとその頻度によって説明できるという仮定をおいている。

表-1 道路交通騒音頻度分布の χ^2 検定

距離(m)	7.5	15	30	60
8 lane	*	*	*	*
	**	**	**	**
6 lane				
4 lane	*			

* 5%有意 ** 1%有意

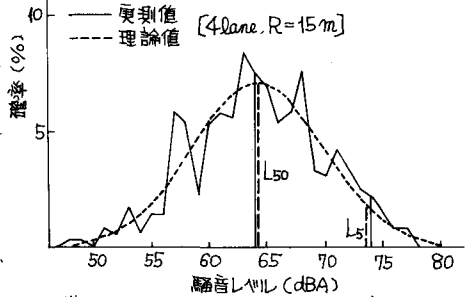


図-8 道路交通騒音の実測値・理論値の頻度分布

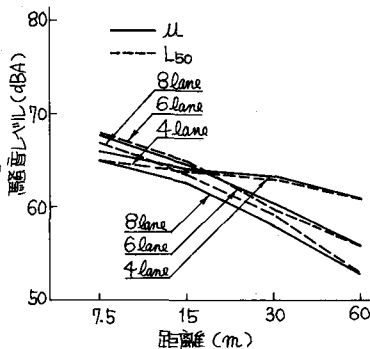


図-9 道路交通騒音の μ , L_{50} の距離減衰

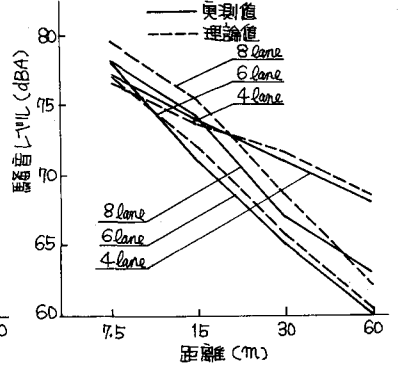


図-10 道路交通騒音の L_5 (実測値・予測値)の距離減衰

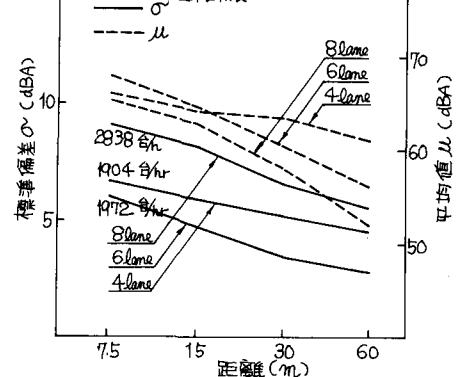


図-11 道路交通騒音の σ , μ の距離減衰
表-2 L_5 の予測モデル

	重相関係数	a	b	c	d
8 lane	0.968	7.839	6.007	-17.445	74.016
6 lane	0.990	8.393	5.060	-18.964	71.742
4 lane	0.967	-5.376	9.394	-11.526	114.218

α) 複合騒音頻度分布の予測モデル

今、予測しようとするある地点において、道路交通騒音の頻度分布と鉄道騒音の列車通過に伴う時間的变化がそれぞれ図-12, 13のように得られており、これらの騒音の発生は独立であるものとする。なお、ここでは鉄道騒音は図のように階段状に近似しており、騒音レベル L_{Ri} およびそのレベルを示す継続時間 TR_i は式(2)から、また道路交通騒音頻度分布は前述した正規分布関数モデルにより得ることが出来る。

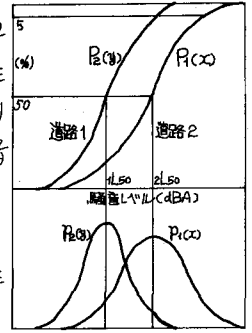


図-12 道路交通騒音頻度分布

α-1) 道路交通騒音どうしの複合

まず、複合騒音分布を予測するモデルの一般的な方法を示すために、互いに騒音発生が独立な2つの道路の②による複合騒音の予測モデルについて述べる。

今、①による道路交通騒音 X (dBA)が発生している時、さらに②による Y (dBA)が重なったとすると、両者による複合騒音 L_c は次式のようになる。

$$L_c = L_{cf}(X+Y) = 10 \log_{10} (10^{\frac{X}{10}} + 10^{\frac{Y}{10}}) \quad (4)$$

こゝに $L_{cf}(X+Y)$ は騒音 X と Y のエネルギー和の $\log$ 変換を示す。

したがって、 X と Y により新たに生じた複合騒音の確率分布を $P_c(L)$ とすると、

$$P_c(L) = P(L_{cf}(X+Y) \leq L) \quad (5)$$

である。(5)式は、 X と Y による複合騒音 L_c が L 以下を示す L_c の確率の総和である。

こゝでは、実測値データが離散的であるので、 X, Y, L_c も離散的な確率変数とし、その実現値を $x_i (i=1, 2, \dots, l), y_j (j=1, 2, \dots, m), L_{ck} (k=1, 2, \dots, n)$ 、各々の確率を P_{xi}, P_{yj}, P_{ck} とす。

今、道路①が $X = x_i$ を示している時、複合騒音 L_c の確率分布は式(5)から

$$\begin{aligned} P_c(L_{ck} | X = x_i) &= P\{L_{cf}(X+Y) \leq L_{ck} | X = x_i\} \times P_{xi} \\ &= P\{Y \leq L_{cf}(L_{ck} - x_i) | X = x_i\} \times P_{xi} \\ &= \left(\sum_{j=1}^h P_{yj} \right) \times P_{xi} \end{aligned} \quad (6)$$

こゝで、 P_{yjh} なる確率を示す y_h は

$$y_h \leq L_{cf}(L_{ck} - x_i)$$

の条件を満足する y_h の最大値である。言い換えるならば、 x_i と y_h との複合騒音 L_c は L_{ck} に等しくなるかあるいは x_i と y_h の組み合わせで最も大きい。この y_h は図-13の関係を点線のように簡略化して求めた表-3により求めることができる。

したがって、式(6)を i について1から l まで求めその総和をとれば、道路①②による複合騒音分布の L_{ck} の確率分布が次式のように求まる。

$$P_c(L_{ck}) = \sum_{i=1}^l P_{xi} \sum_{j=1}^h P_{yj} \quad (7)$$

また、式(7)が求まれば、 L_{ck} の確率は、次式で与えられる。

$$p_c(L_{ck}) = P_c(L_{ck}) - P_c(L_{ck-1}) \quad (8)$$

α-2) 鉄道と道路交通騒音との複合

全時間 T (1時間で $T=3600\text{sec}$)において、 L_{Ri} を示す鉄道騒音の発生時間確率 P_{Ri} は

$$P_{Ri} = (TR_i \times MR) / T$$

である。したがって鉄道騒音発生時間確率は、

$$P_R = \sum_{i=1}^N P_{Ri}$$

こゝで、 N は図-13における階段数(分割数)を示す。この場合の複合騒音分布の予測もα-1)の場合と全く同様の方法で求める。ただし、この場合では $P_R < 1$ であるため全時間における複合騒音の確率分布 P_{cL} は、 L_{cLv} とそれぞれ鉄道・道路交通騒音レベルとすると、次のようになる。

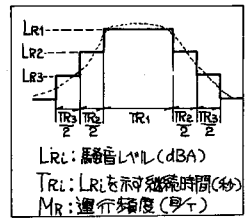


図-13 鉄道騒音

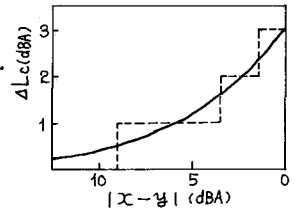


図-14 2つの音源の重なりによる騒音レベルの増加量

表-3

$L_{cR} - x_i$	< 0	0	1
y_h	$F_c(L) = 0$	$x_i - 10$	$x_i - 4$
$L_{cR} - x_i$	2	3	4
y_h	$x_i - 2$	x_i	$x_i + 2$
$L_{cR} - x_i$	5	6	7
y_h	$x_i + 4$	$x_i + 5$	$x_i + 6$
$L_{cR} - x_i$	8	9	$10 \leq$
y_h	$x_i + 7$	$x_i + 8$	L_{cR}

$$P_c(L_c) = P\{L_{cf}(L_R + L_v) \leq L_c\} + (1 - P_R) \times P(L_c)$$

になる。ここで L_R , X を離散的確率変数とすると式(6)において

$$x_i = L_{Ri}, \quad p_{xi} = P_{Ri} \quad i = 1, 2, \dots, N$$

となり、鉄道と道路交通による複合騒音分布予測式は

$$P_c(L_{ck}) = \sum_{i=1}^N P_{Ri} \sum_{j=1}^M p_{xi} + (1 - P_R) P_x(L_{ck}) \quad (9)$$

で与えられる。ここで P_x は道路交通騒音の累積分布であり、式(9)の第1項は全時間における鉄道騒音と道路交通騒音が同時に生じている時間についての複合騒音の累積分布を示し、第2項は鉄道騒音が加わっていない道路交通騒音のみの累積分布を示している。また式(9)の各値を求めることができれば、式(8)によって L_{ck} における複合騒音の確率を求めることができる。

道路交通騒音分布形に、2.2検討した正規分布関数モデルを用い、これに鉄道騒音が発生させた場合、そのピークレベルと発生時間の値によってどのような複合騒音の頻度分布が得られるかを式(9)を用いて検討した。この結果が図-15(a)~(d)である。ここで、道路交通騒音はすべて同じで、鉄道騒音は矩形型波形(図-13で $N=1$ の場合)で発生させた。

図の(a)~(d)は鉄道騒音の発生時間確率を $P=0.10$ に固定し騒音レベルを60, 65, 70, 75 dBA の4段階に分けて発生させたものである。

図の(a)では、鉄道騒音が道路交通騒音にかかれた状態での分布形に大きな変化はみられないが中央値付近の確率が増加している。b)になるとやや卓越したピークが生じるようになり鉄道騒音の影響が現れて来ている。さらにc) d) になると極端に卓越したピークが生じ、鉄道騒音の影響が大きくなることを示している。

次に、騒音レベルが65 dBA の鉄道騒音の発生時間確率を2倍にした場合の変化を図の(e)に示した。これと、同一レベルの分布であるb)と比較すると、前者はピークがより大きく尖鋭になることが分かる。以上のように道路交通騒音の中央値との相対的差、あるいは発生時間確率によって鉄道騒音によって生じるピークの形の尖鋭度と道路交通騒音・複合騒音の分布形状を予測することによって両交通騒音の評価をみることができると考えられる。いずれにせよ、これらの性状がどのように複合されて受音者に受けとめられるかは、今後のアンケートにおける課題である。

ここで、c) d) のように鉄道騒音が道路交通騒音中央値よりもあ

る程度大きい場合、すなわち両者による複合騒音の分布が中央値付近に生じない時には、簡略式によって中央値の予測を行うことができる。すなわち、道路交通

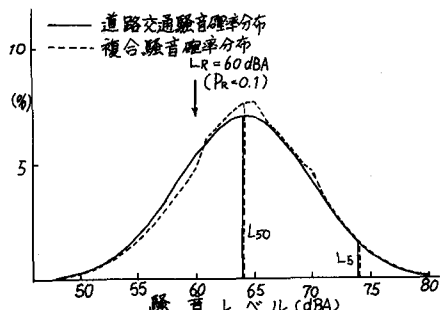


図-15(a) 道路交通・複合騒音分布

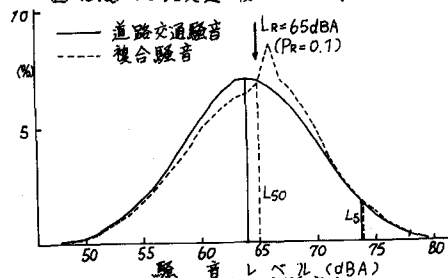


図-15(b) 道路交通・複合騒音分布

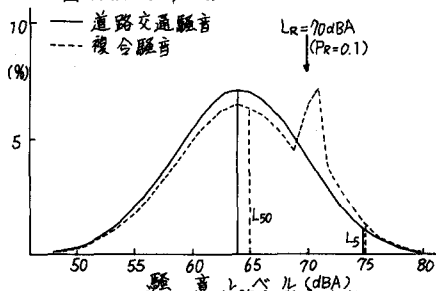


図-15(c) 道路交通・複合騒音分布

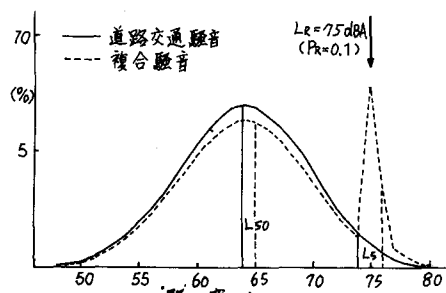


図-15(d) 道路交通・複合騒音分布

騒音の中央値附近の1かあたりの騒音増加量を ΔL_{50} (dBA/40)、鉄道騒音の発生時間確率を P_R とするならば、両者による複合騒音の中央値の予測式は、次式ようになる。

$$L_{50} = L_{50t} + 0.5 \times \Delta L_{50} \times P_R / (1 - P_R) \quad (10)$$

ここに、 L_{50t} は道路交通騒音の中央値である。

式(10)による予測値と実測値の比較結果を示した一例を図16に示す。

実測は80m隔て並行して走っている国道1号線(4車線250名/時)と名鉄の間の無障害平坦地で行なったもので、 L_{50t} は新音響学会式から求めたものである。この結果をみると L_{50} は列車通過頻度に対応した増加傾向を示しており、式(10)の第2項の妥当性を示している。予測値は実測値に比べ、平均して3~6dBA程小さく、これは L_{50t} についても同様の傾向を示している。したがって、この差は L_{50} の予測に帰因していると考えられる。

b) 等価騒音レベルによる予測モデル

等価騒音レベル(以下 L_{eq} と記す)による予測、評価は、T時間において受音者が受ける複数の交通機関から発生される音のエネルギー和をデシベル変換したもにより複合騒音のうるささの指標とするものである。

ここでは、鉄道と道路交通騒音との複合を例にヒリ述べる。今鉄道騒音の発生時間確率を $P_{Ri}(L_R=L_{Ri})$ 、道路交通騒音の確率変数 x の実現値および騒音確率分布関数を $X, x, f(x)$ とすると、鉄道騒音 L_{Ri} が発生している時、

($L_R=L_{Ri} \quad i=1, \dots, N$)と発生していない時との確率は、それぞれ

$$P_i \{ (L_R=L_{Ri}) \cap (x < X \leq x+dx) \} = P_{Ri} \cdot f(x) dx \quad (i=1, \dots, N) \quad (11)$$

$$P \{ (L_R=0) \cap (x < X \leq x+dx) \} = (1 - \sum_{i=1}^N P_{Ri}) f(x) dx$$

であり、 x の上限・下限値をそれぞれ x_u, x_o とすると、その時のエネルギー和の期待値は次のようになる。

$$E_i = \int_{x_u}^{x_o} (10^{\frac{x}{10}} + 10^{\frac{L_{Ri}}{10}}) \cdot I_0 \cdot P_{Ri} \cdot f(x) dx \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

$$E = \int_{x_u}^{x_o} 10^{\frac{x}{10}} (1 - \sum_{i=1}^N P_{Ri}) \cdot f(x) dx$$

したがって、全時間を通じたエネルギー和の期待値 E_t は $E_i(i=1, 2, \dots, N)$ と E を加え合わせればよい。すなわち

$$\begin{aligned} E_t &= \int_{x_u}^{x_o} (10^{\frac{x}{10}} + \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{Ri}}{10}} \cdot P_{Ri}) \cdot I_0 \cdot f(x) dx \\ &= \int_{x_u}^{x_o} 10^{\frac{x}{10}} + \sum_{i=1}^N \int_{x_u}^{x_o} 10^{\frac{L_{Ri}}{10}} \cdot P_{Ri} \cdot I_0 \cdot f(x) dx \end{aligned} \quad (13)$$

である。これをデシベル変換すると、鉄道と道路交通騒音の予測式として次式が得られる。

$$L_{eq} = 10 \log_{10} (10^{\frac{L_{50t}}{10}} + \sum_{i=1}^N P_{Ri} 10^{\frac{L_{Ri}}{10}}) \quad (dBA) \quad (14)$$

4. おわりに

以上の各予測モデルについてこの検討と今後の課題についてまとめると、以下のようである。

① 新交通機関・鉄道の予測モデルで、特に後者については騒音の距離減衰・伝播性・音源特性などについてまだ不明な点が多々モデルの適合性について問題があり、今後さらに検討を要す。

② 道路交通騒音については、正規分布関数モデルを検討したが、ここでは2~3のケースについてその適合性の検討にとどまった。これについては種々の交通流パターンについてさらに実測データをヒリ、交通流パターンによってどのように分布形が変化するかを分析すると共に関数モデルによる指標値(L_{50}, L_{50t})の予測の精度について検討する必要がある。

③ 複合騒音については、上述の各予測モデルにも適用し、それにより複合騒音分布の形状を予測した。またその結果から鉄道騒音が複合騒音分布の中にどのように現れるか、その発生状態によって傾向をみることもできた。今後はアンケート調査によつて、この複合騒音分布をどのように評価し、指標化するかが課題がある。

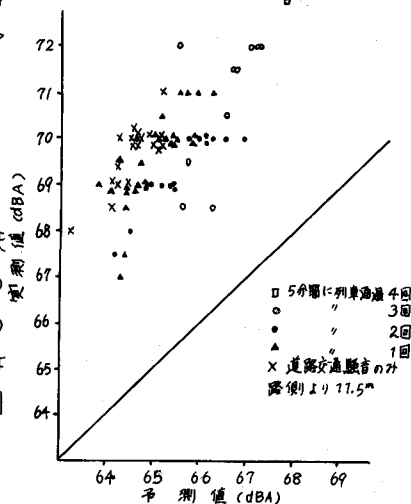


図16 複合騒音(L_{50})の実測値と予測値の比較