

1. はしがき 道路からの騒音を予測するために、比較的簡単な交通流モデルを想定し、そのモデルに基づいて、観測点における騒音レベルの変動を解析するという方法が一般に行なわれている。このようなモデルの一つとして、現在、よく知られており、かつ広く用いられているのは、等間隔モデルである^{1),2)}。このモデルは、各車両の音響パワーがいずれも等しく、また、車頭間隔がすべて等しいという、極めて単純化した交通流を想定しているが、そこから導かれる音圧レベルに関する諸量（例えば、平均値、中央値、 L_{50} など）はほとんどの場合、簡単な式で表示することが可能であるという特色をもっており、このモデルが広く用いられるに至った理由の一つもこの点にあると考えられる。しかし、現実の交通流を考えた場合、このモデルは、あまりにも単純化されているようであり、車頭間隔のせらぎや、各車両から放射される音響パワーのせらぎも考慮に入れたモデルについての解析を行なうことがきわめて重要であると考えられる。以下には、われわれが検討してきた、いくつかのモデルとその解析結果について述べる。

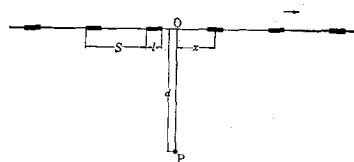


図1. 線音源等間隔モデルの模式図

2. 線音源等間隔モデル³⁾ 自動車は何キロメートルにわたって、混み合いながら走行している渋滞状況の場合や、新交通システム構想の一環として研究されている軌道システムでは、個々の車両は、点音源ではなく、線音源として取扱うことも重要と考えられる。ここでは、従来の等間隔モデルをより拡張したモデルとして、有限長の線音源が、一車線上に等間隔で配列されているモデルを想定する。図1に示すように、無限に長い一車線上を、等しい音響パワー W と、等しい長さ l を持つ線音源とみなせる車両が、等しい間隔 S で並び、等速度で走行しているとする。0点から最初の車両の中心までの距離を x とし、線音源から発する音は、いずれも位相ランダムで、かつ、球面波として伝播するすると、P点における音の強さ $I_w(l; x)$ は、

$$I_w(l; x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{4\pi l} \frac{W}{d^2 + (x + nS)^2} \right] \\ = \frac{q}{8\pi d} \sinh \frac{2\pi d}{S} \left(\frac{\frac{2\pi x}{S} + \frac{\pi}{S}}{2\pi \cosh \frac{2\pi d}{S} - \cos \frac{2\pi x}{S}} \right) \quad (1)$$

と表わされる。この積分の結果は表1のように示される。 $I_w(l; x)$ は S を周期とする周期関数である。 $I_w(l; x)$ の平均 $\bar{I}$ は、

$$\bar{I} = \frac{1}{S} \int_0^S \left(\frac{q}{8\pi d} \sinh \frac{2\pi d}{S} \frac{\frac{2\pi x}{S} + \frac{\pi}{S}}{2\pi \cosh \frac{2\pi d}{S} - \cos \frac{2\pi x}{S}} \right) dx \quad (2)$$

と表わされるが、上式の積分順序を変えることによって、 $\bar{I} = \frac{W}{4\pi d S}$ と求めることができる。したがってエネルギー平均レベル L_{eq} は、

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{W}{4\pi d S} \quad (3)$$

となり、等間隔モデルや後述の指数分布モデルの場合と同じ値となる。評価尺度として重要な L_{50} の値は、 $x = S/2$ のとき、よくことによ

表1 $I_w(l; x)$ の値

$$(\text{I}) \quad 0 \leq l \leq \frac{S}{2}, \quad \cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} \geq \cos \frac{2\pi x}{S} \quad \text{の場合}$$

$$I_w(l; x) = \frac{q}{4\pi d} \operatorname{Arctan} \left(\frac{\sinh \frac{2\pi d}{S} \sin \frac{\pi l}{S}}{\cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} - \cos \frac{2\pi x}{S}} \right)$$

$$(\text{II}) \quad 0 \leq l \leq \frac{S}{2}, \quad \cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} \leq \cos \frac{2\pi x}{S}$$

$$\text{又は, } \frac{S}{2} \leq l \leq S, \quad \cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} \geq \cos \frac{2\pi x}{S} \quad \text{の場合}$$

$$I_w(l; x) = \frac{q}{8\pi d}$$

$$- \frac{q}{4\pi d} \operatorname{Arctan} \left(\frac{\cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} - \cos \frac{2\pi x}{S}}{\sinh \frac{2\pi d}{S} \sin \frac{\pi l}{S}} \right)$$

$$(\text{III}) \quad \frac{S}{2} \leq l \leq S, \quad \cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} \leq \cos \frac{2\pi x}{S} \leq \cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} \quad \text{の場合}$$

$$I_w(l; x) = \frac{q}{4\pi d}$$

$$+ \frac{q}{4\pi d} \operatorname{Arctan} \left(\frac{\sinh \frac{2\pi d}{S} \sin \frac{\pi l}{S}}{\cosh \frac{2\pi d}{S} \cos \frac{\pi l}{S} - \cos \frac{2\pi x}{S}} \right)$$

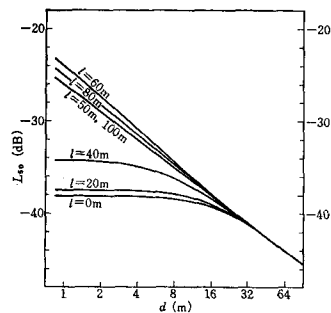


図2. L_{50} と d の関係

($S=100$ m, $PWL=0$ dB)

って得られる。新しく、

表2. $L_a - L_{eq}$ を与える式

	$\cos \frac{\pi \alpha}{100} \leq \cosh 2\pi r \cos \pi p$	$\cos \frac{\pi \alpha}{100} \geq \cosh 2\pi r \cos \pi p$
$0 \leq \rho \leq 0.5$	$10 \log_{10} \left[\frac{1}{\pi \rho} \operatorname{Arctan} \left(\frac{\sinh 2\pi r \sin \pi p}{\cosh 2\pi r \cos \pi p - \cos \frac{\pi \alpha}{100}} \right) \right]$[A]	$10 \log_{10} \left[\frac{1}{2\rho} - \frac{1}{\pi \rho} \operatorname{Arctan} \left(\frac{\cosh 2\pi r \cos \pi p - \cos \frac{\pi \alpha}{100}}{\sinh 2\pi r \sin \pi p} \right) \right]$[B]
$0.5 \leq \rho \leq 1.0$	$10 \log_{10} \left[\frac{1}{2\rho} - \frac{1}{\pi \rho} \operatorname{Arctan} \left(\frac{\cosh 2\pi r \cos \pi p - \cos \frac{\pi \alpha}{100}}{\sinh 2\pi r \sin \pi p} \right) \right]$[C]	$10 \log_{10} \left[\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\pi \rho} \operatorname{Arctan} \left(\frac{\sinh 2\pi r \sin \pi p}{\cosh 2\pi r \cos \pi p - \cos \frac{\pi \alpha}{100}} \right) \right]$[D]

と L_a の値を示すと表2のようになる。特別な場合として、 L_{50} の値は、

$$L_{50} = \begin{cases} = L_{eq} + 10 \log_{10} \left[\frac{1}{\pi \rho} \operatorname{Arctan}(\tanh 2\pi r \tan \pi p) \right] & (0 \leq \rho \leq 0.5) \\ = L_{eq} + 10 \log_{10} \left[\frac{1}{\rho} + \frac{1}{\pi \rho} \operatorname{Arctan}(\tanh 2\pi r \tan \pi p) \right] & (0.5 \leq \rho \leq 1) \end{cases} \quad (4)$$

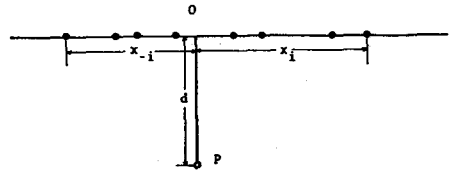


図3 指数分布モデルの様式図

となる。図2に $S=100m$ 、音響バ7-0dBの場合について L_{50} 距離による減衰特性を、車両長と l をパラメータとして示した。 $l=0m$ は通常の実音源等間隔モデル、 $l=100m$ は無限線音源の場合である。受音点が車線に近づくほど、 l の効果は顕著となる。

3 指数分布モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 図3に示すように、各車両が、無限に長い車線上を、車頭間隔が平均 $S(m)$ の指数分布をするような状態を走行しているものとみなす。はじめに、各音源のパワーがすべて同じ場合を取扱うが、この場合も、観測点における音の強さ、あるいは音圧レベルは確率変数となる。 P 点における音の強さ I_w および SPL は、

$$I_w = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{W}{4\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + x_i^2} \quad (5) \quad SPL = PWL + 10 \log_{10} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + x_i^2} \quad (6)$$

で与えられる。 $I = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + x_i^2}$ (7) とおく。 I に対する特性関数(characteristic function)を $g(u) = \exp[K(u)]$ とくと、 $K(u)$ は次式で示される。

$$K(u) = \frac{1}{S} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \exp \left(\frac{i u}{4\pi} \cdot \frac{1}{d^2 + x^2} \right) - 1 \right\} dx = \frac{d\pi}{S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-3)!!}{(2n-2)!!} \frac{1}{n!} \left(\frac{i u}{4\pi d^2} \right)^n \quad (8)$$

I の平均 $\bar{I}$ 、分散 σ_I^2 は $I = \frac{1}{4dS}$ (9) $\sigma_I^2 = \frac{1}{32\pi^2 d^3 S}$ (10)

となる。 I の確率密度関数 $P(I)$ は、 $\exp[K(u)]$ のフーリエ変換として、 $P(I) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i u I} K(u) du$ (11) で与えられる。 $d \rightarrow 0$ の場合(8)式の $K(u)$ は、

$$K(u) = \frac{1}{S} \int_{-\infty}^{\infty} \left(e^{\frac{i u x^2}{4\pi d^2}} - 1 \right) dx = -\frac{1}{S} \sqrt{-i u} \quad (12)$$

となるので、そのときの $P(I)$ は、

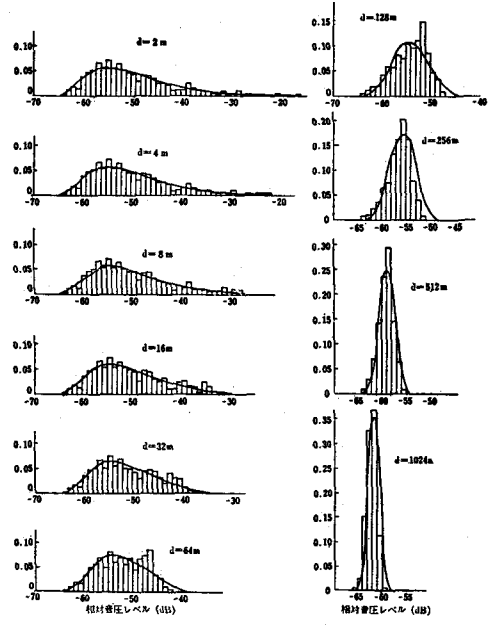


図4 音圧レベルの分布 ($S=400m$, $PWL=0dB$)
モンテカルロ法による結果と近似解(16式)との対応

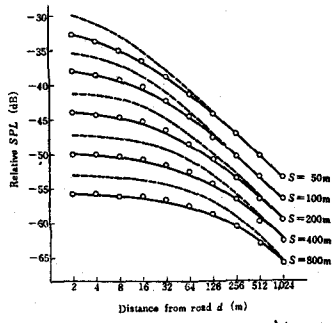


図5 音圧レベルの平均値の距離による減衰

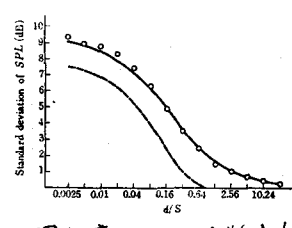


図6 音圧レベルの分散と d/S の関係

いずれも
① 種はシミュレーション計算
実線は導出した式による値
石破線は等間隔モデルによる値

$$P(I) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} e^{-\frac{1}{2}\sqrt{-i\omega}} d\omega$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{\pi}S} I^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{1}{4S}I} \quad (13)$$

として求めることができる。
上記の $d \rightarrow 0$ の場合を除いては、(11)式の $P(I)$ を厳密に表
示することは困難である。

ゆえに、 $K(u)$ の近似式
として、(14)式 $K_1(u)$ を採
用し、その結果から $P(I)$ の

近似式 $P(I)$ および、 $X = 10 \log_{10} I$ から変換した X の密度関数
 $f(X)$ 、 $f(X)$ の積率母関数 $M(Z)$ 、 X の平均 $\bar{X}$ 、分散 σ_X^2 を次式
のように求めた。この近似は $d \rightarrow 0$ 、 $d \rightarrow \infty$ では厳密解と一致し、
かつ音の強さの平均値も一致するようにになっている。

$$K_1(u) = 2 \frac{d\pi}{S} - \frac{\pi}{S} (4d\pi^2 d^2 - iu)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$\text{ただし、} \alpha = \frac{(d\pi/S)^2}{1 + (d\pi/S)^2}$$

$$M(z) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{iz} f(X) dX$$

$$= \frac{e^{\frac{1}{2}z} \pi}{S \pi^{\frac{1}{2}}} (4dS)^{-c+1} K_{-c+1} \left(2 \frac{d}{S} \pi^{\frac{1}{2}} \right) \quad (17)$$

ただし、 $c = 10/\ln 10$ であり、 $K_{-c+1} \left(2 \frac{d}{S} \pi^{\frac{1}{2}} \right)$ は第二種変形ベッセル関数である。

$E_i \left(-\frac{4d\pi}{S} \right)$ 、 $\bar{E}_i \left(\frac{4d\pi}{S} \right)$ は積分指数関数、 Γ はオイラーの定数である。

図4、5、6はモンテカルロシミュレーション計算による結果と、(16)、(18)、(19)式による結果とを比較したもので、両者はよく一致していることがわかる。次に車頭間隔が指数分布するのみでなく、各車両のパワーレベルが平均0dB、標準偏差 σ dB の正規分布にしたがっているモデルを考える。(17)式の I と同様の意味での音の強さと、

$$I = \sum_{i=1}^n \frac{1}{4\pi} \frac{w_i}{d^2 + x_i^2} \quad (20)$$

とすると、 w_i に対する確率密度関数 $r(w)$ は、いずれも、次の対
数正規分布の密度関数となる。

$$r(w) = \frac{10}{\ln 10} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma w} \exp \left\{ -\frac{\left(\frac{10}{\ln 10} \ln w \right)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (21)$$

I に対応する特性関数を $g(u)$ 、 $K(u) = \ln g(u)$ とすると、 $K(u)$
は次式のように示される。

$$K(u) = \frac{1}{S} \int_0^{\infty} r(w) \left\{ \exp \frac{i u}{4\pi} \frac{w}{d^2 + x^2} - 1 \right\} dx dw$$

$$= \frac{d\pi}{S} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n-3)!!}{(2n-2)!!} \frac{1}{n!} \left(\frac{i u}{4\pi d^2} \right)^n$$

$$\times \exp \left\{ \frac{\sigma^2}{2} \left(\frac{\ln 10}{10} \right)^2 n^2 \right\} \quad (22)$$

上式において $\sigma = 0$ とすれば、等パワーモデルの場合の $K(u)$ に一致する。いま便宜上、 $A = \frac{\sigma^2}{2} \left(\frac{\ln 10}{10} \right)^2$ とおく。 $d \rightarrow 0$
のとき、 $K(u)$ は、 $K(u) = -\frac{A^{1/4}}{S} \sqrt{-iu}$ となり、この場合には、 I の確率密度関数や音圧レベルの確率密度関数を
厳密に求めることができる。(22)式の近似式として基本的には(14)式と同じ型の、次式を採用した。

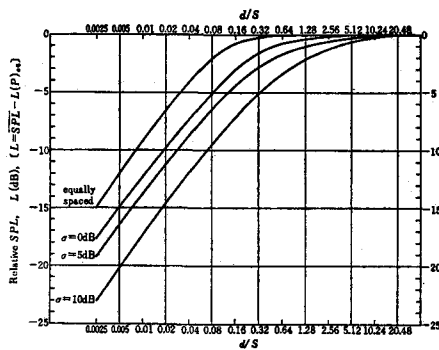


図7. パワーレベルが正規分布する場合、 $\bar{X}$
の距離による減衰 $\sigma = 5$ dB の場合、
石壁反射 $\sigma = 0$ の場合 ($PWL = 0$ dB)

図8. Chart for calculating mean of SPL

$$SPL = L(P)_{eq} + L$$

$$L(P)_{eq} = PWL + 10 \log_{10} \frac{\sigma^2 \left(\frac{1}{4\pi} \right)^2}{4dS}$$

where σ is the standard deviation in dB of power level.

$$f(X) = \frac{\ln 10}{20\pi^{\frac{1}{2}} S} \frac{\pi^{\frac{1}{2}}}{\pi^{\frac{1}{2}}} \exp \left[\pi^2 \left(2 \frac{d}{S} - 4d^2 10^{\frac{X}{10}} - \frac{1}{4S^2} 10^{\frac{X}{5}} \right) \right] \quad (16)$$

$$\sigma_X^2 = \left(\frac{10}{\ln 10} \right)^2 \left[\frac{\pi^2}{2} - \left(\ln \frac{4d\pi}{S} + r \right)^2 \right. \\ \left. + 2 \left(\ln \frac{4d\pi}{S} + r \right) \bar{E}_i \left(\frac{4d\pi}{S} \right) - \left(\exp \left(\frac{4d\pi}{S} \right) E_i \left(-\frac{4d\pi}{S} \right) \right)^2 \right] + \exp \left(\frac{4d\pi}{S} \right) \\ \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{n!} \right)^2 + 3 \frac{1}{n!} \left(-\frac{4d\pi}{S} \right)^n}{n!} \quad (19)$$

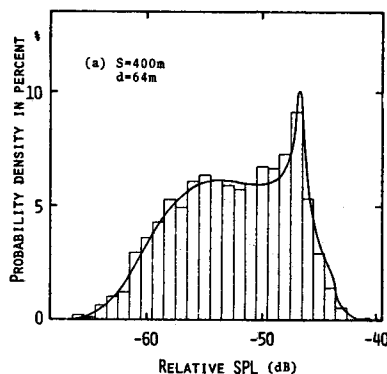


図9. 音圧レベルの確率密度曲線 ($PWL = 0$ dB のとき)
(26)式の数値計算による結果と、シミュレーション計算
によるヒストグラム

$$K_1(u) = \frac{2d_0}{S_0} - \frac{1}{S_0} (4d_0^2 - iu)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

ただし、 $d \rightarrow 0$ で $K(u) = K_1(u)$ 、及び一次のモーメントが一致するという条件から、 $S_0 = S \cdot A^{\frac{1}{2}}$ 、 $d_0 = d \cdot A^{\frac{1}{2}}$ である。音圧レベルの平均

$$\bar{X} = 10 \log_{10} \frac{A}{4dS} + \frac{10}{\ln 10} \exp\left(\frac{4d}{S} A^{\frac{1}{2}}\right) E_1\left(-\frac{4d}{S} A^{\frac{1}{2}}\right) \quad (24)$$

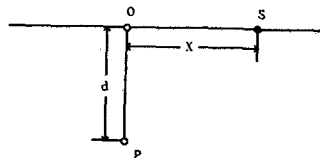


図10. 一実音源モデルの模式図

となる。図7に、 $\sigma = 5$ dB の場合について、音圧レベルの平均値の距離による減衰の様子と、シミュレーション計算の結果と、(24) 式による値との比較を示した。両者はよく一致している。図8には、音圧レベルの平均値を求めるためのチャートを示した。なお、パワーパヤがなない場合の音圧レベルの確率密度関数の型は、(11) 式の I を対数変換した式から、数値計算により、直接求めることもできる。すなわち、(8) 式の $K(u)$ は、Bessel 関数 $J_0(z)$ 、 $J_1(z)$ を用い、

$$K(u) = \frac{i u}{4dS} \exp\left(\frac{i u}{8\pi d^2}\right) \left\{ J_0\left(\frac{u}{8\pi d^2}\right) - i J_1\left(\frac{u}{8\pi d^2}\right) \right\} \quad (25)$$

とあらわされるが、この式を用いると、

$$f(x) = 8d^2 \left(\frac{\ln 10}{10}\right) 10^{\frac{x}{10}} \int_0^{\infty} \exp\left[\frac{2\pi d}{S} z \left\{ \cos z J_1(z) - \sin z J_0(z) \right\}\right] \\ \times \cos\left[\frac{2\pi d}{S} z \left\{ \cos z J_0(z) + \sin z J_1(z) \right\} - 8\pi d^2 \cdot 10^{\frac{x}{10}} z\right] dz \quad (26)$$

のように表わすことができる。図9は、 $S = 100$ m、 $d = 64$ m の場合について、(26) 式から数値計算によって求めた結果と、シミュレーション計算によるヒストグラムとを比較したものである。 $f(x)$ は、相対値の分布になったことがわかる。なお、(26) 式の数値計算は、 d が小さい場合に行なうことは、きわめて困難である。

4. 一実音源モデル⁴⁾ 前節の指数分布モデルの解析では、騒音の評価においてきわめて重要である L_{α} の値を、比較的簡単な式で表示するまでには至らなかった。一般に、密度関数が表示されても、パーセント表示式で表示することは困難であり、指数分布モデルの場合にも、同様の困難が伴ったわけである。ここでは、指数分布モデルと、より簡単な一実音源モデル(音源が一つだけのモデル)によってほぼ等価になるように近似し、その結果から、 L_{α} を与える式を導出した。一実音源モデルは図10に示すように、無限に長い車線上に、音響出力 $\alpha \times W$ の実音源が1個だけ存在するモデルである。0 実から実音源までの距離を x とする。 x は確率変数で、その密度関数 $f(x)$ には、一つの未定定数 B が含まれているものとす。観測点における音圧レベル SPL の x の単調減少関数として、

$$SPL = PWL + 10 \log_{10} \frac{a}{4\pi} \frac{1}{d^2 + x^2} \quad (27)$$

とあらわされる。ただし、 PWL は指数分布モデルにおける PWL と同じ値である。ここで、

$$I = \frac{a}{4\pi} \frac{1}{d^2 + x^2} \quad (28) \quad f(x) = \frac{2B}{S} e^{-\frac{\pi B}{S^2} x^2} \quad (29)$$

と置く。 $d \rightarrow 0$ のとき、 $a = 1$ 、 $B = 1$ となるように、 a 、 B を与えれば、 $d \rightarrow 0$ のとき、 $I = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{x^2}$ となるので、

$$P(I) = \frac{1}{2\sqrt{\pi} S} I^{-\frac{3}{2}} e^{-\frac{1}{4S^2} I} \quad (30)$$

となり、(13) 式と全く一致する。すなわち、 $d \rightarrow 0$ では、このモデルは、指数分布モデルと全く等価となる。次に、 I の平均 $\bar{I}$ 、および分散 σ_I^2 を求めると、それぞれ以下のようになる。

$$\bar{I} = \int_0^{\infty} \frac{a}{4\pi} \frac{1}{d^2 + x^2} f(x) dx = \frac{aB}{4dS} e^{\frac{\pi B^2 d^2}{S^2}} \text{erfc}\left(\frac{\sqrt{\pi} B d}{S}\right) \quad (31)$$

$$\sigma_I^2 = \int_0^{\infty} \left(\frac{a}{4\pi} \frac{1}{d^2 + x^2}\right)^2 f(x) dx - \bar{I}^2 = \left(\frac{a}{4\pi}\right)^2 \frac{\sqrt{\pi} B}{S d^3} \left(\frac{\pi B^2 d^2}{S^2}\right)^{\frac{1}{4}} e^{\frac{1}{2} \frac{\pi^2 d^2}{S^2}} \cdot W_{-\frac{1}{2}, -\frac{3}{2}}\left(\frac{\pi B^2 d^2}{S^2}\right) - \bar{I}^2 \quad (32)$$

ただし, $W_{k,\mu}(z)$ は Whittaker の関数である。 $\bar{I} = \frac{1}{4dS}$ とおいて, (31)式から A を求めると,

$$A = e^{-\frac{\pi B^2 d^2}{S^2}} \frac{1}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\pi} B d}{S}\right)} \quad (33)$$

となる。上記の A を (32) 式に代入し, $\sigma_z^2 = \frac{1}{32\pi d^3 S}$ から定数 B を求めることができればよいわけであるが, 任意の d について, B を簡単な形で表すことはきわめて困難である。そのため, d が十分大きいとき, 両分散が一致するように考える。今, $z = \frac{\pi B^2 d^2}{S^2}$ とおいて, $z \rightarrow \infty$ とし, $W_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{4}}(z)$ の漸近展開を用いると,

$$\sigma_z^2 \sim \left(\frac{1}{4\pi}\right)^2 \frac{\sqrt{\pi} B}{S d^3} z^{-\frac{1}{2}} \left(1 - z^{-1} + \frac{9}{4} z^{-2}\right) - \left(\frac{1}{4dS}\right)^2 \quad (34)$$

$\operatorname{erfc}(\sqrt{z})$ についても漸近展開を行ない, 分散が一致するようにすると, $z \sim \frac{1}{2} + \sqrt{\pi d S}$ となる。したがって, $B \sim \frac{1}{\sqrt{\pi d S}} \sqrt{1 + 2\sqrt{\pi d S}}$ ($d \rightarrow \infty$) となる。したがって, B は $d \rightarrow 0$ で $B \rightarrow 1$, $d \rightarrow \infty$ で上記の B となるようなパラメータである必要がある。この点を考慮し, B として,

$$B = \frac{\frac{S}{\sqrt{2\pi} d} \sqrt{1 + 2\sqrt{\frac{\pi d}{S}}}}{1 + \frac{S}{\sqrt{2\pi} d} \sqrt{1 + 2\sqrt{\frac{\pi d}{S}}}} \quad (35)$$

を採用した。一方, 観測実における音圧レベルが (29) 式のように, x の単調減少関数として表わされることから, 一音源モデルで, L_α を与える x は,

$$\int_0^x f(t) dx = \int_0^x \frac{2B}{S} e^{-\frac{\pi B^2}{S^2} t^2} dt = 0.0\alpha \quad (36)$$

なる関係から定められる。すなわち, 一音源モデルの L_α の値は次式で表される。

$$L_\alpha = \text{PWL} + 10 \log_{10} \left[\frac{1}{4\pi B} e^{-\frac{\pi B^2 d^2}{S^2}} \frac{1}{\operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{\pi} B d}{S}\right)} \frac{1}{d^2 + \left(\frac{S}{\sqrt{2\pi} B}\right)^2 C_\alpha^2} \right] \quad (37)$$

ただし, $\int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{0.0\alpha}{2}$ である。

C_α の値は, 正規分布表から求められるが, たとえば, $\alpha = 50$ のとき, $C_\alpha = 0.67449$ である。図 11 は $L_\alpha - L_{50}$ と d/S の関係, 図 12 は L_{50} の距離による減衰の様子を示した。パワーが分布する場合, 多車線の場合にも同様の取扱いが可能である。

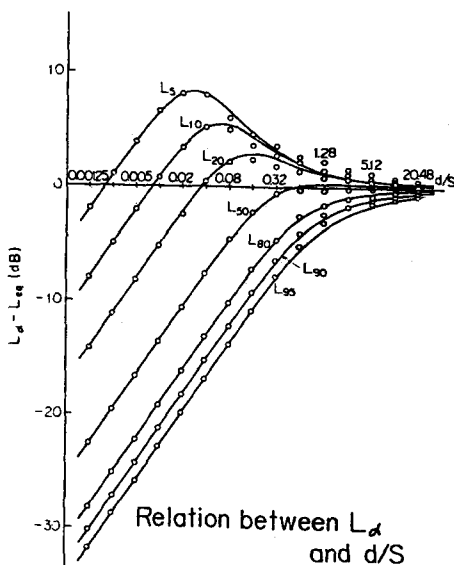


図 11. (36)式に基づいて計算した $L_\alpha - L_{50}$ と d/S の関係。○印はシミュレーション計算の結果。

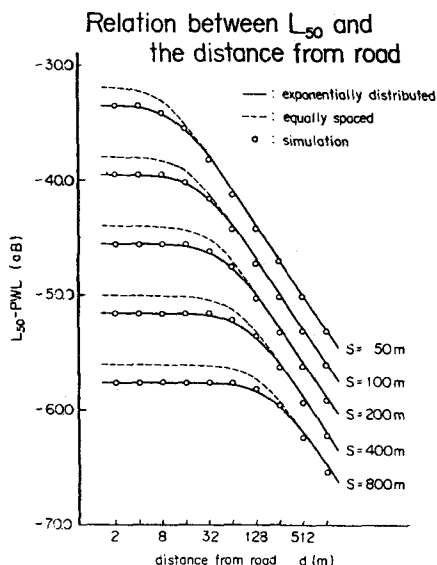


図 12. L_{50} の距離による減衰。実線は (36) 式。○印はシミュレーション計算の結果, 破線は等間隔モデルによる値。

5. アーラン分布モデル⁷⁾ アーラン分布モデルは、車頭間隔の分布が、アーラン分布にしたがうようなモデルで、その密度関数は、

$$f(x) = \frac{1}{(k-1)!} \left(\frac{k}{S}\right)^k x^{k-1} e^{-\frac{k}{S}x} \quad (38)$$

で示される。 $k=1$ のときは、指数分布となり、 $k \rightarrow \infty$ のときは、確率1で S という値をとる。したがって、アーラン分布モデルは、指数分布モデルと、等間隔モデルの中間に位置し、特別の場合に両モデルを含むという重要なモデルと考えられるが、このモデルについては、従来、あまり解析が進んでいない。Blumenfeld and Weiss⁸⁾と著者⁹⁾は、それぞれ独立に、異なった方法で、このモデルに基づく解析を行ない、音の強さの平均値 $\bar{I}$ 、および分散 $\sigma_I^2(k)$ を算出しているが、それらは次式で示される。 $\bar{I}$ は等間隔モデル、指数分布モデルの場合と同じである。

$$\bar{I} = \frac{W}{4dS} \quad (39) \quad \sigma_I^2(k) = -\left(\frac{1}{4dS}\right)^2 + \frac{1}{32\pi d^3 S} + \frac{1}{16\pi d^3 S} \int_0^\infty \frac{\sin x}{\left(1 + \frac{Sx}{2kd}\right)^2} dx \quad (40)$$

音圧レベルの平均値や中央値の、等間隔モデルと指数分布モデルにおける差は、2〜3 dB である。したがって、アーラン分布モデルにおけるそれらの値の位相性による変化も、その範囲内にあることになる。

6. Excess attenuation を考慮に入れたモデル 上述までのモデルは、いずれも、距離による音の強さの減衰のみを考慮に入れたモデルである。実際には、種々の要因による excess attenuation が考えられるが、これを考慮に入れたモデルはきわめて少ない。著者は空気による音の吸収を考慮に入れた指数分布モデルを想定して、その解析を行なった。⁹⁾ 空気による吸収

の係数を m とすると、観測点における $\bar{I}$ は、

$$\bar{I} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\pi} \frac{e^{-m\sqrt{d^2+x_i^2}}}{d^2+x_i^2} \quad (41)$$

となり、その平均値 $\bar{I}(m)$ は、

$$\bar{I}(m) = \frac{1}{4dS} \frac{2}{\pi} K_0(md) \quad (42)$$

となる。ただし、一般に、 $K_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{t-1}{(t^2+z^2)} K_0(t) dt$ である。 $(K_0(t))$ は0次の第2種変形 Bessel 関数

空気による吸収を考慮に入れたときと、入れないときとの、エネルギー平均レベルを ΔL としたとき、 m

をパラメータとして、 ΔL と d の関係を示したものが図13である。破線は、はじめ吸収を考慮に入れないで計算した値に、距離 d のみによる吸収を考えた場合の値である。防音壁がある場合の指数分布モデルについても検討を加えたが¹⁰⁾ L_{eq} , L_5 などは観測点に壁に近いほど減音効果が大さいが、交通量が少ない場合の L_{50} , L_{95} などは、受音点が壁の近くにある方が、はなれた時より減音効果が小さいことが判明している。

7 おわりに、距離減衰のみを考慮に入れたモデルについては、かなり解析が進んでおり、交通流モデルの差による、観測点における音圧レベルの差はあまり大きくないようである。しかし、excess attenuation を考慮に入れた場合には、なお、検討すべき重要な問題が残っており、今後、この方面の検討が必要である。

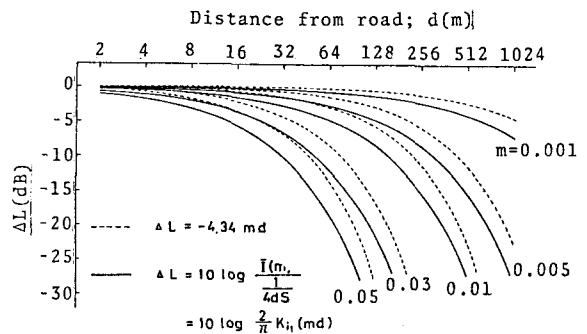


図13. 空気による吸収を考慮に入れたときと入れないときのエネルギー平均レベルの差 (本文6. 参考)

- 文献 1) 主司光他：日本音響学会誌 19(3), 1953, 2) Johnson D.R. et al.: J. Sound. Vib., 7(3), 1968, 3) 高木興一他：日本音響学会誌 33(11), 1977, 4) Takagi, K.: J. Sound. Vib., 36(3), 1974, 5) 高木興一他：日本音響学会誌 33(6), 1977, 6) 高木興一他：日本音響学会講演論文集, 1977, 7) 高木興一他：日本音響学会講演論文集 1976, 8) Blumenfeld et al.: J. Sound. Vib., 1975, 9) 高木興一他：日本音響学会講演論文集 1975, 10) 高木興一：日本音響学会講演論文集, 1977