Random Points System モデルに基づく道路交通騒音の 低次モーメント評価と簡易的分布評価†

山口 静馬*・太田 光雄*・永井 一則*

Lower Order Moment Evaluation and a Simplified Probability Evaluation
for Road Traffic Noise Based on the Random Points System Model
Shizuma YAMAGUCHI*, Mitsuo OHTA* and Kazunori NAGAI*

1. ま え が き

本稿では、交通流に対する従来の限定的理想モデル^{1),2)}を一般化し、Random Points System に対する R. L. Stratonovich の考察法³⁾を用いて、等間隔、指数分布、アーラン分布モデルなど公知の特定モデルに限定しない任意交通流形態に適用できる一統計的評価法をまず与え、従来の結果との関連性に触れてその一般性を示した。また、騒音評価に関する簡易的一方法を提案した。

2. 問題の設定と相関特性の一般表示

問題を明確にするため1車線道路に限定する。Fig. 1のように、任意仮搬環境のもと、道路上のランダムな地点 ζ_k にある k 番目の車が x なる点 P に及ぼす騒音の音圧またはエネルギー影響波形を $w(x, \zeta_k)$ とする。車の出力音響を Y_k とすれば、P 点での合成音圧(またはエネルギー)波形は次式となる。

$$Z(x) = \sum_{k=1}^{N(x)} Y_k \cdot w(x, \zeta_k) \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \kappa_1[Z(x_1)] &= E[Y_k] \int_{x_1-L}^{x_1+L} g_1(\zeta) w(x_1, \zeta) d\zeta \\ \kappa_2[Z(x_1)Z(x_2)] &= E[Y_k^2] \int_{x_1-L}^{x_1+L} \int_{x_2-L}^{x_2+L} g_1(\zeta) w(x_1, \zeta) w(x_2, \zeta) d\zeta \\ &\quad + E^2[Y_k] \int_{x_1-L}^{x_1+L} \int_{x_2-L}^{x_2+L} g_2(\zeta, \zeta') w(x_1, \zeta) w(x_2, \zeta') d\zeta d\zeta' \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

(2)式の $\kappa_2[Z(x_1)Z(x_2)]$ 表示の $g_2(\zeta, \zeta')$ に着目すると、これは、 $g_2(\zeta, \zeta') = \{\beta(\zeta, \zeta') - 1\} \rho(\zeta)$ で与えられる⁵⁾。 $\rho(\zeta)$ は単位距離当りの平均台数で、 $\beta(\zeta, \zeta') d\zeta'$ は地点 ζ に車が存在するとの条件下で地点 ζ と $\zeta' + d\zeta'$ 間に車が存在する確率である。したがって、 $\kappa_2[Z(x_1)Z(x_2)]$ はつぎようになる。

$$\begin{aligned} \kappa_2[Z(x_1)Z(x_2)] &= E[Y_k^2] \int_{x_1-L}^{x_1+L} \rho(\zeta) w(x_1, \zeta) w(x_2, \zeta) d\zeta \\ &\quad + E^2[Y_k] \int_{x_1-L}^{x_1+L} \int_{x_2-L}^{x_2+L} [\beta(\zeta, \zeta') - \rho(\zeta')] \rho(\zeta) w(x_1, \zeta) w(x_2, \zeta') d\zeta d\zeta' \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 1 Flow of random point sources on single lane road

ここに、 $N(x)$ は考察区間内のランダム車両数を表わす任意の計数過程で、 Y_k は互いに ζ_k の分布とは独立して等しい揺らぎ分布をもつものとする。また、 $w(x, \zeta_k)$ としては、田園や都市環境など、さまざまな空間伝搬機構モデルを考えうる⁴⁾。

文献3の統計的解析法を用いると、 $Z(x)$ に対する平均と共分散はつぎのごとく算出される(任意次数の多次相関関数も系統的に求めうるが、ここでは2次までの低次統計量だけに留めた)。ただし、 $g_1(\zeta), g_2(\zeta, \zeta')$ は任意の計数過程 $N(x)$ を規定するための一種の分布関数列である⁵⁾。

† 第4回システムシンポジウムで発表(昭53・7)

Acoustical Society of America, Acoustical Society of Japan, Joint Meeting で発表(昭53・11)

第10回確率システムシンポジウムで発表(昭53・11)

* 広島大学工学部 広島市千田町 3-8-2

(Received August 20, 1979)

D. E. Blumenfeld and G. H. Weiss²⁾ は車配置を均一モデル ($\rho(\xi)=\rho$) に限定し、(3)式と類似の表現を導いているが、それは本章におけるように一般理論としてのより広範な視野から自然に見い出されたものではなく、相関関数といった2次モーメント量の定義式にいきなり着目して、個別的に考察されている点には特に留意する必要がある。

今特に、1) 各車両の出力音響パワーが一定値 (Q とする) を示し、2) 騒音伝搬機構が自由音場で無限長道路、3) 車配置が道路上で均一な場合、の限定モデルに着目する。この時、上式は次式となる。

$$\begin{aligned} \kappa_2[Z(x_1)Z(x_2)] &= \frac{Q^2\rho}{16\pi d} \left\{ \frac{2}{(x_2-x_1)^2+4d^2} - \frac{\rho\pi}{d} \right. \\ &\quad + \frac{2}{d} \int_0^\infty \beta^*(\theta) \exp\{-(x_2-x_1)\theta\} \\ &\quad \cdot \sin(2d\theta)d\theta \left. \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

ただし、 $\beta^*(\theta)$ は車頭間隔がもつ確率密度関数 $P(\cdot)$ のラプラス変換 $P^*(\theta)$ を用いて、

$$\beta^*(\theta) = \frac{P^*(\theta)}{1-P^*(\theta)} \quad (5)$$

で与えられる。車頭間隔分布として、つぎの統計的ラグール展開形一般表示を導入しよう。

$$P(\xi) = \frac{1}{\Gamma(m)s^m} \xi^{m-1} e^{-\xi/s} \sum_{n=0}^{\infty} B_n L_n^{(m-1)}\left(\frac{\xi}{s}\right) \quad (6)$$

ここに上式のパラメータ m, s は、車頭間隔の平均 μ_ξ 、およびその分散 σ_ξ^2 から $m=(\mu_\xi/\sigma_\xi)^2$, $s=\sigma_\xi^2/\mu_\xi$ のごとく求められる (積率法)。このとき $P^*(\theta)$ は、つぎのように見い出される。

$$\begin{aligned} P^*(\theta) &= \frac{1}{s^m \left(\theta + \frac{1}{s}\right)^m} \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left(\frac{\theta}{\theta + \frac{1}{s}}\right)^n \\ A_n &\triangleq \left\langle L_n^{(m-1)}\left(\frac{\xi}{s}\right) \right\rangle_\tau \quad \langle \cdot \rangle_\tau: \xi \text{ に関する平均操作} \end{aligned} \quad (7)$$

(4)式に対するスペクトラム密度 $S_z(k)$ (k : wave number) は、

$$\begin{aligned} S_z(k) &= \frac{Q^2\rho}{16\pi^2 d} \left[\frac{\pi}{2d} e^{-2d|k|} - \frac{\rho\pi^2}{d} \delta(k) \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{d} e^{-2d|k|} \int_0^\infty \beta(x) \cos kx dx \right] \quad (8) \end{aligned}$$

で与えられる。さらに(4)式の表示は従来の等間隔、指数分布およびガンマ分布モデルに基づく公知の結果をスペシャル・ケースとして含むことも確認できる。

3. 騒音評価の簡易的手法

実用的見地からは正確さを犠牲にしても、できる

Fig. 2 A comparison between theory and experiment for L_s in a case of single-lane road with the same type of vehicle and m (in Eq. (6))=2.5. Experimental sample points are marked by (○). Theoretical curves are shown by (—●—) (cf. Eq. (9)), (---●---) (cf. Eq. (10)) and (—○—) (cf. Eq. (11))

限り簡単な評価手法が望まれ、本章では、特につぎの二つの立場から、観測容易な車の位置と車間距離の分布情報のみで定まる低次統計量で簡易的に評価しよう。すなわち、1) 任意の分布形状に対しても常に同一形式で成立するような騒音評価量 (たとえば L_α ($\alpha=5, 10, \dots$)) のある数学的関係式を見出し、これを利用する方法、2) 音の強さに関する分布形状の大筋を捉え、これを低次統計量のみで説明できる近似的分布関数で表現し、評価量 L_α を近似的に推定する方法である。本稿では、前者の場合においては公知のChebychev不等式:

$$P(|Z - \langle Z \rangle| \geq K\sigma_Z) \leq \frac{1}{K^2} \quad (9)$$

を、後者の場合はつぎの二つの簡易的分布関数:

$$P_Z(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Z} \exp\left\{-\frac{(Z - \langle Z \rangle)^2}{2\sigma_Z^2}\right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} P_Z(Z) &= \frac{1}{\Gamma(m)s^m} e^{-Z/s} Z^{m-1}, \\ ms &= \langle Z \rangle, \quad ms^2 = \sigma_Z^2 \end{aligned} \quad (11)$$

を用いる。目的の騒音評価量 L_α は近似的に

$$L_\alpha = 10 \log_{10} \frac{Z_\alpha}{I_{ref}}, \quad I_{ref} = 10^{-12} \text{ (watt/m}^2\text{)} \quad (12)$$

から求められる。ここに Z_α は音の強さの $(100-\alpha)\%$ 点である。Fig. 2 は自由音場の仮定のもとに(2)式および(4)式から平均、分散を求め、これらを(9)式から(11)式の $\langle Z \rangle, \sigma_Z^2$ の部分に代入し、まず L_5 に対する理論値を算出した後、実験値との比較を $\rho \cdot d$ の種々の値に対して行ったものである。なお、実験値は各車両間の車頭間隔をガンマ乱数のもとにまず決定

し、考察対象区間に存在する各車両からの合成エネルギーに関する時系列を計算機内で模擬作成し、この変動分布から求めたものである。

多大の援助をいただいた畠山一達、生田顕、上本忍の3氏に深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本音響学会道路騒音調査委員会：道路交通騒音の予測における数学モデルと評価量について (1975)
- 2) D.E. Blumenfeld and G.H. Weiss: Journal of Sound and Vibration, **41**-1, 93/102 (1975)
- 3) R.L. Stratonovich: Topics in the Theory of Random Noise, 143/174, Science Publishers, New York (1963)
- 4) 太田, 山口, 広光: 日本音響学会誌, **33**-12, 672/675 (1977)
- 5) 山口, 太田, 西村: 第4回システムシンポジウム講演論文集, 135/140 (1978)
- 6) K. Takagi, K. Hiramatsu, T. Yamamoto and K. Hashimoto: Journal of Sound and Vibration, **36**-3, 417/431 (1974)