

モンテカルロ法による交通騒音の推定

ESTIMATION OF TRAFFIC NOISE USING
THE MONTE CARLO METHOD庄司 光*・山本 剛夫**・中村 隆一***・
橋本 和平****・片山 徹*****By Hikaru Shoji, Takeo Yamamoto, Takakazu Nakamura,
Kazuhei Hashimoto and Toru Katayama

1. 緒 言

近年における自動車数の急激な増加にともなう、交通騒音は都心部および郊外において主要な騒音源となりつつある¹⁾。庄司・山本・中村はすでに、交通騒音軽減のための基礎的研究として、直線状の道路を一定速度、等間隔で走行する車両群のモデルを想定して、道路と直角方向の地点における音圧レベルの分布を求め、その最大値、平均値、中央値等を、車線と観測点の間の距離の関数として計算した²⁾。しかし、実際の道路における交通流では、このモデルのように車両が一定速度、等間隔で走行することはまずないと考えられ、一般に交通量に応じて複雑な挙動を示す。後に述べるように一定の条件が満たされているとき、交通流は近似的にポアソン分布をすることが知られているので、本報ではポアソン分布が成立するような交通流モデルを想定して、道路と直角方向の地点における音圧レベルの分布ならびに、距離による減衰特性を考察した。等間隔モデルでは、音圧レベルの分布形を解析的に求めることが可能であったが、ポアソン分布モデルでは解析的な取り扱いが困難である。そこで筆者らはモンテカルロ法によって車両の運動をシミュレートして音圧レベルの分布形を推定し、車線と観測点との間の距離の増加による音圧レベルの減衰の状況を調べた。また、実際に交通流がポアソン分布をしているような場所を4カ所選んで実測を行ない、シミュレーションによる計算の結果と比較した。

2. 高速道路における交通流

(1) 交通流の分布と車頭間隔

交差点や分岐路、あるいは交通信号その他の障害物のない道路において、交通量が比較的少なく、個々の車両が互いに独立に走行する場合には交通流はポアソン分布

をすることが知られている³⁾。すなわち、ある観測地点において時間 t の間に n 台の車両が観測される確率は、

$$P_n(t) = \frac{(Nt)^n}{n!} e^{-Nt} \dots\dots\dots (1)$$

と与えられる。ただし上式において、

N : 単位時間内の平均の通過車両台数

t : 時間間隔

n : 通過する車両の台数

である。渡辺は、名古屋市内の市街地道路における観測の結果、主道路の交通流がこれに接続する副道路の交通流による影響を受けない場合は、交通量が約 1000 V.P.H. (vehicles per hour) 以下の範囲であれば、ほぼポアソン分布にしたがうと報告している⁴⁾。このように、ある時間間隔の間に通過する車両数がポアソン分布にしたがう時、その車頭時間間隔の確率密度関数 $P(t)$ はつぎのような指数分布形として与えられる。

$$P(t) = \frac{d}{dt} \{1 - P_0(t)\} = Ne^{-Nt} \dots\dots\dots (2)$$

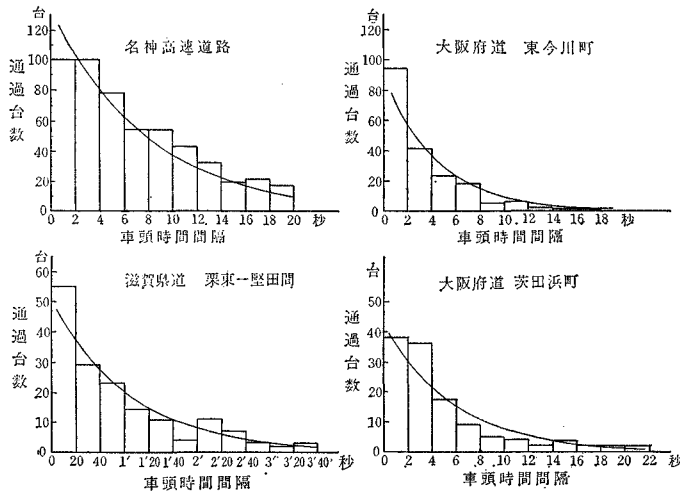
$$0 \leq t < \infty$$

(2) 車頭時間間隔の測定

上に述べた理論が実際の交通流の場合に当てはまるかどうかを調べるために、名神高速道路、滋賀県道、大阪府道2カ所の計4カ所において車頭時間間隔の実測を行なった。測定方法は、車線上の一定点を車両が通過するごとに観測者の一人が合図を発し、別の一人がその都度ストップウォッチによって車頭時間間隔の累計値を読み取って記録するという方法と、8mm 撮影機 (ELMO 8 R-T) で現場の交通流を撮影し、のちほどそれを読み取るという方法を併用した。測定の結果は図-1に示すとおりである。図中の曲線は、指数分布を仮定した場合の理論頻度数を示している。走行中の自動車においては車両自身の大きさのほかに、安全な走行を持続するための最小車頭間隔が存在するので、車頭間隔のごく短い範囲で、実測値が理論値より小さくなくてもよいはずであるが、図-1では実測値と理論値とはかなりよく一致している。この実測値の理論値への適合性を χ^2 検定によ

* 正会員 医博 京都大学教授 工学部衛生工学教室
 ** 正会員 医博 京都大学教授 工学部衛生工学教室
 *** 正会員 京都大学助手 工学部衛生工学教室
 **** 学生員 工修 京都大学大学院 工学部衛生工学教室
 ***** 正会員 大阪府衛生部 環境衛生課

図-1 車頭時間間隔実施例
 曲線は指数分布を仮定した場合の理論頻度



って検討してみた結果、いずれも車頭時間間隔は指数分布とみてさしつかえないことがわかった。

3. 交通騒音の解析

(1) 騒音の伝播

庄司・山本・中村によれば、走行中の車両から発生する騒音は点音源としての伝播特性を示すので²⁾、いま、地表面その他の障害物による音の反射、吸収、屈折等を無視すれば、測定点における音圧レベル SPL は次式のようになる(図-2 参照)。

$$\begin{aligned}
 SPL = 10 \log_{10} & \frac{1}{4\pi} \left(\frac{W_1}{d^2 + x_1^2} + \frac{W_2}{d^2 + (x_1 + x_2)^2} \right. \\
 & + \frac{W_3}{d^2 + (x_1 + x_2 + x_3)^2} + \dots + \frac{W_{-1}}{d^2 + x_{-1}^2} \\
 & + \frac{W_{-2}}{d^2 + (x_{-1} + x_{-2})^2} + \frac{W_{-3}}{d^2 + (x_{-1} + x_{-2} + x_{-3})^2} \\
 & \left. + \dots \right) \dots \dots \dots (3)
 \end{aligned}$$

ただし、

d : 観測点と車線との垂直距離 (m)

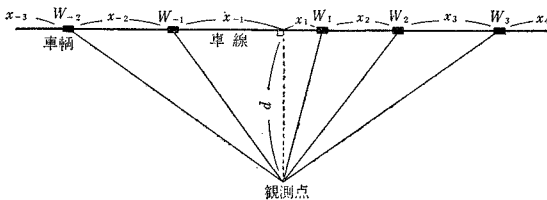
x_i : 車頭間隔 (m)

W_i : 走行車両の音響パワー (watt)

(2) 走行車両の音響パワーレベルの測定

図-2 指数間隔交通流モデル

W_i : 車両の音響出力 (watt)
 x_i : 車頭間隔 (m)
 d : 車線と観測点との距離 (m)



筆者らは先に述べたように車頭間隔が指数分布をすることを実測によって確認したが、式(3)の計算に先だって、さらに走行車両の音響パワー W_i がどのような分布をしているかを明らかにする必要がある。そこで車種別の音響パワーレベルを走行状態において実際に測定してみた。測定場所は滋賀県道栗東-堅田線新田付近で、道路端より約 5m、地表面より 1m の点における音圧のピークレベルを測定した。道路上には 50cm 間隔に白線を引き、各車両ごとに、それが測定点から何メートルの距離を通過したかを記録して、各車両の音響パワーレベルを次式によって計算した。

$$PWL = SPL + 11 + 20 \log_{10} r$$

ただし、

PWL : 音響パワーレベル (watt)

SPL : 音圧のピークレベル (db)

r : 測定点と通過車両との最短距離 (m)

計算の結果は表-1 に示すとおりである。これら相互の車種別の平均値の差の検定を行なった結果、バスと大型トラックの間には有意差が認められず、また、オートバイ、小型トラック、乗用車、ライトバンのそれぞれの間にも有意差は認められなかった。したがってこれら6つの車種はそのパワーレベルによって、バスと大型トラックからなるグループと、オートバイ、小型トラック、乗用車およびライトバンからなるグループの2つに分類することができる。2つのグループの交通量の比は約 1:3 になっている。

表-1 車種別音響パワーレベル

車種	バス	大型トラック	小型トラック	乗用車	オートバイ	ライトバン
音響パワーレベル (db)	118	117	112	110	109	108
観測数	8	45	68	43	13	32
音響パワーレベル (db)	117			110		
観測数	53			156		

ここで x_i が前述のごとく、指数分布をもつときには、式(3)の値を解析的に求めることが困難なので、モンテカルロ法によるシミュレーションを応用した。

(3) モンテカルロ法によるシミュレーション

モンテカルロ法を用いて、車頭間隔が指数分布をするような自動車走行をシミュレートする場合には、まず指数分布にしたがうような数多くの車頭間隔の標本を求める必要がある。時間で表わした車頭間隔 t_i の確率密度関数は式(2)で示されるから、距離で表わした車頭間隔 x_i の確率密度関数は、平均速度を v とすれば、

$$p(x) = \frac{N}{v} e^{-\frac{N}{v}x} \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。

$$r = \int_0^x \frac{N}{v} e^{-\frac{N}{v}x} dx \dots\dots\dots (5)$$

とおき、 r に $(0, 1)$ の間の一様乱数を与える。たとえば、いま n 個の一様乱数を取り、それらが r_1, r_2, \dots, r_n であったとすれば、式(5)から、おのおのの r の値に対応する n 個の x の値、 x_1, x_2, \dots, x_n が求まる(図-3)。このようにして得られた x の値は、指数分布をする母集団から抽出された標本、すなわち指数乱数であると考えられる。 W_i は道路や車種構造によってその分布が異なるが、ここでは W_i をすべて等しいとして計算した。

シミュレーションを行なうには、かなり多くの x_i を必要とし、したがって、そのもととなる一様乱数 r についても多数の標本を必要とする。そのため普通シミュレーションを行なう場合には電子計算機によって疑似一様乱数を発生させる。疑似一様乱数の発生には種々の方法が提唱されているが³⁾、ここでは乗積採中法と呼ばれる方法を用いた。この方法は、まず既成の乱数表から2個の10けたの小数 r_1, r_2 を選んで $r_1 \times r_2$ を作り、その積(20けたの小数)の中央部から10けたを抽出して得られる小数を r_3 とし、つぎに $r_2 \times r_3$ の積の中央部10けたを抽出して r_4 を求める。以下同様にして、順次 r_5, r_6, r_7, \dots を求めていく方法である。この方法で得られる疑似乱数は1組の source numbers (r_1, r_2) に対

図-3 指数間をもつ交通流のシミュレーション

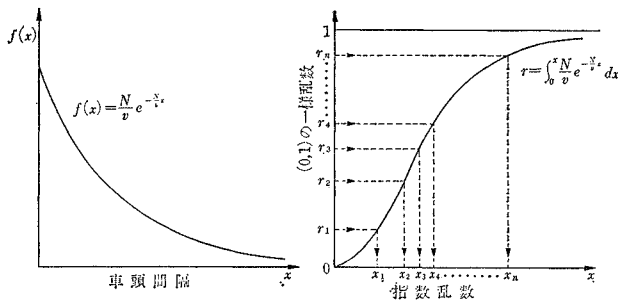
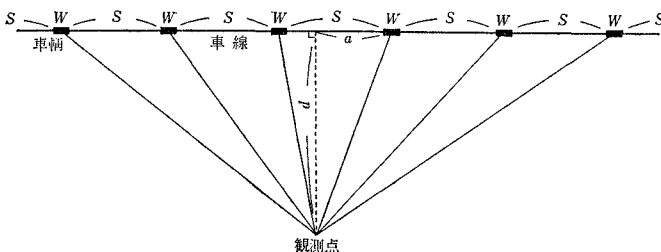


図-4 等間隔交通流モデル

W : 車両の音響出力 (watt)
S : 車頭間隔 (m)
d : 車線と観測点との距離 (m)



して、経験的に約 50 000 個程度までは一様性が保証されている。このようにして得られた多数の x_i を式(3)に代入して計算すれば、任意の観測点における SPL の値を数多く求めることができ、それによって SPL の分布形を推定することができる。なお、車両は道路上無限の彼方まで続いていると考えられるが、計算にあたっては、つぎのようにして実際に計算すべき範囲を決定した。すなわち、測定点から i 番目の車両までの距離を l_i 、おのおのの車両の音響パワーを W とすれば、

$$10 \log_{10} \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{W}{l_i^2} - 10 \log_{10} \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{W}{l_i^2} < 0.5 \text{ (db)} \dots\dots\dots (6)$$

を満足せしめる最小の n の個数だけ電子計算機で車両をシミュレートすれば十分である。これは JIS 規格による騒音測定の見誤差が 1 db まで許容されていることを考慮し、全体としての誤差を 1 db 以下におさえるためである。しかし、式(6)の l_i は確定した値ではないから、ここでは式(6)の代わりに、つぎの等間隔の場合の式から n の値を求めた(図-4 参照)。

$$10 \log_{10} \frac{1}{4\pi} \sum_{i=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{1}{d^2 + (a+iS)^2} - 10 \log_{10} \frac{1}{4\pi} \sum_{i=\pm 1}^{\pm 1/2 \cdot (n-1)} \frac{1}{d^2 + (a+iS)^2} < 0.5 \dots\dots\dots (7)$$

S は車頭間隔、 d は車線と観測点との距離、 a は観測点から車線に下した垂線と車線との交点から $i=1$ 番目の車両までの距離である。式(7)の左辺第1項は計算が可能であり、

$$10 \log_{10} \frac{1}{4\pi} \sum_{i=\pm 1}^{\pm \infty} \frac{1}{d^2 + (a+iS)^2} = 10 \log_{10} \frac{1}{4dS} \times \frac{\sinh 2\pi d/S}{\cosh 2\pi d/S - \cos 2\pi a/S} \dots\dots\dots (8)$$

となる²⁾。式(8)の右辺は周期関数であり、 $a=S/2$ のとき、最小値をとる。すなわちこの時、観測点から最短距離にある車両の影響はもっとも小さくなるから、この場合について式(7)を計算するのがもっとも安全である。また、式(7)から得られる n の値は明らかに d および S によって変わるから、いま、

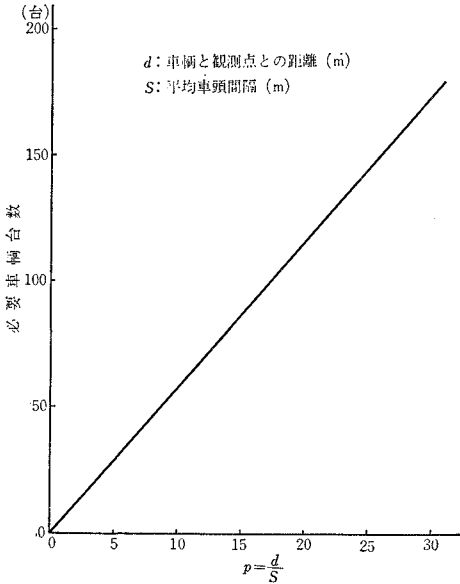
$$p = d/S \dots\dots\dots (9)$$

とおいて式(7)を書き直せば、

$$\log_{10} \frac{1}{p} \frac{\sinh 2\pi p}{\cosh 2\pi p + 1} - \log_{10} \frac{1}{\pi} \sum_{i=\pm 1}^{\pm 1/2 \cdot (n-1)} \frac{1}{p^2 + \left(\frac{1}{2} + i\right)^2} < 0.05 \dots\dots\dots (10)$$

この式 (10) から、種々の p の値について n を求めたものが 図-5 である。なお、図-5 は等間隔モデルについて計算したものであるから、実際の計算の場合は安全のため、これに若干の余裕を見込んだ台数を電子計算機で発生させた。

図-5 シミュレーションに必要な最小車両台数



(4) 音圧レベルの分布と車線からの距離による減衰

車線からの距離による音圧レベルの減衰と、その時間的な変動の状態がどのように変わるかを推定するために、上述の方法にしたがって、平均車頭間隔 S および車線から観測点までの距離 d を種々に変えて計算を行った。 $S=800$ m で、 $d=2, 4, 8, \dots, 1024$ m の場合、一つの d の値について、おのおの 350 回ずつの異なった一連の車頭間隔を発生させて計算した結果の頻度分布を 図-6 に示す。車線からの距離が大きくなるにしたがって平均の音圧レベルが小さくなるとともに、バラツキも少なくなり、時間的な変動の少ない音となる。

つぎに、種々の S の値について、車線からの距離と音圧レベルの平均値との関係を示してみると 図-7 のようになる。平均車頭間隔の短い場合ほど距離による減衰の効果が顕著である。図中、破線で示されているのは等間隔モデルを想定して計算した場合の結果である。なお、等間隔モデルの場合に用いた計算式はつぎのとおりである。

$$SPL_{\text{mean}} = PWL + 10 \log_{10} \frac{1}{2 d S} \times \frac{\sinh 2 \pi d/S}{\cosh 2 \pi d/S + \sinh 2 \pi d/S} \text{ (db)} \dots (11)$$

なお、 PWL は各車両の音響パワーレベルである。また、図-7 において縦の棒線で示した範囲は各平均値の 99% 信頼限界である。この信頼限界は χ^2 検定の結果、

正規性の否定されなかったものについては正規分布として計算し、否定されたものについては正規分布に変換して計算した。正規分布への変換方法はつぎに述べるとおりである。図-8 に示すように、まず標本の相対累積度数分布を作る。つぎに任意の標本値 y の相対累積度数 $F(y)$ を求め、これが正規分布 $f(y')$ の確率分布と等しくなるような y' を見出す。このようにすれば、近似的に正規分布に変換することができる。

図-6 音圧レベルの分布

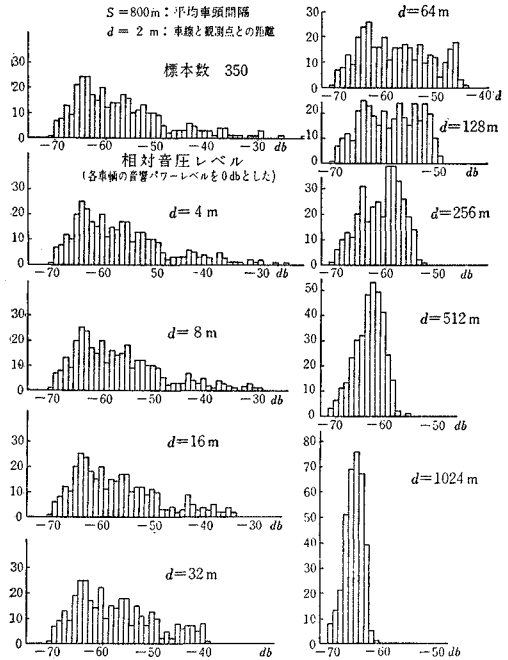


図-7 車線からの距離による音圧レベルの減衰

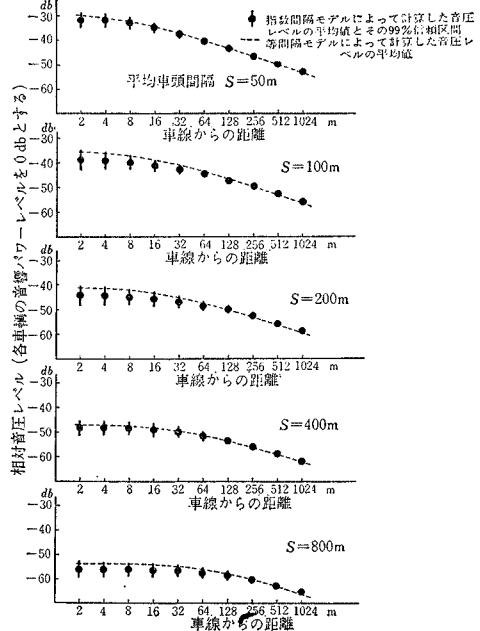
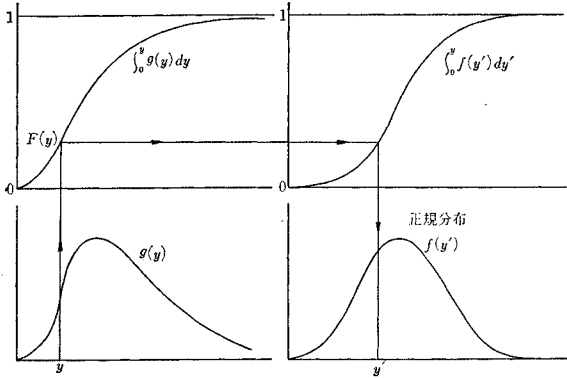


図-8 正規分布型への変換



また、平均車頭間隔と音圧レベルの平均値との関係を、車線から観測点までの距離をパラメーターとして描いてみると、図-9 (a) のようになる。図-9 (b) は同様の関係を等間隔モデルの場合について示したものであるが、両者ともに非常によく似た傾向を呈しており、音圧レベルの平均値は、平均車頭間隔の対数に関して直線的に減少する。

(5) 車種構成を考慮した場合の計算

つぎに車種による音響パワーの違いを考慮した場合の計算について述べる。車種による音響パワーの違いを考慮するという事は、式(3)の計算にあたって W_i を実際の走行車両の音響パワーの分布に則して決めるということである。ところで(2)で述べたように滋賀県道における測定の結果によれば、走行時の音響パワーレベルに関しては各種の車両を2つのグループに分けること

ができる。さらにおおのこのグループに属する車両の平均音響パワーレベルは滋賀県道における実測では117 db および 110 db となっており、これを音響パワー(watt)の比に直せば5:1になる。そこで筆者らはこの測定結果にしたがって計算を行なってみた。いま、このようにすべての車両が2つのグループに分類され、その音響パワーの比が5:1であるとすれば、式(3)の W_i は $5W$ または W のいずれかであり、その混合割合が1:3であるようにランダムに混合していると考えることができる。したがって式(3)の x_i を決める時に発生させたと同じ要領で(0, 1)の一樣乱数 r_i' を発生させ、その一樣乱数がたとえば $0 < r_i' \leq 0.25$ ならば $W_i = 5W$ を選び、 $0.25 < r_i' < 1$ ならば $W_i = W$ を選ぶようにする。ただし、ここでは相対音圧レベルを求めることを目的としているので、 $W=1$ として計算した。このようにして計算した結果を等間隔モデルおよび指数間隔等音響パワーモデルによる計算結果と比較、図示したものが図-10である。いずれの計算方式によってもあまり大きな違いはない。つぎにバスおよび大型トラック ($W_i = 5W$) の混合割合を変えた場合の音圧レベルの変化を図-11に示す。バスおよび大型トラックの混合率が2倍になると音圧レベルは約2db高くなる。

4. 実測値との比較

以上の計算結果が実測値とどの程度合致するかをみるために、つぎの4カ所において実測を行なった。

(1) 測定場所

a) 名神高速道路栗東インターチェンジ西方2kmの地点、アスファルト コンクリート舗装、縦断勾配上り1.2%、片勾配2%、約1000mの直線コースのほぼ中央で測定した。道路は、一方向について二車線で、道路の全幅員は25mである。

b) 滋賀県道栗東一堅田線・新田付近

アスファルト舗装、縦断勾配0、約1500mの直線部分のほぼ中央で測定した。道路は一方向について一車線、道路の全幅員は約7.5mである。

図-9 平均車頭間隔と平均音圧レベルとの関係

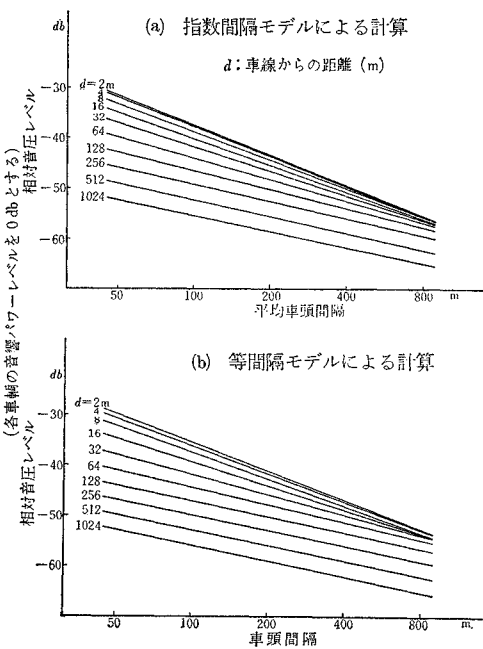


図-10 車種構成を考慮した場合の音圧レベルの距離減衰

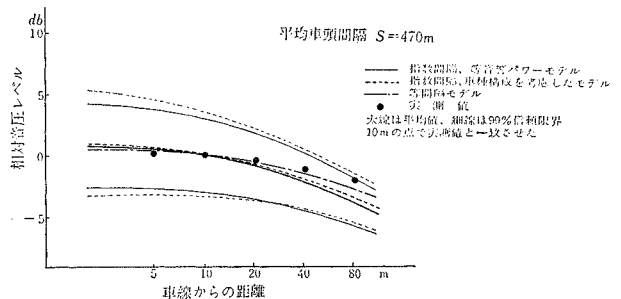
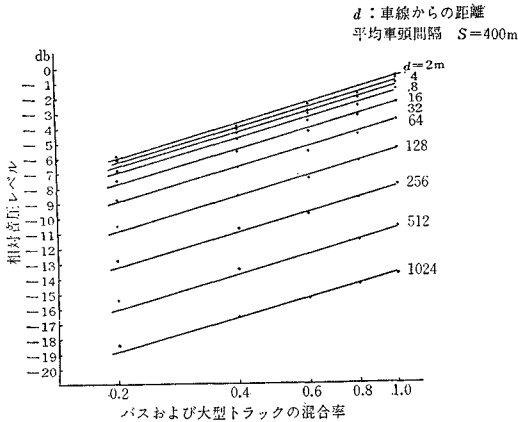


図-11 バス・大型トラックの混合率と音圧レベル



c) 大阪府道森小路一大和川線・東今川町

コンクリート舗装，縦断勾配 0，約 800 m の直線コースのほぼ中央で測定した。道路は一方向について一車線で，全幅員は約 8 m である。

d) 大阪府道茨田浜町

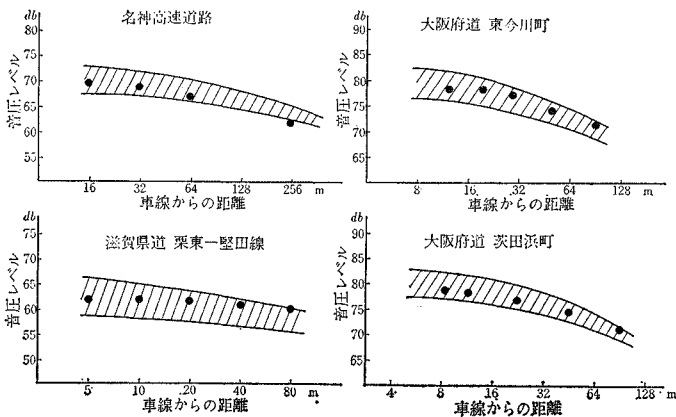
コンクリート舗装，縦断勾配 0，約 800 m の直線コースの中央付近で測定した。道路は一方向について一車線で，全幅員は約 8 m である。

(2) 測定方法

日本電子測器株式会社製 SL-20 型指示騒音計 6 台を用いて，名神高速道路では道路端より 8 m, 16 m, 32 m, 64 m, 128 m の 5 点，滋賀県道では道路中央より 5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 80 m の 5 点，東今川町および茨田浜では道路端より 0 m, 5 m, 10 m, 20 m, 40 m, 80 m のそれぞれ 6 点においていずれも同時測定を行なった。測定は 5 秒間隔で各点 50 個の瞬時値を読み取り，その平均値を算出した。なお，測定器および測定者による誤差を除くために，各測定者はすべての測定点において一回ずつ測定を行なったので，結局一つの測定点において 5~6 回の測定が行なわれ，したがって 250~300 個の瞬

図-12 実測値と計算値との比較

斜線部分は指数間隔モデルによって計算した平均値の99%信頼区間



時値が読み取られた。また，平均車頭間隔 S を求めるために，一定時間に通過した車両台数および，あらかじめ定めた 100 m の距離を車両が通過するに要した時間を測定した。

(3) 測定結果

上記の 4 つの測定場所における測定結果を図-12 に示す。図中の斜線部分は計算によって得られた平均値の 99% の信頼区間を示す。各車両のパワーレベルはすべて 0 とおいて計算し，実測値との比較に際しては車線からもっとも近い測定点における実測値と，同じ点における計算値とを一致させ，以下，車線からの距離による減衰状況を比較した。図-12 からわかるように，実測値と計算値とはかなりよく一致している。

5. 結 論

高速道路を走行する交通流をモンテカルロ法によってシミュレートして，走行中の車両から発生する騒音の伝播状況を考察した。また，このシミュレーションにおける仮定を満足するような交通状況の場所を 4 カ所選んで実測を行ない，シミュレーションを用いた計算結果と比較した。さらに等間隔モデルの場合の理論式とも比較検討した結果，つぎのような結論を得た。

- (1) 高速道路またはそれに準ずる道路を自由走行する車両の車頭間隔は指数分布にしたがう。
- (2) 計算の結果，音圧レベルはほぼ平均車頭間隔の対数に比例して減衰する。
- (3) 車種構成を考慮した計算例によれば，バスおよび大型トラックの混合率が 2 倍になれば音圧レベルは約 2 db 高くなる。
- (4) 車頭間隔が指数分布である時の，距離による音圧レベルの減衰曲線と，等間隔モデルを仮定した計算結果との間にはあまり大きな差はない。
- (5) 4 カ所における実測値をモンテカルロ法による計算値と比較した結果かなりの一致をみた。

謝辞：本研究の計算にあたって，デジタル電子計算機 KDC-I の使用を許可された京都大学計算センターに対して深甚な謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 庄司 光他：日本公衆衛生雑誌 12, (12), (1965), 831
- 2) 庄司 光他：日本音響学会誌 19, (3), (1963), 97
- 3) 毛利正光：都市計画 5, (4), (1965), 13
- 4) 渡辺新三：「交差点の交通処理に関する基礎的研究」 京都大学工学部学位論文，No. 1265
- 5) 西原 宏：制御工学, 7, (3), (1963), 127

(1967.9.19・受付)