

確率過程レベル超過問題の道路交通振動への応用

AN APPLICATION OF THE LEVEL CROSSING PROBLEM TO THE
GROUND VIBRATIONS DUE TO ROAD TRAFFIC

北村 泰 寿*・金 好 昭 彦**

By Yasutoshi KITAMURA and Akihiko KANEYOSHI

1. ま え が き

道路交通によって沿道に発生する振動は、多くの要因によって影響を受け、時間的に不規則に変動する。振動規制法(1976)では、道路交通振動の非定常性を考慮して、振動レベルの5秒間隔瞬時値100個の累積度数曲線から得られる L_{10} (80%レンジ上限値)を評価指標としている。しかし、この指標は「交通騒音測定法」に準拠したもので、多くの実測資料をもとに経験的に決められたものであり、その物理的意味付けははっきりしていない。一方、このような問題に対して、筆者の一人は不規則振動論におけるレベル超過問題の適用を試みたり。その考え方は、不規則に変動する振動の評価指標として、ある設定したレベルを超過するべく露時間(あるいは時間率)が実情に合っているのではないかとする立場に立ったものである。なお、前報では、多車線で多車種の車両がランダムに混合するとき、沿道で実測した振動速度波形が正規定常不規則過程として取り扱えると仮定した。しかし、沿道の振動としては、信号が青から赤になる一つのサイクルを問題にする必要がある。すなわち、信号によって、制御される交通流の形態から、沿道の振動は非定常不規則過程とみなさなければならない。このような場合、沿道で実測される振動波形は非定常状態からほぼ定常状態となり、そして非定常状態になるものと考えられる。

本研究では、前報に続く研究の第2段階として、多車線で多車種の車両が通過する沿道で実測した振動速度波形に、非定常部の存在を考慮したレベル超過問題を適用する。

なお、本研究で取り扱う沿道の振動波形に対して、理論的に取り扱いやすいという観点から次のような仮定を

設ける。

① 周波数構成は時間の経過とともに変わらない、すなわち周波数的には定常であると考える。

② 振幅非定常については、平均値動揺と分散値動揺の2つが大きな要因と考えられるが、平均値は0とみなして分散値動揺のみに注目する。

③ 振動波形は正規不規則過程であるとして、すでに一般的に得られている理論式を適用する。

以上の仮定は、実際の沿道の振動波形について考える場合、理想化した状態といわざるを得ない。しかし、沿道での振動数としては、実測経験より車両および地盤の固有振動に関係する周波数成分が卓越する。また、本研究で対象とする振動波形が振動速度および振動加速度であることから、その平均値は0とみなし得る。これらのことから、上記①、②の仮定は概念的に容認し得るものと考えたものである。一方、③については、正規不規則過程が工学的に多用されること、数学的取り扱いが容易になるという理由にほかならない。逆に、本研究では、このような仮定によって得られる推定値が実測値とどの程度合致するかを知ることにより、上記③の適用の可能性を確認することにもなる。

2. 理論式の誘導

不規則過程 $x(t)$ があるレベル a を正に超過する単位時間当りの回数を $n_a^+(t)$ 、レベル a の上側に滞在する単位時間当りの滞在時間を $\tau_a^+(t)$ とすると次式が得られる²⁾。

$$n_a^+(t) = \int_0^\infty \dot{x}(t) f(a, \dot{x}|t) d\dot{x} \dots\dots\dots (1)$$

$$\tau_a^+(t) = \int_a^\infty f(x|t) dx \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $f(x|t)$ は不規則過程 $x(t)$ の確率密度関数、 $f(x, \dot{x}|t)$ は $x(t)$ とその導関数 $\dot{x}(t)$ の結合確率密度

* 正会員 工修 神戸大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 工修 (株) 鴻池組 土木技術部

関数である。上式の $f(x|t)$ および $f(x, \dot{x}|t)$ を任意の不規則過程に対して決定することはきわめて難しい。このような問題に対する一つのアプローチとして、太田³⁾は、正規不規則過程が長時間スケールで異質な要因の混入により、非定常不規則過程となる場合の統一的処理方法を示している。その結果では、長時間スケールで平均値動揺と分散値動揺をとまない、またそれらの相関が許される場合について、確率密度関数 $f(x|t)$ は統計的エルミート展開形で表示されている。しかし、得られている $f(x|t)$ は複雑で、結合確率密度関数 $f(x, \dot{x}|t)$ を得ることは困難である。

本研究は、前述③の仮定より、不規則過程 $x(t)$ が正規不規則過程であるという条件のもとで、平均値および分散値動揺を考える。この場合、 $f(x|t)$ および $f(x, \dot{x}|t)$ は次式で表わされる。

$$f(x|t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left\{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right\} \dots\dots\dots(3)$$

$$f(x, \dot{x}|t) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_{\dot{x}}\sqrt{1-\rho_{x\dot{x}}}} \exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho_{x\dot{x}})} \times \left\{ \frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho_{x\dot{x}} \frac{(x-\mu_x)(\dot{x}-\mu_{\dot{x}})}{\sigma_x\sigma_{\dot{x}}} + \frac{(\dot{x}-\mu_{\dot{x}})^2}{\sigma_{\dot{x}}^2} \right\}\right] \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 μ_x, σ_x^2 および $\mu_{\dot{x}}, \sigma_{\dot{x}}^2$ はそれぞれ正規不規則過程 $x(t)$ およびその導関数 $\dot{x}(t)$ の平均値、分散を表わし、 $\rho_{x\dot{x}}$ は $x(t)$ と $\dot{x}(t)$ の相関係数である。なお、これらの値は時刻 t で定義され、 $\mu_x(t), \sigma_x^2(t), \dots$ のように時間の関数である。しかし、式の煩雑さを避けるため、式(3)、(4)も含め以下の記述において、特に断らない限り時刻 t の表示を省略する。

前述②の仮定より、式(3)、(4)の平均値 $\mu_x, \mu_{\dot{x}}$ を 0 とおき、式(1)、(2)に代入すると次式のようになる⁴⁾。

$$n_{a^+}(t) = \frac{\sigma_{\dot{x}}}{2\pi\sigma_x} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a}{\sigma_x}\right)^2\right\} \left[\sqrt{1-\rho_{x\dot{x}}^2} \times \exp\left\{-\frac{\rho_{x\dot{x}}^2}{2(1-\rho_{x\dot{x}}^2)}\left(\frac{a}{\sigma_x}\right)^2\right\} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \rho_{x\dot{x}} \left(\frac{a}{\sigma_x}\right) \left\{ 1 + \operatorname{Erf}\left(\frac{\rho_{x\dot{x}}}{\sqrt{2(1-\rho_{x\dot{x}}^2)}} \cdot \frac{a}{\sigma_x}\right) \right\} \right] \dots\dots\dots(5)$$

$$\tau_{a^+}(t) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \operatorname{Erf}\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma_x}\right) \right\} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、

$$\operatorname{Erf}(X) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^X e^{-z^2} dz \text{ (確率積分)} \dots\dots\dots(7)$$

である。

次に、沿道の振動の非定常性を表現するため、前述①の仮定のもとに、不規則過程 $x(t)$ を定常不規則過程 $y(t)$ と確関数 $\sqrt{\varphi(t)}$ の積で表わす。

$$x(t) = \sqrt{\varphi(t)} \cdot y(t) \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 $y(t)$ は平均値を 0、標準偏差を 1 とする正規定常不規則過程である。式(5)、(6)の計算に必要な $\sigma_x^2, \sigma_{\dot{x}}^2, \rho_{x\dot{x}}$ を得るため、まず $x(t), \dot{x}(t)$ の各自己相関関数 $K_{xx}(t_1, t_2), K_{\dot{x}\dot{x}}(t_1, t_2)$ および相互相関関数 $K_{x\dot{x}}(t_1, t_2)$ を求めると次式となる。

$$K_{xx}(t_1, t_2) = \sqrt{\varphi(t_1)\varphi(t_2)} K_{yy}(t_1, t_2) \dots\dots(9)$$

$$K_{\dot{x}\dot{x}}(t_1, t_2) = \frac{\dot{\varphi}(t_1)\dot{\varphi}(t_2)}{4\sqrt{\varphi(t_1)\varphi(t_2)}} K_{yy}(t_1, t_2) + \frac{\dot{\varphi}(t_2)\sqrt{\varphi(t_1)}}{2\sqrt{\varphi(t_2)}} K_{\dot{y}y}(t_1, t_2) + \frac{\dot{\varphi}(t_1)\sqrt{\varphi(t_2)}}{2\sqrt{\varphi(t_1)}} K_{y\dot{y}}(t_1, t_2) + \sqrt{\varphi(t_1)\varphi(t_2)} K_{\dot{y}\dot{y}}(t_1, t_2) \dots\dots(10)$$

$$K_{x\dot{x}}(t_1, t_2) = \frac{\dot{\varphi}(t_2)\sqrt{\varphi(t_1)}}{2\sqrt{\varphi(t_2)}} K_{yy}(t_1, t_2) + \sqrt{\varphi(t_1)\varphi(t_2)} K_{y\dot{y}}(t_1, t_2) \dots\dots(11)$$

ここに、 $K_{yy}(t_1, t_2), K_{\dot{y}\dot{y}}(t_1, t_2)$ は $y(t), \dot{y}(t)$ の自己相関関数、 $K_{y\dot{y}}(t_1, t_2)$ あるいは $K_{\dot{y}y}(t_1, t_2)$ は $y(t)$ と $\dot{y}(t)$ の相互相関関数である。しかるに、 $y(t)$ が平均値 0、標準偏差 1 の正規定常不規則過程であることを考慮すると、式(9)~(11)から $\sigma_x^2, \sigma_{\dot{x}}^2, \rho_{x\dot{x}}$ は次式のように得られる。

$$\sigma_x^2 = \varphi(t) \dots\dots\dots(12)$$

$$\sigma_{\dot{x}}^2 = \{\dot{\varphi}(t)^2/4\varphi(t) + \varphi(t)\sigma_y^2\} \dots\dots\dots(13)$$

$$\rho_{x\dot{x}} = \dot{\varphi}(t)/\{\dot{\varphi}(t)^2 + 4\varphi(t)^2\sigma_y^2\}^{1/2} \dots\dots\dots(14)$$

ここに、 σ_y^2 は $\dot{y}(t)$ の分散で、 $y(t)$ のパワースペクトルから次式のように計算によって求める。

$$\sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\dot{y}}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S_y(\omega) d\omega \dots\dots(15)$$

ここに、 $S_y(\omega), S_{\dot{y}}(\omega)$ は $y(t)$ および $\dot{y}(t)$ のパワースペクトル密度関数である。

3. 沿道の振動への適用

沿道の振動を取り扱う場合、振動規制法に合せて振動レベルを対象とすることが望ましい。しかし、振動レベルの波形を得るためには、振動加速度の実効値に人体感覚補正を行い、時定数を 1 秒にするための特別の電気回路が必要となる。さらに、前述の式(15)の関係を確認するため、振動レベルの微分波形を同時測定することが必要である。これらの諸点から、本研究は前報¹⁾と同様に、不規則過程 $x(t)$ として振動速度波形、その導関数 $\dot{x}(t)$ として振動加速度波形を対象とする。

(1) 実験概要

測定は交通量の多い国道 43 号線(片側 3 車線または

表一 測定・処理計器

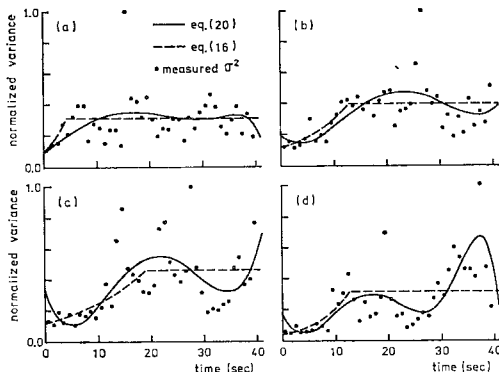
項目	計器名	タイプ	備考
振動速度	動電型換振器	保坂 MTDV-1 C	$f_0=1\text{ Hz}$
	増幅器	三栄 6L5	
振動加速度	振動レベル計	ノード LP-2	周波数特性 1~90 Hz
記録	データレコーダ	ソニー PFM-15	
処理	フィルター	リオン SA 2701 B	遮断周波数 53 Hz, 78 Hz
	リアルタイム波形解析装置	ヒューレットパッカード HP 5451 A	A・D 変換 フーリエ計算

4車線の沿道で実施した。測定場所は神戸市東灘区深江南町 (No. 1), 青木 (No. 2), 住吉南町 (No. 3), 芦屋市精道町 (No. 4), 平田北町 (No. 5) の計5か所で、道路端での上下振動を記録した。また、沿道の振動を非定常不規則過程として取り扱うため、信号が青に変わり先頭の車両が測点を通る直前から、後尾の車両が通過し終わるまでの60~80秒間 (No. 1のみ予備測定で途中までの約40秒間)の振動を1サイクルとして記録した。参考のため、測定および処理計器を表一に示す。なお、実測した記録は、ローパスフィルターでノイズなどの高周波数成分を除去し、0.01秒の時間間隔で読み取ったデジタル量で処理した。パワースペクトルについては図示することを省略するが、振動速度の定常と思われる部分のスペクトルでは、前報¹⁾と同様に10 Hz前後から15 Hz付近に高いピークがみられる。

(2) 理論適用上の二、三の問題

まず、式(8)に示す確定関数 $\sqrt{\varphi(L)}$ について若干の検討を行っておく。沿道の振動を非定常部と定常部に分けて取り扱う場合、定常部では一定値をもち、非定常部では一端は定常部に接続し、他端は0に漸近する確定関数を用いることが考えられる。そこで、非定常部には、地震動の非定常性を表現するためによく用いられる指数関数をあてはめる。この場合、

$$\varphi(t) = Ae^{Bt} \quad (A, B: \text{定数}) \dots\dots\dots (16)$$



図一 確定関数の比較 (No. 1 測点)

とすれば、 $\sigma_x^2, \sigma_{\dot{x}}^2, \rho_{x\dot{x}}$ はそれぞれ次式のように与えられる。

$$\sigma_x^2 = Ae^{Bt} \dots\dots\dots (17)$$

$$\sigma_{\dot{x}}^2 = (B^2/4 + \sigma_y^2) Ae^{Bt} \dots\dots (18)$$

$$\rho_{x\dot{x}} = B/\sqrt{B^2 + 4\sigma_y^2} \dots\dots\dots (19)$$

なお、式(16)の確定関数の場合、式(19)で σ_y^2 が一定値であることを考慮すると、相関係数 $\rho_{x\dot{x}}$ は一定値となる。一方、非定常部と定常部に分けずに、

全過程を非定常として取り扱うため、式(16)の代わりに次式のような多項式をあてはめる場合を考える。

$$\varphi(t) = \sum_{j=1}^n \alpha_j t^{j-1} \quad (\alpha_j: \text{定数}) \dots\dots\dots (20)$$

この場合、 $\sigma_x^2, \sigma_{\dot{x}}^2, \rho_{x\dot{x}}$ はそれぞれ次式のように表わされる。

$$\sigma_x^2 = \sum_{j=1}^n \alpha_j t^{j-1} \dots\dots\dots (21)$$

$$\sigma_{\dot{x}}^2 = \left\{ \sum_{j=2}^n (j-1) \alpha_j t^{j-2} \right\}^2 / 4 \sum_{j=1}^n \alpha_j t^{j-1} + \sigma_y^2 \sum_{j=1}^n \alpha_j t^{j-1} \dots\dots\dots (22)$$

$$\rho_{x\dot{x}} = 1 / \left[1 + \left\{ 2 \sum_{j=1}^n \alpha_j t^{j-1} / \sum_{j=2}^n (j-1) \alpha_j t^{j-2} \right\}^2 \times \sigma_y^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (23)$$

次に、この2つの確定関数を No. 1 測点での実測データに適用して比較する。まず、振動速度の分散 σ_x^2 が時間の経過とともに変化する様子を示したものが図一1である。なお、同図に示す実測データの分散は時間長1秒間の時系列の分散を示したものである。ここで、この部分的な分散を求めるため、1秒間という時間長を用いたのは次の理由による。2, 3秒間の時間長で求めた分散の時期的変化とあまり変わらない。さらに読み取り時間間隔が0.01秒であるため、卓越周波数が10~15 Hz程度であることを考慮すると、1秒間の標本値100個は10~15波の波数を含んでいる。一方、式(16)および式(20)の係数は実測の部分的分散に最小自乗法を適用して求めた。式(16)に対しては、非定常部と定常部の分散がほぼ一致するまで、非定常部の時間を延長して試行錯誤的に係数を求める。また、式(20)に対しては、順次項数を増すとともに、式(8)で得られる正規定常不規則過程 $y(t)$ の標準偏差を調べる。そして、 $y(t)$ の標準偏差が1に最も近い項数をもって最適な確定関数とする。

図一1の(a), (b)については、確定関数として、式(16), (20)のいずれを適用してもほぼ問題はないが、(d)については、式(20)の方が式(16)よりも分散値動揺の様子をよく表わしているようにも思われる。これ

表-2 超過回数の比較 (No. 1 測点)

Test No.	$a=0.1\text{mm/s}$		$a=0.2\text{mm/s}$		$a=0.3\text{mm/s}$		備考
	eq. (16)	eq. (20)	eq. (16)	eq. (20)	eq. (16)	eq. (20)	
1	181.5 182.0*	176.4 158**	6.3 5.7*	6.9 10**	0.0 0.0*	0.0 1**	図-1 (a)
2	278.9	272.4	42.0	43.2	2.0	3.1	
3	142.6	146.0	3.5	4.8	0.0	0.0	
4	127.5 130.7*	126.4 127**	2.7 1.8*	3.4 4**	0.0 0.0*	0.0 0**	図-1 (b)
5	194.2	201.6	23.0	24.7	0.9	1.4	
6	135.9	192.7	7.1	31.5	0.1	3.0	
7	137.1	136.2	2.8	3.1	0.0	0.0	
8	196.8 233.6*	210.7 187**	15.3 13.2*	18.8 16**	0.3 0.1*	0.6 0**	図-1 (c)
9	174.1 181.1*	161.9 149**	8.1 5.0*	15.2 17**	0.1 0.0*	0.9 1**	図-1 (d)
10	272.2	278.2	36.5	36.3	1.7	1.9	

注) *: 全定常とした場合の回数 ** : 実測回数

らの点をさらに確認するため、No. 1 測点のデータに対して、それぞれの確定関数を用いて求めた超過回数を比較すると表-2 のようになる。なお、同表には、後節での検討のため、全過程を定常と仮定した場合（全定常と略）の超過回数および実測波形から直接求めた超過回数も示した。表-2 から、確定関数の違いによって明らかに差異がみられるのはわずか1回である。これらの結果と取り扱いやすさから本研究の No. 2~5 測点の処理には、式 (16) で表現される確定関数を用いる。ここで参考のため、式 (16) の確定関数を前半の非定常部と後半の非定常部に適用して全過程の分散の時間的変化を求めた結果のうち、No. 2 測点の一部について図-2 に示す。また、同図に用いた確定関数の各係数を表-3 に示しておく。

さらに、このようにして得られた確定関数がどの程度妥当であるかを知るため、式 (8) で得られる正規定常不規則過程 $y(t)$ の標準偏差を調べた。図-3 に、 $y(t)$ の標準偏差 σ_y と超過回数の計算に必要な導関数 $\dot{y}(t)$ の標準偏差 $\sigma_{\dot{y}}$ を示す。同図から、 σ_y は 1.0~1.1 の

表-3 確定関数の係数の一例 (No. 2 測点)

Case	非定常部 $A \cdot \exp(Bt)$	時刻 $T_1(\text{sec})$	定常部 σ_x^2	時刻 $T_2(\text{sec})$	非定常部 $C \cdot \exp(D(T_3-t))$	時刻 $T_3(\text{sec})$
(a)	$A=6.501 \times 10^{-3}$ $B=3.433 \times 10^{-2}$	40.36	0.0260	51.82	$C=1.120 \times 10^{-2}$ $D=4.387 \times 10^{-2}$	71.85
(b)	$A=3.365 \times 10^{-3}$ $B=7.947 \times 10^{-2}$	27.13	0.0291	41.61	$C=6.582 \times 10^{-3}$ $D=6.633 \times 10^{-2}$	64.58
(c)	$A=3.275 \times 10^{-3}$ $B=7.696 \times 10^{-2}$	27.46	0.0271	46.13	$C=2.783 \times 10^{-3}$ $D=1.434 \times 10^{-1}$	62.26
(d)	$A=3.115 \times 10^{-3}$ $B=2.280 \times 10^{-1}$	9.24	0.0256	45.88	$C=9.650 \times 10^{-3}$ $D=7.437 \times 10^{-2}$	59.20

注) 各記号は 図-2 参照

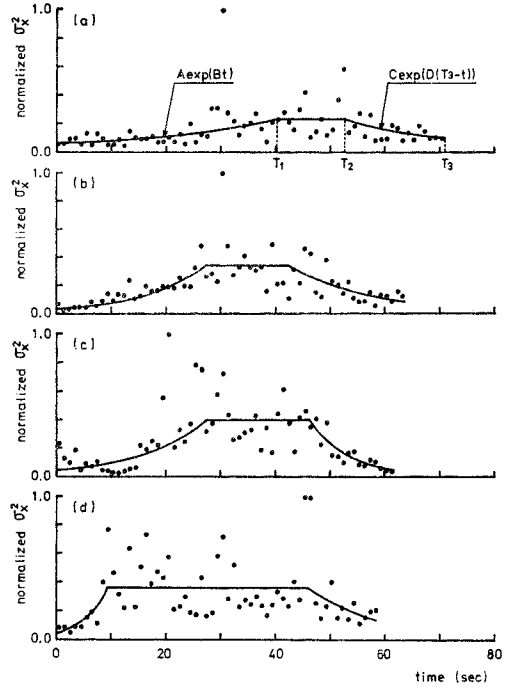


図-2 確定関数の一例 (No. 2 測点)

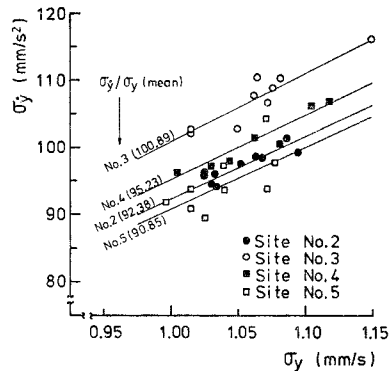


図-3 定常不規則過程 $y(t)$ とその導関数 $\dot{y}(t)$ の標準偏差

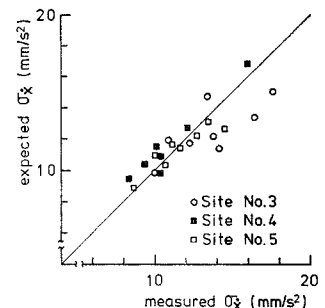


図-4 振動加速度の標準偏差（実測値と計算値の比較）

間に集中しており、それぞれについて求めた確定関数はだいたい妥当なものとなさせる。なお、同図の σ_j は式 (15) の関係より、 $y(t)$ のパワースペクトルから計算によって求めたものである。式 (15) の関係については前報¹⁾でも調べているが、本研究でも改めて 図-4 に示すようにその関係を調べた。同図は定常と考えられる範囲内の時系列に対して、実測した振動加速度の標準偏差と振動速度のパワースペクトルから計算した振動加速度の標準偏差を比較したもので、式 (15) の関係はほぼ満足されていることがわかる。

(3) 超過回数と滞在時間の検討

1 サイクルの測定時間長 (60~80 秒間) において、正のレベル a に対する 超過回数 N_a^+ および 滞在時間 T_a^+ は次式で得られる。

$$N_a^+ = \int_0^T n_a^+(t) dt \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$T_a^+ = \int_0^T \tau_a^+(t) dt \quad \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 T は 1 サイクルの測定時間長である。また、 $n_a^+(t)$ および $\tau_a^+(t)$ は式 (5), (6) で与えられる。なお、本節では、確定関数として式 (16) で表現されるもののみが用いられている。

式 (24), (25) は、式 (5), (6) からわかるように、簡単に積分できない。しかし、式 (16) の確定関数を用いるとき、相関係数 $\rho_{x\dot{x}}$ は式 (19) から一定値となることがわかる。この場合、確率積分 $\text{Erf}(X)$ の展開公式を用いると、若干の操作によって式 (24), (25) の非定常部の積分は次のように変形できる。

$$N_{a,n}^+ = \frac{\sqrt{1-\rho_{x\dot{x}}^2}}{4\pi\rho_{x\dot{x}}} \{E_i(-X_1) - E_i(-X_2)\} + \frac{1}{4} \{\text{Erf}(\sqrt{Y_1}) - \text{Erf}(\sqrt{Y_2})\} - \frac{1}{2\pi} \{F(Y_1) - F(Y_2)\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$T_{a,n}^+ = \frac{T_n}{2} - \frac{2}{B\sqrt{\pi}} \{G(\sqrt{Y_1}) - G(\sqrt{Y_2})\} \quad \dots\dots\dots (27)$$

ただし、上式の各関数 および 変数は式 (7) および次式で与えられる。

$$E_i(-X) = -\int_X^\infty \frac{e^{-z}}{z} dz \quad (\text{指数積分}) \quad \dots\dots (28)$$

$$F(Y) = e^{-Y} \sum_{n=0}^\infty (-1)^n \frac{(\rho_{x\dot{x}}/\sqrt{1-\rho_{x\dot{x}}^2})^{2n+1}}{(2n+1)} \times \sum_{r=0}^n \frac{Y^{n-r}}{(n-r)!} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$G(Y) = \sum_{n=0}^\infty (-1)^n \frac{Y^{2n+1}}{(2n+1)^2 \cdot n!} \quad \dots\dots\dots (30)$$

$$X_2 = a^2 e^{-BT_n} / 2(1-\rho_{x\dot{x}}^2) A \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$Y_2 = a^2 e^{-BT_n} / 2 A \quad \dots\dots\dots (32)$$

ここに、 $N_{a,n}^+$, $T_{a,n}^+$, T_n はそれぞれ非定常部の超過回数、滞在時間、測定時間長を表わす。また、 X_1 , Y_1 は式 (31), (32) で $T_n=0$ とおいたときの値である。なお、式 (7), (28) の確率積分および指数積分は、通常の電子計算機を利用する場合、サブルーチンとして準備されている。一方、定常部については、式 (5), (6) で相関係数を $\rho_{x\dot{x}}=0$ とおけば容易に求まる。

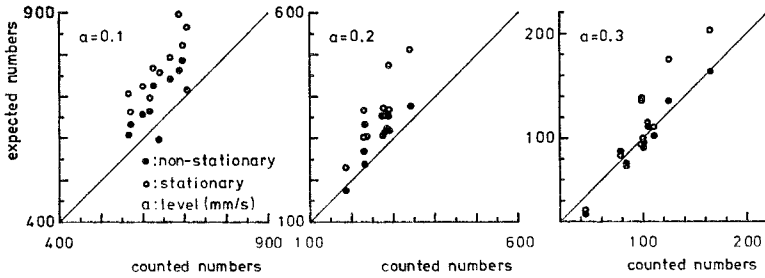
$$N_{a,s}^+ = \frac{C_0 T_s}{2\pi} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{a}{\sigma_x}\right)^2\right\} \quad \dots\dots\dots (33)$$

$$T_{a,s}^+ = \frac{T_s}{2} \left\{1 - \text{Erf}\left(\frac{a}{\sqrt{2}\sigma_x}\right)\right\} \quad \dots\dots\dots (34)$$

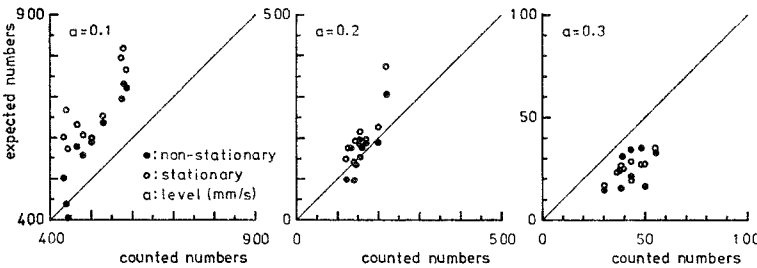
ここに、 $N_{a,s}^+$, $T_{a,s}^+$, T_s はそれぞれ定常部の超過回数、滞在時間、測定時間長を表わす。また、定常部では σ_x , $\sigma_{\dot{x}}$ は一定値で、 $C_0 = \sigma_{\dot{x}}/\sigma_x = \sigma_j$ である。

以上のように、式 (24), (25) は変形できるが、式 (29), (30) で表わされる級数展開式の収束性が問題になる。いま、式 (19) において、表-3 の B (または D) および 図-3 の σ_j を参照すると、 $\rho_{x\dot{x}}$ は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ のオーダーとなる。一方、変数 Y は式 (32) において、表-3 の A (または C) および時間長 T_n ($T_n = T_1$ または $T_n = T_3 - T_2$) を参照すると、 $a = 0.1 \sim 0.3 \text{ mm/s}$ に対して $Y > 1$ となる。これらの関係を考慮すると、本節のような場合、式 (29) の収束性は $\rho_{x\dot{x}}$ のオーダーによって保証されるが、式 (30) の収束性は保証されない。したがって、式 (30) については変数 Y が大きい場合の収束性の速い展開公式を用いる必要がある。これらの考察から、一般的には式 (24), (25) は数値積分によって求める方が汎用性は広いといえる。

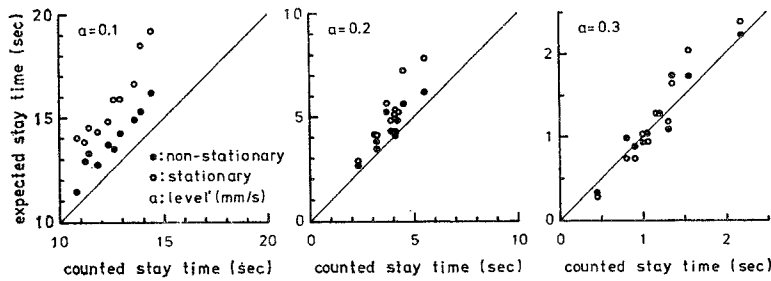
次に、非定常部に対して式 (26) を用いて求めた超過回数を 図-5, 6 に、また式 (25) を数値積分して求めた滞在時間を 図-7, 8 に示す。これらの図は、いずれもレベル a を $a = 0.1, 0.2, 0.3 \text{ mm/s}$ として、実測波形から直接求めた超過回数および滞在時間と比較してある。また、同図には、参考のため、全定常と仮定して求めた超過回数および滞在時間も示す。これらの図と他の測点の結果も含めて、レベル a が $a = 0.1, 0.2 \text{ mm/s}$ では、非定常部を考慮した方が全定常とするよりも実測値により近い値を与えている。一方、 $a = 0.3 \text{ mm/s}$ では非定常としても全定常としてもほとんど差異が認められない。これは、全定常と仮定した場合の単位時間当りの超過回数あるいは滞在時間に対して、非定常とした場合の非定常部では超過回数あるいは滞在時間は小さく、定常部では大きくなるのが相殺して、見かけ上差異が認められなくなったものと考えられる。また推定値は実測値と比較して、 $a = 0.1 \text{ mm/s}$ では大きくなる傾向にあるが、 $a = 0.3 \text{ mm/s}$ では No. 4 測点の結果のように小



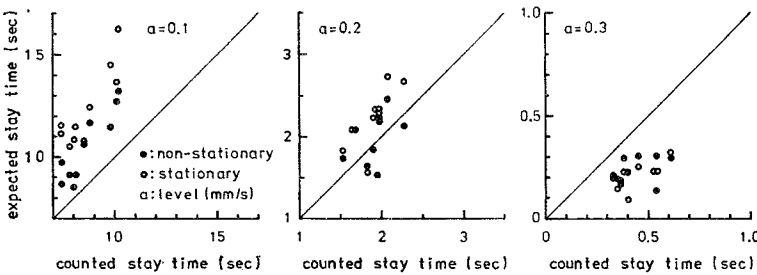
図—5 各レベル超過回数 (No. 2 測点)



図—6 各レベル超過回数 (No. 4 測点)



図—7 各レベル滞在時間 (No. 2 測点)



図—8 各レベル滞在時間 (No. 4 測点)

さくなる場合がみられる。なお、他の測点の結果については、No. 3 は No. 4 と、No. 5 は No. 2 と同じ傾向になっている。一方、No. 1 では、表—2 に示すように、 $a=0.3$ mm/s に対する超過回数は非常に少なく、推定値、実測値ともに 0 になる場合が多くなっている。推定値と実測値との差異に関係する要因としては、より妥当な確定関数の適用、さらには正規不規則過程の適合性などが当然考えられる。

まず、確定関数については、図—3 で調べたようにその妥当性はほぼ満足し得るものであったが、ここでは表—2 に示した結果を用いて、さらに詳しく検討してみる。同表から、図—1 の (a),(b) に対しては全定常、非定常いずれによる推定値もほとんど同じ値となっているが、実測値とは若干の差異がみられる。これに対して、(c) では式 (16) を、また (d) では式 (20) を適用した場合の推定値が実測値と近い値となっている。つまり、確定関数をさらに改良することによって、推定値と実測値の対応をよくすることができると思われる。しかし工学的な立場からは、確定関数を複雑にすることは取り扱いやすさの面で良策とは思えない。次に正規性の検討に関しては、レベル a と振動速度波形の標準偏差 σ_v の比 a/σ_v が関係してくる。しかるに、 σ_v の値を求めることは波形のどの部分に対して求めるかによって違ってくる。ここでは、全定常として得られる σ_v の値を一応の目安として用いる。このとき、大まかではあるが $a/\sigma_v < 1.0$ では推定値が実測値より大きくなっており、 $a/\sigma_v > 2.7$ では逆に実測値が大きくなっている。また、 a/σ_v が 1.5~2.3 程度の値では推定値と実測値がほぼ一致している。つまり、 a/σ_v の値によって実測波形から得られる確率密度曲線の正規分布への適合度が逆

になっている。いいかえると、 a/σ_v の大きい所では実測の密度が相対的に大きくなると考えられ、超過回数の実測値が推定値より大きくなる 1 つの原因であろうと推察される。

以上の考察から、推定値が実測値と一致しているかどうかの判断にはいくつかの問題を含んでいる。しかし、工学的に判断して、その差異はやむを得ないとみなし、前報¹⁾と同様に沿道の地盤振動の振動波形を正規不規則

過程として取り扱えるものと仮定する。その際、非定常として取り扱うことは全定常と仮定するよりも当然よい結果を与える。

4. 振動量の評価指標に対する検討

本章では、振動規制法に定める L_{10} (80% レンジ上限値) と L_{10} のレベルを超過する滞在時間の測定時間長に対する百分率 (以下時間率と略す) の対応について調べる。参考として、 L_{50} とこのレベルに対する時間率との対応についても合わせて検討する。なお、振動規制法では振動レベルを対象としているが、すでに述べた理由により振動速度の時系列を用いて検討する。振動レベル L_{10} (動特性 slow) と時間率が 10% となる振動レベル (動特性 fast) との対応については実測データによる若干の検討もみられる⁹⁾。その結果によると、 L_{10} と時間率が 10% になる値は、約 10 dB (3 倍) の違いを示すものもみられるが、だいたい ± 3.5 dB (1.5 倍) 程度の差異内にある。これより同報告では、道路交通振動の大きさを L_{10} (slow) で示しても時間率 10% の値で示してもともに両者の間には一定の関係があると述べている。しかし、実測データを用いてこのような比較を行うことは、実測波形の処理に時間を要するとともに、各種要因の制御が簡単にできないという難点がある。このため前章の検討結果をもとに、沿道の地盤振動に正規不規則過程のレベル超過問題が適用できると仮定し、本研究の応用例の一つとして、計算機内でのモデルシミュレーションによって前述のような問題に対する検討を行う。

(1) シミュレーションの概要

ここで、シミュレーションを行うための方法および検討を行うケースについて若干の説明を行っておく。沿道の振動は、信号によって制御される交通流の形態から、青信号で交通が流れているとき発生し、赤信号で交通が停止しているときは発生しないと考える。これを分散値の変化として示すと、図-9 に示すようなサイクルになっているものとする。そして、非定常部を表現する確定関数としては式 (16) を使い、振動速度の時系列は次式によってシミュレーションする。

$$x(t) = \sum_{n=1}^N a_n \sin(\omega_n t - \theta_n) \dots \dots \dots (35)$$

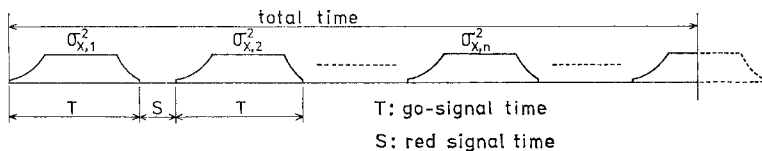


図-9 シミュレーションモデルにおける分散値の変化

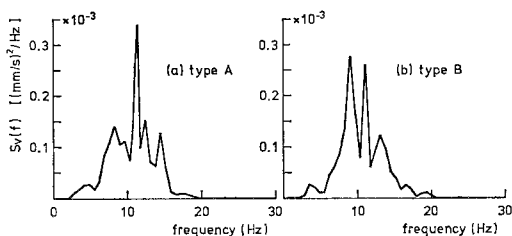


図-10 シミュレーションのための振動速度の
パワースペクトル

ここに、 $a_n = \sqrt{4 S_v(\omega_n) \Delta\omega}$ 、 $\omega_n = (n-1/2)\Delta\omega$ また、 θ_n は $0 \sim 2\pi$ に一様分布するランダム変数、 $S_v(\omega)$ は振動速度のパワースペクトルで、図-10 に示すものを用いる。同図の type A は図-2 (b)、type B は図-2 (d) で得られている実測波形の定常と考えられる部分について、B.T. 法によって求めたものである。なお、本章のように 1 サイクルの時系列発生 の時間長が長い場合、 $x(t)$ に現われる周期性 ($T_p = 4\pi/\Delta\omega$) は大きな問題である。周期性を避けるため、重ね合わせの数 N を十分大きくとり $\Delta\omega$ を小さくするか、あるいは乱数を利用して ω_n をランダムに選択するなどの工夫が必要である⁹⁾。しかるに、 N を大きくすることは演算時間が非常長くなるため、本章では後者の方法を準用し次のような便宜的な方法を用いた。つまり、スペクトル密度 $S_v(\omega)$ は $\Delta\omega$ 間隔の離散量で与えられているので、 a_n はこの $\Delta\omega$ 間隔の離散値について計算し、 ω_n のみを $\Delta\omega$ の微小範囲内でランダムに選択する。このため、シミュレーションした振動波形のパワースペクトルは原パワースペクトルとは多少違ったものとなる。しかし、この差異を調べたところわずかであり、実用上この便宜的な方法でも十分であることを確かめた。さらに、図-9 に示すサイクルにおいて、各サイクルの振動波形を発生させるための式 (35) 中の位相角 θ_n はそれぞれ違ったものを用いる。実際の交通流では、車種混合状態の変化などのため、各サイクルの確定関数、パワースペクトルおよび振動波形はそれぞれ異なったものになる。しかし、各サイクルの確定関数を変化させることは各種要因を考えていくうえでかえって複雑になる。このため、本章では確定関数およびパワースペクトルには特定のものを用い、各サイクルにおける振動波形のみを変化させることとした。

次に、検討を行うケースについては表-4 に一覧表として示す。Case 1 は Case 4 の非定常部を考慮しない場合で、定常部をそのまま非定常部まで延長して全定常としたものである。Case 2~4 は停車時間 (赤信号時) の影響を調べるた

表-4 検討を行ったケースの一覧表

Case No.	種別	間隔	確定関数*	分散	停車(S)	測定時間	備考
1	瞬時値	5.0 秒	全定常**	同じ	0 秒	500 秒	非定常との比較
2	"	"	図-2 (b)	"	60 秒	"	停車時間の影響
3	"	"	"	"	30 秒	"	
4	"	"	"	"	0 秒	"	
5	"	"	図-2 (d)	"	30 秒	"	確定関数の影響
6	"	"	図-2 (b)	大小あり***	"	"	
7	"	2.5 秒	"	同じ	"	"	間隔の影響
8	"	5.0 秒	"	"	"	700 秒	測定時間(測定個数)の影響
9	"	"	"	"	"	300 秒	
10	ピーク値	"	"	"	"	500 秒	種別の影響

注) * パワースペクトルは 図-2(b) のとき type A, 図-2(d) のとき type B (図-10 参照)

** 図-2(b) の定常部のみで非定常部がない場合 *** $\sigma_x^2, \text{even} = 0.5 \sigma_x^2, \text{odd}$

めのもので、Case 3 は標準として他のケースとの比較基準とする。Case 5, 6 は確定関数の影響をみたもので、Case 5 は確定関数の係数および時系列発生時に用いるパワースペクトルを変える。一方、Case 6 は Case 3 の分散に大小の変化を与えたものである。Case 7 は読み取り時間間隔を短くした場合であるが、Case 8, 9 の測定個数の検討と同様に測定個数に関する。以上、Case 1~9 はいずれも測定値が瞬時値となっており、レベルレコダその他の読み取り計器を利用する場合に相当する。これに対して、測定計器にメータ指示を用いる場合には、目の追従性のため、読み取り時刻付近のピーク値を測定値とすることが多い。したがって、Case 10 は読み取り時刻に一番近いピーク値を読み取る場合を想定したものである。

(2) シミュレーション結果の検討

シミュレーションによって発生させた振動速度の時系列について、5 秒 (あるいは 2.5 秒) 間隔の振動値を読

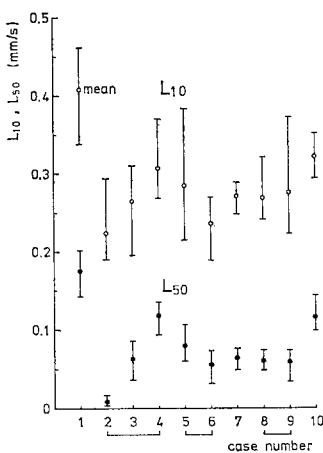


図-11 振動速度の L_{10} , L_{50}

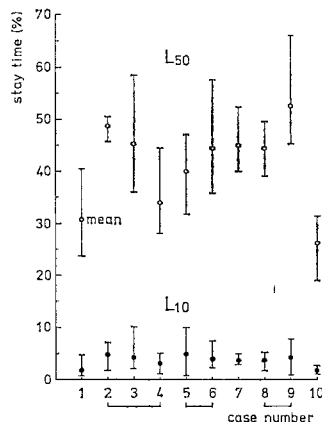


図-12 振動速度の L_{10} , L_{50} に対する時間率

み取り、その累積度数を求める。そして、 L_{10} および L_{50} を簡易計算法によって累積度数の 10% 値, 50% 値として決定する。次に、得られた L_{10} , L_{50} をレベル超過問題におけるレベル a として、それぞれに対する滞在時間を計算する。このとき、正負のレベル a に対する滞在時間 T_a は $T_a = 2 T_a^+$ として求める。このようにして求めた L_{10} および L_{50} とそのレベルを超過する時間率を 図-11, 12 に示す。これらの図には、各ケースについて、それぞれ乱数を変えて 10 回のシミュレーションを行い、得られた値の平均値とばらつきの幅を示し

てある。なお、ばらつきの幅は試行回数に関係するため、特に断らない限り平均値について検討を行う。

まず、図-11 に示す L_{10} および L_{50} について、各ケースに対する変動はどのようにになっているか検討しておく。Case 1 の全定常は非定常部を考慮した場合に比べて大きくなっているが、Case 2~4 で停車時間が短くなれば L_{10} , L_{50} ともに大きくなっている場合の延長と考えれば納得できる。つまり、停車時間および非定常部の存在によって、測定値の小さい方の値の個数が増す効果があるとともに、大きい値の発生する機会が減少するためである。次に、Case 3 を比較基準として Case 5~10 の各種の影響を調べる。Case 5 は Case 3 と異なる確定関数を用いた場合であるが、確定関数の違いによって多少値が変わっている。これは、表-3 の (b) と (d) で定常部の分散がそれほど変わっていないことから考えて、図-2 (b), (d) に示される定常部の時間長の影響と考えられる。一方、Case 6 は Case 3 の偶数番目のサイクルの分散を奇数番目のその 1/2 とした場合である。この場合も、前述の Case 1~4 に対すると同様の考察から、値が小さくなったものと考えられる。Case 7~9 は測定値の個数に関する場合であるが、 L_{10} および L_{50} の平均値はほとんど変わっていない。しかし、 L_{50} のばらつき幅がほぼ安定しているのに対して、 L_{10} のばらつき幅は Case 7, 8, 3, 9 と測定値の個数が減少するにつれて大きくなっている。つまり、測定値の個数を多くしなければ L_{10} のばらつきは大きく、安定した指標とはならないことを示している。Case 10 は、読み取り時刻付近のピーク値を測定値としているため、Case 3 の瞬時値を読み取る場合に比べて当然大

きくなる。

次に、図-12 に示す時間率についてみると、 L_{10} に対する時間率は 10% 以下で各ケースに対する変動が少ないのに対して、 L_{50} の時間率は大きく変動している。なお、同一のケースでは、レベルの増加とともに時間率は単調に減少する関係にあるが、停車時間、確定関数などの変化を含めるとレベルと時間率は、厳密には単調な関係で結びつかない。たとえば、Case 7~9 について、図-11 の L_{50} はほとんど変動していないが、図-12 の L_{50} に対する時間率は変動しているなどその様子がうかがえる。しかし、このような違いはわずかで、図-12 に示す時間率の各ケースに対する変動は、図-11 に示す L_{10} 、 L_{50} の変動とほぼ逆の関係にあるとみなしてもよい。

以上の結果から、 L_{10} および L_{50} に対する影響として、停車時間および非常常部の長さ（全定常も含めて）は L_{10} 、 L_{50} のレベルの変動に大きく関係しており、測定値の個数はばらつきの幅に関係している。一方、 L_{10} のばらつき幅は大きくても時間率としては小さくなっており、 L_{50} ではこれが逆の関係になっている。また、 L_{10} および L_{50} とそれを超過する時間率との関係は明確なものではないことがわかる。つまり、 L_{10} および L_{50} を時間率でそれぞれ 10%、50% と定義することには無理があることを示唆している。一般に、騒音測定では、中央値 (L_{50}) は時間率 50% を意味し、90% 上下限值 (L_{95} 、 L_{95}) は変動の範囲を示すと定義している。これに対して、道路交通振動で L_{10} を採用した根拠を筆者はよく理解していないが、前述の考察から L_{10} を時間率 10% に結びつけることには問題があるといえる。一方、本研究では取り上げなかったが、道路交通振動の L_{10} は変動ごとの最大値のほぼ平均値であるとする考え方もみられる⁷⁾。しかし、いずれにしても、図-11 に示すように、 L_{10} の各ケースに対する変動とばらつき幅は大きいことに留意しなければならない。

5. あとがき

本研究では、道路交通による沿道の地盤振動に対して、分散値動揺を伴う正規不規則過程のレベル超過問題

を適用した。このため、筆者は前報⁷⁾よりも道路交通振動の実情に近づいたものと考えている。しかし、本研究で設けた仮定は、厳密にはいくつかの問題を含んでいることは否定できない。たとえば、本研究で得られた超過回数あるいは滞在時間の推定値の内で実測値と一致しない場合の原因の1つとして、正規不規則過程とする仮定の適否を挙げた。これに対して、次のような検討も必要であろうと考えられる。筆者の一人は、道路交通振動の測定個数を検討する際、振動レベルの測定値の方が振動速度よりも正規分布に近い場合があることを経験した⁸⁾。これは比較的交通量の少ない箇所での一例で、暗振動の影響を含むため速断はできないが、振動レベルの波形に対して本研究を適用することは道路交通振動の実情により近づく可能性をもつことも考えられる。なお、この場合、振動レベルの波形を得るための特別の考慮といくつかの基礎的検討が必要であることは 3. のはじめに述べた。

終わりに、本研究を行うにあたり、日ごろご助言とご支援を賜っている神戸大学 桜井春輔教授に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 北村泰寿・水野正英：道路交通による地盤振動への不規則振動論の適用，土木学会論文報告集，第256号，pp. 1~9, 1976.
- 2) 高岡宣善：工学のための応用不規則関数論，共立出版，pp. 136~143, 1975.
- 3) 太田光雄：ガウス形不規則過程の非定常理論とそのディジタルシミュレーション，電子通信学会論文誌，Vol. 54-C, No. 10, pp. 885~892, 1971.
- 4) 後藤尚男・土岐憲三：地震動のシミュレーションとその応用，第9回地震工学研究発表会講演概要集，pp. 75~78, 1967.
- 5) 東京都建設局：道路交通振動防止対策についての報告，1977.
- 6) Borgman, L.E. : Ocean Wave Simulation for Engineering Design, Journal of Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 95, WW 4, pp. 557~581, 1969.
- 7) 梶川康男：振動公害基準値に関する基礎的研究 II 振動解析と評価について，日本衛生学雑誌，第33巻，第2号，pp. 402~409, 1978.
- 8) 畑中元弘，北村泰寿ほか：振動レベル計による交通振動測定について—測定個数の検討—，土木学会関西支部年次学術講演概要集，III-11, 1973. 6

(1978. 5. 30・受付)