

# 振動レベル計の計算機によるシミュレーション

国松 直\*・三浦 房紀\*・今村 威\*\*・中川 浩二\*

## Numerical Simulation for Response of Vibration Level Meter

Sunao KUNIMATSU, Fusanori MIURA, Takeshi IMAMURA and Koji NAKAGAWA

### Abstract

This study aims to make a numerical simulation program to calculate the vibration level. The level, which is used to evaluate pollution vibration, must be measured by a vibration level meter that satisfies JIS(JIS C 1510) requirements. The level meters are generally made of two circuits to simulate human body responses for frequency and duration. The response of the vertical direction for frequency is different from its horizontal direction. We used the z-transformation method for numerical simulation of those characteristics, and obtained the linear difference equations from the pulse transfer function. On the other hand, the response for duration was simulated by a non-linear circuit which was a CR circuit with a diode. The result was similarly expressed by the linear difference equations. Using the difference equations, we developed a program which could simulate those response characteristics.

### 1. 緒 論

近年、振動公害に対する規制は地域住民の環境保全のために厳しくなる傾向にある。建設工事においては、苦情発生以前から振動計測を行い、工事に伴う振動に注意を払っている。また新幹線や都市内高速道路に見られるような高架の橋脚から発生する交通振動についても厳しい規制を受けている。

それらの規制は基本的には昭和51年施行の振動規制法に基づくが、その規制基準については地域の特殊性を考慮して住民との折衝により決定されることが多い。その規制値の評価単位としては振動規制法において定義された振動レベルがしばしば用いられる。振動レベルは振動の加速度時刻歴に鉛直、水平の2方向の人体感覚を考慮して定義されており、人間の感覚評価には優れた評価単位であるといえる。一方、振動レベルを

測定する機器の規格としてJISでは振動レベル計の規格を示しており、その規格を満足する振動レベル計を用いて測定することを規定している。

公害振動の計測、解析において、上述の規定に従うならばすべてアナログ的な手法によらなければならない多くの問題を有する。たとえば、地盤の振動解析における数値解析法の発達は著しく、公害振動の解析にも多く用いられている。しかるに、数値解析により地盤の振動を解析したとしてもその時刻歴から振動レベルを求めるためには時刻歴を振動レベル計へアナログ入力しなければならず、面倒な手順を踏まなければならない。このことは、振動公害の問題を数値解析手法を用いて進める上での一つの障害であるといえる。

筆者らは公害振動に関する研究を行う中で上述のような理由から振動レベル計のシミュレーションプログラムの開発を行ってきた。前に筆者らは鉛直振動に対するシミュレーションプログラムの概要を報告<sup>1)</sup>したが今回はこれに加えて水平振動を対象とするシミュレーションプログラムを報告する。これにより鉛直、水平それぞれの振動に限らない総合的な振動レベルの解析

\*建設工学科

\*\*宇部興産

が可能になる。

2. 振動レベル計と計算機によるそのシミュレーション

本章では、まず振動レベルの定義を述べ、これと振動レベル計の関係を明らかにする。次に、振動レベル算出のための種々の差分方程式を示し、最後に出力結果を振動レベルに変換する方法について述べる。

2.1 振動レベルと振動レベル計

振動レベルVLは次式で定義され、デシベル (dB) 表示される。

$$VL = 20 \times \log_{10}(A/A_0) \text{ (dB)} \tag{1}$$

ここに、 $A_0$ は基準となる加速度で $A_0 = 10^{-5} \text{m/s}^2$ である。また、 $A$ は周波数に対する人体感覚補正を行った後の加速度実効値であり、次式で与えられる。

$$A = (\sum A_n^2 \times 10^{c_n/10})^{1/2} \tag{2}$$

ここに、 $A_n$ は周波数 $f_n$ 成分の加速度実効値である。また $c_n$ は $f_n$ に対する相対レスポンスであり、Fig. 1に示す周波数特性を有する<sup>2)</sup>。従って、振動レベル計はこの周波数に対する補正のためにFig. 1の鉛直、水平の両特性をもつ振動感覚補正回路を備えていなければならないと規定されている。

さて、式(1)は継続時間が無限大の定常振動に対して定義された式であるから、車両の通過や発破による振動のように有限な継続時間を有する振動に対しては、この継続時間の影響を考慮に入れなければならない。Fig. 2は衝撃正弦振動(ある時間間隔のみ正弦振動が継続する振動)の継続時間と人体感覚との関係を示したものである<sup>2)</sup>。JIS C 1510および同解説によると、振動レベル計の指示特性はこの実験結果をもとに整流回路の平滑時定数が0.63秒に相当する特性を持つように規定されている。

従って、振動レベル計はFig. 1, 2に示した周波数と継続時間に対する人体感覚特性を表現する必要があり、このための回路を内蔵している。前者はフィルター回路として、後者は指示特性回路として与えられている。振動レベル計にはこれら2回路の他に、90Hz以上の周波数に対して-12dB/oct以上のフィルター特性を持たすための回路も内蔵されている。以下本研究においては、前者のフィルター回路を特に振動感覚補正回路と呼び、90Hz以上の周波数に対するフィルター回路をフィルター補正回路と呼ぶことにする。

フィルター補正回路と振動感覚補正回路のデジタルシミュレーションを行うためには、以下に述べるデジタルシステム理論を用いることになる。

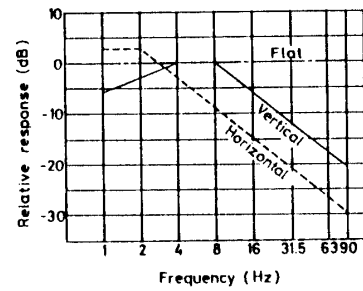


Fig. 1 Frequency characteristics of relative response.

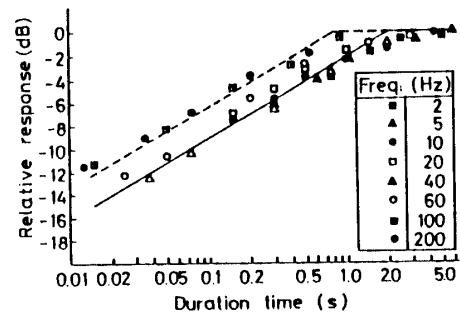


Fig. 2 Response for the single tone burst signal.

2.2 デジタルシステム理論の概要

いま、デジタル化された加速度波形の離散時間系列に対してフィルター補正回路、鉛直、水平方向の振動感覚補正回路に相当する重み系列を作用させることを考える。すなわち、この重み系列を作用させることがフィルターを通過させることに対応する。

デジタルシステム理論<sup>3)</sup>によれば入力系列 $\{x(k)\}$ および重み系列 $\{h(k)\}$ のz変換を $X(z)$ および $H(z)$ とすると、出力系列 $\{y(k)\}$ はそのz変換 $Y(z)$ が

$$Y(z) = H(z)X(z) \tag{3}$$

を満足する時間領域の関数として与えられる。ここで、 $H(z)$ はパルス伝達関数と呼ばれるが、この $H(z)$ がフィルター特性を表すことからこれを定めることが以下の主目的となる。

連続時間システムにおいて重み関数がラプラス変換されたs領域の伝達関数 $H(s)$ で与えられているときは、まずラプラス逆変換

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1} \{H(s)\} \tag{4}$$

によって重み関数 $h(t)$ を求め、その後z変換の定義に従い、

$$H(z) = \sum_{k=0}^{\infty} h(k\Delta t)z^{-k} \quad (5)$$

によってパルス伝達関数 $h(z)$ を求めればよいことがわかっている<sup>3)</sup>。ここに $z^{-1}$ はラプラス逆変換を表す記号である。

次に、このパルス伝達関数を差分方程式で表すことを考える。差分方程式の一般形は

$$y(k) = b_0x(k) + b_1x(k-1) + \dots + b_nx(k-n) - a_1y(k-1) - \dots - a_ny(k-n) \quad (6)$$

で表される。上式で $k$ を $0, 1, 2, \dots$ と変化すると、系列 $\{y(k)\}$ が得られる。系列 $\{y(k)\}$ と $\{x(k)\}$ の $z$ 変換を $Y(z), X(z)$ とすれば、 $z$ 変換の線形性および推移定理を用いて、次の関係が得られる。

$$Y(z) = b_0X(z) + b_1z^{-1}X(z) + \dots + b_nz^{-n}X(z) - a_1z^{-1}Y(z) - \dots - a_nz^{-n}Y(z) \quad (7)$$

この関係を式(3)の形で表現すればパルス伝達関数 $H(z)$ は次のようになる。

$$H(z) = Y(z)/X(z) = \{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nz^{-n}\} / \{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}\} \quad (8)$$

ここで、式(3)の $H(z)$ と上式の $H(z)$ が等しいということから、システムの差分方程式の各係数が決定される。

### 2.3 デジタルシステム理論によるデジタルフィルターの設計

フィルター補正回路、鉛直方向振動感覚補正回路については既に北村<sup>4)</sup>によって次のように設計されている。

#### 2.3.1 フィルター補正回路の差分方程式

90Hz以上の周波数に対して、 $-12\text{dB/oct}$ の減衰を持つ2次のローパスフィルターとして設計すればパルス伝達関数が次のように得られる。

$$H(z) = \{(1 - 2e^{-a\Delta t}\cos(a\Delta t) + e^{-2a\Delta t})z^{-1}\} / \{1 - 2e^{-a\Delta t}\cos(a\Delta t)z^{-1} + e^{-2a\Delta t}z^{-2}\} \quad (9)$$

上式よりシステムの差分方程式は入力加速度の時系列を $\{x(k)\}$ とし、その第 $k$ ステップ目を $x(k)$ とすると、それに対する出力 $y(k)$ は次式で与えられる。

$$y(k) = (1 - 2e^{-a\Delta t}\cos(a\Delta t) + e^{-2a\Delta t}) \cdot x(k-1) + 2e^{-a\Delta t}\cos(a\Delta t)y(k-1) - e^{-2a\Delta t}y(k-2) \quad (10)$$

ここに、 $a = 400.3$ であり、 $\Delta t$ はサンプリング間隔(s)である。

#### 2.3.2 鉛直方向振動感覚補正回路の差分方程式

式(9)で得られた系列 $\{y(k)\}$ を改めて $\{x(k)\}$ とし、Fig. 1に示した鉛直方向の周波数特性を振幅変化特性

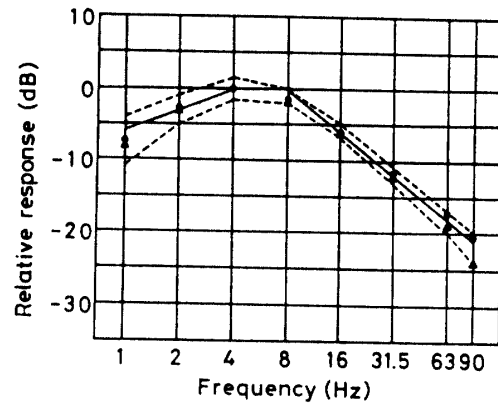


Fig. 3 Tolerance and calculated value on frequency characteristics of vertical direction for Vibration Level Meter.

を持つ2次のフィルターとして設計すれば、パルス伝達関数を求めた後の差分方程式は次式のように得られる。

$$y(k) = Kx(k) - Ke^{-c\Delta t}\{\cos(b\Delta t) + (c/b)\sin(b\Delta t)\} \cdot x(k-1) + 2e^{-c\Delta t}\cos(b\Delta t)y(k-1) - e^{-2c\Delta t}y(k-2) \quad (11)$$

ここに、 $b = 11.06$ ,  $c = 26.03$ ,  $K$ は利得を1にするための定数であり、その値は $\Delta t$ (ms)の関数で $k = 0.00112 + 0.04827\Delta t$ で与えられる。

Fig. 3は鉛直方向の相対レスポンス(実線)とJIS規格で規制された許容差(破線)に対して、上式のフィルター補正回路と振動感覚補正回路の総合レスポンスの適用範囲を調べた結果である。その結果、 $\Delta t$ として $0.5\text{ms}(\blacktriangle) \sim 3\text{ms}(\bullet)$ の範囲で許容差を満足することが確認された。

#### 2.3.3 水平方向振動感覚補正回路の差分方程式

水平振動レベルと鉛直振動レベルとの相違点は、Fig. 1に示した相対レスポンスのみである。従って、他の回路のシミュレーションは鉛直、水平両成分に対して共通であるから、水平振動レベルの数値シミュレーションを行うには新しく水平振動の相対レスポンスに対応した振動感覚補正回路に等価な差分表示式(式(11)に対応)を求めればよい。以下にその過程を述べる。

Fig. 1に示されている水平方向に対する相対レスポンスを一次のローパスフィルタとみなせば、その伝達関数 $H(s)$ は次式で示される。

$$H(s) = \omega / (s + \omega) \quad (12)$$

ここに、 $\omega = 2\pi f$ であり $f$ は折点周波数である。

ここで、入力時系列は $\Delta t$ 毎にサンプリングされた離散時間系列であるので、デジタルシステムとしてデー

タ・ホールド要素と連続時間システムが直列に接続されたシステムを考え、連続時間システムとしての解析を行う。本研究ではこのデータ・ホールド要素として最も単純な零次ホールドを考える。その場合のパルス伝達関数  $H(z)$  と伝達関数  $H(s)$  の間には、

$$H(z) = (1-z^{-1}) \mathcal{Z}\{H(s)/s\} \quad (13)$$

なる関数がある<sup>3)</sup>。ここで  $\mathcal{Z}$  は  $z$  変換を表す記号である。これに式(11)を代入し、パルス伝達関数  $H(z)$  を求めると、

$$\begin{aligned} H(z) &= (1-z^{-1}) \mathcal{Z}\{\omega/(s(s+\omega))\} \\ &= (1-z^{-1}) \mathcal{Z}\{1/s - 1/(s+\omega)\} \\ &= \{(1-e^{-\omega\Delta t})z^{-1}\} / \{1-e^{-\omega\Delta t}z^{-1}\} \end{aligned} \quad (14)$$

上式の変形において、ラプラス変換された伝達関数が  $\mathcal{Z}$  変換後に次のように表されることを用いている。

$$\mathcal{Z}(1/s) = 1/(1-z^{-1}) \quad (15)$$

$$\mathcal{Z}(1/(s+\omega)) = 1/(1-e^{-\omega\Delta t}z^{-1}) \quad (16)$$

ここで、式(8)の  $H(z)$  と上式の  $H(z)$  が等しいということから、システムの差分方程式の各係数は

$$\begin{aligned} a_1 &= -e^{-\omega\Delta t} \\ b_0 &= 0.0 \\ b_1 &= 1-e^{-\omega\Delta t} \end{aligned} \quad (17)$$

と求めることができる。

以上より水平振動感覚補正回路の差分方程式は入力時系列を  $\{x(k)\}$ 、出力時系列を  $\{y(k)\}$  とすれば次式で表される。

$$y(k) = K(1-e^{-\omega\Delta t})x(k-1) + e^{-\omega\Delta t}y(k-1) \quad (18)$$

ここで、 $k$  は利得を 1 にするための定数である。 $K$ 、 $\omega (= 2\pi f)$  に関しては JIS 規格に示された水平振動感覚補正回路の許容差を満足するように試行錯誤的に求めた。その結果  $K=1.85$ 、 $f=1.60$  (Hz) の値となった。

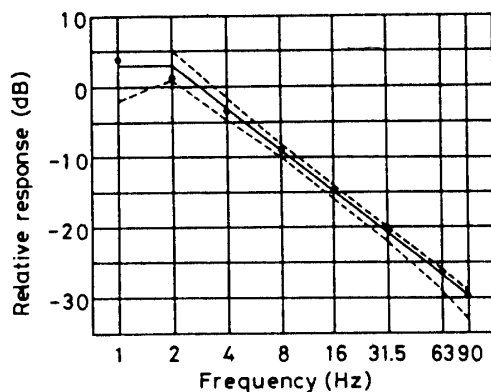


Fig. 4 Tolerance and calculated values on frequency characteristics of horizontal direction for Vibration Level Meter.

Fig. 4 に JIS C 1510 で示されている周波数に対する相対レスポンスの値と許容差およびフィルター補正回路と上式の総合レスポンスによる結果 (●印) を示す。これより、シミュレーション結果が許容差内に収まっていることがわかる。なお、このときのサンプリング間隔は 1 ms である。

### 2.4 指示特性回路の差分方程式

振動レベル計の指示特性を表す回路として Fig. 5 に示す回路を用いた。この回路は振動レベル計の特性を忠実に再現するために立ち上がりと減衰で異なる特性 (時定数が異なる特性) を持つことが可能である。振動レベル計の指示値は以下に示す式(19)、(20)、(21)で与えられるコンデンサー電圧  $V_c(k)$  の対数目盛で与えられる。すなわち、鉛直方向に対して式(11)、水平方向に対して式(18)で求めた  $\{y(k)\}$  の自乗を  $\{V_s(k)\}$  とすると ( $V_s(k) = y(k)^2$ )、

$$\begin{aligned} \text{a) 立ち上がり時 } & (V_s(k) \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \geq V_c(k-1)) \\ V_c(k) &= (V_s(k) \cdot R_2 / (R_1 + R_2) - V_c(k-1)) \times \\ & (1 - e^{-\Delta t / \tau_1}) + V_c(k-1) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{b) 減衰時 } (V_s(k) \cdot R_2 / (R_1 + R_2) < V_c(k-1))$$

$$\text{i) } V_s(k) \geq V_c(k-1)$$

$$\begin{aligned} V_c(k) &= (V_c(k-1) - V_s(k) \cdot R_2 / (R_1 + R_2)) e^{-\Delta t / \tau_1} \\ & + V_s(k) \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\text{ii) } V_s(k) < V_c(k-1)$$

$$V_c(k) = V_c(k-1) e^{-\Delta t / \tau_2} \quad (21)$$

ここに、 $\tau_1 = CR_1R_2 / (R_1 + R_2)$ 、 $\tau_2 = CR_2$ 、 $C = 100 \mu\text{F}$ 、 $R_1 = 71000 \Omega$ 、 $R_2 = 6950 \Omega$  であり、 $V_c(k)$  は電圧として与えられる。

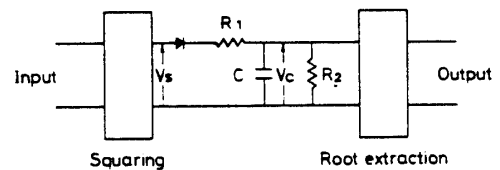


Fig. 5 Nonlinear electric circuit to simulate human body response for duration.

### 2.5 振動レベルへの変換

JIS 規格を満足する振動レベル計 (リオン製 VM-14 B) の測定範囲は 85~120、65~100、45~80、25~60dB の 4 つのレンジにより設定される。そのダイナミックレンジは常に 35dB である。

そこで、まず振幅 1000gal (rms) の正弦波形を指示特

性回路へ入力したときの $V_{c_{max}}$ を求める。この $V_{c_{max}}$ の値が120dBに相当することになり、この関係を用いて振動レベルを算出することが可能となる。しかし、実際の振動レベルの測定において振動の大きさによってレンジを切り替えることが行われるので、シミュレーションにおいてもダイナミックレンジを35dBと固定し、振動の大きさによってそのレンジを変化させるようにプログラムした。

レンジ変化はプログラム内では入力加速度の値を85~120dBの時は1倍、65~100dBの時は10倍、45~80dBの時は100倍、25~60dBの時は1000倍とすることに対応する。

以上のことを考慮して、振動レベル計の指示値(dB)は $V_c(k)$ を用いて次式で与えられる。

$$VL = (35 + LR) + 20 \times \log(\sqrt{V_c}(k) / V_{c_{max}}) \quad (22)$$

ここに、 $V_{c_{max}} = 301.2$ である。LRはレンジの下限値である。

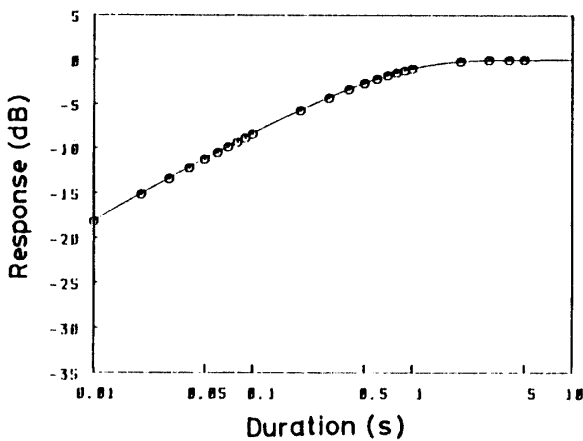


Fig. 6 Response curves for rise time constant of 0.6s and calculated values through numerical simulation program.

指示特性回路のシミュレーション結果を調べた結果をFig. 6に示す。図中の実線は次式で計算される時定数0.63の相対レスポンスであり、○印は振幅1000gal (rms)の正弦波形を振動感覚補正を行わずに指示特性回路に入力したときの式による振動レベルをプロットした結果である。

$$\text{相対レスポンス} = 10 \times \log(1 - \exp(-k\Delta t / 0.63)) \quad (23)$$

上式と指示特性回路のシミュレーション結果が非常によく一致していることがわかる。

### 3. 実振動波形による検証

Fig. 7は振動レベル計(リオン製VM-14B)のVAL特性(振動感覚補正を行わない特性)でa)鉛直、b)水平(x)方向の振動加速度成分をデータレコーダへ記録し、その波形をストレージスコープ(岩通製SS5802)を介してマイコン(NEC製PC9801E)処理して描いた波形である。Fig. 8はFig. 7の波形に対してシミュレーション回路による鉛直、水平振動感覚補正を行った後の波形である。これに対して、Fig. 9はFig. 7の記録を再生し再度振動レベル計へ入力し、VL-Z, VL-X特性で振動レベル計の振動感覚補正回路により補正された波形を示している。Fig. 8とFig. 9の波形の形状、振幅が非常によく一致しシミュレーションがうまく行われているといえる。

Fig. 10はシミュレーションプログラムによるFig. 7の波形の振動レベル時刻歴である。Fig. 11はVL-Z, VL-X特性で記録された波形をレベルレコーダ(リオン製LR-04)へ入力することにより得られた振動レベルの時刻歴である。Fig. 10はストレージスコープの性能上、全体で2秒間の時刻歴しか得られていないがFig. 11との対応は非常によいといえる。また、Fig. 11の立ち上がり時の直線性はレベルレコーダの機械的

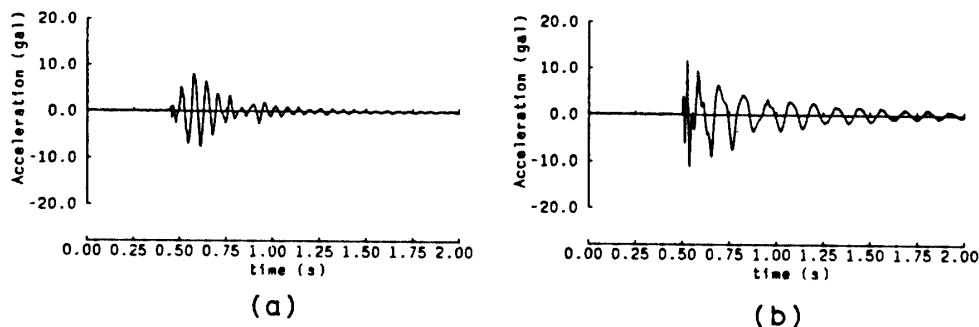


Fig. 7 A accelerogram.

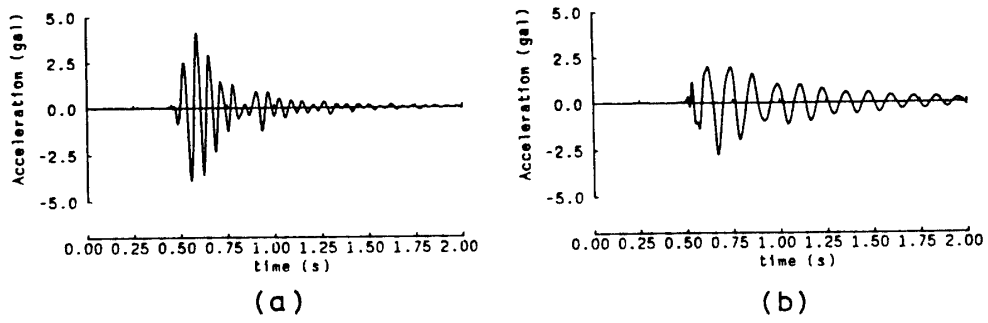


Fig. 8 A accelerogram considered human body response for frequency through numerical simulation program.

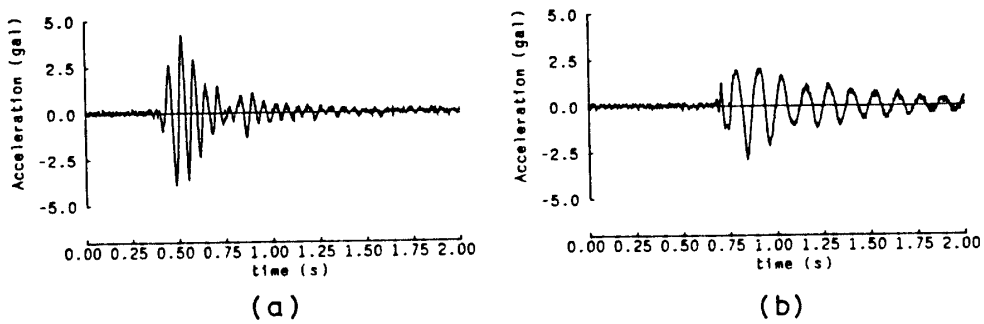


Fig. 9 A accelerogram considered human body response for frequency through Vibration Level Meter.

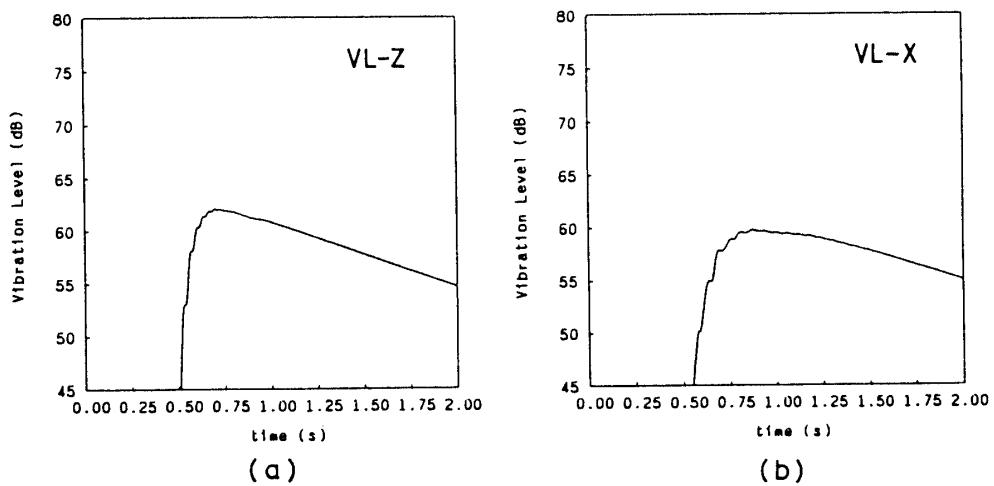


Fig. 10 Time history of vibration level colculated by numerical simulation program.

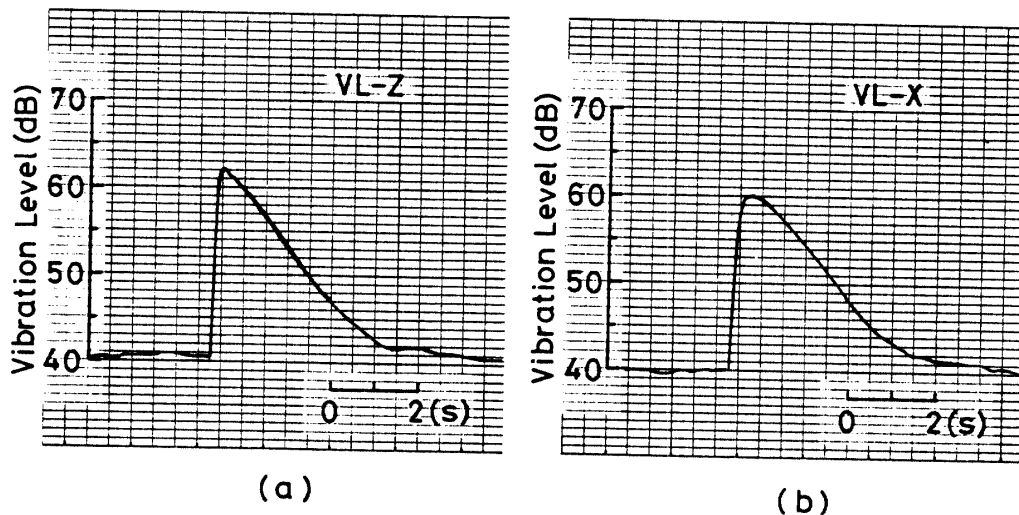


Fig. 11 Time history of vibration level recorded by Level Recorder.

な動作による追従が遅いことを示しており、非常に衝撃的な振動の測定にはレベルレコーダの指示値からJIS規格に即したレベルを求めることに無理があるといえる。その点、シミュレーションプログラムによれば精度よく求めることが可能である。

#### 4. 結 論

上述のように、振動レベル計のデジタルシミュレーションが可能となったことより、観測点において振動の加速度時刻歴さえ計測すれば、その記録をもとに室内で振動レベル計算が容易に行えるようになる。また、地盤振動の解析、構造物の応答解析の結果として得られたデジタルの加速度時刻歴からも容易に振動レベル

の計算が行えることになる。

#### 参 考 文 献

- 1) 国松 直・中川浩二・三浦房紀・今村 威, 発破振動におけるレベルの推定, 土木学会論文集, 第367号, pp. 45-51, 1986
- 2) たとえば, 公害防止の技術と法規編集委員会編, 公害防止の技術と法規・振動編, 産業公害防止協会, 1985
- 3) 成田誠之助, デジタルシステム制御—理論と応用—, 昭晃堂, 1984
- 4) 北村泰寿, 振動レベル波形のデジタルシミュレーション, 建設工学研究所報告, 第27巻, 1985

(昭和63年4月15日受理)