

# リアルタイム地震防災のための地震動補間

川上英二<sup>1</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

従来、地震動の時空間分布を扱う必要が指摘されてきたが、近年、単に時空間分布を考えるだけでなく、観測結果を時空間分布の全体像の一部分とみなし、条件付き時空間分布が検討されている。この目的としては、元来は、トンネル・橋梁などの長大または地中構造物に対する設計用地震波形の作成の目的で提案されたものであるが、地震動のモニタリングによる被害のリアルタイムの推定のための地盤震動の空間補間の目的にも使用されている。地震動の観測結果に基づく時空間波形を扱う目的、方法、数値計算例などを、著者らがこれまでに提案してきた内容を中心に整理した。

**Key Words :** ground motion, simulation, interpolation, space-time variation

## 1. 地震動のモニタリングによる地盤震動の空間補間

近年、観測機器および無線網の充実に伴い、情報をリアルタイムで集めてライフラインなどのシステムの制御（供給停止の判断など）に使うことが検討されている。例えば、東京ガス（株）では、多数の地震計を供給地域に配置しており、無線により集められたデータを基に、各ブロックに対する供給停止の判断を行うシステムが検討されている。必要な供給停止を行わなければ、ガス漏れによる二次被害を引き起こす可能性がある。逆に、不必要な供給停止を行えば、生活が不便になるばかりでなく、復旧に余分な作業が必要になる。

最適な判断を行うためには、被害の分布を推定する必要があり、このためには、まず、外力である入力地震動を各地点に対して推定する必要がある。その際、地震計を設置した幾つかの観測点でのデータを用いて推定することになる。

## 2. 条件付き時空間分布を考える目的

従来、地震動の時空間分布を考える必要があることが指摘されてきたが、近年、単に時空間分布を考えるだけでなく、観測結果を時空間分布の全体像の一部分とみなす考えが提起された。そして、地震動の観測結果に基づく条件付き時空間分布を扱うことが提案された。

条件付き時空間分布に関する理論は、元来は、

- (1) トンネル・橋梁などの長大または地中構造物に対する設計用地震波形の作成<sup>1-8)</sup>の目的で提案されたものであるが、その後、
- (2) 地震動のモニタリングによる被害のリアルタイ

ムの推定のための地盤震動の空間補間<sup>9-12)</sup>の目的にも使用されている。

図-1には、現実の時空間波形（集合A）、従来のシミュレーション理論による時空間波形（集合B）、条件付き時空間波形（集合DまたはE）などの集合の関係を概念的に示してある。従来の長大または地中構造物の設計では、観測波形を変形させずそのまま伝播させた波形（集合F）を用いるか、従来の時空間波形（集合B）を用いるかの二通りの選択であったのに対し、本研究では、新しく第三の選択（集合C、DまたはE）の可能性を示している。

## 3. 時空間波形が満たすべき条件

観測波形から時空間波形を求める際、次の2種類の条件を満足するものとする<sup>3)</sup>。

条件(1): 時空間波形は、観測地点においては観測波形に厳密に一致する。

2番目の条件としては、以下に示す条件(2a)~(2c)の3つのケースを考える。

条件(2a): 観測地点以外の波形は観測地点の波形から内挿する。数値を内挿するという従来の概念を、時間の関数である波形を内挿するという概念に拡張する。

条件(2b): 地盤の変位を互いに相関を有する複数の確率過程と考える。時空間確率過程と観測波形との時間に関する自己相関関数（またはパワースペクトル）は一致する。また、時空間確率過程の相互相関関数（またはクロススペクトル）は、想定した相互相関関数に一致する。

ただし、ここでの一致とは、求められた時空間確率過程に対し、アンサンブル平均を求めた結果が一致す

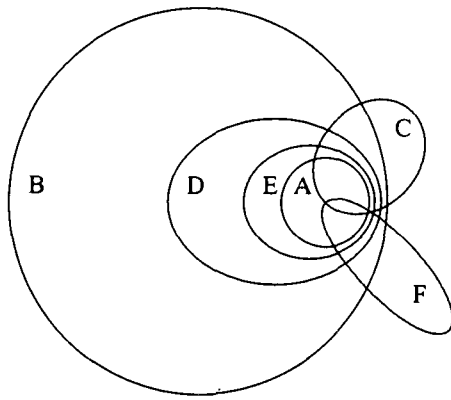


図-1 時空間波形の集合間関係

- A: 現実の時空間波形
- B: 従来のシミュレーション理論による時空間波形
- C: 内挿による時空間波形
- D: 条件付き時空間波形のシミュレーション
- E: 長大構造物の設計用の時空間波形
- F: 長大構造物の設計用の従来の時空間波形

という意味であり、一つの時空間確率過程のサンプルに対し一致するという意味ではない。

条件(2c): 条件(2b)と類似しているが、本条件での一致とは、逆に、求められた一つの時空間確率過程のサンプルに対しても一致するという意味である。条件(2b)よりも厳しい条件である。

ただし、上述の相互相関関数(またはクロススペクトル)の想定は、観測波形の自己相関関数と、地震波のみかけの伝播速度、波形の変形の程度(コヒーレンシー)とから行う。

図-1の集合Bは、条件(2b)を満足し、条件(1)は満足しない、従来のシミュレーション理論による時空間確率過程である。これに対し、集合C, D, Eは、何れも条件(1)を満足しており、加えて、それぞれ、条件(2a)(2b)(2c)を満足している場合である。

#### 4. 時空間波形の算定理論

これまでに観測記録を含む時空間地震波形を算定する手法としては、主に以下の手法が展開されている。これらの方法は、前節の条件(2a)~(2c)の3つのケースに対応して、大きく次の3つのグループに分類することができる。

##### (1) 内挿波形(集合C)を求める方法

本方法は波形の内挿を求める方法であり、次の方法が考えられる。

- ① 時間領域で、同時刻の変位を内挿する方法<sup>11,12)</sup>

- ② 周波数領域で、相乗平均を用いる内挿方法<sup>13)</sup>

本方法は、観測波形が複数個ある場合に有効である。極端な例として、2地点での観測波形が同一の波形の場合には、全く同じ波形が内挿されることを考えている。

##### (2) 条件付き確率過程(集合D)を求める方法

本方法は、従来の確率過程の理論に、観測波形の条件を加える方法である。このため、従来の確率過程の理論と同様に、多くの時空間サンプルのアンサンブル平均が、3節の条件(2b)を満足する方法である。この方法はさらに以下のように分類される。

###### (a) 振動数領域での方法

- ① 不規則確率過程のシミュレーション理論に基づく方法<sup>5)</sup>
- ② 多入力線形システム理論に基づく方法<sup>6)</sup>
- ③ Kriging手法を用いる方法<sup>14)</sup>
- ④ フーリエ係数の条件付き確率密度関数を用いる方法<sup>9,10)</sup>

###### (b) 時間領域での方法

- ① 多変数(両側)ARモデルを用いる方法<sup>7)</sup>
- ② Kriging手法を用いる方法<sup>15-18)</sup>
- ③ カルマンフィルターとKrigingのハイブリッド法<sup>19)</sup>

##### (3) 時空間設計波形(集合E)を求める方法

本方法は、各々の時空間サンプルが、3節の条件(2c)を満足する方法であり、設計のための代表的な時空間設計波形を求める方法である。本方法に関しては、次の手法を提案している。

- ① 二重フーリエ級数を用いる方法<sup>3,4)</sup>

以下では、条件(2a)~(2c)の3つのケースに対応する4.(1)~4.(3)節の方法の内、これまでに筆者らが提案してきた方法を中心に、これらの理論および特徴を簡単にまとめる。

#### 5. 内挿波形(集合C)を求める方法

2地点で観測された地震波形を内挿するという考えであり、クロススペクトルは想定しない。

- ① 時間領域で、同時刻の変位を内挿する方法<sup>11,12)</sup>

本方法は、各地点の変位を、各時刻毎に独立に考え内挿するという、簡便な方法であり、類似した波形を内挿するには有用である。しかし、異なる時間の変位の間の関係を考えないため、波動が空間内を伝播し、対応する変位が異なる時刻に出現するような地震波動の場合には、適当ではない。各時刻毎に、変位の直線分布を考えると、観測点間の値は小さく求められてしま

う。波動の伝播を考慮できる内挿方法が必要である。

## ② 周波数領域で、相乗平均を用いる内挿方法<sup>13)</sup>

二地点で観測された地震波のデータをFFTによって周波数領域に変換し、重み付き相乗平均を用いて、内挿波形を算出する方法である。

観測点0, Lの波形データを $u_0(t), u_L(t)$ とする。これらのフーリエ変換 $C_0(\omega), C_L(\omega)$ は、次式で表される。

$$\begin{aligned} C_0(\omega) &\equiv |C_0(\omega)| \exp\{i\phi_0(\omega)\} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(t) \exp\{-i\omega t\} dt \\ C_L(\omega) &\equiv |C_L(\omega)| \exp\{i\phi_L(\omega)\} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} u_L(t) \exp\{-i\omega t\} dt \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $\phi_0(\omega), \phi_L(\omega)$ は位相である。

これらの $C_0(\omega), C_L(\omega)$ の重み付き相乗平均をとることにより内挿を行う。観測点間の距離をLとする場合、観測点0から距離 $x(0 \leq x \leq L)$ の地点での内挿波形を次式のように表す。

$$u_x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \{C_0(\omega)\}^{(L-x)/L} \{C_L(\omega)\}^{x/L} \exp(i\omega t) d\omega \quad (2)$$

式(2)から、位置 $x$ における振幅は重み付き相乗平均、位相は重み付き相加平均で与えられていることが示される<sup>13)</sup>。

上式で位相 $\phi_L(\omega), \phi_0(\omega)$ を求める場合、三角関数は $2\pi$ の周期性を持っているため、観測波形 $u_0(t), u_L(t)$ だけからは一意に定まらない。そこで、地表面でのみかけの波速 $c$ を、相互相関関数のピーク、または、低振動数での位相差を用いて決定する。そして、この波速から想定される位相に最も近い値に、位相を一意に決定している。

## 6. 条件付き確率過程(集合D)を求める方法

### (1) 振動数領域の方法

#### ① 不規則確率過程のシミュレーション理論に基づく方法<sup>5)</sup>

場所 $i$ と時間 $t$ における地盤の変位を、互いに相関を有する $I$ 個の確率過程 $u_i(t)(i=1, 2, \dots, I)$ で表す。 $u_i(t)$ は、片側クロススペクトル $S_{XT}(x_0, \omega)$ ( $x_0$ :二地点間の距離、 $\omega$ :角振動数)が与えられた場合、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} u_i(t) &= \sum_{p=1}^i \sum_{n=1}^N \left| H_{ip}(\omega_n) \sqrt{\Delta\omega} \right| \sqrt{2} \\ &\quad \cdot \cos\{\omega_n t + \theta_{ip}(n) + \phi_{pn}\}; (i=1, 2, \dots, I) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、直流成分は存在しないものと想定しており、 $N$ は十分大きな整数である。また、 $H_{ip}(\omega_n)\sqrt{\Delta\omega}$ は、片

側クロススペクトルを要素とするマトリックスを分解して与えられる。 $\theta_{ip}(n)$ は $H_{ip}(\omega_n)\sqrt{\Delta\omega}$ の偏角である。

本方法は、観測波形が1個である場合に有効であり、 $u_1(t)$ が観測記録に一致するという条件は、 $\phi_{1n}(n=1, \dots, N)$ を乱数ではなく、観測記録から求めることで満足される。また、 $\phi_{pn}(p=2, \dots, I)(n=1, \dots, N)$ は $0 \sim 2\pi$ の範囲で互いに独立な一様乱数である。

#### ② 多入力線形システム理論に基づく方法<sup>6)</sup>

非観測地点の地震波形を、観測記録を入力とする線形システムの出力として取り扱うものである。地点 $x_i(i=1, 2, \dots, I)$ の中の地点 $x_k(k=1, 2, \dots, K)$ (観測地点)において観測記録 $u_k(t)$ が得られているとする。このとき、非観測地点 $x_v(v=K+1, K+2, \dots, I)$ における地震波形 $u_v(t)$ を次式でシミュレートする。

$$u_v(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=-N}^N H_{vk}(\omega_n) U_k(\omega_n) \exp(i\omega_n t) + z_v(t) \quad (4)$$

ただし、 $U_k(\omega_n)$ は観測記録の複素フーリエ係数である。また、 $H_{vk}(\omega_n)$ は複素伝達関数、 $z_v(t)$ は付加雑音であり、想定したクロススペクトルから求めることができる。

#### ③ 周波数領域でKriging手法を用いる方法<sup>14)</sup>

Vanmarcke, Fentonが提案したKriging手法に基づく方法<sup>14)</sup>では、まず、観測波形をフーリエ級数に展開し、観測地点 $x_a$ におけるフーリエ係数 $\overline{A_{ak}}, \overline{B_{ak}}$ を求め、非観測地点 $x_b$ における係数 $\overline{A_{bk}}, \overline{B_{bk}}$ をKriging手法により推定する。一方、観測点と非観測点のすべての地点に対して、無条件のフーリエ係数 $A_{ak}, B_{ak}, A_{bk}, B_{bk}$ を従来の方法によりシミュレートする。そして、観測地点におけるフーリエ係数から、非観測点における係数 $A_{bk}^*, B_{bk}^*$ をKriging手法により推定する。結局、条件付きフーリエ係数 $\widetilde{A_{bk}}, \widetilde{B_{bk}}$ は次式で求められる。

$$\begin{aligned} \widetilde{A_{bk}} &= A_{bk} + \overline{A_{bk}^*} - A_{bk}^* \\ \widetilde{B_{bk}} &= B_{bk} + \overline{B_{bk}^*} - B_{bk}^* \end{aligned} \quad (5)$$

$\widetilde{A_{bk}}, \widetilde{B_{bk}}, \overline{A_{ak}}, \overline{B_{ak}}$ を、すべての振動数に対して求め、フーリエ逆変換すれば、条件付き時空間波形が得られる。

#### ④ フーリエ係数の条件付き確率密度関数を用いる方法<sup>9,10)</sup>

亀田・盛川<sup>9,10)</sup>は、まず、観測波形をフーリエ級数に展開し、観測地点 $x_a$ におけるフーリエ係数 $\overline{A_{ak}}, \overline{B_{ak}}$ を求めている。そして、この値を条件と考え、非観測地点 $x_b$ における係数 $\widetilde{A_{bk}}, \widetilde{B_{bk}}$ の分布である条件付き確

率密度関数

$$f \left\{ \overline{A_{bk}}, \overline{B_{bk}} \mid \overline{A_{ak}}, \overline{B_{ak}} (a=1, 2, \dots, K) \right\} \quad (6)$$

を解析的に表している。これは、多次元の結合正規確率密度関数で表され、平均値と標準偏差を求める問題になる。

## (2) 時間領域の方法

### ① 多変数（両側）AR モデルを用いる方法<sup>7)</sup>

地盤の変位を互いに相関を有する定常ガウス確率過程であると考え、地点  $i$  と時刻  $t$ （ここで、 $t$  は整数としても一般性を失わない）における地盤の変位を、互いに相関を有する平均値 0 の多変数 AR モデル

$$u_i(t) = \sum_{p=1}^i \sum_{m=1}^M b_{ip}(m) u_p(t-m) + \varepsilon_i(t) \quad (i=1, 2, \dots, I) \quad (7)$$

または、多変数両側 AR モデル

$$u_1(t) = \sum_{m=-M}^{-1} b_{11}(m) u_1(t+m) + \varepsilon_1(t) \quad (8)$$

$$u_i(t) = \sum_{p=1}^{i-1} \sum_{m=-M_2}^{M_3} b_{ip}(m) u_p(t+m) + \sum_{m=-M}^{-1} b_{ii}(m) u_i(t+m) + \varepsilon_i(t) \quad (i=2, \dots, I) \quad (9)$$

で表す。ここで、 $\varepsilon_i(t)$  は誤差波形、 $M, M_2, M_3$  はモデルの次数である。

式(7)(8)は、従来の AR モデルであるが、式(9)は既に計算されている波形  $u_p(t)$  ( $p=1, 2, \dots, i-1$ ) については過去の値だけでなく、現在および未来の値も使用している。係数  $b_{ip}(m)$  は、相互相関関数を係数とする連立一次方程式により求めることができる。

与えられた  $K$  地点の観測記録を含む時空間地震波形のシミュレーションを行う場合には、誤差波形  $\varepsilon_i(t)$  ( $i=1, \dots, K$ ) を乱数に基づくのではなく、観測記録に基づいて決める必要がある。

### ② 時間領域で Kriging 手法を用いる方法<sup>15-18)</sup>

星谷・丸山<sup>15,16)</sup>は、時間領域で、非観測点の波形を、観測点の時系列  $u_k(t)$  ( $k=1, 2, \dots, K$ ) の線形和として表す Kriging 手法に従い、次のように表し、

$$u_i(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=-M_2}^{M_3} b_{ik}(m) u_k(t+m) + \varepsilon_i(t) \quad (10)$$

誤差  $\varepsilon_i(t)$  の分散が最小となるように係数  $b_{ik}(m)$  を決める方法を展開している。

### ③ カルマンフィルターと Kriging のハイブリッド法<sup>19)</sup>

清野、鈴木<sup>19)</sup>は、Kriging の推定誤差共分散がカル

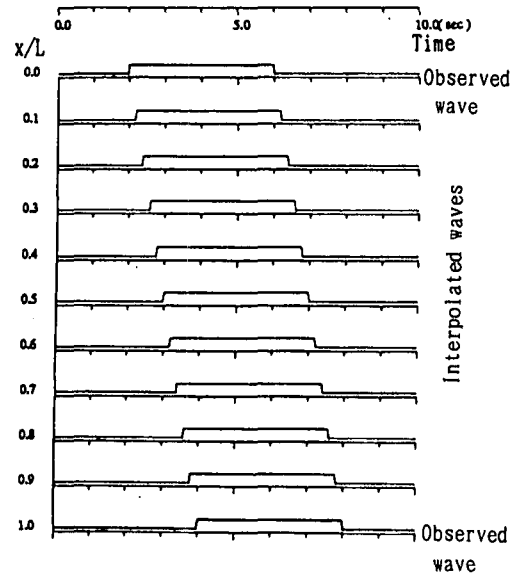


図-2 時空間波形の内挿  
(矩形波形の場合)

マンフィルターの観測更新による推定誤差共分散と等価であることに着目し、場の確率特性として指数型の共分散関数が与えられた場合に、時間方向、空間方向の相関をそれぞれ満足するような波形を、カルマンフィルターと Kriging のハイブリッド法により逐次推定する手法を提案している。

## 7. 時空間設計波形（集合 E）を求める方法

### ① 二重フーリエ級数を用いる方法<sup>3,4)</sup>

場所  $x$  と時間  $t$  における地盤の変位を、 $u(x, t)$  で表し、これを二重フーリエ級数

$$u(x, t) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \{ a_{mn} \cos(k_m x) \cos(\omega_n t) + b_{mn} \cos(k_m x) \sin(\omega_n t) + c_{mn} \sin(k_m x) \cos(\omega_n t) + d_{mn} \sin(k_m x) \sin(\omega_n t) \} \quad (11)$$

に展開する。相互相関関数および観測記録から係数  $a_{mn}, b_{mn}, c_{mn}, d_{mn}$  を決定する。他の方法では、時空間関数のサンプルのアンサンブル平均が相互相関関数（またはクロススペクトル）を満足するのに対し、本方法では、各々のサンプルが満足する点に特徴がある。

## 8. 数値計算例

### (1) 内挿波形（集合 C）の例

ここで、単純な波形を用いて、5.②の解析方法の妥当性を示す。図-2 では矩形波が観測点  $0, L=1$  において

観測された(図中太線)として解析した。波形  $u_0(t)$  に対し  $u_L(t)$  の立ち上がり時間が 2 秒遅れている場合を考え、解析を行った。内挿波形の立ち上がり前後の誤差がほとんど見られず、また、立ち上がり時間がなめらかに変化しており、理想的な内挿波形が得られている。

次に、兵庫県南部地震(1995)の際、関西地震観測研究協議会によって福島と森河内で観測された速度波形を用いて解析を行った。観測点  $0, L$  はそれぞれ福島と森河内の観測点で、2 点間の距離は約 7km、振動の方向は N-S 方向である。観測された地震波の相互相関関数を計算すると、ピークは  $\tau =$  約 0.65sec 付近に現れていることがわかり、このことからみかけの波速  $7/0.65$  km/s を用いて解析を行った。図-3 は観測点間を 10 等分し、その各点について内挿波形を算出したものである。ほぼ妥当な結果が得られているものと考えられる。

## (2) 条件付き確率過程(集合 D) の例

数値計算には、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内において<sup>20)</sup>、1986 年 6 月 24 日に観測された房総半島沖地震における加速度記録(地下 1m, NS 成分)の地震記録を使用する。観測地点を P0, C0, P5 の 3 地点と考え、15m 間隔に並ぶ合計 23 地点での地震波形をシミュレートした。なお、本論文では、6.(2) 節①の多変数(両側) AR モデルを用いる方法によりシミュレートした結果を示してある。

まず、時空間地震波形をシミュレートするためのクロススペクトルは次式により想定する。

$$S_{XT}(x_0, \omega) = S_T(\omega) \exp\{-\alpha |\omega| |x_0| / (2\pi c)\} \cdot \exp(-i\omega x_0 / c) \quad (12)$$

ここで、 $S_T(\omega)$  はパワースペクトルであり、3 地点の観測記録のパワースペクトルの平均値を用いた。 $\alpha$  は波形の変形しやすさの程度を表すパラメーターであり、これを変形定数と呼んでいる<sup>1)</sup>。 $c$  は地震波の地表面に沿うみかけの伝播速度である。本論文では、 $c=4,000$  m/sec の値を、また、 $\alpha=2\pi$  を使用した。想定した相互相関関数を図-4 に示す。

シミュレートした時空間地震波形のサンプルを図-5 に示す。シミュレーション結果では観測地点においては観測記録に一致している事がわかる(図-5 太線)。図-6 には、シミュレートされた時空間地震波形から求められた相互相関関数を示す。波形サンプルの相互相関関数が、想定した相互相関関数に調和的であることがわかる。

## (3) 時空間設計波形(集合 E) の例

7 節の手法を Kern County California 地震の観測記録に適用した計算結果の一例を以下に示す。本記録は

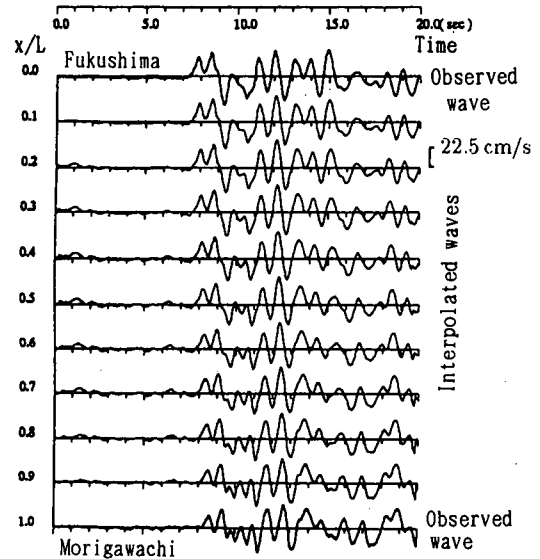


図-3 時空間波形の内挿  
(兵庫県南部地震の場合)

Taft 地震波として建築物等の動的解析に用いられる代表的な地震波形の一つである<sup>8)</sup>。ここでは、12 km 離れた二地点で同一の観測波形を示す場合を想定した。図-7 の太線は Taft 観測波形から求められた自己相関関数であり、細線は式(12)を用いて、みかけ速度  $c=1000$  m/s、変形定数<sup>5,6)</sup>  $\alpha=0.2 \times 2\pi$  として想定された相互相関関数である。

シミュレートされた時空間関数としての波形を図-8 に、この波形の相互相関関数を図-9 に示す。図-7 と図-9 の相互相関関数はよく一致しており、仮定した相互相関関数を満たす収束結果が得られている事がわかる。また、図-8 の太線と観測波形は良く一致しており、シミュレートされた時空間関数は、両端の地点で観測記録を満たしていることがわかる。

謝辞：本研究では、(財) 震災予防協会、強震動アレー観測記録データベース推進委員会/作業部会による強震動アレー観測記録(1992 年 10 月)から東京大学生産技術研究所片山研究室提供のデータベース並びに、関西地震観測研究協議会提供の強震記録のデータベースを使用いたしました。

## 参考文献

- 1) 川上英二・茂木秀則：多地点の地震観測記録を含む時空間確率過程の内挿とシミュレーション, JCOSSAR'95 論文集, 1995.
- 2) 川上英二・佐藤靖彦：地盤の相対変位・ひずみの推定結果に及ぼす地震波形の変形の影響, 土木学会論文報告集, No.337,1983.
- 3) 川上英二：一地点の観測記録を含む地震波形の時空間関数のシミュレーション, 土木学会論文集, No.410/I-

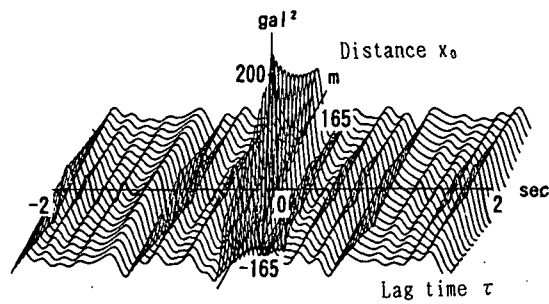


図-4 仮定した相互相関関数

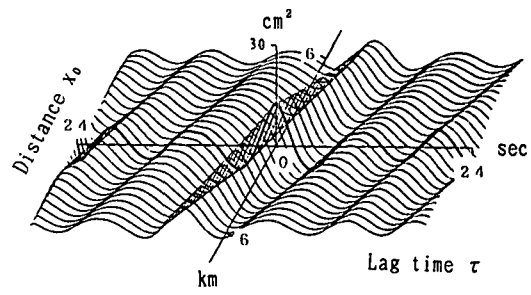


図-7 仮定した相互相関関数

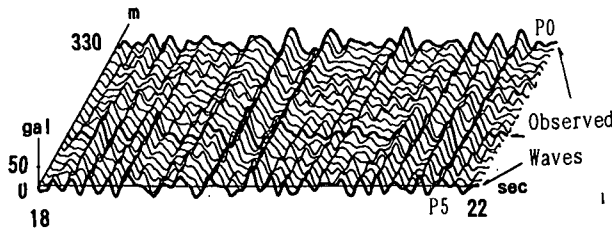


図-5 シミュレートした時空間関数  
(房総半島南東沖地震)

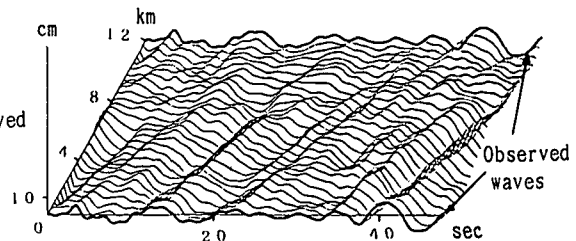


図-8 シミュレートした時空間関数  
(Taft 地震波の場合)

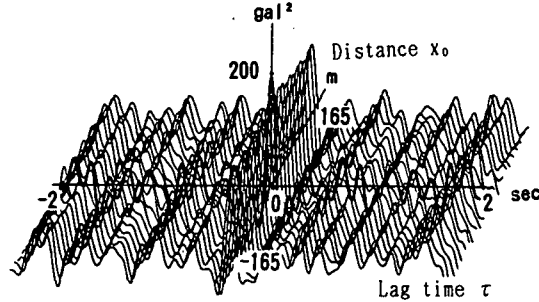


図-6 シミュレートされた時空間サンプル  
関数の相互相関関数

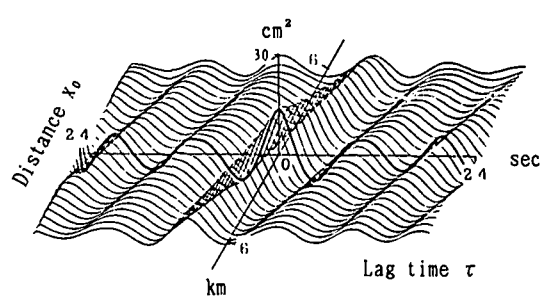


図-9 シミュレートされた時空間サンプル  
関数の相互相関関数

- 12,1989.
- 4) 川上英二：Imperial Valley 地震の観測記録を含む時空間関数としての地震波形のシミュレーション，第8回日本地震工学シンポジウム，1990.
  - 5) 川上英二・小野牧夫：一地点での観測記録を用いた時空間地震波形のシミュレーション，土木学会論文集，No.441,1992.
  - 6) 川上英二・小野牧夫：多入力線形システム理論に基づく観測記録を含む時空間地震波形，土木学会論文集，No.489,1994.
  - 7) 川上英二・小野牧夫：多変数 AR モデルを用いた観測記録を含む時空間地震波形，土木学会論文集，No.489,1994.
  - 8) 川上英二・小野牧夫・楊仲元：房総半島南東沖地震(1986)の観測記録を含む時空間シミュレーション波形，第9回日本地震工学シンポジウム，1994.
  - 9) Kameda, H. and Morikawa,H.: An Interpolating Stochastic Process for Simulation of Conditional Random Fields, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol.7, 1992.
  - 10) Kameda, H. and Morikawa,H.: Conditioned Stochastic Processes for Conditional Random Fields, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.120, 1994.
  - 11) 高田至郎・高谷富也・小川安雄・福井真二：モニタリングシステムにおける地震動補間法と精度の検証，構造工学論文集，Vol.40A, 1994.
  - 12) 高田至郎・高谷富也・小川安雄・福井真二：地震動モニタリングとライフラインのリアルタイム被害推定，構造工学論文集，Vol.40A, 1994.
  - 13) 川上英二・茂木秀則・佐藤誠一：周波数領域での重み付き相乗平均を用いた地震波の内挿方法，第10回日本地震工学シンポジウム論文集，1998.
  - 14) Vanmarcke, E.H. and Fenton, G.A.: Conditioned Simulation of Local Fields of Earthquake Ground Motion, *Structural Safety*, Vol.10, 1991.
  - 15) Hoshiya,M. and Maruyama,O.: Stochastic Interpolation of Earthquake Wave Propagation, *ICOSSAR'93*, Austria, 1993.
  - 16) 丸山収・星谷勝・山口和英：定常・均一ガウス確率場の条件付き地震波動シミュレーション，土木学会論文集，No.489/I-27,1994.
  - 17) Kiyono, J., Toki, K. and Sato, T.: Simulation of stochastic waves on a layered media with ireegular interfaces, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, 1994.
  - 18) 野田茂・星谷勝・大霜正樹：クリッキングによる地盤震動の条件付シミュレーション，第9回日本地震工学シンポジウム，1994.
  - 19) 清野純史・鈴木誠：カルマンフィルタとクリッキングのハイブリッド法による条件付確率波のシミュレーション，土木学会論文集，No.525/I-33, 1995.
  - 20) 片山恒雄・山崎文雄：地震動のアレー観測とデータベース，生研セミナーテキスト，東京大学生産技術研究所,1990.