

地震動特性のパターン化と 耐震設計への応用に関する基礎研究

鈴木浩平* 戸澤祥二** 青木 繁*

要 約

振幅、周波数が共に非定常である個々の実地震波のもっている特徴を抽出し、パターン認識の手法を用いて地震波の分類を行い、耐震設計への応用の便に供することを目的としている。

まず非定常である地震波を一定の短い時間間隔においては定常波とみなし、その定常波についてパワースペクトル密度を推定し、逐次時間を移動しながらパワースペクトル密度の時間的な変化を示すランニングパワースペクトル密度 (RPSD) を計算している。次にRPSDのピーク数、パワーの広がり方およびピークの相対的位置関係の3情報を、地震波を識別するのに必要な特徴としてとらえ、総計36個のパターンに分類している。

RPSDのパターンは本研究で新たに提案する正規分布関数を基本としたピーク関数を用いることによって模擬することができ、また、地震動時刻歴の位相差分布と時間的な強度の変動が対応していることに着目し、これらの特性を導入することによって、非定常性を考慮した耐震設計用模擬地震波を作成できることを明らかにしている。

1 はじめに

近い将来、来襲が予想される大地震を始め、地震現象そのものはきわめて不確定性の強いランダム現象であり、地震の発生、伝播機構の解明をはじめ、その特徴の把握が重要な研究対象となって久しいことは、周知の事実である。

一方、耐震工学の立場からは、耐震設計の際に想定する設計地震動の選定という大問題がある。現在、設計地震動としては El Centro (1940), Taft (1952) など国際的に多用されているものや、十勝沖 (1968) など国内で記録された強震動記録が採用されているほか、さまざまな用途から理論的あるいは実用的見地で提案されている模擬地震動 (ATH; Artificial Time History) がある。これらの動向や問題点について筆者らはすでに述べた (鈴木・青木, 1978)。

本研究は、地震動記録のもつ特徴を抽出し、それを設定したクライテリアにより分類し、いわゆるパターン認識という手法により耐震設計の便に供する目的ですすめられたものである。

まず、地震動の有するスペクトルの時間的な変動を記述する非定常ランニングスペクトルを手段として用いた本手法の概要について述べ、いくつかの計算例により特徴を示す。さらに、ランニングスペクトルのピーク近傍の形状と2次元正規結合確率密度関数との相似性に着目して、振幅のみでなく周波数の非定常性をも記述できる新しい模擬地震波の作成手法を提案している。

2 地震波のパターン化

振幅、周波数が共に非定常性を有する実地震をパターンとして分類するには、振幅と周波数の時間的な変動の特徴を画像情報としてとらえ、パターン化する方法がある (中田, 1978)。振幅の非定常性に関しては、その変動のようすを時間の確定関数として表わす包絡関数 (envelope function) がいくつか提案されている。例えば、Shinozuka は

$$P_1(t) = A_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}); 0 \leq t \quad \dots (1 \cdot 1)$$

なる確定関数を提案しており、また、Housner ら (1968)

*東京都立大学都市研究センター・工学部

**東京都立大学大学院工学研究科

は地震動を初動部、主要動部および減少部に分け、それぞれ

$$P_2(t) = \begin{cases} A_0(t/X_1)^2 & ; 0 \leq t < X_1 \\ A_0 & ; X_1 \leq t < X_2 \\ A_0 \exp\{-\alpha(t-X_2)\} & ; t \geq X_2 \end{cases} \quad (1 \cdot 2)$$

なる形で包絡関数を仮定している。これらは、工学的には扱いやすいという利点があり、耐震工学上多く利用されている。

しかし、このような t の確定的包絡関数だけでは、周波数の非正常性を記述することができない。そこで周波数領域と時間領域の両方における非正常性を記述でき、しかも地震波の有する情報を直接的に抽出できるものとして、パワースペクトル密度の時間的変化を示すランニングパワースペクトル密度 (Running Power Spectral Density, 以下 RPSD と略す) を導入し、地震動の非正常性を考えることにする。すなわち、

- (1) RPSDのピークの数
- (2) パワーの広がり方
- (3) ピークの相対的位置関係

の3個の特徴を画像情報としてとらえ、地震波の分類を試みる。このほか、複数のピークを有する場合のスペクトル曲線のピーク値の比も考慮すべきと思われるが、ここでは問題を単純化するために省略した。

2-1. RPSDの計算法

実地震波を一定の時間間隔で分割し、その間では定常波とみなし、時間を逐次ずらしながらスペクトル解析を行う。ここではスペクトル解析手法としてはデータ数が少なくとも精度良く推定することができ、スペクトル曲線の細部の凸凹を平滑し、大局的特徴を把握するのに適切な手法として、自己回帰モデルを用いた推定法 (AR法) を採用している。結果は横軸に時間、縦軸に周波数を取り、RPSDをそのピーク値で正規化し、対数的に10段階に振り分け、筆者らの考案による計算機のラインプリンターの記号の濃淡でその大きさを表わす。

記号は、それぞれの図中に示してある。

2-1-1 AR法によるスペクトル解析

自己回帰モデル (auto-regressive model) によるパワースペクトル密度の推定法の概要 (赤池・中川, 1922, 日野 1977) をのべる。

いま、定常時系列 $x(s)$ ($s=1, 2, \dots$) を $x(s)$ から過去の M 時点の間の値 $x(s-1), \dots, x(s-M)$ の線形結合によって表現されるものとする $x(s)$ は次式で示される。

$$x(s) = \sum_{m=1}^M a(m) \cdot x(s-m) + \varepsilon(s) \quad \dots\dots(2 \cdot 1)$$

ここで、

$a(m)$: 自己回帰係数
 $\varepsilon(s)$: 残差

いまデータの長さが無限大であるし、 $x(s)$ の直流分

$$m_x = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N x(s) \quad \dots\dots(2 \cdot 2)$$

は0であるとしておく。この時、平均自乗残差は式(2・1)より次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon^2(s)} &= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N \varepsilon^2(s) \\ &= R_{xx}(0) - 2 \sum_{m=1}^M a(m) R_{xx}(m) \\ &\quad + \sum_{l=1}^M \sum_{m=1}^M a(l) a(m) R_{xx}(m-l) \end{aligned} \quad \dots\dots(2 \cdot 3)$$

$\overline{\varepsilon^2(s)}$: 平均自乗残差
 R_{xx} : 自己共分散関数

式(2・3)より自己共分散関数の値 $R_{xx}(0), R_{xx}(1), \dots, R_{xx}(M)$ が与えられれば平均自乗残差 $\overline{\varepsilon^2(s)}$ を最小にする線形予測の係数 $a(1), a(2), \dots, a(M)$ が求められる。

十分大きな M に対して $a(m)$ を対応する最良線形予測を与えるものとすれば、これによって得られる $\varepsilon(s)$ は $x(s)$ の過去の値と無相関 (共分散が0) であるとみなすことができる。このとき $\varepsilon(s)$ のパワースペクトル密度は次式で表わされる。

$$P_{\varepsilon\varepsilon}(f) = \sigma^2; \quad -\frac{1}{2\Delta t} \leq f \leq \frac{1}{2\Delta t} \quad \dots\dots(2 \cdot 4)$$

$P_{\varepsilon\varepsilon}(f)$: $\varepsilon(s)$ のパワースペクトル密度
 Δt : データの読み取り時間間隔
 σ^2 : 分散
 f : 周波数 (サイクル/単位時間)

式(2・4)よりスペクトルは平坦なものとなり、従って $\varepsilon(s)$ は (離散的な時間パラメータの場合の) 白色雑音となる。また式(2・1)より $a(0) = -1$ とおくと $\varepsilon(s)$ の自己分散関数 $R_{\varepsilon\varepsilon}(l)$ は次式で表わされる。

$$R_{xx}(l) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a(m) a(n) R_{xx}(l-m+n) \quad \dots\dots (2.5)$$

ところで、自己共分散関数とパワースペクトル密度は Wiener-Khintchine の関係式で結ばれ次のようになる。

$$R_{xx}(l) = \int_{-\frac{1}{2\Delta t}}^{\frac{1}{2\Delta t}} \exp(i2\pi fl\Delta t) P_{xx}(f) df \quad \dots\dots (2.6)$$

従って式(2.5)と式(2.6)より次の関係式が導かれる。

$$R_{xx}(l) = \int_{-\frac{1}{2\Delta t}}^{\frac{1}{2\Delta t}} \exp(i2\pi fl\Delta t) P_{xx}(f) df = \int_{-\frac{1}{2\Delta t}}^{\frac{1}{2\Delta t}} \exp(i2\pi fl\Delta t) \left| \sum_{m=0}^M a(m) \exp(-i2\pi fm\Delta t) \right|^2 \cdot P_{xx}(f) df \quad \dots\dots (2.7)$$

式(2.4)と式(2.7)より与えられた時系列データの パワースペクトル密度は次式で示される。

$$P_{xx}(f) = \frac{\Delta t \sigma^2}{\left| 1 - \sum_{m=1}^M a(m) \exp(i2\pi fm\Delta t) \right|^2} \quad \dots\dots (2.8)$$

有限長のデータ $\{x(s); s=1, 2, \dots, N\}$ に基づいて上記の $a(m)$ の推定値を求めるためには、式(2.3)における自己共分散関数 $R_{xx}(l)$ を有限長データから求められる推定値 $C_{xx}(f)$ $\left(= \frac{1}{N-l} \sum_{s=1}^{N-l} x(s+l)x(s) \right)$ でおき直したものを最小にする $a(m)$ の値を求めればよい。これを $a_M(m)$ ($m=1, 2, \dots, M$) で表わすことにすると $a_M(m)$ は次式で示される M 元連立 1 次方程式の解として与えられる。

$$\sum_{m=1}^M C_{xx}(l-m) a_M(m) = C_{xx}(l) \quad (l=1, 2, \dots, M) \quad \dots\dots (2.9)$$

M としてどのような値をとればよいかはあらかじめわからないから、 $M=1, 2, \dots, L$ と適当なまでの範囲の値に対して $a_M(m)$ を求めてその結果を比較して M を決

定する。具体的に M としてどのような値を採用するかについては、得られた $a_M(m)$ を用いて予測を行う場合の誤差を示す量 (final prediction error, FPE と略す) の推定値 $FPE(M)$ を求め、これが最小となるような M を採用する。赤池による FPE は次式で示される。

$$FPE(M) = \frac{N+M+1}{N-M-1} \cdot \sigma^2(M) \quad \dots\dots (2.10)$$

N : データ数

従って式(2.10)の値の最小値を与える M に対する $a(m)$ を最終的な推定量として採用する。この時 $\sigma^2(M)$ が $R_{xx}(0) = \sigma^2$ の推定値となる。

以上の流れ図を図2-1に示す。

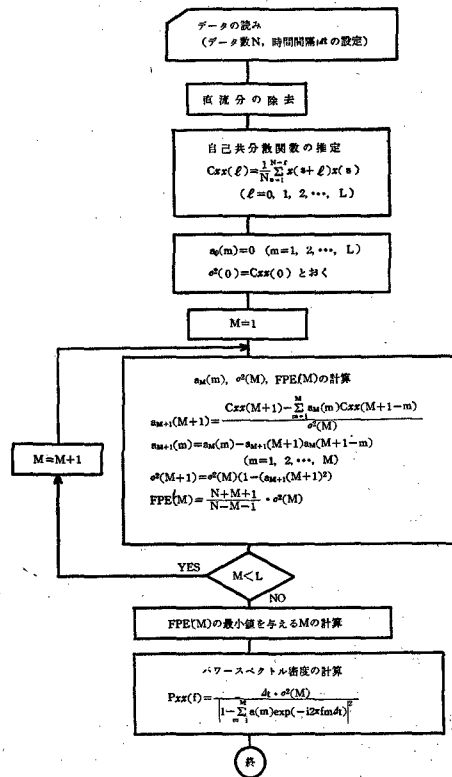


図 2-1 AR法によるパワースペクトル密度推定の流れ図

2-1-2 非定常スペクトル解析 (RPSDの推定)

AR法を用いるとデータ数が少なくてもパワースペクトル密度を比較的精度よく推定できることが知られている。そこで周波数、振幅の両領域で非定常である地震波形をある一定の短い時間間隔においては定常波とみなし、その区分波形についてAR法を用いてパワースペクトル密度を推定する。この操作を地震動の開始時点から逐次時間をずらしながらくり返し行い、得られた時間tに関する離散的な結果を時間関数として表わし、ランニングパワースペクトル密度 (RPSD) の推定値とする。この時、各々のパワースペクトル密度推定時における時刻は、定常波(定常波とみなした区分時刻歴)の継続時間の中心の時刻をもって代表させる。これを示すと図2-2のようになる。

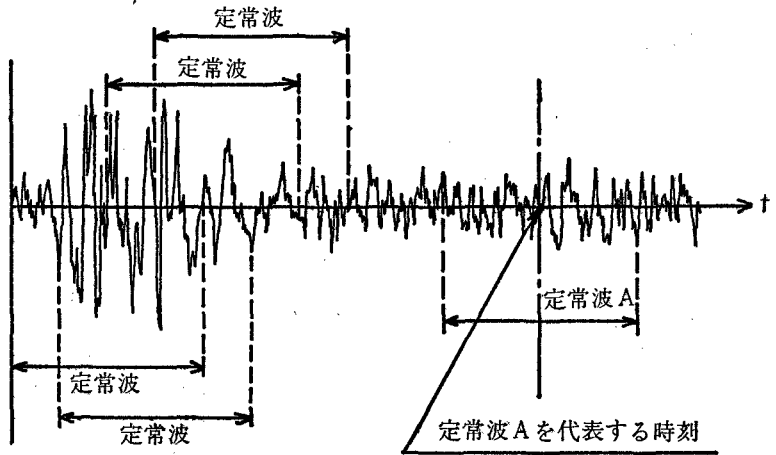


図 2-2 RPSD推定における地震波の分割

RPSDの推定において、スペクトル解析を行う定常波の継続時間は、短い方が非定常性の影響が強く表われるが、反面、データ数が少なくなるため、パワースペクトル密度の推定の精度が落ちてしまうという問題点がある。また、スペクトル解析を行う定常波の移動時間間隔は短い方がよりなめらかなスペクトル曲線として特徴を把握できる反面、計算時間がかかるという問題点がある。本研究では、これらのことを考慮し、分割時間間隔は4secとした。従って、データの読み取り時間間隔は $\Delta t = 0.01$ sec であるからデータ数は400個となる。また、移動時間間隔は0.5 secとした。

AR法で推定可能なパワースペクトル密度の最低周波数は、そのデータの継続時間の逆数となる。すなわち、データの継続時間が一周期となる周波数まで推定可能となる。従って、本研究では分割時間間隔が4 secであるから、周波数が0.25Hz以上でナイキスト周波数 $\frac{1}{2\Delta t} = 50$ Hzまで推定可能である。

RPSD推定の流れ図を図2-3に示す。

例として Taft N21E の RPSD を図2-4に示す。

比較のため、分割時間間隔を8 secとした場合と2 secとした場合の Taft N21E の RPSD をそれぞれ図2-5、図2-6に示す。両図と図2-4と比較することによって非定常性の影響は分割時間間隔が2 secの場合が一番強く表われている反面、低周波数におけるパワースペクトル密度の推定が不可能であることがわかる。

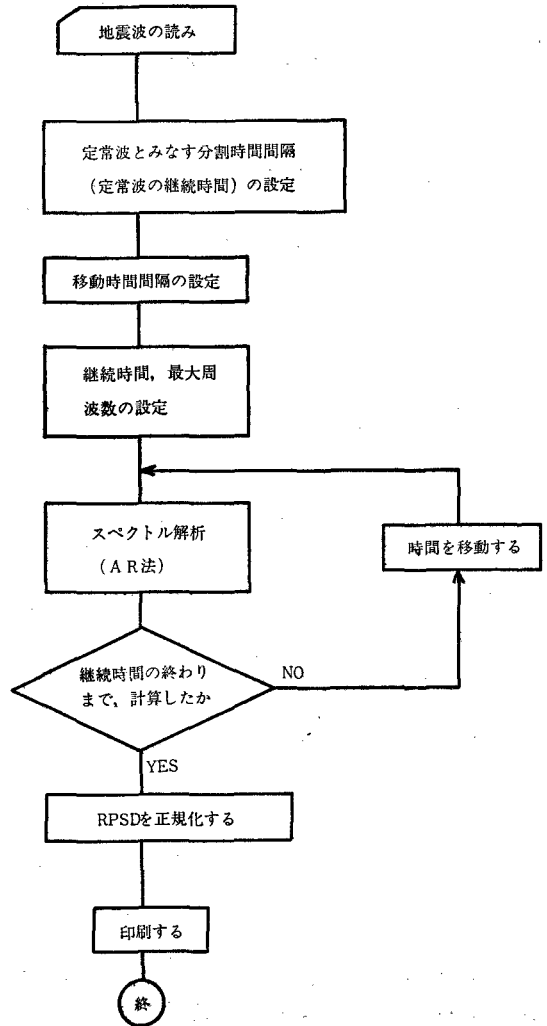


図 2-3 RPSD推定の流れ図

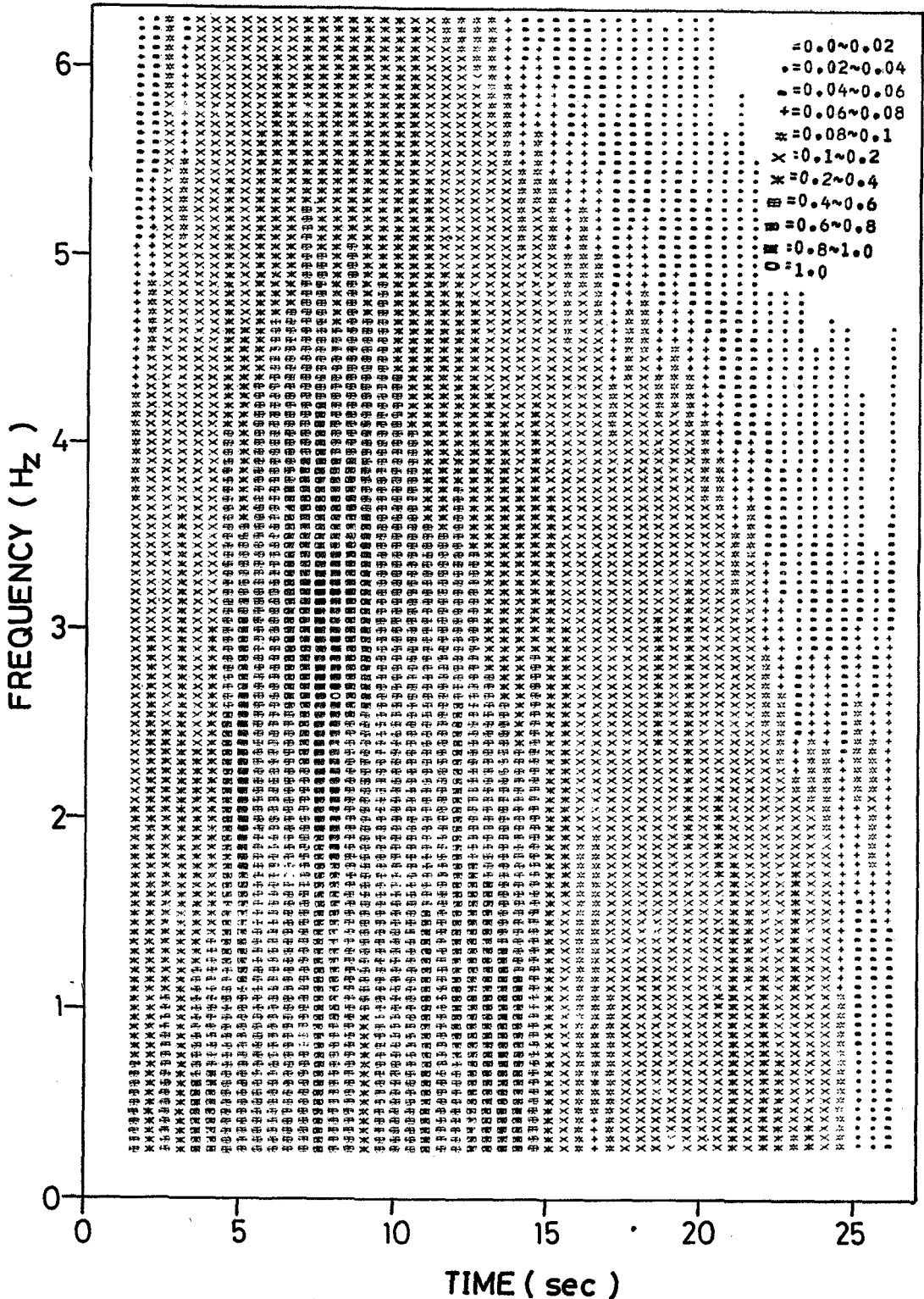


図 2-4 Taft N21E の RPSD (分割時間間隔 4 sec)

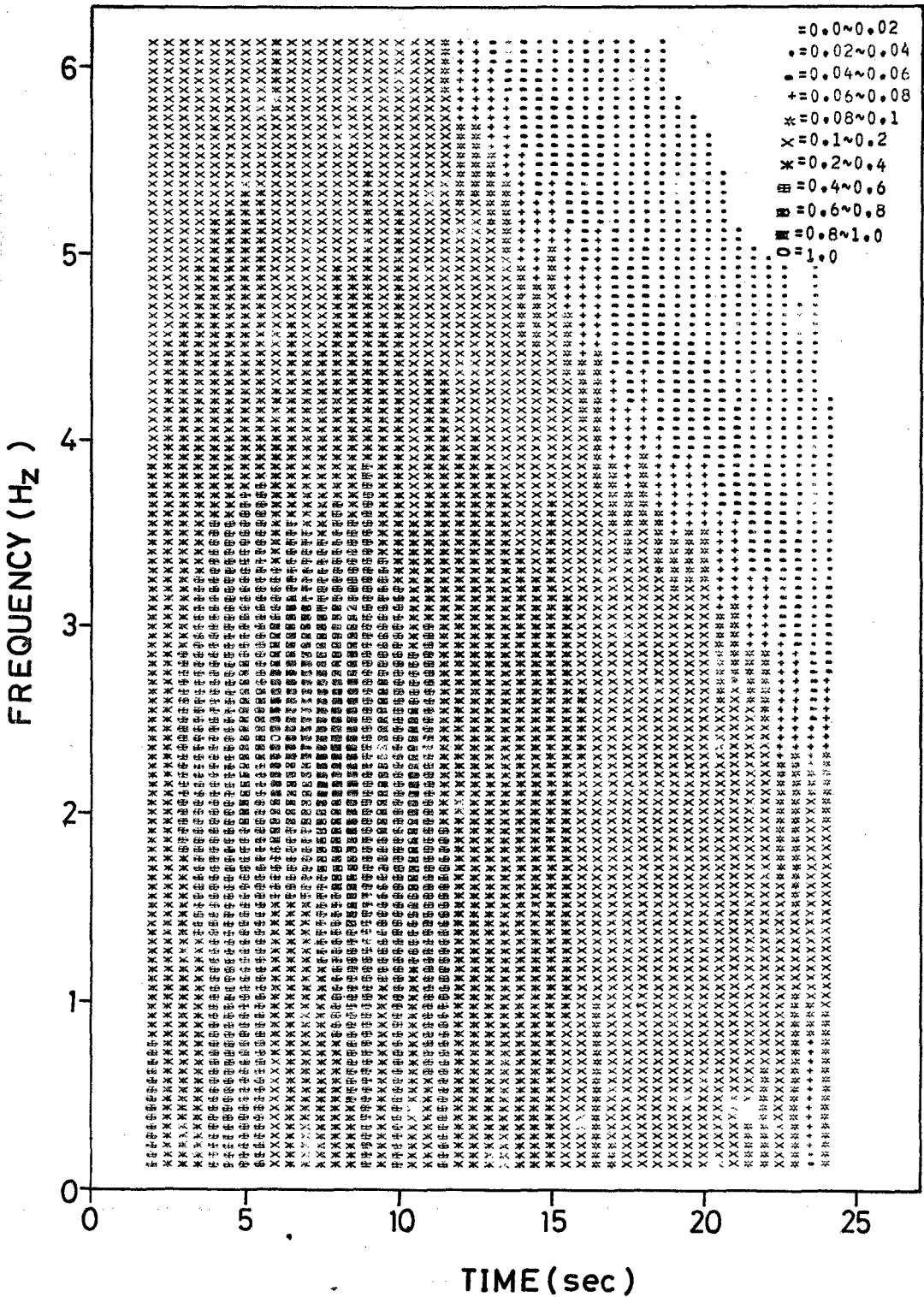


図 2-5 Taft N21EのRPSD (分割時間間隔 8 sec)

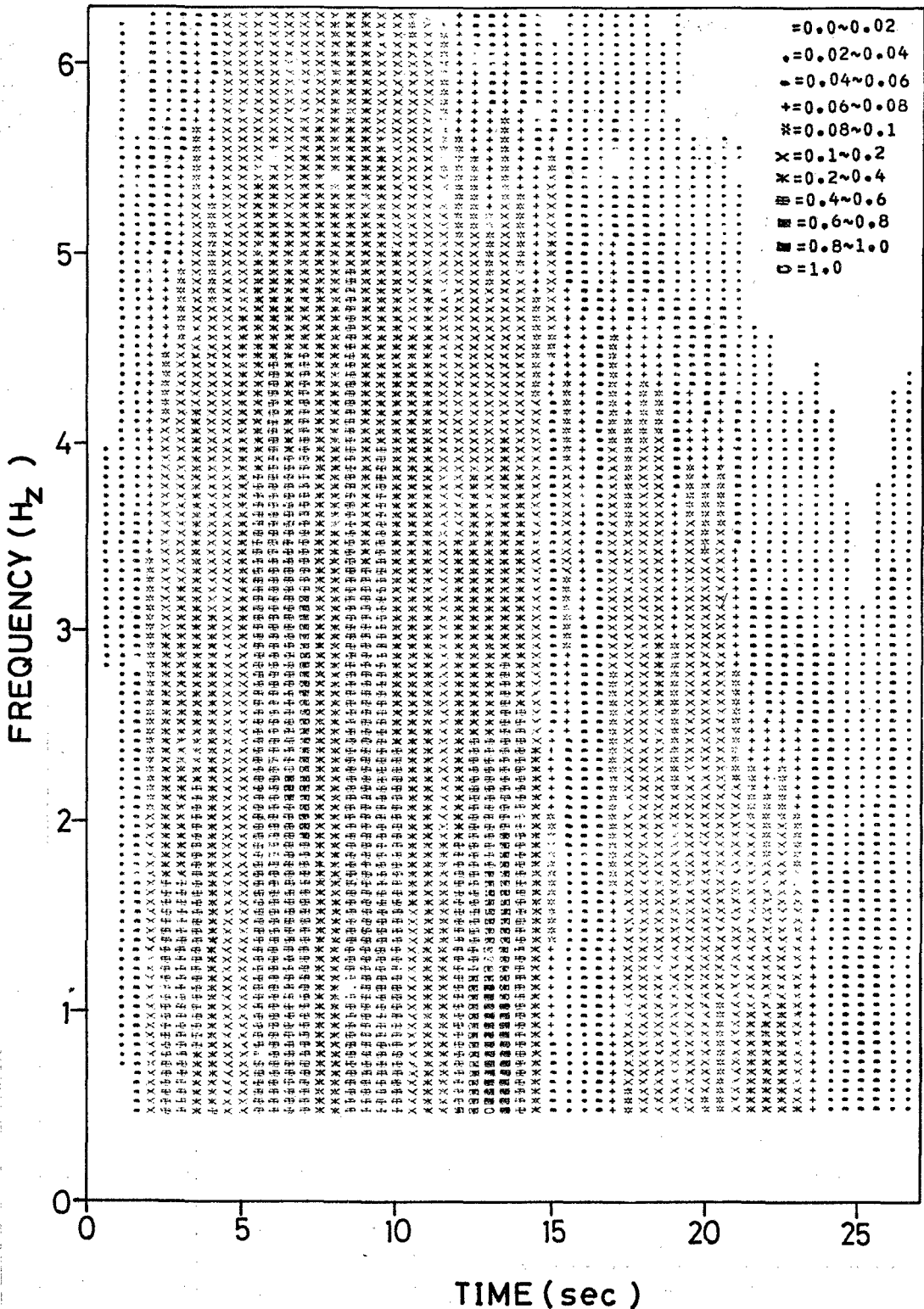


図 2-6 Taft N21EのRPSD (分割時間間隔 2 sec)

2-2 地震波のパターン化

すでに述べたように、工学的に多く用いられる典型的な強地震動記録について、そのRPSDのピークの数、パワーの広がり方、およびピークの相対的位置関係の3点に注目して地震波をパターンとして分類する。

ここでは、これらの区分法について提案を行う。

(1) ピークの数；

RPSDのピーク数は1個または2個で代表させる。2ピークの場合は、大ピークと小ピークとに分割する。大ピークは最大パワーの位置とする。小ピークはパワーの大きさが最大パワーの $\frac{1}{3}$ 以上であり、大ピークに対して独立であるもののみを抽出することとする。1ピークの場合をケースI、2ピークの場合をケースIIとする。

(2) パワーの広がり方

パワーの広がり方については下記の4ケースに分類する。ここでは、広がりをもつ、もたないの境界が問題となるが、最大パワーの $\frac{1}{3}$ 以上のパワーについて、時間領域に対しては6sec、周波数領域に対して1Hzを大略の目安とする。

2ピークの場合は大ピークのみに注目する。

- (i) 周波数領域、時間領域共に広がりをもつ場合(ケースa)
- (ii) 周波数領域のみに広がりをもつ場合(ケースb)
- (iii) 時間領域のみに広がりをもつ場合(ケースc)
- (iv) 周波数領域、時間領域共に広がりをもたない場合(ケースd)

(3) ピークの相対的位置関係

RPSDにおけるピークの位置は初期微動の長さ、継続時間のとり方によって大きく変化してしまふ。ここでは、2ピークの場合のピークの相対的位置関係を8領域に分類する。すなわち、図2-7のように大ピークを中心として小ピークの位置を上下左右とその中間の計8個のケースに分類し、左上から右へ1~8まで番号をつける。

以上をまとめると表2-1のように計36個のパターンに分類される。

図2-8~ 図2-18に実地震波のRPSDを示す。それぞれの地震波のRPSDのパターンは表2-2のようになる。

図2-19, 図2-20に十勝沖NSとEl Centro NSの固有周期 $T_n=0.1\text{sec}$, 減衰係数 $\zeta=0.005$ の質点系フィルターを介した狭帯域模擬地震波のRPSDを示す。図2-19と図2-20より狭帯域模擬地震波はほぼ2.5Hzの周

表2-1 地震波のパターン

分類項目	1ピーク, 2ピーク		2ピークのみ
	ピークの数	パワーの広がり方	ピークの相対的位置関係
ケース	I	a	1
		b	2
	II	c	3
		d	4

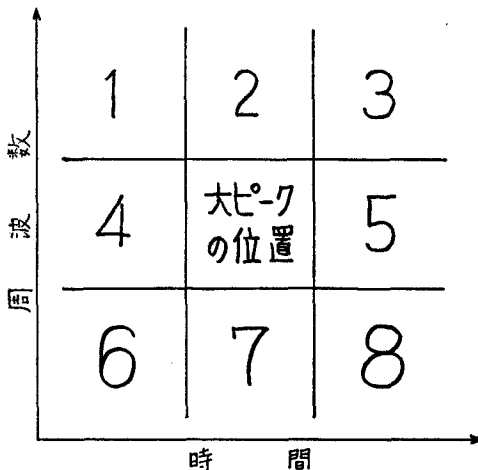


図 2-7 ピークの相対的位置関係

表2-2 実地震波のRPSDパターン

実地震波	パターン	図番
Taft N21E	I-a	図 2-4
十勝沖 NS	II-b-8	図 3-8
十勝沖 EW	I-b	図 3-9
尼ヶ崎 Lg	II-d-4	図 3-10
尼ヶ崎 UD	II-a-2	図 3-11
マナグア NS	I-a	図 3-12
マナグア EW	I-b	図 3-13
釧路 NS	I-a	図 3-14
釧路 EW	I-d	図 3-15
釧路 UD	I-b	図 3-16
El Centro NS	I-a	図 3-17
新潟 NS	I-b	図 3-18

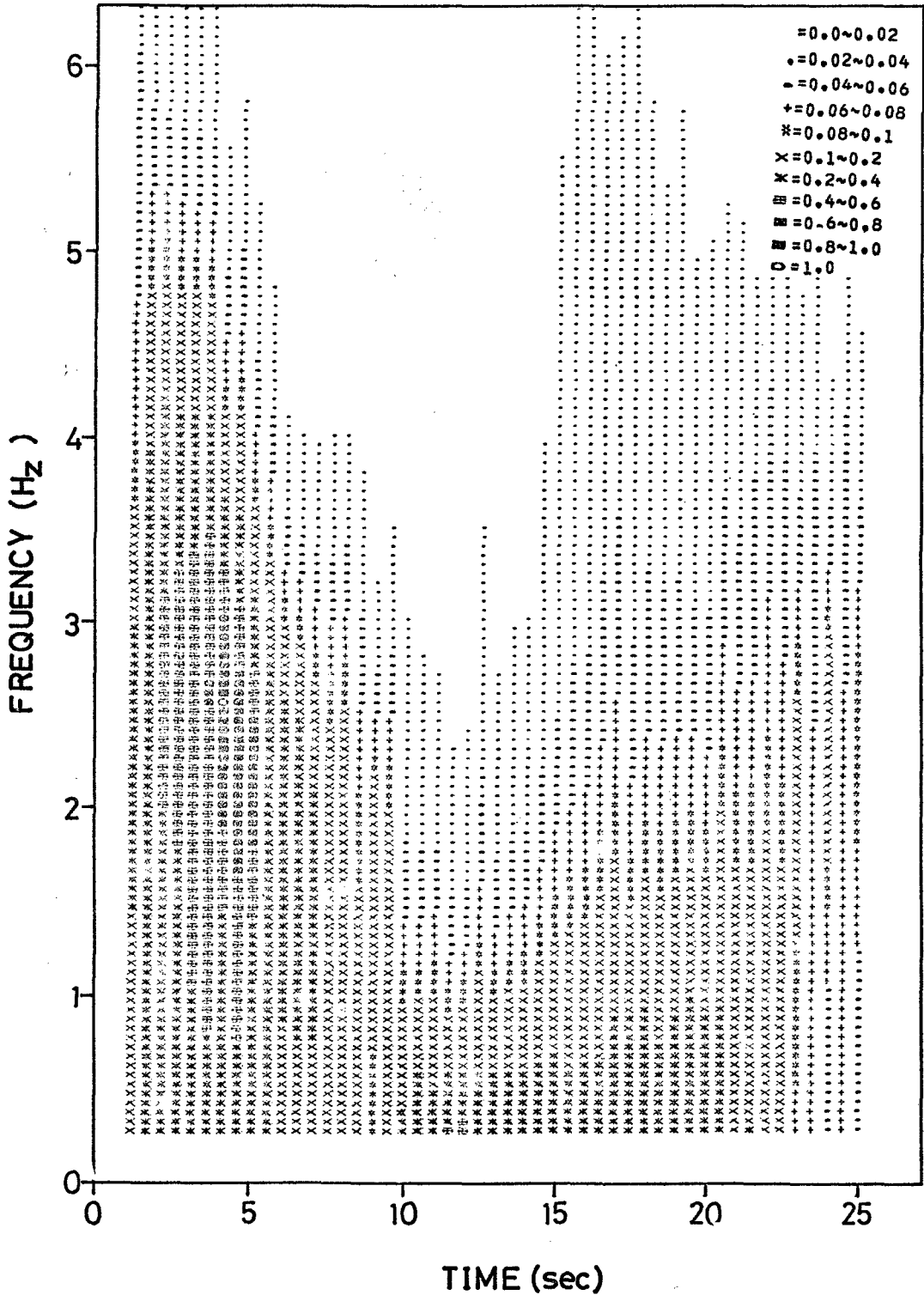


図 2-8 実地震波のRPSD (十勝沖NS)

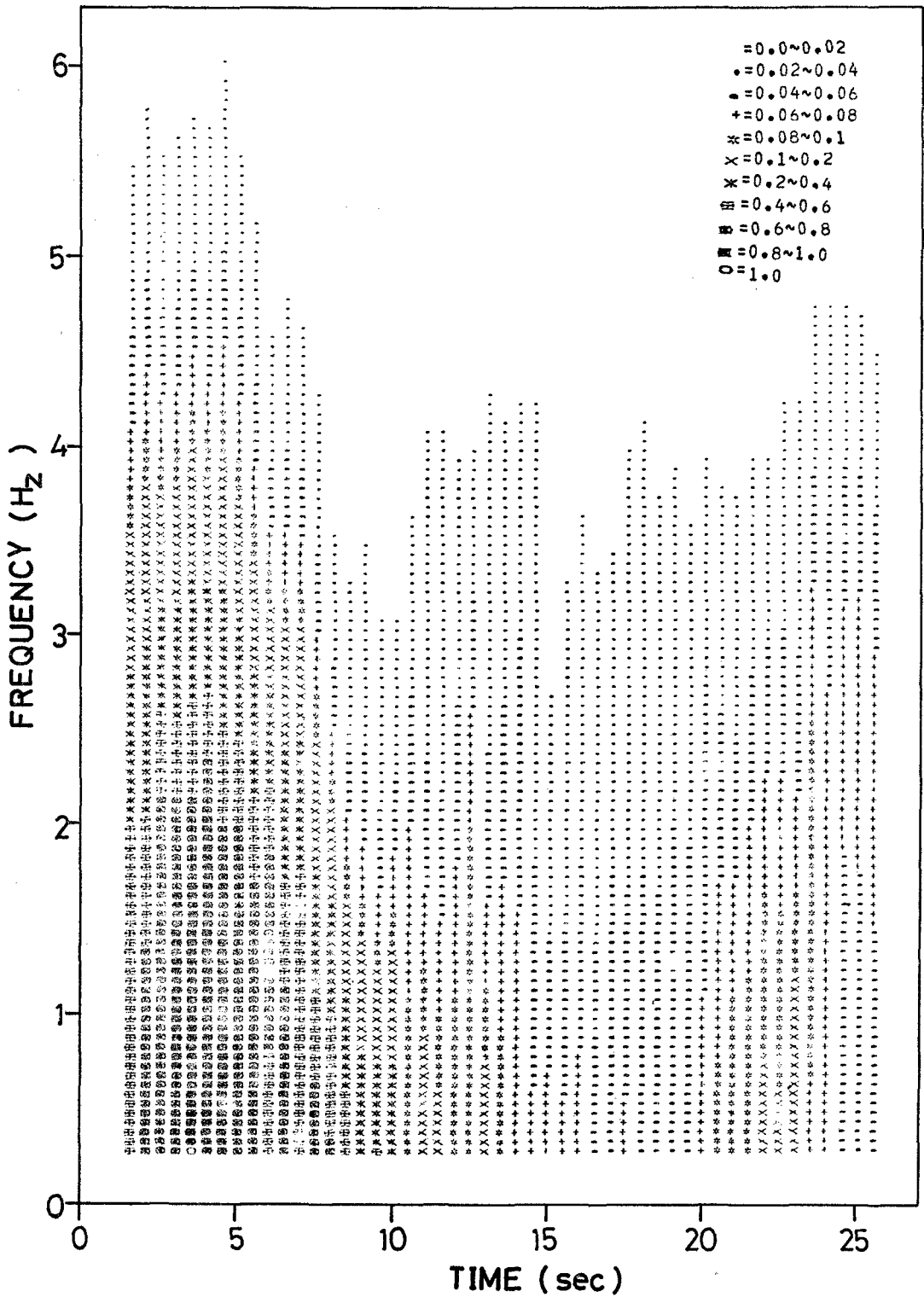


図 2-9 実地震波のRPSD (十勝沖EW)

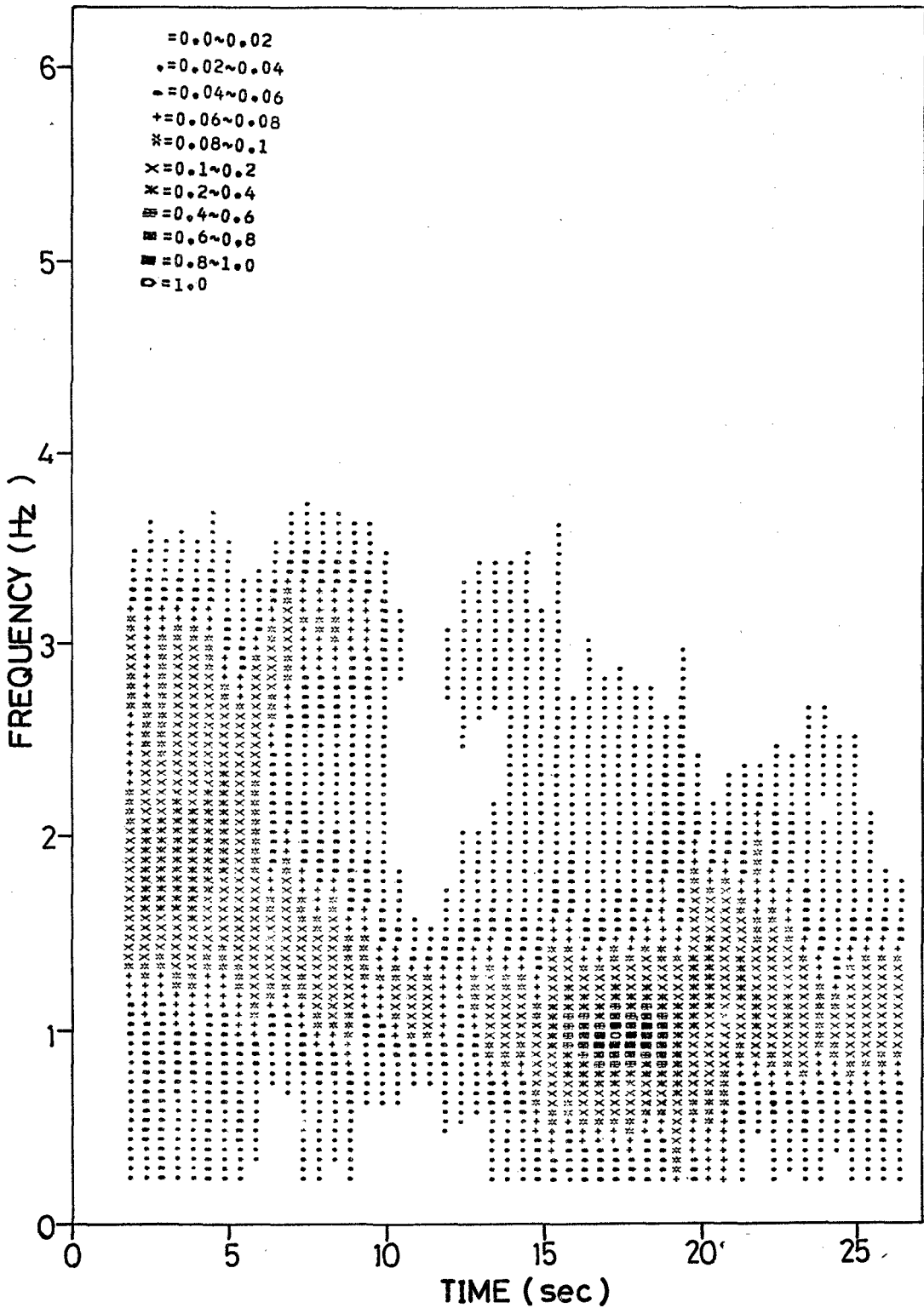


図 2-10 実地震波の RPSD (尼ヶ崎 Lg)

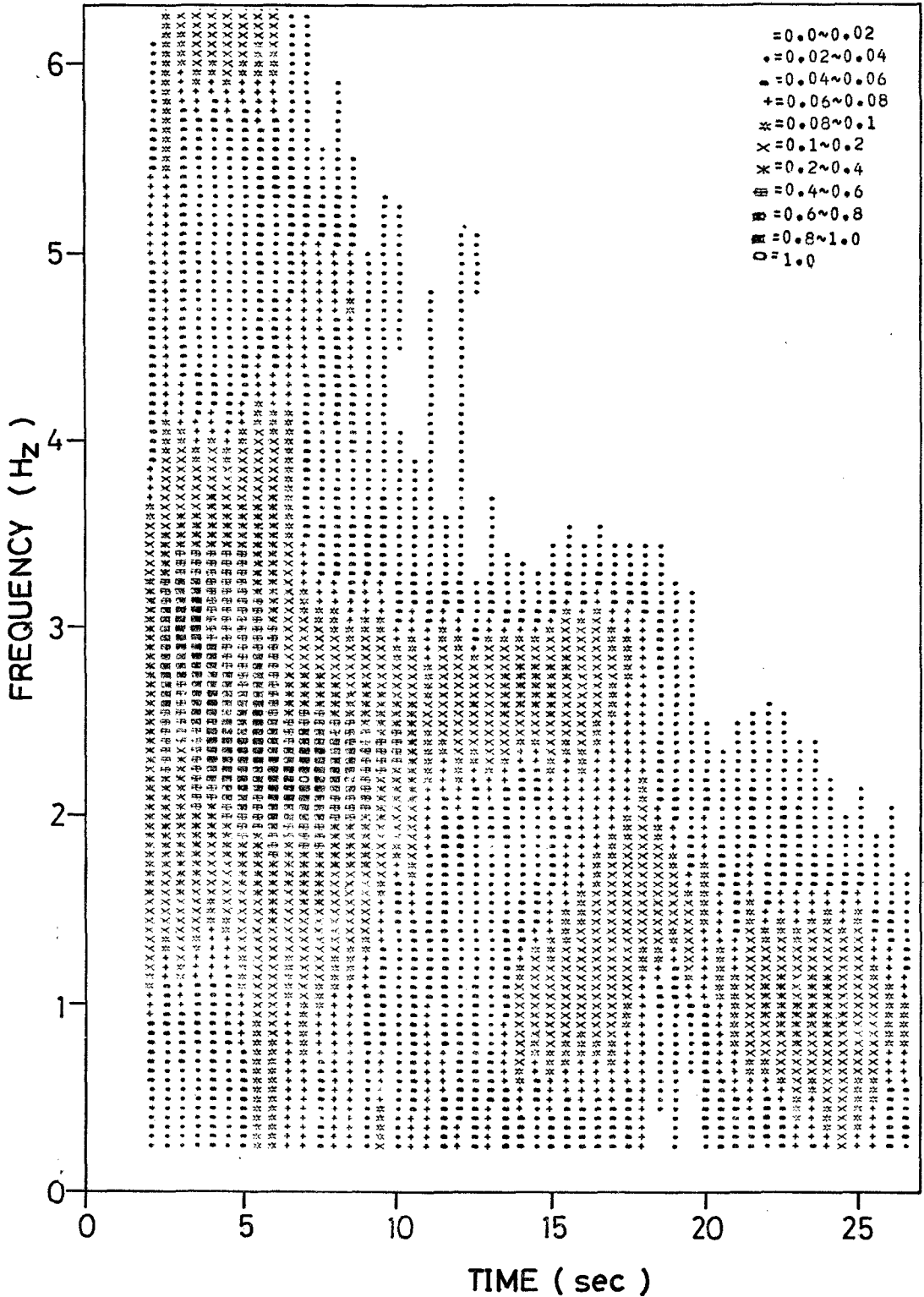


図 2-11 実地震波の RPSD (尼ヶ崎 UD)

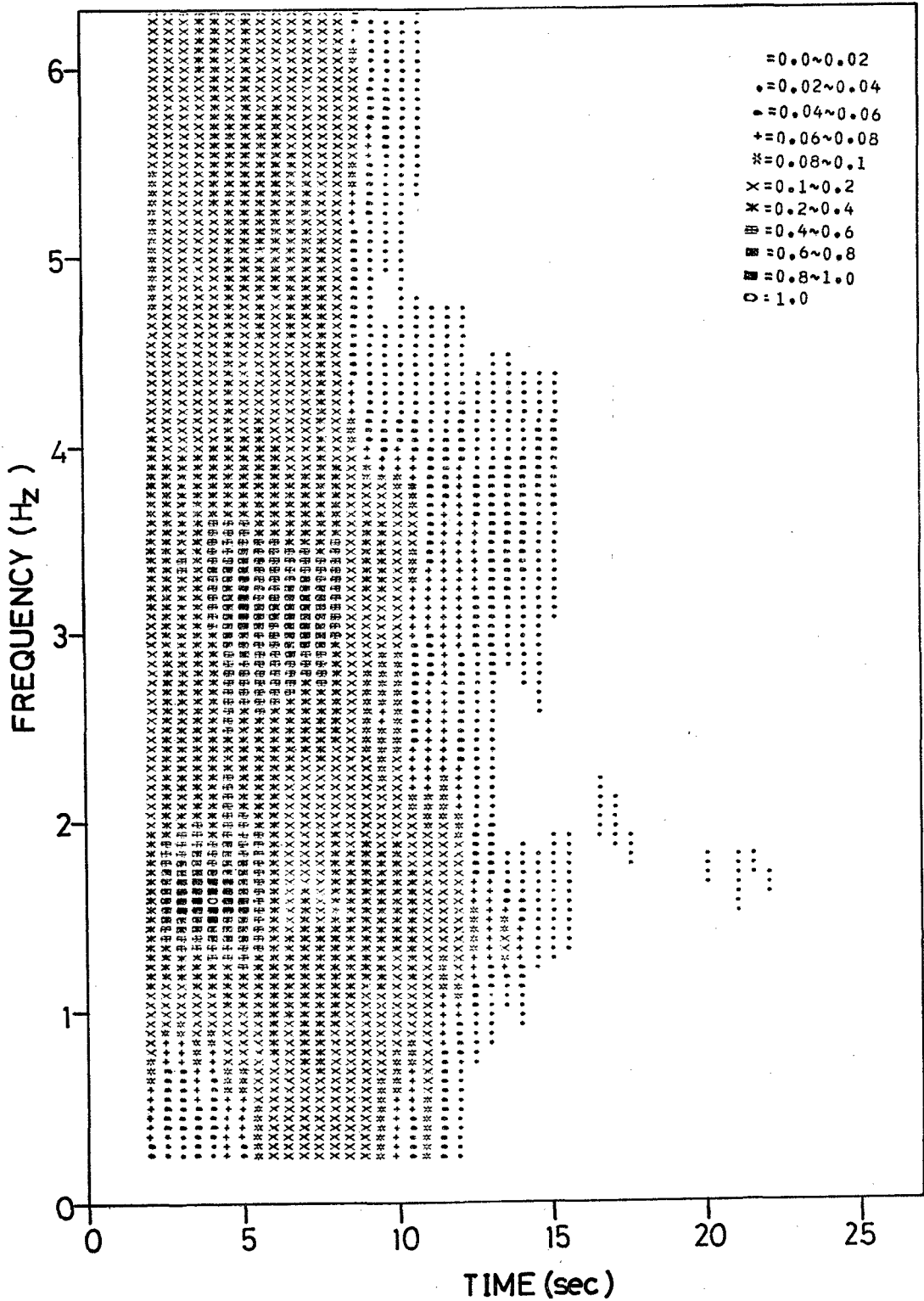


図 2-12 実地震波のRPSD (マナグア EW)

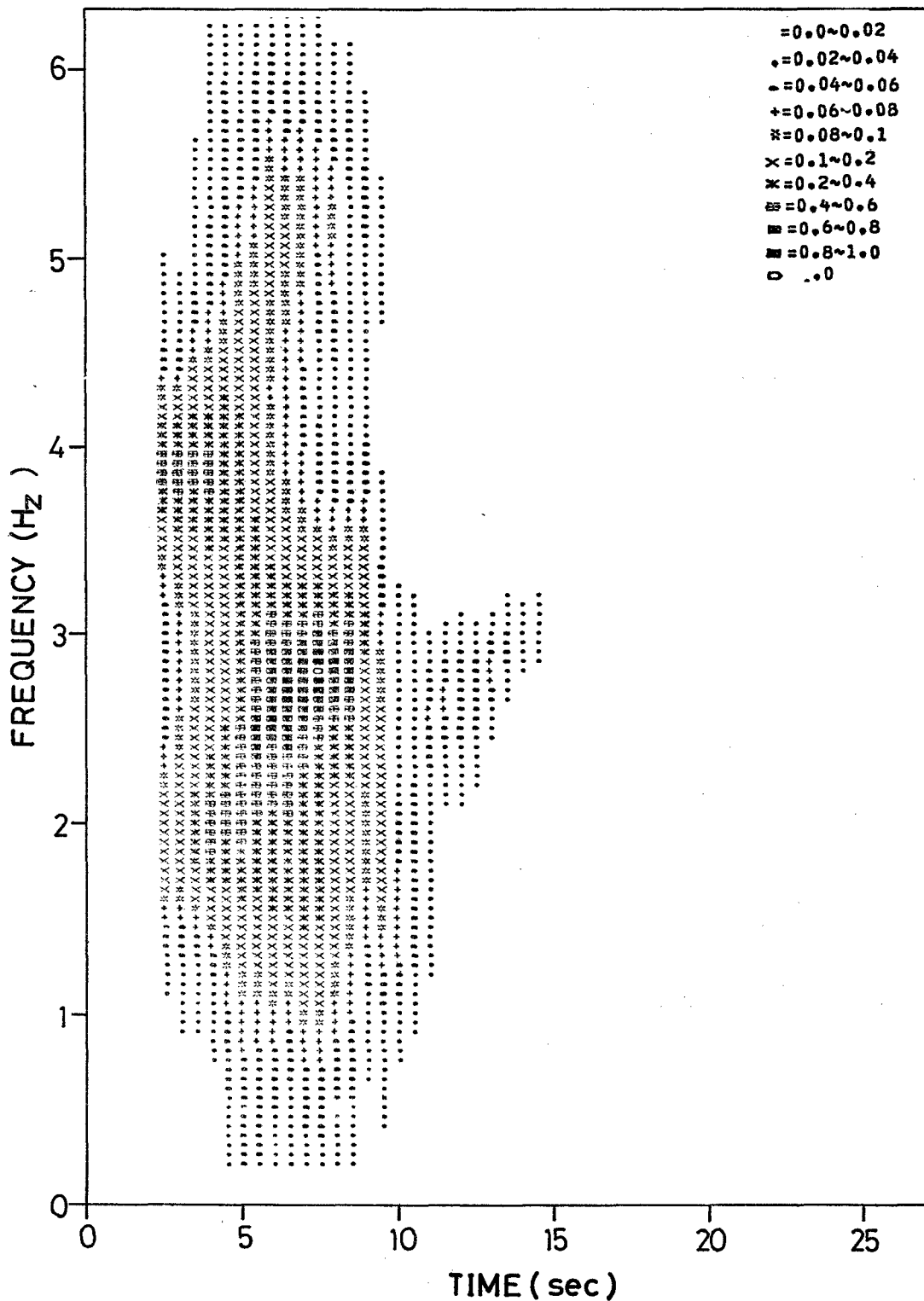


図 2-13 実地震波のRPSD (マナグア NS)

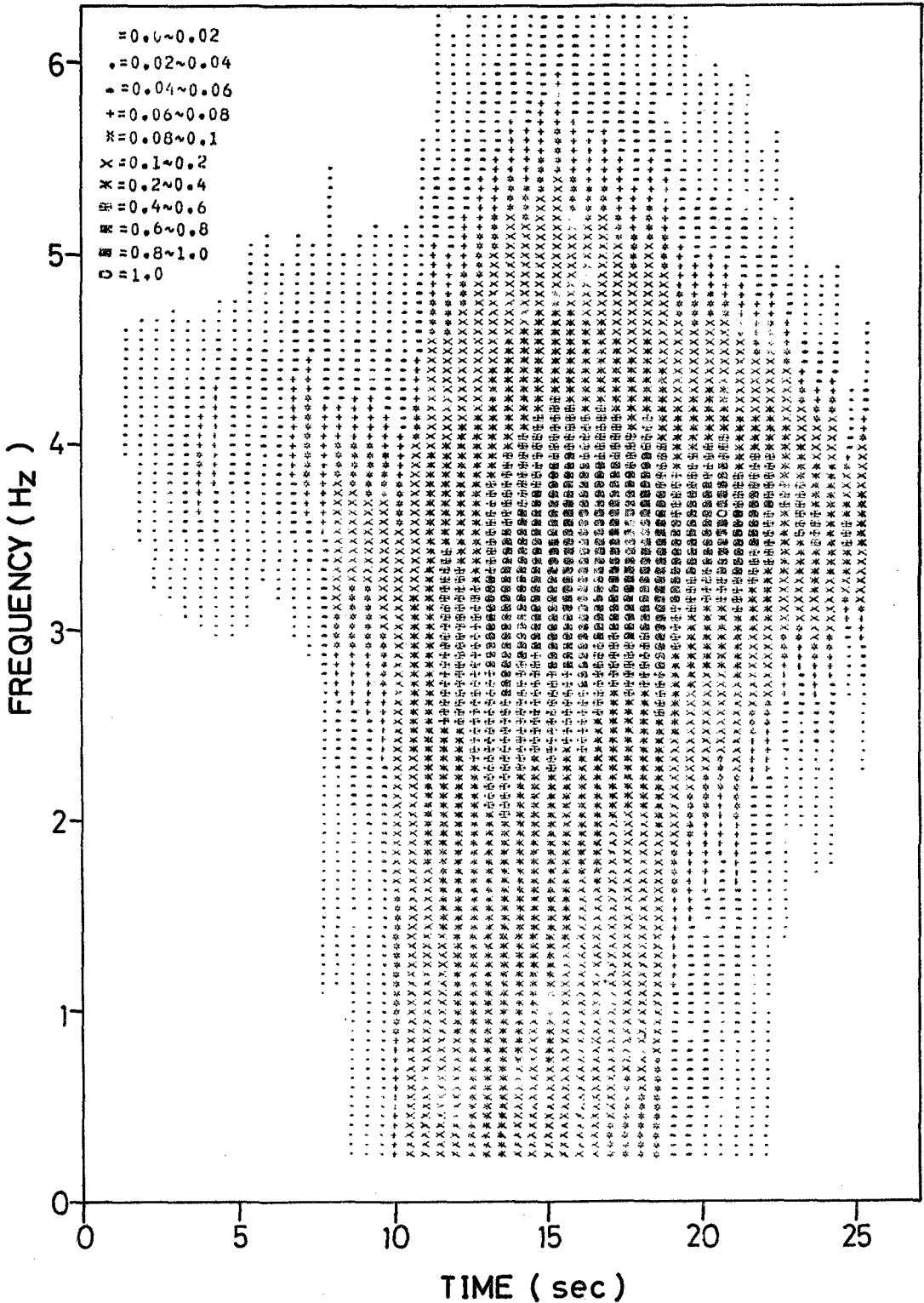


図 2-14 実地震波のRPSD (鋼路 NS)

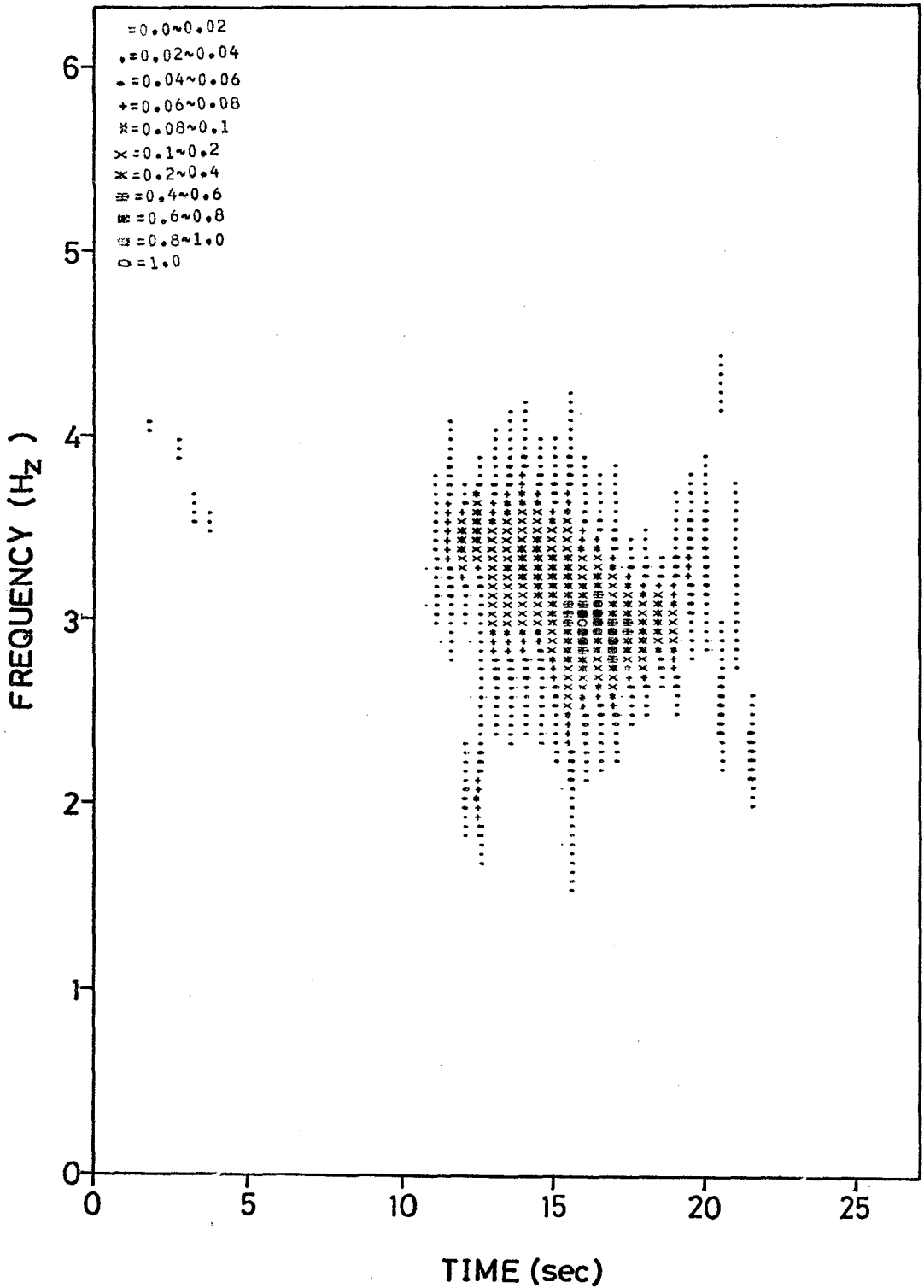


図 2-15 実地震波のRPSD (釧路 EW)

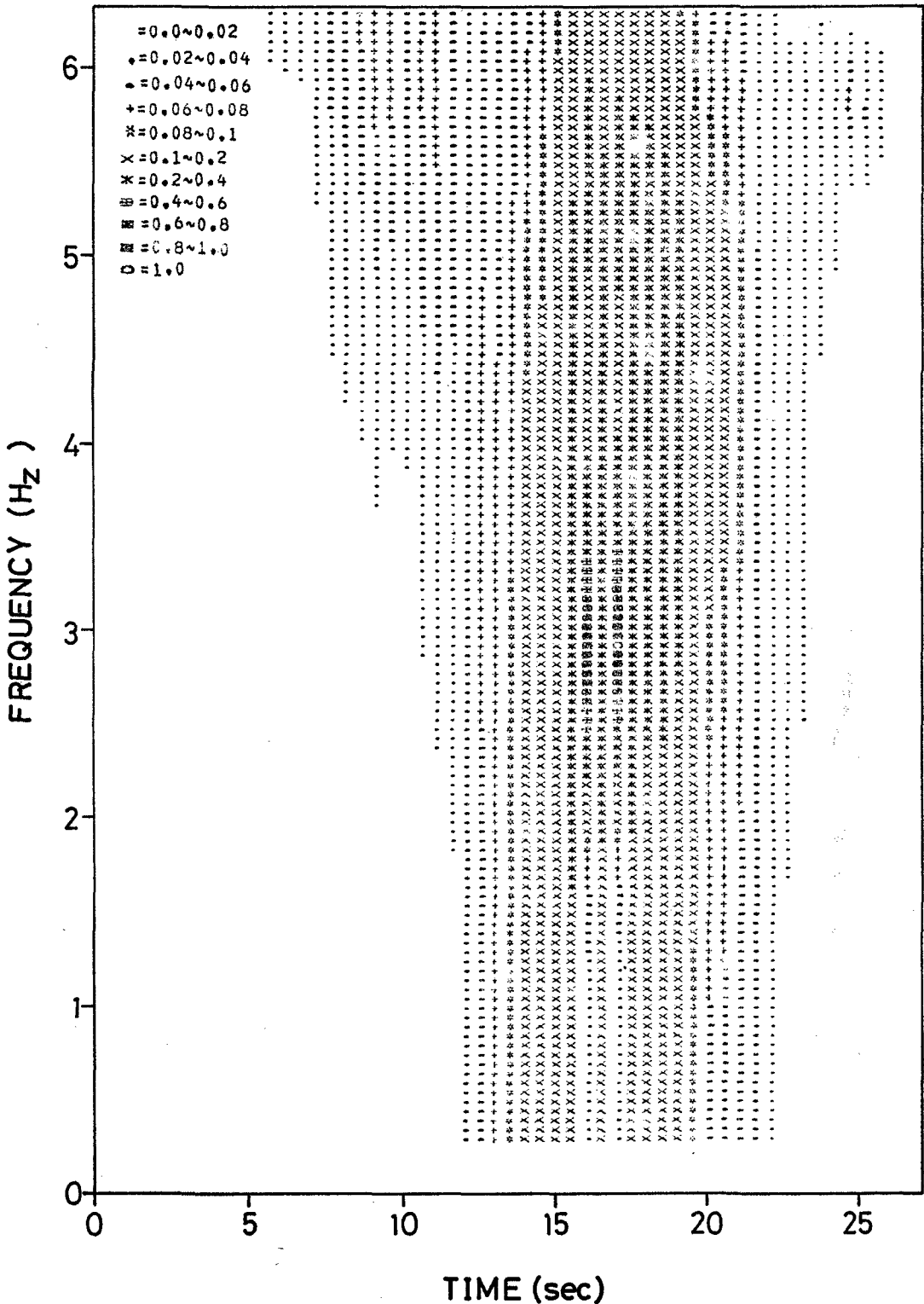


図2-16 実地震波のRPSD (釧路UD)

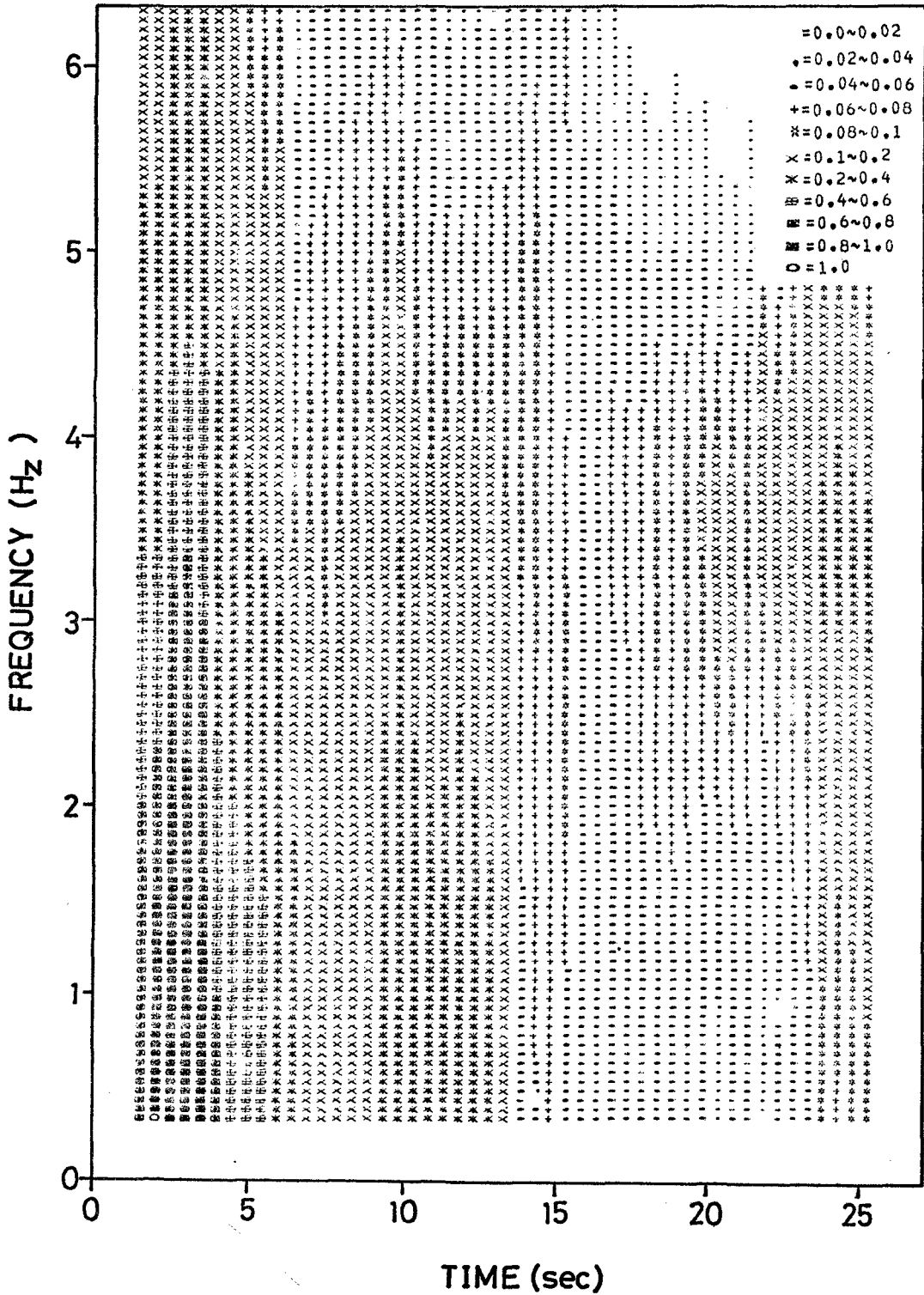


図2-17 実地震波のRPSD (El Centro NS)

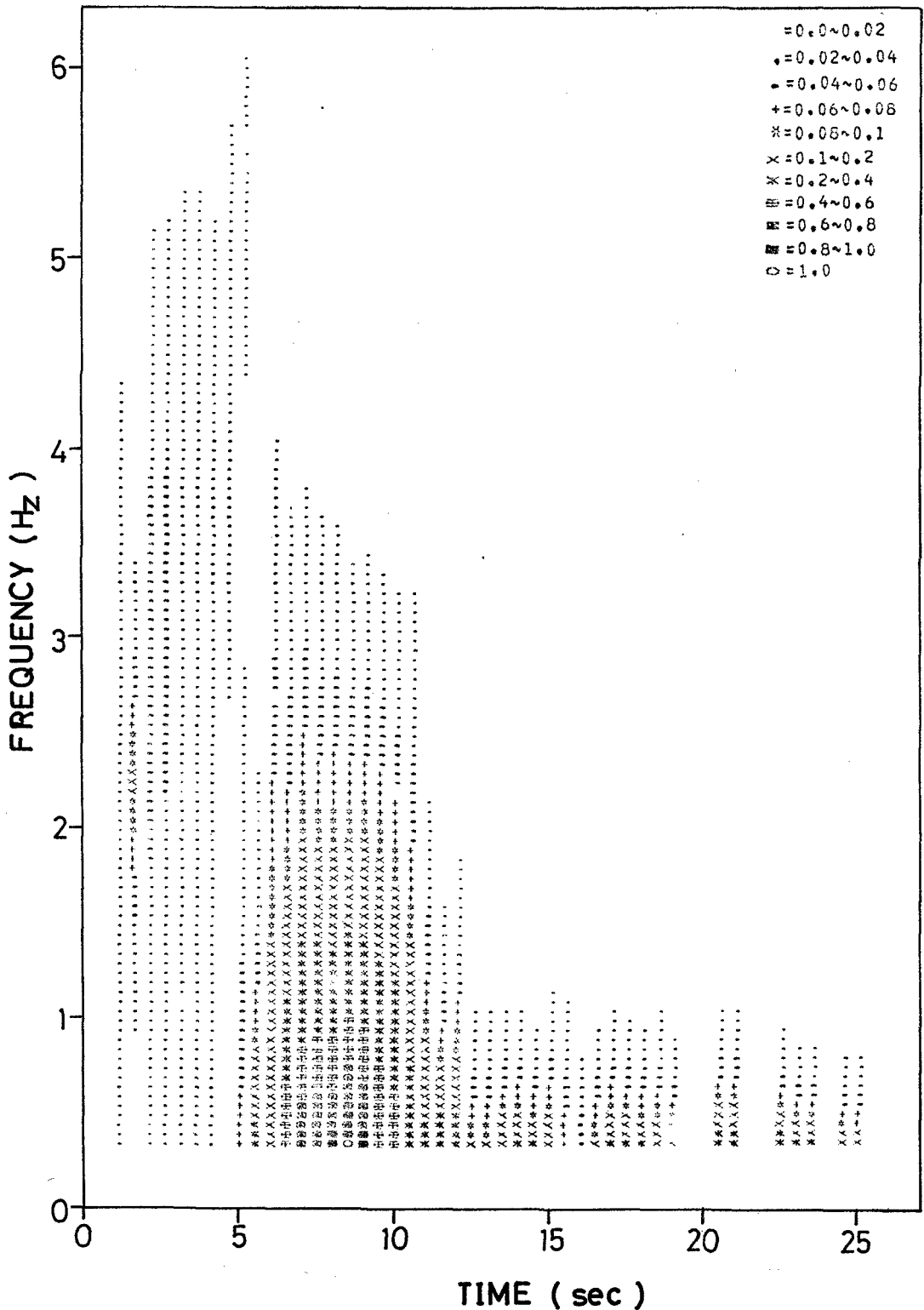
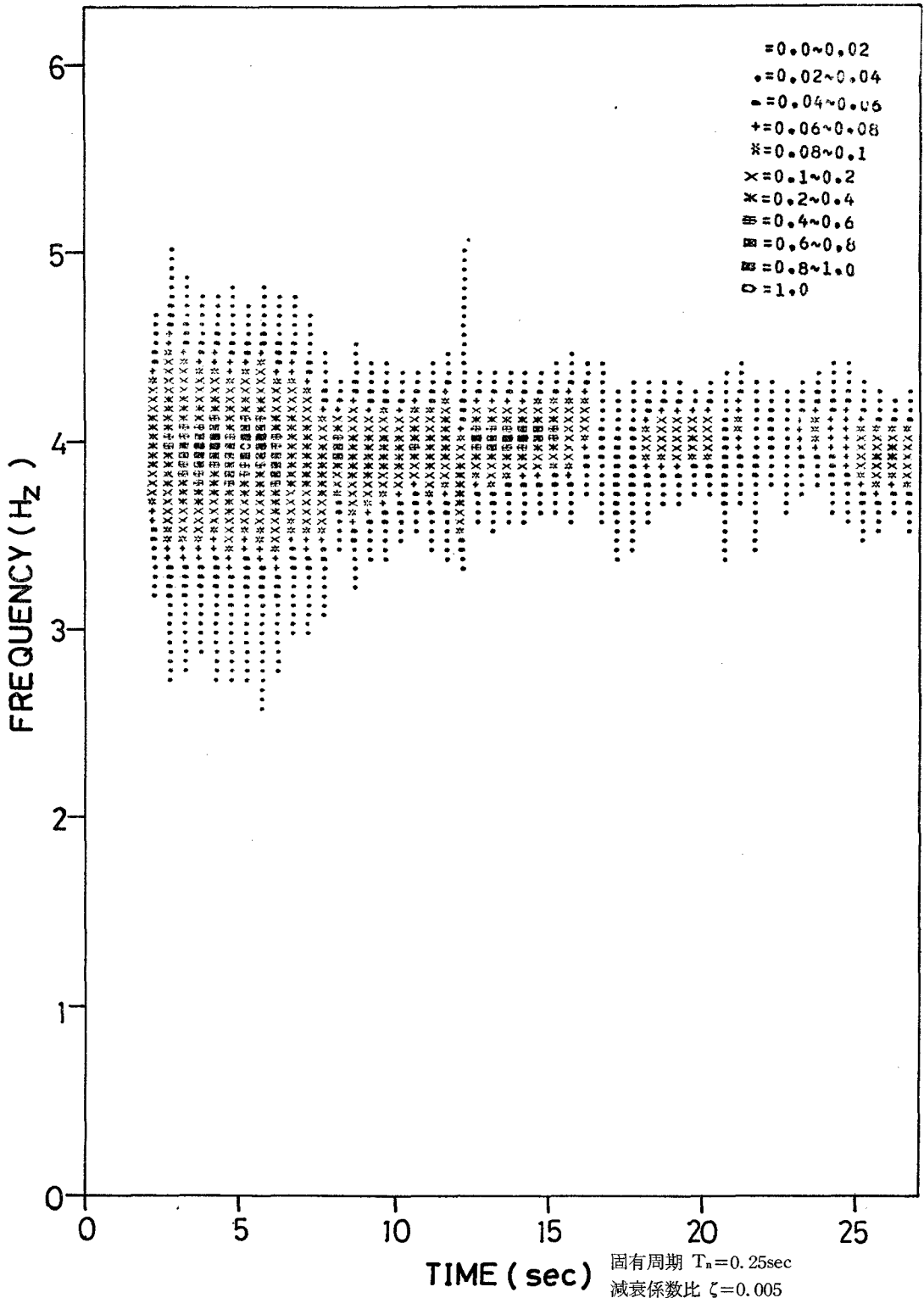


図2-18 実地震波のRPSD(新潟 NS)



固有周期 $T_n=0.25\text{sec}$
減衰係数比 $\zeta=0.005$
図 2-19 狭帯域模擬地震波のRPSD (入力 + 勝沖 NS)

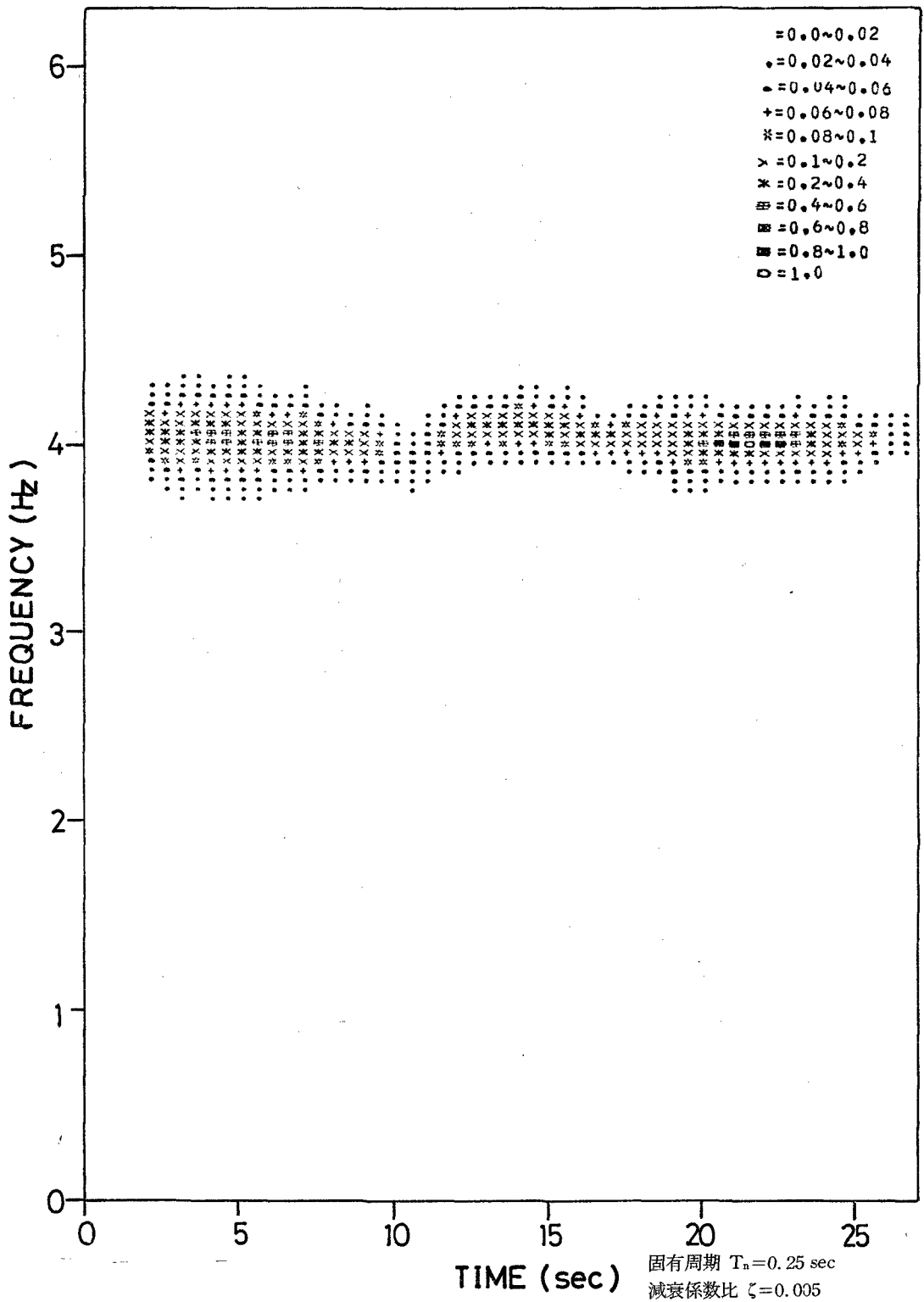


図 2-20 狭帯域模擬地震波のRPSD (入力 El Centro NS)

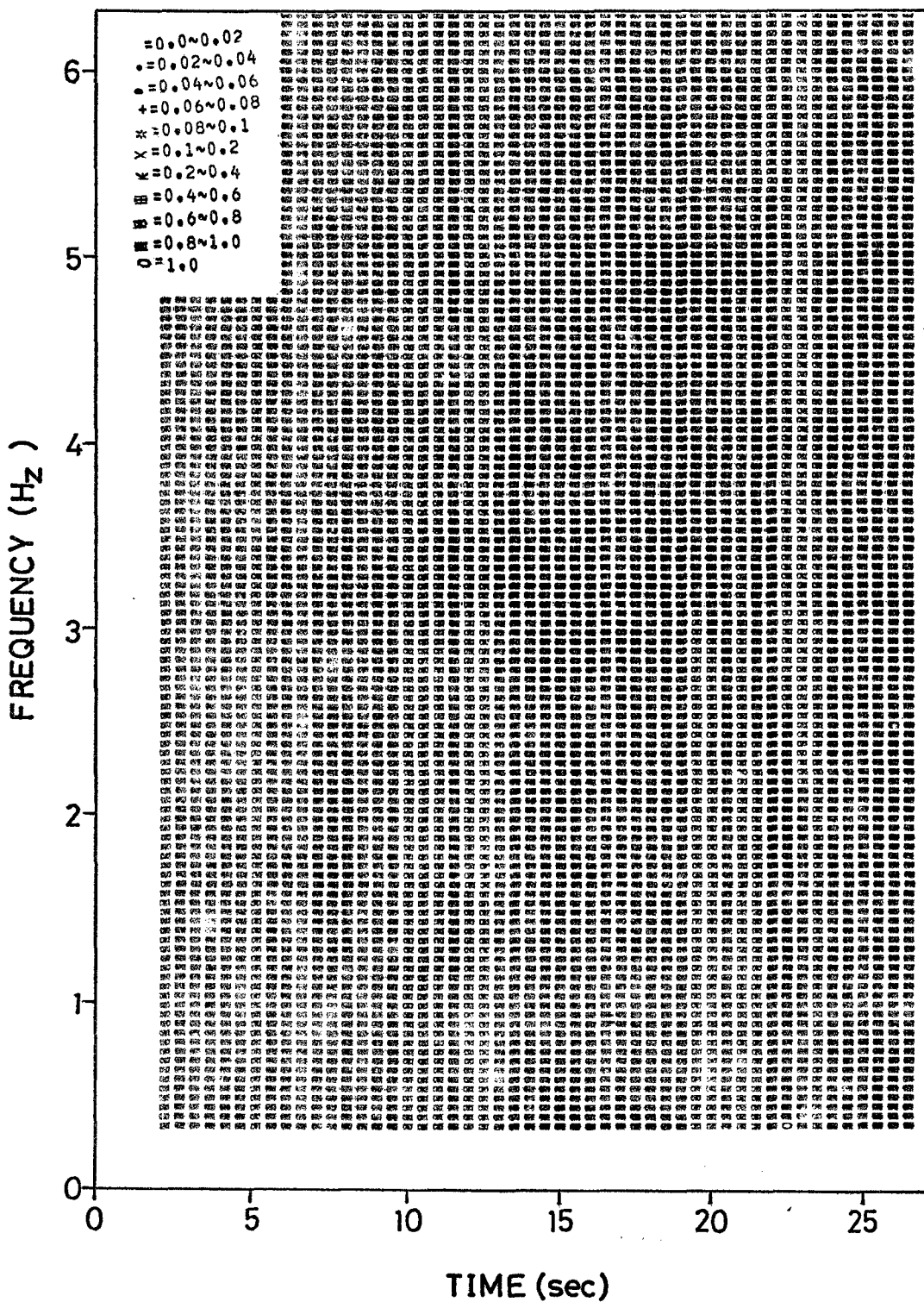


図 2-21 白色雑音のRPSD

波数を持つ定常波であることがわかる。また、共にパターンでI-cであることがわかる。

図2-21に白色雑音のRPSDを示す。この図より白色雑音はパワーが一定の定常波であることがわかる。

3 分類パターンに適合する模擬地震波の作成

前章で述べたように実地震波はRPSDを利用することによって、計36個のパターンに分類することができた。ここでは、それぞれのパターンを代表する平均的RPSDを求め、そのRPSDと地震波の時間的な強度の変動とを考慮した模擬地震波を作成する。

3-1 模擬地震波の周波数特性

模擬地震波は、余弦波を重合した逆フーリエ変換の式で表わされるものとし、その最大振幅の値は、所要の設計条件に基づき設定することにする。すなわち

$$Z(t) = \sum_n X(f_n, t) \cdot \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \dots\dots (3 \cdot 1)$$

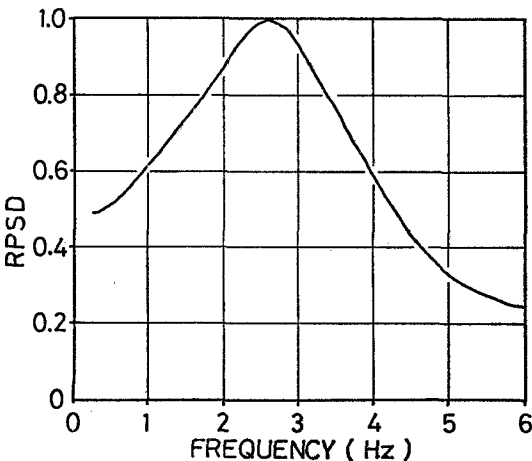
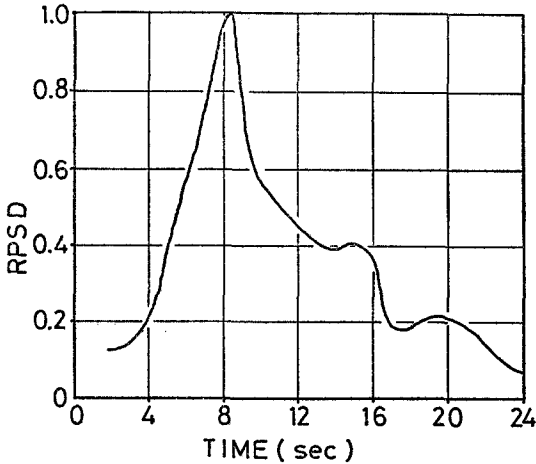


図3-1 RPSDのピークを含む断面図 (Taft N21E)

$Z(t)$: 模擬地震波の地表加速度

$X(f_n, t)$: フーリエ振幅

φ_n : 位相 (rad)

f_n : 周波数 (Hz)

t : 時間 (sec)

ここで、周波数領域での非定常性を考慮しているためにフーリエ振幅 $X(f, t)$ は当然、周波数 f と時間 t の関数となる。この $X(f, t)$ は前章の手法で推定したRPSDの平方根を求めることによって得られる。

フーリエ振幅 $X(f, t)$ は、 $t-f$ 平面上で3次元的に凹凸をもつ関数として表わされる。ところでRPSDは、1個か2個のピークを持ったパターンに区別されている。3次元空間におけるこれらのピークの凹凸の形状は、地震波の特性によりきわめて多岐多様にわかれるが、AR法の特徴を生かした平坦なスペクトル曲線は、おおむね t 軸、 f 軸の両軸に関して最大ピークに対し対称な形状を示しており、例えば、図3-1に示すような図2-4 (Taft N21EのRPSD) の断面図をみてもわかるように正規分布関数と近似的には相似であることが指摘できる。

本研究では、このひとつのピークの位置と形状を表わす関数として、以下のように定義されるピーク関数 (peak function) を提案する。

$$p_1(f, t) = \exp\left[-\frac{(f - \mu_{1f})^2}{2\sigma_{1f}^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(t - \mu_{1t})^2}{2\sigma_{1t}^2}\right] \\ = \exp\left[-\frac{(f - \mu_{1f})^2}{2\sigma_{1f}^2} - \frac{(t - \mu_{1t})^2}{2\sigma_{1t}^2}\right] \dots\dots (3 \cdot 2)$$

$p_1(f, t)$: RPSDのひとつのピーク関数

μ_{1f} : ひとつのピークの周波数に関する平均値

μ_{1t} : ひとつのピークの時間に関する平均値

σ_{1f}^2 : ひとつのピークの周波数に関する分散

σ_{1t}^2 : ひとつのピークの時間に関する分散

f : 周波数

t : 時間

式 (3・2) の \exp の中は結合確率密度関数の相関係数が0の場合のそれに相当し (Y. K. Lin, 1972), このことは周波数非定常性と振幅非定常性が統計的に独立であることに相当する。

式 (3・2) を見てわかるように、ピーク関数の最大値は1に正規化している。

2ピークの場合をも含めたRPSDは式 (3・2) で表わされるピーク関数を二つたし合わせることによって示される。

$$P(f, t) = p_1(f, t) + \alpha \cdot p_2(f, t) \dots\dots (3 \cdot 3)$$

$P(f, t)$: RPSD

$p_i(f, t), p_2(f, t)$: ピーク関数

α : 小ピークの大ピークに対する比を表わす定数

従って、式(3・3)で示されるようにRPSDは σ_{1f} , σ_{1t} , μ_{1f} , μ_{1t} , σ_{2f} , σ_{2t} , μ_{2f} , μ_{2t} , α の9パラメータの値によってピークの数, パワーの広がり方, ピークパワーの比, ピークの位置関係を設定でき, それぞれのパターンに合ったRPSDを模擬できることになる。

図3-2に非定常フーリエ振幅を計算する流れ図を示す。

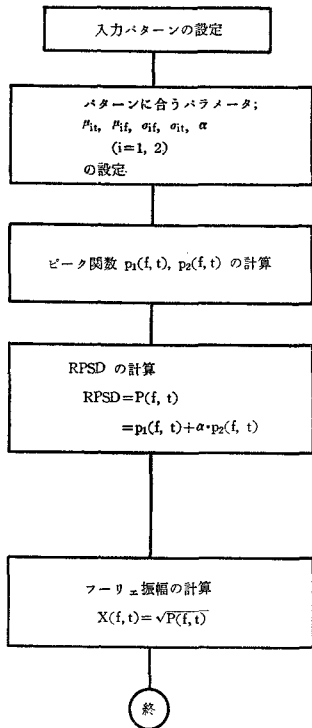


図 3-2 非定常フーリエ振幅の計算

図3-3に1ピークで時間領域と周波数領域が共に広がりをもつ模擬RPSD(パターンI-a), 図3-4に1ピークで周波数領域のみに広がりをもつ模擬RPSD(パターンI-b), 図3-5に1ピークで時間領域と周波数領域が共に広がりをもたない模擬RPSD(パターンI-d) 図3-6に2ピークで大ピーク周波数領域のみに広がりを持ち, 小ピークが大ピークのほぼ真右にある模擬RPSD(パターンII-b-5)を示す。

3-2 模擬地震波の時間的な強度の変動

従来の模擬地震波の作成法は, 白色雑音, 白色雑音のフィルターを通したもので, 式(3・1)などによって求められた時刻歴に時間的な強度の変動(振幅の継時変化)を与えるために, 確定的な包絡関数を掛けるという操作が含まれていた(RAPRAS研究会, 1977)。しかし, 式(3・1)に包絡関数を掛けてしまうと, その模擬地震波のパワー(フーリエ振幅)は3-1で規定したものと

異なってしまいます。このことから, 包絡関数を掛けないで位相特性から時間的な強度の変動を与える方法をとることが妥当であると考えられる。

3-2-1 時間的な強度の変動と位相差分分布

位相は, その波の相対的な遅れ, 進みを表わしているから, いくつか調和波を重ね合わせるとき, それらの互いの位相差によって干渉という現象に寄与するであろうことは想定できる。

最近, 大崎らの研究(岩崎ほか, 1978)により原波形の時間的な強度の変動と位相の間には相関性があることが明らかにされてきた。その相関関係を明確にするため, 位相及び位相差分の相対度数分布に注目することにする。

位相差分とは式(3・1)における位相 φ を用いて表わすと次式のようになる。

$$\Delta\varphi_n = \varphi_{n+1} - \varphi_n \quad \dots\dots (3 \cdot 3)$$

$\Delta\varphi_n$: 位相差分

位相差分の相対度数分布(以下, 相対度数分布を単に分布と呼ぶ)は式(3・3)により与えられる位相差分について $0 \sim -2\pi$ (rad)まで等分割した各領域に入る度数によって作成した面積が1となるヒストグラムである。

大崎ら(岩崎ほか, 1978)によると, 実地震波の位相差分分布はある値の所で極値を有する形になり, 位相差分で $0 \sim -2\pi$ (rad)の範囲を時刻歴波の $0 \sim T$ (sec)(全継続時間)に対応させると両者の極値の位置がほぼ対応しているということが明らかにされている。従って, 位相差分分布を規定することにより時刻歴波に時間的な強度の変動を与え, それを規定することができる。一方, 多数の実地震波の解析の結果, 位相差分分布はそのほとんどが正規分布に近いものであり, 積率による尖度(4次の積率)を求めたところ, ほとんどが正規分布よりやや鋭峰であることが明らかとされている。その一例として図3-7と図3-8に時刻歴波と位相差分分布を示す。

位相 φ は次式によって表わされ。

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n + \Delta\varphi_n \quad \dots\dots\dots (3 \cdot 4)$$

$$(f=0 \text{ の時 } \varphi_1=0)$$

以上の流れを図3-9に示す。

3-2-2 位相差分分布の規定法

RPSDを時間軸(t軸)パワー軸(P軸)とを含むt-P平面上に投影した時の曲線は, 時刻歴波形の時間的

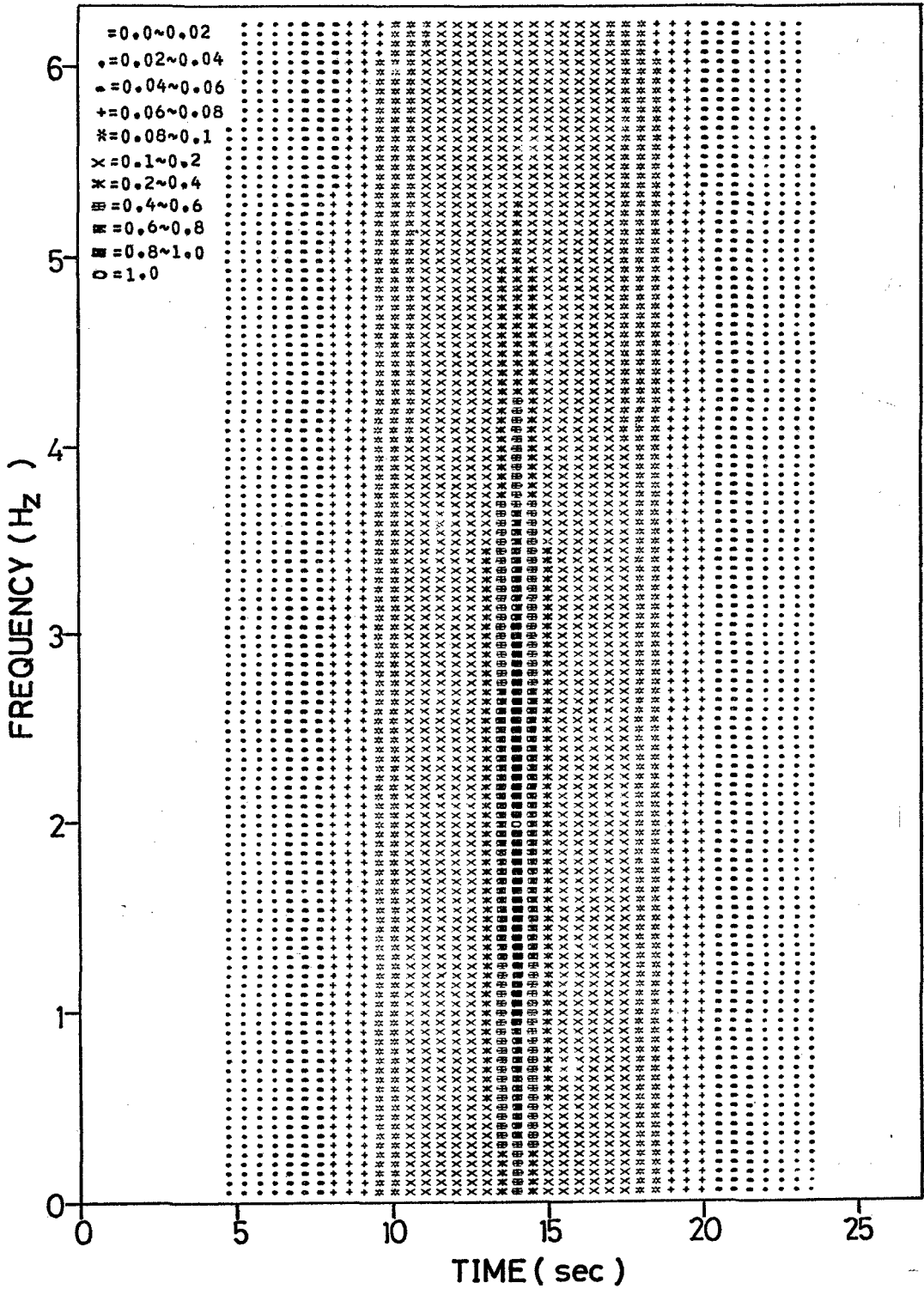


図 3-3 模擬RPSD

$$\begin{aligned} \mu_{1f} &= 2.0 & \mu_{1t} &= 14.0 & \sigma_{1f} &= 1.5 & \sigma_{1t} &= 0.5 \\ \mu_{2f} &= 2.0 & \mu_{2t} &= 14.0 & \sigma_{2f} &= 10.0 & \sigma_{2t} &= 5.0 & \alpha &= 0.15 \end{aligned}$$

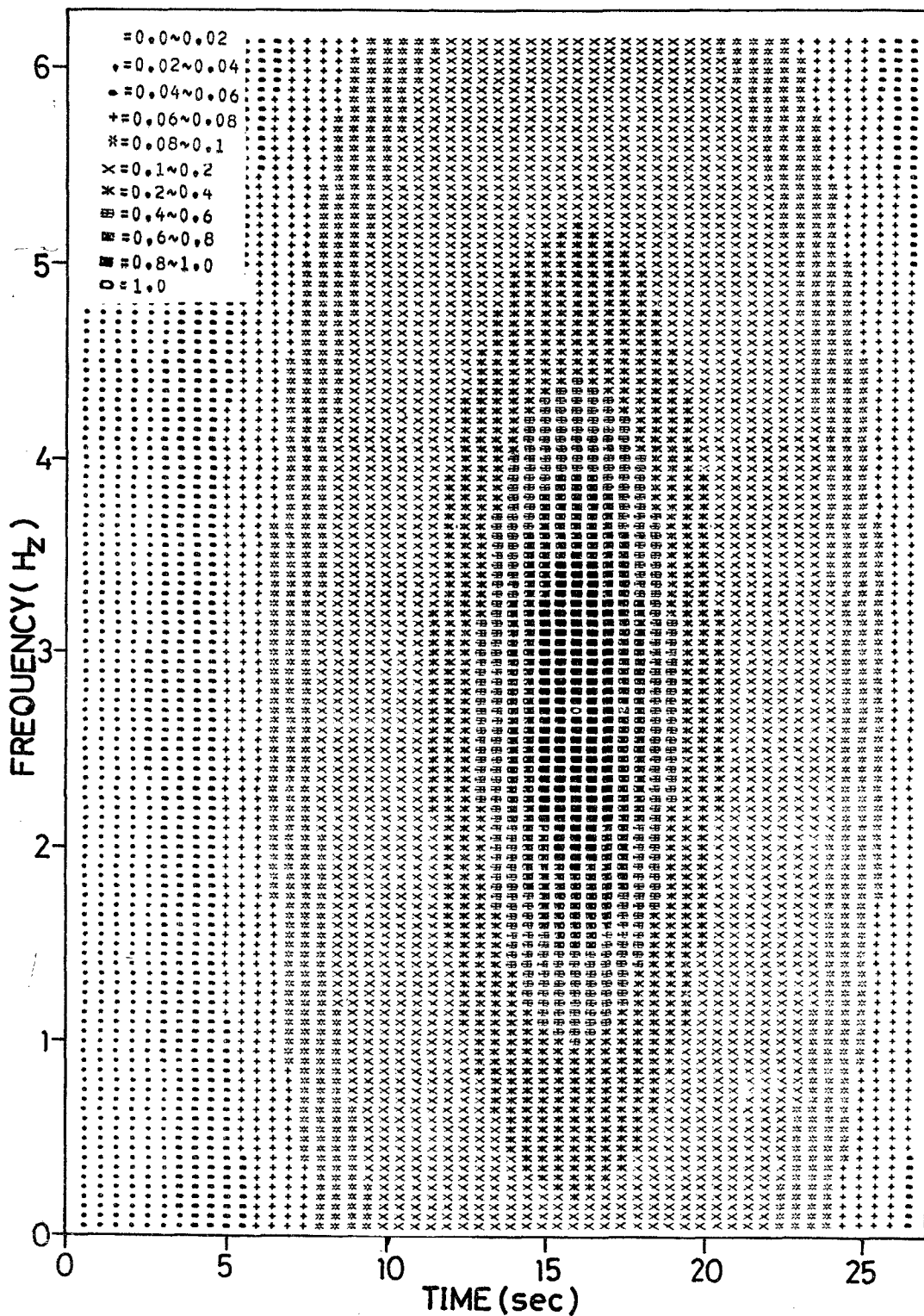


図 3-4 模擬RPSD

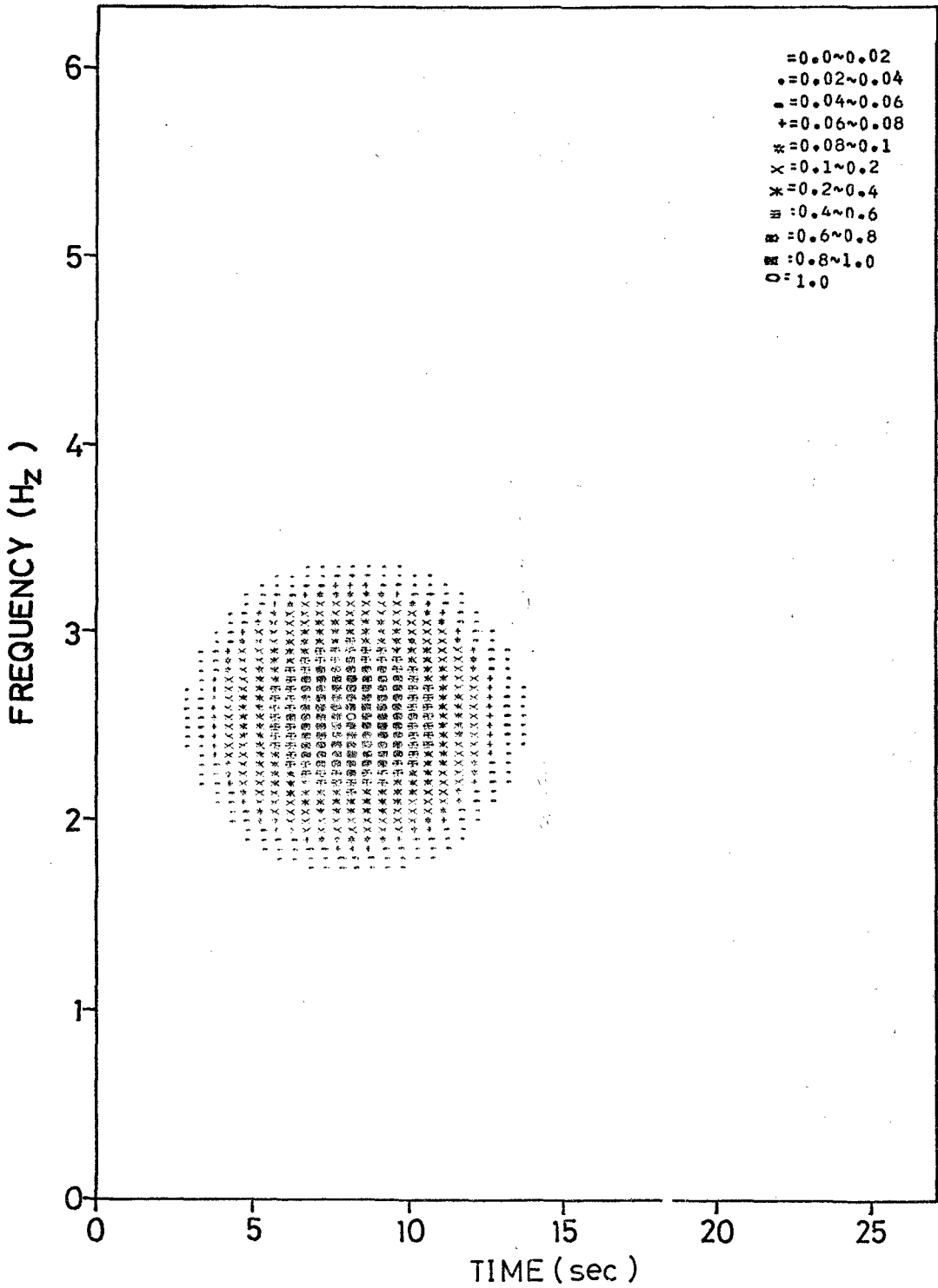


図 3-5 模擬RPSD

$\mu_{1f} = 2.5$ $\mu_{1t} = 8.0$ $\sigma_{1f} = 0.3$ $\sigma_{1t} = 2.0$
 $\mu_{2f} = 0.0$ $\mu_{2t} = 0.0$ $\sigma_{2f} = 0.0$ $\sigma_{2t} = 0.0$ $\alpha = 0.0$

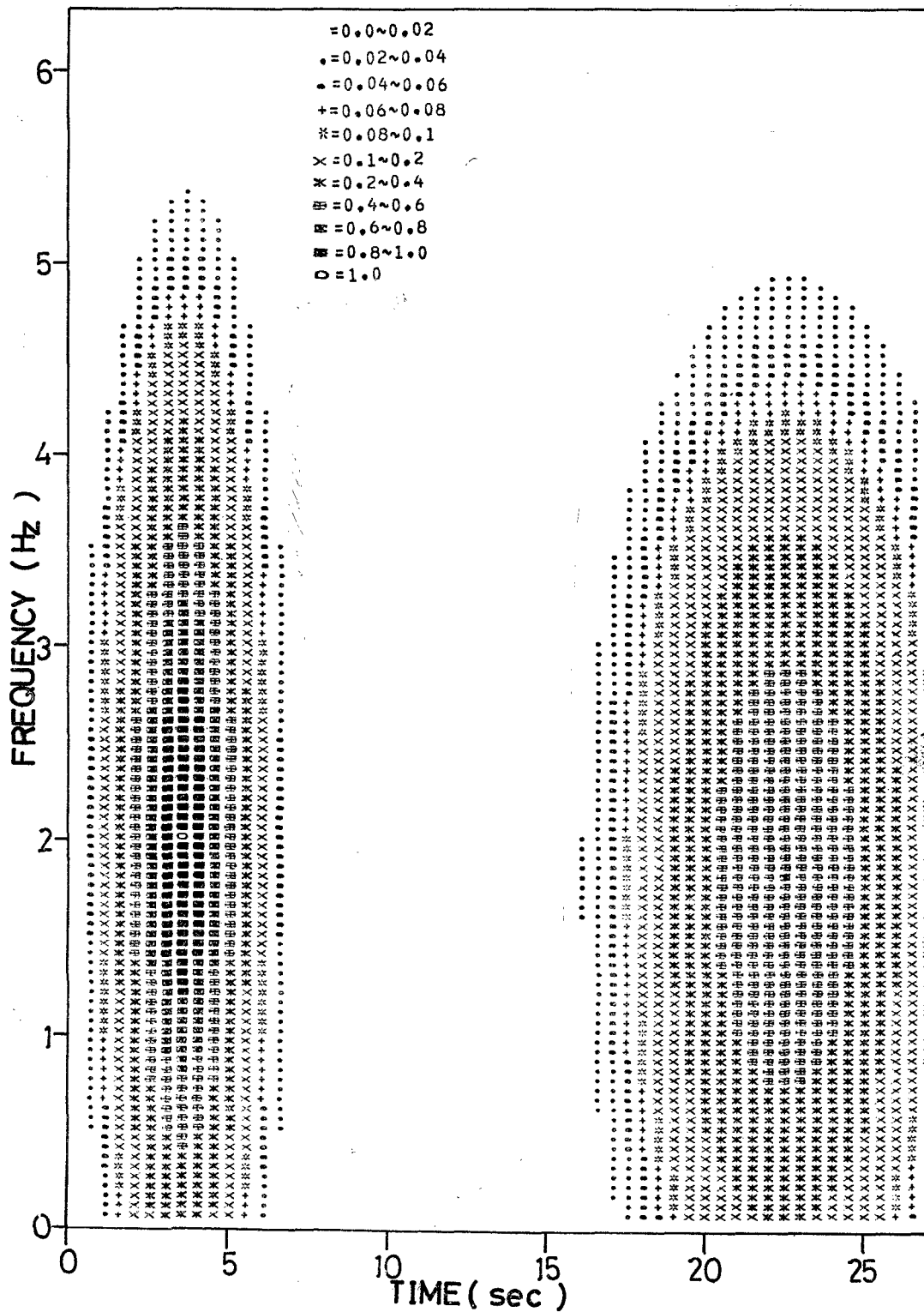
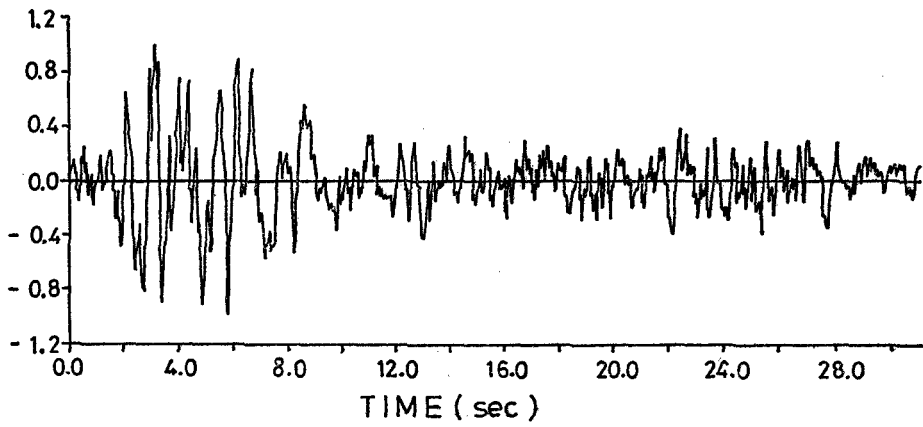
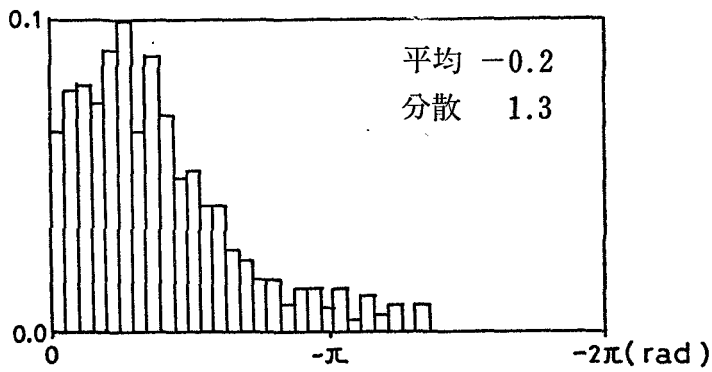


図 3-6 模擬 RPSD

$\mu_{1f} = 2.0$ $\mu_{1t} = 3.5$ $\sigma_{1f} = 1.2$ $\sigma_{1t} = 1.2$
 $\mu_{2f} = 1.8$ $\mu_{2t} = 22.5$ $c_{2f} = 1.2$ $\sigma_{2t} = 2.5$ $\alpha = 0.6$

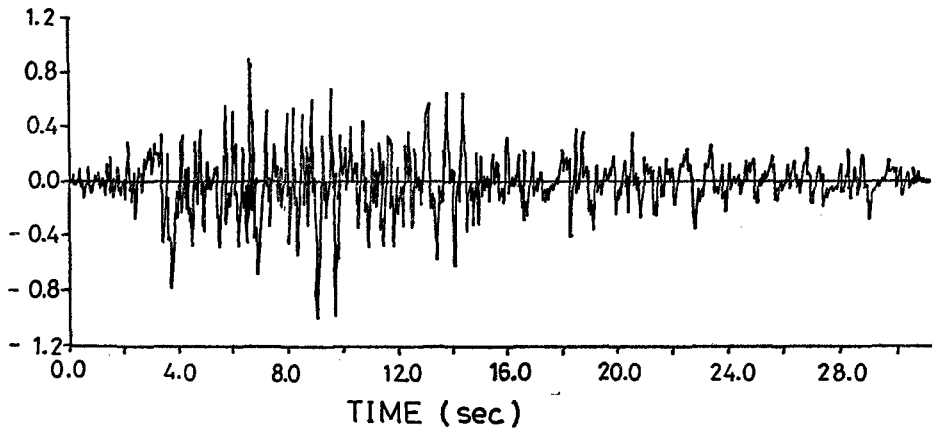


原波形

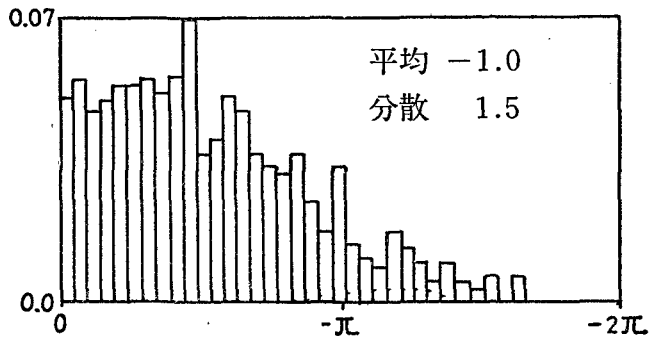


位相差分分布

図 3-7 原波形と位相差分分布 (十勝沖 EW)



原波形



位相差分分布

図 3-8 原波形と位相差分分布 (Taft N21E)

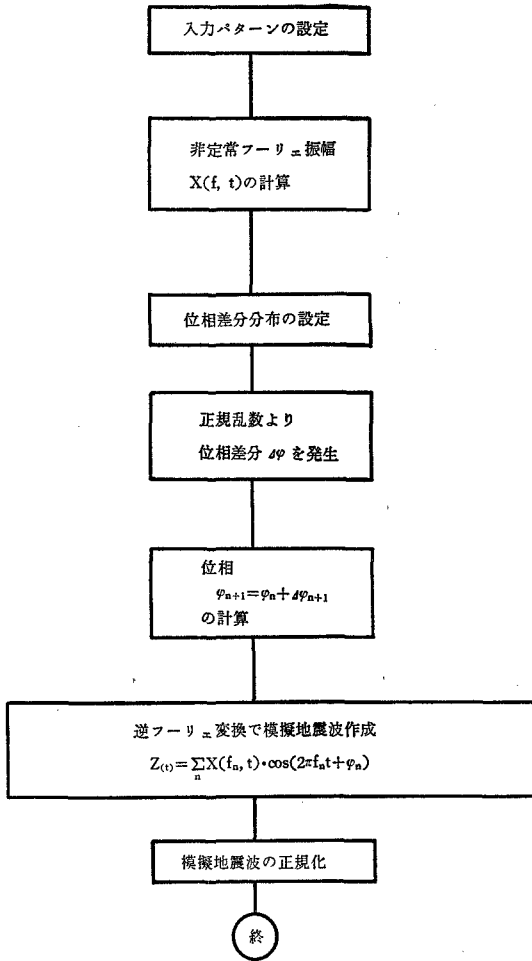


図 3-9 非定常模擬地震波作成の流れ図

な強度の変動を表わす包絡関数とほぼ対応する形状を示す。従って、模擬地震波の時間的な強度の変動の規定する位相差分布の形状は、入力として設定した模擬RPSD（以下、入力RPSDと略す）の $t-P$ 平面上に投影した図形と対応させることが妥当であると考えられる。このことから、本研究では、入力RPSDの時間軸に関するピーク位置と位相差分布のピーク位置（平均値）を対応させ、さらに入力RPSDの時間軸に関するパワーの広がり方と位相差分布の位相差分の広がり方（分散）を対応させることが、地震波を最適に模擬できる位相差分布の規定法となるとしている。これらのことを図3-10に概略的に示す。

位相差分布の規定の例として、位相差分布の形状を1ピークの入力RPSD（パターンI-b、図3-3）の $t-P$ 平面上に投影した図形に対応させるために、位相差分布の平均値を-3.0、分散を4.0とした場合の模擬地震波とそのRPSDを図3-11 a, bに示す。また、2ピークの入力RPSD（パターンII-b-5、図3-6）に対応させるため位相差分布の平均値を-1.0、分散を4.0とした場合の模擬地震波とそのRPSDを図3-12 a, bに示す。図3-12 a, bの比較のため、図3-13 a, bに同じ2ピークの入力RPSDに対して、位相差分布を一樣分布にした場合の模擬地震波とそのRPSDを示して

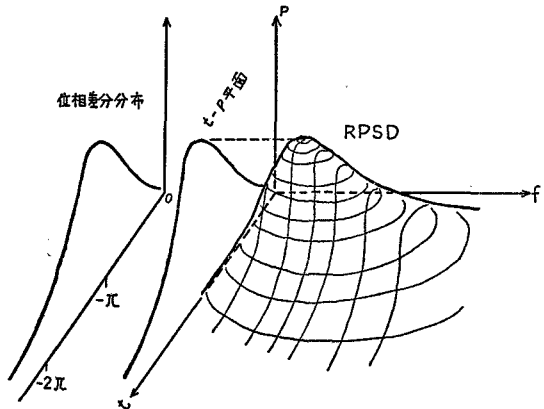


図3-10 RPSD の $t-p$ 平面への投影図と位相差分布

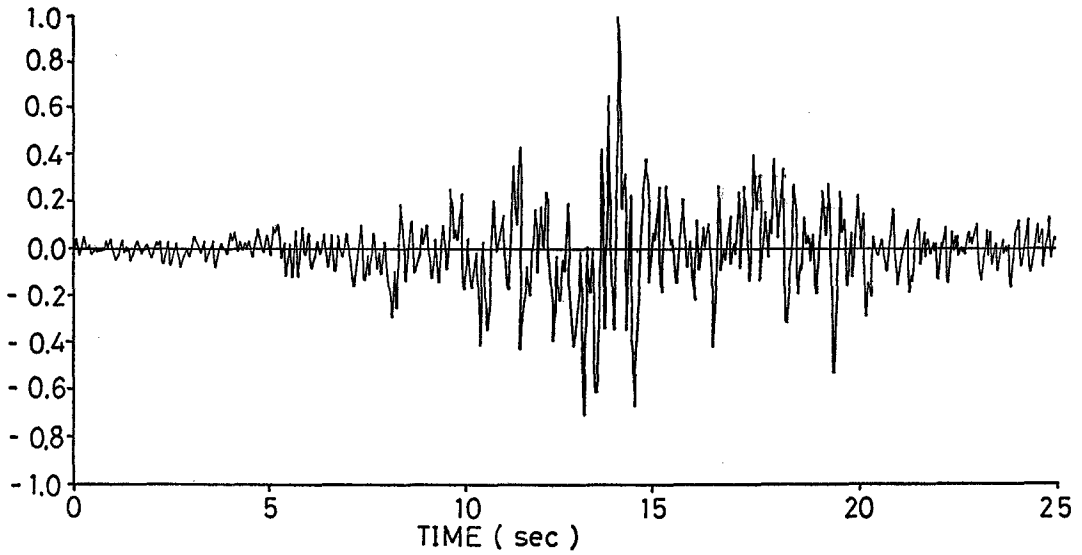


図 3-11 a 模擬地震波 (位相差分布の平均値=-3.0, 分散=4.0とした場合)

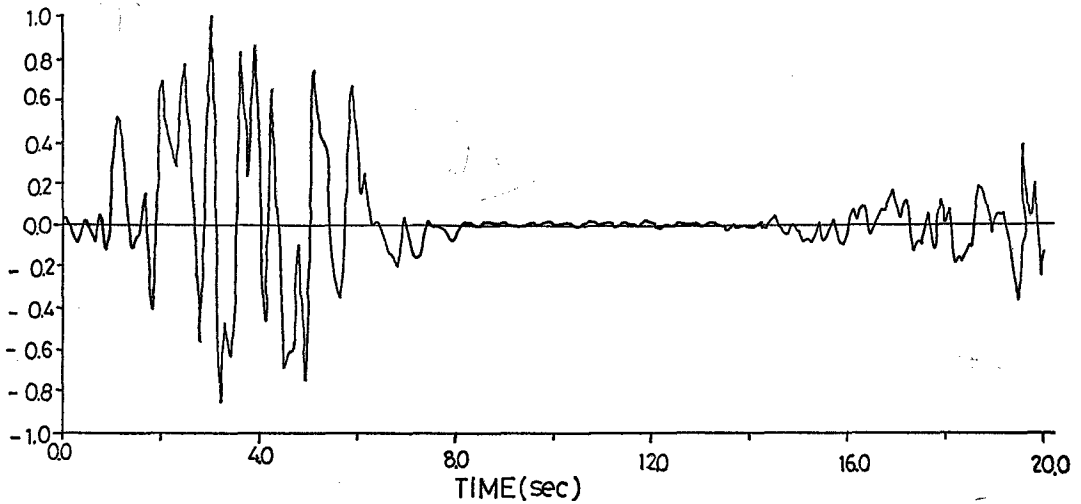


図 3-12a 模擬地震波 (位相差分布の平均値=-1.0, 分散=4.0とした場合)

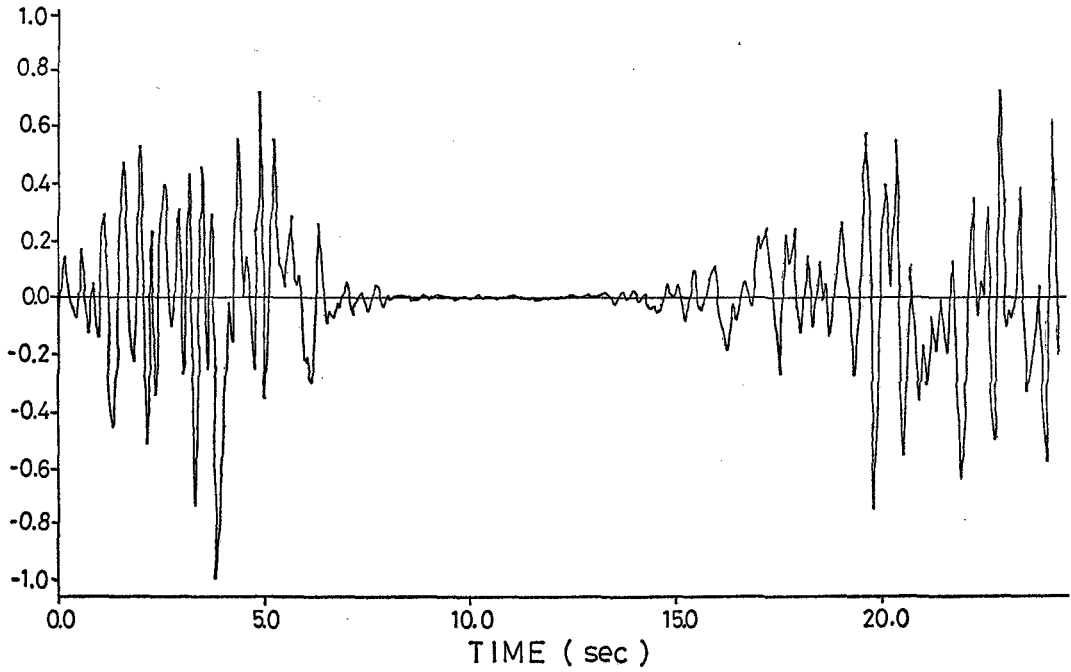


図 3-13a 模擬地震波 (位相差分布が一様分布の場合)

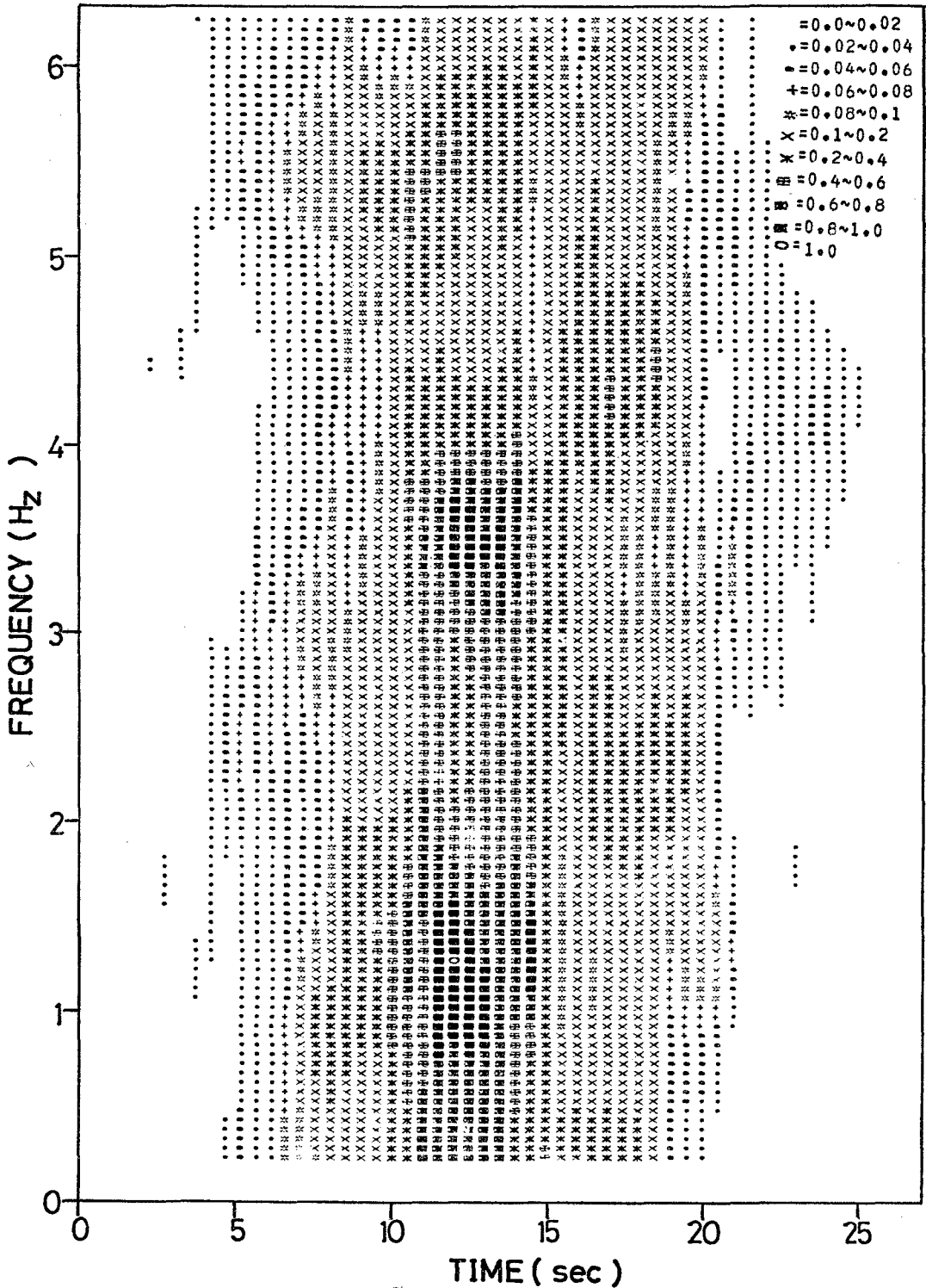


図 3-11b 模擬地震波のRPSD (位相差分分布の平均値=-3.0, 分散=4.0とした場合)

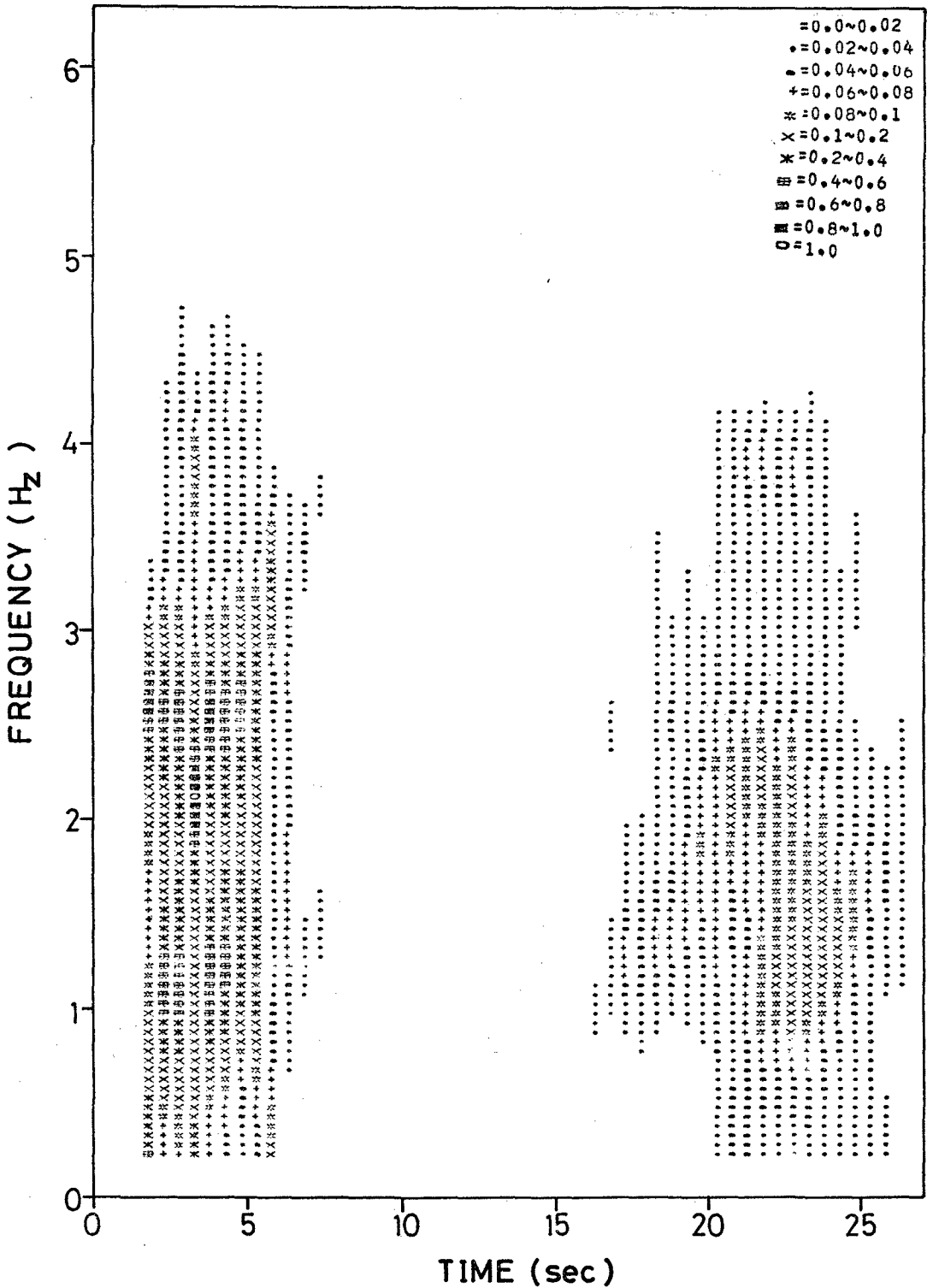


図 3-12b 模擬地震波のRPSD (位相差分布の平均値=-1.0, 分散=4.0とした場合)

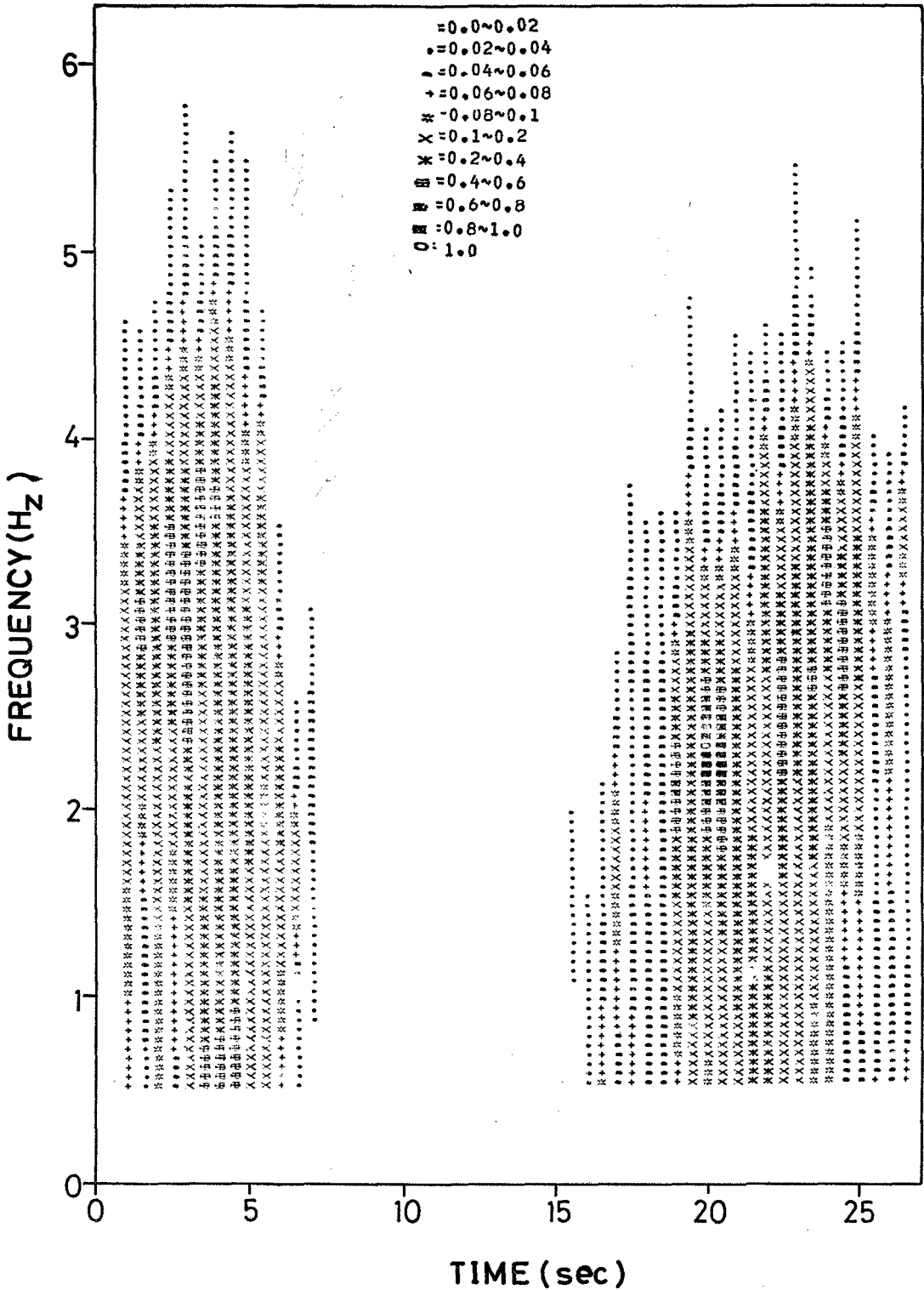


図 3-13b 模擬地震波のRPSD (位相差分布が一様分布の場合)

ある。図3—12bと図3—13bとを比較すると、図3—12では入力RPSDのピーク位置と模擬地震波のRPSDがほぼ一致し、しかもパワーの広がり方も両図とも同じ傾向を示しているのに対し、図3—13bでは模擬地震波のRPSDはパワーの広がり方こそ似てはいるが、ピーク位置が入力RPSDに対して大きくずれていることがわかる。

このように、本研究で提案するパターン化は、位相差分分布を規定する模擬地震波の作成法に対しても、工学的に有効であることが明らかとなった。

4 結論

本研究により明らかになったことをまとめると以下のようになる。

1. 振幅と周波数が共に非定常である実地震波を一定の時間間隔で分割し、その間では定常波とみなし、時間を逐次ずらしながら、パワースペクトル密度の時間的変化を示すランニングパワースペクトル密度(RPSD)を推定することができる。この際、自己回帰モデルを用いたスペクトル解析手法を用いると、データ数が少なくても精度よく推定することができ、RPSDの大局的特徴の把握に有効であることがわかった。
2. RPSDを時間-周波数平面における2次元情報として記述し、とくに地震波の非定常特性を抽出するため、
 - (1) RPSDのピーク数
 - (2) パワーの広がり方
 - (3) ピークの相対的位置関係
 の3個の画像情報をパラメータとして地震波を計36個のパターンに分類する方法を提案した。
3. RPSDのピーク位置での断面の形状は、正規分布関数と近似的に相似であることを着目し、ピーク関数を導入することによって、実地震波のRPSDを精度よく模擬することができた。
4. 模擬したRPSDと地震波の時間的な強度の変動とを考慮した耐震設計用模擬地震波の作成を行った。時刻歴波の位相差分分布の形状と時刻歴波の全継続時間に対する時間的な強度の変動とが良好に対応していることを利用し、模擬RPSDを $t-P$ 平面上へ投影した図形と位相差分分布の形状を一致させることにより、実地震波の特性を最適に反映する模擬地震波を作成することが明らかになった。

本手法を実用化するに当たり、解決すべき問題点としては、

- (1) 分類すべきパターン数が多すぎるため、さら

に簡略化を考え、パターン数を減らす。

- (2) RPSDの両軸(f , t 軸)が、実地震波の継続時間の長さや、最大周波数の取り方によって異ってしまうため、RPSDのパターンを一般的指標として扱いにくい。
- (3) 正規分布関数の形で表わしたピーク関数では、例えば新潟地震波(1964)などのように、地震波の後半にも低周波成分が強く含まれているような波形に対して、時間軸に対するRPSDの断面が正規分布的形状を示さないため模擬しにくい。ピーク関数を対数正規分布関数の形で表わしてみるなどの検討が必要となる。

- (4) 2ピークの場合、位相差分分布を正規分布の形状と仮定すると、小ピークを模擬しにくい。

などがあげられるが、今後、本手法の改良と、データの蓄積などにより解決をはかってゆく所存である。

最後に、本研究遂行にあたり、模擬地震波作成の計算プログラムを作成された日本電子開発(株)皆川剛君(元本学学生)ならびに、計算遂行などに積極的に協力された本学学生中島明君に深く感謝する。

文献一覧

- 鈴木浩平・青木 繁
1978「耐震設計用入力地震波について」『総合都市研究 2号, pp. 39—53.
- 中田和男
1978「パターン認識とその応用」コロナ社
- P. C. Jennings・G. W. Housner・N. C. Tsai
1968“Simulated Earthquake Motion” A report on research conducted under a grant from the National Science Foundation. C. I. T
- 赤池弘次・中川東一郎
1972「ダイナミックシステムの統計的解析と制御」サイエンス社
- 日野幹雄
1977「スペクトル解析」朝倉書店
- Y. Y. Lin・森大吉郎他訳
1972「構造力学の確率論的方法」培風館
- RAPRAS研究会(柴田碧監修)
1977「応答解析用模擬地震波とその周辺の研究論文抄録集」
- 岩崎良二・大崎順彦・政尾 亨・大川 出
1978「地震波の位相特性とその応用に関する研究」『日本建築学会学術講演梗概集』pp. 567—582

STUDY OF EARTHQUAKE MOTION CHARACTERISTICS AND SIMULATION
METHODS BY USING PATTERN RECOGNITION TECHNIQUE

Kohei Suzuki *, Shoji Tozawa ** and Shigeru Aoki *

Comprehensive Urban Studies, No. 8, 1979, pp. 73~109

This report deals with a schematic study of earthquake motion characteristics and simulation techniques of artificial earthquake time histories by introducing the pattern recognition method. Particular attention was paid to the non-stationary characteristics of earthquake motions.

First the running power spectrum density function (RPSD) was estimated by dividing the whole earthquake duration into certain "stationary" segments. Then the computed RPSD was described as a 2-dimensional evolutionary spectrum on the time-frequency plane.

Next, the described RPSD patterns for various types of strong earthquake records were classified into 36 typical pattern models by paying attention to the following representative information of the RPSD; (1) number of peaks of the RPSD, (2) degree of development of power strength on the time-frequency plane and (3) relative location of peaks of the RPSD.

Finally a new earthquake simulation technique was proposed by using the calculated characteristics and phase-increment distribution characteristics of earthquake motions presented by Ohsaki.

* Center for Urban Studies, Tokyo Metropolitan University

** Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University