

## 強震記録のポーラリゼーション解析

Polarization Analysis of Strong Motion Seismograms

金子 孝吉\* 三上 敬司\*\*

By Takakichi KANEKO, Takashi MIKAMI

Polarization analysis has been used to detect seismic events from small seismic recordings which invariably are contaminated by noise, and to devise filters which will separate elastic body waves into compressional(P) and shear(S) phases and also enhance (or attenuate) surface Rayleigh and Love waves as desired.

In this paper, a time-varying nonlinear polarization filter techniques is carried out to discriminate waveforms of strong motion seismograms. This analysis is based on two terms of a rectilinear in nature and rectilinear in a direction of polarization in three-dimensional space.

We discuss a processor for three-component strong motion accelerograms which estimates the state of polarization. To investigate the earthquake ground motions at certain sites, the principal axes are calculated. And a synthetic seismogram oriented in the direction of the major axis was set forth. As a result, input waves calculated using the present technique will be available for simulation analysis in the design of earthquake resistant structures.

For instance the amplitude of the maximum main axis wave, recorder from the strong motion seismograms shows an considerably increase. Thus if the synthetic wave is used as the designed input wave, maximum effect in earthquake design can be expected.

## I. まえがき

全国各地で観測されている地震動の強震記録は工学的に多方面に利用されているが、それらの記録の多くは土木建築構造物の耐震設計における設計入力波あるいは設計スペクトルに利用されている。構造物の耐震性の向上は地震動の特性を正確に把握しておく必要があり、強震記録のより高度な波形解析を行うことが要求されている。そのため、これまで多くの研究者により各種の方法でその有効な波形解析が行われてきた。

本研究は北海道開発局管轄で北海道内の道路橋の架橋地点で観測されている強震記録の工学的利用を目的として、その3成分加速度記録のポーラリゼーション解析を行ったものである。ここで適用する時間領域での非線形ポーラリゼーション・フィルター解析 (polarization filter techniques) は Flinn<sup>1)</sup> によって提案されたものであり、その1つである "REMODE"-filter 解析 (Rectilinear Motion Detector filter analysis) は地震波のある方向に指向された位相を強調するために多くの研究者に用いられている<sup>2)</sup>。

しかし、それらの多くはシグナルとノイズの分離を行うことに注がれていた<sup>3)</sup>。それはまた実地震波の波形解析においては、震源で発生したP波、S波とそれらの実体波が地表下の境界層や不整形な地層によって反射、屈折を行った結果として誘起された後続波との分離を目的とするためにも使われている。

さらに、微小地震と常時微動などのバックグラウンド・ノイズとの分離、あるいは近年多重震源の判定や実体波と表面波の波形識別にも利用されこの種のフィルターに関する知識が蓄積されてきた<sup>3)</sup>。

\* 工博 専修大学北海道短期大学 教授 土木科 (〒 079-01 美瑛市光珠内町)  
 \*\* 工修 " " 助教授 " ( " " )

解析の特色は3次元空間での地震動粒子軌跡の楕円球の性質をあらわす特性 (rectilinearity) と方位指向性(direction of polarization) の2つのパラメータで表現しようとする考えに基づいている。

さて、ここではまず3成分加速度強震記録を用いて地震動のポーラリゼーションの状態を推定し、波動主成分の識別と分離を行っている。地震動の波形識別にはこのポーラリゼーション解析のみで充分かと言うとそうではない。地震動のリサージ軌跡図等の別の手法を合わせて利用することにより正確な判定を下せることになる。そのため、本論ではマルチフィルターを用いて地震動の粒子軌跡を周波数分析して表現する軌跡スペクトル解析を行っている。さらに進めて、地震動の最大のパワーを示す主要動部における最大主軸成分方向の波動を合成している。その結果、この3成分強震記録から合成された最大主軸成分波は構造物のより実際的な耐震設計入力地震波として工学的に利用できるものと思われるのでここに提案する。

## II. ポーラリゼーション・フィルター解析

ここで示す道路橋架設地点で観測した強震記録のポーラリゼーション解析については Montalbettiら<sup>4)</sup>の手法を基礎にしており、図-1に示した流れの操作手順に従い実行される。その手順に従い解析方法を説明する。

[1] データベース化された3成分加速度強震記録の中から必要なデジタルデータを引き出す。

[2] 3成分地震波記録  $G_{Bi}$  ( $i$ はLG,TR,UDの3成分)の中で水平成分の方位は橋軸方向(LG)と橋軸直角方向(TR)の場合が多く、観測地点が異なれば水平成分の方向もそれぞれ異なるため、まず座標変換してNS、EWの成分波  $G_i$  (ここで、 $i$ はNS,EW,UDの3成分)を作成する。ここで、地震動の全体的な特徴を把握しておく意味でNS、EW、UD 3成分から2成分を組み合わせて、NS-EW、UD-NS、UD-EWに関する周波数別、時間別に表した地震動粒子のリサージ軌跡スペクトル (Orbit Spectrum) を描くことにする<sup>5)</sup>。

[3] 立上りから一組  $N$  個のデジタル量に関する共分散行列 (Covariance Matrix) は、

$$V = \begin{pmatrix} \text{Var}[G_{NS}] & \text{Cov}[G_{NS}, G_{EW}] & \text{Cov}[G_{NS}, G_{UD}] \\ \text{Cov}[G_{NS}, G_{EW}] & \text{Var}[G_{EW}] & \text{Cov}[G_{EW}, G_{UD}] \\ \text{Cov}[G_{NS}, G_{UD}] & \text{Cov}[G_{EW}, G_{UD}] & \text{Var}[G_{UD}] \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (1)$$

のように求められる。

[4] この行列の固有値と固有ベクトルを計算し、これらの値から最大主軸、中間主軸および最小主軸の大きさ ( $\lambda_i$ ) とそれぞれの入射角 ( $\psi_i$ )、方位角 ( $\theta_i$ ) を計算しその分散の大きさの時間変化を図示する。ここで、 $i=1,2,3$  である<sup>6),7),8)</sup>。

[5] 方位角と入射角により地震動の注目した基本的な水平方位成分  $R$  (Radial) とその方向に直角な成分  $T$  (Transverse) および上下方向  $Z$  (Vertical) の3成分の波を合成するための Direction Function

$$D_i = (e_i)^k \quad (i=R,T,Z, \equiv 1,2,3) \quad \dots (2)$$

を求める。なお、 $0 < D_i < 1$ 、 $k$  は強調を表す指数である。また、 $e_i$  は方位座標変換の関数であり、たとえば水平方位の座標変換の関係式は

$$\left. \begin{aligned} e_R &= X = x \cos \theta + y \sin \theta \\ e_T &= Y = y \cos \theta - x \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

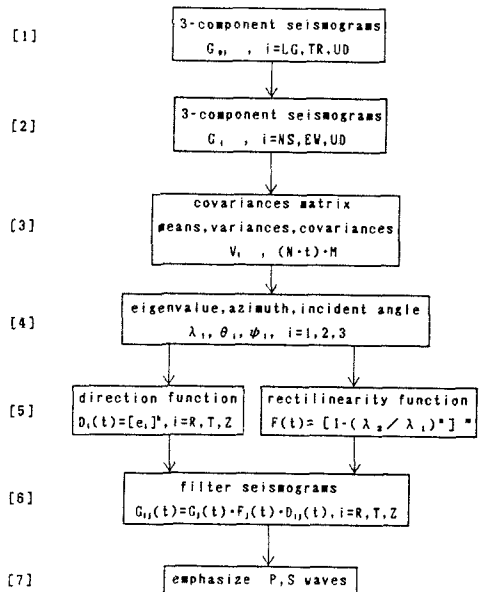


図-1 Polarization Filter 解析の流れ

のように表わすことができる。

また Rectilinearity Function は Flinn が用いた2次元の場合

$$F_1 = \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^n \right\}^m \dots \dots \dots (4)$$

を著者らは3次元に拡張して、

$$F_2 = \left\{ 1 - \left( \frac{\lambda_{22} + \lambda_2 \lambda_3 + \lambda_3^2}{3\lambda_1^2} \right)^n \right\}^m \dots \dots \dots (5)$$

$$F_3 = \left( \frac{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}{\lambda_1^2 - \lambda_2 \lambda_3} \right)^m \dots \dots \dots (6)$$

のようにも提案した。ここで、式(5)、式(6)のかっこ内の項には主軸でつくられる楕円の面積

$$A_1 = \pi \lambda_1 \lambda_2, A_2 = \pi \lambda_1 \lambda_3, A_3 = \pi \lambda_2 \lambda_3$$

楕円球の体積

$$V = 4 \pi \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 / 3$$

と最大主軸 $\lambda_1$ を半径とする円の面積  $A_\lambda = \pi \lambda_1 \lambda_2$ 、球の体積  $V_\lambda = 4 \pi \lambda_1^3 / 3$ 、との比がそれぞれ組み合わせられて用いられている。いずれも0と1の間の値をとり、理想的な動きをするとき0の値になるのは $F_1$ が円板、 $F_2$ が球の内部を動き、1の値になるのは $F_1$ 、 $F_2$ ともに直線運動をするときになる。

$F_2$ において円板の動きになるのは値が2/3のときである。なお、ここでも式(4)、(5)、(6)におけるn、mは強調指数を示すものである。以後の解析例においては方向に関して強調を強めk=2とにおいて、Rectilinearityに関してはn=1、m=1を用いている。

さて、一組N個のデジタルデータ(データ間隔t秒のときN・t秒の時間)は、線形な時間ウィンドウ関数になっている。これを地震波の全データに適用するため、ウィンドウの時間幅を一定にしてウィンドウの中心の時刻 $t_j$ (j=1,2,...,M)のフィルター関数として順次時刻を再新し同じ計算を繰り返す。時刻の移動によりM回ウィンドウが変化するため非線形フィルターとみなすことができるが、隣のウィンドウ同士は重なる時間領域をもっており低域通過フィルターを適用した場合に該当している(図-2方位座標変換と主軸)。

[6] 結局目標とするところの主軸成分を強調した地震波形 $G_{ij}$ は上記のようにつくられたポーラリゼーション

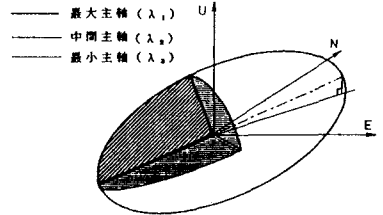
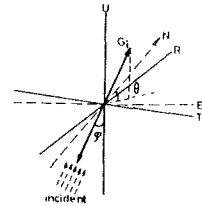


図-2 方位座標変換と主軸

表-1 浦河沖地震と強震観測地点

地震	浦河沖地震 本震 1982.03.21.11:32 N42°04' E142°36' D=40km M=7.1	
観測点	(1) 横溝橋 (HOR)	地点 N42°04' E143°02' Δ=36.0km 加速度強震計 SMAC-B2 GL 3成分 LG(N52°30'E),TR,UD ALGmax=95.0 ATRmax=100.1 AUDmax=-29.8
	(2) 千代田大橋 (CHI)	地点 N42°55' E143°23' Δ=168.1km 加速度強震計 SMAC-B2 GL 3成分 LG(N53°45'E),TR,UD ALGmax=74.0 ATRmax=-83.7 AUDmax=17.0
	(3) 島松沢橋 (SHI)	地点 N42°55' E141°32' Δ=128.4km 加速度強震計 SMAC-Q GL 3成分 LG(N38°25'W),TR,UD ALGmax=121.0 ATRmax=107.7 AUDmax=56.7
	(4) 広尾橋 (HIR)	地点 N42°16' E143°19' Δ= 63.0km 加速度強震計 SMAC-Q GL 3成分 LG(N23°00'E),TR,UD ALGmax=265.8 ATRmax=-207.1 AUDmax=-72.0
	(5) 石狩河口橋 (KAK)	地点 N43°13' E141°21' Δ=163.6km 加速度強震計 SMAC-B2 GL 3成分 LG(N42°42'E),TR,UD ALGmax=36.2 ATRmax=45.3 AUDmax=14.5
	(6) 札幌IC高架橋 (SAI)	地点 N43°04' E141°25' Δ=147.2km 加速度強震計 SMAC-Q GL 3成分 LG(N09°43'W),TR,UD ALGmax=249.9 ATRmax=299.2 AUDmax=40.5

ジョン・フィルターを用いて次式で表現することができる。

$$G_{ij}(t) = G_j(t) \cdot F_j(t) \cdot D_{ij}(t) \quad (i=R,T,Z, j=1,2,\dots,M) \quad \dots \dots \dots (7)$$

つまり、方位指向された地震波形  $G_{ij}$  は元の波形  $G_j$  にウィンドウの時間関数  $F_j$ 、 $D_{ij}$  を乗じて得られることになる。

[7] さらに、P波初動部から推定された入射方向の成分と入射角の方位が平行で入射角が直角なSV波の成分を強調するようなP波、S波を合成し、それを作図することによって波形識別を容易にしている。

なお、後述の実地震波の解析においてはデジタルサンプリング間隔は0.01秒で、データ数5000個に対してウィンドウ時間幅0.5秒で1組N=50個、M=100回を基準にしているが、記録された地震波の振幅や継続時間のいかんによって一部変わることがある。

### III. 強震記録の主成分解析と波形識別

ポーラリゼーション・フィルターを用いて実地震の記録を解析するわけであるが、ここで扱った強震記録は北海道開発局（道路部門）で設置した強震計による記録から 1982 年北海道南方沖の地震（浦河沖地震）のものである。表-1にはその浦河沖地震と強震観測地点が示されている<sup>9)</sup>。

表中の6つの観測地点（幌満橋、千代田大橋、島松沢橋、広尾橋、石狩河口橋および札幌IC高架橋）について前記した解析手法で主成分解析を行った。なお、図、表等に示す観測地点は HOR、CHI、SHI、HIR、KAK および SAI のようにコードネームで表わすことにする。

ステージ [2] でたとえば、SHI の水平動の1つLG成分は N38°25'W の方位を示しているからTR成分

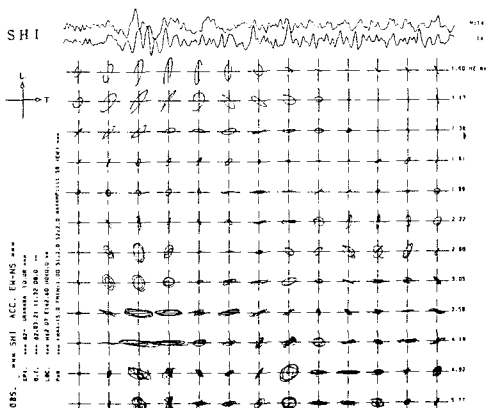


図-3 (a) 座標変換前の軌跡スペクトル

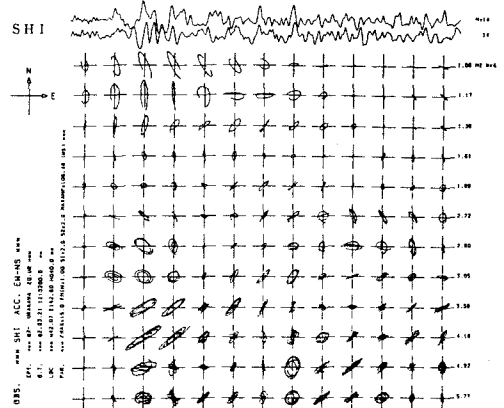
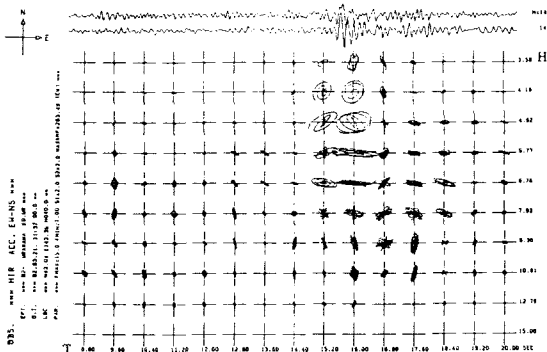
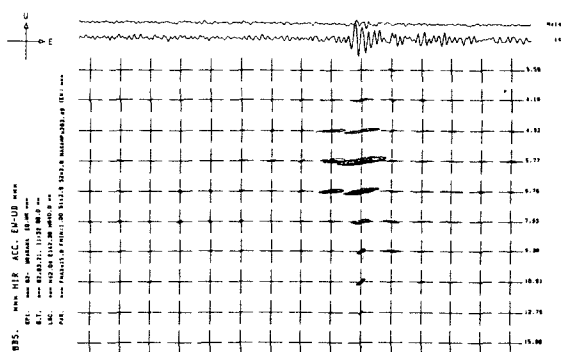


図-3 (b) 座標変換後のスペクトル



(a)



(b)

図-4 地動粒子のリサーチ軌跡図

とともに座標変換してNS、EW成分に直してみる。

図-3はその一例として方位変換前後の波形と地震動の粒子軌跡を示したものである。また、地震動全体の動きの様子を把握するために地動粒子の周波数別リサージ軌跡図すなわち Orbits Spectrum を求めている。図-4には代表として広尾橋 HIR の図を示しておく。

つづいて、[3]そして[4]のステージに移り、共分散行列の固有値、固有ベクトルから求まる主軸パワー $\lambda_i$ と入射角 $\psi_i$ 、方位角 $\theta_i$ を求め、その結果を図-5(a~d)に表-1の観測地点コード順に4点示す。最大(実線)、中間(破線)および最小(点線)の主軸の入射角、方位角そしてパワーの時間変化を示している。入射角は鉛直軸に対するものであるから各地点とも最大、中間の主軸が主要動部ではほぼ $90^\circ$ に近いことは水平動が支配的であることを示している。

一方、主要動部の最大主軸方位角は各地点ばらばらでここでは比較することができない。なお、図中に水平に引いた破線の方位はその観測地点と震央とを結ぶ方位である。

さらに、下の図は $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ および $\lambda_3$ の時間変化を表わしたもので地震動のパワーを示すものとみなせるが、いずれも最大主軸と中間主軸が最小主軸に比べて大きく楕円板に近い地震動の動きを読み取ることができる。ステージ[5]の段階では、地震動の主軸の問題をより理解し易くするために最大主軸を軸とする包絡楕円球の時間変化の様子を図-6に示した。水平成分N、E方向に対してU方向は紙面に垂直な手前に

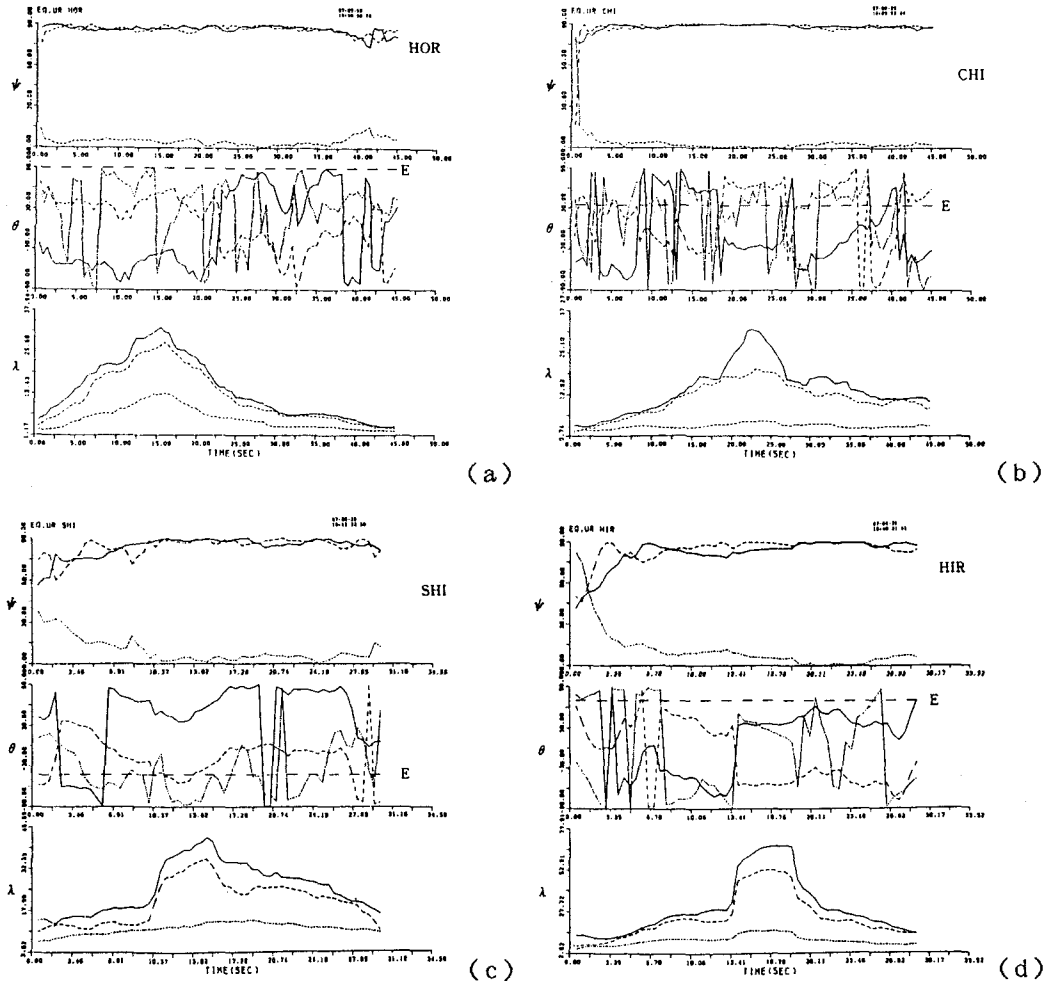


図-5 主軸の入射角、方位角およびパワーの時間変化

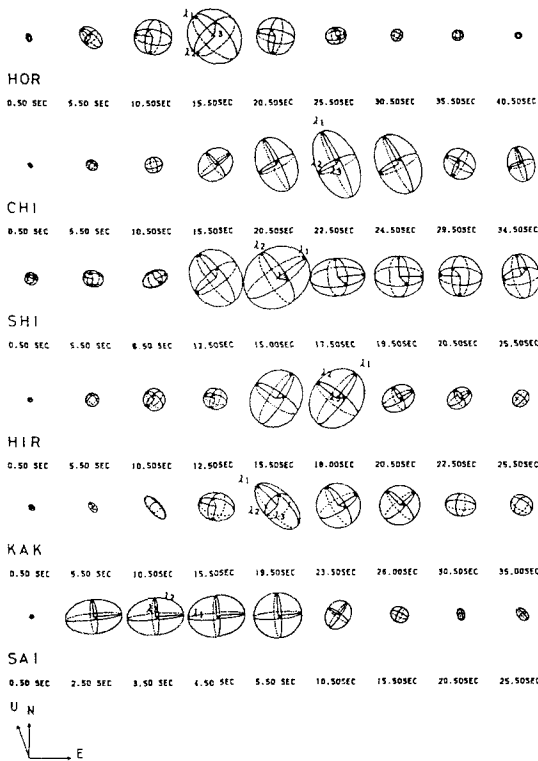


図-6 楕円球の時間変化

45°傾いた方向の3成分座標で示してある。それぞれ振幅、方位、Rectilinearityと主軸の変化する様子が視覚的に充分とらえることができる。

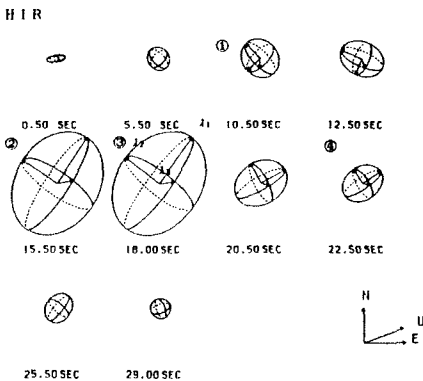


図-8 地動軌跡の楕円球表示と Power および Rectilinearity の変化図

また次に、式(4)、(5)および(6)で与えられた Rectilinearity  $F_1$ 、 $F_2$  および  $F_3$  の時間変化を調べて図-7に示した。 $F_1$  (実線)、 $F_2$  (破線) および  $F_3$  (点線) はほぼこの順に値が大きくなっていく傾向はそれほど変わっていない。立上りの部分が比較的大きな値であることは細長い楕円球の動きになっており、後ろの位相で値が小さく円板に近い動きもみられる。

図-8は HIR における楕円球の軌跡とそれに対応するパワーと Rectilinearity の変化図である。

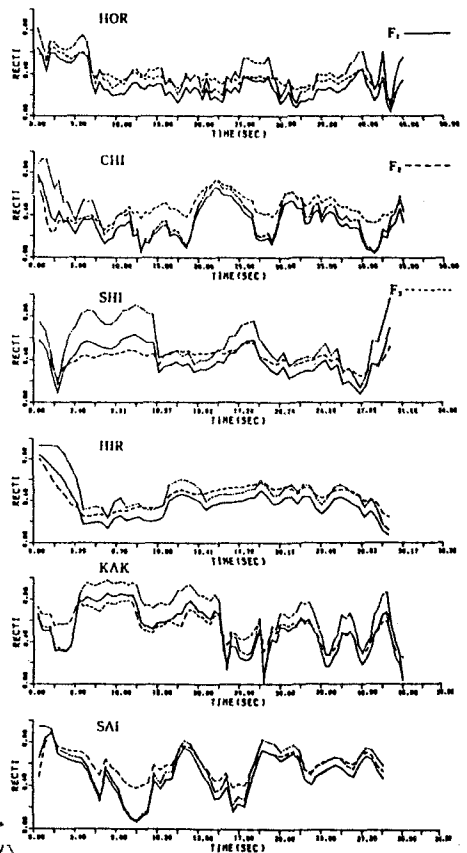
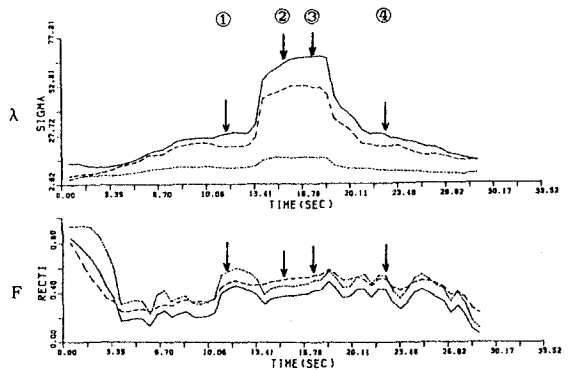


図-7 Rectilinearity の時間変化



#### IV. 主要動最大主軸成分波

きて、ステージ [6] [7] に移りここでは主成分解析を行って推定された波動の伝播方向 (Radial) もしくはそれに直角な成分 (Transverse) 方向に変換した波形を合成する。

そして主要動の中で振幅の最大な波の最大主軸  $\lambda_1$  の示す方向が求められるからその方向に生波形を変換して合成すればこの地震動がもつ最大の成分波であると言える。

また、初動部の主成分解析から推定されるP波とそれに入射角の方向が平行で震動の方向が同一面内で垂直なSV波の成分をそれぞれ引き出して強調するフィルター (REMODE Filter) を作成する。

図-9は HIRにおけるもので生波形UD・NS・EW、合成された主成分波形T・R、強調波形P・SVを示したものである。図をみるとR成分がEW成分によく似ており振幅がわずかに大きくなっていることがわかる。そして、強調P波はUD成分に、強調SV波はEW成分に近い波形を示しているが、P波成分とSV波成分は完全に分離されていることがわかる。

主要動の最大振幅を示す部分の最大主軸成分の方位で変換した波がどの程度大きいのかR成分とEW成分のパワースペクトルを求めて図-10に示す。

R成分の振幅がEW成分の振幅より各周波数において大きくなっていることがわかる。

また、図-11は生波形NS、EWと最大主軸方位合成波Rとの比較をそれぞれ観測地点別に示したものである。いずれもNSあるいはEWどちらかの成分の波に類似した波形をしていることがわかる。

Rの振幅が現波形の振幅に対して最大の増加を示すのは地震動が直線的な運動をし、さらに主軸の方向が現波形の振動方向に対して  $45^\circ$  傾いている場合であり振幅が  $\sqrt{2}$  倍になる。最後に、6つの観測地点における各成分波の最大加速度の値を比較して表-2に示した。生波形の振幅に比べて最大主軸成分波形の振幅はこのケースでは平均 数% 大きくなっていることがわかる。しかし、座標変換後のNS、EW成分波の振幅と比較すると、当然その増加率も変わっていることが明らかである。

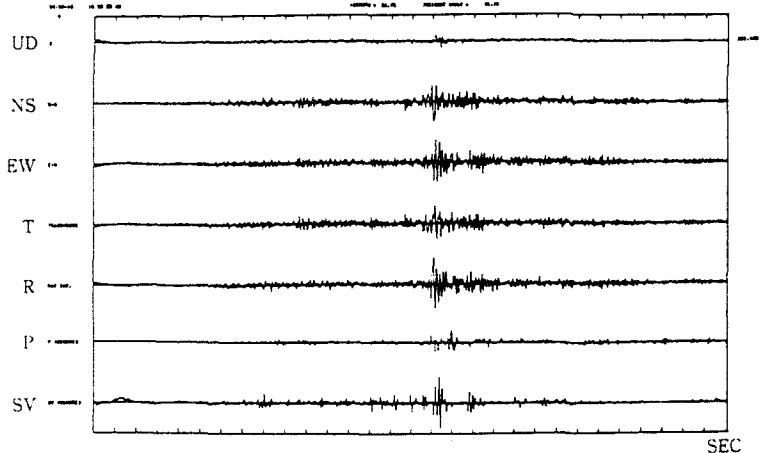


図-9 生波形、主成分合成波形および強調波形

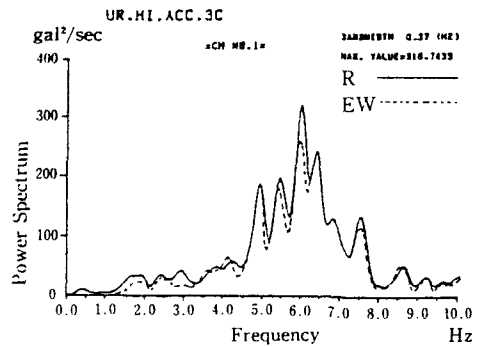


図-10 R成分とEW成分のスペクトル

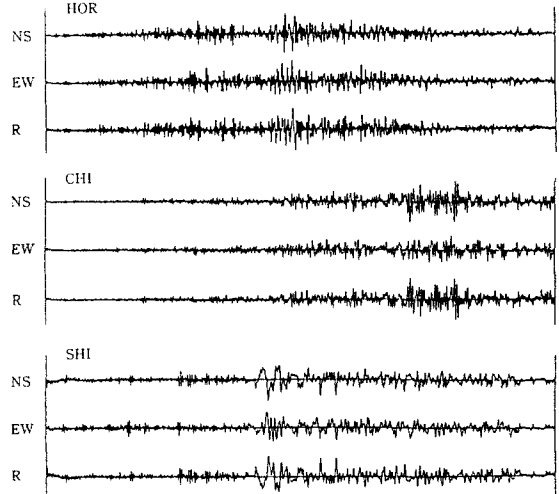


図-11 生波形と合成された成分波

表-2 各成分波の最大加速度絶対値

観測地点	原波形の最大 加速度 Gal	座標変換後の 最大加速度 Gal	最大主軸成分波 の最大加速度 Gal	加速度増加比 (%)
H O R	100.1 (TR)	104.7 (EW)	104.8	4.70
C H I	83.7 (TR)	84.7 (NS)	87.1	4.06
S H I	121.0 (LG)	117.0 (NS)	121.6	0.49
H I R	265.8 (LG)	261.5 (EW)	266.3	0.19
K A K	45.3 (TR)	45.2 (EW)	45.4	0.22
S A I	299.2 (TR)	292.6 (EW)	300.1	0.30

以上のことから総合的な地震動の主成分解析を行えるこのポーラリゼーション・フィルター解析は強震記録の波形識別にも効果を挙げることができた。また、最大主軸の方向成分波はこの地震動が持つ最大の水平成分波とみなせることがわかった。

#### V. あとがき

ポーラリゼーション・フィルターを用いた手法は古くから利用されていたが、時間領域における移動平均的な手法であるため、周波数領域で操作するほどの威力を発揮しないこともあって、いままで工学の分野では利用頻度が少なかったように思われる。時間領域ではあっても主成分解析から得られた方位指向性の特性と粒子軌跡の3次元楕円球の性質を表わす特性を考慮したデジタル・フィルターを使用することによって空間的に地震動をとらえ、波形解析を行えるということによって十分にその威力を発揮している。

特に最大主軸成分波を作成することができるため、その合成波は工学的にも耐震設計においてより実際的な入力地震波として提供できるだろう。今後は、地盤上の他の強震記録についての主成分解析はもちろん、橋脚や橋台の振動を記録した強震記録の解析についても検討する予定である。

本研究の解析には北海道大学大型計算機センターのHITAC 680 H を使用した。

#### [参考文献]

- 1) Flinn, E.A.: Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion, Proc. I.E.E.E., 53, 1874, 1965.
- 2) Griffin, J.N.: Application and development of polarization (REMODE) filters, Seismic Data Laboratory Report 141, Teledyne Inc, Alexandria, Va. (AD-630-515), 1966.
- 3) 高波 鉄夫、他: 地震波の識別と分離、物理探査学会秋期講演会、30-31、1986。
- 4) Montalbetti, J.F. & Kanasevich, E.R.: Enhancement of Teleseismic Body Phases with a Polarization Filter, Geophys. J. R. astr. Soc., 21, 119-129, 1970.
- 5) Kaneko, T. & Watanabe, N.: Multiple Filter Orbit Analysis of Seismograms, Proc. of the 6th Japan Earthq. Eng. Symp., 409-416, 1982.
- 6) Watabe, M., Tohdo, M., Hanazato, T. & Matsukawa, K.: Some Features of Earthquake Ground Motions due to the MEXICAN Earthquake of September 19, 1985, Proc. of the 7th Japan Earthq. Eng. Symp., 319-324, 1986.
- 7) 久保哲夫: 三次元地震動の模擬作成に関する研究—その1. 地震動の主軸—日本建築学会論文報告集、第265号、pp.81~91、1978。
- 8) 川島一彦、相沢興、高橋一之: 最大地震動および応答スペクトルの推定式に及ぼす強震記録の水平2成分合成の影響、土木学会論文報告集、第329号、pp.48~56、1983。
- 9) 北海道開発局土木試験所構造研究室: 強震観測記録報告書 (1966.11-1984.3)、1985。

(1988年10月12日受付)