

I—20 ポーラリゼーション・フィルターを用いた強震記録の波形識別

専修大道短大 正員 金子 孝吉
北大理学部 正員 高波 鉄夫

I. まえがき

時間領域で適用する非線形ポーラリゼーション・フィルター解析 (polarization filter techniques) は Flinn¹⁾ によって提案されたものであり、地震波の実体波位相を強調するために多くの研究者に用いられている。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。実地震波の波形解析について別の表現でいえば、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波との分離を目的とするものが多かった。

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発展してきた^{2), 3)}。

解析の根底には地震動の粒子軌跡の楕円離心率特性 (rectilinearity) と方位指向性 (direction of polarization) の2つのパラメータが必要で重要な役割をもっている。

さて、本研究は地中および地表の強震記録にこのポーラリゼーション・フィルター解析を採用して波動主成分の識別と分離を行ったものである。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作成した。その結果、この3成分強震記録から作成された最大主軸成分波は構造物の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

ここで示すポーラリゼーション・フィルターは Montalbettiら³⁾の手法を基礎にしており、楕円離心率の関数Fと方位指向性の関数Dの積で表された関数を空間的に発展したものである。以下、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・フィルター解析について図-1に示した流れの操作手順にしたがい説明する。

[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_i 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 を作成する。

ここで、地震波動の全体的な特徴をつかんでおく意味で、NS、EW、UD 3成分波から2成分組み合わせ NS-EW、UD-EW、UD-NSに

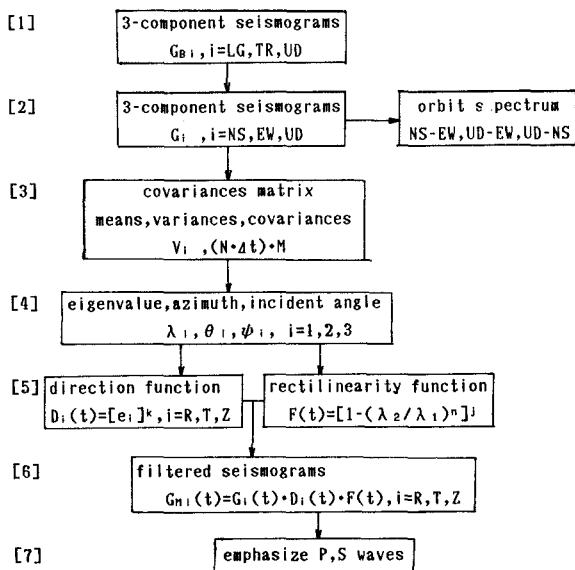


図-1 ポーラリゼーション・フィルター解析の流れ

関する周波数別、時間別の地震動リサージ軌跡図を描き、オービット・スペクトルを作成する。

〔3〕 立上りから一組 N 個のデジタル量に関するコバリアンス・マトリックス V を求める。

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

〔4〕 これを対角化することにより最大主軸、中間主軸および最小主軸それぞれの入射角 (ψ_i)、方位角 (θ_i) および固有値 (λ_i) を計算する。ただし、 $i=1,2,3$ である。図-2 は直交座標と入射方向成分主軸を表している。

この主成分解析による最大、中間および最小の主軸のそれぞれの ψ 、 θ および λ による振動振幅値に関する時間変化を作図する。

〔5〕 方位角 θ_i により地震動の基本的な水平方位成分 R (Radial) とその方向に直交な成分 T (Transverse) および上下方向 Z (Vertical) の3成分の波を作成するための方位関数 (direction function)

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

を求める。なお、 e_i は方位座標変換の関数である。

また、Montalbetti らが用いた楕円離心率関数 (rectilinearity function)

$$F = \{1 - (\lambda_2 / \lambda_1)^n\}^j \quad (3)$$

を計算しておく。なお、解析例においては $k=2$ $n=1$ $j=1$ を用いることが多い。さてこれらは N 個のデジタルデータ (データ間隔 Δt 秒のとき $N \cdot \Delta t$ 秒の時間) 分に相当するもので、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 ($j=1,2,\dots,m$) のフィルター関数として順次計算しておく。これがボーラリゼーション・フィルターである。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連続性を有している。

〔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_{nij} は次式で表現することができる。

$$G_{nij}(t) = G_{ij}(t) \cdot F_j(t) \cdot D_{ij}(t) \quad (4)$$

〔7〕 P 波の入射方向の成分とその方向に直角に震動する S 波成分のみの波を特に選んで抽出しそれぞれの成分波に重み関数を乗じ、以外の方の波を消して強調波動を作成する。

以上の結果をもとに、生波形 (UD , NS , EW)、式 (4) より求まる主成分波形 (T , R) および強調波形 (P , S) を作図する。

III. 強震記録の主成分解析と波形識別

ボーラリゼーション・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

- (1) 地震 日本海中部地震 本震 1983.05.26.11:59 N40°21' E139°05' D=14km M=7.7
観測点 室蘭 白鳥大橋架橋地点 N42°20' E140°57' $\Delta=256$ km 加速度強震計 AJE306
場所 (-13m, -25m, -35m) 3成分 LG(N15°00'E), TR, UD
- (2) 地震 和歌山県中部地震 1973.11.25.13:25 N33°51' E135°25' D=60km M=5.9
観測点 大阪南港埋立地 N34°42' E135°37' $\Delta=97$ km 加速度強震計 SMAC
場所 (GL, -40m, -80m) 3成分 NS, EW, UD

である。まず、前述の解析手順に従って (1) 日本海中部地震の解析を行う。

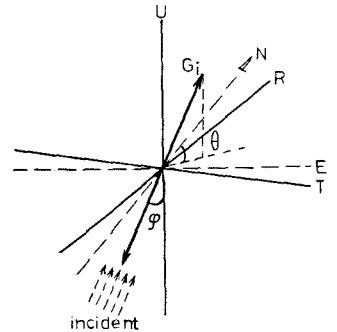


図-2 直交座標と主軸

ステージ [2] でたとえば -13m での水平動 L G、T R 成分を $N15^{\circ}00'E$ 方位変換して NS、EW 成分の波を作ると図-3 ようになる。波形での比較は難しいが軌跡図をみれば容易に確認できる。

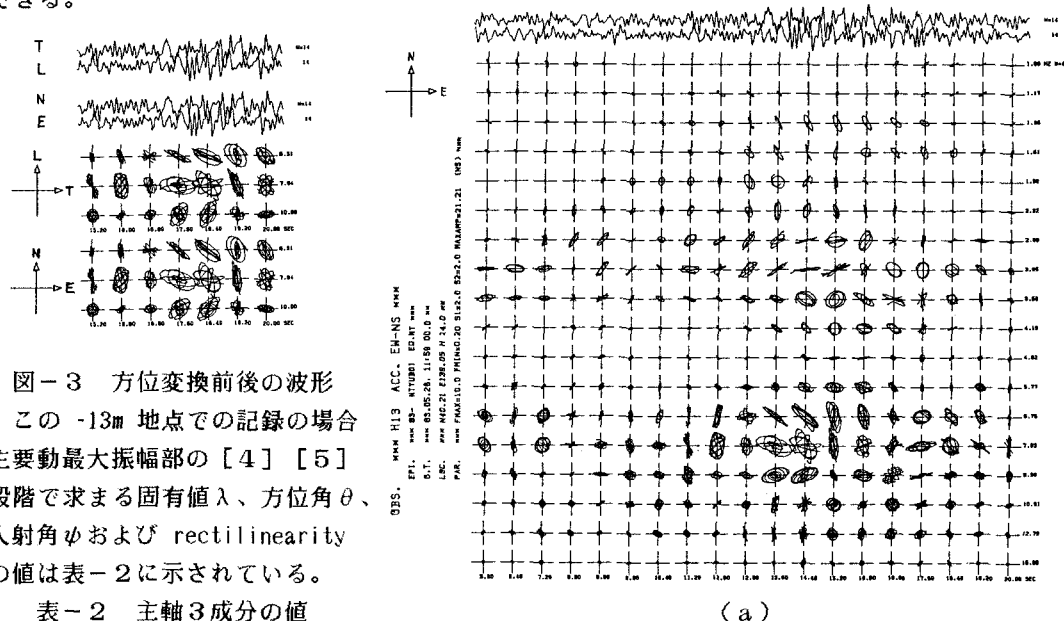


図-3 方位変換前後の波形
この -13m 地点での記録の場合
主要動最大振幅部の [4] [5]
段階で求まる固有値 λ 、方位角 θ 、
入射角 ψ および rectilinearity
の値は表-2 に示されている。

表-2 主軸3成分の値

	λ	θ	ψ
1-st	8.145	$N37^{\circ}31'W$	81.38°
2-nd	7.348	$N52^{\circ}62'E$	89.27°
3-rd	3.513	$N42^{\circ}76'W$	08.15°
	$F=0.098$		

λ と F の値からこの記録の最大
振幅部の軌跡は円軌道に近いこと
を示している。 ψ の値から最大、
中間の主軸はほぼ水平で最小主軸
は鉛直に近いことがわかる。

また、地震動の全体の動きの様
子を把握するために軌跡スペクトル
を示したのが図-4 と図-5 で
ある。図-4 は深度 -13m 地点で
(a) は NS-EW 成分、(b) は
UD-NS 成分であり、図-5 は
-35m 地点における NS-EW
成分である。ただし、軌跡の振幅
スケールは異なり (a) に対して
(b) では 2 倍に拡大されている。

この軌跡スペクトルを注意深く
ながめてみると次のことが言える。

① この波動は 1 ~ 15 Hz の周波

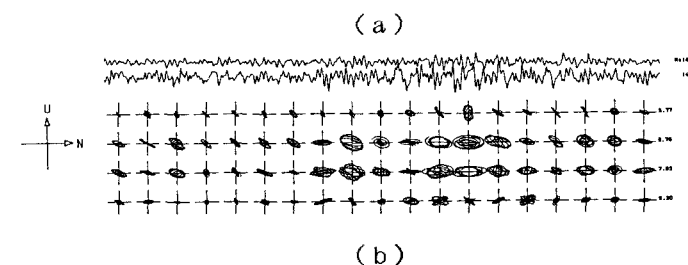


図-4 軌跡スペクトル -13m

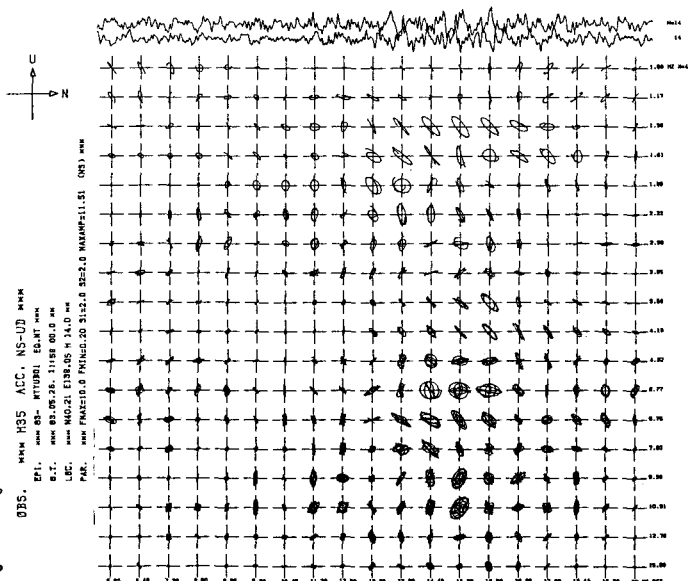


図-5 軌跡スペクトル -35m

数帯域にある。② -13m、-25m（省略）および-35m地点ともに同種の波動が1.5 Hz、1.7 Hz付近に生じている。③ 震央距離が 256 km と比較的速地震であるため、発生時の生の実体波は、伝播経路の地下構造の影響が大きく、とらえにくい波になっている。④ しかし λ 、 θ 、 ψ とこの地動軌跡の形状を比べることによってP波動、SV波動～ Rayleigh 波動あるいはSH波動～ Love 波動の推定と識別を容易にしている。

このような予備知識をもちながら主成分解析に入ることとする。図-6には最大（太実線）、中間（破線）および最小（細実線）の主軸の入射角 ψ 、方位角 θ そしてパワー λ の時間変化を示した。（a）、（b）、（c）はそれぞれ深度（-13m）、（-25m）、（-35m）における記録の場合である。いずれも地中の記録であるが震央距離 256 km に比べればどれも表層地盤とみなせるので主軸の時間変化はほとんど同じ傾向を示している。特に-25mと-35mでは完全に同じ動きをしている。 ψ について言えば最大、中間主軸が 90°に近いことから水平S波動が最小主軸が 10°ぐらいで上下P波動が卓越している。一方 θ は変化しており主軸の方位が定まっていなかったことがわかる。そして主要動最大パワーはいずれも 22 秒付近にある。

次ぎに、ステージ [6] [7] に移りボーラリゼーション・フィルターによるP波とS波の分

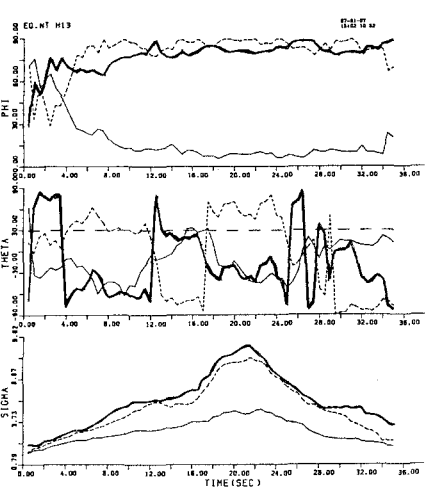


図-6 (a) 主軸の時間変化 -13m

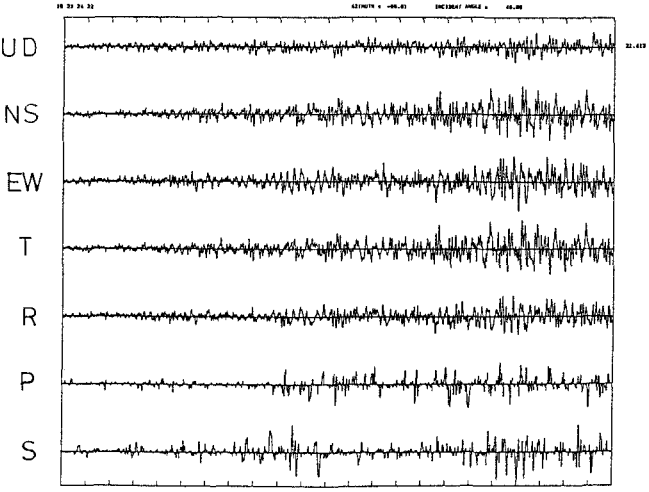


図-7 (a) 主軸成分波と強調P波、S波 -13m

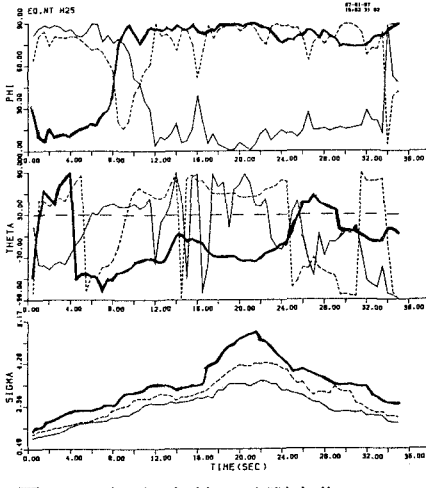


図-6 (b) 主軸の時間変化 -25m

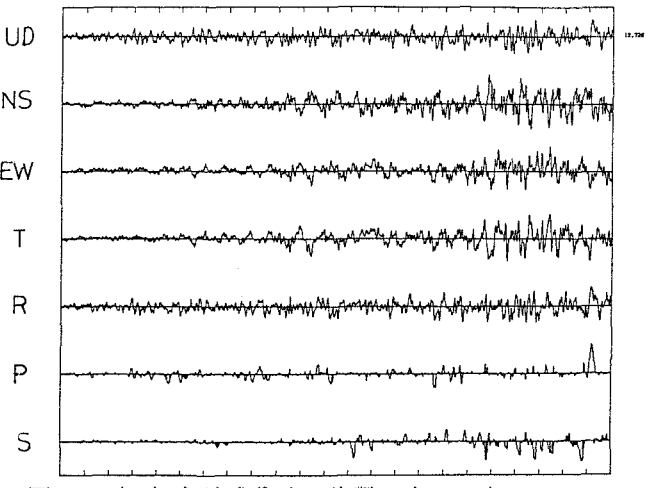


図-7 (b) 主軸成分波と強調P波、S波 -25m

離を行った結果を図-7に示す。(a)、(b)、(c)は(-13m)、(-25m)、(-35m)の場合で上からUD、NS、EWと主成分T、Rそして強調P、Sの波動を順に示してある。もちろん地表に近いほど振幅は大きいのであるが見やすくするため各々最大振幅を同一にしている。

水平な最大主軸のT方向成分はいずれもNSかEWのどちらかに近い波形を示しているが、振幅は幾分大きくなっている。R成分は入射P波に加えてSV波を含む傾向にある。また、P波成分とS波成分は完全に分離されていることがわかる。

以上のことから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は有力な手法であるということが言える。また、最大主軸のT方向成分はこの地震動が持つ最大の水平成分波であることが判る。

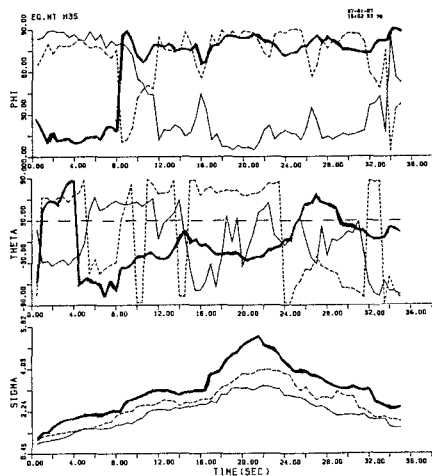


図-6(c) 主軸の時間変化 -35m

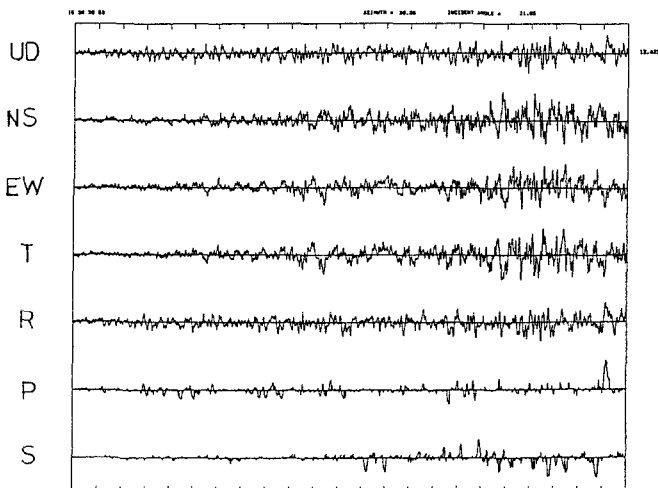


図-7(c) 主軸成分波と強調P波、S波 -35m

IV. 耐震設計の入力地震波

前述の日本海中部地震の記録は $\Delta = 256\text{km}$ と比較的遠い地震であったため、主要動が来るまでの時間がかかり最大振幅が緩やかに進行してくるケースであった。一般的に構造物に影響を与える地震は近距離の大地震であるから、ここでは III. で示した和歌山県中部地震の大阪南港埋立地での記録を例に耐震設計の入力地震波について考察してみる。

ポーラリゼーション・フィルターを用いて主成分解析を行った結果、まず主軸の時間変化図を描いてみると図-8に示すとおりである。これは地盤上の記録であるが地中 40m、80m の記録についても以下に示すとおりほぼ同様のことが言える(省略)。

この記録は震源距離がおおよそ 100km であり主要動S波部が非常に卓越している。それは最大主軸のパワーの時間変化図からも容易にわかる。

また、 ψ の図からわかるように主軸の入射角が 9.5 秒付近で急激に変化しており、最大主軸の成分がP波からS波へと変わったことを示している。

最大主軸の方位もEW成分に近いところで2転3転している。このことは地中の場合ではもっと複雑である。

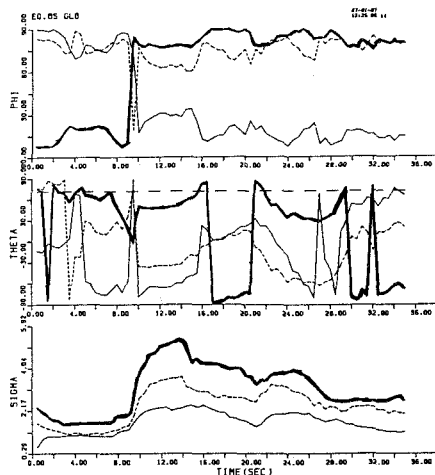


図-8 主軸の時間変化 GL

さて、図-9には水平成分の生波形 NS、EW成分とポーラリゼーション・フィルター解析によって求めた最大主軸のT成分とを比較して示してある。

(a)、(b)、(c)はそれぞれ地表、-40m、-80mにおける波形である。

地中ほど細かい周期が含まれているが全体の波形の顔つきも似通っていることがわかる。しかもT成分は他のどちらかの成分に極めて似ており振幅がわずかに大きくなっている。

このことはT成分波が最大の地震動を与えるもので、よりベターな設計入力地震波として使えることを示すものである。

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楕円離心率の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、波形分析を行えるということで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、工学的にも耐震設計におけるよりベターな入力地震波として提供できるだろう。

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

なお、ここで使用した強震記録を提供して頂いた開発局土木試験所構造研究室 吉田 紘一室長 並びにデジタル・データのファイルを作って頂いた 浅野 基樹氏 に深謝の意を表します。

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) Montalbetti, J.F. & Kanasevich, E.R.: Enhancement of Teleseismic Body Phases with a Polarization Filter, Geophys. J. R. astr. Soc., 21, 119-129, 1970.
- 4) Kaneko, T. & Watanabe, N.: Multiple Filter Orbit Analysis of Seismograms, Proc. of the 6th Japan Earthq. Eng. Symp., 409-416, 1982.
- 5) 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.
- 6) 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。
- 7) 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。

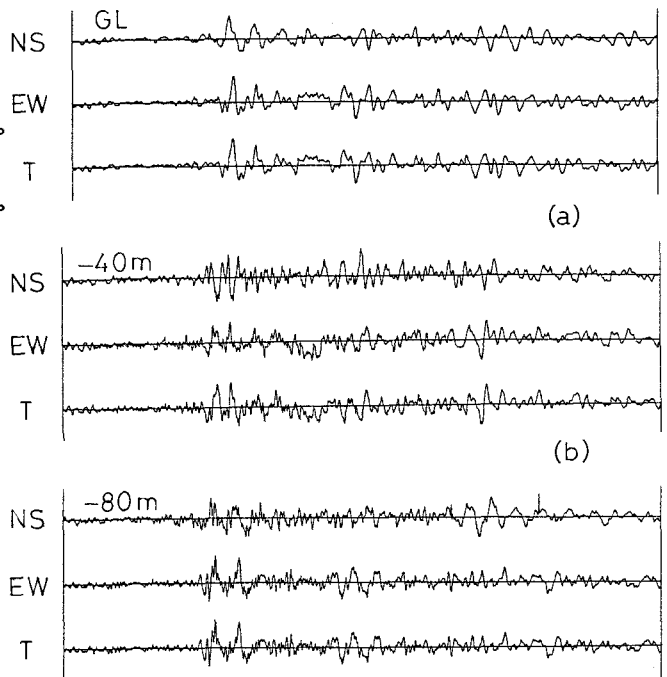


図-9 生波形と最大主軸のT成分波形 (c)