

I-32

中・小地震による傾斜地の地震動特性

専修大学短大 ○ 正 員 金 子 孝 吉
 専修大学短大 正 員 三 上 敬 司
 北海道大学 正 員 松 井 義 孝

1. はじめに

北海道における将来の地震活動を予測するため、人工衛星を利用した GPS (全地球測位システム) による地殻移動の調査も本格化してきた¹⁾。地震予知を目的とする微動観測や工学的に役立てようとする強震観測のために、全道各地に多数の地震計が設置され随時観測されている。専修大学北海道短期大学においても地震防災に取り組むための基礎的研究の一貫として、地震観測を実施してきた²⁾。大学校舎内に設置された強震計は1996年8月、強震観測システムの構成が整い観測が開始された。以来1998年12月現在までに、記録した地震は中小のもので17個におよんでいる。ここでは記録されたこれらの地震のそれぞれの特性を調べることから始め、観測地点、特に傾斜地域における地震動特性について把握することを目的として進めるものである。

2. 情報地震計観測システム

情報地震計による強震観測の実施に関する説明は文献2) において報告しているため、ここでは観測された地震記録の利用に必要な部分だけ簡単に整理して示すことにする。

2.1 地震計の設置場所

強震計は空知平野から東に望む山岳地への境の一角、美瑛市光珠内町にある専修大学北海道短期大学の構内に設置されている。その位置は図-1中の●で示され、北緯43.2893°、東経141.8660°

海拔56m

平均傾斜角度6.84deg (ESE方位に登り勾配)

地中3mの礫混じり粘土層中

にある。また、図には記録された地震の番号と震央位置(●)が示されている。

2.2 地震計のシステム構成

地震計は地中埋め込みタイプで円筒状長さ80cmに組み込まれている。装置は地震発生時の敏感かつ確かな情報を把握するための地震情報を得ることを目的としており、地震を検知すると、加速度、速度および変位成分の各最大値と計測震度、SI値と地震の継続時間を計算し、それらのデータを地震情報として外部転送装置に出力するとともに、地震の速度ならびに加速度の波形を地震記録として内臓のPCカードに保存する。

地震動を検知する地震計としてはサーボ型速度計(NS, EW, UD 3成分)が使われている。

この地震のシグナルは情報地震計情報入出力部に取り込まれる。地震記録の処理としてはパソコン上で波形解析プログラムにより地震波形、フーリエスペクトル図などを作成する。それらは地震情報入出力装

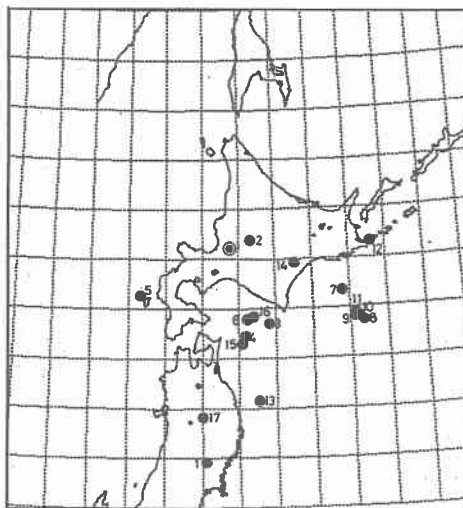


図-1 地震の震央分布

置として一体化したパッケージに収められている。

2.3 情報地震計の特徴

地震発生時に10秒毎に以下のデータを出力する。最大加速度、最大速度、最大変位（いずれも X,Y,Z 成分と、X,Y ベクトル和）、気象庁アルゴリズムによる計測震度階（0.01秒単位）、SI値（0.1kine 単位）、および地震の継続時間（0.01秒単位）である。1地震あたり 290秒間の加速度、速度成分の波形を ICカードに記録していく。速度記録に関しては、フルスケール +204.8kine（1,2,3チャンネル）と5.12kine（7,8,9チャンネル）の計 6チャンネルと加速度記録+2048gal（4,5,6チャンネル）の3チャンネルの計 9チャンネルが記録される。さらに、機番番号、起動内容（自動・手動）、起動日時（年～1/100秒）、起動条件（レベル、論理、サンプリング、遅延時間等）、10秒毎の地震計測値（継続時間、最大速度、加速度、変位、計測震度、SI値）が記録内容として残るので、微小地震から大地震までの観測が可能である。

3. 実測された地震記録

3.1 地震記録

1996年 8月から観測態勢に入り、トリガースケール全3成分20ミリカインで強震動を観測している。これまでに中小地震が17個記録されているが、たとえば

【1996年8月16日 16:05:06.84】の地震は中富良野に震源を有する地震(M=3.3、震源深さH=14.0km、北緯 43.3702°、東経 142.3087°)である。実際に記録された地震波形を見ると、最大加速度が2.188gal、最大速度が0.088kine、SI値が0.0kine、気象庁相当震度階級は0.93と記録されている。M=3.3と比較的小さい地震であったが、近地地震であったため記録された。そして、

【1997年 2月20日 16:54:12.94】の地震は浦河沖に震源を有する地震 (M=6.0、H=47.0 km、北緯41.7430° 東経142.9040°)である。この地震は浦河で震度5弱、静内、えりも、広尾で震度3を記録した。道内で「震度5弱」を記録したのは1996年10月に震度10階級の判定になって以来始めてのことである。記録された地震のSI値は1.5kineで気象庁相当震度階級は1.46を示しており、観測記録中最大の地震であった。観測地点の人間には多少の揺れを感じる程度の地震であった。最大加速度3.813gal、最大速度0.238kineである。

3.2 地震波形

それぞれの地震は震源の位置や大きさの違いでその波形もかなり異なるものである。

図-2には異なる地震を例にとってその

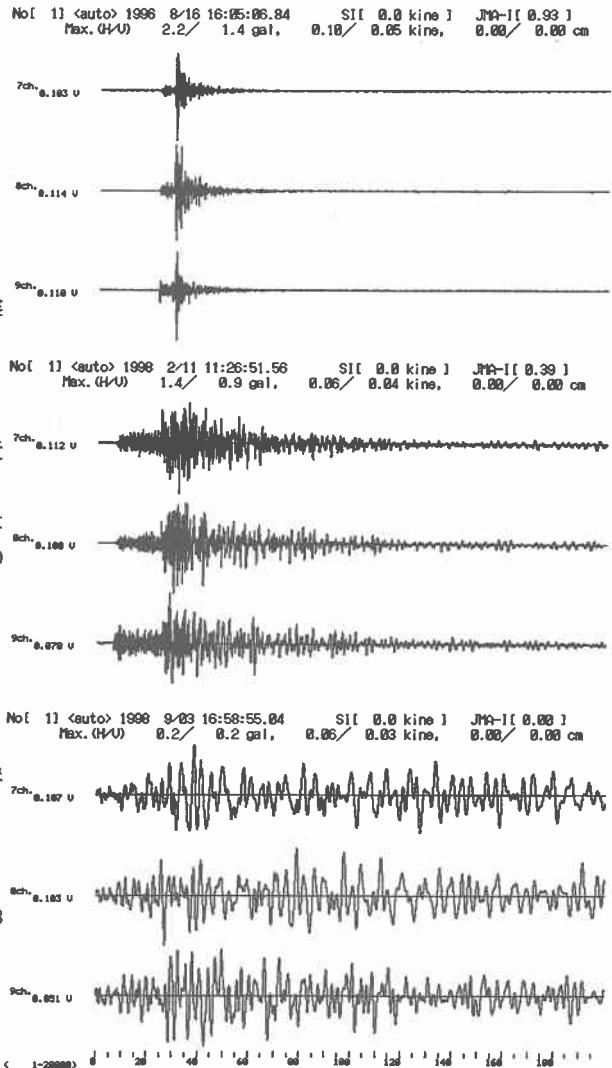


図-2 震央距離の異なる地震記録

速度記録の波形をNS、EW、UDの順に示した。

これらの地震波の主要動部の卓越周期および卓越周波数はNS成分でそれぞれ0.54sec(1.86Hz)、1.23sec(0.81Hz)、3.70sec(0.27Hz)とかなり異なるものであった。これは規模および震央距離の大きな地震ほど地震動は長周期になることを示している。

観測年月日、震源地、震源深さ、マグニチュード(M)、SI値、JMA-I(震度階)が示され、さらに水平動の最大値に対する上下動の最大値をそれぞれ加速度、速度、変位について示してある。つづいて1チャンネル・NS成分、2チャンネル・ES成分、3チャンネル・UD成分の波形を示したものである。上から地震番号No2、No16、No17で震央距離が48.9km、157.2km、378.3kmと異なっており、継続時間も震央距離が大きいほど長くなっていることがよく判る。

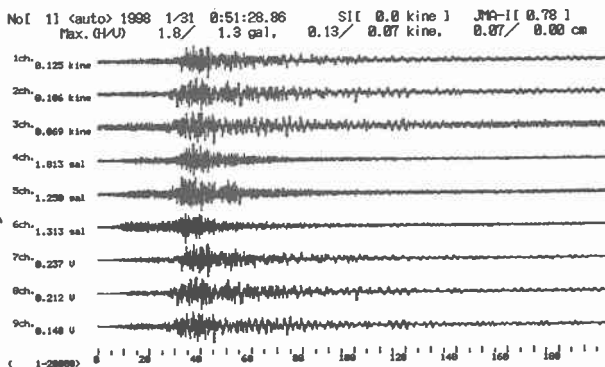
表－1 情報地震計によって記録された地震一覧

No	観測年月日時刻	震源地 震央(緯度、経度)	震央距離 km	震源深さ km	M	JMA-I	卓越周期および卓越周波数			継続時間 sec
							NS	EW	UD	
							sec Hz	sec Hz	sec Hz	
1	1996. 8/11 3:14:11.04	N=38.95° E=141.10°	478.0	10.0	5.9	0.00	2.27 0.44	3.45 0.29	2.27 0.44	>290
2	1996. 8/16 16:05:06.84	N=43.3702° E=142.3087°	48.9	14.0	3.3	0.93	0.54 1.86	0.29 3.47	0.35 2.83	27
3	1997. 2/20 16:54:12.94	N=41.7430° E=142.9040°	187.2	47.0	5.6	1.46	3.70 0.27	4.17 0.24	2.27 0.44	>290
4	1997. 2/27 23:23:46.14	N=41.5530° E=142.0910°	211.3	81.1	5.3	0.51	0.87 1.49	0.72 1.39	0.53 1.90	184
5	1997. 2/28 20:35:11.44	N=42.2190° E=139.2980°	221.1	10.3	6.5	0.39	0.93 1.07	0.89 1.12	1.64 0.61	>290
6	1997. 3/17 18:24:39.94	N=41.8510° E=142.2070°	176.1	71.0	5.4	0.99	0.83 1.59	0.78 1.29	0.73 1.37	192
7	1997.10/ 3 13:46:24.24	N=42.4221° E=144.8792°	228.9	47.9	5.8	0.10	1.59 0.63	1.64 0.61	2.70 0.37	220
8	1997.10/ 9 6:20:51.14	N=41.7504° E=145.3213°	305.2	81.1	6.0	0.00	3.13 0.32	3.45 0.29	3.70 0.27	>290
9	1997.10/ 9 12:28:19.66	N=41.8368° E=145.1063°	285.7	75.8	5.6	0.00	1.52 0.66	3.45 0.29	1.64 0.61	>290
10	1997.10/ 9 13:01:11.64	N=41.8318° E=145.1608°	285.0	78.5	5.4	0.00	3.13 0.32	3.13 0.32	2.27 0.44	>290
11	1997.10/12 4:40:00.44	N=41.8829° E=145.1590°	283.7	70.8	5.6	0.00	2.27 0.44	3.13 0.32	1.64 0.61	231
12	1997.11/15 16:06:36.36	N=43.30° E=145.60°	307.2	150.0	6.0	0.39	2.94 0.34	1.47 0.68	2.94 0.34	>290
13	1997.12/23 1:34:05.36	N=40.0999° E=142.5245°	345.7	71.1	5.9	0.00	2.04 0.49	3.13 0.32	2.27 0.44	>290
14	1997.12/23 4:09:08.16	N=42.9800° E=143.5073°	108.3	128.8	5.9	0.10	1.32 0.76	1.28 0.78	1.64 0.61	188
15	1998. 1/31 0:51:28.86	N=41.4213° E=142.1156°	213.9	70.5	5.6	0.78	0.70 1.42	0.83 1.07	2.70 0.37	253
16	1998. 2/11 11:26:51.56	N=41.8826° E=142.4857°	157.2	71.6	5.8	0.39	1.23 0.81	2.17 0.46	2.38 0.42	204
17	1998. 9/03 16:58:55.04	N=39.8° E=141.0°	378.3	0.0	6.0	0.00	3.70 0.27	3.70 0.27	3.13 0.32	>290

以上のように震源情報が明らかで波形解析が可能な17の地震記録について観測順にその性質を調べることにする。表－1にはこれらの地震の観測年月日時刻、震央位置(緯度、経度)、震央距離、震源深さ、マグニチュード、計測震度階(JMA震度)、フーリエスペクトル解析から求めた卓越周期と卓越周波数そして継続時間が示されている。図－1でも分かるように17個の地震の内訳は北海道内陸に3個(中富良野、帯広、根室)、北海道南西沖に1個、浦河沖に5個、釧路沖に5個、岩手県沖に1個そして東北内陸に2個(宮城県北部、岩手県北部)となっている。マグニチュードは3.3から6.5まで、計測震度は0.00から1.46までの範囲になっている。震源深さも地表から150kmまでと開いている。

4. 地震波の周期分析および主軸解析

以上の地震の中には被害をとまうものもあるがほとんどは中規模の地震であった。観測地点における地震動の特性を



図－3 地震記録(速度波形および加速度波形)

調べるために、まず表－１中の記録番号 No15の浦河沖に震源を有する地震を例に取り解析手順を説明することにする。

図－３は記録波形である。上から３成分づつNS、EW、UDでそれぞれ速度（＋204.8 kine）、加速度（＋2048gal）、速度（5.12kine）の波形である。それぞれの記録の振幅が小さいため、ここでは下のフルスケール5.12kineの速度波３成分を解析することにする。

4.1 地震波のフーリエスペクトル解析

そして図－４には主要動のフーリエスペクトル図を示した。スペクトル解析には高速フーリエ変換を使用しているため、２の累乗のデジタルデータ数になっている。図は上から、NS、EW、UD成分で、観測開始時刻、SI値、計測震度、最大水平動に対する上下動の比がそれぞれ加速度、速度、変位について表示されている。主要動部4096個のデジタルデータ入力によるものであり、卓越周期と最大フーリエ振幅が表示されている。卓越周波数（あるいは卓越周期）は1.42Hz(0.70 sec)、1.07Hz(0.93sec)、0.37Hz(2.70sec)である。各地震について成分ごとに周波数分析した結果が表－１に示してある。

4.2 全記録の地震動周期特性

すべての地震について成分ごとにスペクトル解析した結果は表－１に示すとおりである。

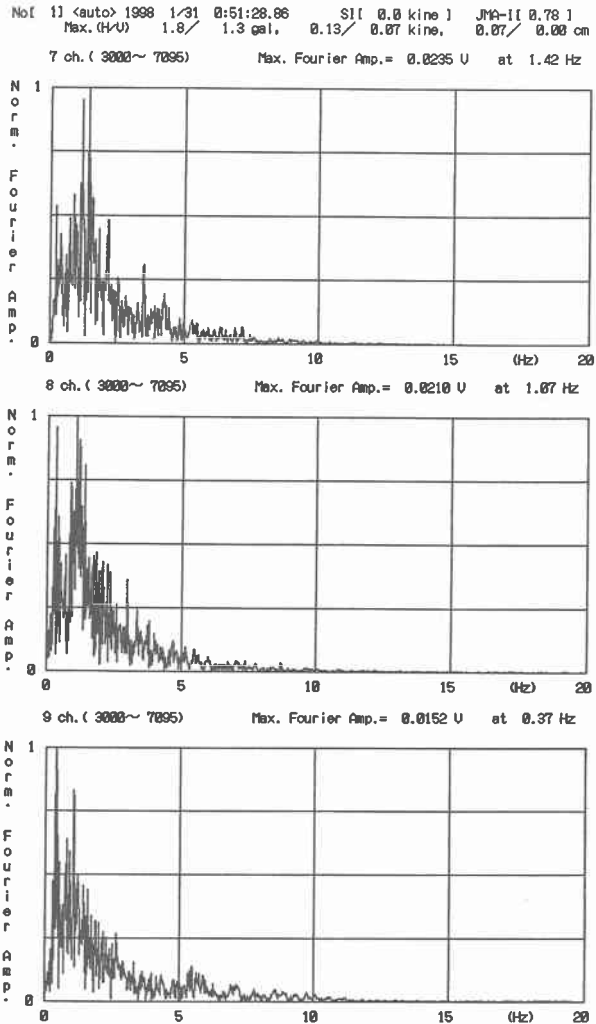
この表から、

- (１) 同一観測地点での地震動の水平動の卓越周期は0.29secから4.17secまでの範囲に入っていることがわかる。
 - (２) 地震動は震源距離の大きい地震ほど長周期を示す。
 - (３) 地震動は規模（マグニチュード）の大きい地震ほど長周期を示す。
- ということが言える。

4.3 地震波のポーラリゼーション解析

つぎに、地震波の振幅特性について検討してみるとほとんどの地震において、地震波の最大振幅はNS成分がEW成分より大きく記録されている。したがって各地震に対して地震動の最大主軸の方向を分析する必要が生じてきた。

そして、速度波３成分のポーラリゼーション解析^{3)、4)}による地震動の主軸方向を求めることにする。解析手法については文献３)などで十分発表済みであるため、ここでは省略する。



図－４ フーリエスペクトル図（地震 No15、NS）

図-5は上からそれぞれ時間領域における入射角、方位角およびパワー（最大主軸・実線、中間主軸・点線、最小主軸・破線の時間変化）である。入射角の座標は 0° から 90° までで、 0° は鉛直入射で上下振動を、 90° は水平入射で水平振動を意味している。また、方位角の座標は中央NS方位（ 0° ）から上下へEW方位（ $+90^{\circ}$ ）までを表し、方位の時間変化を示している。水平に引かれた点線は観測地点から震央をみた方位を示している。この地震による観測地点の地震動の最大主軸変化の最大値は方位角の時間変化図に横線引いたところで $N27.4^{\circ}E$ であった。

これは地震の震央から観測地点に向かう方位（点線）と 21.2° 異なるものである。

4.4 地震動の振幅特性

表-1に示す計17個の地震の速度記録から、水平NS成分と水平EW成分の最大振幅に着目して、各地震動の振幅特性を調べてみる。

表-2には各地震の速度記録のデジタルデータの中から最大の振幅値（Vmax）を選んで示してある。+は各成分のN、E、Uの方向で-はS、W、Dの方向を意味している。最大値はいずれも地震波の主要動部にあり、この主要動部の卓越周期をあわせて載せている。この最大振幅値をよくみるとほとんどの地震においてNS成分がEW成分より大きな値を示している。しかも、水平動の場合+-の符号から最大振幅を示す方位を4方位ぐらいの粗さで推測することができる。

一方、3成分波形から地震動のポーラリゼーション解析を行い、厳密に最大主軸、中間主軸、最小主軸の成分を求めてみた。ここでは特に最大主軸の方位に着目し、+-の向きを考慮して、地震動の方向性を調べることにする。

4.5 地震動の方向性

ポーラリゼーション解析では各主軸の方位が計算上は精度よく求まってくるが、使用するウィンドウ関数の幅やスキップの時間の違いによって幾分値が変わってしまう。

このことを考慮して、地震動の主軸の中から、最大主軸の水平方位を16方位（1方向角が 22.5° ）に表して整理することにする。このようにして求めた最大主軸の方位を表-2に示した。

また、表-2には観測地点から震央に向かった方位についても図-1の震央分布図を利用して求め、震央方位として示した。表から、最大主軸方位と震央方位を比較してみると、たとえ向きを考慮したとしても完全に一致するものはない。むしろ、最大主軸方位にはSSWの方位がよく見られる。

4.6 最大主軸の方位図

ところでこの観測地点は傾斜地であることはすでに報告してあるが、その勾配はESEに登り、WNWに下っている。すなわち、斜面に平行にSSWあるいはNNEの方位があることになり、最大主軸の方位

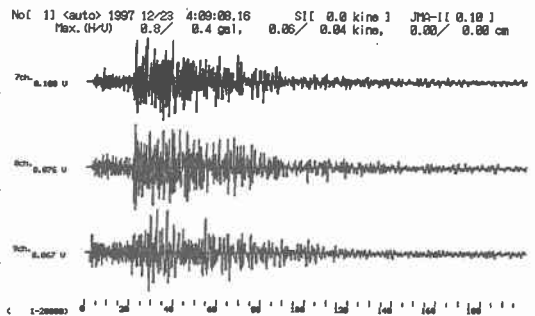
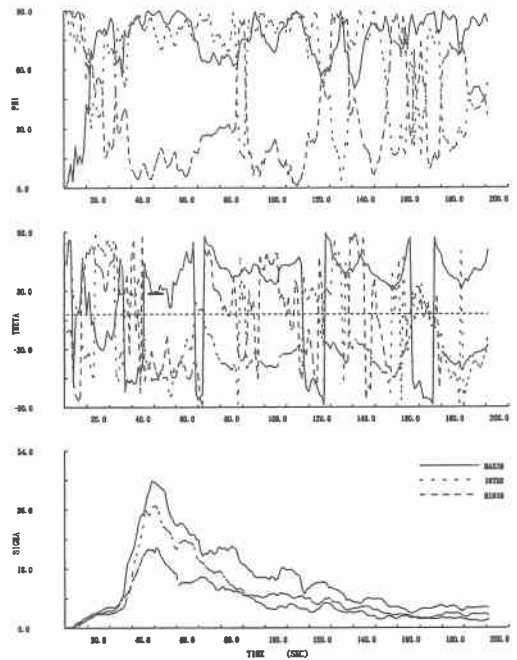
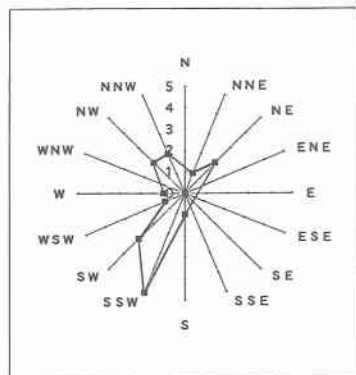


図-5 解析された速度記録と主軸の時間変化図



図－6 最大主軸方位図

は傾斜地の勾配に直角な方向に卓越していることを示している。17個の地震を見るかぎり観測地点における地震動には明確な方向性が見られると言うことである。

そこで、1地震の最大主軸方位を1個の方位として、各地震それぞれの方位を16方位図にプロットしてみると図－6のように表すことができる。図－6を見るとSSW方向に最大主軸方位を持つ地震が多いことを示している。

5. あとがき

全体として、次のような結果が得られたのでここに報告する。

- 1 専修大学北海道短期大学の構内に設置した強震計による地震観測が軌道に乗った。
- 2 北海道とその周辺に震源を有する中小地震をほぼ2ヶ月に1個の割合で記録した。
- 3 ここで観測された17個の中小地震をみるかぎりにおいて
 - (1) 地震の規模が小さいほどそして近い地震ほど地震動は短周期が卓越する。
 - (2) 近い震源域の地震同士をみると最大主軸方位と震央方位についてはそれぞれ共通している。
 - (3) 最大主軸方位と震央方位はほとんど一致しない。
 - (4) 最大主軸方位は傾斜地形の勾配方向に直角な方向を示すことが多い。

ただし、地震動の方向性として傾斜地形の影響をうけるかどうかについてはデータ数が少ないため断言することはできない。地震の発生機構や地震波の伝播経路の解明とともにこれからの課題として残る。それについてはこれからのデータの蓄積が解決してくれることを希望して研究報告を終了する。

なお、この研究を遂行するにあたり開発土木研究所構造研究室佐藤 昌志室長はじめ研究室の皆さんに地震動の主軸解析において協力していただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

6. 参考文献

- 1) 笠原 稔：道内の内陸部をプレート境界が走る，道新トゥデー，2月号，pp.42-43，1998.
- 2) 金子 孝吉：傾斜地における強震観測システム，専修大学北海道短期大学紀要，第30号，pp.115-121，1997.
- 3) 金子 孝吉・三上 敬司：強震記録のポーラリゼーション解析，構造工学論文集，Vol.35A，pp.643-650，1989.
- 4) T.Kaneko・T.Hayashikawa：Directional Behavior of Strong Ground Motions during the Loma Prieta Earthquake, Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, pp.605-610, 1992.

表－2 地震動の最大速度振幅と最大主軸方位

No	観測年月日	NS		EW		UD		最大 主軸 方位	震央 方位
		T sec	Vmax kine	T sec	Vmax kine	T sec	Vmax kine		
1	1996. 8/11	2.27	+0.078	3.45	+0.097	2.27	-0.072	NE	S
2	1996. 8/16	0.54	-0.183	0.29	+0.114	0.35	-0.110	SSW	ENE
3	1997. 2/20	3.70	+0.485	4.17	-0.461	2.27	-0.270	NW	SE
4	1997. 2/27	0.67	-0.136	0.72	+0.108	0.53	+0.072	SSW	SSE
5	1997. 2/28	0.93	-0.145	0.89	-0.222	1.64	+0.095	WSW	WSW
6	1997. 3/17	0.63	-0.204	0.78	+0.172	0.73	-0.111	SW	SSE
7	1997. 10/03	1.59	+0.112	1.64	-0.088	2.70	-0.093	NW	ESE
8	1997. 10/09	3.13	-0.278	3.45	+0.257	3.70	+0.176	SW	ESE
9	1997. 10/09	1.52	+0.088	3.45	+0.092	1.64	+0.092	NNE	ESE
10	1997. 10/09	3.13	-0.078	3.13	+0.074	2.27	+0.075	SSW	ESE
11	1997. 10/12	2.27	+0.080	3.13	-0.110	1.64	+0.068	W	ESE
12	1997. 11/15	2.84	+0.434	1.47	-0.378	2.94	+0.123	NNW	E
13	1997. 12/23	2.04	-0.087	3.13	-0.083	2.27	-0.048	SSW	SSE
14	1997. 12/23	1.32	+0.100	1.28	+0.078	1.64	+0.067	NNW	E
15	1998. 1/31	0.70	-0.237	0.93	-0.212	2.70	-0.140	SSW	S
16	1998. 2/11	1.23	-0.112	2.17	-0.108	2.38	+0.078	SW	SSE
17	1997. 9/03	3.70	+0.107	3.70	-0.103	3.13	-0.051	NE	S