

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	1948年福井地震における震源近傍での地震動強さに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	野畑有秀
Author(English)	
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第4775号, 授与年月日:2001年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:翠川 三郎
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第4775号, Conferred date:2001/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

1948年福井地震における震源近傍での
地震動強さに関する研究

2001年3月

東京工業大学大学院総合理工学研究科
人間環境システム専攻

野 畑 有 秀

1948年福井地震における震源近傍での地震動強さに関する研究

概要

本論文は、「1948年福井地震における震源近傍での地震動強さに関する研究」と題し、以下の5章より構成されている。

1章「序論」では、本研究の背景として、震源近傍の地震動強さの評価のためには、過去に発生した地震における震源近傍での地震動強さを明らかにすること、特にその面的な分布を推定することの重要性について述べるとともに、本論文で1948年福井地震を対象とした理由を述べている。次に、震源近傍での地震動強さに関する既往の研究を概観し、過去の被害地震の震源近傍での地震動強さの評価が墓石転倒により推定される合震度に殆ど限られていること、また、過去の被害地震における強震動シミュレーションを用いた評価例では、結果を照査するためのデータが乏しく、結果の妥当性についての議論が難しいことを述べている。また、震源近傍の強震記録の解析については、観測記録の数が限られており、震源域での評価をするための情報量が未だ少ないこと等を指摘している。

2章「福井地震における構造物被害分布の特徴」では、最初に、木造家屋の被害について着目している。部落毎の木造家屋の被害分布図は、多数存在し各々異なっている。それらの基となった被害統計資料を整理し、差の原因を分析することで、より信頼できる木造家屋の被害分布図を作成している。次に、土木構造物である軌道・橋梁等の被害分布について着目し、福井平野内においても場所によって被害のパターンが異なること、その被害パターンが地震動の主軸方向に起因している可能性があることを指摘している。さらに、被害パターンから推定される地震動の主軸方向が家屋や煙突、墓石等の転倒・傾斜方向と対応が良いことを示している。

3章「福井地震の地震動強さ」では、最初に、墓石の転倒や構造物被害から定量的に各地点での地震動強さの推定を行っている。地震動強さの指標としては、従来推定されてきた合震度のみならず、構造物の被害とも関係の深い最大速度にも着目し、転倒現象より最大地動速度を推定する方法を提案している。それらの検討を行い、福井平野内における地震動の強さの把握を行っている。次に、木造家屋の全壊率と前述した被害から推定した地震動強さの関係についての検討を行い、福井地震における木造家屋の被害関数を作成している。この被害関数と2章で示した被害分布に基づいて、福井地震における震源近傍での地震動強さの面的な分布特性を示している。その結果、最大地動速度は、福井平野の大部分の地域で120cm/s以上であり、部分的には200cm/sを越えていたことを示している。最後に、3次元差分法と統計的波形合成法を組合わせたハイブリッド法に基づいて、強震動シミュレーションを行っている。シミュレーション結果を被害から推定した地震動強さと比較・検証した上で、震源近傍での時刻歴波形を推定し、そのスペクトル

特性も含めて地震動特性を示している。また、その計算結果を基に、震源近傍での地震動特性に与える震源や地盤の影響についての検討を行っている。

4章「福井地震の地震動強さと近年の強震記録から評価した震源近傍での地震動の特性」では、最初に、近年観測された26地震、98地点の震源近傍における強震記録を整理・分析することにより、最大加速度、最大速度、上下動水平動振幅比、継続時間およびスペクトル特性の上限値や平均的特性を示している。次に、推定された福井地震における震源近傍での地震動特性も併せて、マグニチュード7級の地震における震源近傍の地震動特性についての検討を行っている。福井地震における最大の地震動強さは、最大地動速度で200cm/s程度と推定されること、また、その応答スペクトル振幅は1995年兵庫県南部地震の被害激甚地域で観測された記録と同程度ないしそれをやや上回ることを示し、同規模の地震で今まで観測された値の中では最大級の振幅であることを指摘している。このように振幅の大きくなる要因として、福井平野を覆う堆積層ならびに軟弱な表層地盤の影響が大きいことを示している。

5章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

以上を要するに、本論文は、1948年福井地震を対象として、被害資料を基に震源近傍での地震動強さの面的な分布を推定し、さらに強震動シミュレーションからそのスペクトル特性等も推定するとともに、近年の地震で観測された強震記録と併せて検討を行うことにより、震源近傍での地震動の特性をより明らかにしたものである。

目 次

第1章 序 論	1
1.1 本研究の背景と目的	1
1.2 既往の研究の概要	4
1.2.1 被害から推定される震源近傍での地震動強さ	4
1.2.2 強震記録から評価される震源近傍での地震動強さ	6
1.2.3 強震動予測手法に基づく震源近傍での地震動強さ	7
1.3 本論文の構成	9
第2章 福井地震における構造物被害分布の特徴	11
2.1 木造家屋の被害分布	12
2.1.1 各資料における被害統計の特徴	12
(1) 全壊率分布図	12
(2) 部落別統計資料	13
2.1.2 被害統計資料間における全壊率の相違の要因	18
(1) 総数の相違	18
(2) 全壊数の差	19
2.1.3 福井地震における木造家屋全壊率	24
(1) 福井市内における全壊率	24
(2) 木造家屋の構造による差	24
(3) 部落別全壊率の修正	25
2.2 軌道・橋梁等の被害分布	30
2.2.1 表層地盤と液状化の分布	30
(1) 表層地盤	30
(2) 液状化の分布	31
2.2.2 軌道・橋梁等の被害	33
(1) 軌道の被害	33
(2) 橋梁等の被害	34
(3) 道路の被害	36
(4) 被害分布の特徴	37
第3章 福井地震の地震動強さ	51
3.1 被害から推定される地震動強さの定量的評価	52
3.1.1 被害報告に記載される福井地震の地震動強さの整理	52
3.1.2 墓石・石碑等単体の転倒から推定される地震動強さ	59
(1) 単体の転倒から推定される地動最大速度	60
(2) 最大速度の推定法	61
(3) 福井地震における単体から推定される最大速度	62

3.1.3 建造物の滑りから推定される地震動強さ	66
(1) 橋桁の滑り	66
(2) 家屋の滑り	66
3.1.4 考察	69
3.2 木造家屋全壊率と地震動強さに基づいた福井平野における地震動強さ分布	72
3.2.1 木造家屋全壊率と地震動強さの関係	72
(1) 合震度（墓石転倒震度）との関係	72
(2) 最大速度との関係	73
3.2.2 地震動強さ分布の特徴	74
3.3 福井地震の強震動シミュレーション	79
3.3.1 シミュレーション手法の概要	79
3.3.2 各パラメータの設定	81
(1) 断層モデルの設定	81
(2) 地盤モデルの設定	84
3.3.3 シミュレーション結果	96
(1) 計算条件	96
(2) シミュレーション結果	97
3.3.4 地盤の影響	120
第4章 福井地震における地震動強さと近年の強震記録から評価した震源近傍での地震動の特性	123
4.1 強震記録に基づく震源近傍での地震動強さ	124
4.1.1 震源近傍での強震記録のデータベース	124
4.1.2 震源近傍での地震動強さ	129
(1) 計測震度	129
(2) 最大加速度	129
(3) 最大速度	129
(4) 上下動強さと水平動強さの関係	130
(5) 継続時間	130
4.1.3 応答スペクトル特性	137
(1) スペクトル形状	137
(2) 卓越周期とその振幅	137
4.1.4 まとめ	138
4.2 福井地震の地震動強さと強震記録より評価される地震動強さ	145
第5章 結 論	153
参考文献	155
付録	

第1章 序 論

1.1 本研究の背景と目的

阪神地域を襲った1995年兵庫県南部地震は、その前年に起きた1994年Northridge地震と相俟って、我々に、内陸で発生する都市直下地震の脅威を改めて見せ付けた。これらの地震を契機に、震源近傍での地震動評価が社会的にも重要な課題となり、強震観測網の全国展開、自治体における活断層調査等、地震研究に関わる基盤整備が行われ始めた。同時に、構造物の設計用入力地震動においても、如何に震源近傍地震動の評価を取り込むかの検討や、自治体における地震被害想定シナリオの中に如何に兵庫県南部地震の経験を盛り込むかの検討がなされてきている。これらの検討において、最もその基本となるものが震源近傍における地震動強さの評価である。

震源近傍での地震動強さを知るためには、まず、その地震における地震動強さの面的な分布の評価が重要な課題である。この課題に答える最も直接的なデータは、強震記録そのものである。しかしながら、強震記録は点の情報でしかなく、強震観測網が整った現在でも面的な地震動強さの分布を推定するには必ずしも十分ではない。従って、現在、面的な分布を推定するためには、次の3通りの方法がよく用いられている。①実際に震源近傍で得られた強震記録の統計処理を行い、経験的なモデルを作成し、震源近傍での地震動強さ分布を再評価する方法。②1994年Northridge地震以降、最も頻繁に用いられている手法として、強震記録に基づき、ある地盤構造のもと、震源過程を推定し、その震源過程を用いて、逆に震源近傍での地震動評価を行う方法。③被害分布より、地震動強さを推定する方法である。①②の方法は、点在する強震観測記録を基に、経験的、理論的なモデルをもとに面的な補間を行い、被害分布との適合性をもって評価する方法であり、③は間接的ではあるが、構造物が存在する場所においては、面的な地震動強さの推定が可能である。

次に重要なのが、地震及び地域における多様性の有無の確認である。この課題に答えるためには、数多くの地震における震源近傍での地震動強さについての情報が必要である。米国においては、比較的多くの内陸地震が発生し、強震記録も得られている。一方、日本における都市直下の被害地震は、1995年兵庫県南部地震以前は、1948年福井地震まで溯る。この事実を考えると、過去の被害地震の地震動強さの情報を如何に今日に活かすかが、重要な課題であると考えられる。

過去の地震における地震動強さの情報量は、近年の地震に比べ、遥かに乏しい。近年では、兵庫県南部地震での検討されたように、強震記録を含め、理論的な手法を始め多岐にわたる多数の手法に基づいた地震動の強さの分析結果が残されている。一方、甚大な被害を伴った過去の地震は、被害報告のみが地震動強さを知る手がかりとなるといっても過言ではない。幸いにも、明治

以降の被害地震については、比較的詳細な調査報告が現存している。

日本において、死者 1000 人以上を出した過去の内陸浅発地震を図 1.1 に示す。その中でも、1948 年 6 月 28 日 16 時 13 分福井地方を襲ったマグニチュード 7.1 の福井地震は、気象庁震度Ⅶ制定の契機となった地震であり、都市直下地震を考える時、避けては通れない地震である。当時の日本は、終戦後、近代化に向かう最中で、建造物もそれ以前の地震に比べ、鉄道、橋梁等、より現在に近い構造を有しているものと考えられる。さらには、この地震における震度Ⅶの領域は福井平野上という軟弱層に覆われた堆積平野内で発生しており、地盤特性が地震動に及ぼす影響もかなり含まれているものと考えられる。また、被害についても「その後兵庫県南部地震を含めて現在まで地震工学の分野で新しく議論されたかに見える諸問題のほとんどすべての問題が震害として現れていた地震であった」[小林(1996)]といわれるように近代化された現在に比べても劣らず多種多様にわたっている。

1948 年福井地震のような強震記録の無い過去の地震について、震源近傍の地震動強さを推定するためには、図 1.2 に示されるフローに基づくことが重要である。即ち、まず中段のフローに基づき、被害資料により、震源近傍での地震動強さの面的な分布をより正確に推定する必要がある。次に、上段のフローに従って、近年の強震シミュレーション手法を行い、被害から推定された地震動強さ分布に基づき、その妥当性を検証した上で、そのスペクトル等を含めた地震動特性を推定するというフローである。このようにして推定された過去の被害地震における震源近傍での地震動強さを、図 1.2 下段のフローに従って得られる近年の強震記録に基づく震源近傍での地震動強さの評価に活かすことにより、データの乏しい震源近傍の地震動強さをより精度良く評価できるものと考えられる。

以上より、本論文では、1948 年福井地震震源近傍を対象とし、その震源近傍における地震動強さをより正確に推定し、近年観測された強震記録と併せて検討することにより、内陸直下地震における震源近傍での地震動強さを明らかにすることを目的としている。

年月日	地震名	M	全半壊戸数	死者数	負傷者数
1891/10/28	濃尾地震	8	222,501	7,273	17,175
1927/3/7	北丹後地震	7.3	9,745	2,925	7,806
1943/9/10	鳥取地震	7.2	13,643	1,083	3,259
1945/1/13	三河地震	6.8	17,245	1,961	896
1948/6/28	福井地震	7.1	48,000	3,769	22,203
1995/1/15	兵庫県南部地震	7.2	107,610	5,291	26,815

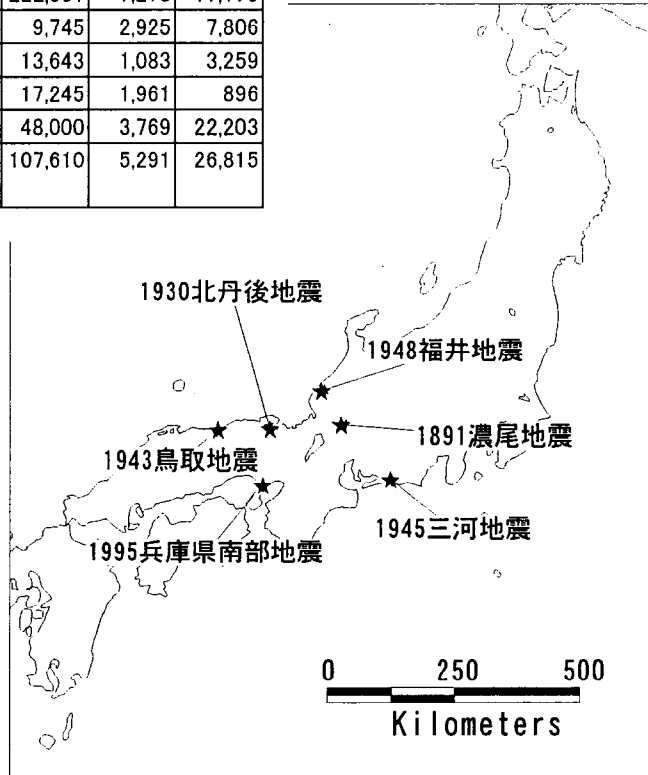


図 1.1 死者 1000 人以上を出した過去の inland 被害地震

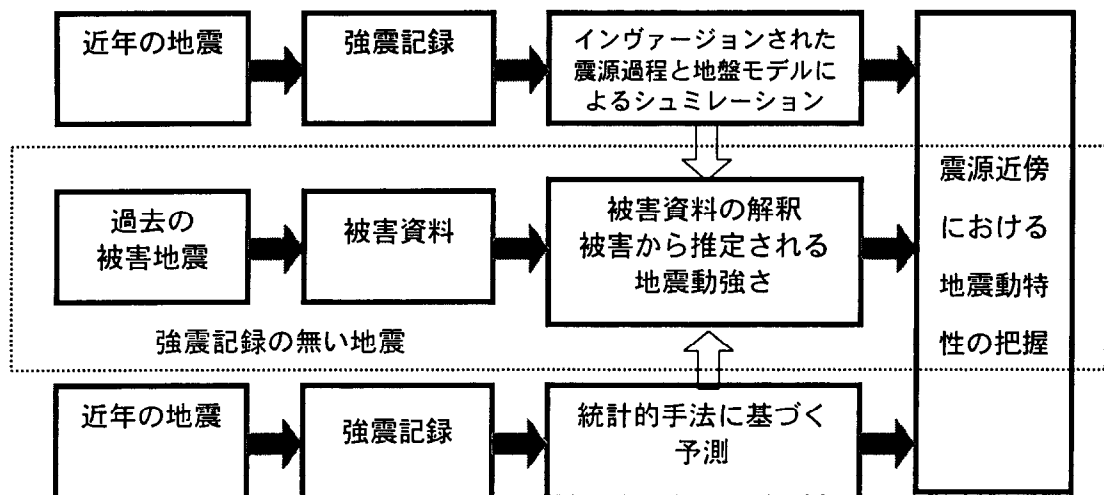


図 1.2 震源近傍における地震動強さの推定方法

1.2 既往の研究の概要

本節では、最震源近傍における地震動強さに関する既往の研究について、「被害」「強震記録」「強震動予測手法」の3項目にわけて各々概観し、夫々の問題点を抽出する。

1.2.1 被害から推定される震源近傍での地震動強さ

震源近傍の地震動強さの評価においては、より直接的な観測事実である強震観測記録そのものを用いることが、最も重要であると考えられる。しかしながら、日本における震源近傍での強震記録は、1995年兵庫県南部地震まではほとんど存在せず、過去の被害地震における墓石転倒震度の被害調査資料を整理することで、震源近傍の地震動強さの評価を行うしか方法はなかった。墓石転倒震度は、転倒した墓石や石碑等の単体と、転倒しなかった単体の幅と高さの比をもって震度を推定するものであり、水平と上下が組み合わさった震度であるとされ、合震度とも呼ばれている[谷口、小林、坂井(1951)]。

岡本(1971)は、これらの墓石転倒震度を基に、明治以降の14地震における震源近傍の最大加速度を上限として $12M^2$ 、下限として $6M^2$ (ここにMはマグニチュード)を推定している。また、この結果より、最大加速度として、岩盤では、両式の平均値、沖積地盤では、上限値をとると仮定して、M7クラスでは、 $440\sim 590\text{cm/s}^2$ 、M8クラスでは、 $580\sim 770\text{cm/s}^2$ になることを指摘している。さらに、最大速度として、岩盤の地盤の卓越周期0.3秒、沖積地盤の卓越周期0.7秒を仮定して、M7クラスでは、 $21\sim 66\text{cm/s}$ 、M8クラスでは、 $27\sim 86\text{cm/s}$ になることも指摘している。また、表・他(1978)は、福井地震、大分県中部地震、宮城県北部地震、伊豆半島東方沖地震において、墓石転倒震度を修正した最大加速度と震源距離の関係を示し、震源域内での最大加速度は、頭打ちになることを示している。

墓石転倒震度による個々の被害地震の地震動強さの調査は、大森(1899)の1891年濃尾地震に始まり、濃尾平野で0.4g以上となることを推定している。その後、1927年北丹後地震では0.44g、1943年鳥取地震では、400gal、500galが推定されている[岡本(1971)]。

1948年福井地震においては、幾つかの報告書に、合震度調査結果が記載されている。

谷口・小林・坂井(1951)は、福井平野の比較的広範囲にわたる20地点を調査し、うち17地点での合震度を推定している。また、各地点での転倒しなかった単体と転倒した単体の合震度の記述とともに、幾つか代表的な単体の形状を示している。その結果、福井平野中央部では0.6ないしそれ以上の墓石転倒震度が、平野北側の丘陵地では0.3前後の合震度が推定されている。

末広・久本・田中(1948)は、福井平野周辺部の現地踏査を行ない、24地点での墓石の幅高さ比を示している。さらに、この比を基に、等震度線をもとめ福井平野と山地のほぼ境界で合震度0.5が推定されている。Kishinoue(1950)は、河角による福井平野東周辺部の墓石転倒調査による29地点での合震度の推定結果と、岸上・池上による30地点での墓石調査結果をまとめて報告している。この結果、合震度が最大で0.5程度であることを示している。

墓石等の単体の転倒は、その単体の形状に応じてある周期が決まり、その周期より短い周期の加速度が入力されても転倒には至らない[Ishiyama(1982)]。従って、これらの調査で得られる墓石転倒震度は、地動最大加速度とは異なり、一種のローパスフィルターを施した最大加速度として考える必要がある。

一方、墓石転倒震度のみならず、様々な被害から、震源近傍での地震動強さを推定する試みもなされている。例えば、1930年北伊豆地震では、大町・他(1995)が魚雷の擦痕より、その地震動強さを推定し、その結果、最大速度として120~170cm/sであることを指摘している。

福井地震においては、谷口・小林・坂井(1951)は、福井市内での残存した木造建築物の壁の亀裂等から変形の状況を判断して最大変形量を推定し、地震動の強さを推定している。すなわち、各建築物の固有周期と減衰定数をモデル化した上で、各建物が当該最大変形となるに必要な地動変位を、その変位周波数応答倍率の逆算より推定している。対象とされた5つの建築物の推定最大変形、固有周期、減衰定数を基に推定された地動変位曲線5本の交点が福井市内の地動変位及び卓越周期であると考え、福井市内で周期0.65~0.7秒、半振幅5~6cmであり、加速度で400~450cm/s²程度であることが推定されている。

G.H.Q.の報告(1949)や福井市(1978)の報告では、橋桁の滑った事例より、震度が推定されている。これは、福井市内の板垣橋であり、柱脚のコンクリートと橋桁のコンクリート間の摩擦係数0.78を仮定して同係数以上の震度が当該地点であったことが推定されている[福井市(1978)]。さらに、G.H.Q.の報告書(1949)によれば、同橋において入射角30度、即ち上下震度を想定した震度であれば、その震度は0.62となることが記載されている。

木造家屋の滑った事例では詳細な記述は無いが、福井市内の木造家屋が基礎上で滑っていることより、基礎の石と木材間の摩擦係数0.65以上の震度であったと推定されている(福井市、1978)。

末広・久本・田中(1949)は、福井市の西に位置する安居村角折での墓石の跳躍現象から速度の推定を行っている。飛ぶ前の墓石の重心位置の高さは125cmであり、落ちた地点での高さが12.5cm、その間の水平距離が、93cmである。これより計算すると、その墓石の初速度は約200cm/sである。

煙突の破壊から推定する方法では、蛭田・鈴木・谷(1951)が煙突の切断面より、破壊に必要な震度を静力学的に評価している。震度推定を行っている煙突の数は15本であり、これらの結果

によれば、福井市内では、必要震度の最大が 0.526 であり、煙突の応答としてこれ以上の震度が必要であったことが推察されている。また春江町では、0.354 が必要震度であることが示されている。さらに煙突から推定された福井市での震度は 0.6 と記載されている報告もある(福井市, 1978)。

このように、幾つかの事例については、墓石転倒震度以外の推定がなされているが、その数は圧倒的に少なく、点での情報しか得られていない。特に、兵庫県南部地震以降、中低層の構造物も破壊指標としては、地動最大速度との相関が良いことが指摘されている(例えば、林・他 1996)が、過去の被害地震における地動最大速度の推定例は殆ど無い。

一方、近年の地震では、藤本・他(1999)が、被害データ、観測データの豊富な 1995 年兵庫県南部地震を対象として、その被害分布から、震度の面的な分布を推定している。

さらに、震度分布に着目した例としては、1995 年兵庫県南部地震を含めて、過去の地震における激震地区の領域に着目した検討例もある。翠川・他(1997)は、震度 6 および 7 の領域に着目し、その発生頻度や発生要因についての検討を行っている。武村・他(1998)は、明治地震以降の内陸被害地震における震度 VII の領域をまとめ直すとともに、震度 VII を発生する要因として、1995 年兵庫県南部地震で得られた知見である①地盤の影響、②エッジ効果の有無、③震源破壊伝播効果の 3 点に着目して、各々、過去の地震でも見られたかどうかの検討を行っている。その結果によれば、平野・盆地直下またはその端部に断層のある場合、震度 VII の領域が、平野や盆地内に大きく広がること、震源近傍での地震動の卓越方向は、断層直交方向になることが多いことを指摘している。また、一つの被害地震に対して、様々な角度から検討を行った例としては、1923 年関東地震についての武村・他の一連の研究がある[武村・他(1994, 1999), 他]。これらは、体験談や、遠距離の地震記録を基に関東地震についての検討や、千葉における詳細な震度分布の検討も行っている。

1.2.2 強震記録より評価される震源近傍での地震動強さ

米国では、1979 年の Imperial Valley 地震を始めとして、震源近傍での強震記録が幾つか観測されている。これらの記録を基に、震源近傍まで、評価可能な距離減衰式が提案されている[例えば Joyner&Boore(1981)]。しかしながら、震源近傍でのデータは回帰する全体のデータに比べ圧倒的に少なく、やや離れた距離からの減衰傾向の評価に重きを置いたデータセットとなっている。また、震源近傍での地震動強さには頭打ちの傾向があるという経験的事実より、距離の項に破壊域の平均的深さを組み込むことや[Joyner&Boore(1981)]、震源の広がり効果を考慮し、マグニチュード依存項を組み込むことにより震源近傍での地震動強さのモデル化を行っている。このよ

うな考え方のひとつに、大野・他(1999)は、短周期領域を評価することに着眼し、断層内の小要素からの寄与を2乗平均の形で表現することにより、等価震源距離の概念を持ち込んだ距離減衰モデルを提案している。このように、震源近傍での地震動に関しては、ある条件の基にモデル化された減衰式により、回帰された評価式での検討が行われている。

さらに、1994年 Northridge 地震、1995年兵庫県南部地震以降、震源近傍の地震動において、断層直交方向に長周期パルスが卓越するという Near Fault Directivity 効果が改めて着目されている。Somerville, et al(1997)は地震動の方位依存性を回帰分析によって定量的に評価している。その結果、平均的なスペクトル特性に比べ、断層直交方向では、周期 0.6 秒から方位依存性が見られ、周期とともに増大し、横ずれ断層に対しては、周期 2 秒で平均振幅より 1.8 倍大きくなることを示している。また、同様な検討が等価震源距離を用いた距離減衰モデルに対しても行われている[大野(1999)]。

一方、震源近傍での限られた強震観測を直接的に用いて、震源近傍で観測された最大加速度や、最大速度の範囲も検討がなされている。福島・他(1991)は、最大加速度について、既往の距離減衰式による震源近傍での平均値を示すとともに、観測記録と比較することで、震源近傍では、200～700gal 程度となることを示している。片岡・他(1993)は、最大速度についてまとめ、40～177cm/s に分布することを示している。特に M6.5 以上では、半数が 100cm/s 以上となることも指摘している。Midorikawa(1995)は、最大加速度の多くが、0.5～1g に分布すること、最大速度の最大が約 85cm/s となることを示している。また、武村・他(1999)は、硬質地盤上で観測された強震動のスペクトルの上限値に関しても、設計的な観点から検討を行っている。

これらの検討も、距離減衰式の構築の際に用いられた観測記録と同様に、その多くが米国カリフォルニアの地震に基づいており、マグニチュードとしては、7クラス迄の記録がほとんどであり、それ以上のクラスの地震動強さを、把握するまでには至っていない。その後、1999年には、台湾集集地震に代表されるように、マグニチュード 7.5 クラスの地震における震源近傍での強震記録が数多く観測されており、比較的マグニチュードレンジの広い範囲での強震記録のデータベースが利用可能となってきた。

1.2.3 強震動予測手法に基づく震源近傍での地震動強さ

震源近傍での強震動を予測する手法は、今日、比較的地震動強さの予測に良く用いられている小林・翠川による手法がある。この方法は、統計的な応答スペクトル予測式に、断層の広がり、移動震源効果を考慮したものである。この手法を用いて、翠川(1980)は、幾つかの地震について最大加速度を計算し、震度分布との整合性を検討している。福井地震における最大加速度の推定

では、700gal以上の地域が、木造家屋全壊率30%以上の地域との対応が良いことを示している。同手法を用いて、小林(1996)は、福井地震の最大加速度および震度を計算し、最大加速度で750gal程度、さらに震度7の領域が木造家屋全壊率30%と概ね対応することを示し、兵庫県南部地震における地震強さとほぼ同程度であることを指摘している。

強震観測記録が得られている場合は、その観測記録を基盤に逆算し、地盤構造の影響を考慮することで、面的な地震動強さの分布を推定する方法がある。例えば、川瀬・他(1996)は、1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の記録を基に、震災の帯における地震動強さを推定している。その結果によれば震災の帯にあたる領域では、概ね150cm/s程度の最大速度であることを示している。

一方、理論的に地震動を推定する手法においては、近年、震源近傍での強震記録が比較的多数観測されるようになり、観測記録を用いた震源インバージョンや、動力学に基づいた理論的考察により、震源過程の解釈およびシミュレーション手法が検討されてきている。このような理論的手法のうち、1995年兵庫県南部地震以降、長周期側が理論地震動、短周期領域を統計的なグリーン関数を用いるいわゆるハイブリッド合成法が着目されている[例えば、入倉・釜江(1999)]。さらに、この手法と、震源インバージョン結果に基づく不均質震源の統計的モデル[Somerville et.al(1999)]を用いて、後述する福井地震や、三河地震の強震動シミュレーション[入江・他(2000)]が行われ、過去の被害地震に適用し、その地震動強さを明らかにしようとする研究が行われ始めている。

福井地震においては、入倉・釜江(1999)により、上記で述べたハイブリッド合成法により、強震動シミュレーションが行われ、平野内の地震動強さとして、約200cm/sの推定値が得られており、概ね、兵庫県南部地震の地震動強さと対応するとされている。しかしながら、震源モデルに関しては、西落ち正断層および東落ちの逆断層の2ケースを行っており、どちらが、被害を良く説明できるかの指摘までにはいたっていない。また、宮武(1999)は、福井地震における構造物の転倒方向を説明できるような震源破壊過程についての考察を行っている。この検討では、震動軸方向と地動速度の卓越方向を議論するのみに留まっており、定量的評価までにはいたっていない。

以上のように、過去の被害地震における強震動シミュレーションにおいては、震源近傍での強震記録等、シミュレーションを照査する信頼すべきデータが少ないことにより、結果の妥当性についての不確実性が残されている。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を図 1.3 に示す。2 章「福井地震における構造物被害分布の特徴」では、最初に、木造家屋の被害についての着目している。部落毎の木造家屋の被害分布図は多数存在し、各々異なっているため、それらの基となった被害統計資料を整理し、差の要因を分析することで、信頼できる木造家屋の被害分布図を作成している。次に、土木構造物である軌道・橋梁等の被害分布について着目し、福井平野内においても場所によって被害のパターンが異なることを指摘している。その被害パターンは、概ね、地動速度の主軸方向に起因していることを述べ、墓石等単体の転倒方向との対応が良いことを示している。

3 章「福井地震の地震動強さ」においては、最初に、単体等の転倒や、構造物被害から定量的に各地点での地震動強さの推定を行っている。地震動強さの指標としては、加速度のみならず、最大速度にも着目し、転倒現象より、地動最大速度を推定する方法を提案している。次に、木造家屋の全壊率と地震動強さの関係についての検討を行い、福井地震における木造家屋の被害関数を作成している。その被害関数により、2 章で示した被害分布を基づいて、福井地震における震源近傍での地震動強さの面的な分布特性を示している。最後に近年の強震動シミュレーション手法に基づいて、強震動シミュレーションを行い、震源近傍でのスペクトルを含めた地震動特性を示すとともに、震源近傍での地震動特性に与える震源や地盤の影響についての検討を行っている。

4 章「福井地震の地震動強さと近年の強震記録から評価した震源近傍での地震動の特性」では、最初に、近年観測された強震記録を整理、分析することにより、震源近傍での地震動特性の統計的な評価を行っている。次に、前章までに推定された福井地震での震源近傍での地震動強さと、これら強震記録に見られる最大地震動強さを併せて検討することで、データの乏しい震源近傍の地震動強さをより明らかにすることを試みている。

5 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括している。

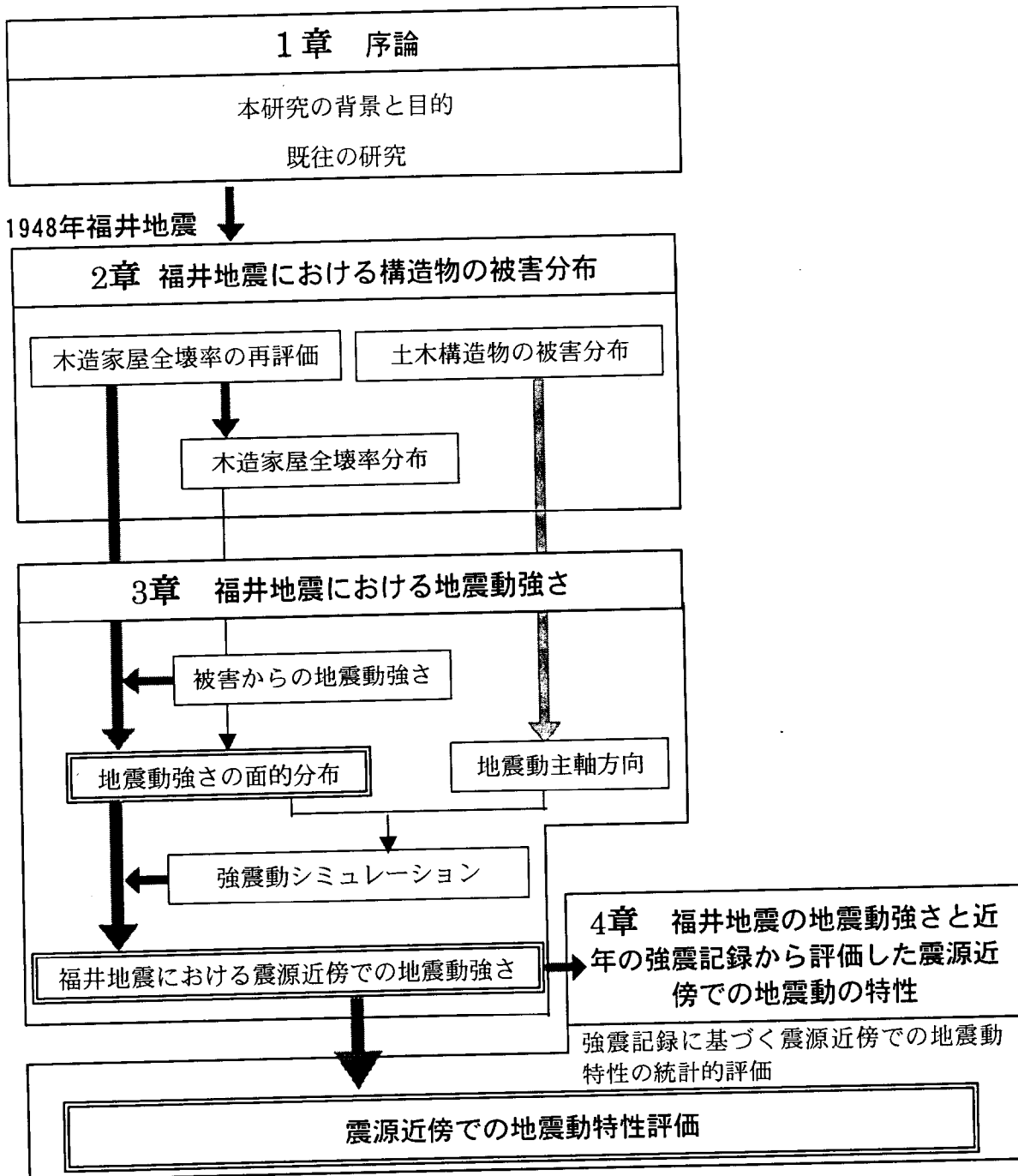


図 1.3 本論文の構成

第2章 福井地震における構造物被害分布の特徴

福井地震当時、木造家屋は、福井県全体で総戸数約 73,000 戸〔河角 1950〕であり、部落の分布は、福井平野内のほぼ全域にわたっている。また、当時の軌道も、国鉄、私鉄合わせて、6 線が福井平野を東西にわたり横断している。これらの構造物の被害分布を精度良く知ることは、福井平野内の地震動強さの面的な分布を知る有力な手がかりとなると考えられる。木造家屋の被害に関しては、比較的多数の被害資料が残されている。しかしながら、その中に記載されている被害分布図は、異なる分布をしており、その基となった被害統計資料も、各々異なっており、どの資料が最も信頼できるものかが明らかにはなっていない。

本章では、福井地震における震源近傍での面的な地震動強さの手がかりを得るために、木造家屋および、土木構造物の被害についての整理を行い、それら構造物被害分布についての見直しを行う。

2.1 木造家屋の被害分布

福井地震では各種被害が調査され、多数の報告がある[例えば、小嶋・他(1999)]。なかでも木造家屋の被害については豊富な資料があり、これらの資料は建物被害と地震動強さの関係や建物被害と人的被害の関係などを検討する上で重要なデータと考えられる。しかし、これら木造家屋の被害資料は複数存在し、それぞれ出典が異なり、数値も異なる。したがって、これらの資料に基づいて描かれた全壊率分布図には相違が認められる。これらの資料の出典には不明の部分もあり、どの資料が最も信頼性が高いものかについては十分な吟味がなされていない。

本節では、福井地震の木造家屋被害資料とその相互の関係を調べ、全壊率分布について再検討を行なった結果について述べる。

2.1.1 各資料における被害統計の特徴

(1) 全壊率分布図

各報告書に記載されている木造家屋の全壊率分布図を同一スケールにて書き直し、図 2.1 に示す。図 2.1(a)が和達(1948)、図 2.1(b)が G.H.Q.(1949)、図 2.1(c)が河角(1949)、図 2.1(d)が高橋(1951)、図 2.1(e)が竹山・他(1951)、図 2.1(f)が谷口・他(1979)による分布図を各々示している。何れの分布図も震度Ⅶを示す全壊率 30%以上の領域は、概ね、福井平野内の沖積地盤に分布する傾向を示している。しかしながら、全壊率の高い領域は、各分布図で違いが見られる。図 2.1(d)と図 2.1(f)では、福井市内を除いてほぼ同じ傾向を示しており、福井平野内全域でほぼ 90%以上の全壊率となっている。図 2.1(c)もほぼ同様な分布図が示されている。図 2.1(e)は、九頭竜川の北側平野中央部で全壊率 80%以上の領域が見られ平野内の多くの地点が 60%以上の分布内に位置している。同様に、九頭竜川の北側平野中央部で全壊率の高い領域があるという傾向を示すのが図 2.1(a)と図 2.1(b)ではあるが、被害の範囲は平野内のみならず、周辺山間部にまで拡大している。また、図 2.1(a)は、全壊率 100%の領域が平野内で南北に別れ、2ヶ所見られる。

これらのうち、一般的には、図 2.1(d)と図 2.1(e)の分布がよく引用されている[宇佐美(1987)]。両者は、同一報告書内での記載ではあるが、被害分布はかなり異なっている。この違いは、前者が総戸数に対する全壊率で、国警および調査委員会資料に基づき、後者は住家のみ全壊率で、資料に十分な吟味を加えてあるためとされている[宇佐美(1987)]。しかしながら、図 2.1(e)が描かれた過程については、用いた資料等不明な点もある。

最初に、福井地震の被害統計資料や、これらの分布図が作成された過程についての検討を行う。

(2) 部落毎被害統計資料

福井地震においては、戦後間もない時期に発生した地震にもかかわらず、多数の震災報告書が存在する。家屋の被害統計は、石川県を含む福井県全体の被害統計、市郡別、町村別、部落別での整理がなされているが、どの地域レベルまでの記載があるかは各報告書毎に異なっている。全体被害総計の各資料毎の比較を行なった服部(1995)によれば、資料により異なる値は示すものの、概ね、全壊家屋数で3万5千戸前後、半壊家屋数で1万1千前後である。市郡別、市町村別の統計は、町村史をはじめ多くの報告書[G.H.Q.(1949), 河角(1949), 高橋(1951), 竹山・他(1951), 末廣・他(1948), 本多・他(1948), 福井県(1949), 福井市(1970,1979), 丸岡町(1972), 坂井町(1973), 三国町(1983), 松岡町(1972), 芦原町(1951), 西藤島村(1971)]に記載されている。これらは、国家警察本部資料、村役場資料、福井県震災対策本部資料など出所が明確なものから、出所の記載の無い資料、他資料を引用したと思われるもの等が混在しており、資料間で総戸数、全壊戸数において異なる数値が報告されている。また、同じ警察調査に基づいていても数値が異なる場合もあり、調査時期の異なる資料の可能性もある。さらには、統計数量についても、世帯数、全戸数、住宅棟数と記されており、各々異なっている。

前述した木造家屋全壊率の各分布図の多くは、部落別被害報告資料を基に作成されている。そこで、本論文では、部落別での被害統計が記載されている報告に着目して検討を行なう。部落別被害が記されている資料を表 2.1 に示す。報告書毎に分けて、中央気象台の報告 (K)、日本学術会議の報告 (S)、北陸震災特別委員会の報告 (B) 及び福井県内の地震誌、及び町村史 (D) の報告がある。K の資料では、調査地域毎に報告者が異なり、3 種の報告[末廣・他(1948), 矢崎・他(1948), 本多・他(1948)]から構成されている。また、B の資料では、報告者が異なる幾つかの統計表が記載されている。各々、高橋(1951)が激震地区部落別被害表(B1)として、竹山・他(1951)が、京都大学の報告(B2)、建築研究所 1 次調査(B3)、建築研究所 2 次調査(B4)の 3 種類の統計表を各々報告している。D の資料では、D1 として福井市(1978)による福井市内の統計表、D2 として、芦原町(1951)の芦原町内における統計表である。以下、表中の記号で資料を記載することとする。

この資料のうち、福井市内を除く部落での被害の記載が整っているのが B1 の資料である。この資料は、福井地震調査委員会の現地調査の結果に基づいたとされており、基本的には S の共同調査隊調査に基づく資料と同じであるが、松岡町等 B1 の方が細かい部落が記載されている。このことより、B1 の資料は、S の資料の補完版であると考えられる。そこで、以降 S の資料は、検討から外した。B2 は、京都大学の調査で村役場・駐在所の資料によっている。B3 は、建築研究所自体が現地にて詳細調査を行った 1 次調査によるものであり、B4 は、村役場資料に基づいた建築研究所 2 次調査によるものである。表 2.1 に示した以外の資料では、部落別の調査では無いが、

福井市，森田町，丸岡町，金津町におけるブロック毎の倒壊率が記載[G.H.Q.(1949)]されている。これは G.H.Q(1949)が，震災前と震災後の航空写真から判別した資料である。

表 2.1 に示される資料に記載されている部落のうち，位置が特定できたものを図 2.2 に示す。同図には当時の村区分も併せて示す。図 2.2(a)が，B1 と D1 に記載されている部落位置であり，福井地震での激震地区のほぼ全域をカバーしていることがわかる。なお，D2 の芦原町内部部落の位置は B1 と共通である。図 2.2(b)の中央気象台の調査(K)は，地震直後現地踏査した地点の村役場資料に基づいており，森田町を除いて，福井平野周縁部の部落に限定される。図 2.2(c)に示される京都大学調査位置 (B2) は，春江町，高椋村，森田町を除く平野内部の部落である。図 2.2(d) は建築研究所調査位置を示す。建築研究所の 1 次調査(B3)は，福井平野周縁部であり，またその個所数も限られる。2 次調査(B4)は福井平野南縁部の部落に限られる。

これらの分布図より，B1 資料が，福井市内を除く激震地区内における殆どの部落について記載されており，最も多数の部落での資料が整理されたものである。ただし，B2 資料には，B1 資料に記載されていない部落が数ヶ所ある。また，福井市内における町部落単位での被害が記載されている資料は，D1 に限られる。

資料間毎の内容の差異を検討するために，整理された部落数が最も多い B1 の資料と各資料間の全壊率の関係を図 2.3 に示す。なお，その際に総数と全壊数が等しくて，全壊率が異なる等の記載誤りと考えられる数値に関しては修正を行っている。

図 2.3(a)は，B1 と K の資料の関係である。本図より，B1 と K は，同じ資料であることがわかる。図 2.3(b)には，B2 の資料と B1 の関係を示す。概ね両者は一致するが，異なる部落もある。異なる部落は，木部村，伊井村，坪江村であり，これらの個所はKの資料とも重複する村である。このことより，B1 の資料は，B2 と K が重複する時には，K の資料を，重複しない時は，各々の資料を用いていることがわかる。なお，B2 の伊井村の被害統計は戸数ではなく，総棟数であることが記されている。図 2.3(c)は，B3 及び B4 と B1 の関係を示すが，一致する部落は少なく，両者は異なる資料であることがわかる。全壊率の関係では，B3 では B1 の方が全壊率を高めに，B4 とでは，B1 の方が全壊率を低めに評価していることがわかる。

以上より，表 1 に示された資料の中で，部落別の被害統計資料としては，B1，B3，B4 と B2 のうちKの資料と重複しない部落，さらには，D1，D2 の資料が異なる内容が記載されている資料であることがわかる。

前述の全壊率分布図の基になった統計資料は，図 2.1 (c)の分布図が S，図 2.1 (d)が B1，図 2.1 (e)が主に B2，B3，B4 に基づいている。図 2.1 (f)については，特に明記されていないが，主に B1 を用いているものと判断される。なお，図 2.1 (b)は，同図が記載された報告書内に市町村別被害表が記載されており，当該市町村別の全壊率を用いたものと判断される。図 2.1 (a)の基とな

った資料は定かでない。

ほぼ同じ資料に基づいて作成された図 2.1 (c)(d)(f)は同じ傾向を示しているが、分布形状は多少異なる。B1に基づく図 2.1 (d), B2, B3 及び B4 に基づく図 2.1 (e)のように、資料が異なる場合は、かなり違った形状を示している。この差の要因は、前述したように住家のみを対象とした場合と、住家のみならず総棟数を対象とした場合の差とされているが、竹山・他(1951)によれば、「母屋のみの全壊率を全棟数に対する倒壊棟数の比と見なしても差支えなくしかも母屋の数は、概ね警察統計にいう住家の数と等しいと見られる」とされている。

また、図 2.1 (e)の分布図の基となった建築研究所による詳細な調査(B3)は、平野周縁部のみ行われ、平野全体の分布を作成するにあたっては、村役場・駐在所の資料(B2,B4)を参考にしている。ただし、B2, B4 の資料のみでは、春江町を含む平野中央部等で調査されていない地域があり、どのように分布図を描いたかが不明である。村役場・駐在所の資料を用いる際、村役場・駐在所の全壊率(B2)と構造学的被害を調査した資料(B3)の全壊率の関係及び、地形の状況を睨んで、村役場・駐在所の資料における全壊率を1～2割低減したとされている[竹山・他(1951)]。ただし、主に平野内部の沖積地盤に位置する B2 の資料の全壊率を一律に低減したのか、ある部落に限って低減したのかは、明記されていない。

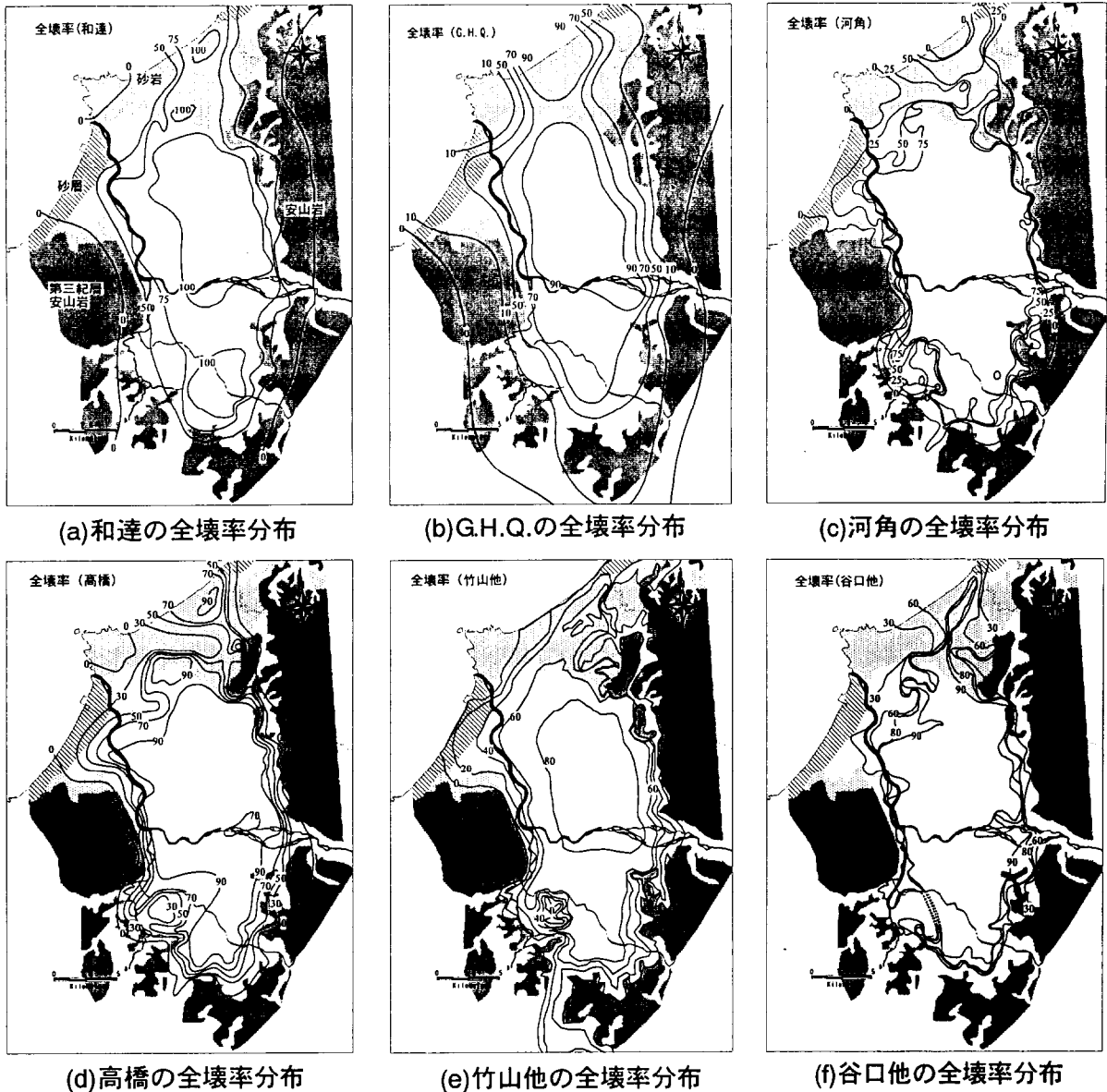
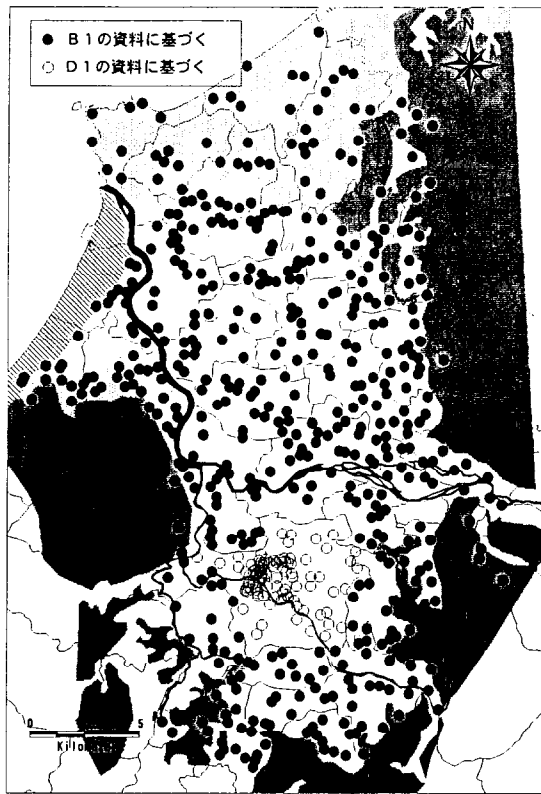


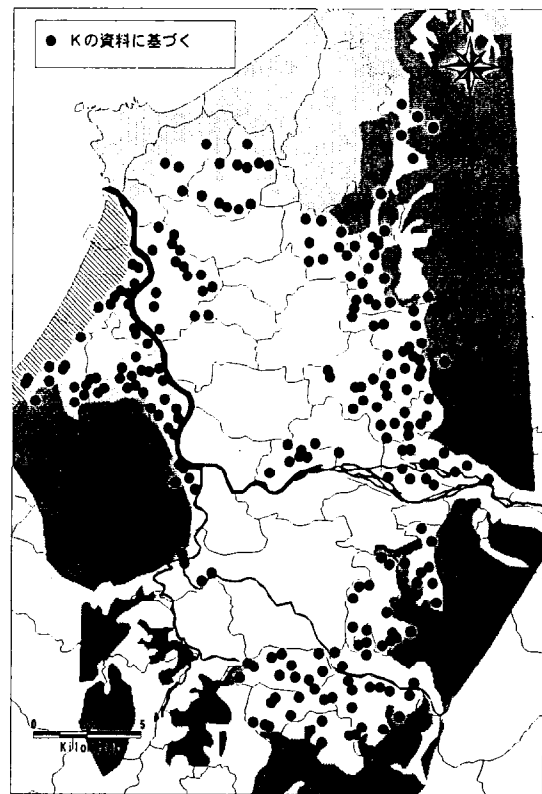
図 2.1 全壊率分布図の相違

表 2.1 部落別全壊率資料

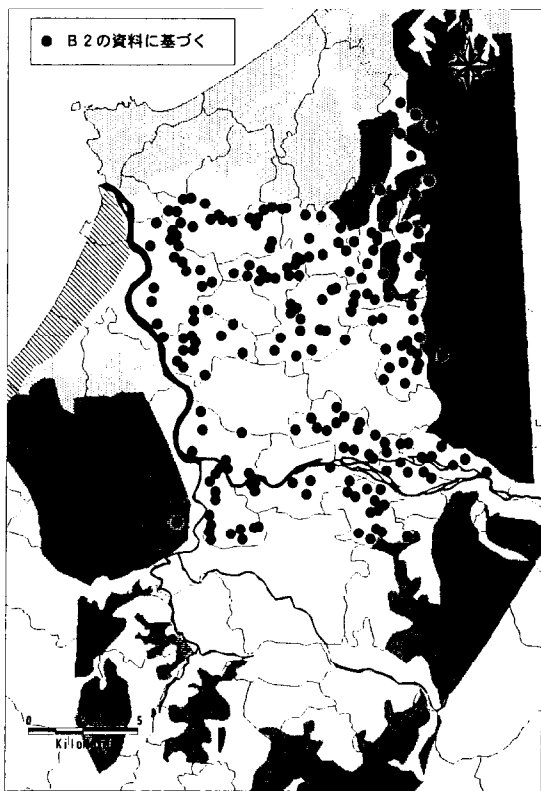
符号	部落別資料	文献	調査	
K	中央气象台			
	福井地震踏査報告(1)	末廣・他(1948)p.22-37	村町役場	
	福井地震踏査報告(2)	矢崎・他(1948)p.37-43	村町役場	
S	福井地震踏査報告(3)	本多・他(1948)p.44-56	村町役場	
	日本学術会議福井地震調査研究特別委員会			
	被害表/表4	河角(1949)p.6-14	共同調査隊	
B	北陸震災調査特別委員会			
	B1	激震地区部落別被害表/表8	高橋(1951)p.11-19	調査班
	B2	京都大学調査(表02.2)	竹山・他(1951)p.34-40	村役場, 駐在
	B3	建研1次調査/表02.3(A)	竹山・他(1951)p.40-46	建研
	B4	建研2次調査/表02.3(B)	竹山・他(1951)p.46-47	村役場
D	村町吏等			
	D1	福井烈震誌/資料	福井市(1978)p.1219-1262	
	D2	農家被害表及び部落毎記述	芦原町(1951)p.7-53	



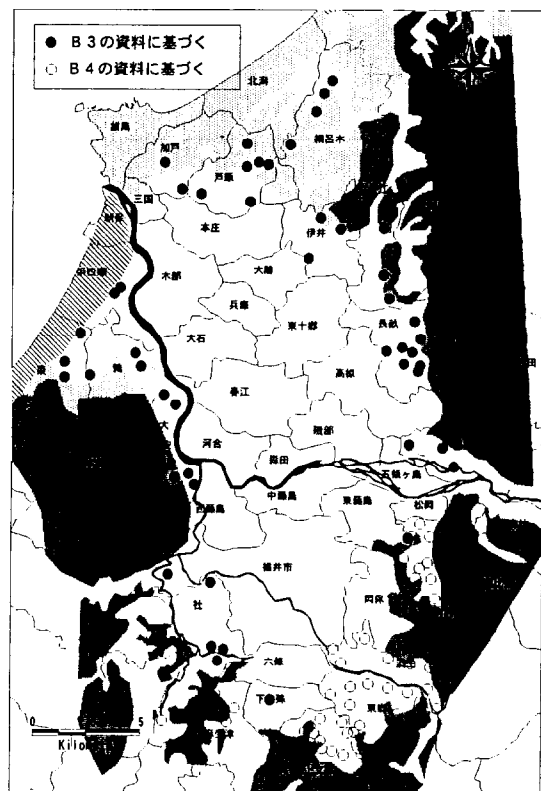
(a) B1 と D1 の調査部落位



(b) K の調査部落位置



(c) B2 の調査部落位置



(d) B3 と B4 の調査部落位

図 2.2 各資料毎の調査部落位置

2.1.2 被害統計資料間における全壊率の相違の要因

前項で示したように、複数の資料で各々全壊率が異なっている。全壊率が異なる理由の主要因として、小林(1998)は、分母となる市町村の総数が世帯数や棟数と異なること、さらには、全壊等の被害の程度を表す指標の定義が統一されていないことを指摘している。本項では、これらについての考察を行なう。

(1) 総数の相違

各資料間で分母となる総数の名称を比較してみる。B1の資料では、総数は全戸数と記載されている。また、その市町村毎小計においては、世帯数が記載されている。また、B2の資料の総戸数は、B1と同じく全戸数とされており、注意書きに伊井村のみが、戸数は棟数を示すとされている。B3の資料は、総戸数は母屋、土蔵、付属屋と区別された棟数であり、B4の資料は住宅棟数と記載されている。また、D1では、総数は世帯数であり、分子となる全壊数も世帯数である。さらにD2では、芦原町内のみの記述ではあるが、農家についてのみ、母屋、作業場、土蔵、蓄舎の区別毎被害棟数が記載されている。

各資料間の総数の比較を図2.4に示す。図2.4(a)にB1とB3の総数の相違を示す。■で示す浜四郷村と大安寺村のみが、大幅に異なる以外は、B1の全戸数は、母屋の棟数とほぼ一致していることがわかる。これは、既に竹山・他(1951)が指摘している通りである。異なる地点の浜四郷村、大安寺村では、B3の資料の付属屋と土蔵を含めた総棟数とほぼ等しいことがわかる。国警資料⁹⁾の村別での全戸数集計値とB1資料の部落別の戸数を総計した値を比較すると、倍程度大きくなる村は前述の浜四郷村、大安寺村と東十郷村の3村である。このことより、このこの3村に関しては、付属屋等を含めた総戸数がB1に記載されているものと考えられる。ただし、竹山・他(1951)の検討によると、総棟数に対する全壊率は、母屋に対する全壊率と整合するとされている。図2.5に土蔵・付属屋を含めた全壊率と母屋のみの全壊率の関係[竹山・他(1951)]を示し直すが、両者は概ね一致している。

前章での検討結果より、B1資料は、KとB2の資料に基づいて記載されており、KとB2が重複する部落ではB1とB2の全壊率が異なっている。図2.4(b)は、KとB2の総数の関係を示したものであるが、前述のように伊井村が総棟数であり、Kに比べて2倍の開きがあるが、残りの重複する村での総数はほぼ等しい。

また、住宅棟数とされているB4資料とB1資料(重複している部落はKに対応)の総数の比較を図2.4(c)に示す。同図には、世帯数と記載されたD1の資料とB1の資料の比較も合わせて示す。住宅棟数とされたB4の資料とB1の全戸数は概ね一致する。D1とB1が重複するのは、東安居

の3部落のみであるが、これの部落では世帯数と全棟数とは一致する。これは、福井市内のような都市部は必ずしも一致しないが、農村における世帯数は、母屋数と等しいという指摘[竹山・他(1951)]と整合している。

以上の検討より、幾つかの村で、非住家を含めた総棟数での記載があるが、B1で示す全戸数と、母屋の総戸数は、概ね一致するものと考えられる。従って、図2.1(d)、(e)に示した全壊率分布の差は、分母を総戸数にしたか住家数にしたかによるものでは無いことが指摘できる。

(2) 全壊数による差

被害判定基準の差をみるため、図2.6に各資料間の全壊数を比較した。今迄の検討により、B1の資料は、KとB2より構成されているため、比較はB4とB3のみとした。ただし、総数の異なる浜四郷村、大安寺村は除外している。B4による全壊数は、概ね一致しているが、一部大きく判定されていることもわかる。一方、図2.6(b)に示されるB3においては、全体的に全壊数を小さく判定していることがわかる。

また、芦原町内でD2とB1およびB3資料の重複する部落の全壊半壊の関係を表2.2示す。3者は、概ね一致するが、布目部落のみが、B3の全壊戸数8に対して、B1が28と大幅に異なる。この部落でのD2の記録は、農家の全壊は9とB3とほぼ等しいが、D2の記述中にある半壊2、大破15の戸数を、B3では半壊に数え、B1では半壊の部分を全壊に含めたものと考えられる。

福井地震当時の被災度判定基準としては、表2.3に示した3つが挙げられる。①は、当時一般的に用いられた指標[福井市(1978)]であり、構造被害よりは、被災額の見積もりや見舞い金の支払いを目的とするものと考えられる。ただし、当時は、他にも倒壊、大破、中破等の区分も用いられたようである[福井市(1978)]。②は、1948年に学術会議で定められたもので、福井地震でも一部用いられた可能性がある[小林：私信(2000)]。③は、建築研究所の詳細調査で用いられた判定基準で、構造被災度の立場にたったものである[竹山・他(1951)]。

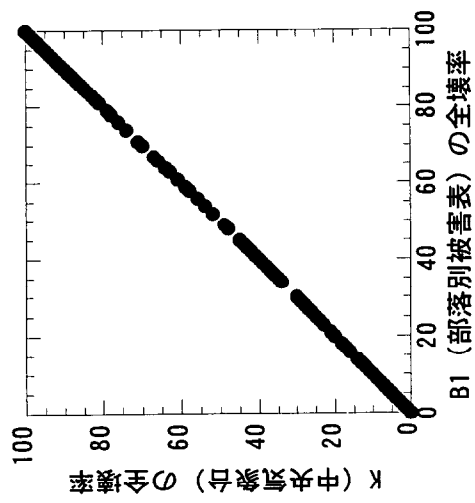
また、②の全壊が、損害率50%以上としているのに対して、③の全壊の定義は、損害率60%以上にあたるとしている[竹山・他(1951)]。さらに、当時一般的であった①に比べても、半壊の定義がかなり異なり、全壊と半壊の境界がかなり厳しい表現となっている。また、①については、「調査は、大部分は町内会の世話人とか部落の区長とかいう人からの報告であり、当時全半壊の差によって配給品や見舞金に差があったので、自然と被害を過大に見積もる傾向があった[福井市(1978)]」とされているように、③の構造被害に比べ、全壊の下限を低く評価していたことが推察される。

建築研究所(B3)の判定基準とB1での判定基準との関係を見るため、両者の全壊率の浜四郷村、大安寺村を除いた比較を図2.7に示す。図中の黒丸は数戸の戸数が全壊率に変動を及ぼさないよ

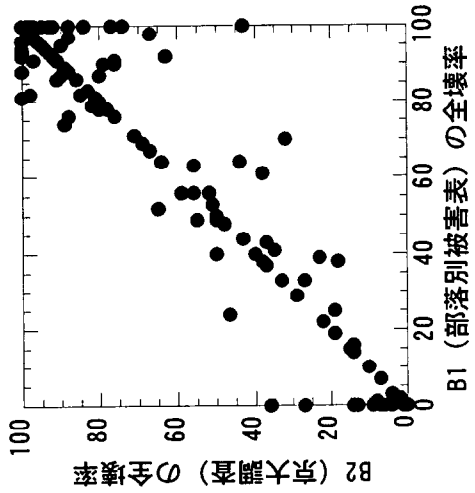
う、全戸数が20戸以上の部落及び、総戸数が1割以上異なる部落以外の地点であるが、バラツキは全体で見た場合と殆ど変わらない。B1の資料が、建築研究所の判定でいう全壊と半壊の一部を考慮した被害であることを考慮すると、本来は、被害関数、即ち異なる平均値と標準偏差を有する正規累積分布関数間の関係に両者はなる。ただし、本論では、後述する補正を考え、単純な2次曲線で両者の関係を回帰した。なお、回帰するにあたり、図中の全点を対象とし、B1の0%はB3の0%に収束するようにした。

$$\text{全壊率}_{B3} = 0.3 \times \text{全壊率}_{B1} + 0.005 \times \text{全壊率}_{B1}^2 \quad (2.1)$$

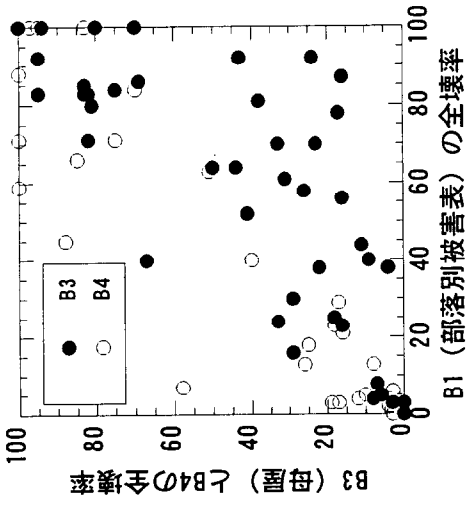
上記の回帰式によるとB1の全壊率100%でB3の全壊率は80%となる。これは、B1資料で全壊率100%とされた森田町や丸岡町において、G.H.Q.の写真による倒壊率(G.H.Q.(1949))が平均で76%、90%と推定されていることと調和的である。



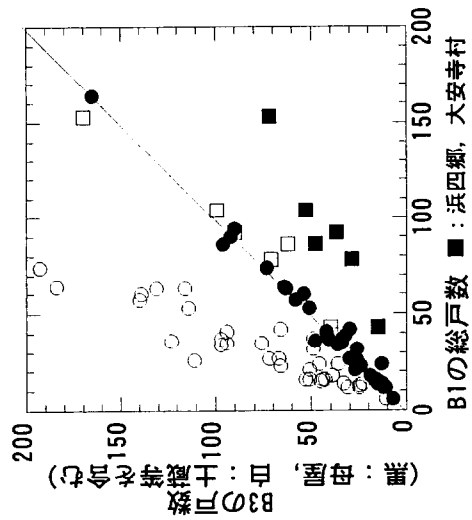
(a) B1 と K の比較



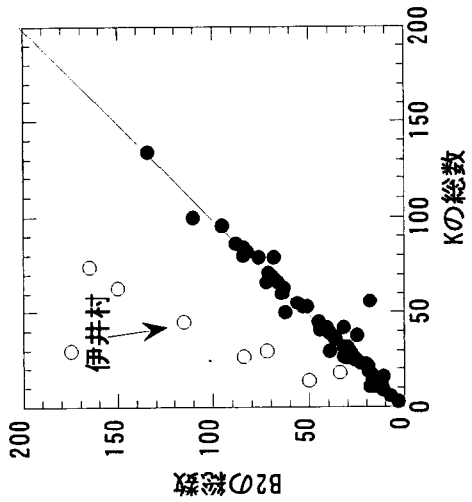
(b) B1 と B2 の比較
各資料間の全壊率の比較



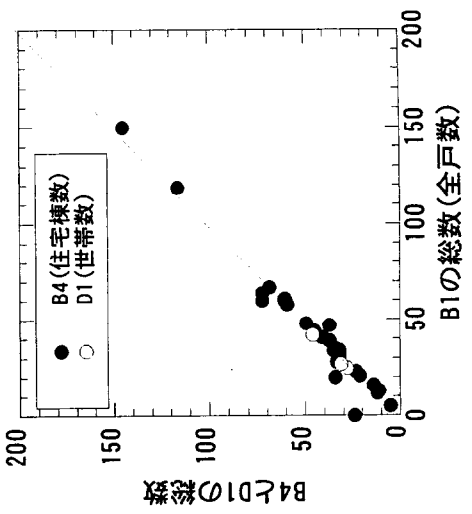
(c) B1 と B3 及び B4 の比較



(a) B1 と B3 の比較



(b) K と B2 の比較
各資料間の総数の比較



(c) B1 と B4 及び D1 の比較

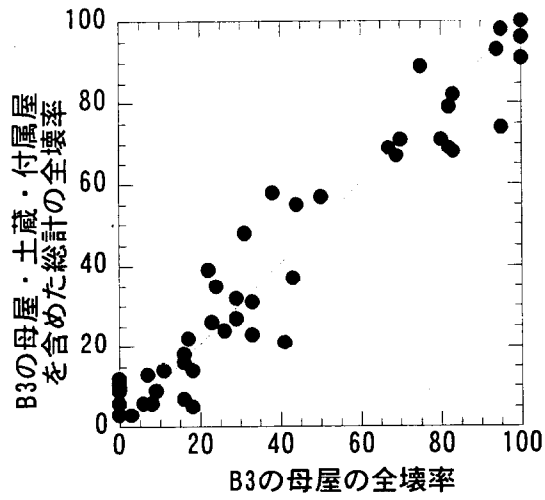


図 2.5 母屋の全壊率と総棟数の全壊率

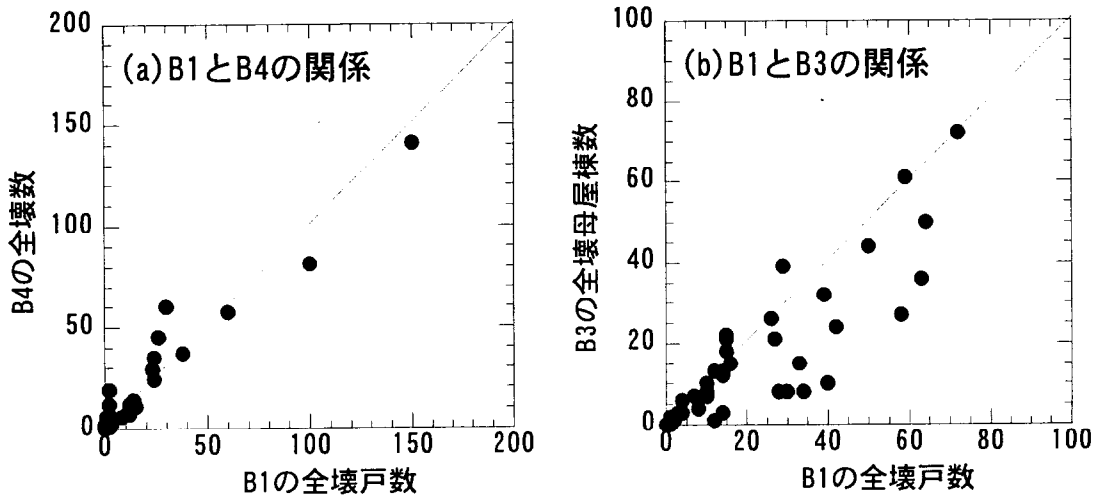


図 2.6 各資料間の全壊戸数の相違

表 2.2 芦原町での比較

部落名	D2			B1			B3						
	農家	全	半	戸数			母屋						
				計	全	半	率	計	全	半	傾	率	
国影	25	0		家屋全滅	26	26	0	100	26	26	0	0	100
横垣	14	0		全戸数17戸とも倒壊	16	16	0	100	16	15	1	0	94
井江霞	46	2	57	戸中, 全壊54(内1戸焼)	64	59	5	92	64	61	2	1	95
重義	28	9	36	戸中, 全壊26, 半壊10	34	29	5	85	36	30	6	0	83
布目	9	31		全壊9, 半壊22, 大破15	36	28	5	78	48	8	37	3	17
牛山	3	15		全壊3, 大破3, 中破35	37	3	2	8	41	3	20	18	7

表 2.3 全壊・半壊の定義

	全壊	半壊
①一般的な指標 (福井市)	家屋としての形態をとどめないもの、破壊激しくて修繕の不可能なるもの、修繕費が再建費より高くつくと思われるもの	一部に手を加えることによって使用可能または修繕可能
②学術会議	大部分倒壊して復旧しにくいもの	一部倒壊し、又は傾斜著しいが大修繕によって復旧しうるもの
③建築研究所	地震時に屋根の一部以上が地についたもの、2階建にありては2階床部分が地に着いたものも之に含む	軸部構造の破壊著しく、小なる補修では到底使用不可能なるもの

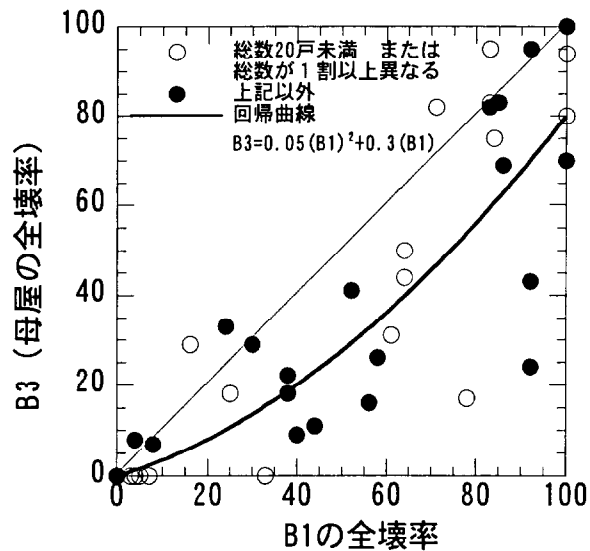


図 2.7 B1 と B3 資料の全壊率

2.1.3 福井地震における木造家屋全壊率

(1) 福井市内における全壊率

福井市内における家屋の被害資料は、市単位の報告が殆どある。例えば、国警調査〔竹山・他(1951)〕では全壊率 79%、福井烈震誌〔福井市(1978)〕では 62.% 等である。従来の全壊率の分布図が示される報告書での福井市内については、市別の統計値のみが記載されるのみで、町部落別での被害統計は明記されては無く、町部落別の詳細な被害統計資料は、D1 による統計表があるのみである。

当資料には町街区の全壊、半壊、焼失、略完全の世帯数が記載されている。世帯単位ではあるが、全壊を焼失を除く総世帯数で除したものを全壊率とし検討を行なった。なお、D1 における福井市内の総世帯数は、20,303 であり、国警〔竹山・他(1951)〕による総戸数、15,525 と約 20% 程度の違いがある。

市街地においては、G.H.Q. が航空写真により、ブロックを決めて倒壊家屋とそうでない家屋の戸数調査を行ない、その倒壊率を算定している〔G.H.Q.(1949)〕。写真で判定したブロックの大きさは、町の大きさと一致しないが、その町の平均的全壊率を表していると仮定して、世帯による全壊率と G.H.Q. の写真から判定した倒壊率の関係を図 2.8 に示す。同図には、B1 と B3 の全壊率の関係からもとめた回帰曲線も併せて示す。写真で倒壊と判定される家屋と、建築研究所の屋根の一部以上が地についたという基準が等基準であることから考えても、本回帰曲線で概ね世帯数での全壊率と写真からの倒壊率の関係を表しているものと考えられる。図 2.9 に当回帰曲線で補正した福井市街地の全壊率分布図を示す。

福井市街地では、大きく分けて県庁より北側では全壊率が 40~60% であり、市街地南東部のはずれと北西部のはずれが全壊率が高く 60% 以上である。ただし、北西部のはずれに位置する乾新町は、写真による倒壊率では 40% 程度である。さらに、県庁と足羽川を挟む地域から足羽川南側と足羽山の麓の地域で全壊率が 0~20% と小さくなっている。

(2) 木造家屋の構造による差

福井地震時における被災農村の家屋の多くは、本土地固有の日本家屋である。それらは、重い瓦やかやぶきのを有した構造をしており、建築年齢 30~50 年の老朽家屋が非常に多かったとされている〔G.H.Q.(1949)〕。一方、福井市内における木造家屋の大部分は、戦時中の空襲で焼失している。復興に際して、戦後の物資不足のため、軽い屋根の建築に分類される建物が多く建設されることとなった。これらの屋根は、トタン屋根、軽いスレートぶき、セメント・アスベストぶき、木製のこけら板である〔G.H.Q.(1949)〕。福井地震当時の福井市内の住宅数は明確ではないが、

市住宅課の調査によれば、普通住宅の数は、9,109 戸、このうち、終戦前からあった 1,782 戸を除き、7,327 戸（約 80%）は戦災後の復興住宅であるとされている[福井市(1978)]。

G.H.Q.(1949)は、福井市、森田、丸岡、金津における幾つかのブロックにおいて、重屋根家屋と軽屋根家屋に類別して航空写真から判別した全壊率の調査を行っている。図 2.10 に重屋根、軽屋根各々の全壊率と合計の全壊率の関係を示す。G.H.Q.(1949)の報告でも指摘されているが、重屋根の全壊率は、軽屋根の被害に比べて、約 2 倍の関係がある。結果的には、屋根が軽いことにより耐震的になったともいえる。全体の全壊率に対する関係では、森田、丸岡、金津においては、軽屋根の家屋が占める割合が、全体の家屋に対して少なく、全体の全壊率に及ぼす影響は少ないことがわかる。従って、福井市内を除く各部落における全壊率は、当地方固有の旧家屋における全壊率を示しているものと判断できる。一方、福井市内においては、前述したように、空襲後に建設された住宅が多いことより、福井市内における調査ブロックの総戸数も、1,225（軽）/1,627（総）戸=75%と軽屋根の構成比が高い。これは、前述した福井市における戦後に復興した建物の戸数比率 80%と概ね等しい。また、福井空襲史刊行会(1978)によれば、福井市内は、市街地では、戦災で概ね罹災しており、殆んどの町で全焼している。ただし、市内においても周辺の町では、罹災を免れている。このことより、前述した福井市街地での総戸数に対する全壊率は、周辺部落の全壊率に比べて小さくなっているものと考えられる。

(3) 部落別全壊率の修正

以上の検討より、福井地震における木造家屋全壊率の再検討を行なう。用いた資料は、福井平野全体においては B3 の資料を基に、B3 資料の無い部落については B1 資料より、福井市内においては D1 の資料である。全壊率の定義としては、構造的被災を目的とした建築研究所の母屋の全壊率を基準として、全壊率の推定を各部落で行う。即ち、B1 の資料を用いる場合及び、D1 の福井市郊外の部落の全壊率は、前述の回帰曲線で補正した全壊率を用いた。

図 2.11(a)には、部落毎に全壊率を示す。全壊率が 90%以上になる部落は、本検討で基準となる B3 の全壊率であり、その数値を記載した。B1 及び D1 の資料で 80%以上となるのは、補正の回帰曲線より、原資料で全壊率 100%と記載されている部落である。図 2.11(b)にこれら再検討した各部落の全壊率よりコンター線を引いたものを示す。

同図と図 2.1 (e)に示す建築研究所の分布図と比較すると、福井平野の南西部で異なり、全壊率 80%以上の領域が、酒生、東郷、上文殊村等に存在する。国警[竹山・他(1951)]の報告による当該領域での村毎の全壊率は、酒生で 56%、東郷で 28%、上文殊村で 20%となっているが、これらの地域は平野の縁であり、丘陵と平野の部落が混在している。当該部落の現地踏査の報告[末廣(1948)]では、山合の部落では 0%、平野の水田地域の部落では 100%と格段の差があるとされてい

る。このことは、村全体平均と部落毎の全壊率とはかなり異なることを意味し、今回の結果は現地踏査報告の記述と調和的である。

また、芦原町の金津よりの部落で全壊率が大きいことにより、本検討での全壊率 80%の領域が北に延びていることがわかる。この結果、福井平野西縁部において、途中途切れるものの、全壊率 80%の領域が南北に長くなっている。全体の傾向は、図 2.1 (d)に示す高橋の分布図に近い。これは、平野全体を検討した際に用いた資料が B1 に基づいているためと考えられる。

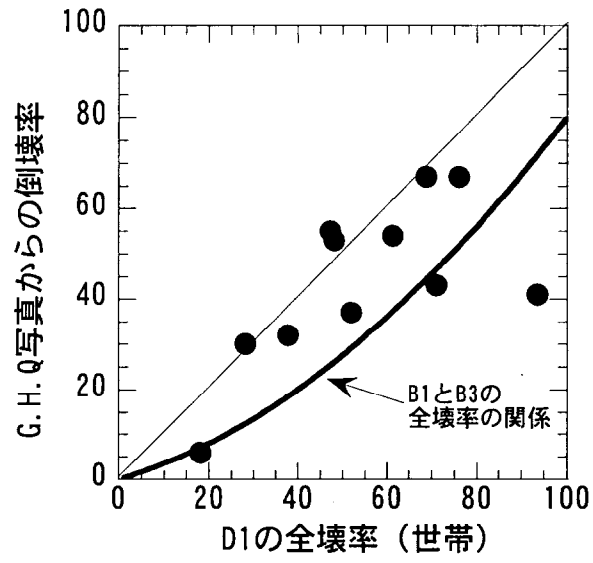


図 2.8 D1 の全壊率と写真から判定した倒壊率

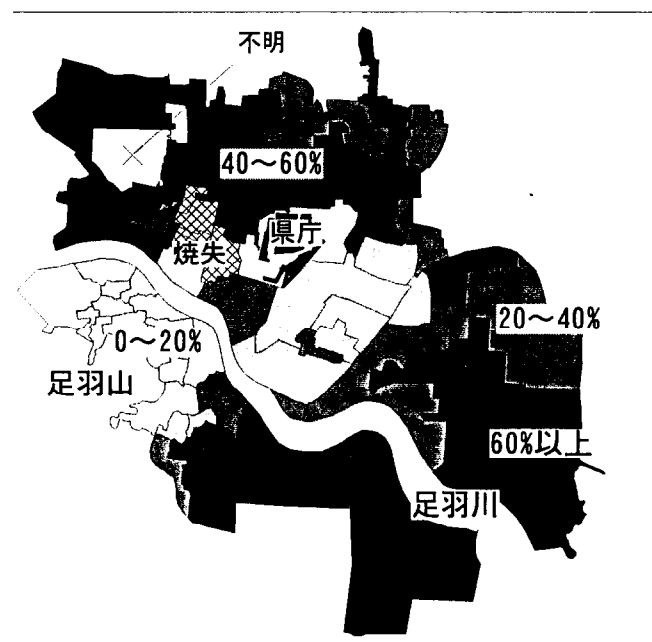


図 2.9 福井市街地の全壊率分布図

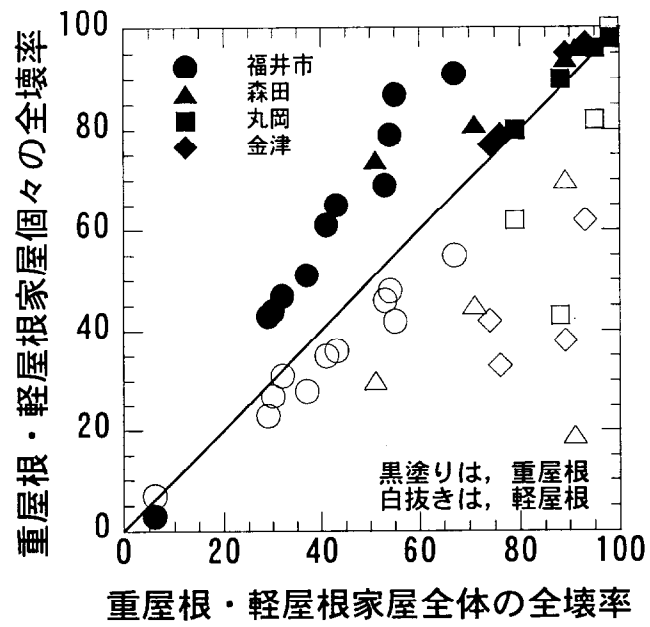
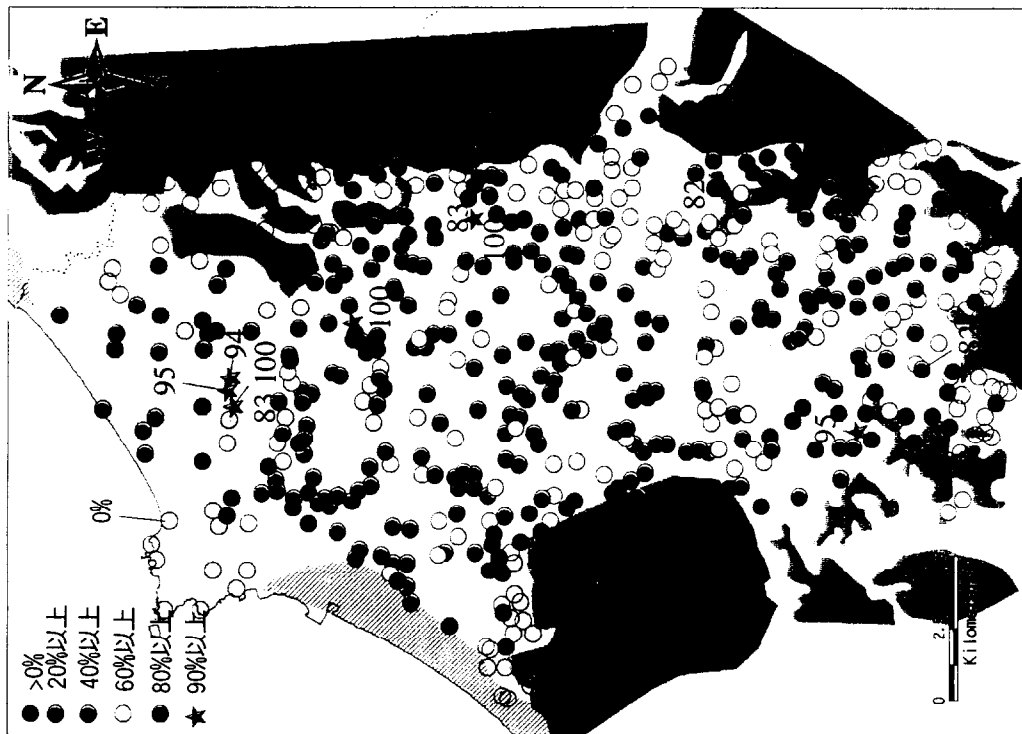
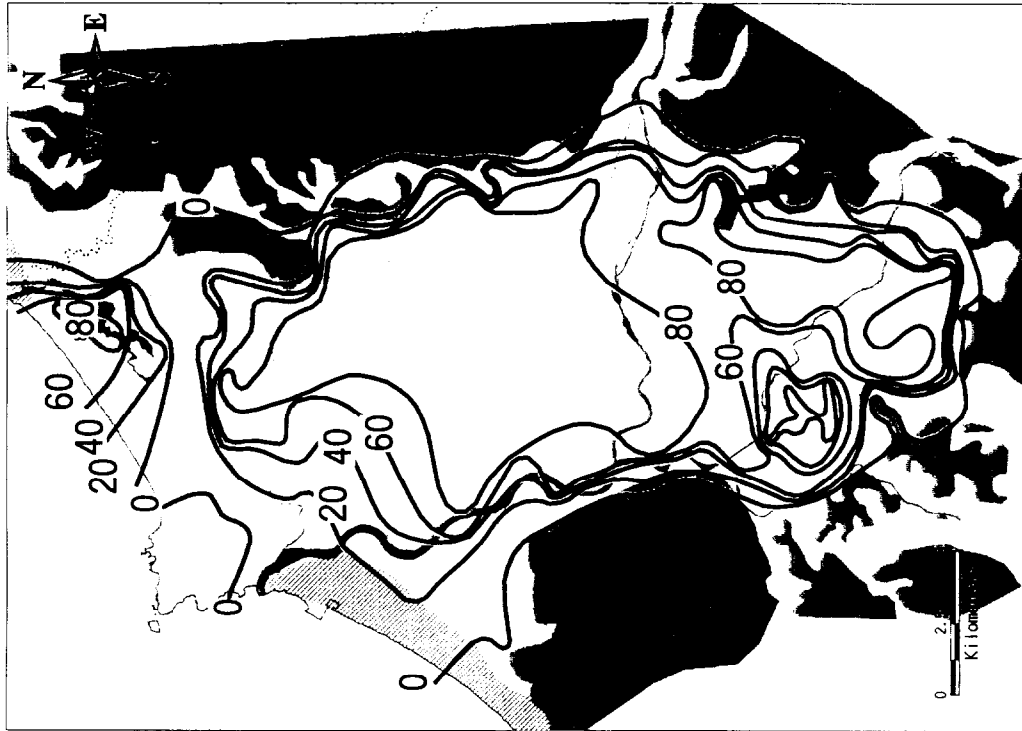


図 2.10 木造家屋の質による差と木造家屋全体全壊率の関係



(a)推定された部落毎の全壊率



(b)全壊率分布図

図 2.11 推定された全壊率分布図.

2.2 軌道・橋梁等の被害分布

福井地震当時の軌道は、平野内を東西南北にわたり、計6線が敷設されている。これらの土木構造物は、地盤面に直接構築されており、それらの被害は、地震時の地盤変状を直接的に反映しているものと考えられる。また、ここで着目する構造物は、軌道や橋梁等、線状の形状を有しており、方向性による被害の違いが予想される。例えば、兵庫県南部地震における水道管の被害を調査した結果によれば、断層直交方向の被害が、断層平行方向に比べ大きいという結果を得ている[Takada et al.(2000)]。

本節では、福井地震における震源近傍での地震動強さの方向性の分布を知る手がかりを得るため、このような構造物の被害分布を整理し検討を行う。

2.2.1 表層地盤と液状化の分布

軌道の被害は、地盤面上に直接構築されているため、表層地盤の地盤変状の影響を直接受けているものと考えられる。そこで、最初に福井平野における表層地盤の特徴および福井地震時における液状化の分布について概観する。

(1) 表層地盤

福井平野は、その東方に加越山地・越前中央山地を、西方に丹生山地及び丹生台地を構え、南北に広がる平野である。その平野は河川によって堆積された広い沖積低地であり、扇状地と氾濫原とから構成されている。氾濫原は、軟弱な粘性土層と、緩い砂質土層からなり、扇状地は砂礫層が主体をなしている。また、沖積低地内には、蛇行する旧河川に沿って自然堤防及び旧河道堆積物が分布し、自然堤防の後背地には腐植土層が分布している。図 2.12[福井県(1986)]に表層地質分類を示す。同図の礫質堆積物が、ほぼ扇状地に対応し、泥質堆積物が、氾濫原に対応している。

これら表層地質に見られる沖積層の基底の深さ分布は、福井県(1986)によって比較的良好に調べられている。沖積層基底の深さ分布を図 2.13 に示す。沖積層厚は、永平寺線の本丸岡から越前線の松岡-福井間で0mと浅く、北西および南西方向に向かって深くなっている。特に、平野北西部に向かって深くなる傾向が見られ、木部村、浜四郷村、本庄村において50m以上の深さとなっている。また、福井平野内における表層部分は、N値0~2の極軟弱層が存在する。これら極軟弱層はほぼ平野全域に渡って分布し、福井平野北西部の三国町の南部~芦原町にかけて、その深さが

深くなり、深いところでは 15m 以上にも達する福井県(1986)]。以上、福井平野内部では、比較的厚い沖積層が堆積しており、その表層部は、極軟弱層で覆われている。土木構造物の被害を考えると、これら、軟弱地盤の影響を考慮する必要があるものと考えられる。

(2) 液状化の分布

土木構造物の多くの被害は、地震時の地盤変状を直接受けるため、液状化に伴う地盤変状と、断層運動による被害を区別するためにも液状化発生位置の分布を知ることは重要である。福井地震では、平野内の多くの地点で噴砂が見られ、その位置が G.H.Q.(1949)の付図に記載されている。図 2.13 にその位置を示す。液状化の発生地点は、福井平野を流れる九頭竜、日野川等の河川に沿った場所、また、その細かな水路に沿った地点で多く見られる。さらに、北陸本線の東側、松岡より西側、田島部落より南側の領域でも顕著に見られる。液状化の発生位置は、扇状地と、旧河川に沿った自然堤防および旧河道堆積物に多く見られる。ただし、丸岡本線の丸岡～本丸岡間で見られるように、表層地質としては泥質堆積物上でも、液状化が多く発生している地点があり、必ずしも表層地質のみに対応しているわけではない。

森田町でのボーリング調査の結果によると、液状化発生層は Gl.-2~-10m の砂層、砂礫層であると推定されている[Hamada et al.(1992)]。図 2.14 に福井県(1986)の調査結果による沖積砂層、砂礫層の層厚分布を示す。この図に見られるように、福井平野内の殆どに沖積砂層および砂礫層が堆積していることがわかる。前述の丸岡～本丸岡間も、粘土層の下部の砂層が 5~10m ほど堆積しており、これらの層が液状化したものと考えられる。また、液状化の発生は、沖積砂層、砂礫層の層厚が 5m 未満の位置での発生は殆どしていないことがわかる。

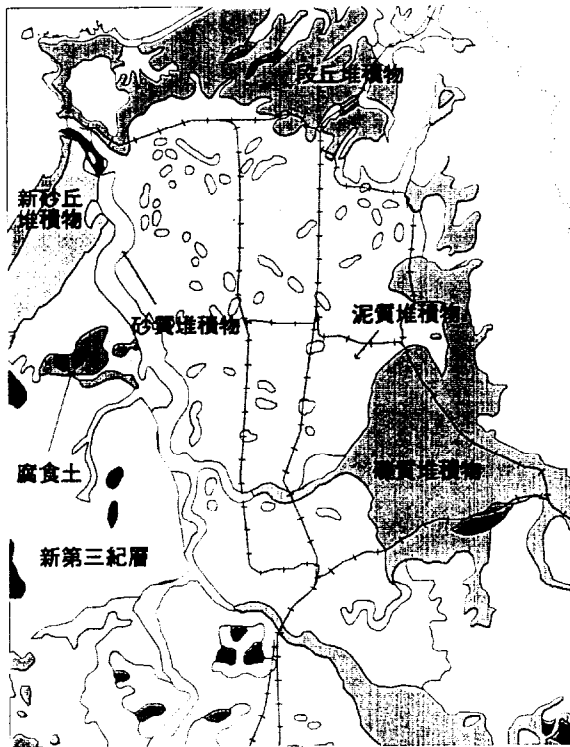


図 2.12 表層地質分類 (福井県)

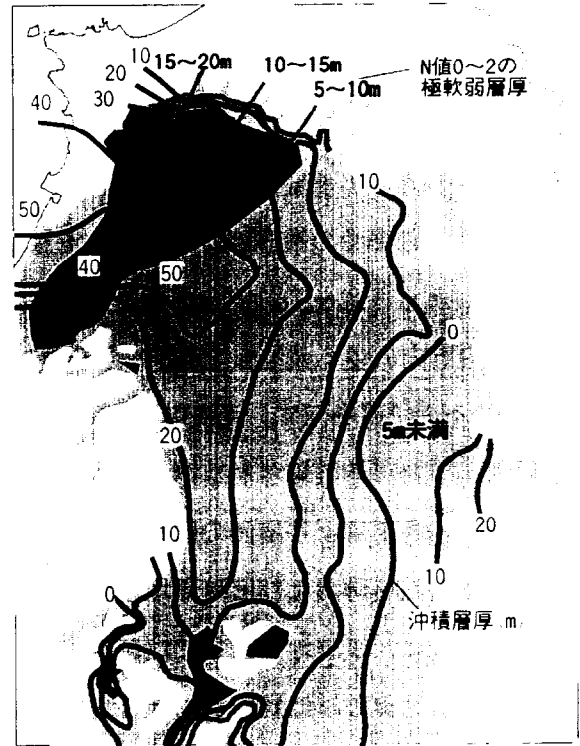


図 2.13 沖積層深さと
N 値 0~2 の極軟弱層の深さ (福井県)

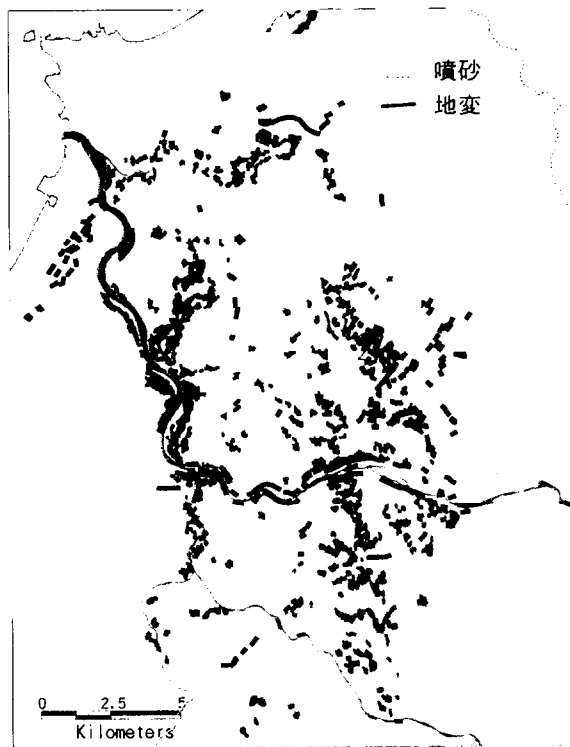


図 2.14 噴砂・地変位置(G.H.Q.)



図 2.15 沖積砂層・砂礫の層厚 (福井県)

2.2.2 軌道・橋梁等の被害

(1) 軌道の被害

1948年当時の福井平野内に軌かれていた鉄道路線図を図2.16に示す。被害の大きかった個所は、当時の国有鉄道では、北陸本線で大土呂一大聖寺、三国線で金津一芦原間である。私鉄では、永平寺線の金津一油間、丸岡線全線が最も大きく、次いで越前本線の福井一松岡間、三国芦原線の福井口一本荘間である[北陸震災特別委員会(1950)]。施設関係の被害も甚大で主なものは建物15万3000m²、路盤沈下崩壊60ヶ所、橋梁関係26ヶ所である。中でも三国線千束トンネル前後及び細呂木の大築堤の崩壊及び九頭竜川橋梁は最も大きな被害を受けている[北陸震災特別委員会(1950)]。このような被害の内、地盤変状を直接被るものと考えられる軌道の被害に着目する。被害の形態は、概ね、次の4つに大別される。

- ①波状屈曲　：部分な座屈現象10m～長い場合で100m
- ②波状曲り　：500～1000mという長い区間にわたり、軌道が蛇行し軌道狂いを生じる
- ③陥没・沈下：築堤の崩壊による
- ④亀裂　　：築堤に軌条に沿った亀裂が生じる

図2.20に各々被害の形態と地震力のかかる主方向の概念図を示す。①の被害の主要因としては、軸方向に強い力を受け、地盤または築堤の脆弱な部分に歪が溜り、その部分の軌道が座屈したものと考えられる。特に、分岐器、橋梁、列車等、軌道方向の軸力の流れを妨げる場合に被害が多いことは、軌道の軸力が加わったことを支持するものである。この被害の形態にはおいては、部分的に築堤が軌道直行方向に崩壊し、軌条に横方向の力が加わった場合も生じる可能性があるが、福井地震における本形態の被害例では、築堤の崩壊は報告されていない。②の被害は、長い区間で波状の軌道狂いを生じたものである。その要因は、路盤および道床が崩壊・陥没をしたことにより生じた被害である[岡本(1971)]とされている。福井地震においても、「一般に波状曲がり路盤軟弱にして震動が大きかったと推定される個所に多く生じた[北陸震災特別委員会(1950)]」と記述されているように、路盤、道床の変動がその第1の要因として挙げられる。しかしながら、路盤の不同沈下を生じていない場所でも被害を受けており[北陸震災特別委員会(1950)]、①の被害と同じ要因も考えられるが、資料からのみでは、判別はできない。また、波状曲がりが生じた地点での枕木間隔が、粗密になる現象が多く見られる。③の被害は、強震動による築堤の崩壊により生じている。沈下の被害個所には、陥没等の被害も見られることにより、液状化による側方流動もその主要因であると考えられる。④の被害は、軌道に沿っての縦亀裂が主な亀裂の方向である。この被害は、ひとつは、築堤が崩壊し、③の被害を伴って、築堤が崩壊し、幅方向に広がること

により生じる。一方、縦亀裂のみを生じ築堤の崩壊を伴わない場合は、盛土がよく締め固められており、地盤は沖積層が薄く比較的硬い場合に多い[岡本(1971)]。この場合は、軌道直行方向に地震力が働いた、または軌道 45 度方向に圧縮力が加わり、その結果亀裂が入ったもの、さらには断層運動に伴い地表面に亀裂が入ったものと推定される。

これらの被害をまとめて、図 2.17～図 2.19 にその分布を示す。各図には、G.H.Q.(1949)の噴砂位置より推定された液状化地点の分布図[若松(1991)]を併せて示す。

福井平野北東部の永平寺線、丸岡線では、亀裂の被害が多い。永平寺線の亀裂の激しい区間瓜生～長畝は、図 2.12 に見られるように軟弱地盤の層厚も薄く、また、液状化の発生は見られない。このことより、この区間における亀裂の被害は、地盤震動による被害と考えられる。一方、丸岡線の船寄一本丸岡間では、亀裂を伴う陥没が多く発生し、地表面の亀裂も縦断するというように、かなり甚大な被害が生じている区間である。当該区間は、液状化も激しい地域にあたり、液状化による被害であるか、地震動そのものの被害によるのかの特定はできない。

平野を南北に走る北陸本線では、沈下や波状曲がりが多いが、三国芦原線では、構造物近傍の沈下、波状曲がりが多い。三国芦原線の周辺では、液状化発生地点はそれほど多くは無い。従って、主に強震動による築堤の崩壊による沈下、またそれに伴う軌条の波状曲がりの被害と考えられる。越前線の福井口～松岡間では、沈下や、波状曲がりが見られるが、この区間では液状化の発生地点が多く、主要因は液状化による築堤の崩壊であると考えられる。

屈曲の被害は限られた地点で見られる。屈曲に関しては、構造物の近傍に多く、局所的な地盤の変化が要因のひとつになっているものと考えられるが、福井操車場内で生じた屈曲には、構造物が無い場所でも生じている[北陸震災特別調査委員会(1950)]。さらには、本丸岡では、東西方向に走る丸岡線にのみに屈曲が見られ、ほぼ南北に走る越前線に見られないことも注意すべき被害であるものと考えられる。

これらを液状化による被害を除いて整理すると、図 2.21 に示す個所となる。①軌条の屈曲は、北陸本線では、森田以南～福井市内、三国芦原線では、金津～芦原間である。即ち、平野中央部以南では、南北方向の軌道であり、平野北部では、東西方向の軌道である。③亀裂の被害は、福井平野北東部の永平寺線の瓜生～長畝で見られる。②と④の波状曲がりおよび沈下に関しては、液状化による被害が主な要因であると考えられる。被害は、各線により、特徴的を持っており、平野内の位置および軌道軸により被害分布の傾向が異なることがわかる。

(2) 橋梁等の被害

福井地震においては、多くの橋梁に被害が生じており、九頭竜川では、鉄道橋、道路橋とも大多数が破壊し、福井市より 10km 上流の鳴鹿橋のみがかりうじて通行可能という状況であった。

このため、最も甚大な被害を受けた震央地一帯の地域は、行政中心である福井市との陸上交通が殆ど絶たれ、救援物資や、復旧資材は、相当の期間輸送不可能な状態に陥っている。橋梁が被害を受けた領域は、福井平野全域にわたり、その数も、鉄道橋の被害では、溝橋を含め、大小 170 箇所とかなり多数の被害を受けている[北陸震災特別委員会(1950)]。

橋梁の構造としては、単純桁の架構が多く、橋台はコンクリート又は、石積、橋脚は鉄筋コンクリート又は木造である。桁に関しては、鉄筋コンクリート、鋼版、木造等である。主な被災橋梁の位置を図 2.22 に示す。図 2.22 には、前述した噴砂位置より推定された液状化地点の分布図[若松(1991)]を併せて示す。

橋梁の被害の多くは、柱脚の沈下及び傾斜に伴う橋桁の落下が目立つ。幾つか主要な橋梁についての被害を概観する。

最初に道路橋の被害[猪瀬(1950)]について述べる。中角橋は、県道福井加賀吉崎線が九頭竜川を跨ぐ地点に設置されており、鋼板の単純桁である。図 2.23 に示すように、橋桁は、南側に移動し、橋脚部の転倒、傾斜により落下している。被害の主たる原因として、柱脚ジョイント部と、桁・脚頭アンカー部の耐力不足であると報告されている[岡本・他(1950)]。

五松橋は、県道松岡丸岡線が九頭竜川を跨ぐ地点に位置する。構造は、3 塔柱二径間の吊橋であり、桁部は補剛鋼、塔柱は鉄骨コンクリートで構成されている。被害は図 2.24 に示すように端桁上弦の座屈のみである。被害の主たる原因は、軟弱地盤に設置された右岸の定着台の移動であると報告されている。ただし、観測された定着台の移動量は、座屈から推定される移動量よりは少ない[小西(1951)]。

長屋橋は、県道勝山三国線において十郷用水路を跨ぐ地点に位置している。構造は、橋脚、床版とも鉄筋コンクリート造である。被害は、図 2.25 に示すように 7 本の橋脚のうち、6 本が沈下または大傾斜を生じ、桁が転落をしている。左岸における橋台に桁が 1.8m 程乗りかかっており、本橋設置地点は、全体的に土地が縮みを生じている場所のように見受けられると報告されている[猪瀬(1950)]。板垣橋は、福井市内足羽川に設置された橋梁であり、橋脚の傾斜及び、橋桁の橋軸直交方向への滑り出しが主な被害である。桁の水平移動量は大きい所で 2m を超えている。また、その方向は南東方向である[猪瀬(1950)]。

次に鉄道橋の被害[仁杉(1950)]について述べる。鉄道橋は、道路橋に比べ、桁重量が軽い。九頭竜川にかかる北陸本線、京福電鉄の桁と道路橋である中角橋で、各々、20、18、77ton (1 径間) であり、地震時にかかる慣性力は、道路橋に比べると小さかったものと推察される。北陸本線の九頭竜橋の橋脚部は、煉瓦造であり、基礎部はコンクリート造である。被害は、柱脚部において切断転倒することにより、桁部が落下している状態である(図 2.26)。一方、京福電鉄の三国線の九頭竜橋は、柱脚部はコンクリート造である。10 橋脚中 1 橋脚が転倒し、桁が転落している。ま

た他の1橋脚の打継部で、南西方向に滑動している(図 2.27)。

表 2.5 に他の橋梁も併せて、各橋梁の被害状況をまとめて示す。被害の多くは、橋脚の傾斜、沈下、転倒を伴っている。同表に示した橋梁の中で、上部構造のみの被害としては、五松橋の座屈のみである。残りの全て、なんらかの橋脚の被害を伴っている。被害は、複合して発生している場合が多いため、一概に区別するのは難しいが、破壊に直結したであろうという被害に大別すると、①橋脚の沈下、②橋脚の移動、③橋脚の破断・転倒、④木造橋脚破壊、⑤橋桁の座屈、⑥橋桁の滑動となる。図 2.20 にそれらを分類毎に記号を変えて示した。

前項で示したように、福井平野内での液状化分布は河川流域では、ほぼ全域にわたっているため、その河川域での構造物である橋梁設置位置では、大小の差はあるものの液状化は発生しているものと考えられる。特に、被害の中での沈下を伴うものは、液状化に伴う支持力の低減が被害の主な原因であると推定される。図 2.20 に示される橋梁で、長畝橋、長屋橋、新保橋、港橋が、それに該当する。一方、九頭竜川に建設されている中角橋、北陸本線、京福電鉄の橋梁は、基礎と橋脚部で破壊が生じていること、電鉄の基礎長さは、前節で示した中積層より深部まで達していること、森田周辺での液状化発生層が 5~10m の砂・砂礫層で発生していることより、液状化による支持力低減による被害ではないと推定される。慣性力であれば、橋梁に移動方向は、地動の方向とほぼ同じであると考えても大きな間違いはないものと考えられる。ただし、前述したように周辺地盤においては、液状化が発生しているものと考えられ、側方流動による被害である可能性も考えられる。

以上を考慮し、地震動の方向性を確認する資料となる橋梁の被害としては、①板垣橋における橋桁の滑動、②中角橋の南方向への移動、③京福電鉄九頭竜川橋の橋脚打継面の南西方向への滑り、④長屋橋における地盤の縮み、⑤五松橋の橋軸方向へ移動等が挙げられる。ただし、五松橋の被害は側方流動による移動の可能性もあるため、参考として考える。これらの被害のあった位置をまとめて、図 2.28 に示す。

(3) 道路の被害

道路の受けた被害は、前述した橋梁の被害、路盤の沈下と軟化、切取面の崩壊、盛土の崩落及び舗装の破壊等である。道路の被害分布を図 2.29 に示す。国道 12 号線、県道加賀吉崎線での被害の概要を以下にまとめる

• 国道 12 号線

中川一丸岡間：長畝橋以南の道路は水田内を走るが、外観に現れない路盤の変状により沈下著しく路面が水田と同高さ或いはそれ以下になった個所が 150~200m の長い区間に亘って見

られた。

丸岡町内：町内ではコンクリートで舗装された区間があり，図 2.30 に見られるようにその南北方向に延びる部分には亀裂が見られず波状の高低変化が現れ東西に向かう部分には直角方向即ち南北方向の亀裂が生じている。道路の被害にも方向性が見られることが報告されている。

丸岡—船橋間：縦亀裂が延長 20～30m に亘り発生しており，両側の路肩が崩れ出している個所が見られた。ただし，この区間については，液状化が発生している地点であり，液状化による被害が大であると考えられる。

船橋—福井間：この間約 4km は大部分コンクリートにより舗装されているが，その継ぎ目個所で上下の食い違いや，横方向のずれを生じているのが見られた。

- 県道福井加賀吉崎線

福井—芦原：比較的軽微な沈下亀裂が見られる程度であり，道路としての使用上は問題が無い路線である。鉄道三国線との交差点から南に約 1km の区間は厚さ 15cm のコンクリート舗装路線になっているが，横断目地の部分で南側の盤が北側の盤に乗り上げ 30cm 程重なり合っ

て破壊している個所が 5ヶ所見られた。

(4) 被害分布の特徴

以上概観したように，福井平野内においては，土木構造物の被害には地域性・方向性が見られる。ただし，各々の被害の定量的な評価は，構造物周辺の詳細な地盤情報が必要であり，被害資料からのみでは，難しいと判断される。そこで，被害から推定される概略的な地震力の方向についての整理を行う。液状化の発生している地点での被害を除外し，領域毎に被害から推定される地震力の方向を示すと下記のようなになる。

福井平野北西部

永平寺線（瓜生—長畝）における軌道で亀裂の被害→東西もしくは，その 45 度の地震力

本丸岡内

軌道の被害で東西方向にはしる丸岡線にのみ屈曲→東西方向の地震力

道路で東西方向の道路に亀裂→東西もしくは，その 45 度の地震力

三国—金津

三国線（東西）で屈曲→東西の地震力

森田—福井

北陸本線（ほぼ南北）で屈曲→南北方向の地震力

中角橋の橋桁が南に転落→南西，北東方向の地震力

三国芦原線九頭竜橋の橋脚が南西に滑動→南西，北東方向の地震力

福井市内

北陸本線（ほぼ南北）で屈曲→南北方向の地震力

板垣橋の橋桁が南東への滑動→南東，北西方向の地震力

松岡町

五松橋の橋軸方向への座屈→南北方向の地震力

図 2.31(a)に上記の土木構造物被害位置を示す。場所がこれらの被害から推定される地震力の方向は，概ね一致している。これら土木構造物の被害から推定された地震力の方向と，煙突，家屋の倒壊・傾斜方向および墓石の転倒方向[谷口・他(1951)]の関係を図 2.31(b)に示す。これらの構造物の転倒方向は，個々に見れば，その耐力の不均質性や，墓石の転倒に伴う回転等ばらつくことが推測されるが，平均的に見れば，概ね，地震動の主軸方向を示すものと考えられる。

同図より，土木構造物の被害から推定される地震力の方向とその他の被害における地震力の方向は，概ね一致することがわかり，地震力の主軸方向に依存して土木構造物の被害のパターンが変ることを示している。このことは，強震動を予測する際に，地震動強さそのものと，その地動主軸方向も予測することが，災害の低減につながることを示唆している。

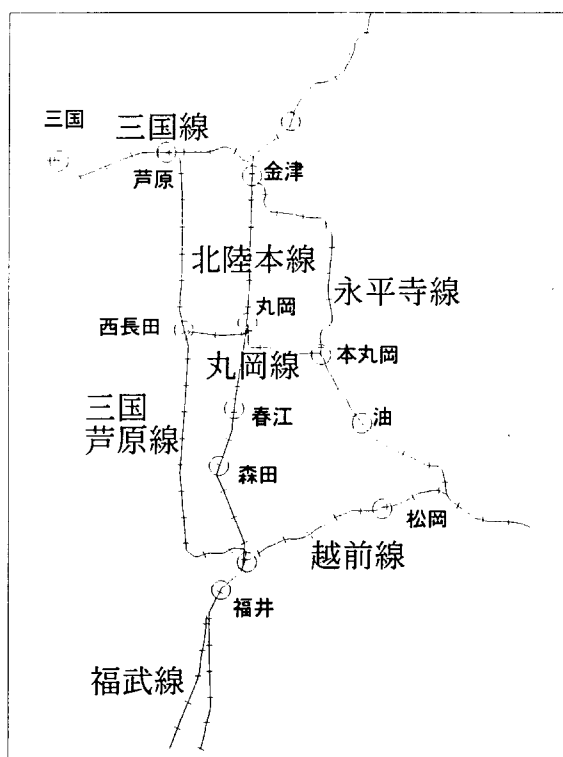


図 2.16 福井地震時の鉄道路線図

表 2.4 各路線に見られる主な軌道被害

路線名	主な被害
北陸本線	福井平野を南北に横切る北陸本線では、福井操車場～大聖寺間で波状曲がりが多く生じている。その中でも比較的短い区間で生じる波状屈曲は、森田付近で見られる他、福井操車場や、福井駅構内で生じている。また、丸岡付近では、横断亀裂が見られる。
三国線	亀裂が多く見られる。千束トンネル付近では、築堤が沈下し、波状曲がりの被害が見られる。
永平寺線	金津～油間で幅 30cm 以上の亀裂が、20 数カ所生じ、中でも瓜生～長畝間で 10 数ヶ所以上と多い。
越前本線	福井～松岡間で、沈下による被害が見られる。この間は、波状曲がりも生じているが、沈下に伴うものと推察されている。さらに福井～福井口間では、波状屈曲も見られた。
丸岡線	全線にわたり、亀裂を生じ、特に丸岡～本丸岡間で甚だしい。また、構造物前後の沈下も国鉄線の跨線橋前後の築堤で見られた。丸岡駅付近で、永平寺線には、全く見られない波状屈曲が、丸岡線で見られた。
三国芦原線	構造物付近の沈下が最も多い線である。波状曲がりの被害も見られるが、沈下に伴うものが多い。

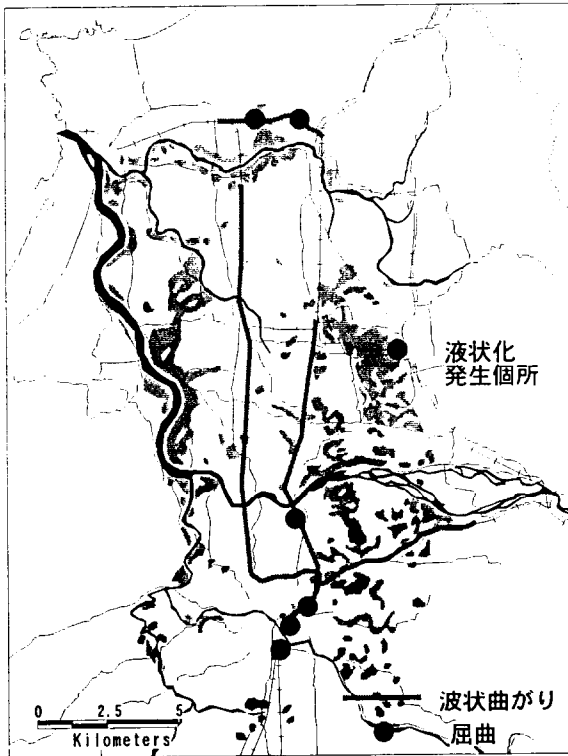


図 2.17 波状曲がりと屈曲による被害分布

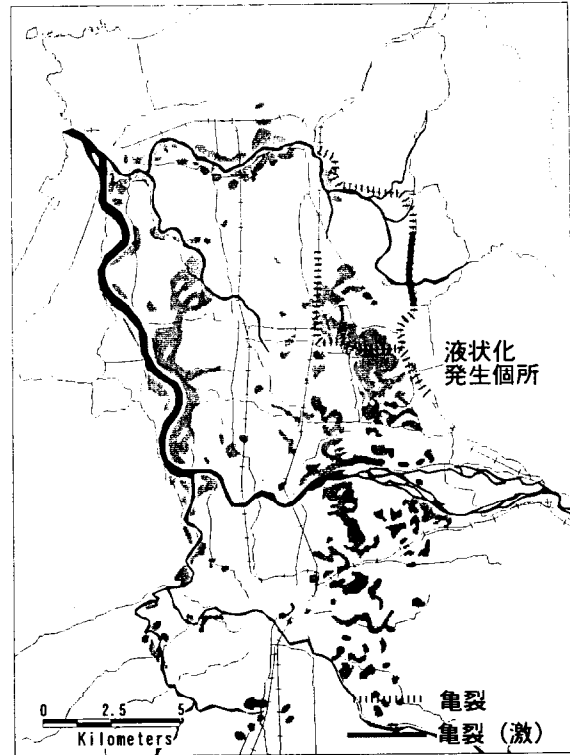


図 2.18 亀裂による被害分布

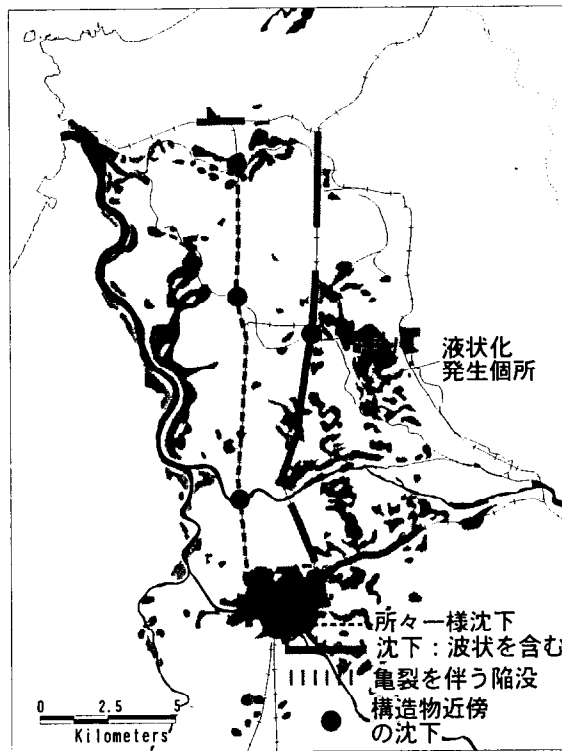


図 2.19 沈下による被害分布図

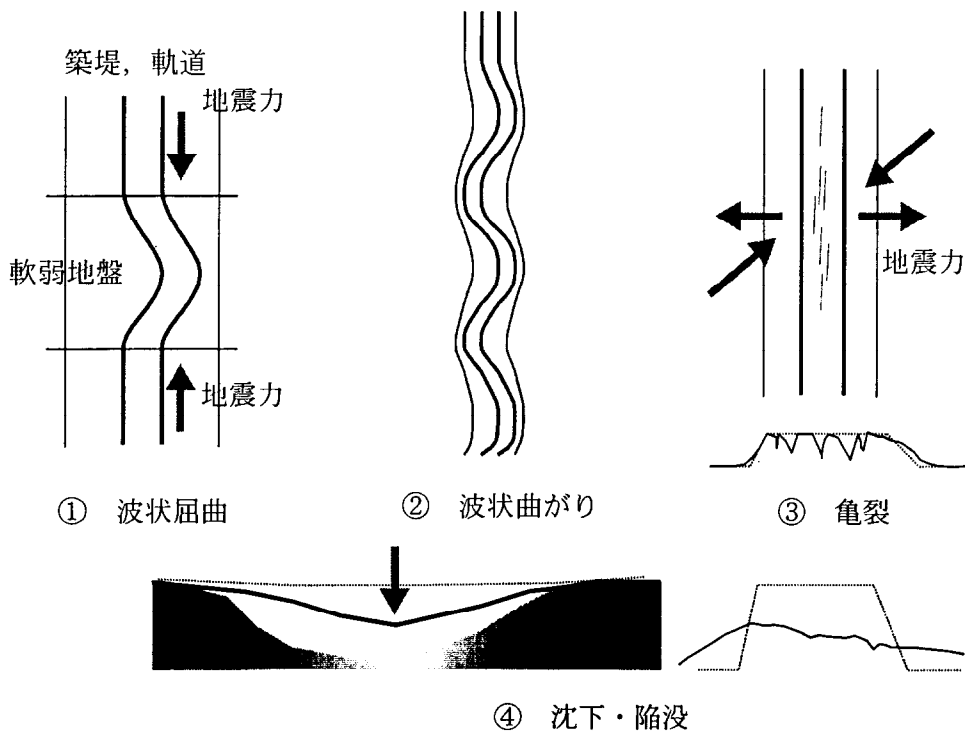


図 2.20 軌道被害の概念図

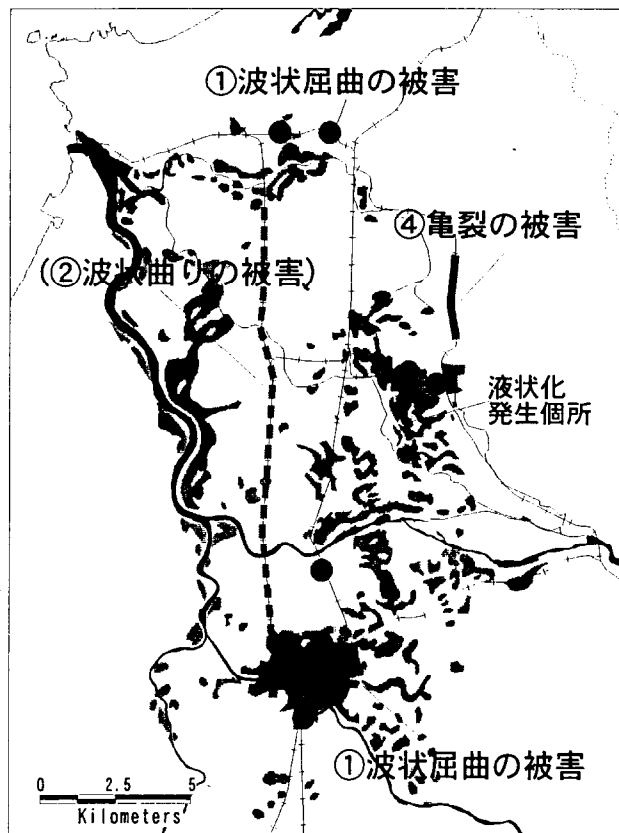


図 2.21 地震力と直接関係のありそうな軌道の被害位置

表 2.5 橋梁の被害一覧

橋名	構造	被害	
道路橋	五松橋	三塔柱二径間補剛構付吊橋	端桁上弦の座屈：右岸の定着台移動が主な原因であるが、その移動量は、座屈から推定される量よりは小さい。
	中角橋	鋼鈑桁，RC ケーソン基礎 RC 柱脚	柱脚の傾き及び転倒，桁は南側に移動し，転落基礎部のジョイント部，桁と柱頭部のアンカー耐力不足
	船橋	木造土橋	木造柱脚腐敗部の破壊による桁落下
	布施田橋	木造土橋	木造柱脚腐敗部の破壊による桁落下
	神保橋	木造土橋，RC 桁及びゲルバー式鋼鈑桁	柱脚の不同沈下により，橋面勾配の乱れ，桁の転落は無し
	長畝橋	木造土橋	木造柱脚の破壊，不同沈下
	長屋橋	RC 造：単純桁	柱脚の沈み込みによる桁の落下 全体的に縮みが起こっているように見られる
	港橋	木造	柱脚(管にコンクリート)破壊，転倒による
	板垣橋	RC 造：単純桁	橋桁の滑動・落下
	九十九橋	RC 造	橋全体として橋軸方向に移動
	足羽橋	RC 造	橋脚 1 本転倒
鉄道	北陸本線九頭竜川橋	煉瓦造，	橋脚の転倒による桁の転落
	京福電鉄九頭竜川橋	C 造	橋脚の転倒，

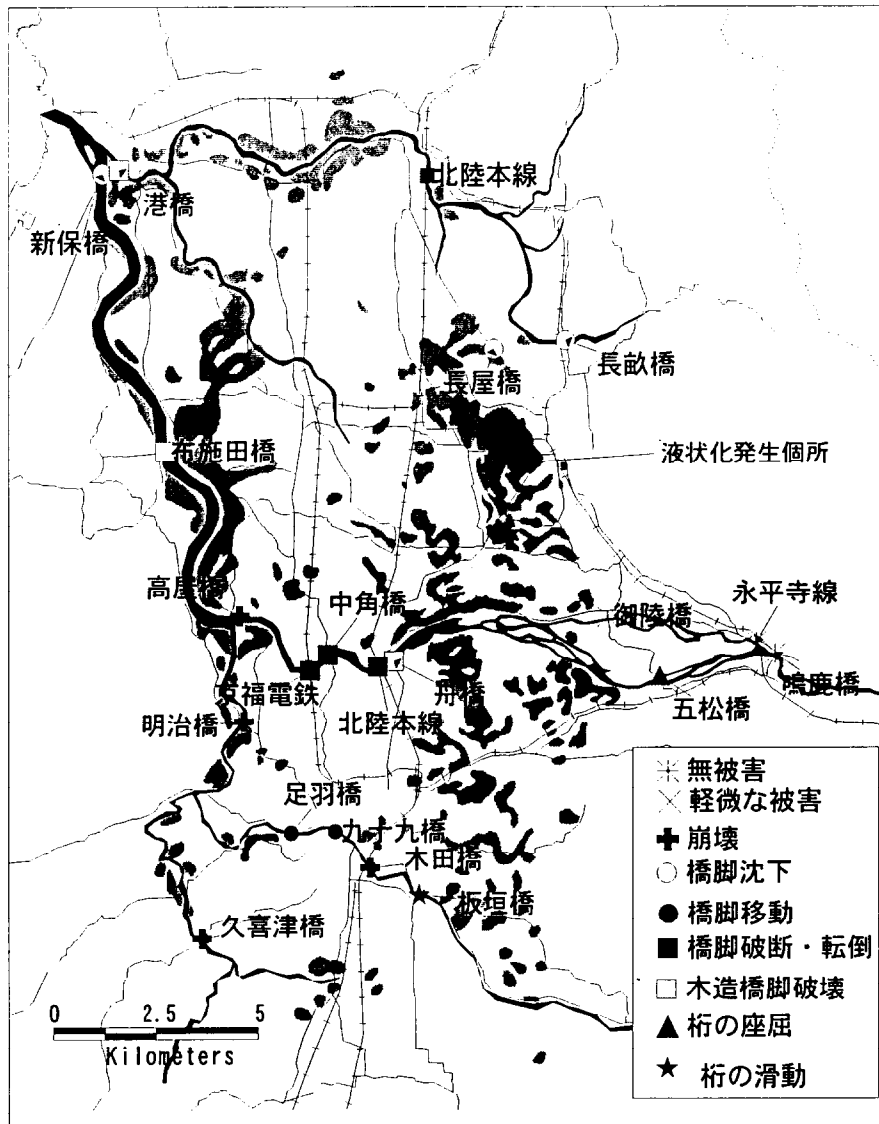
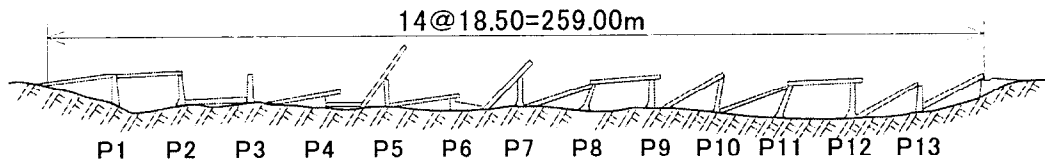
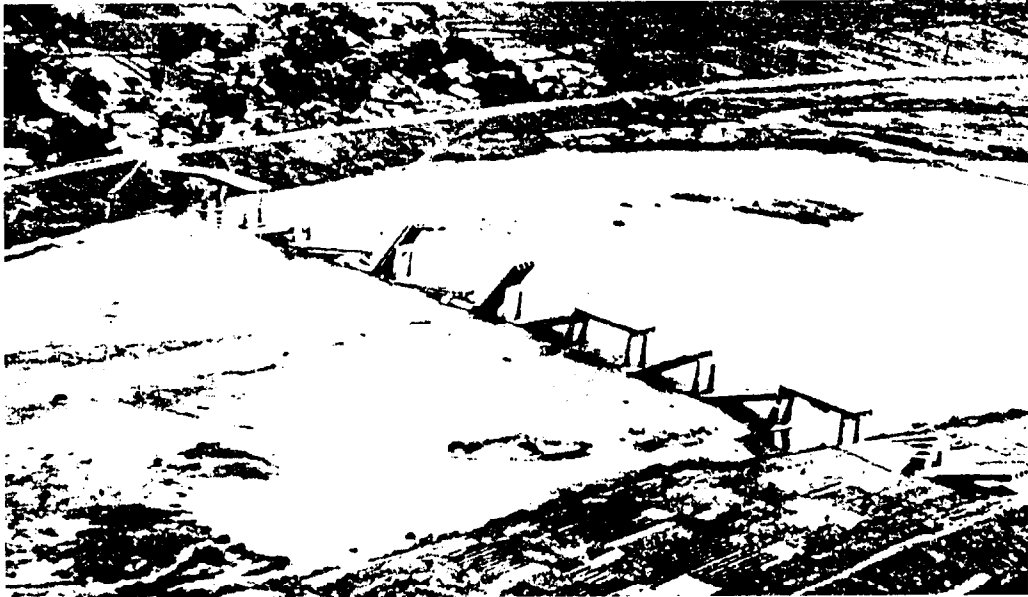


図 2.22 橋梁の被害



(a) 被害の立面



(b) 被害の写真[北陸震災特別調査委員会(1951)]

図 2.23 中角橋の被害

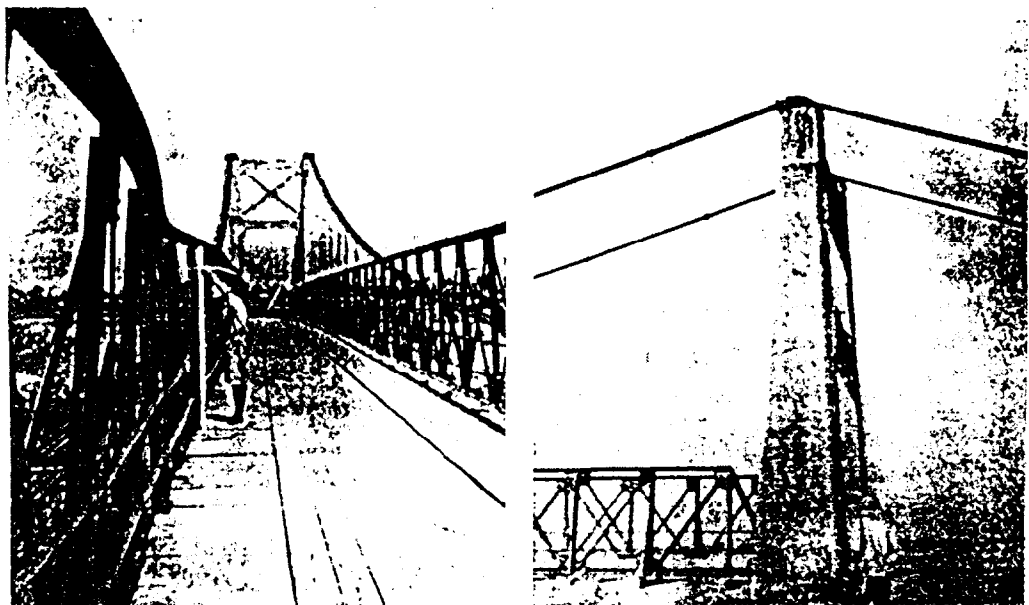
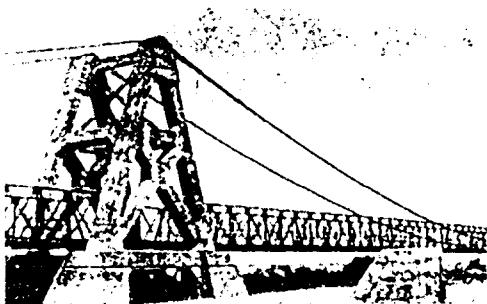


図 2.24 五松橋の被害[北陸震災特別調査委員会(1951)]

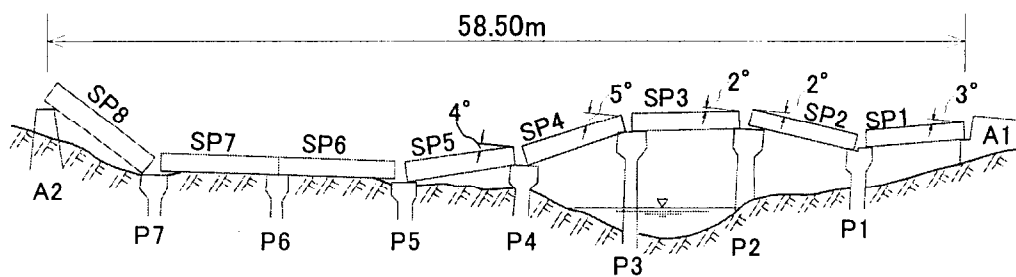


図 2.25 長屋橋の被害[北陸震災特別調査委員会(1951)]

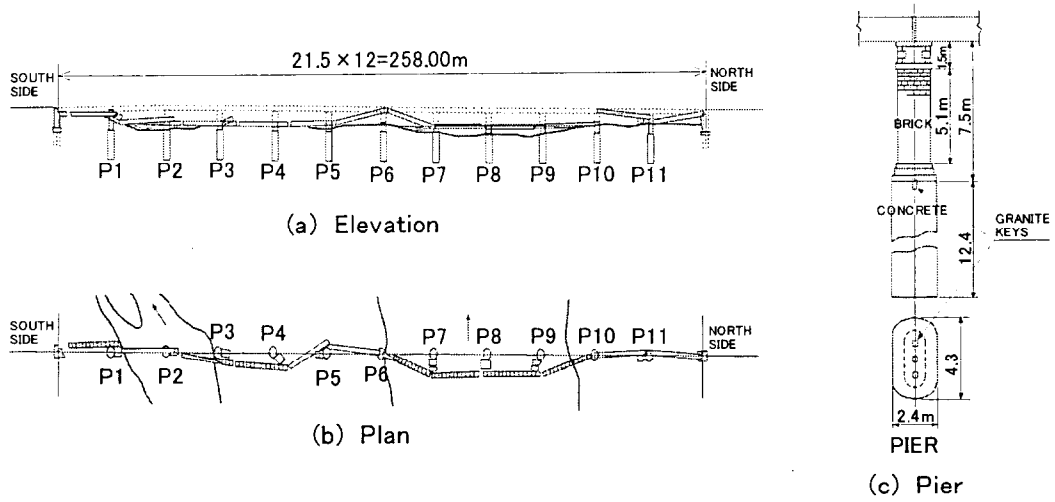


図 2.26 北陸本線九頭竜川橋の被害[北陸震災特別調査委員会(1951)]

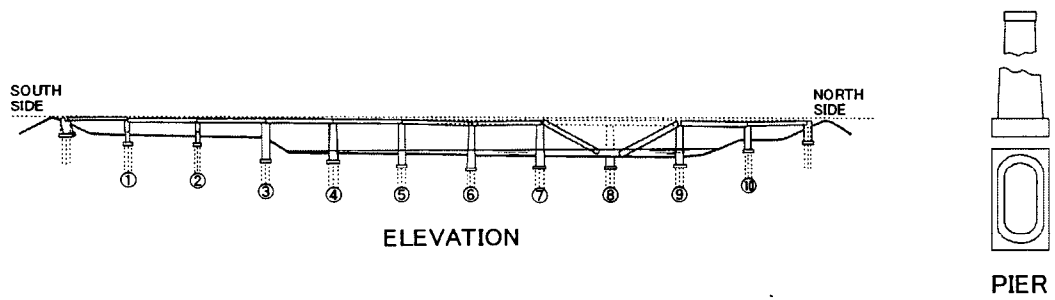


図 2.27 京福電鉄九頭竜川橋被害(G.H.Q.)

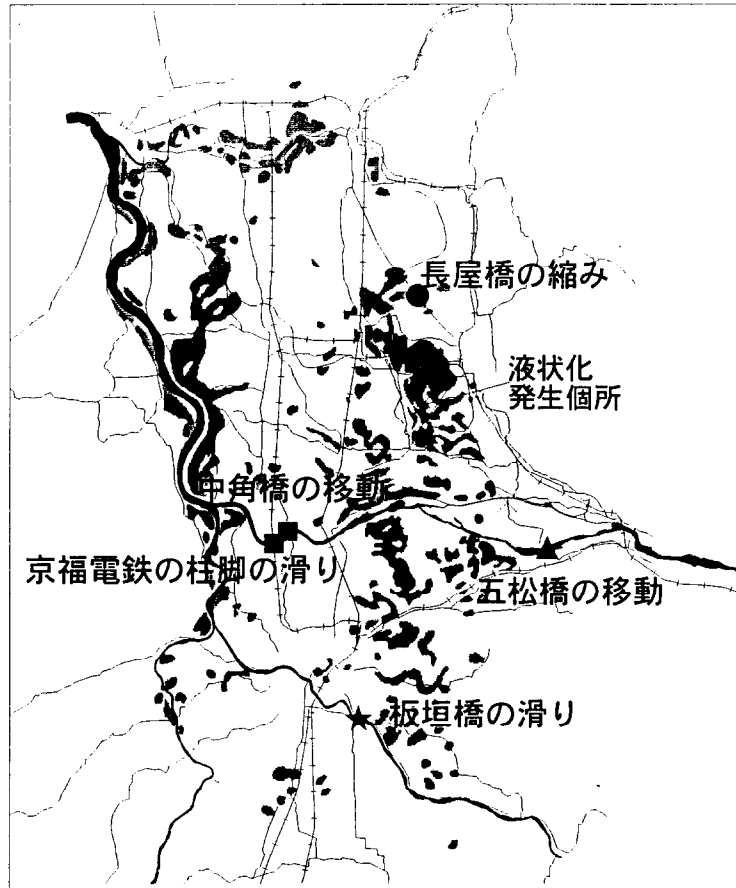


図 2.28 地震力と直接関係のありそうな橋梁の被害位置

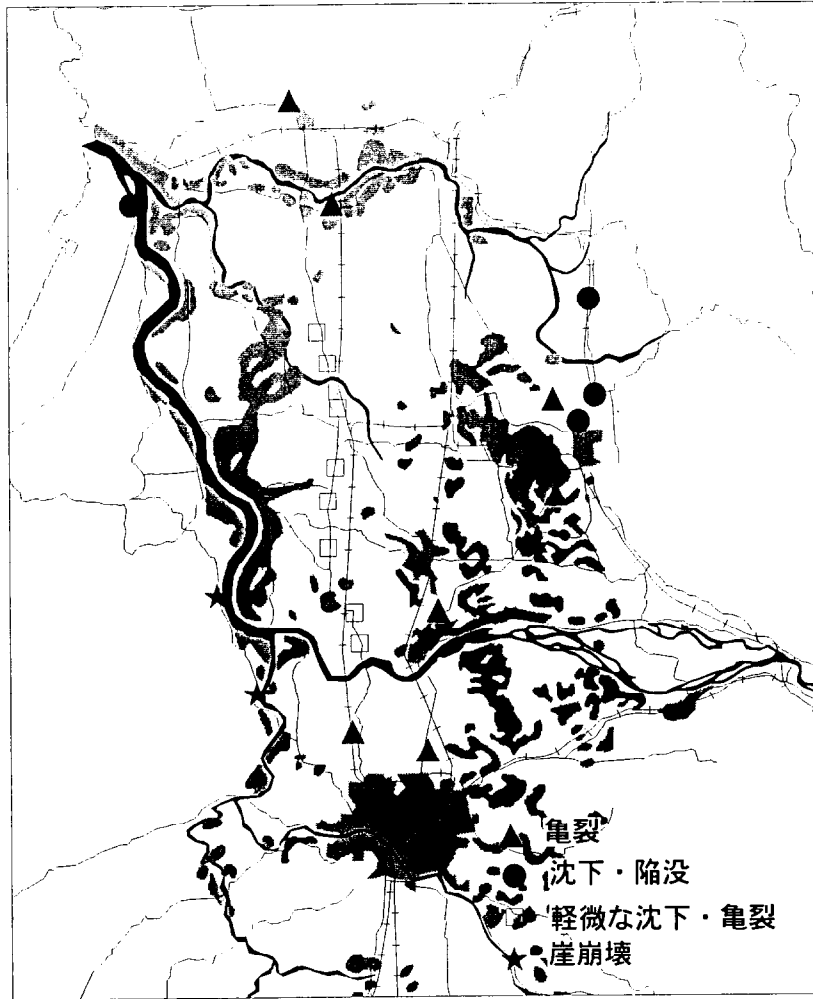


図 2.29 道路の被害

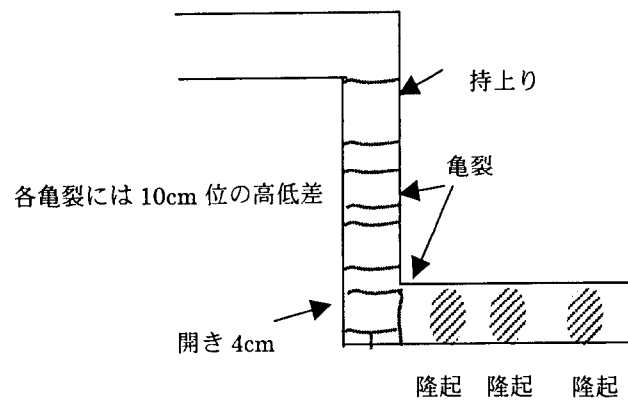
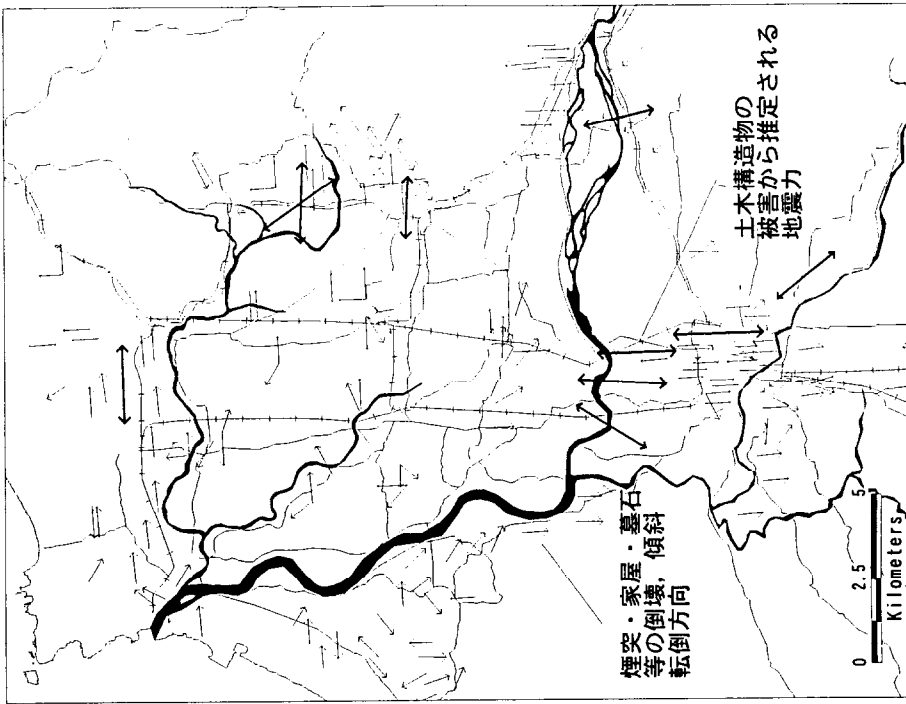
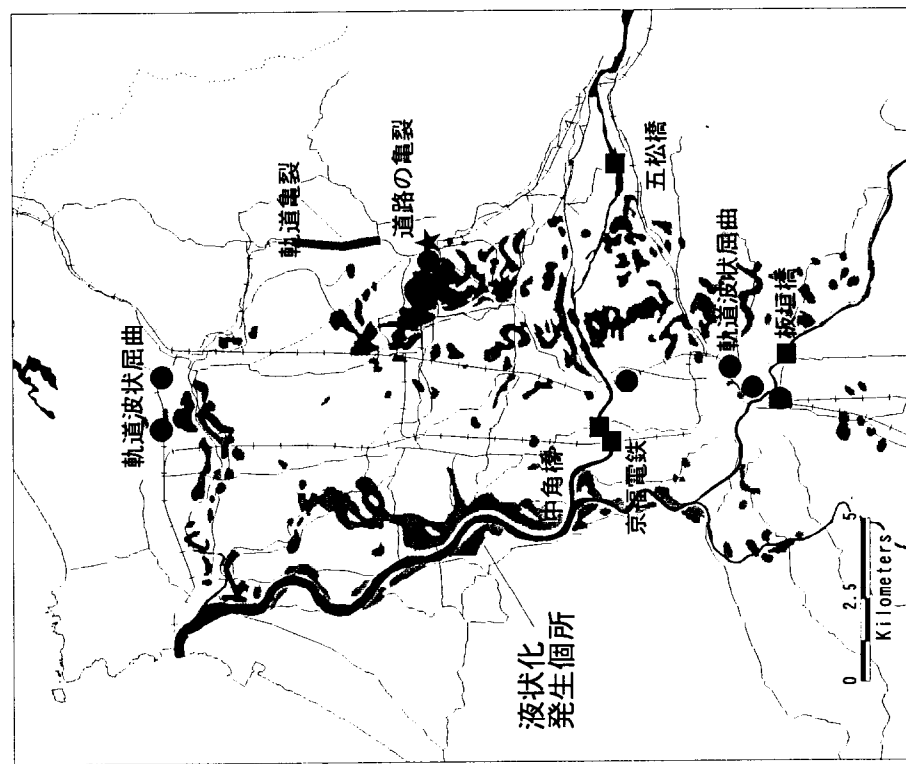


図 2.30 丸岡町内の道路の被害



(a) 地震力方向推定に用いた被害箇所



(b) 土木構造物被害の地震力方向と他被害の転倒・傾斜方向
 図 2.31 墓石・煙突等の転倒方向と土木被害から推定される地震力の関係

第3章 福井地震の地震動強さ

福井地震においては、強震記録は無いが、地震直後に様々な被害調査がなされ、震源近傍での地震動強さの手がかりが得られている。例えば、墓石の転倒状況や建造物の被害状況等から震度の推定が行われている[谷口・他(1951), 末広・他(1948), Kishinoue(1950)]。しかし、これらの推定結果の多くは単純な仮定に基づくもので、それぞれの結果の推定精度については十分な吟味はされていない。本章では、福井地震の被害報告を整理するとともに見直して、福井地震での地震動強さの面的分布をより正確に推定する。

さらに、近年の強震動シミュレーション手法に基づいて強震動波形を推定し、被害から推定された地震動強さの分布との整合性を確認した上で、そのスペクトル特性や、地震動強さに及ぼす震源、地盤の影響について検討を行う。

3.1 被害から推定される地震動強さの定量的評価

3.1.1 被害報告に基づく福井地震の地震動強さの整理

福井地震では、以下の5種類の調査方法から地震動強さが推定されている。

- ①墓石に代表される単体の転倒
- ②残存建築物の残留変位
- ③建造物の滑り
- ④墓石の跳躍
- ⑤煙突の被害

これら被害からの地震動強さの推定結果を整理し、まとめる。

①の方法では、墓石や石碑等の単体より幅と高さの比をもって震度（以降、合震度と呼ぶ）を推定している。

谷口・小林・坂井(1951)は、福井平野の比較的広範囲にわたる20地点を調査し、うち17地点での合震度を推定している。また、各地点での転倒しなかった単体と転倒した単体の合震度の記述とともに、幾つか代表的な単体の形状を示している。その結果、福井平野中央部では0.6ないしそれ以上の合震度が、平野北側の丘陵地では0.3前後の合震度が推定されている。

末広・久本・田中(1948)は、福井平野周辺部の現地踏査を行ない、24地点での墓石の幅高さ比を示している。さらに、この比を基に、等震度線をもとめ福井平野と山地のほぼ境界で合震度0.5が推定されている。Kishinoue(1950)は、河角による福井平野東周辺部の墓石転倒調査による29地点での合震度の推定結果と、岸上・池上による30地点での墓石調査結果をまとめて報告している。この結果、合震度が最大で0.5程度であることを示している。

②の方法での推定は、谷口・小林・坂井(1951)によるもので、福井市内での残存した木造建築物の壁の亀裂等から変形の状況を判断して最大変形量を推定し、地震動の強さを推定している。すなわち、各建築物の固有周期と減衰定数をモデル化した上で、各建物が当該最大変形となるに必要な地動変位を、その変位周波数応答倍率の逆算より推定している。対象とされた5つの建築物の推定最大変形、固有周期、減衰定数を表3.1に示す。各建築物から推定された周期毎の地動変位曲線5本の交点が福井市内の地動変位及び卓越周期であると考え、福井市内で周期0.65～0.7秒、半振幅5～6cmであり、加速度で400～450cm/s²程度であることが推定されている。

表 3.1 地震動強さの推定に用いられた木造家屋[谷口・他(1951)]

位置	周期 (秒)	減衰	変形 (cm)	状況
松枝上町	0.34	0.23	2.2	家屋は南へ70cm移動/上部は壊れず。
田原下町	0.8	0.24	10	家屋は南へ60cm移動/半壊程度
宝永中町	0.41	0.24	2.2	被害が殆ど無し
福井工専側	0.44	0.2	2.4	地割れが甚だしく、基礎が壊れる。上部構造は貫を斜に打った大壁造りで傾斜もしなかった。
絹織物検査所	0.63	0.1及び0.14	2.4	2階建/被害殆ど無し。

③の方法では、橋桁と木造家屋の事例が用いられている。橋桁の事例は、福井市内の板垣橋であり、門型フレームの形状をした柱脚上で橋桁が元の位置より 76cm、橋軸と直交方向に滑ったものである[G.H.Q(1950)]。この被害を基に、柱脚のコンクリートと橋桁のコンクリート間の摩擦係数 0.78 を仮定して同係数以上の震度が当該地点であったことが推定されている[福井市(1978)]。さらに、G.H.Q.(1950)の報告書によれば、同橋において入射角 30 度、即ち上下震度を想定した震度であれば、その震度は 0.62 となることが記載されている。

木造家屋の事例では詳細な記述は無いが、福井市内の木造家屋が基礎上で滑っていることより、基礎の石と木材間の摩擦係数 0.65 以上の震度であったと推定されている[福井市(1978)]。

④の方法では、末広・久本・田中²⁾により、福井市の西に位置する安居村角折での墓石の跳躍現象から速度が推定されている。飛ぶ前の墓石の重心位置の高さは 125cm であり、落ちた地点での高さが 12.5cm、その間の水平距離が、93cm である。これより計算すると、その墓石の初速度は約 200cm/s である。

⑤の方法では、蛭田・鈴木・谷(1951)が煙突の切断面より、破壊に必要な震度を静力学的に評価している。震度推定を行っている煙突の数は 15 本であり、これらの結果によれば、福井市内では、必要震度の最大が 0.526 であり、煙突の応答としてこれ以上の震度が必要であったことが推察されている。また春江町では、0.354 が必要震度であることが示されている。さらに煙突から推定された福井市での震度は 0.6 と記載されている報告もある[福井市(1978)]。

これらの推定が行われている位置を図 3.1 に示す。また、建築研究所の調査を主に用いた木造家屋の全壊率の分布[竹山・他(1951)]及び地質区分も併せて同図に示す。●は墓石調査位置を示しており、数字は、表 3.2 に示される各地点の番号に対応している。調査個所の地点数は、墓石調査が 94 個所と多く、他の推定は福井市内、安居村、春江町のみである。また、墓石調査が行われている地点は、村落が点在する福井平野と山地の境界部に多くあり、平野の中央部は少ない。ただし、平野中央部でも、墓石等が無かった訳ではなく、墓石の転倒による散乱状態が激しく、墓石の転倒による地震動強さの推定は難しかったため、資料に記載しなかったとされている[小林

(1999), 私信]。これらの方法の内, ①の方法で推定された合震度を統合して図 3.2 に示す。墓石の形状しか記載されていない地点については, そのサンプルの幅高さ比より合震度を改めて推定した。同図より合震度は, 平野中央部の木造家屋全壊率 80%の領域で 0.6 程度, 平野縁辺部の全壊率 40%の領域で 0.5 程度であったことがわかる。

これらの推定は, 単純な仮定からの震度の推定が殆どであり, 以下の点で疑問が残る。

①の方法で推定される合震度は, WEST の式である重力釣合い式, 即ち単体が一端を回転中心とした時に浮き上がる初期条件をおさえる式であり, 単純には地動最大加速度と対応しない。また, 合震度の値が大きくなる程, 加速度は小さく見積もられる[宮野(1982)]ことや, 墓石転倒現象は加速度のみで決まらないこと[Ishiyama(1982)]も指摘されている。②の方法による推定では, 最大変形量を壁の亀裂等の残留変形量から推定しており, 必ずしも動的な最大変形量と一致しないものと考えられる。③の方法では, 摩擦係数を仮定して, その値以上の震度が必要であったと推定されているのみである。④の方法から推定された最大速度も, 墓石の跳躍現象は, 物体と地盤からなる振動系の共振現象であり, 墓石の動きは地動そのものではない[翠川(1994)]。⑤の方法は, 建造物の応答震度であり, 煙突の固有周期に依存するため地動の震度ではない。

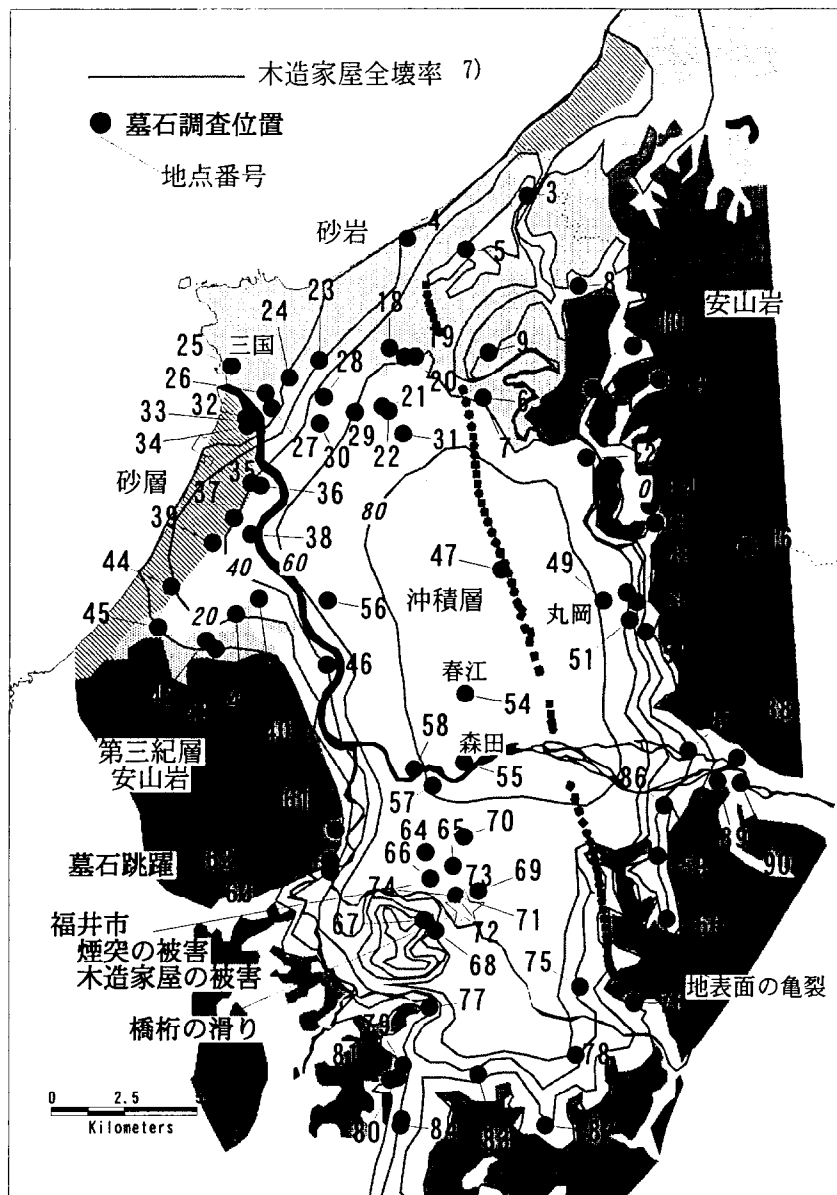


図 3.1 福井地震における震度調査位置

表 3.2(1) 墓石転倒調査位置一覧

No.	町村名	部落名	サン プル	合震 度	最大 速度 (cm/s)	備考	出展
1	大聖寺町	極楽寺	12	0.3	43-89		3
2	三木村	吉崎	5	0.51	>55		3
3	吉崎村		1	0.37	>40	3個の同一墓石転倒	1
4	北潟村	波松	12	0.56	64-133		3
5		北潟西	8	>0.53	>55		3
6		濱坂	3	0.42	52-128		3
7		濱坂(西本願寺)	5	0.22	35-84		3
8	細呂木村	澤	5	0.35	37-108		3
9		山十楽	1	0.24	<52	金峰神社の石碑転倒せず	1
10	坪江村	熊坂	10	0.41	51-116		3
11		笹岡	6	0.46	55-121		3
12		中川	2	>0.6	>53		3
13	剣岳村	権世市野々	5	0.49	60-97		3
14		東山	1	>0.38	>55		3
15	坪江村	川上	1	>0.42	>41		3
16	竹田村		5	0.45	57-138		3
17	金津町	えいぐ寺	5	0.39	48-123		3
18	芦原町	二面	—	0.46		石碑より>0.26/柵の円柱より>0.46	1
19		国影	2	0.3	>45		3
20		二面	4	>0.43	>55		3
21		堀江十楽	4	0.5	49-118		3
22		田中々	3	0.48	35-92	倒れなかった墓石より <0.44, <0.52/倒れた墓石より	1
23	加戸村	加戸	3	>0.51	>50	墓石転倒率100%	3
24		學善	4	0.5	51-105		3
25	雄島村	米ヶ脇	3	0.4	50-120		3
26	三国町	三国北小学校裏墓地	3	0.43	33-77	倒れなかった墓石より <0.38, <0.39/倒れた墓石より >0.45/地盤硬く/被害比較的少ない	1
27		きゅうしょう寺	5	0.4	53-116		3
28	本荘村	角屋	4	0.47	47-117		3
29		宮前	10	0.4	53-105		3
30		西今市	4	0.45	59-127		3
31		中番	—	0.50		倒れなかった墓石より<0.53, <0.50 倒れた墓石より >0.53, >0.47, >0.40, >0.39/比較的 新しい墓石	1
32	新保村		4	0.49	52-130	家屋は傾く程度の被害	2
33		河側	3	<0.43	<102		3
34		丘陵	3	0.51	50-140		3
35	濱四郷村	山岸	6	0.48	60-132	砂丘	2
36		山岸	4	0.49	57-113		3
37		黒目	5	0.5	59-116	墓石が砂の中へめり込む/上下動を 感じ、家屋の倒壊早い	2
38		下野	8	0.5	60-127		3
39		米納津	7	0.45	58-108		3
40	鶉村	波寄	4	>0.55	>56	墓石転倒率100%	3
41		波寄	3	0.54	>55		2
42		八丁	4	0.3	(60)-	墓石転倒率ほぼ0%	3
43		小野	5	0.5	56-142		3
44	棗村	白方・石橋墓地	7	0.45	57-108		3
45		石橋	8	0.41	58-106		2

表 3.2(2) 墓石転倒調査位置一覧

No.	町村名	部落名	サンプル	合震度	最大速度 (cm/s)	備考	出展
46	大安寺村	御所垣内	5	0.5	53-126	深さ2尺5寸、1斗5升桶8分めの水2,3寸残して溢出。振動の山は3回、途中で静止、	2
47	東十郷村	宮領	—	0.6		墓石転倒率100% : >0.39, >0.49, >0.50, >0.51, >0.52, >0.55 : 地変多く、地割れの大なるもの生じ	1
48	長畝村	三本木	2	0.5	41	倒れなかった墓石より<0.52, <0.60 倒れた墓石より >0.43, >0.40, >0.30, >0.50	1
49		松川	3	0.52	>62		3
50		与川	2		>57	墓石転倒率100%	3
51		篠岡	6	0.47	57-145		3
52		内田	3		>55		3
53		丸岡町	はくどう寺	2	0.42	<91	
54	春江町	春江町: 江留上	1	0.63	<122	石柱(花崗岩)53CM東南東に移動<0.65	1
55	森田町	森田第1小学校	1	0.57	>93	小学校の石碑転倒>0.54/自然堤防	1
56	大石村	姫王	1	0.53		倒れなかった墓石より<0.49/倒れた墓石より>0.54/沖積平野	1
57	西藤島村	牧島	1	0.5	>64		1
58	河合村	中角	—	0.63		狛犬の転倒よりもとめた合震度	1
59	吉野村	下吉野	2	0.53	>52		2
60	吉野村	上吉野	9	0.50	58-108	上下動は極めて激しく土台から離れて跳びあがる	2
61	東安居村	深谷	4	0.46	33-106	地盤は砂礫でその下岩盤	2
62		角折	1	0.51	>50	墓石飛ぶ/振動極急	2
63		下市	4	0.51	53-89		3
64	福井市	福井工業専門学校の内	1	0.57	>64	校内の1階床の転倒した機械類 0.32, 0.30, 0.34, 戸棚類 0.35, 0.31, 箱入機械0.47, グランド ピアノ0.4/転倒しない箱入機械	1
65		福井市北部	4	0.6	>53	護国神社の狛犬転倒>0.4: 西別院の墓石より>0.59, >0.52, >0.54, >0.56, >0.43, >0.41	1
66		東本願寺別院	6	0.5	65-119		3
67		藤島神社	—			藤島神社の石碑が折れて転倒	1
68		福井輸出絹織物検査	—			石碑(花崗岩)が倒れる	1
69		千寄下町	—	0.5		墓石0.49, 0.40, 0.41, 0.38全て転倒	1
70		福井火葬場付近墓地	7	0.51	49-102		3
71		福井徳川秀康墓地	4	0.4	40-120		3
72		福井市南西部	2	<0.4	<107	位置の詳細不明のため福井市中心にプロット	3
73		こうげん寺	4	0.5	65-119		3
74		みょうこう寺	1	>0.6	>71		3
75	酒生村	稲津(平地)	2	0.54	>58	転倒率100%。転倒方向は一定しないが、土台がS70Wにつれる。家屋は相当耐えた後倒壊した	2
76		篠尾(山地)	6	0.48	53-94		2
77	六條村	江端	4	0.43	52-129	墓石転倒率100%	3
78	東郷村	東郷	2	0.59	>54	墓石転倒率100%	2
79	麻生津村	今市	4	0.5	52-125		3
80		浅水	3	0.4	57-126	墓石転倒率5%	3
81		麻生津(称名寺)	3	0.45	55-113		3

表 3.2(3) 墓石転倒調査位置一覧

No.	町村名	部落名	サンプル	合震度	最大速度 (cm/s)	備考	出展
82	上文殊村	西大味	5	0.43	54-116	被害の殆ど無し	2
83	下文殊村	太田	4	>0.53	>58	転倒率100% 墓石は1面に散乱して適当な材料を見出すには困難を感じた。なかでも確かと思われるもののみ記載	2
84	神明町	岡野	5	0.4	49-124		3
85		万福寺	4	0.37	34-92		3
86	松岡町		6	0.55	55-134	家屋の倒壊は非常に早い/家屋は90%以上北に傾く	2
87	鳴鹿村	下久米田	1	0.43	>51	倒れなかった墓石より <0.52, <0.48/倒れた墓石より >0.40/被害が少なく/壁に亀裂また	1
88				6	0.29	29-68	
89	下志比村	志比境	6	0.45	52-128		2
90		東古市	4	0.37	28-110		2
91	大野町		6	0.29	31-82		2
92			4	0.30	26-64		2
93	北郷村	小舟渡	3	0.35	49-92		2
94	勝山村		5	0.39	49-98		2

出展番号

1:谷口・他(1951), 2:末広・他(1948), 3:Kishinoue(1950)

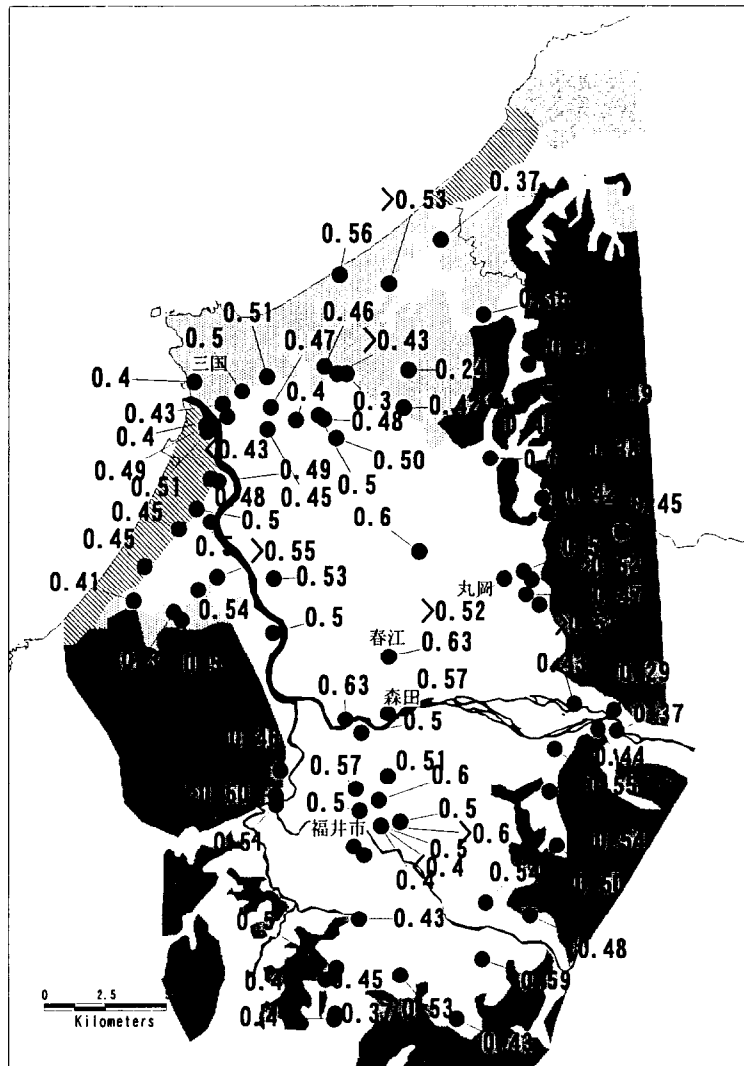


図 3.2 墓石の転倒から推定される合震度

3.1.2 墓石・石碑等単体の転倒から推定される福井地震での最大速度

(1) 単体の転倒から推定される地動最大速度

前述したように、既往の調査報告では、震度推定が殆どであり、構造物の被害と関係の深い地動最大速度の推定は行われていない。一方、単体の転倒は、加速度のみではなく、速度の両者で決まることが指摘されている[Ishiyama(1982)]。これは、単体が静的に浮き上がる初期条件に加え、単体の重心位置が回転中心より外へ出すためには、ある運動エネルギーが必要であることに起因し、両者が転倒の必要条件となる。例えば、同じ幅高さ比の単体でも、地震動の周期特性により、高さの変化で転倒する加速度が異なってくる事がある[宮野(1982)]。この現象も、速度が、転倒に対する重要な要因であることを示唆している。これらのことより、本研究では、単体の転倒から地動最大速度の推定を試みる。

速度の転倒条件の代表的なものとして、ISHIYAMA (1982)は MILINE の論文を引用し、Mallet の式を紹介している。Mallet の式は、式(3.1)で示されるように重心位置が回転中心位置まで移動する際の位置エネルギー E_p と運動エネルギー E_k が等しいとし、整理することで式(3.2)で表されている。

$$E_p = gr(1 - \cos \alpha) = \frac{i^2 + r^2}{2} \left(\frac{vh}{i^2 + r^2} \right)^2 = E_k$$

ここで、 α : 回転中心と鉛直のなす角度

h : 重心迄の高さ

i : 回転半径

v : 転倒に必要な速度

r : 回転中心から重心までの距離

g : 重力加速度

(3.1)

$$v = \sqrt{\frac{8gr}{3} \times \frac{1 - \cos \alpha}{\cos^2 \alpha}}$$

(3.2)

この v は単体の速度であり、衝撃的な地震動の場合には、 v は地動速度と等しくなる。実際には、衝撃的に加わる場合は少なく、単体の応答等を考慮した低減係数が必要となる。ISHIYAMA(1982) は、低減係数を式(3.3)のように提案している。

$$v \approx 0.4 \times (3.2) \text{式} \approx 10 \frac{B}{\sqrt{H}}$$

(3.3)

ここで、 H : 単体の高さ、 B : 単体の幅

本式の 0.4 は、単体のスィープ加振試験より実験的にもとめられた係数であり、転倒に必要な速度の最小をもとめるためのものである。

被害報告より墓石・石碑等の資料の幅及び高さが記されているものを集め、地点毎にまとめたものを表 3.2 に示す。このうち、末広・久本・田中(1948)の資料は、幅高さの関係を示した図よりその値を読み取ったものを用いた。墓石・石碑等は計 87 箇所、サンプル数にして計 363 個である。このサンプル数は、資料より墓石の形状、もしくは幅と高さの寸法がわかるものみの個数であり、調査地点での墓石の全数ではない。図 3.3 はこれら単体のサンプル形状の分布を示す。当時の墓石形状は、現在ほど規格化されておらず、比較的ばらついていることがわかる。墓石の大きさの平均値は、幅 27cm, 高さ 65cm であり、現在の標準的な大きさ(幅約 30cm, 高さ約 75cm)とあまり違いはない。また、同図より幅高さ比から合震度がわかる範囲は 0.2~0.6 程度であり、式(3.3)による最大速度の推定範囲は、20~50cm/s 程度である。

(2) 最大速度の推定法

式(3.3)は、スweep加振による試験結果、即ち単体の応答がほぼ定常状態での評価式であるため、剛体が転倒開始する下限速度に対応する[金子・林(1996)]ものと考えられる。従って、推定地点での実際の最大速度は、本式でもとめた速度より大きいものと考えられる。そこで、本論文での最大速度の推定には以下の仮定を設けた。

- 1) 下限を抑える速度の推定においては、転倒した墓石等に式(3.3)を適用し、その速度をもって当該地点での下限最大速度とした。その地点で転倒した墓石等のサンプル数が幾つかある場合は、その中で最大になる値をその地点の下限最大速度とする。
- 2) 上限を抑える速度の推定においては、単体の応答を考えず、地動速度が水平に衝撃的に加わったと仮定した式(3.2)を転倒しなかった墓石等に適用し、その速度をもって当該地点での上限最大速度とした。その地点で転倒しなかった墓石等のサンプル数が幾つかある場合は、その中で最小になる最大速度をその地点の上限最大速度とする。

図 3.4 に当推定法の概念図を示す。この方法は、墓石の形状が均一であれば、推定幅は 2.5 倍となる。従って、推定速度の精度をあげるためには、如何にこの幅を少なくするような単体の形状を調査できるかに依存するが、福井の被害報告での墓石の形状は比較的ばらついており、ある程度の範囲で推定が可能であると考えられる。

本推定法を検証するため、兵庫県南部地震における墓石転倒調査結果への適用を試みた。使用した資料は主に、墓石の形状が記載されている砂防学会(1995)のデータと筆者らの一人が現地踏査した結果である。図 3.5 に墓石の形状から推定した各墓苑での上限最大速度と下限最大速度の範囲を示す。各墓苑での最大速度の推定には、翠川・藤本(1996)が強震観測点付近の墓石転倒率と強震記録の最大速度より提案した墓石の転倒率と最大速度の関係を用いた。同式による推定最大速度は、墓石形状から推定した下限最大速度、上限最大速度の間に位置しており、本推定法に

よる下限値と上限値は、大きな過ちはおかしていないことが判る。このことより、本推定法を用いて、福井地震での転倒した及び転倒しなかった墓石形状より最大速度の範囲の推定が可能であると考えられる。ただし、兵庫県南部地震においては、各墓苑で、墓石の多数が規格化されており、特徴のある墓石形状の調査が難しく、同図に示される下限最大速度と上限最大速度の推定幅が、大きくなっている。

次に、当該地点での最大速度が、上限に近いのか下限に近いのかを推定するために、転倒率が大きい程上限最大速度に、小さい程下限最大速度に収束するよう、下式により墓石転倒率で重み付け平均で最大速度を推定した。

$$PGV_{AVE} = R \frac{\sum PGV_{Hi}}{N_H} + (1-R) \frac{\sum PGV_{Lj}}{N_L} \quad (3.4)$$

ここに、 PGV_{Hi} は、転倒しなかった墓石 i より推定した上限最大速度、 N_H はその個数であり、 PGV_{Lj} は、転倒した墓石 j より推定した下限最大速度、 N_L その個数であり、 R は当該地点での墓石転倒率である。この最大速度は、図の●で示すように翠川・藤本(1996)の関係式から推定した最大速度と良い一致を示している。即ち、転倒率が 100%に近ければ、上限値に近く、小さければ下限値に近いという定性的傾向も同図より判る。

(3) 福井地震における単体の転倒から推定される最大速度

以上の推定法に従って、表 3.2 に示される地点の中で墓石等の形状が記載されているものに対して各地点の最大速度の推定を行なった。図 3.4 に各地点での最大速度を示す。福井地震の被害報告では、転倒率の記述が無い場合が多く、同図では、最大速度を下限最大速度と上限最大速度の幅で最大速度を示した。ここで、上限または下限最大速度しか推定できなかったものに関しては、値の前に不等号の記号で示している。

この結果をみると、多くの個所で、下限最大速度しか推定できなかったことがわかる。また、下限及び上限が抑えられた地点でもその推定幅は約 1.5 倍～約 2.5 倍程度とかなりばらつくことがわかる。幾つかの地点に着目すると、最初に、上限最大速度の推定値では、長畝村（地点番号 51）での 145cm/s が最高である。ただし、このサンプルは回転を生じており、本推定値は、実最大速度を小さめに評価しているものと考えられる。木造家屋全壊率 80%を超えるような平野中央部で墓石転倒による推定ができたのは、森田町（地点番号 55）、春江町（地点番号 54）の 2 箇所のみである。森田町での最大速度は、93cm/s 以上、および春江町では 122cm/s 以下である。ここで、春江町の墓石調査の記述では「台石上で 53cm 東南東に移動した」[谷口・他(1951)]とされており、転倒しなかった当サンプル値より推定した上限最大速度は、滑りによる入力低減効果により、前述の長畝村と同様、実最大速度を小さめに算定しているものと考えられる。

当時の報告では、墓石の転倒率の記載はそれ程数多くはないが、地点番号 47 の東十郷村、50 の長畝村、23 の加戸村、77 の六条村、78 の東郷村では転倒率 100%とされている。また、平野中心部では、墓石は散乱が激かったこと[小林(1999), 私信]からも、平野内での多くの個所での墓石の転倒率は高く、最大速度は、本推定法で得られた上限最大速度に近いものと推定される。

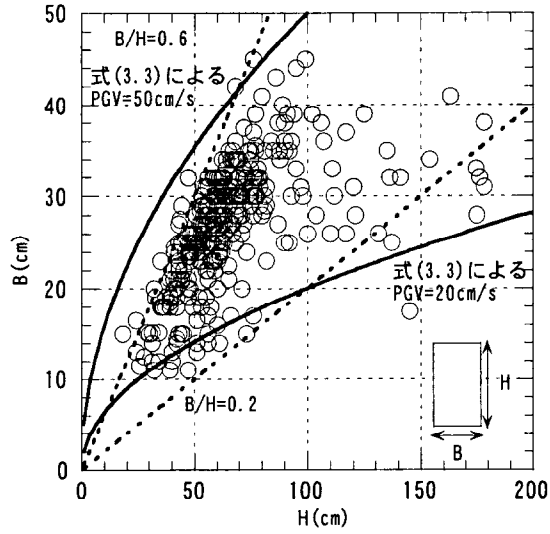


図 3.5 兵庫県南部地震における墓石形状から推定される最大速度

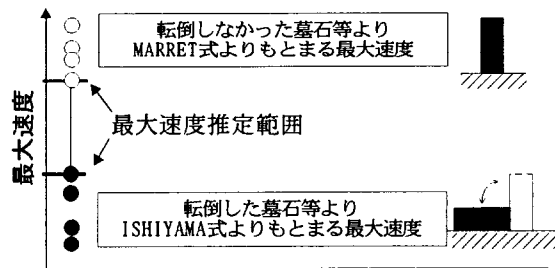


図 3.4 墓石形状から推定される最大速度

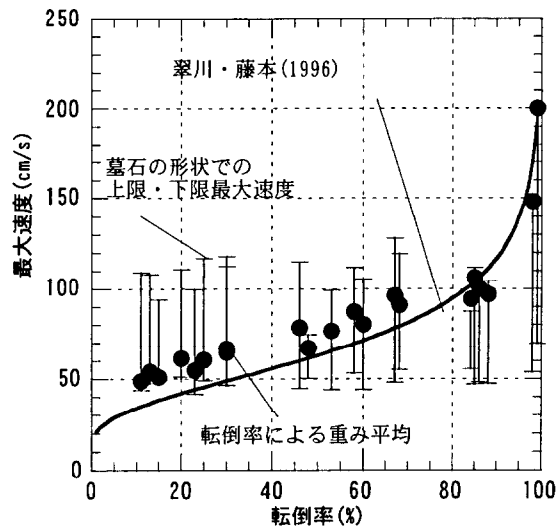


図 3.5 兵庫県南部地震における墓石形状から推定される最大速度

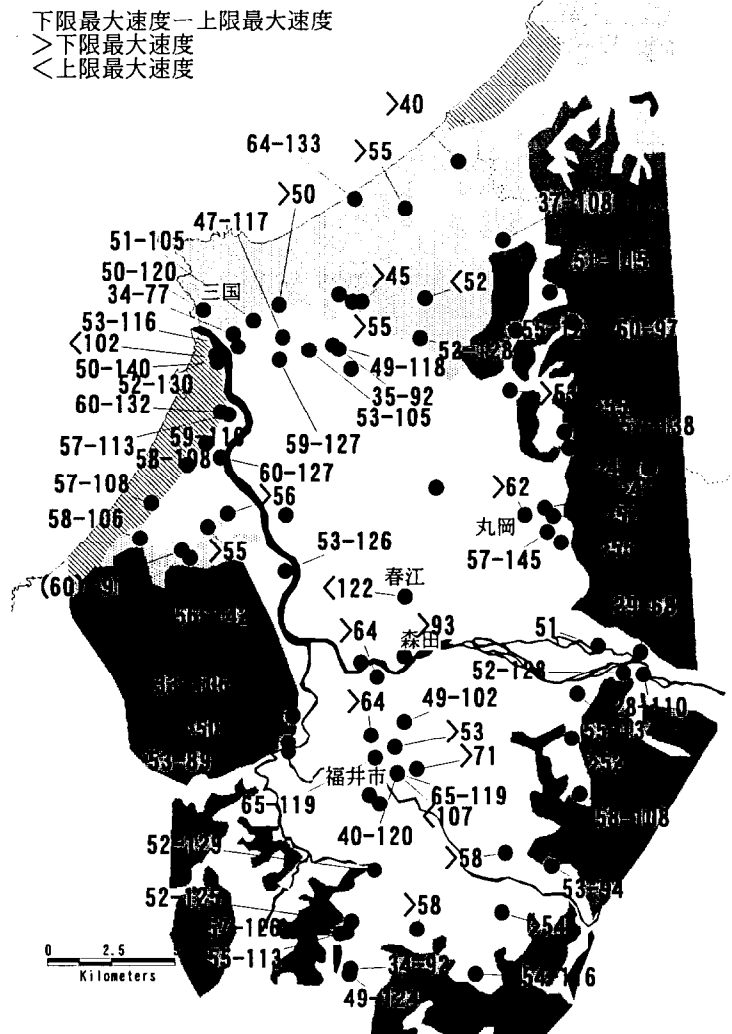


図 3.6 墓石形状から推定される最大速度

3.1.3 構造物の滑りから推定される最大速度

福井地震においては、報告書の中に墓石を含め滑りを生じた現象が多く記述され[谷口・他(1951), 福井市(1978), G.H.Q(1950), 久田(1951)], 幾つかは残留変位についての記述もある[G.H.Q(1950), 久田(1951)]。ただし、これらの現象から推定された地震動強さは、前述したように単純に、仮定した摩擦係数を上回る震度であるとのみ記述されている。また、残留変位より最大応答変位を推定し、その入力地震動強さについて報告されている[谷口・他(1951)]。ここでは、残留変位から構造物最大応答変位の推定が可能であるのか、さらには、最大応答変位から地動最大速度が推定できるのかの2点に着目して簡単な数値実験を行ない考察する。

構造物をほぼ剛体と見なし、滑りの特性を完全弾塑性の履歴で置換した。履歴特性における初期剛性は10Hzとし減衰は0%とし、パラメータとしては、摩擦係数とした。使用した地震波は、福井地震と同様、内陸地震であり、マグニチュードも同規模である兵庫県南部地震の震源近傍で観測された記録を用いた。波数としては、神戸海洋気象台、ポートアイランド、本山、葺合、東神戸大橋、JR 鷹取、神戸大学の計7波とし、完全弾塑性の最大応答変位、残留変位は、入力波の特性により大きくばらつくため、本検討では、各7波の平均値をもって各々評価することとした。

図3.6に最大応答変位と残留変位の関係を示す。摩擦係数が大きくなるに従い、残留変位量は同程度の最大応答変位大きくなる傾向は見られるものの、最大応答変位と残留変位はほぼ比例関係にあり、概略的には最大応答変位量の約6割程度である。このことから前述した②の方法による推定結果は、やや過小評価になるものの大きな誤りは犯していないことがわかる。図3.7に、入力最大速度と最大応答変位の関係を示す。最大応答変位は摩擦係数が小さい程、大きくなる。また、摩擦係数が大きい場合は、入力速度が100cm/sを超えると、最大応答変位は急増する。

(1) 橋桁の滑り

前述したように、福井市内に位置する板垣橋での橋桁の滑り量は76cmである[G.H.Q.(1950)]。この事例では、摩擦係数を0.78[G.H.Q.(1950)]として震度を推定しており、比較的大きな値が設定されている。図3.7より70cm以上の残留変位が生じるためには、約100cm以上の最大応答変位が必要である。図3.8より、推定に用いられた摩擦係数が正しいとすれば、入力速度は数百cm/s程度となり、振動のみの現象で生じたものとは考えにくい。

(2) 家屋の滑り

福井市における戦災復旧のために簡易構造で造られた市営共同住宅では、「大部分の家屋の土台

は基礎と緊結されていない為、南に家屋が移動した。その移動量はさまざまであるが、20～50cmが多いようである。」[久田(1951)]という残留変位が報告されている。また、移動した建物での「家具等に損傷がなかった」[久田(1951)]という記述を考えると、入力された加速度は小さい、即ち、摩擦係数は小さかったものと推察される。図 3.7 より、残留変位が 20～50cm であるためには、30cm～80cm 程度の最大応答変位が必要である。この最大応答変位となるためには、摩擦係数の小さい 0.2 程度の応答変位で 100cm/s～150cm/s 程度の入力速度が必要であることが、図 3.8 よりわかる。

なお、煙突の被害に関しては、その破損個所が、地盤の悪いところでは、底部より 0.5 の高さまで、地盤の良好な地点では、0.5～0.7 の高さに分布していることが記述されている[蛭田・他(1951)]。このことは、単純に 1 次の固有モードのみならず、高次の固有モードを考慮する必要があることを示唆している。従って、単純に 1 次の剪断力係数から地震動強さを推定することは難しいため、ここでの検討からは除外した。

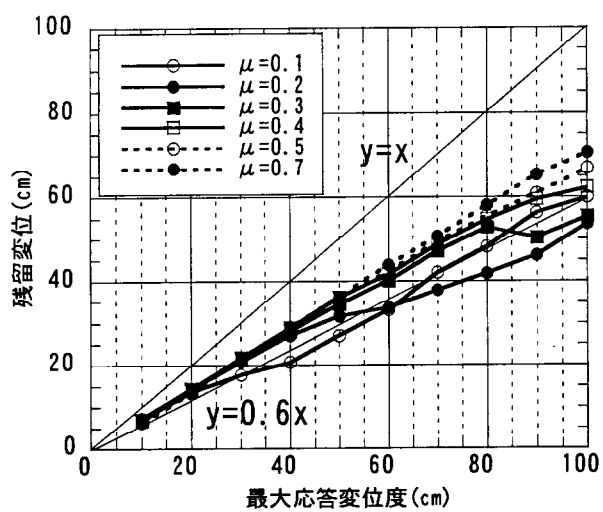


図 3.7 残留変位と最大応答変位の関係

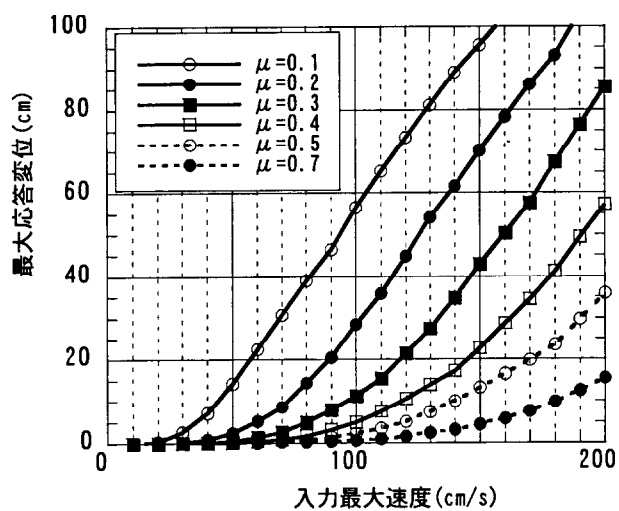


図 3.8 入力最大速度と最大応答変位の関係

3.1.4 考察

墓石等の転倒から推定された下限最大速度は、概略的には、福井平野内縁部で 50cm/s 以上、平野中央部で 100cm/s 以上である。これらの結果は、小さめに見積もってもこの値以上であったことを示している。実際は、前述したように、平野内での墓石の転倒による散乱状態が激しく震度の推定ができなかった[小林(1999), 私信]ことや、幾つかの地点では転倒率 100%と報告されていること、多くの地点で下限最大速度しか推定できない、即ち、転倒しなかった墓石の記述が少ないこと等を考慮すると、実最大速度は、墓石推定速度の上限値に近いものと推察される。これらを踏まえて、福井地震における地動最大速度についての図 3.9 の示す領域毎に考察を行う。

領域 1) : 福井市の南にあたる福井平野南縁部の六条村(地点番号 77)や東郷村(地点番号 78)では、墓石転倒率 100%の記載があり、その周辺の地点での上限速度は、100cm/s~120cm/s 程度の値を示している。このことより、当領域での最大速度は、100cm/s 程度であったものと推察される。

領域 2) : 福井平野東縁部にあたる丸岡町や長畝村付近では、長畝村内での墓地で、墓石の転倒率が 100% (地点番号 50) の記述があること、さらに、その周辺の墓地で下限最大速度のみしか推定できないことにより、長畝村内で推定できた上限最大速度約 150cm/s に近い最大速度であったことが推定される。ただし、前述したようにこの墓石は、滑りを生じており、上限値としては低く見積もっている可能性がある。従って、当領域では、最大速度 150cm/s 程度はあったものと推察される。

領域 3) : 福井市の西にあたる福井平野西縁部の領域での、上限最大速度は、100cm/s 程度である。当領域では、墓石転倒率の記述はないが、東安居村(地点番号 62)で、墓石が跳躍したという記述がある。この現象は、地震時における石・構造物の跳躍現象[翠川(1994)]と同じように物体と地盤からなる振動系の共振現象であると考えられる。その応答倍率を仮に 2 倍程度と考えると 100cm/s 程度となり、墓石形状からもとめた上限速度とほぼ同レベルとなり、当領域では、最大速度 100cm/s 程度であったものと推察される。

領域 4) : 木造家屋全壊率が比較的緩やかに変化する平野北西縁部(地点番号 35~45)及び北縁部(地点番号 18~32)については、墓石転倒率や、滑り等の推察する手がかりが少ない。ただし、木造家屋全壊率 0%にあたる鶉村(地点番号 43)で、転倒率ほぼ 0%と記載されており、下限最大速度が 60cm/s 程度の値が得られている。同地点の表層地質分類は砂岩であり、比較的 maximum 速度が小さかったことと整合している。

領域 5) : 木造家屋全壊率 80%の領域にあたる福井平野中央部では、春江町の約 120cm/s 以下に推

定された上限最大速度，森田の 93cm/s 以上，河合村の 63cm/s 以上のわずか 3 点しか推定できなかった。また，地表に生じた断層近傍の東十郷村では，転倒率 100%の記載はあるが，墓石形状の記載は無く，最大速度の推定はできなかった。これらの領域も前述したように墓石の状態は散乱が激しく震度の推定ができなかった[小林(1999)，私信]ことより，上限最大速度に近いと判断しても良いものと考えられる。ここで唯一上限最大速度が推定された春江町の最大速度は，前述したように滑りを伴って転倒しなかった単体から計算されたものであり，上限速度を低く見積もっている可能性がある。従って，当領域では，最大速度 120cm/s 以上あったと推察される。

領域 6)：福井市内においては，墓石転倒から推定された下限最大速度の最大値は 70cm/s 程度，上限速度としては 120cm/s 程度である。福井市内では，転倒率の記載が殆どないが，前節で示したように福井市内での木造家屋の滑りから推定した最大速度は 100cm/s 程度以上である。以上を考慮すると，福井市内では，下限速度と上限速度の中間的な値 100cm/s 程度の最大速度であったと考えてもよさそうである。

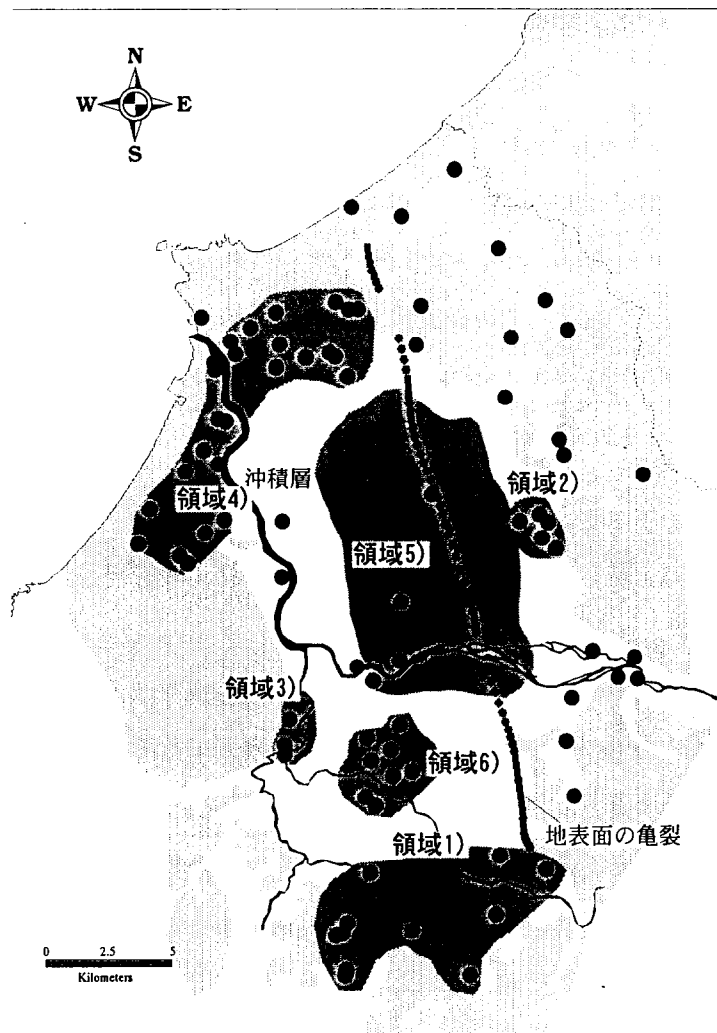


図 3.9 速度推定の領域

3.2 木造家屋全壊率と地震動強さの関係に基づいた福井平野における地震動強さの分布

3.2.1 木造家屋の全壊率と地震動強さの関係

本節では、2章で検討した部落毎の木造全壊率と、前節で推定した各地点での地震動強さ（合震度と最大速度）の関係から各々の上記に示した被害関数を作成することにより、福井地震の地震動強さの面的な分布を推定する。

木造家屋の全壊率と地震動強さの関係は、古くは、物部(1926)により、いわゆる被害関数として正規確率の累積分布関数として表現され、その後、濃尾地震、関東地震についての被害関数が検討されている。福井地震においても、高橋(1951)、谷口・他(1951)、宮野(1984)により、全壊率 P と合震度 K （墓石の転倒震度）との関係が正規分布により評価されている。

$$P(K) = \frac{h}{\sqrt{\pi}} \int_0^K e^{-h^2(K'-K_0)^2} dK' \quad (3.5)$$

ここで、 K_0 は、木造家屋の標準的な耐震力、 h は其の地方の家屋耐震力の一様さを示す指数であり、確率論で用いる標準偏差 σ とは $\sigma = 1/(\sqrt{2}h)$ の関係となる。

一方、最大速度と木造家屋全壊率の関係については、福井地震では検討されていない。近年では兵庫県南部地震の被害よって、林・宮腰(1996)、長谷川・翠川(1998)は、村尾・山崎(2000)らによって検討されており、対数正規分布により、最大速度 V との関係をもとめている。

$$P(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^V e^{-(\ln(V') - \ln(V_0))^2 / 2\sigma^2} dV' \quad (3.6)$$

ここで、 V_0 は被害が50%となる最大速度を示し、 σ は対数標準偏差である。

両者は、正規確率分布関数と対数正規確率分布関数と、地震動強さに対する指標のとり方が異なっている。正規分布と対数正規分布では、裾野の分布が異なってくることが予想されるが、本研究で扱っている合震度の範囲においては、両者に大きな違いは見られない。従って、墓石転倒震度と木造家屋全壊率の被害関数は、既往の研究との継続性を重視して、式(3.5)の正規確率分布で検討を行い、最大速度との被害関数は、式(3.6)の対数正規確率分布で検討を行うこととした。

(1) 合震度（墓石転倒震度）との関係

福井地震における合震度と、木造家屋の全壊率の関係を図 3.10 に示す。回帰にあたっては、高橋(1951)、諸井・武村(1999)を参考として、合震度を $\Delta K = 0.05$ の間隔に区切り、その区間内の全

壊率を平均化したデータを用いて行った。図中○が全地点のデータであり、×が平均化した値である。また、回帰された被害関数を図中実線で示す。推定された K_0 と h を既往の検討結果と比較して表 3.3 に示す。

図 3.11 にこれらの関係を、正規確率紙上にこれらの関係を示す。また、同図には、参考のために、諸井・武村(1999)による兵庫県南部地震の合震度と全壊率の関係も示す。

本研究で得られた平均震度 K_0 は、既往の検討結果と比べると若干高くなっている。この理由として、本研究で得られた被害関数における木造家屋全壊率は、2章で示した構造的被災度の定義に基づいており、他の罹災被災度よりは低めに評価されていることによるものと考えられる。また、耐震力の一様性を示す h は、谷口・他(1951)の結果とほぼ同じ値となった。兵庫県南部地震の結果と比べると、平均震度 K_0 は、0.7 倍程度小さく、一様性については、兵庫県南部よりも大きいという結果であり、既往の研究と比較した諸井・武村(1999)の指摘と矛盾しない結果となっている。

表 3.3 得られた平均震度と耐力の一様性と既往の研究結果の比較

	高橋(1951)	谷口・他(1951)	宮野(1984)	本研究
K_0	0.49	0.42	0.48	0.52
h	19.9	7.5	5.6	7.7

(2) 最大速度との関係

次に最大速度と木造家屋全壊率の関係について検討する。前節で検討を行った各地点での上限最大速度と下限速度とその部落での木造家屋全壊率の関係を図 3.12 に示す。図中●が上限最大速度であり、○が下限最大速度である。ここで、被害関数をもとめるために用いたデータは、これらのデータの内、前節の考察で示した、上限に近い部落と、下限に近い部落と判断されたデータ×のみを用いて回帰を行なった。図中実線にて被害曲線を示す。なお、得られた平均最大速度 V_0 は、 $V_0 = 84\text{cm/s}$ であり、自然対数標準偏差 σ は $\sigma = 0.42$ である。合震度からもとめた耐震力の一様性 h と、対数標準偏差の関係をみるために両者を変動係数で示すと、合震度が0.18であり、最大速度が0.44となっており、最大速度に関する分布の幅が大きいことがわかる。

図 3.13 に、1995 年兵庫県南部地震でのデータ[日本建築学会近畿支部(1995)]に基づき、構造被害に着目した 1978 年以前の木造家屋の倒壊に関する被害関数[林・宮腰(1996)]と本研究で得られた福井地震における木造家屋の全壊率の関係を正規確率紙上で比較して示す。兵庫県南部地震における全壊率 50%を与える平均最大速度が 126cm/s であり、福井地震では 84cm/s である。両者の間には 1.5 倍程度の差があり、福井地震における木造家屋の耐震性は兵庫県南部地震の時と比較して小さかったことが指摘できる。また、福井地震の全壊率 30%の領域は、兵庫県南部地震での全壊率 10%の領域にあたる。これらの指摘は、罹災被災度基準に基づき、墓石転倒震度と全壊

率の関係を検討した諸井・武村(1999)の指摘と一致しており、墓石転倒震度のみならず、最大速度においてもこの関係が成立つことを示している。

3.2.2 地震動強さの分布の特徴

得られた木造家屋の全壊率と地震動強さの被害関数より、木造家屋の全壊率分布に基づいて福井地震における地震動強さの面的な分布が推定できる。その関係を整理すると表 3.4 のようになる。前述した全壊率において、竹山・他(1951)の調査結果は、修正を行わず評価するため、全壊率 100%の部落が存在する。この場合、被害関数から地震動強さを推定することはできないので、全壊率 99%として検討する。従って、上限最大速度としては 223cm/s、上限合震度は 0.73 となる。

図 3.14(a)に合震度、図 3.14(b)に最大速度の分布図を各々示す。なお、最大速度に関しては、全壊率 100%の部落位置及びその最大速度、墓石の転倒から推定された最大速度も示している。分布図によれば、福井平野の中央部において、合震度 0.6 以上、最大速度 120cm/s 以上であり、中央部の他にも、南東縁部及び北潟湖にも地震動の強い部分が見られる。

この推定結果は、前節で推定した墓石転倒、構造物の滑り等から推定した最大速度と概ね良い対応を示している。即ち、図 3.9 に示される領域 1)の推定結果が、100~120cm/s であったのに対して、木造家屋の被害関数から推定された結果は概ね 120cm/s 以上の領域となっている。また、平野北西縁部である領域 4)では、60cm/s 程度と推定されたが、概ね全壊率から推定された最大速度と対応している。一方、福井市街およびその周辺部の領域 3)では、構造物の滑り等から 100cm/s 程度の値が推定されている。この結果は、周辺部では、木造家屋の全壊率から推定した最大速度と良い対応は示すものの、市街地から足羽山にかけて全壊率から推定した最大速度は小さくなっている。これは、2章で検討したように、福井市街地の木造住宅に関しては、軽屋根の建造物が多く、周辺部落における当該地方従来の木造家屋に比べ、全壊率が低かったことに起因しているものと考えられる。

全壊率から推定した 120cm/s 以上の領域では、墓石の転倒から推定された丸岡付近[領域 4)]での 150cm/s 程度の領域が福井平野東縁部に見られる。さらに、その領域から、北西にかけて、全壊率 100%部落が存在し、その推定最大速度は 200cm/s を越える。200cm/s を越える領域の推定は、竹山・他(1951)の調査が、平野周縁部に限られるため、その分布を推定することは難しいが、●で示したように丸岡町から芦原町にかけて存在し、その方向にかけての最大速度はかなり大きくなっていたことが推察できる。

一方、合震度と、最大速度における耐力の一様性は前述したように異なる。合震度（墓石転倒

震度)は、前章でも考察したように、墓石の形状に応じ、最大加速度にローパスフィルターをかけたものに対応していると考えられる。従って、当該地方の建造物の耐力分布が一様であると仮定すれば、この差は、卓越周期の差によることが考えられる。そこで、合震度 K を加速度と見なして、最大速度 V との関係より、見かけの卓越周期 T_a を計算すると、表 3.4 の右欄のようになる。

$$T_{ap} = 2\pi V / (Kg) \quad (3.7)$$

全壊率 80%以上である福井平野中央部では、1.3 秒程度の地震動が卓越し、全壊率が下がる福井平野の周辺部になるにつれて卓越周期が短くなる傾向が見られ、福井平野の地盤構造を反映しているものと考えられる。

表 3.4 木造家屋の全壊率と各地震動強さの関係

全壊率 (%)	最大速度 (cm/s)	合震度	見かけの周期 (sec.)
20	60	0.45	0.84
40	76	0.50	0.96
60	94	0.55	1.07
80	120	0.60	1.26
99	223	0.73	1.92

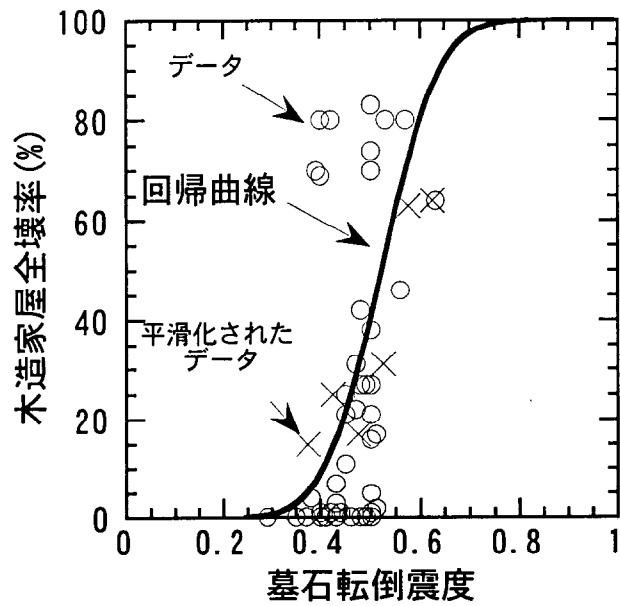


図 3.10 木造家屋の全壊率と墓石転倒震度の被害関数

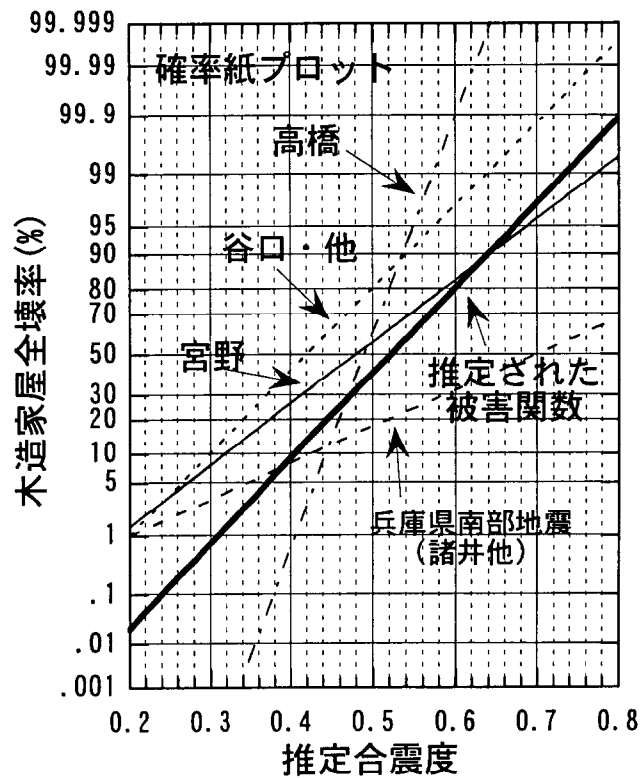


図 3.11 木造家屋の全壊率と墓石転倒震度の関係

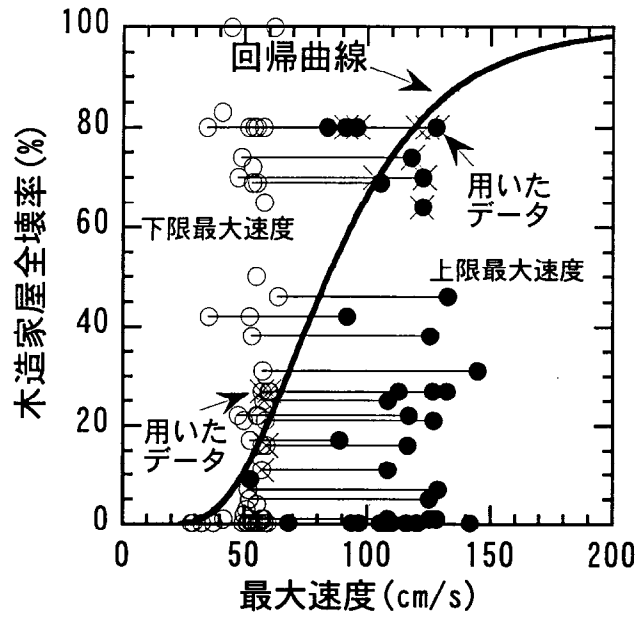


図 3.12 木造家屋の全壊率と最大速度の被害関数

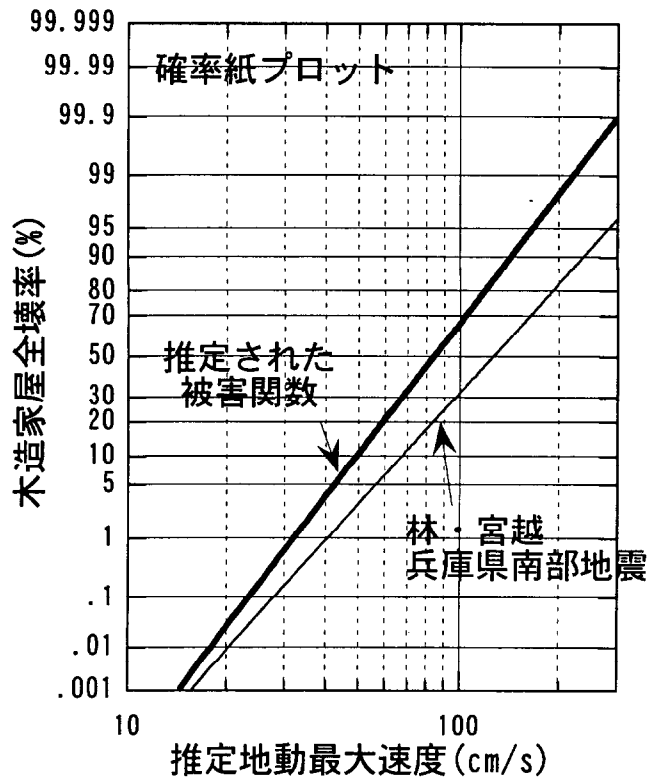


図 3.13 木造家屋の全壊率と最大速度の関係



● は全壊率100%の部落
 ● 墓石転倒・滑り等
 より推定された
 最大速度

(a) 合震度 (墓石転倒震度)

(b) 最大速度

図 3.14 被害から推定された地震動強さの分布

3.3 福井地震の強震動シミュレーション

本節では、前述した被害資料に基き推定した地震動強さの情報のみならず、スペクトル特性等時刻歴の情報を得るために、近年、急速に発展した強震動シミュレーション手法を用いて、福井地震における震源近傍の地震動波形の推定を行う。また、シミュレーションを行うことにより、震源、地盤が、福井地震における震源近傍の地震動強さにどのように影響しているかを検討する。

3.3.1 シミュレーション手法の概要

シミュレーションは、入倉・釜江(1999)によるハイブリッド合成法を用いる。即ち、長周期領域では、3次元有限差分法[空間4次、時間2次の差分近似、正方の staggered grid による、Graves(1996)、Pitarka et al.(1998)]により、福井平野の地盤構造及び震源を含めて理論的に地震動を合成する。一方、短周期領域は、 ω^{-2} モデルに基づく統計的グリーン関数[Boore(1983)]を用いて要素波形となる小地震の波を人工的に作成し、波形合成法[入倉・他(1997)]を用いて計算サイト直下の基盤層での福井地震の波形を合成する。その後、サイト直下の地盤構造を用いて、鉛直入射仮定の1次元地盤増幅特性を基盤層での水平2成分、鉛直1成分の波形に対して合積することでサイトの波形の推定を行う。両者を別々に計算した後、3次元有限差分において計算された波形に関しては、ローパスフィルターを施し、統計的波形合成法で計算された波形に関しては、ハイパスフィルターを施し、時刻歴で両者を足し合わせる。尚、短周期、長周期を分けるコントロール振動数は、3次元有限差分のグリッド間隔による計算精度、震源時間関数の短周期の精度等により支配されるが、一般的には1Hz程度が用いられる[入倉・他(1999)]ことが多い。

一般的に、強震時における地表面の波形には、表層地盤の非線型性の影響を強く受けることが今までの観測結果より指摘されている。特に、福井平野を被う軟弱な沖積層においては、その影響が大きいものと考えられる。そこで、上記の方法により推定した工学的基盤（支持地盤相当）面までの波形を入力として、表層地盤の非線型を考慮した地表面の波形を計算することとした。福井地震における震源近傍での地震動強さは、前節までの検討により、200cm/s程度になることが推定されており、シミュレーションにおける地盤の歪レベルも%のオーダーになることが予想される。このレベルになると、等価線形化手法の適用範囲を超えるものと考えられ、本論文では、時刻歴非線形の応答計算を行うこととした。その際、計算サイト直下の地盤構造を1次元モデルに反映させ、水平成分のみを対象とすることとした。図3.15にシミュレーションのフローを示す。

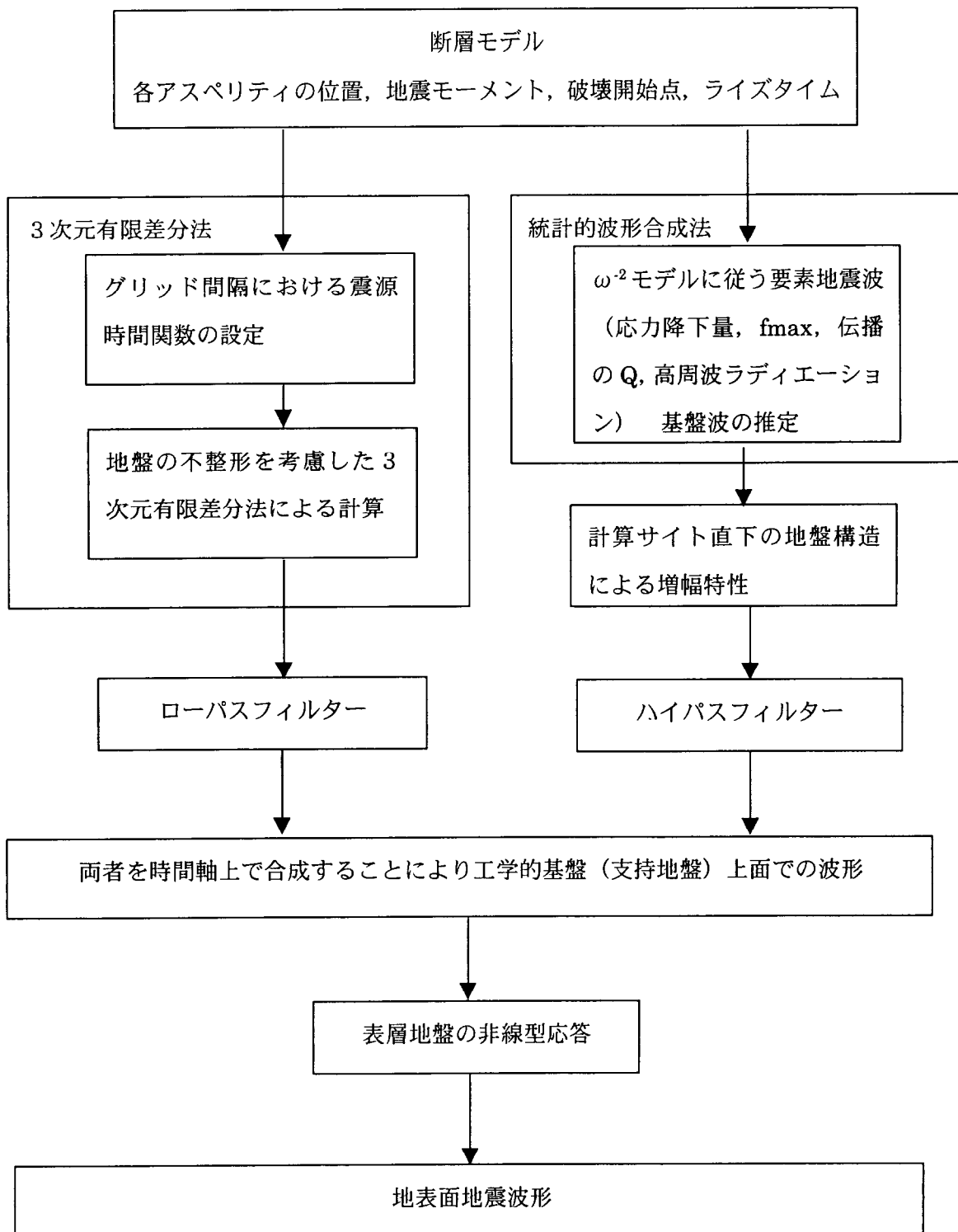


図 3.15 シミュレーション手法のフロー

3.3.2 各パラメータの設定

(1) 断層モデルの設定

• 福井地震における震源位置

各研究者により報告されている福井地震の震央位置を図 3.16 に示す。地震発生当時の検討の中では Koshikawa(1950)が、P波の走時曲線より、震央位置を定めており、他の被害報告書にも引用されている。この位置は、本丸岡の南ほぼ 2km のある。一方、気象庁(1982)は、過去の地震について、電算処理を行ない、震央位置を定め直している。それによれば、福井平野北西部に位置しており、その間約 8km の差がある。この震央位置は、その後、多くの文献（例えば、理科年表、日本被害地震総覧、断層パラメータハンドブック）により、引用されている。さらに、浜田(1990)は、気象庁(1982)の震央位置については、震源計算法の違い、また、観測資料の全部が調査に用いられていないことにより、再度見直しを行なっている。その結果は、本丸岡の北東 3km に推定されており、Koshikawa(1950)とも大きく矛盾しない結果となっている。

余震の分布は、Omote(1950)により推定されている。Omote(1950)は、地震後の 7 月の期間中、余震観測を行ない、P-S 時間によりその余震位置を推定した。その分布を図 3.17 に示す。同図には、地震月報に記載されている 1948 年～1968 年間の当該地域で起きた地震の震央位置及び新編活断層に記されている活断層の分布図も合わせて示している。同図によれば、余震の分布は、福井平野内で東側に偏在して発生していることがわかる。これより、後述する断層モデルでは、地表亀裂線より、東側に傾斜している断層面を推定している場合が多い。また、その後(1948 年～1968 年)の気象庁が観測した地震の震央分布は、特に東側に偏在することなく、平野内いずれの個所でも地震が発生している。

• 既往の断層モデルの概要

日本の地震断層パラメータハンドブック[佐藤(1989)]には、Kanamori(1973)、吉岡(1974)、長谷川(1986)によるものが記載されている。これらを基に、福井地震における推定断層モデルについて概観する。

Kanamori(1973)は、地表面亀裂の走向と余震域の広がりから震源断層を $L=30\text{km}$ 、 $W=13\text{km}$ と推定し、地殻変動の水平成分の変動量により、滑り量を決め、図 3.18(a)のような断層を推定している。また、この断層モデルから推定される変位波形と阿武山の観測記録を比較することで、概ね、断層モデルが適切であり、震源は多重震源であり、最初のイベントより、約 9 秒後に第 2 イベントが発生し、最初のイベントに対して 4 倍の変位振幅であったことが示されている。モーメント解放量は、 $3.3 \times 10^{26} \text{dyne/cm}$ 、応力降下量は、83bar であることが推定されている。

吉岡(1974)は、Kanamori(1973)のモデルを基に、余震分布が地表面亀裂の東に偏在すること、上下の地殻変動が東側隆起を示すことから、地殻変動の水平・上下のデータに適合するように、東落ち 80 度の逆断層を推定している。図 3.18(b)にそのモデルを示す。

岩崎・他(1983)は、副断層が福井県庁の直下を北東-南西に走っていること [G.H.Q(1950)]より、副断層の走向を推定し地殻変動データを良く説明できる 2 枚断層面を推定している。図 3.18(c)にそのモデルを示す。

長谷川(1986)は断層面を 8 枚の小断層に分割しそれぞれの断層パラメータを未知数として地殻変動データの非線型インバージョン解析を行っている。その推定結果を図 3.18(d)に示す。モーメント解放量は、 1.8×10^{26} dyne/cm、応力降下量は、全体で 103bar である。

近年の検討例では、鷺谷(1999)が、見直しを行った地殻変動のデータに基づき、地表面亀裂の断層線に鉛直な断層面を推定し、インバージョンにより、断層面内の不均質滑りを推定している。その断層面は、図 3.18(a)に示される Kanamori(1973)のモデルとほぼ同じである。モーメント解放量は、 2.3×10^{26} dyne/cm である。また、断層面を伏せ角をパラメータとして、観測データからの誤差評価を行なった結果によれば、東落ち 70~80 度の時に、誤差が小さくなったことが報告されている。

以上までが、主に地殻変動に基づく断層モデルの検討例である。一方、菊地・他(1999)は、阿武山、豊岡、亀山、岐阜の記録を用いて、波形インバージョンを行っている。その際に用いた 4 の点震源に位置を図 3.18(e)に示す。結果は、今までと異なり、西落ちの正断層タイプの地震であり、気象庁(1982)の震源位置より破壊が開始し、第 2 イベントとなる、破壊開始点より南 10km の浅い領域で最大モーメントの開放があることを示している。また、その時間遅れは、8 秒である。モーメント解放量は、全体で 2.1×10^{26} dyne/cm、応力降下量は、全体で 100bar である。

宮武(1999)は、実際の断層モデルは推定していないが、鉛直断層において構造物の転倒方向に着目し、震源パラメータの推定を行っている。その結果によれば、断層面北側から破壊が開始し、南側のアスペリティにおいては、鉛直下方からバイラテラル的に破壊を起こす断層を考慮することにより、福井平野の北側で東西方向の転倒が、南側で、南北方向の転倒が説明できるとしている。

入倉・他(1999)は、長周期側は、3次元差分法により理論的に強震動を推定し、短周期側は、1次元地盤構造を反映させた ω^{-2} モデルに従う小地震統計波を用いて大地震を合成する統計的波形合成法を用いて推定するハイブリッド法による震源近傍の強震動の再現を行っている。その際に、断層モデルは、図 3.18(f)に示す 2 種類を用いて検討している。一つは、吉岡(1974)による東落ちの逆断層タイプ、もう一つは、菊地・他(1999)による西落ちの正断層タイプの断層モデルである。この断層面内に、統計的モデルから推定し、 12×12 km の大きさのものと、 7×8 km の大き

さを有するアスペリティを2個作成している。その結果、西落ちのタイプは、最大速度で200cm/s を超えるところがあり、ほぼ同規模である1995年兵庫県南部地震の観測からの推定値と良く対応することを指摘している。しかしながら、どちらのモデルが良いかについての言及は行われていない。また、鉛直断層についても同モデルで検討しており、その結果は、被害分布と異なることも指摘されている。

• 本論文で用いる断層モデル

本論文では、余震の分布が、東側に偏在していること、地殻変動データから推定されている断層モデルのほとんどが逆断層タイプであること、浜田(1990)が決め直した震央位置が地表面亀裂の東側に推定されていること等より、吉岡(1974)の東落ち逆断層の断層モデルを用いてシミュレーションを行なう。また、断層面内の不均質性は、破壊の大きな領域のみをモデル化するアスペリティモデルを用いる。本シミュレーションにおいては、近年の震源インバージョン結果を基に作成された震源の統計モデル[Somerville et.al(1998)]を参考に推定された入倉・釜江(1999)のモデルを参考とした。彼らがシミュレーションに用いた、断層内のアスペリティの分布を図3.19に、表3.5にその諸元を示す。

福井地震のように震源の破壊過程が不確実な場合、このような統計的な震源モデルを用いることは、現在、最も有効な手段であると考えられる。しかしながら、アスペリティ位置や、破壊開始点等、未だ不確定性の伴うパラメータもある。そこで、本研究においては、次の5ケースについてシミュレーションを行い、各々比較することとした。5ケースの変更点を表3.6にまとめて示す。変更点の概要は下記に示すとおりである。

① Case1: 入倉・釜江(1999)による Model 1

② Case2: Case1の各々のアスペリティの位置を南方向に4km程移動させる。

これは、長谷川(1986)や、岩崎・他(1983)の断層モデルの北端が金津付近で止まっていること、鷺谷(1999)による断層面北部5~6km付近の滑り分布が小さいことによる。

③ Case3: Case2のモデルにおいて、第1破壊であるアスペリティ No.1の破壊開始点を、断層南端最深部とする。

これは、浜田(1990)の震央位置が、より南側に位置していることによる。

④ Case4: Case3のモデルにおいて、アスペリティ No.2の破壊開始点をアスペリティ中央最深部とした。

これは、釜江(1999)、宮武(1999)の破壊開始点を変動させたパラメータスタディを参考に、計算されるであろう地動速度の分布と被害分布の関係より設定した。

⑤ Case5: Case4のモデルにおいて、地震モーメントを $2.6 \times 10^{17}(\text{Nm})$ から、 $2.1 \times 10^{17}(\text{Nm})$

に変更

菊地の波形インバージョン結果を参照

図 3.20 に各 Case のアスペリティ位置と、破壊開始点位置を示す。

(2) 地盤モデルの設定

・ 深層地盤

福井平野における更新世の基底にあたる新第三紀層迄の深さは、天池・他(1984)がエアガンと自然地震より丸岡周辺において、深度 200~300m あることを推定している。若松・野畑(1948)は、丸岡を通る福井平野東西断面で行った微動観測の H/V 卓越周期より、図 3.21 に示すような速度構造を推定している。また、山中・他(2000)は、特に、新第三紀以深の地震基盤相当層の深さを調査することを目的として、微動アレイ観測により、福井、春江、坂井、丸岡、三国の 5 地点でのその深さの推定を行っている。その結果によれば、新第三紀層は、概ね 200~300m の深度に存在している。これらの検討結果も、福井平野内における 3 次元的地盤構造を推定するまでにはいたっていない。

一方、福井県(1997)では、地震被害想定することを目的として、当該地方のボーリング資料を集め、154 種類の地盤モデルを作成し、福井県全域にわたり 500m メッシュ毎に各々当てはめている。設定された新第三紀層上面の深さ分布は、図 3.22 (一部修正) に示すとおりである。この分布図において、元となる基盤に迄達するボーリングは殆ど無く、基本的には推定深度となっているものの、新第三紀層を別の方法で推定した天池・他(1984)や若松・野畑(1998)、山中(2000)の推定地点での結果は、概ね矛盾しない構造となっている。3 次元構造とした場合の不確実性は残るが、現時点での得られる知見として、本シミュレーションでの新第三紀層の深さ分布は、本構造を用いることとする。なお、足羽山等新第三紀層が地表面に出ていると考えられる地点においては、深さ分布を 0m と修正を行った。

前述した山中・他(2000)における、新第三紀以深の地震基盤相当層の深さは、福井平野中央部で約 1km が推定されている。また丸岡、三国、福井では、比較的浅く深さ 700m 程となっているが、平野全体の面的な構造は未だ不確定な部分が多い。そこで、本論では、その層は深さ 1km の平行成層と仮定した。また、それ以深の地殻の構造は、入倉・釜江(1999)のモデルを参考とした。

・ 表層地盤

福井平野は、ほぼ全域にわたって沖積層が堆積し、N 値 0~2 の極軟弱層が表層部を被い、その下層に砂と粘土の互層が存在する。2.2.1 でも述べたように、福井平野における沖積層の基底深さは、図 2.13 および図 3.24 に示すように福井県(1986)によって比較的良く調査されている。た

だし、図 2.13 に示されるように、N 値 0~2 の極軟弱層が福井平野を一面に覆っているに対して、沖積層厚が丸岡~松岡・福井間で 0m になっている等の矛盾がある。また、沖積層 0m の位置から九頭竜川上流に向かって沖積層厚が深くなっているが、図 2.12 に見られる表層地質によると、その領域は礫質堆積物が存在し、平野内の大半を占める泥質堆積物とは異なっている点等、未だ不明瞭な領域も存在する。

福井平野における速度構造のデータは少ないが、図 3.25 に示すように福井平野南部の福井県土木事務所において、170m までの PS 検層が行われている。PS 検層の結果によれば、前述した沖積層で 80~255m/s の S 波速度が得られている。N 値 0~2 の極軟弱層が 80m/s 程度の層に相当し、以深 255m/s 層までが沖積層となっている。本シミュレーションにおいては、極軟弱層を含めた沖積地盤を 1 層とし、その S 波速度を PS 検層結果の平均的な値として 150m/s と仮定した。

その下には更新世の層が存在し、S 波速度で 570m/s のシルト混じりの礫層が、その下には 240m/s と比較的速度の遅いシルト混じりの細砂及び粘土層によって構成されている。この地層の平均的な S 波速度は 300m/s 程度となる。更新世上位の地層にあたる本層の層厚に関する面的な情報は少ない。そこで、福井県土木事務所の地盤構造における新第三紀層の層厚と、 $V_s=300\text{m/s}$ である本層の層厚の比が、福井平野全体に適用できると仮定して、本層の層厚分布を推定する。その結果を図 3.22 に示す。

上記の 2 層までを表層地盤とし、シミュレーションにおいて非線型性を考慮することとした。一方、PS 検層の結果によれば、上記 2 層の下層に存在する更新世の地層の S 波速度は安定しており、670m/s の値を示している。以上より、新第三紀以浅を 3 層構造とし、沖積層(A)と更新世上位層(B 層)、更新世下位層(C 層)にモデル化した。

このモデル化の基となっている速度構造は、福井県土木事務所の PS 検層結果を参考として、全平野に適用している。しかしながら、前述したように同じ沖積層でも、礫質堆積物や、粘質堆積物等、場所によってはその特性が異なることが考えられる。それらを適切にモデル化するための数多くの地点の速度構造調査の情報が必要であり、現時点で、それらの情報は殆ど得られていない。従って、未だ地盤モデル化に伴う不確実性は残されるものの、本シミュレーションにおいては、上述した速度構造、及び、層厚を用いた。

表層地盤と深層構造をまとめた地盤定数一覧を表 3.7 に示す。また、代表的な地点(丸岡、春江、森田、金津、福井、三国)において、想定した 3 次元地盤モデルにおける各地点での直下の 1 次元地盤構造を用いて、鉛直に入射する S 波及び P 波に対する弾性時の地盤増幅特性を図 3.26 に示す。なお、減衰は表 3.7 に示す Q に振動数の 1 乗を考慮した振動数依存の減衰を用いた。

深い構造から 1 次卓越周期は、どの地点も概ね 2 秒であるが、これは、地震基盤層(E 層)を深

さ 1km に固定したためと考えられる。新第三紀層(D 層)の深さに応じて卓越周期は 0.8~1.2 秒に変動していることがわかる。

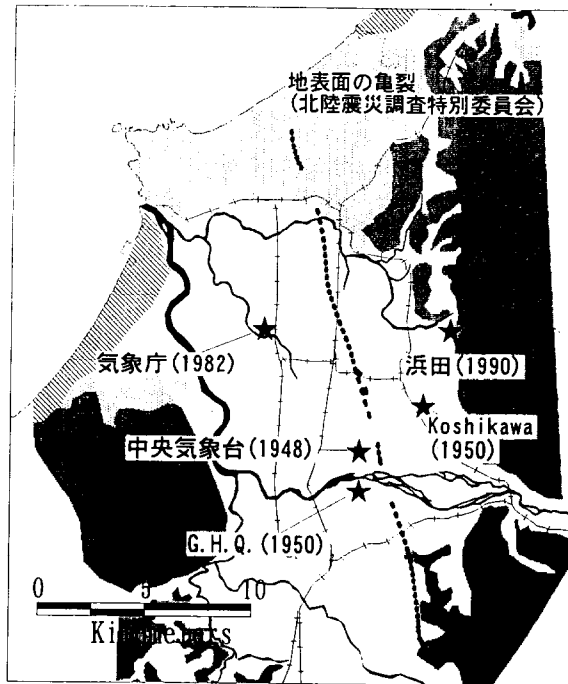


図 3.16 福井地震の震央位置

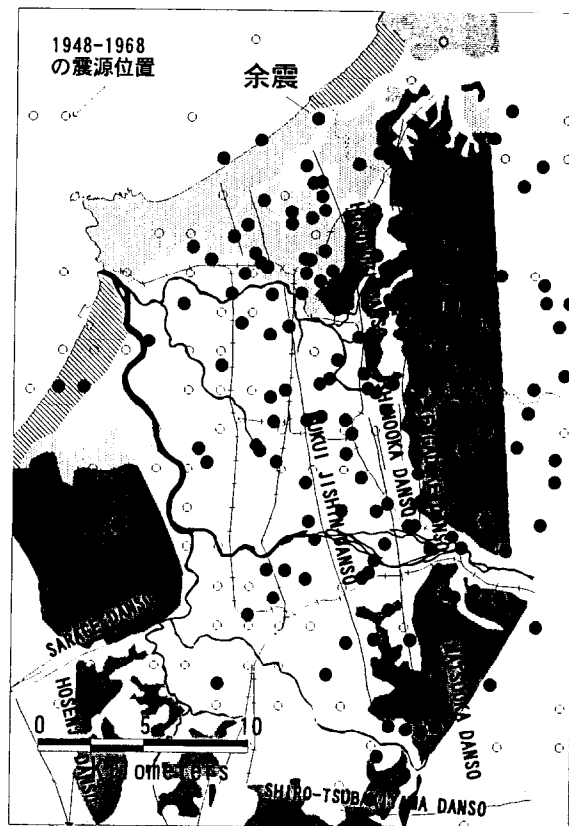
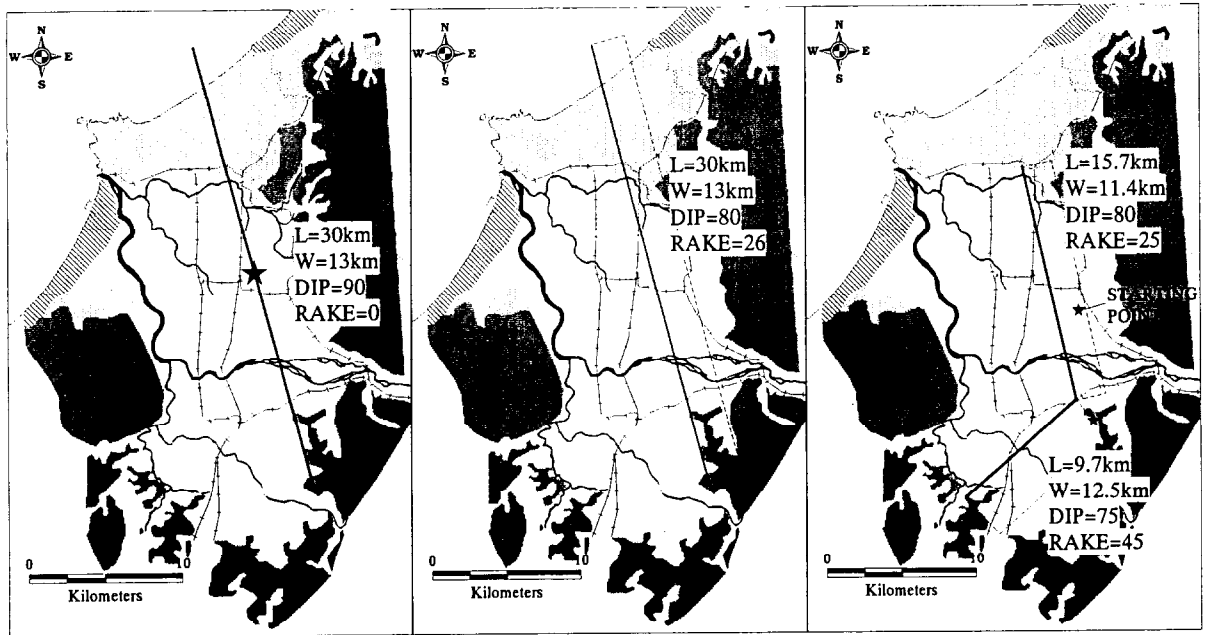


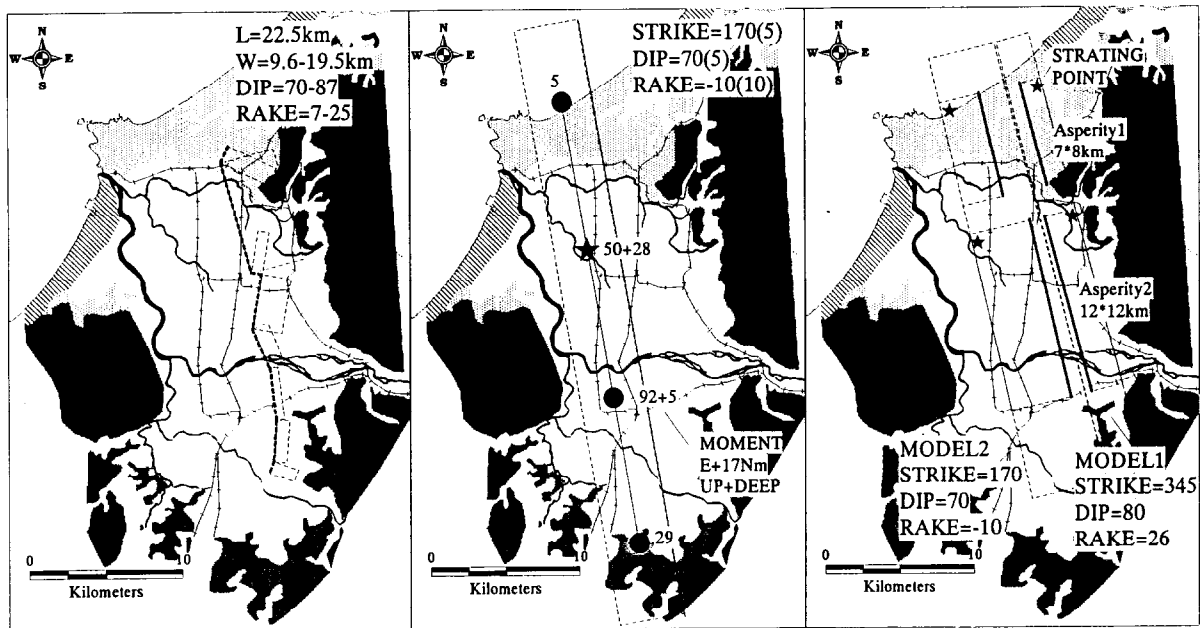
図 3.17 余震の震央位置及び過去(1948-1968)の地震の震央位置と新編日本の活断層



(a) kanamoriによる

(b)吉岡による

(c)岩崎・他による



(d) 長谷川による

(e)菊地・他による

(f)入倉・他による

図 3.18 提案されている断層モデルの代表例

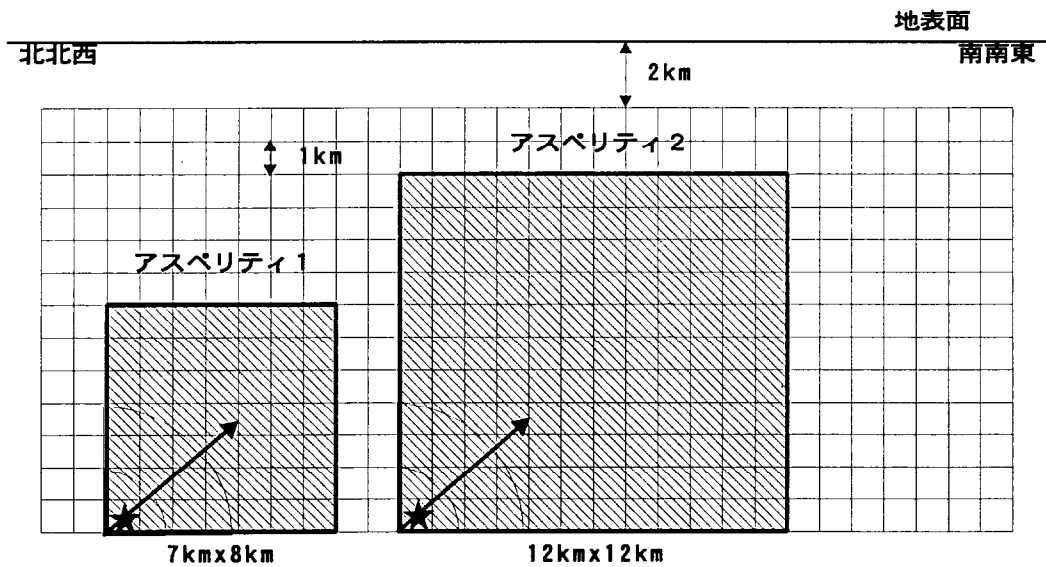


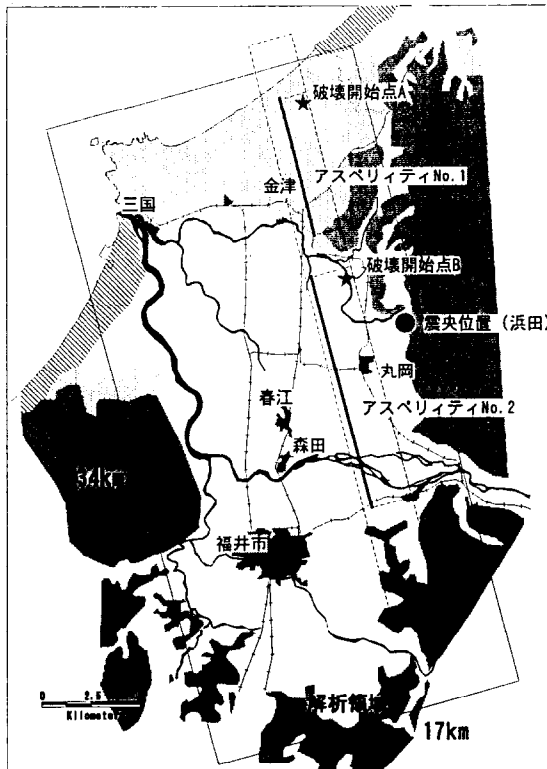
図 3.19 設定された震源のモデル図(入倉・釜江(1999)より)

表 3.5 震源パラメータ(入倉・釜江(1999)より)

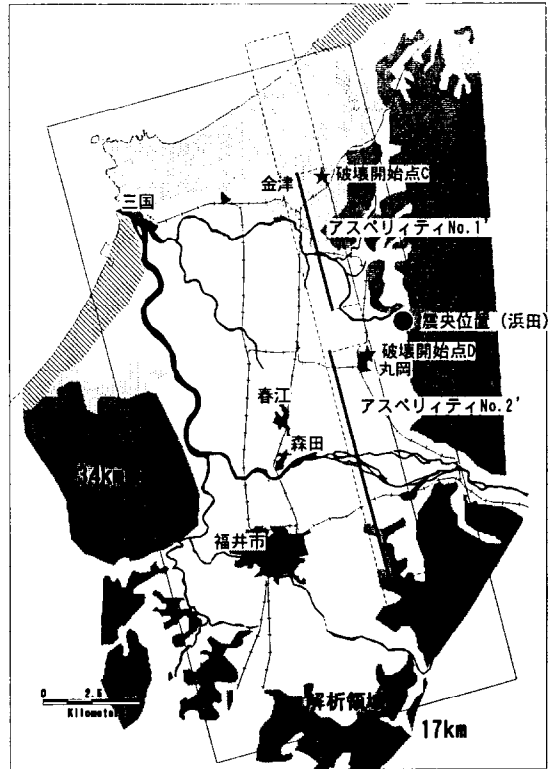
パラメータ	用いた値	備考
走向、傾斜、滑り	345°、80°、26°	吉岡(1974)
地震モーメント	2.6*10 ¹⁹ (Nm)	
アスペリティ個数	2	菊池(1999)
破壊領域	908km ²	Somerville et al.(1998)
アスペリティ総面積	204km ²	Somerville et al.(1998)
最大アスペリティ面積(No.2)	148km ² (12km*12km)	Somerville et al.(1998)
他のアスペリティ面積(No.1)	56km ² (7km*8km)	204-148
地震モーメント(No.2)	8.3*10 ¹⁸ (Nm)	$M_{02}=M_0*S_{a2}/S*2.0$
地震モーメント(No.1)	3.2*10 ¹⁸	$M_{01}=M_0*S_{a1}/S*2.0$
ストレスドロップ(No.2)	113(bar)	$\Delta\sigma=7/16*M_0/r^3$
ストレスドロップ(No.1)	186(bar)	
ライズタイム	1.3 秒	Somerville et al.(1998)
ライズタイム (短周期)	0.6 秒	釜江・入倉(1998)

表 3.6 各 Case の変更点

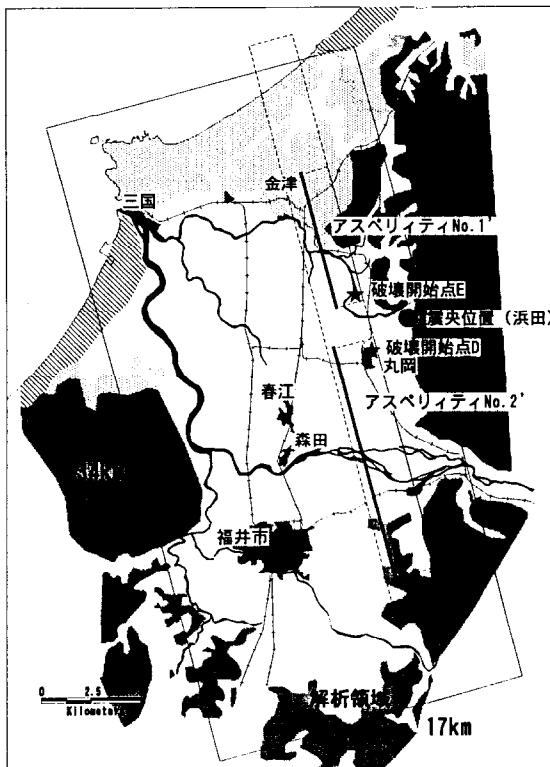
Case 名	アスペリティの水平位置	破壊開始点	地震モーメント M_0	ライズタイム T_r
Case1 入倉・釜江(1999)の Model 1	菊地・他(1999)が推定した震源モーメントの重心位置を東に移動し, 吉岡(1974)の断層面に投影, 大きなアスペリティの位置は, 高被害領域の中心位置	何れのアスペリティも北側最深部より破壊が進行	$2.6 \times 10^{17}(\text{Nm})$ [根拠] 既往の福井断層モデルの平均的な値	0.6 秒 [根拠] 1995 年兵庫県南部地震のシミュレーションより
Case2	Case1 のアスペリティ位置を各々, 南へ 4km 移動	北のアスペリティは, 南側最深部から, 南のアスペリティは北側最深部から破壊が進行		
Case3	[根拠] 地殻変動より推定される鷲谷(1999)の滑り分布において北側領域の滑りが小さいこと, 岩崎・他(1983), 長谷川(1986)の断層面の北端は何れも金津付近でとまっていることによる。	[根拠] 浜田(1990)の震央位置から破壊が開始すると仮定 南のアスペリティは, アスペリティ中央最深部から破壊が進行		
Case4		[参考] 宮武(1999)の震源モデル	$2.1 \times 10^{17}(\text{Nm})$ [根拠] 菊地のインヴァージョン結果	1.3 秒 [理由] Somerville(1999)の統計モデル $T_r = 2.03 \times 10^{-9} M_0^{1/3}$
Case5				



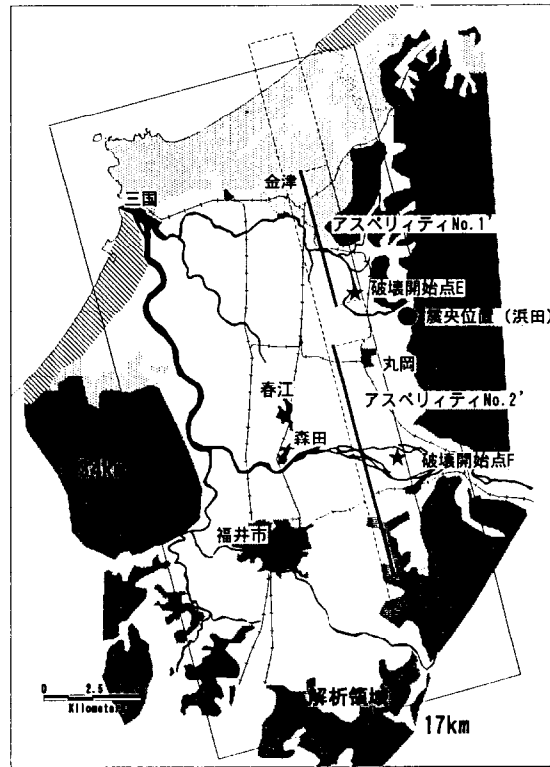
(a) CASE1:入倉・釜江 MODEL1(1999)



(b) CASE2(アスペリティ位置を南)



(c) CASE3(CASE2の破壊開始点変更)



(d) CASE4&5(CASE3の破壊開始点変更)

図 3.20 シミュレーションを行う解析領域と断層モデル

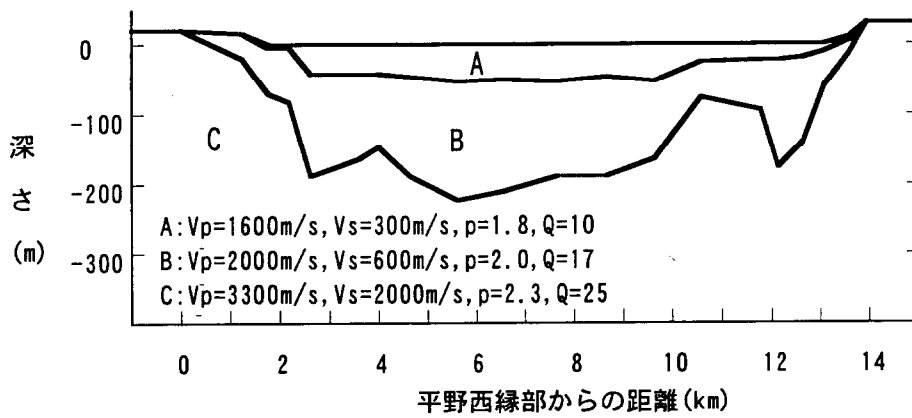


図 3.21 微動 H/V から推定した地盤モデル[若松・野畑(1998)]

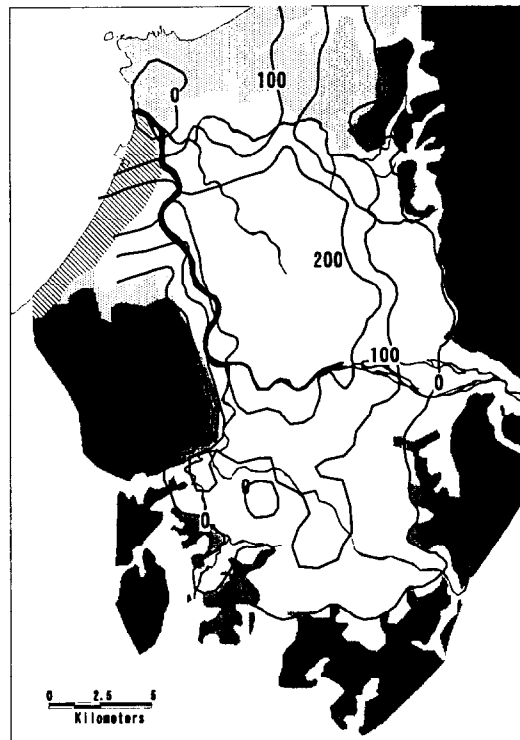


図 3.22 新第三紀層(D)層上面の深さ分布 [福井県(1987)を修正]

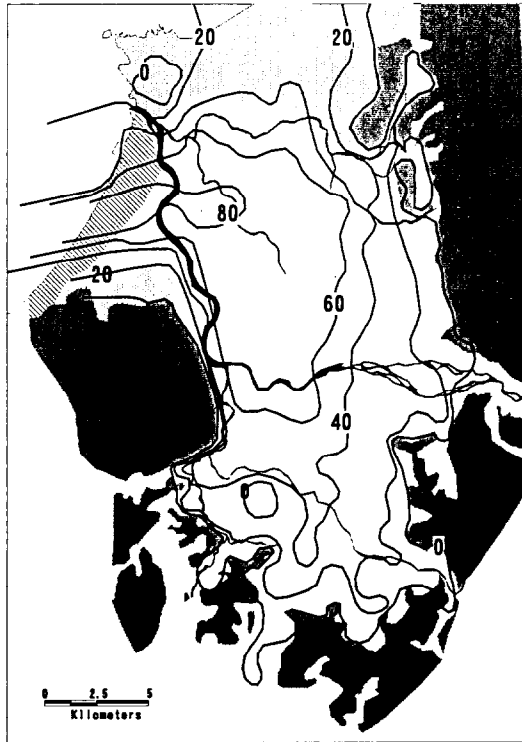


図 3.23 更新世上位層(B)層の仮定深さ分布

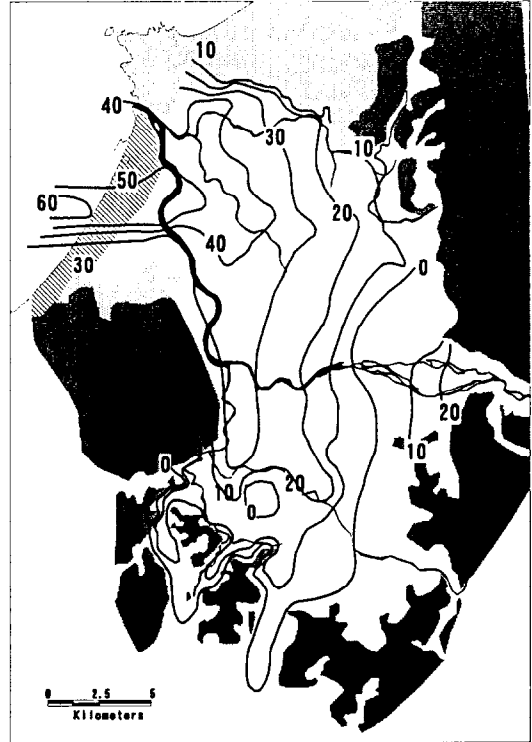


図 3.24 沖積層(A)層の層厚分布[福井県(1987)]

表 3.7 福井平野の地盤構造

深さの 目安 (m)	層 名	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (ton/ m ³)	Q	備考
0~50m	A	150	1500	1.7	25	不整形 1D非線型
0~80m	B	300	1500	1.8	25	不整形 1D非線形
0~ 200m	C	650	2000	2.0	50	不整形
1000m	D	1800	3800	2.4	150	平行成層
5000m	E	3200	5500	2.6	250	平行成層
	F	3500	6100	2.7	400	半無限

福井土木事務所

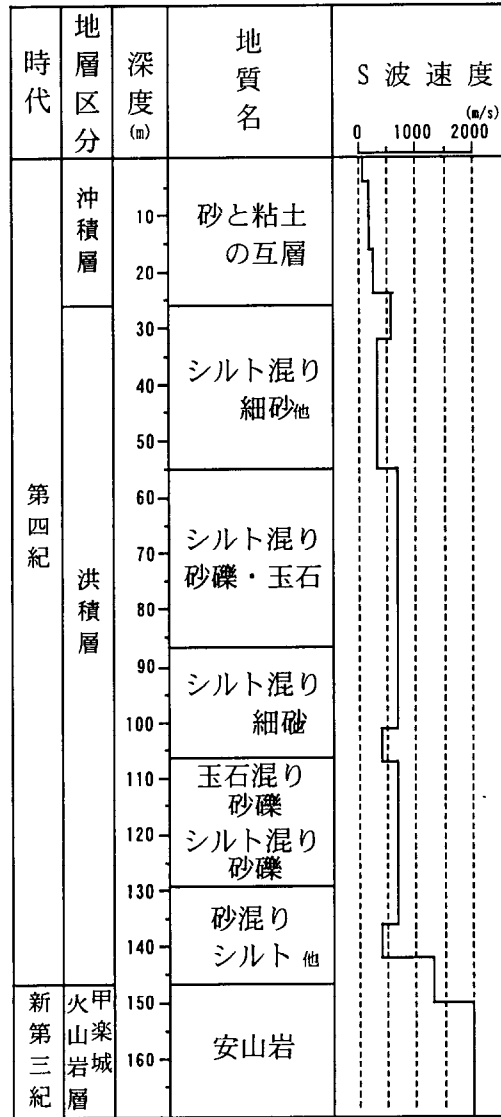


図 3.25 県土木事務所の P S 検層結果[福井県(1997)]

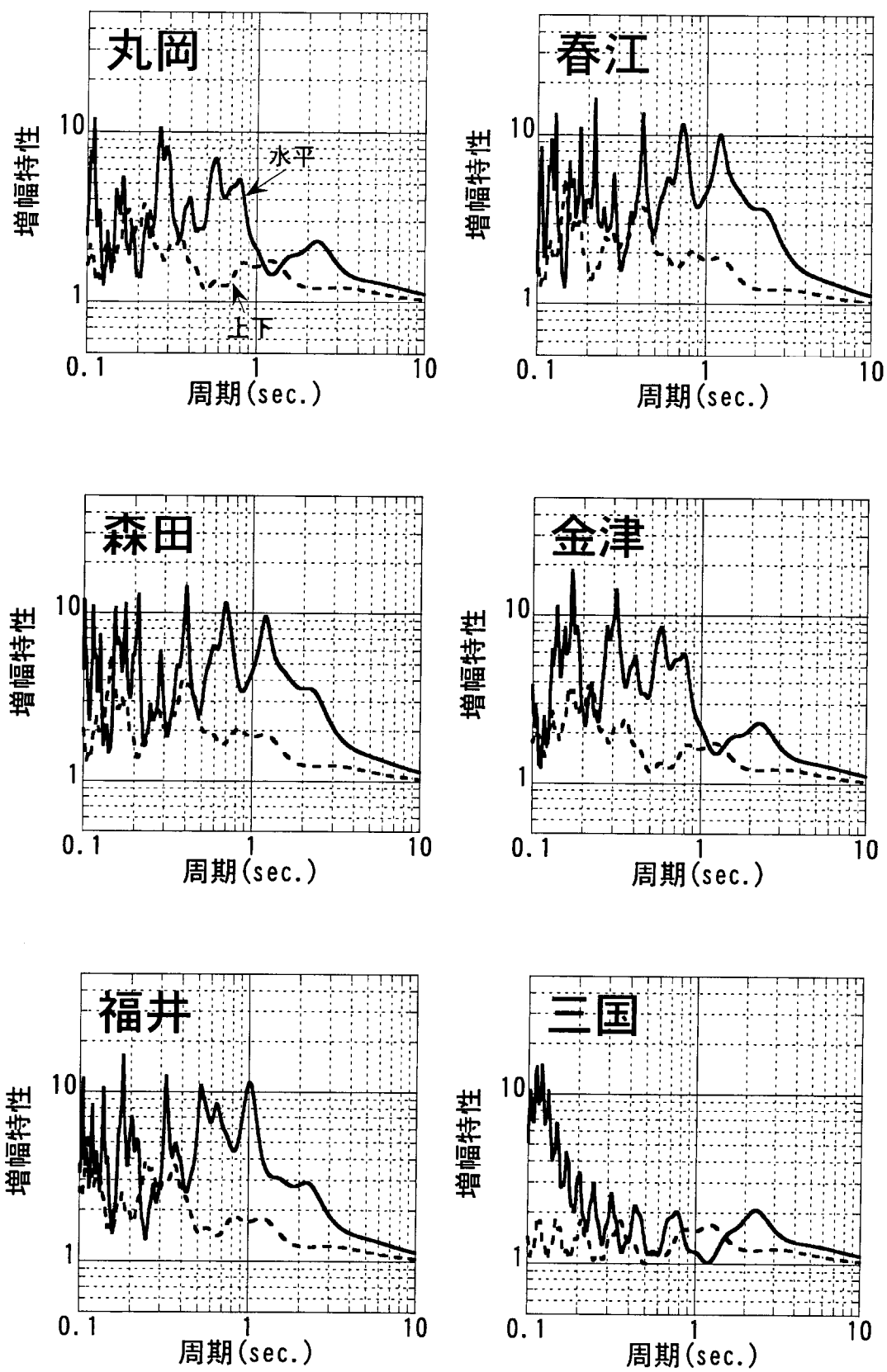


図 3.26 想定した地盤モデルの直下 1 次元構造より計算される代表的な地点での増幅特性

3.3.3 シミュレーション結果

(1) 計算条件

図 3.28 に、層構造を考慮したシミュレーションのフローを示す。

3次元有限差分におけるモデル化の領域は、入倉・釜江(1999)にならい、図 3.20 に示される領域、水平 17km×34km×深さ 15km であり、地盤構造としては、表 3.5 に示される C 層 ($V_s=650\text{m/s}$) 上面までをモデル化し、離散化するグリッド間隔は 0.1km とした。その結果、計算される波形の信頼振動数範囲は、1 波長について 5 グリッド程度を考慮すると、約 1.3Hz となる。計算時刻刻みは、Graves の提案された式(1996)を参考にし、0.008 秒とした。地盤の減衰 Q は、0.8Hz で表 3.7 の値となるように設定した。本シミュレーションで用いた減衰は、Graves(1996)に従い、振動数にかかわらず、波動進行距離とともに減衰する。また、解析モデル境界から端部 1km 間を、吸収領域として用いている[田中・他(1998)]。震源については、各アスペリティ領域を長さ・幅方向各々 1km に離散化し、3次元差分空間の最も近いグリッドにモーメントを与えている。ここで、震源時間関数は、Bell 型の 1 波を用いた。

一方、統計的波形合成法においては、アスペリティ領域を、ほぼ 2km メッシュ四方になるように離散化し、各要素の時刻歴波形を、波形合成法により合成した。波形合成においては、滑り速度補正関数は exp 型[入倉・他(1997)]を用い、各要素波を破壊と伝播による時間遅れを考慮することで地震基盤層(E 層上面)での地震動を合成した。各要素の時刻歴波形は、離散化されたサイズのモーメント量と、各アスペリティの応力降下量により規定される ω^{-2} スペクトルに適合する模擬地震波を用いる。模擬地震波の作成にあたっては、乱数位相のホワイトノイズに、 ω^{-2} スペクトルのコーナー振動数の逆数を継続時間とした Boore(1983)の提案する包絡関数をかけあわせる。ラディエーションパターンに関しては、釜江・他(1990)を参考に、5Hz で一様となる周波数依存のラディエーションパターンを用い、高周波遮断振動数 f_{max} は 10Hz とした。

統計的波形合成における地震波の水平 2 成分と上下成分は、全ての波が S 波で構成されるものとし、要素波毎の入射角により、地震基盤層(E 層上面)で、各々の成分にベクトル分解し計算を行っている。このようにして得られた波形を、鉛直入射の仮定をすることで、水平 2 成分は、観測点直下の 1 次元地盤構造を反映した SH 波の増幅特性を、上下成分は、P 波の増幅特性を各々 Convolution することで、C 層($V_s=650\text{m/s}$) 上面までのサイト特性を考慮した。なお、 Q 値は 3 次元有限差分とは異なり、表 3.7 に示される Q 値に振動数の 1 乗を考慮することとした(入倉・他(1999))。

このようにして計算された 2 手法による波形を、3次元差分で計算された波形に関して、カットオフ振動数 1.2Hz、ローパスフィルタを通し、統計的波形合成法

で計算された波形に関して、カットオフ振動数 1.0Hz、ロールオフ振動数 1.2Hz のハイパスフィルターを通した各々時刻歴上で合成する。

水平動に関しては、ハイブリット手法により合成された更新世上面(C層)の波形を、表層地盤(B層、A層)の非線型応答を考慮することにより、地表面の波を計算した。非線型応答においては、歪が大きくなることを考慮し、時刻歴非線型応答解析を行うこととした。その際に、各層とも 1m 毎に離散化し、底面である更新世上面 1m までモデル化した後、その下にダッシュポットを設けた。なお、この沖積層における減衰に関しては、履歴減衰のみである。

表層地盤の非線型性の特性は、今津ほか(1986)の土質別に統計処理した $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線を参考に砂地盤、粘土地盤、砂礫地盤の 3 種の平均的な $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 曲線より、Ramberg-Osgood 型にモデル化した。図 3.28 にその特性を示す。A 層は、図 3.25 に示されるように砂層と粘土層の互層であり、B 層内では、シルト混じりの砂礫、その下層に砂層、さらにその下層に粘土層と複雑な互層構造となっている。本シミュレーションにおいては、これらの地層構造を単純に 2 層構造としている。従って、次に述べる仮定をもって、2 層構造と地質分類を行った。福井県(1986)による地盤構造の推定断面を参照すると、平野全体では、A 層は、粘土層の方が、砂層に比べ占めている割合が多いことより、粘土層の非線型特性を用いることとした。また B 層では、砂、粘土、砂礫の互層であるが、その平均的特性を示す砂地盤の特性を用いることとした。

さらに、福井平野においては、前章で示したように、多くの地点で液状化が発生しているが、地盤パラメータの設定に伴う不確実性を避けるため、本シミュレーションにおいては、有効応力による解析は行わないこととした。

(2) シミュレーション結果

最初に、3次元有限差分解析の妥当性をみるため、震央位置近傍に点震源をおいて計算した速度波形を図 3.29 に示す。震源の走向および滑り角はシミュレーションに用いる 345 度、26 度を各々用いている。新第三紀層の深さに応じて振幅が大きくなる傾向が見られ、概ね良好な結果が得られているものと考えられる。ただし、断層直交成分において、北潟湖周辺で振幅が大きくなる傾向が見られる。この原因として、北側は軟らかな地盤が開いており、境界からの反射による悪さの影響が考えられる。現点震源モデルの滑り角における北潟湖周辺の方法は、SH 波のラディエーション振幅が大きくなる方向に一致しているため、逆に滑り角を 154 度とした場合の計算を図 3.30 に示した。北潟湖周辺の振幅は小さくなるものの、周辺に比べてやはり大きな振幅となっている。このことより、北側の領域においては、解析領域の境界からの反射波の影響をうけているものと判断され、北側の領域に関しては、注意を要する。

次に、統計的合成法と 3次元差分の結果の合成結果を確認するために、後述する Case1 におい

て、代表地点（丸岡一本丸岡中間部）における更新世(C層)上面での、3次元差分、統計的波形合成とハイブリッド合成結果のフーリエスペクトルを図 3.31 に各々示す。3次元差分の結果は、周期 1 秒以下では、急激に振幅が小さくなっていることがわかる。また、両者を合成した、ハイブリッド波のフーリエスペクトルは、短周期から長周期にわたりスムーズに振幅が変動していることがわかる。また、合成の様子を時系列で示したものが図 3.32 である。統計的波形合成法も 3次元差分の結果も、ほぼ包絡形は同様である。なお、合成された波形の速度振幅値では、3次元差分のみの結果に比べ、2割程度大きくなっている。

Case1 の結果を図 3.33 に示す。(a)が地表面での水平最大速度であり、(b)が水平面内の速度粒子軌跡である。なお、比較のために、(a)では、被害から推定した最大速度コンター線を、(b)には、煙突、家屋、墓石等の転倒方向を矢印で示している。計算された波の最大速度は、概ね被害から推定された最大速度と対応している。ただし、速度粒子軌跡においては、福井平野北縁部で東西方向に物体が転倒しているのに対し、計算された速度粒子軌跡においては、必ずしも対応していない。また、最大値は、松岡周辺で 340cm/s 程度である。このモデルにおいて、入倉・釜江(1999)の計算と大きく異なる点は、表層地盤の影響の有無である。

Case 2 の結果を図 3.34 に示す。このモデルは、断層北端部の滑り分布が小さい[鷺谷(1999)]こと等を鑑みて、断層内アスペリティ位置を南に 4km 程移動させたモデルである。この結果、最大速度の分布は南側に移動し、被害の全体的な傾向を表現できていないことがわかる。また、最大値は、丸岡周辺部で 300cm/s 程度である。

Case3 の結果を図 3.35 に示す。このモデルは、福井地震の推定震央位置が丸岡周辺部に存在することより、Case2 のモデルにおいて、破壊開始点をアスペリティ No.1'においては、南側最深部、アスペリティ No.2'においては、北側最深部としたモデルである。本モデルから推定される最大速度分布は、両破壊開始点から、南北方向に広がるように分布し、平野中央部での振幅が大きくなる。

Case4 の結果を図 3.36 に示す。このモデルは、Case3 を基本に、宮武(1999)の震源モデル、釜江(1999)のパラメータスタディ結果を参考としてアスペリティ No.2'の破壊開始点を断層中央最深部としたモデルである。なお、今迄のパラメータスタディ結果より、いずれの場合も最大速度振幅値が大きいことを鑑みて、ライズタイムを、Somerville(1996)の統計的震源モデルから推定される下式より 1.3 秒とした。

$$T_r = 2.03 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3} \quad (3.8)$$

この結果は、概ね被害から推定された最大速度分布と似た傾向を示すことがわかる。しかしながら、最大速度振幅はライズタイムを変更しても全体的に大きな値となっている。そこで、地震

モーメントを $2.6 \times 10^{17}(\text{N} \cdot \text{m})$ から、菊池(1999)の推定値 $2.1 \times 10^{17}(\text{N} \cdot \text{m})$ に変更したケースを Case5 とした。この時、モーメントマグニチュード Mw としては、6.9 から 6.8 に変更したこととなる。

Case5 の結果を、図 3.37 に示す。図 3.37(a)に示す最大速度分布の形状は、平野北西部にかけて最大速度がおおきくなる傾向、平野の南縁部にまで地震動強さの大きな範囲が広がる傾向等、被害から推定した結果と比較的整合しているといえる。また、図 3.38 (b)に示す煙突や墓石の転倒方向と速度粒子軌跡の関係は、比較的良好な対応を示していることがわかる。福井平野のように軟弱層が堆積した地域においても、震源の放射特性による震動主軸方向は見られ、2.2 の土木の被害でも論じたように、その方向により、建造物の被害のパターンが異なることが理解できる。

これらの解析 Case を比較するために、平野の東西・南北断面で、被害から推定された最大速度とシミュレーション結果を図 3.38 に比較して示す。図 3.38(b)(d)に見られるように、Case2 と Case3 のシミュレーション結果では、最大速度の大きな領域が南側のシフトしており、被害を説明できない。また、Case4 は最大速度が被害から推定される最大速度より若干大きめに評価されている。一方、Case1 と Case5 に関しては、ほぼ同様な傾向であり、被害から推定された最大速度と概ね対応している。ただし、より詳細に比較すると、図 3.38(b)において、Case5 の方が Case1 に比べ北側に最大速度の大きな領域が延びている点が異なる。また、Case1 と Case5 の結果では、図 3.39(a)、図 3.39(b)に見られるように速度粒子軌跡の方向が異なっている。そこで、以降の検討では、煙突や墓石の転倒方向と速度粒子軌跡の方向が、比較的良好な対応を示している Case5 を基にする。

図 3.40～図 3.42 に解析領域内 2km ピッチでの各成分の Case5 における速度波形を示す。断層直交成分では、福井平野中央部から北方向にかけて大きくなり、Near field Directivity 現象が見られる。一方、断層平行成分は、福井平野中央部から南部にかけて大きくなっている。上下動に関しては、更新世(C 層)上面での波形であるが、比較的振幅は小さい。

図 3.43 に Case5 における水平最大加速度分布を示す。全壊率 80%以上の領域は概ね 0.6g 以上であり、被害より推定された合震度と概ね対応している。図 3.44 に Case5 における波形 3 成分（ただし、上下動に関しては C 層上面）より計算した計測震度を示す。木造家屋全壊率 30%以上の領域とほぼ対応する福井平野内では、震度 6 以上であることわかる。

代表的な地点（丸岡、春江、森田、金津、福井、三国）における速度波形を図 3.45 に、その擬似速度応答スペクトル($h=5\%$)を図 3.46 に示す。福井平野北側の金津、三国では、アスペリティ No.1'と、アスペリティ No.2'の影響により、波形の分離が見られるが、春江より南では、アスペリティ No.2'の影響による振幅が大きくなり、アスペリティ No.1'の影響は見られない。これらの地点で最大地動を示すのが、春江であり、速度振幅約 160cm/s、擬似速度応答スペクトルでは、周期 2 秒で 500cm/s 程度になっている。この地点は、被害から推定された最大速度が 120cm/s 程度以上

であることや、「墓石が台上で東南東に移動した」という記述からも、振幅や、地動方向は概ね対応しているものと考えられる。また、福井市内では、被害から推定される最大速度は、概ね 100cm/s 程度であることや、煙突の倒壊方向や、「家屋が南方向へ滑りを生じた」という記述との対応も概ね良好である。

軌道の被害との対応を見るために、福井平野を南北に走る北陸本線上と、東西に走る丸岡線に沿った速度波形を図 3.47 に示す。北陸本線ではレールの座屈に伴う屈曲の被害が福井市近傍で発生しているが、丸岡以南においては、断層平行成分（南北成分）が大きくなる傾向が見られ、軌道直交方向に比べ、軌道軸方向に大きな力が働いていることがわかる。また、丸岡以北で、亀裂による被害が見られるが、その区間は軌道直交成分の振幅が大きいことがわかる。丸岡線の本丸岡—丸岡間では、液状化が発生し、被害はそれに伴う亀裂や沈下が見られるが、その区間の速度振幅はかなり大きなことがわかる。

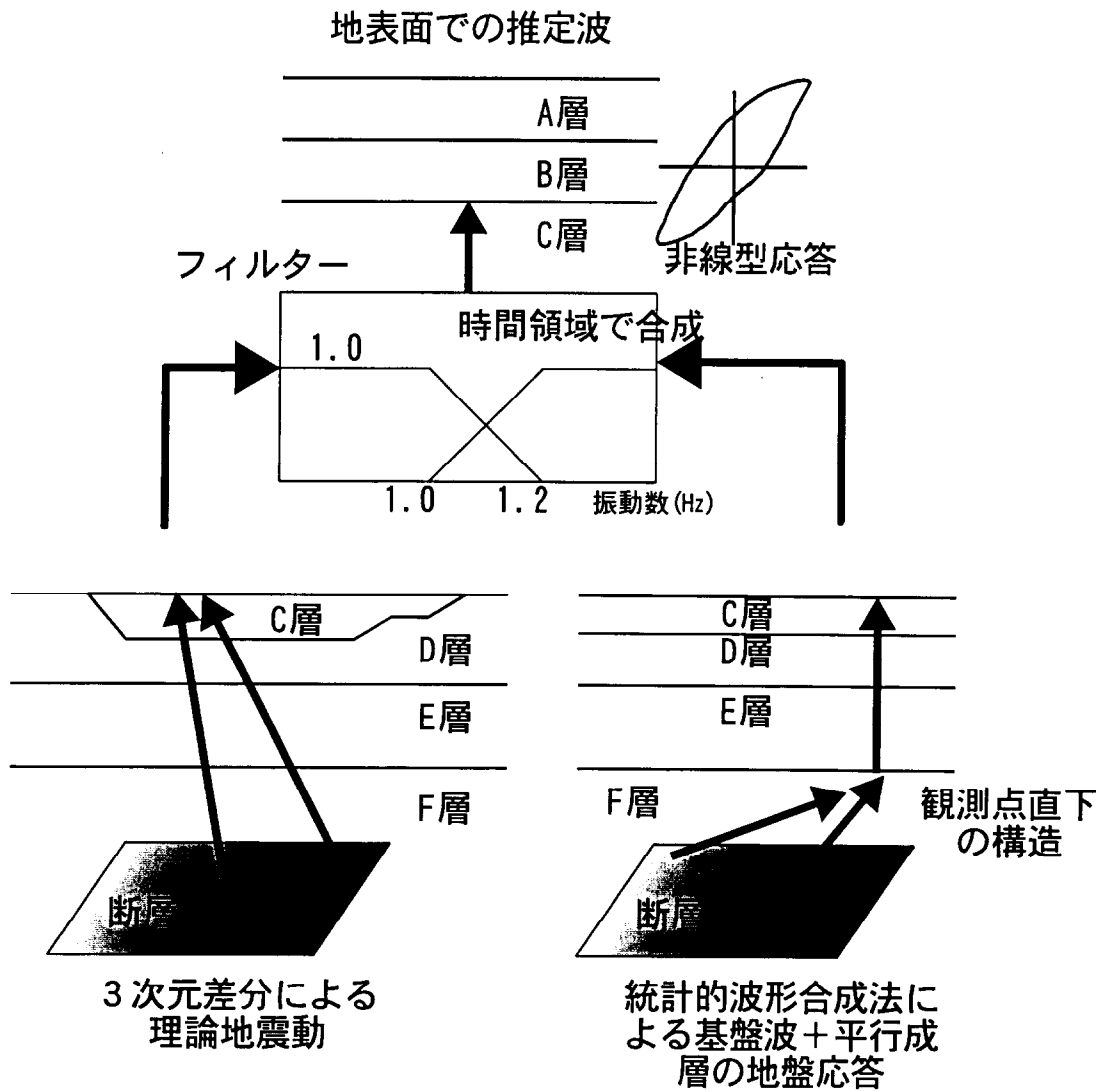


図 3.27 地盤構造を考慮したシミュレーションの流れ

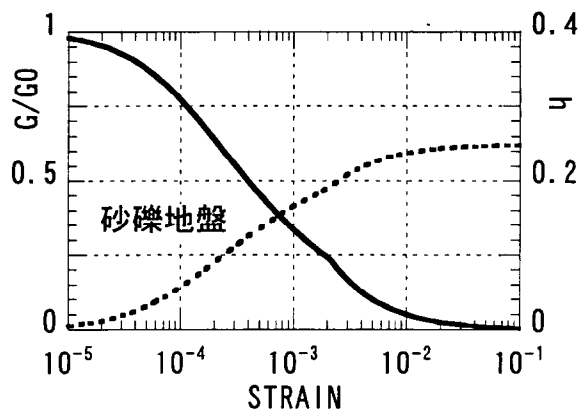
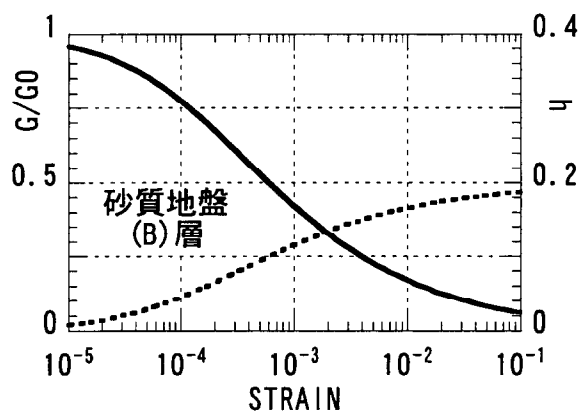
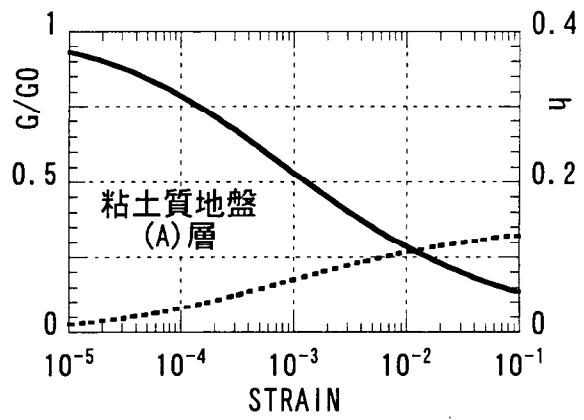


図 3.28 用いた非線形特性(R-O モデル)

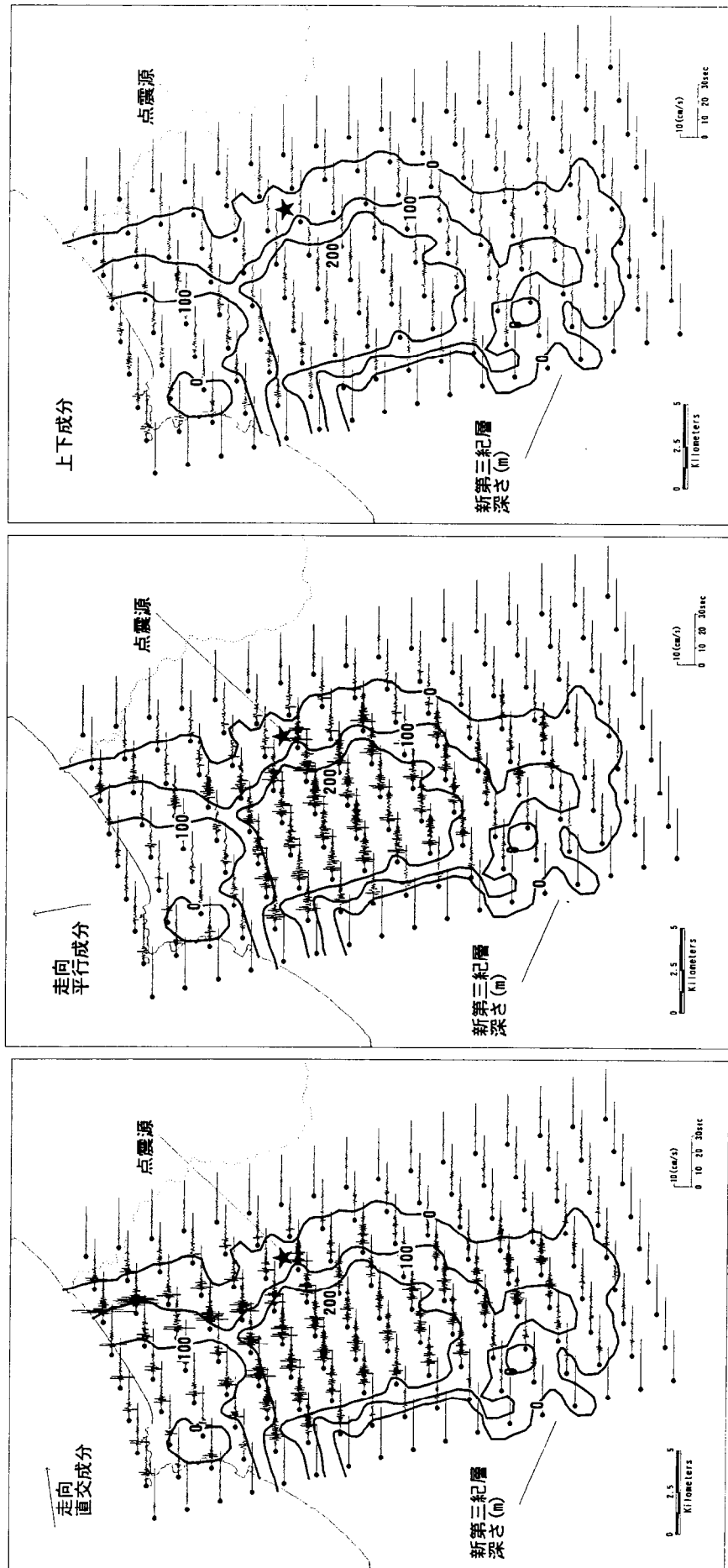


図 3.29 点震源による 3 次元有限差分モデルにおける更新世上面(C 層)地盤応答結果

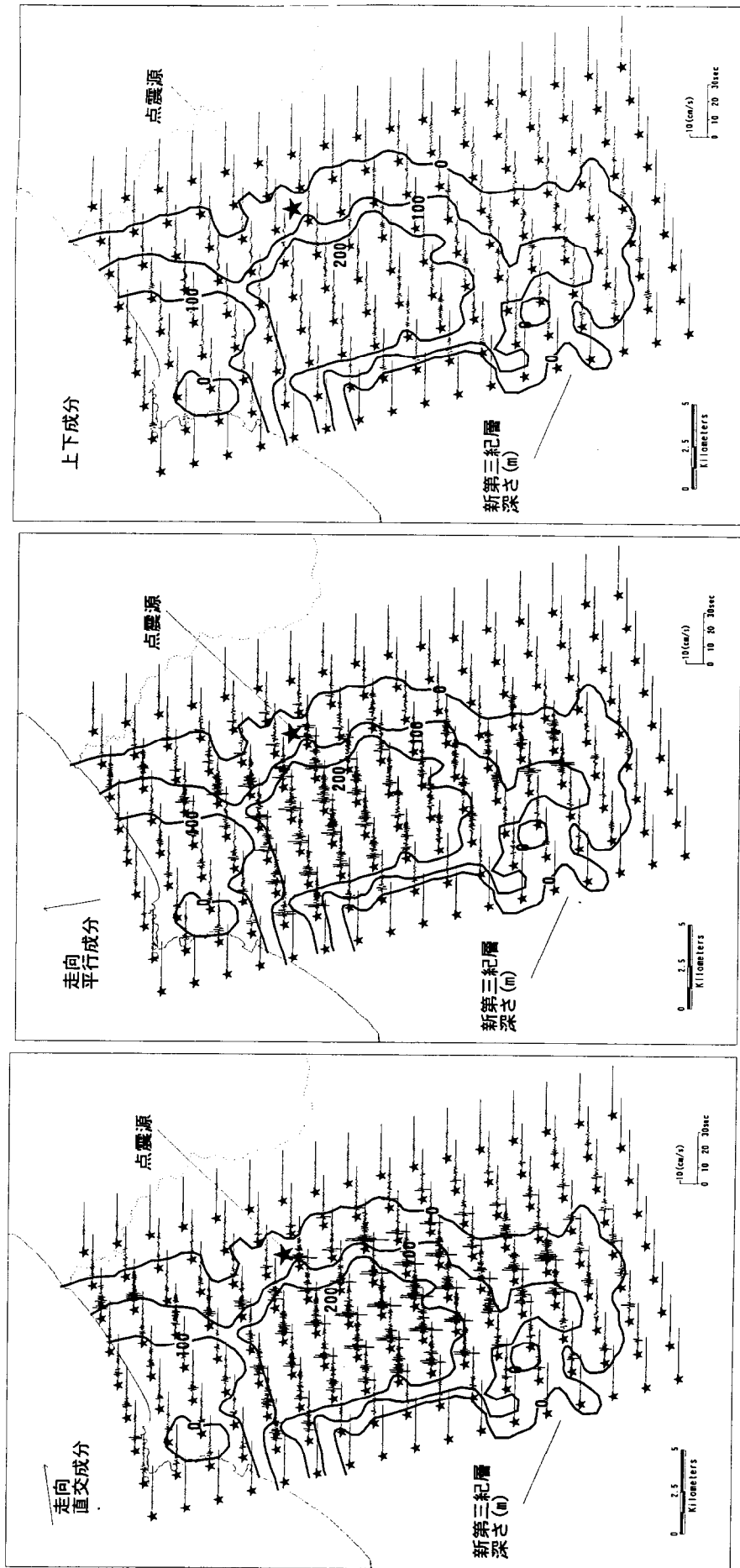


図 3.30 滑り角を対照とした(154 度)点震源による 3 次元有限差分モデルにおける更新世上面(C 層)地盤応答結果

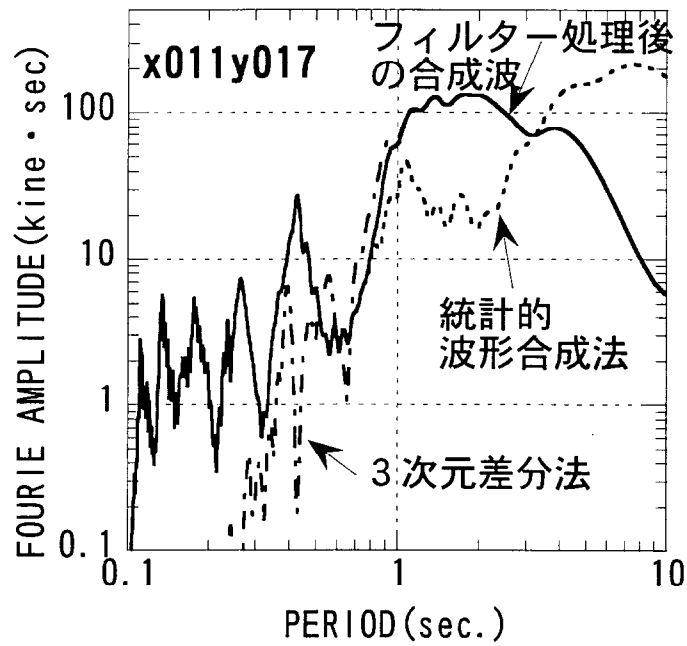


図 3.31 統計的波形合成法と3次元差分のフーリエスペクトルと、
フィルター処理後の合成波のフーリエスペクトル

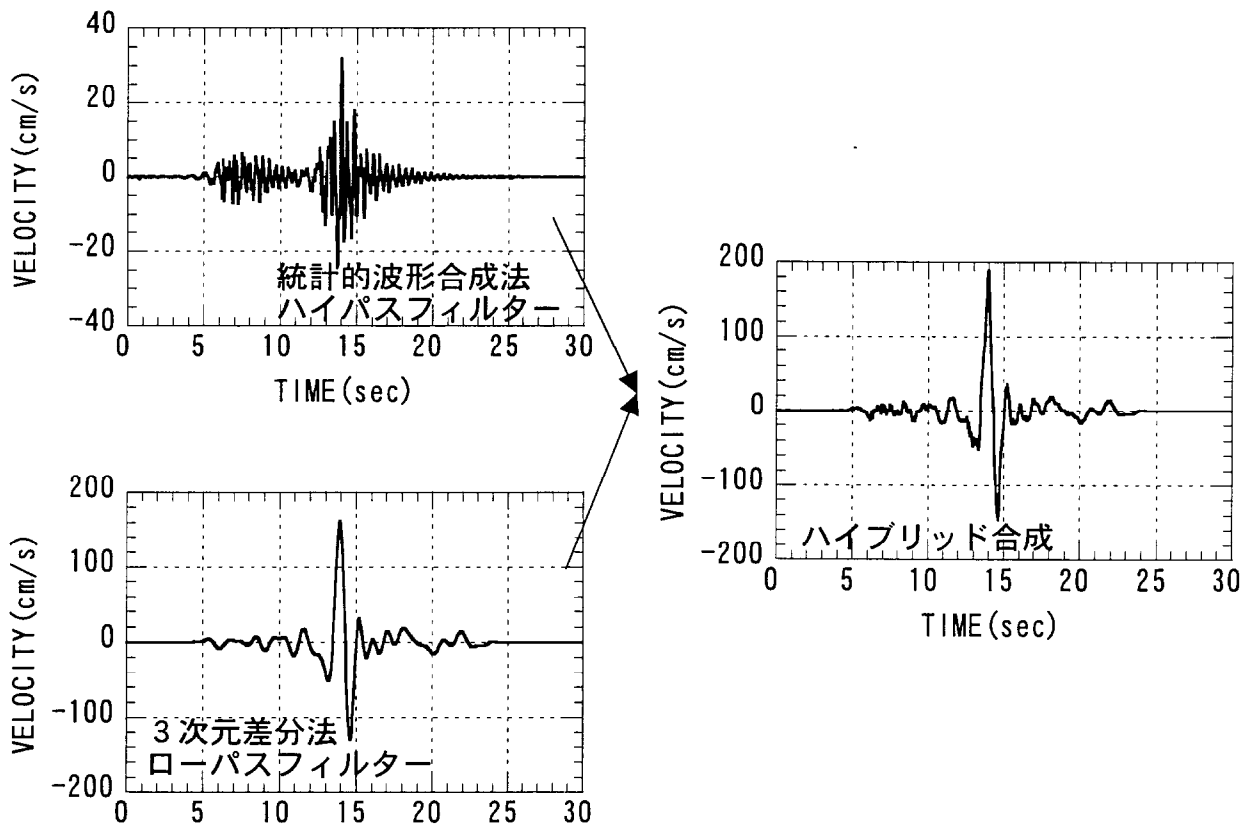
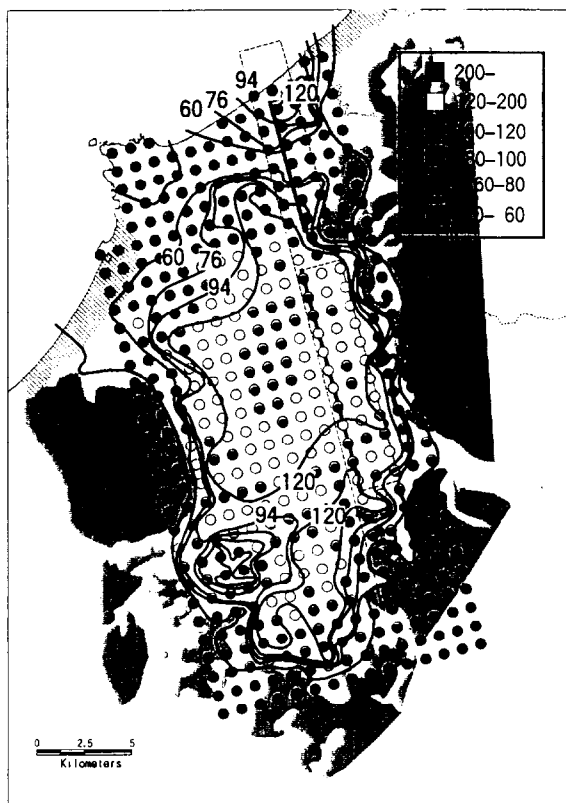
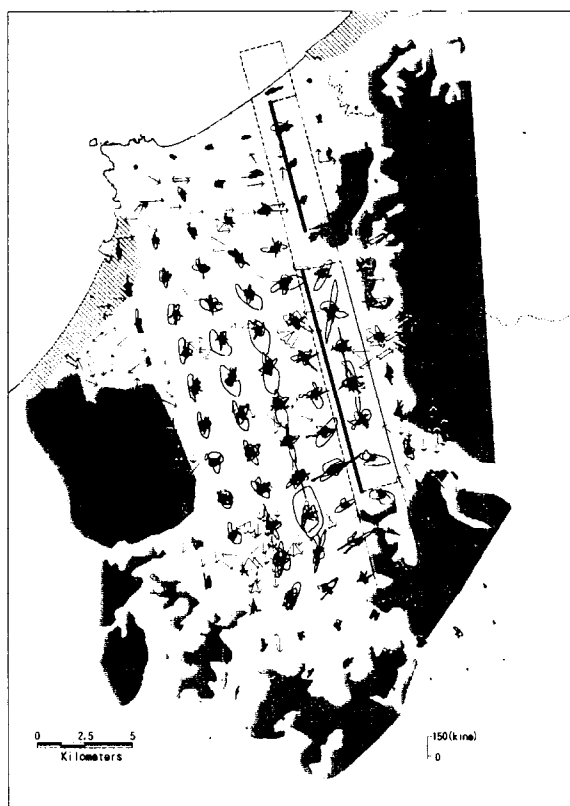


図 3.32 時間軸での合成結果

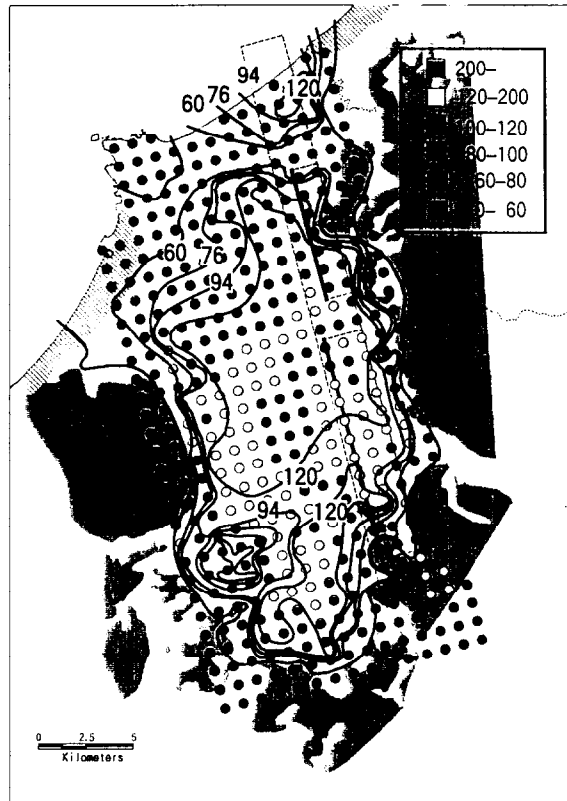


(a) 水平最大速度と被害からもとめた最大速度

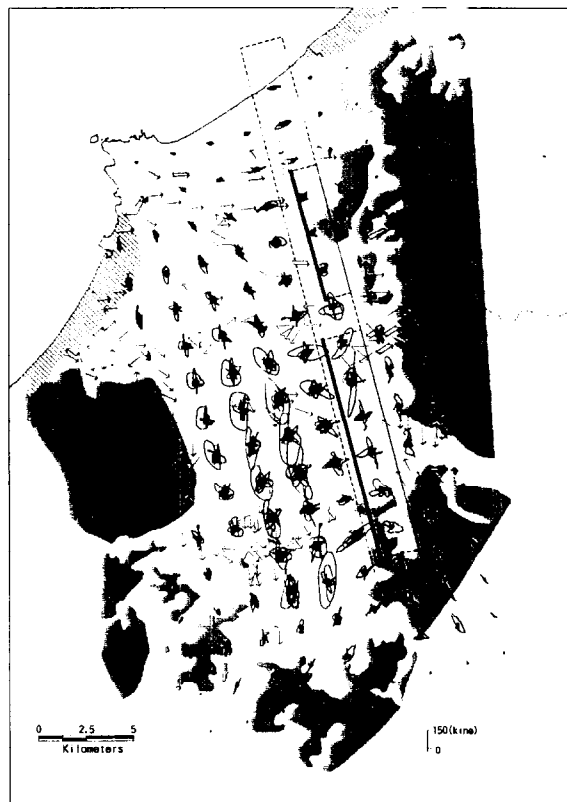


(b) 速度粒子軌跡と煙突・墓石の転倒方向

図 3.33 地表面における水平最大速度と被害からもとめた最大速度(Case1)

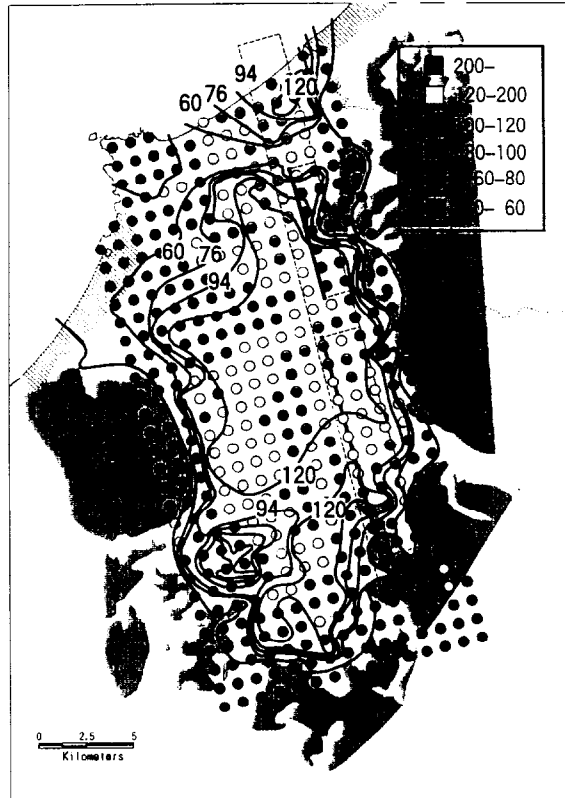


(a) 水平最大速度と被害から求めた最大速度

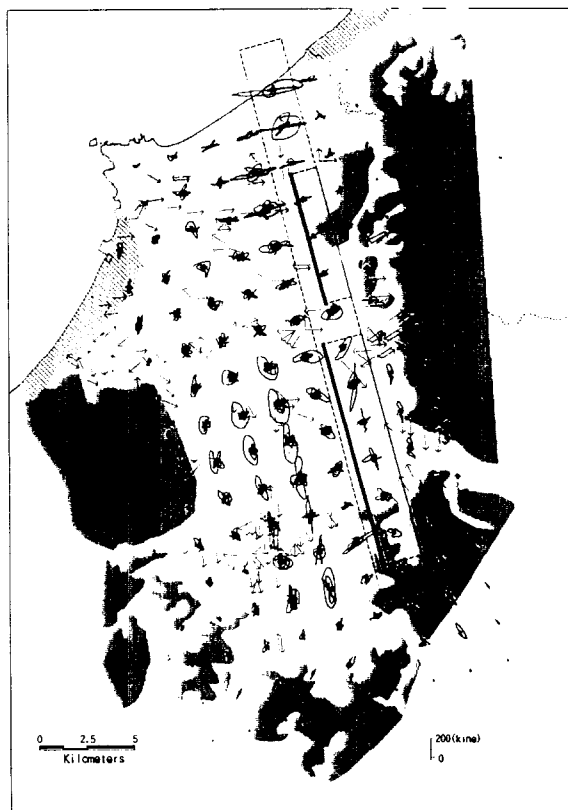


(b) 速度粒子軌跡と煙突・墓石の転倒方向

図 3.34 地表面における水平最大速度と被害から求めた最大速度(Case2)

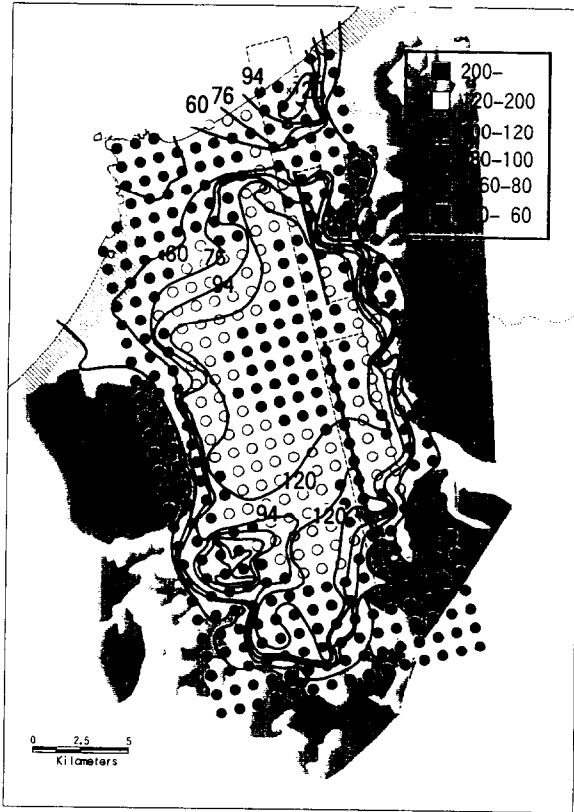


(a) 水平最大速度と被害から求めた最大速度

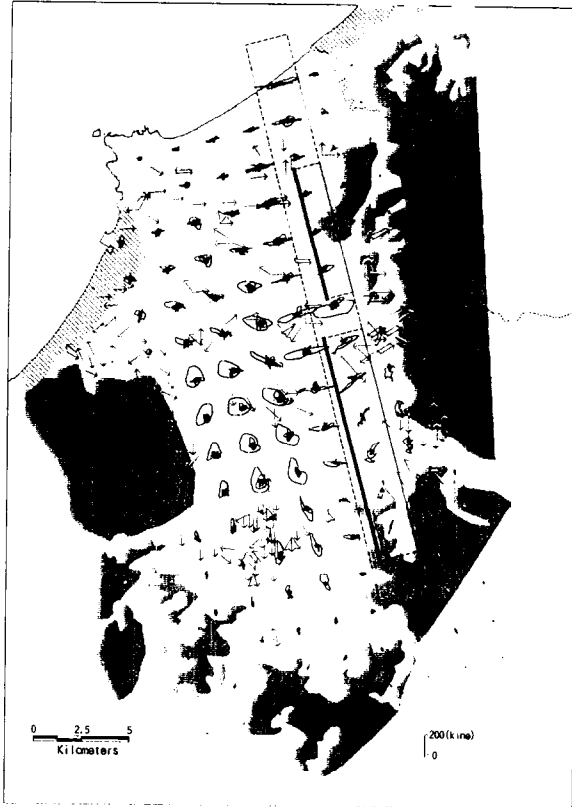


(b) 速度粒子軌跡と煙突・墓石の転倒方向

図 3.35 地表面における水平最大速度と被害から求めた最大速度(Case3)

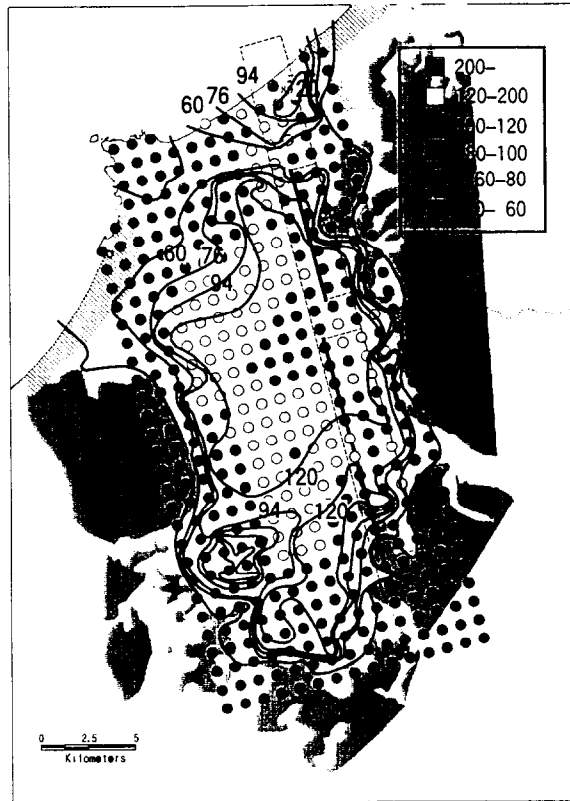


(a) 水平最大速度と被害から求めた最大速度



(b) 速度粒子軌跡と煙突・墓石の転倒方向

図 3.36 地表面における水平最大速度と被害から求めた最大速度(Case4)

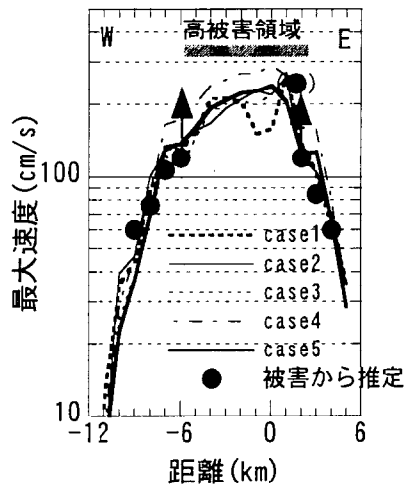


(a) 水平最大速度と被害から求めた最大速度

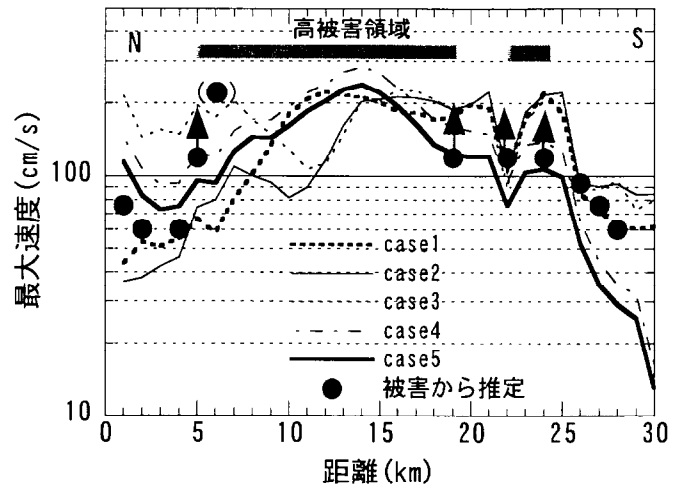


(b) 速度粒子軌跡と煙突・墓石の転倒方向

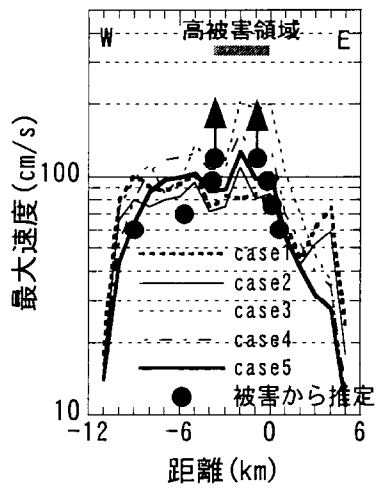
図 3.37 地表面における水平最大速度と被害から求めた最大速度(Case5)



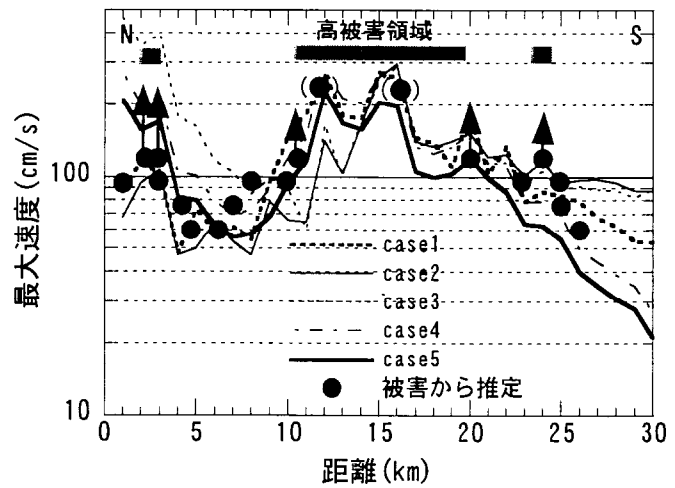
(a) A断面



(b) B断面



(c) C断面



(d) D断面

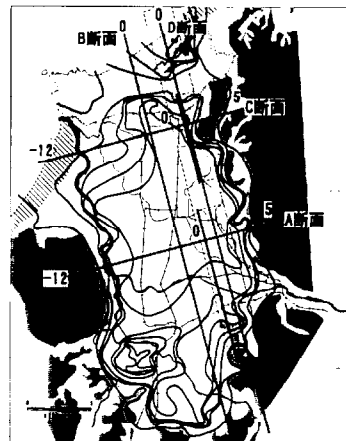
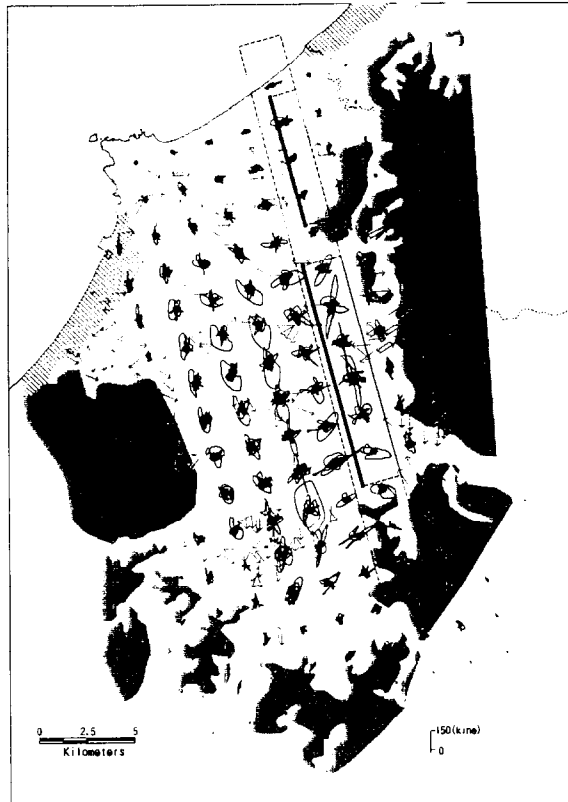
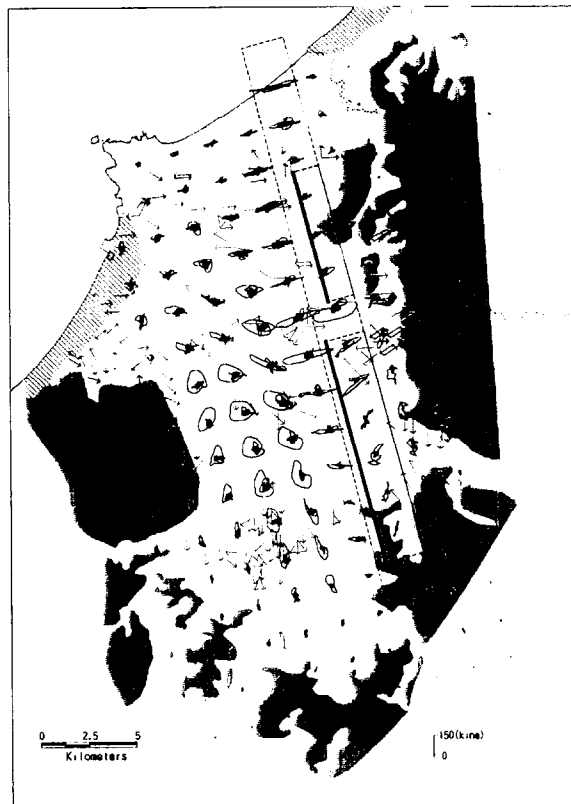


図 3.38 シミュレーションから得られる最大速度と被害から推定される最大速度の比較



(a) Case1



(b) Case5

図 3.39 Case1 と Case5 における速度粒子軌跡の比較

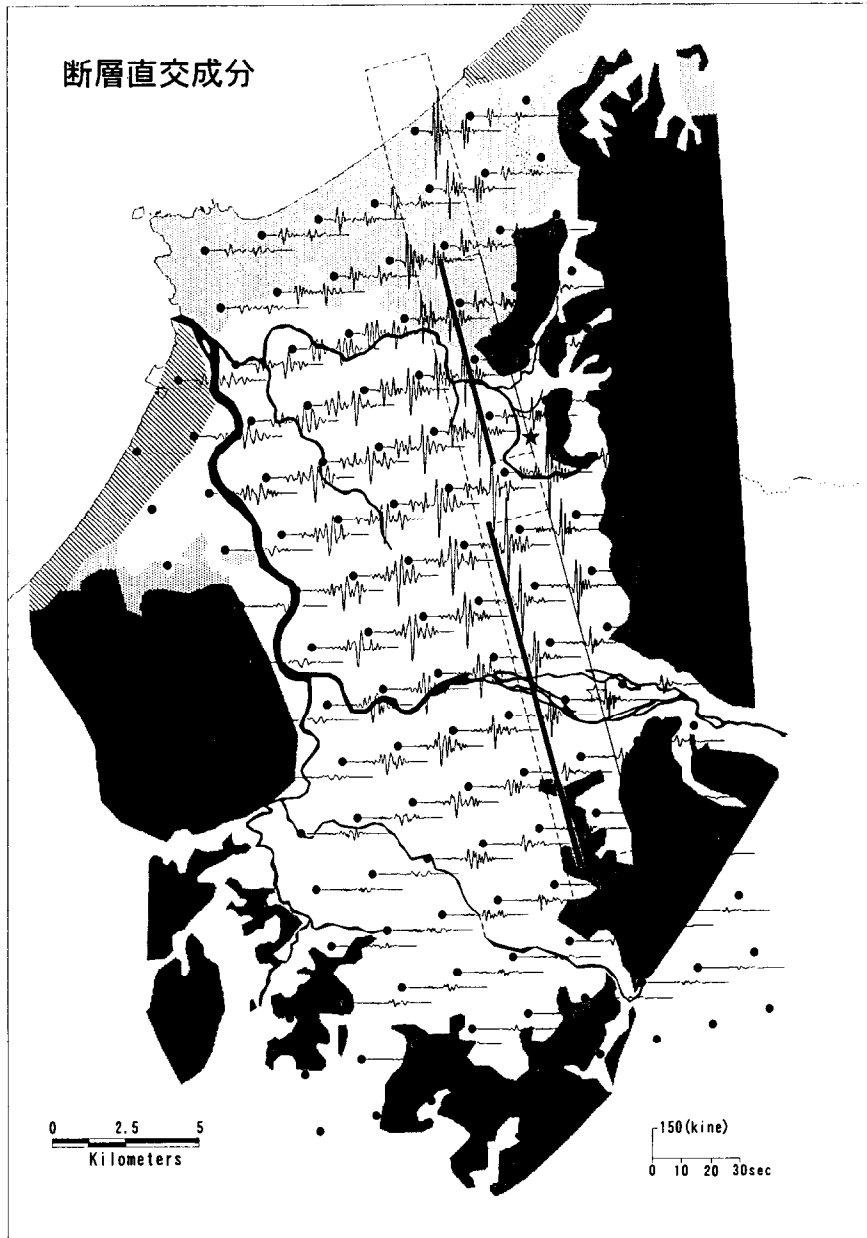


図 3.40 地表面での速度波形(断層直交成分)

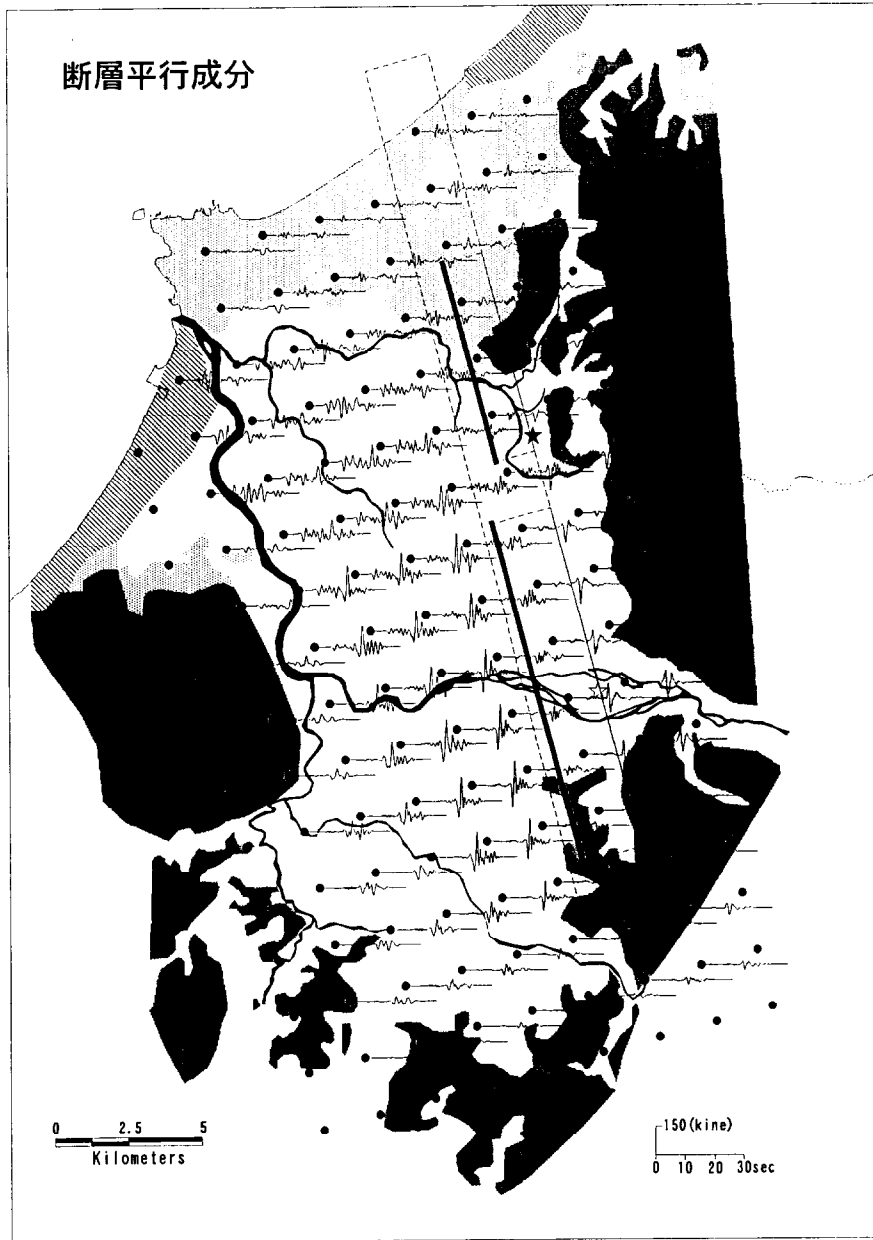


図 3.41 地表面での速度波形(断層平行成分)

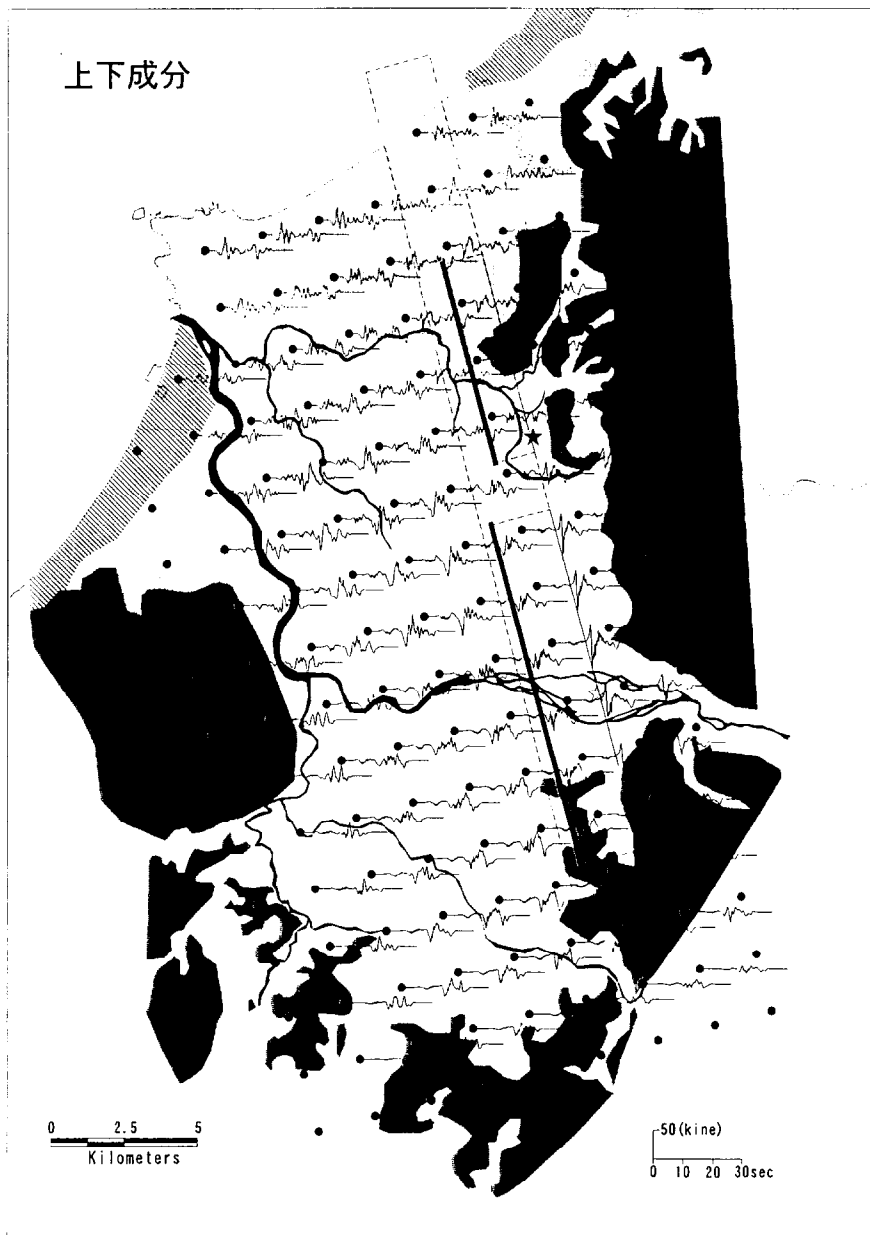


図 3.42 地表面での速度波形(上下成分)

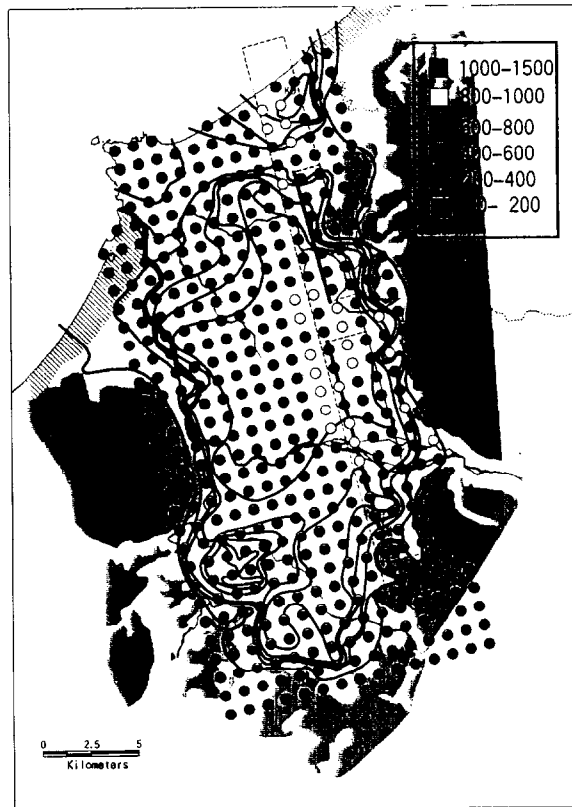


図 3.43 地表面における水平最大速度と被害から求めた最大加速度(case5)

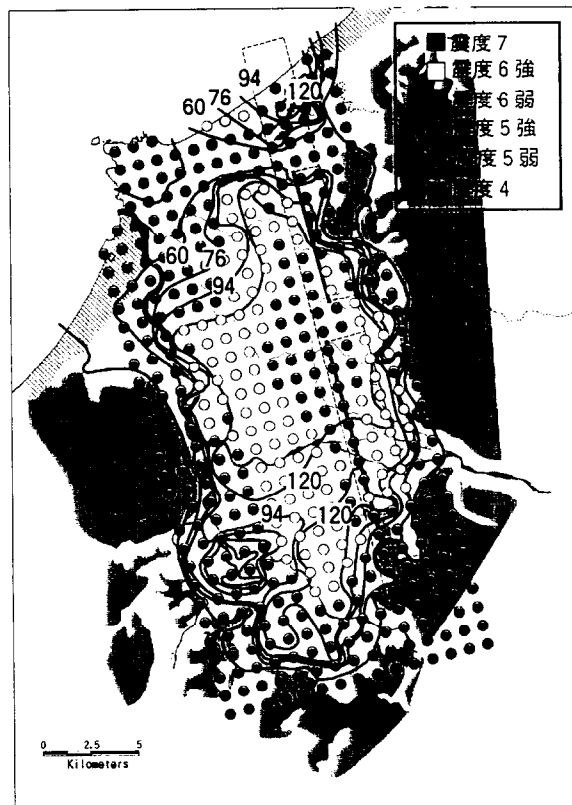


図 3.44 地表面における計測震度(case5)

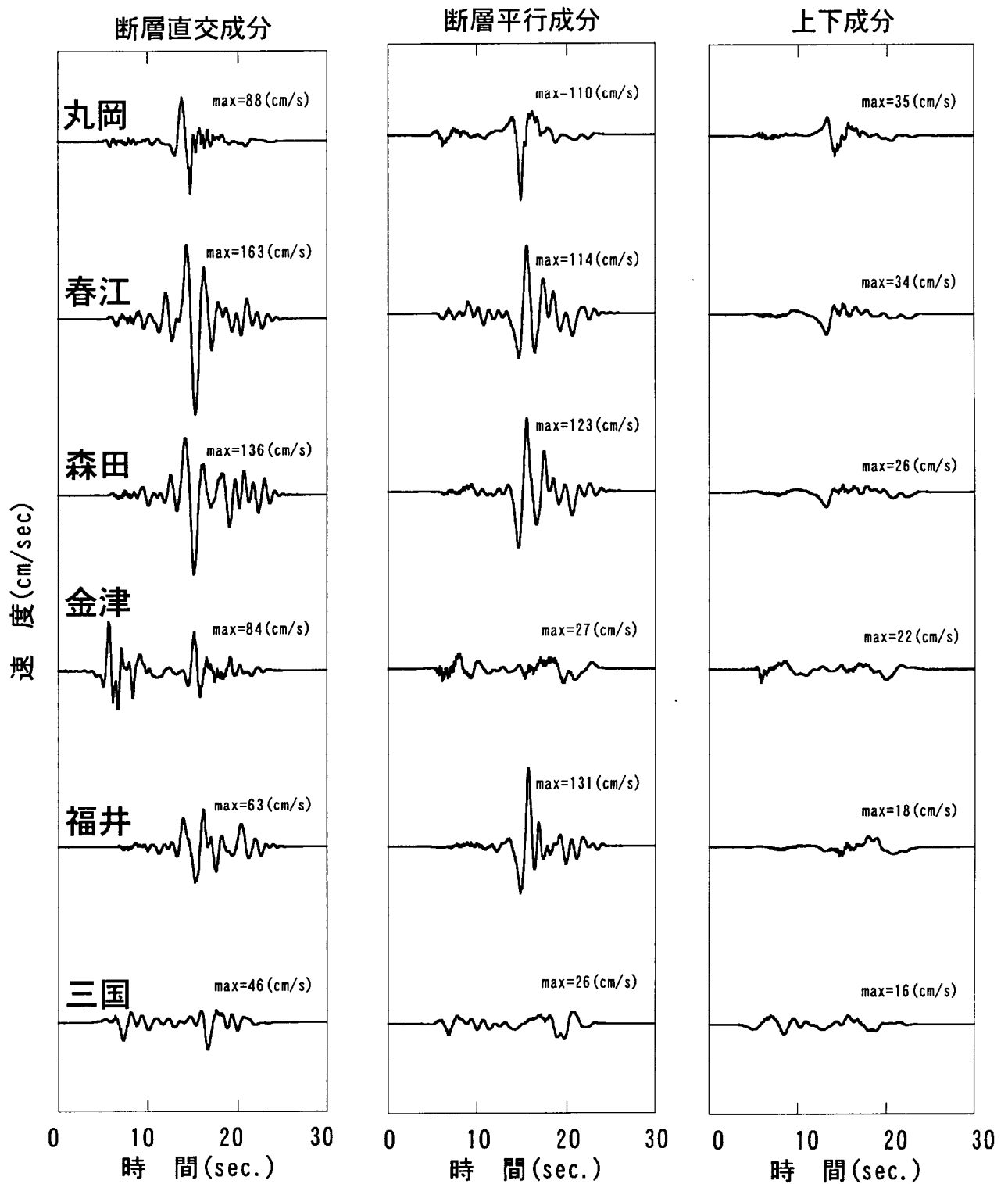


図 3.45 代表地点での速度波形

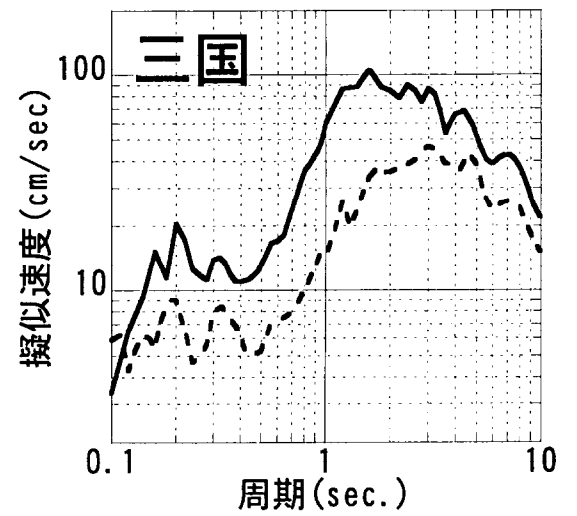
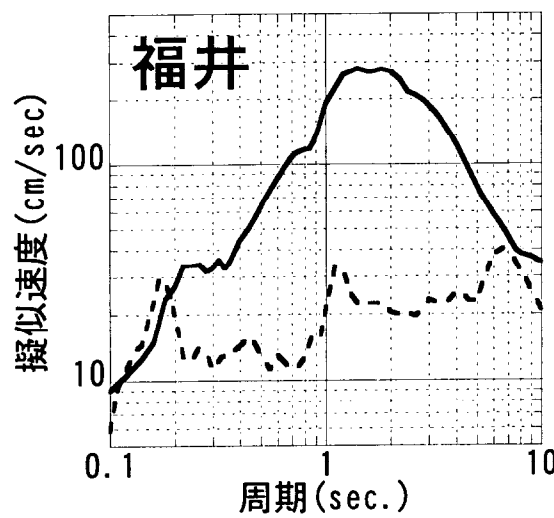
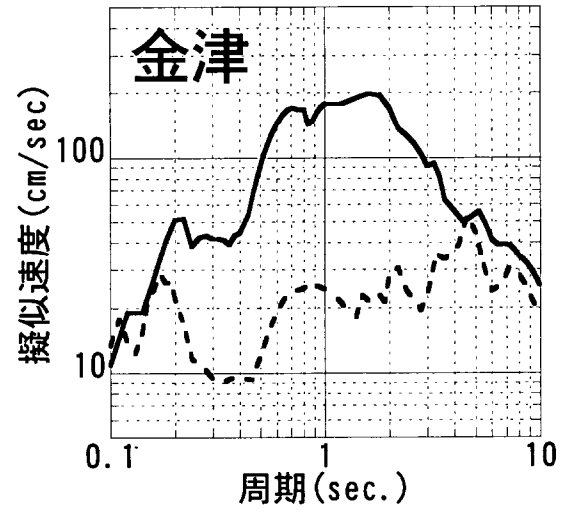
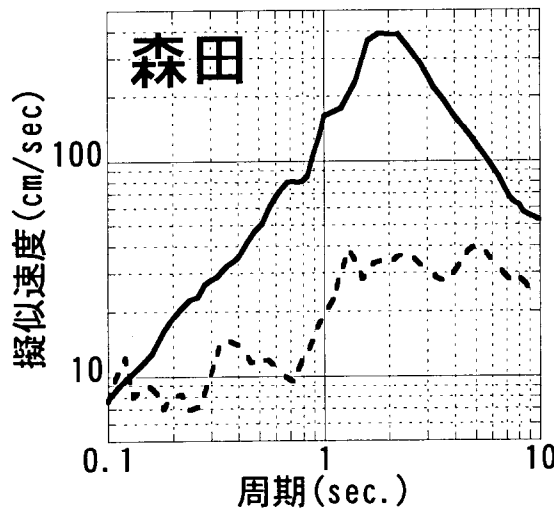
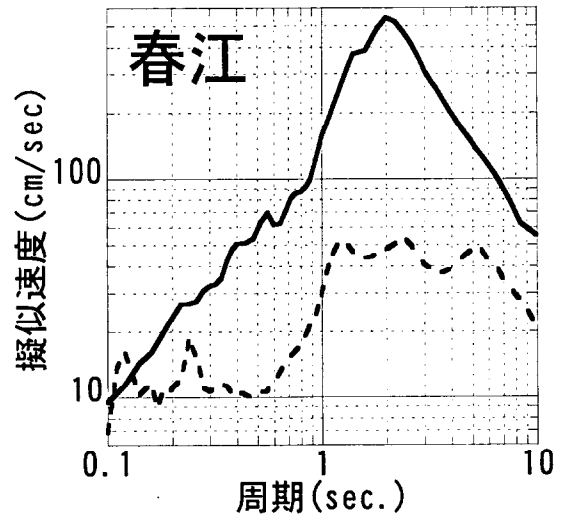
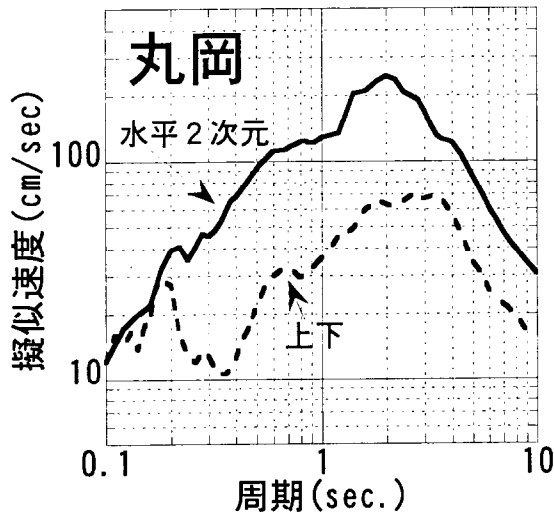
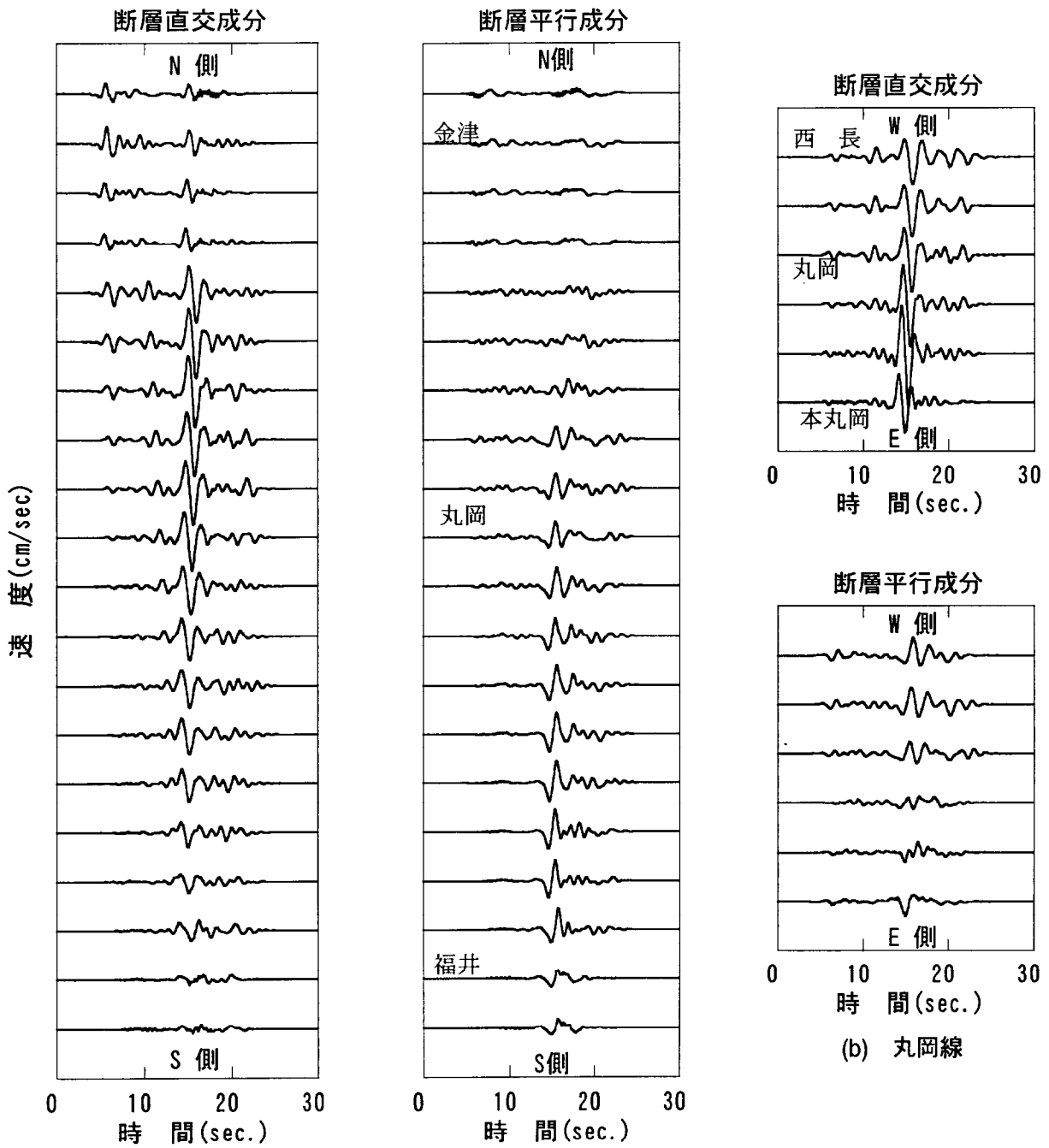


図 3.46 代表地点での擬似速度応答スペクトル(減衰 5%)



(a) 北陸本線

図 3.47 北陸本線および丸岡線の沿った速度波形

3.3.4 地盤の影響

前項までの検討により、アスペリティ位置と破壊開始点の組合せにより、最大速度の分布が異なることを示した。本項では、地盤の影響が震源近傍の地震動強さにどの程度寄与しているのかの検討を行う。

地盤の影響を検討するために、地表面の波形の他に、更新世下位層(C層)解放面と、新第三紀層解放基盤面の波形を各々計算した。新第三紀層解放基盤面の波形は、更新世下位層(C層)の物性値を新第三紀層であるD層と同じ物性値に変更し、シミュレーションを行った。

図 3.48 に Case5 における代表 6 地点の水平 2 次元の擬似速度応答スペクトルを示す。点線が地表面であり、実線が C 層解放面であり、破線が D 層解放面である。三国においては、新第三紀層がほぼ地表面に露頭しているため、スペクトルに変化は見られない。一方、新第三紀層が深い春江、森田、福井に関しては、C 層上面と新第三紀上面で、差の大きな周期帯では約 2 倍に増幅していることがわかる。また、この 3 地点は、表層地盤の層厚も厚い。周期 1~2 秒の間で 2 倍以上に増幅しており、表層地盤による影響がかなり大きいことがわかる。福井地震においては、震源から卓越する周期が概ね 1~2 秒、新第三紀以浅の更新世で増幅する周期も 1 秒前後であり、表層地盤も非線型化して、ほぼ同じような周期帯になる。これらのことが重合されることにより、福井地震における震源近傍での地震動強さをかなり大きくした理由であると考えられる。

表層地盤による最大地動強さへの影響を検討するために、C 層解放面に対する地表面の最大速度増幅倍率を面的に示したのが、図 3.49 である。沖積層の厚い領域では、1.5~2.5 倍程度増幅しており、福井平野における最大速度振幅に表層地盤の存在が大きく影響していることがわかる。同様に最大加速度の増幅率を示したものが、図 3.50 である。福井平野内においては概ね 1.5 倍以下であり、最大速度に比べると沖積層の影響は少ない。

以上、強震動シミュレーションによる地震動強さは、被害から推定された地震動強さとの対応は概ね良く、被害を説明できることを示した。しかしながら、福井平野全体の最大速度の分布においては、幾つか異なる領域が生じている。この要因として一番に考えられるのが、地盤構造のモデル化であろう。前述したように、本シミュレーションにおいては、福井工事事務所の地盤調査の速度構造を基に、地質境界を参考として福井平野全体の地盤モデルを作成したが、実際は、同じ地質であっても、平野内の場所により、その速度構造は異なることが予想され、より面的に高密度な地盤情報が必要となるものと考えられる。

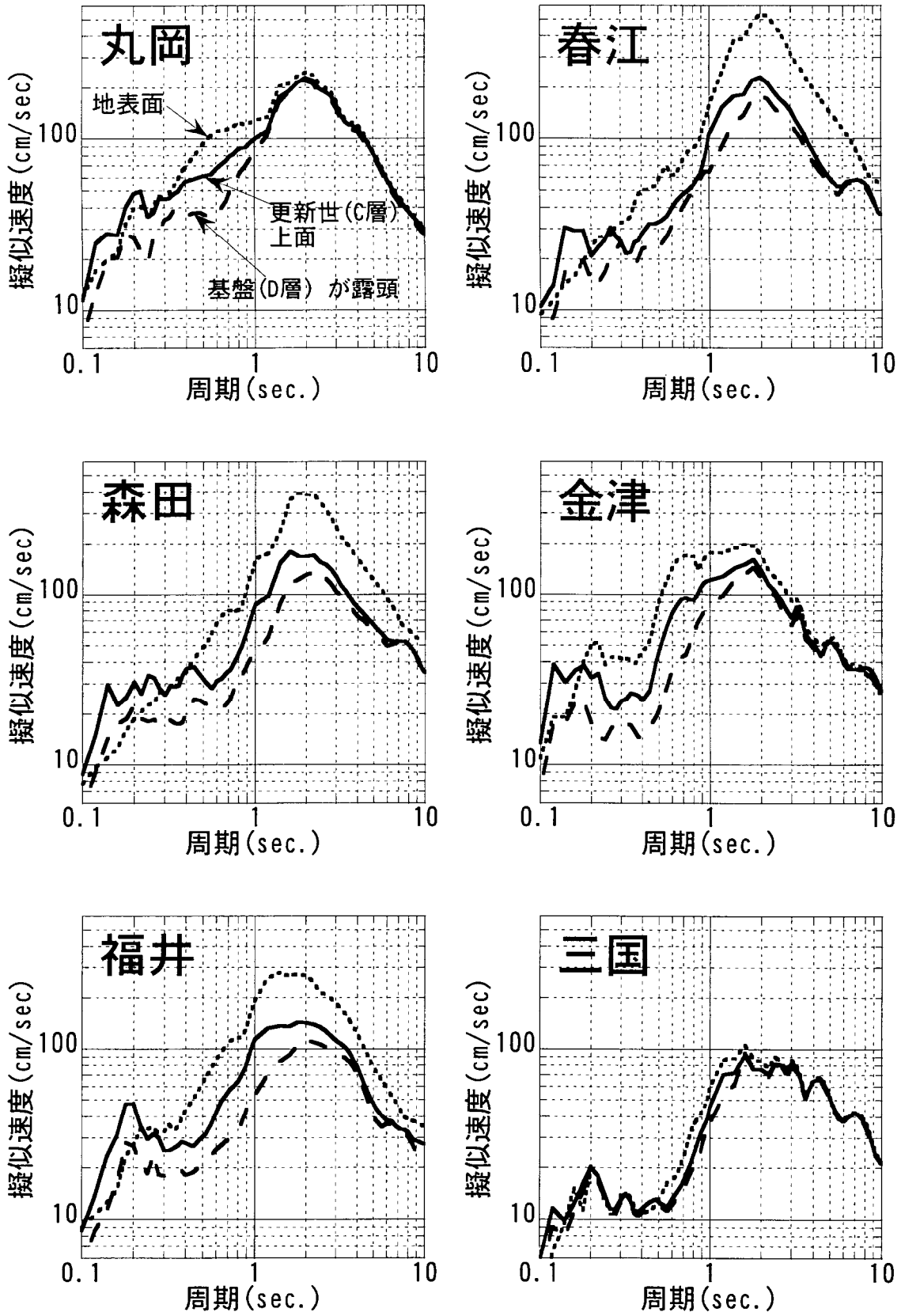


図 3.48 図 3.43 各代表点における地表面と更新世上面(C層)及び基盤層(D層)が露頭したと仮定したモデルにおける減衰5%の擬似速度応答スペクトルの差異

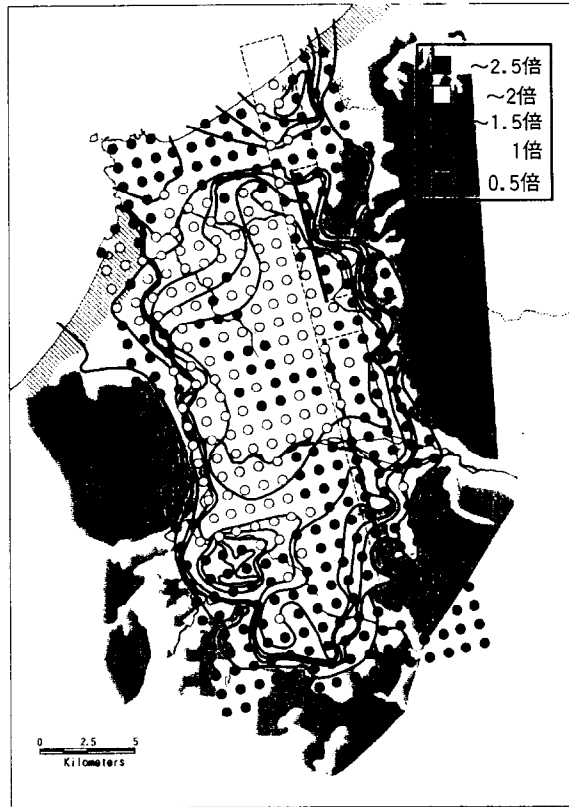


図 3.49 表層地盤 (C層上面~地表面) の増幅率 (水平最大速度)

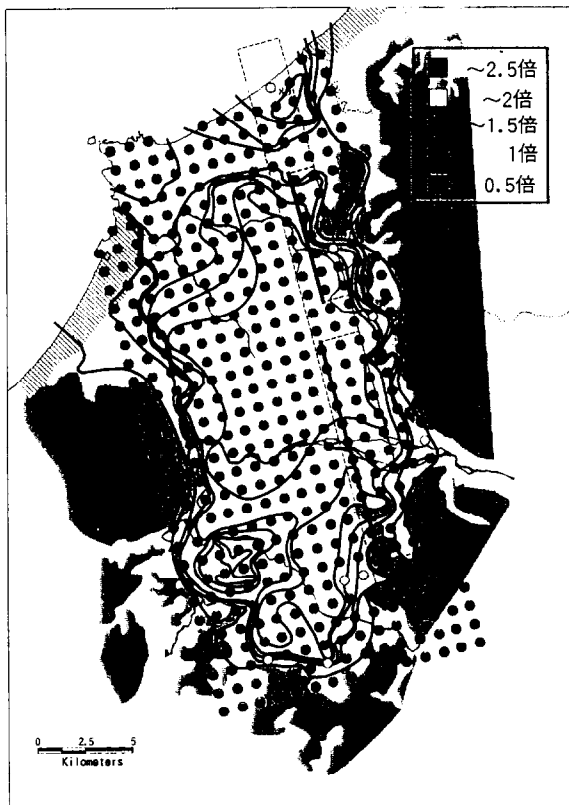


図 3.50 表層地盤 (C層上面~地表面) の増幅率 (水平最大加速度)

第4章 福井地震の地震動強さと

近年の強震記録から評価した震源近傍での地震動の特性

前章でも示したように震源近傍での地震動強さは、震源過程、地盤構造により強く影響される。従って、震源近傍の地震動強さをより明らかにするためには、より多くの地震による震源近傍の地震動強さを比較検討することが重要である。

近年では、各地震毎におけるデータ数は少ないものの、異なる地震をまとめると、震源近傍での強震記録が比較的多く観測されている。本章では、まず、これら震源近傍での強震記録を整理することにより、福井地震以外の地震における震源近傍の地震動強さの検討を行い、震源近傍における地震動特性の統計的な地震動強さについて把握する。

つぎに、限られた観測結果である強震記録のデータを補うために、前章までに推定された福井地震の推定結果を併せて評価し、それら震源近傍における地震動強さの比較検討を行う。

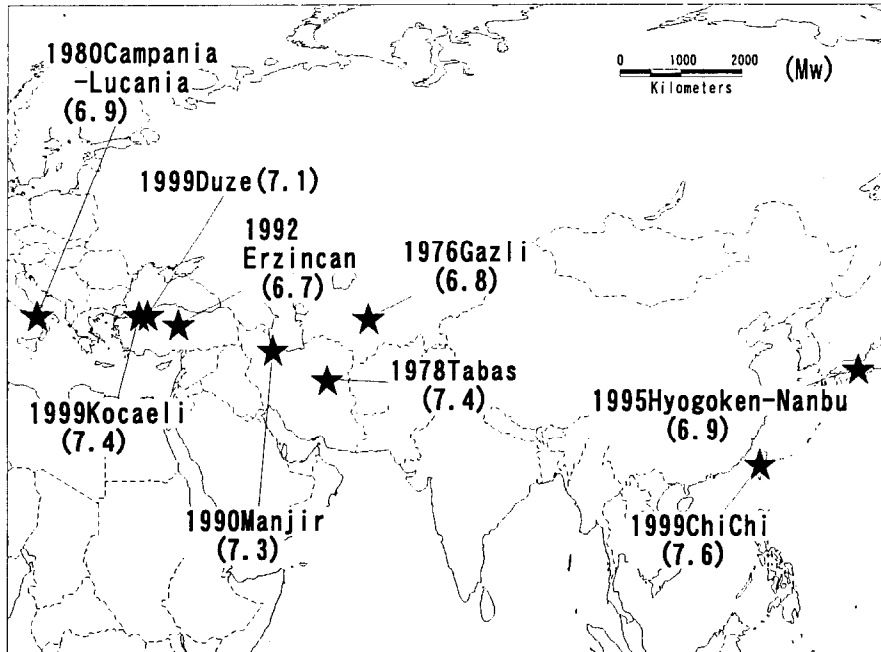
1948年福井地震とほぼ同じ規模の地震における震源近傍の地震動の評価は、内陸直下の地震として重要であり、特に、多大なる被害をもたらした1995年兵庫県南部地震との比較は、都市直下の地震のレベルを検討する上で重要であると考えられる。

4.1 強震記録に基づく震源近傍での地震動強さ

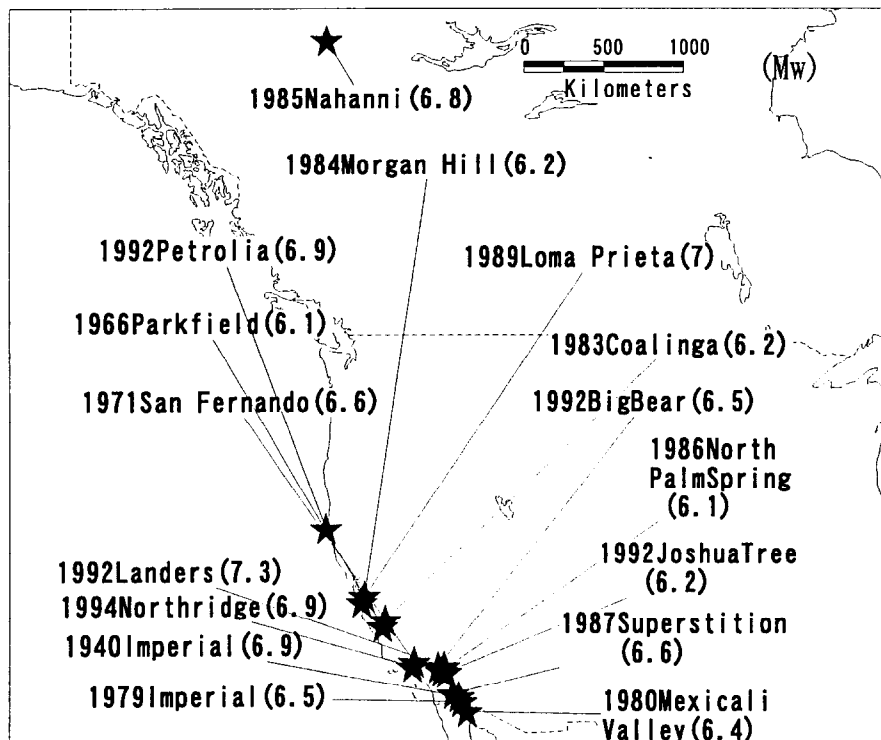
4.1.1 震源近傍での強震記録のデータベース

対象とした地震は、内陸で発生したモーメントマグニチュード（以降、マグニチュード）6以上の地震のうち、震源近傍での強震記録が利用可能な地震である。図 4.1 に対象とした地震の震央位置を示す。地震数としては、米国カルフォルニアの地震が 15 地震と圧倒的に多く、次に多いにはトルコの 3 地震、他国では、ほぼ 1 地震づつの総計 26 地震である。なお、震源近傍の範囲としては、断層面最短距離でほぼ 10km 以内とした。なお距離の取り方は、断層面における滑りの大きな領域からの距離ではなく断層面全体からの最短距離としている。

整理した強震記録の一覧表を表 4.1 に示す。観測記録数としては 98 記録である。同表には、観測点までの断層面最短距離[*DIST*]、観測点の表層地質[*GR COND*]、記録からもとめた計測震度[*SI*]、最大加速度[水平：*PGA(H)*、上下：*PGA(V)*]、最大速度[水平：*PGV(H)*、上下：*PGV(V)*]と、継続時間[*TD*]を示した。なお、発生日は世界標準時とした。最大速度をもとめるにあたり、1995 年兵庫県南部以降の地震においては、0 軸補正のみを施した後、加速度時刻歴の数値積分を行っている。1995 年以前の記録に関しては、一律 10 秒のローカットフィルターを施し、速度波形をもとめている。水平動の最大値は、2 成分のベクトル合成の最大値とした。表中に、その方向を N より時計廻りの角度で記載している。なお、幾つかの記録で、記録の方向が不明なものに関しては、その角度を記載していない。強震動に影響を及ぼす地盤の影響を見るためには、表層の地質区分だけでは必ずしも十分ではないが、既往の距離減衰式[例えば、大野(1999)]において、地質区分を用いて、比較的良く分離がなされている。また、実際には深層構造を含めた地盤速度構造の情報が得られている観測点は少ない。従って、本稿では、大野(1999)を参考に、H:完新世、P:更新世、T:第三紀以前の 3 種類の表層地質に区分した。表層地盤の分類にあたっては、観測点の地盤情報がある場合は、その情報を基に分類し、1999 年 ChiChi, Kocaeli 地震のように観測点での地盤情報が無い場合は、地質図を参照した。なお、米国の記録に関しては、主に大野(1999)の結果を参照している。



(a) アジア・ユーラシア



(b) 北米

図 4.1 震源近傍での強震記録が得られている M_w 6 以上の地震の震央位置

表 4.1 震源近傍での強震記録一覧(1)

YEAR	EARTHQUAKE NAME	Mw	STATION CODE	DIST. (km)	GR. COND.	SI	PGA(H) G	DIRC. Deg.	PGA(V) G	PGV(H) cm/s	DIRC. Deg.	PGV(V) cm/s	TD	Mref
1940/05/19	Imperial Valley	6.9	EL09	7	H	5.4	0.35	170	0.27	50	132	11	25	1
1966/06/28	Parkfield	6.2	CL2 CL5	5 8	H H	5.8 5.2	0.48 0.43	- 269	0.20 0.12	78 26	- 253	14 7	7	2
1971/02/09	San Fernando	6.6	PDM	5	T	6.3	1.36	35	0.70	122	185	56	7	1
1976/05/17	Gazli	6.7	KAR	4	T	6.0	0.75	90	1.33	78	165	62	7	3
1978/09/16	Tabas	7.4	TBS	3	H	6.2	0.96	327	0.73	129	200	39	19	4
			EL03	9	H	5.3	0.29	345	0.11	57	105	9	14	
			EL04	4	H	5.5	0.52	119	0.20	85	25	16	9	
			EL05	1	H	5.7	0.55	331	0.47	95	62	40	9	
			EL06	1	H	5.7	0.43	57	1.61	121	251	57	11	
			EL07	2	H	5.9	0.51	16	0.46	113	227	26	6	
1979/10/15	Imperial Valley	6.5	EL08	5	H	5.5	0.63	123	0.35	72	280	23	6	5
			EL10	9	H	5.2	0.24	159	0.10	56	98	9	13	
			EDA	6	H	5.7	0.48	6	0.46	73	87	22	7	
			HOL	7	H	5.2	0.25	60	0.21	72	91	10	12	
			MEL	1	H	5.7	0.37	52	0.25	117	232	29	8	
			BCR	2	H	6.0	0.79	216	0.44	54	195	12	10	
1980/05/25	Mammoth Lakes	6.2	CC	9	P	5.4	0.49	143	0.38	26	61	25	10	6
1980/11/23	CampanoLuciano	6.7	STR	3	P	5.4	0.33	104	0.25	74	101	25	16	7
1980/06/09	Mexicali Valley	6.4	VIC	2	H	6.1	1.10	258	1.50	86	90	29	11	
			CPR	7	H	5.5	0.64	240	0.29	36	262	12	11	
1983/05/02	Coalinga	6.3	PVS	13	H	5.9	0.60	30	0.37	62	43	16	8	5
			CLA	1	P	6.1	1.16	116	0.38	79	282	16	4	
			HAV	2	P	5.5	0.31	227	0.11	40	51	12	13	
1984/04/24	Morgan Hill	6.2	GL6	6	T	5.4	0.33	40	0.41	37	258	15	7	9
			GL4	8	H	5.0	0.39	213	0.39	22	240	11	14	
			GL7	9	H	4.5	0.18	3	0.38	8	207	5	10	
1985/12/23	Nahanni	6.7	S01	9	T	5.9	1.34	110	2.32	48	31	42	8	5
			S02	9	T		0.39	-	0.53	33	-	30		
			PSP	4	H	5.7	0.72	177	0.77	73	7	14	5	
			DSS	4	H	6.0	1.12	146	0.36				8	
1986/07/08	North Palm Springs	6.0	CAB	7	P	4.7	0.23	24	0.36	17	120	7	8	5
			DHS	7	H	5.4	0.37	221	0.55	36	340	24	8	
			WTF	7	P	5.7	0.68	242	0.43	41	21	18	4	
			MV	15	H	5.5	0.23	284	0.34	41	133	10	7	

表 4.1 震源近傍での強震記録一覧(2)

YEAR	EARTHQUAKE NAME	Mw	STATION CODE	DIST. (km)	GR. COND.	SI	PGA(H) G	DIRC. Deg.	PGA(V) G	PGV(H) cm/s	DIRC. Deg.	PGV(V) cm/s	TD	Mref	
1987/11/24	Superstition Hills	6.6	SUP	6	T	6.1	0.56	315	0.45	157	249	32	11		
			PAR	1	H	5.9	0.99	190	0.70	50	173	22	13	10	
			COR	2	T	5.9	0.63	347	0.43	347	56	170	19	8	
1989/10/18	Loma Prieta	7.0	LXD	3	T	6.1	0.45	239	0.13	120	226	25	4		
			ASH	8	H	4.8	0.17	62	0.08	31	18	10	27		
			CAP	15	H	5.8	0.54	149	0.50	41	318	20	13	11	
			SAA	7	P	5.6	0.50	174	0.35	57	225	27	9		
			SCO	18	T	5.4	0.49	315	0.33	23	345	12	10		
			GIL1	9	T	5.6	0.46	84	0.21	40	34	15	5		
			GGC	9	P	5.3	0.39	135	0.15	32	64	13	5		
1990/06/20	Manjir	7.3	ABB	7	H	5.7	0.53	307	0.42	63	101	43	30	12	
1992/03/13	Erzincan	6.6	ERZ	2	H	5.9	0.49	82	0.38	118	264	22	8	5	
1992/04/23	Joshua Tree	6.2	IDV	21	H	5.7	0.40	82	0.11	54	264	8	7	13	
1992/04/25	Petrolia	7.0	OPM	5	T	6.1	1.72	36	0.74	130	193	61	14		
			PTR	10	H	6.1	0.70	111	0.16	97	264	21	17	14	
1992/06/28	Landers	7.3	LUC	2	T	5.7	0.87	181	0.82	80	105	44	14		
			JSH	7	H	5.5	0.29	72	0.18	45	250	16	29	13	
1992/06/28	Big Bear	6.5	BBL	5	T	5.6	0.63	312	0.19	35	171	11	10	13	
1994/01/17	Northridge	6.7	SCS	1	H	6.2	0.87	32	0.48	122	202	25	7		
			JFP	1	H	6.2	0.62	109	0.39	113	172	35	10		
			SYL	2	H	6.2	0.83	358	0.53	131	191	19	6		
			RRS	2	H	6.4	0.88	26	0.83	179	211	49	7		
			U56	3	H	6.1	0.41	46	0.28	117	221	30	11		
			NHL	4	H	6.3	0.73	49	0.54	120	218	31	6		
			SVA	4	H	6.2	0.93	169	0.45	78	275	25	9		
			ARL	5	H	5.5	0.36	327	0.54	41	263	18	14	15	
			PKC	5	T	5.6	0.42	35	0.30	56	206	14	10		
			PDM	5	T	5.6	0.50	227	0.18	50	26	16	4		
			U53	7	H	5.7	0.39	169	0.41	63	184	15	13		
			U55	9	H	5.9	0.71	206	0.34	67	40	14	7		
			SHR	11	H	6.0	0.55	178	0.38	97	357	18	32		
			TRZ	11	H	6.5	1.97	117	1.03	114	268	73	12		
			U57	12	H	5.8	0.48	243	0.28	49	56	19	6		

表 4.1 震源近傍での強震記録一覧(3)

YEAR	EARTHQUAKE NAME	Mw	STATION CODE	DIST. (km)	GR. COND.	SI	PGA(H) G	DIRC. Deg.	PGA(V) G	PGY(H) cm/s	DIRC. Deg.	PGY(V) cm/s	TD	Mref		
1995/01/17	Hyougoken Nanbu	6.9	TKT	3	H	6.5	0.68	324	0.30	157	310	20	11			
			FKI	4	H	6.5	0.81	126	-	130	131	-	-	7		
			JMA	4	P	6.4	0.83	143	0.34	326	0.43	104	326	40	9	5
			UNV	4	T	5.7	0.43	321	0.43	321	0.29	56	173	19	7	
			KHB	5	H	5.9	0.51	152	0.29	152	0.29	108	155	32	19	
1999/08/17	Cocaeli	7.4	POI	5	H	5.7	0.34	138	0.57	71	315	62	10			
			YPT	9	P	5.4	0.34	161	0.24	94	314	314	37	33		
			IZT	11	T	5.2	0.24	68	0.14	44	0.14	44	114	15	15	10
			SKR	4	T	4.8	0.41	-	0.26	48	0.26	48	-	39	44	
			T129	1	H	6.0	1.00	280	0.34	280	0.34	78	135	38	29	
1999/09/21	ChiChi	7.6	T076	1	H	5.7	0.42	2	0.28	88	128	33	29			
			T102	1	T	5.7	0.30	264	0.17	111	230	68	33	29		
			T067	1	T	5.9	0.56	301	0.23	301	0.23	108	117	49	23	
			T052	1	T	6.3	0.50	331	0.19	331	0.19	260	320	170	17	
			T065	1	T	6.0	0.80	105	0.26	105	0.26	147	122	69	29	
			T075	1	H	5.5	0.33	266	0.22	266	0.22	116	93	50	29	
			T068	2	T	6.0	0.53	249	0.52	249	0.52	383	319	229	13	
			T103	2	P	5.0	0.17	209	0.14	209	0.14	69	270	61	24	
			T087	2	T	4.8	0.12	36	0.09	36	0.09	51	299	58	24	
			C080	3	T	6.5	1.13	42	0.72	42	0.72	137	232	41	22	
			T049	3	H	5.2	0.32	232	0.18	232	0.18	62	121	27	22	
			C028	4	P	6.2	0.87	210	0.34	210	0.34	94	152	30	8	
			T071	4	H	5.9	0.81	219	0.42	219	0.42	86	348	60	24	
T072	7	T	5.9	0.47	91	0.28	91	0.28	90	276	39	23				
T089	8	T	5.3	0.37	251	0.19	251	0.19	45	272	20	24				
T078	8	H	5.6	0.47	291	0.17	291	0.17	45	294	20	26				
T084	10	T	6.5	0.99	271	0.32	271	0.32	126	66	27	17				
T074	13	H	6.0	0.61	106	0.27	106	0.27	77	293	25	15				
1999/11/12	Duze	7.1	DZC	9	H	5.9	0.53	285	0.34	88	282	22	11			
			BOL	19	H	6.1	0.90	143	0.20	66	89	21	21	9	10	

Mrefは、マグニチュードを参照した参考文献番号

4.1.2 震源近傍での地震動強さ

(1) 計測震度

図 4.2 にマグニチュードと計測震度の関係を表層地質分類毎に示す。○が完新世、△が更新世、×が第三紀以前に位置する観測点である。これらの強震記録による計測震度は、4.5 以上、最大で 6.5 であり、多くは 5.5～6.0 程度にある。最大震度 6.5 となった記録は、1994 年 Northridge 地震の TRZ、1995 年兵庫県南部地震の TKT、FKI、1999 年 Chichi 地震の C080、T084 である。マグニチュード 6.5 程度以上の地震で、急激に高震度を示す記録が多く見られることがわかる。また、表層地質の違いによる震度への影響は、顕著には認められない。

(2) 最大加速度

図 4.3 にマグニチュードと最大加速度の関係を表層地質分類毎に示す。(a)が水平動であり、(b)が上下動である。水平最大加速度の最大は、1994 年 Northridge 地震の TRZ の記録であり、ほぼ $2g$ が観測されている。この観測点は、丘地形による地形増幅効果が 2～3 倍あるとされている[後藤・他(1995)]。また、約 $1.4g$ を示す 1971 年 San Fernando 地震の PDM はダム上での記録であり、地形効果による増幅効果が含まれているとされている[Trifunac(1975)]。1992 年 Petrolia 地震の CPM の記録は、約 $1.7g$ である。この記録は、周期 0.2 秒程度のパルスがその最大値を示しており、そのパルスを除けば、その最大値は、 $0.6g$ 程度である。これらの地形の影響が大きな記録や、パルスの記録を除くと、どのマグニチュードにおいても、 $0.3g$ から $1g$ 程度にばらついており、マグニチュードや、表層地質の依存性は殆ど見られない。平均では $0.6g$ 程度であり、既往の検討結果[福島・他(1992)]とほぼ等しい。

上下動に関して最大を示すのは、1985 年 Nahanni の記録であり、 $2g$ を超える記録が観測されている。この記録を除けば、上下動においては、 $0.1g$ から $1g$ 程度にばらついており、水平動に比べてその変動幅が大きい。また、マグニチュードや表層地質の違いによる差異も水平動と同様にほとんど認められない。

ばらつきの影響要因のひとつである距離の影響を確認するために、対象記録数の多い 1979 年 Imperial Valley 地震、1994 年 Northridge 地震、1999 年 ChiChi 地震における距離と水平最大加速度の関係を図 4.4 に示す。本検討で用いた距離内での最大加速度値は、ほぼ全体のばらつきの中に入っており、顕著な減衰傾向は見られない。

(3) 最大速度

図 4.5 にマグニチュードと最大速度の関係を示す。(a)が水平動であり、(b)が上下動である。水

平動で、最大値を示すのは、1999年 ChiChi 地震での T068, T052 であり、各々 350cm/s, 250cm/s を超える記録が観測されている。マグニチュード7程度の地震では、概ね 150~200cm/s である。上下動に関しても、ほぼ水平動と同じで、最大を示す 1999年 ChiChi 地震の2記録で 200cm/s 程度の記録が得られている。マグニチュード7程度での地震では、概ね 70cm/s 以下である。

最大速度に関しては、水平・上下とも、マグニチュード 6.5 程度までは、マグニチュードが大きくなるにつれて、最大速度も大きくなる傾向がある。また、1999年 ChiChi 地震における最大速度を記録した2地点を除けば、マグニチュード 6.5 以上の地震でのマグニチュード依存性はあまり顕著ではない。最大加速度の場合と同様に、3地震における最大速度と距離との関係を図5に示す。最大加速度と同様、本検討で用いた距離内での最大速度値は、距離とともに若干減少する傾向は見られるものの、ほぼ全体のばらつきの中に入っている。

(4) 上下動強さと水平動強さの関係

上下動の地震動強と水平動の地震動強さとの関係を見たのが図 4.7 である。(a)が最大加速度であり、(b)が最大速度である。最大加速度では、水平に対する上下の比率は、概ね 0.5~1 の範囲に入っており、全体の平均で 0.73 である。また、表層地質による違いは見られない。一方、最大速度に関しては、概ね 0.5 以下であり、全体の平均で 0.39 である。また、軟質地盤になるほど、水平に比べ上下の最大速度は小さくなっており、その比率は、完新世で 0.33, 更新世で 0.46, 第三紀以前で 0.48 と明らかに異なっている。

(5) 継続時間

地震波の継続時間は、構造物の総入力エネルギー量と密接な関係があるため、重要な指標のひとつである。本検討で用いた継続時間の定義は、式(4.1)で示される Arias Intensity AI が 5%~95% になる範囲を継続時間[Trifunac et al.(1975)]とした。

$$AI = \frac{\pi}{g} \int_0^{T_{end}} [acc_{ns}(t)^2 + acc_{ew}(t)^2] dt \quad (4.1)$$

ここで、 g は重力加速度、 $acc_{ns}(t)$ 、 $acc_{ew}(t)$ は水平の各加速度成分、 T_{end} は記録の全時間を示す。マグニチュードと継続時間の関係を図 4.8 に示す。マグニチュードが大きくなるにつれて、継続時間が長くなる傾向が明瞭にわかる。また、軟質地盤の方が、硬質地盤に比べ、継続時間が長くなる傾向がある。地盤の影響が少ないと考えられる第三紀以前の観測記録において、この傾向を回帰すると、式(4.2)が得られ、図 4.8 に実線で示す。

$$\log T_D = 0.40M_w - 1.83 \pm 0.17 \quad (4.2)$$

実体波の継続時間は、断層面の破壊が伝わる時間とほぼ等しいと考えられる。そこで、断層面

の破壊領域全体[Somerville et al.(1999)]を等価な円で置き換え、その半径 r_{rup} [式(4.3)]を、破壊伝播速度 v_r で除した平均的破壊時間 T_{rup0} [式(4.5)]を図 4.8 に点線で示す。なお、地震モーメント M_0 とマグニチュードの関係は、Kanamori (1977) による式(4.4)を用い、断層面の破壊領域全体の大きさは、Somerville(1999)による地震モーメントとの関係式を用いた。破壊伝播速度 v_r は 3km/s と仮定した。

$$r_{rup} = \sqrt{2.23 \times 10^{-15} \times M_0^{2/3} / \pi} \quad (4.3)$$

$$\log M_0 = 1.5M_w + 16.1 \quad (4.4)$$

$$\log T_{rup0} = 0.5M_w - 2.68 \quad (4.5)$$

同図より、断層の平均的な破壊伝播時間は、観測波の継続時間の下限値をほぼ抑えていることがわかる。

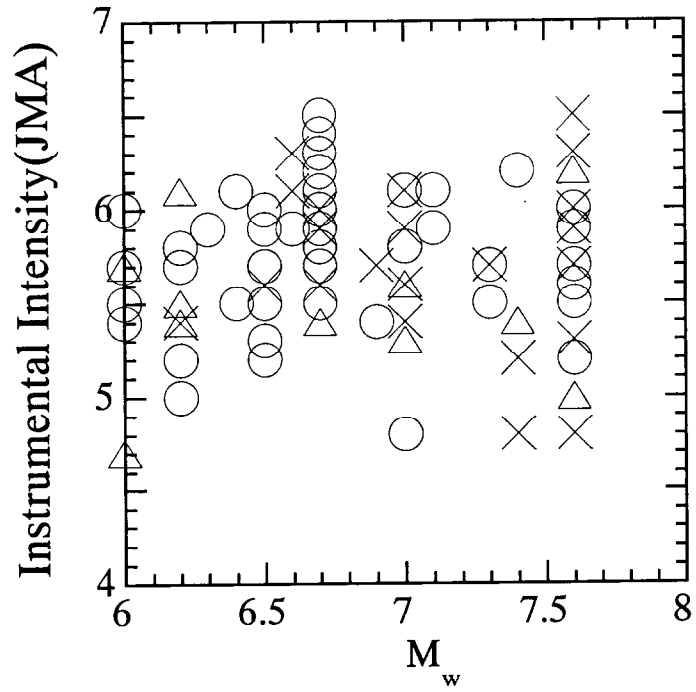


図 4.2 計測震度とマグニチュードの関係

- : Holocene
- △ : Pleistocene
- × : Prior to Quaternary

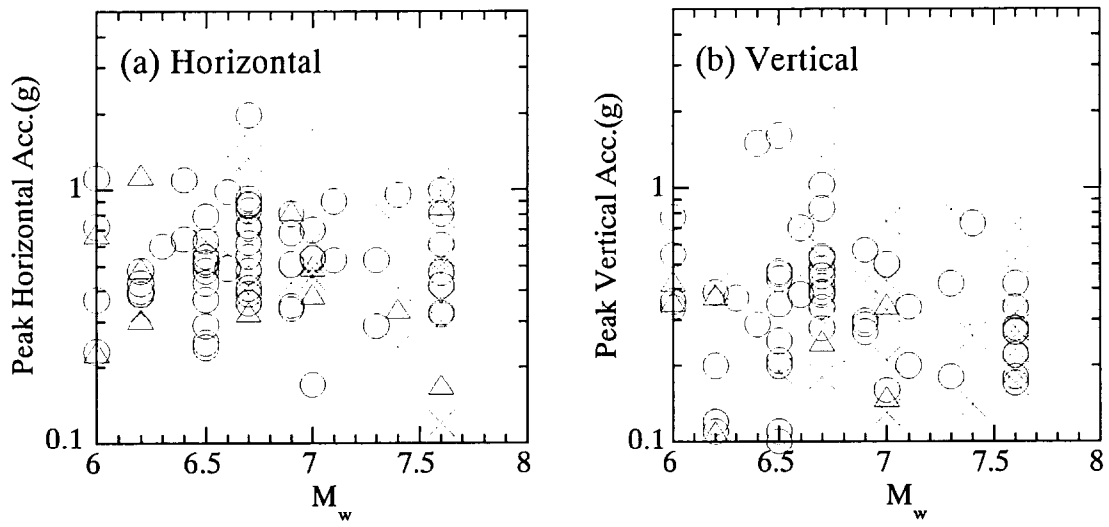


図 4.3 マグニチュードと最大加速度の関係
 ○ : Holocene △ : Pleistocene × : Prior to Quaternary

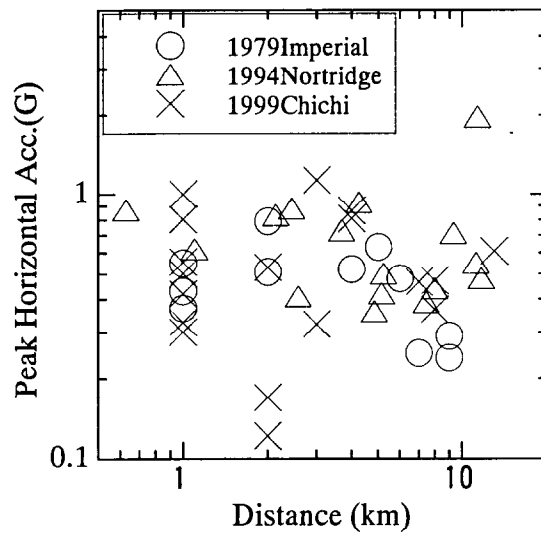


図 4.4 距離と水平最大加速度の関係

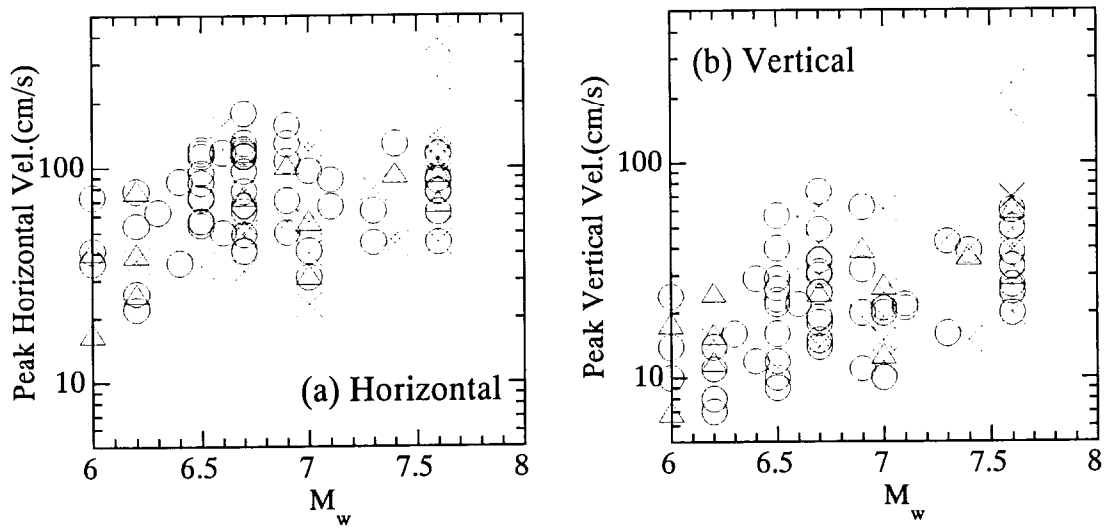


図 4.5 マグニチュードと最大速度の関係

○ : Holocene △ : Pleistocene × : Prior to Quaternary

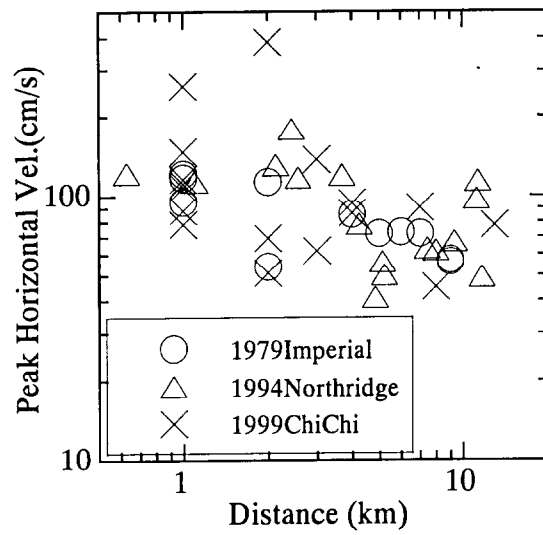


図 4.6 距離と水平最大速度の関係

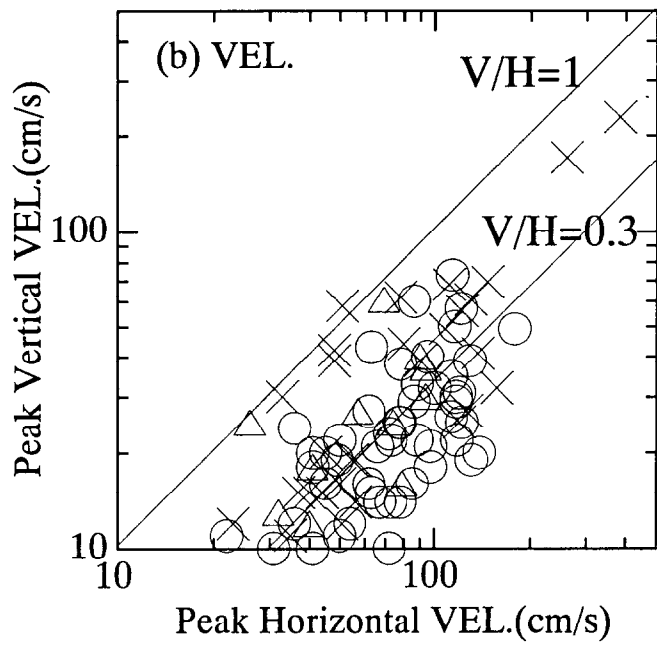
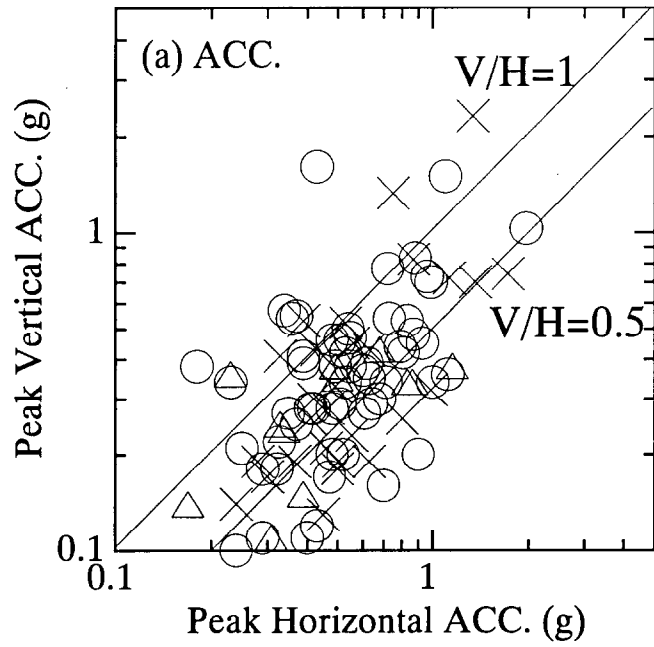


図 4.7 水平動と上下動の関係

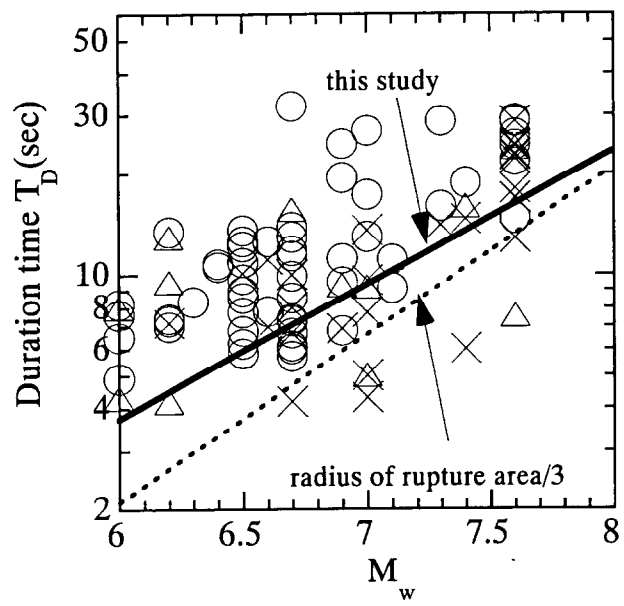


図 4.8 マグニチュードと継続時間の関係

- : Holocene
- △ : Pleistocene
- × : Prior to Quaternary

4.1.3 応答スペクトル特性

(1) スペクトル形状

強震記録の水平2次元擬似速度応答スペクトル(減衰5%)を図4.9に示す。図4.10(a)にマグニチュード7クラスの地震として、1995年兵庫県南部地震(M6.9)、1994年Northridge地震(M6.7)と1989年LomaPrieta地震(M7.0)を、図4.10(b)にマグニチュード7.5クラスの地震として、1999年ChiChi地震(M7.6)、1999年Kocaeli地震(M7.4)、1992年Landers地震(M7.6)、及び1978年Tabas地震(M7.4)を示す。ここで、マグニチュード7クラスとは概ね6.5以上7以下を示し、マグニチュード7.5クラスとは、7を越す規模のマグニチュードを対象としている。マグニチュード7クラスの地震では、1秒～2秒程度に卓越周期を有し、ほぼ単峰型の形状を示している。また、卓越周期における速度振幅は200cm/s程度以上と大きい。

マグニチュード7.5クラスの地震は、概ね、周期5秒程度に卓越周期を有しており、マグニチュード7クラスの地震に比べると、明らかに卓越周期が異なること、さらには、短周期の減少が比較的緩やかなことがわかる。ただし、1999年ChiChi地震におけるT068は、周期10秒前後に卓越周期が見られ、同じ地震であるT075に比べ、周期が2倍異なっている。両者の位置関係は、T068が断層北端、T075が断層線ほぼ中央部に位置しており、断層との位置関係で卓越周期が異なる。

同図には、参考のために、常時微動のH/Vで周期0.7秒の卓越が見られた[翠川・他(2000)]1999年ChiChi地震のT065の記録と、軟弱地盤上の観測点で地盤特性の影響が強いと推定されている[Harzel et.al(1991)]1978年Tabas地震のTBSの記録も示す。T065では、卓越周期5秒の他にも地盤特性に応じた0.7～1秒付近で山を有し、2山型の形状を示している。また、TBSでは、全体的に短周期のレベルが上がった形状を示している。このように、地盤特性が顕著と推定されている観測点における記録は、単峰型にはならない。ただし、地盤特性が強くない記録を含め、マグニチュード7クラスの地震とは明らかに傾向が異なる。

(2) 卓越周期とその振幅

前節で示したように、マグニチュード7クラスと7.5クラスでは、スペクトル特性が異なる。水平2次元擬似速度応答スペクトル(減衰5%)において、長周期側で比較的顕著に卓越する周期を読み取り、マグニチュードとの関係を示したのが図4.10である。なお、この際には、地盤や地形効果による卓越周期が顕著に見られると判断される記録は除外した。従って、対象とした記録数は、18地震の43記録である。

卓越周期は、マグニチュード7クラスまでは、ばらつきは大きいですが、マグニチュード大きくなるにつれて、卓越周期が大きくなる傾向が見られる。特に、それ以上のマグニチュードの地震では、比較的安定して、周期が長くなる傾向が見られる。また、表層地質による違いは見られない。平均的評価として、この傾向を回帰すると、式(4.6)が得られ、図中の実線のようになる。

$$\log T_p = 0.49M_w - 2.96 \pm 0.20 \quad (4.6)$$

震源近傍の観測記録の見られる長周期パルスの周期は、観測点と破壊開始点を結ぶ線上において通過する破壊領域（アスペリティ）の長さとの相関が良いことが指摘[釜江・他(1998)]されている。震源インヴァージョンモデルより統計処理された最大アスペリティ領域の等価半径 r_l （式(4.7)[Somerville et al.(1998)]）を破壊伝播速度 V_r で除した平均的破壊時間 T_{rup} （式(4.8)）を図4.10中の点線で示す。なお、継続時間の検討と同様に、地震モーメント M_0 とマグニチュードの関係は、Kanamori(1979)による式(4.4)を用い、破壊伝播速度 V_r は3km/sと仮定した。

$$r_l = 1.08 \times 10^{-8} \times M_0^{1/3} \quad (4.7)$$

$$\log T_{rup} = 0.5M_w - 3.08 \quad (4.8)$$

最大アスペリティより求めた破壊時間と本検討での回帰曲線はほぼ一致する。このことは、レスポンススペクトルに見られる震源に起因した卓越周期の平均的値は、ほぼ平均的な最大アスペリティの大きさにより特徴づけられていることが理解できる。ただし、同一地震でもその卓越周期にはばらつきが見られる。アスペリティと観測点の位置関係、その破壊伝播の方向と観測点の位置関係、震源のタイプによる差等の要因が考えられるが、今後の検討課題である。

図4.11に、この卓越周期に対応した減衰5%の擬似速度応答振幅を示す。振幅においては、マグニチュードとの相関はあまり見られない。マグニチュード7クラスでは、1995年 Hyogoken nanbu地震におけるTKTが、マグニチュード7.5クラスでは1999年 ChiChi地震T068で500cm/sの最大応答振幅を示すが、残りの記録は概ね100~300cm/s程度に分布している。

4.1.4 まとめ

震源近傍の地震動強さを検討するために、近年のマグニチュード7.5クラスの地震を含むマグニチュード6以上の地震において、断層最短距離10km程度の強震記録の整理を行った。得られた知見は以下の通りである。

- 対象とした強震記録は、計測震度にして、最大で6.5であり、多くは5.5.~6.0程度である。また、マグニチュードが6.5程度以上になると高震度を示す記録が見られる。最大加速度は、地形効果等の影響のあるものは、大きく約2Gに達する記録もある。それらを除くと、概ね1G以下であり、平均的には0.6G程度である。この値は既往の距離減衰式の平均的な値とほぼ整合

している。また、最大加速度に関しては、表層地質、マグニチュードの依存性は見られない。

- 最大速度に関しては、マグニチュード 6.5 までは、ばらつきは大きいものの、表層地質、マグニチュードの依存性が見える。マグニチュード 6.5 以上では、ばらつきが大きくマグニチュードの依存性はわからない。最大値は、1999 年 ChiChi 地震の断層北側観測点の 2 地点で約 250cm/s を超える記録が観測されている。マグニチュード 7 程度では、150~200cm/s 程度である。
- 上下水平の比率では、最大加速度では、表層地質の違いによる差は見られず、概ね 0.5~1 の範囲であり、平均で 0.7 程度である。最大速度に関しては、概ね 0.5 以下であり、平均で 0.3 程度である。また最大速度においては、硬質地盤になるほど、上下水平比はあがる傾向が見られる。
- 継続時間は、マグニチュードとともに長くなり、軟質地盤ほど長くなる傾向が見られる。断層面の破壊領域を等価な円で置き換えた場合の半径から推定される破壊時間は、継続時間のほぼ下限を抑える。
- マグニチュード 7 クラスとマグニチュード 7.5 クラスでは、スペクトル特性が異なり、マグニチュード 7.5 クラスでは、マグニチュード 7 クラスに比べ、長周期成分が卓越する。これらスペクトルに見られる卓越周期は、マグニチュードとともに、長くなる傾向が見られる。特に、マグニチュード 7 クラスまでは、かなりばらつく傾向が見られるが、マグニチュード 7.5 クラスでは、比較的安定して、周期が延びる傾向が見られる。
- マグニチュードと卓越周期の関係の回帰式における卓越周期は、断層面内の最大アスペリティの破壊時間とほぼ対応しており、平均値としてマグニチュード 7 クラス 3 秒程度、7.5 クラスで 5 秒程度となる。また、卓越周期に応じた速度応答振幅に関しては、マグニチュード 7 クラスでは、1995 年兵庫県南部地震における TKT が、マグニチュード 7.5 クラスでは 1999 年 ChiChi 地震 T068 で 500cm/s の最大応答振幅を示すが、残りの記録は概ね 100~300cm/s 程度に分布している。

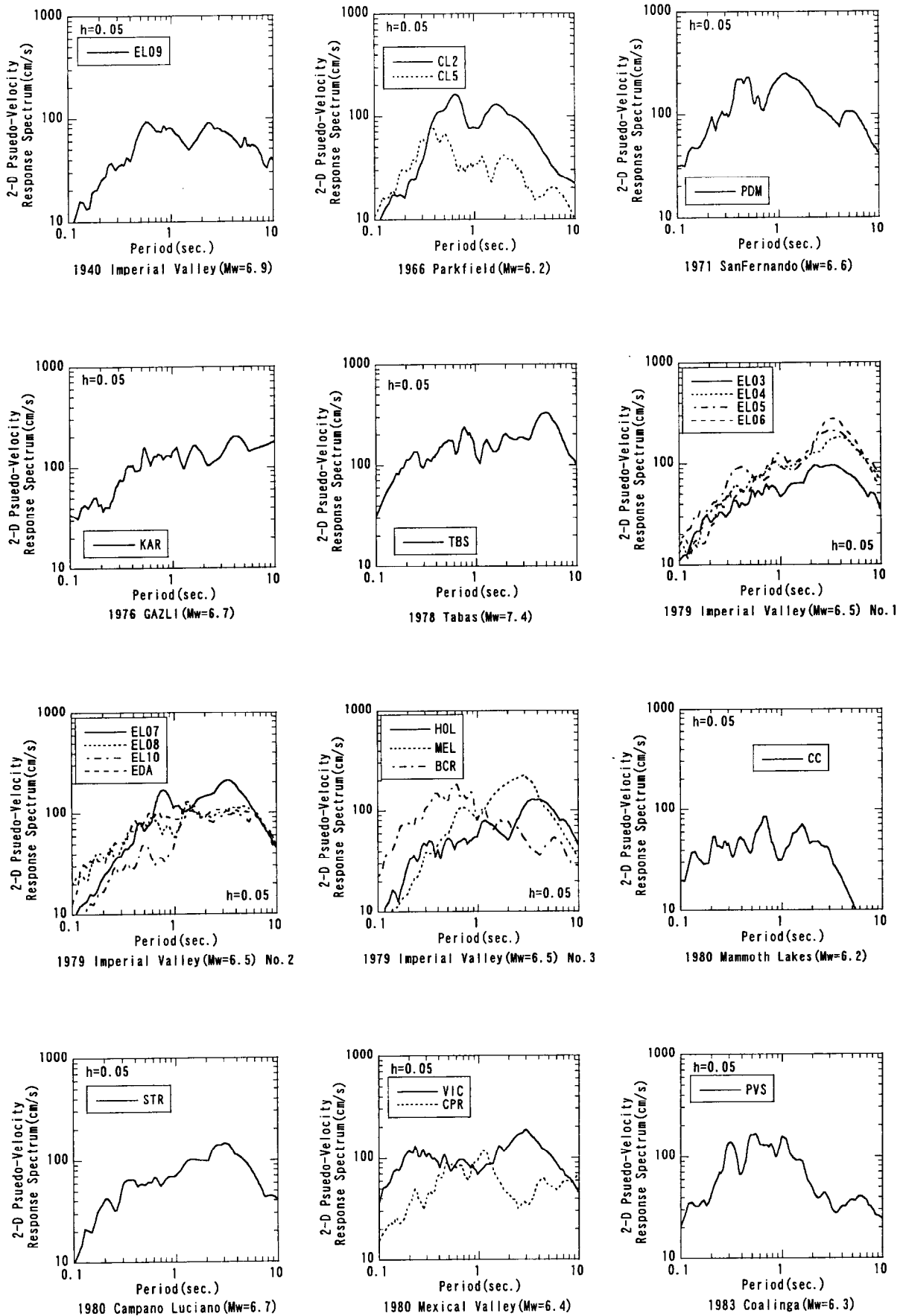


図 4.9(1) 震源近傍強震記録のスペクトル特性(その1)

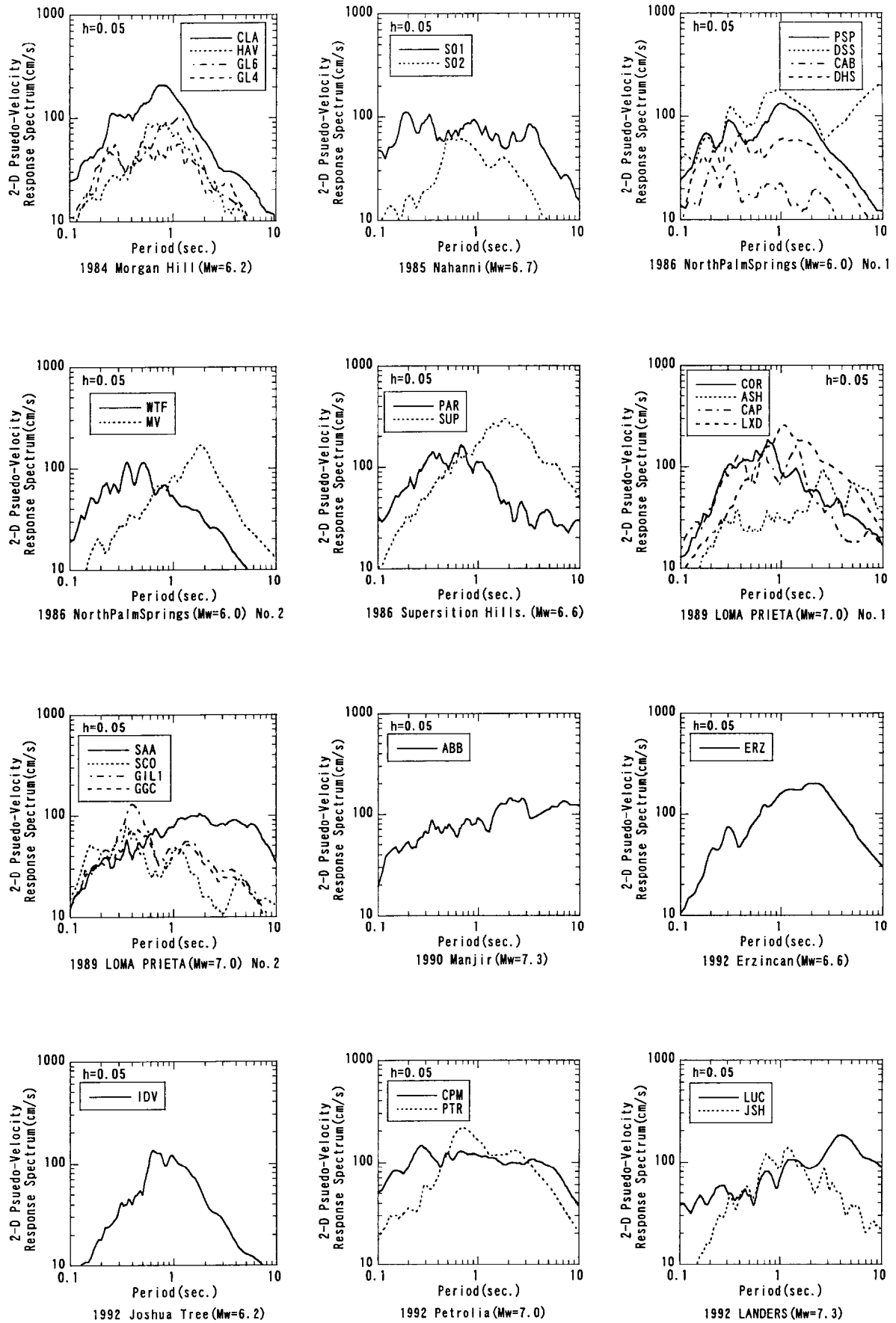


図 4.9(2) 震源近傍強震記録のスペクトル特性(その2)

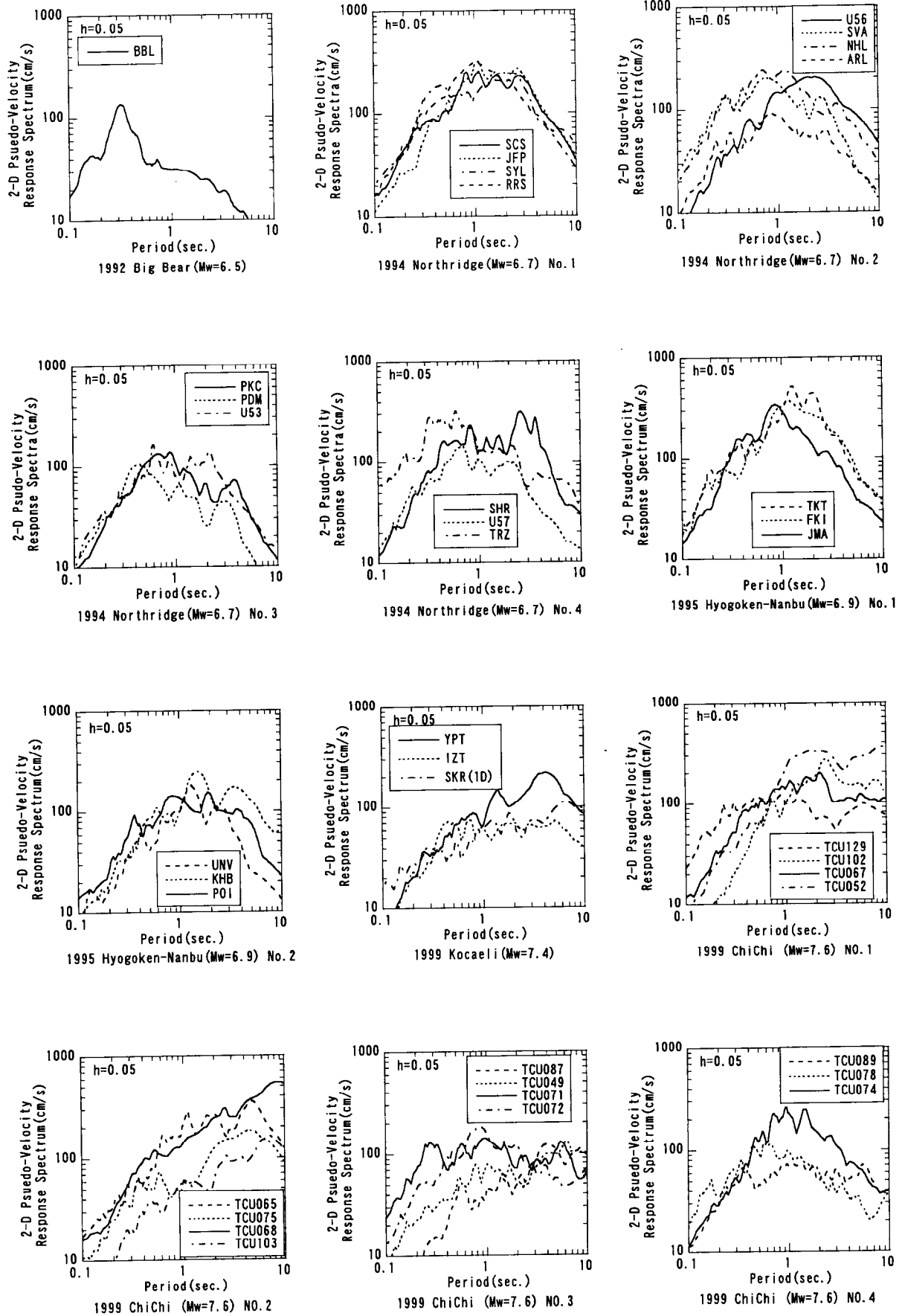


図 4.9(3) 震源近傍強震記録のスペクトル特性(その 3)

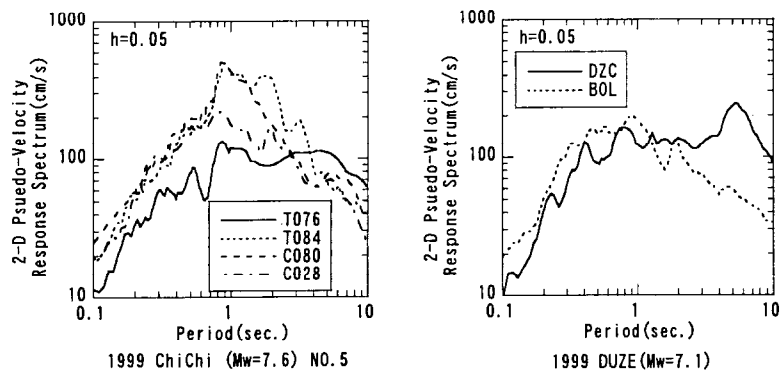
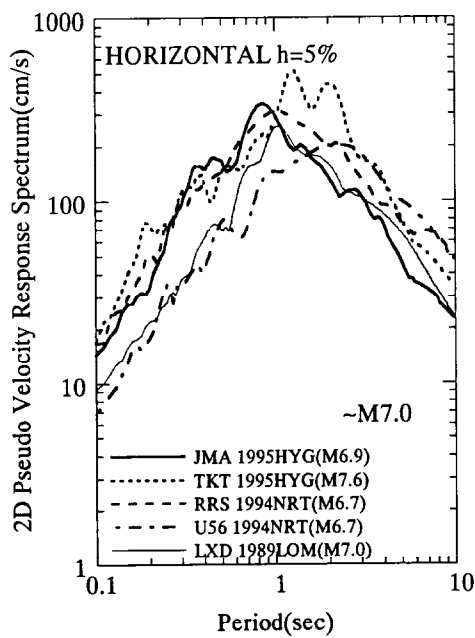
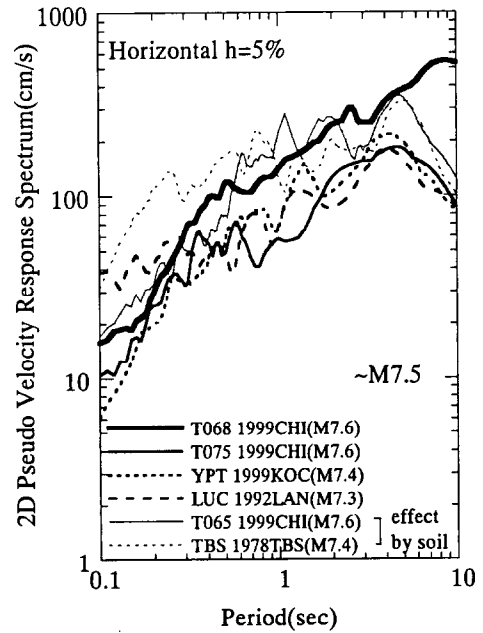


図 4.9(4) 震源近傍強震記録のスペクトル特性(その4)



(a) マグニチュード7クラス



(b) マグニチュード7.5クラス

図 4.10 震源近傍強震記録のスペクトル特性

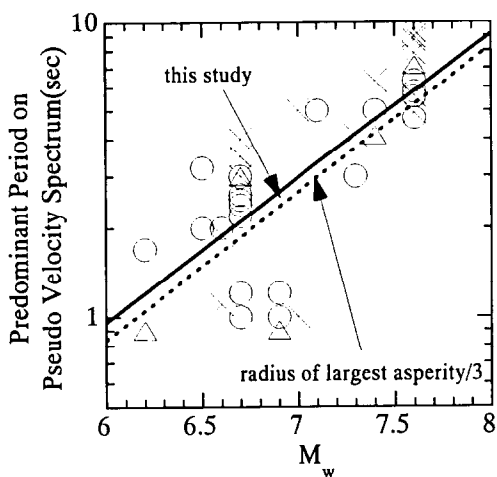


図 4.11 マグニチュードと卓越周期の関係
○ : Holocene △ : Pleistocene
× : Prior to Quaternary

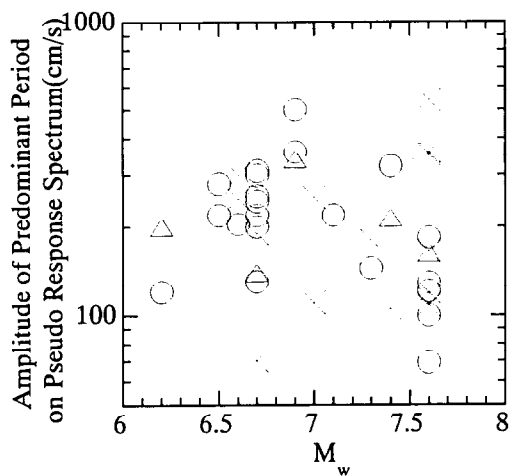


図 4.12 マグニチュードと
スペクトル振幅の関係
○ : Holocene △ : Pleistocene
× : Prior to Quaternary

4.2 福井地震の地震動強さと強震記録より評価される地震動強さ

福井地震における被害から推定される地震動強さと、前節で検討された強震記録に見られる地震動の関係について検討する。ここで、前章で検討した福井地震における断層モデルより、断層最短距離と、想定断層面内でのモーメントは均質とした場合の等価震源距離を図 4.13(a)(b)に各々示す。また、アスペリティ領域のみモデル化した場合の距離も各々示している。同図よりわかるように、福井地震における平野内での高被害領域は、概ね断層最短距離で 10km 以内に存在する。また、等価震源距離で考えると、15km 以内であり、ほぼ前節で示した強震記録のデータ範囲と整合していることがわかる。

福井地震のマグニチュードは M_{JMA} で 7.1 である。また、前章のシミュレーションにおける地震モーメント M_0 は概ね $2.1 \sim 2.6 \times 10^{27} \text{dyne} \cdot \text{cm}$ であり、 M_w に換算すると 6.8~6.9 である。そこで、整理した強震記録の中で、 $M_w 6.5$ 以上 7.0 以下の地震を対象として、それらの最大地動強さと、福井地震における震源域での地震動強さの比較を行う。強震記録における最大加速度と断層最短距離の関係を図 4.14(a)に、最大速度と断層最短距離の関係を図 4.14(b)に示す。なお、用いたデータのマグニチュードは平均で 6.7 である。また、記号は、前節と同様に、○完新世、△更新世、×第三紀以先である。同図で扱ったデータ範囲では、表層地質による地震動強さの差は明瞭には認められない。また、これらの記録の中で、最大加速度および最大速度の最大は、 $2g$ 程度、200cm/s 程度となっている。

また、同図には式(4.9)および式(4.10)に示す司・翠川(1999)の地殻内地震での距離減衰式を併せて示す。

$$\text{Log}(PGA) = 0.5M_w + 0.0043D - \log(X_s + 0.0055 \times 10^{0.5M_w}) - 0.003X_s + 0.61 \quad (4.9)$$

$$\text{Log}(PGV) = 0.58M_w + 0.0038D - \log(X_s + 0.0028 \times 10^{0.5M_w}) - 0.002X_s - 1.29 \quad (4.10)$$

なお、 D は震源深さであり、5km とし、マグニチュード M_w は、データの平均マグニチュード 6.7 とした。図 4.14(a)に示す最大加速度では、概ね、司・翠川(1999)の式と整合する。そこで、福井地震の規模での震源域近傍における強震記録の最大加速度平均レベルを式(4.9)で評価することとする。一方、最大速度に関して司・翠川(1999)の式は、観測データの下限を示している。式(4.10)を 2 倍することで、概ね強震記録の平均的な値と整合する。図中点線が 2 倍した距離減衰式である。そこで、式(4.10)の 2 倍を福井地震の規模での震源域近傍における強震記録の最大速度平均レベルとした。なお、2 倍の値は、深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度 200m/s における最大速度増幅率[Midorikawa et al.(1993)]にあたる。

被害から推定した地震動強さと強震記録に基づく最大地動レベルの関係を検討するために、2章で示した部落毎の修正全壊率を、3章で示した被害関数を用い逆算することで、各部落での合震度および最大速度を推定した。ただし、その際に全壊率0%は1%とし、修正を施していない建研1次調査の全壊率における100%は、99%として計算を行っている。その結果、下限値は、合震度0.32、最大速度32cm/sとなっている。また、上限値は、合震度0.73、最大速度223cm/sである。さらに、激震地区内の殆どの部落が、修正を施した全壊率であるため、100%の全壊率が、80%に修正され、合震度0.6、最大速度120cm/sで頭打ちになっている。各部落での断層最短距離をもとめるにあたっては、図4.13で示した吉岡(1984)の断層面を用いている。

図4.15に結果を示す。図4.15(a)は合震度を最大加速度と読み直してプロットしたものである。●が部落毎の全壊率から推定した合震度、実線が強震記録の平均的なレベル、点線がその $\pm\sigma$ である。被害から推定された合震度は、最大加速度に墓石形状に応じたフィルターがかかったものであり、強震記録に比べると、小さな値となるものと考えられるが、同図を見ると、強震記録の平均的最大加速度レベルとほぼ同じか幾分小さ目である。

一方、図4.15(b)に示す最大速度に関しては、断層最短距離にして7km以内の多くの部落で、強震記録の平均的最大速度レベルを上回り、平均より $+1\sigma$ 大きいレベル程度の部落も存在する。この原因の大きな要因として、福井平野における軟弱な堆積層による影響が考えられる。また、部落毎にばらつきが大きく、局所的な地盤の違い、また、アスペリティやその破壊開始点との位置関係による差が考えられる。

これらの影響を見るために、福井平野をほぼ東西に横切るA-Lineと南北に横切るB-Lineでの地震動強さを、前章で示したシミュレーション結果による最大加速度と最大速度を併せて検討する。図4.16に最大加速度の比較を図4.17に最大速度の比較を示す。太線が各々シミュレーションによる推定値であり、実線が強震記録における平均的な値である。図4.16からわかるように、最大加速度が、強震記録の平均レベルを上回るのは、断層線直上の狭い領域のみであり、多くの領域において、強震記録の平均レベル程度の最大加速度を示している。

最大速度に関しては、平野内の堆積層が厚くなっている広い領域で、強震記録の平均レベルを上回っていることがわかる。堆積層の薄くなっている、または露頭している領域では、強震記録の平均レベル程度であることもわかる。さらに、更新世を含めた堆積層の影響のみならず、前章のシミュレーションで示したように、表層地盤の増幅倍率も、最大速度に関しては1.5~2.5倍程度増幅していることも、岩盤と平野内での最大速度値の差が広がる要因の一つである。

次に、図4.18に前掲したマグニチュード7クラスの強震記録の擬似速度スペクトルと福井地震のシミュレーションによる擬似速度応答スペクトルを比較して示す。福井地震の代表地点でのスペクトルは、概ね1秒~2秒に卓越周期を持つことがわかる。この周期帯の卓越は、震源モデル

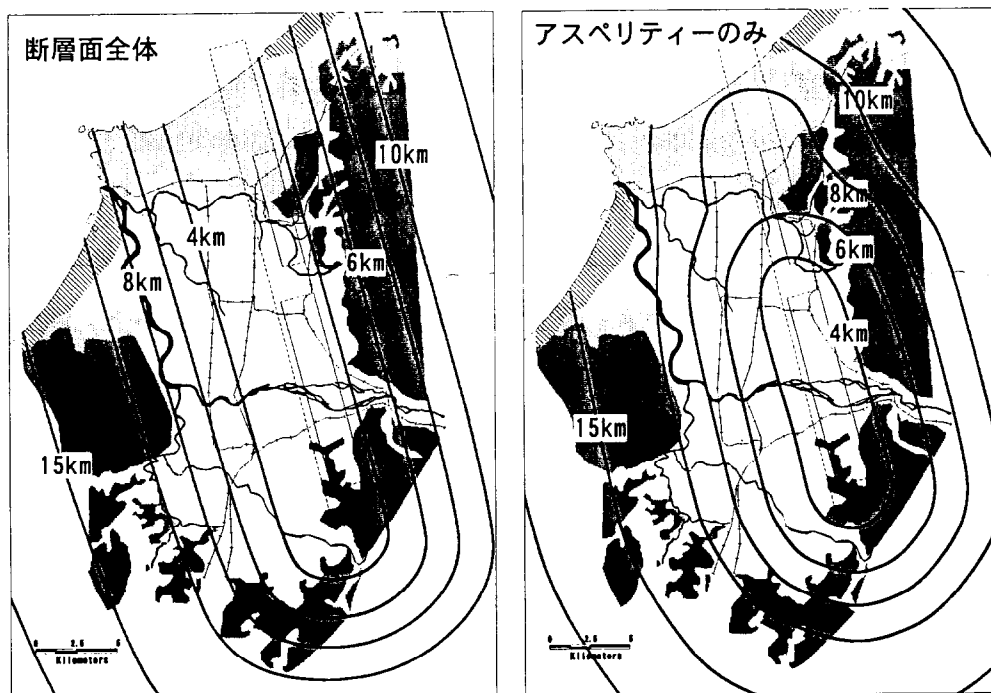
を設定するときに用いたマグニチュード7クラスの統計的なアスペリティサイズによる影響と、前述した福井平野における地盤構造の卓越周期による影響の両者によるものと考えられる。また、スペクトル形状は、単峰型を示し、前節で検討したマグニチュード7.5クラスの地震のスペクトルと形状が異なることがわかる。春江、森田のスペクトル振幅は、兵庫県南部地震における鷹取の記録とほぼ同程度であり、このクラスの地震としては、最大に近いレベルであることがわかる。これは、前章の図3.43で示した各種地盤のスペクトルの比較からもわかるように、表層地盤の影響による要因が大きい。なお、鷹取の地形区分は扇状地であり、ほぼ福井平野内の地形分類と整合している。

図4.19にマグニチュードとその卓越周期の関係を福井地震におけるスペクトルに示した代表5点の結果と併せて示す。本卓越周期は、前述したように、震源モデルに用いたアスペリティサイズと、福井平野内における地盤の増幅特性との合積された結果である。従って、何れの影響が大きいかを区別することは難しいが、近年の強震記録で観測される卓越周期と概ね整合しており、この地震規模の平均的な周期と考えても良さそうである。

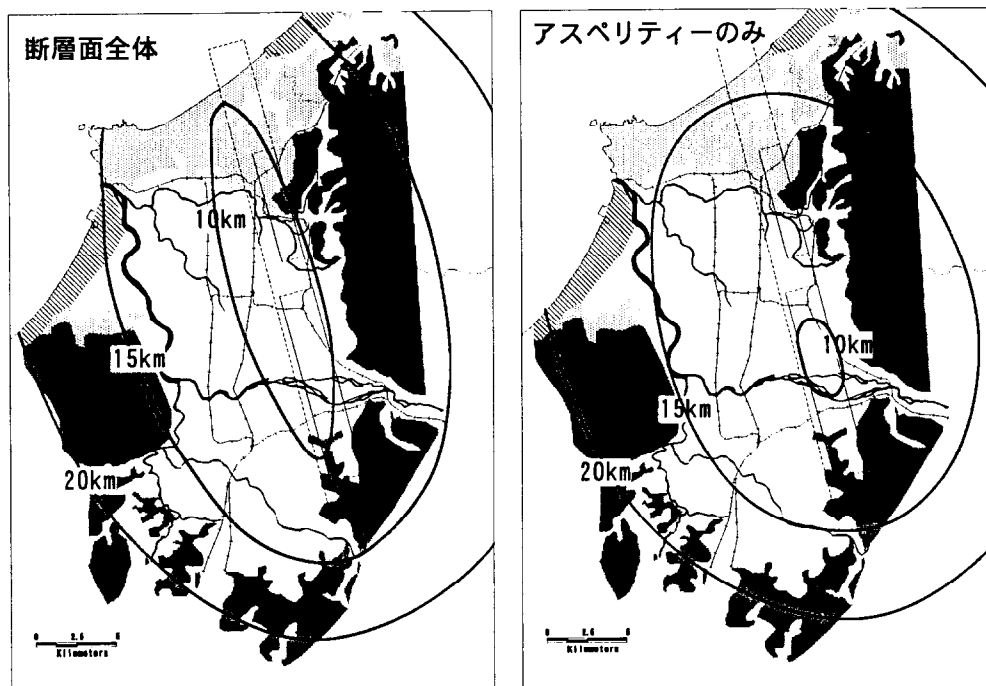
図4.20に示される卓越周期での速度応答振幅に関しては、春江において、鷹取の記録と同程度の、この地震規模での最大の振幅値が推定される。また、新第三紀層がほぼ露頭している三国においては、100cm/sと、ほぼ観測記録の下限を示していることがわかる。このように、断層最短距離10km以内の観測点においても、観測点と断層の位置関係及び地下構造の差により、振幅レベルはばらつくことがわかる。

以上のことから、1948年福井地震と、他の同規模地震の地震動強さを比べると以下のことが指摘できる。

- 最大速度のレベルは、断層からほぼ同距離であっても、観測点と断層の位置関係及び地下構造の差により、ばらつくことがわかる。
- 最大速度のレベルは強震記録の平均的なレベルに比べ福井平野内では、約2倍程度大きい。
- 福井地震の震源域は、ほぼ福井平野内の堆積層の存在する領域を占めているため、その領域で推定された最大速度の平均レベルが大きくなったものと考えられる。
- 福井地震で推定された最大速度の200cm/s程度は、同規模地震の強震記録から観測される最大速度の上位レベルである150~200cm/s程度と対応しており、この地震規模における軟弱な地盤上での最大地動と考えても、大きな過ちを犯していないものと考えられる。
- 福井地震における卓越周期1~2秒は、この地震規模の平均的な値となる。これらは、震源の影響と地盤の影響が重なりあって生じたものと考えられる。
- 福井地震における減衰5%擬似速度応答スペクトルの最大振幅500cm/s程度は、1995年兵庫県南部地震の鷹取の記録にほぼ匹敵し、この規模の地震の最大振幅となっている。

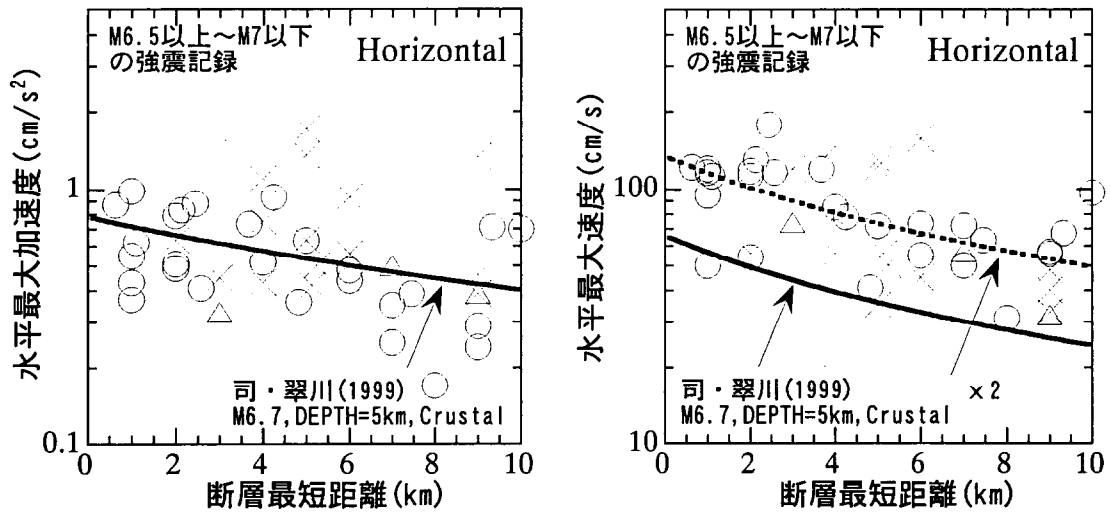


(a) 断層面最短距離



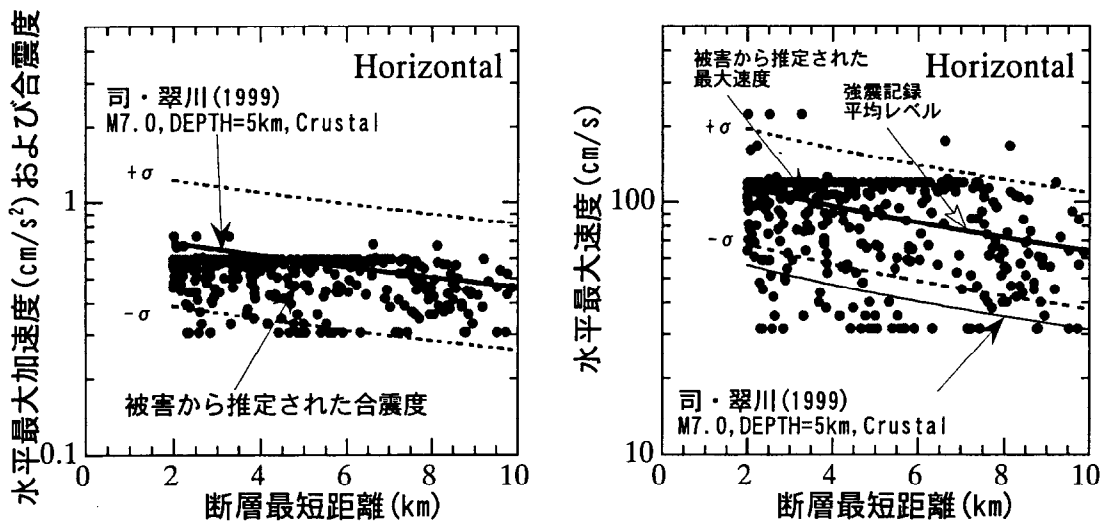
(b) 等価震源距離

図 4.13 福井地震における震源からの距離と領域



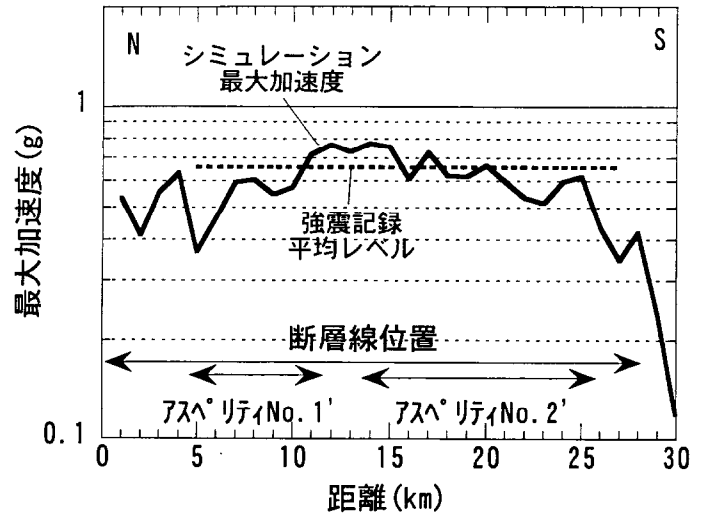
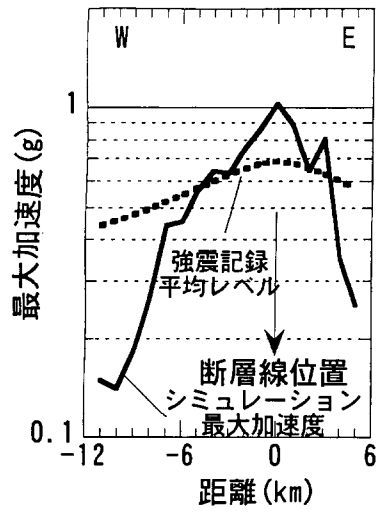
(a) 最大加速度 (b) 最大速度

図 4.14 強震記録と既往の距離減衰式との関係



(a) 最大加速度 (b) 最大速度

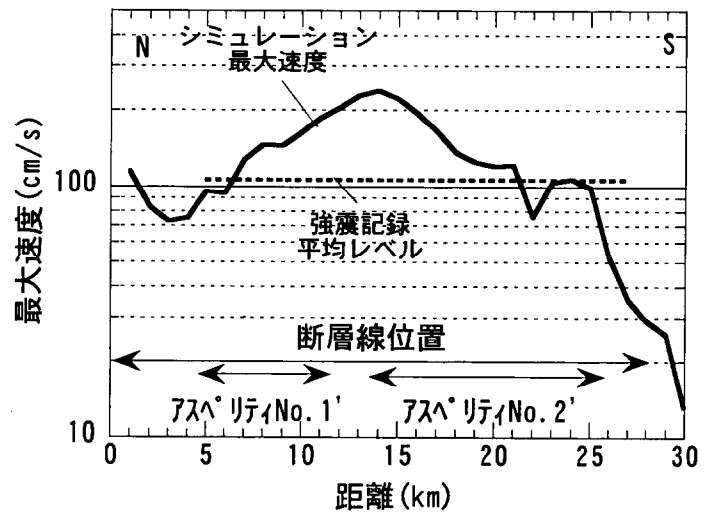
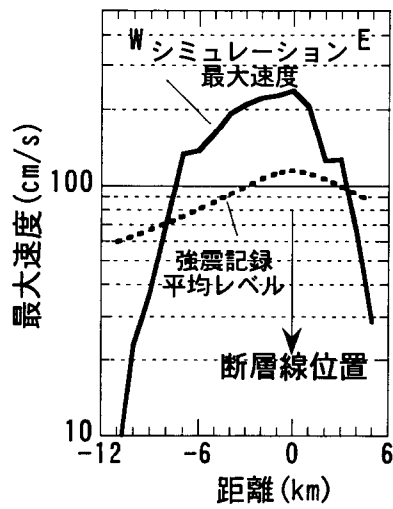
図 4.15 福井地震における被害から推定された地震動強さと強震記録との関係



(a) A断面

(b) B断面

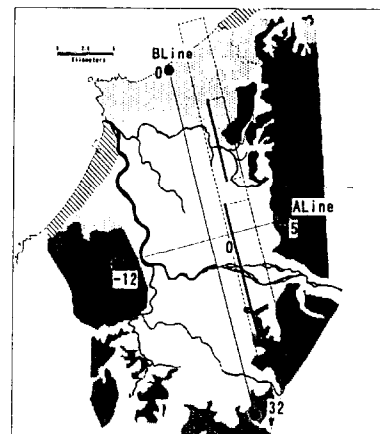
図 4.16 被害から推定された合震度と強震記録, シミュレーション最大加速度の比較



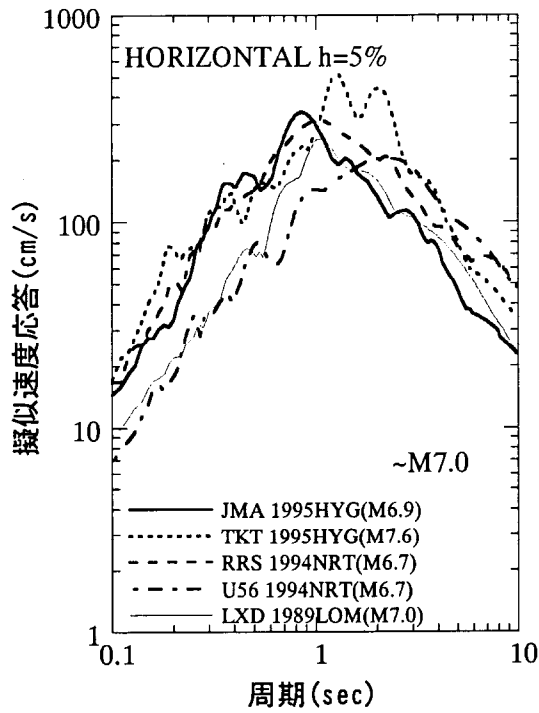
(a) A断面

(b) B断面

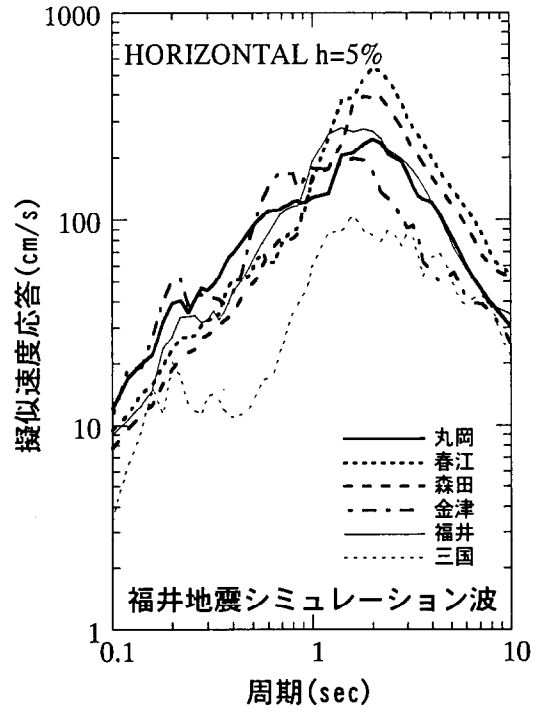
図 4.17 被害から推定された最大速度と強震記録, シミュレーション最大速度の比較



Line 位置



(a) マグニチュード7クラス



(b) 福井地震

図 4.18 マグニチュード7クラスの地震と福井地震の比較

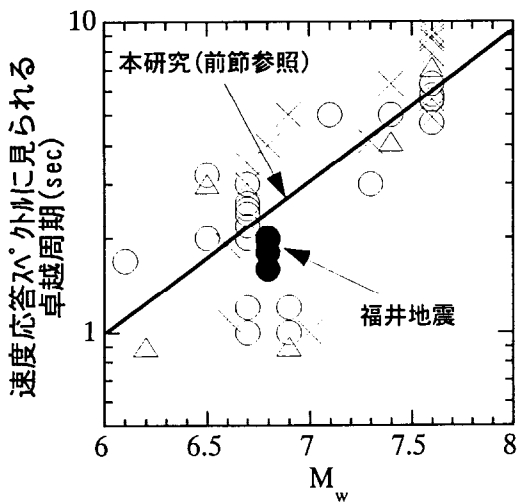


図 4.19 マグニチュードと卓越周期の関係
 ○ : Holocene
 △ : Pleistocene
 × : Prior to Quaternary

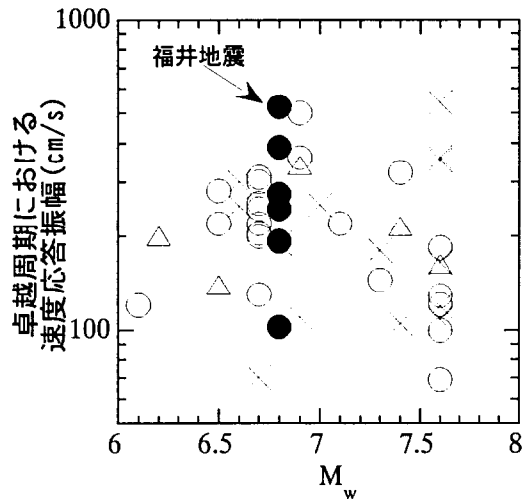


図 4.20 マグニチュードとスペクトル振幅の関係
 ○ : Holocene
 △ : Pleistocene
 × : Prior to Quaternary

第5章 結 論

本研究は、震源近傍の地震動強さの評価のためには、過去に発生した地震における震源近傍での地震動強さを明らかにする必要があると考え、1948年福井地震を対象とし、その地震動強さの面的な分布について、被害資料を基に解明を行ったものである。さらに、強震動シミュレーションにより、強震動を発生させる要因について検討するとともに、近年の地震で観測された強震記録により、他の地震との関係についての検討を行っている。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 福井地震における木造家屋の全壊率分布は、多数存在し、各々が異なった形状を示している。これら分布図の基となった被害統計資料を整理し、違いを生じる要因について検討を行った結果、異なる全壊率の定義によって調査されている統計資料を用いていることがその主な要因であることを明らかにした。構造的被害に基づく全壊率の定義を用い、異なる統計資料を修正することで、より信頼できる木造家屋の全壊率分布図を作成し、福井地震で被害の大きかった地域が、福井平野中央部のみならず、平野の南縁部まで拡大していることを示した。
- 2) 土木構造物である軌道・橋梁等の被害について着目し、その被害分布が、福井平野内においても場所によって発生し易い被害のパターンがあることを示した。その被害パターンから推定される地動速度の主軸方向は、煙や墓石等の単体の転倒方向との対応が良いことを示した。
- 3) 転倒した墓石および転倒しなかった墓石等の単体の形状から地動最大速度を推定する方法を提案し、福井地震における地動最大速度を上限最大速度、下限最大速度というある幅での推定を行った。さらに、構造物の残留滑動量からの地動最大速度の推定等を基に、福井平野内を幾つかの領域に分け、其の領域内の単体の転倒から推定された地動最大速度が上限最大速度に近いか下限最大速度に近いかを示し、福井地震における地動最大速度を領域ごとに明らかにした。
- 4) 推定された地動最大速度および墓石転倒震度（合震度）と、評価し直した部落毎の木造家屋全壊率より、各々の指標に対する木造家屋全壊率の被害関数を作成した。これらの関係を用いて、福井平野内における木造家屋全壊率分布図より、福井地震における地震動強さの面的な分布を明らかにした。その結果、高被害領域では、地動最大速度 120cm/s 以上、合震度 0.6 以上であることを示した。

- 5) 近年の強震動シミュレーション手法に基づき、福井平野に堆積する極軟弱層を考慮した地盤モデルを用いて、5パターンの震源モデルについて震源近傍の強震波形を推定した。震源モデルにより、最大速度分布が異なることを示し、被害から推定される地動最大速度分布と煙突および単体の転倒方向を一番良く説明できるモデルに基づいて、福井地震における地動最大速度が概ね200cm/s、最大加速度が1g程度であることを示した。さらに表層地盤における増幅倍率を示し、最大加速度に比べ、最大速度への影響が大であることを示した。また軌道に沿って地動速度波形を示すことにより、レールの屈曲現象が軸方向に最大速度が大ききな地点で生じていることを確認した。
- 6) マグニチュード6以上の地震における震源近傍の強震記録を基に、地震動強さを示す各指標とマグニチュードの関係について検討した。各指標とも、ばらつきは大きいものの、最大加速度について相関は見られず、上限値で1g~2g、平均的には、0.6g程度であることを示した。最大速度に関しては、マグニチュード6.5程度までは、地震規模に依存して大きくなる傾向が見られるが、それより大きくなると100~200cm/s程度のばらつくことを示した。また、マグニチュード7クラスの地震とマグニチュード7.5クラスの地震では、そのスペクトル形状が異なり、その卓越周期は、地震規模に応じて長くなることを示した。
- 7) 福井地震における地震動強さと近年の強震記録を併せて震源近傍での地震動強さに関する検討を行った。福井地震は、福井平野での堆積層の影響により、最大加速度に比べて、最大速度が大ききな地震であり、推定された200cm/s程度の最大速度は、この規模の地震におけるほぼ上限に近い値と考えられることを示した。また、推定される卓越周期1~2秒は、この規模の地震における平均的な周期であることを示した。

参考文献

- 足羽町史編纂委員会(1976)：足羽町史，pp.587-600
- 天池文男，竹内文朗，春日茂，古川信雄，平野憲雄(1984)：地震探査により推定された福井地震断層とその地震学的考察，地震第2輯，Vol.37，pp.441-452
- 芦原町[寺尾登喜雄](1951)：福井地震芦原震災誌，pp.7-53
- 今津雅紀，福武毅芳(1986)：動的変形特性のデータ処理に関する一考察，第21回土質工学研究発表会講演梗概集，pp.603-604
- 猪瀬寧雄(1950)：橋梁の被害，昭和23年福井地震震害調査報告書 I 土木部門，北陸震災調査特別委員会，pp.84-109
- Ishiyama,Y.(1982)：Criteria for Overturning of Bodies by Earthquake Excitations，日本建築学会論文報告集,第317号，PP.1-13
- 入江紀嘉，福元俊一，釜江克宏(2000)：経験的震源モデルとハイブリッド法による1945年三河地震(Mjma=6.8)の強震動の再現，日本建築学会学術講演梗概集，B2，pp.167-168
- 入倉孝次郎(1994)：震源のモデル化と強震予測，地震第2輯，第46巻，pp.495-512
- 入倉孝次郎，釜江克宏(1999)：1948年福井地震の強震動—ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現—，地震第2輯第52巻第1号，pp.129-150
- 入倉孝次郎，香川敬生，関口春子(1997)：経験的グリーン関数を用いた強震動予測手法の改良，地震学会1997年秋季大会講演予稿集，B25
- 岩崎貴哉，小川隆一，松浦充宏(1982)：測地データから求めた1948年福井地震の断層モデルとそれに基づく理論波形，地震学会予稿集，No.1
- 宇佐美龍夫(1987)：新編日本地震被害総覧，東京大学出版会，pp.291-297
- 大野晋(1999)：震源の広がり方を考慮した経験的地震動評価に関する研究，東北大学博士論文，188pp.
- 大町達夫，大塚勇，年縄巧(1995)：魚雷の擦痕から推定される1930年北伊豆地震の震源域での強震動特性，土木学会論文集，No.507 I-30，pp.219-229
- 表俊一郎，三宅昭春，榎橋秀衛(1978)：震央域における地震動最大加速度，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.549-550
- Omote,S.(1950)：Aftershocks, The Fukui Earthquake of June 28 1948, Report of the Special Committee for the Study of the Fukui Earthquake, National Council, Japan(ed. H.Tsuya), pp.37-78
- 岡本瞬三(1971)：耐震工学，オーム社，473pp.
- 岡本瞬三，久保慶三郎(1950)：橋脚の震害に関する考察，昭和23年福井地震震害調査報告書 I 土木部門，北陸震災調査特別委員会，pp.114-123
- 片岡則子，渡辺孝英，田中貞二(1993)：観測記録による震源域の最大速度，日本建築学会大会学術講演梗概集 B，pp.71-72
- 釜江克宏，入倉孝次郎(1998)：震源近傍域での強震動パルスの特性と断層破壊過程との関係，第3回

- 都市直下地震災害シンポジウム, pp.75-78
- 釜江克宏, 入倉孝次郎(1990): 地域的な震源スケーリング則を用いた大地震(M7 級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 416 号, pp.47-70
- 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長(1991): 地震のスケーリング則に基づいた大地震の強震予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 430 号, pp.1-9
- 釜江克宏(1999): 1948 年福井地震(MJMA=7.1)時の強震動評価と強震動予測, 日本建築学会第 27 回地盤震動シンポジウム, pp.83-94
- Kanamori Hiroo(1973): Mode of Strain Release Associated with Major Earthquake in Japan, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1, pp.213-239
- Kanaomori,H.(1977): The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 82, pp.2981-2987
- 河角廣(1949): 福井地震概報, 日本学術会議福井地震調査研究特別委員会: 昭和 2.3 年福井地震研究速報, pp.1-14
- Kawasumi,H.(1950): General Description, The Fukui Earthquake of June 2.8, 1948, Report of the Special Committee for the Study of the Fukui Earthquake, National Council, Japan(ed. H.Tsuya), pp.1-28
- 金子美香,林康裕(1996): 剛体の転倒条件に関する基礎的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 479 号, pp.41-49
- 川瀬博, 林康裕(1996): 兵庫県南部地震の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 480 号, pp.67-76
- 菊地正幸, 中村操, 山田真, 伏見実, 巽誉樹, 吉川一光(1999): 1948 年福井地震の震源パラメーター—1 倍強震計記録の解析—, 地震第 2 輯, 第 52 巻, pp.121-128
- Kishinoue,F.(1950): Field Investigation of Earthquake Phenomena, THE FUKUI EARTHQUAKE OF JUNE 28,1948 REPORT OF THE SPECIAL COMMITTEE FOR THE STUDY OF THE FUKUI EARTHQUAKE, pp.137-155
- 気象庁(1982): 改定日本付近の主要地震の表(1926 年~1960 年), 地震月報別冊第 6 号, pp.64,
- Graves,R.W.(1996): Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media using Staggered-grid Finite Differences, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.86, pp.1091-1106
- 小嶋啓介, 荒井克彦(1999): 1948 年福井地震に関する文献目録, 地震 第 2 輯, 第 52 巻, pp.213-218
- Koshikawa,Y.(1950)[Compiled Win Inoue]: Seismometrical Features, The Fukui Earthquake of June 28 1948, Report of the Special Committee for the Study of the Fukui Earthquake, National Council, Japan(ed. H.Tsuya), pp.29-36
- 後藤洋三, 江尻譲嗣(1995): ノースリッチ地震 Tarzana 強震観測点における地盤の増幅特性, 平成 6 年度科学研究費補助金研究成果報告書「軟弱地盤における地震動の増幅機構と被害の発生メカニズムに関する研究」, pp.196-203
- 小林啓美(1996): 福井地震 1948 と地震工学, 地震工学振興会ニュース, 161, pp.6-9
- 小林啓美(1999): 私信, 1999 年 2 月

- 小林啓美(2000)：私信，2000.5
- 小西一郎(1950) 仁杉巖(1950)：吊橋五松橋の被害に対する考察，昭和23年福井地震震害調査報告書 I 土木部門，北陸震災調査特別委員会，pp.123--127
- 坂井町史編纂委員会(1973)：坂井町史，pp.112.-142
- 鷺谷威(1999)：1948年福井地震(M=7.1)に伴う地殻変動と震源断層モデル，地震第2輯，第52巻，pp.111-120
- 佐藤良輔(1989)[編著]：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版，pp.390，1989
- Somerville, P.G., N. F. Smith, R. W. Graves, N. A. Abrahamson(1997). : Modification of Empirical Strong Ground Motion Attenuation Relations to Include the Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, *Seismological Research Letters*, Vol.68, No.1, pp.199-222
- Somerville, P.G., Irikura,K. et al(1999). : Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Motion, *Seismological Research Letters*, Vol.70, No.1, pp.59-80
- 司 宏 俊，翠川三郎(1999)：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.63-70
- G.H.Q.(1949)：Geological Surveys Branch Intelligence Division Office of the Engineer General Head Quarters, Far East Command:The Fukui earthquake, Hokuriku Region, JAPAN 28 JUNE 1948, volume II ENGINEERIN, pp.3-16
- Joyner,W.B, D.M. Boore(1981)：Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-motion records including records from the 1979 Imperial Valley, California Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.71, pp.2011-2070
- 末広重二,久本壮一,田中康裕(1948)：福井地震踏査報告(1),昭和23年6月23日福井地震調査概報，験震時報第14巻別冊，中央气象台，pp.22-37
- (社)砂防学会(1995)：地震による砂防設備の被害状況調査報告
- Seo,K.,Ymanaka,H.,Kurita,K.,Motoki,K.,Eto,K.,Terasaka,M.,Kobayashi.H.(2000) : A Joint Research on Microtremors in Fukui Basin,Japan – for Site Effects Evaluation during the 1948 Fukui(Japan) Earthquake,12W.C.E.E.,0142 CD-ROM
- Takada S., N. Hassani, Kitada T.(2000) : Relation between Damage Ratio and Burial direction of Water Distribution Pipelines in Kobe City during The Hyogoken-nanbu earthquake, Joint W.S. on US-Japan Corporative Research in Urban earthquake Mitigation, Topic 4-2 Risk Analysis and Advanced Technologies for Infrastructures, pp.38-42
- 高橋龍太郎(1951):福井地震概説，北陸震災調査特別委員会:昭和23年福井地震震害調査報告 II 建築部門，pp.1-21
- 武村雅之，諸井孝文，八代和彦(1998)：明治以降の内陸浅発地震の被害から見た強震動の特徴 —震度Ⅶの発生条件—，地震 第2輯 第50巻，pp.485-505
- 武村雅之，大野晋，高橋克也(1999)：強震記録から見た震源近傍での硬質地盤上における地震動—レ

- ベル2地震動の共通基準一,第25回地震工学研究発表会講演論文集 Vol.1, pp.61-64
- 武村雅之, 池浦友則(1996): 短周期データからみた1923年関東地震の多重震源一体験談と地震気象の解釈一, 地震 第2輯 第47巻, pp.351-364
- 武村雅之(1999): 1923年関東地震の被害分布と強震動, その1.詳細な被害分布を知るためのデータ, A404, 日本地震学会秋季大会講演予稿集
- 竹山謙三郎, 竹之内清次, 大崎順彦, 木村蔵司(1951): 福井平野周辺部における被害率分布について一主として地盤と木造建物の被害との関係, 北陸震災調査特別委員会: 昭和23年福井地震震害調査報告 II 建築部門, pp.29-66
- 田中清和, 栗本修, 入倉孝次郎, 岩田和孝(1999): 三次元有限差分法による京都盆地の地盤震動解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B2, pp.109-110
- 谷口仁士, 飯田汲事(1979): 1948年福井地震の震害の資料解析, 愛知工業大学研究報告, No.14B, pp.207-217
- 谷口仁士編(1998): よみがえる福井震災 写真集, (株)現代史料出版, pp.1-190
- 谷口忠, 小林啓美, 坂井辰郎(1951): 物体の転倒建造物の倒壊より推察した福井地震の地動, 昭和23年福井地震震害調査報告書 II 建築部門, 北陸震災調査特別委員会, pp.23-29
- 童華南, 山崎文雄(1997): 地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究, 第48巻, 第11号, pp.31-34
- 鳥海勲, 大場新太郎(1993): 福井平野の地下構造, 地震第2輯, 第46巻, pp.45-pp.47
- Trifunac M.D.(1973): Scattering of Plane SH Wave by a Semi-Cylindrical Canyon, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.1, pp.267-281
- Trifunac, M.D., Brady A.G.(1975): A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.65, pp.581-626
- 名古屋鉄道局(1950): 福井震災誌, pp.13-233
- 仁杉巖(1950): 鉄道橋の被害状況, 昭和23年福井地震震害調査報告書 I 土木部門, 北陸震災調査特別委員会, pp.109-114
- 伯野元彦, 藤野陽三, 片田敏行(1978): 1978年伊豆大島近海地震被害調査報告, 地震研究所彙報, Vol.53, pp.1101-1133
- Hamada, H., S.Yasuda, K.Wakamatsu(1992): Large Ground Deformation and Their effects on Lifelines: 1948 Fukui Earthquake, Case Studies of Liquefaction and Lifeline Performance During Past Earthquakes, Vol.1, (ed. M.Hamada, T.D.O'Rourke), Technical report NCEER-92-0001, pp.2-1~2-42
- 服部勇(1995): 資料に見る福井大震災の概要, 福井大学積雪研究紀要, 第2号, pp.71-81.
- Hartzell, S., C.Mendoza(1991): Application of an Iterative Least-Squares Waveform Inversion of Strong-Motion and Teleseismic Records to the 1978 Tabas, Iran, Earthquake: *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.81, pp.305-331
- 長谷川洋平(1986): 非線型インバージョン法を用いた測地データの解析: 内陸型地震の断層モデル,

東京大学理学系研究科地球物理学専門課程修士論文

- 浜田信生(1990):地震月報別冊6号震源カタログの部分修正について,地震第2輯,第43巻,pp.307-310
- 林康裕, 宮腰淳一(1998):兵庫県南部地震による被害率曲線,1998年日本建築学会災害部門パネルディスカッション資料,地震動の特性と建築物の被害—経験と予測—,pp.15-20
- 久田俊彦(1951):福井市集団住宅の被害,昭和23年福井地震震害調査報告書,Ⅱ建築部門,北陸震災調査特別委員会,pp.87-90
- Pitarka A.,Irikura K.,Iwata T.,Sekuguchi H.(1998):Three-dimensional simulation of the near-fault ground motion for the 1995 Hyogo-ken Nanbu(Kobe),Japan,earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 88, pp.428-449
- 蛭田捨太郎, 鈴木鐸二, 谷資信(1951):煙突の被害,昭和23年福井地震震害調査報告書 Ⅱ建築部門,北陸震災調査特別委員会,pp.185-200
- 福井県民生活部(1986),応用地質株式会社:福井県地震対策基礎調査報告書,53pp
- 福井県(1989):福井県地震被害想定調査,pp.49-61
- 福井県(1997) 福井県民生活部消防防災課:福井県地震被害予測調査報告書,pp.1-283
- 福井市(1978):福井烈震誌,pp.1-1491
- 福井空襲史刊行会(1978):福井空襲史,1478pp.
- 福井市西藤島公民館[野村栄一](1971):西藤島村史,pp.815-841
- 福井県(1949):福井震災誌,pp.1-34
- 福井市編さん委員会(1970),新修福井史Ⅰ,pp.536-537
- 北陸震災特別委員会(1950):第2章 鉄道の被害,昭和23年福井地震震害調査報告 Ⅰ土木部門,pp.14-52
- 福島美光, 田中貞二, 渡辺孝英(1991):震源域における地震動強さの統計的考察,第19回地盤震動シンポジウム,pp.61-68,日本建築学会
- 藤本一雄, 翠川三郎(1999):被害分布から推定した1995年兵庫県南部地震の震度分布,日本建築学会構造系論文集,第523号,pp.71-78
- Boore,D.M.(1983):Stochastic simulation of high frequency ground motion base on seismological models and radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp.1865-1894
- 本多彪, 野口憲男(1948):福井地震踏査報告(3),験震時報,第14巻別冊,昭和23年6月28日福井地震調査概報,pp.43-56
- 松岡町史編纂委員会(1972):松岡史下巻,pp.327-348
- 丸岡町史編纂委員会(1972):丸岡町史,pp.597
- 三国町史編纂委員会(1983):三国町史,pp.743
- 翠川三郎, 五艘隆志(1997):過去の事例に基づく激震動の発生頻度に関する基礎的考察,日本建築学会構造系論文集,第502号,pp.55-60
- 翠川三郎(1980):震源域及びその近傍での地震動強さに関する研究,東京工業大学博士論文,254pp.
- Midorikawa, S.(1993):Preliminary analysis for attenuation of peak ground velocity on site, *Procs.*

- Intern. Workshop on Strong motion Data, Vol.2, pp.39-48,
- 翠川三郎(1994)：地震時に物体の跳躍現象が生じた事例の調査，地震第2輯，第47巻，pp.333-340
- 翠川三郎，藤本一雄(1996)：墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布，日本建築学会構造系論文集，第490号，pp.111-118.
- 翠川三郎，藤本一雄(2000)：震源域の地震動とその応答スペクトル特性，パッシブ制振構造シンポジウム，pp.25-36
- Midorikawa, S.(1995)：Ground Motion Intensity in Epicentral Area, 「耐震設計の一つの新しい方向」シンポジウム論文集，pp.247-250
- 宮武隆(1999)：1948年福井地震の強震動—建築物・墓石等の倒壊方向と震源過程—，地震第2輯，第52巻，pp.315-318
- 宮野道雄(1982)：墓石・木造建物被害等による震度に関する若干の検討，土木学会論文報告集，第319号，pp.33-42
- 宮野道雄(1984)：墓石の転倒および木造建物の被害に基づく地動加速度に関する研究，東京都立大学学位論文，133pp.
- 諸井孝文，武村雅之(1999)：1995年兵庫県南部地震による気象庁震度と住家全壊率の関係，地震第2輯，第52巻，pp.11-24
- 矢崎敬三，濱松音蔵(1948)：福井地震踏査報告(2)，験震時報，第14巻別冊，昭和23年6月28日福井地震調査概報，pp.37-43
- 吉岡直人(1974)：地震の発生機構と地殻変動及び津波，東京大学理学系研究科地球物理学専門課程修士論文
- 山中浩明，栗田勝実，瀬尾和大，小嶋啓介，佐藤浩章，宮腰研，赤澤隆士(2000)：微動アレイ観測による福井平野のS波構造の推定，地震第2輯，Vol.53，pp.37-43
- 若松邦夫，野畑有秀(1998)：福井平野の地下構造と1948年福井地震の被害，日本建築学会大会学術講演梗概集，B2,pp.227-228
- 若松加寿江(1991)：日本の地盤液状化履歴図，東京大学出版
- 和達清失(1948)：緒言，験震時報，第14巻別冊，昭和23年6月28日福井地震調査概報，pp.1-3

第4章：強震記録のマグニチュードを参照した参考文献

- 1) Hanks, T.C., J.A. Hileman, W. Thatcher (1975) : Seismic moments of the large earthquakes of the Southern California region, *Geological Soci. of AM. Bull.*, 86, pp.1131-1139
- 2) Arculeta, R.J., S.M. Day (1980) : Dynamic rupture in a layered medium : The 1966 Parkfield earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 70, pp.671-689
- 3) Hartzell, S.H. (1980) : Faulting Process of the 1976 GAZLI, USSR Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.70, pp.1715-1736
- 4) Hartzell, S.H., C. Mendoza (1991) : Application of an Iterative Least-Squares Waveform Inversion of Strong-Motion and Teleseismic Records to the 1978 Tabas, Iran, Earthquake : *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.81, pp.305-331
- 5) Harvard CMT Catalog
<http://www-eps.harvard.edu/department/research/data/>
- 6) Given, J.W., T.C. Wallace, H. Kanamori (1982) : Teleseismic Analysis of the 1980 Mammoth Lakes earthquake Sequence, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.72, pp.1093-1109
- 7) Crosson, C., M. Martini, R. Scarpa, S.C. Key (1986) : The Southern Italy Earthquake of 23 November 1980; An Usual Pattern of Faulting, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.76, pp.381-394
- 8) Anderson, J.G., J.N. Brune (1991) : The Victoria Accelerogram for the 1980 Mexicali Valley Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.7, No.1, pp.29-43
- 9) Hartzell, S., T. Heaton (1986) : Rupture history of the 1984 Morgan Hill, California; Seismological and Tectonic analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.76, pp.649-674
- 10) United States Geological Survey
<http://neic.usgs.gov/neis/eqlists/significant.html>
- 11) Hanks, T.C., H. Krawinkler (1991) : The 1989 Loma Prieta Earthquake and Its Effects: Introduction to the Special Issue, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.81, pp.1415-1423
- 12) Berberian, M., M. Qurashi, J.A. Jackson, K. Priestley, T. Wallace (1992) : The Rudbar-Tarom Earthquake of 20 June 1990 in NW Persia: Preliminary Field and Seismological Observations, and its Tectonic Significance, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.81, pp.1726-1755
- 13) Hauksson, E., Lucile, M.J., K. Hutton, D. Eberhart-Phillips (1993) : The 1992 Landers Earthquake Sequence: Seismological observations, *J. Geophys. Res.*, Vol.98, pp.19835-19858
- 14) Oppenheimer, D., G. Berzosa, G. Carver, L. Dengler, J. Eaton, L. Gee, F. Gonzalez, A. Jayko, W.H. Li, M.L. Isowski, M. Magee, G. Marshall, M. Murray, R. McPherson, B. Romanowicz, K. Satake, R. Simpson, P. Somerville, R. Stein, D. Valentine (1993) : The Cape Mendocino, California, Earthquake of April 1992: Subduction at the triple junction, *Science*, 261 pp.433-438
- 15) Wald, D.J., T. H. Heaton, K. W. Hudnut (1996) : The Slip History of the 1994 Northridge, California, Earthquake Determined from Strong-Motion, Teleseismic, GPS, and Leveling Data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.86, pp.s49-s70

本研究に関連した論文

1. 野畑有秀, 翠川三郎: 被害資料から推定した 1948 年福井地震での地震動強さ, 日本建築学会構造系論文集, 第 532 号, pp.57-64, 2000 年 6 月
2. 野畑有秀, 翠川三郎, 宮村攝三: 1948 年福井地震における木造家屋の被害分布の再検討, 地域安全学会論文集, No.2, pp.179-186, 2000 年 11 月
3. Saburoh MIDORIKAWA, Kazuo FUJIMOTO, Arihide NOBATA: VARIATION OF NEAR-FIELD GROUND MOTIONS OBSERVED IN THE 1999 CHICHI EARTHQUAKE AND RECENT LARGE EARTHQUAKES, 6th International Conference on Seismic Zonation, 2000.11
4. 野畑有秀, 翠川三郎: 強震記録に基づく震源近傍での地震動強さ, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.47B, pp.173-180, 2001 年 3 月

本研究に関連した口頭発表論文

1. 若松邦夫, 野畑有秀: 福井平野の地下構造と 1948 年福井地震の被害 —その 1 微動 H/V の特性と推定地下構造—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.227-228, 1998 年 9 月
2. 野畑有秀, 若松邦夫: 福井平野の地下構造と 1948 年福井地震の被害 —その 2 福井平野の震動特性と被害分布に関する検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp.229-230, 1998 年 9 月
3. 野畑有秀, 翠川三郎: 1948 年福井地震における地盤のひずみ, 日本地震学会講演予稿集, 1998 年度秋季大会, A-18, 1998 年 10 月
4. 野畑有秀, 翠川三郎, 藤本一雄: 強震記録から見た震源近傍の地震動強さ, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), 2000 年 9 月

付録1 本文 2.1.3 で記載される重屋根，軽屋根の木造家屋の写真

軽屋根（トタン屋根，軽いスレート葺，セメント・アスベスト，木製こけら板）は，福井市街地に多く見られ，他村部落では少ない。

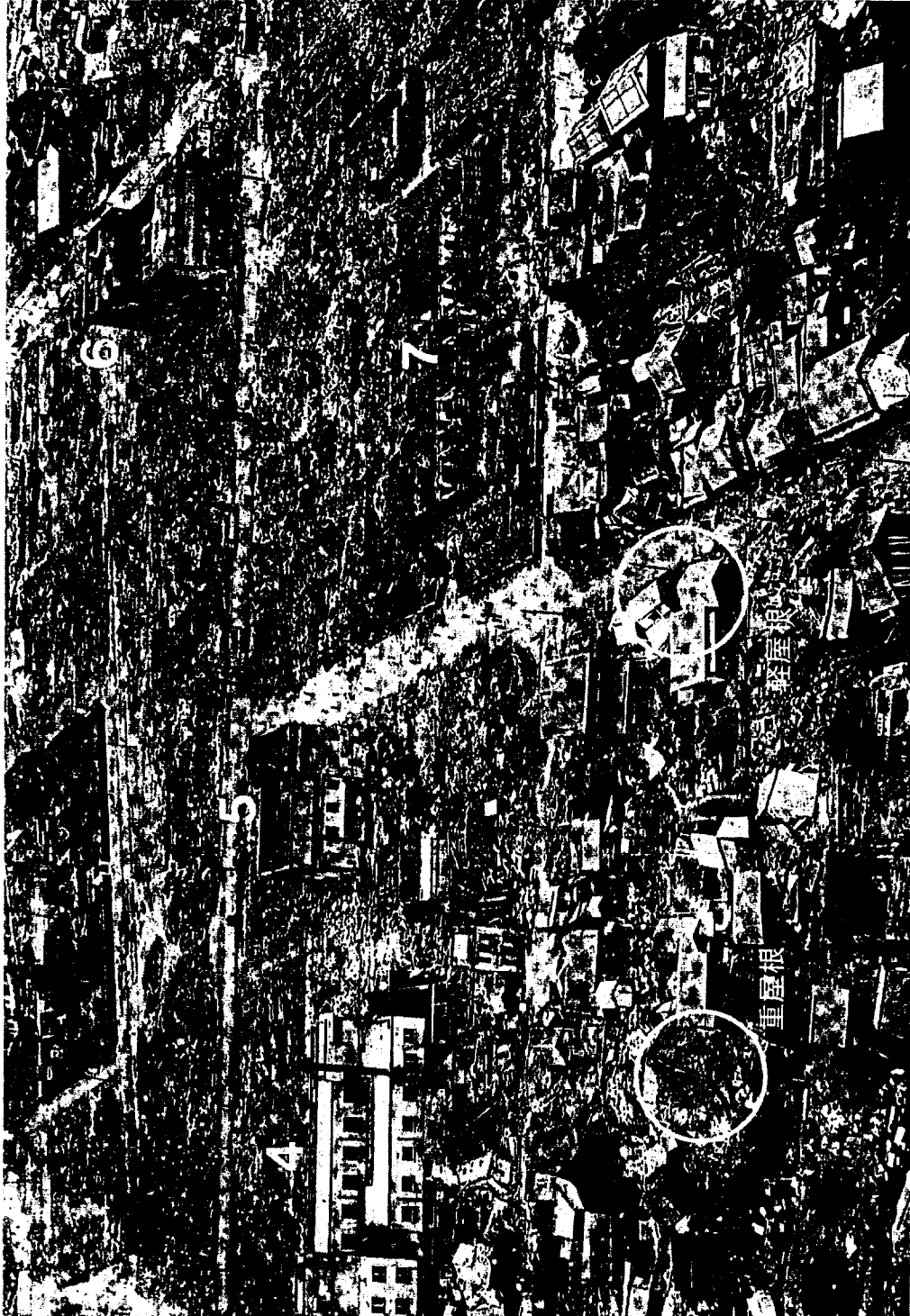


写真 A1-1 福井市街：県庁南側，佐佐枝上町，豊島上町付近の重屋根，軽屋根の被害
よみがえる福井震災 写真集より



写真 A1-2 福井市街：県庁東側，日之出町一帯の重屋根，軽屋根の被害
よみがえる福井震災 写真集より

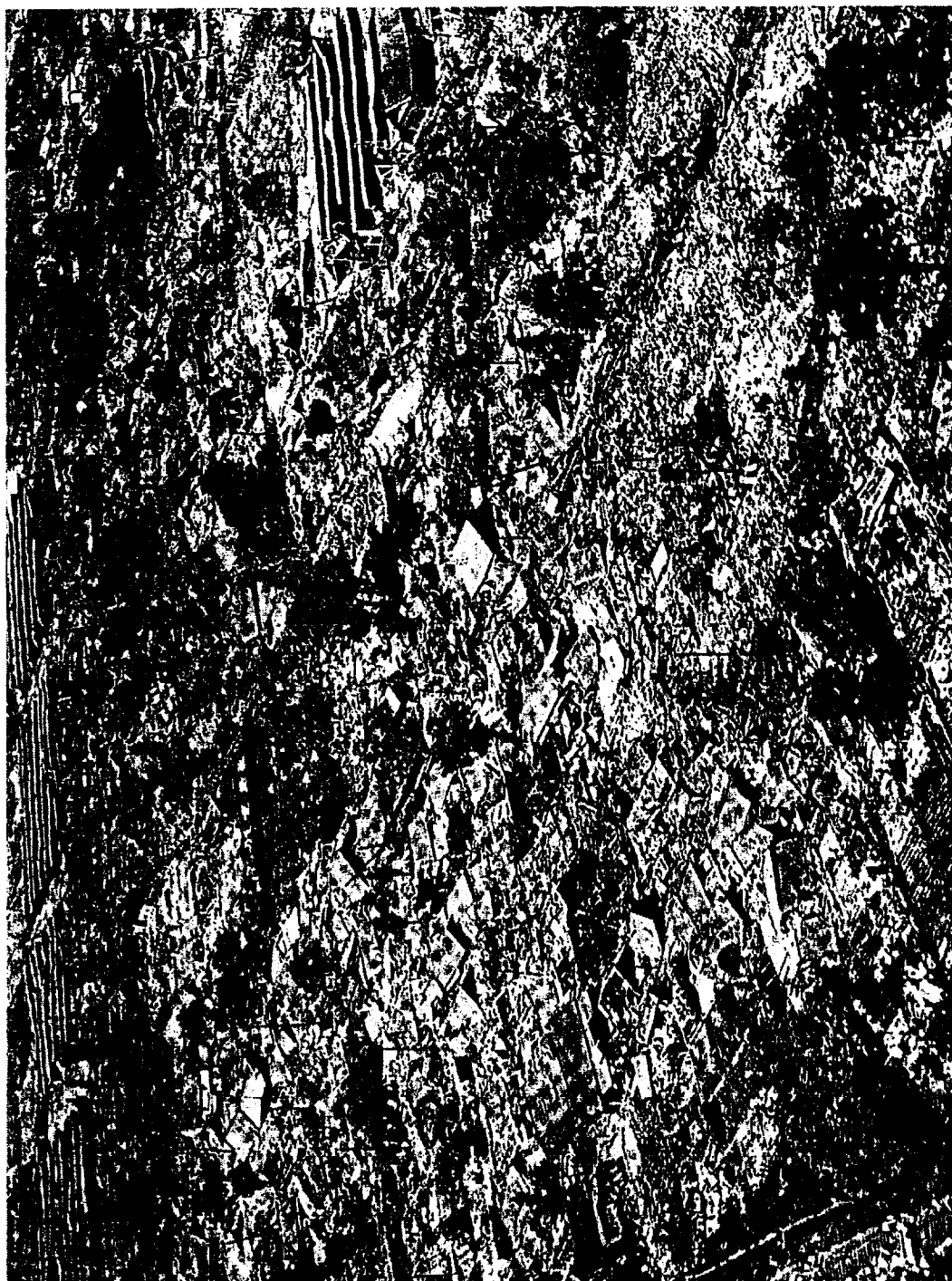


写真 A1-3 森田町の被害, 重屋根家屋の被害状況
よみがえる福井震災 写真集より



写真 A1-4 森田町の被害, 重屋根家屋の被害(クローズアップ)

よみがえる福井震災 写真集より

付録2 3次元有限差分法における境界からの反射波の影響

本文 3.3 におけるシミュレーションの結果は、本章でも示したように、北側境界からの反射の影響が含まれている。これは、堆積層部が北側に向かって解放されており、その境界処理において発生した反射波の影響であると考えられる。本計算においては、Clayton et al.(1977)の paraxial 仮定に基づく境界処理を発展させた Emerman et al.(1983)における境界処理と、Sochacki et al.(1987)の吸収領域を用いて、境界処理を行っている。特に、Sochacki et al.(1987)の吸収領域処理は、その領域内の振幅を減少させることにより、波動を吸収させる方法であり、周辺岩盤に比べ、堆積層部が解放されている北側領域では、固定端的な影響が強くなる。そこで、Case6 として、北側に領域を 5km 延ばし、即ち 39km*17km の領域として、かつ Sochacki et al.(1987)の吸収領域を外した状態で計算を行い、本論文での Case5 との比較を行った。なお、震源パラメータ、地盤モデルは Case5 と同じである。なお、この場合においても、十分な境界処理とはなっておらず、長周期の波が境界面から生じる。そこで、本検討における Case6 の 3次元有限差分の結果に対しては、1秒~5秒のバンドパスフィルター処理を行った上で、波形を合成している。

図 A2-1 に最大速度の比較を示す。北潟湖周辺での振幅や、平野北部での振幅は小さくなるものの、平野全体での傾向は変わらない。また、図 A2-2 に速度粒子軌跡の比較を示すが、両者は概ね一致している。地表面での速度波形を図 A2-3 及び図 A2-4 に示す。本文中(図 3.40 及び図 3.41)に示す波形に比べ、平野北部領域において後続波がそれほど顕著ではなくなっているが、全体的な傾向は変わらない。さらに、図 A2-5 に代表 6 地点での擬似速度応答スペクトルの比較結果を示す。福井平野の北側にあたる三国での振幅変化は見られるが、両者は概ね一致していることがわかる。

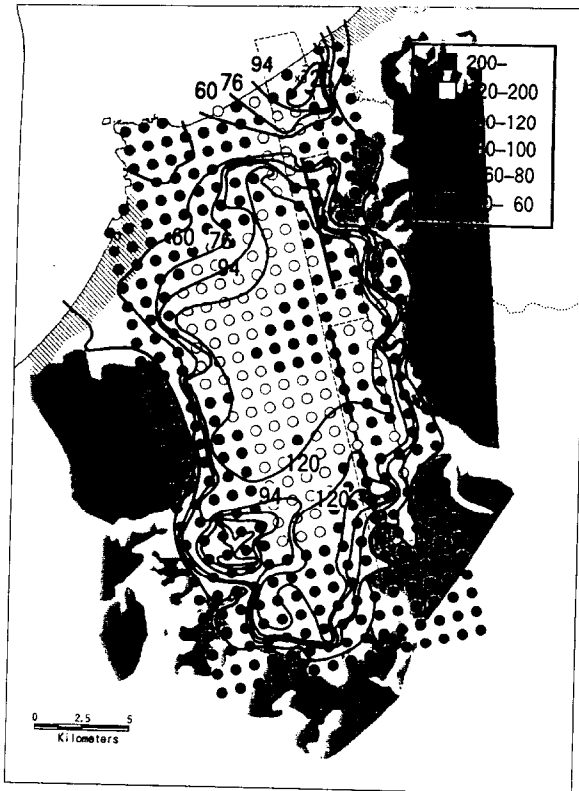
以上のことより、平野北側では、多少振幅の減少が見られるものの、本論で検討に用いた地震動強さ、スペクトルに関しては、概ね妥当であると判断される。

参考文献

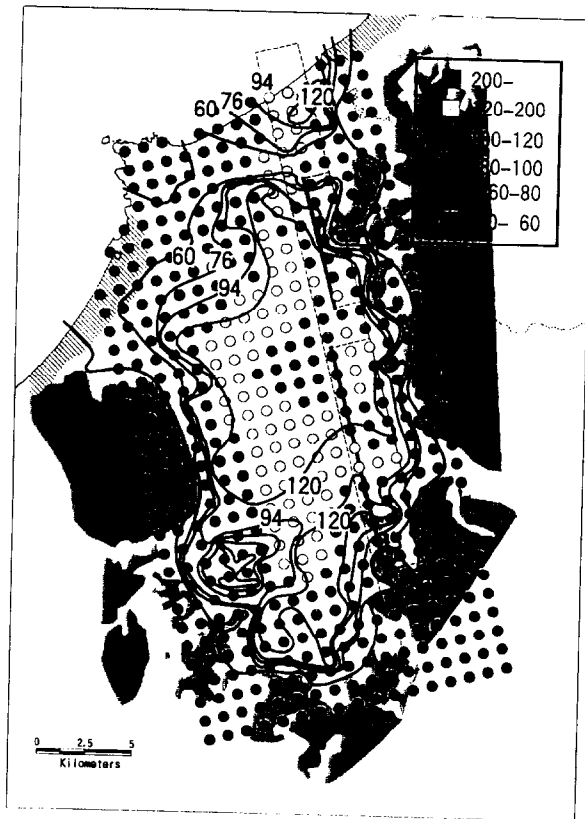
Sochacki, J., R. Kubichek, J. George, W.R. Fletcher, Scott Smithson(1987) : Absorbing Boundary Conditions and Surface Waves, Geophysics, Vol.52, No.1 pp.60-71

Emerman S. H., R. A. Stephen(1983) : Comment on 'Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations', by R.Clayton and B.Engquist, Bull. Seism. Soc. Am. Vol.73, pp.661-665

Clayton R., B.Engquist(1977) : Absorbing Boundary Conditions for Acoustic and Elastic Wave Equations, Bull. Seism. Soc. Am. Vol.67, pp.1529-1540

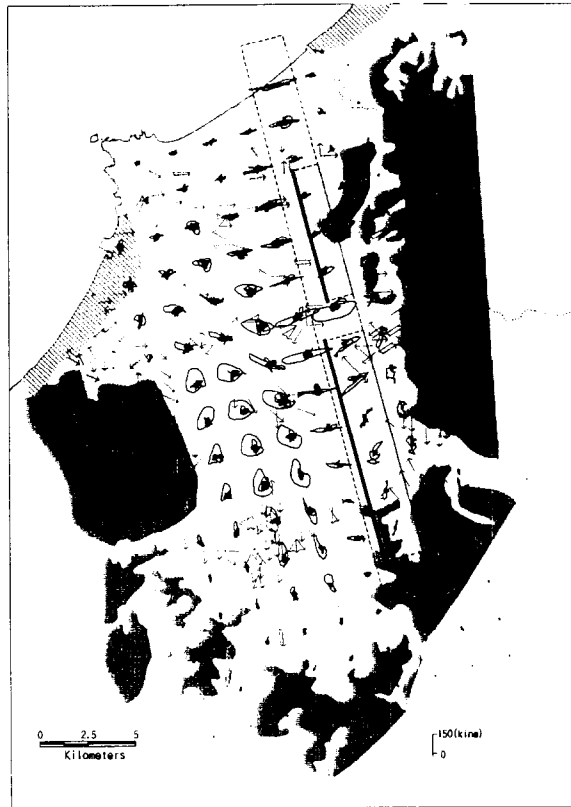


(a) CASE5における水平最大速度と被害からもとめた最大速度

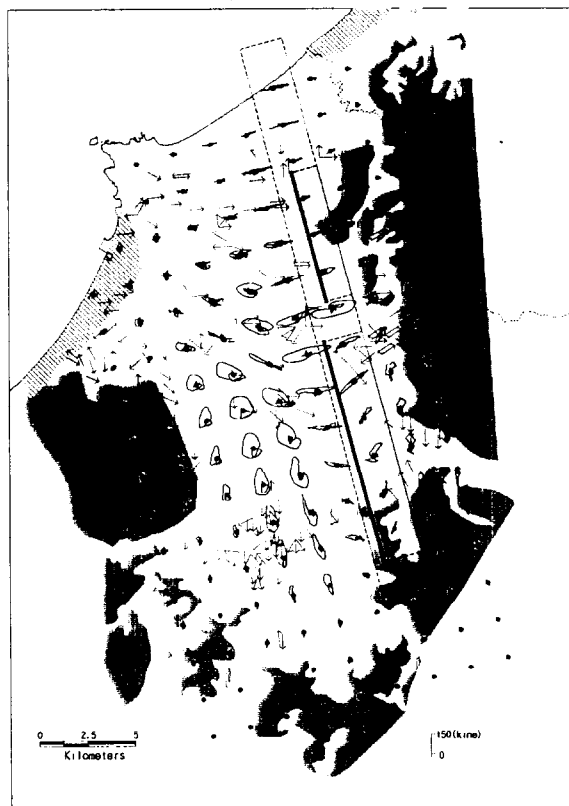


(b) CASE6における水平最大速度と被害からもとめた最大速度

図 A2-1 地表面における水平最大速度の比較



(a) Case5



(b) Case6

図 A2-2 Case5 と Case6 における速度粒子軌跡の比較

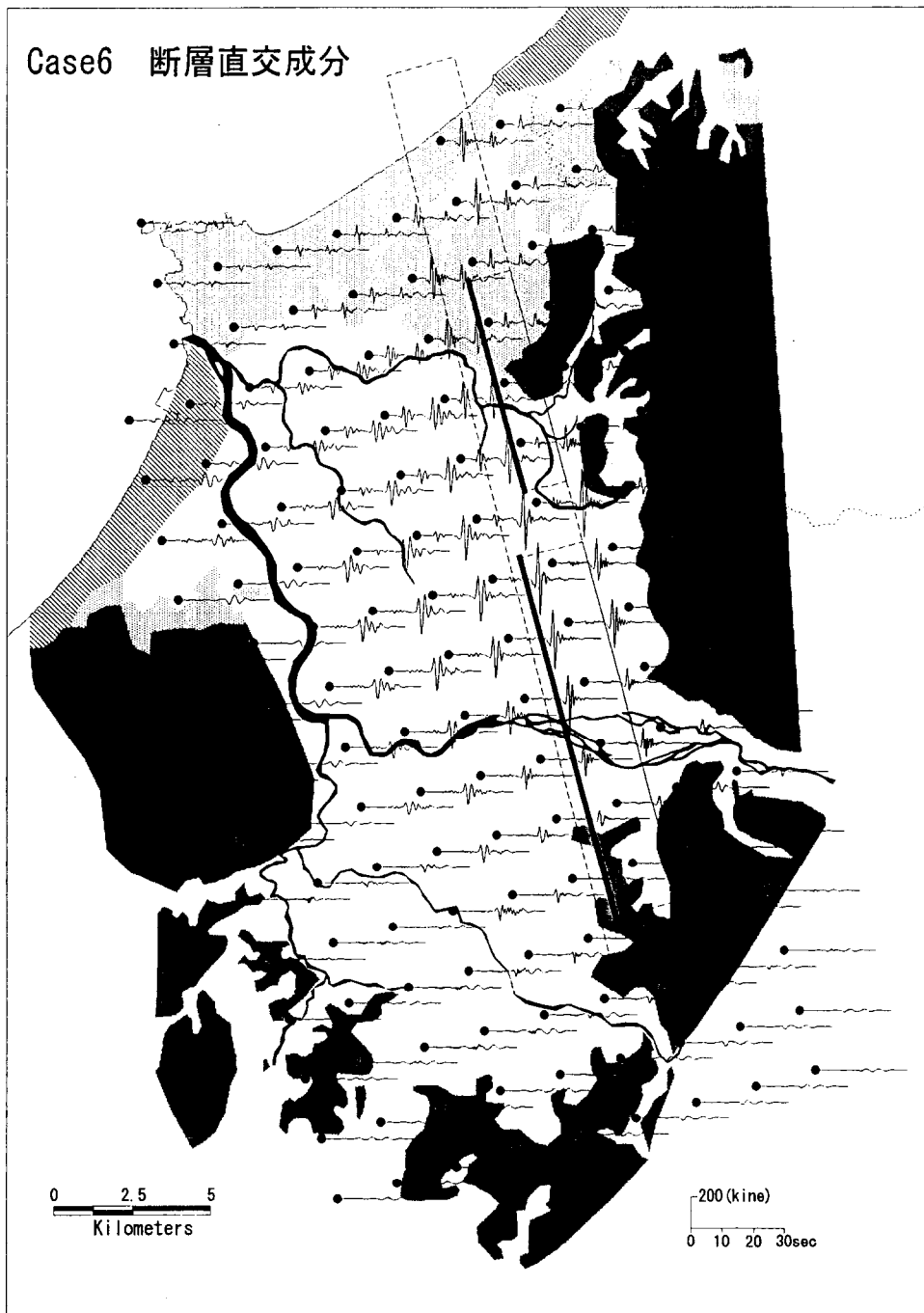


図 A2-3 地表面での速度波形(断層直交成分)

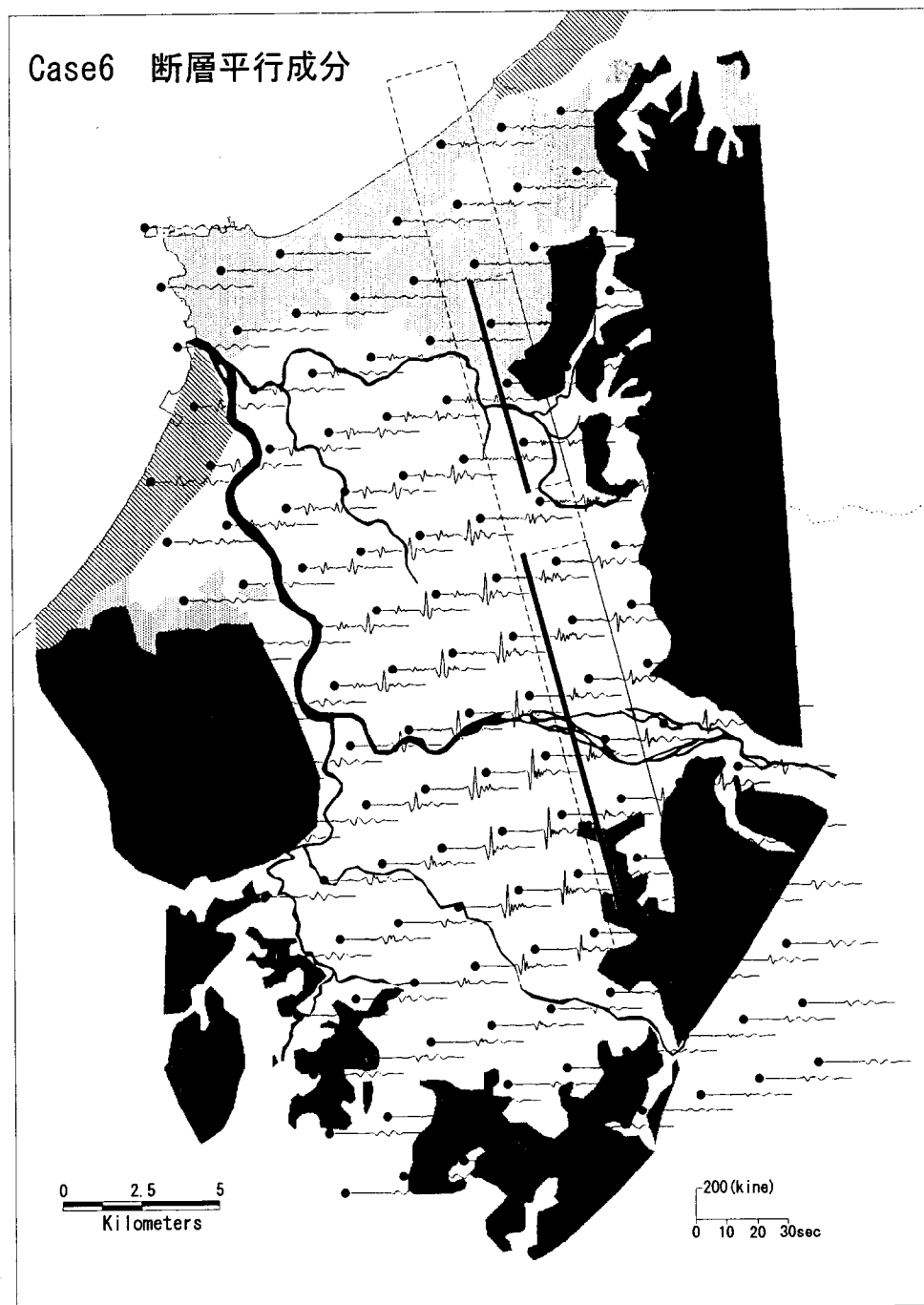


図 A2-4 地表面での速度波形(断層平行成分)

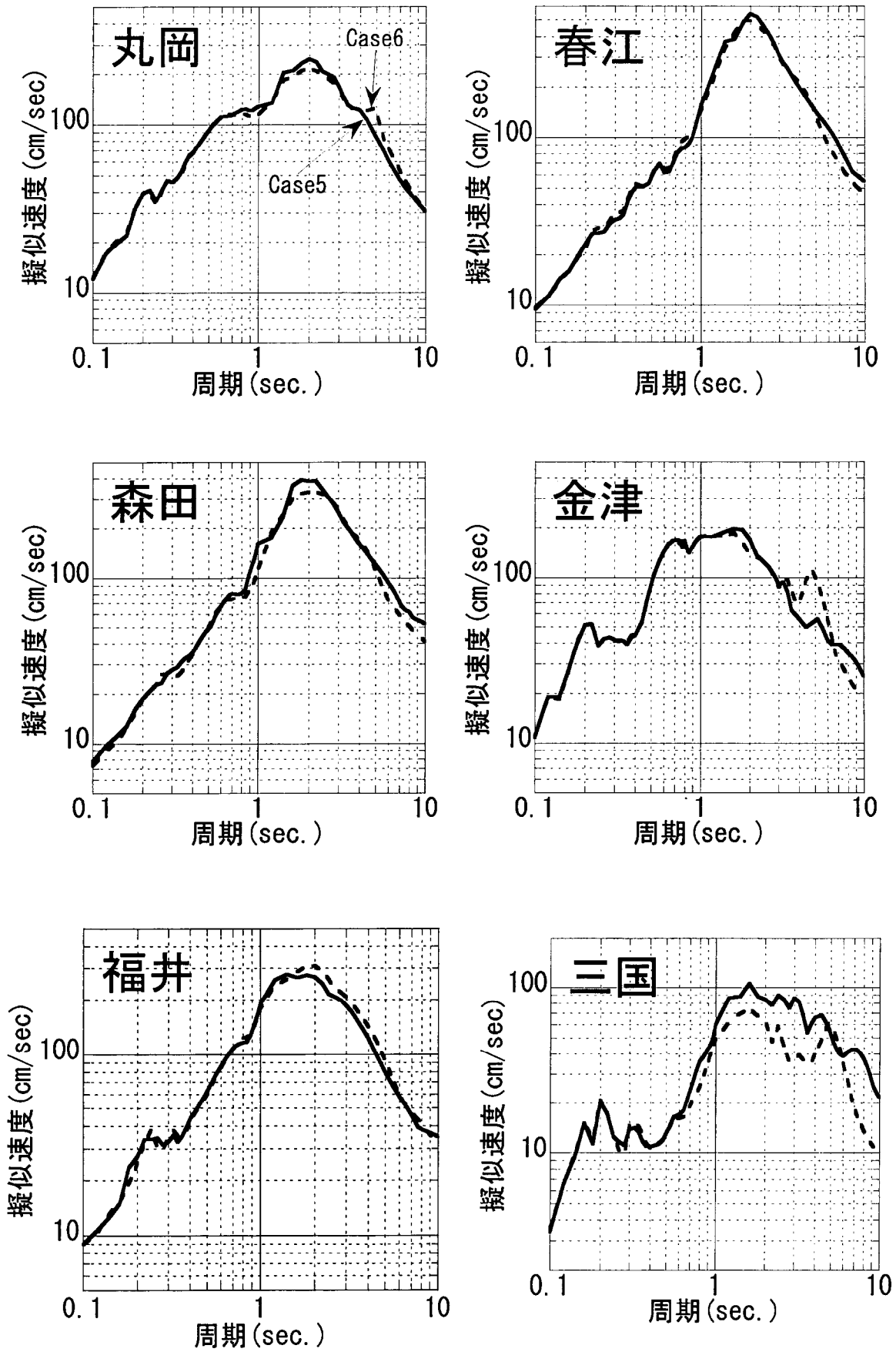
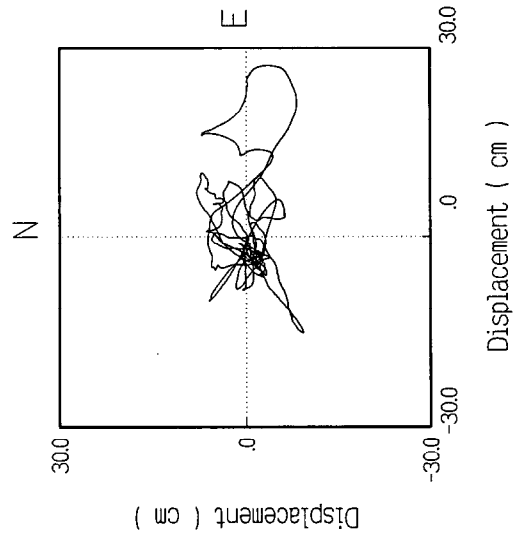
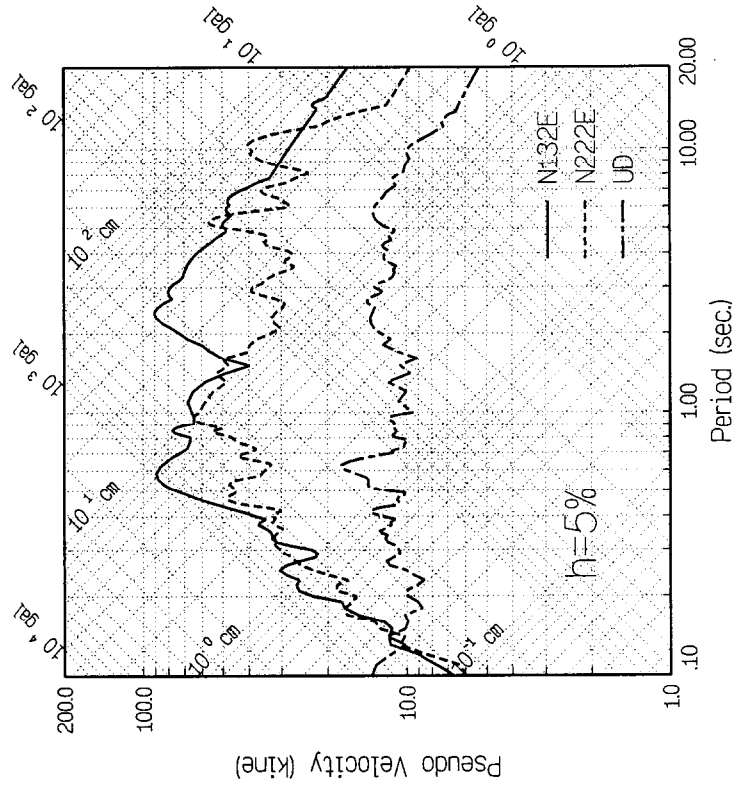
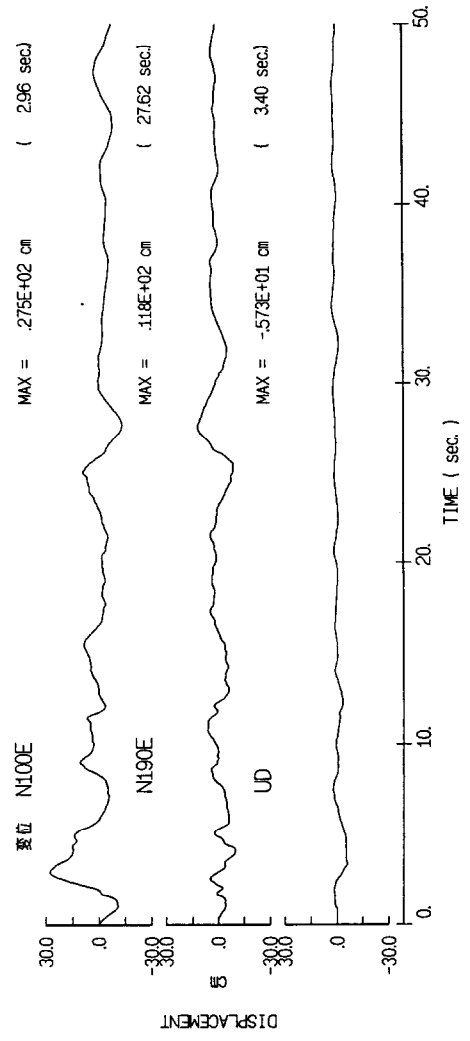
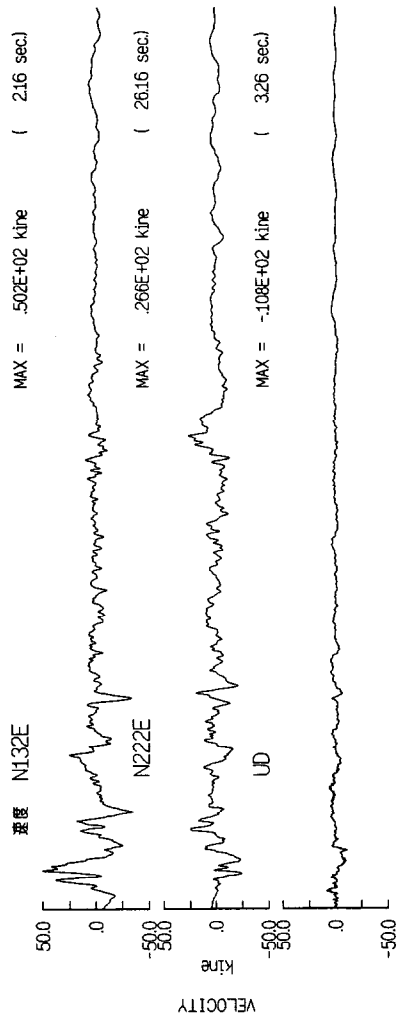
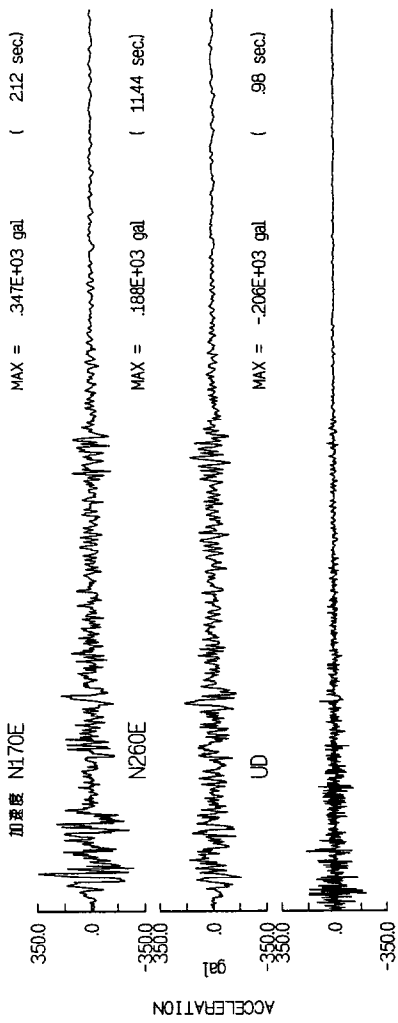


図 A2-5 代表地点での擬似速度応答スペクトル(減衰 5%)の比較

付録3 震源近傍における強震記録集

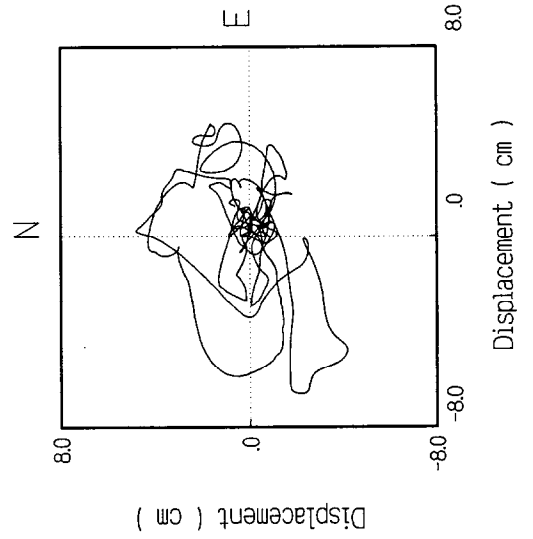
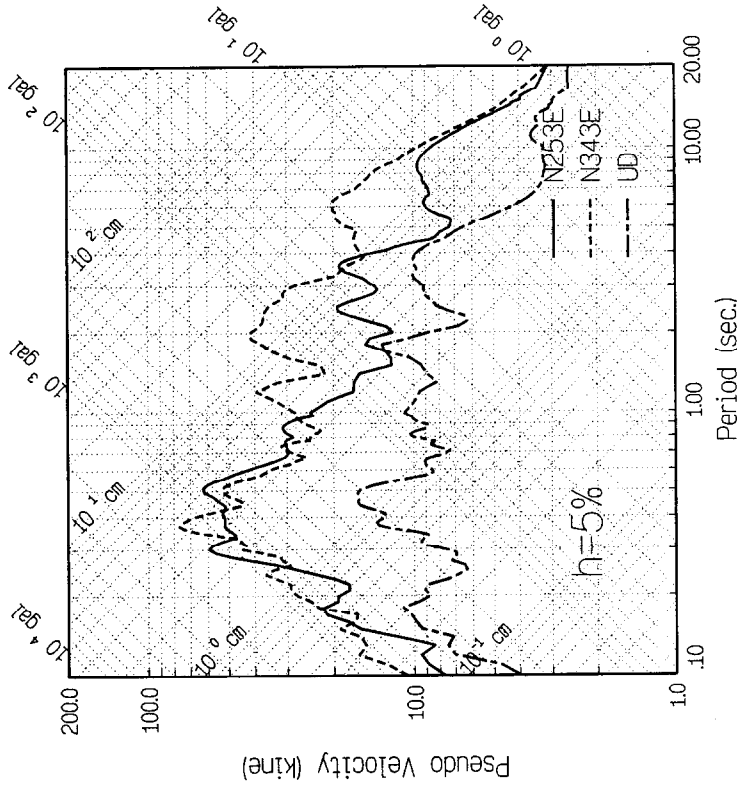
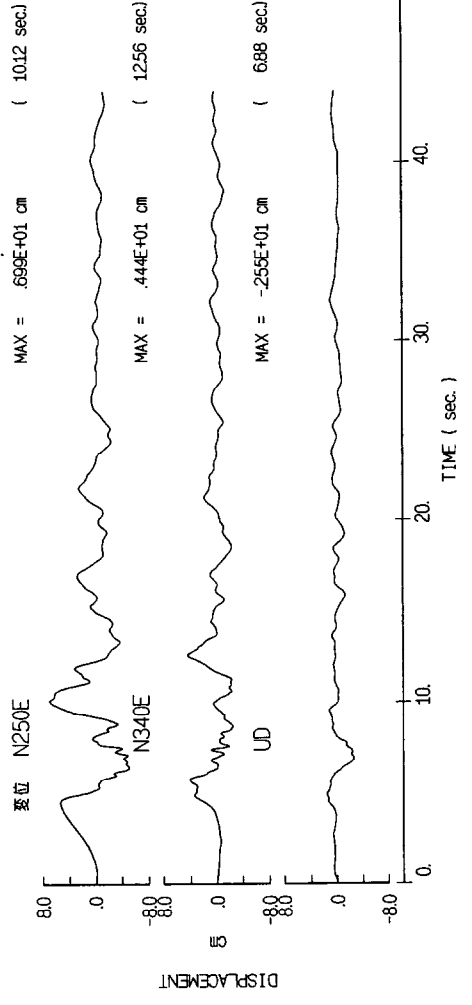
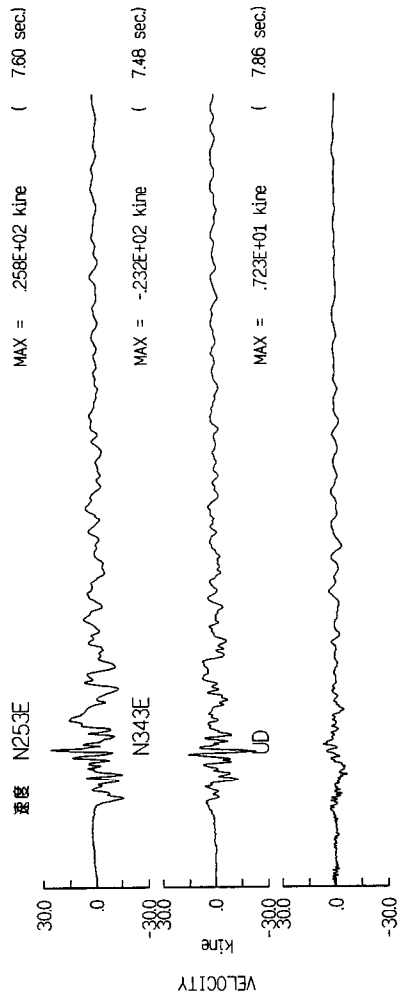
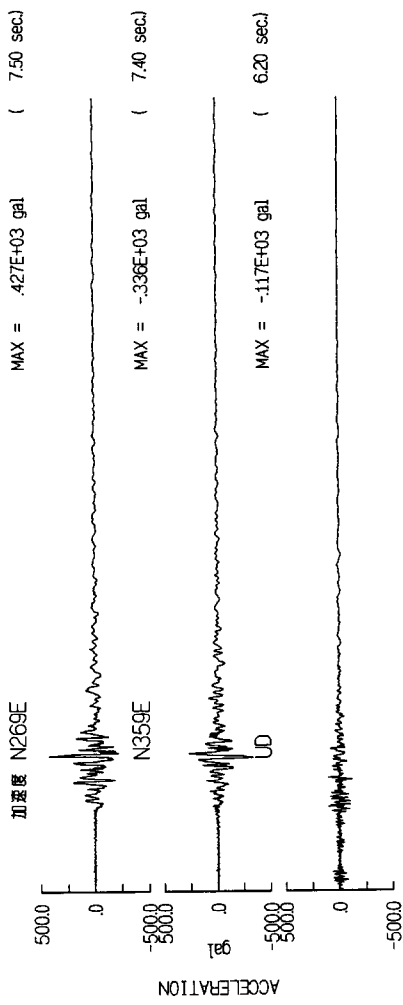
本論文4章中で用いた強震記録の波形集を以降に添付する。地震名、観測地点名に関しては、本文表4.1に記載されている。なお、波形に関しては、加速度、速度、変位各々、水平の最大値を示す方向に角度変換を行った波形に関して示している。また、水平成分における擬似速度応答スペクトル($h=5\%$)に関しては、速度が最大を示す方向に角度変換した加速度波を用いて、スペクトルを計算している。

1940/05/19 Imperial Valley Mw=6.9 EL09



1966/06/28 Parkfield

Mw=6.2 CL5



1966/06/28 Parkfield

Mw=6.2 CL2

加速度 N065E MAX = -480E+03 gal (3.74 sec)



UD MAX = -202E+03 gal (2.80 sec)



速度 N065E MAX = -779E+02 kine (4.46 sec)



UD MAX = .139E+02 kine (4.64 sec)



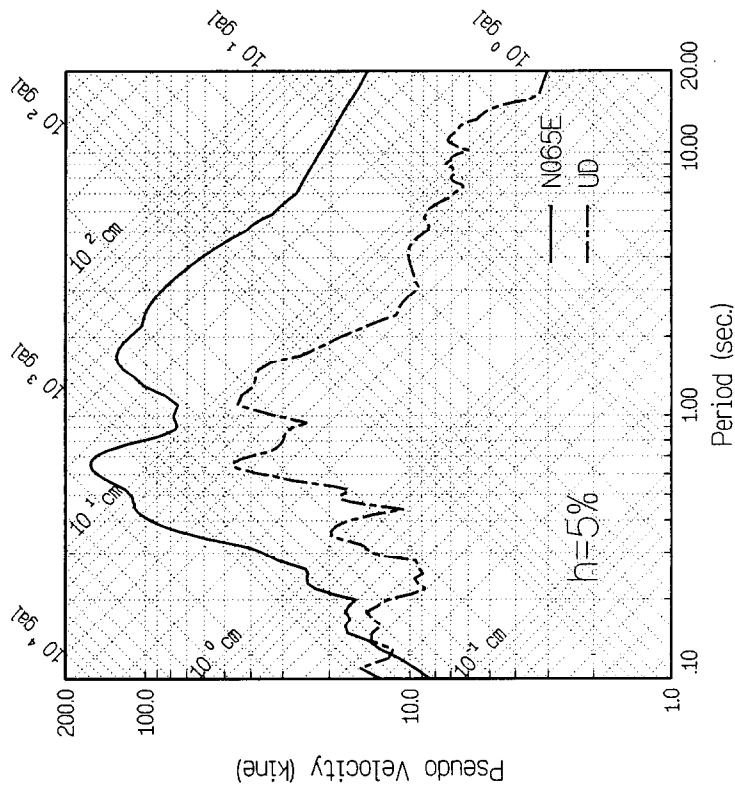
変位 N065E MAX = 273E+02 cm (4.18 sec)



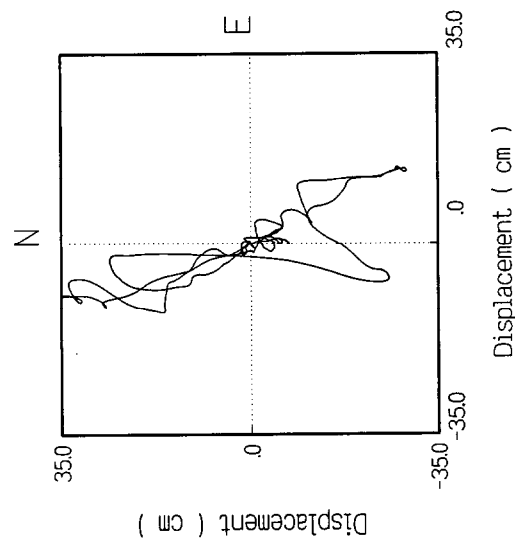
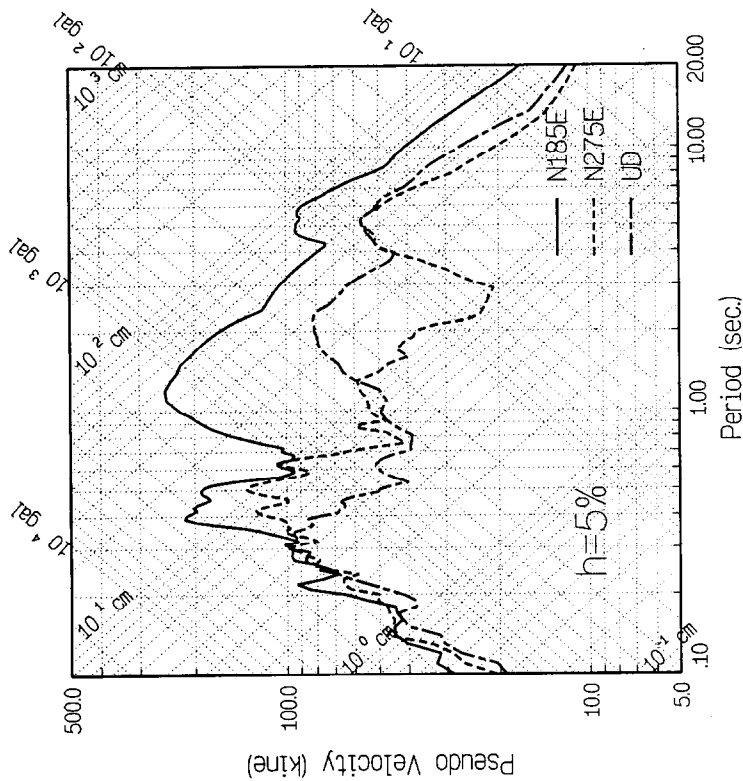
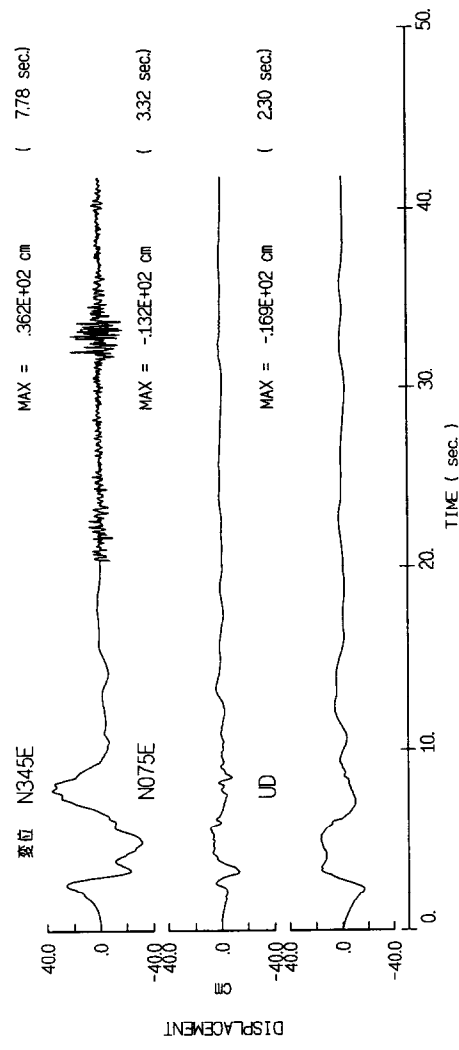
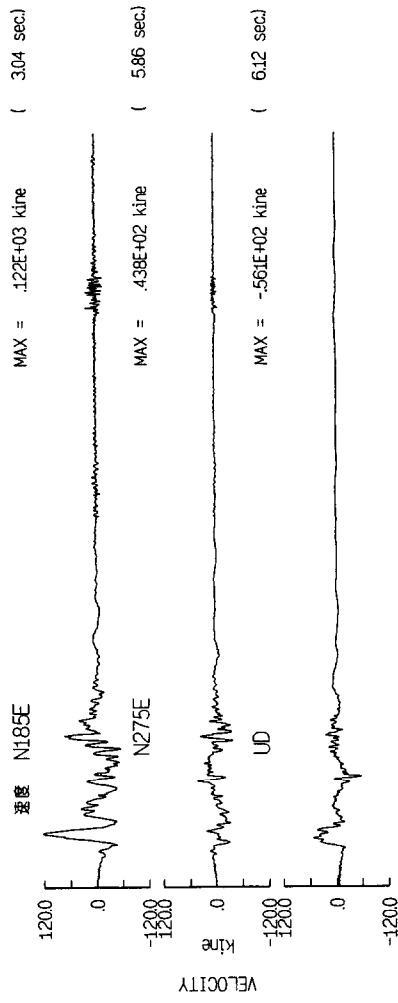
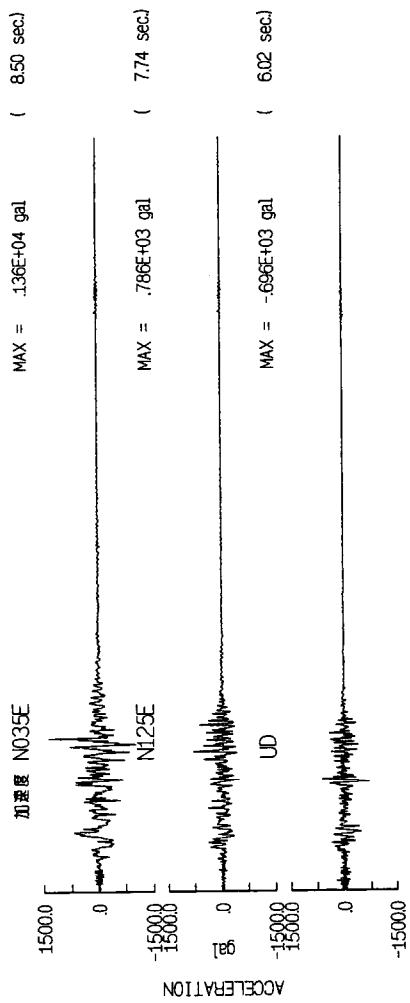
UD MAX = -526E+01 cm (3.80 sec)



TIME (sec.)

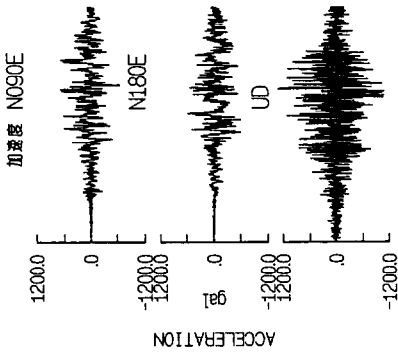


1971/02/09 San Fernando Mw=6.6 PDM

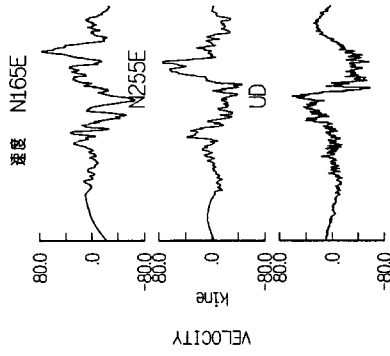


1976/05/17 Gazli

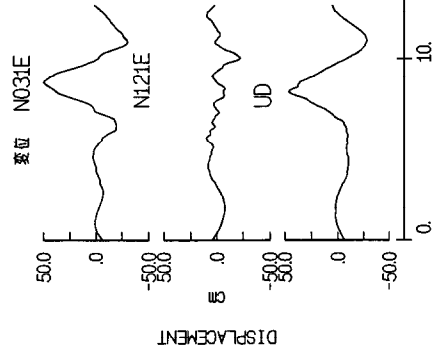
Mw=6.7 KAR



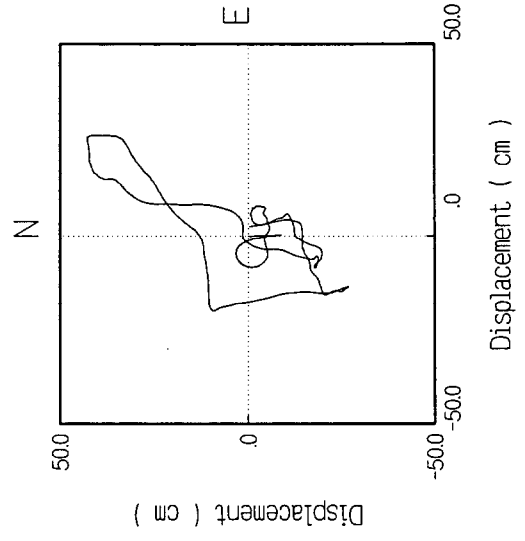
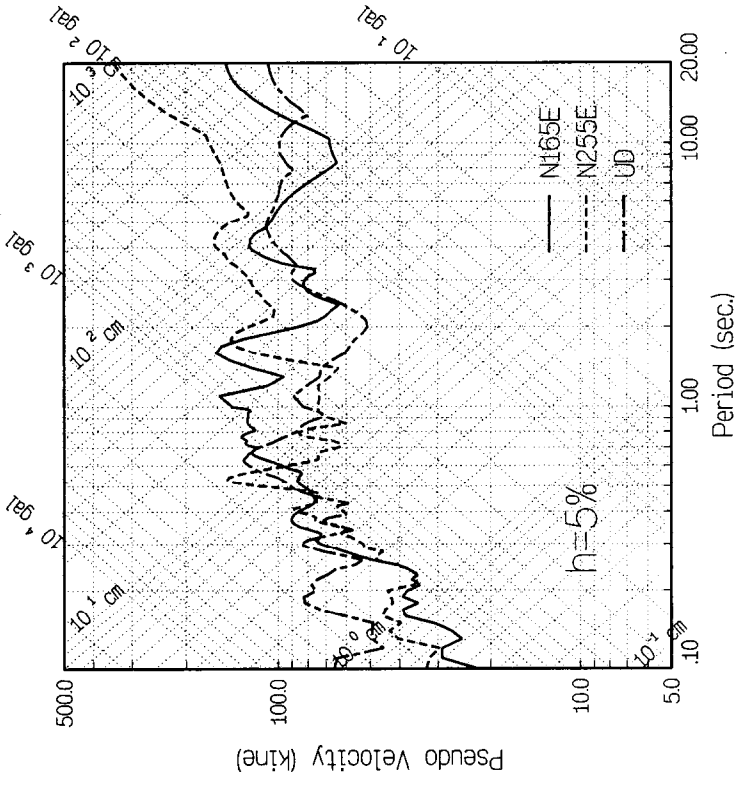
MAX = .703E+03 gal (8.40 sec)
 MAX = -.601E+03 gal (6.77 sec)
 MAX = .133E+04 gal (8.42 sec)



MAX = .775E+02 kine (10.44 sec)
 MAX = .746E+02 kine (9.82 sec)
 MAX = .617E+02 kine (7.96 sec)

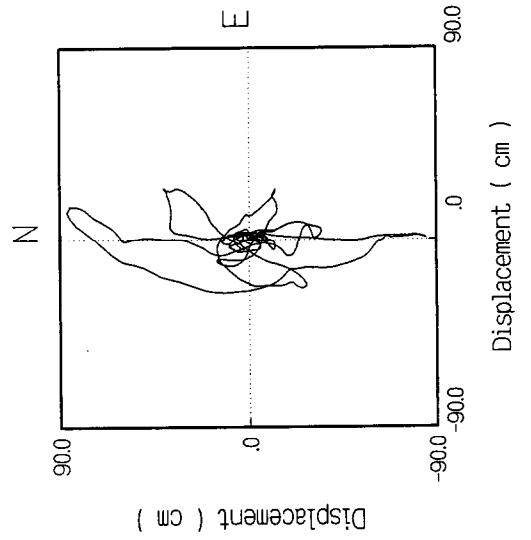
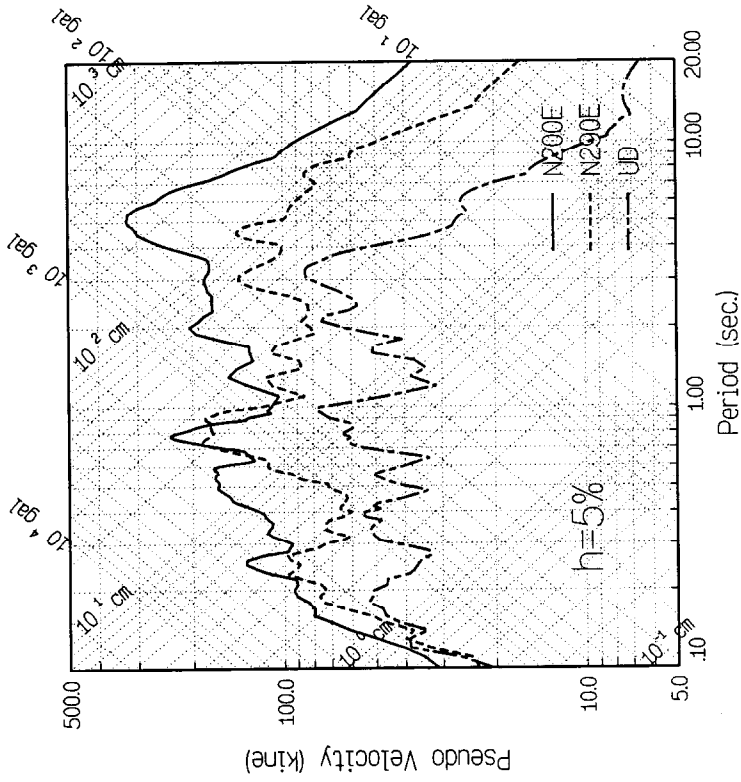
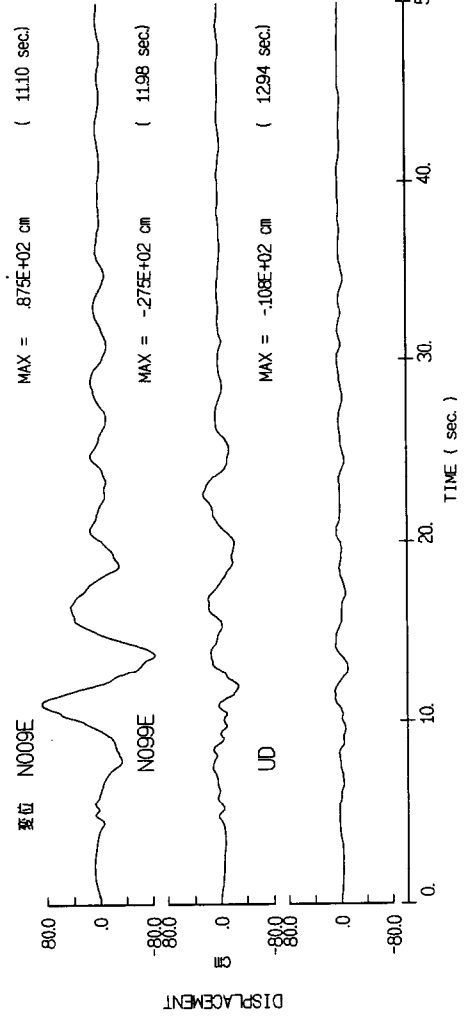
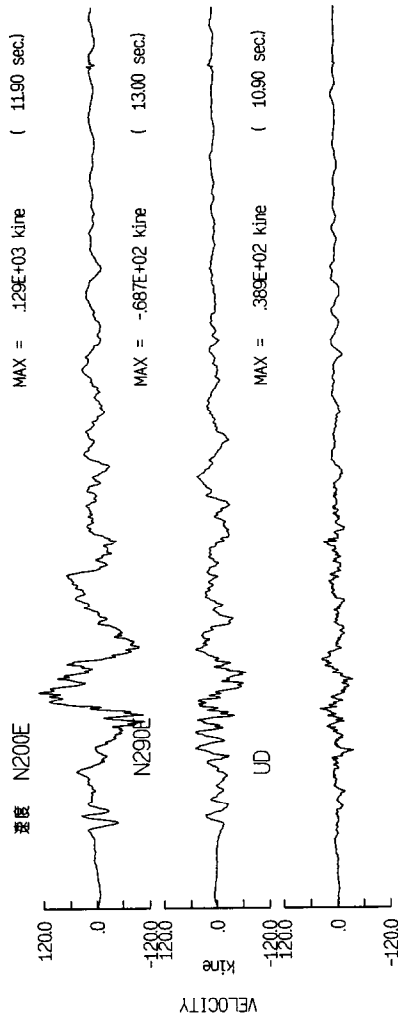
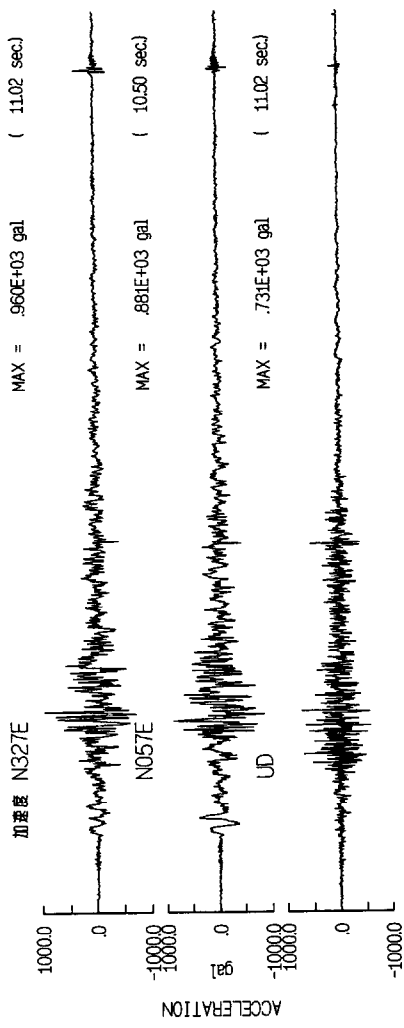


MAX = .501E+02 cm (8.67 sec)
 MAX = -.221E+02 cm (10.07 sec)
 MAX = .466E+02 cm (8.20 sec)

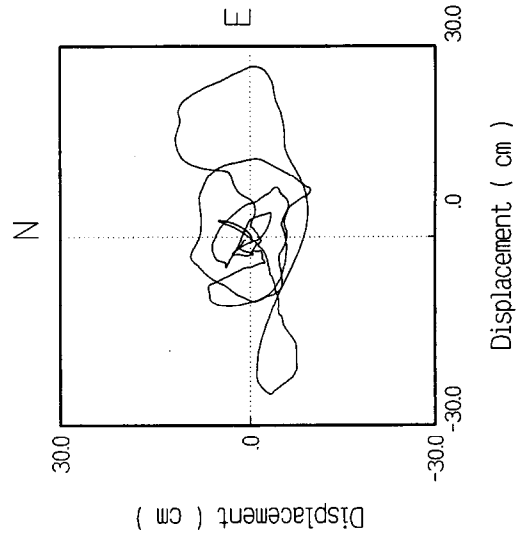
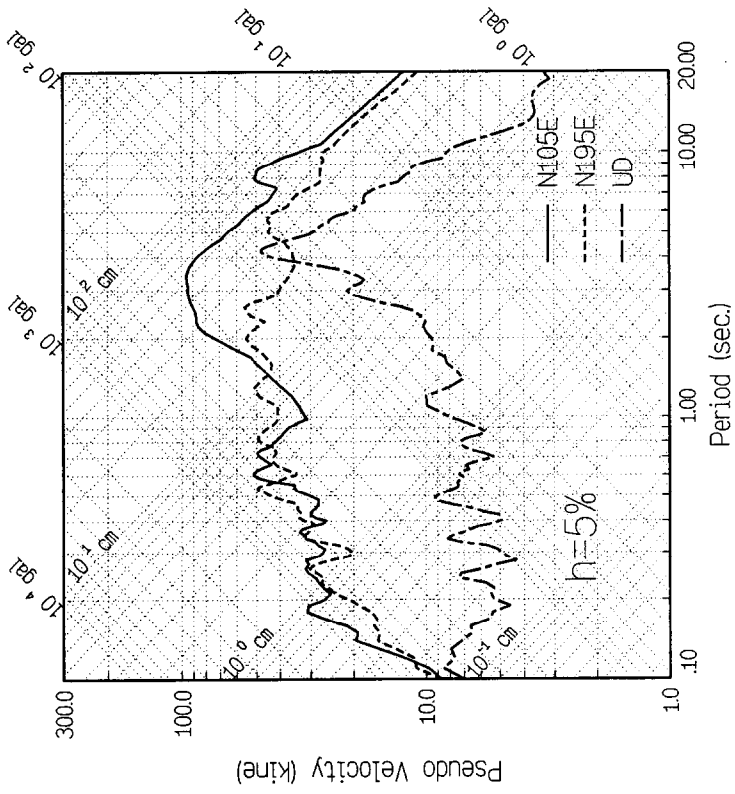
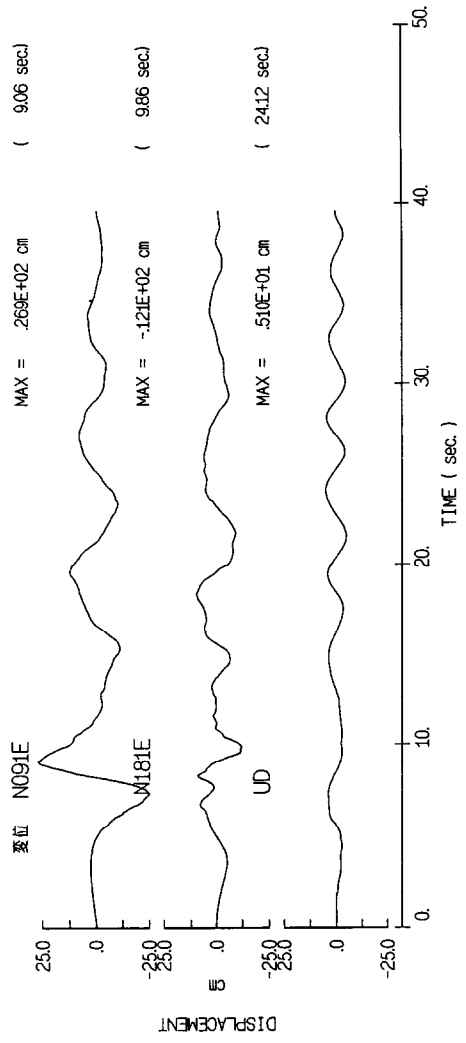
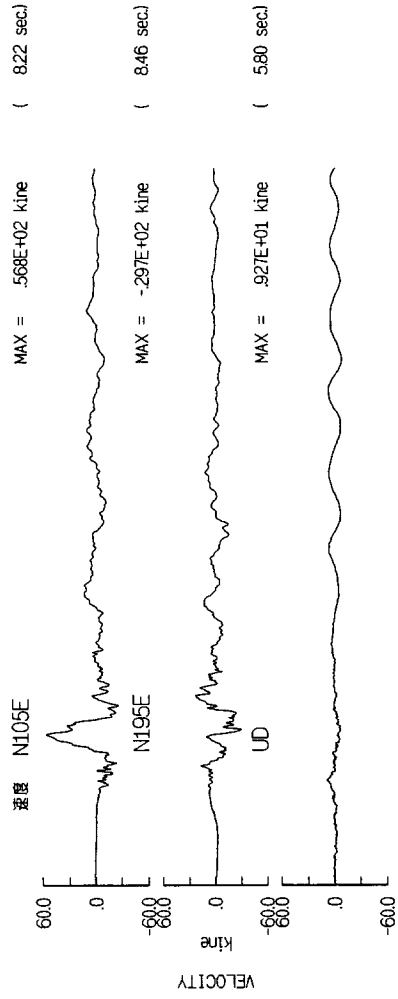
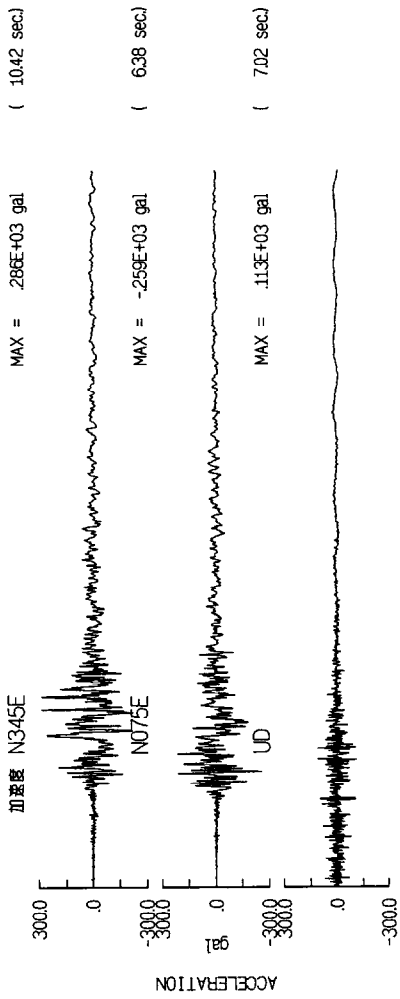


1978/09/16 Tabas

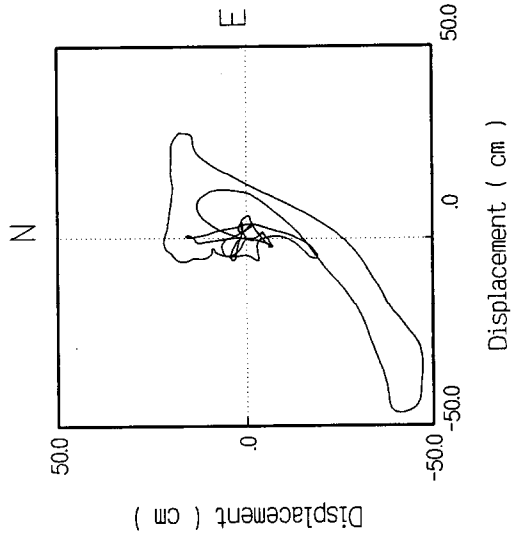
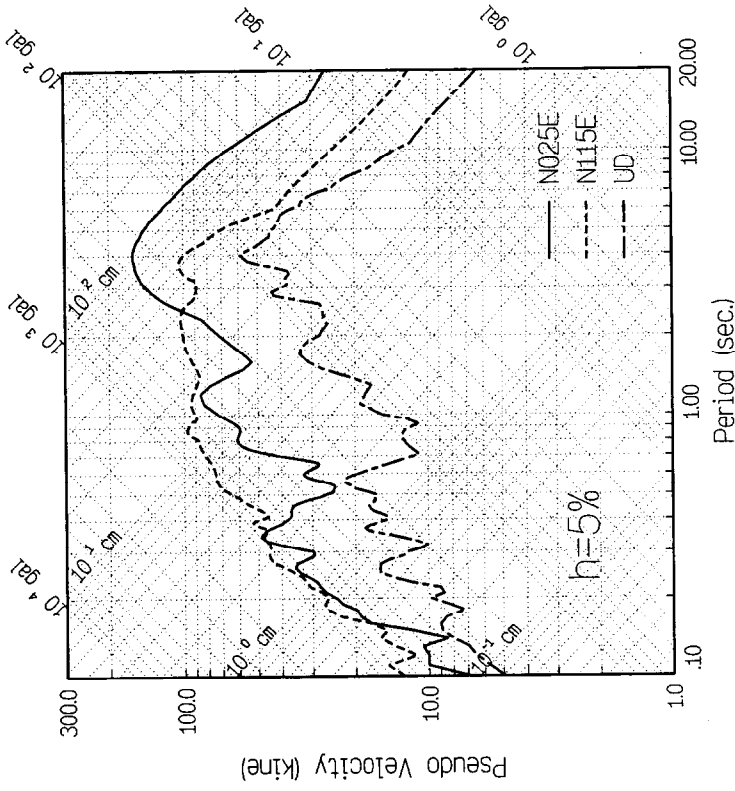
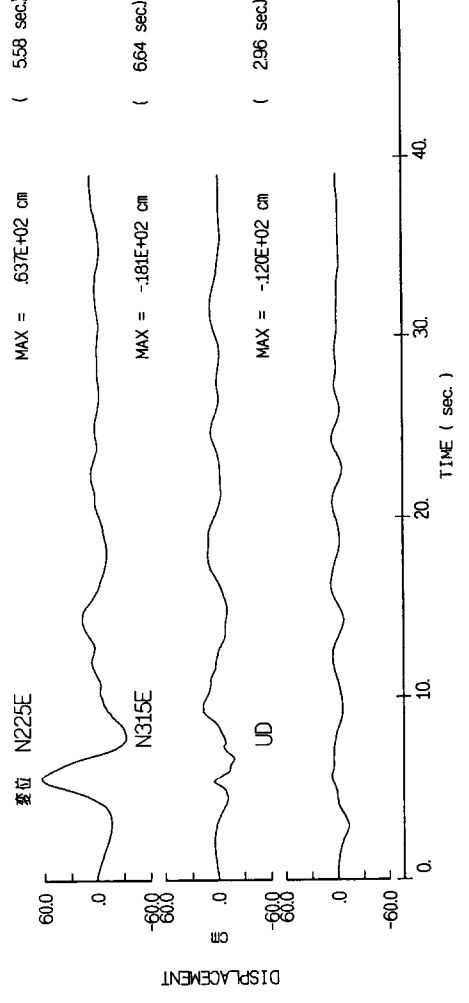
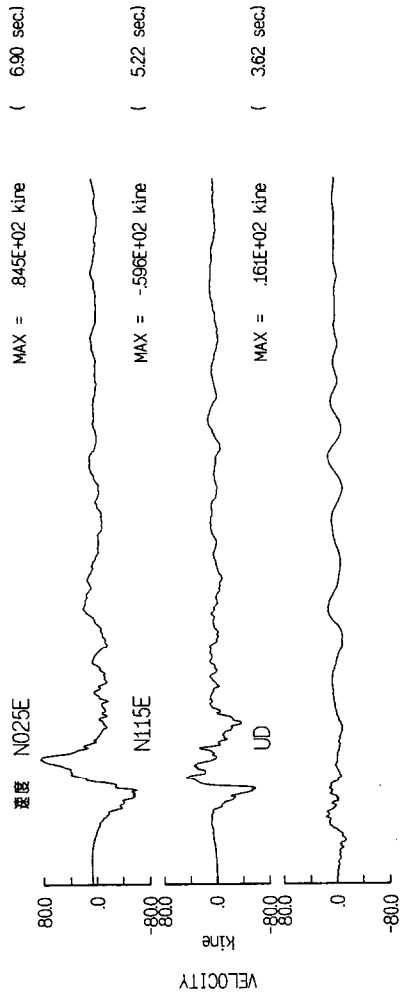
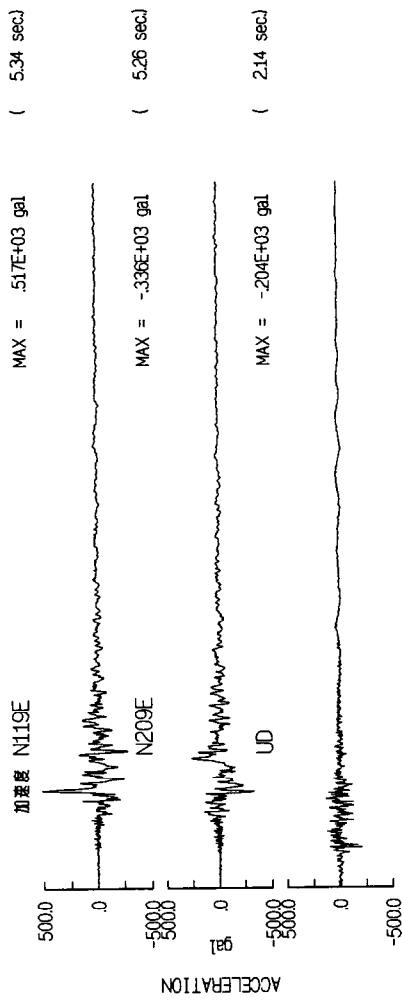
Mw=7.4 TBS



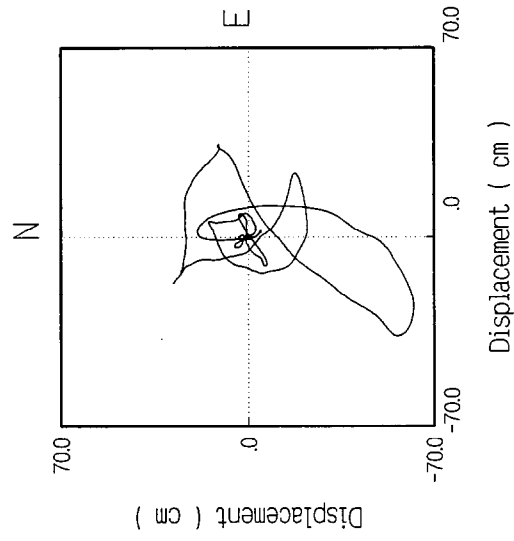
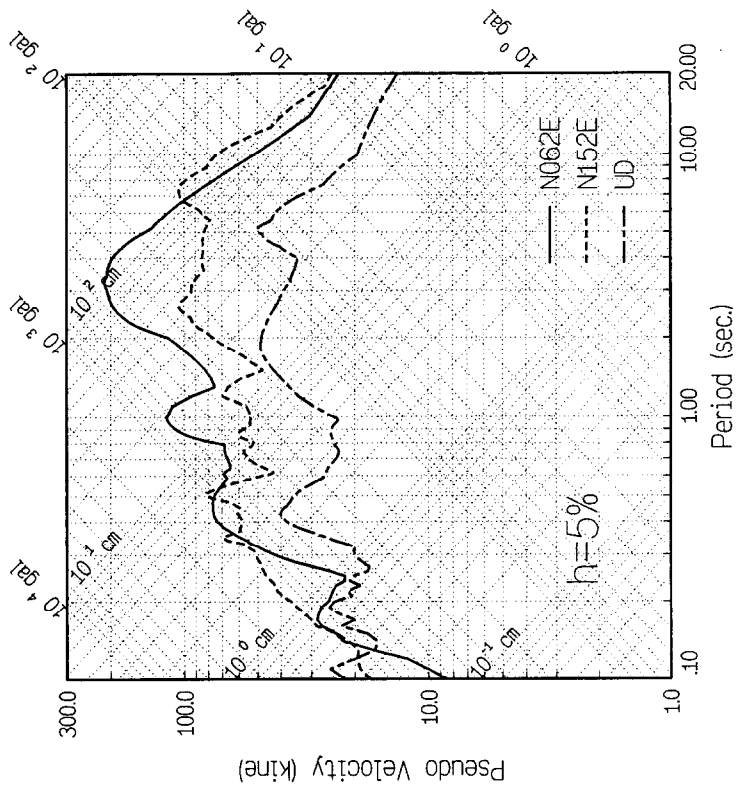
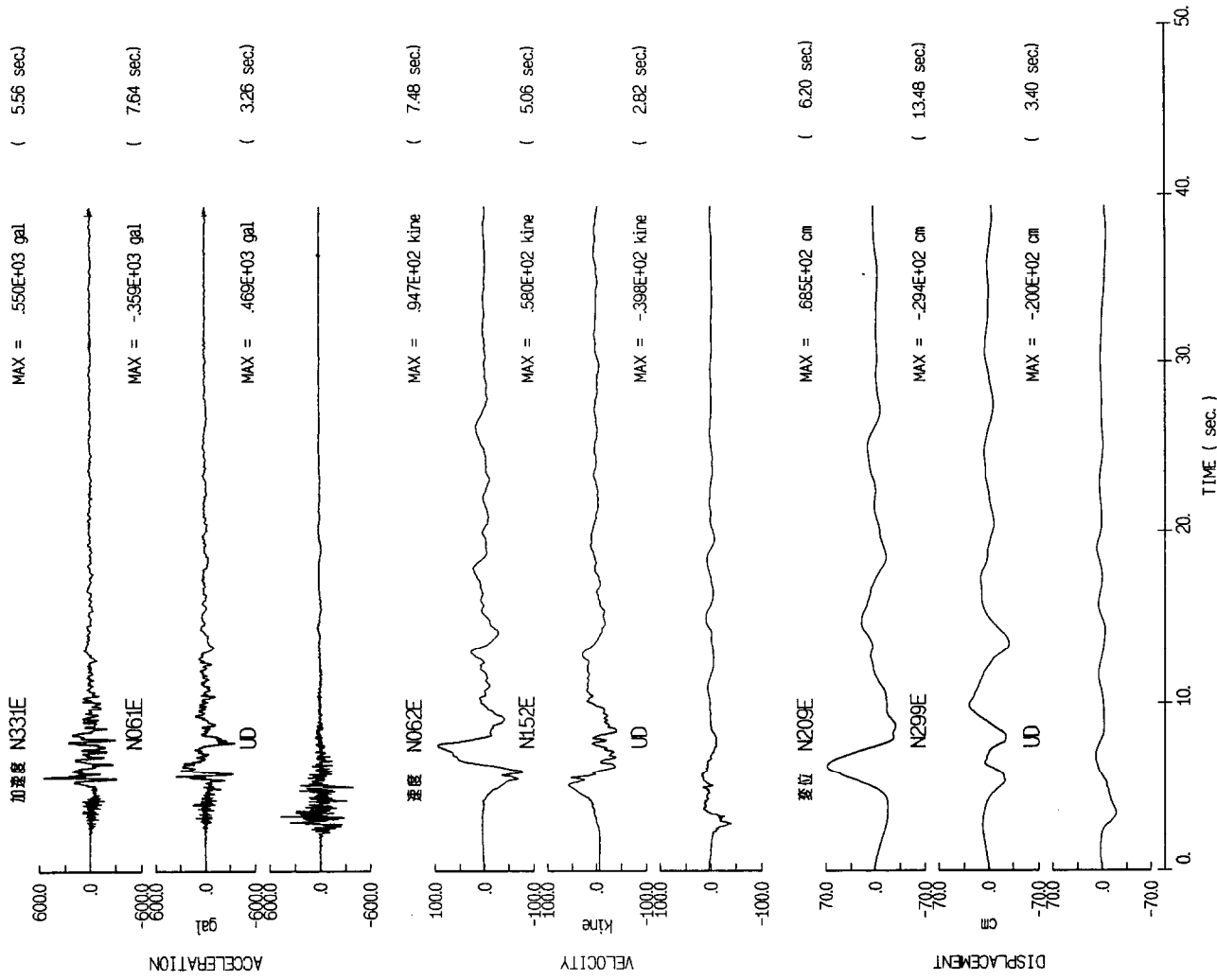
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 EL03



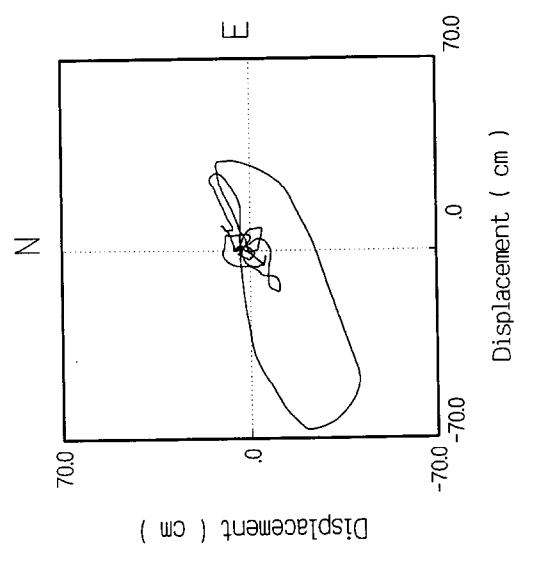
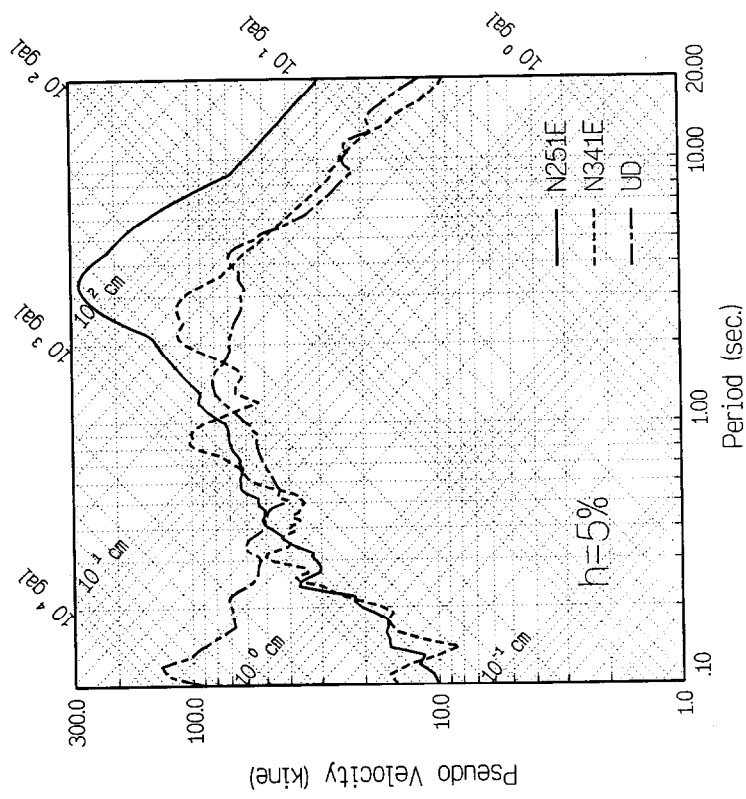
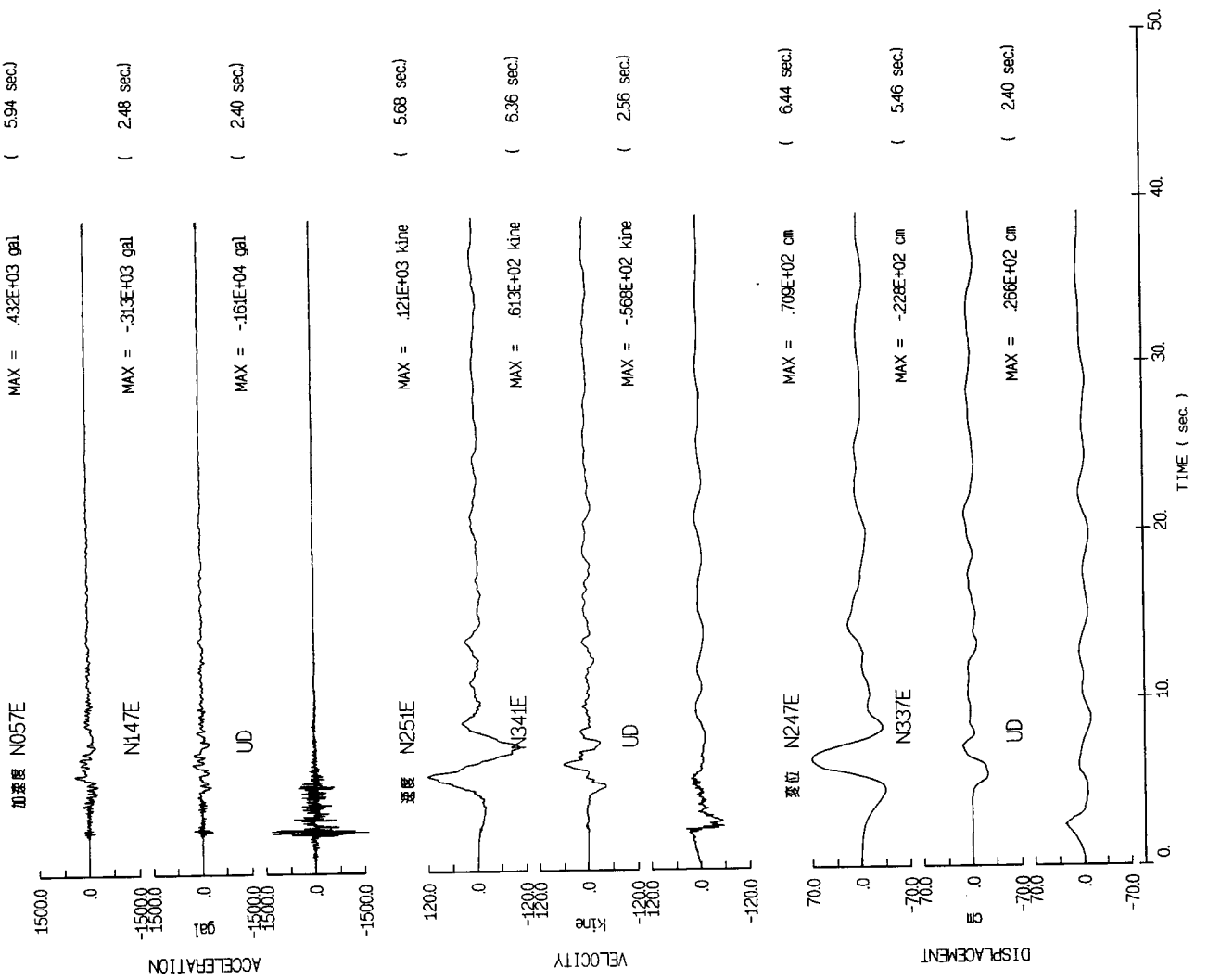
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 EL04



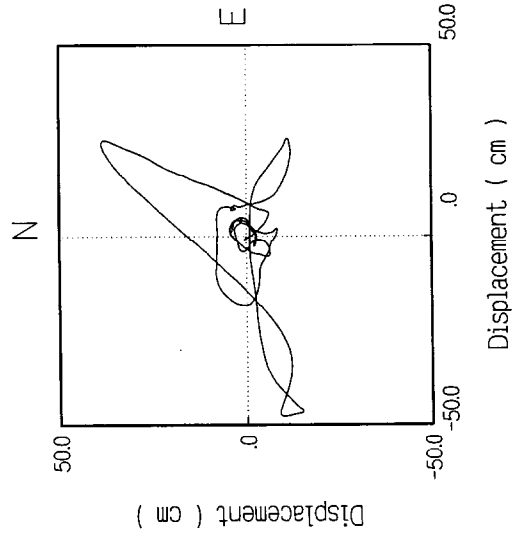
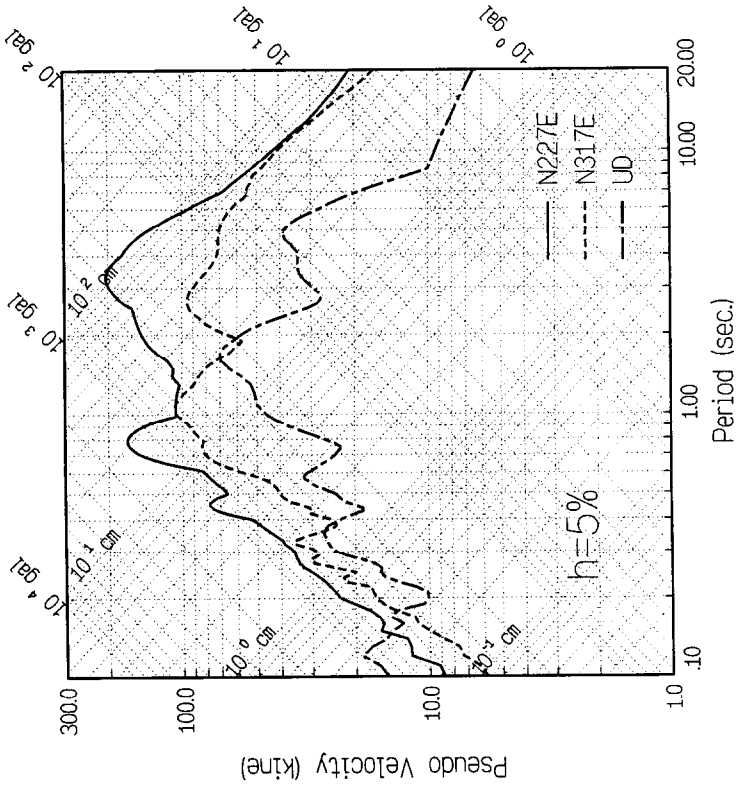
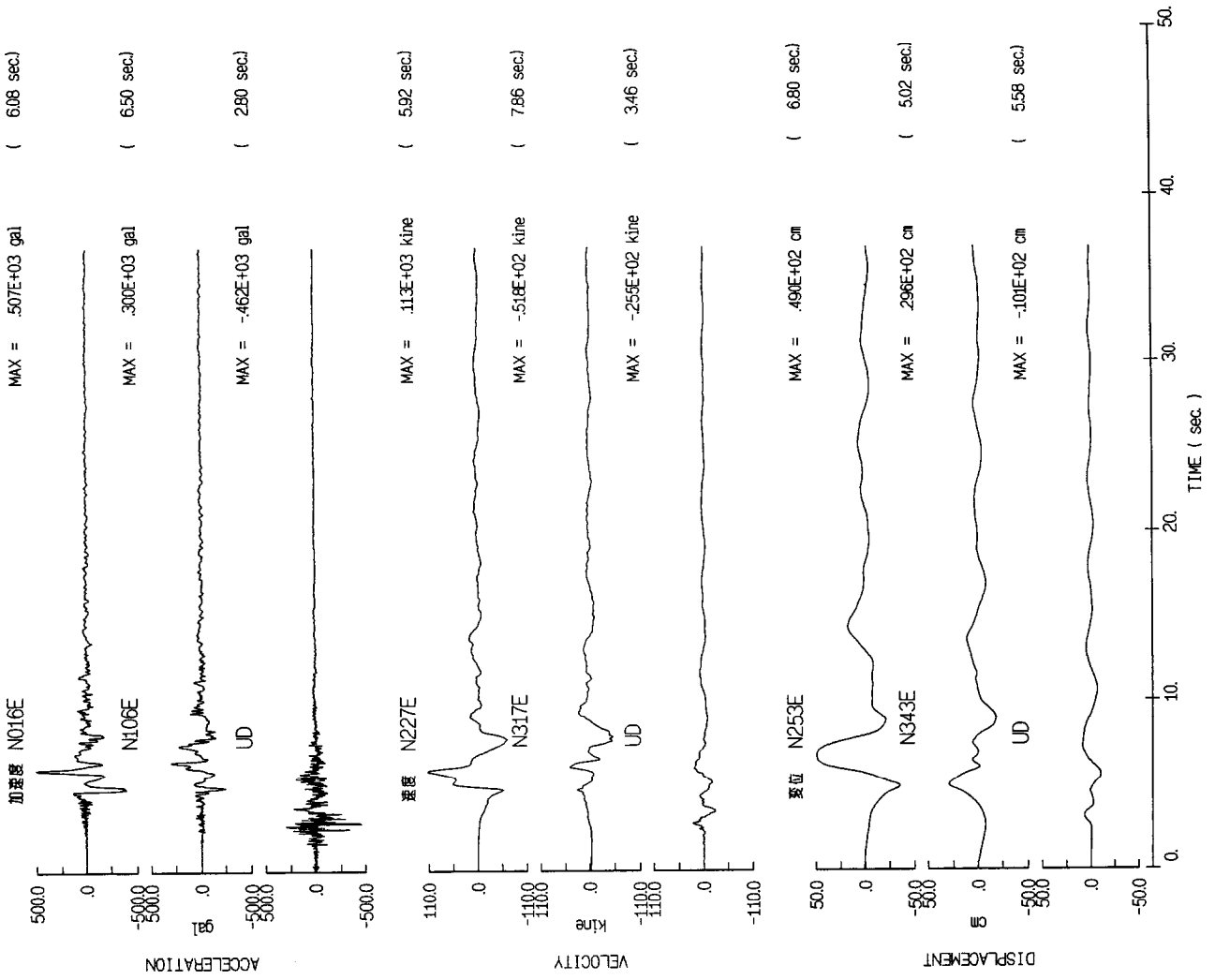
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 EL05



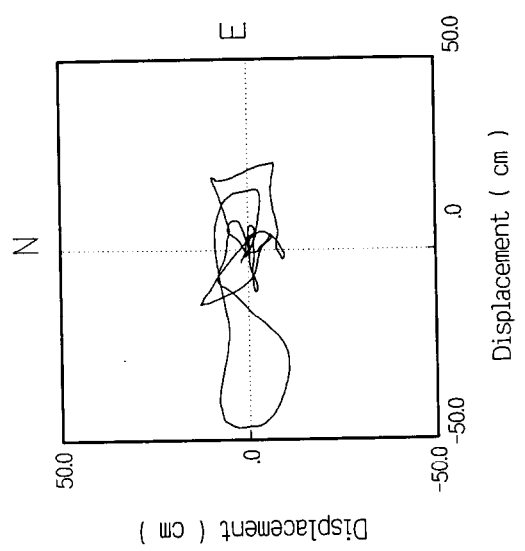
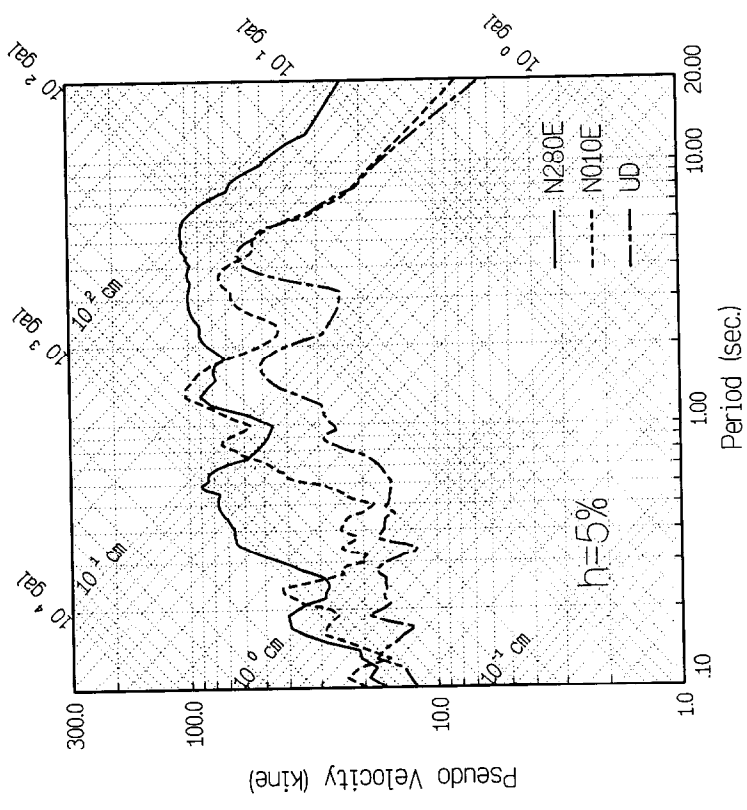
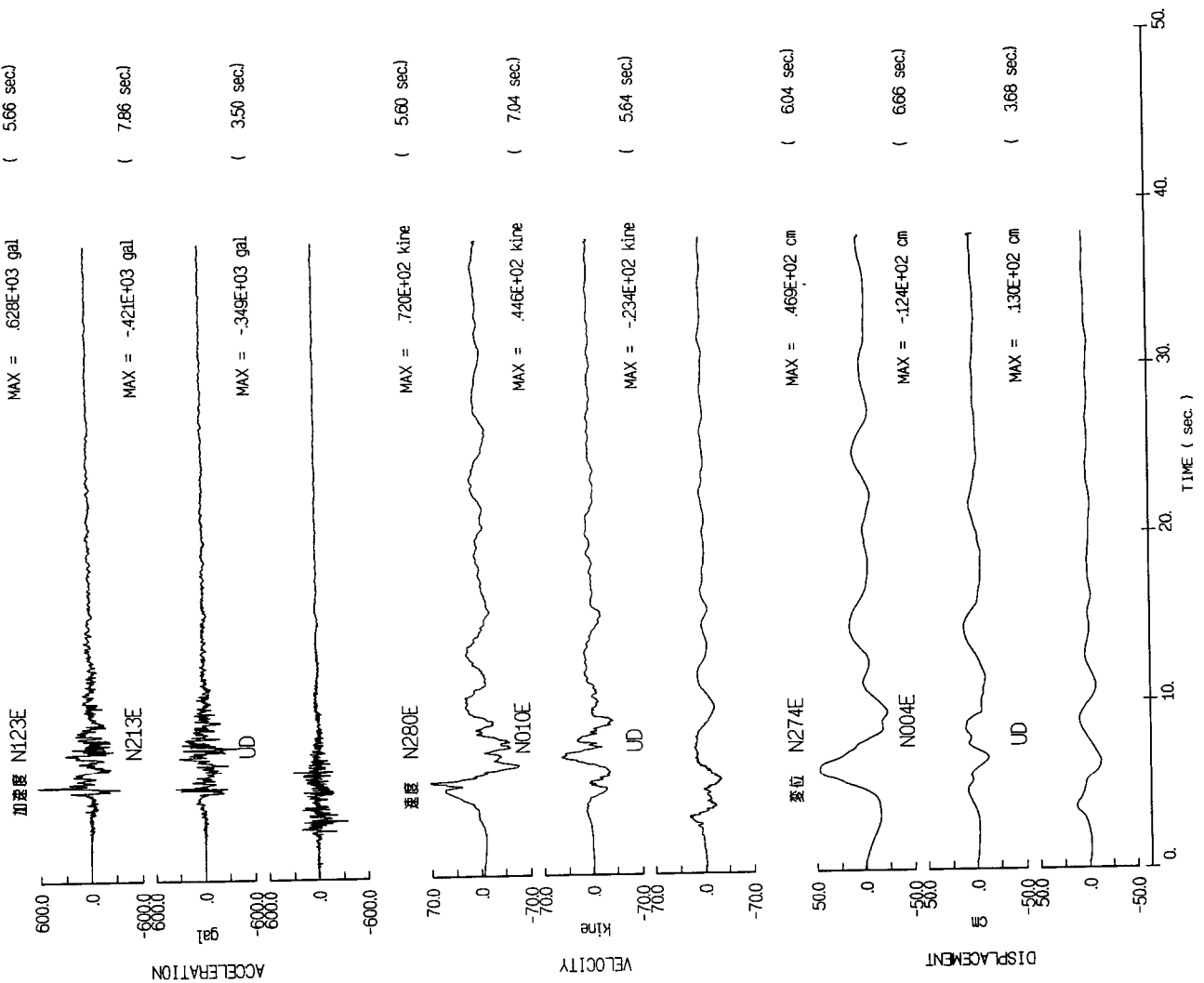
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 EL06



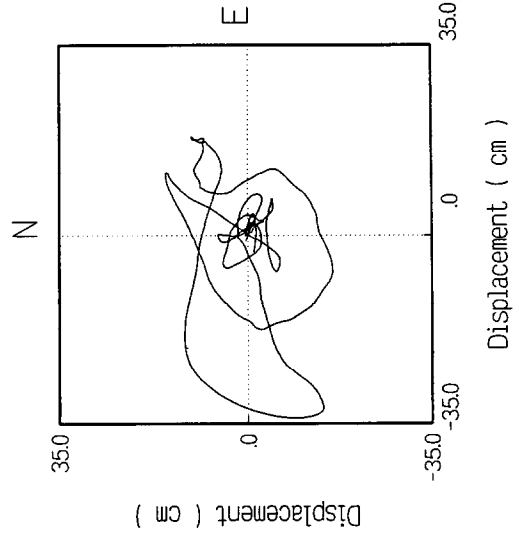
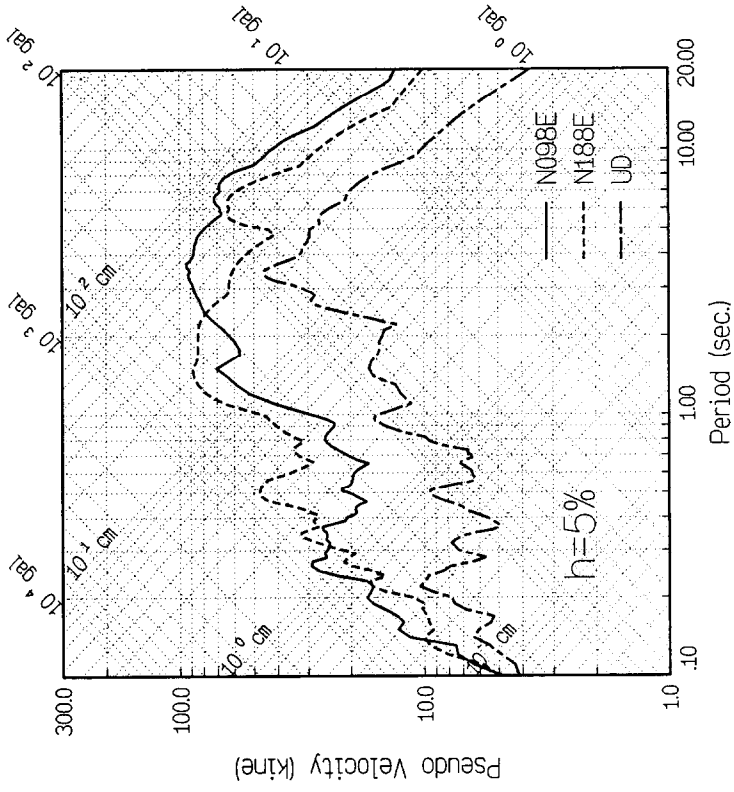
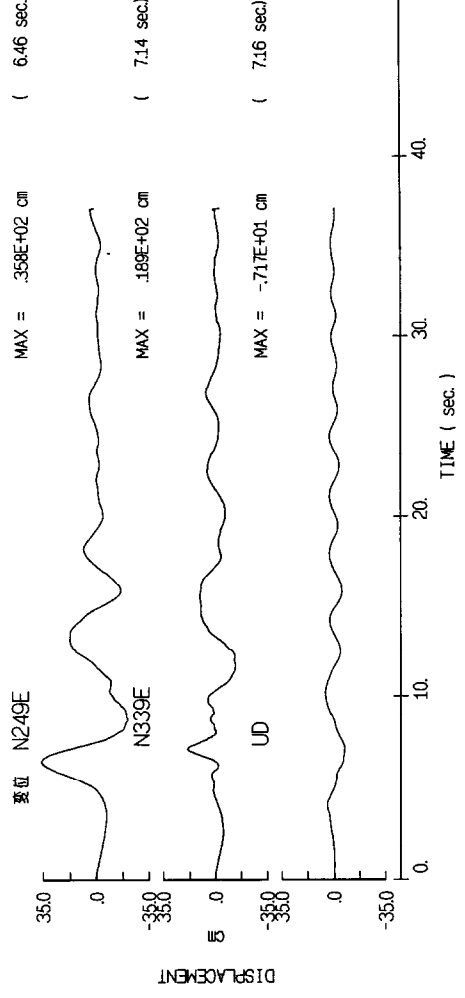
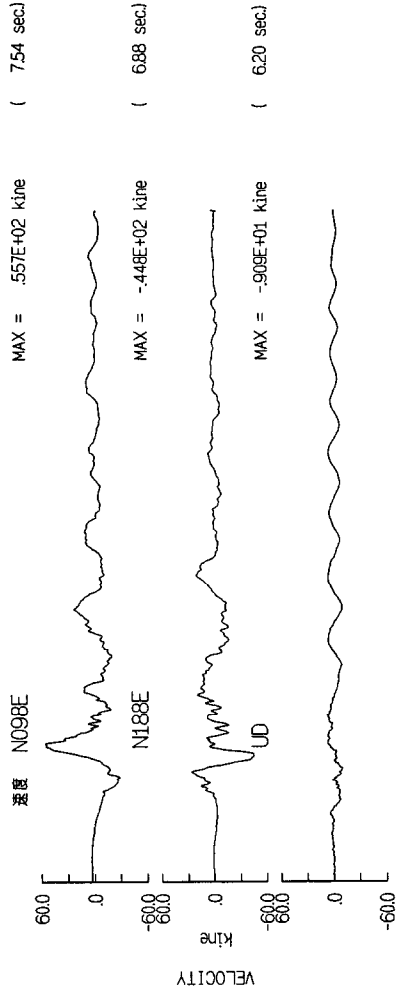
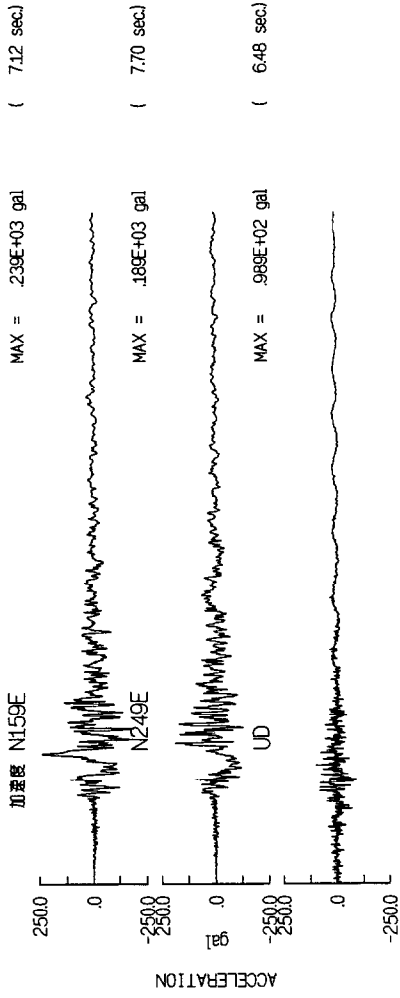
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 ELO7



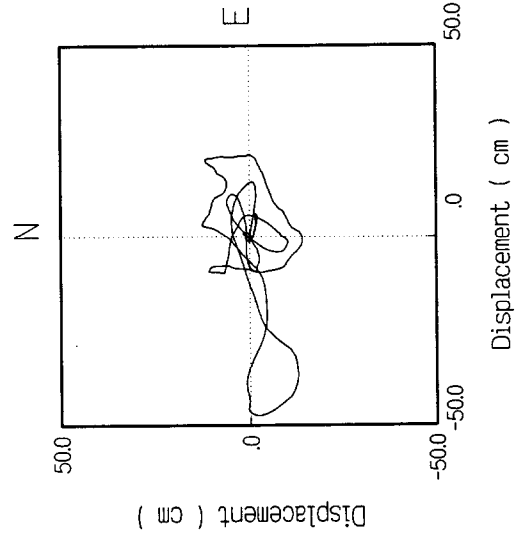
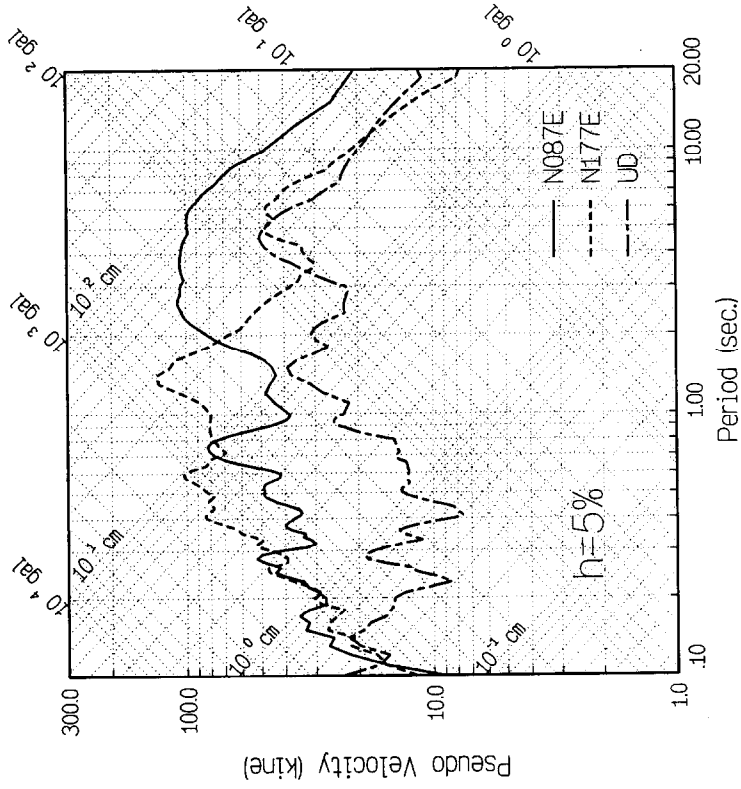
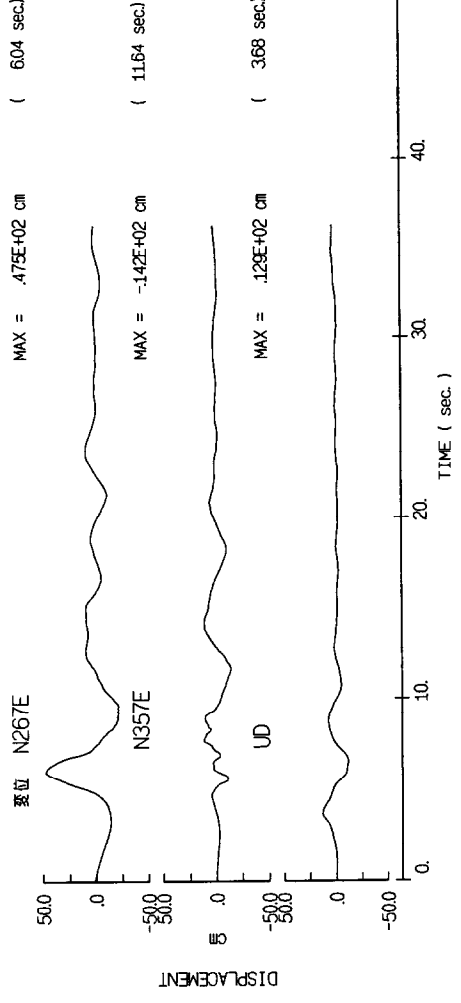
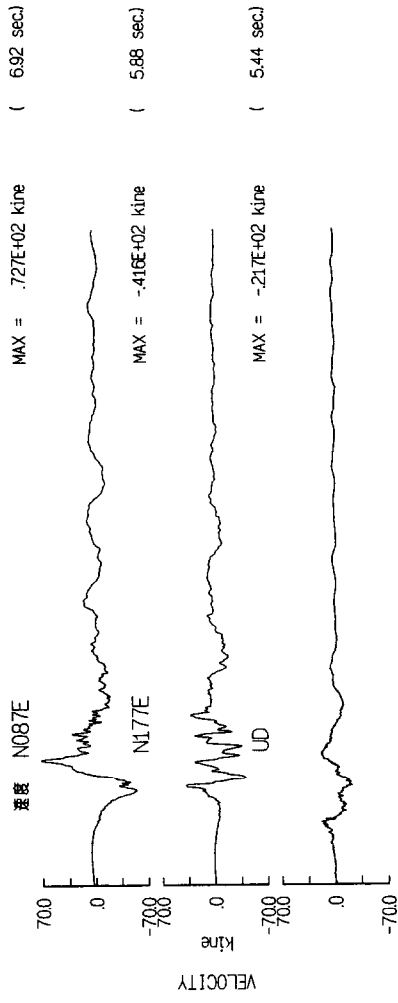
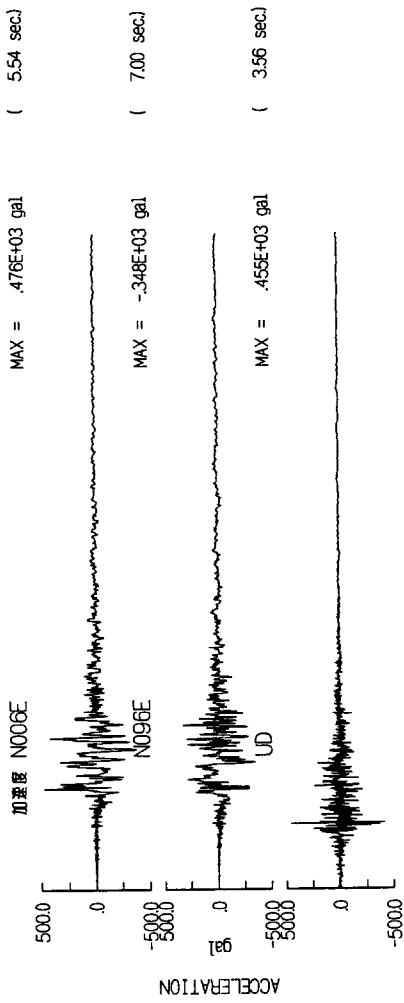
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 EL08



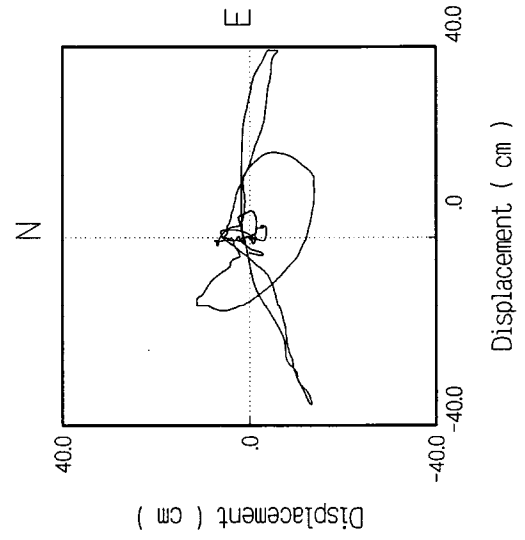
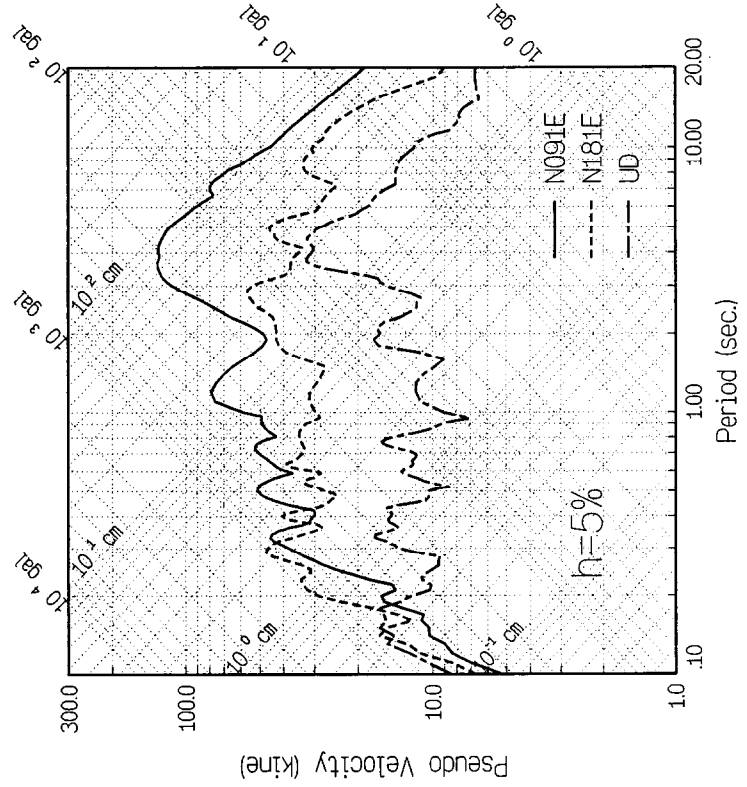
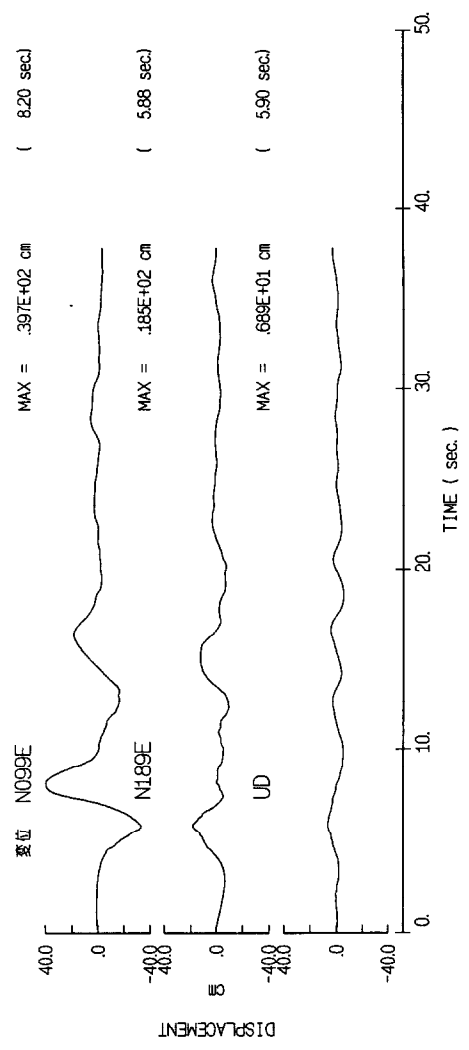
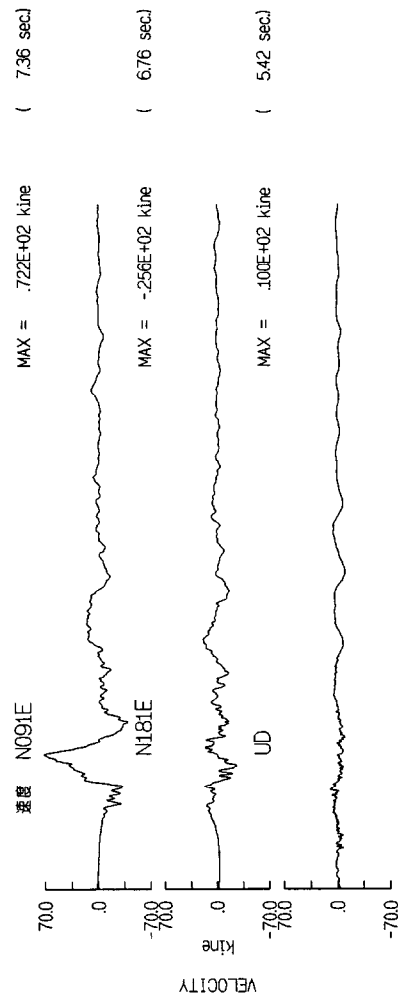
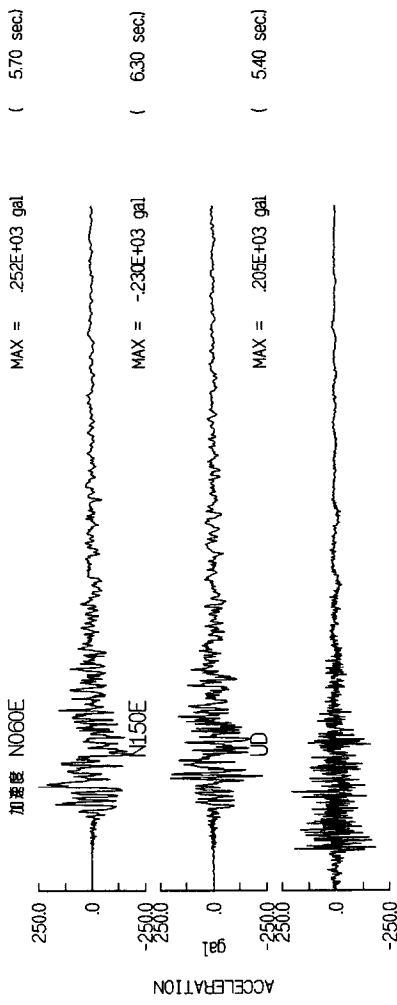
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 ELTU



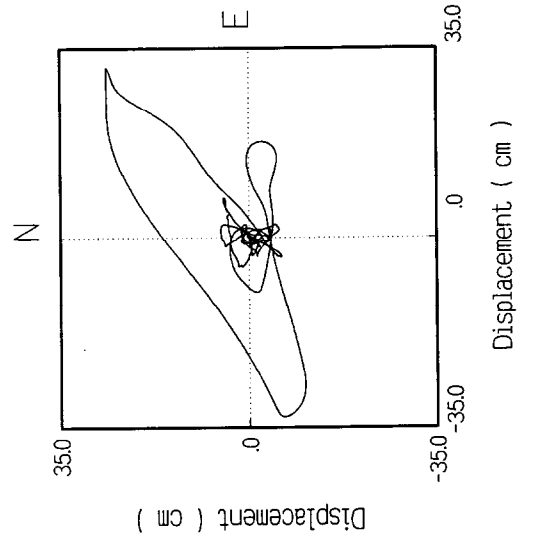
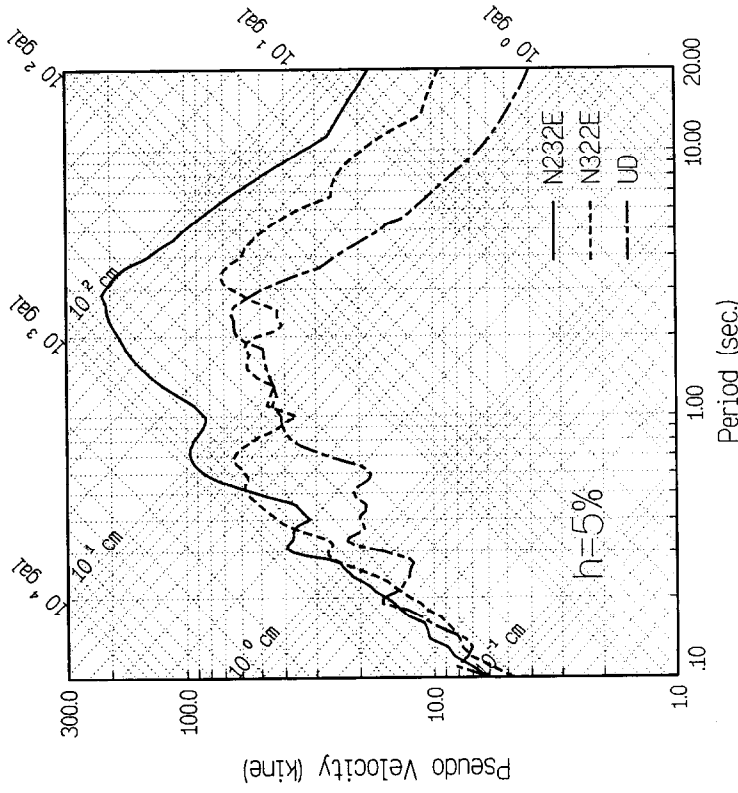
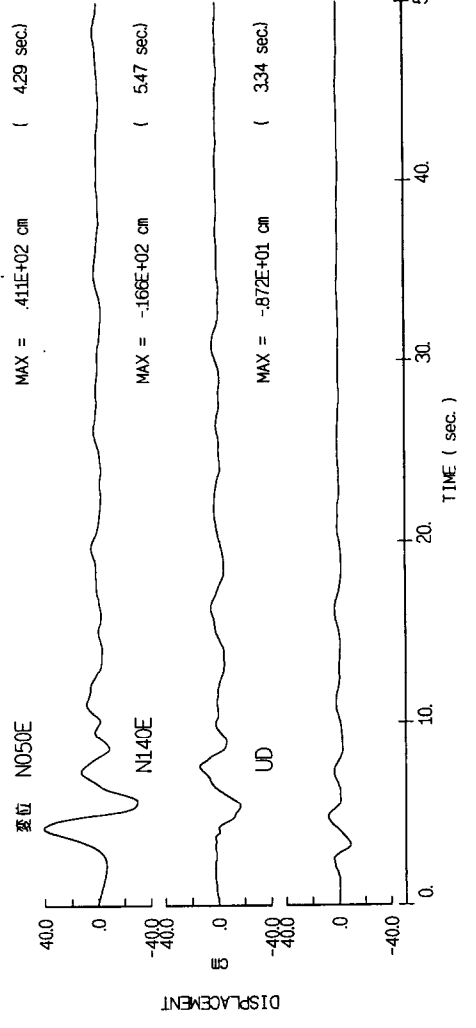
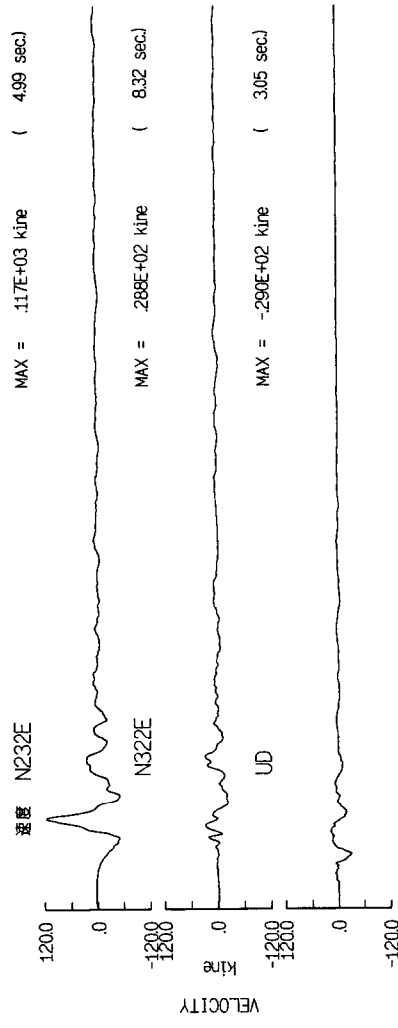
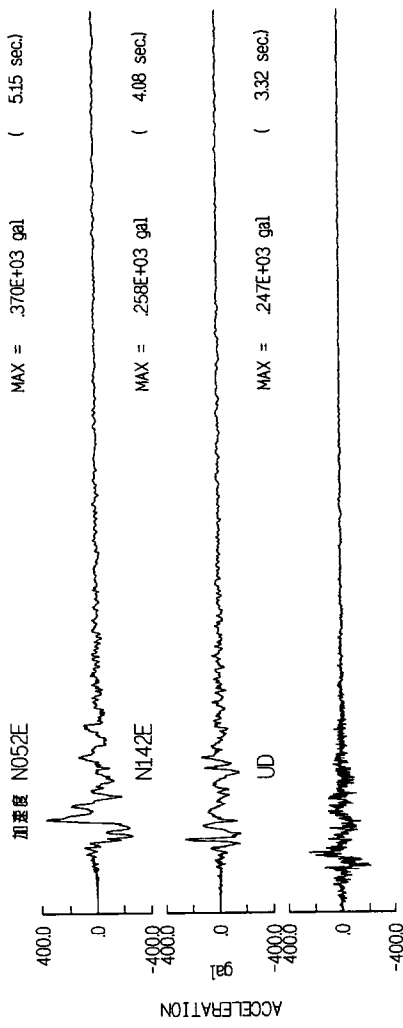
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 EDA



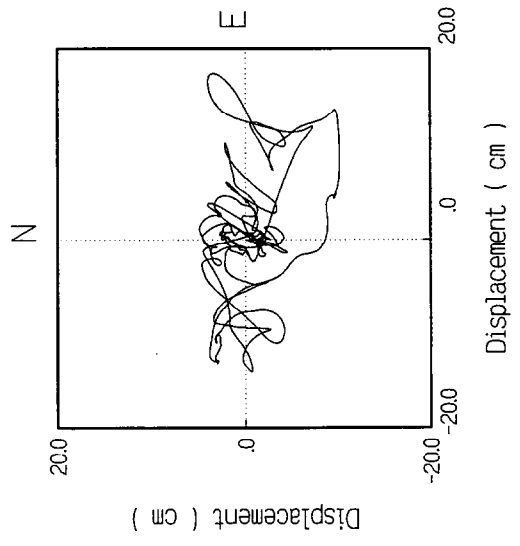
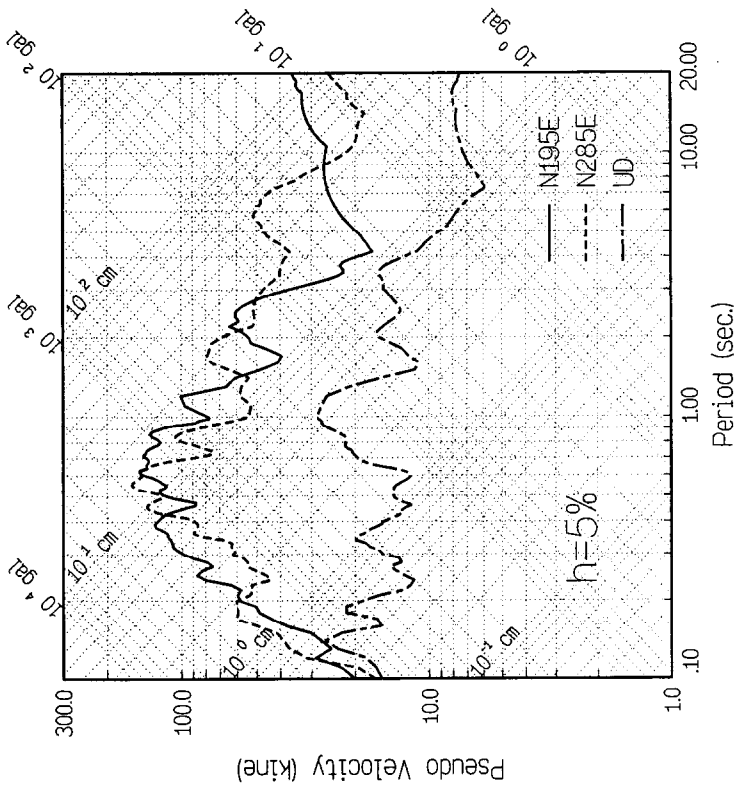
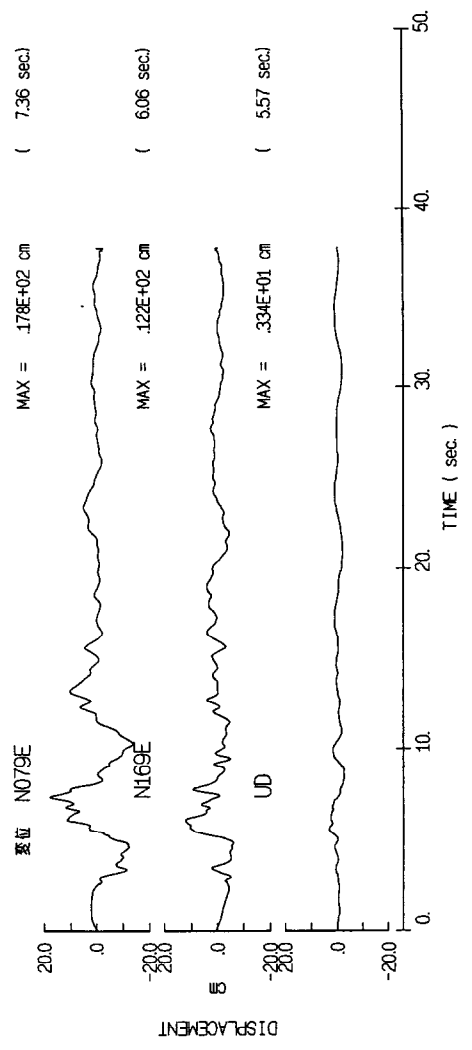
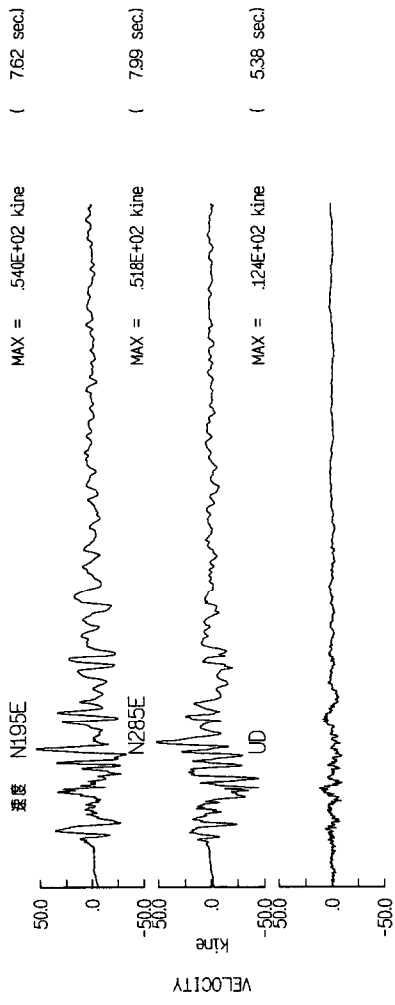
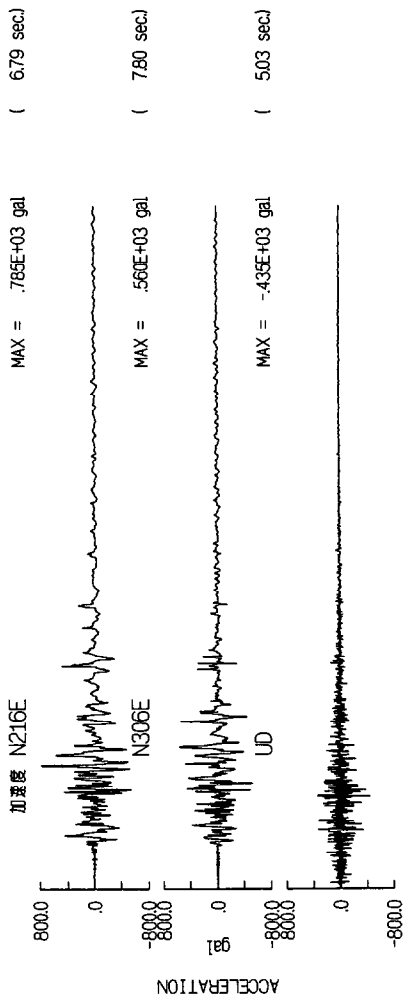
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 HOL



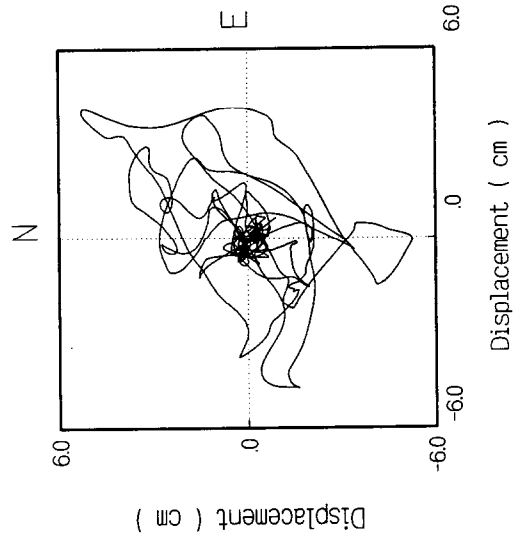
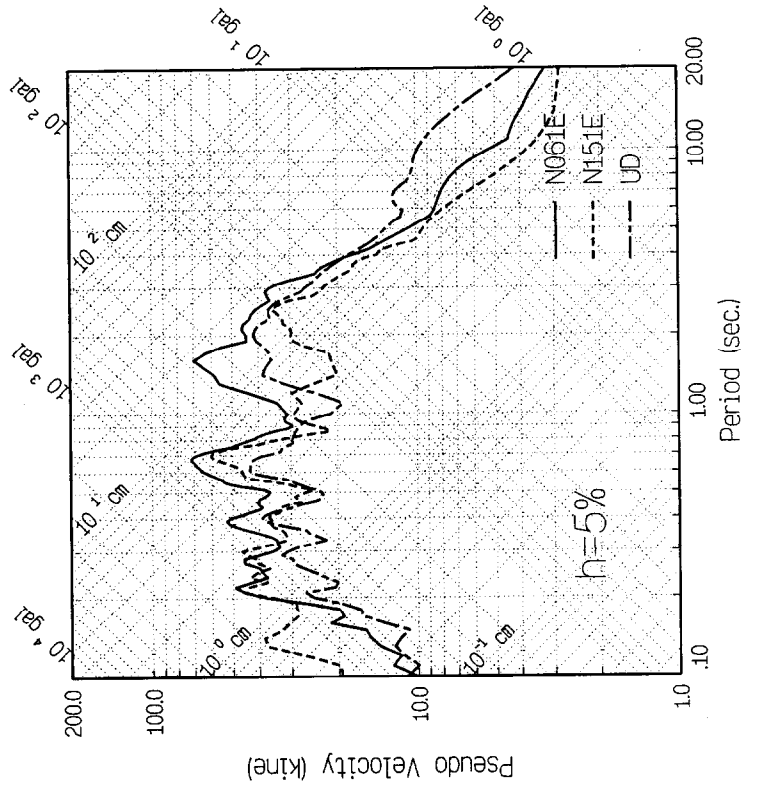
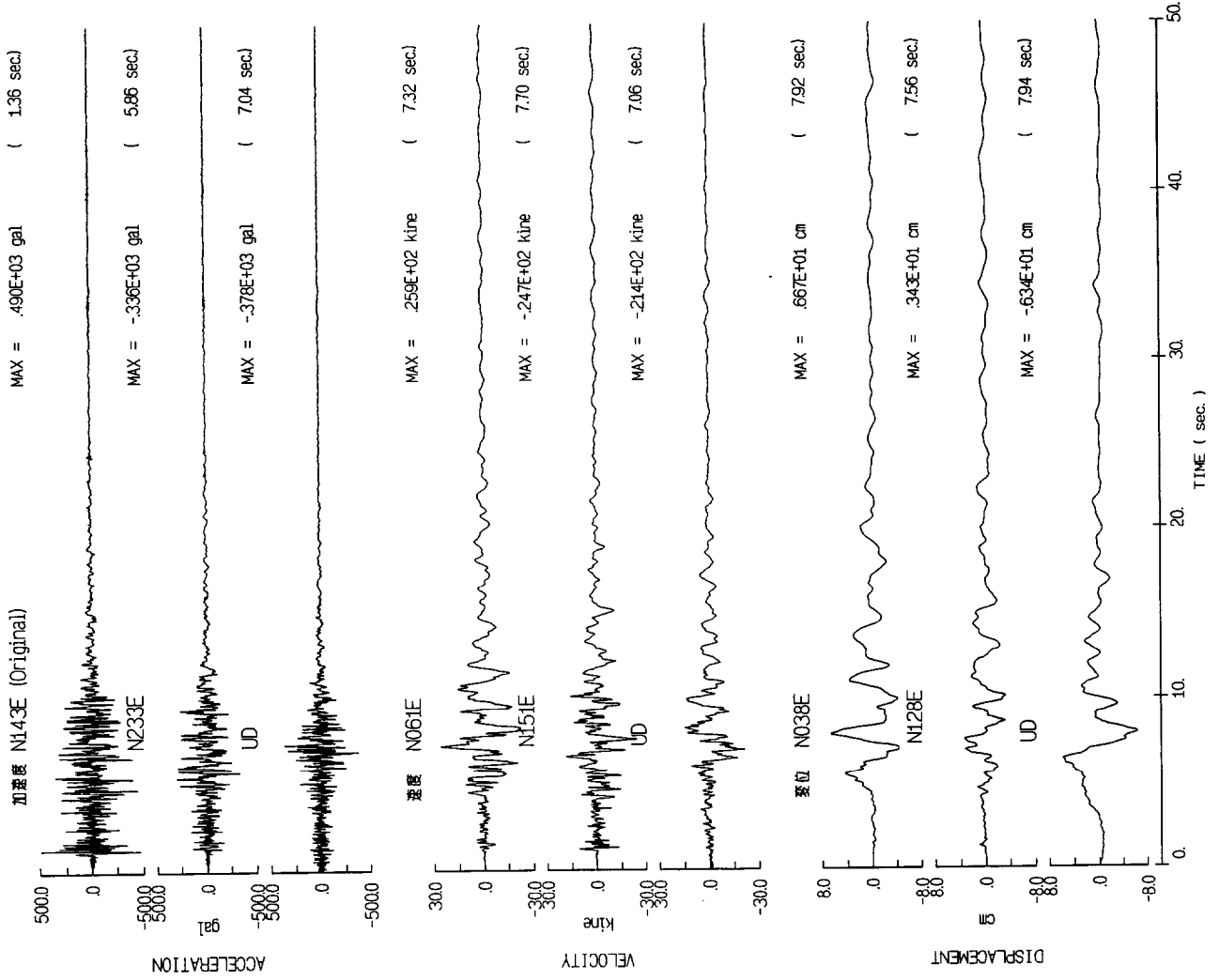
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 MEL



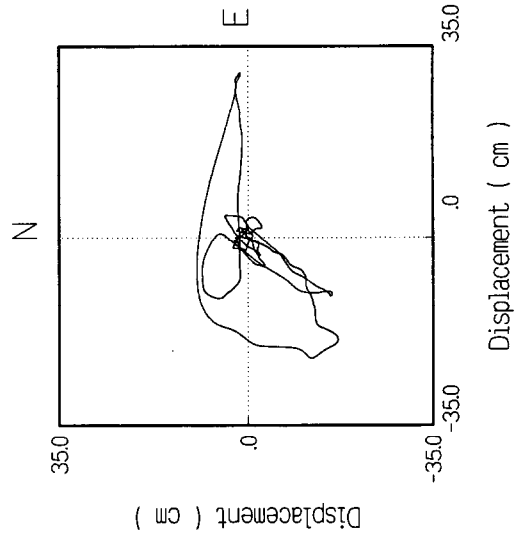
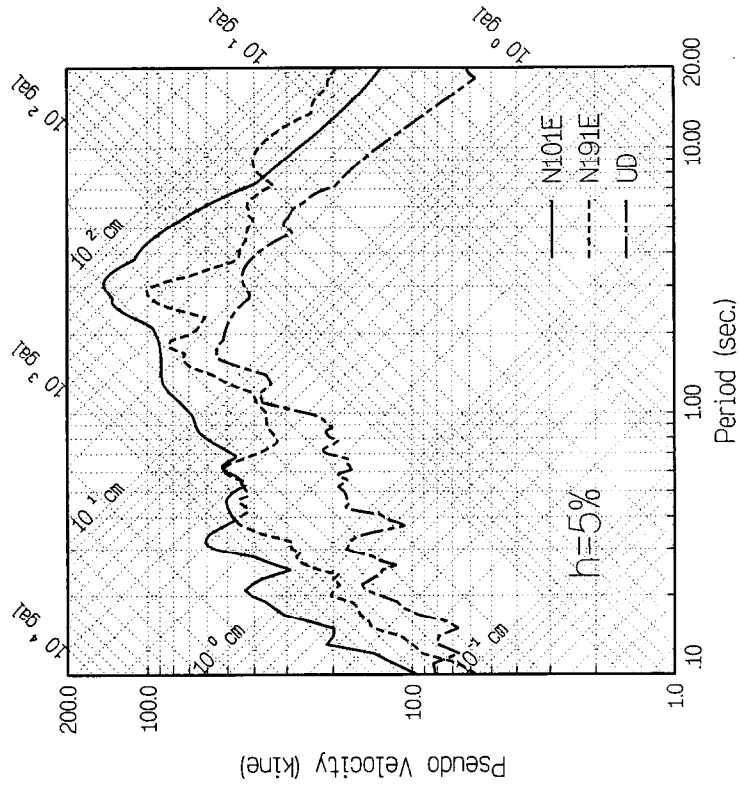
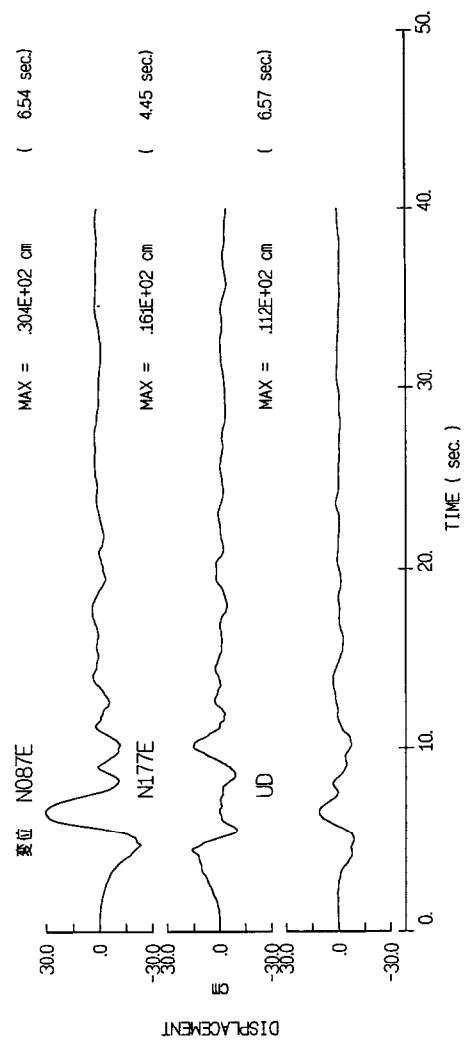
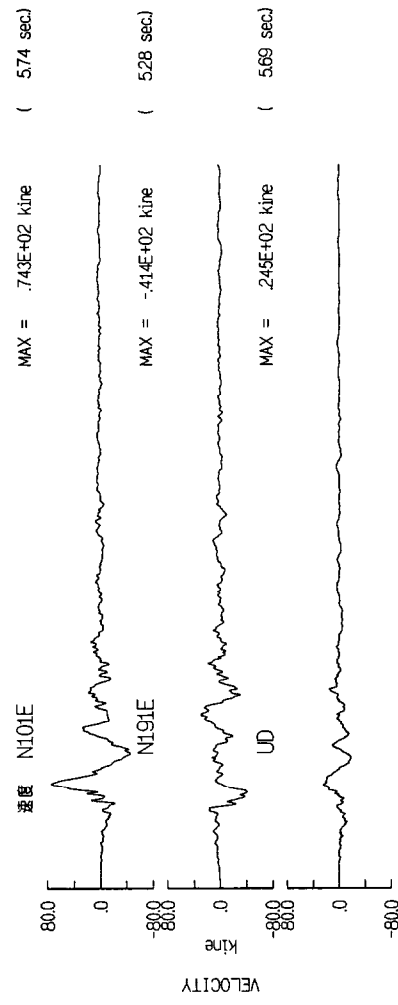
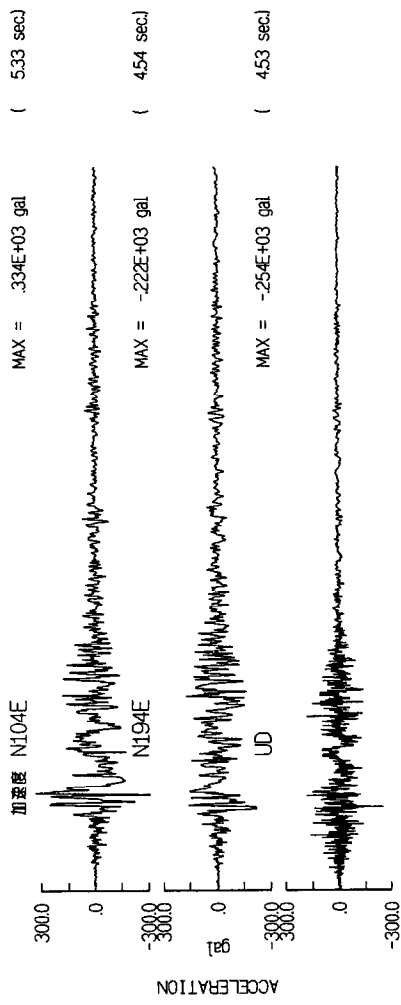
1979/10/15 Imperial Valley Mw=6.5 BCR



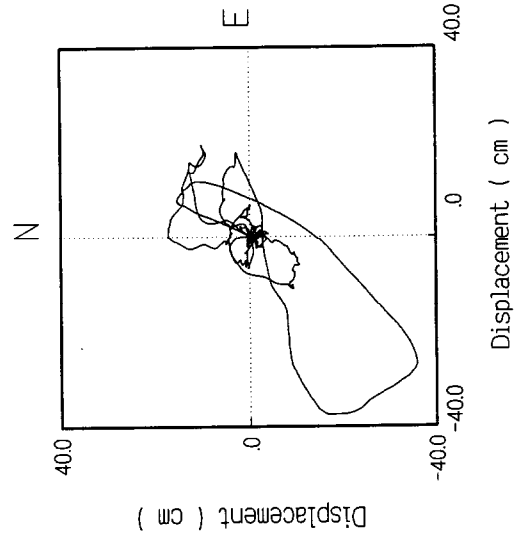
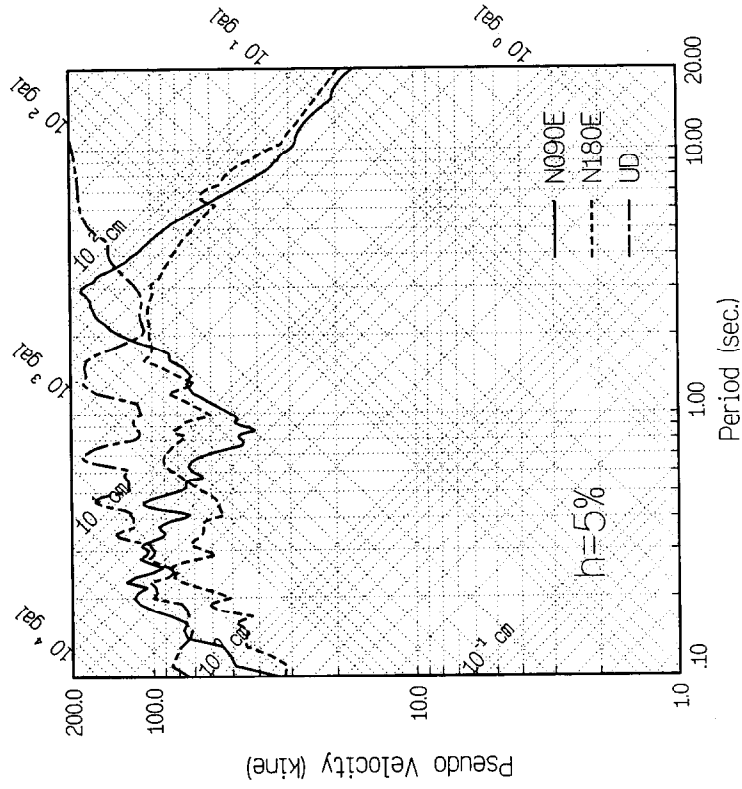
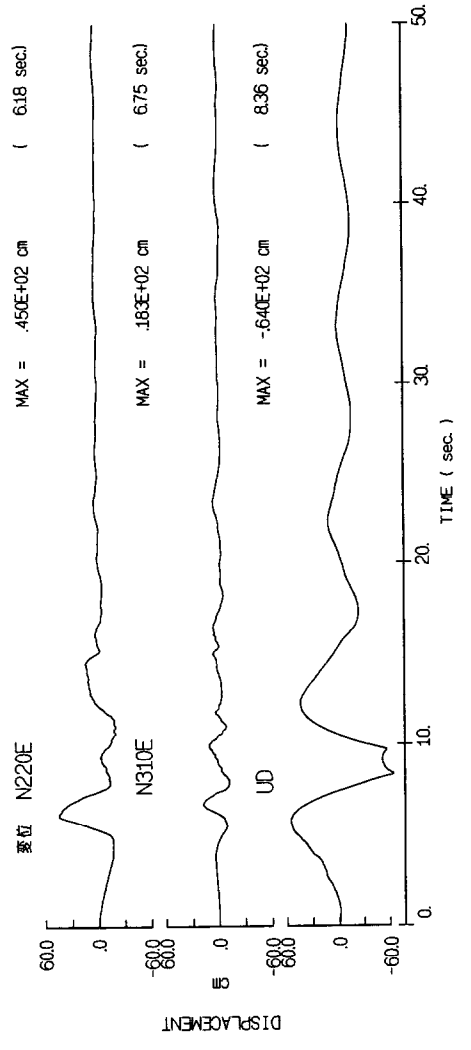
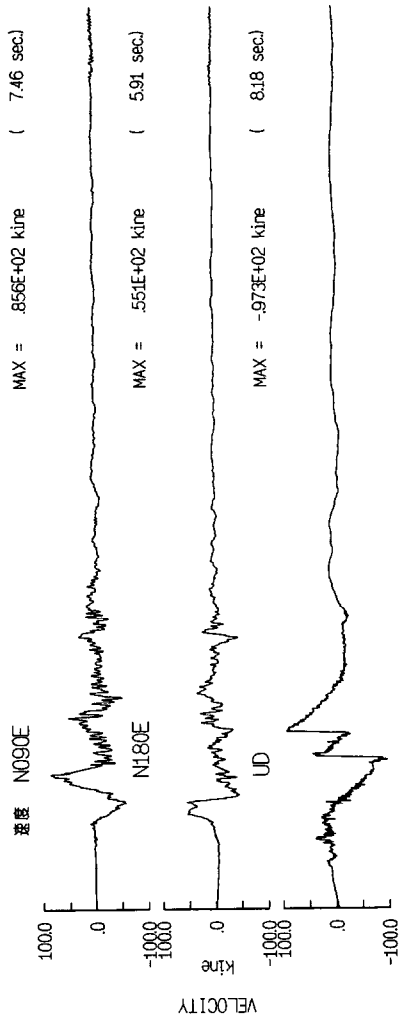
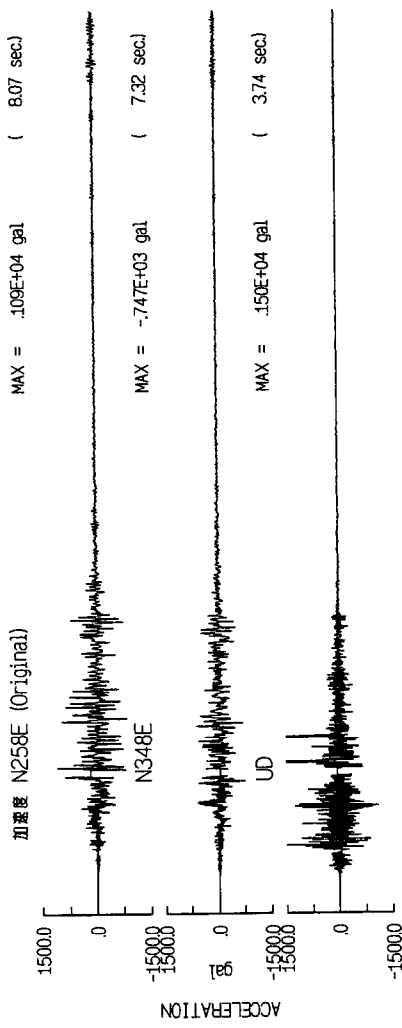
1980/05/25 Mammoth Lakes Mw=6.2 CC



1980/11/23 CampanoLuciano Mw=6.7 STR

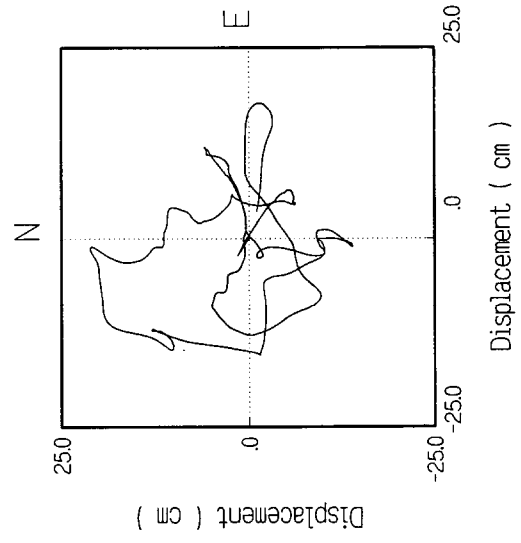
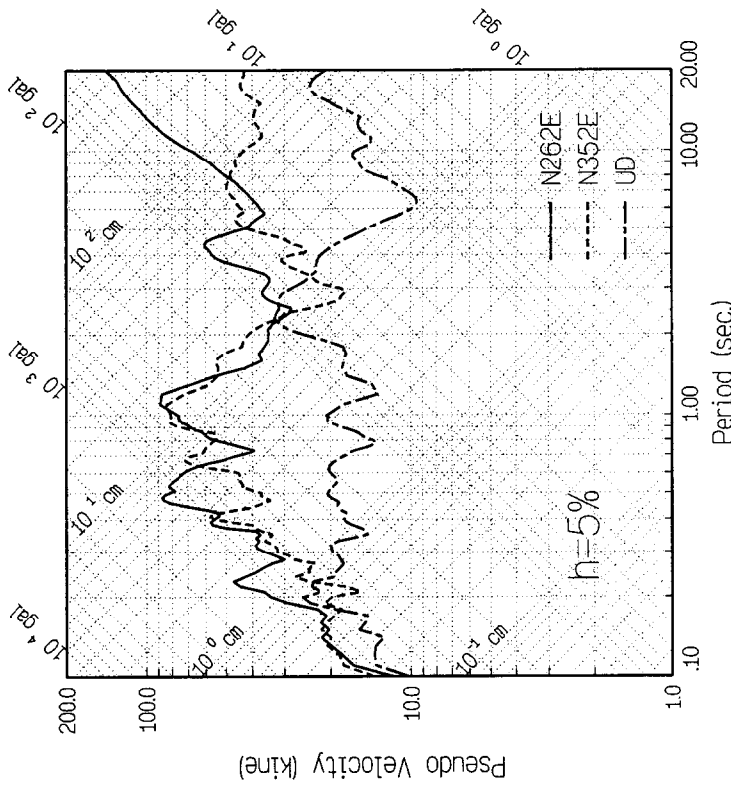
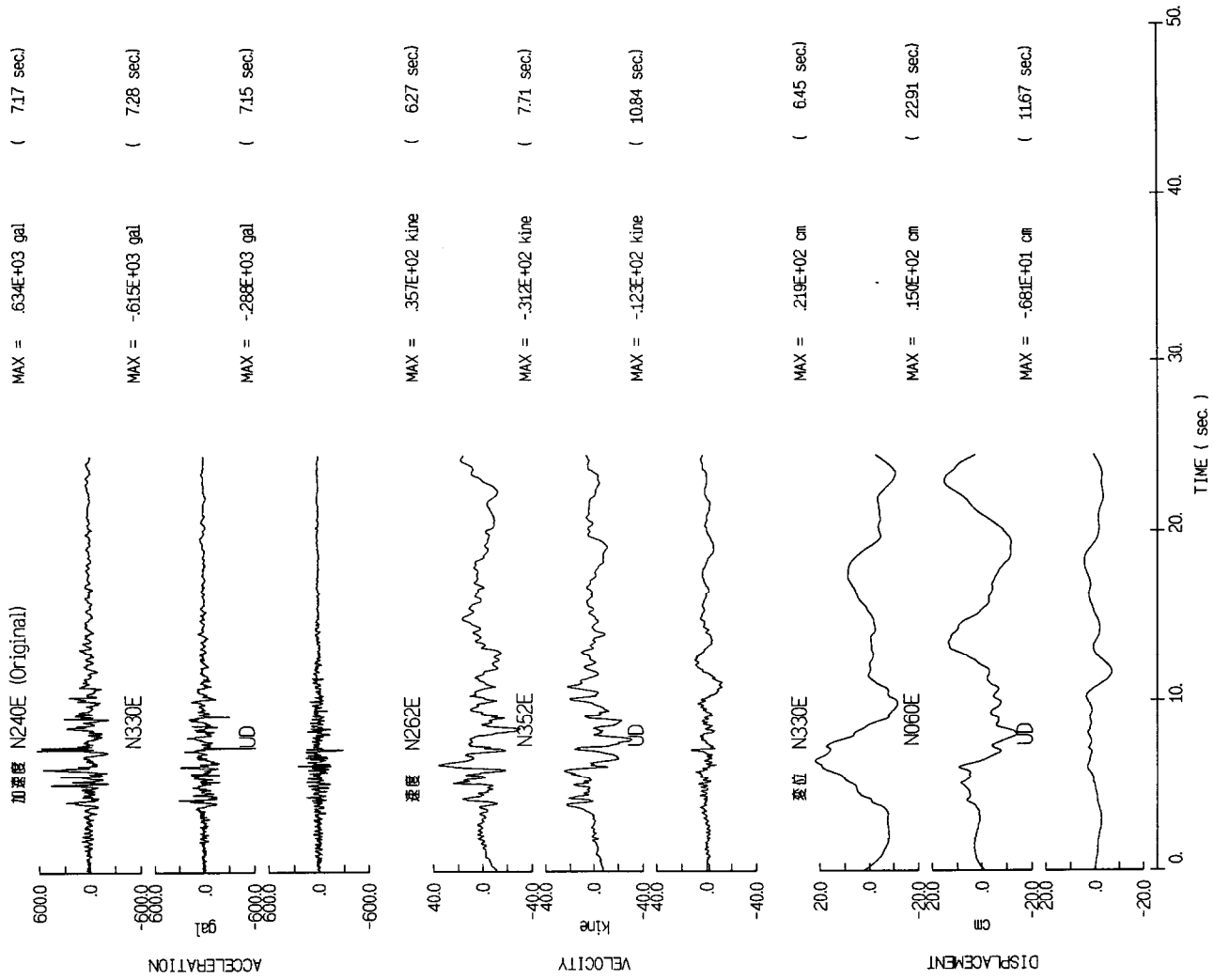


1980/06/09 Mexicali Valley Mw=6.4 VIC



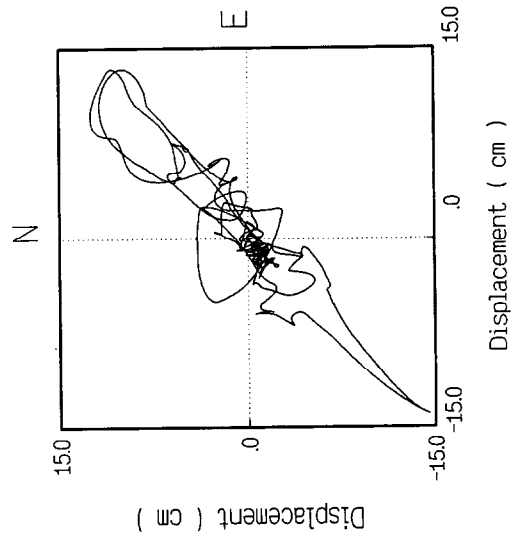
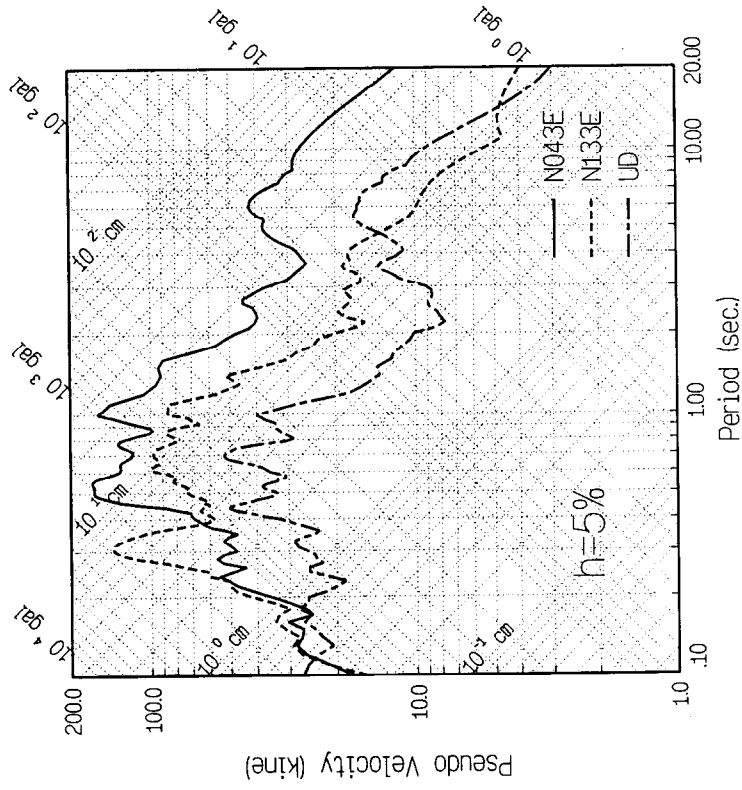
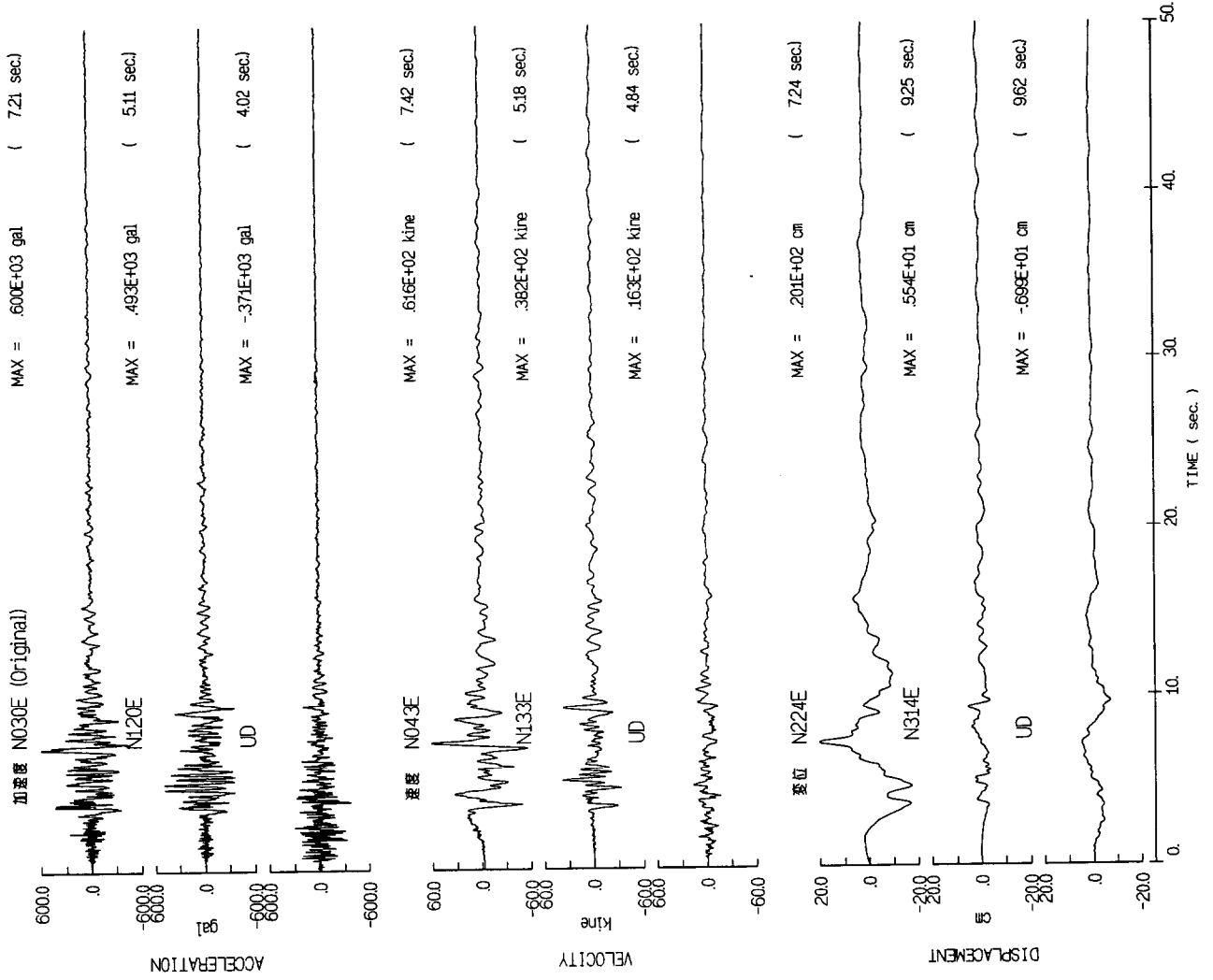
1980/06/09 Mexicali Valley

Mw=6.4 CPR



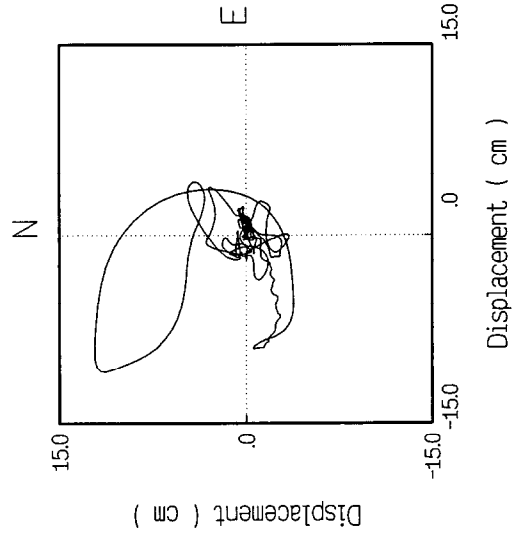
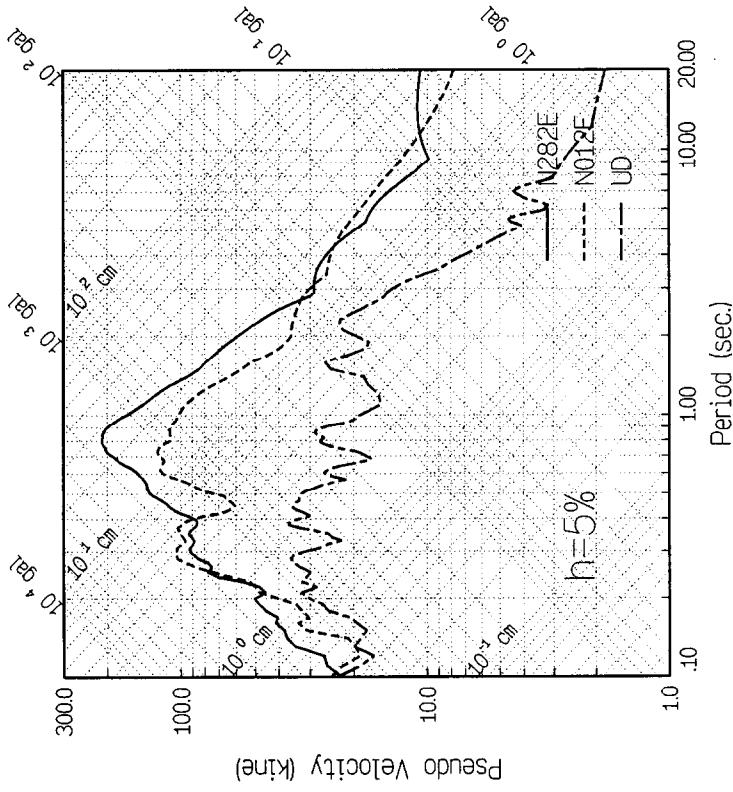
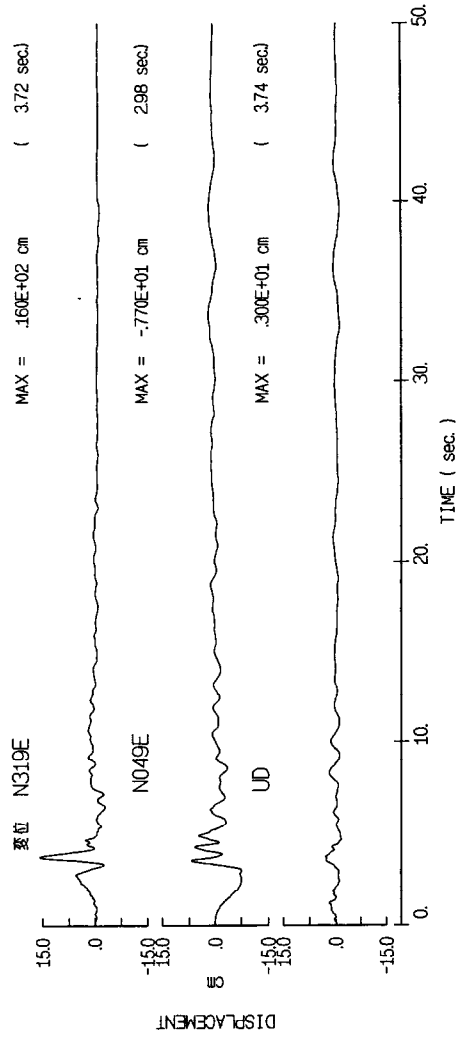
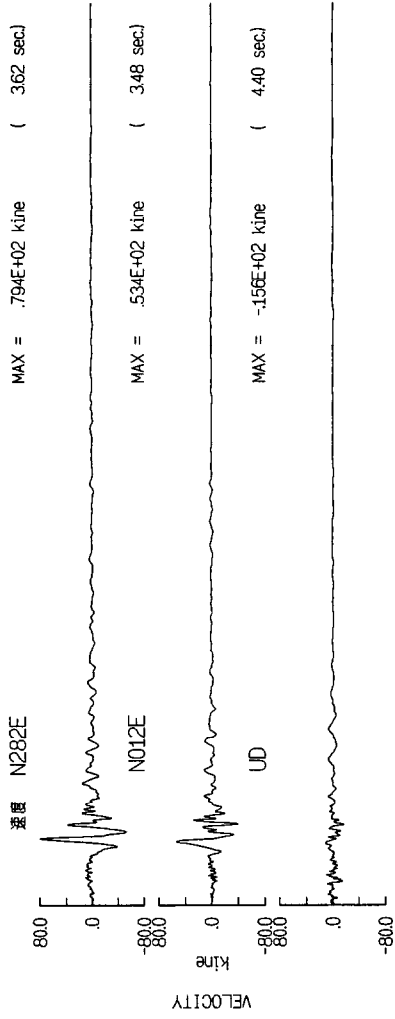
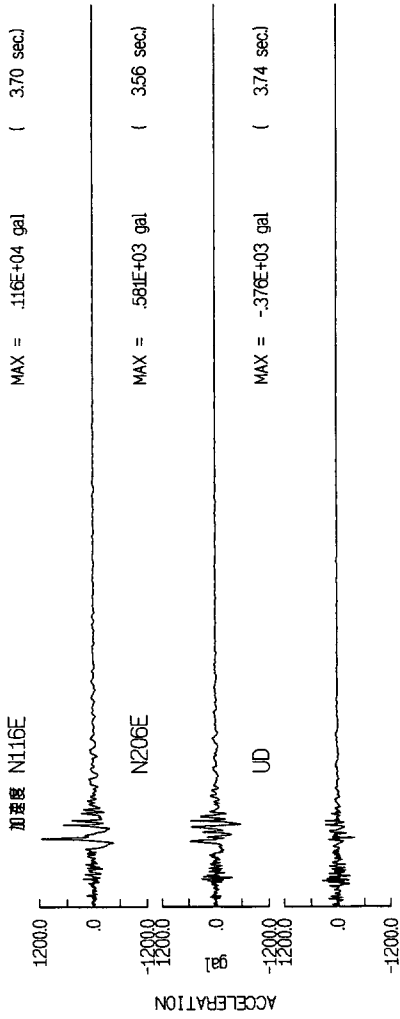
1983/05/02 Coalinga

Mw=6.3 PVS



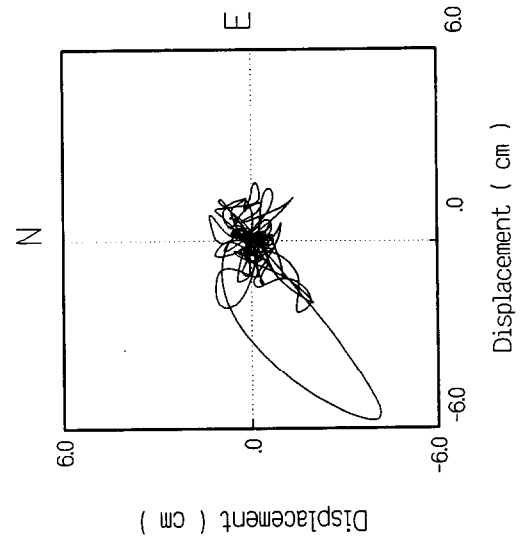
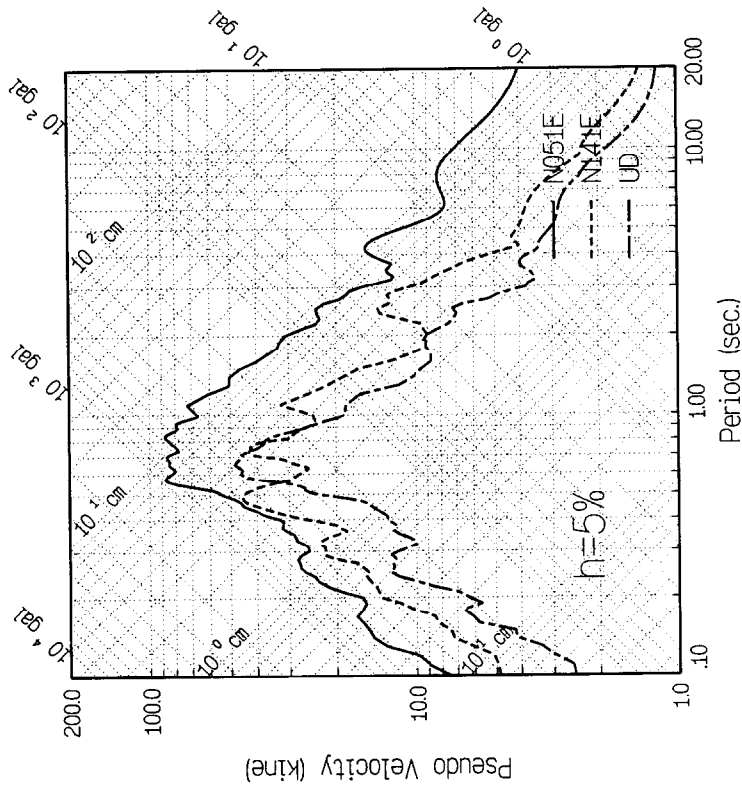
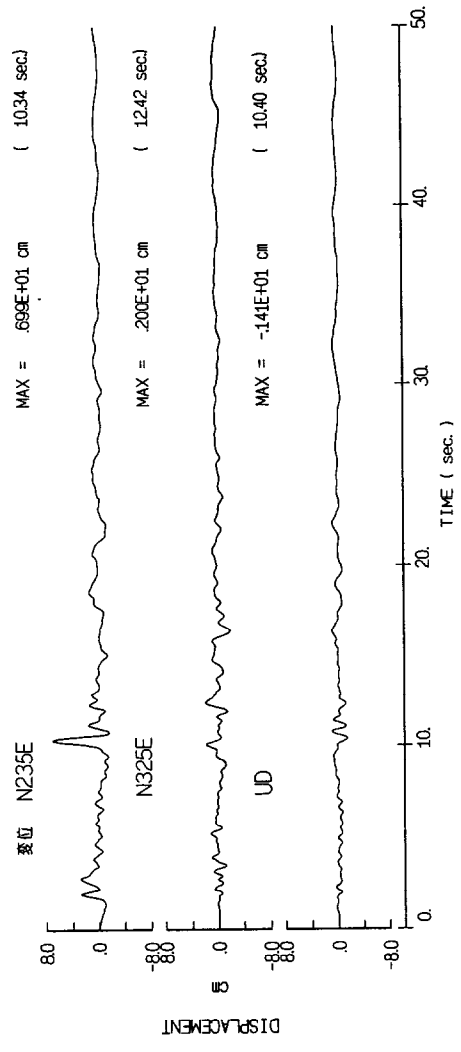
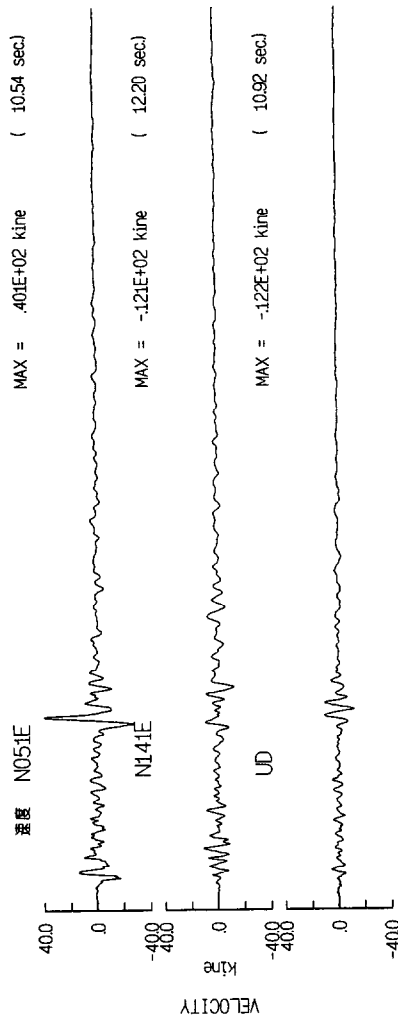
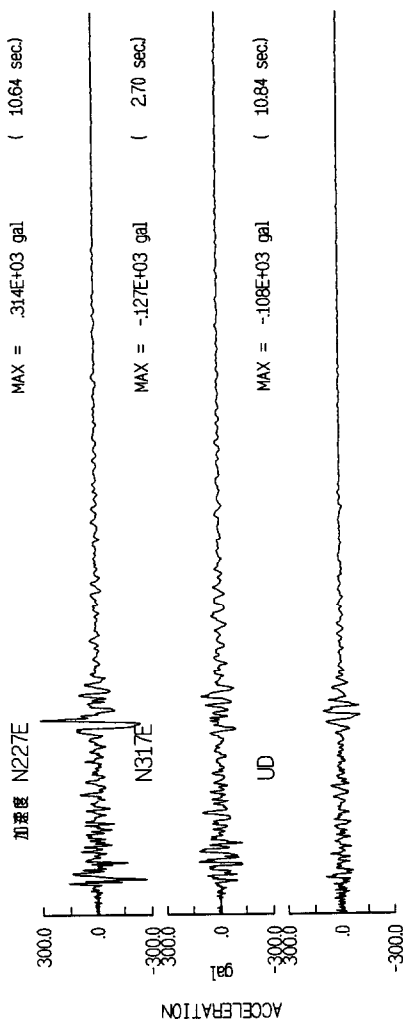
1984/04/24 Morgan Hill

Mw=6.2 CLA



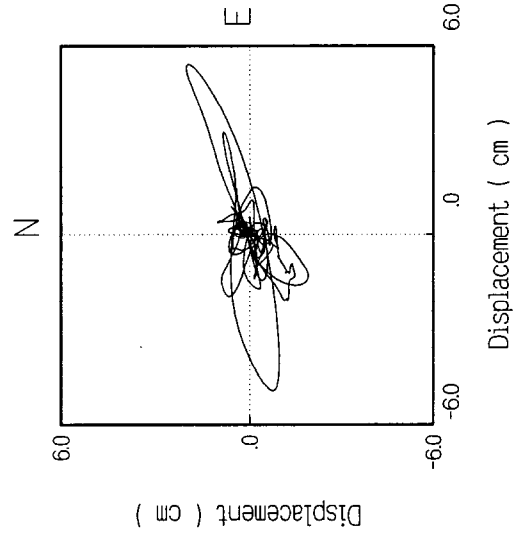
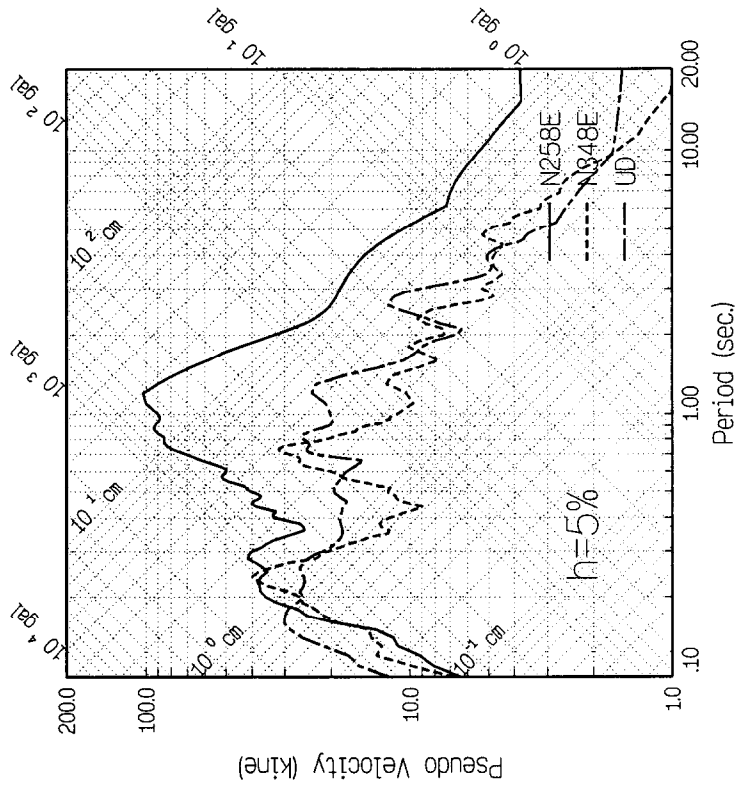
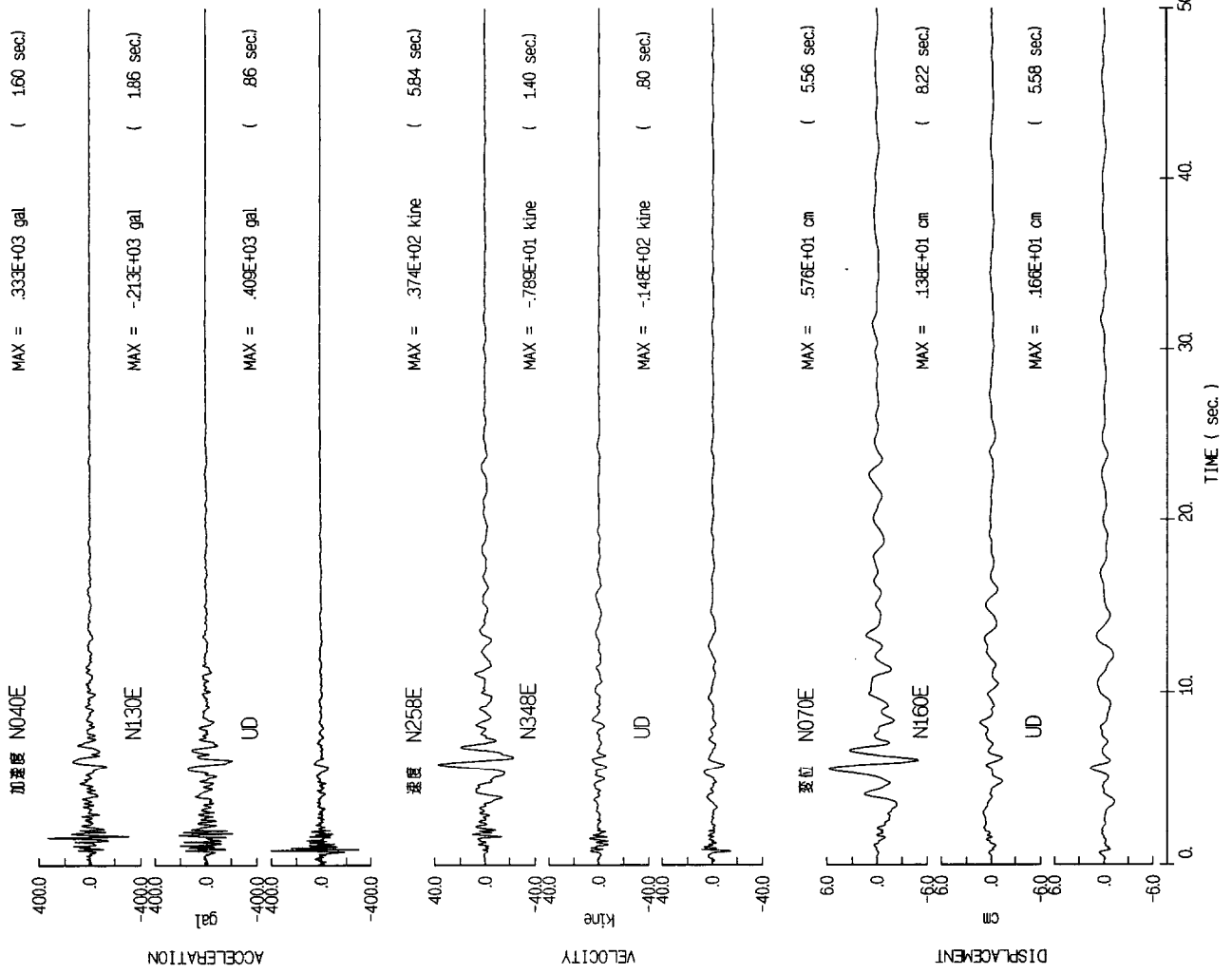
1984/04/24 Morgan Hill

Mw=6.2 HAV



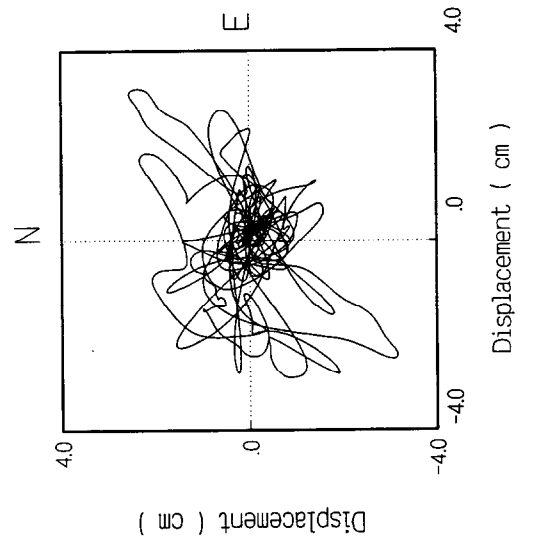
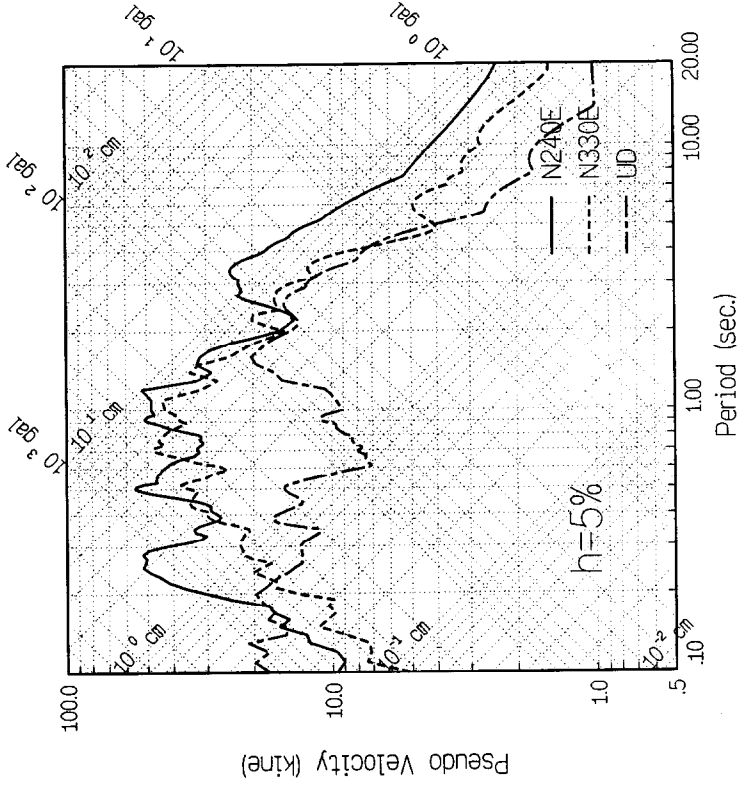
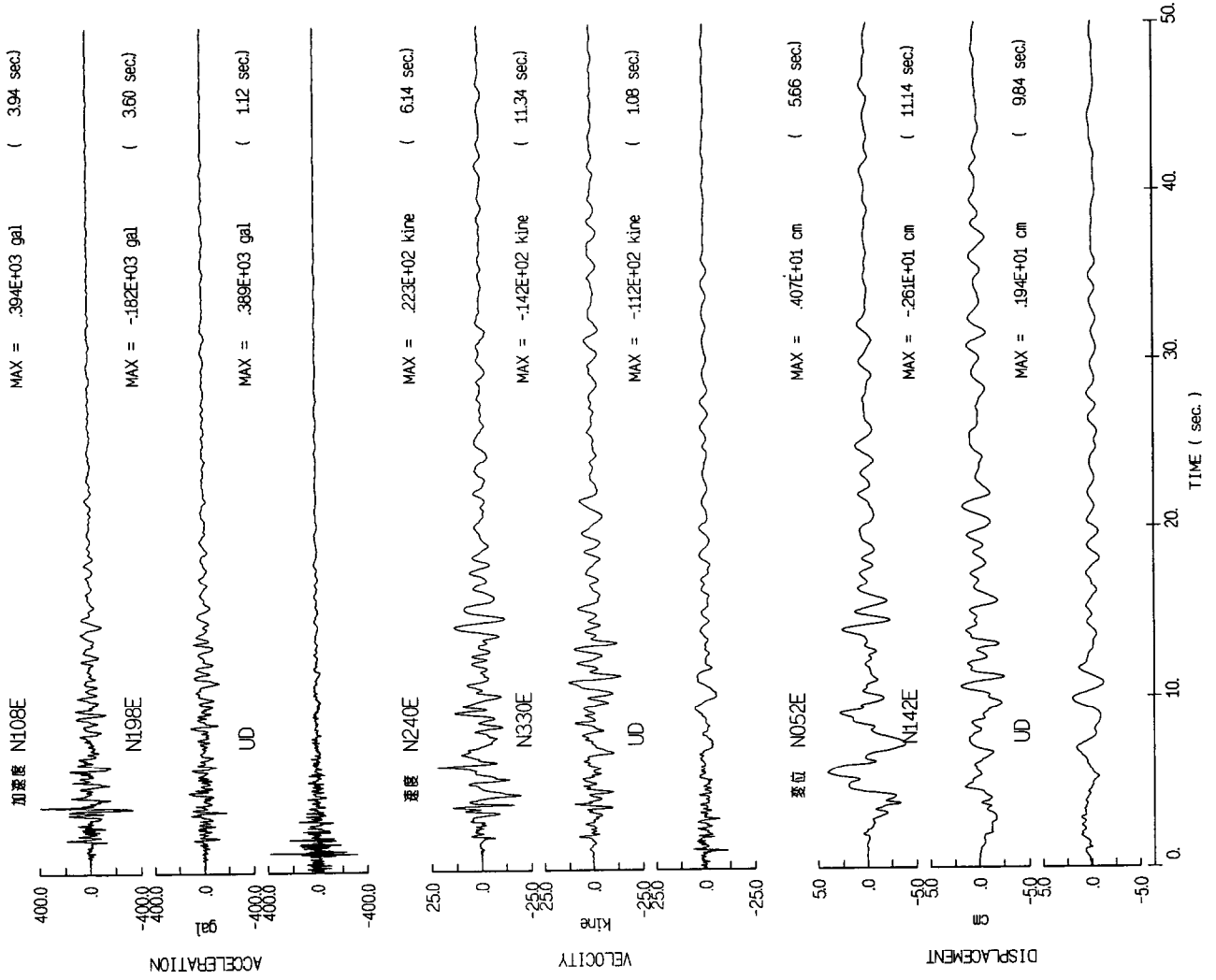
1984/04/24 Morgan Hill

Mw=6.2 GL6

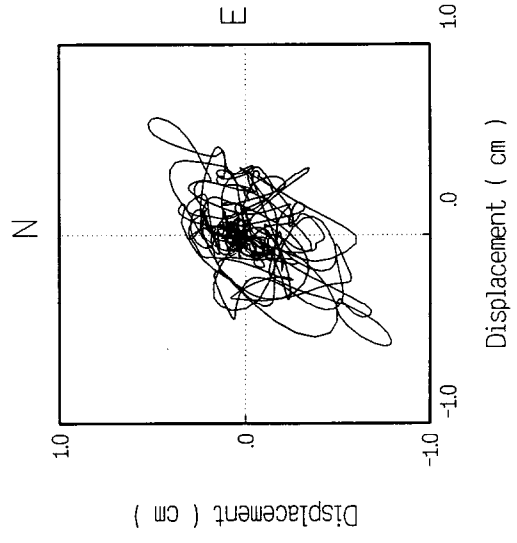
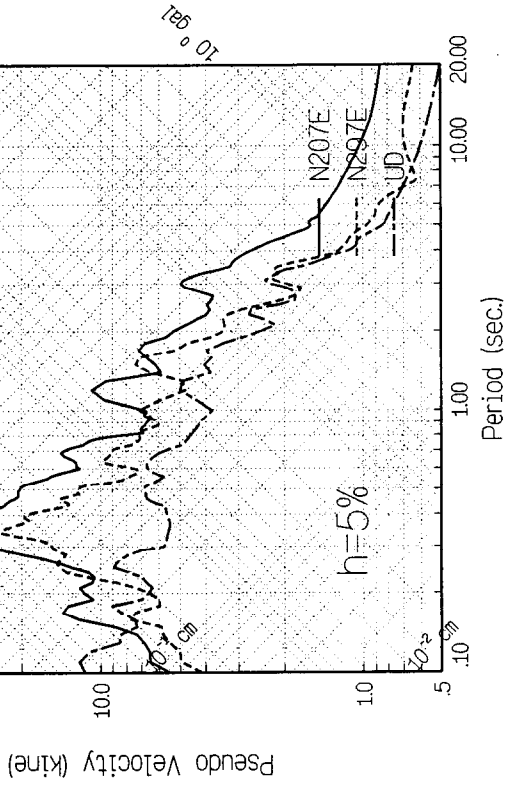
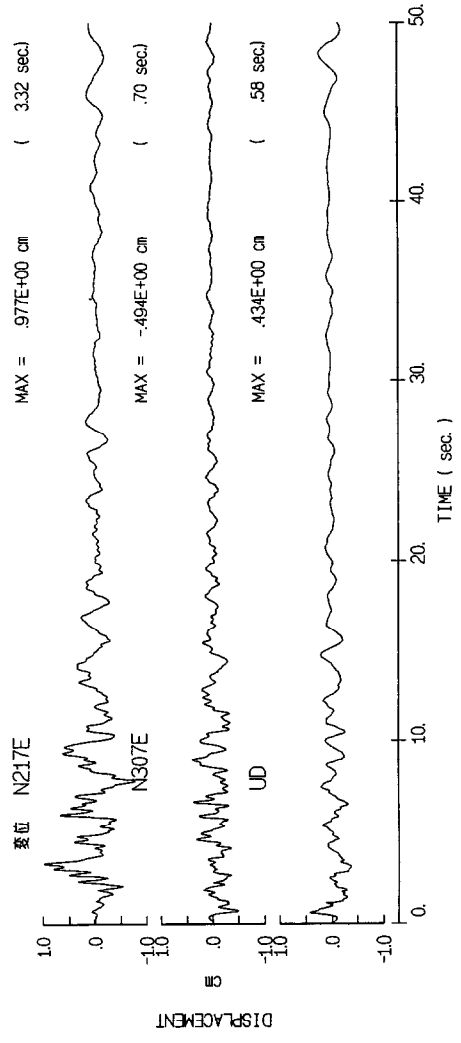
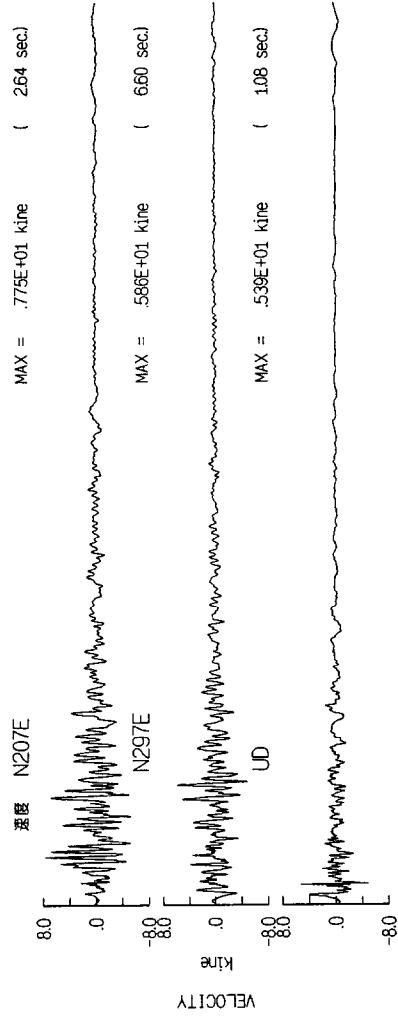
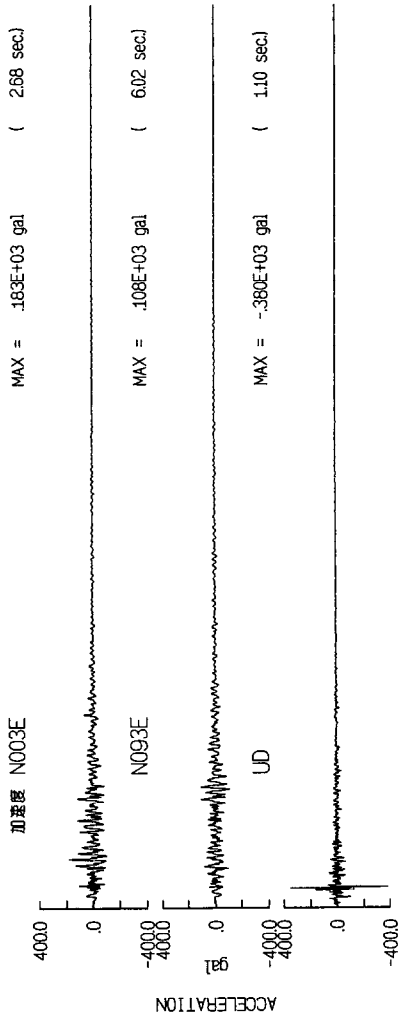


1984/04/24 Morgan Hill

Mw=6.2 GL4

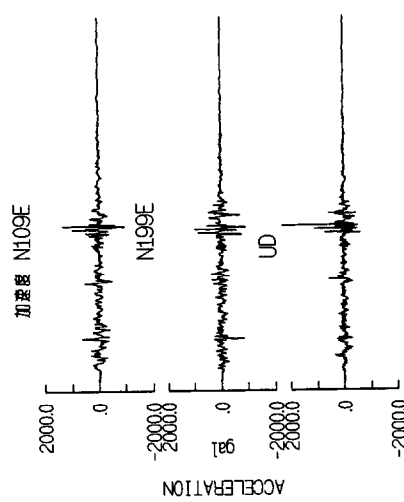


1984/04/24 Morgan Hill Mw=6.2 GL7

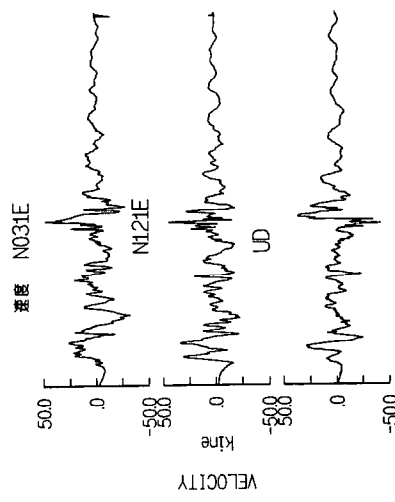


1985/12/23 Nahanni

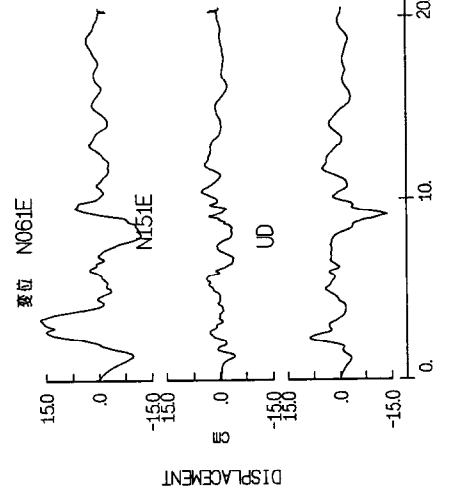
Mw=6.7 S01



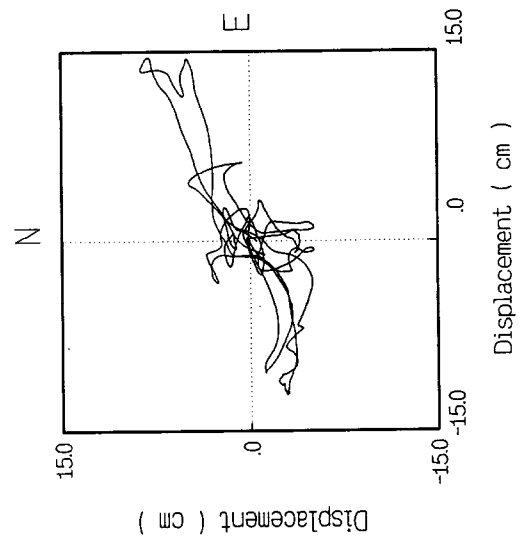
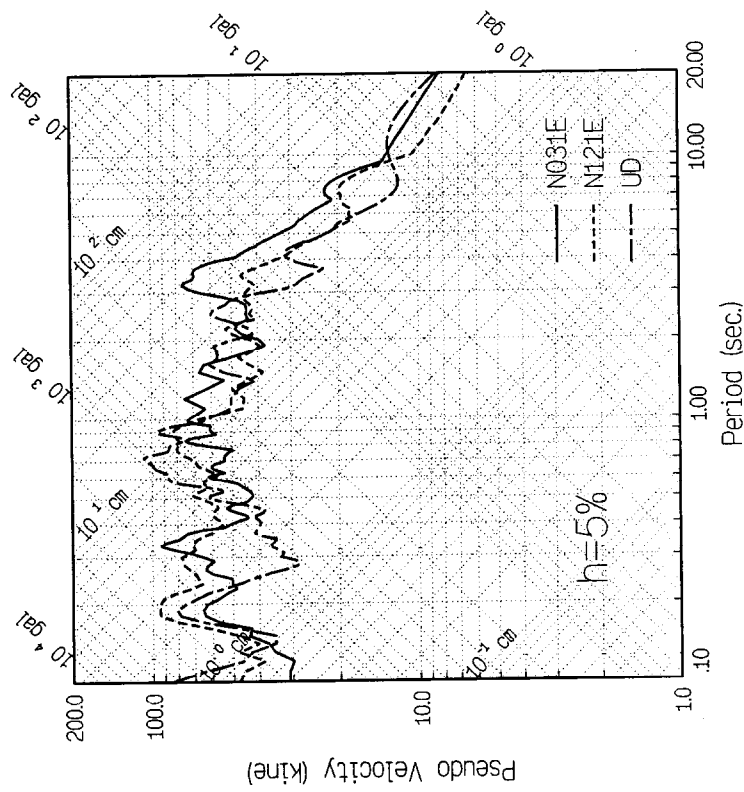
MAX = .134E+04 gal (9.15 sec)
 MAX = .979E+03 gal (8.94 sec)
 MAX = .232E+04 gal (9.13 sec)



MAX = .477E+02 kine (9.10 sec)
 MAX = .443E+02 kine (9.03 sec)
 MAX = -.424E+02 kine (8.92 sec)

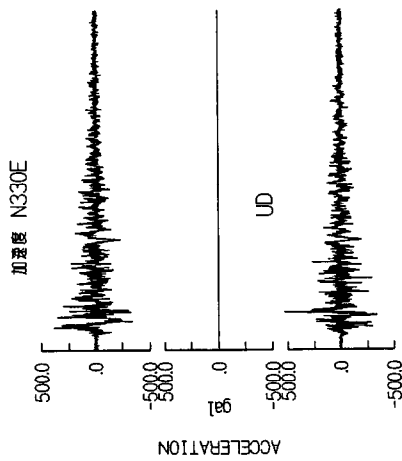


MAX = .167E+02 cm (3.39 sec)
 MAX = .501E+01 cm (10.44 sec)
 MAX = -.139E+02 cm (9.13 sec)



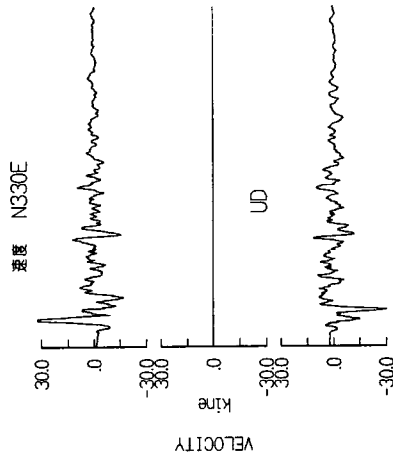
1985/12/23 Nahanni

Mw=6.7 S02



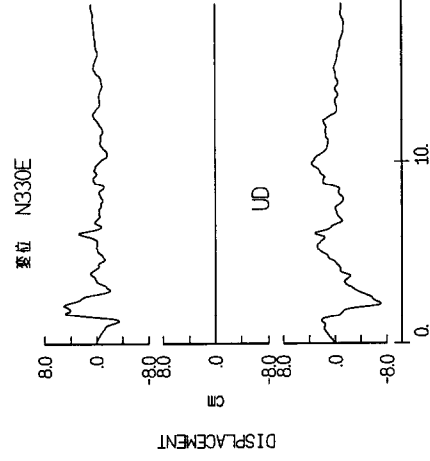
MAX = .366E+03 gal (1.24 sec)

MAX = .534E+03 gal (2.08 sec)



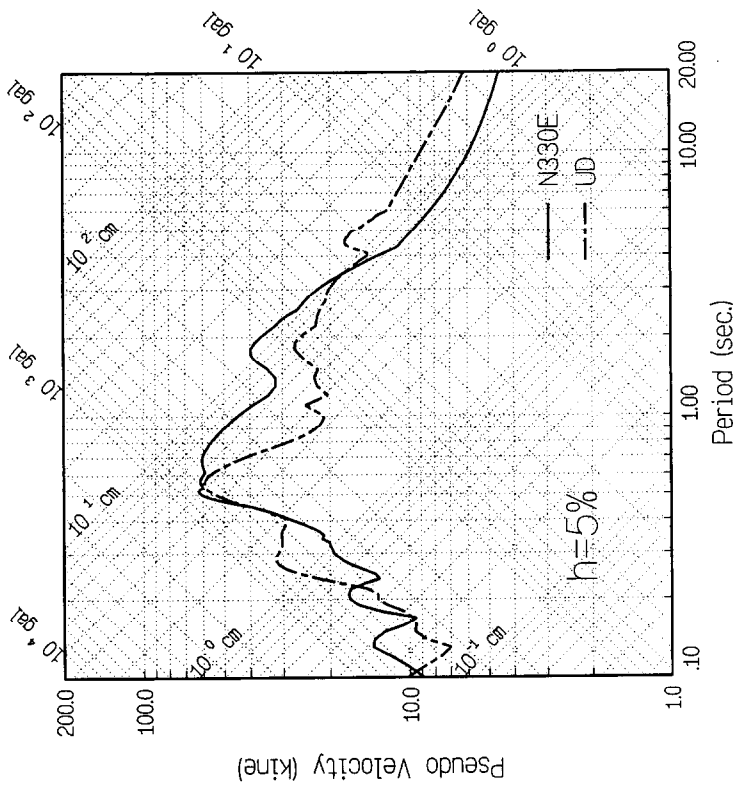
MAX = .327E+02 kine (1.43 sec)

MAX = -.302E+02 kine (2.03 sec)



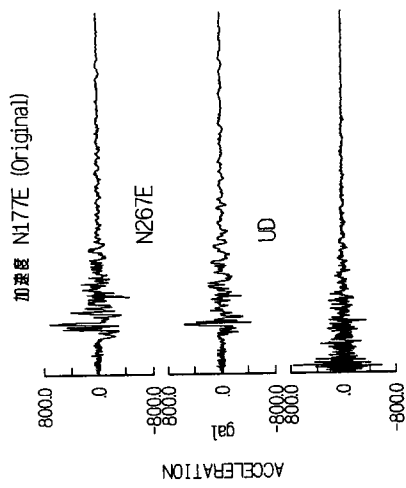
MAX = .510E+01 cm (2.10 sec)

MAX = -.707E+01 cm (2.19 sec)

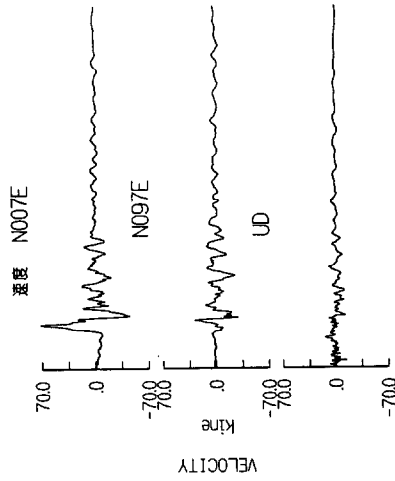


1986/07/08 North Palm

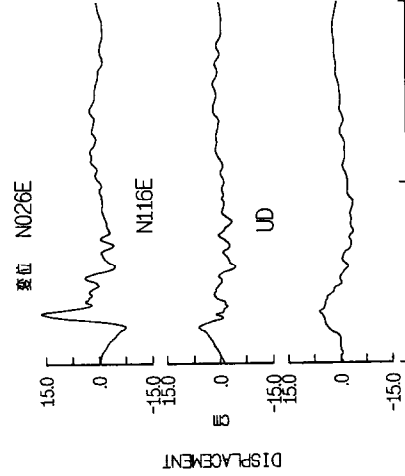
Mw=6 PSP



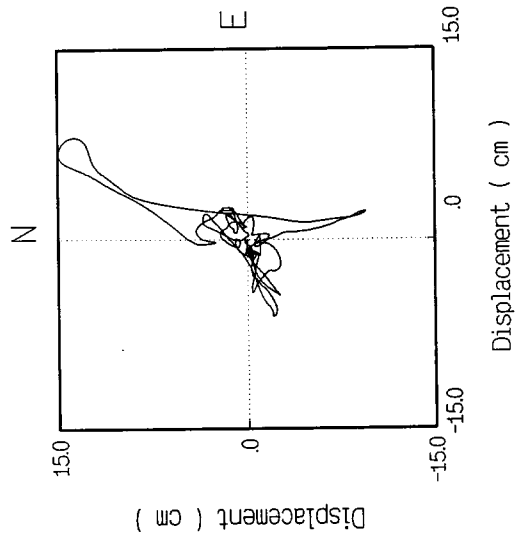
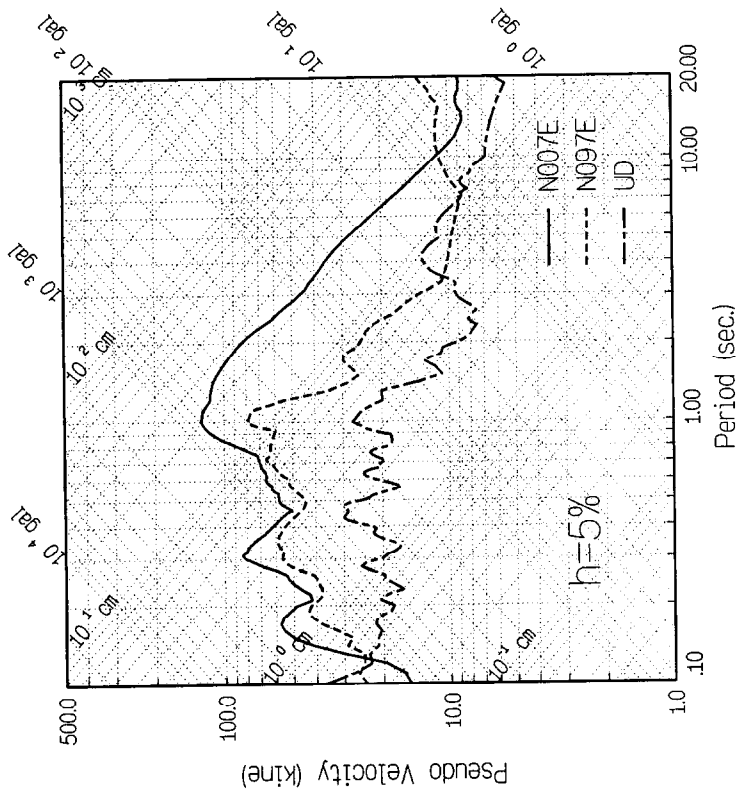
MAX = .718E+03 gal (2.83 sec)
 MAX = .558E+03 gal (2.78 sec)
 MAX = .769E+03 gal (.43 sec)



MAX = .726E+02 kine (2.45 sec)
 MAX = .287E+02 kine (2.67 sec)
 MAX = .140E+02 kine (1.67 sec)



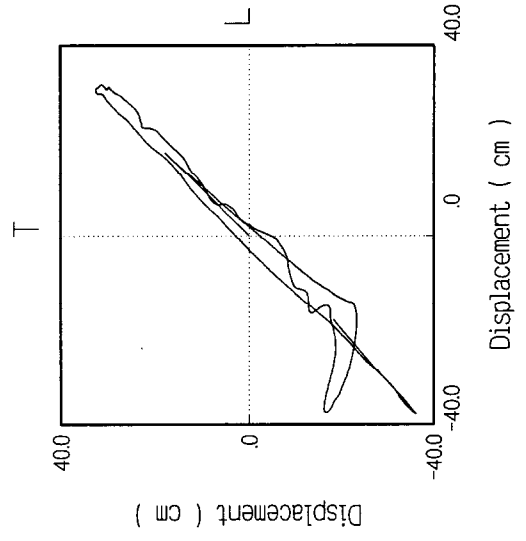
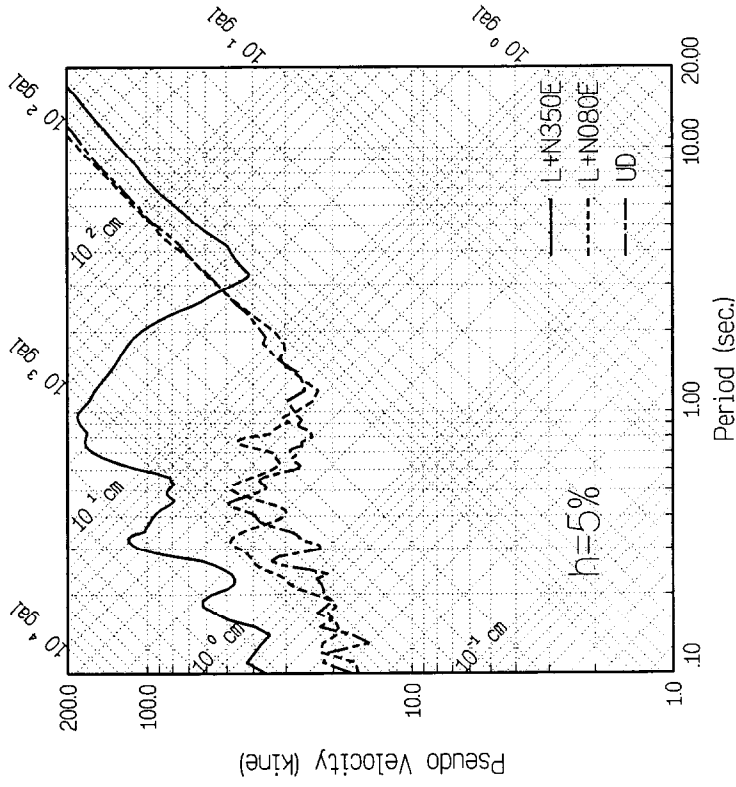
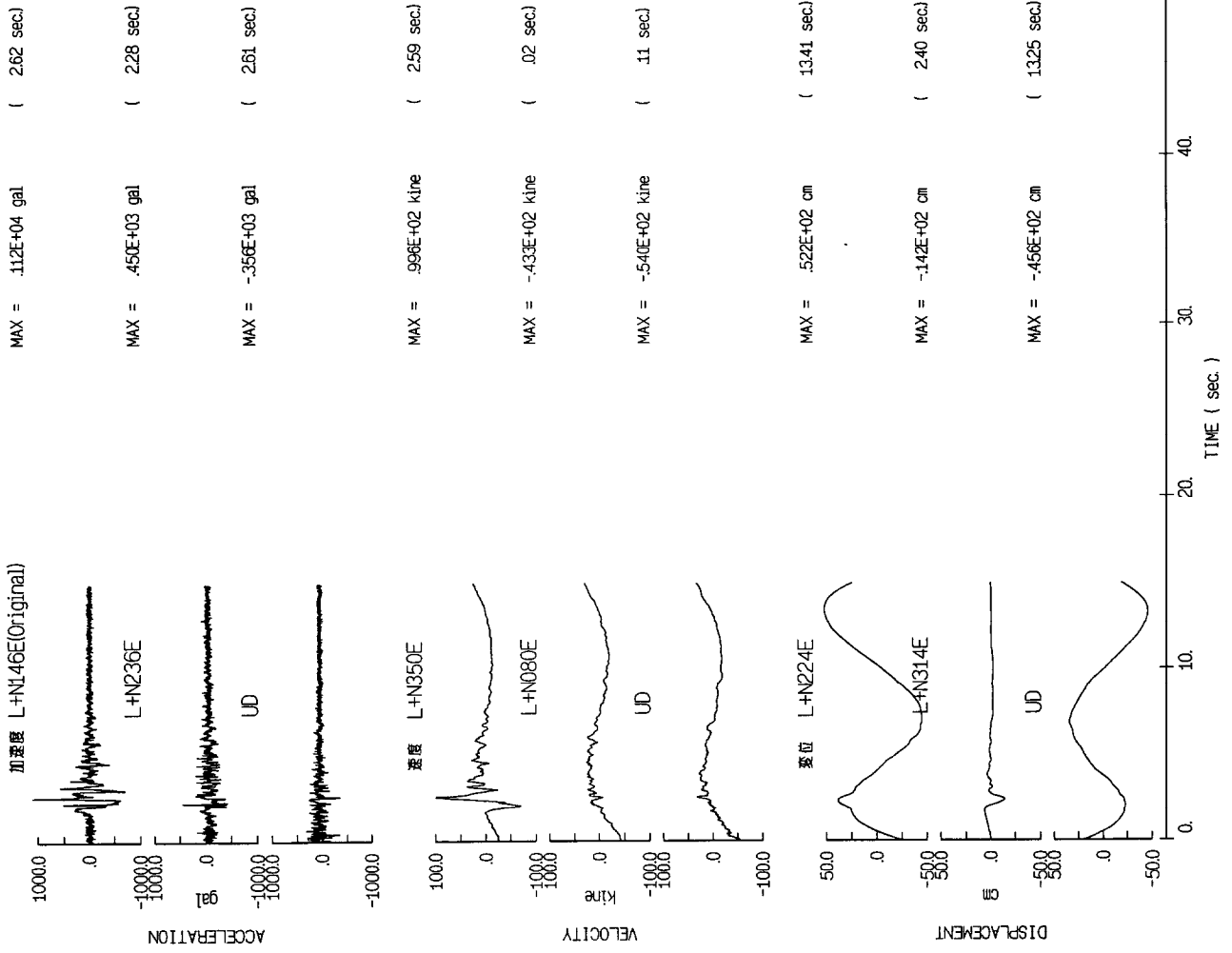
MAX = .165E+02 cm (2.81 sec)
 MAX = .617E+01 cm (2.05 sec)
 MAX = .601E+01 cm (2.87 sec)



1986/07/08 North Palm

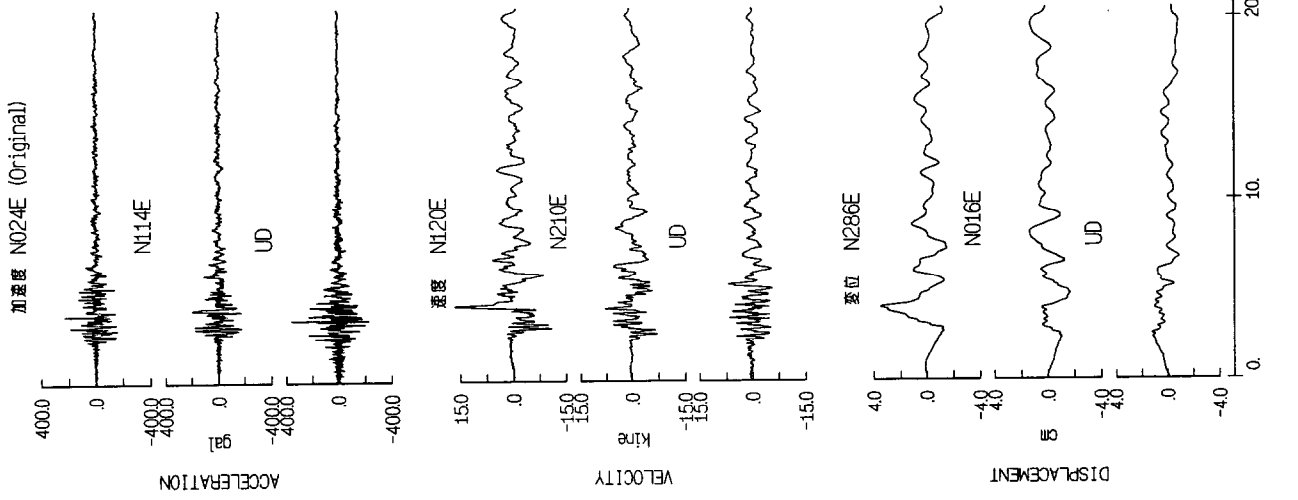
Mw=6

DSS

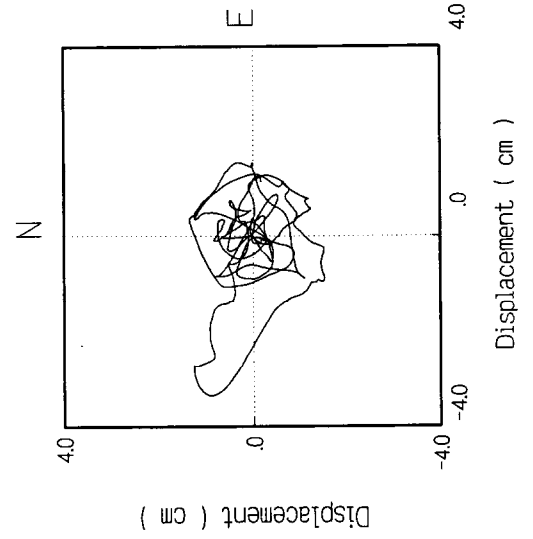
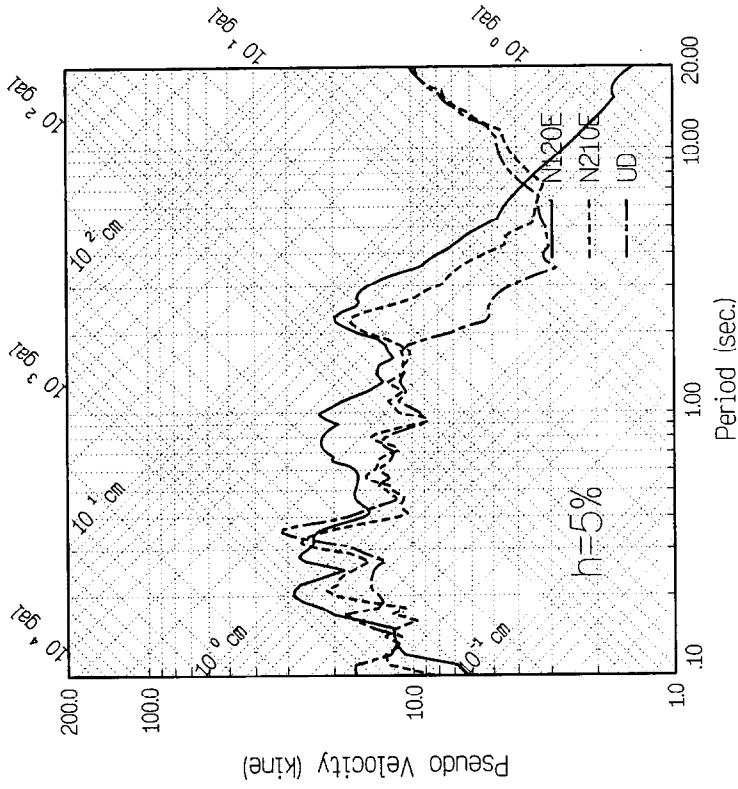


1986/07/08 North Palm

Mw=6 CAB

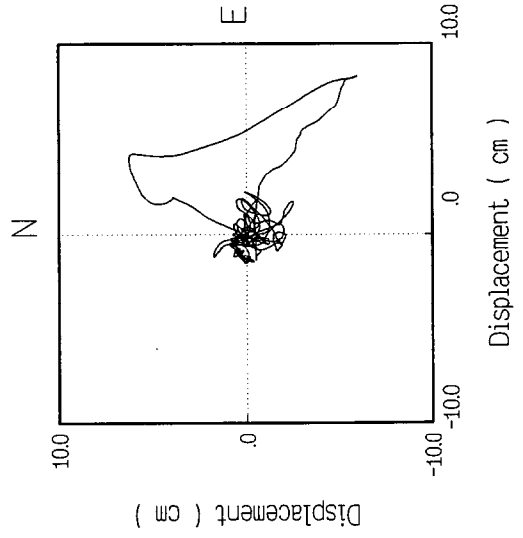
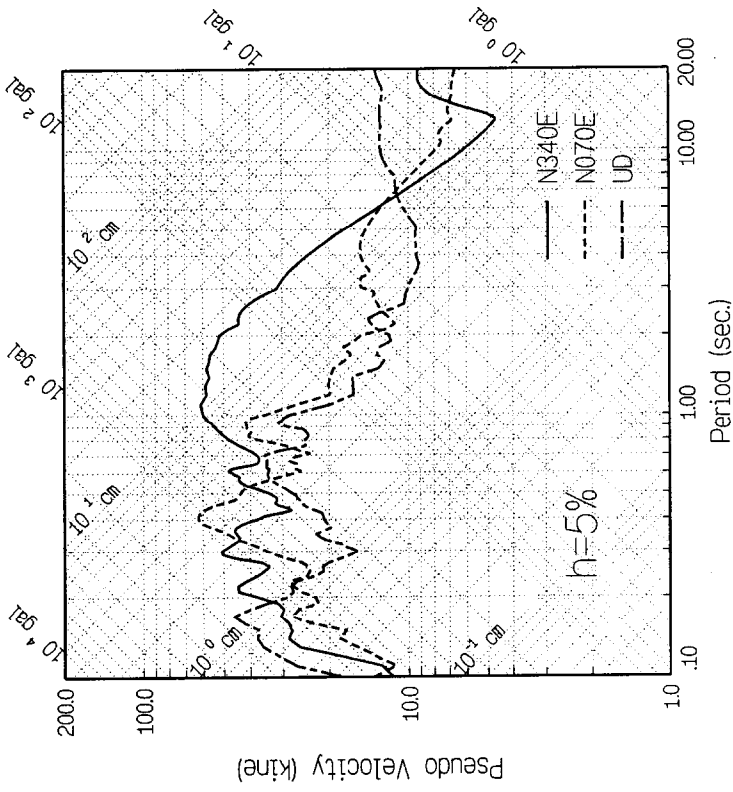
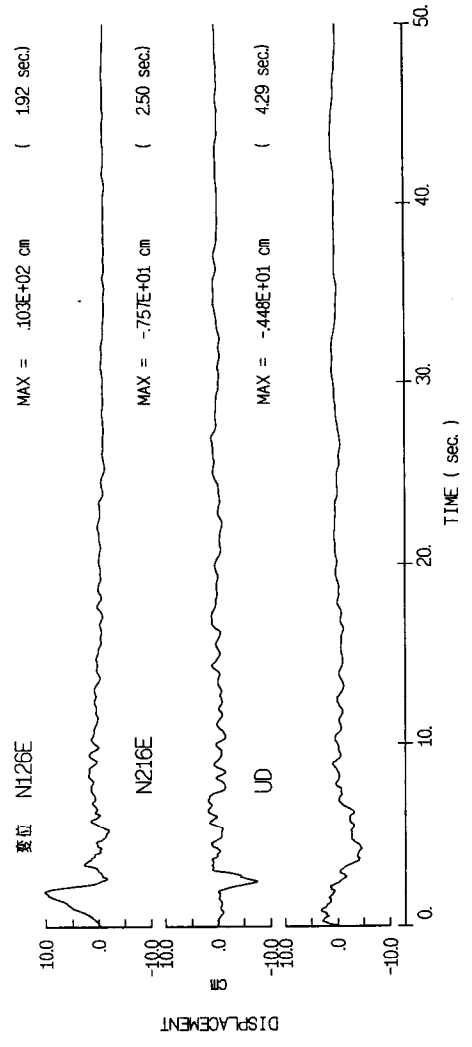
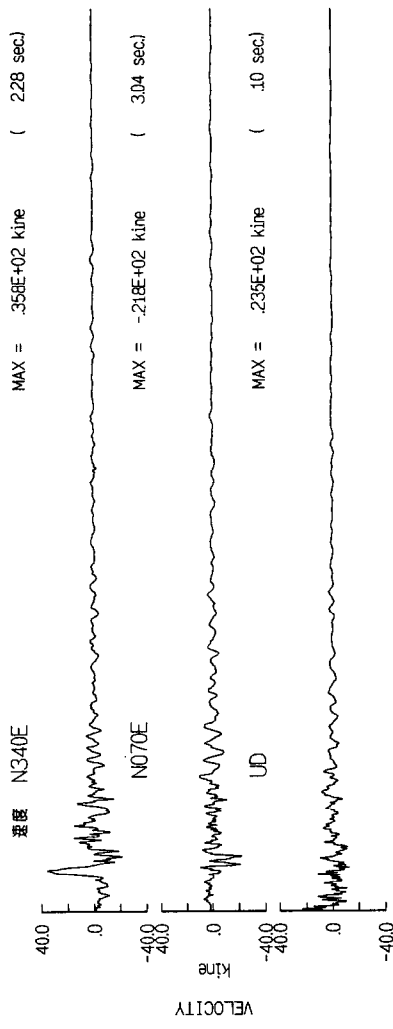
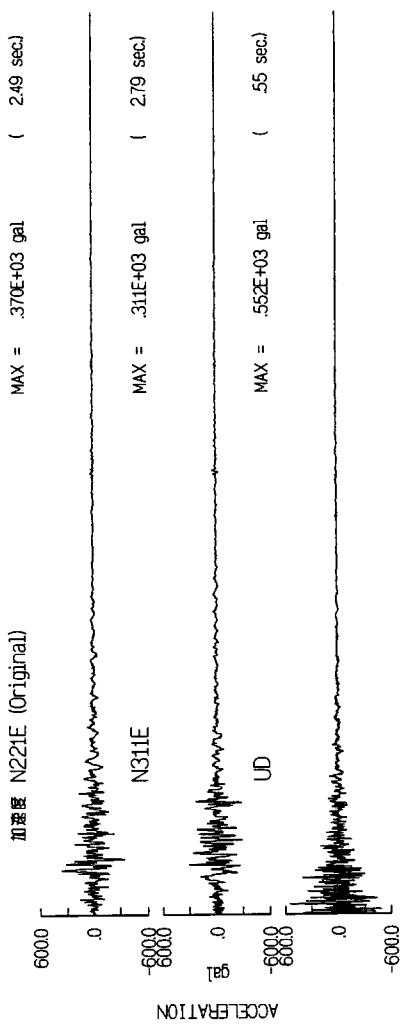


MAX =	229E+03 gal	(3.83 sec)
MAX =	.197E+03 gal	(4.09 sec)
MAX =	.362E+03 gal	(3.49 sec)
MAX =	.166E+02 kine	(4.20 sec)
MAX =	.809E+01 kine	(4.06 sec)
MAX =	.702E+01 kine	(5.35 sec)
MAX =	.348E+01 cm	(4.09 sec)
MAX =	-.169E+01 cm	(4.79 sec)
MAX =	.122E+01 cm	(2.56 sec)



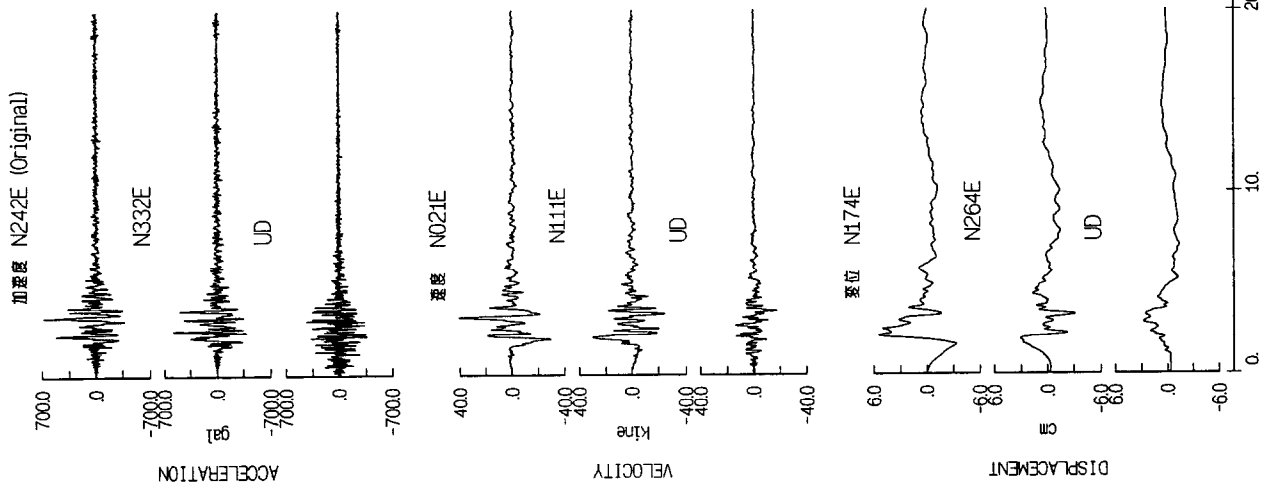
1986/07/08 North Palm

Mw=6 DHS

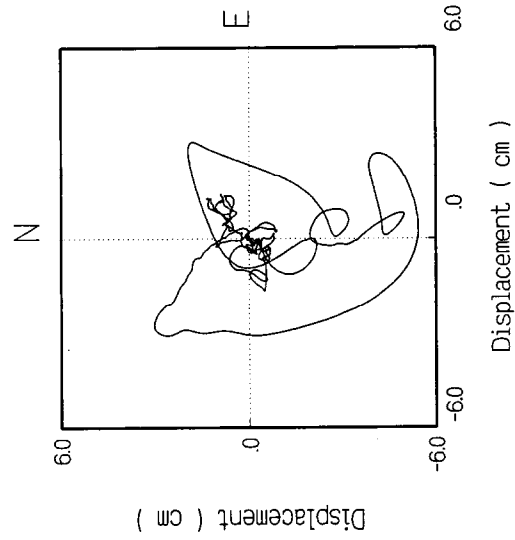
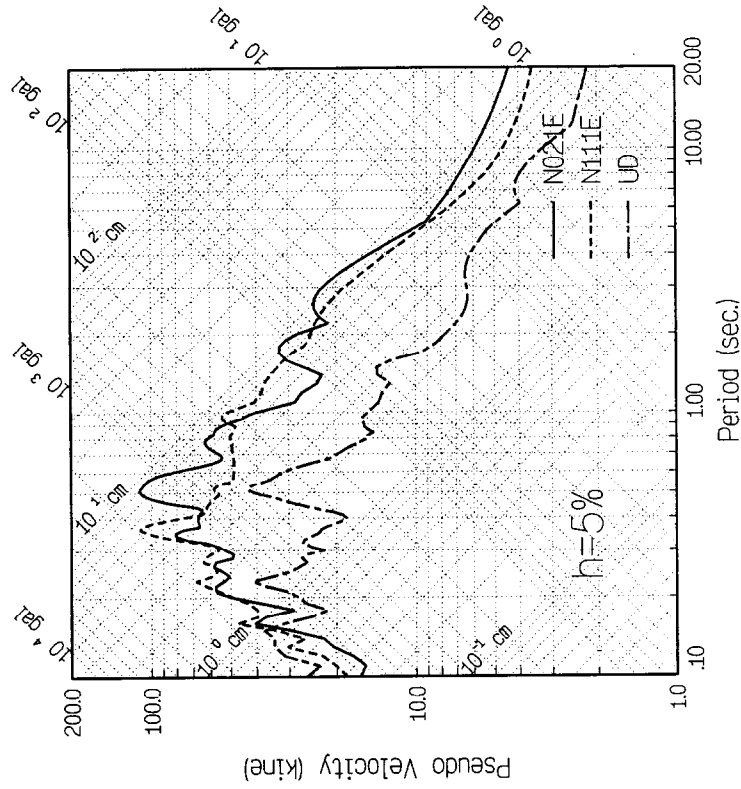


1986/07/08 North Palm

Mw=6 WTF

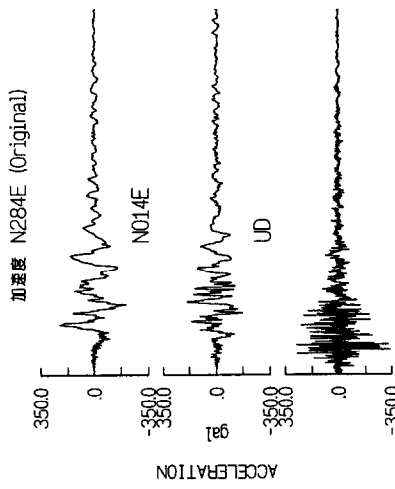


MAX =	.684E+03 gal	(3.26 sec)
MAX =	.579E+03 gal	(2.49 sec)
MAX =	.428E+03 gal	(3.00 sec)
MAX =	.411E+02 kine	(3.18 sec)
MAX =	.300E+02 kine	(2.05 sec)
MAX =	-.175E+02 kine	(3.51 sec)
MAX =	.544E+01 cm	(2.10 sec)
MAX =	-.320E+01 cm	(3.26 sec)
MAX =	.278E+01 cm	(2.81 sec)

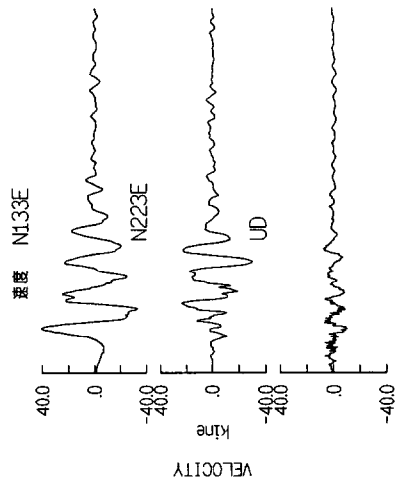


1986/07/08 North Palm

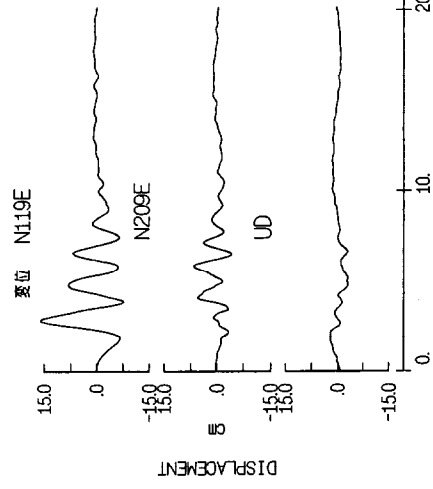
Mw=6 MV



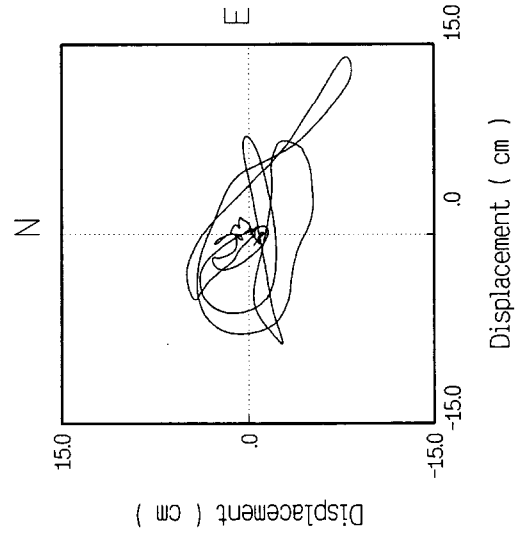
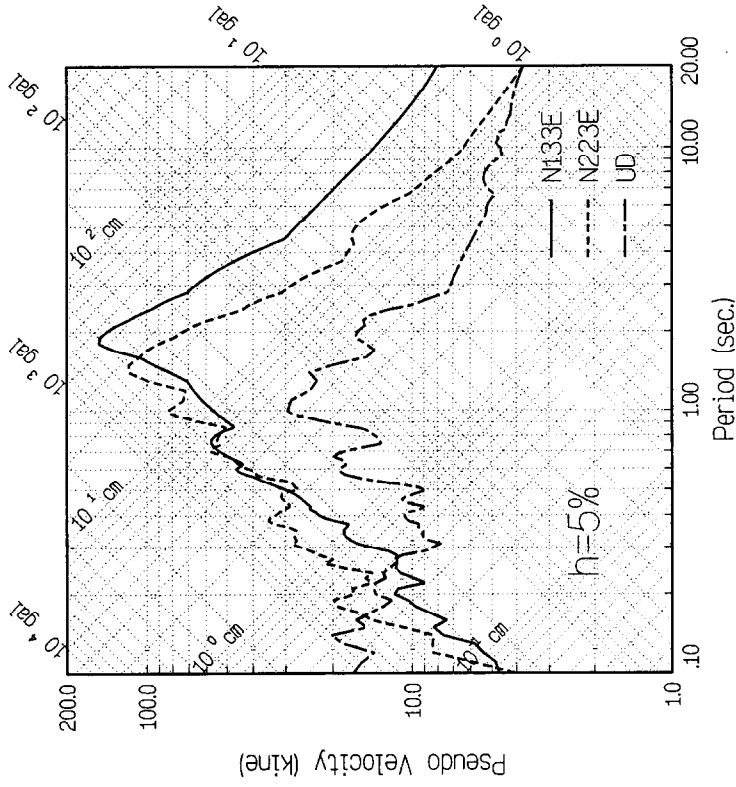
MAX = .228E+03 gal (2.80 sec)
 MAX = .194E+03 gal (4.08 sec)
 MAX = -.340E+03 gal (1.35 sec)



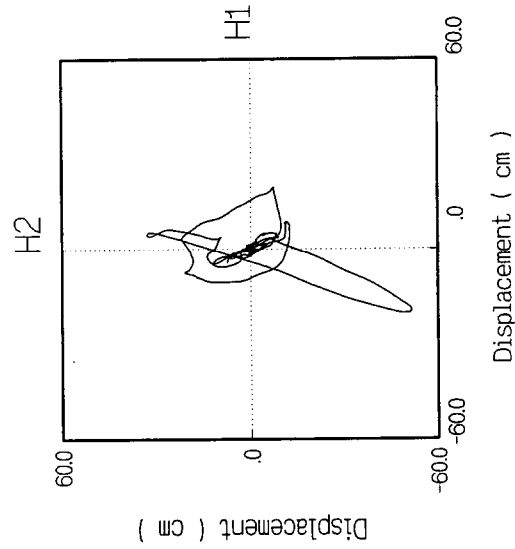
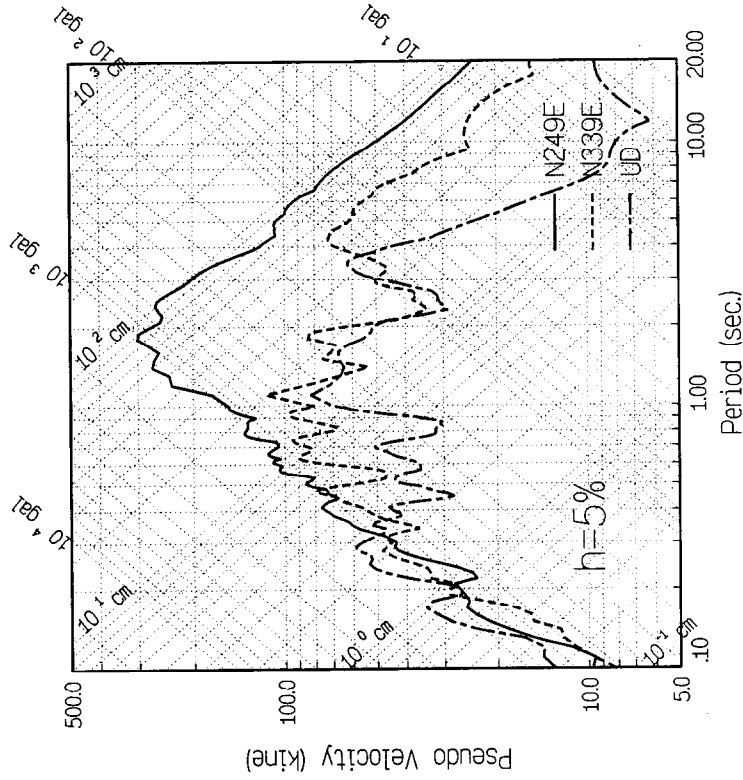
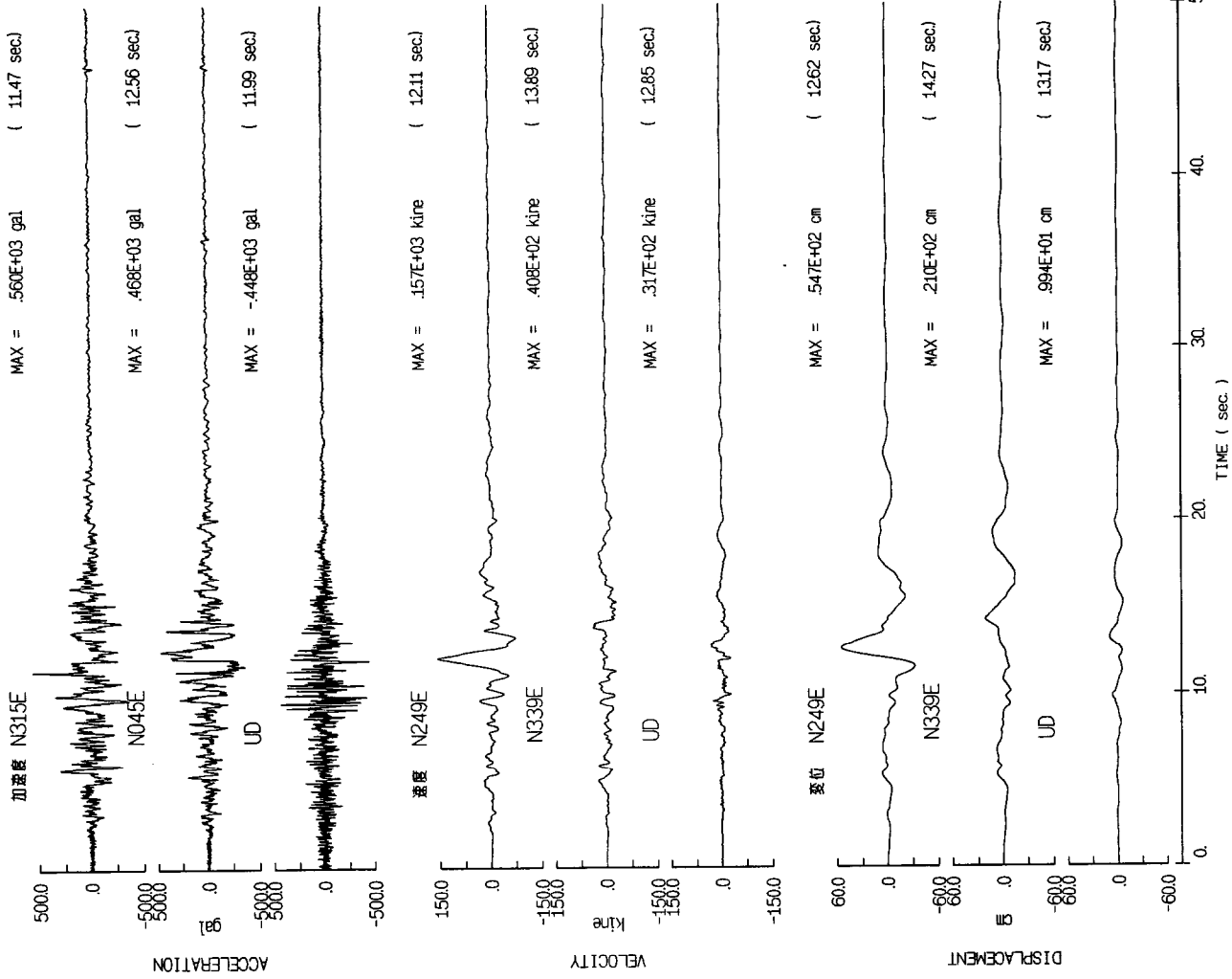
MAX = .408E+02 kine (2.47 sec)
 MAX = -.303E+02 kine (6.20 sec)
 MAX = -.966E+01 kine (2.43 sec)



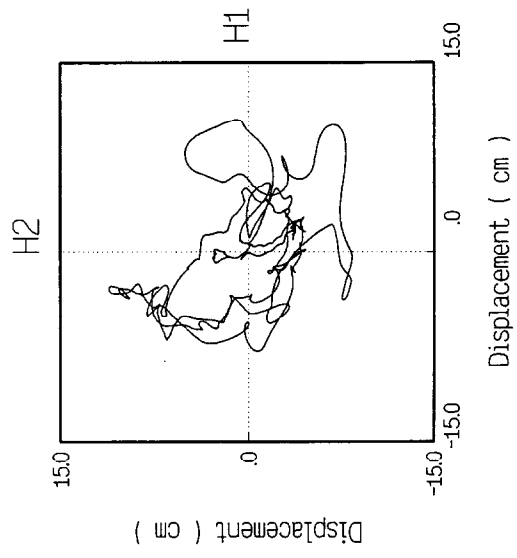
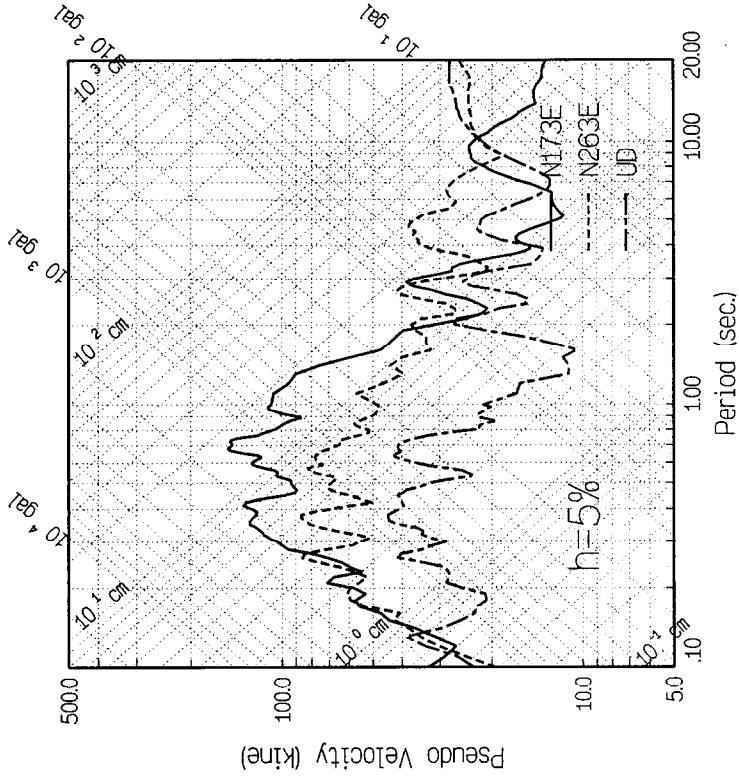
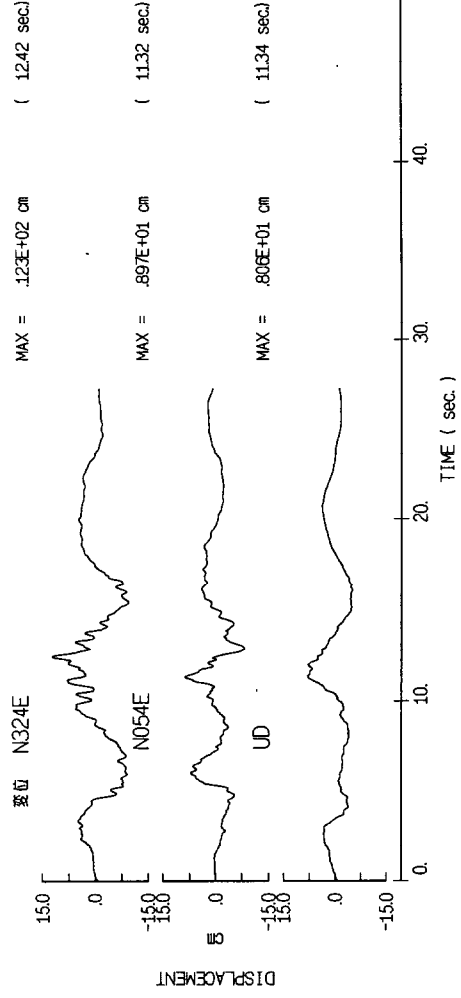
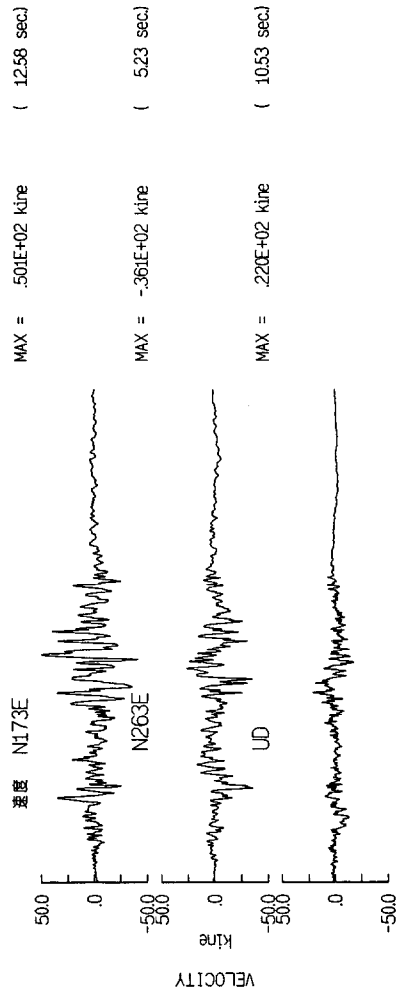
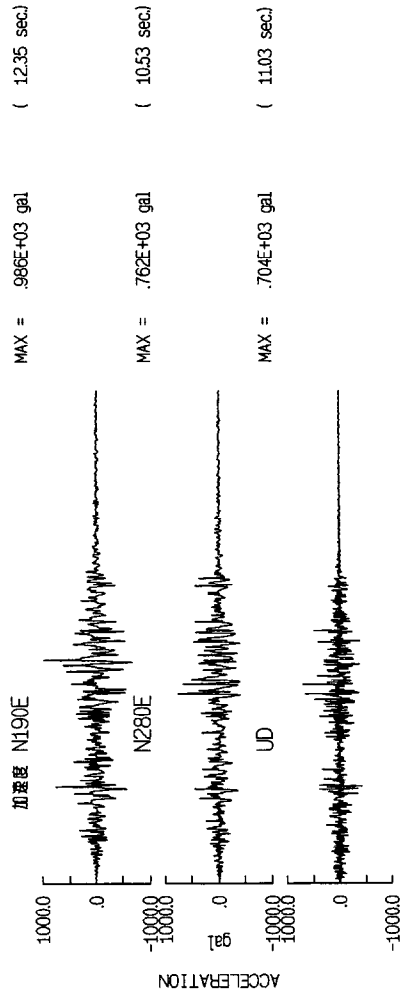
MAX = .160E+02 cm (2.84 sec)
 MAX = .656E+01 cm (5.89 sec)
 MAX = -.292E+01 cm (5.22 sec)



1987/11/24 Superstition Hills Mw=6.6 SUP



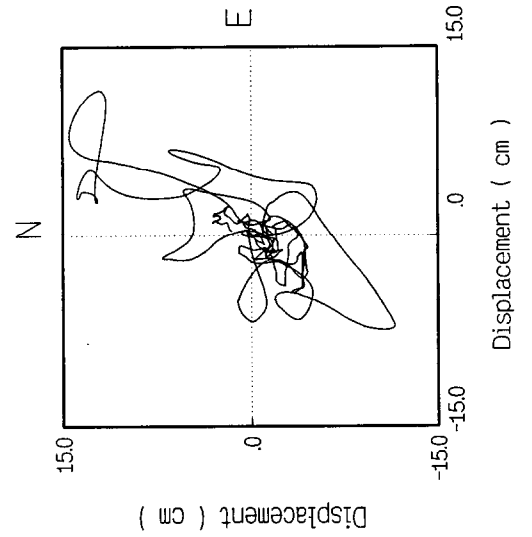
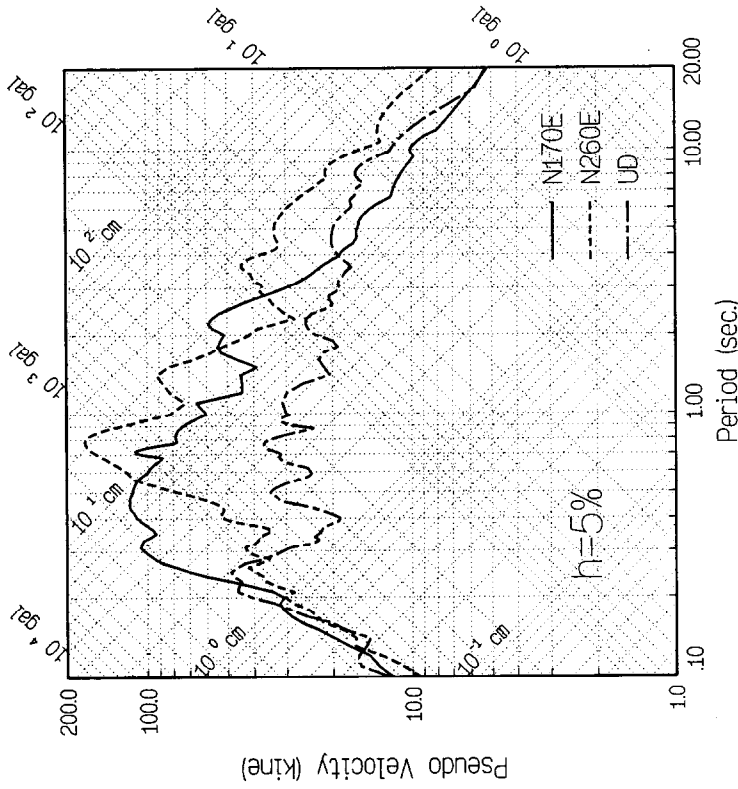
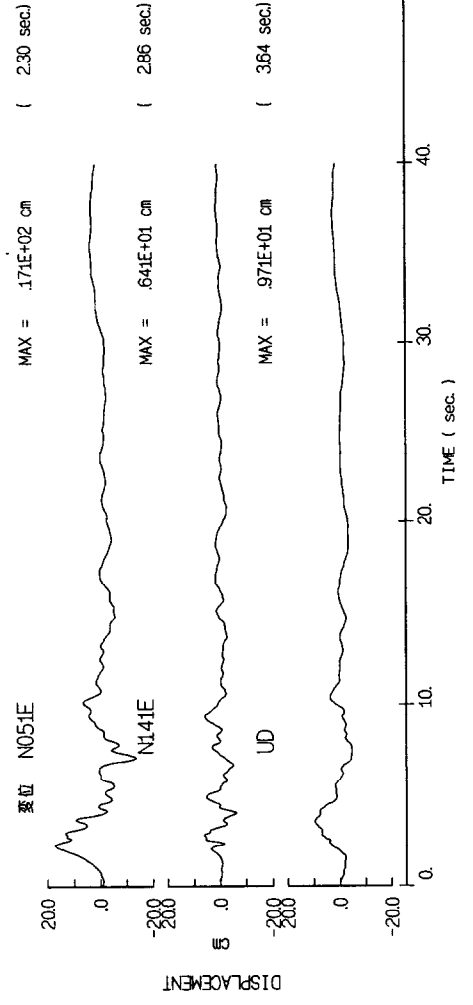
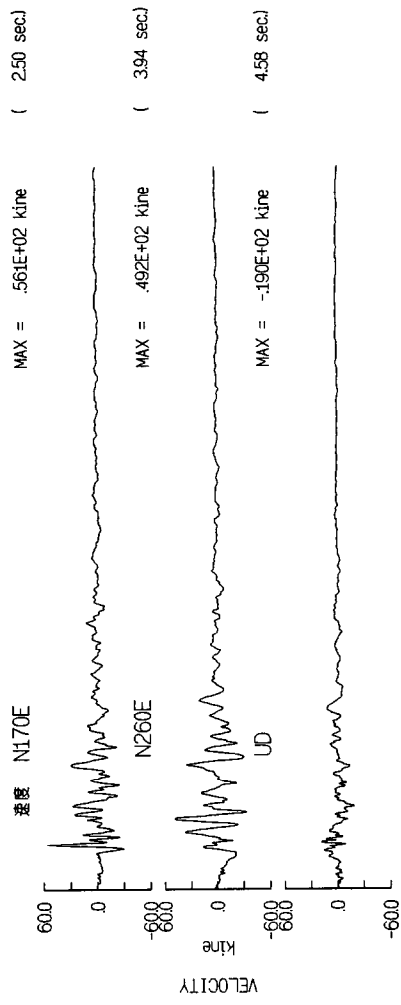
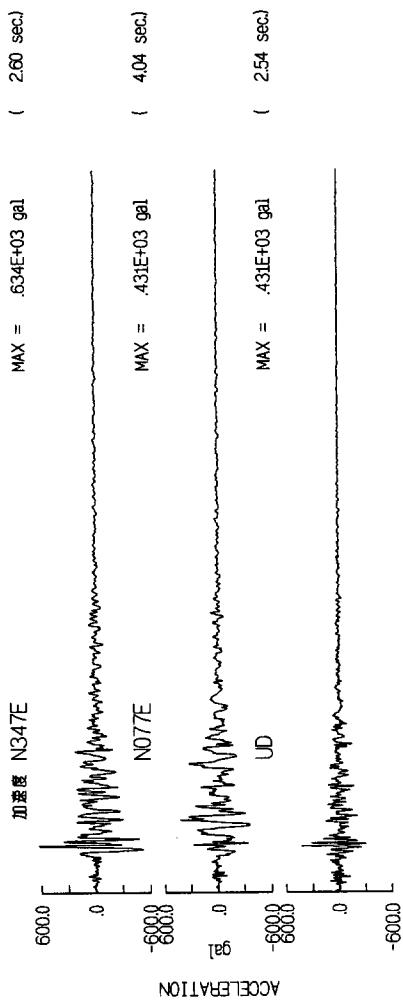
1987/11/24 Superstition Hills Mw=6.6 PAR



1989/10/18 Loma Prieta

Mw=7

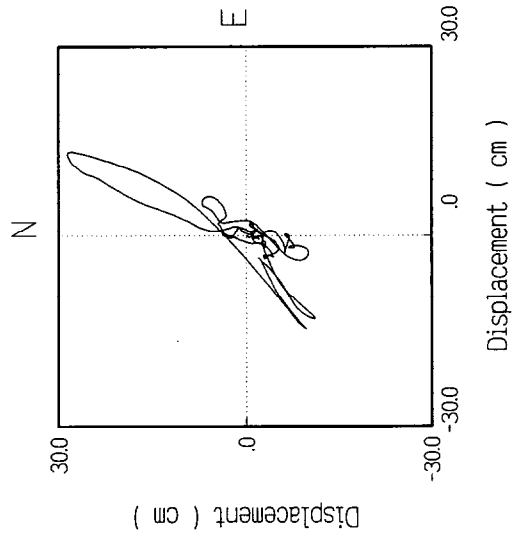
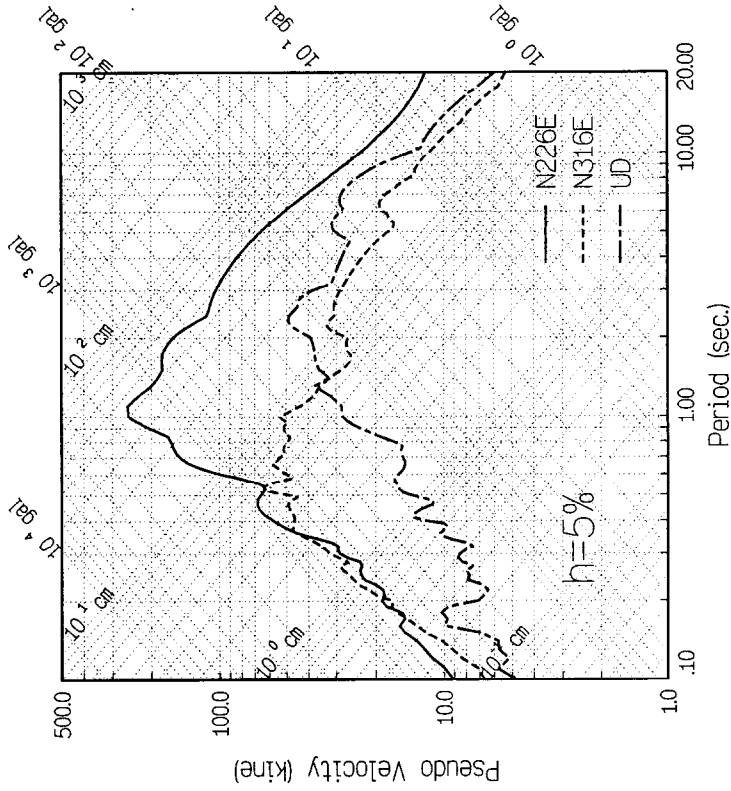
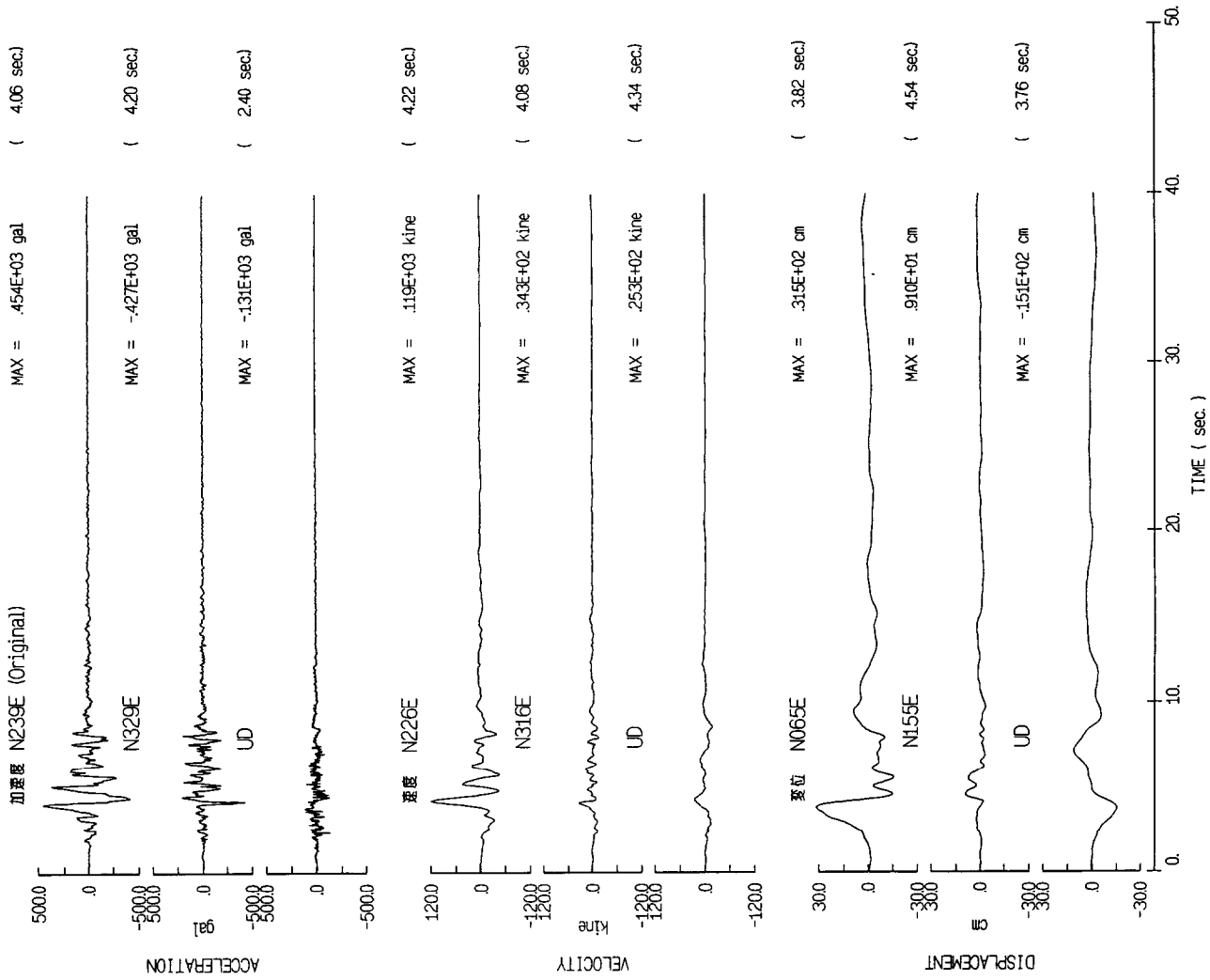
COR



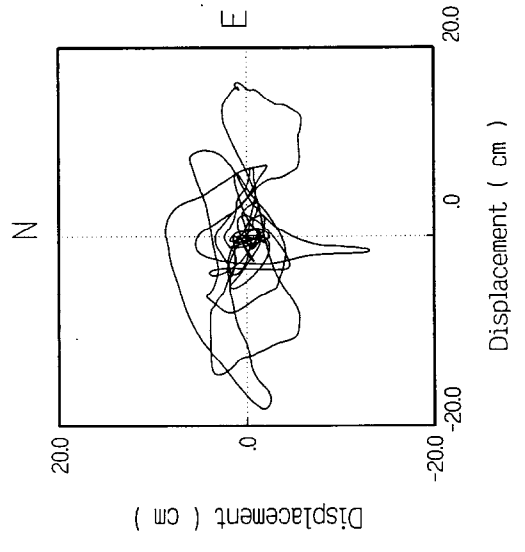
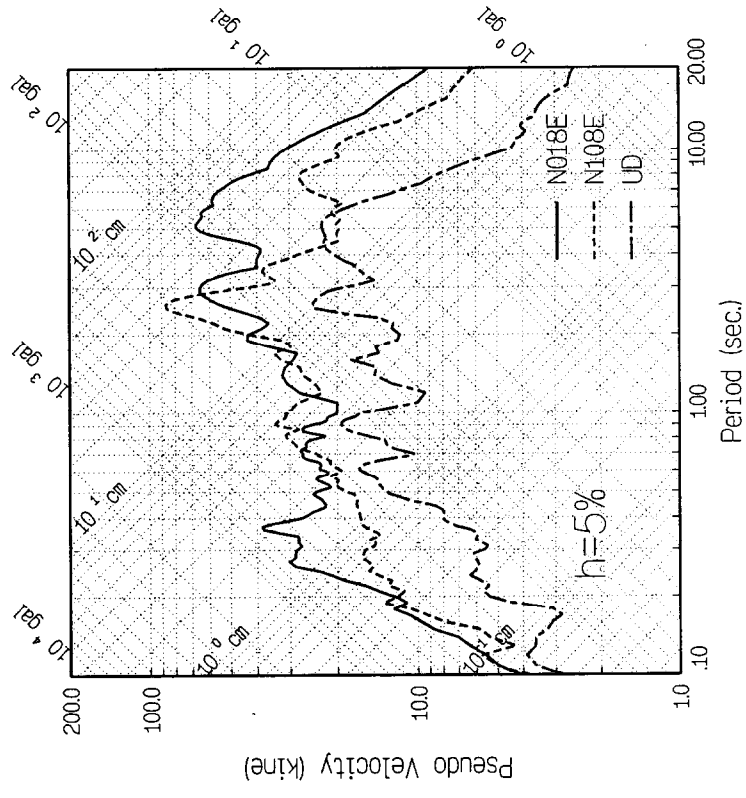
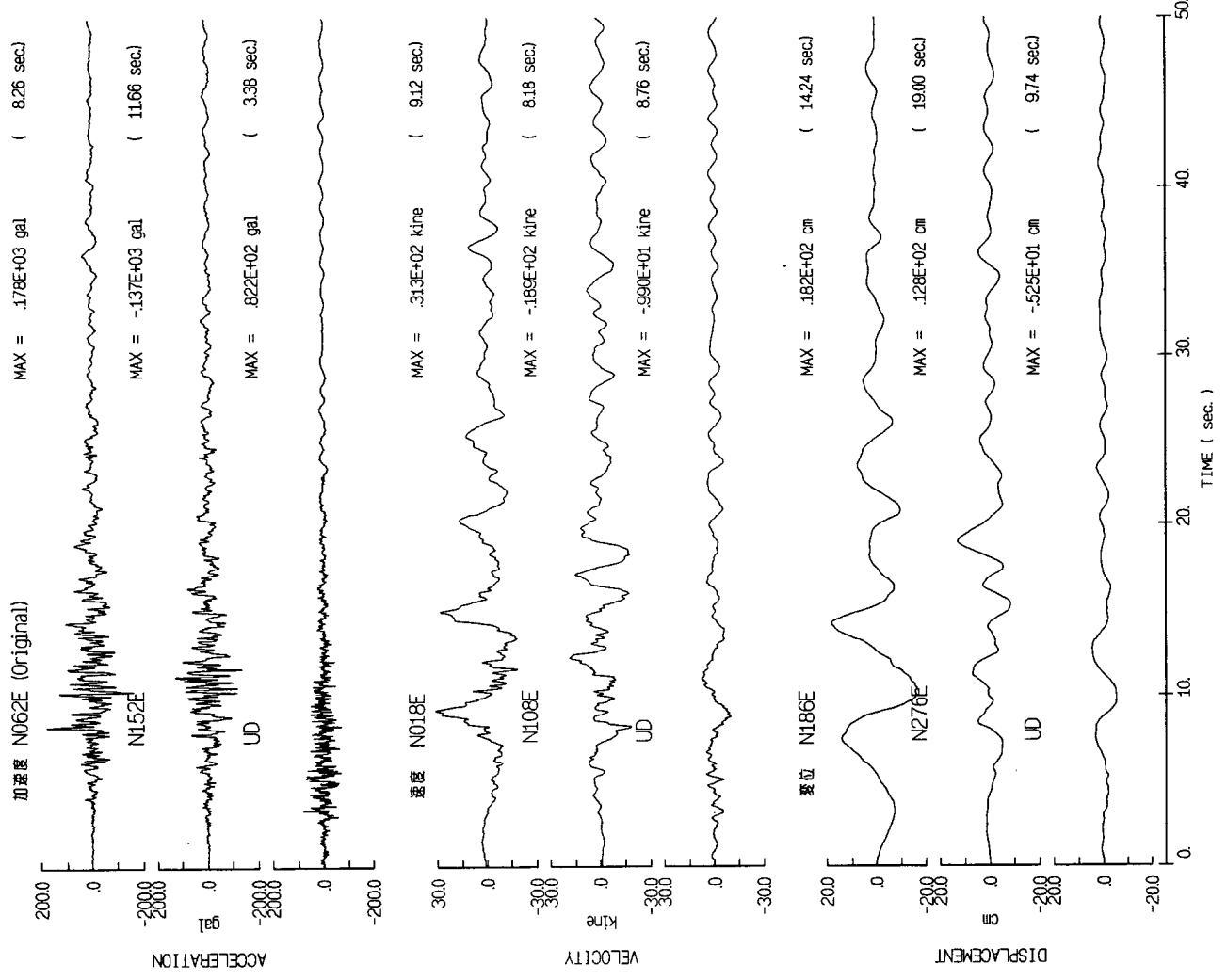
1989/10/18 Loma Prieta

Mw=7

LXD



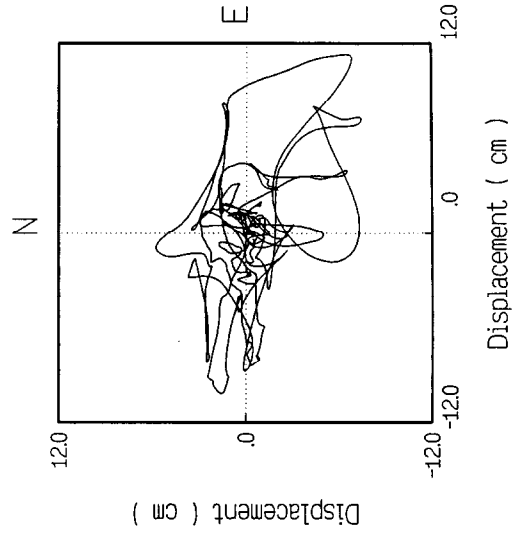
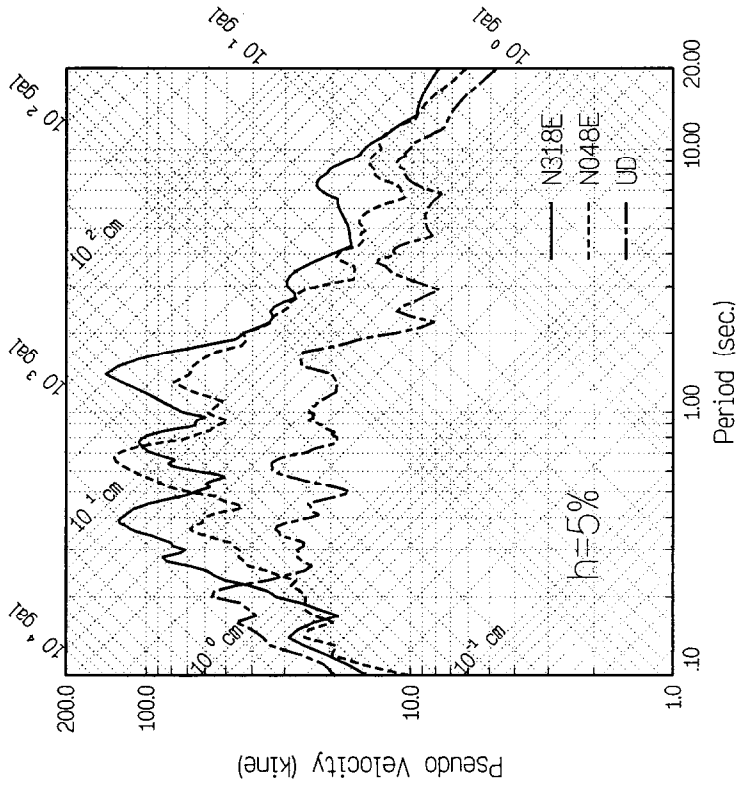
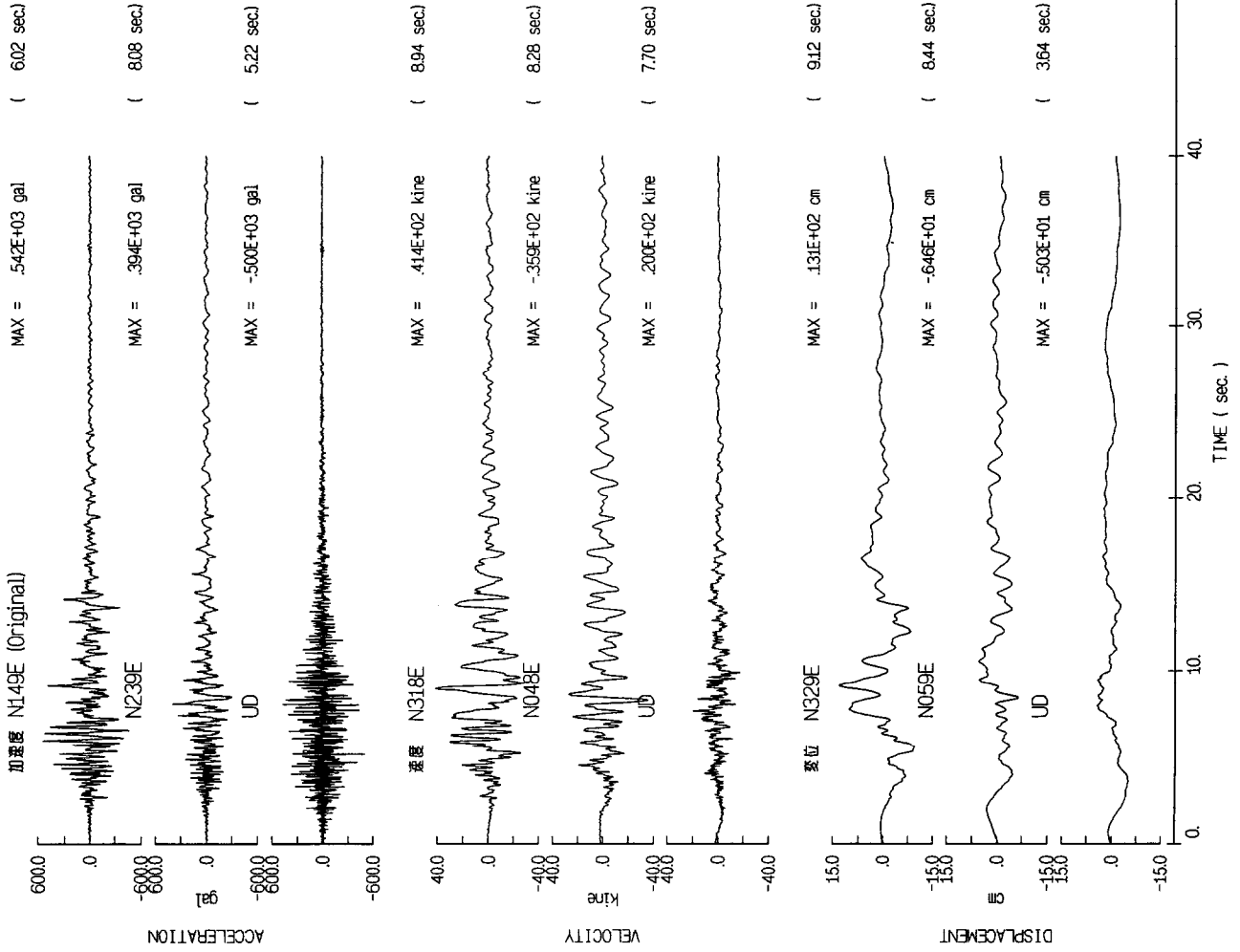
1989/10/18 Loma Prieta Mw=7 ASH



1989/10/18 Loma Prieta

Mw=7

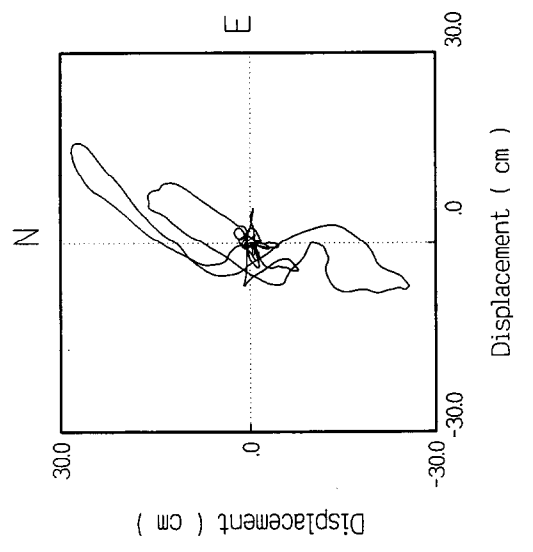
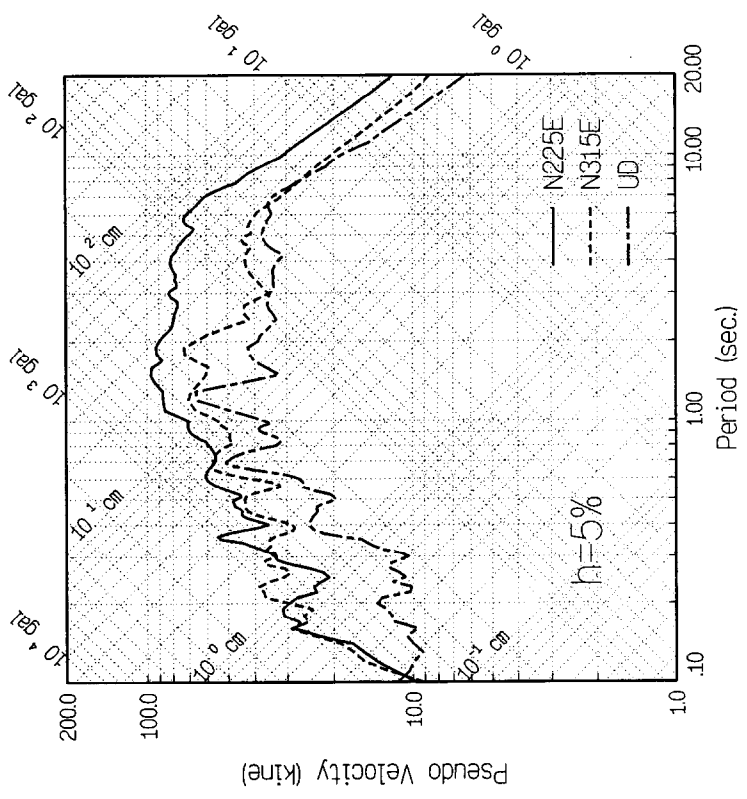
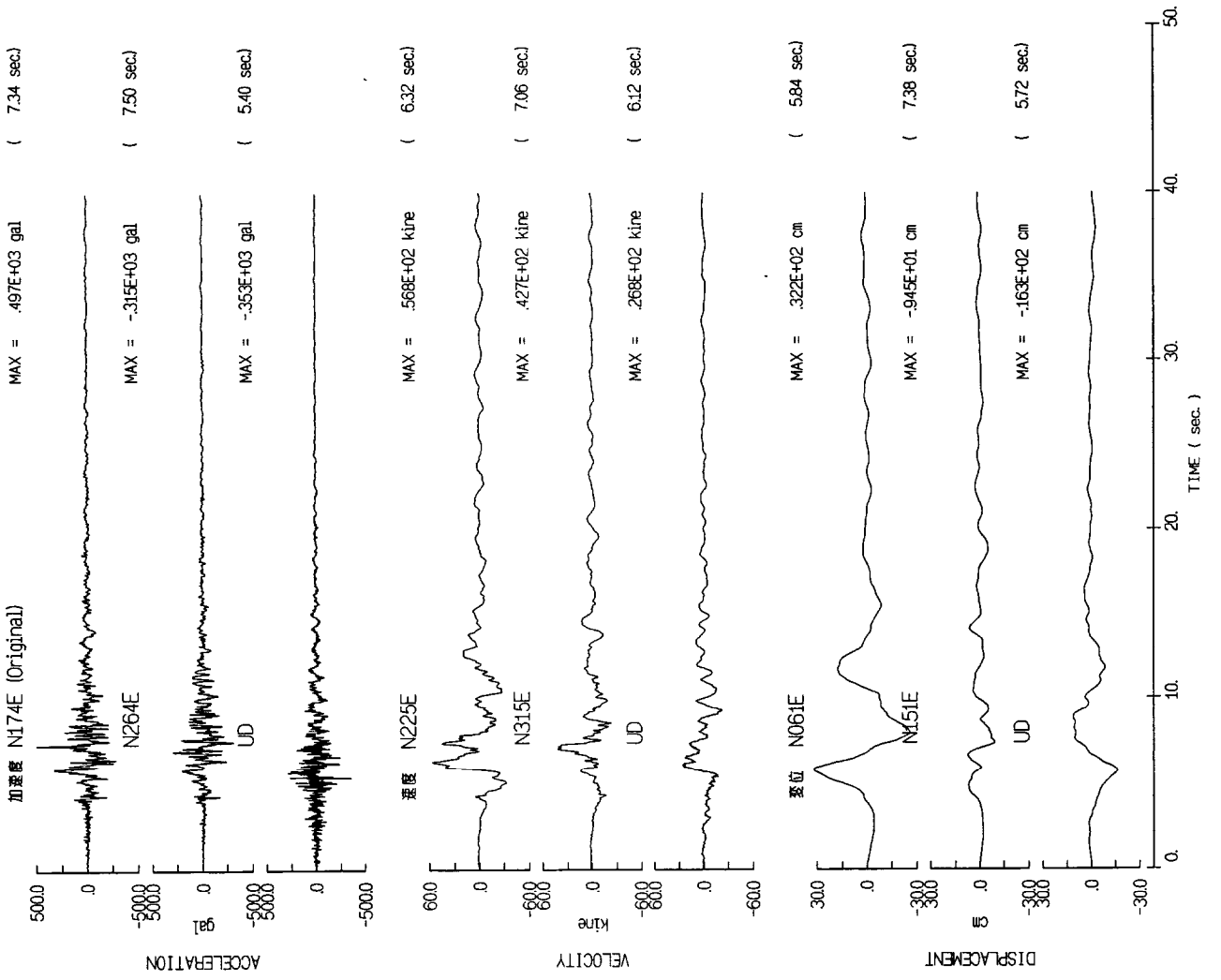
CAP



1989/10/18 Loma Prieta

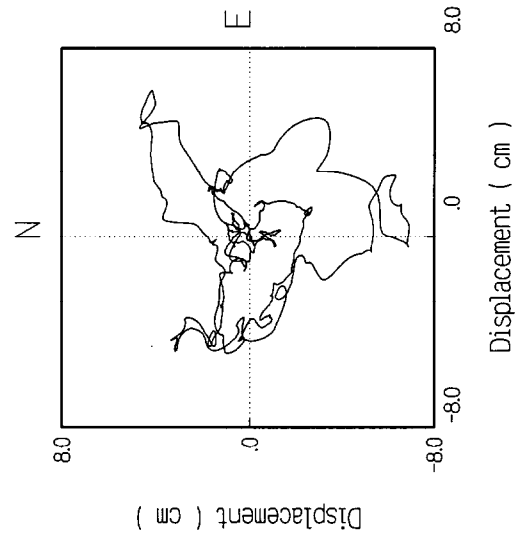
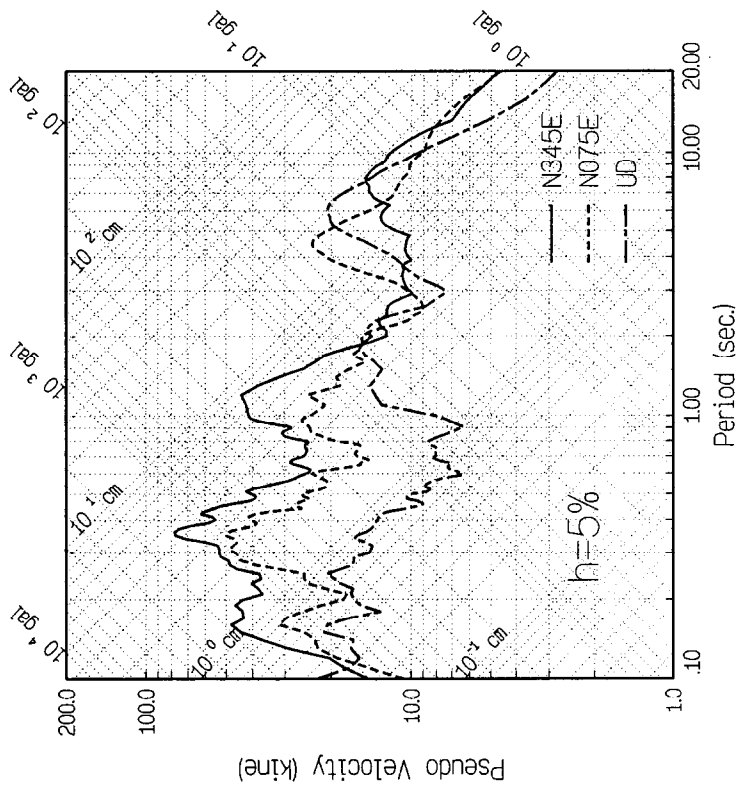
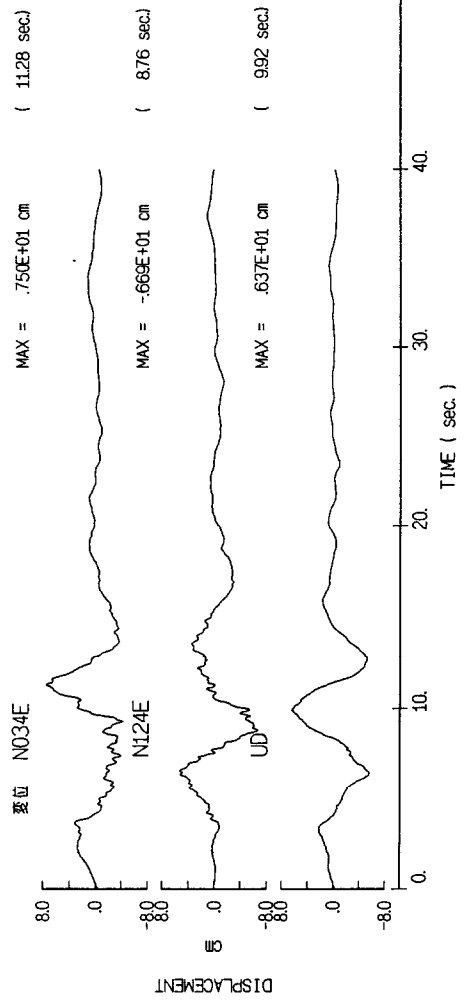
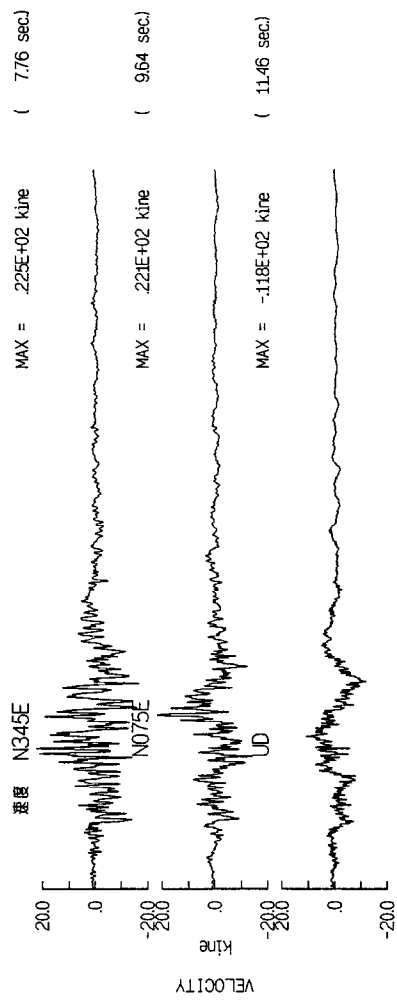
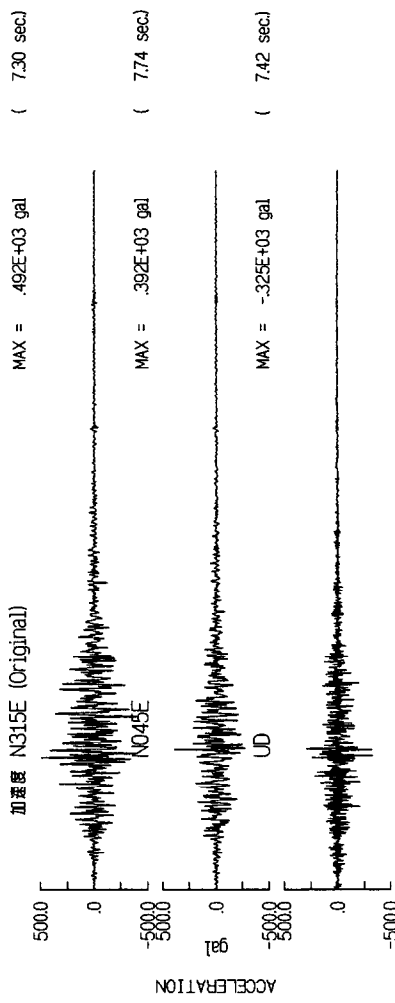
Mw=7

SAA



1989/10/18 Loma Prieta

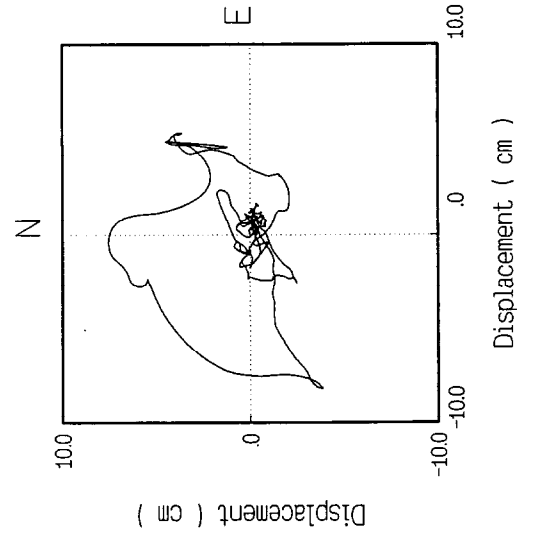
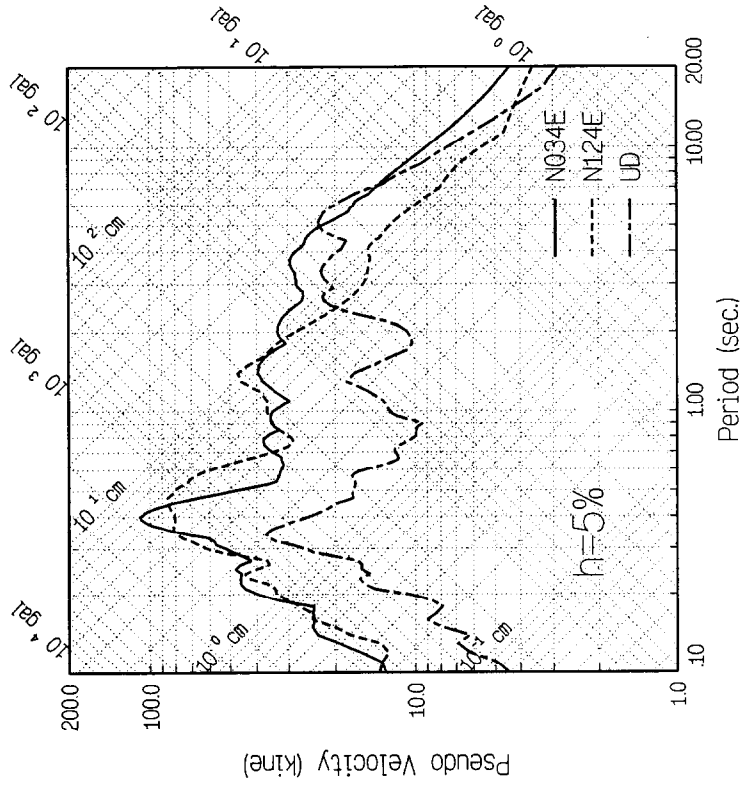
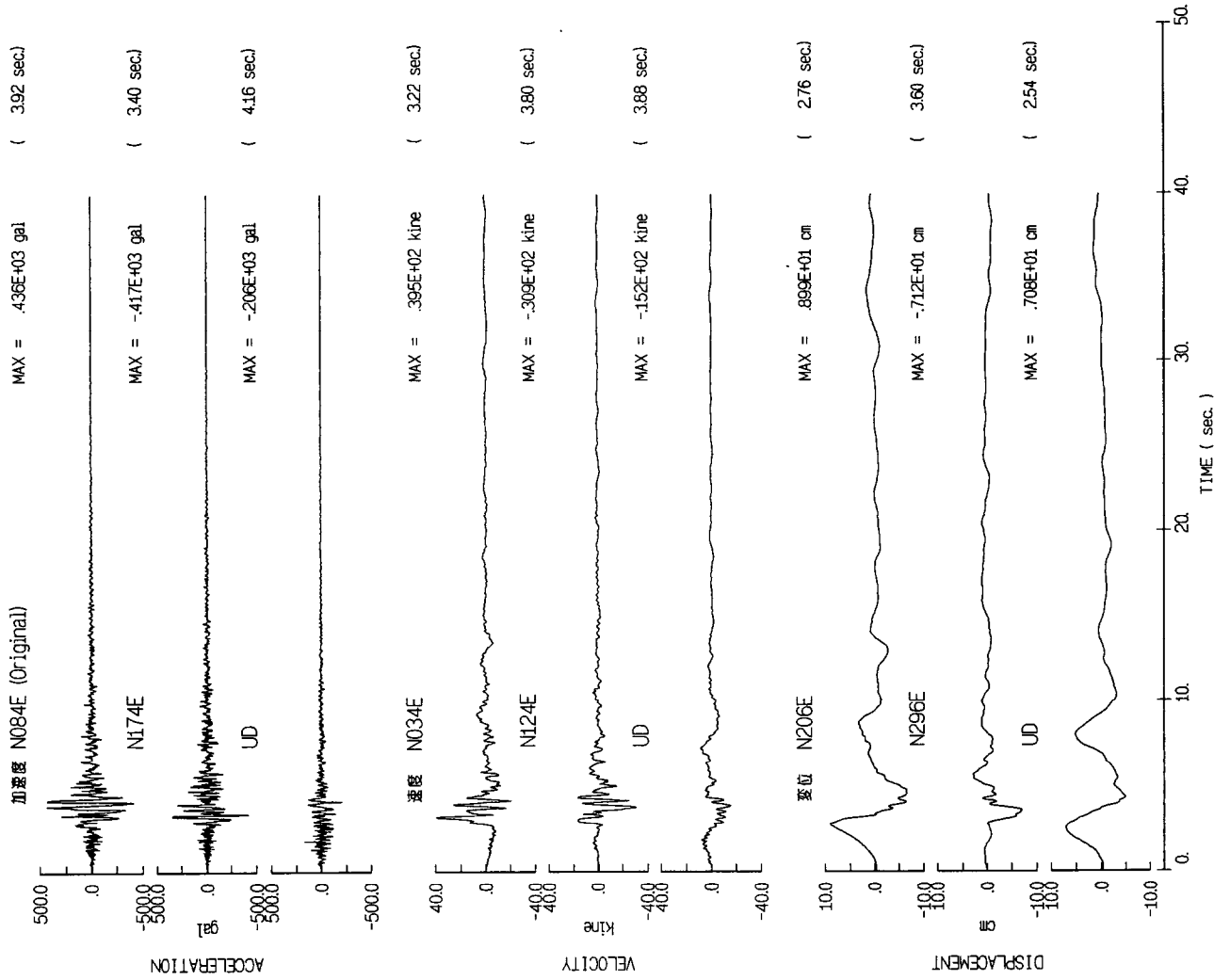
Mw=7 SCO



1989/10/18 Loma Prieta

Mw=7

GIL1

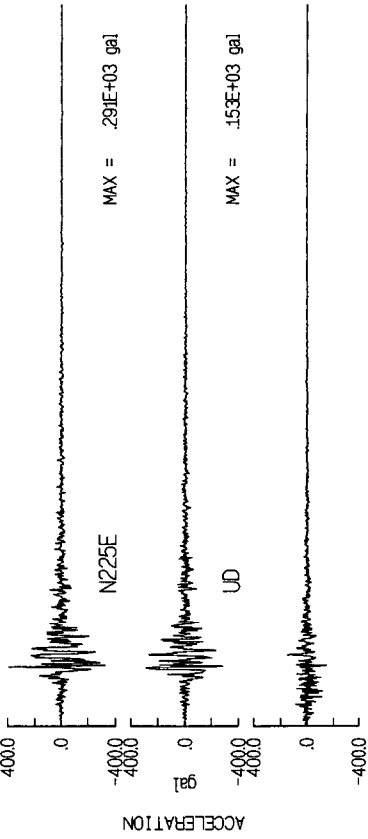


1989/10/18 Loma Prieta

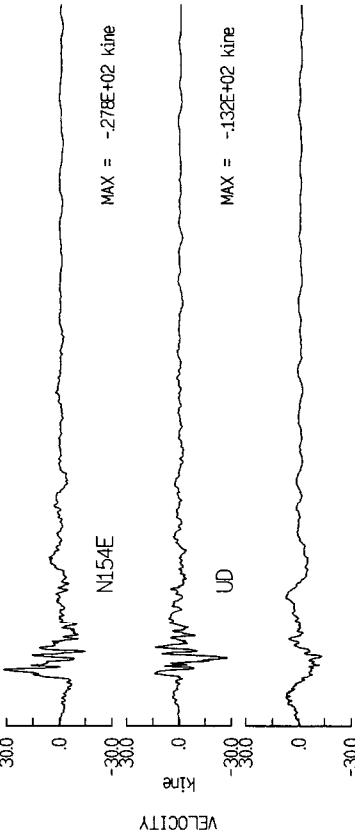
Mw=7

GGC

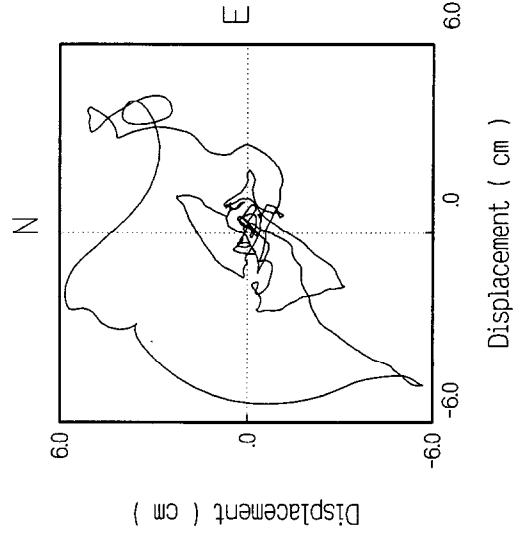
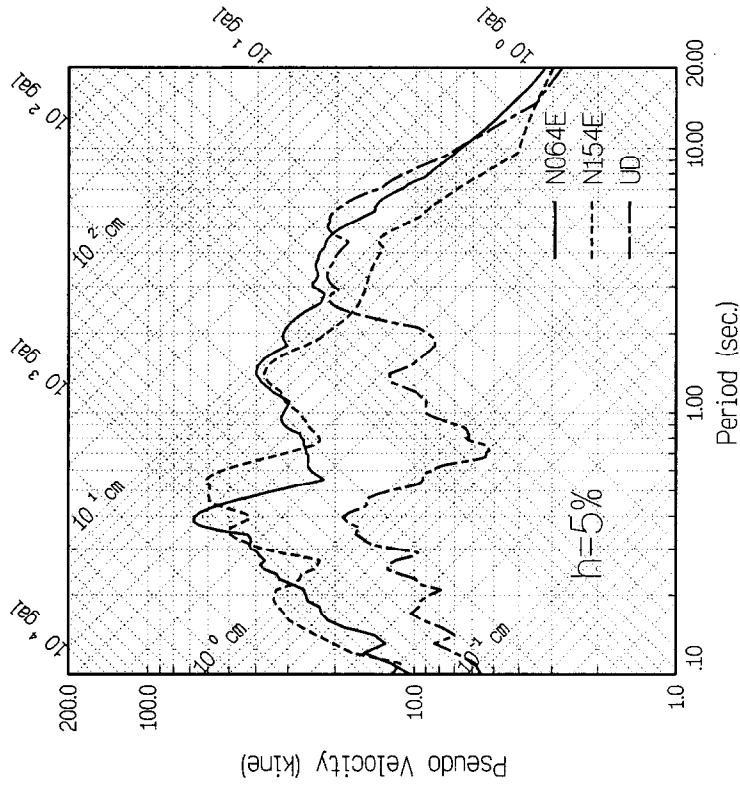
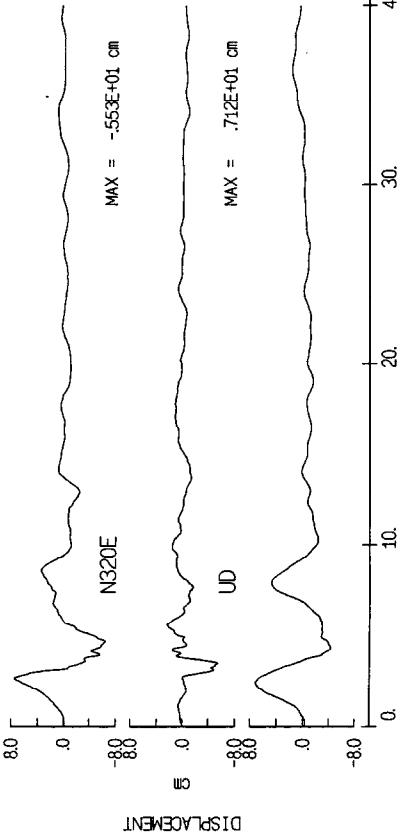
加速度 N135E (Original) MAX = .393E+03 gal (3.26 sec)



速度 N064E MAX = .32E+02 kine (3.10 sec)

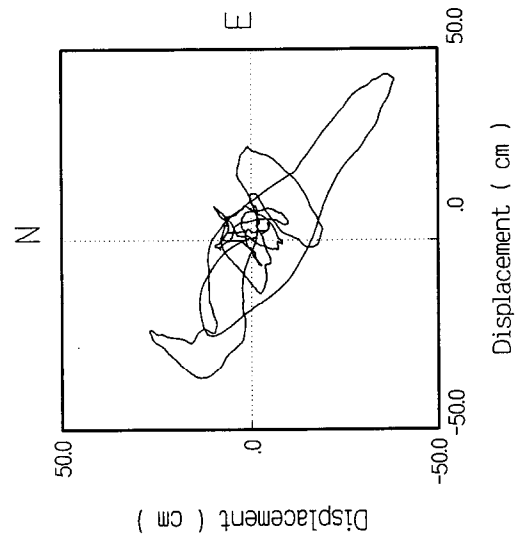
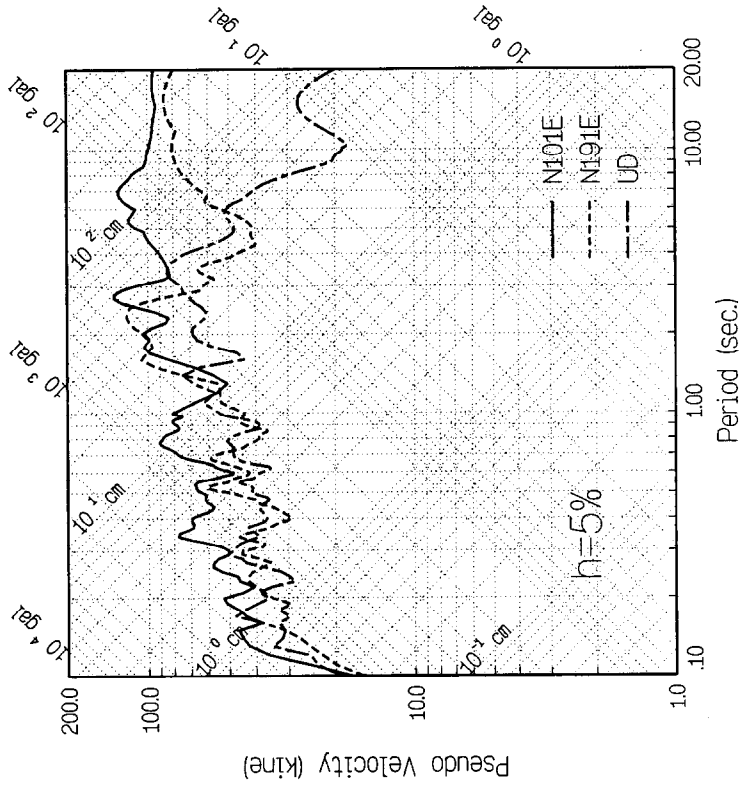
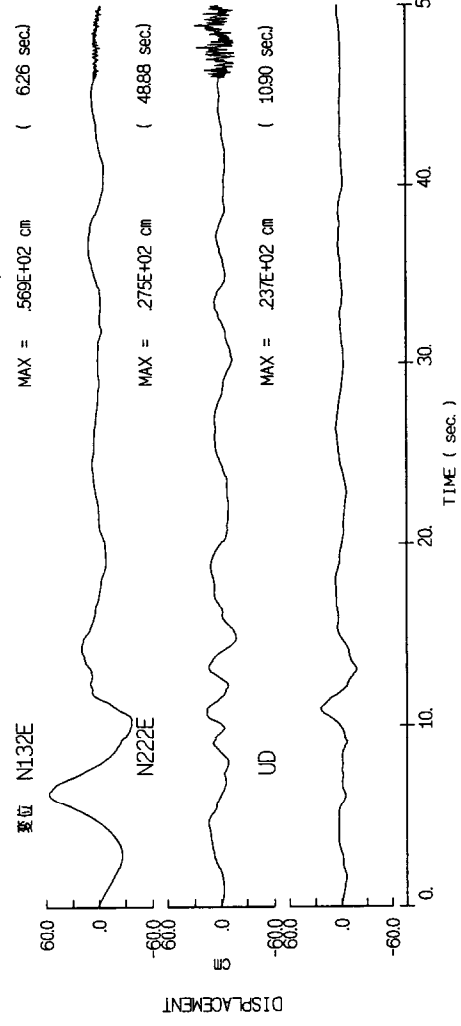
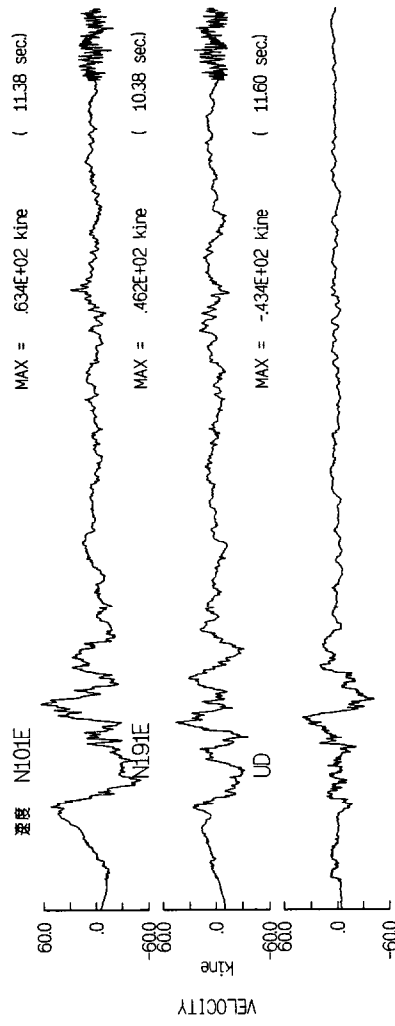
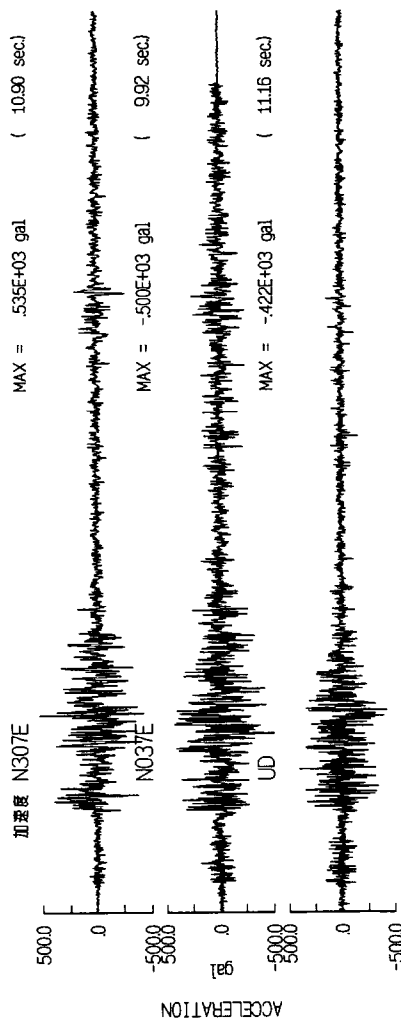


変位 N230E MAX = .747E+01 cm (2.66 sec)



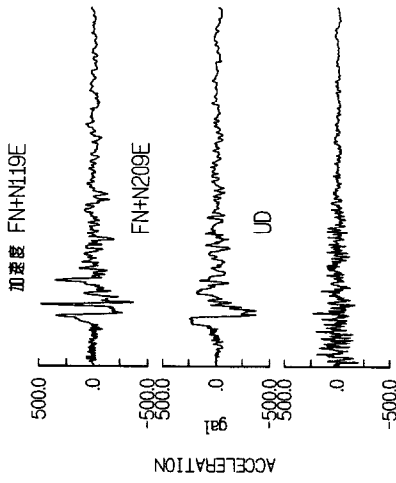
1990/06/20 Manjir

Mw=7.3 ABB

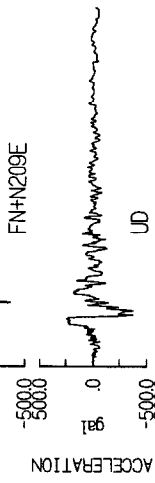


1992/03/13 Erzincan

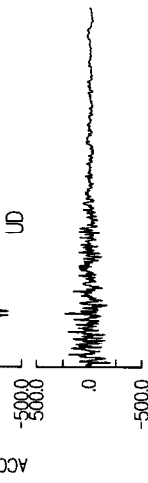
Mw=6.6 ERZ



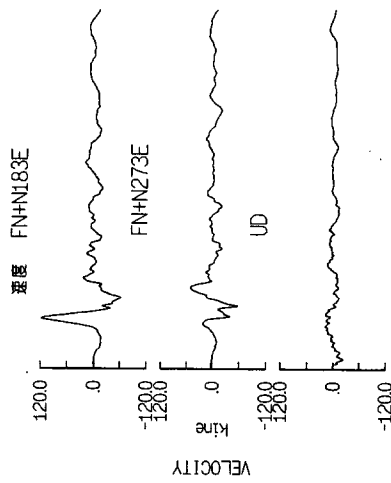
MAX = .487E+03 gal (3.46 sec)



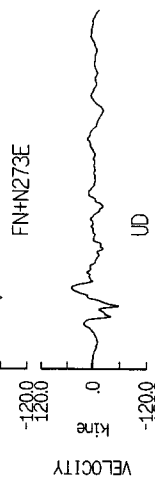
MAX = -.379E+03 gal (3.13 sec)



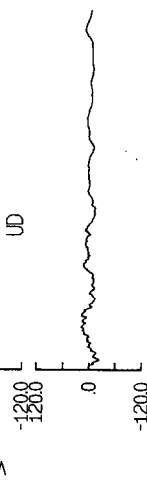
MAX = 236E+03 gal (3.00 sec)



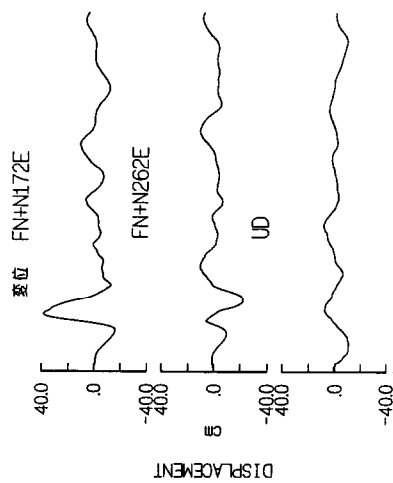
MAX = .118E+03 kine (2.82 sec)



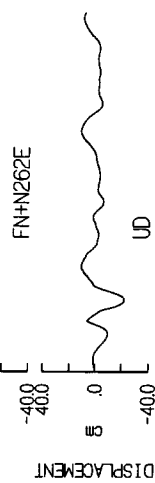
MAX = -.572E+02 kine (3.52 sec)



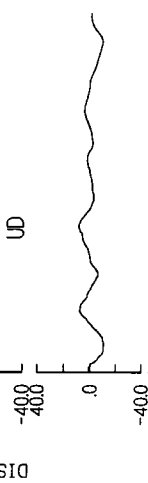
MAX = -.224E+02 kine (.57 sec)



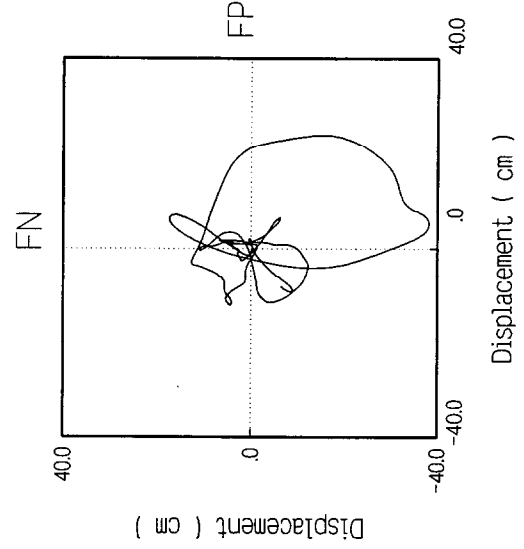
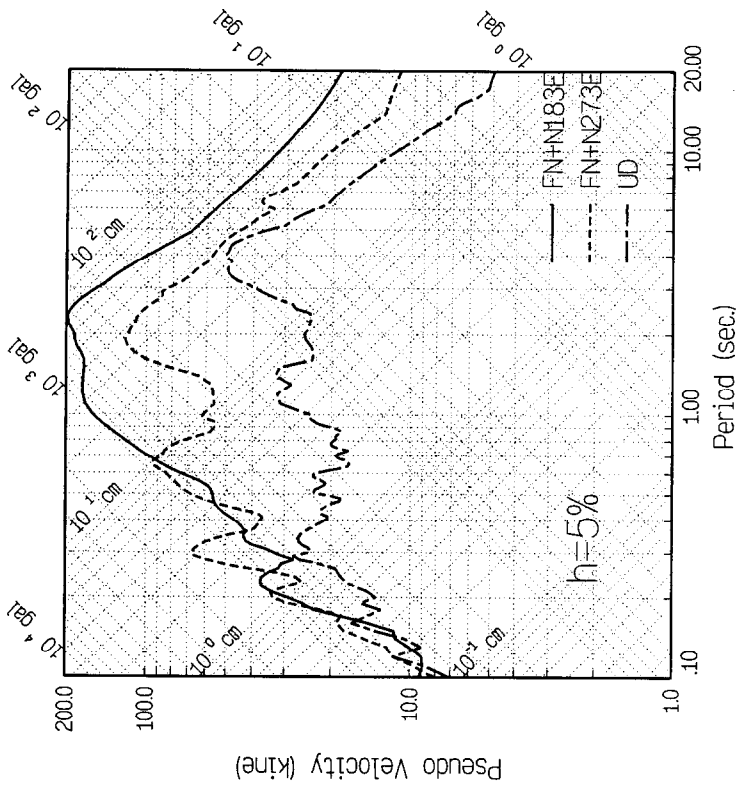
MAX = .385E+02 cm (3.22 sec)



MAX = -.218E+02 cm (3.99 sec)

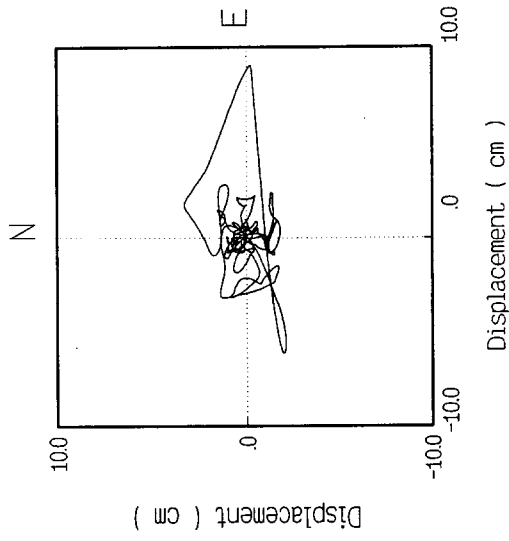
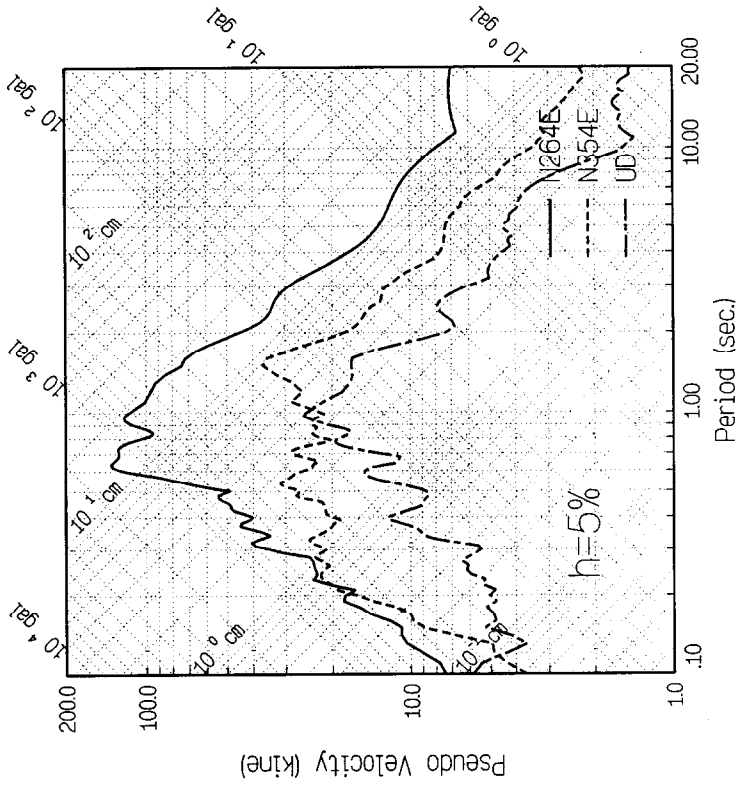
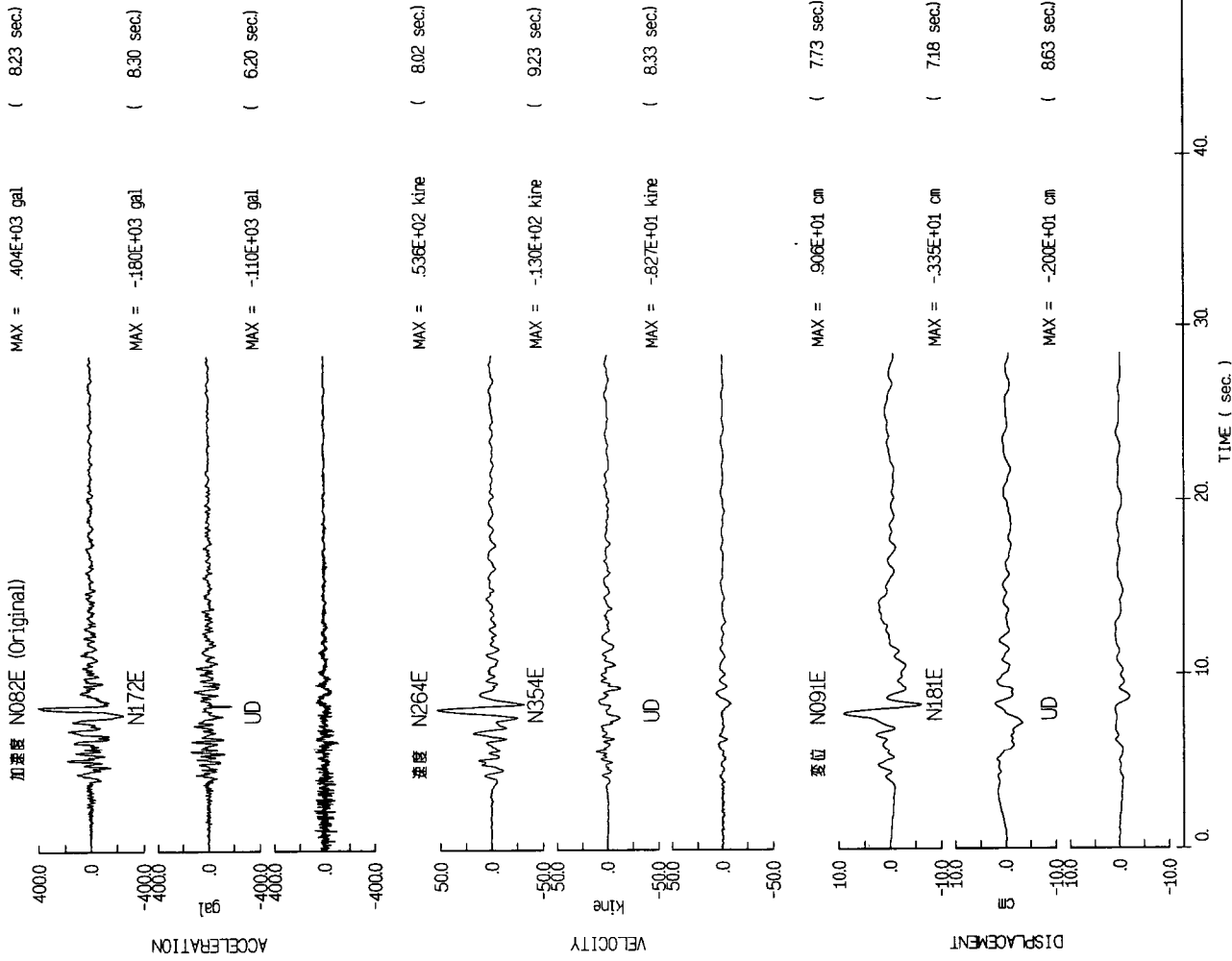


MAX = -.104E+02 cm (1.56 sec)



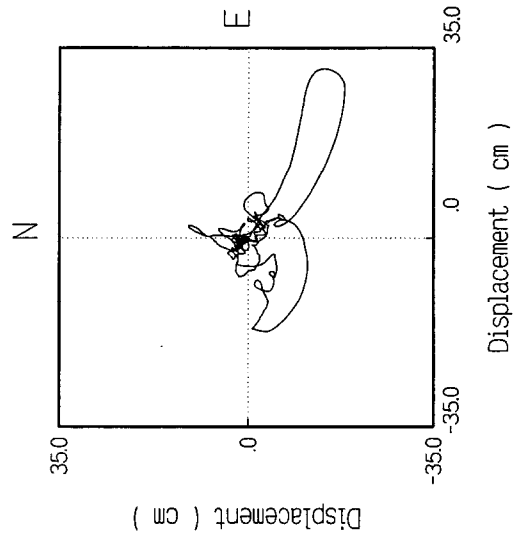
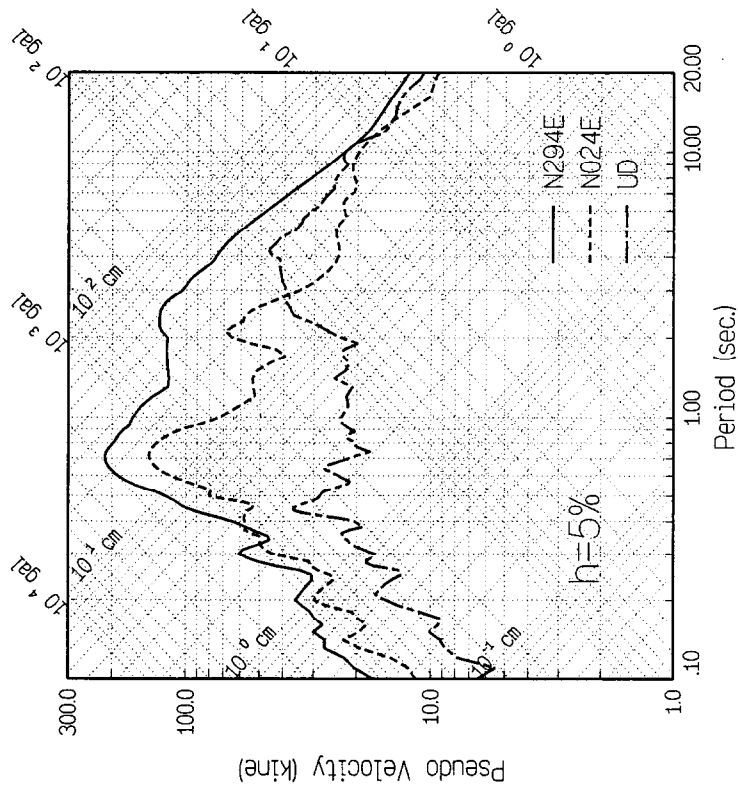
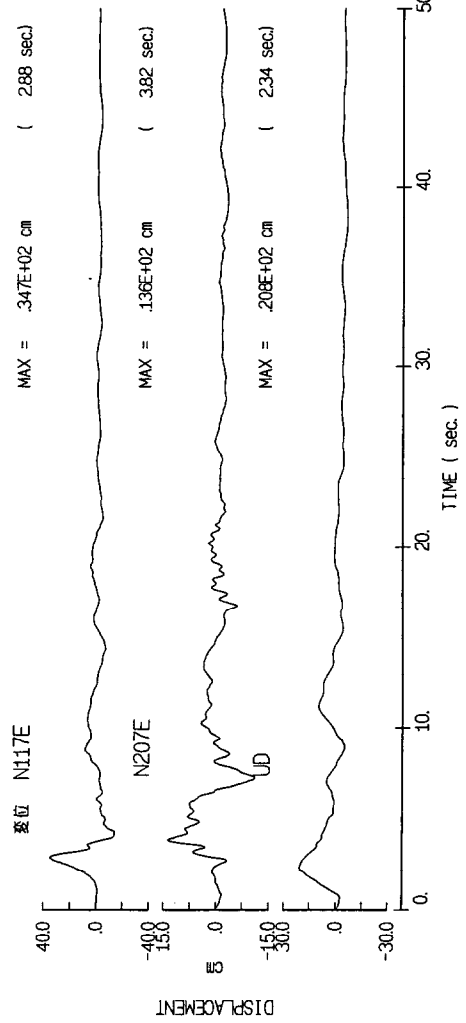
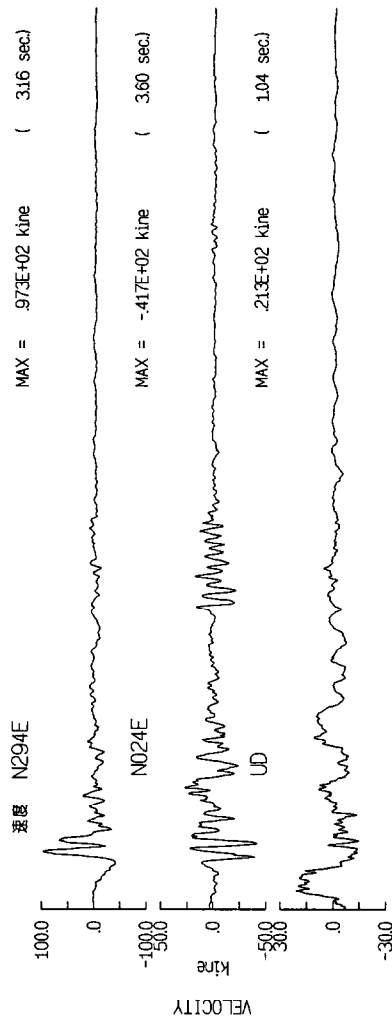
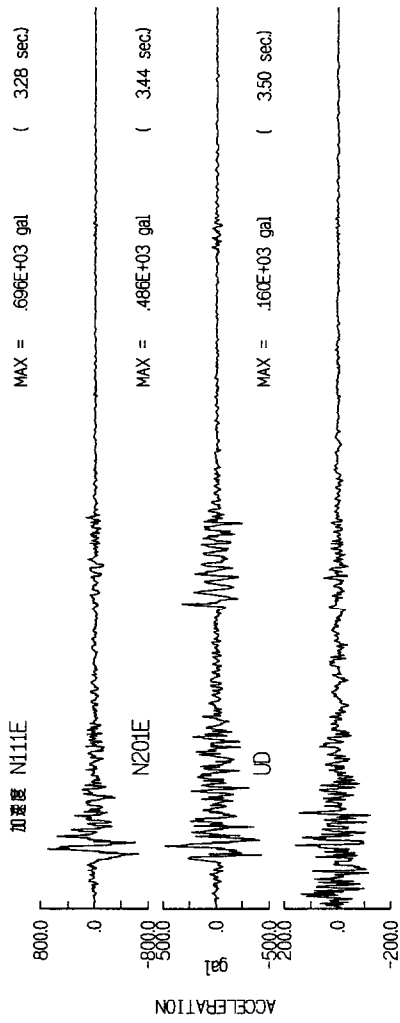
1992/04/23 Joshua Tree

Mw=6.2 IDV



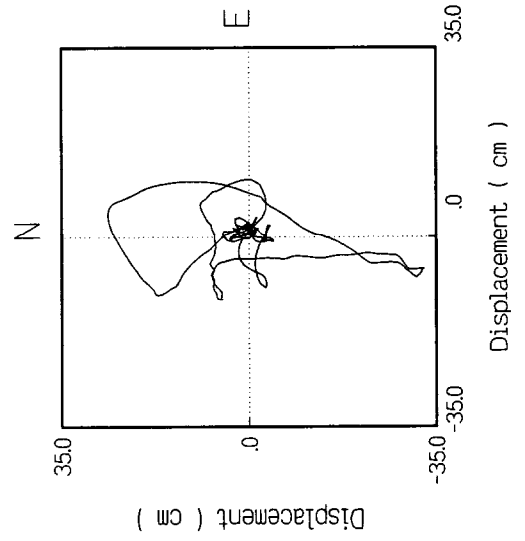
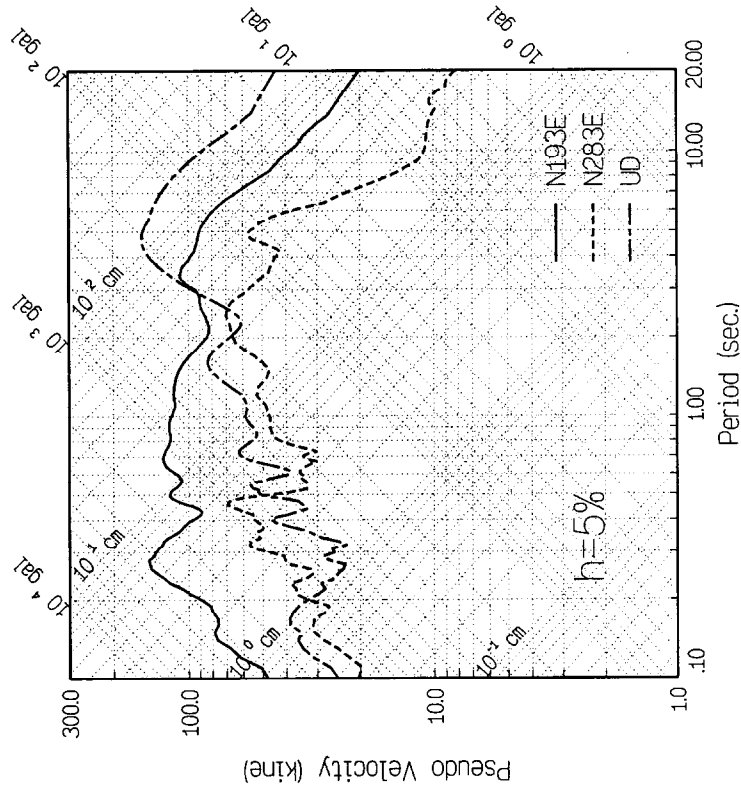
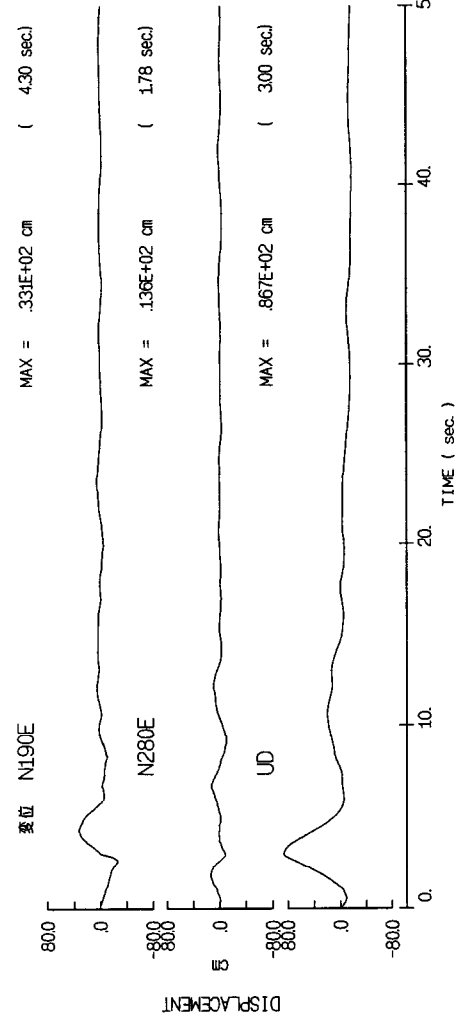
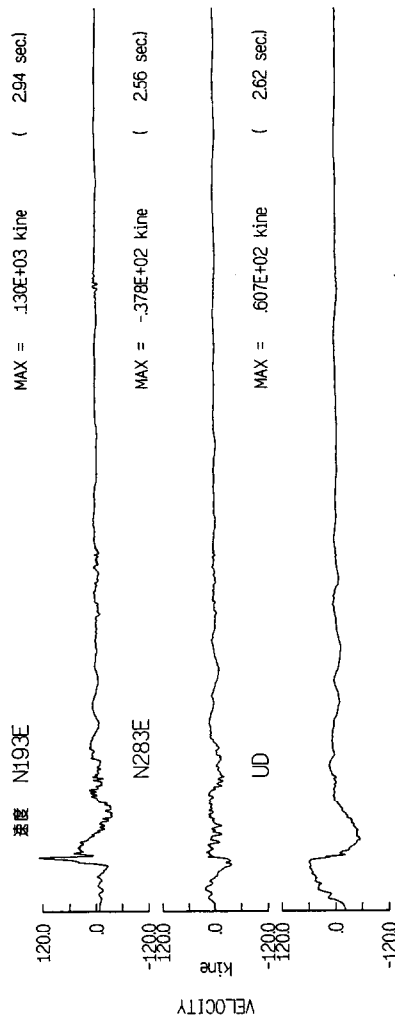
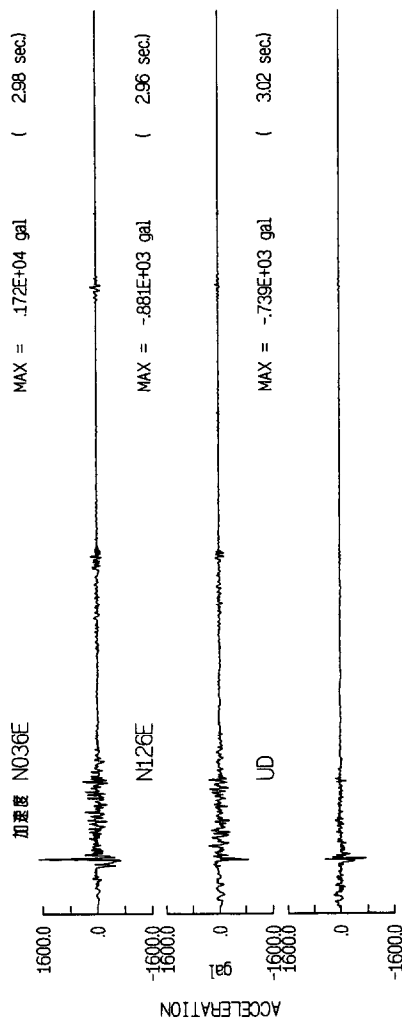
1992/04/25 Petrorolia

Mw=7 CPM

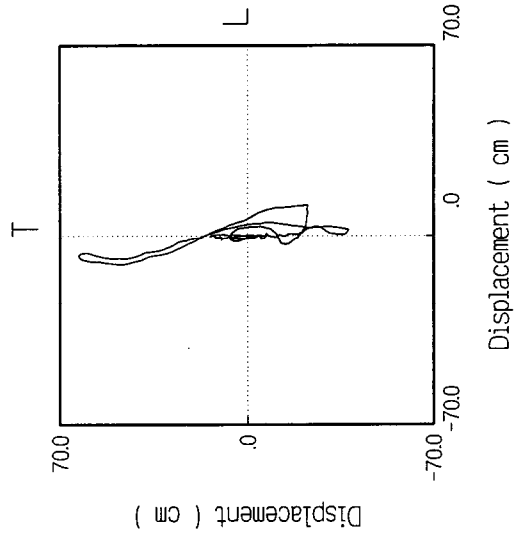
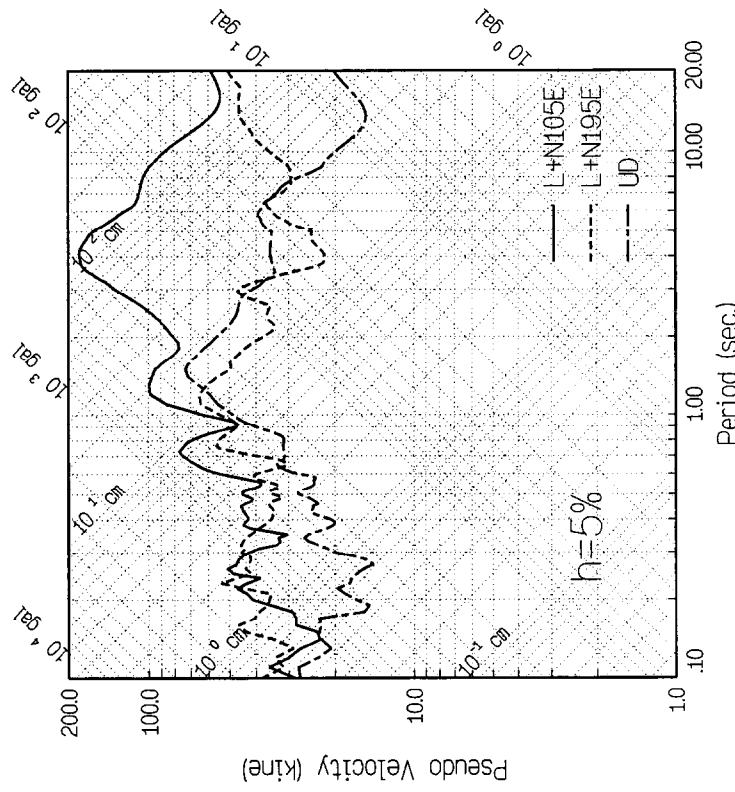
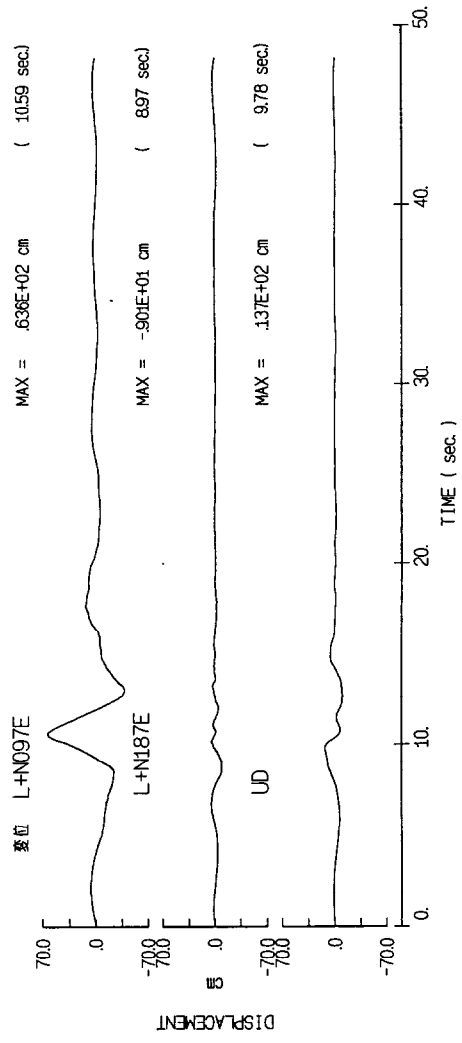
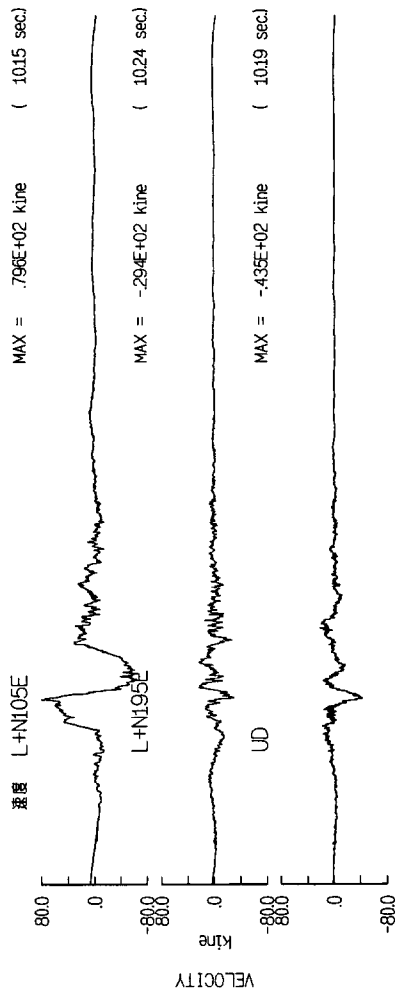
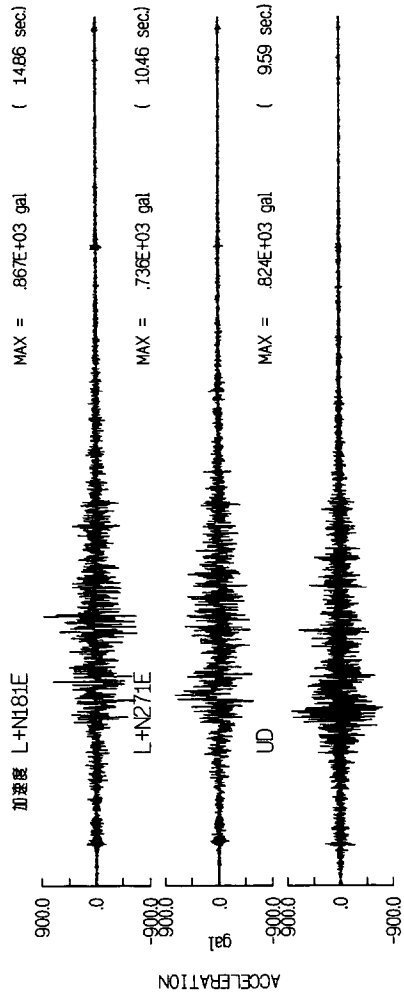


1992/04/25 Petrorolia

Mw=7 PTR

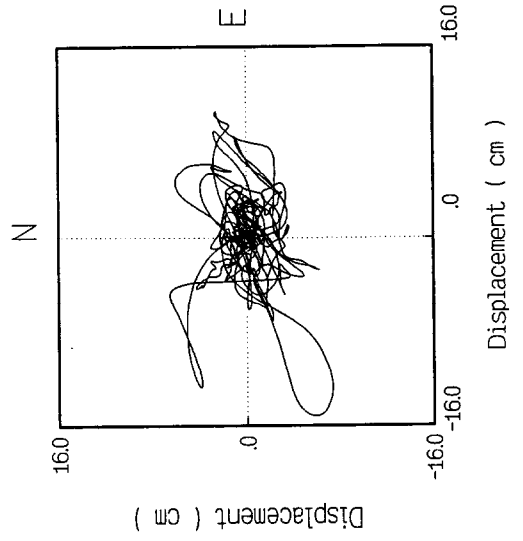
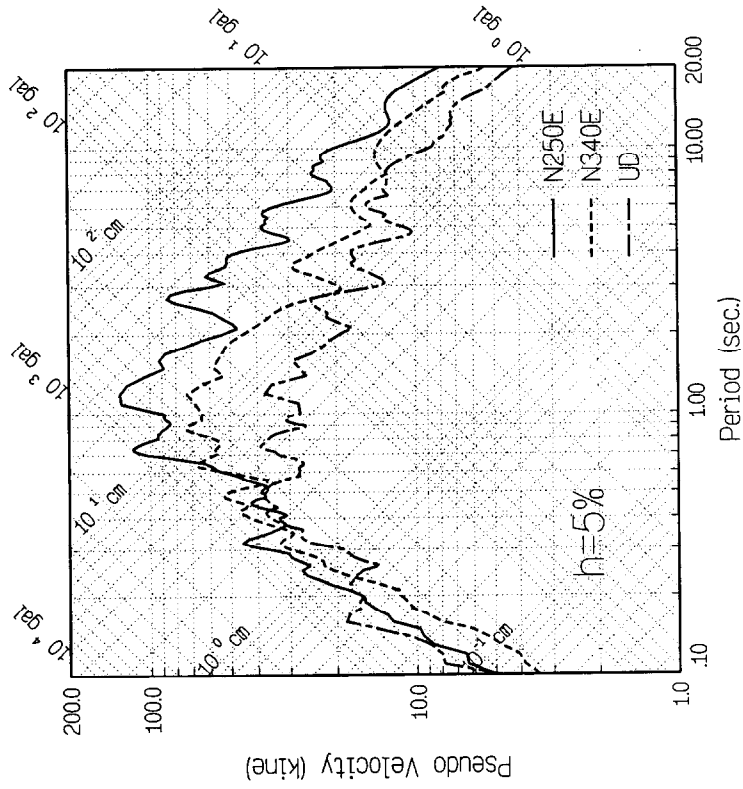
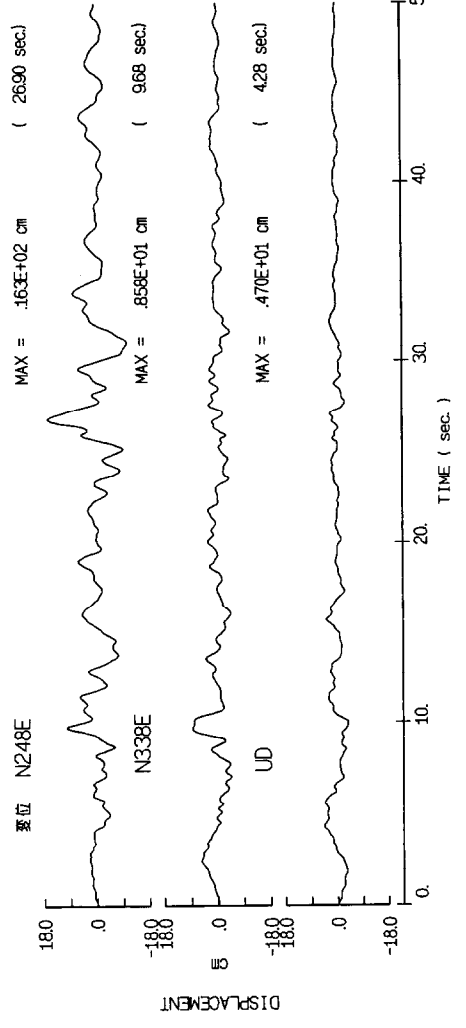
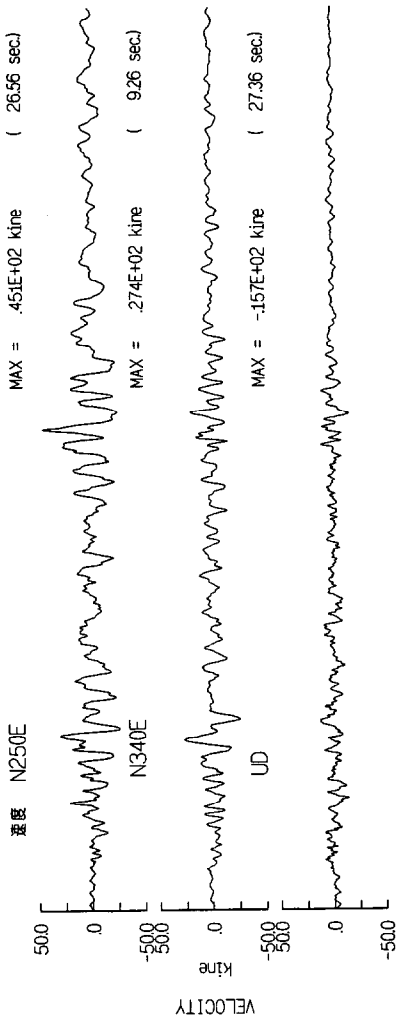
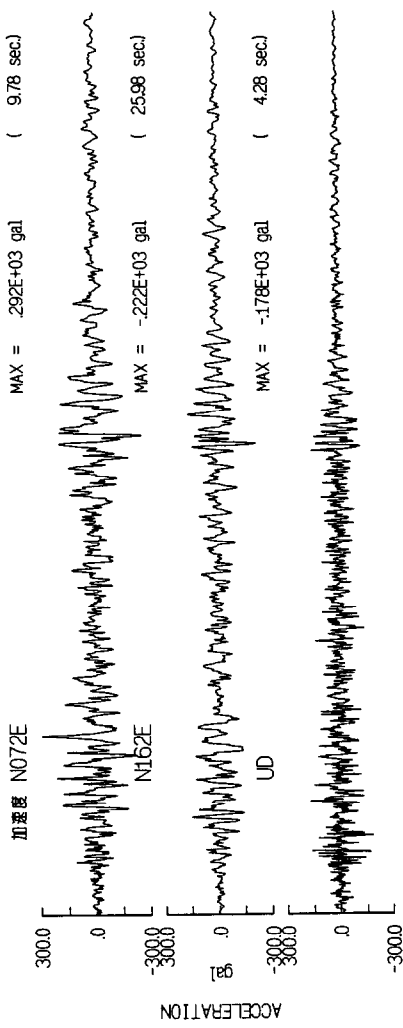


1992/06/28 Landers Mw=7.3 LUC



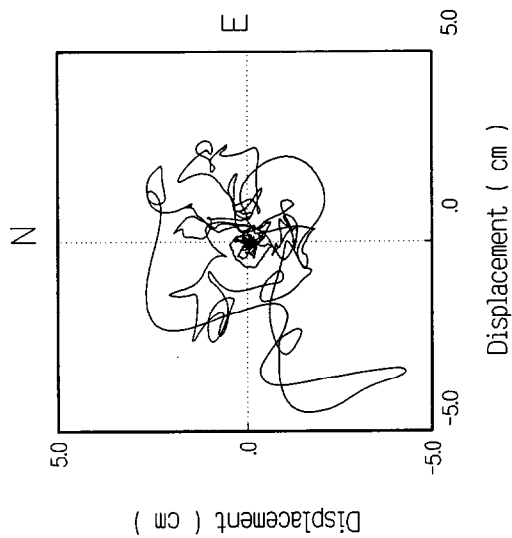
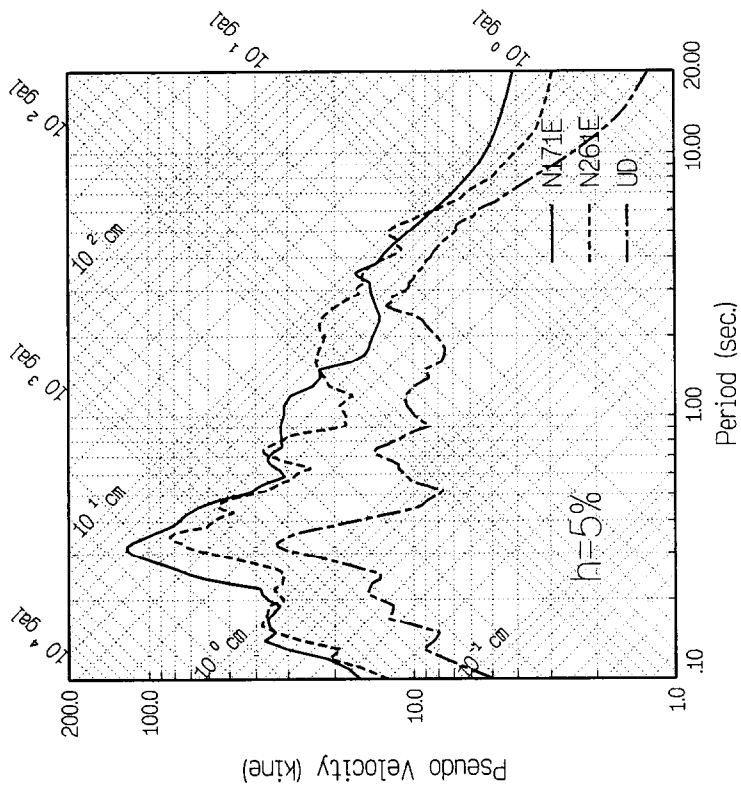
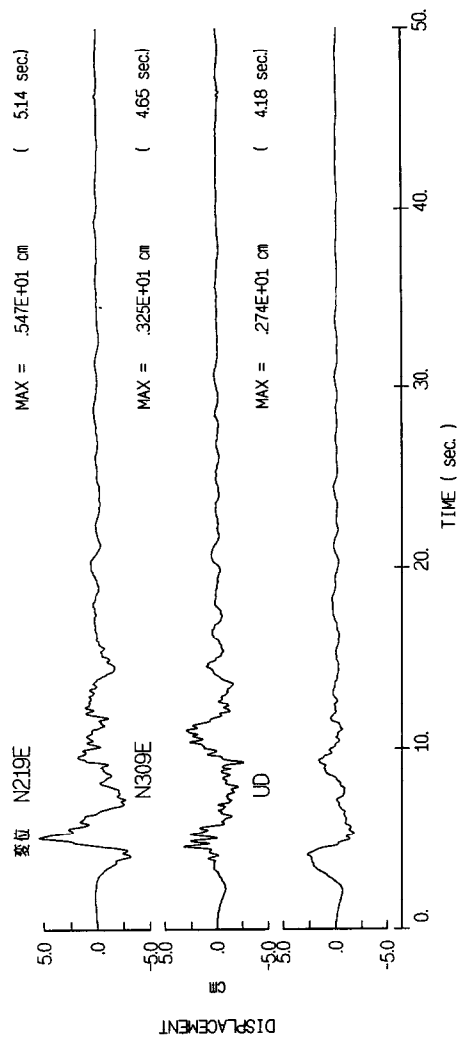
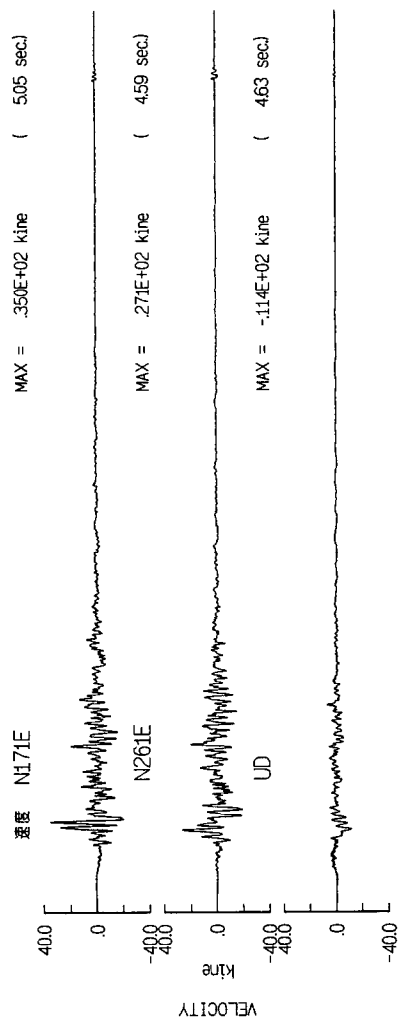
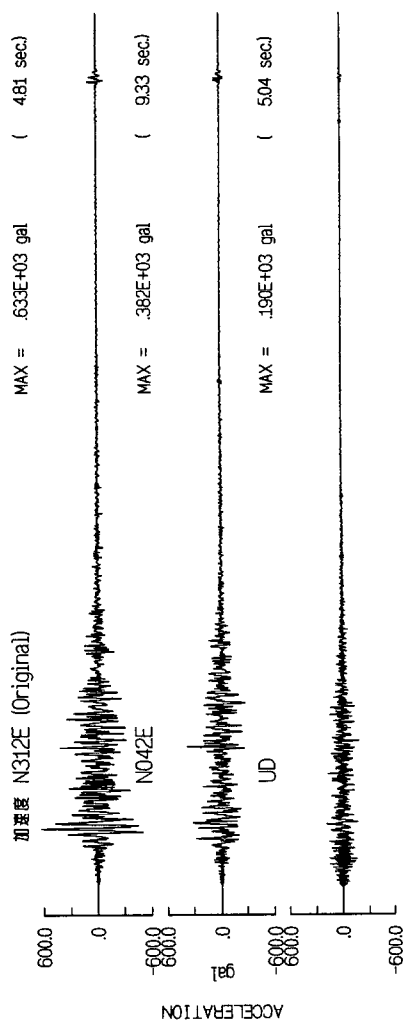
1992/06/28 Landers

Mw=7.3 JSH



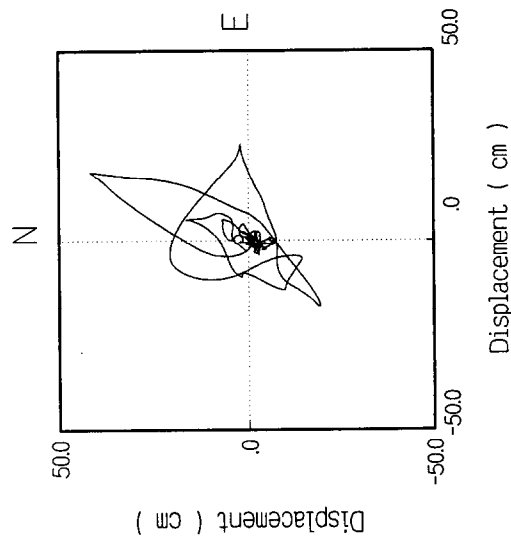
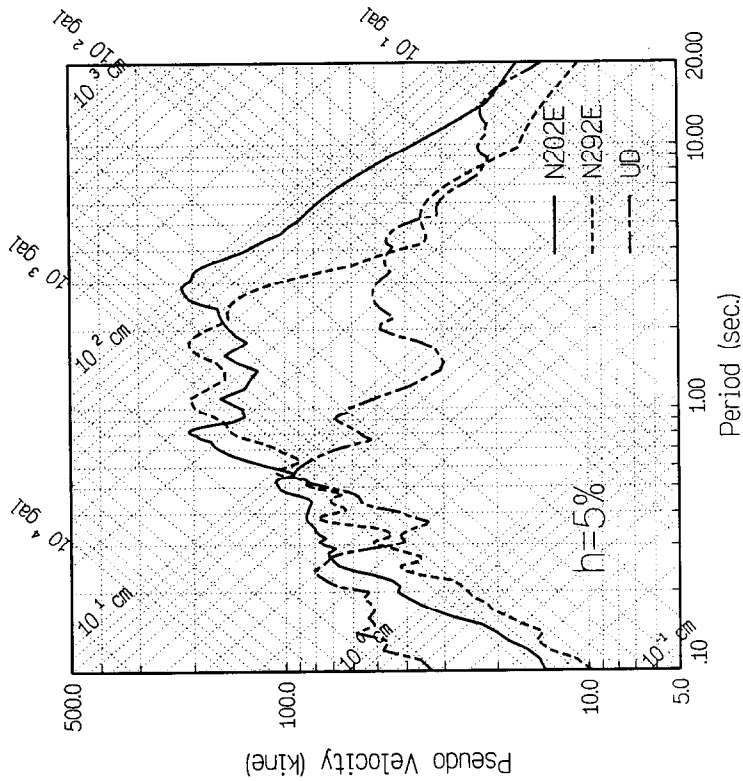
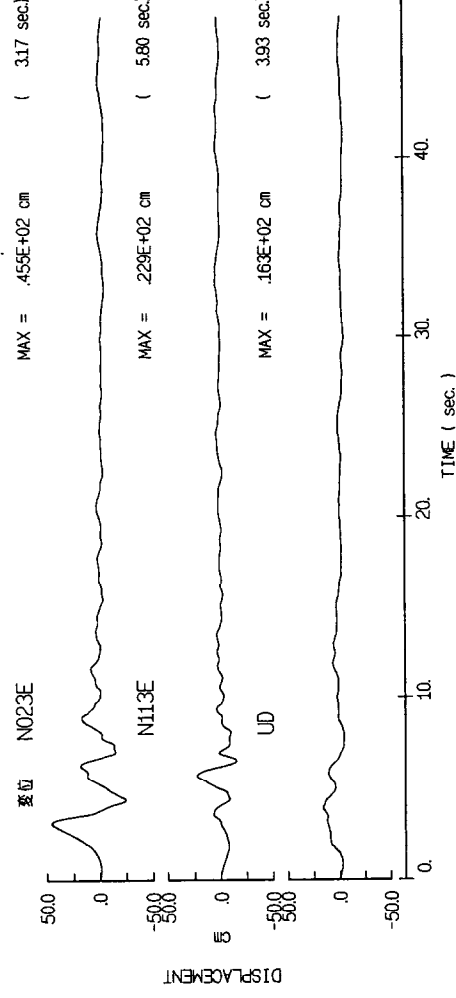
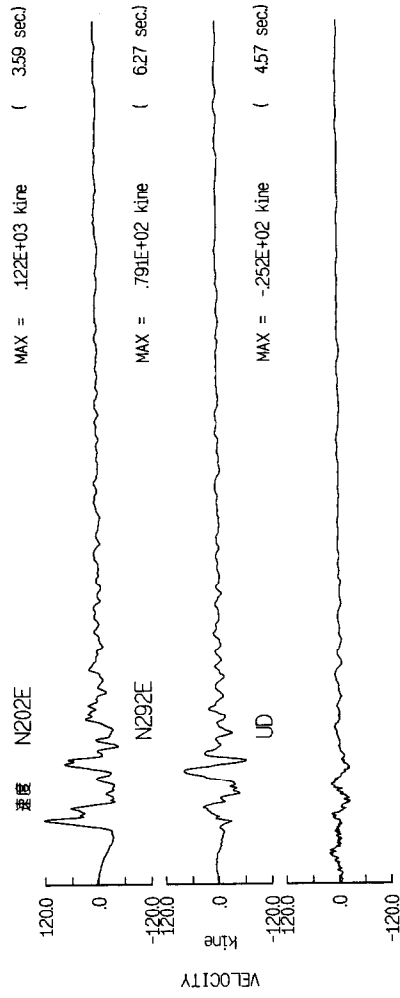
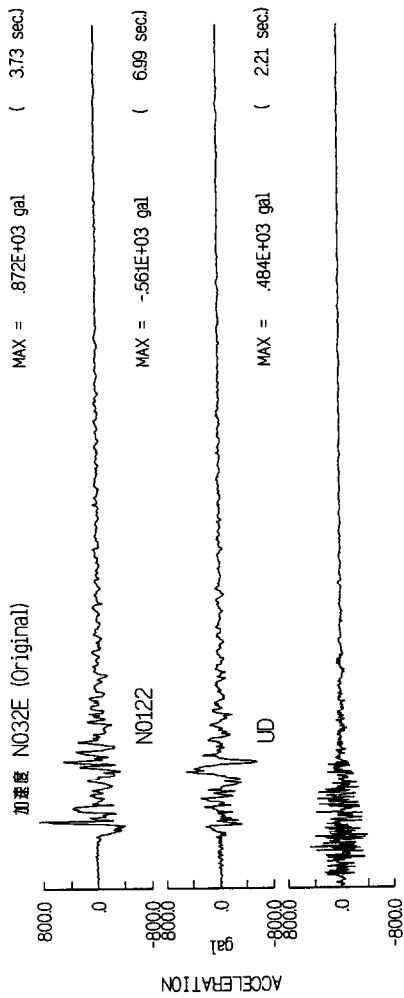
1992/06/28 Big Bear

Mw=6.5 BBL



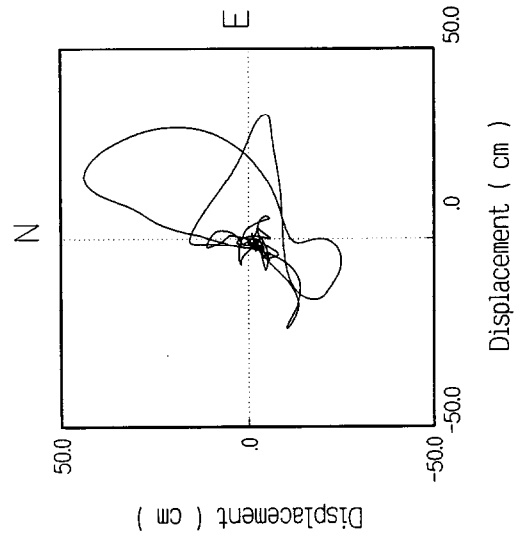
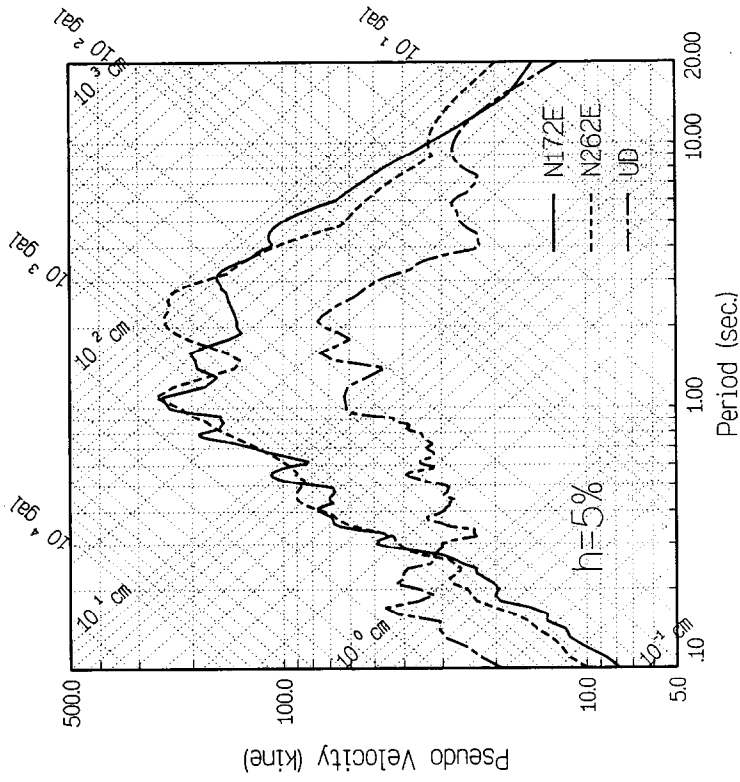
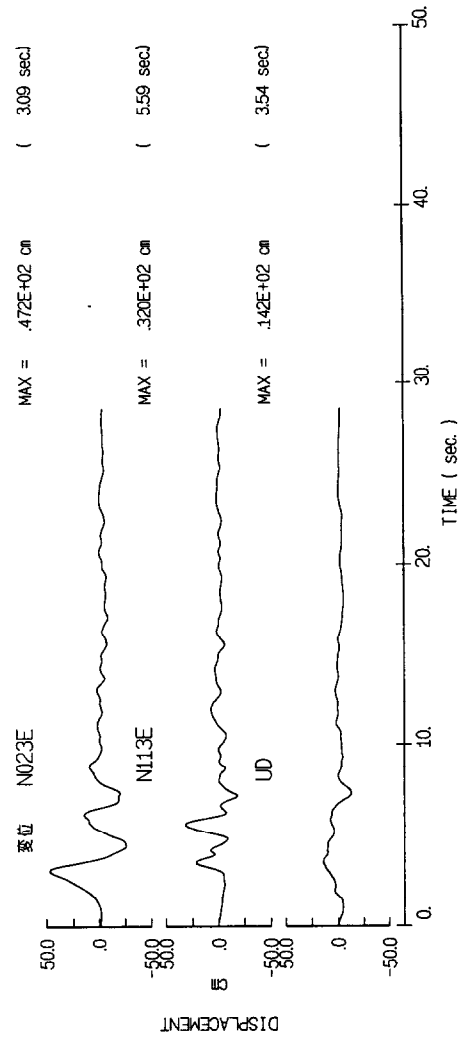
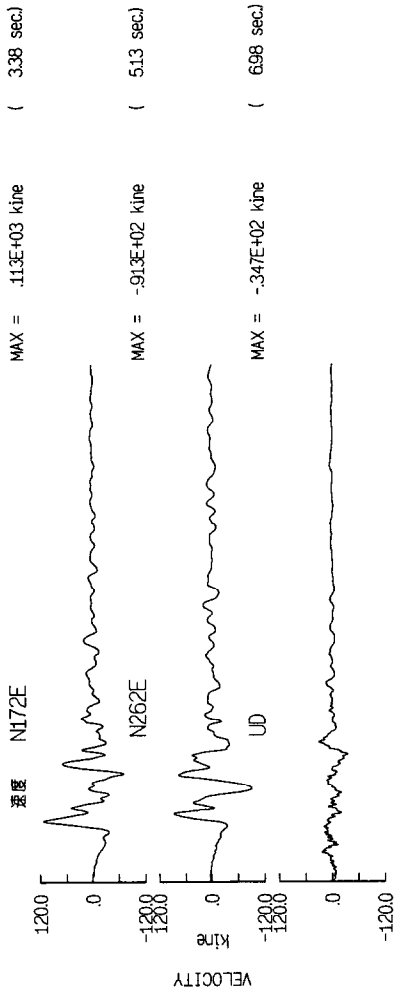
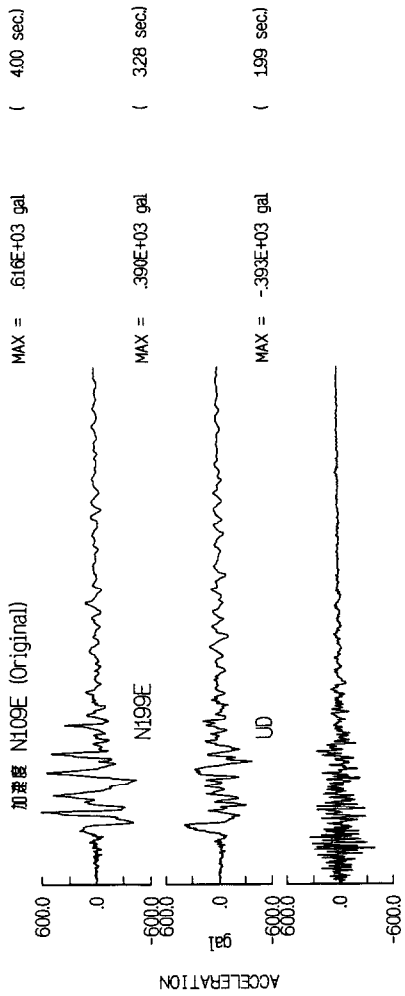
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 SCS



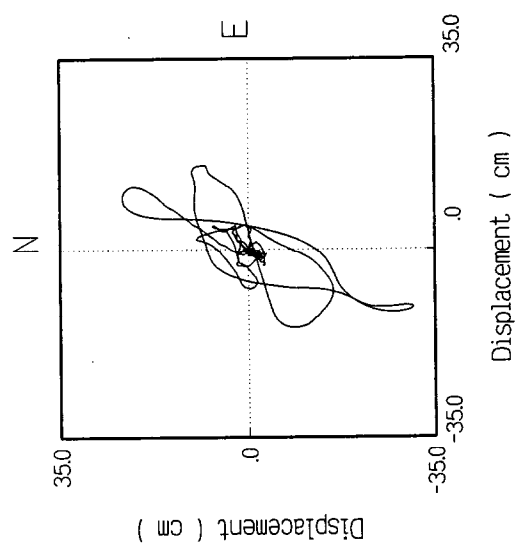
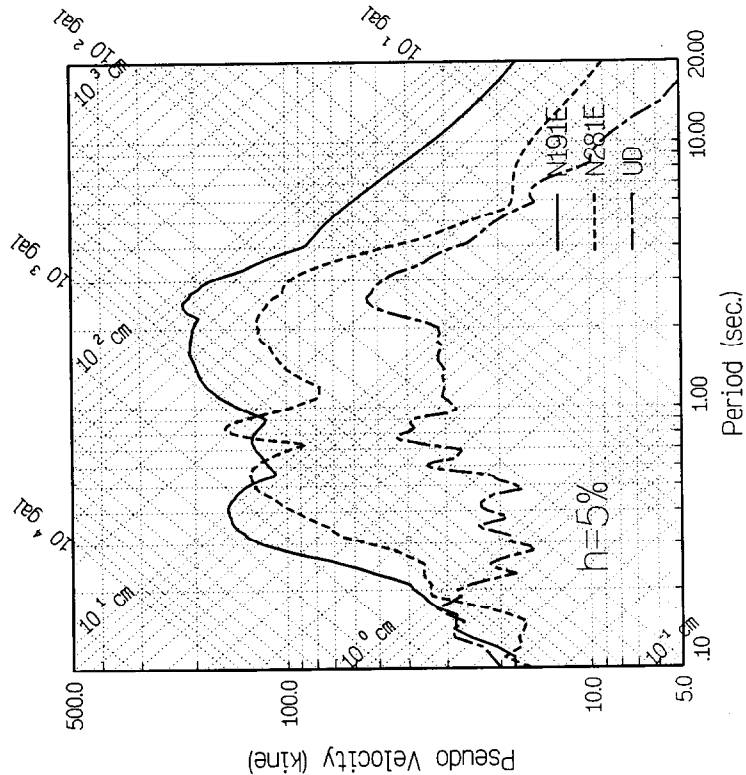
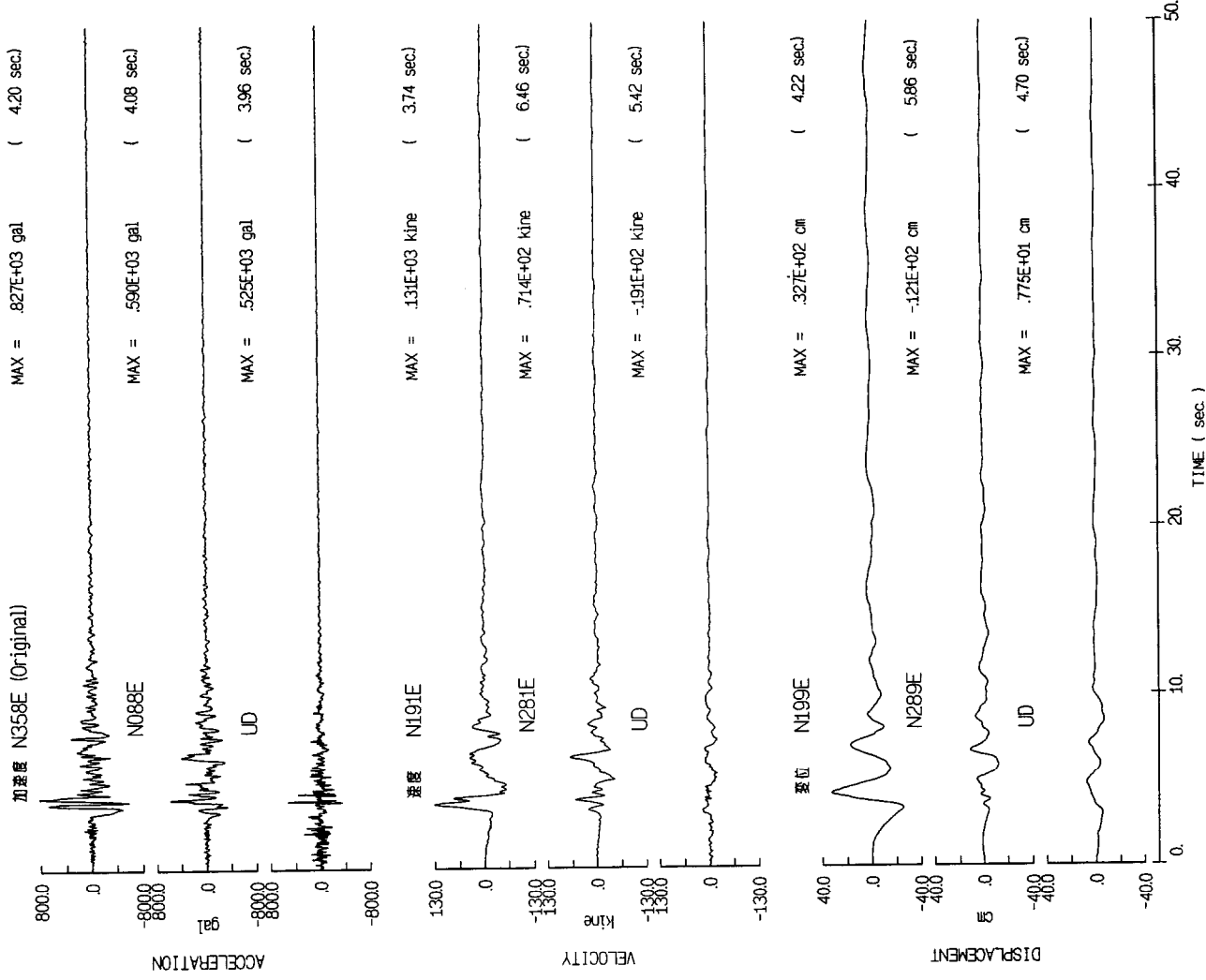
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 JFP



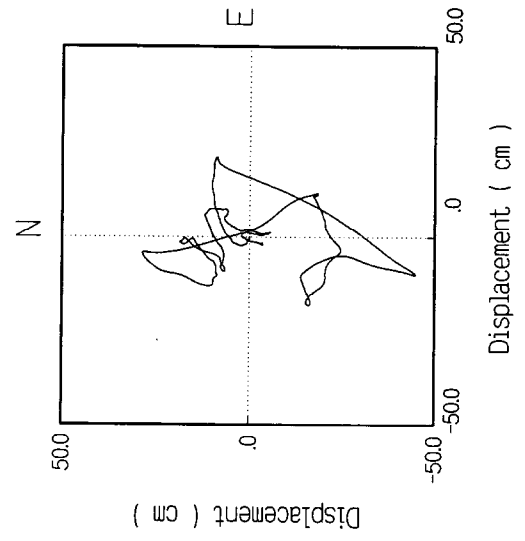
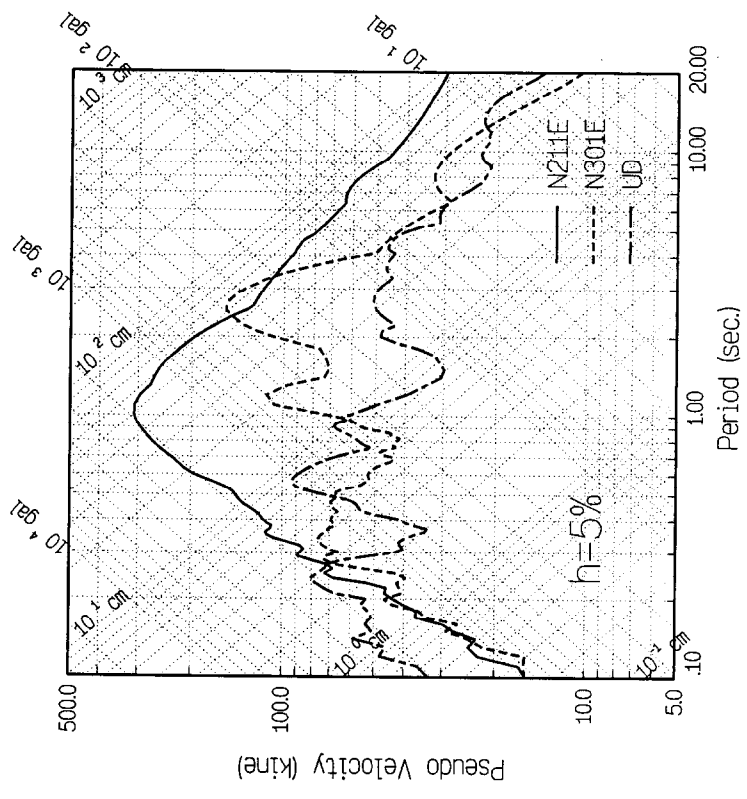
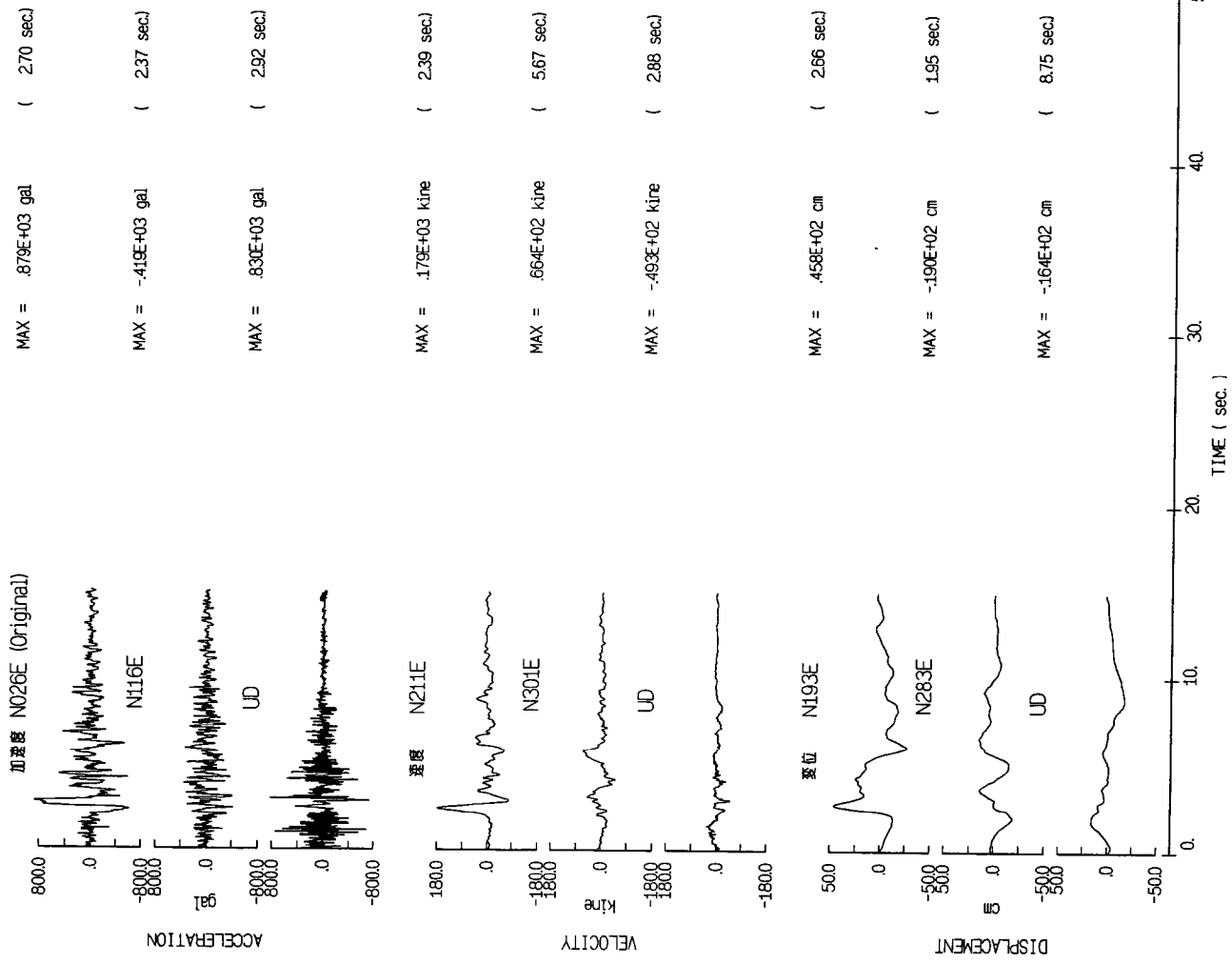
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 SYL



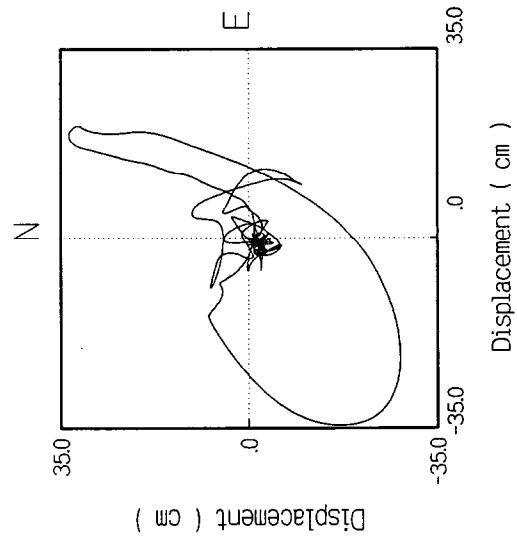
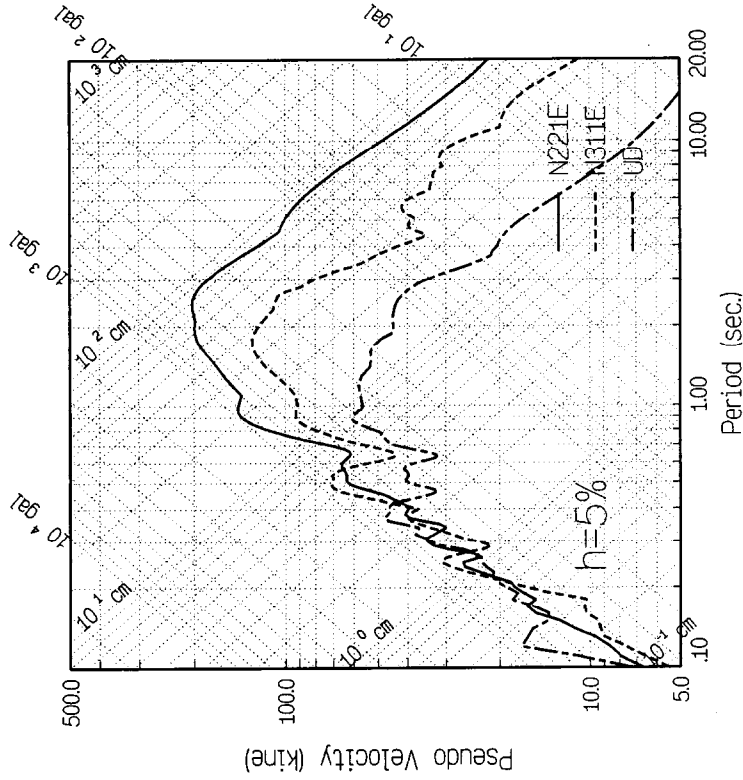
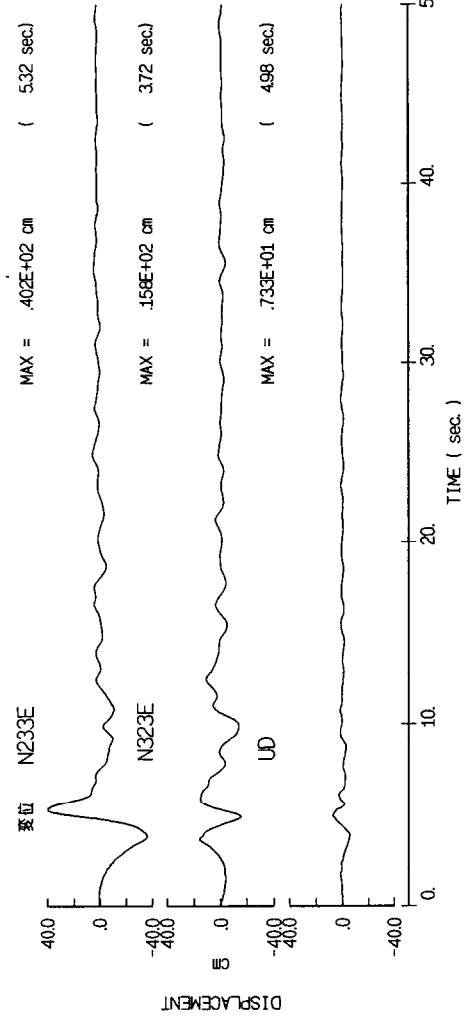
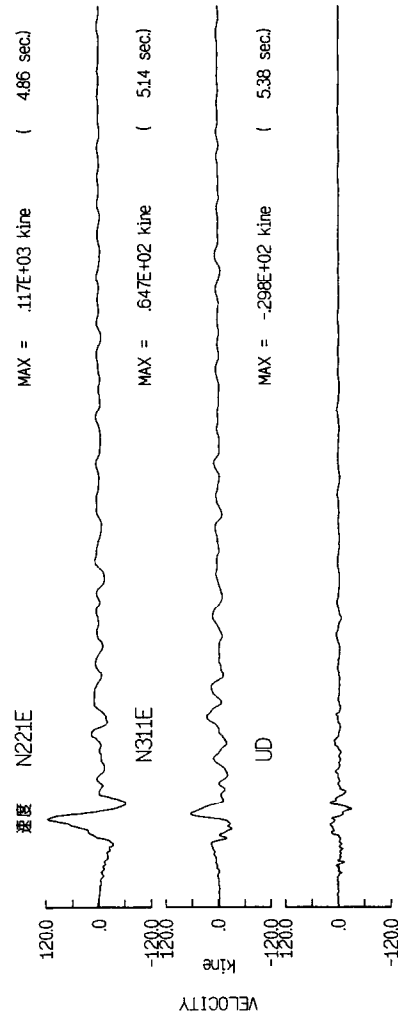
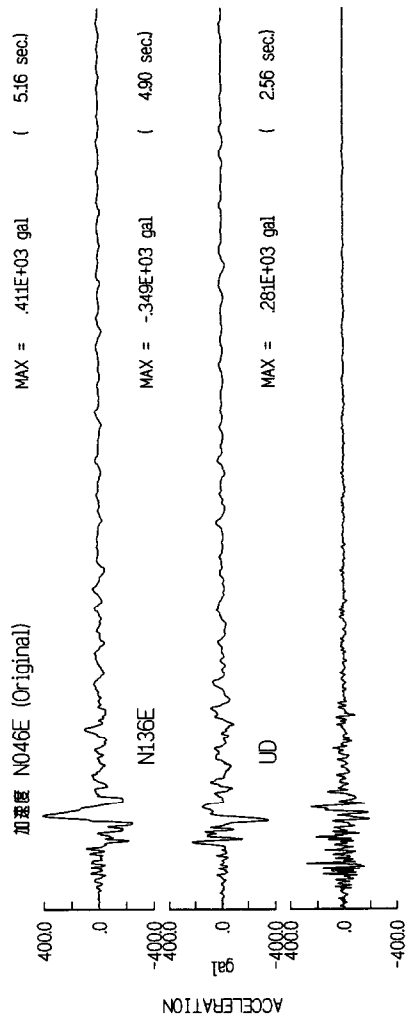
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 RRS

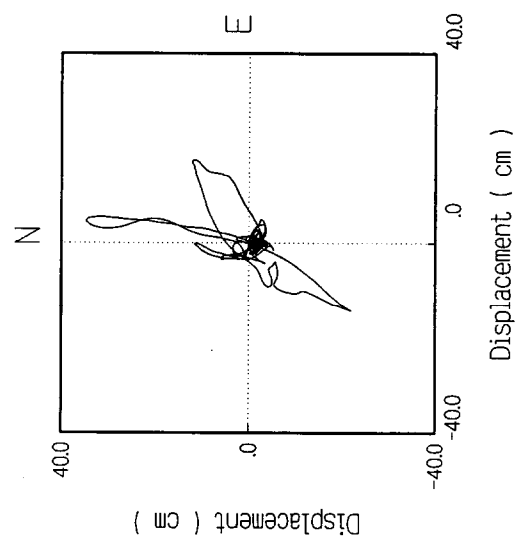
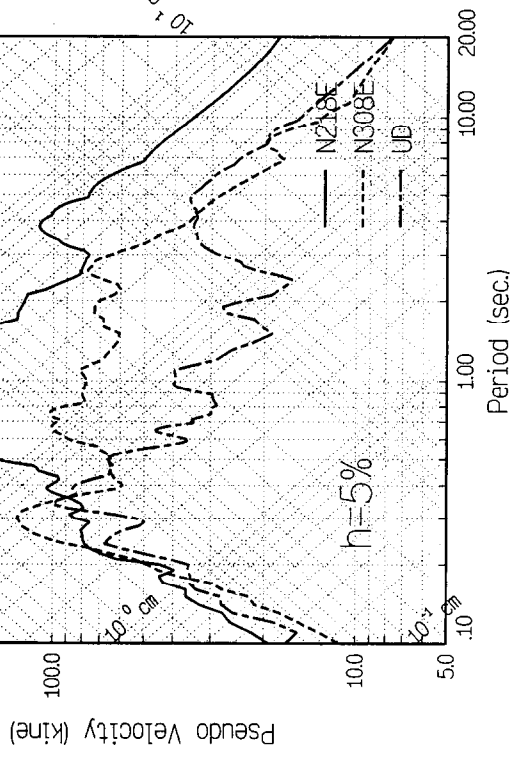
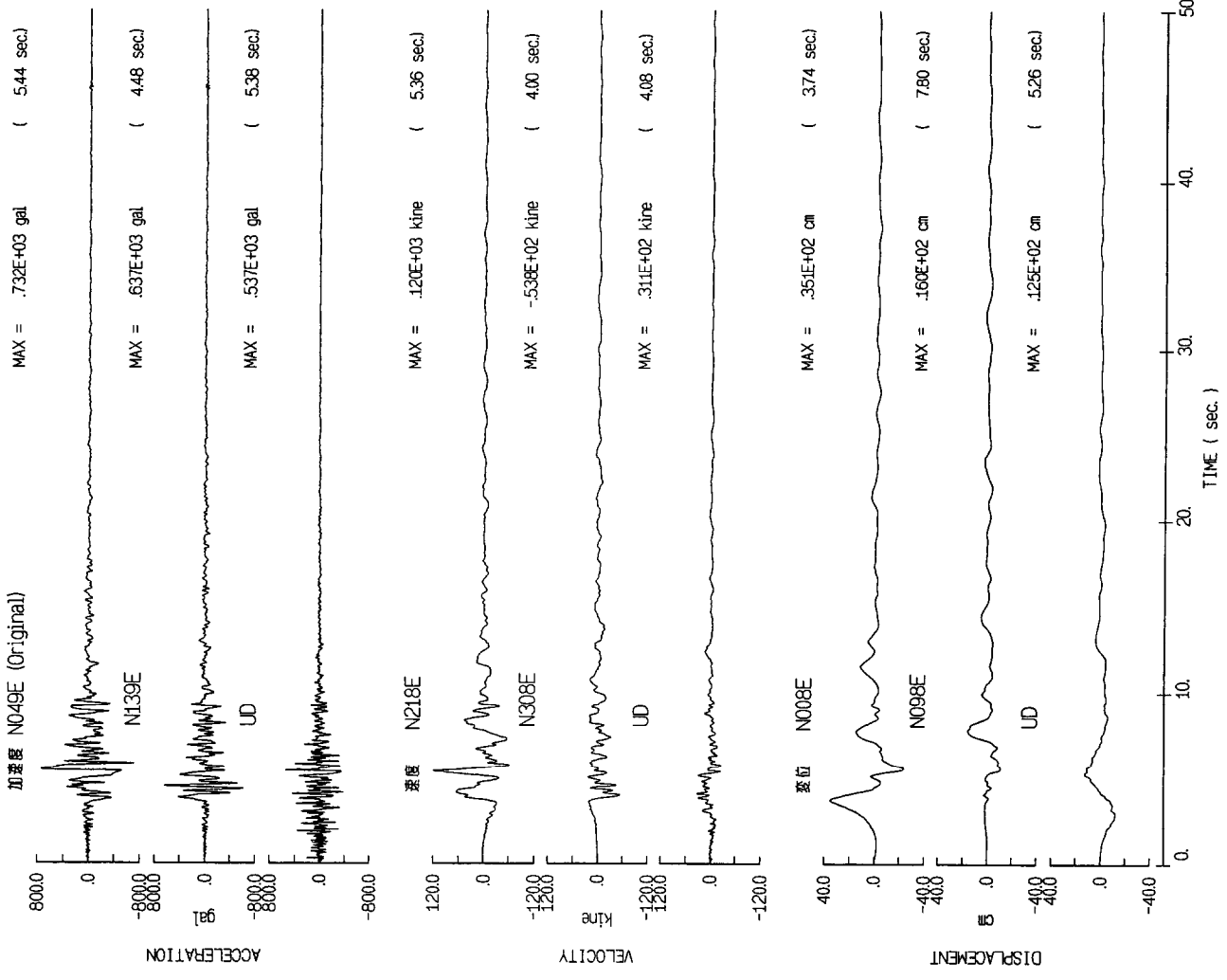


1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 U56

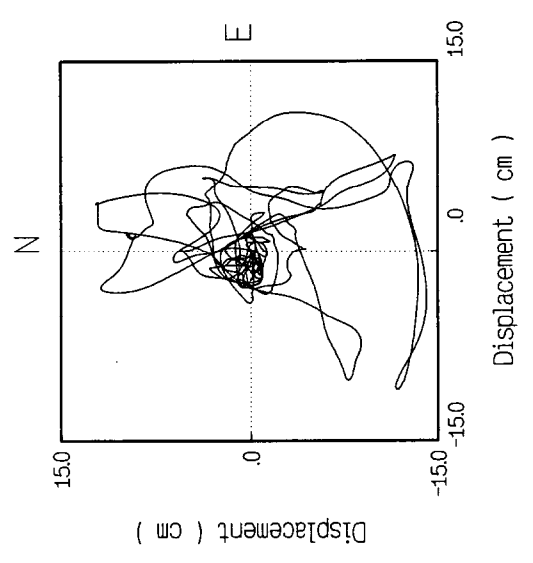
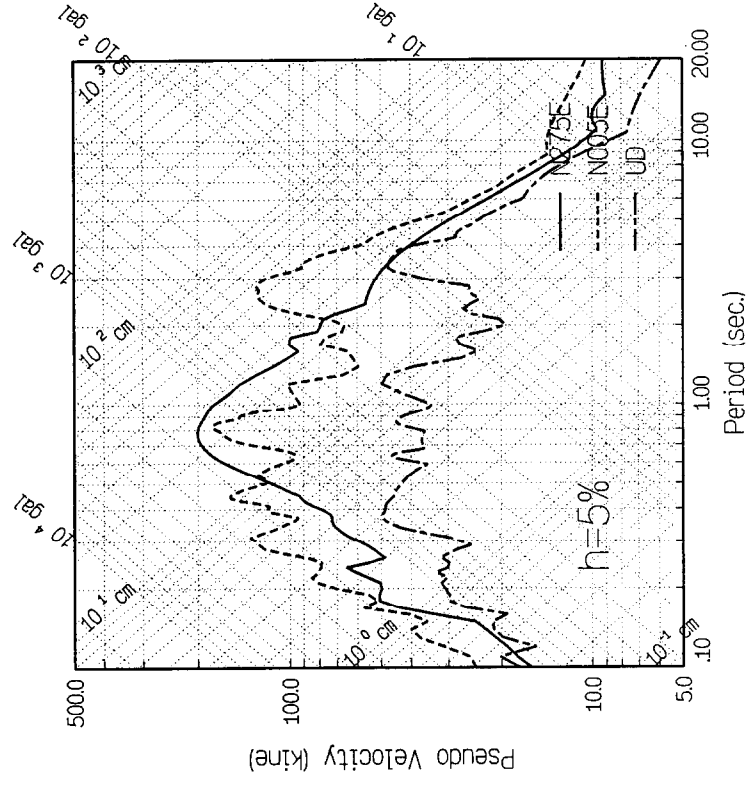
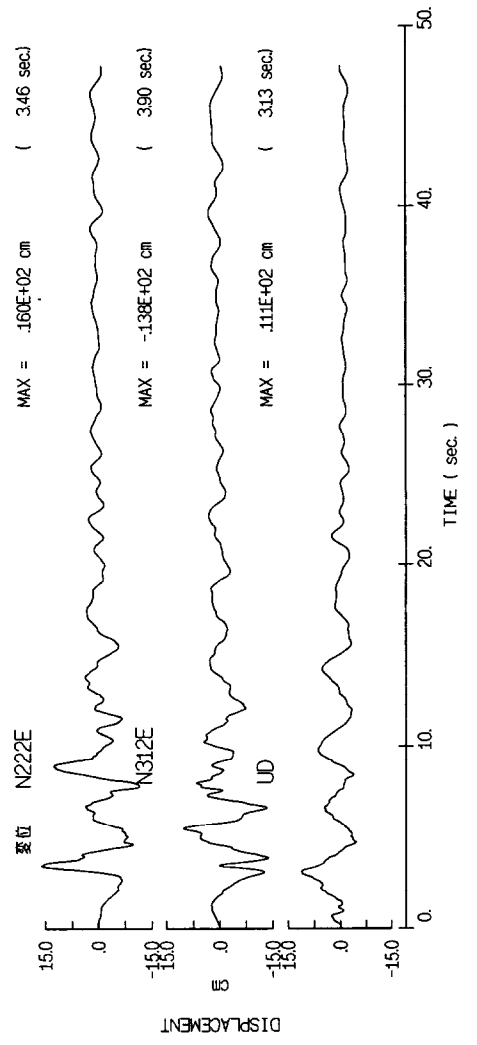
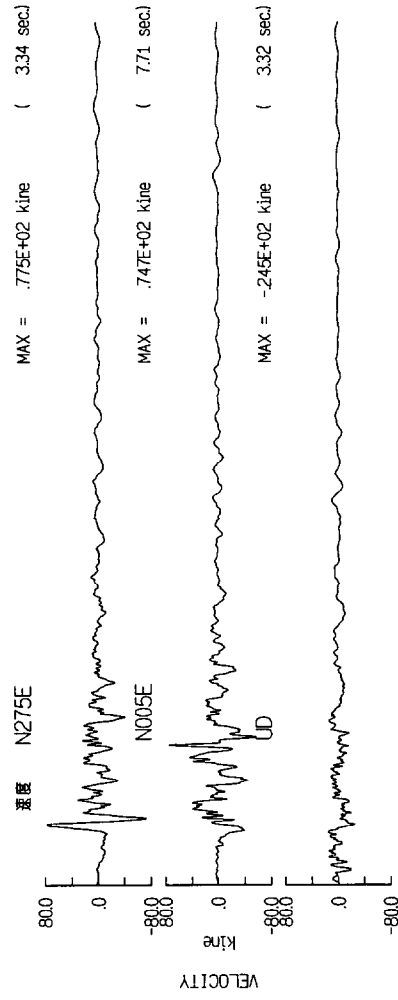
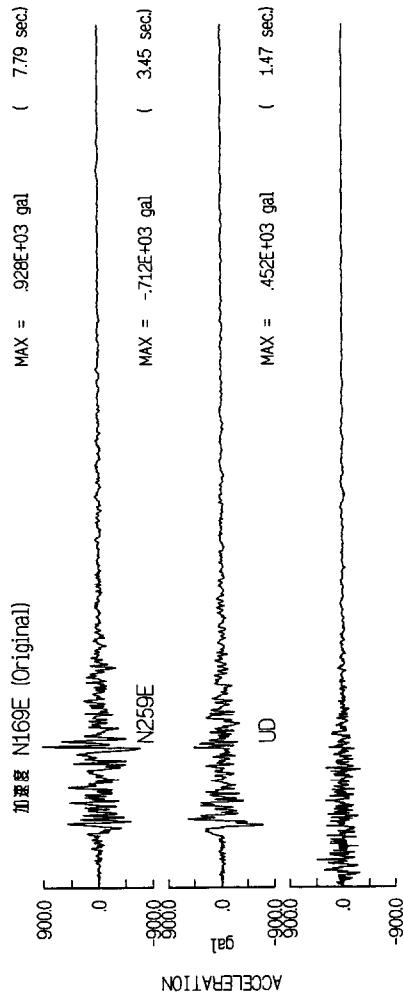


1994/01/17 Northridge Mw=6.7 NHL

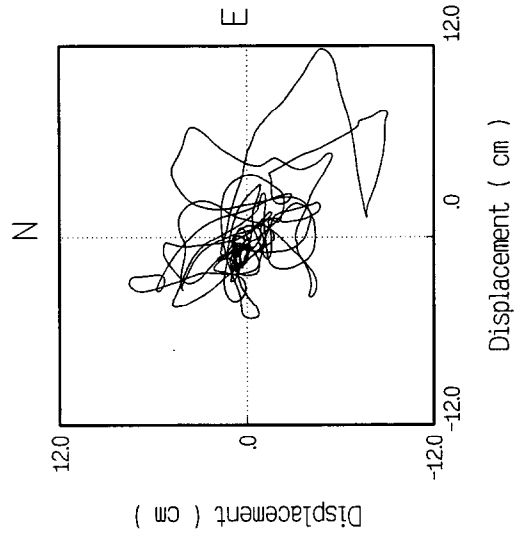
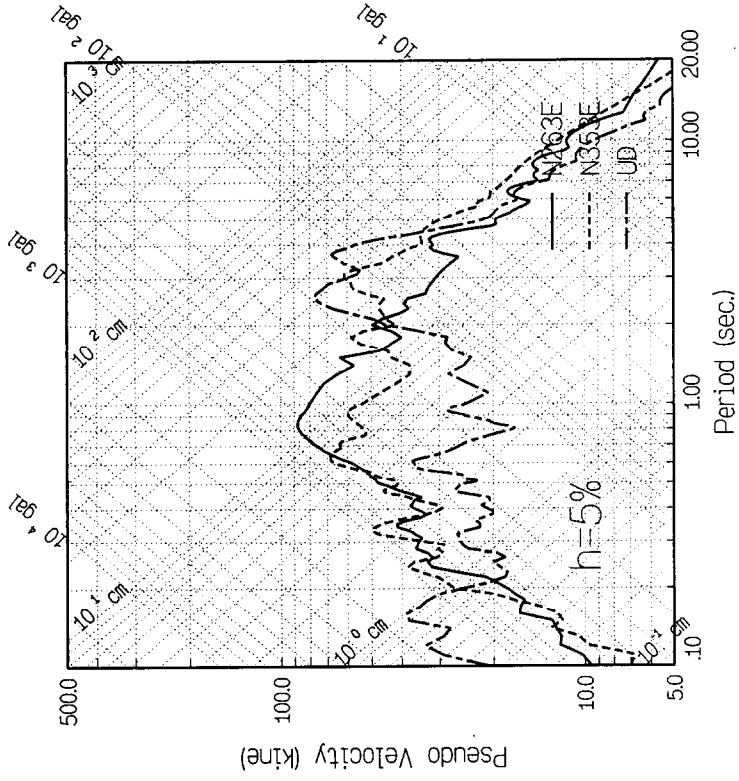
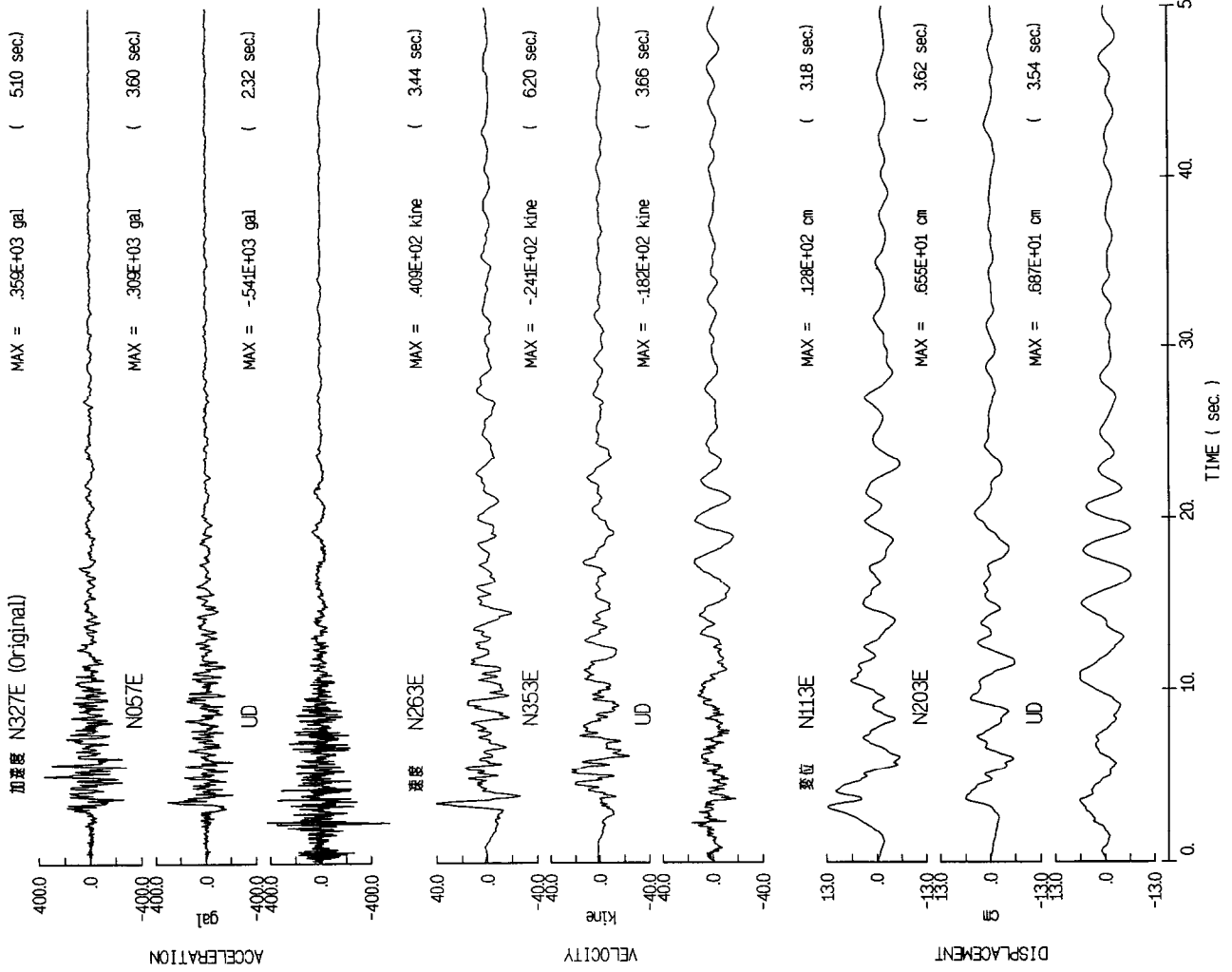


1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 SVA

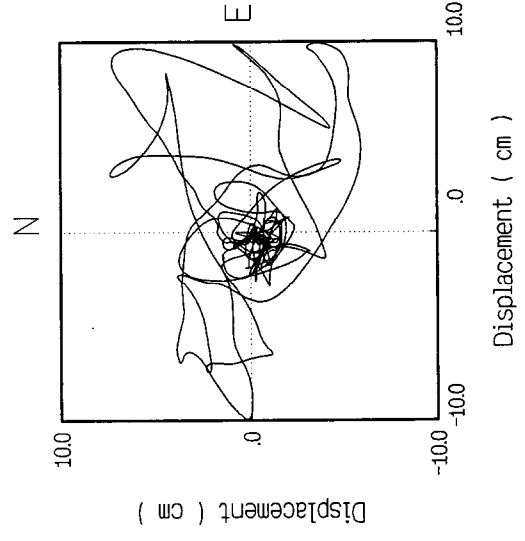
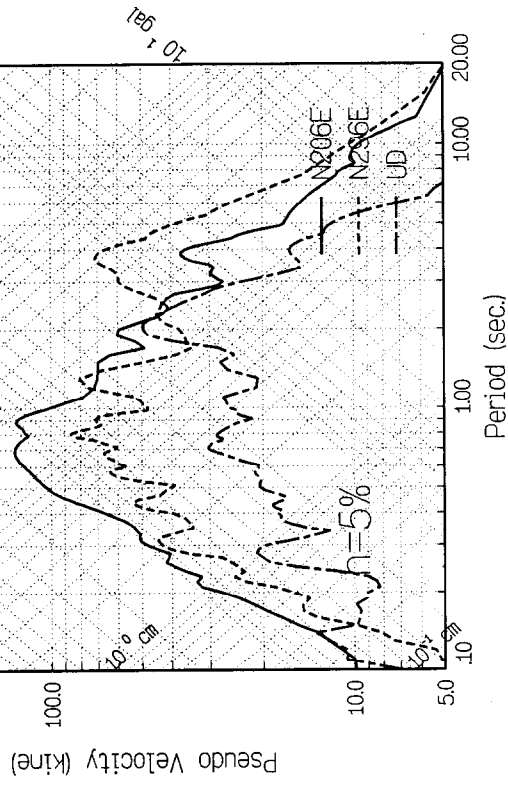
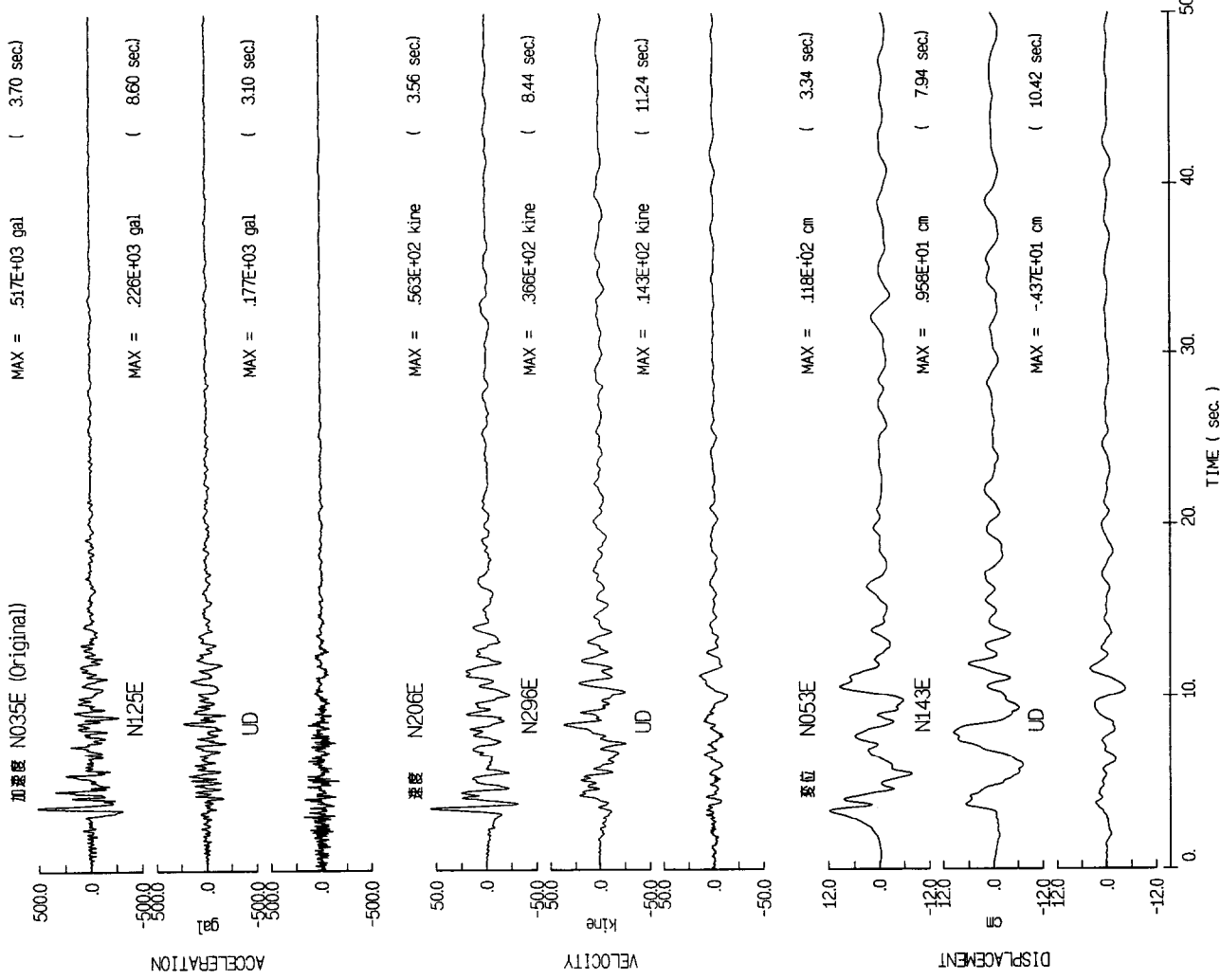


1994/01/17 Northridge Mw=6.7 ARL



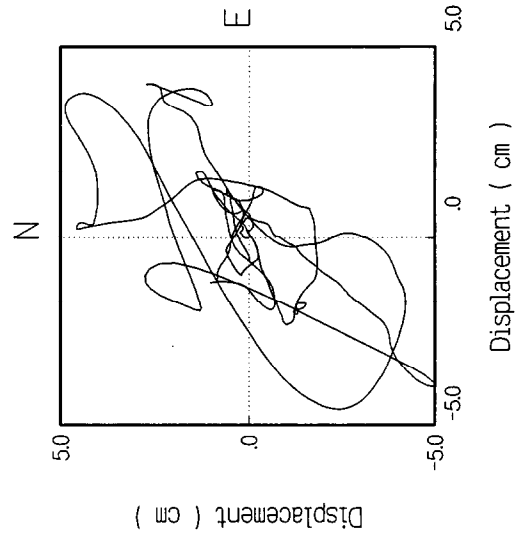
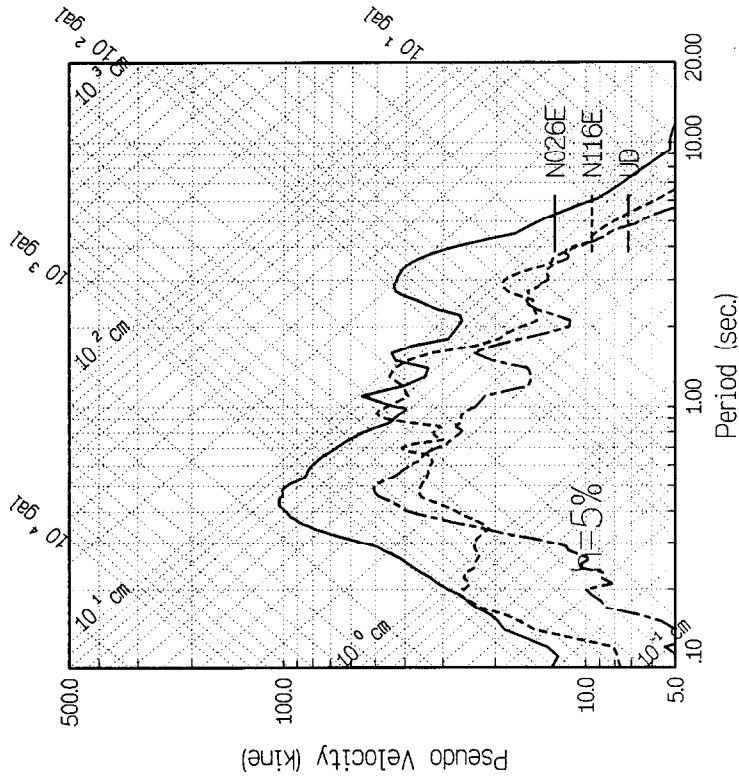
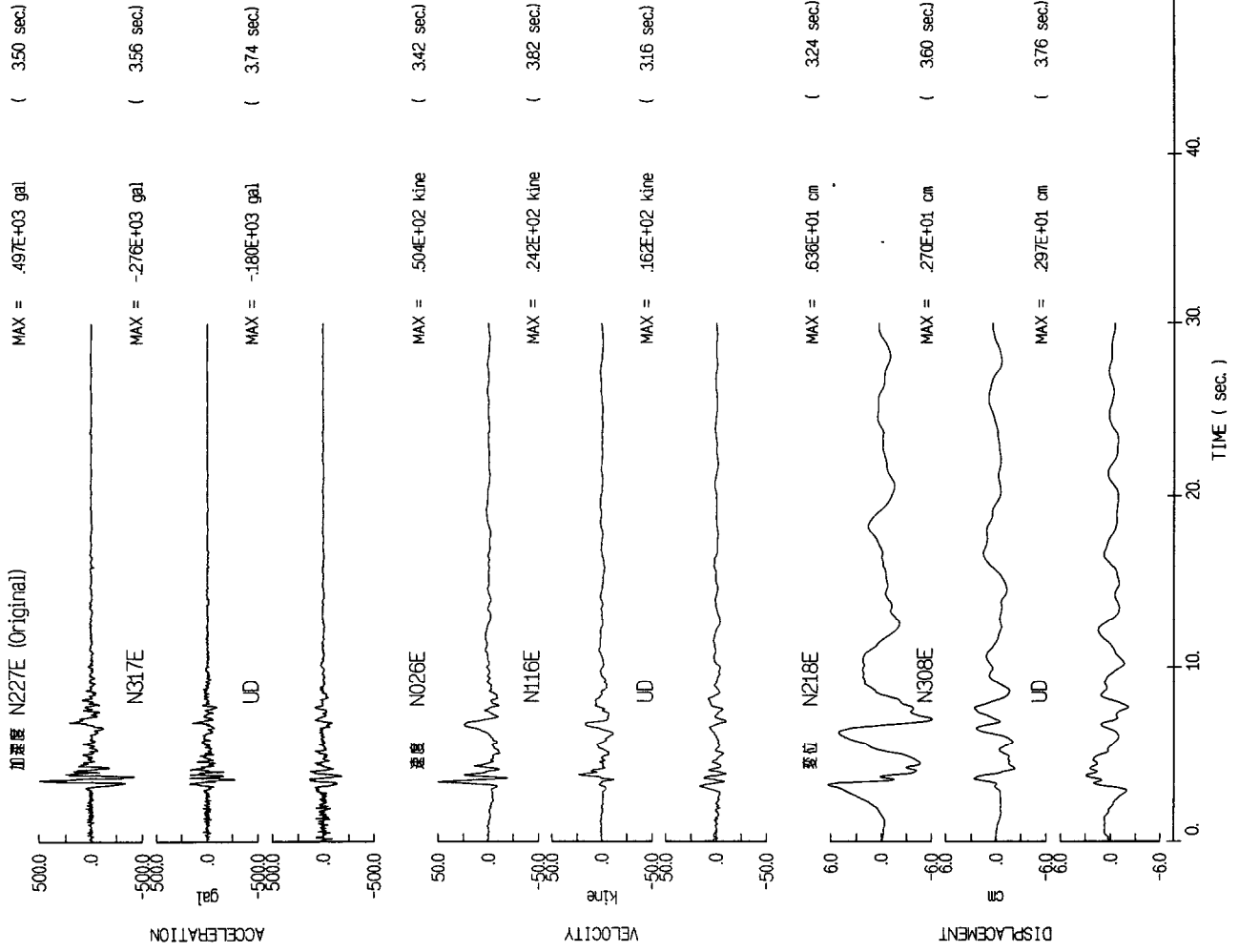
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 PKC



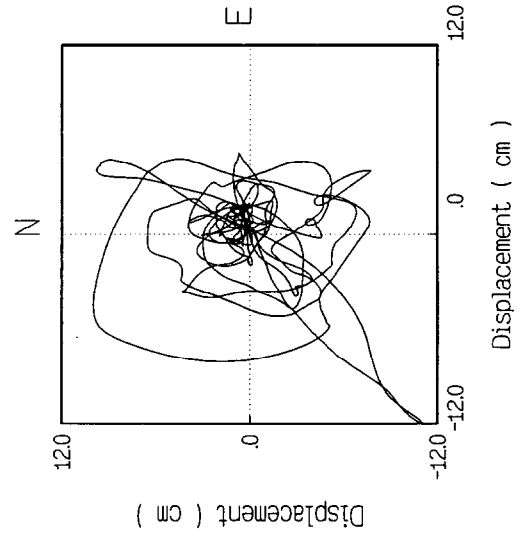
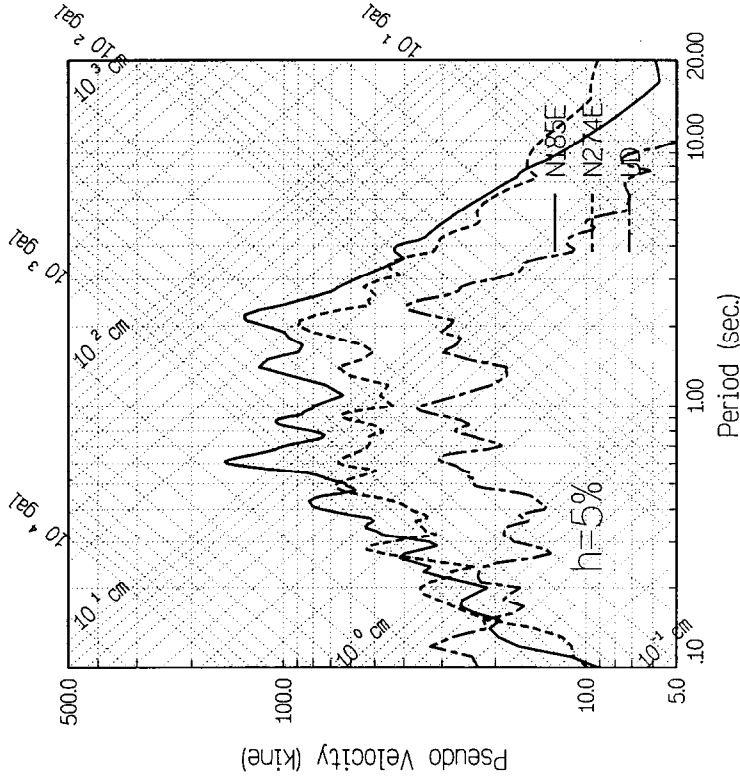
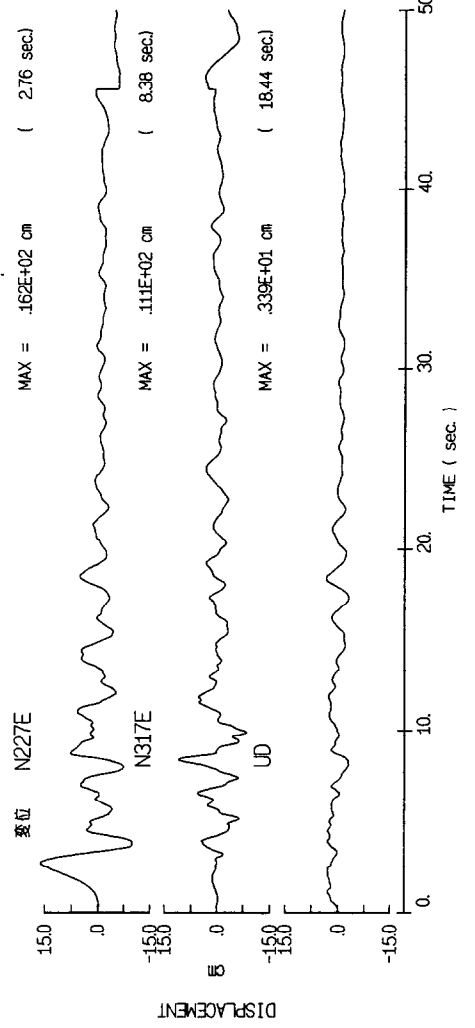
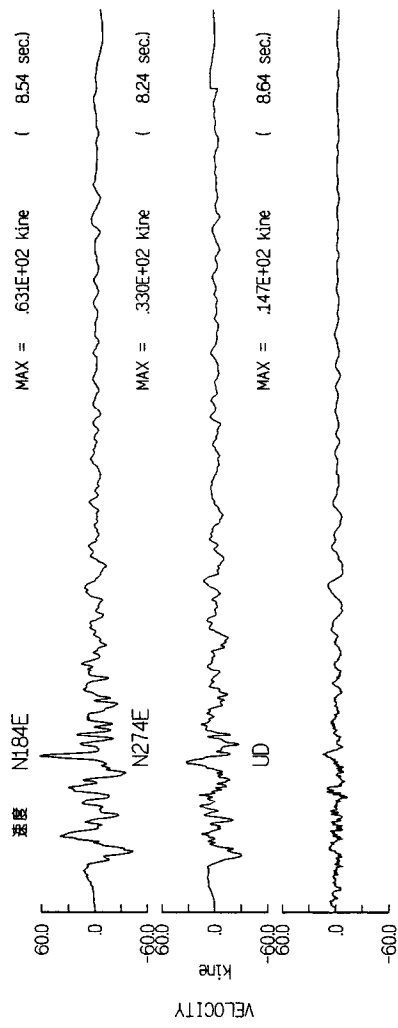
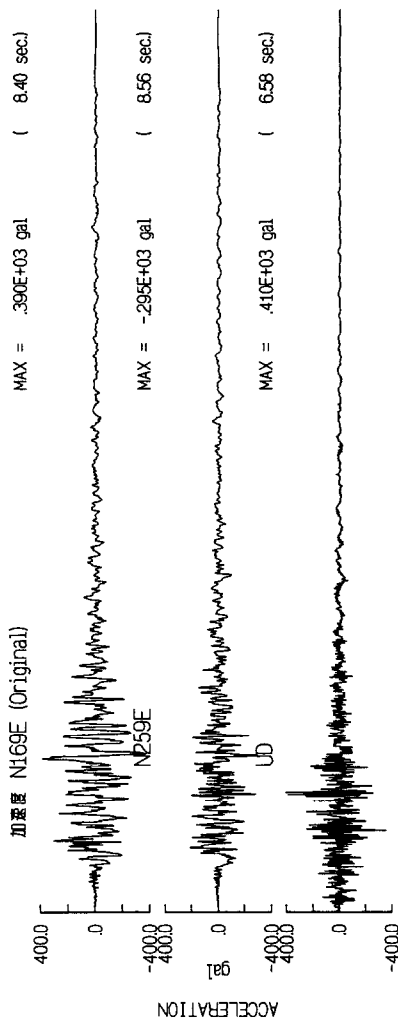
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 PDM



1994/01/17 Northridge

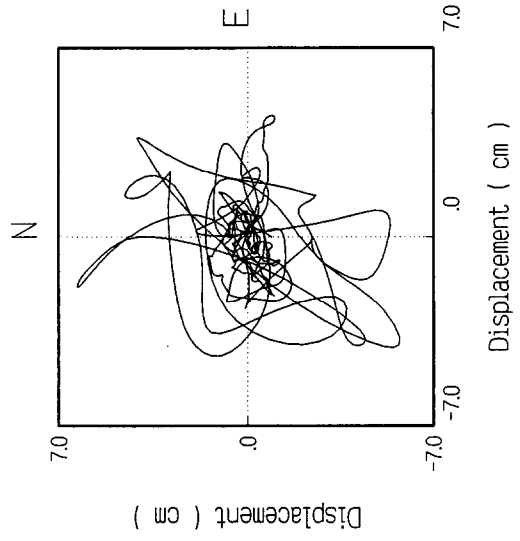
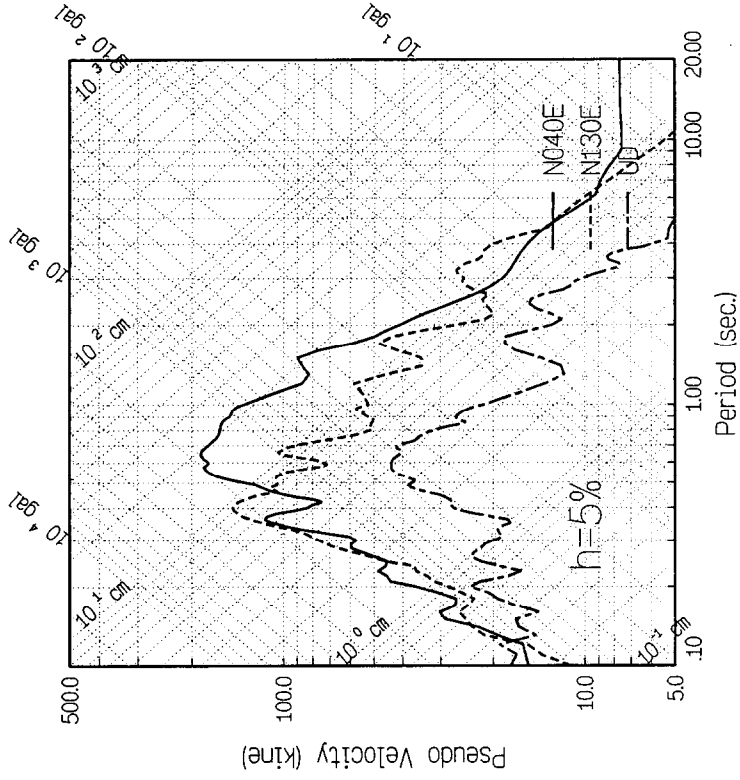
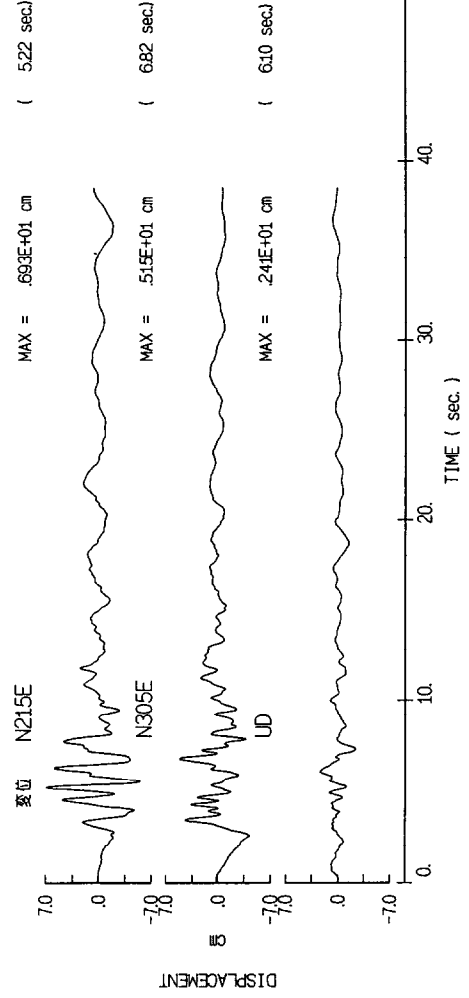
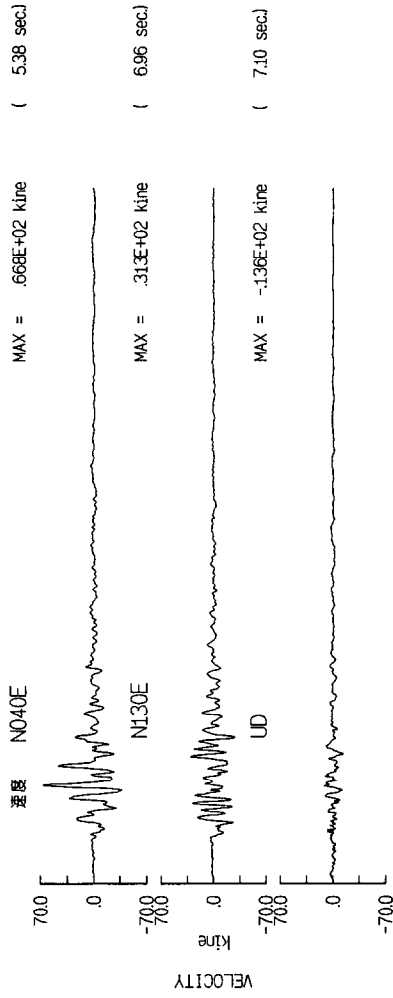
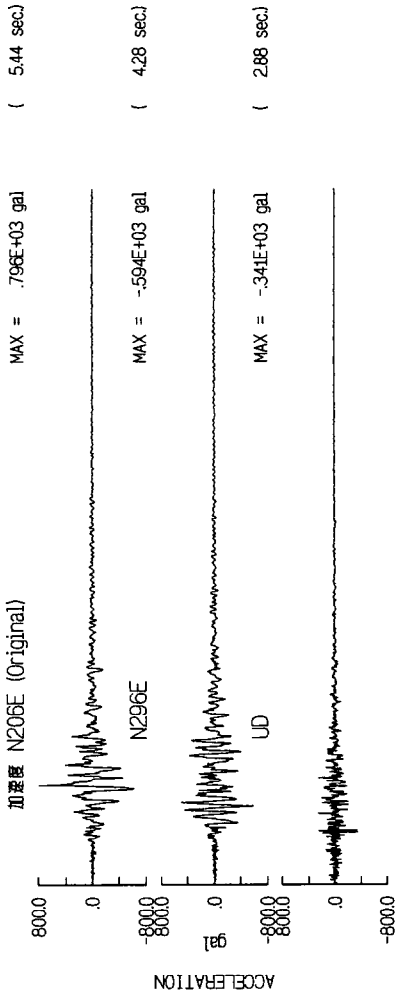
Mw=6.7 U53



1994/01/17 Northridge

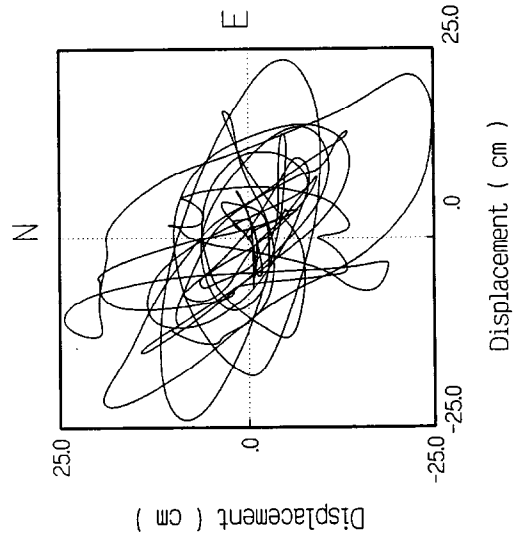
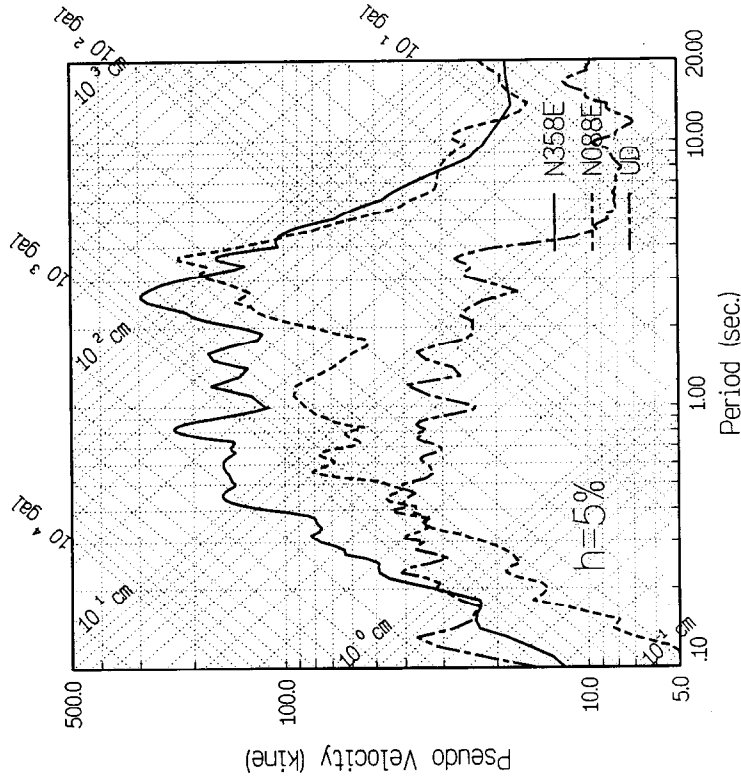
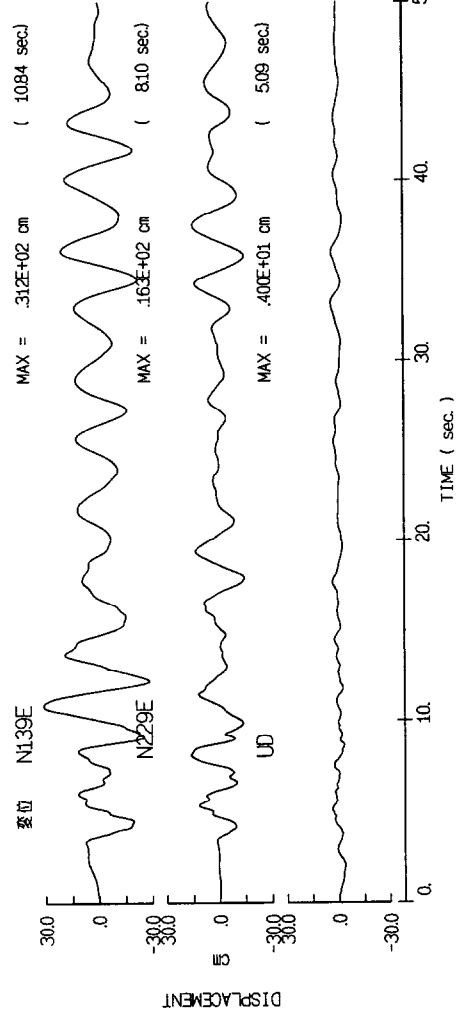
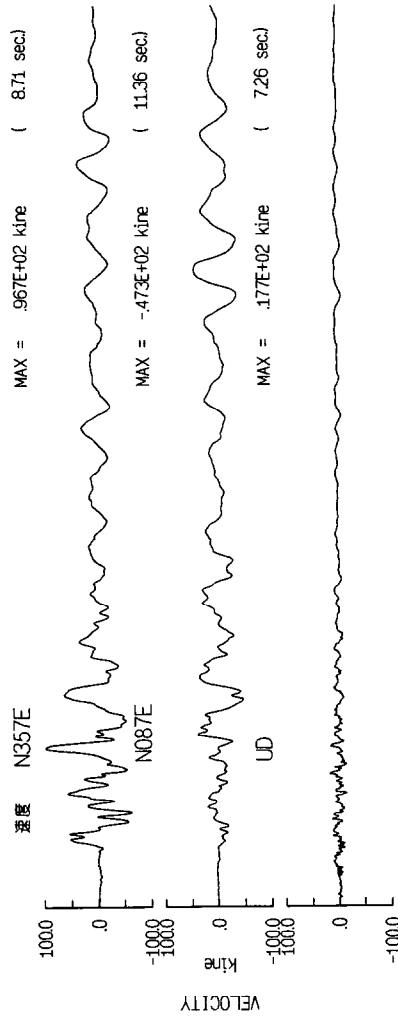
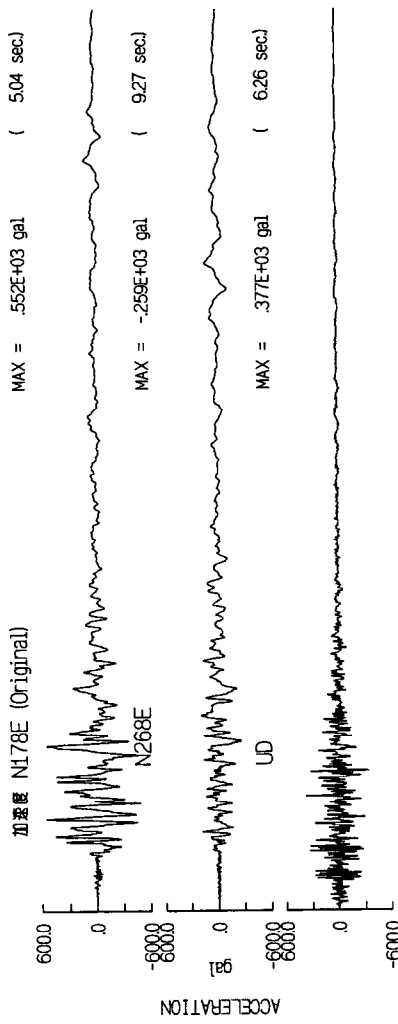
Mw=6.7

U55



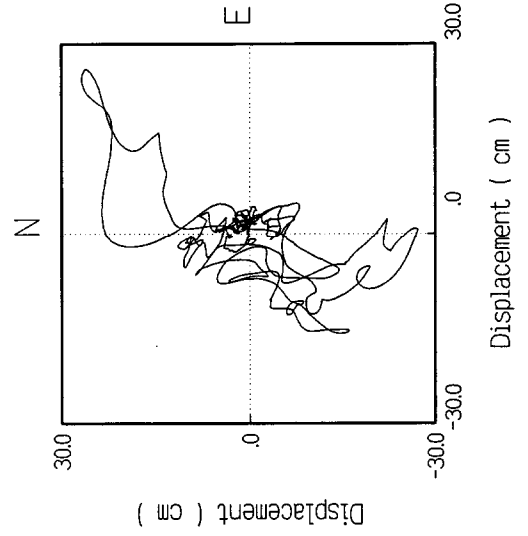
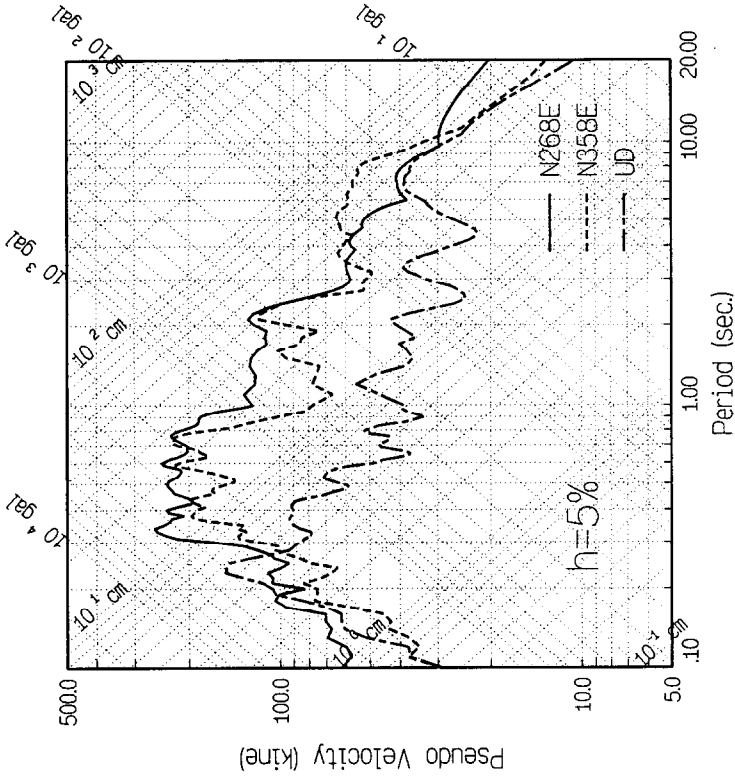
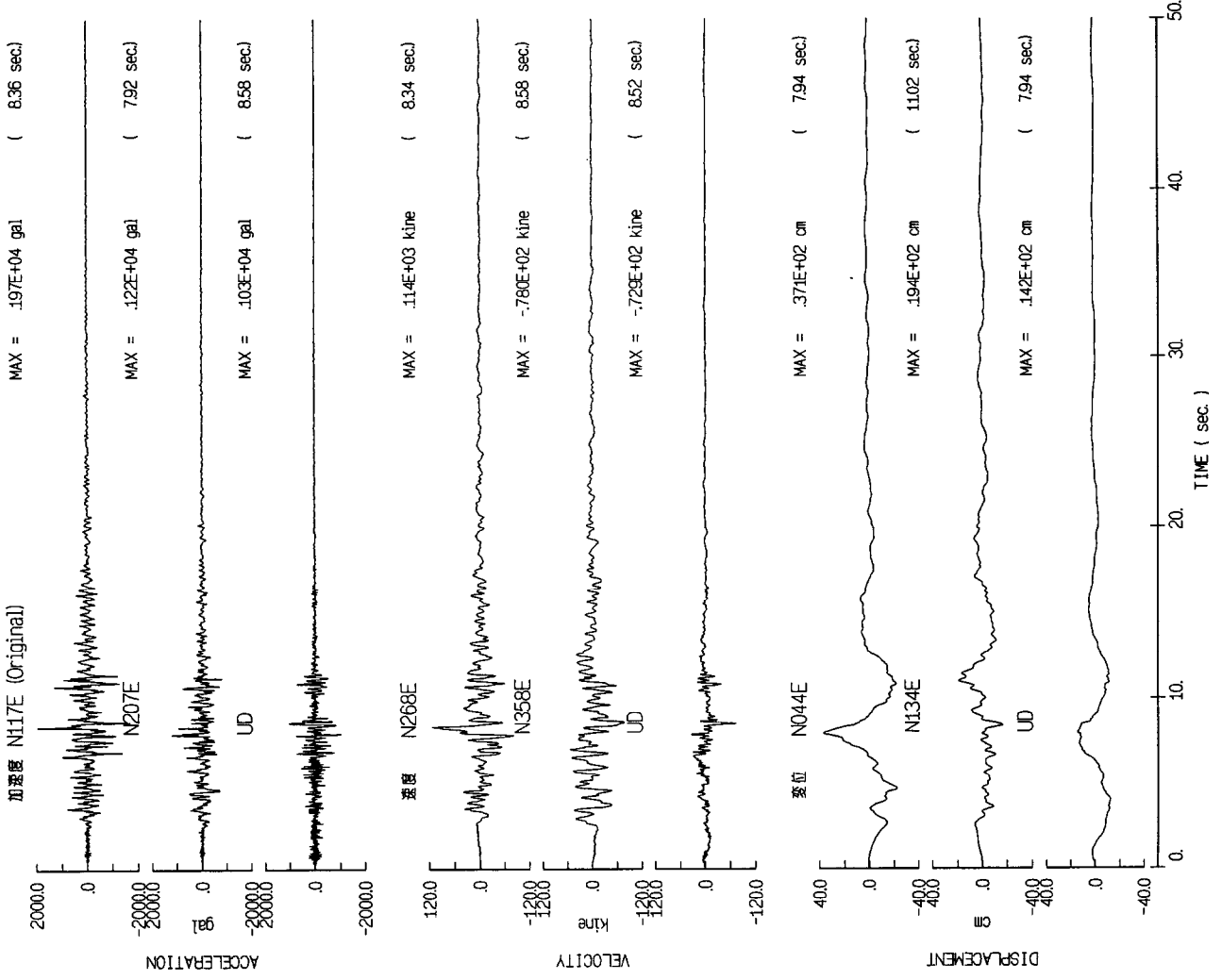
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7 SHR



1994/01/17 Northridge

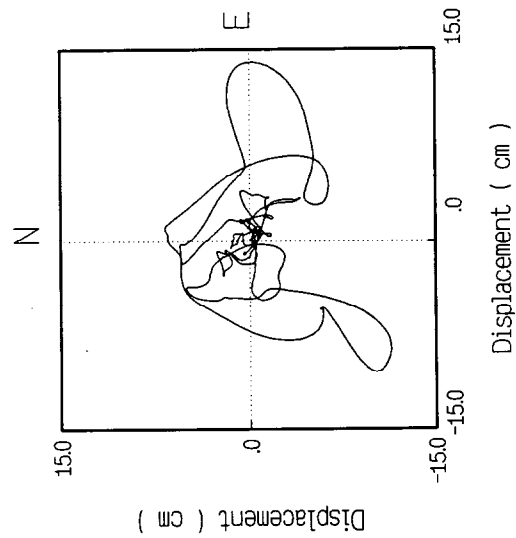
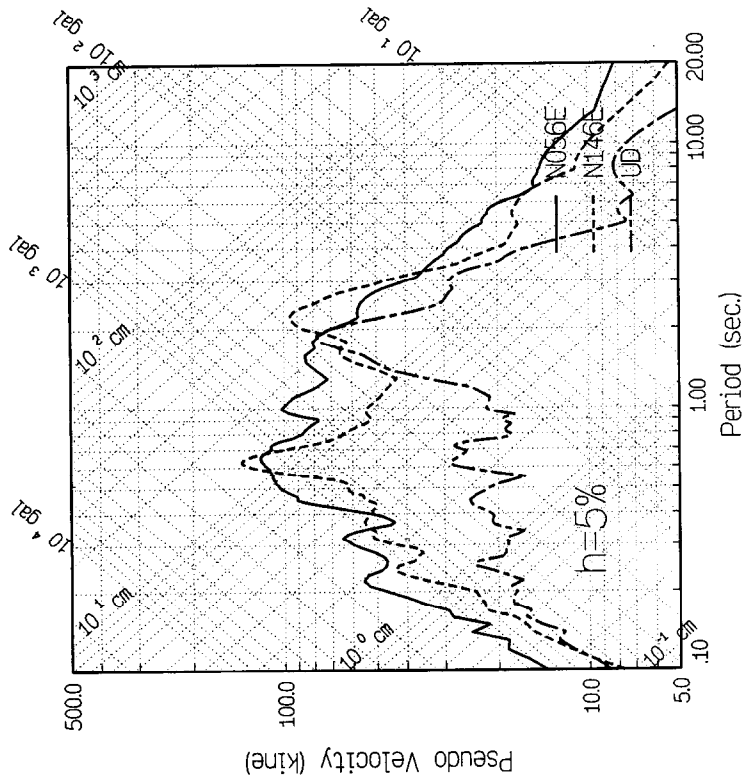
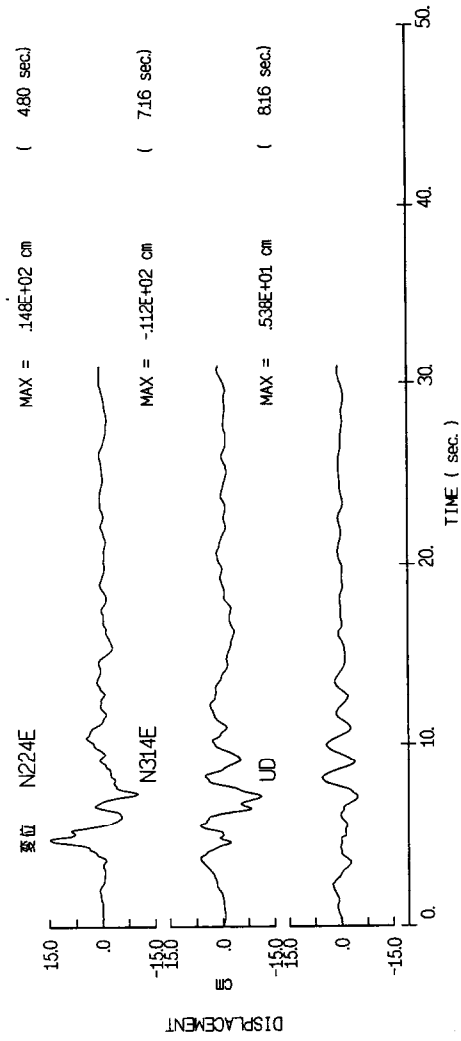
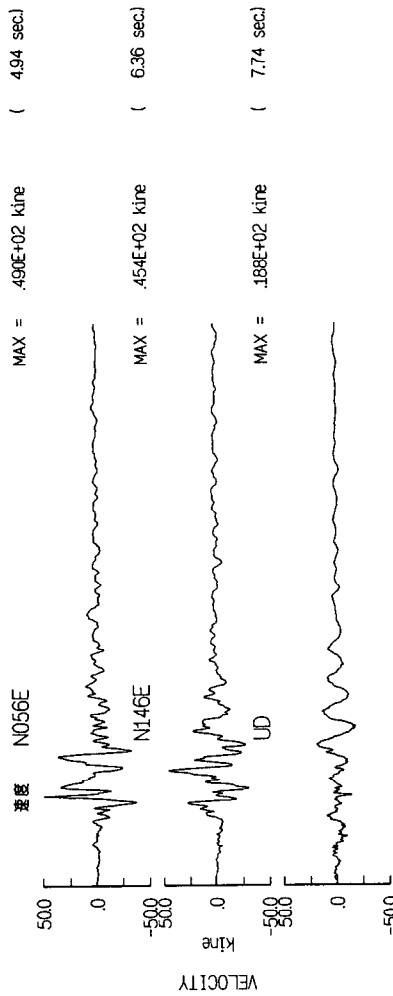
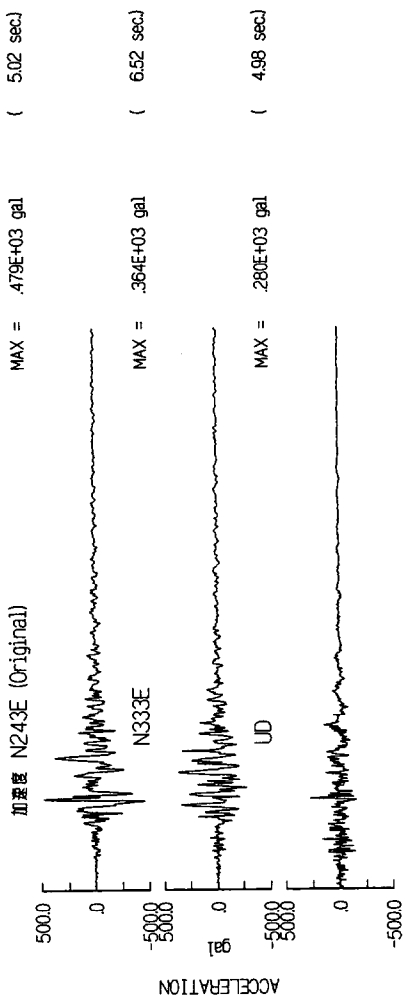
Mw=6.7 TRZ



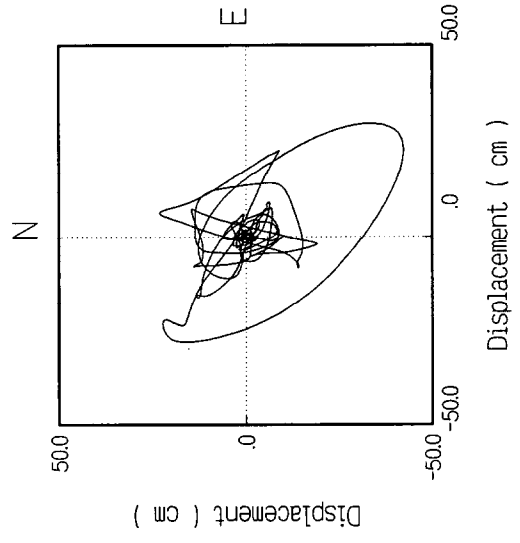
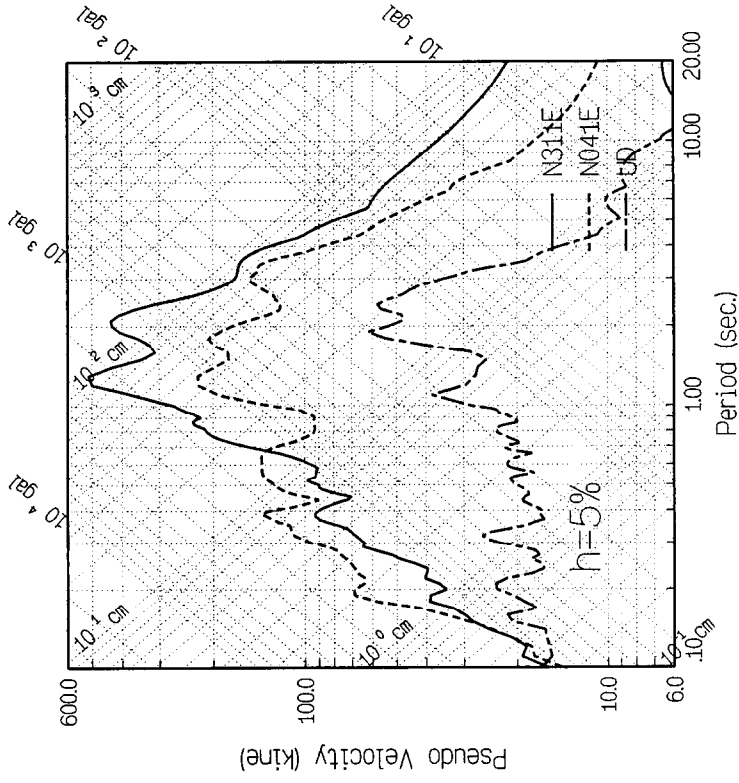
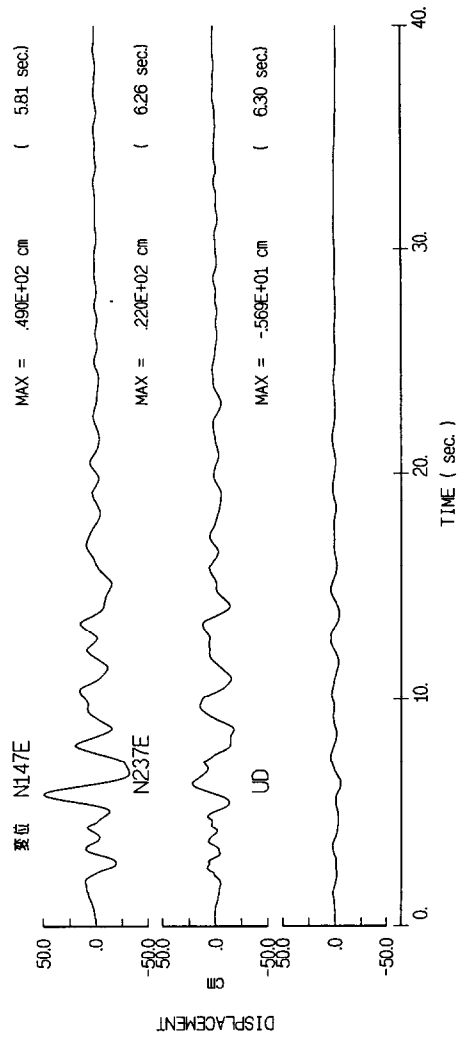
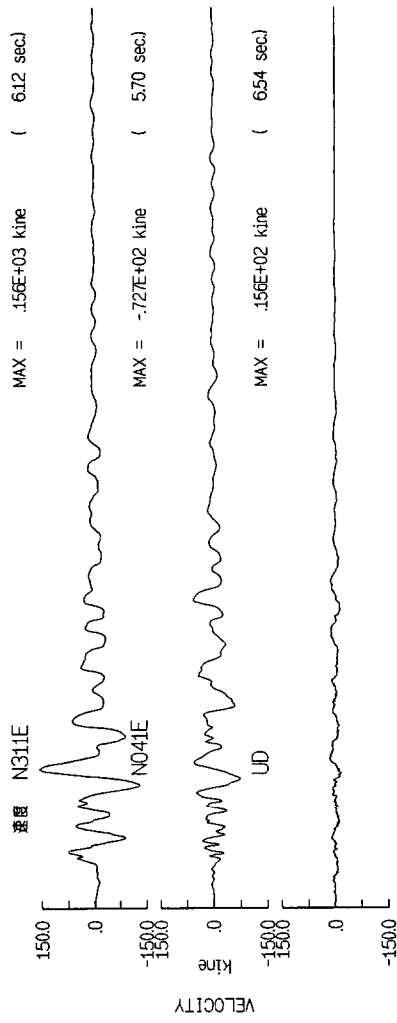
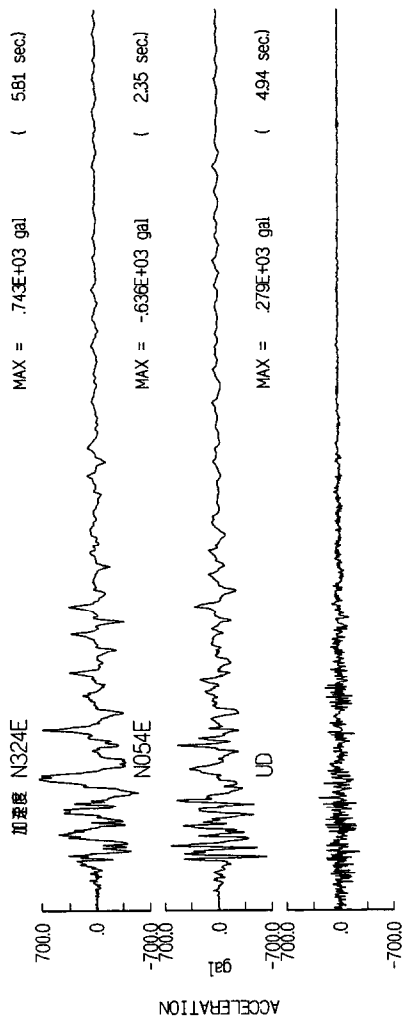
1994/01/17 Northridge

Mw=6.7

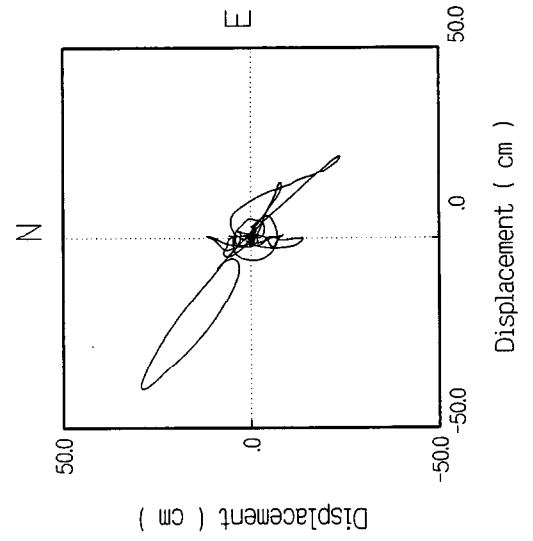
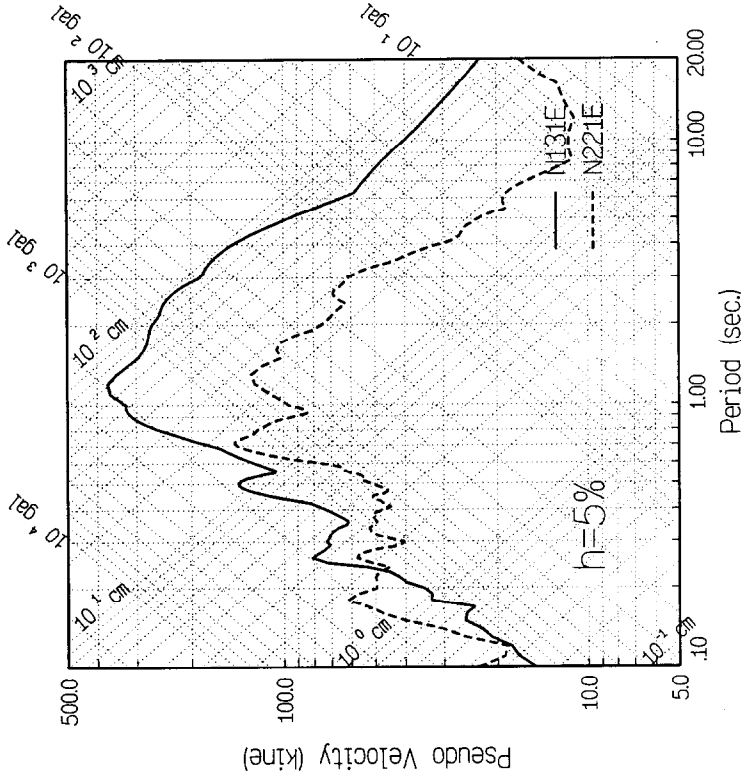
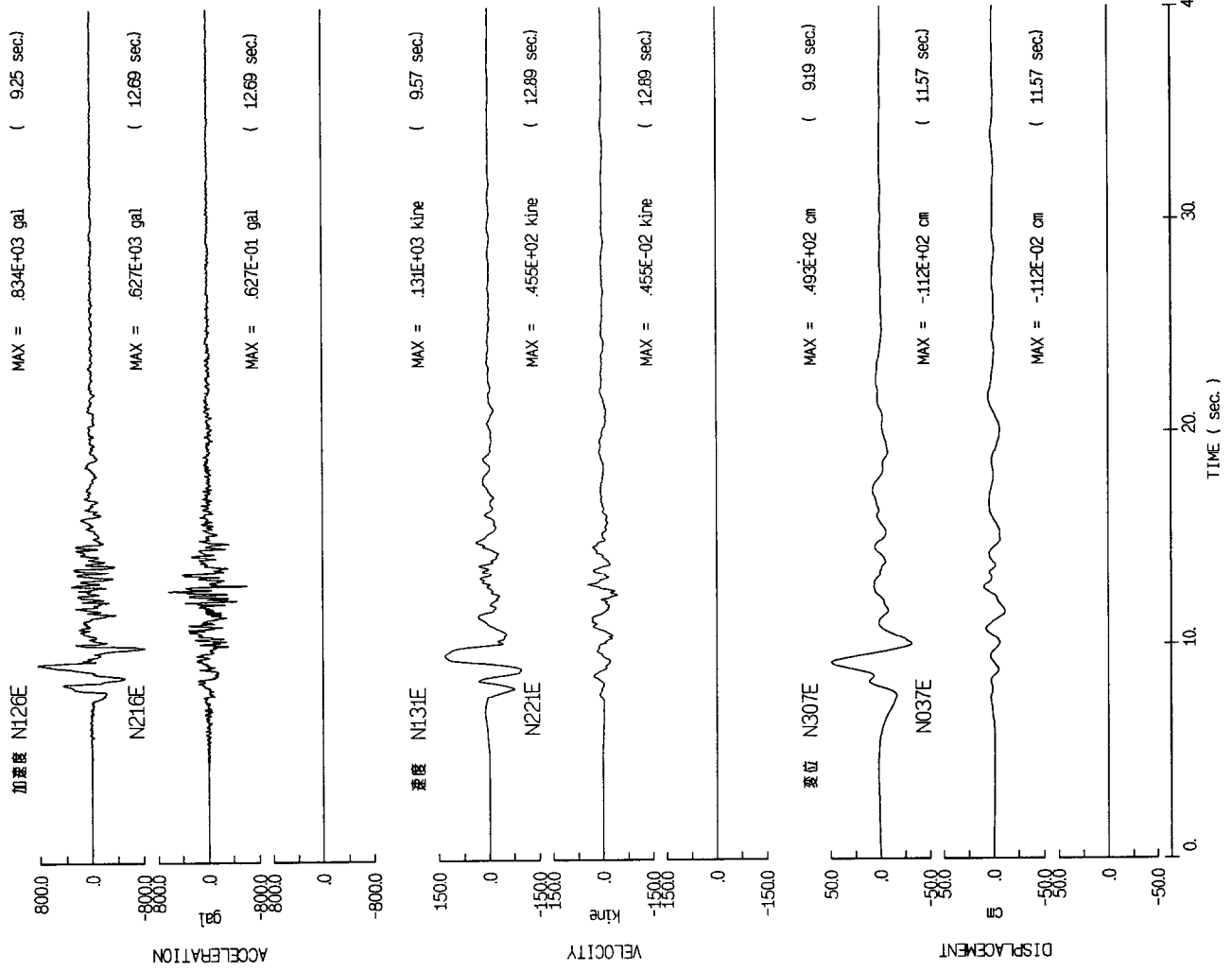
U57



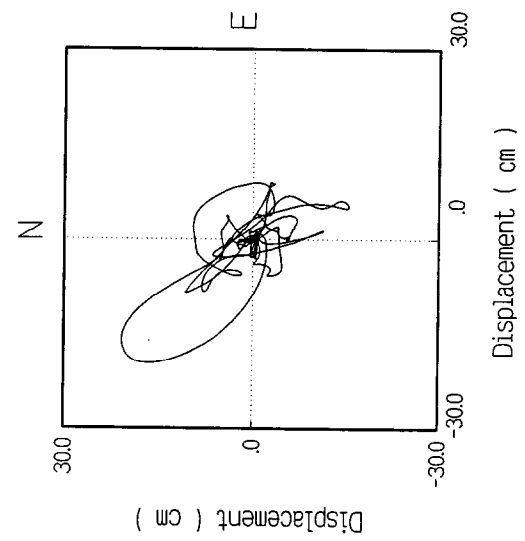
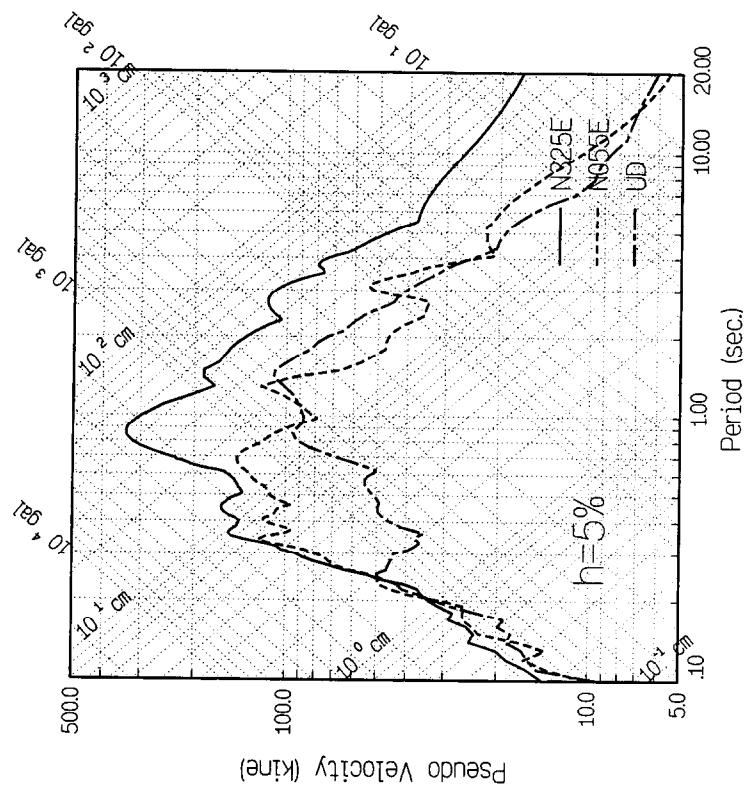
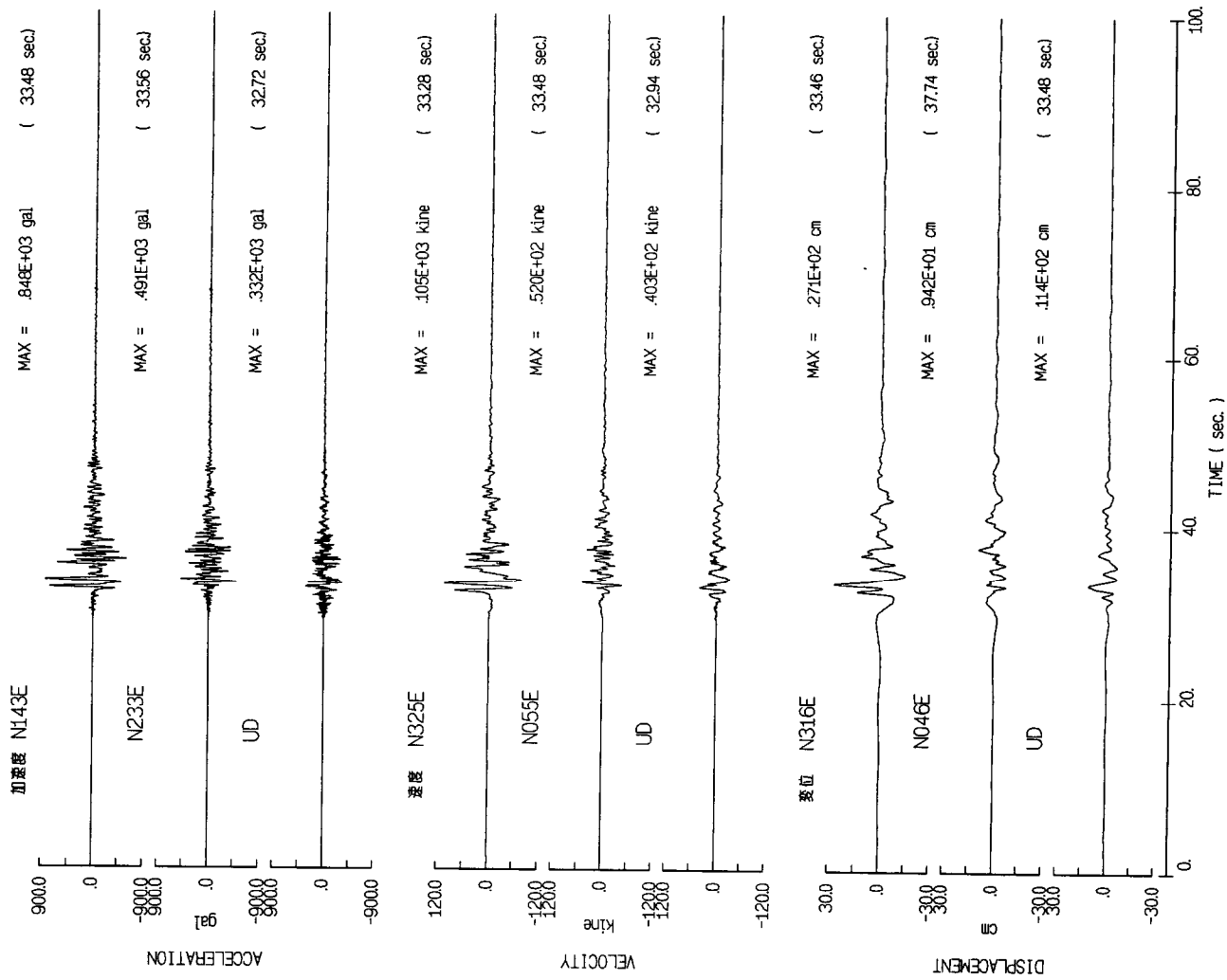
1995/01/17 Hyogoken Nanbu Mw=6.9 TKT



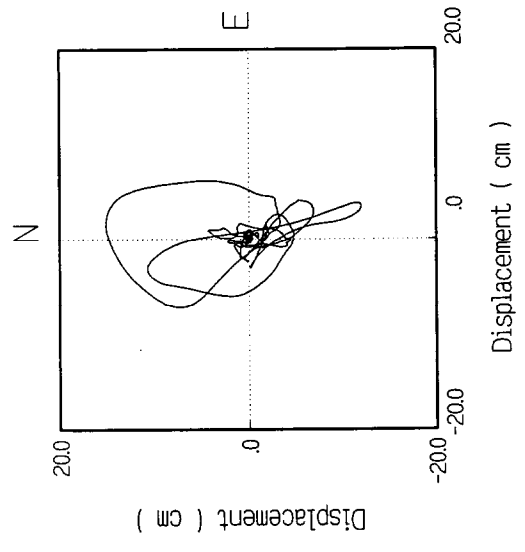
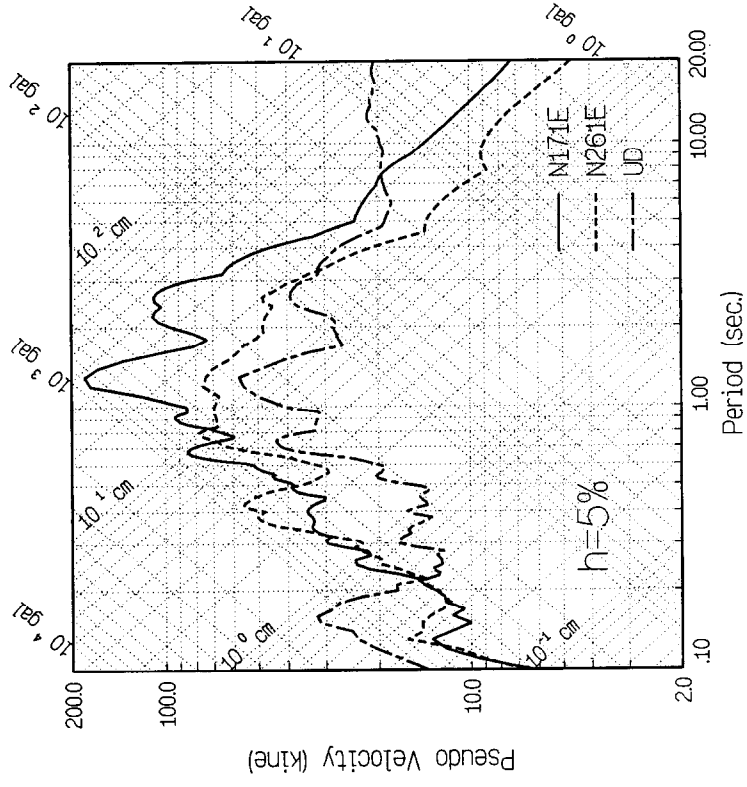
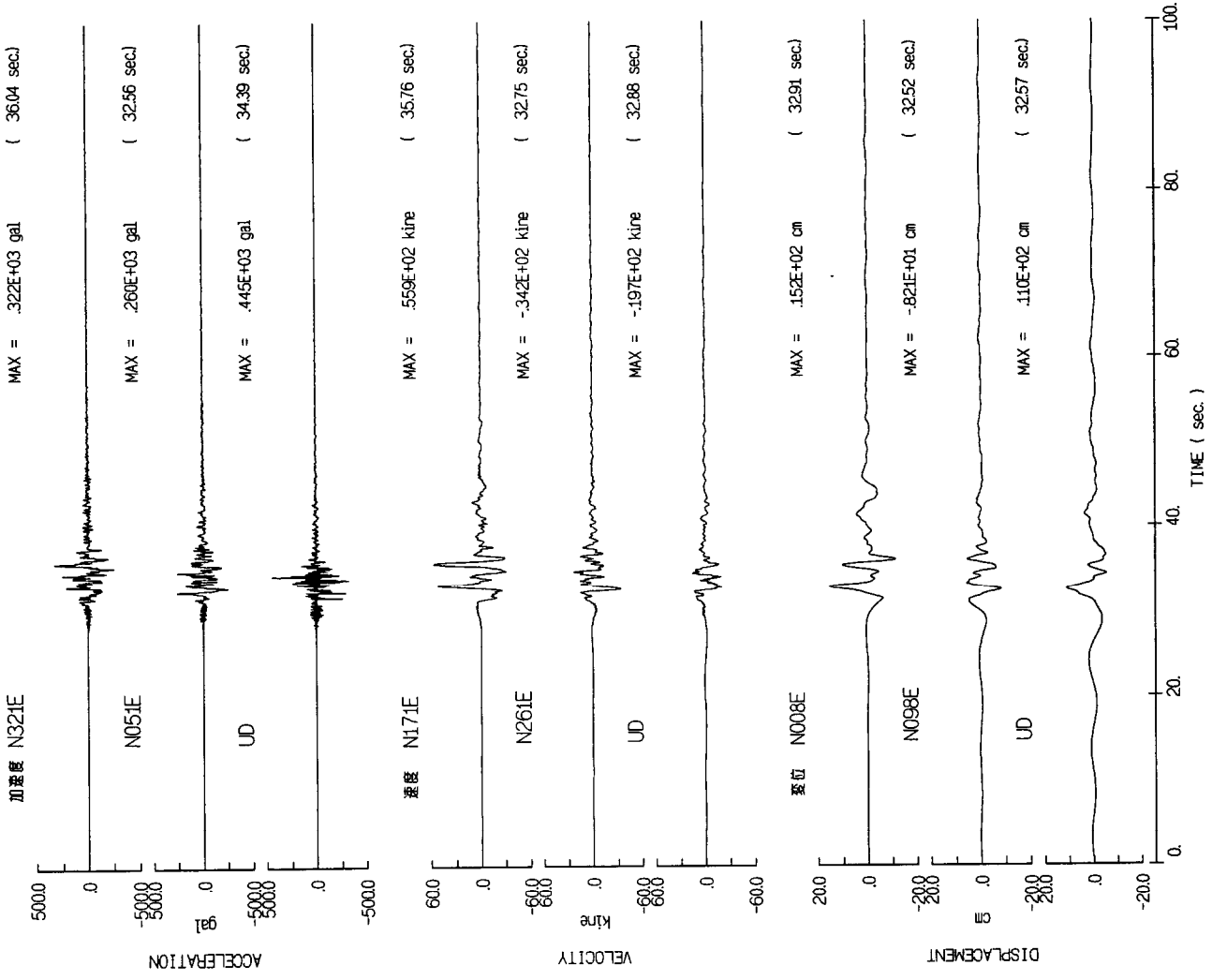
1995/01/17 Hyogoken Nanbu Mw=6.9 FKI



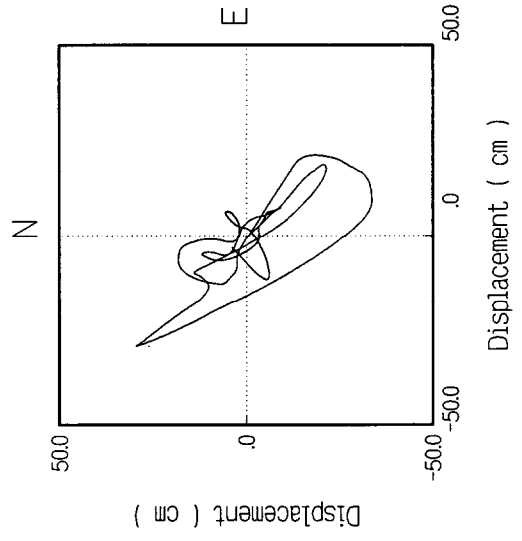
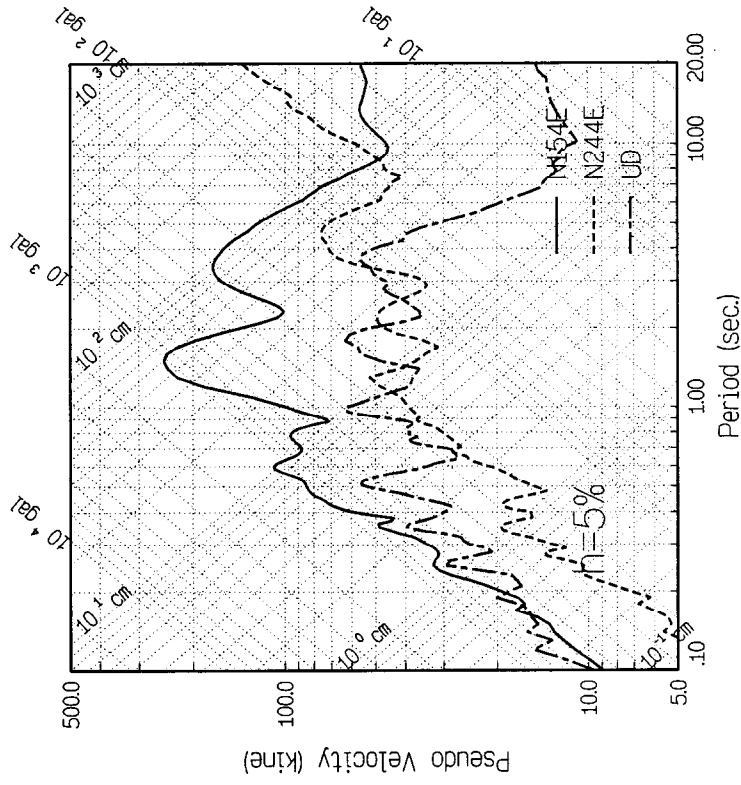
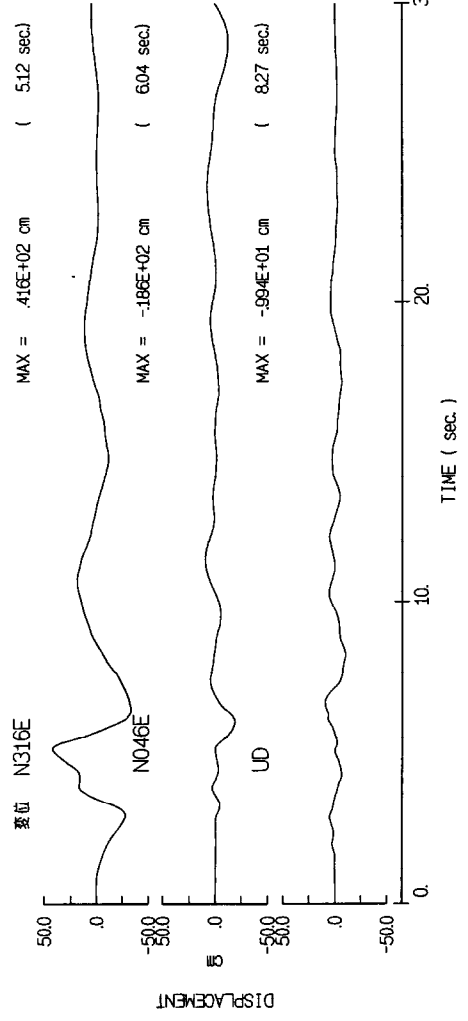
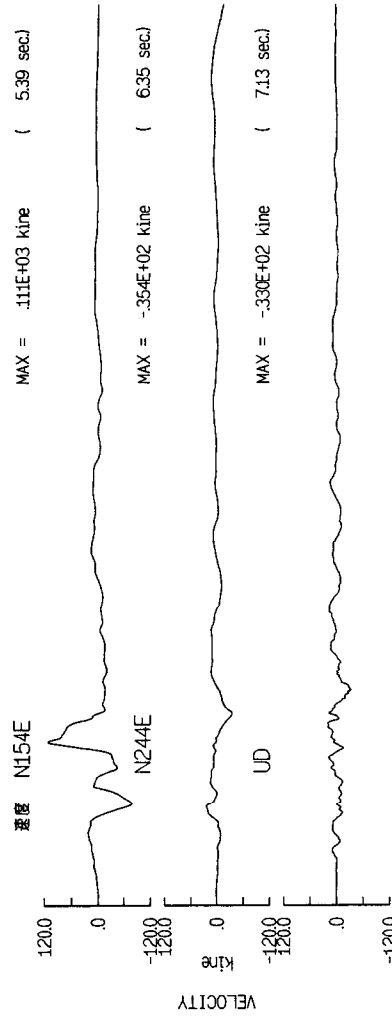
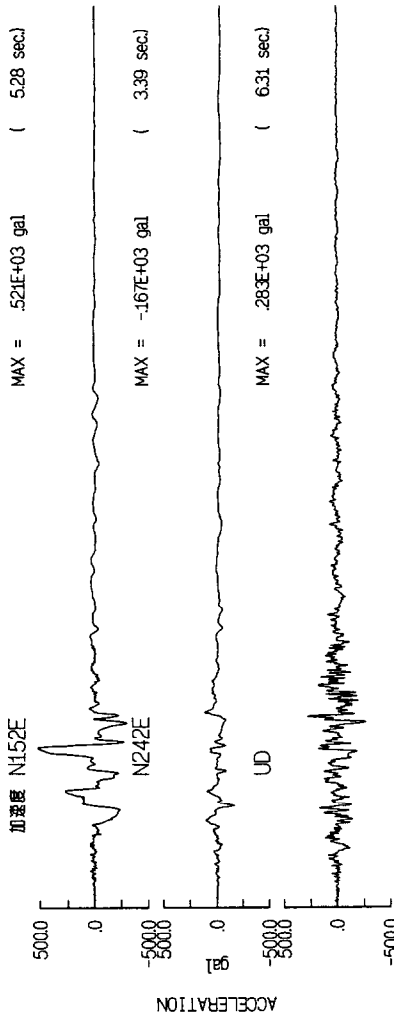
1995/01/17 Hyogoken Nanbu Mw=6.9 JMA



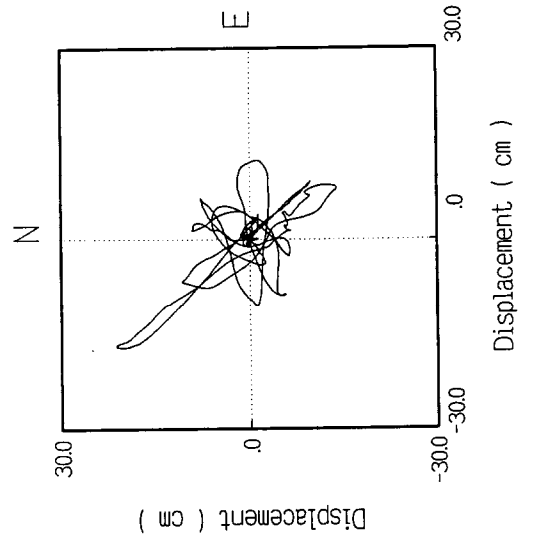
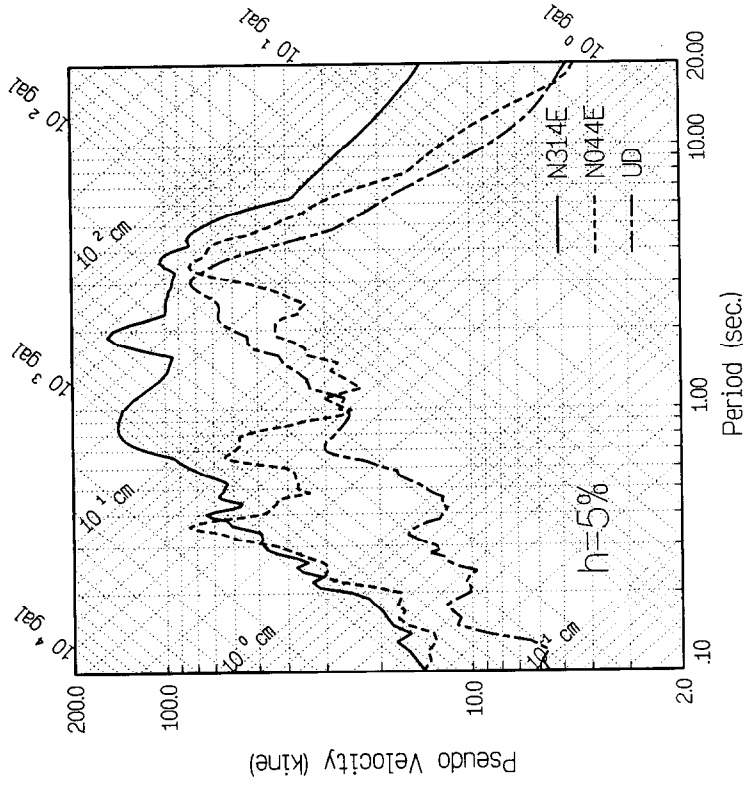
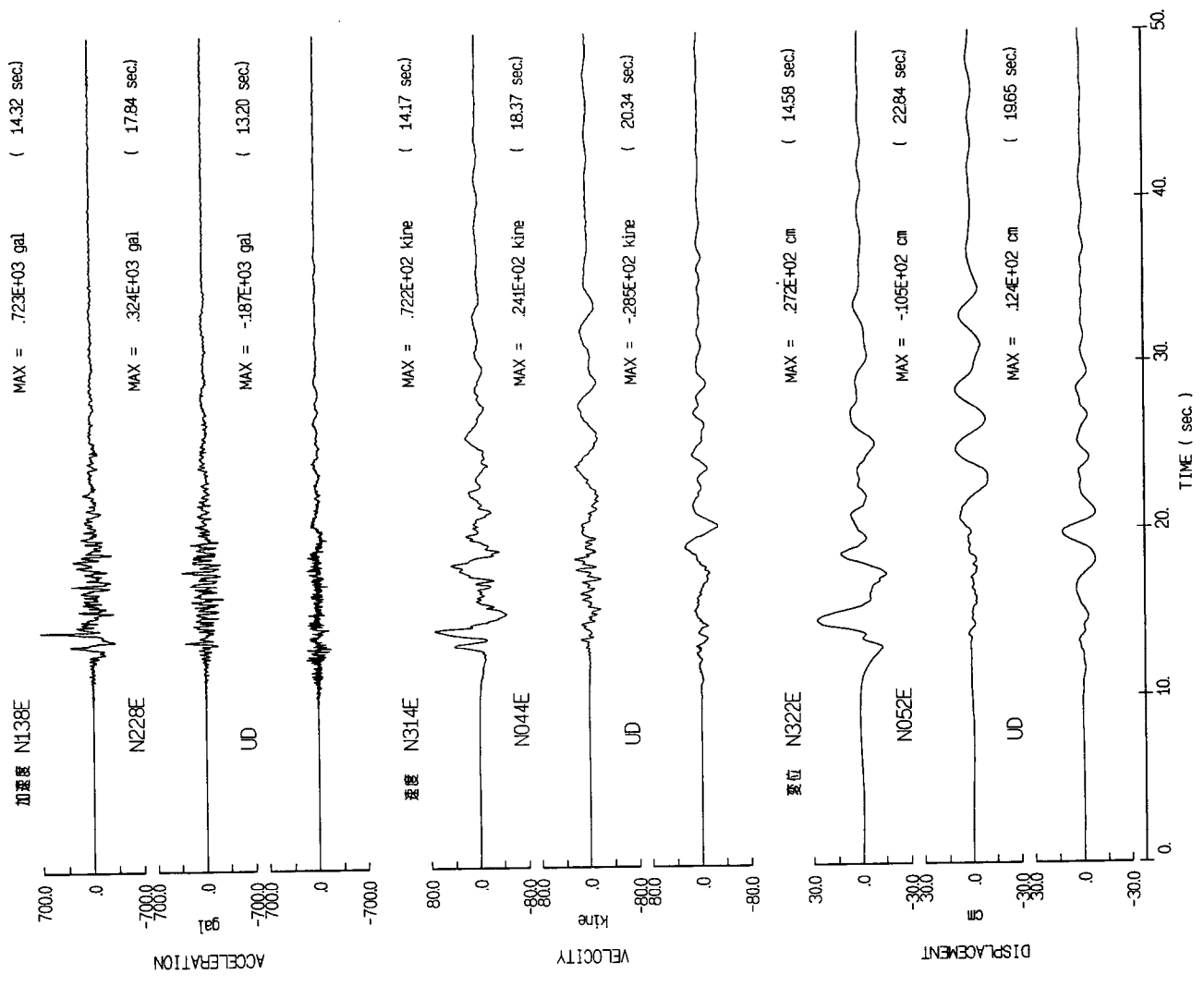
1995/01/17 Hyogoken Nanbu Mw=6.9 UNV



1995/01/17 Hyogoken Nanbu Mw=6.9 KHB

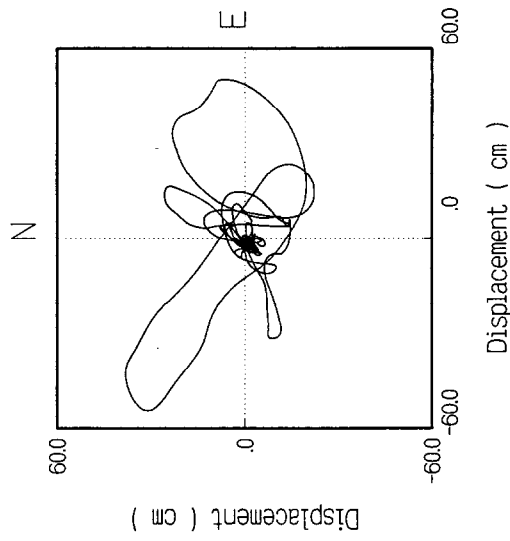
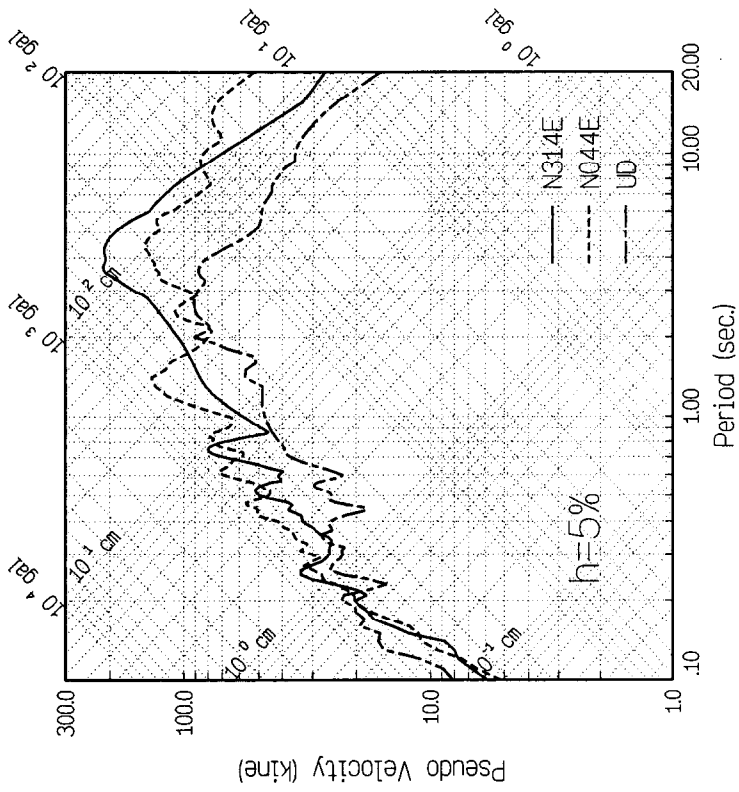
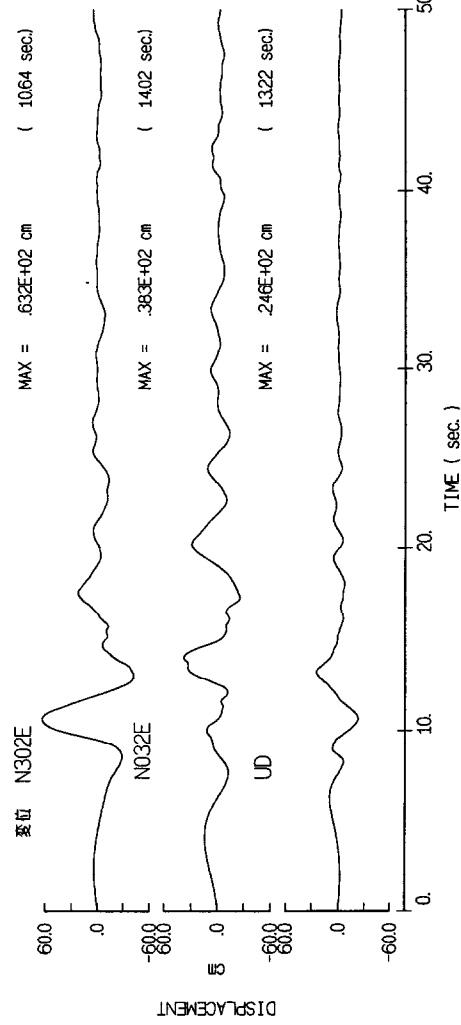
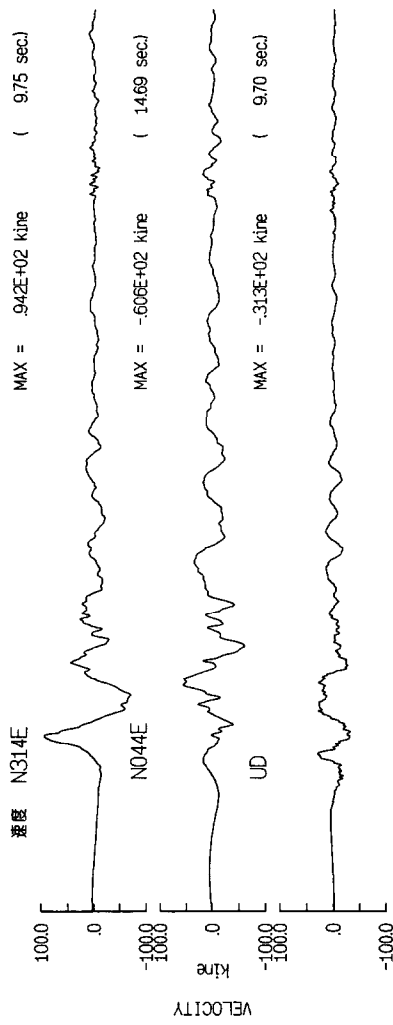
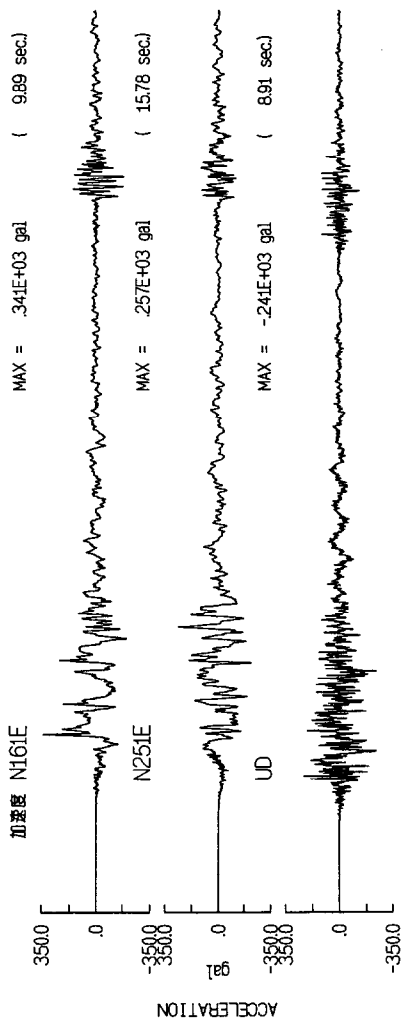


1995/01/17 Hyogoken Nanbu Mw=6.9 POI



1999/08/17 Coaeeli

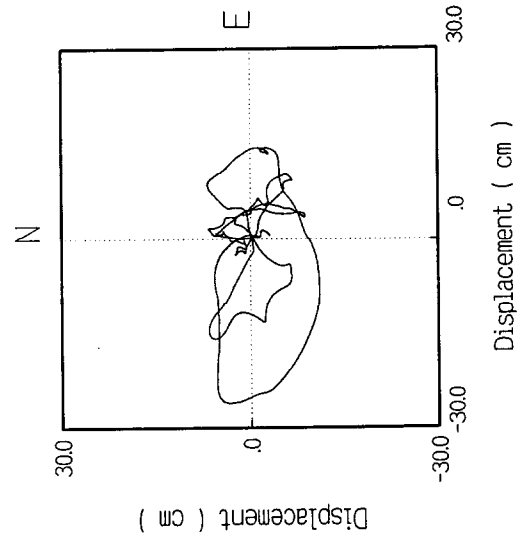
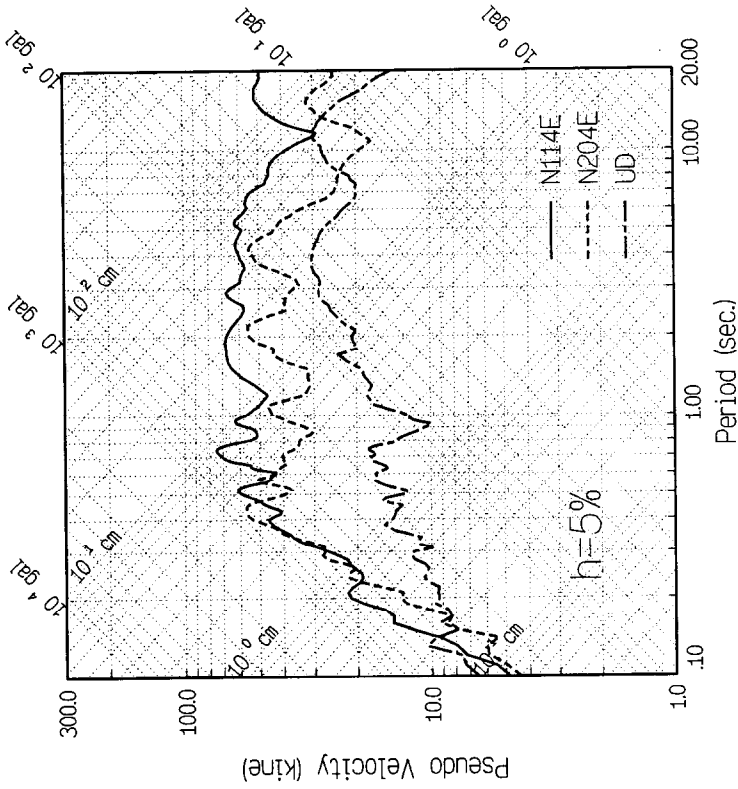
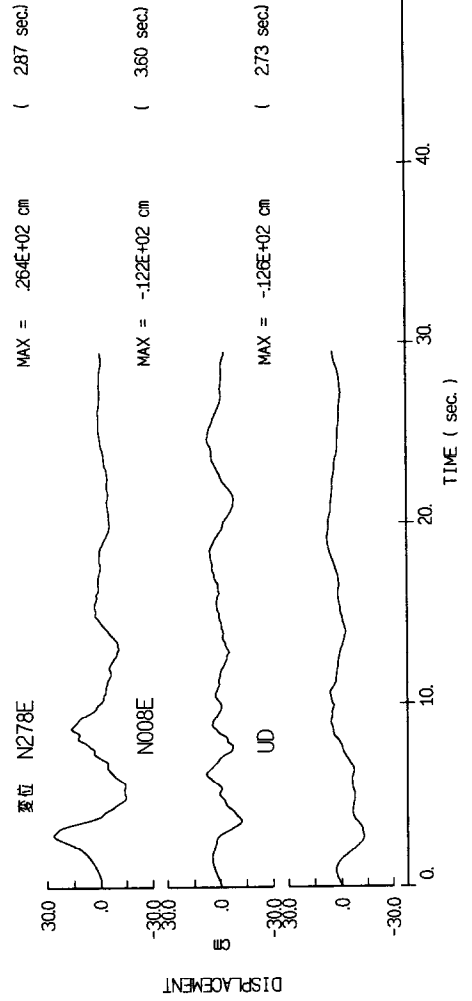
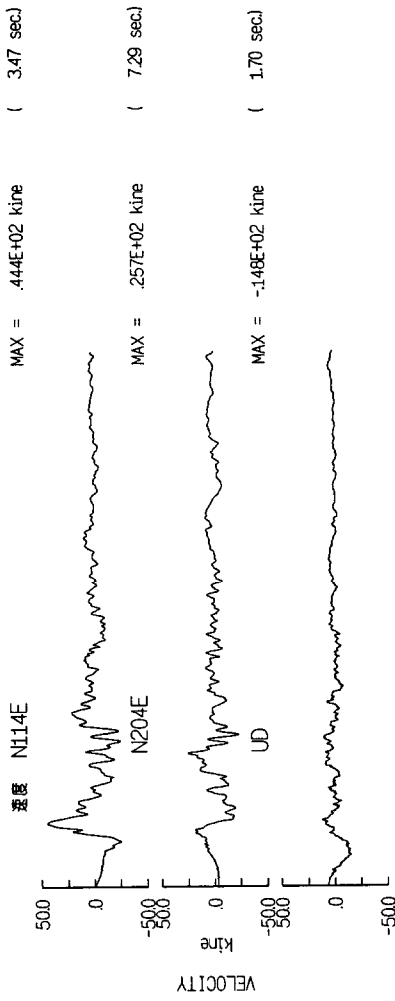
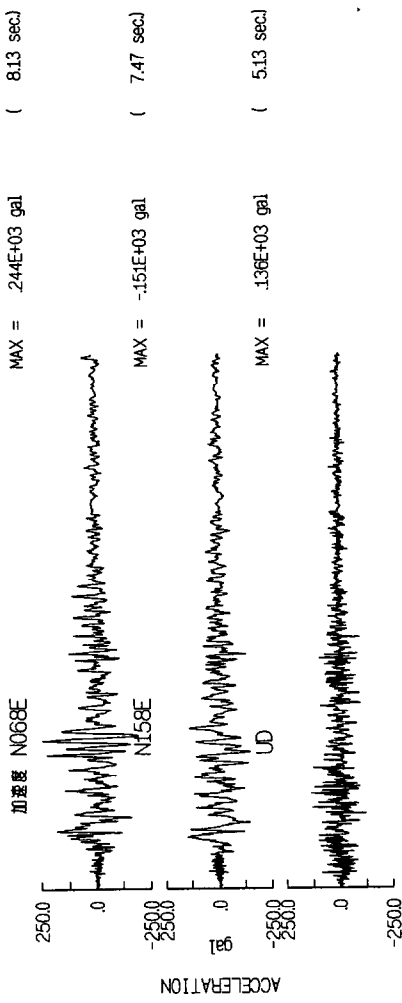
Mw=7.4 YPT



1999/08/17 Cocali

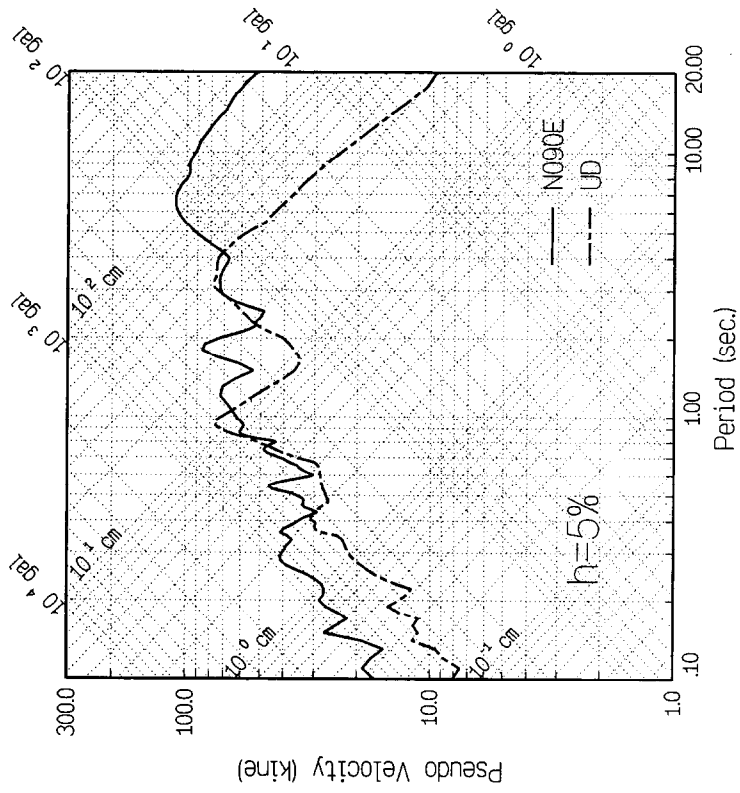
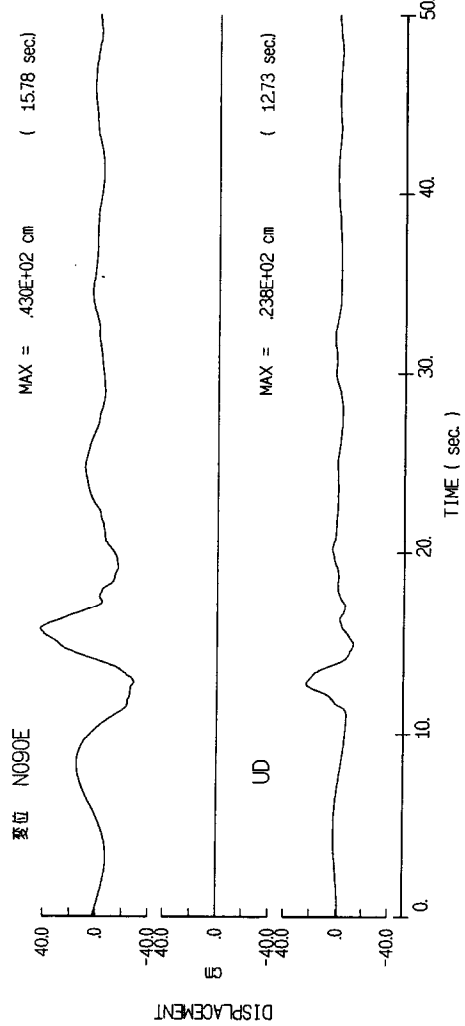
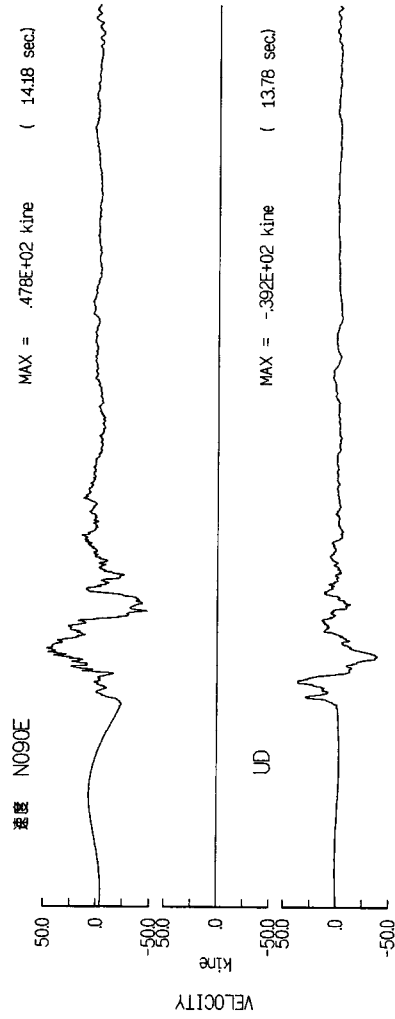
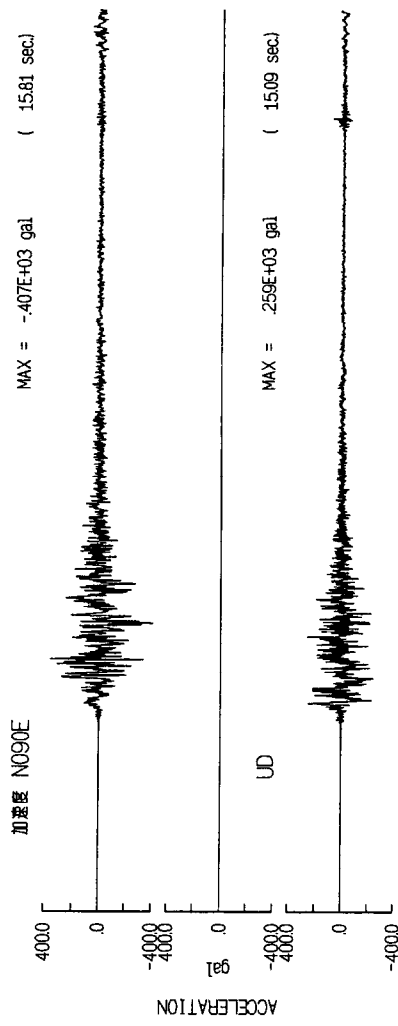
Mw=7.4

IZT



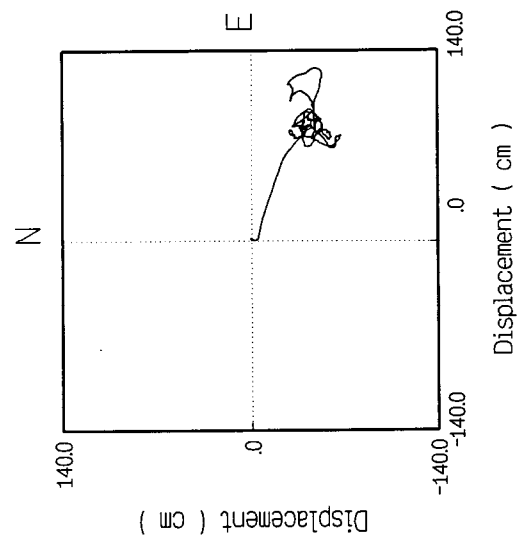
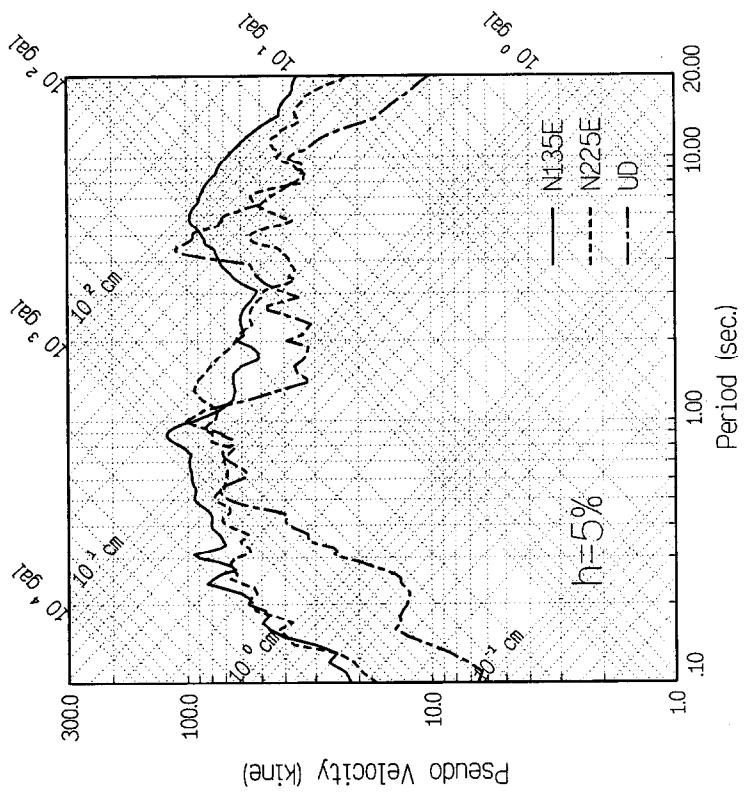
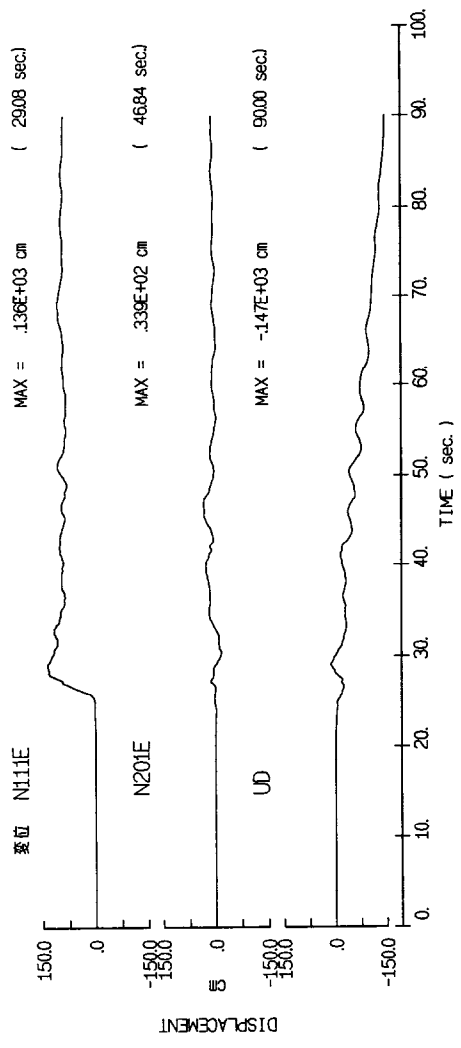
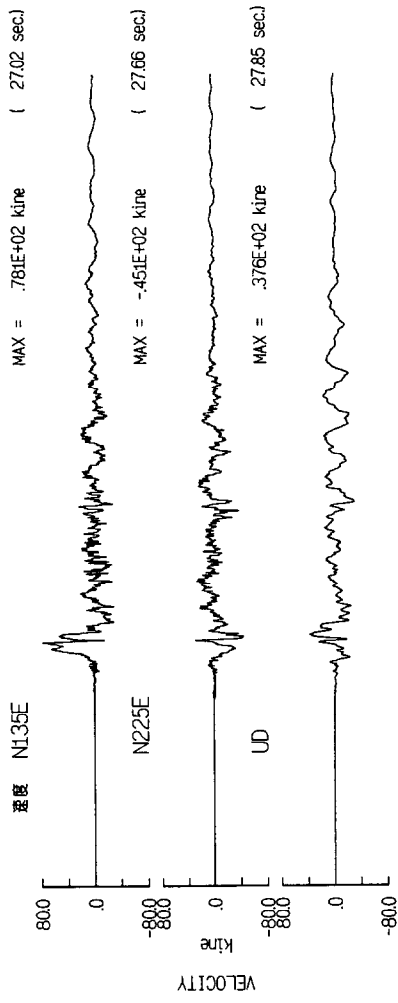
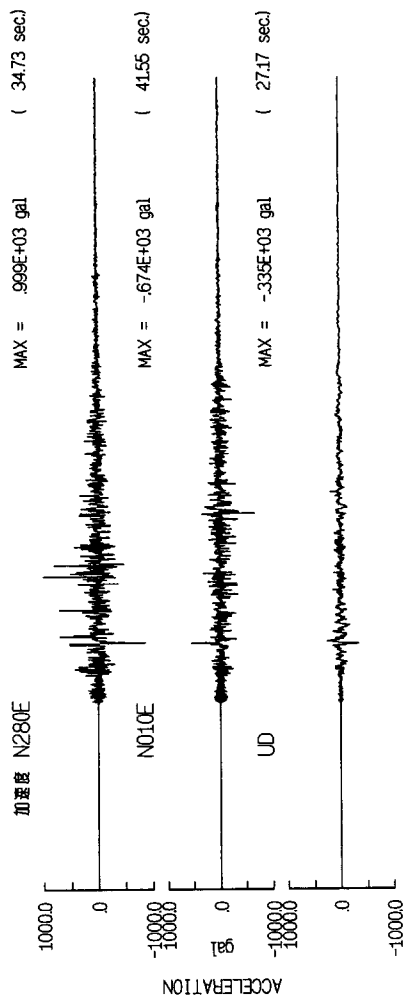
1999/08/17 Cocali

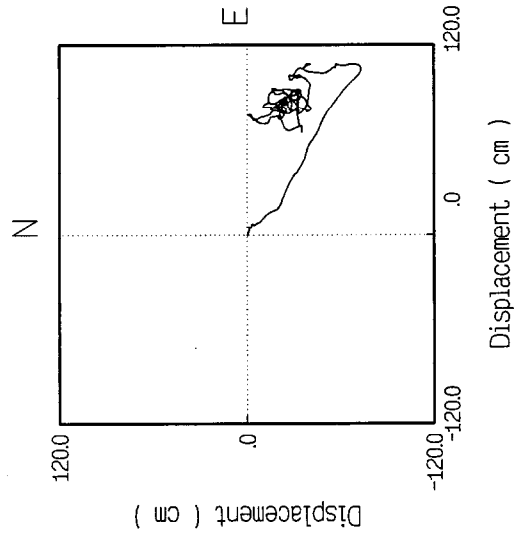
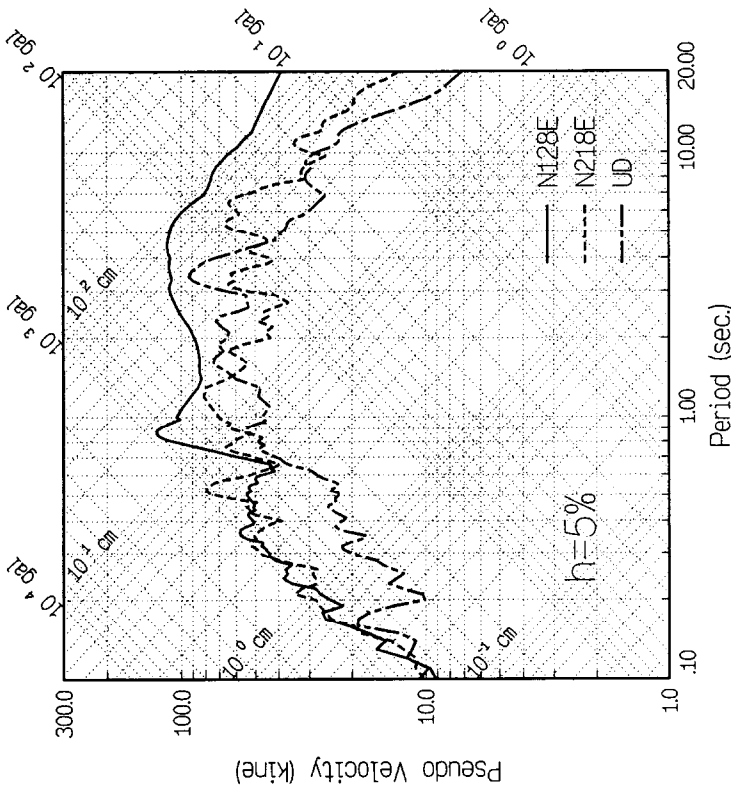
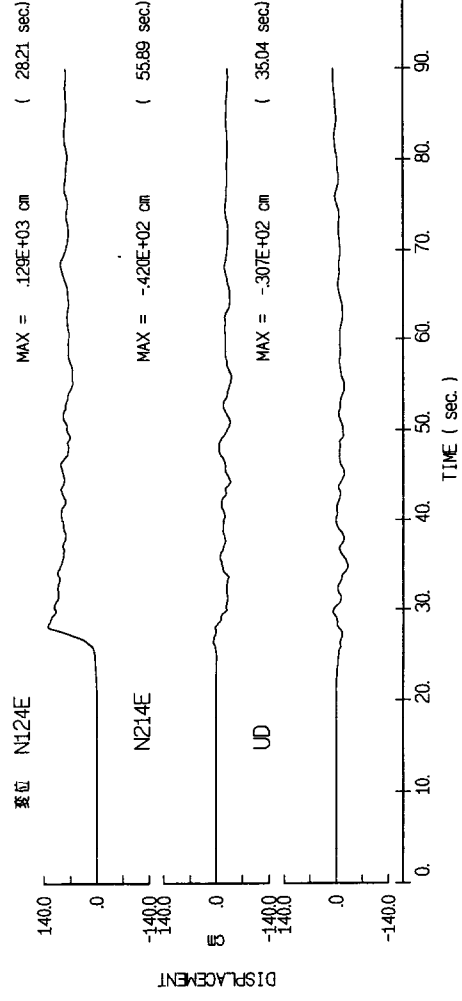
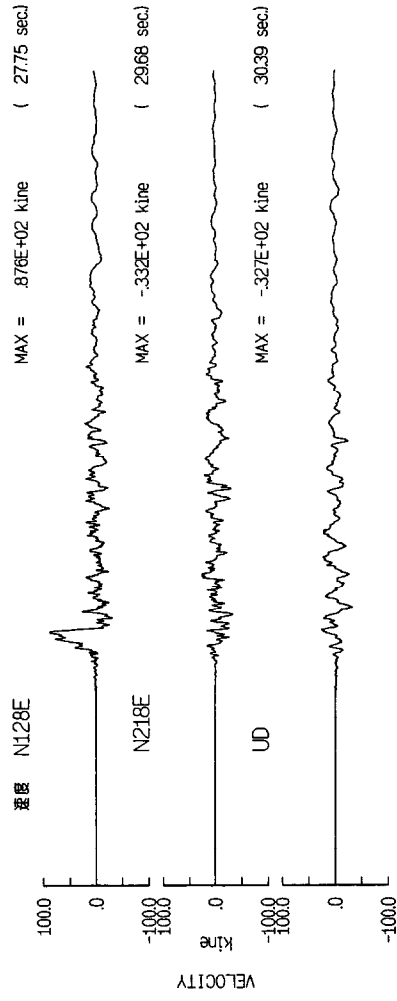
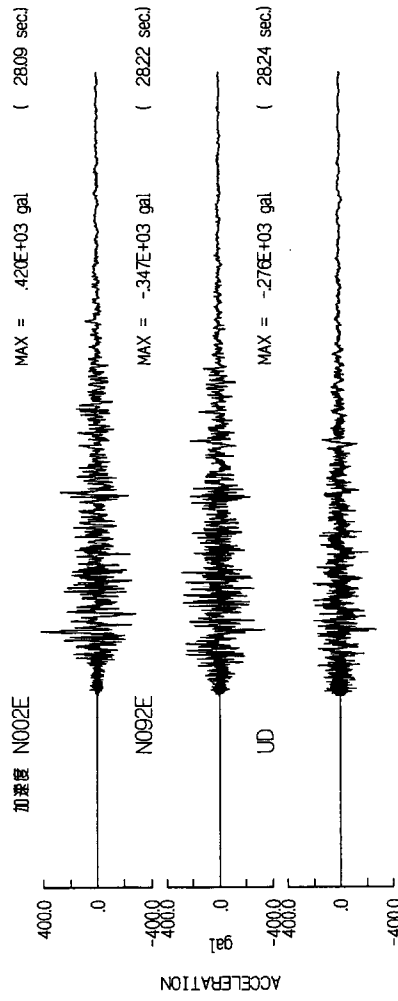
Mw=7.4 SKR



1999/09/21 ChiChi

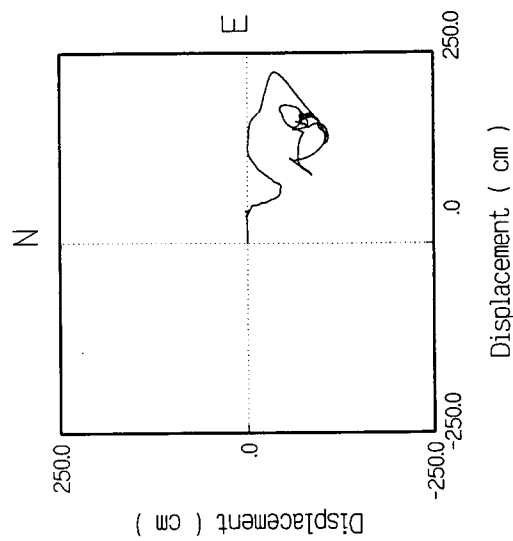
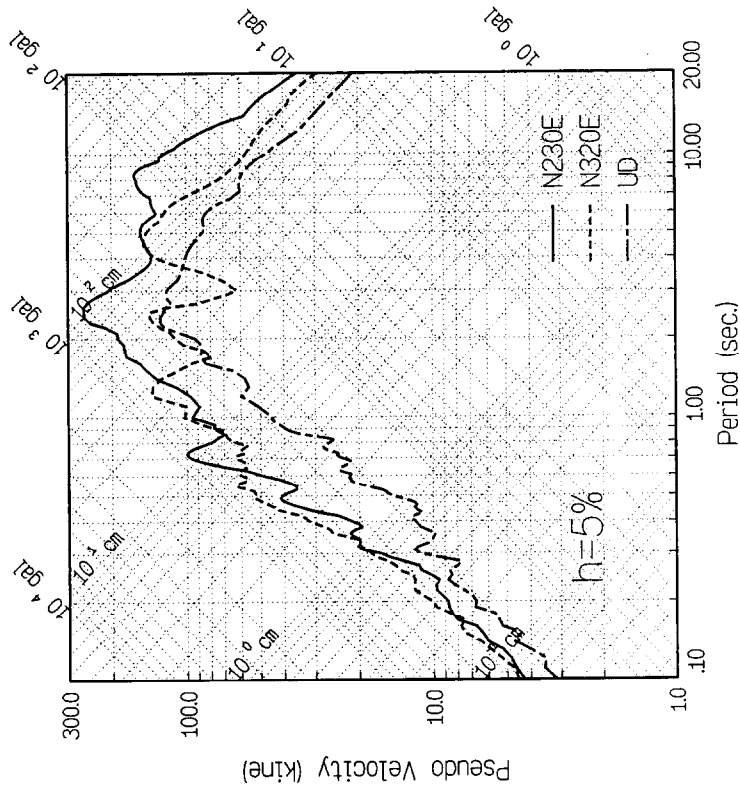
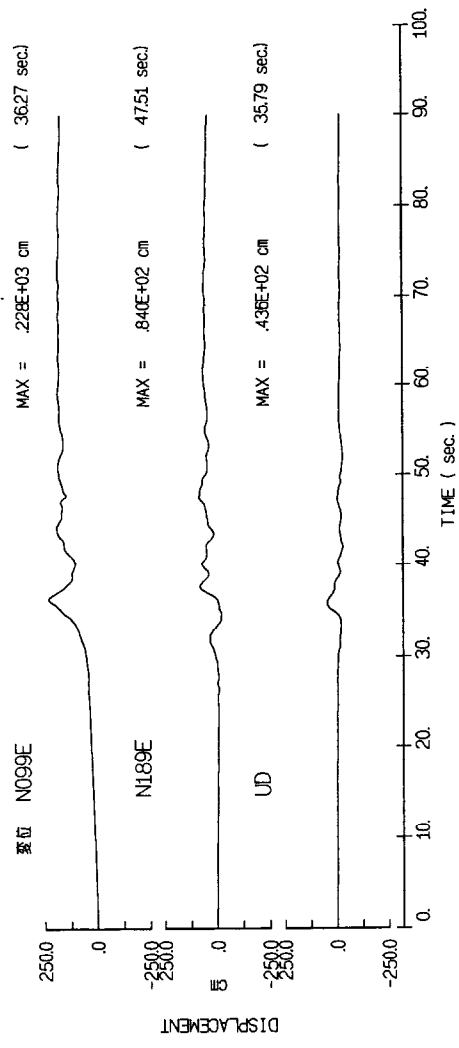
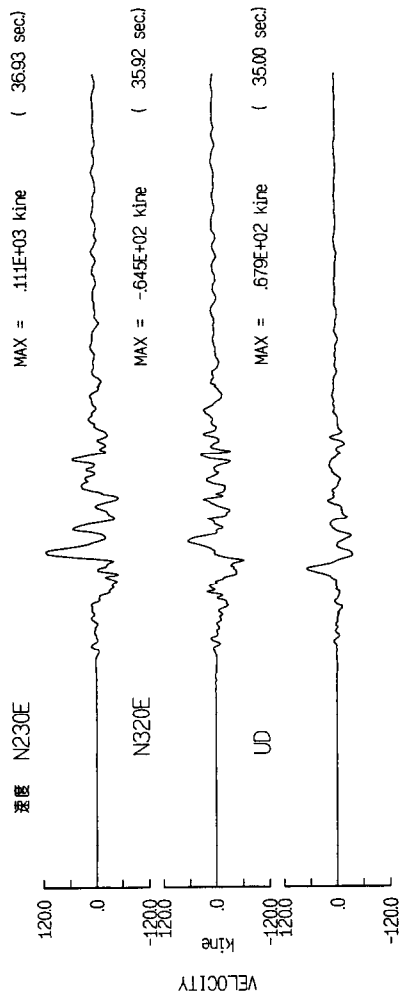
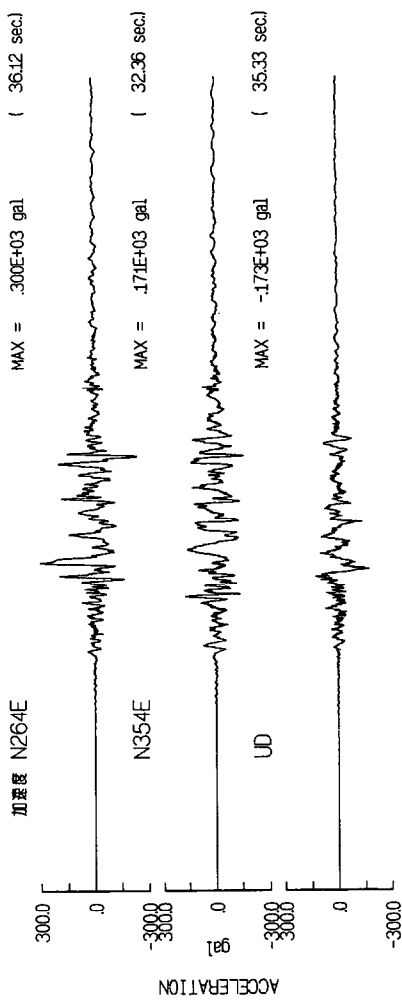
Mw=7.6 T129

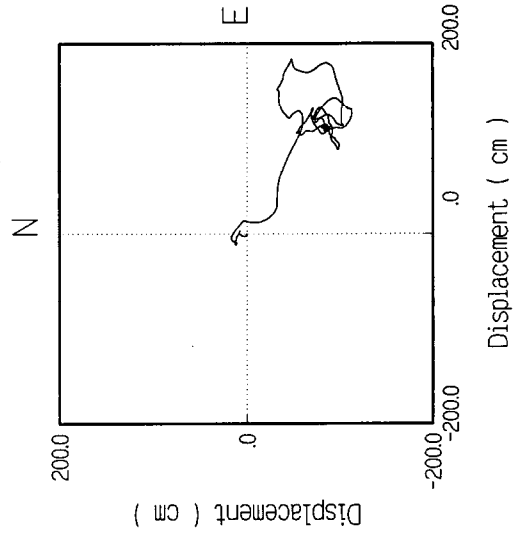
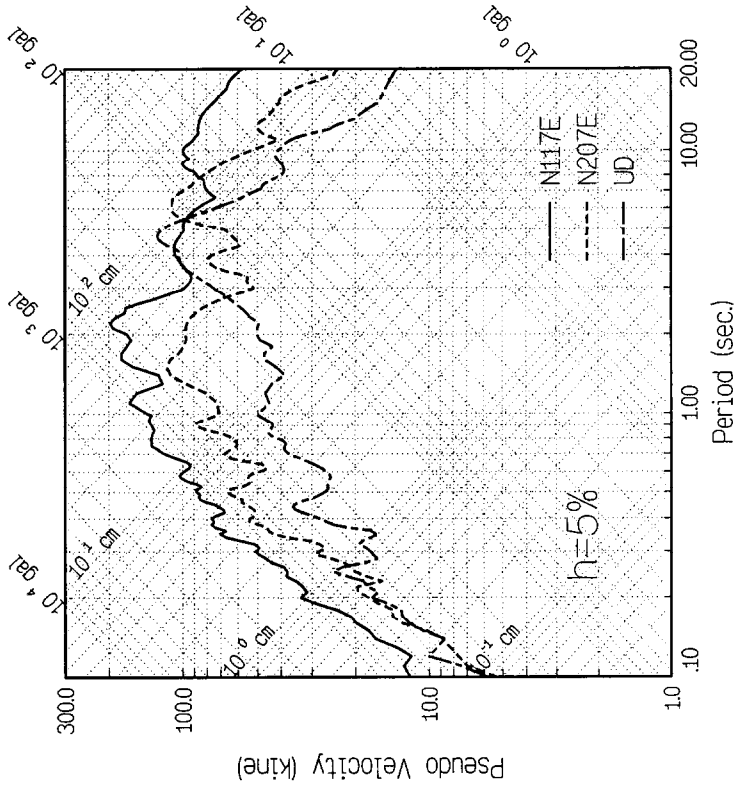
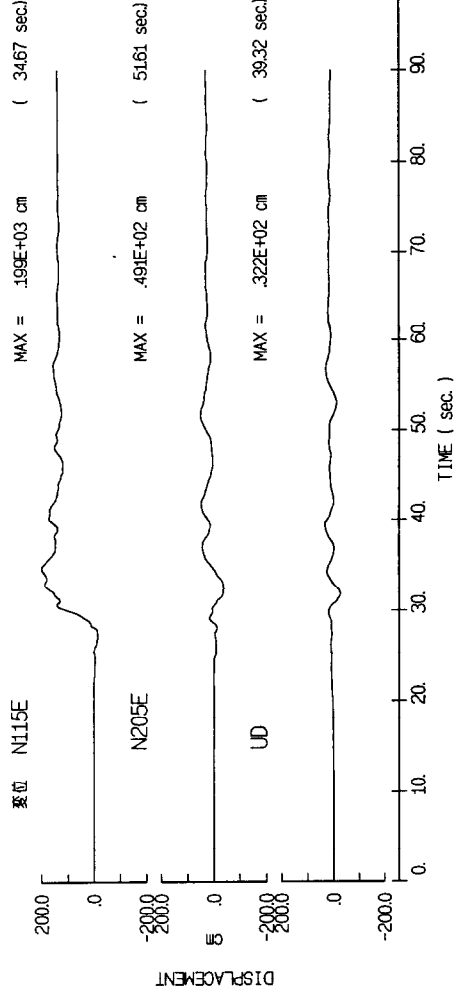
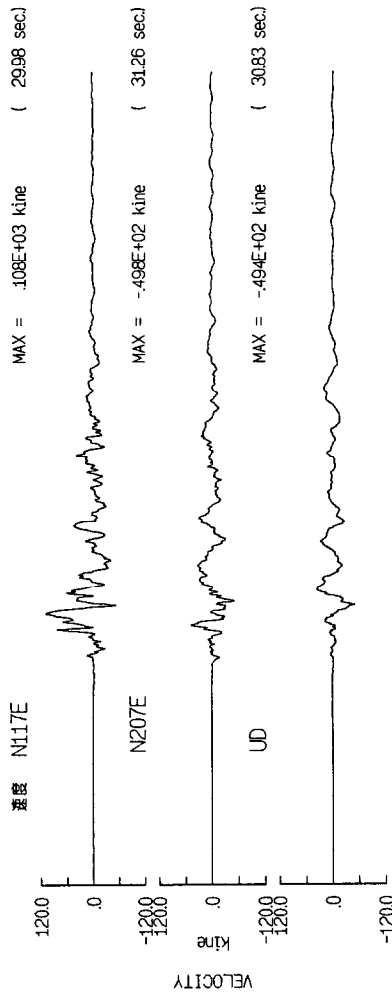
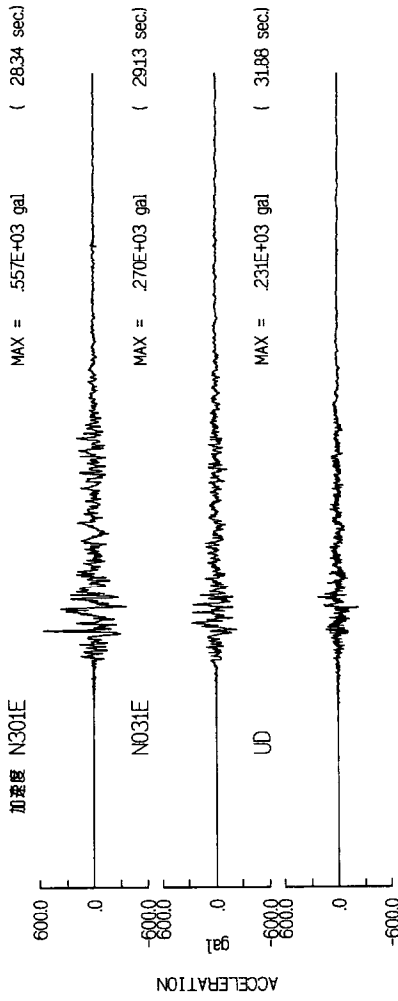




1999/09/21 ChiChi

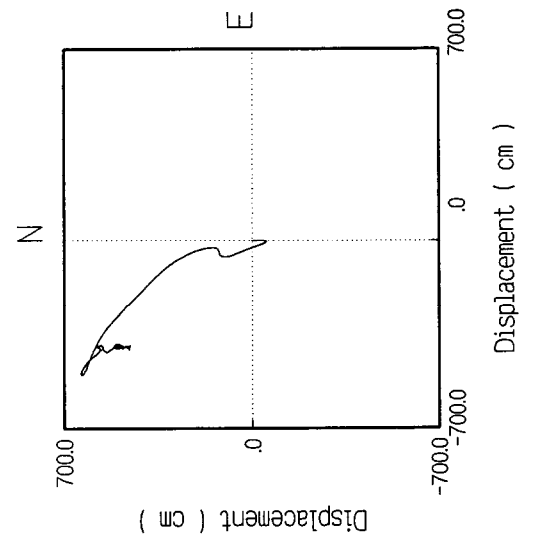
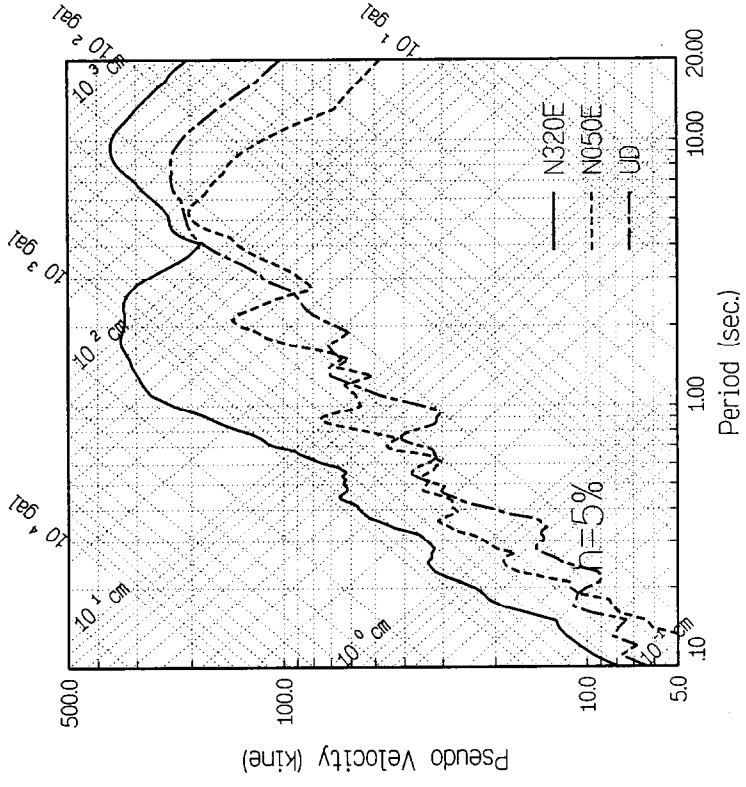
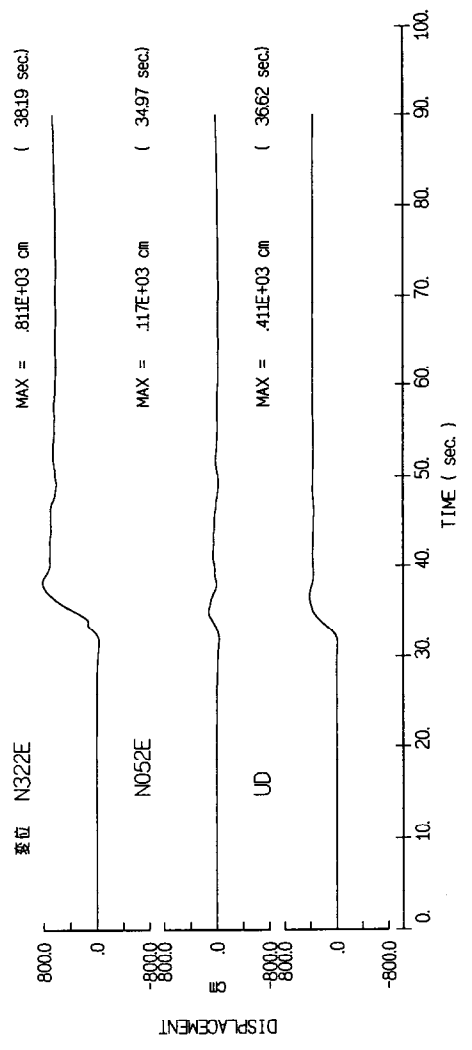
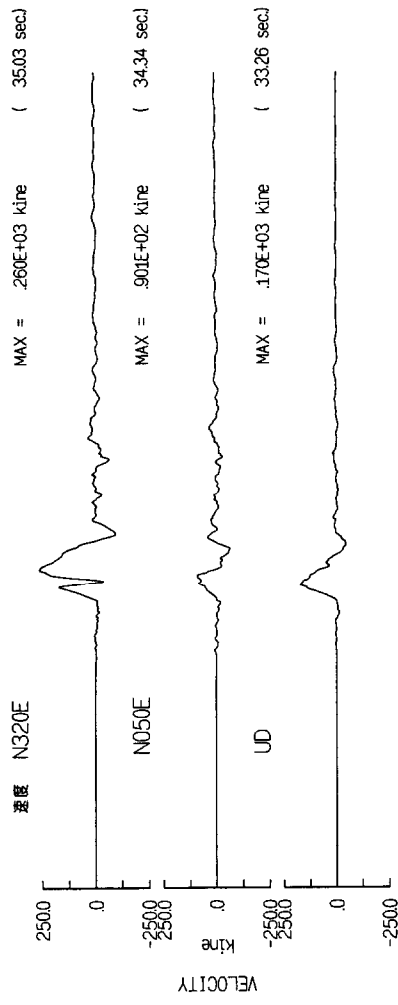
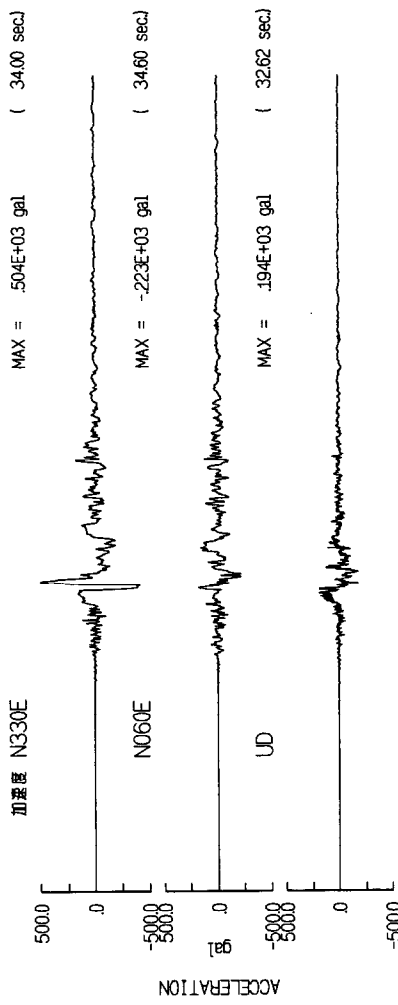
Mw=7.6 T102





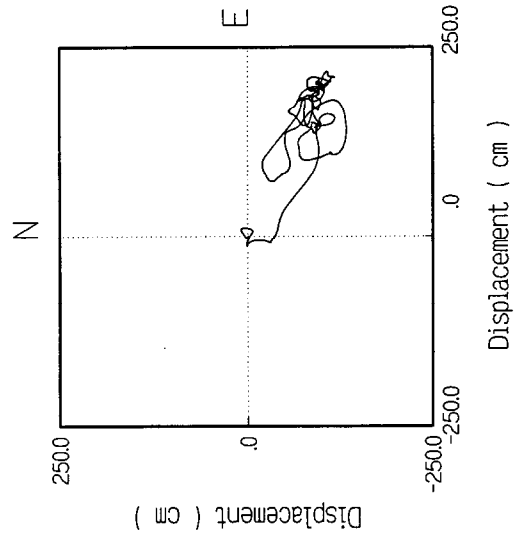
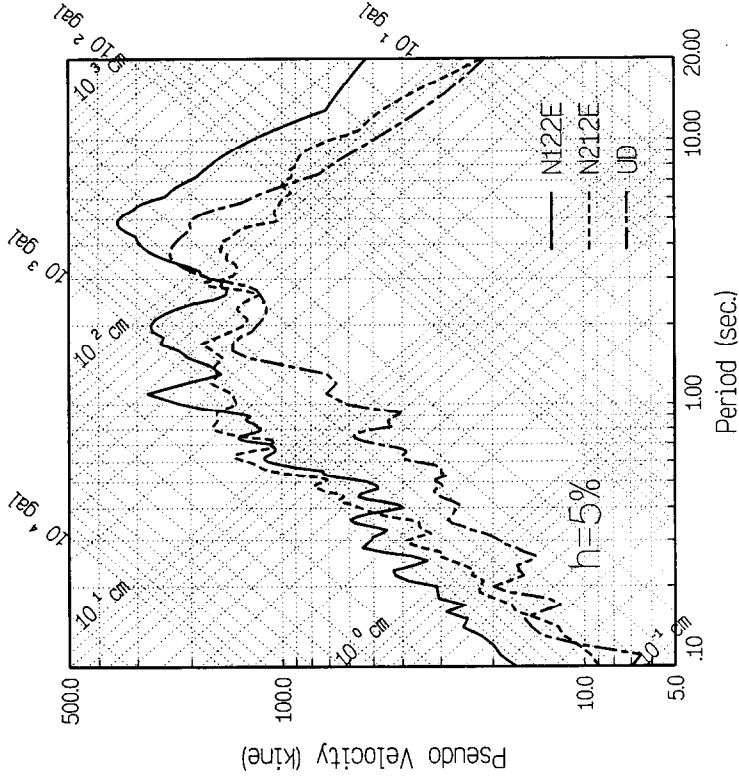
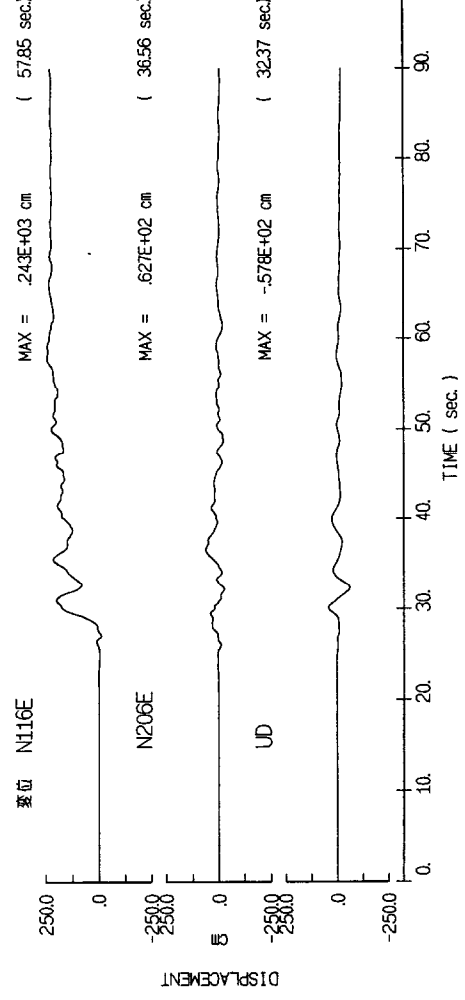
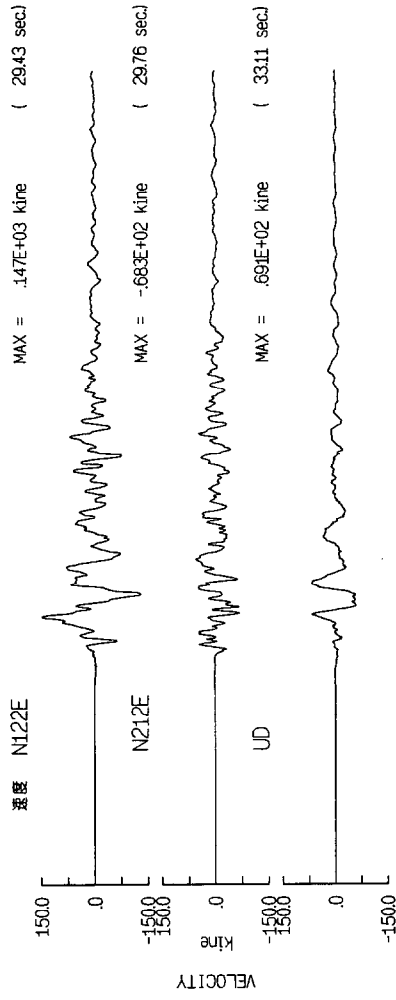
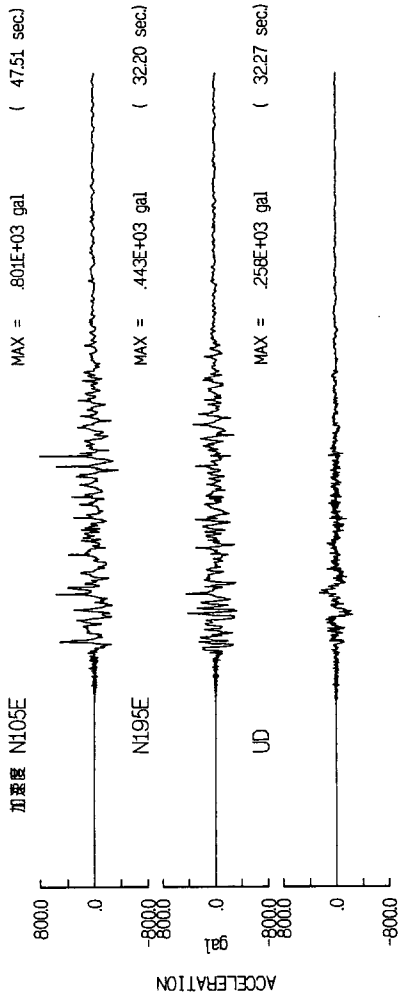
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T052



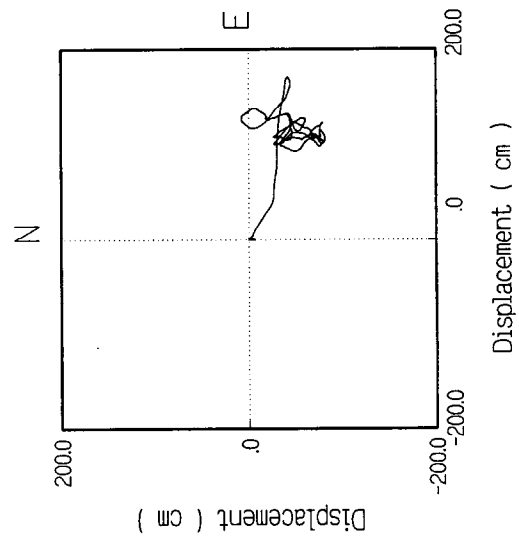
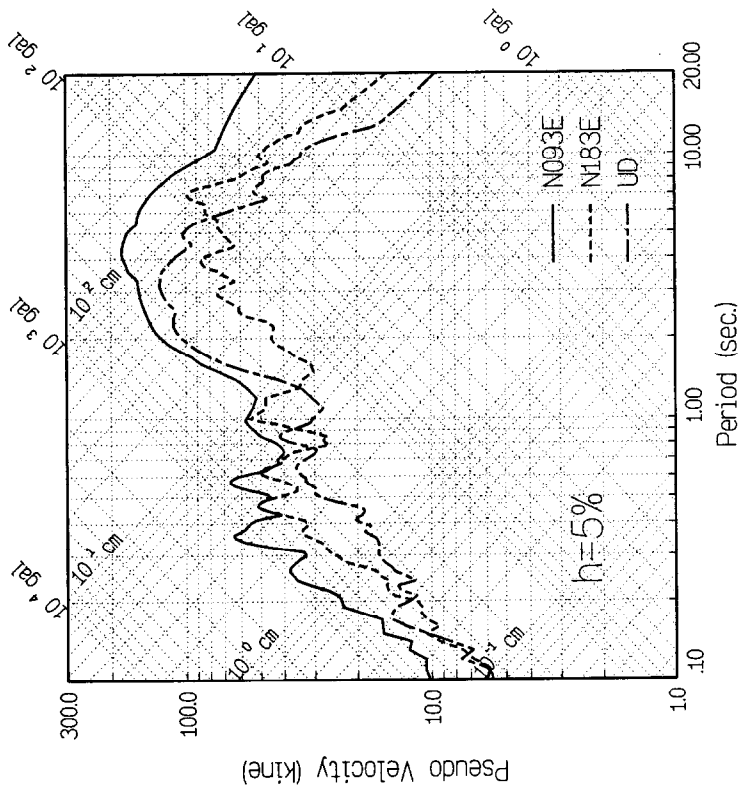
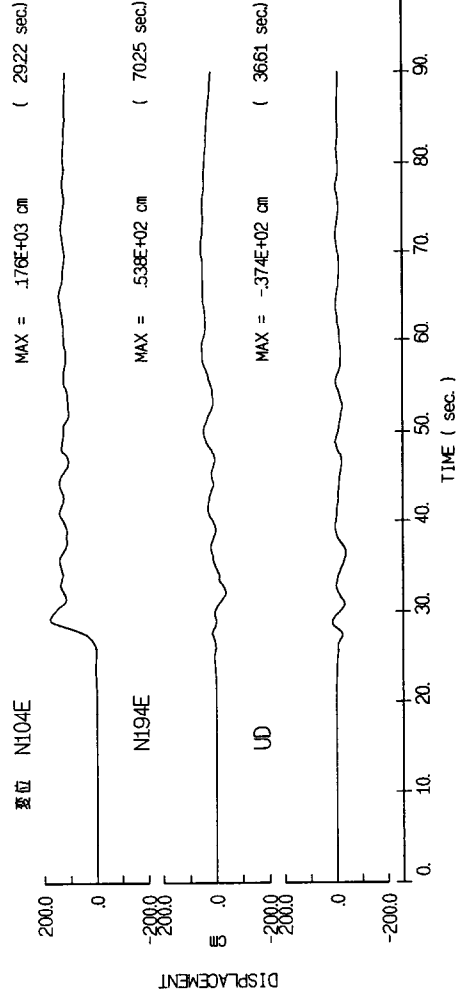
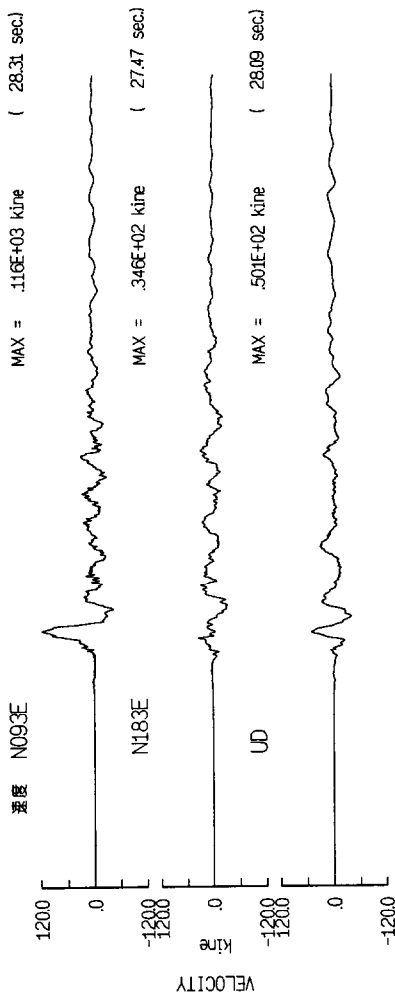
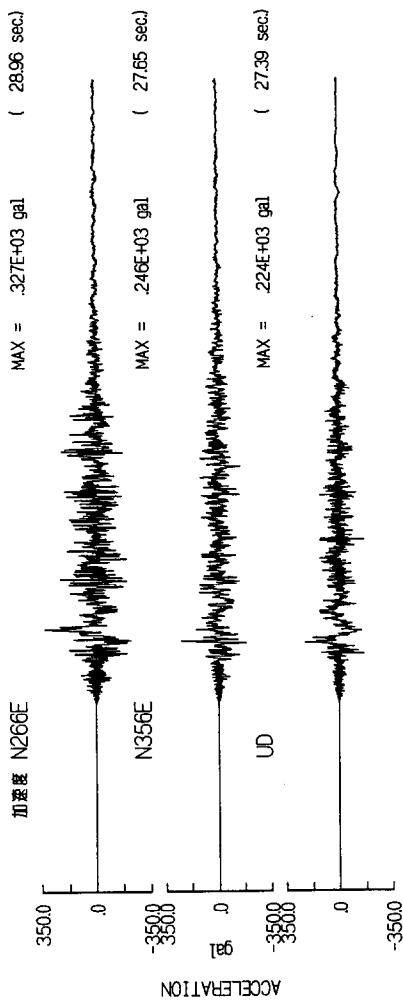
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T065



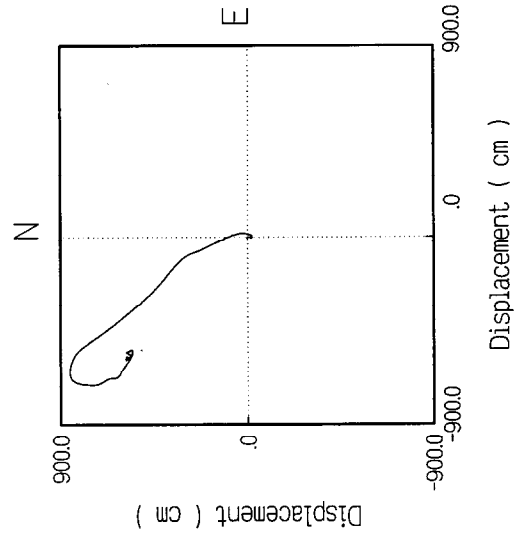
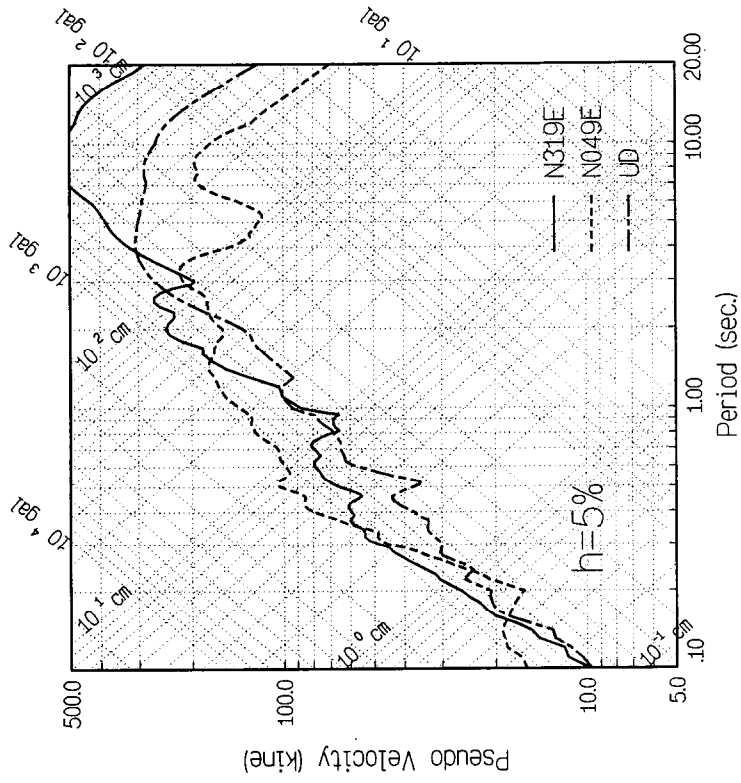
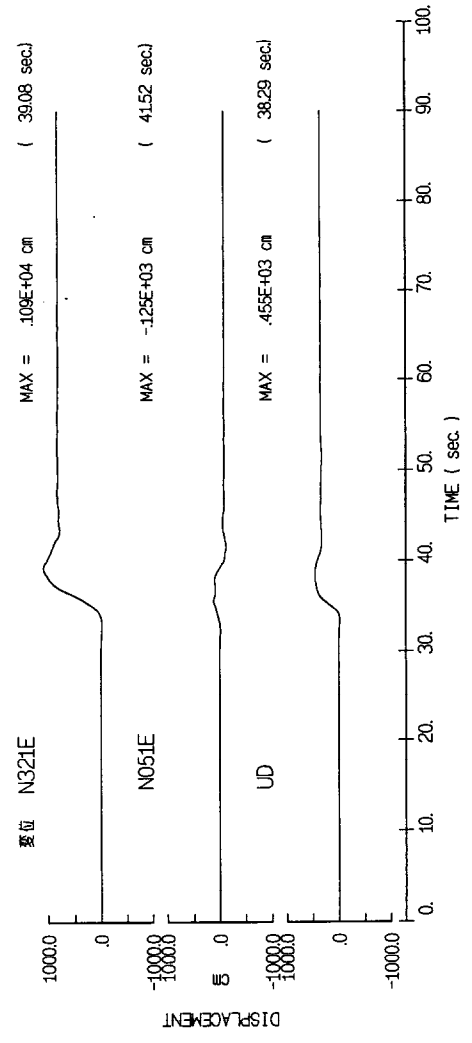
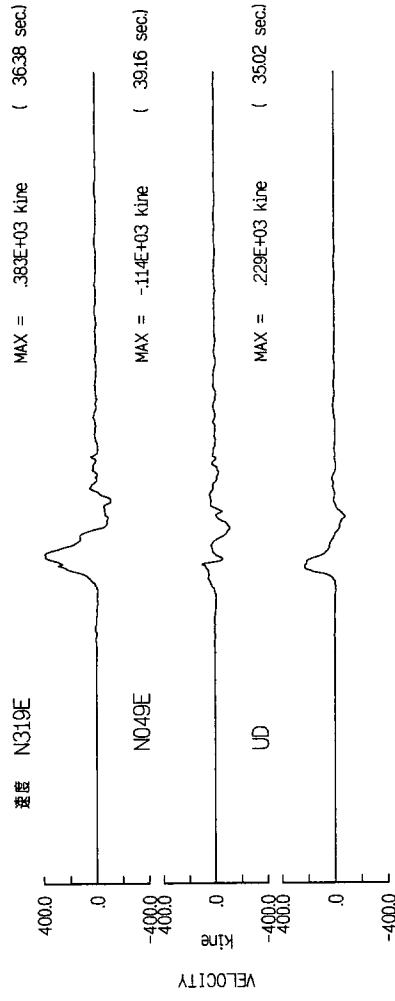
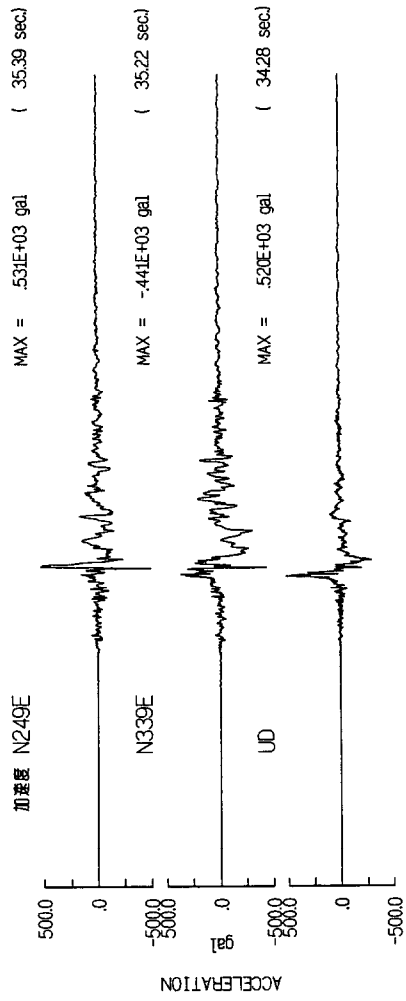
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T075



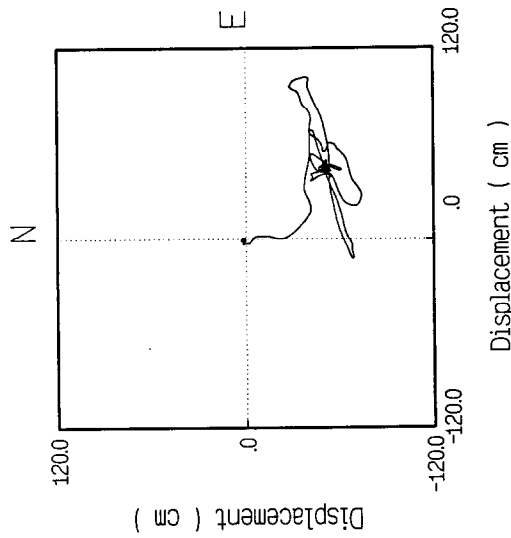
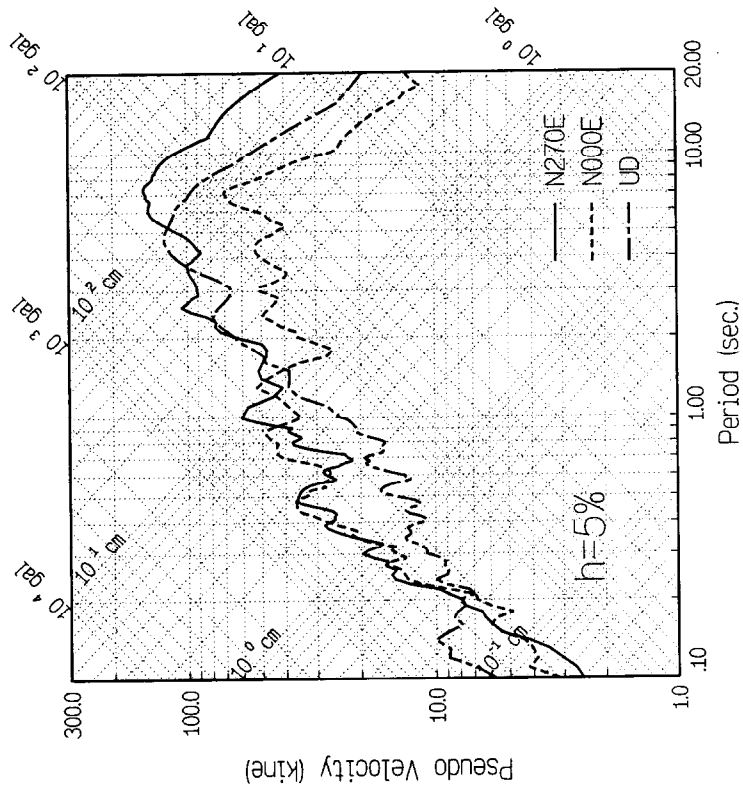
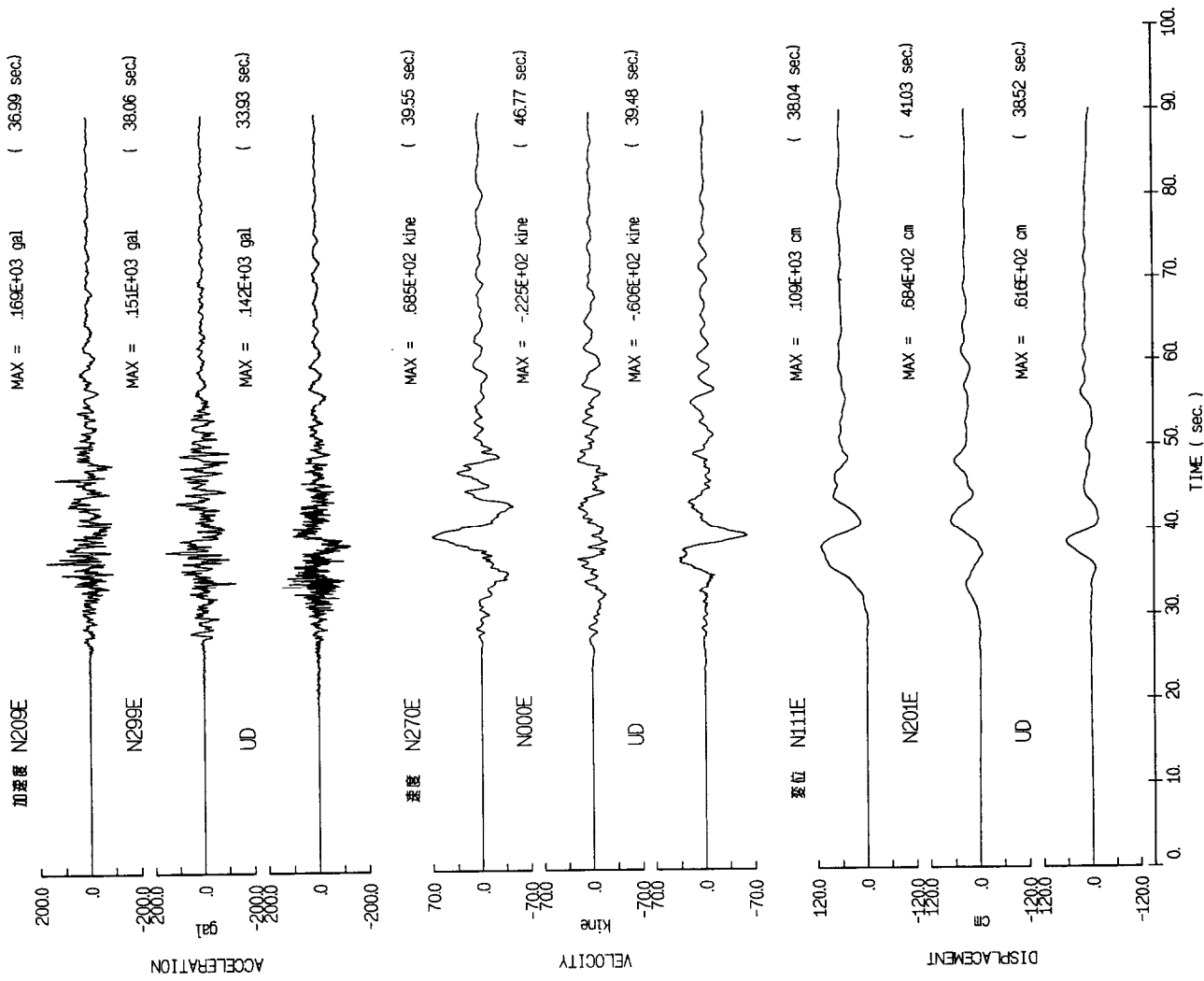
1999/09/21 ChiChi

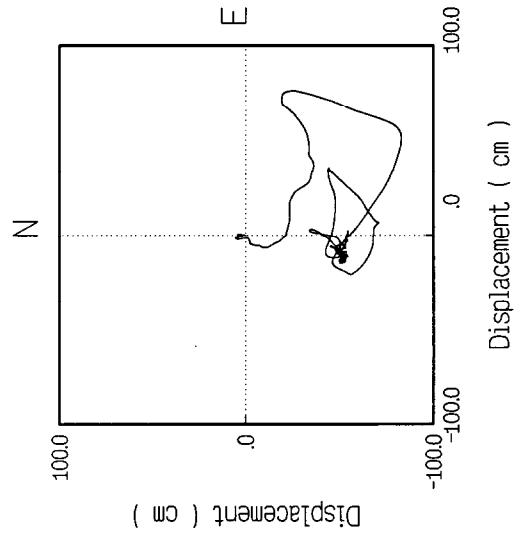
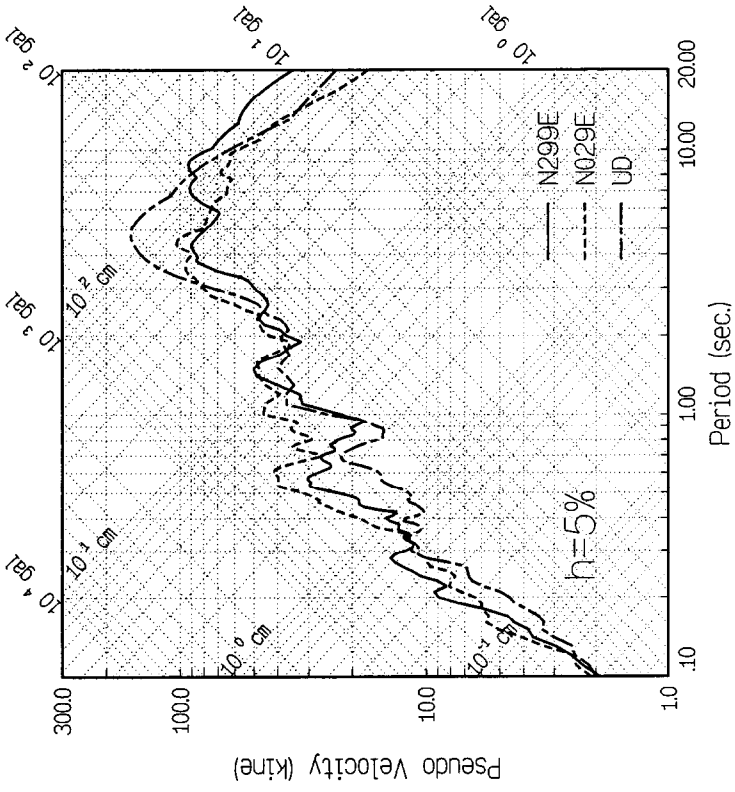
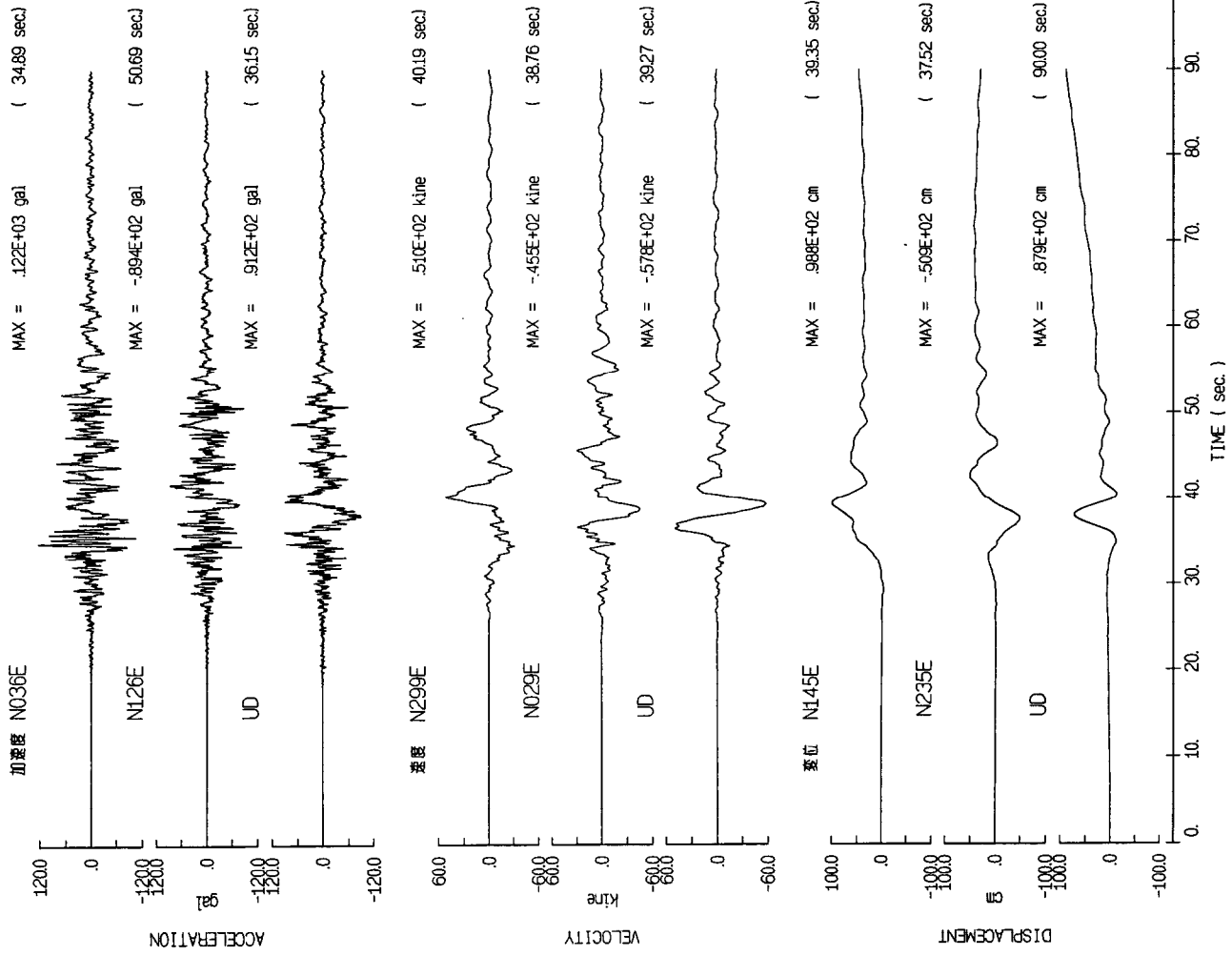
Mw=7.6 T068



1999/09/21 ChiChi

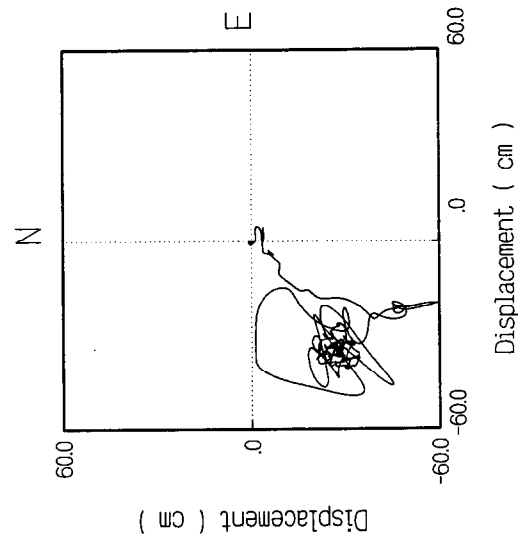
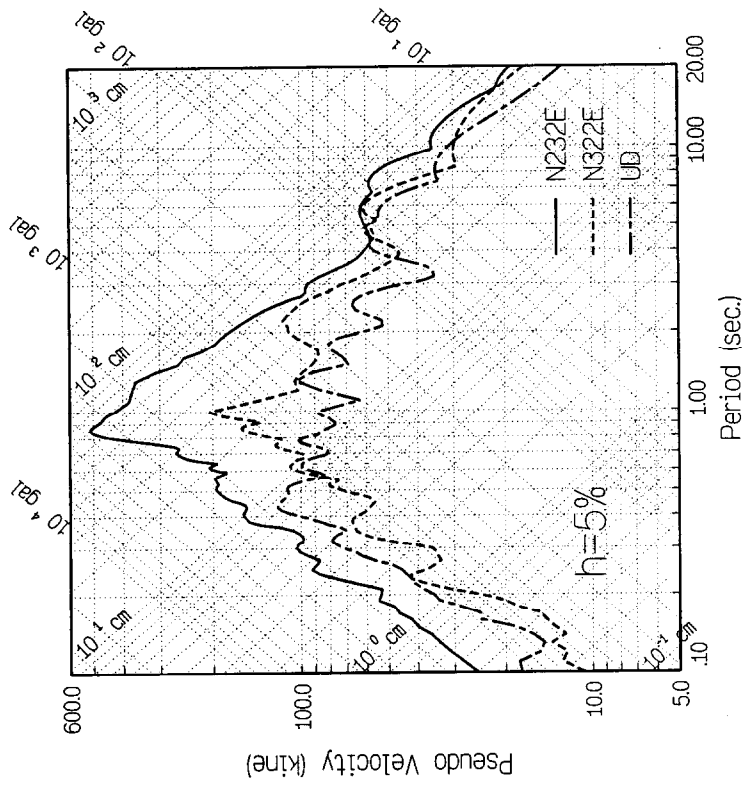
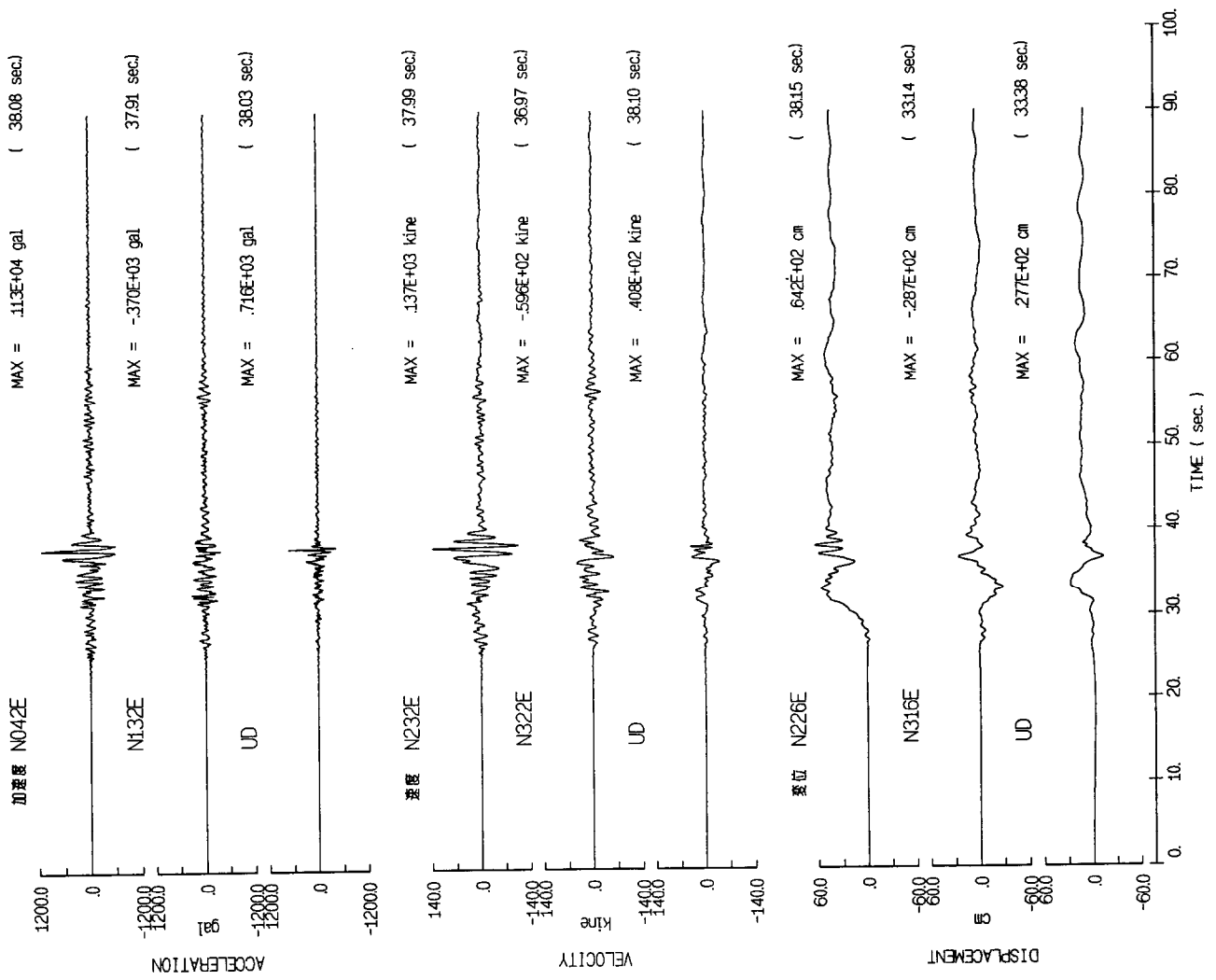
Mw=7.6 T103





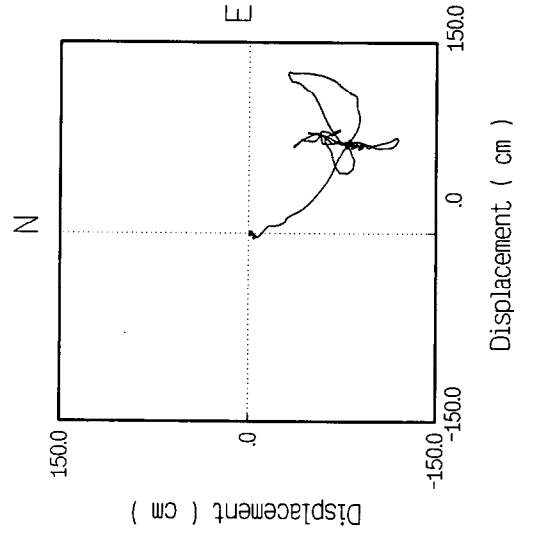
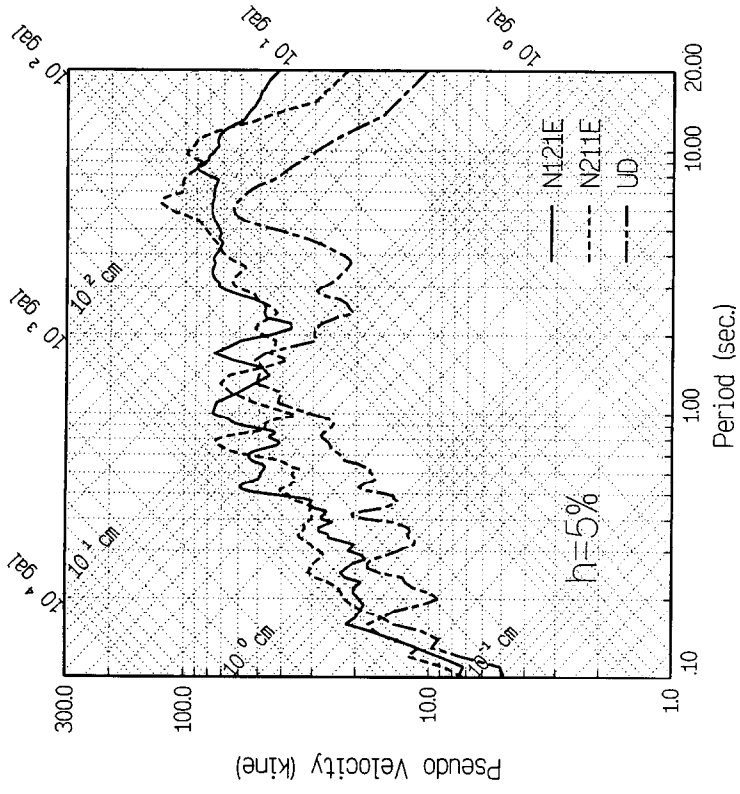
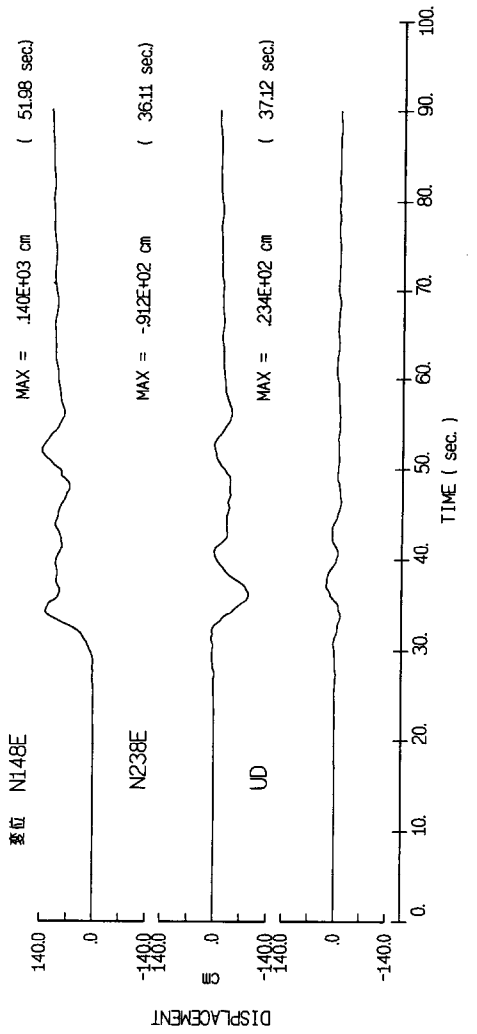
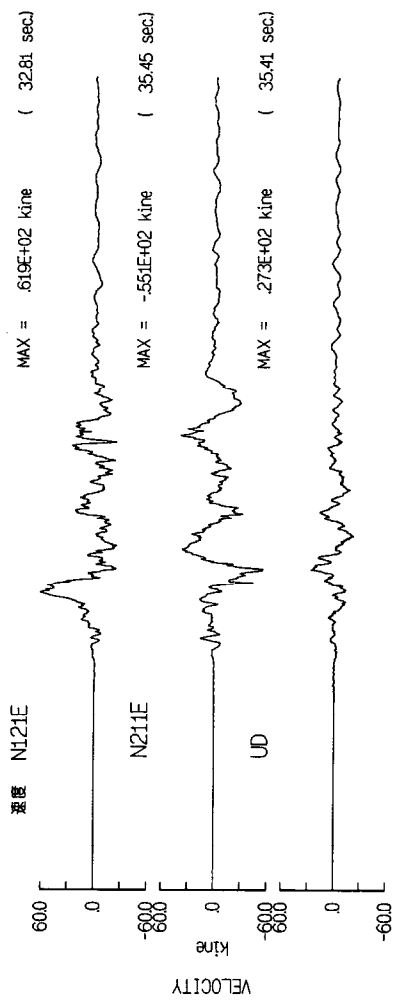
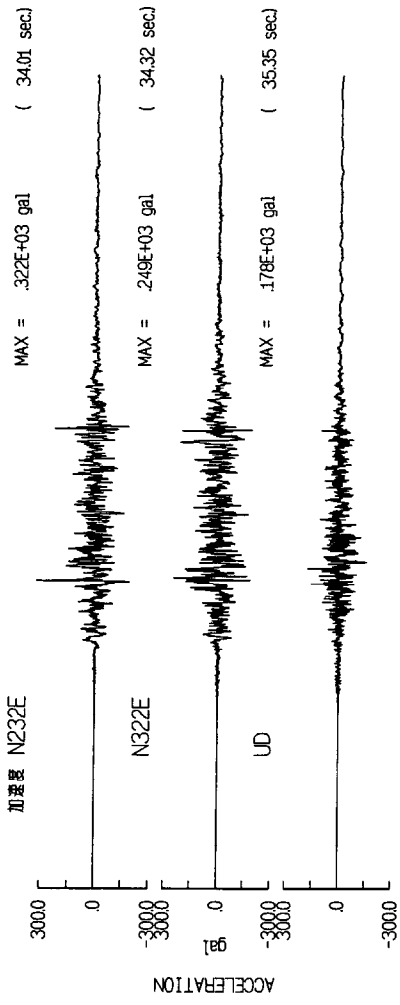
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 C080



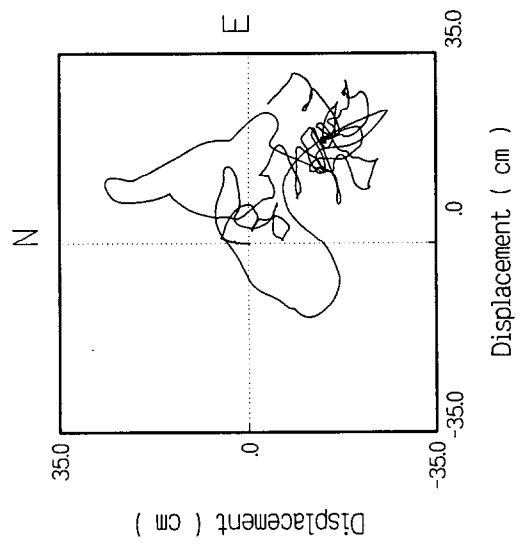
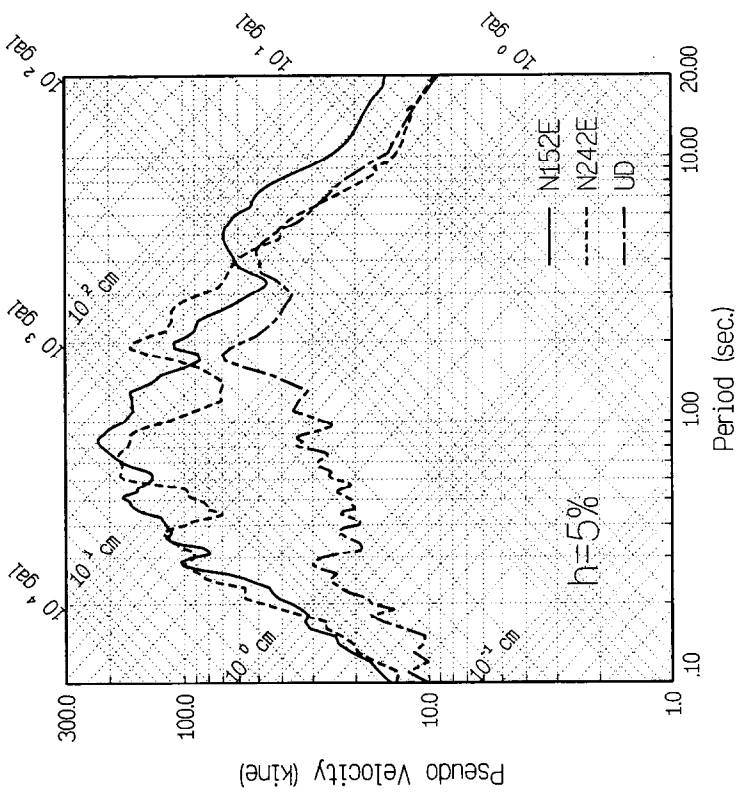
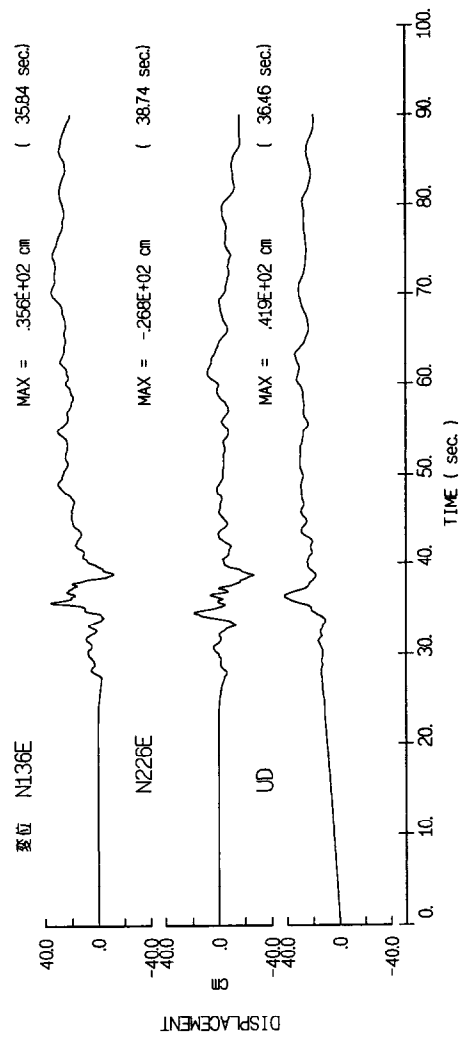
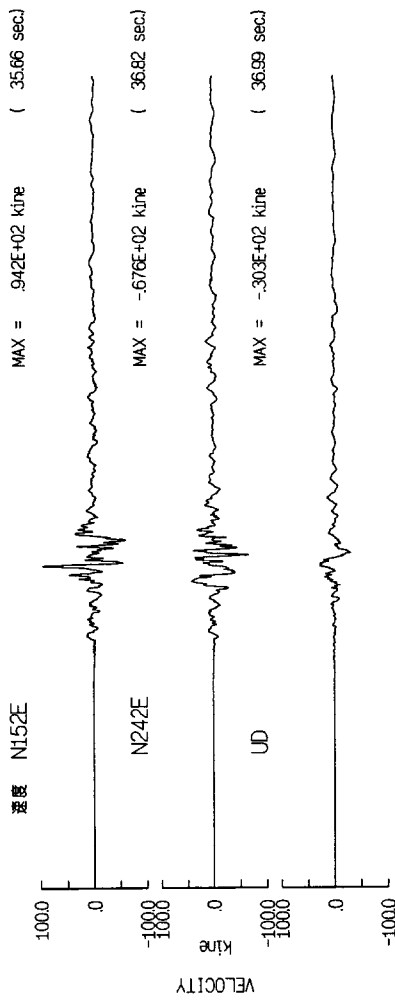
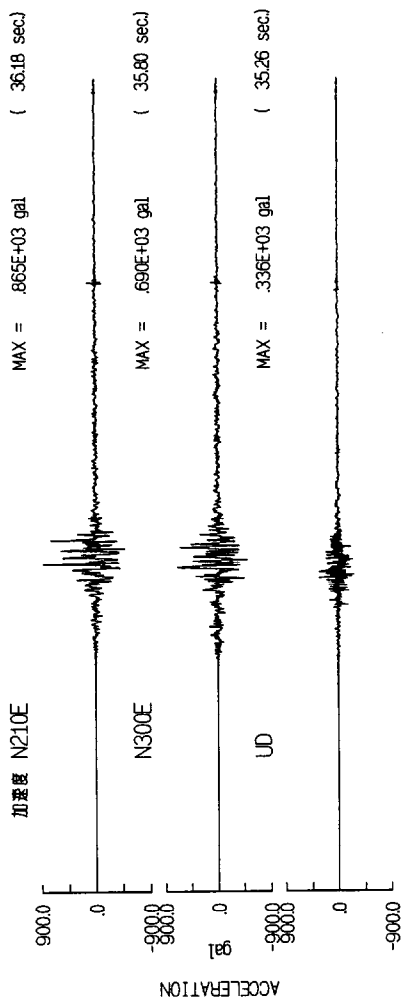
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T049



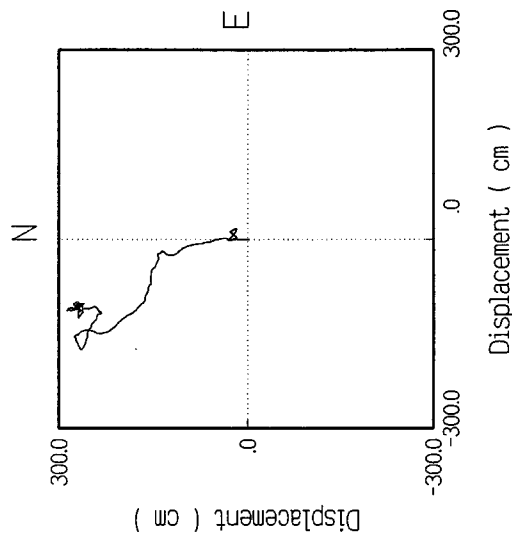
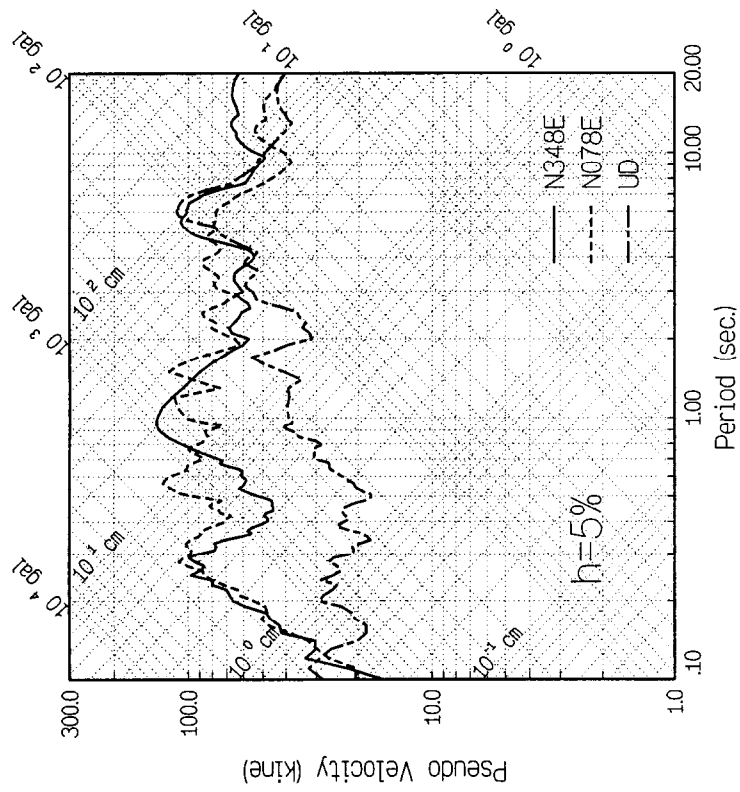
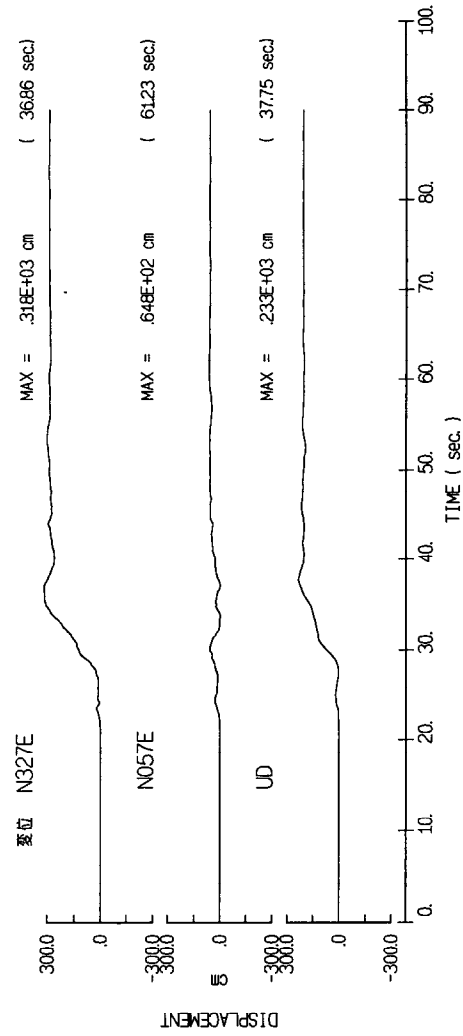
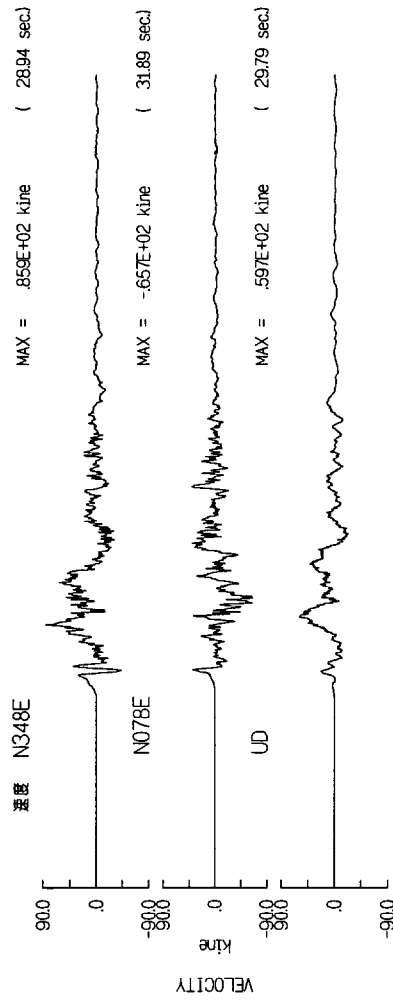
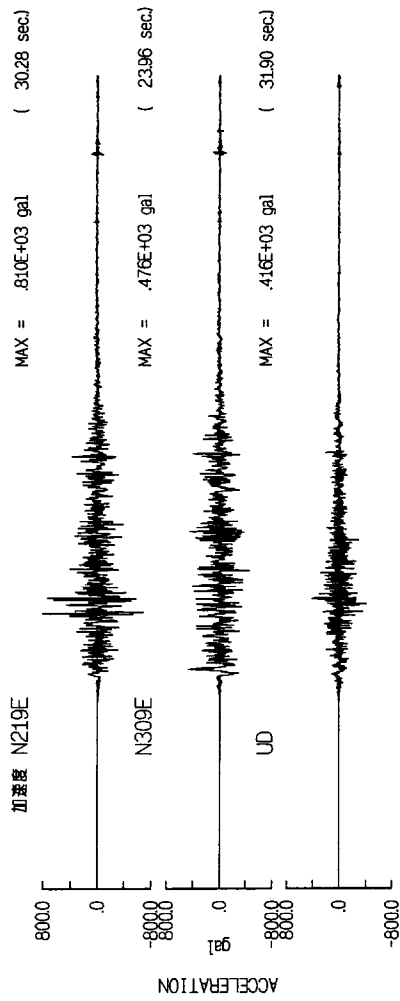
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 C028



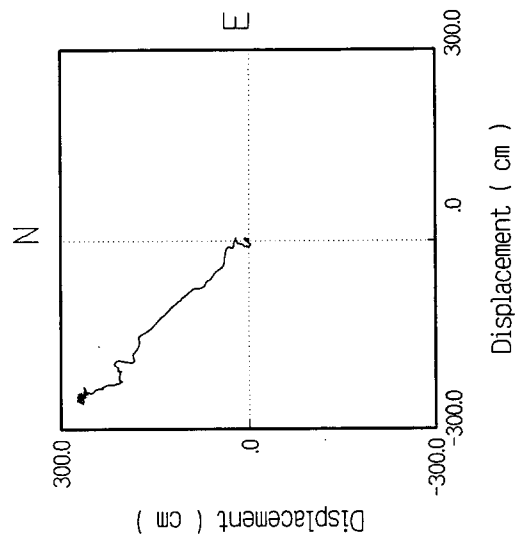
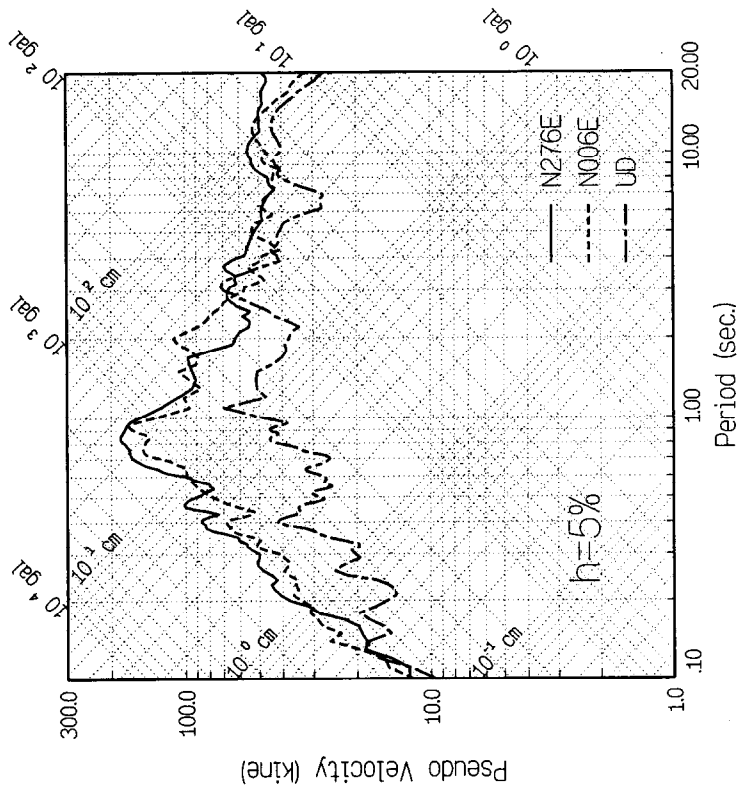
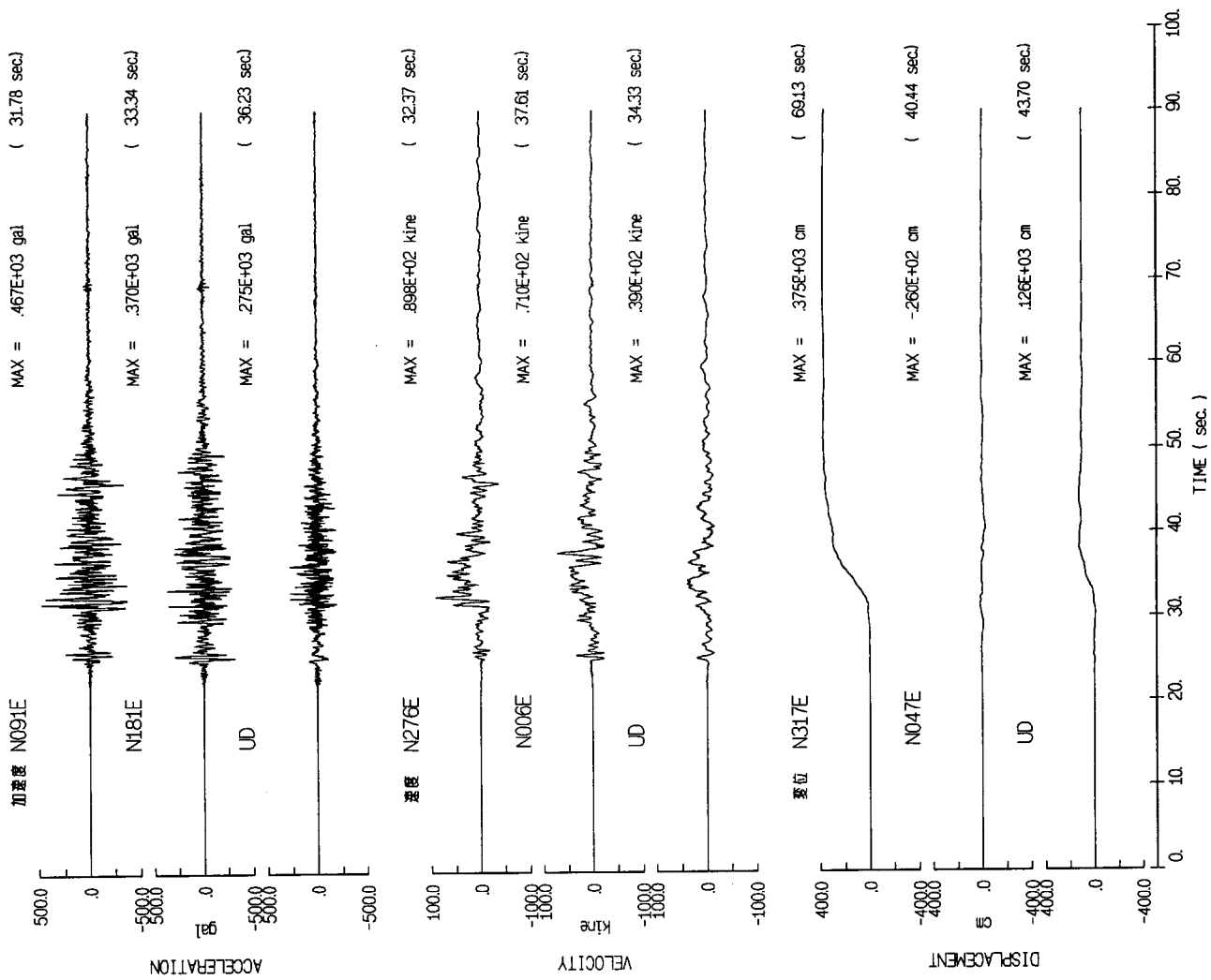
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T071



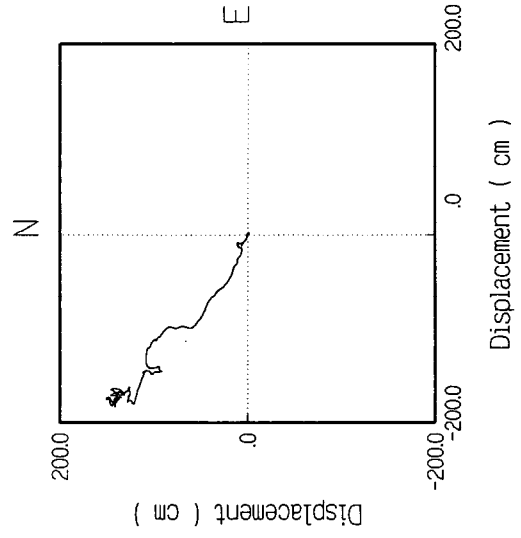
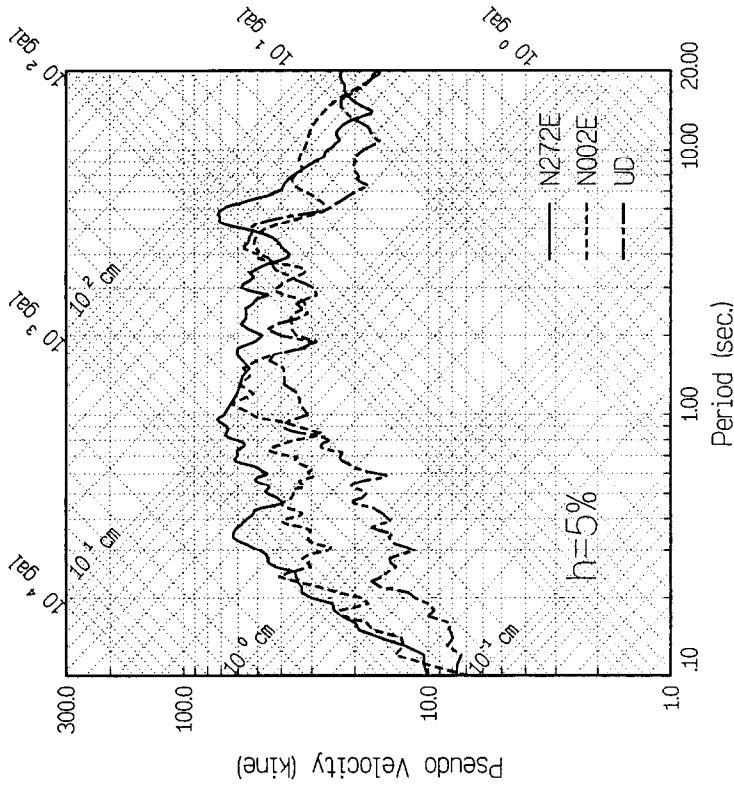
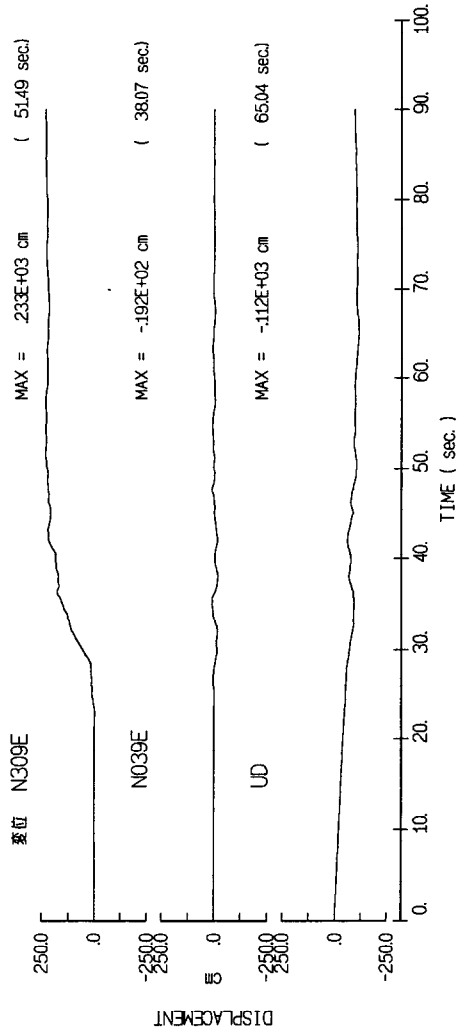
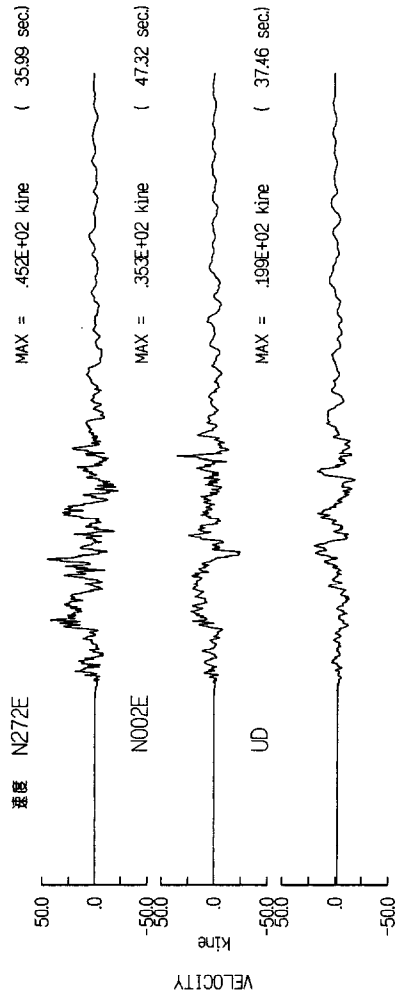
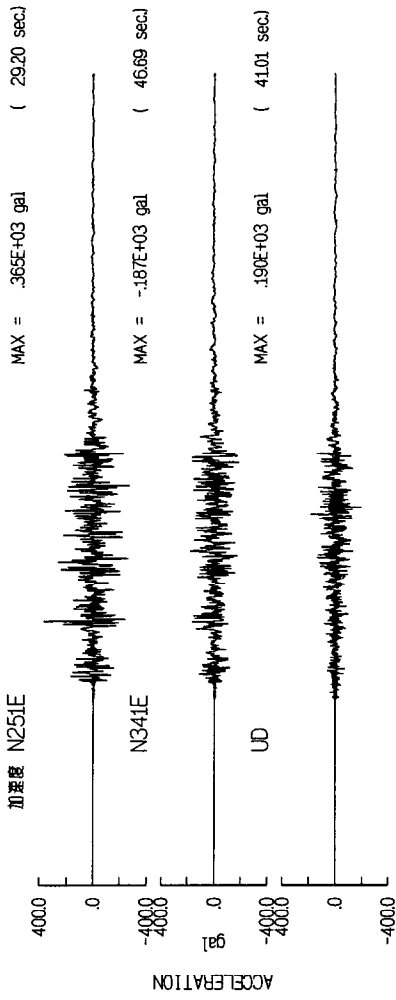
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T072



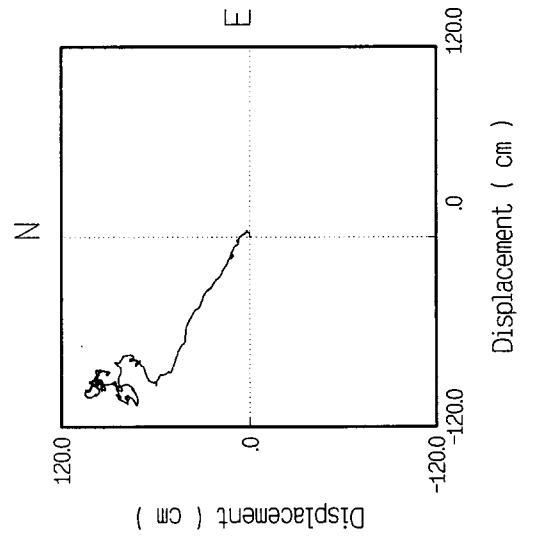
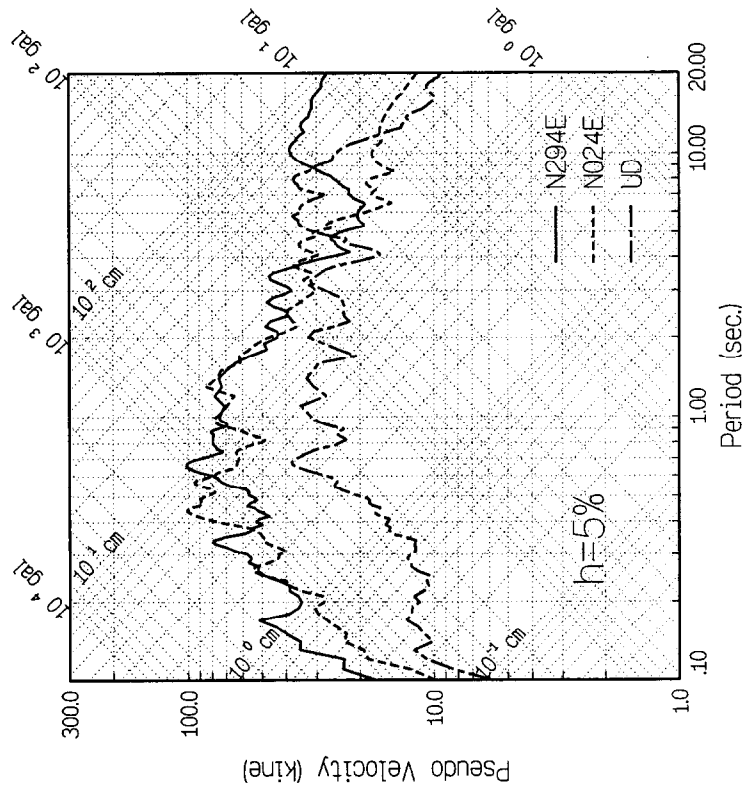
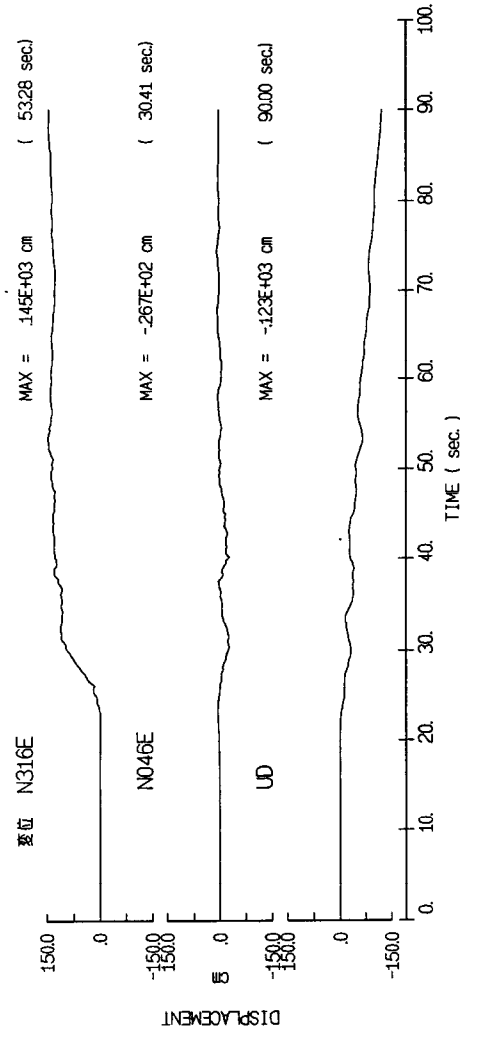
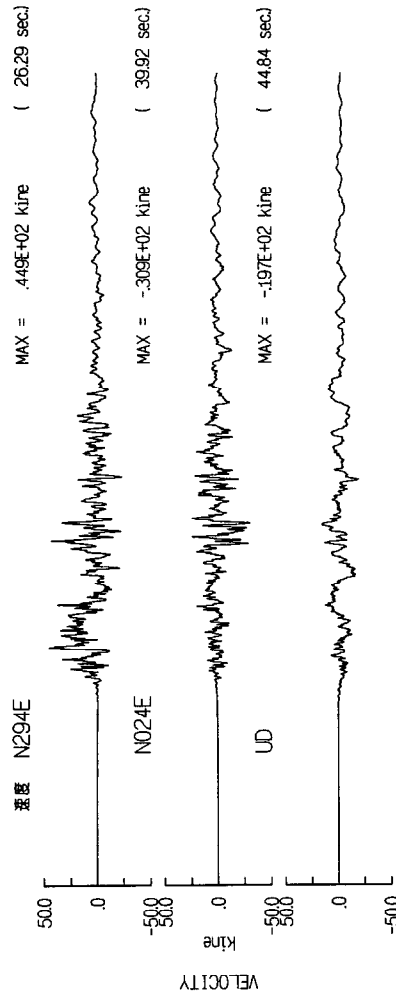
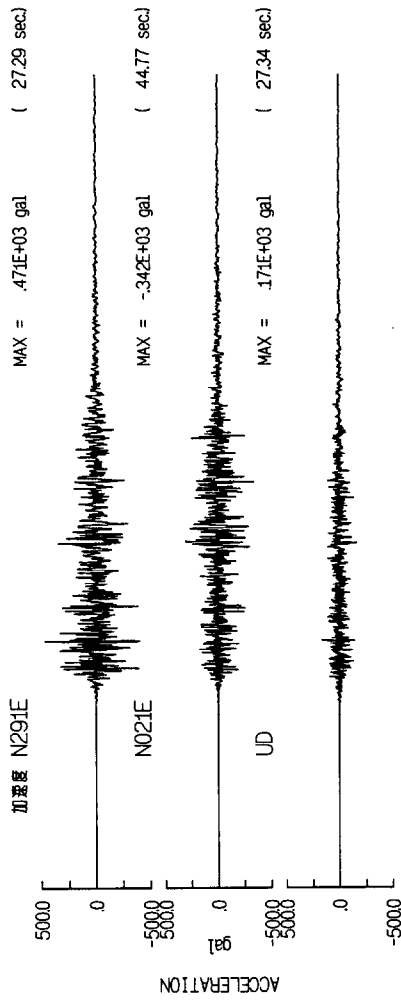
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T089



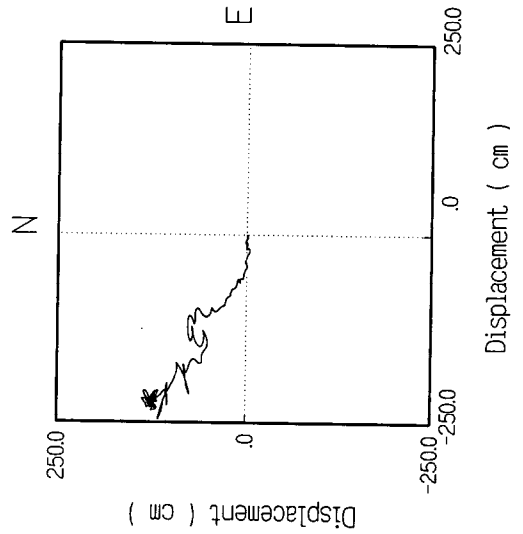
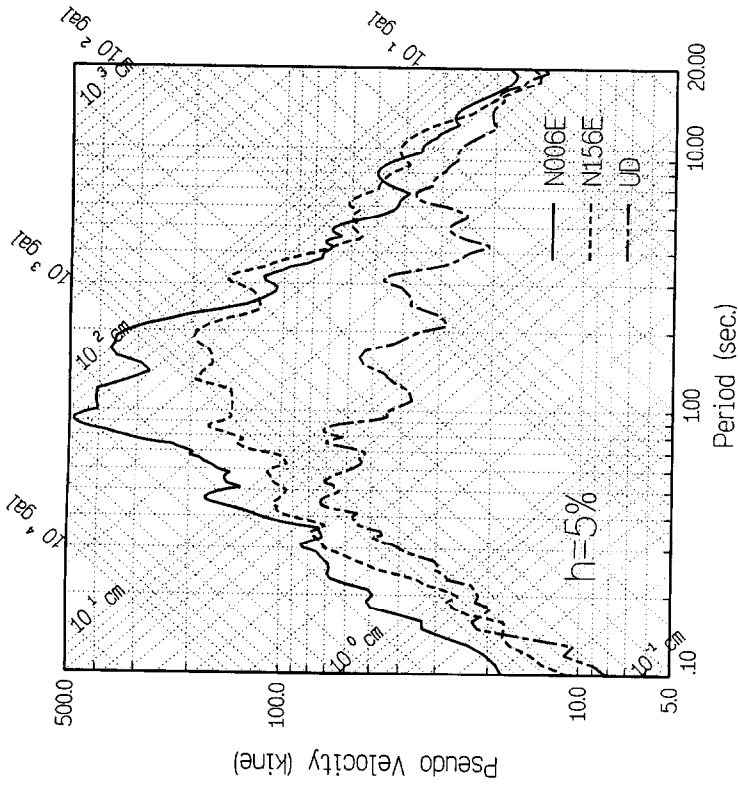
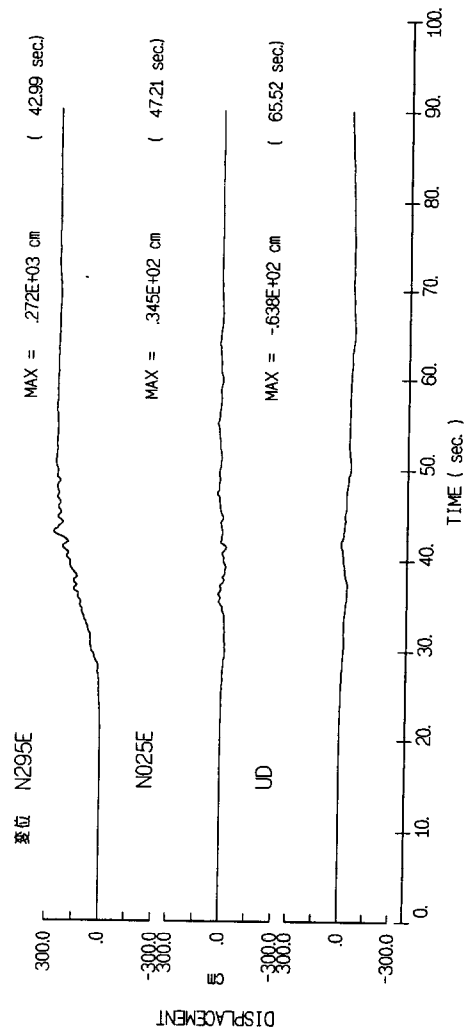
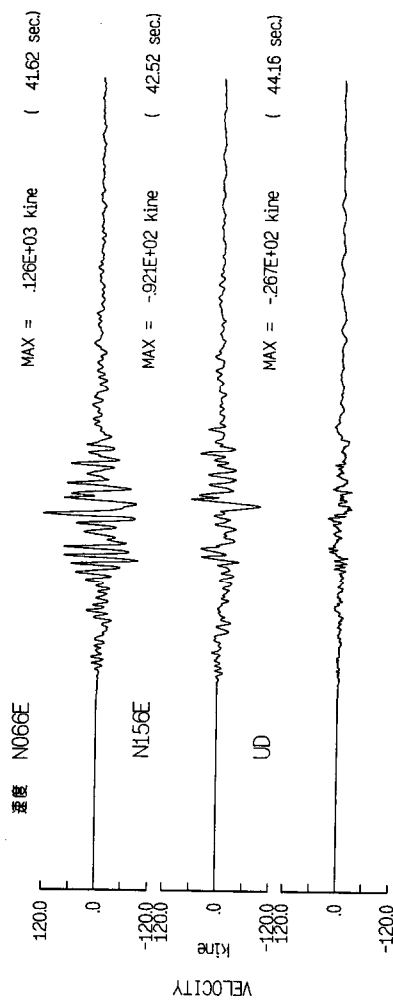
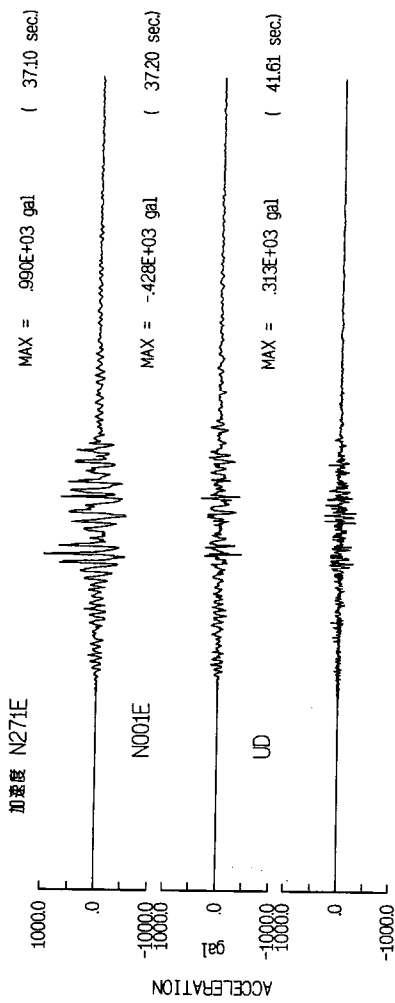
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T078



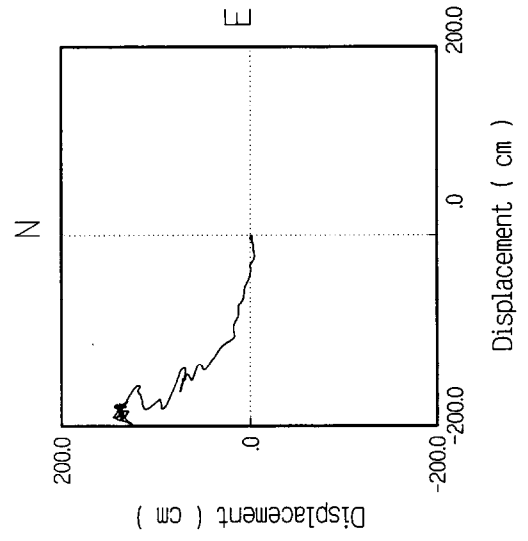
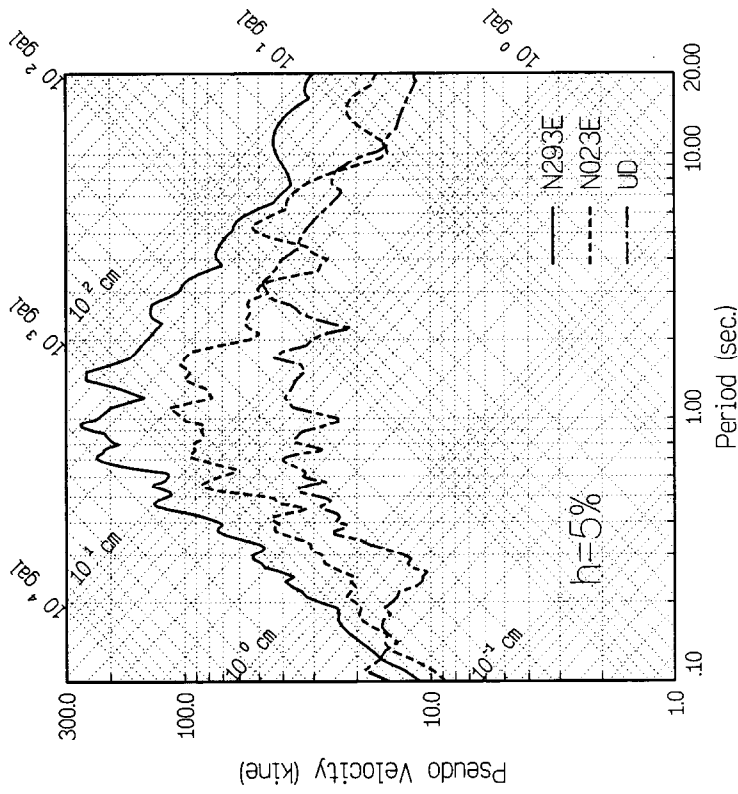
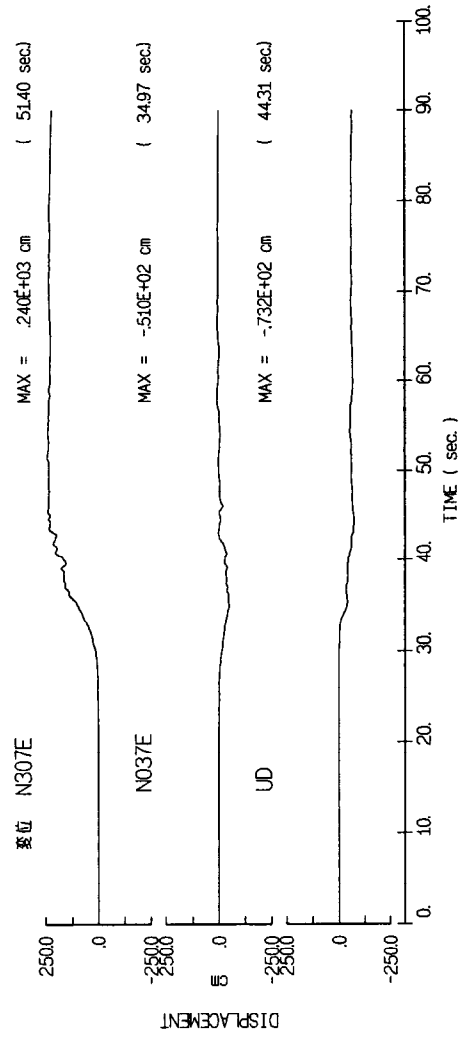
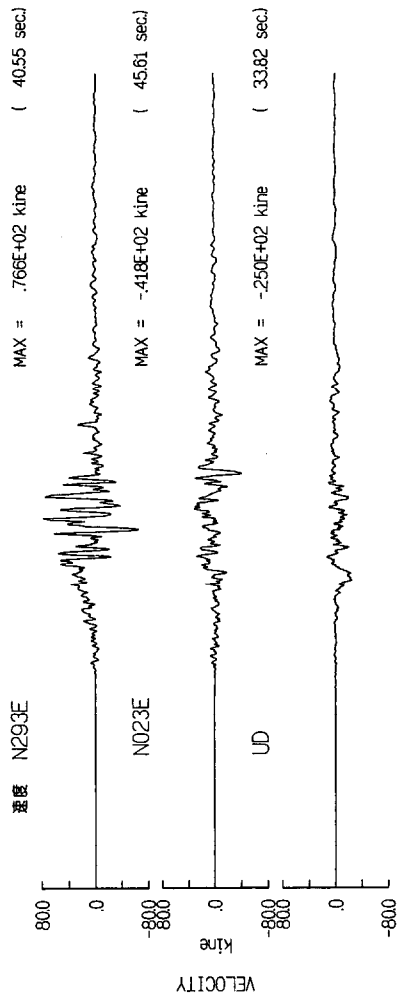
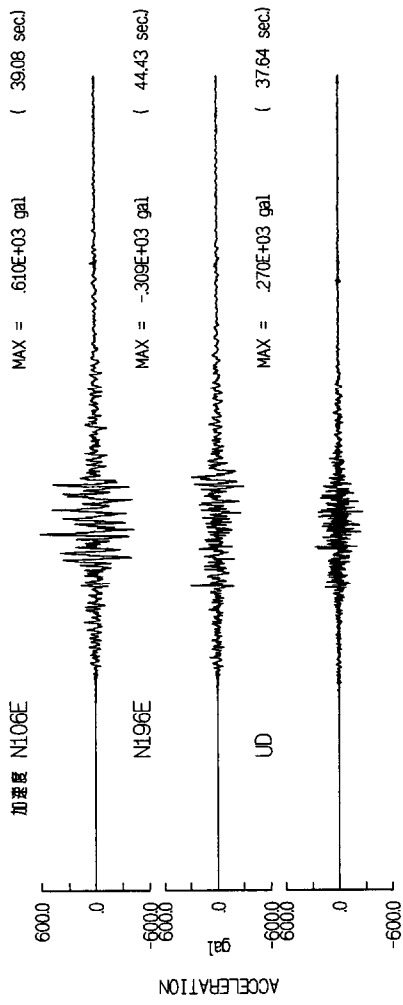
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T084



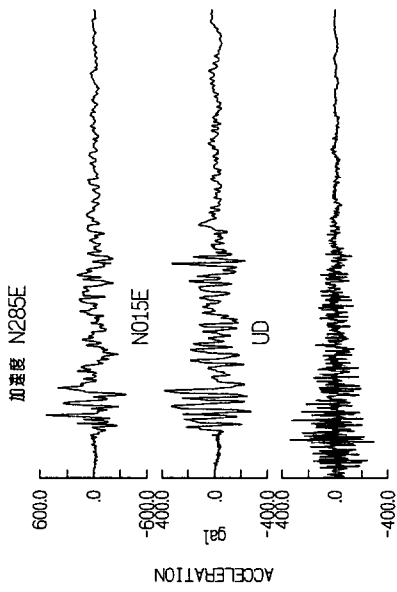
1999/09/21 ChiChi

Mw=7.6 T074



1999/11/12 Duze

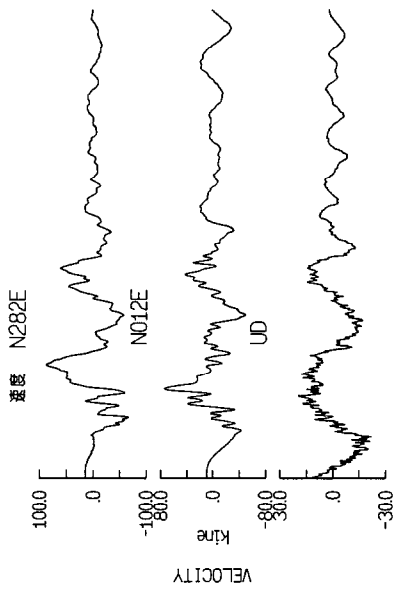
Mw=7.1 DZC



MAX = .532E+03 gal (3.42 sec)

MAX = .383E+03 gal (4.78 sec)

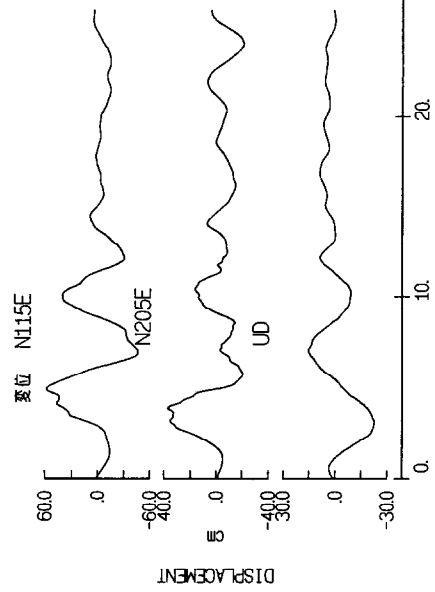
MAX = .340E+03 gal (2.02 sec)



MAX = .876E+02 kine (6.25 sec)

MAX = .745E+02 kine (4.89 sec)

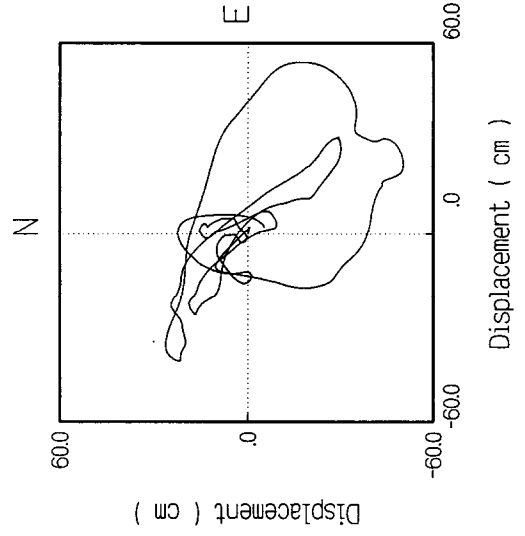
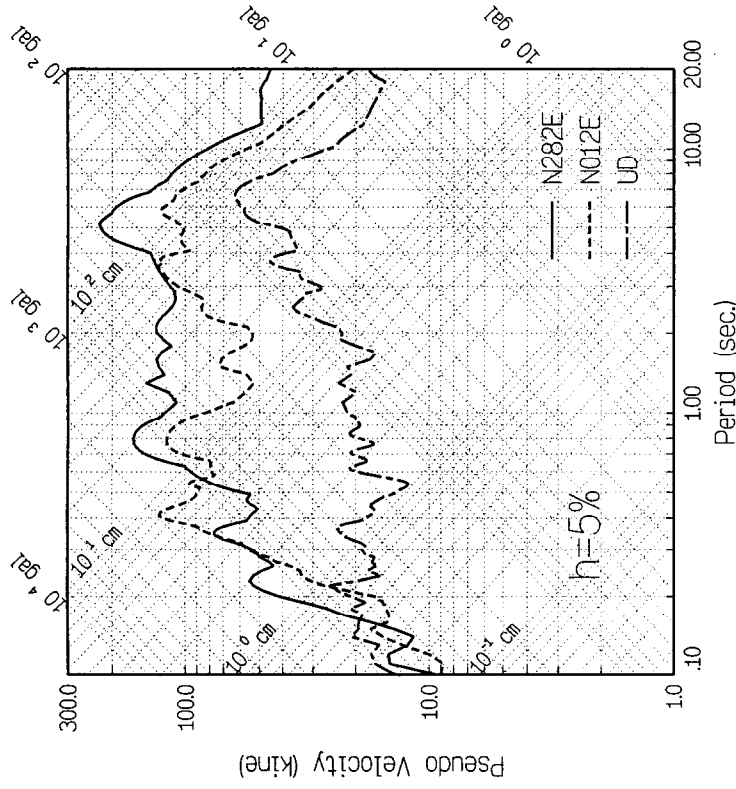
MAX = -.219E+02 kine (2.26 sec)



MAX = .581E+02 cm (4.92 sec)

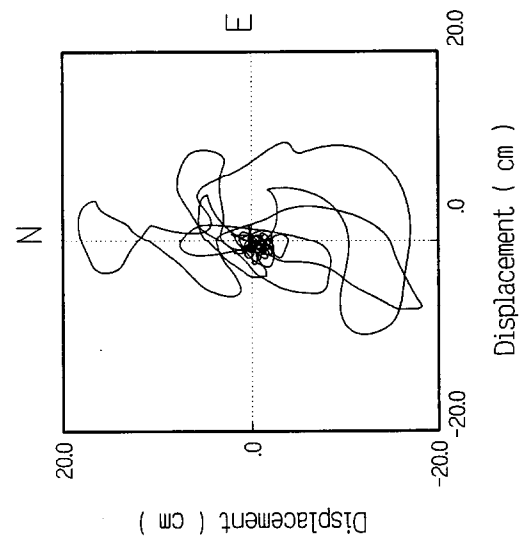
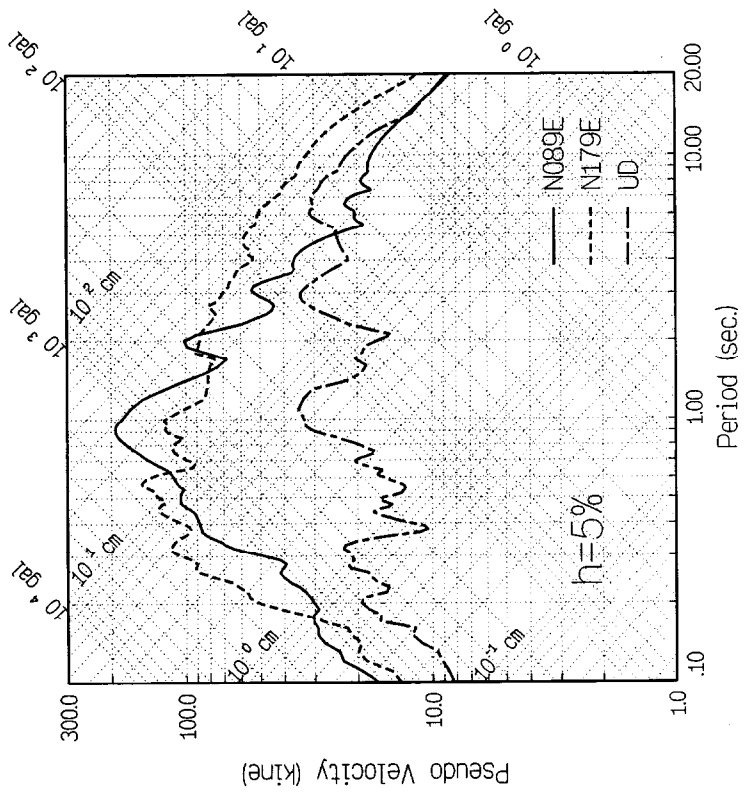
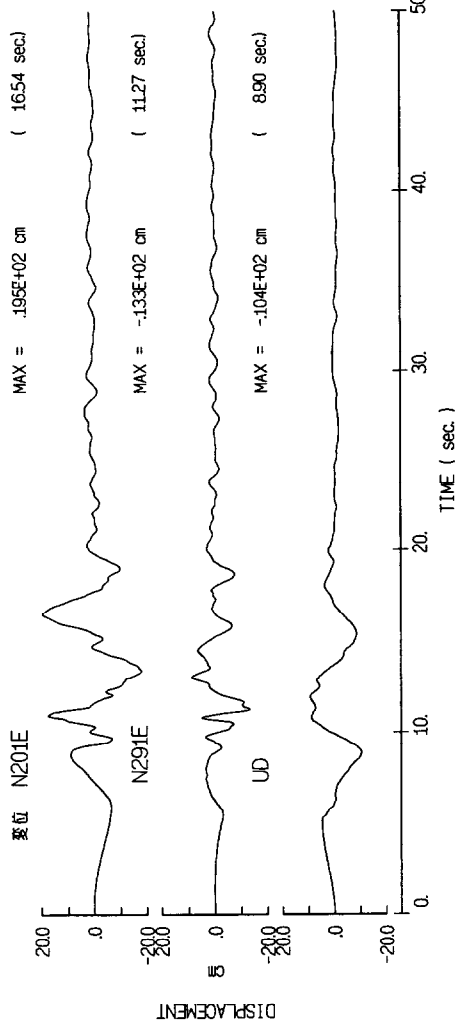
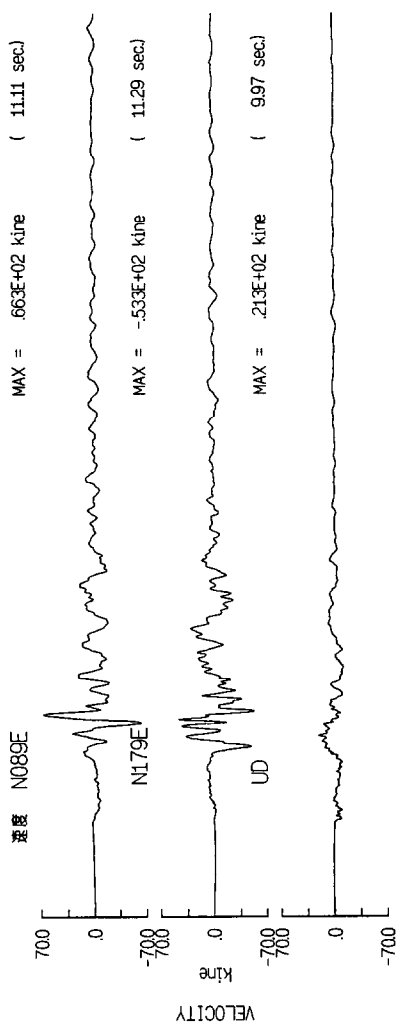
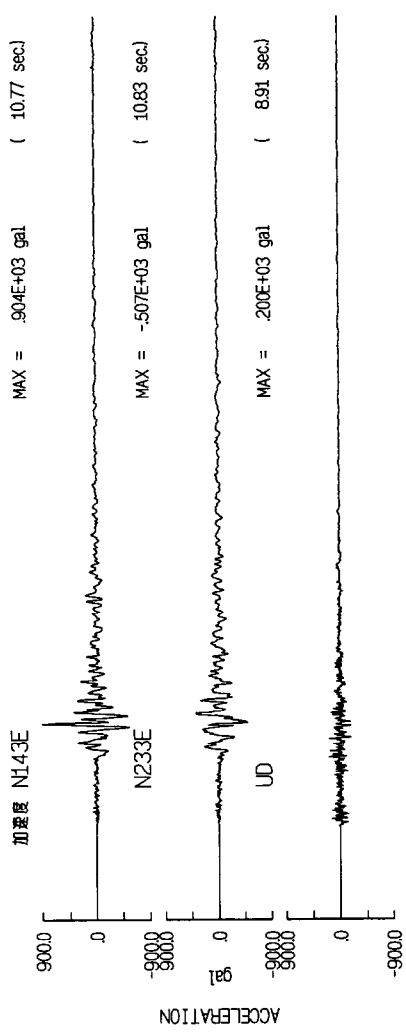
MAX = .368E+02 cm (3.86 sec)

MAX = -.229E+02 cm (3.12 sec)



1999/11/12 Duze

Mw=7.1 BOL



謝辞

東京工業大学教授翠川三郎博士には、著者が修士課程において研究活動の発端を始めて以来、現在に至るまで、ご指導ご鞭撻を賜ってまいりました。特に、本研究遂行時において賜った丁寧なご指導と暖かい励ましは、私にとって幸甚の至りです。深謝の気持ちを持って感謝いたします。

東京工業大学名誉教授小林啓美博士には、修士課程において本論文の発端のテーマを授かり、本論文を遂行するにあたりましても、貴重なご教示を頂きました。また、修士在学中には厳しくも暖かいご指導いただき、研究者を志すきっかけを与えていただきました。深く感謝いたします。

瀬尾和大博士（東京工業大学教授）、大町達夫博士（東京工業大学教授）、山中浩明博士（東京工業大学助教授）には、筆者在学中はもとより、機会ある毎に、貴重なご教示を賜り、心から感謝しております。

東京工業大学助手藤本一雄博士には、研究生活の支援およびゼミを通じて貴重な意見を賜りました。厚くお礼申し上げます。司宏俊博士（現・構造工学研究所）、佐伯琢磨氏（D2, 現・損害保険料率算定会）、Vicotr RODRIGUEZ 氏(D1)をはじめ、翠川研究室学生諸氏および卒業生諸氏にも、研究生活およびゼミを通じて貴重な意見を賜りました。厚くお礼申し上げます。

宮村摂三博士には、福井地震の木造家屋の全壊率に関して貴重な資料を拝領いたしました。心より感謝いたします。

本論文で用いた強震記録は、米国を始め、各国各機関で観測されたものです。観測および強震記録の公開に携わった関係各機関に感謝いたします。

筆者が株式会社大林組に勤務しながら、本研究を遂行することができたのは、所属する研究室を始め、社内の多くの方々のお力添えによるものです。関係する方々全てに厚くお礼を申し上げます。特に、ご便宜を賜りました技術研究所前所長武田寿一博士、技術研究所所長表祐太郎博士、安井讓博士（旧振動研究室室長）、鈴木哲夫博士（旧構造第二研究室室長）、建築振動制御研究室室長関松太郎博士に心より感謝いたします。

地盤震動研究室室長若松邦夫博士には、筆者が技術研究所配属以来、研究面で様々なご指導いただきました。深く感謝いたします。

地盤震動研究室、大堀道広博士、田中清和氏には、筆者が本論文を執筆中、多大なるご迷惑をおかけしました。深く感謝いたします。シミュレーションに用いた3次元有限差分法のプログラムは大林組と京都大学防災研究所入倉研究室との共同研究を通じて、入倉研究室より拝領しましたものが元となっているものです。地盤震動研究室主任研究員栗本修博士、田中清和氏には、同シミュレーションにおいてご協力いただきました。関係者各位に厚く感謝いたします。プロジェクト部奥田暁博士には、議論を通して、貴重な意見を頂きました。厚く感謝いたします。