

## 1995年兵庫県南部地震の強震動記録の検討

猿田 正明  
(技術研究所)  
横田 治彦  
(技術研究所)  
片岡 俊一  
(技術研究所)  
半澤 徹也  
(技術研究所)

### §1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、阪神・淡路地域において多くの建築構造物・土木構造物の倒壊・大破という未曾有の大被害をもたらし、各所で火災も発生した。

地震断層に近い地域で非常に大きな地動を生じたことが、被害を大きくした原因の一つと考えられるが、その一方で、関西地方において多くの強震記録が得られた。これらのデータは、関西地震観測研究協議会・気象庁等の各機関の努力によって、早い時期に公開されている。ここでは、現在までに公開されている記録のうち神戸周辺の記録について、時刻歴波形の各種最大値・応答スペクトル・総エネルギー入力スペクトル・層間変形スペクトル・スペクトル強度・Arias Intensity等地震動強さを表す各種指標を計算し、設計用地震動 (El Centro, Taft, 十勝沖地震八戸)・1993年釧路沖地震・1994年ノースリッジ地震の記録と比較することで地震動の大きさについて考察を行い、今後の耐震設計の資料とした。

また、気象庁は、地震後の現地調査により倒壊率30%以上に適用される震度VII (激震) の地域として、図-2に示す神戸市須磨区から西宮市にかけて海岸沿いの幅約2km延長約30kmの地域および淡路島北部の北淡町、一宮町、津名町の一部を発表した。1948年福井地震後に制定された震度VIIが、初めてこの地震に適用された。



図-1 各地の震度

### §2. 地震の概要

地震の諸元 (気象庁による) を以下に示す。

発震時：平成7 (1995) 年1月17日5:46JST

震源：淡路島北部

北緯34°36.4', 東経135°2.6'

震源深さ：14.3km

マグニチュード：7.2

各地の震度を、震源位置と合わせて図-1に示す。震源近傍の洲本・神戸で震度VI、京都・彦根・豊岡で震度Vをはじめとして西日本一帯から中部・関東地方までの広い範囲で揺れを感じたことが分かる。



図-2 震度VIIの地域

### § 3. 地震記録の概要

#### 3.1 強震動記録について

兵庫県南部地震において観測された強震動記録について、関西地震観測研究協議会（独自観測の他、会員提供記録も含む）・気象庁・建設省建築研究所等はデジタル値を公開している。また、多くの機関

が最大値を発表している。

図-3<sup>1)</sup>には、発表された各観測点の最大値を示す。これによると、神戸市での加速度は $800\text{cm/s}^2$ を越え、速度も $40\text{cm/s}$ を越えている。大阪周辺では、加速度が $200\text{cm/s}^2$ 、速度が $20\text{cm/s}$ を越える地動となっている。

福島・入倉は、観測された強震記録の最大振幅と距離減衰および水平動と上下動の最大値の関係について検討を行っている<sup>2)</sup>。これによると、断層からの距離と最大加速度の関係は、図-4に示されるように福島・田中の最大加速度の距離減衰式による推定値と良い対応を示している。また、水平動と上下動の関係については、図-5に示されるように上下動は最大加速度が $100\text{cm/s}^2$ 以下では水平動のほぼ $1/2$ 、 $100\text{cm/s}^2$ を越えると水平動の最大加速度とほとんど変わらない大きさとなっている観測点も見られる。地震規模と距離減衰の関係からは、本地震の最大振幅については推定式を大幅に越えるような大きさではないとしている。

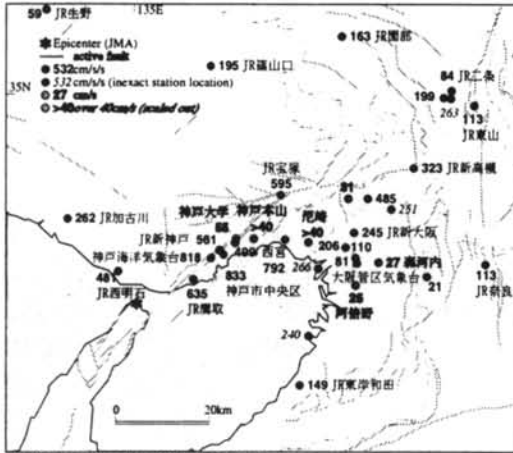


図-3 加速度・速度の最大値の分布（参考文献1）に加筆

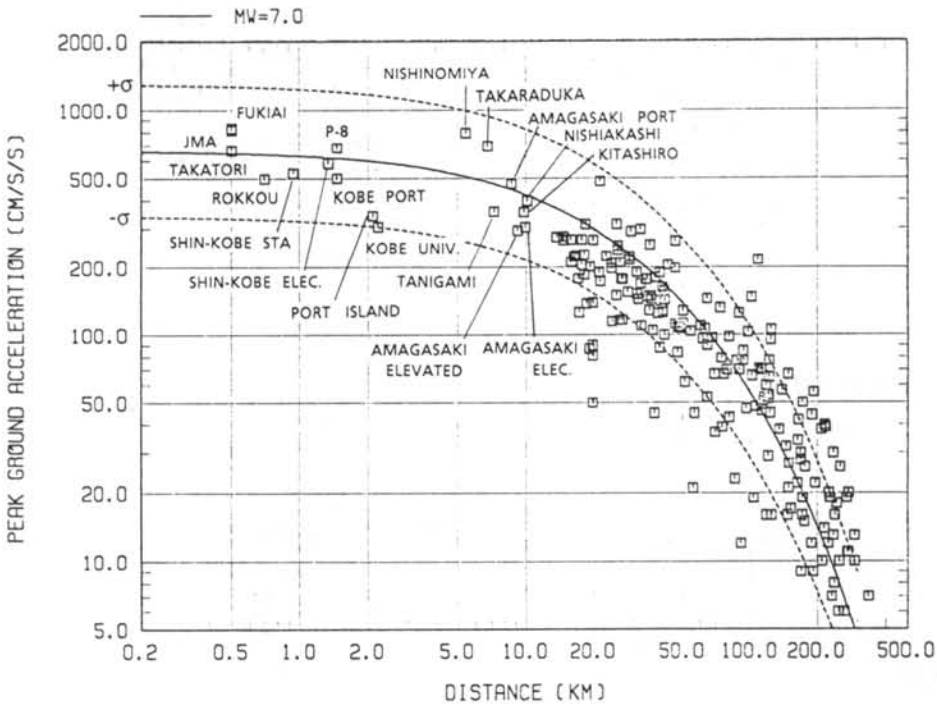


図-4 断層からの距離と最大加速度の関係

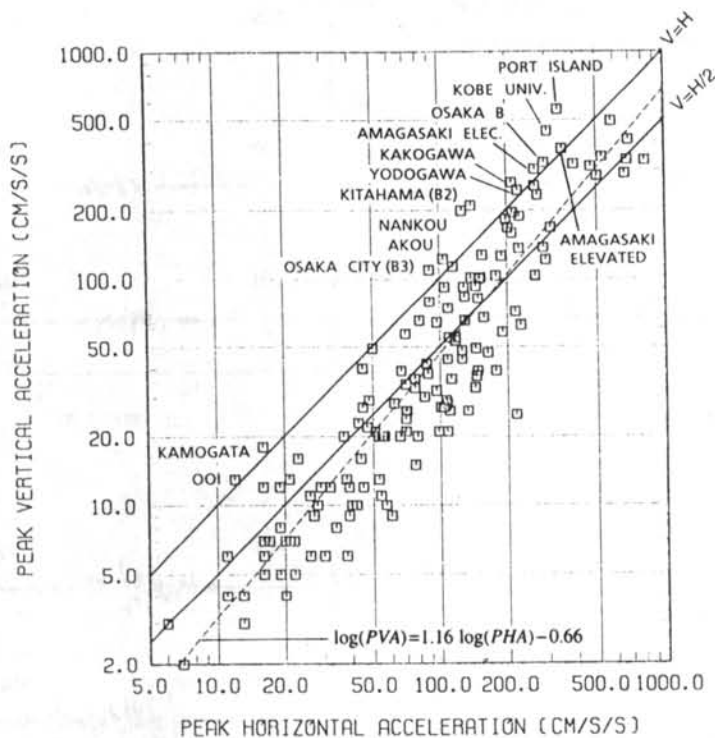


図-5 水平動の最大加速度と上下動の最大加速度の関係

## § 4. 地震記録

### 4.1 時刻歴波形

ここで、検討対象とする観測地点および設置場所・地盤条件を表-1に示す。

各地点での加速度時刻歴波形を図-6, 7に示す。このうち、神戸大学の記録は、速度で記録されたものである。記録の前後で基線のずれが生じており、これを0.08HzのButterworthのハイパスフィルターにより補正した後、微分してカットオフ振動数18Hzのローパスフィルターを施して加速度を求めたものである(詳細については、付録を参照のこと)。また、ポートアイランドでは、地表・GL-16m・GL-32m・GL-83mと鉛直アレー観測が行われているが、地表近くの記録には地盤の液状化の影響が見られるため、ここではGL-83mの硬質地盤中の記録のみを示した。

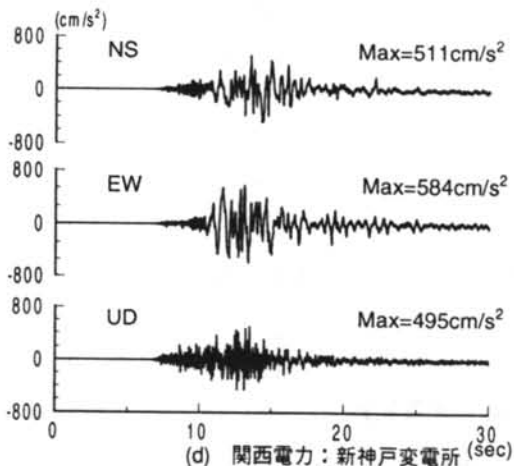
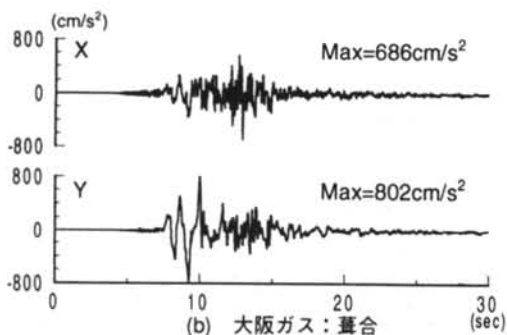
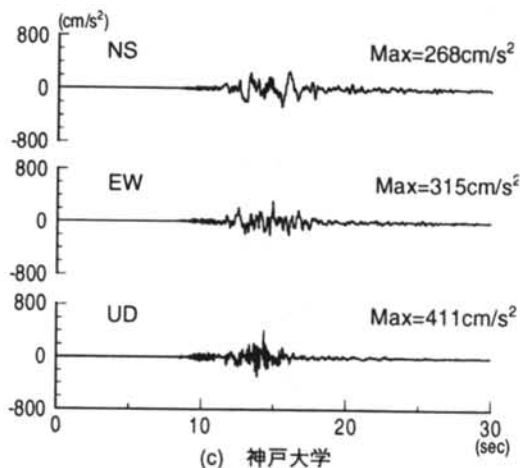
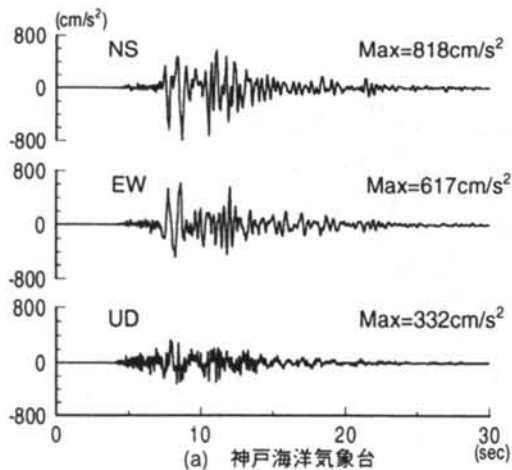
いずれの記録も、3秒程の初動に続き主要動の大きな揺れとなっており、震源近傍の地震動(いわゆる直下地震)の特徴を呈している。最大値は、水平

観測地点	設置場所	地盤
神戸海洋気象台	地表面	洪積層
大阪ガス葺合供給所	地表面	—
神戸大学	岩盤	岩盤
関西電力新神戸変電所	地表面	風化土
竹中工務店建物No.S0222	地下3階	—
ポートアイランド	GL-83m	礫混り砂
港湾技術研究所神戸港事務所	地表面	埋め立て
港湾技術研究所神戸第8突堤	構造物上	埋め立て

表-1 観測記録一覧

方向は神戸海洋気象台NS方向の818cm/s<sup>2</sup>、上下方向は新神戸変電所の495cm/s<sup>2</sup>であった。港湾技術研究所の2地点の記録は、埋め立て地の地表のもので、液状化が生じているものと思われる。

また、これらを積分して得られた速度・変位の最大値を表-2に示す。速度の水平方向は、第8突堤の181cm/sを別にすると葺合が124cm/sと最も大きく、上下方向はS.0222が47cm/sとなっている。変位も、水平方向は葺合の45cm、上下方向はポートアイランドの12cmが最大となっている。



図一 6 加速度時刻歴波形 (1)

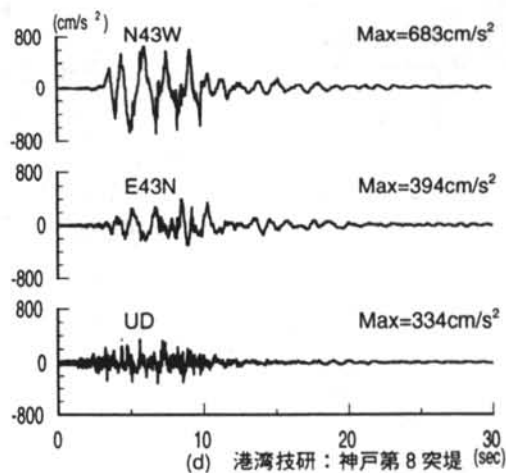
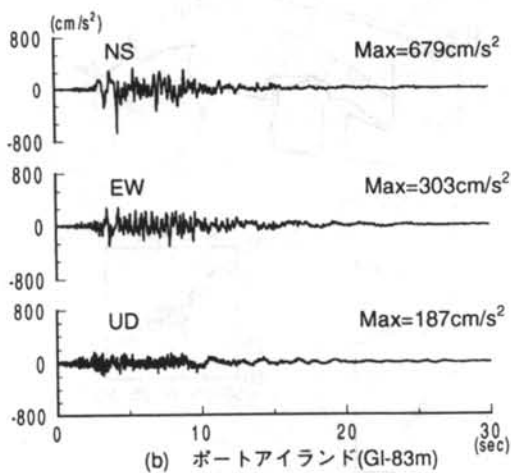
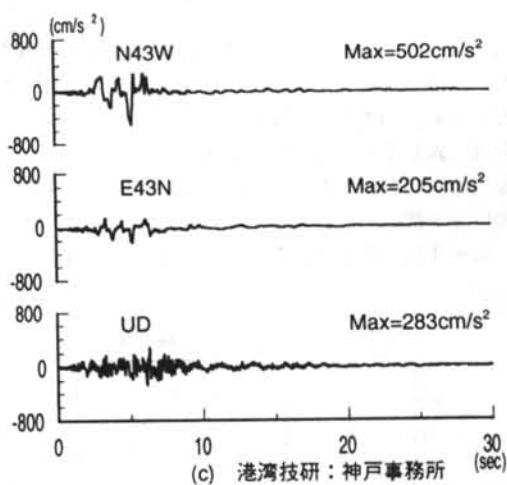
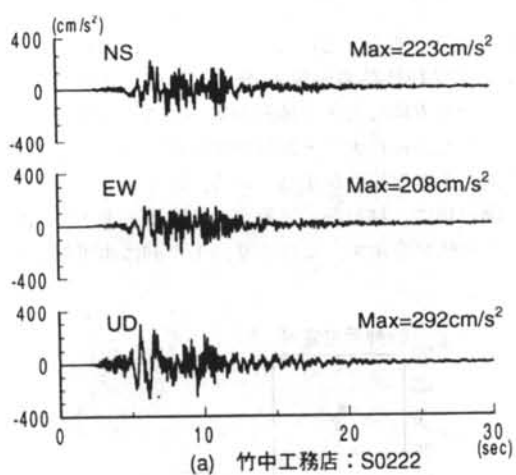
観測地点	加速度 (cm/s <sup>2</sup> )			速度 (cm/s)			変位 (cm)		
	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
神戸海洋気象台	818	617	332	90.4	75.0	40.3	21.0	19.8	11.2
大阪ガス葺合供給所 *1	686	802	—	57.2	123.8	—	20.0	45.4	—
関西協神戸大学	268	315	411	55.2	33.0	23.0	14.1	7.0	7.9
関西電力新神戸変電所	511	584	495	44.7	39.9	13.6	13.6	6.1	1.8
竹中工務店建物No.S0222	223	208	292	30.6	24.8	47.3	15.1	4.6	12.2
ポートアイランド(GL-83m)	679	303	187	65.9	29.1	28.5	26.1	11.6	12.3
港湾技術研究所神戸港事務所	502	205	283	106.5	34.0	33.6	47.1	13.0	11.0
港湾技術研究所神戸第8突堤	683	394	334	181.3	60.1	34.8	65.5	19.1	11.0

\*1: NS→X,EW→Y,UD→記録無し

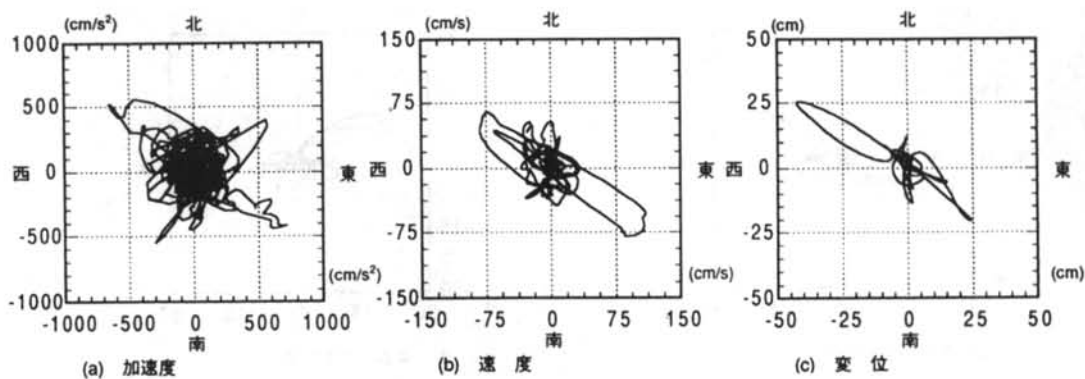
表一 2 加速度・速度・変位の最大値一覧

図一 8 に、葺合の加速度，速度，変位それぞれの水平方向の軌跡を示す。速度・変位は加速度を積分

#### 4.2 軌跡について



図一 7 加速度時刻歴波形 (2)



図一 8 水平方向の軌跡 (大阪ガス：葺合供給所)

して求めたものである。ここでは、オリジナルの波形の方位を確認できた情報により修正してプロットしている。加速度・速度・変位とも、振動の強軸方向は一致しており、北西-南東方向となっている。他の地点においても、強軸方向は、加速度・速度・変位で一致している。

図-9は、各観測地点の変位の軌跡を地図上に示

したものである。これより、断層にはほぼ直交する方向に地震動軌跡の強軸があり、三宮周辺では、北西-南東方向に大きな地動が働いたことが推察される。また、神戸大学・新神戸変電所では、ほぼ南北方向に大きな揺れが生じている。

図-10に、神戸海洋気象台での水平-上下方向の変位の軌跡を示す。これより、上下動は水平動と同

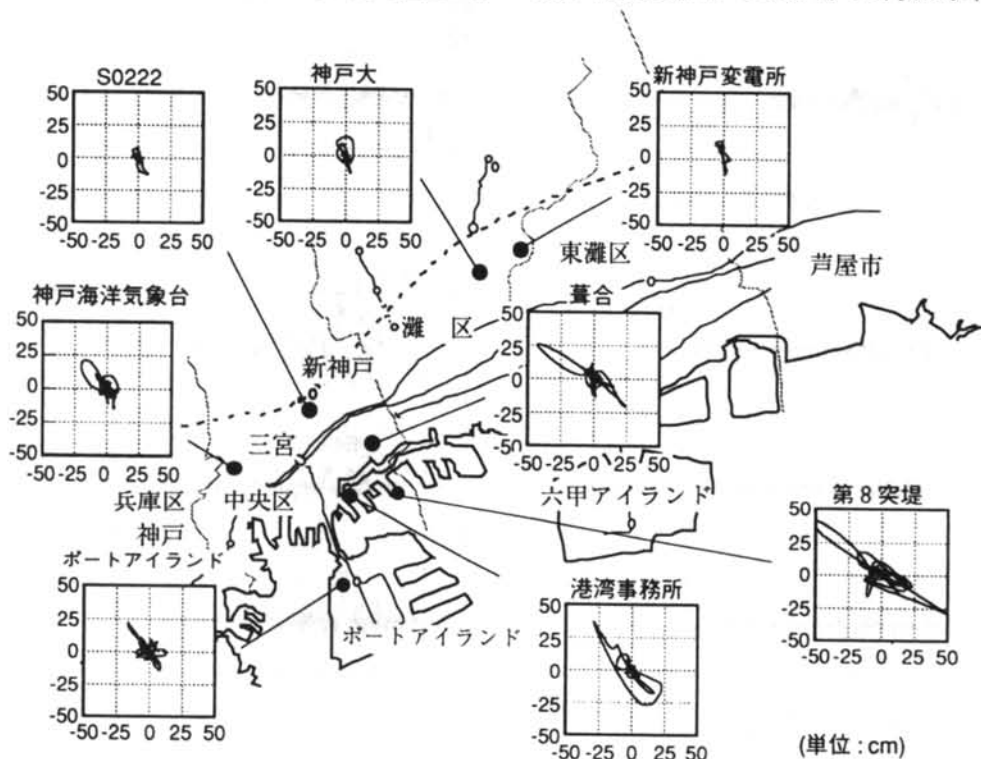


図-9 各観測地点での変位の軌跡

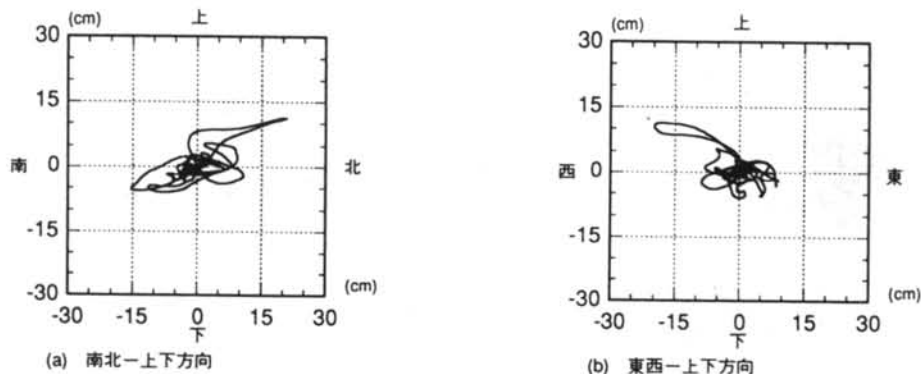


図-10 水平-上下方向の変位の軌跡 (神戸海洋気象台)

時刻に最大振幅を生じていたことが分かる。

## § 5. 強震動記録の検討

兵庫県南部地震の神戸海洋気象台・葦合・神戸大学での観測記録を、標準的な設計用入力地震動として使われているEl Centro・Taft・Hachinoheの速度最大値を水平方向50cm/s、上下方向25cm/sとして規準化した記録、1993年釧路沖地震の釧路気象台の記録、および1994年ノースリッジ地震のSylmar・Newhall・Santa Monicaでの記録と比較しながら検討してみる。これらの記録には、地下構造・地盤の影響等が含まれることは予想されるが、ここではそれを別にして記録そのものの検討を行う。

### 5.1 応答スペクトル

神戸海洋気象台・葦合・神戸大学の水平方向について減衰5%の加速度応答スペクトル、速度応答スペクトルを図-11に示す。加速度応答スペクトルよ

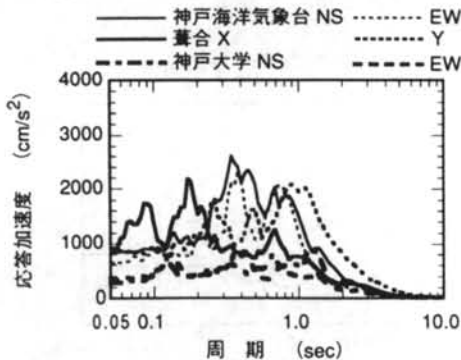


図-11 応答スペクトル(1)

り、神戸海洋気象台の記録は0.4、0.7秒、葦合X方向は0.2、0.7秒に、葦合Y方向は0.9秒に鋭いピークを持ち、中層の建物に大きな応答が生じたことが推察される。速度スペクトルは、気象台・葦合とも100cm/sをはるかに越える大きな値を示している。

兵庫県南部地震以外の記録について同様にスペクトルを図-12に示す。加速度応答スペクトルでは、釧路気象台およびSylmarの記録は、0.3秒付近に兵庫県南部地震を上回る大きなピークがあり、釧路気象台は、0.1~0.5秒にわたって加速度応答が大きい。速度応答スペクトルは、釧路気象台の0.5秒のピークと、Sylmarの長周期成分の大きさが注目される。

### 5.2 総エネルギー入力スペクトル

ここでは、秋山による総エネルギー入力<sup>3)</sup>について検討する。総エネルギー入力 $E_t$ およびそれに基づく等価速度 $V_E$ は以下のように定義される。

$$E_t = \int_0^t M \ddot{Z} \dot{X} dt, \quad V_E = \sqrt{2E_t/M}$$

$M$ ：質点の質量、 $\ddot{Z}$ ：地動加速度、 $\dot{X}$ ：相対速度

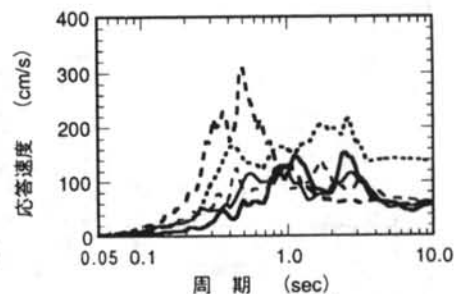
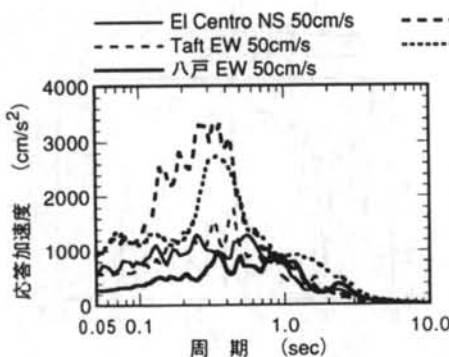
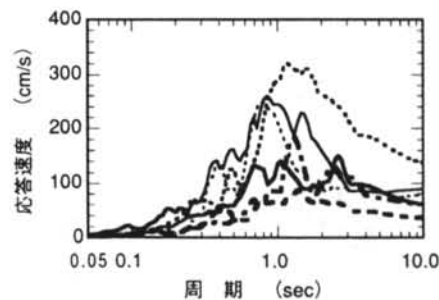


図-12 応答スペクトル(2)



現実の建物の基本的な振動モデルである完全弾塑性系へのエネルギー入力を推定するため、減衰定数10%として1質点の応答解析を行って求めた等価速度スペクトル<sup>3)</sup>を、図-13に示す。

葦合Y方向が1~2秒で400cm/sと非常に大きな値を示している。神戸海洋気象台では、0.7秒付近に300cm/sを越えるピークが見られる。神戸大学は、1.2秒付近にピークを示している。

他の記録では、釧路が0.4秒で450cm/sを越えてお

り、Sylmarが1.5~3.0秒の範囲で250cm/sと大きな値を示している。

これらを比べてみると神戸海洋気象台NS、葦合Y方向、釧路、Sylmarの値がかなり大きいことが分かる。

### 5.3 層間変形スペクトル

ここでは、建物の被害に与える影響を考えるために3~50階建て建物についての弾性応答解析を行い、

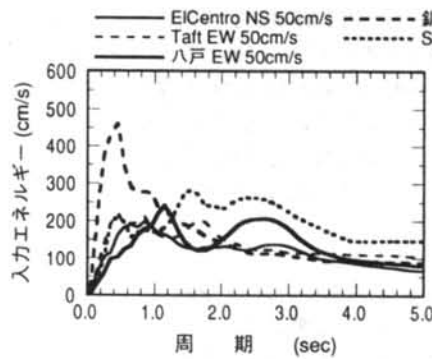
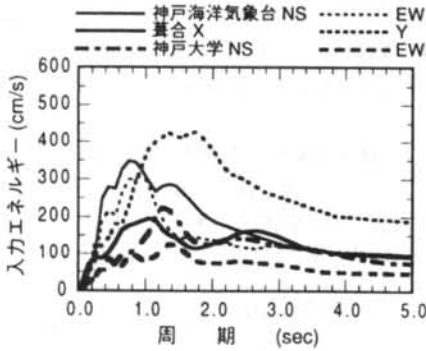


図-13 総エネルギースペクトル

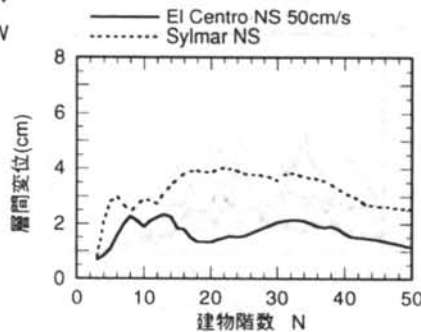
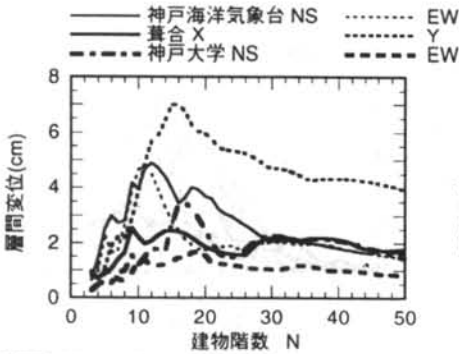


図-14 層間変形スペクトル

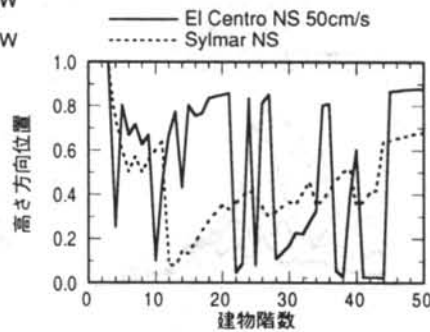
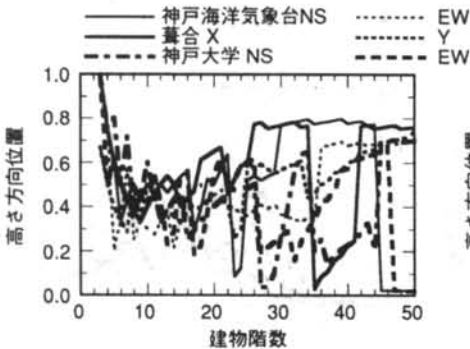


図-15 最大層間変形発生位置



最大層間変形について注目し、横軸に階数、縦軸に最大層間変形を取ったスペクトルについて検討してみる。

建物は、各階階高375cmとした多質点のせん断ばねモデルとし、1次固有周期が $T=0.02H$  ( $H$ :建物高さ)となるように、剛性を定める。ただし上層階での、ホイッピングを避けるため、剛性は、最上階と1階との比を0.4とする直線的分布とした。また、減衰定数を大振幅時に大きくなることを考慮して5%とした。

図-14には、神戸海洋気象台・葦合・神戸大学の加速度記録を入力とした場合の結果について示す。全体の傾向としては、速度応答スペクトルに近い形状となっている。神戸大学EWの記録以外は、10~20階で大きな層間変形を生じている。特に、葦合Y方向は10階以上の高層で他と比べ大きな値を示している。

さらに図-14にEl Centro NS, Sylmar NSについて計算した結果について示す。El Centroと比べ、神戸海洋気象台・葦合の値はほとんどの高さで大きくなっている。Sylmarの値は、15~35階の広い範囲でピークを示している。

図-15に層間変形の最大値が発生した階を建物高さで基準化して示す。最大層間変形の発生階はばらつきが大きいものの、10~20階建ての建物では中間階付近で発生していることが分かる。個々の記録では、葦合X方向は27~28・35~44階建て、神戸海洋気象台NSは23~24・45~50階建て、同EWは35~41階建て、神戸大学EWは27~32・47~50階建てが低層階で最大層間変形を示している。El Centroの結果を見ると、兵庫県南部地震のような傾向はなくばらついている。Sylmarの結果は、20~40階建てで中間階に最大層間変形を生じている。

#### 5.4 その他の指標値

その他の地震動を評価する指標として、スペクトル強度 (SI値、減衰定数20%の速度応答スペクトルの周期0.1~2.5秒間の平均値)、Arias Intensity (IA= $(\pi/2g) \cdot \int a^2(t)dt$ )、地震動の継続時間 (Trifunacの定義による、振幅二乗和の5~95%を与える区間の時間) について検討を行った。

各観測記録のSI, IAについてEl Centro 50cm/s (上下は25cm/s) との比を求め、図-16に示す。SIは、神戸海洋気象台・葦合・Sylmar・釧路気象台が2~3倍と大きな値を示している。IAは、兵庫県

南部地震の記録では、神戸海洋気象台・葦合が2倍程度になっている。釧路気象台のみが、SIおよびIA共に大きな倍率となっている。

継続時間について、図-17に示す。地震規模・震源距離等の影響が考えらるが、兵庫県南部地震およびノースリッジ地震の継続時間は、ほとんど10秒以下と短いのに対して、釧路気象台・八戸港湾・El Centro・Taftの記録は、21~26秒と約2倍の継続時間となっている。

## §6. まとめ

本報では、兵庫県南部地震で観測された強震記録について、種々の検討を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

1) 強い方向性のある地動で、三宮周辺では北西-南

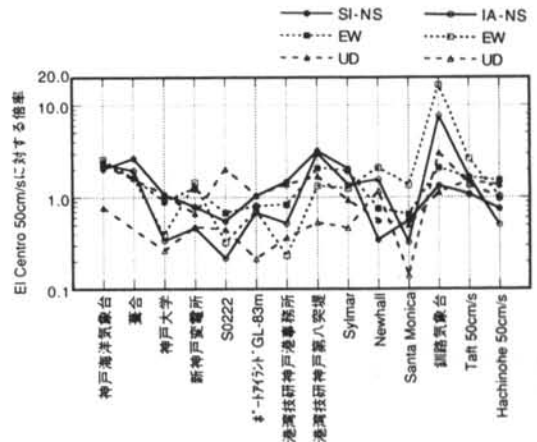


図-16 スペクトル強度・Arias Intensity

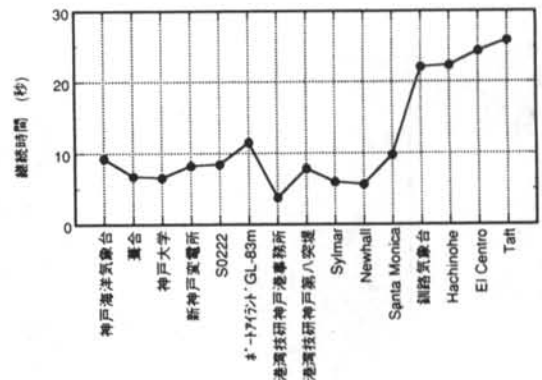


図-17 継続時間

東方向（国道2号線に直交方向）に地震動の軌跡の主軸があった。最大変位は、20～40cmと大きな値であった。

- 2) 各種スペクトル・指標から判断すると、現行の高層建物設計用地震動の2～3倍の大きさの地震動が記録されている。
- 3) 中層建物の共振領域と考えられる1秒前後の周期において大きな応答を与える地震動であった。層間変形スペクトルにおいても、10～20階建てでは中間階で大きな層間変形となっている。
- 4) 葺合Y方向とノースリッジ地震のSylmar NSの

記録は、各種スペクトルから判断すると1.5秒前後のパワーが大きく、2～3秒の長周期においても、大きな値を示している。

今後、これらの結果をもとに、さらに地震動の評価指標についての検討を進めていきたい。

**謝辞** 地震記録のデジタル値を提供していただいた、日本気象協会（気象庁「87型電磁式強震計波型データ」による）、関西地震観測協議会ならびに諸機関に感謝の意を記す。また、方位確認結果について教えていただいた関係者の方々に感謝の意を記す。

#### <参考文献>

- 1) ftp. eri.u-tokyo. ac. jp/pub/hyogo/strong. motion/maxav.ps
- 2) Irikura K. and Fukushima Y. (1995), "Attenuation characteristics of peak amplitude in the Hyogo-ken Nambu earthquake" J. Natural Disaster Science, Vol. 16, No.3, (in print)
- 3) 秋山 宏：“建築物の耐震極限設計（第2版）”1987年，東京大学出版会

## 付録

## 神戸大学における記録の処理について

## 1. はじめに

本文中で使用した関西地震観測研究協議会による神戸大学の記録は、波形の前半と後半で基線がずれており、当初はその使用が躊躇されていた。しかしながら、神戸大学は震源に近く、観測点は岩盤内の比較的良質な地点であり、重要な記録と考えられるので、筆者の独断で以下のような処理を行った。処理の詳細については研究報告を作成してあるが、内部資料のためここにその要点を再掲しておく。また、香川・他は、地震計の振動方程式を数値モデルに置き換えて、記録から地動を再現する試みを行っている<sup>1)</sup>。さらに、関西地震観測研究協議会としても、この記録についての公式な見解を発表する動きもあるように聞いている。

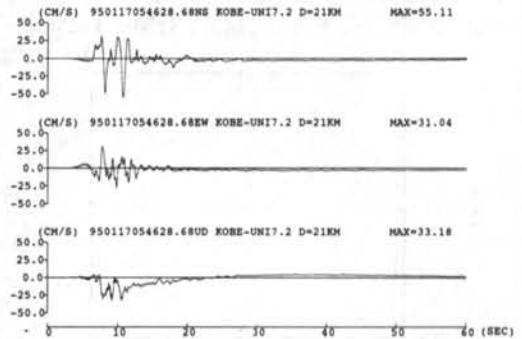
付図-1は、観測された記録を図化したものであるが、前述したように3成分とも主要動以降で基線がずれるような動きをしていることが分かる。用いている地震計(東京測振製、VSE-11,12)は、長周期まで(周期40秒程度)測定可能な速度計であるが、DC成分あるいは測定可能範囲を大幅に超えた地震動成分については測定が不可能である。つまり、ある程度より長い周期成分は機器から発生したノイズが多く含まれていると考えられる。付図-2は主要動部分を拡大したものであるが(付図-1の最初から12秒)、図中の7秒前後において上下動の記録のうち正のピークが頭切れになっている。

## 2. 問題点の発生原因

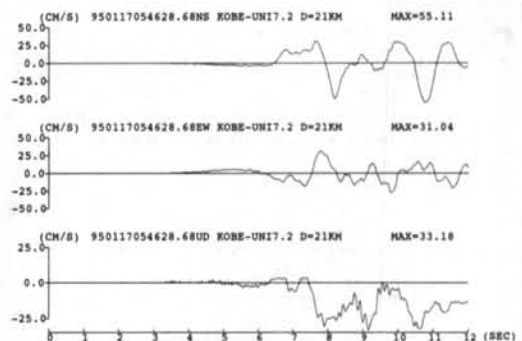
ここで使用している地震計の場合、大振幅の振動を受けた場合には、センサーの内に組み込まれている振り子の位置検出器とAD変換器の2箇所まで振幅が飽和する可能性がある。このうち、振り子の位置検出器で記録の飽和が起ると、今回のような頭切れの波形と長周期ノイズが発生することが実験的にも数値実験的にも確かめられている。さらに、上下動のセンサーの場合はそのままでは重力加速度により、下側(地球側)にずれた位置でバランスしてしまい(オフセット)、十分な測定範囲が保てないの、通常は重力加速度をキャンセルするように電圧

をかけてある。しかしながら、長い時間たつと電圧と重力加速度のバランスが微妙に崩れるので定期的な保守点検が必要であり、このオフセットにより測定可能範囲が狭められることは十分考えられる。結局、上下動成分の著しいドリフトと頭切れは、センサーの整備不良によるものである可能性が高い。

また、木下・横井<sup>2)</sup>の検討によれば、地震計が微妙に傾くと今回の水平動のような記録を描くとのことである。地震計が強い地震動を受けてボルトがゆるみ傾いたか、地盤が傾斜したかは不明であるが、どちらにしてもその傾きは微小であり、記録全体からするとその影響は小さいと思われる。特に、上下動については、傾きを $\theta$ とするとこの影響は $(1-\cos\theta)$ となり、 $\theta$ は非常に小さいので無視できると考えられる。



付図-1 関西地震観測研究協議会が神戸大学に設置した地震計で得られた1995年兵庫県南部地震の記録



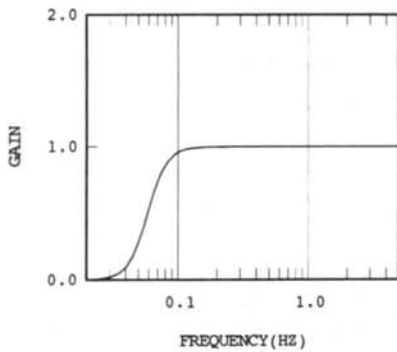
付図-2 神戸大学における記録の主要動部の拡大(付図1の最初から12秒)

### 3. 記録処理

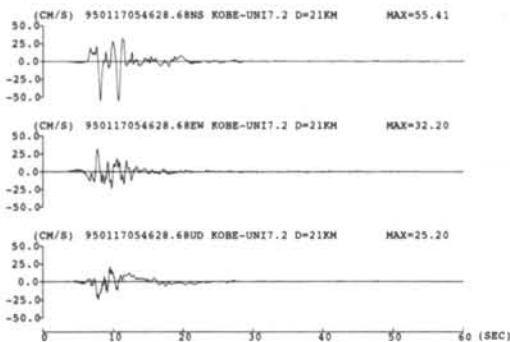
設計の動的検討用を意図する場合には、記録に対してハイパスフィルターを用いて長周期のノイズを除去し、更に微分する際にローパスフィルターにより高振動数成分を除去することが必要である。微分するので、長周期ノイズが自然に除去される可能性もあるが、ノイズであることには違いがないので、ここでは以下の手順を取った。

#### 3.1 低振動数の除去

低周波成分を除去するために、付図-3に示す特性を有するButterworthハイパスフィルターを再帰表現して<sup>3)</sup>、因果性をくずさないように、記録先頭から終わりに向かって1回施した。このフィルターは、カットオフ振動数が0.08Hz、ロールオフ振動数0.02Hzで、いわゆる通過帯域でフィルターされた波形の振幅が0.8以上、遮断帯域でフィルターされた波形の振幅が0.025以下になるように設計されている。フィルターを施した結果を付図-4に示す。



付図-3 長周期ノイズを除くために設定したハイパスフィルターの特性

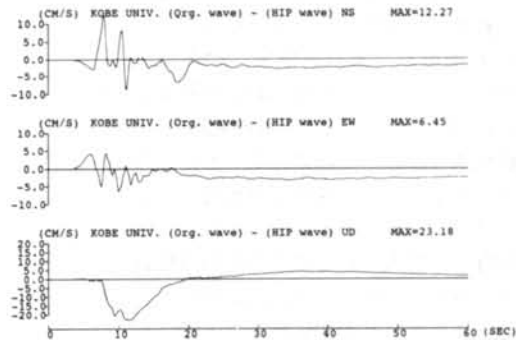


付図-4 ハイパスフィルターを施した波形

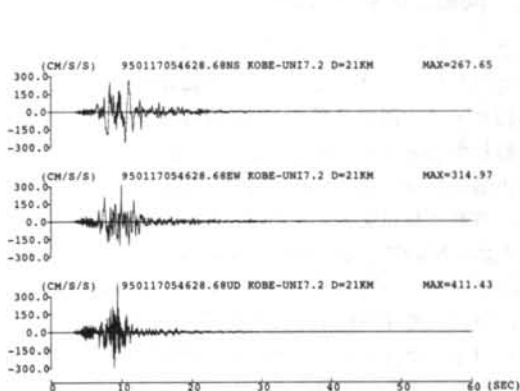
フィルターしたために長周期の成分がなくなり、そのために最大値が変化している。NS成分の最大値は55.1cm/sから55.4cm/s、EW成分は31.0cm/sから32.2cm/s、UD成分は33.2cm/sから25.2cm/sになっている。最大値が増えるのは、除去した長周期成分が必ずしも0Hzの成分ではないからであろう。参考のために、原記録からフィルター波形を差し引いたもの、つまり除去した成分を示すと付図-5のようになる。

#### 3.2 高振動数側限界と速度記録の微分

ハイパスフィルターを施した波形を微分して、加速度波形を求めた。ここで留意すべきことは、微分することで顕著になる高振動数のノイズである。関西地震観測研究協議会が設置した大阪市内の地震計の記録を微分した際に検討した結果では、地震計の特性もあり、カットオフ振動数を50Hzとしても問題は生じなかった。しかしながら、上下動には矩形波が含まれるので、微分後のローパスフィルターの



付図-5 付図-3で示したハイパスフィルターで除去した成分



付図-6 最終的に得られた補正加速度波形 (有効振動数領域は0.1Hz~18Hz)

カットオフ振動数の設定には注意が必要であることが推測される。そこで、予備的検討としてローパスフィルターのカットオフ振動数を50Hz, 30Hz, 18Hzとして原記録を周波数領域で微分して主要動部分を出力してみた。その結果によると、最大値はほとんど変化しないが、カットオフ振動数を50Hz, 30Hzとした場合には矩形波形の部分に高い振動数成分の波形が見られた。逆に、この現象はカットオフ振動数を18Hzにするとほとんど見られなかった。また、この記録は上下動の加速度最大値が水平動の加速度最大値よりも大きいことで知られているが、このようにローパスフィルターを施しても、やはり上下動の最大値は水平動よりも大きかった。

以上の検討から、微分する際のローパスフィルターのカットオフ振動数は18Hzとすることにした。付図-4 で見たハイパスフィルターを施した波形を、微分したものを付図-6 に示す。結局最大値はNS成分267.7cm/s<sup>2</sup>, EW成分315.0cm/s<sup>2</sup>, UD成分

411.4cm/s<sup>2</sup>となる。

#### 4. おわりに

関西地震観測研究協議会が神戸大学に設置した地震計の記録を、主として設計検討用に使用するために各種フィルターを施した。まず、速度波形の長周期ノイズを取り除き、更に微分すると共に高振動数成分を除去した。この結果得られた加速度波形は、使用可能な振動数範囲は0.1Hzから18Hz（周期では約0.055秒から10秒）である。この波形処理の結果は必ずしも正解を与えていないこと、あるいは今後、より真実に近い記録が公開される可能性があることに留意が必要である。

謝辞 助大阪土質試験所の香川敬生氏には、地震計の振り切れあるいはその補正方法について、丁寧に説明頂いた。記して謝意を示す。

#### <参考文献>

- 1) 香川敬生・入倉孝次郎・横井勇：“速度サーボ型強震計の飽和特性について—兵庫県南部地震における飽和録復元の試み—”地震学会秋季大会予稿集（投稿中），（1995）
- 2) 木下繁・横井勇：“強震速度記録に見られる地盤傾動の推定方法”強震動予測に関する総合的研究（研究代表者：入倉孝次郎），平成6年度科学研究費補助金（総合研究A）（研究課題番号05302069）研究成果報告書，（1995年）pp.72-80.
- 3) 齊藤正徳：“漸化式デジタル・フィルターの自動設計”物理探鉱，vol.31, No.4,（1978年）pp.112-135.

