

兵庫県南部地震による地震動の特徴

こう けつ かず き¹⁾
瀬 織 一 起

1. はじめに

あの兵庫県南部地震から4カ月が経とうとしている。被災地ではまだ多くの方々が避難所生活をされている現実を忘れることはできないが、大学連合による合同観測も撤収が行なわれ、研究の現場は断片的な情報をもとに概観を行なう段階から、データを腰を据えて解析すべき時期にさしかかっている。

ここで述べるべき地震動の問題についても地震直後の情報の混乱した中で、その特徴的なものをすでに概観してある(瀬織, 1995)。当然その後新しい観測事実が現われたし、またいろいろな研究者による解析結果も徐々に発表されつつあるが、液化化・非線型化の指摘が欠けていた点を除いて、幸いその内容に大きな誤りはなかったようである。そこでここでは基本的に先の概観のまとめ方を踏襲し、これにその後明らかになった点を追加する形で兵庫県南部地震の地震動の特徴を述べてみたい。

2. 一般的な伝播の特徴

京阪神圏は鉄道・高速道路といった公共交通網や、電気・ガスなどのインフラ・ストラクチャが張り巡らされており、そのため気象庁だけではなく、これらの施設を維持する会社等が地震対策のために地震動の観測を行っている。しかも、その多くが最大加速度値を電話収集できるタイプの強震計を採用しているようで、今回の地震でも各地の最大加速度値は早い時期から公表されていた。第1図はそうした公表値をgal (cm/秒²)単位で、気象庁発表の震央と活断層(活断層研究会, 1980)を合わせて地図上にプロットしたものである。ただし、関西地震観測協議会(関震協)は速度型強震計を用いているの

で、その観測点(図中○印)では最大速度値をkine (cm/秒)単位で示した。経験的ではあるが、最大速度値は十倍すると最大加速度値の良い目安となる。

気象庁や関震協を除いて、観測された地震動記録そのものは公開されていないので、これら公表値を再確認することはできない。また各観測点での観測状況や最大加速度の定義が社により異なる可能性も高いし、詳細な住所がわからず不正確な位置で済ませているものもある(図中イタリック体)。しかし、こうした不備を割り引いても、この図面から兵庫県南部地震の地震動がどのように伝播したか、およそ特徴的なものを読み取ることができる。

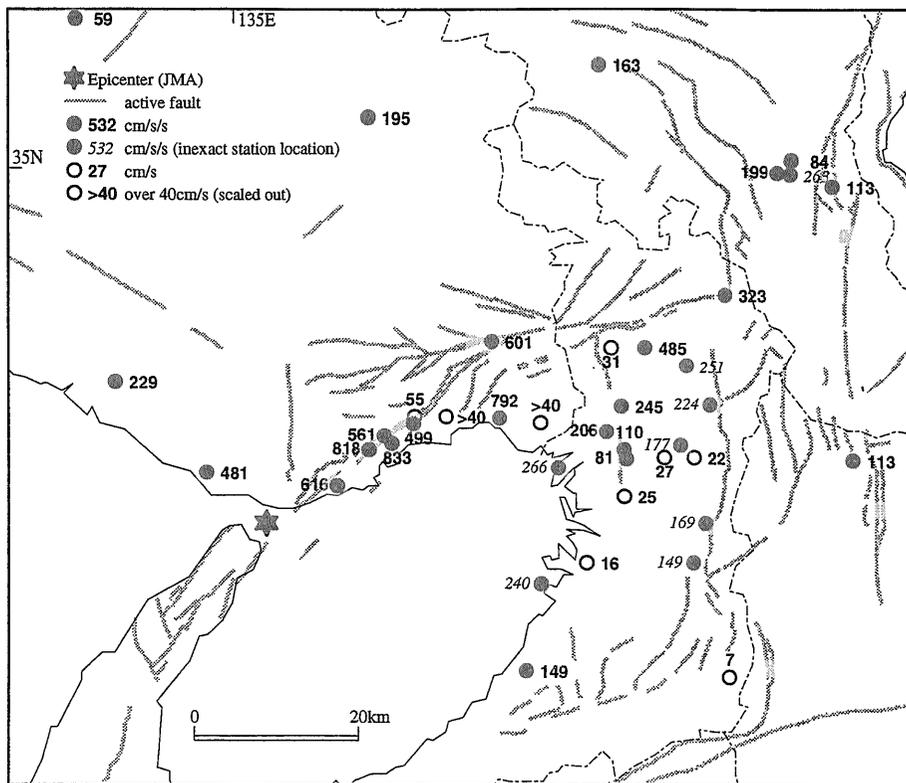
被害の大きかった神戸市中央区や西宮市の海岸寄りでは800 gal 前後の非常に大きな加速度が得られており、速度型強震計の中には強震計にもかかわらず振り切れてしまったものまで出ている。このほか神戸市内ではほぼ確実に500 gal から600 gal の加速度が得られており、この程度の地震動がかなり普遍的に存在していたと考えられる。単純に比較すれば釧路沖地震(1993年)の919 gal という地震動の方が大きい、この値が観測された釧路気象台を除くと、釧路市内ではほぼ300から400 gal 程度の加速度になっており、これらと比較すれば今回の地震の神戸市内は、釧路沖地震の釧路市内に比べ、ほぼ二倍の強さで揺さぶられたことになる。

このほか、兵庫県内でも六甲山の向こう側にある宝塚や、大阪府北部の吹田・高槻、さらには京都市内は震央からの距離に比べ大きな加速度が観測されている。震源断層における岩盤の破壊は活断層に沿って北東に進んだとされており、これらの地点はその延長上にあること、およびそこに到る部分の地下構造が地震動を伝えやすい性質を持っている可能性があることなどが、この原因として考えられよう。

1) 東京大学地震研究所：
〒113 東京都文京区弥生1-1-1

キーワード：兵庫県南部地震、地震動、非線型化、震災の帯

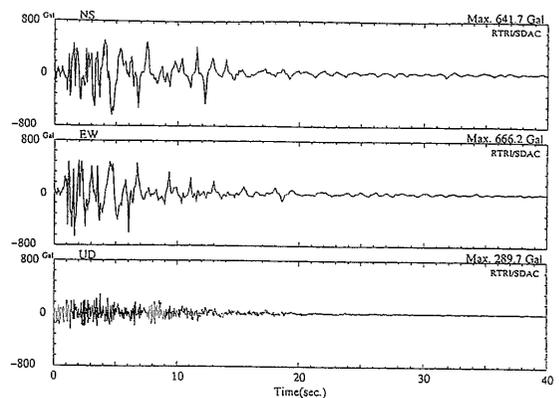
Maximum Accelerations and Velocities of the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake



Note: Most values have not been checked by using waveforms.

第1図 最大加速度値・最大速度値の分布.

以上の観測点に比べると、大阪湾岸を除いた大阪市内は比較的揺れが小さい。特に大阪城を中心とした上町台地上の大阪管区气象台や第三合同庁舎では100 gal 前後の加速度しか観測されておらず、気象庁が大阪震度4の発表を変更しない点もうなずける。震度は气象台がある地点の地震動を体感の段階で表現したものであり、決して大阪全体を代表しているものではないからである。ただし管区气象台・合同庁舎とも地下三階で観測されており、一般に地表より地中の方が揺れにくい点は考慮しなければならない。

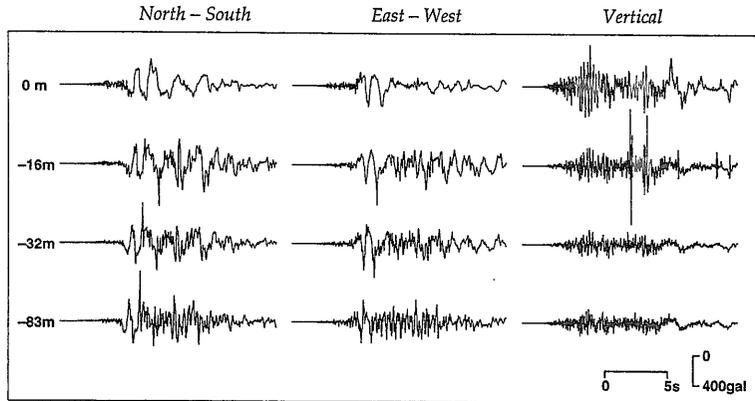


第2図 JR 鷹取駅における加速度記録(中村, 1995).

3. 液状化・非線型化

ポートアイランドや六甲アイランドにおける大規模な土砂噴出を待つまでもなく、これだけ強い地震動で揺さぶられれば、地盤の挙動も微小歪みの線型応答から逸脱して、非線型応答さらには液状化へ進

んでいたであろうことは当然予想される。こうした点を最初に明らかにしたのは、第2図に示したJR鷹取駅の加速度記録(中村, 1995)である。その水平動には鋭角にとがったピークが目立ち、線型理論では理解できない異様な波形をしている。こうした

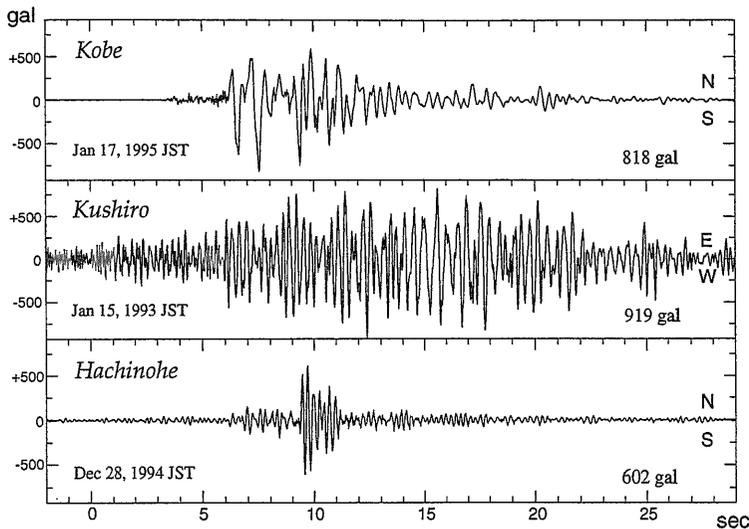


第3図 ポートアイランドの鉛直アレイにおける加速度記録.

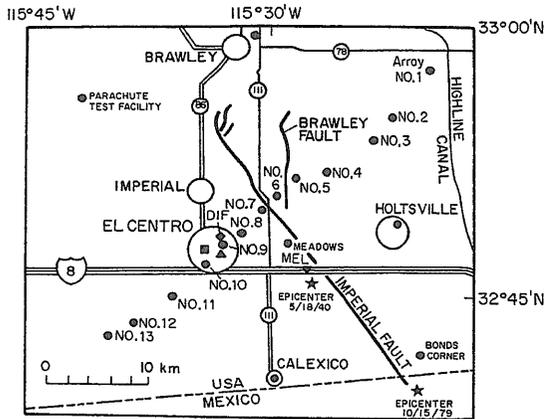
波形は釧路沖地震時に釧路港でも観測されているが(井合ほか, 1993), そこは旧砂丘を3mほど埋め立てた地点であった. これに対して, 神戸市須磨・長田区境付近(第1図, 616 galの地点)の鷹取駅は沖積地盤であるにしろ, 埋立地ではない. 震源断層のひとつに想定されている須磨断層に近く, それだけ地震動が強かったのであろう.

また, ポートアイランドでは神戸市開発局により地中3点(-83 m, -32 m, -16 m)と地表1点の強震計鉛直アレイがボーリング孔内に設置されており, このアレイによる加速度記録が第3図である. 左から地震動の南北, 東西, 上下成分を示しており, 南北・東西の水平動では地中-83 mですでに,

非線型応答の特徴である鋭角的なピークが見えている. さらに注目すべきは, 地中3点の間では浅いほど長周期になる点を除いて大きな波形の変化はないが, 地表に達すると急激に振幅が落ちてしまうことである. 先に述べたように, 自由表面による反射の影響で地表では地中に比べ振幅が大きくなるのが一般的であるから, 地表と地中-16 mの間で深い部分より一層著しい非線型化, 液状化が起きていたことが推定される. 鷹取駅と比べても, 鷹取駅では地表で鋭角のピークが残っていたのに対して, ポートアイランドでは非線型化による激しい減衰のため, その特徴であるこれらピークまでが鈍っている.



第4図 神戸(兵庫県南部地震)・釧路(釧路沖地震)・八戸(三陸はるか沖地震)における加速度記録の比較.



第5図 1979年 Imperial Valley 地震の震央と震源断層および El Centro 強震計アレイ (Hartzell and Heaton, 1983).

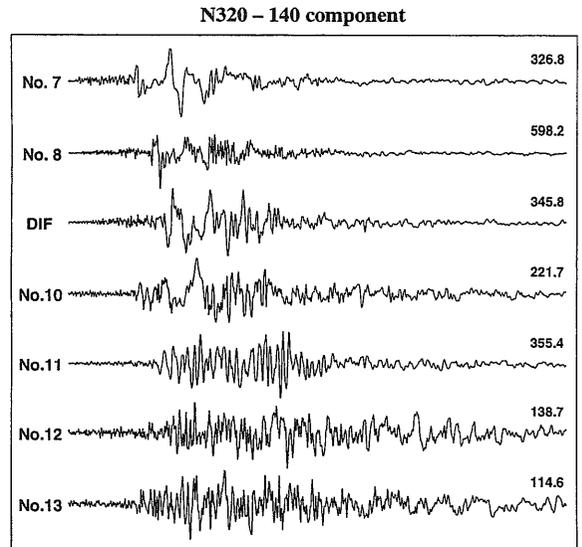
一方、液状化が起こっても、上下動は流体中も伝播可能なP波が主体であるので、その影響は出にくい。確かに第3図右端の上下動を見れば、-16 m でスパイク状のパルスが発生している点を除いて、地表に向かって順調に振幅が大きくなっていることがわかる。上下動が大きくなっているのに対して水平動では逆に減衰しているのだから、地表では結局上下動の方が水平動より大きくなってしまっている。なおスパイク状のパルスについては、激しい液状化に伴ない地震計容器が孔壁に衝突するなどして発生した、という推測がなされている(川瀬ほか, 1995)。

今回の地震では、これまでの地震に比べ上下動が大きいことがマスメディアなどで話題になった。こうした一般論が成り立たないことは額額(1995)ですでに述べたが、改めて強震計データをまとめたもの(防災科研, 1995)を眺めてみると、確かに上下動成分の最大振幅が水平動のそれを上回っている観測点が散見される。こうした地点ではポートアイランドと同じような非線型化が起こっていた可能性が高いであろう。しかし、たとえポートアイランドでも地中では通常の水平動/上下動の振幅比になっていることを考えると、これが兵庫県南部地震の一般的な特性ではないことは明らかであろう。

4. なぜ長周期?

2節で述べたように、1993年の釧路沖地震では釧

1995年7月号



第6図 El Centro 強震計アレイにおける1979年 Imperial Valley 地震の加速度記録。

路気象台で919 gal という、今回の地震を上回る加速度が記録された。第4図は今回の地震の神戸海洋気象台における記録の南北成分と、この釧路の記録の東西成分、および昨年暮れの三陸はるか沖地震で602 gal を記録した八戸測候所における記録の南北成分を比較したものである。最大加速度値で見ると、釧路の方が大きい、言うまでもなく被害に関しては阪神大震災の方がはるかに大きい。釧路気象台が妙に揺れやすいことで前から注目されていた点を割り引いても、これはまさに最大加速度値が被害の指標にはふさわしくない典型的な例であろう。そこで加速度に代表される「力」ではなく地震波の破壊エネルギーを見るため、これらのデジタル記録を数値的に積分して速度記録に直してみた。そうすると、それらの最大振幅は神戸、釧路、八戸でそれぞれ92, 59, 27 kine となり、被害の大きさの順番と合ってくる。しかし順番は合ってきたが、阪神「大震災」と呼ばれるほどの被害の規模は依然として表現し得ていない。

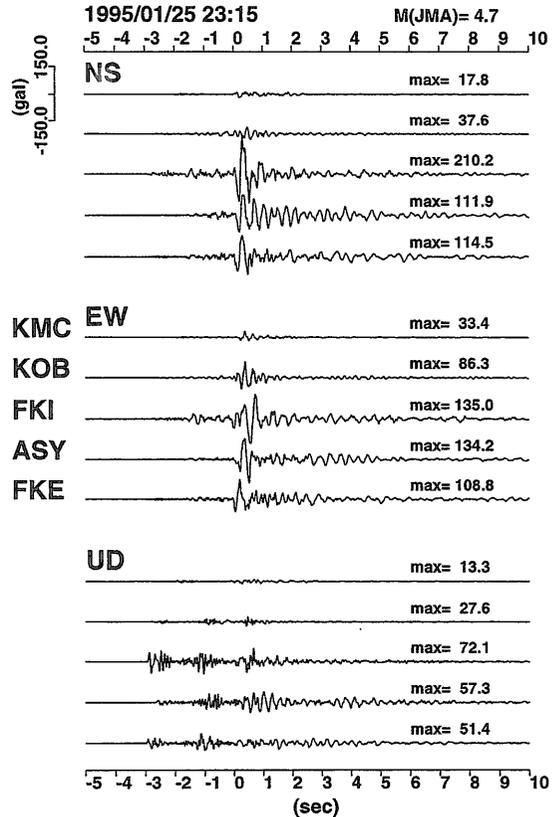
この問題の解く鍵は、それぞれの記録の主要動の周期にあると言われている。第4図で見れば、神戸の記録が釧路や八戸に比べて、明らかに長周期の成分を多く含んでいるのが見て取れるであろう。神戸の記録は数 Hz の高周波側から周期1~2秒の長周期側まで、広い帯域でパワーを持っている。境は

か(1995)はこの神戸の記録に対する建物の応答を、弾性変形だけでなく塑性変形も考慮して解析した。その結果によれば、中低層の建物の固有周期は数Hzであるから、まず影響を与えるのは高周波であるが、それにより建物が損壊を受けて塑性領域に入ってくると、固有周期が延びてくる。その状態で1秒を越える長周期波が効いてきて、全壊に到るような大きな被害になったという。釧路や八戸では高周波成分はあっても長周期成分が小さかったため、「大震災」にはならなかったのである。

ではなぜ神戸の記録は長周期なのであろうか。遠地地震波による震源過程の解析(菊地, 1995)では兵庫県南部地震が長周期地震波を多く放出したという様子は見られないが、強震記録を用いた解析(井出ほか, 1995)では淡路島側の断層運動の時間関数が比較的長周期であるという結果が得られている。また過去の地震記録を見ると、神戸のような震源断層のごく近傍では、地震動がこうした断層運動そのものに支配されて、遠方より地震動が長周期になるという可能性も示唆されている。たとえば1979年、カリフォルニアのメキシコ国境近くで起こったImperial Valley地震では第5図に示したように、震源断層を横切るように強震計アレイが展開されていた。第6図はこれにより得られた記録のうち、南西方向の強震計による断層方向成分の加速度記録である。一番遠いNo. 13から断層近傍のNo. 7に向かって、明らかに地震動は長周期になっている。しかし、兵庫県南部地震でも同じようなことが起こったのか、起きたとすればどのようなメカニズムによるかは今後の課題である。

5. 「震災の帯」

神戸市から芦屋市・西宮市に到る地域では建物の顕著な被害、特に木造建物の被害が幅約2kmの帯状領域に集中することが、地震直後に嶋本(1995)などにより指摘された。この領域は気象庁が現地調査で震度7と発表した地域(吉田, 1995)とほぼ一致しているだけでなく、「震災の帯」という嶋本の命名により多くの人々に強い印象を与えた。こうした帯状分布になる原因については諸説があり、どれが正しいのか依然として不明であるが、主なところは、嶋本(1995)による伏在断層説、Iwata et al.



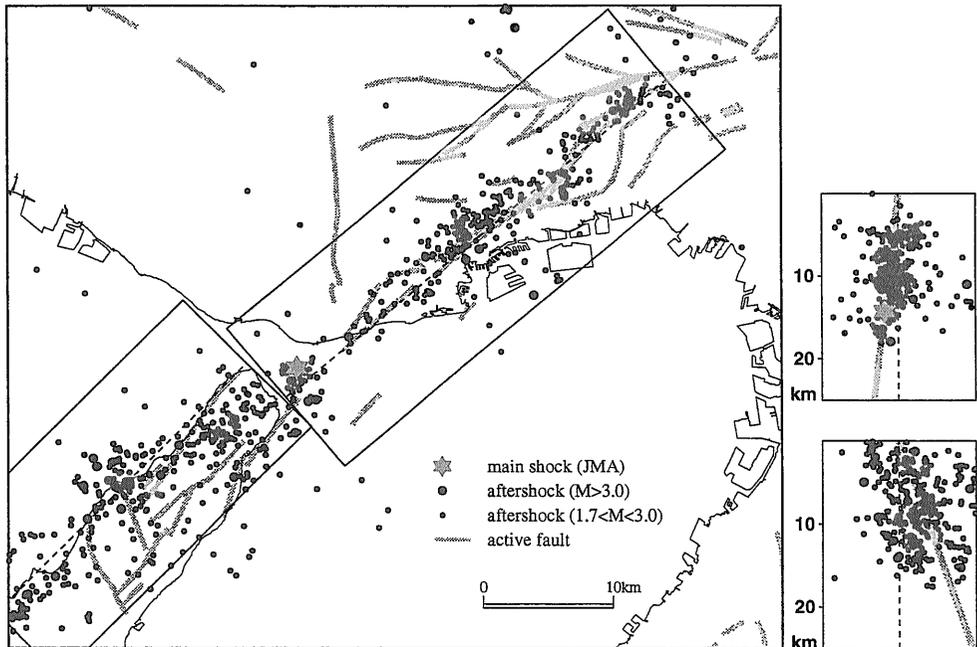
第7図 東灘区・芦屋市内における1月25日余震(M_{JMA}=4.7)の加速度記録(Iwata et al., 1995).

(1995)による地盤増幅説、伯野(1995)や青木・志知(1995)の傾斜構造説の3つになるであろう。地質ニュースの読者には伏在断層説はよく知られていると思うので、ここでは後の二説を紹介する。

まずIwata et al. (1995)は地震直後から被害のひどかった神戸市東灘区・芦屋市内に強震計を展開し、1月25日の気象庁マグニチュード4.7の余震に対して、第7図のような加速度記録を得た。ここで「震災の帯」の中にある観測点FKI, ASYでは、北側のKMC, KOBに比べ数倍から10倍以上に及ぶ振幅になっている。この余震の震央や観測点に対する方位は本震とまったく異なるにもかかわらず、本震と同じように「震災の帯」の中で地震動が増幅しているということは、両者による地震動に共通して影響を及ぼす「震災の帯」直下の地盤構造がその原因であろうというのがIwata et al. の推論である。この地盤増幅説に対する反論として、北側に比べ南側のFKEではそれほど振幅が小さくなっていないと

Aftershocks of the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake

(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University & Japan University Group of Urgent Joint Observation)



第8図 京大防災研(神戸側)と緊急調査ネット(淡路島側)の自動処理による余震分布。

いう点がよく指摘される。しかし、海岸近くで軟弱地盤であることが予想される FKE では、大揺れの本震時に鷹取駅やポートアイランドと同じような非線型化が起これ、それによる減衰で建物被害が小さくなったと考えることができる。

もう一方の傾斜構造説では、神戸が北側に六甲山地が、南側に海が迫った急傾斜地であり、その地下も同様の急傾斜構造であろう点に注目する。実際、青木・志知(1995)による重力探査ではそのような傾斜構造が得られており、そうした構造では入射地震波が屈折させられて集中したり、堆積層が薄くなった部分で地震波エネルギーが集まってくる(「なぎさ現象」)ような現象が起これるのであろう。これらを「震災の帯」の原因とするのが傾斜構造説である。

筆者の印象では傾斜構造説単独で「震災の帯」のような劇的な現象を説明するのは難しく、地盤増幅説に傾斜構造説がからんだ形が有力であるように思える。また「震災の帯」の中には比較的長く、施工条件の悪い建物が多かったことも被害を助長したと考えられるが、いずれにしろどの説が主因であったかはこれからの研究課題である。

一方、余震分布との不一致が指摘されている伏在

断層説についても、これを一部支持するような地震学データが存在することも確かである。たとえば第8図の余震分布をよく見ると、神戸側の須磨断層、諏訪山断層、五助橋断層をむすんだ線よりわずかに南側でも余震が起これており、特に芦屋断層の延長部付近ではかたまると余震が起きている。また橋本(1995)が指摘するように、このあたりの地殻変動データには単純なモデルでは説明が難しいものが存在するし、菊地(1995)の解析では余震分布と異なった走向のサブイベントが得られている。

ただ、井出ほか(1995)や橋本(1995)によるモデルを見る限り、断層上の変位は明石海峡の震央付近と淡路島側で大きく、神戸側も深い部分が断層変位の主体になっているので、新たな副断層を追加してもそれほど大きな役割を担うことは難しいかもしれない。しかし一方で寛ほか(1995)による短周期地震波の解析では、神戸側の浅い部分に大きな寄与を想定する結果も得られており、やはり簡単に結論を出すことは難しいであろう。(5月8日稿)

謝辞：気象庁87型および神戸市開発局の強震計データ、京大防災研および緊急調査ネットの自動処理による余震データ、Columbia大・地質観測所の

Strongmo システムを使用した。また以下の方々の協力をいただいた(敬称略)。Noel Barstow, 石川有三, 岩田知孝, 片尾 浩, 工藤一嘉, 渡辺孝英。

文 献

- 青木治三・志知龍一(1995): 重力異常から見た震源域の地下構造, 地球惑星科学関連学会1995年合同大会. 緊急フォーラム Q124.
- 防災科研(1995): 強震速報. No. 46.
- 伯野元彦(1995): 地盤・地形と被害の関係, 第715回地震研究所談話会.
- Hartzell, S. H. and Heaton, T. (1983): Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California, earthquake. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **73**, 1553-1583.
- 橋本 学(1995): 兵庫県南部地震による地殻変動と断層運動の推定. *地質ニュース*, no. 490, 33-40.
- 井合 進・松永康男・森田年一・桜井博孝(1993): 釧路港湾での強震動の特徴. 第21回地盤震動シンポジウム, 33-42.
- 井出 哲・武尾 実・林 能成・吉田康弘・神定健二(1995): 強震波形に基づく兵庫県南部地震の震源過程—副断層上の時間関数の決定—. 地球惑星科学関連学会1995年合同大会, 緊急フォーラム Q144.
- Iwata, T., Hatayama, K., Kawase, H., Irikura, K. and Matsunami, K. (1995): Array observation of aftershocks of the 1995 Hyogoken-nambu earthquake at Higashinada Ward, Kobe city. *Jour. Nat. Disas. Sci.*, **16**, (in press).

寛 楽磨・入倉孝次郎・干場充之(1995): 強震動加速度記録のエンベロープ・インバージョンによる兵庫県南部地震の断層面上の高周波生成域の推定. 地球惑星科学関連学会1995年合同大会, 緊急フォーラム P149.

活断層研究会(1980): 日本の活断層. 東京大学出版会.

川瀬 博・佐藤智美・福武毅芳(1995): 神戸市ポートアイランドにおけるボアホール観測記録の非線型地盤応答シミュレーション. *ORI 研究報告*, **94-05**.

菊地正幸(1995): 兵庫県南部地震の震源過程モデル—遠地の地震波解析速報—. *地質ニュース*, no. 486, 12-15.

額額一起(1995): 地震波を読む(2), 「地震科学」最前線. *科学朝日緊急増刊*, 11-14.

中村 豊(1995): 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析. *JR 地震情報*, No. 23c.

境 有紀・南 忠夫・鄭 玉龍(1995): 1995年兵庫県南部地震による建築物の被害と地震動の性質(速報). 第715回地震研究所談話会.

嶋本利彦(1995): “震災の帯”の不思議. *科学*, **65**, 195-198.

吉田明夫(1995): 1995年兵庫県南部地震. *地質ニュース*, no. 486, 6-11.

KOKETSU Kazuki (1995): Characteristics of seismic ground motions from the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake.

〈受付/受理: 1995年5月10日/5月11日〉