

地震動

兵庫県南部地震 ―震源断層、強震動、そして震災の帯―

入倉 孝次郎（京都大学防災研究所）

1. はじめに

歴史の古い近畿地域は地震に関する資料も豊富に残されており、歴史上繰り返し大被害を被ってきていることはよく知られている。近畿に被害をもたらす内陸部に発生する地震は南海沖から紀伊半島沖にかけての南海トラフ沿いに繰り返し起こるマグニチュード8クラスの巨大地震と連動して発生してきた（例えば、茂木、1981）¹⁾。南海トラフ沿いの巨大地震は100～150年程度の間隔でかなり規則的に起っているが、これまでの歴史記録からこの巨大地震に先行して50年程前から西日本の内陸の地震活動が活発化することがわかっている。この内陸地震は最大でもマグニチュード7を少し超える程度で南海沖の巨大地震に比べて数10分の1のエネルギーに過ぎないが、都市直下に起こる可能性があるため、大被害となることが懸念されていた。しかしながらこの内陸地震が実際にいつ・どこに・どの位のものが起こるかという決定論的な意味での地震予知は兵庫県南部地震の発生前には全くなされてはいない。兵庫県南部地震は予知にのみに頼る地震防災対策では大震災は防ぐことはできないことを教えている。

ここでは、まず最初に今回の地震の震源と活断層の関係について、余震分布、強震動記録、被害分布などから考察し、そのあと今回の地震の被害の直接の原因となった強震動というものがどういうものであったか、どうして非常に大きい地震動が形成され、またそれによって大被害が引き起こされたのかについて述べる。

2. 兵庫県南部地震と近畿の活断層

今回の地震の全体的な様相を見るために「日本の科学者」に掲載された気象庁気象研の石川有三氏の論文²⁾中の気象庁による本震及び余震の震源分布を図1に引用する。彼の指摘によれば、今回の地震の余震は志筑断層から有馬高槻構造線の間に分布している。従って、破壊が広がっていった先端部分に応力が集中することから、今回の地震を引き起こした断層帯の北東端に位置する有馬高槻構造線とか、南西端に位置する志筑断層およびその延長にある中央構造線というものを今後注意深く見守るべきだとしている。

この地震は石川氏が前から指摘していた空白域の1つに起こっている。しかし、今回の震源域は淡路側から神戸側にかけて少なくとも40km以上と思われるが、空白域といわれていたのは神戸側のみで、淡路側では1916年マグニチュード6.1の地震が起こったおり空白域とはみなされていなかった。従って今回の地震では従来の空白域を埋めるという形だけではなく、さらに空白域だけではない所まで含む広い領域が震源となったことになる。このことは将来の地震の規模が単に空白域の大きさからはわからないことを意味する。

震源となった断層がどこかをみるには余震域についてももう少し詳しく検討する必要がある

とがわかる。断層系はいくつもの断層（一つ一つにいろいろな名前が付いている）の集まったものであるが、地震の方は必ずしも名前をついた断層毎には起こってくれない。そういう意味で、将来の地震の大きさを推定する場合、どこからどこまで破壊するかということの想定は重要課題の1つと思われる。この場合一つ一つの断層はあまり大きくないので個別に地震を起こしていたら、こんな大きな地震が起こらない訳であるが、今回はいくつかの断層が適当に一緒に動いてしまったようである。

しかしながら余震域は時間経過と共に広がってしまうので本震の時にどの断層が実際に動いたかを知るには図2の余震分布は適当ではない。最近根本ら⁴⁾は京大防災研究所および東大地震研究所和歌山観測所の記録を手動で読み取り本震の震源および本震直後の余震分布の精密な決定を行い図3のようにまとめている。余震分布の平面図と断面図が示され、断面図は断層系に平行する面とそれに直交する面に余震分布を投影したものである。本震直後約6時間以内の余震分布（実際には停電のため本震発生 of 5時46分から10時までは欠測）は、明石海峡付近深さ約17kmの本震の発震点を中心として、水平に神戸側約30km、淡路側約20kmで、深さにして約17kmから数kmにわたるほぼ垂直な面と推定される。

今回の地震に関してもう一つの重要なことは淡路側の震源域で地震断層が地表に現れたが、神戸側に関しては現れてないことである。これは将来の地震を考える場合に考慮すべ

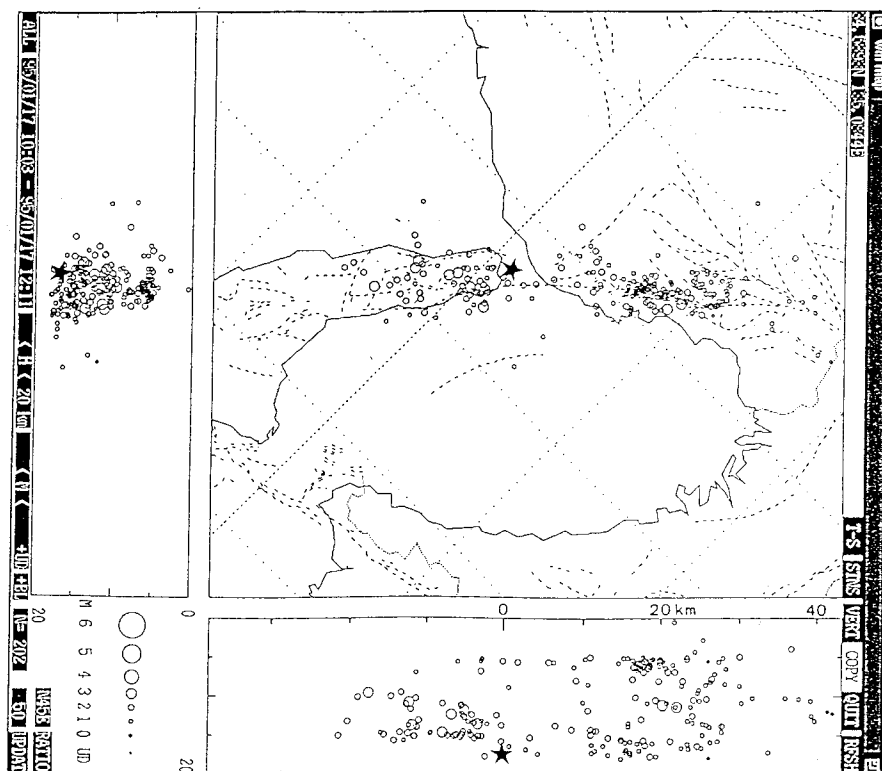


図3 本震（1995年1月17日5時46分51.63秒）直後1月17日10時から12時の間の余震分布（根本他、1995）。京大防災研究所地震予知研究センターおよび東大地震研究所和歌山観測所のデータが用いられた。平面図、断層方向およびその直交方向の断面図が示される。星印は本震の震源位置。

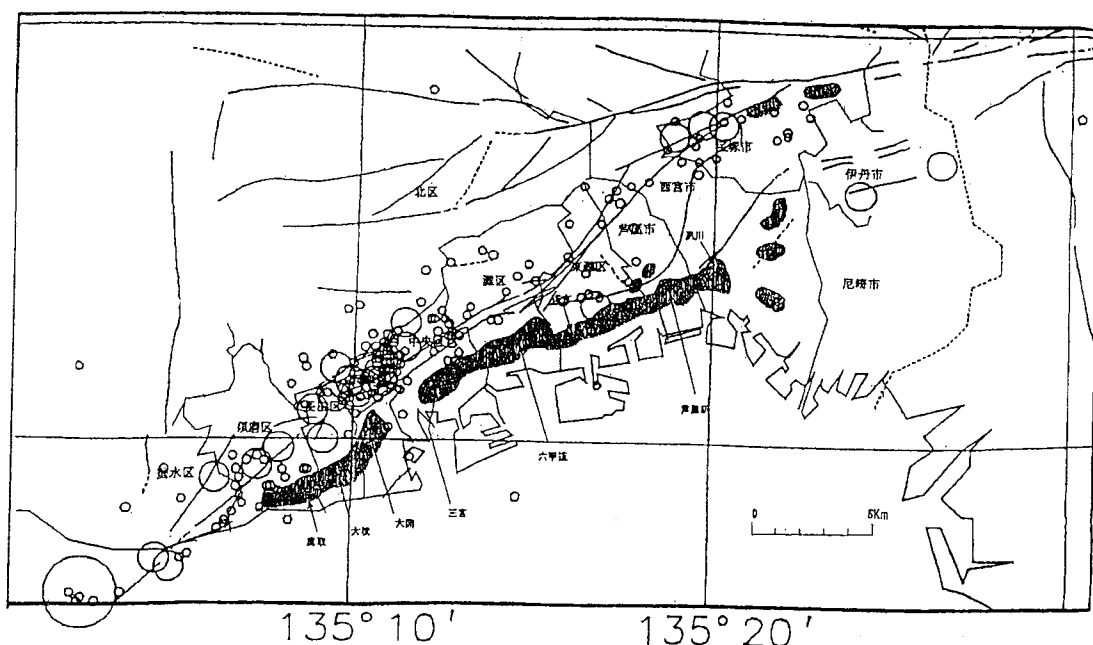


図4 本震の時の震度7の領域と余震分布（気象庁地震・火山課による）

き問題だと思われる。

今回の被害と断層の関係に関して、図4に気象庁の発表した神戸側における震度7の分布が余震分布（気象庁が決めたもの）や既存の活断層分布と一緒に示めされている。この図から余震震源分布と活断層分布とはよく一致するが、震度7の領域とは必ずしも一致していないことがわかる。狭い帯状の所に被害が集中していることから、嶋本利彦氏は図4の震度7の領域を「震災の帯」と呼び、その帯の下に今回の地震の震源断層が隠れているのではないかと報告している。しかしながら余震は「震災の帯」の直下には殆ど起こっていないので震源断層がその帯の下を通ったと考えるのは無理があるように思われる。被害が集中したのはそこはやはり地震動が大きかったことによると考える方がいいようである。もちろんその地域の構造物が耐震的に脆弱であったことも被害を拡大させた要因の1つとなったと考えられる。どうしてこういう所に地震動が大きくなる原因があるかについては後述する。

最近反射法の探査などでこの辺の地下構造がわかりつつある。被害集中域の下に活断層が存在している可能性は十分ある。しかし、たとえ活断層が見つかったとしても、今回の地震の時に動いたという証拠はない。

今回の地震で地表に現れた野島断層の周辺の光景がテレビなどで写しだされたが、断層が動いたところでは地盤に亀裂ができたり、断層を跨ぐ建物が裂けるというようなことが起きているが、すぐそばに建つ家屋がほとんど被害を受けていないことがよくある。これは米国などでの地表地震断層の場合でも（例えば1992年ランダース地震）同様の現象がみられている。地震動という立場からみると、断層のすぐ近くが特別に震動が大きくなるわけではない。このことについては後で述べる。地震動は地盤条件によって大きく変わる。震源のメカニズムと地盤条件によって地震動が大きくなったところで被害が大きくなった

と考えるのが理にかなっている。今回の地震で一番最初にテレビに写りだされた阪神高速の高架橋の倒壊したところは、断層からやはり2～3キロ離れている。その近くに断層が動いたという証拠は無いが、あのような大きな被害が起こっている。その理由はやはりそういう地域で地震動が大きくなったことにある。どうして大きくなるかということを考えていくべきだと思う。

3. 強震動記録

今回の地震に対して種々の機関によって強震計で観測された最大加速度の分布が図5である。各観測点位置が地盤条件の違いによって異なったマークで示され、加速度レベルは数字(ガル)と色の濃さで示されている。この図から北東方向、すなわち京都の方向は南東方向に比べて加速度が大きかったことがわかる。震源断層は神戸市の北東縁部付近で止まっているはずなのに北東方向では宝塚周辺で大きな被害がでており、さらに、京都でも多少被害が出ている。これは断層面での破壊の伝播方向で断層から発生する地震動が大きくなる、いわゆるディレクティビティ効果に関係していると思われる。

断層から生成された地震動がどういうものであったかを知るには震源域に近いところでの強震動の記録が必要である。逆に強震動記録があればどのように断層破壊が生じたかを知ることでもある。そのためには、震源近傍での強い地震動、すなわち強震動の観測が充実していなければならない。残念ながら京阪神地域というのは地震に対する関心度も低いということもあって、この地震が起こる前までは強震観測は非常に少ない機関でしか行なわれていなかった。実際にはいろいろ建設会社とか記録を持っている所はたくさんあるが、

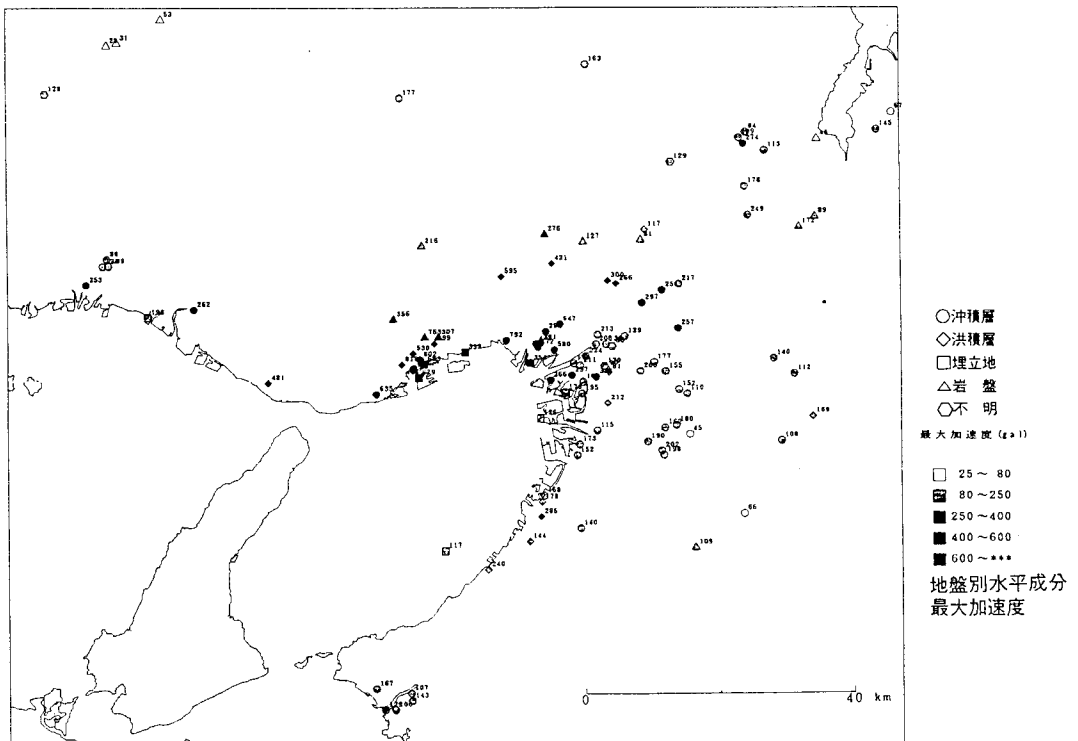


図5 本震の時の水平動最大加速度分布

被害が起こると補償とか裁判などの問題もあって、強震動をせっかく記録してもいまだ研究用に公表してもらえないものもある。

関西地震観測研究協議会（代表：土岐憲三京都大学教授）は関西地域で強震計による観測を行うため、民間会社が協力し資金を出しあって置いた強震計のネットワークであるが、この記録に関しては全て研究用にはオープンにしている。それ以外にも、海洋気象台の記録と神戸市のポートアイランドの記録は地震の後すぐに公表されている。今回の地震の震源域と考えられる断層帯のすぐそばに海洋気象台であるとか、神戸大学の観測用トンネルなどの観測点があったことになる。震源域のすぐそばで記録がとれているということは今回の地震の生成のメカニズムを知る上で非常に貴重なものとなっている。神戸大学のトンネルに設置されていたのは広い周波数範囲で平坦な特性をもつ速度型強震計でその記録（図6）をみると大体どの程度の長さの断層の範囲かわかる。記録から約 10 秒ぐらいで地震動は終わっており、これは破壊が継続した時間は 10 秒しかかかっていないことを意味している。その中で大きなピークが2つでているという事は、2つぐらいの領域で非常に大きな破壊が起こったと推定できる。

震源の極近傍の海洋気象台（K O B E）と神戸大学（K B U）でとれた加速度記録が図7である。水平動をみると気象台（K O B E）は非常に大きな 820ガル に対し神大（K B U）は 300ガル と小さくなっているのは気象台は地盤構造によって増幅されている可能性がある。一方、上下動をみると気象台では水平動に対し2分の1以下となっていて、これまでの経験的關係に一致する。ところが神戸大学の記録をみると、上下動が約 400ガル で水平動よりも大きくなっている。ところがよく見ると、上下動記録のみかけ周期はきわめて短周期で水平動とは全く異なっている。こういう短周期のものというのは地盤の条件に

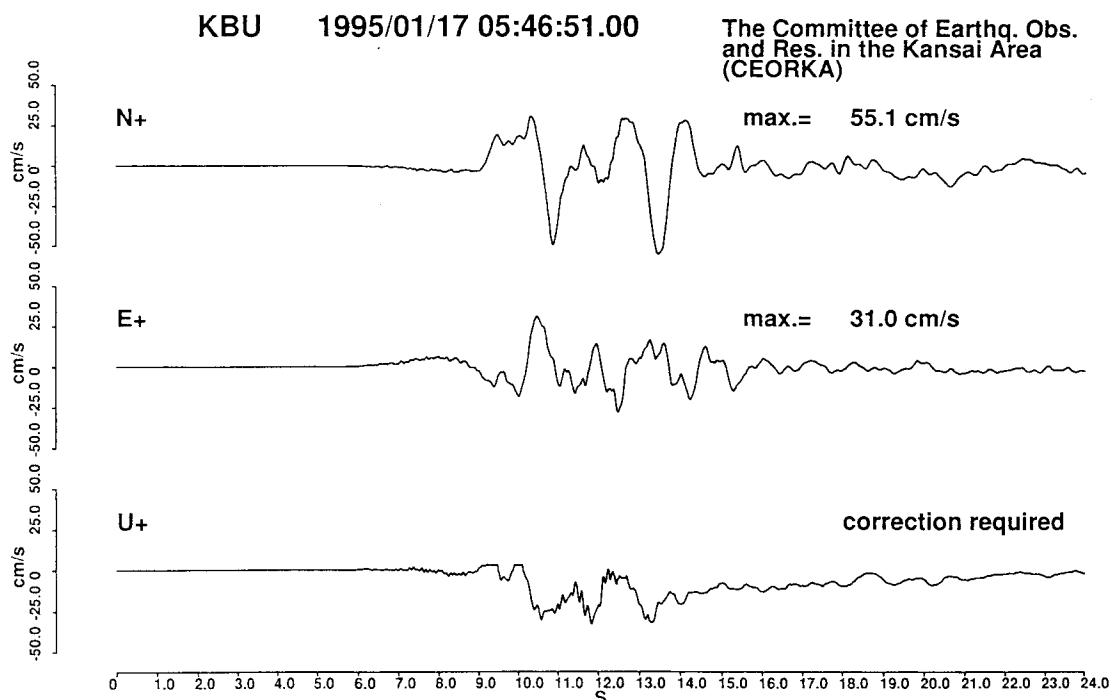


図6 震源の極近傍に位置する神戸大学（K B U）で得られた速度波形記録

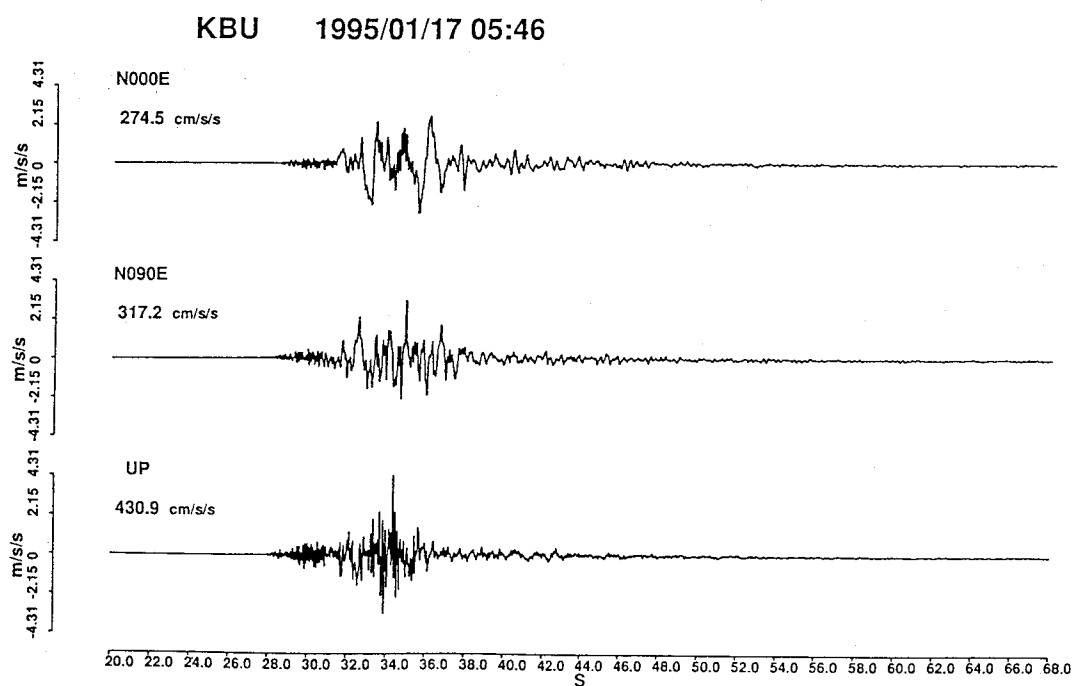
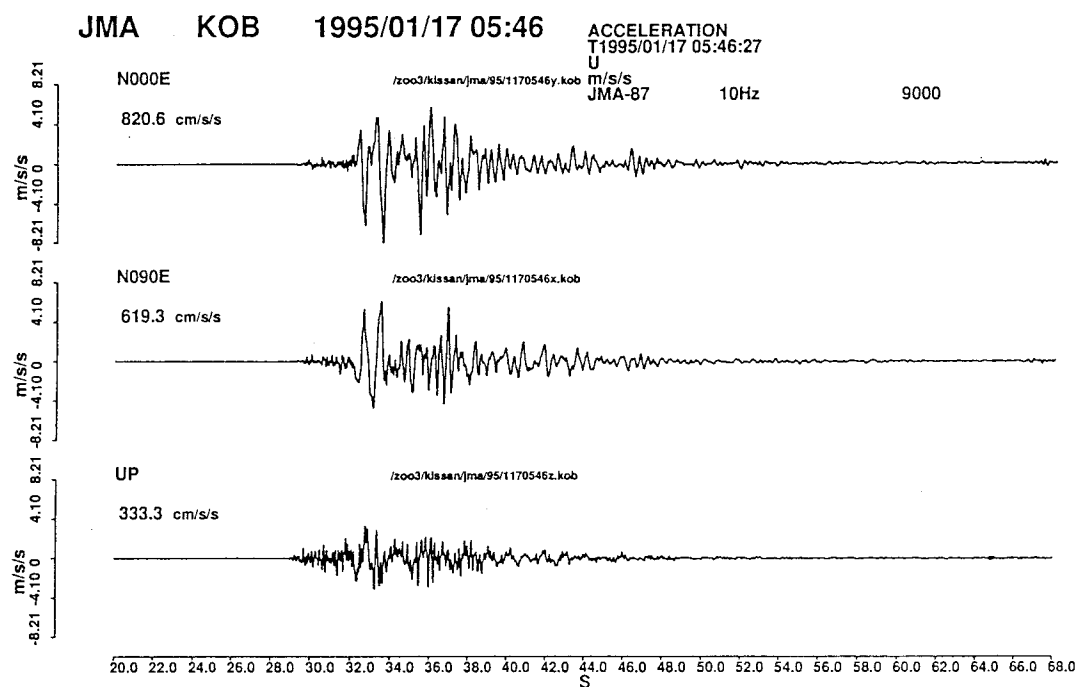


図7 震源の極近傍での2つの観測点、神戸海洋気象台（K O B E）
と神戸大学（K B U）、での加速度波形記録

よってごくローカルにできたと考えられる。このように震源からの地震波はどうだったかとか、上下動がとくに大きかったのか等考えるにはできるだけ沢山の記録をみないとまちがった結論にいてしまう。

4. 断層破壊過程：どの断層がどのように動いたのか

地震は断層面での岩盤のすべり破壊によって地震動を発生する現象である。生成された地震動が異なった方向と距離にある観測点で記録されていると、それらの記録から逆になどの断層がどのように動いたか推定することができる。

図8は京大防災研究所の地震予知センターでまとめた各地のP波初動の押し引き分布である。この分布からこの地震は東西方向に圧縮力により北東－南西方向の面の右横ずれか或いは北西－南東方向の面の左横ずれのすべりを起こしたことによることがわかる。この

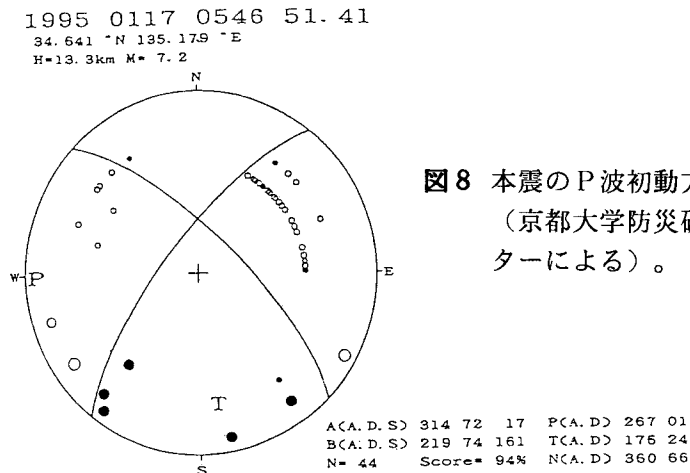


図8 本震のP波初動方向によるメカニズム解
 (京都大学防災研究所地震予知研究センターによる)。

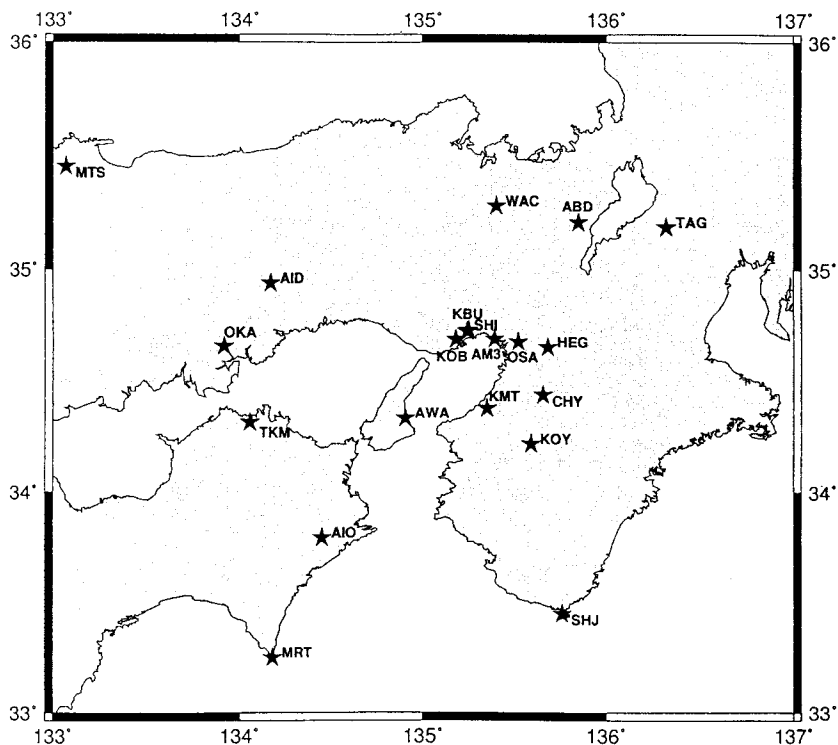


図9 波形インバージョンにもちいた震源の極近傍および
 近距離地域での強震動記録の観測点位置。

震源メカニズムはこれまで近畿地方に起こった地震と一致している。余震は本震の時の破壊面に沿って起きることは経験的にわかっており、余震分布から断層面は当然北東―南西方向ということになる。右横ずれの動きは野島断層の動きに一致している。

断層面内での詳細なすべりは断層面近傍での強震動の記録から知ることができる。現在までに震源近傍で公表された記録の観測点の位置が図9に示されている。断層面位置は、余震分布に加えて、地震前後の地殻変動データ、強震動のパーティクル・モーションの偏奇性などを参考にして、震源断層は図10に示されるように、淡路側1つ、神戸側2つ、計3つのセグメントからなると仮定している。

想定された断層面に震源があると考え観測点で得られた地震動を断層面上に戻す波形インバージョンという方法で断層面上のスリップ分布を推定する。この際地下構造による地震動への影響を理論的に考慮する必要があり、これがこの方法の適用限界ともなる。このようにして得られた結果は図11に示されるようなものである。主要な破壊は発震点（図の白丸）付近、淡路側の浅いところ、および神戸側（図で発震点から16～26km付近）のやや深いところ（深さ約15km）の3つの領域で生じている。最も大きなスリップは淡路側の浅いところで、これは野島断層での地表の右横ずれに対応していると思われる。興味深いのはこの結果では大被害を被った神戸側では淡路側に比べて小さなスリップでしかも深いところにしか起こっていないことである。この結果からでは神戸の大きな被害の説明はできない。

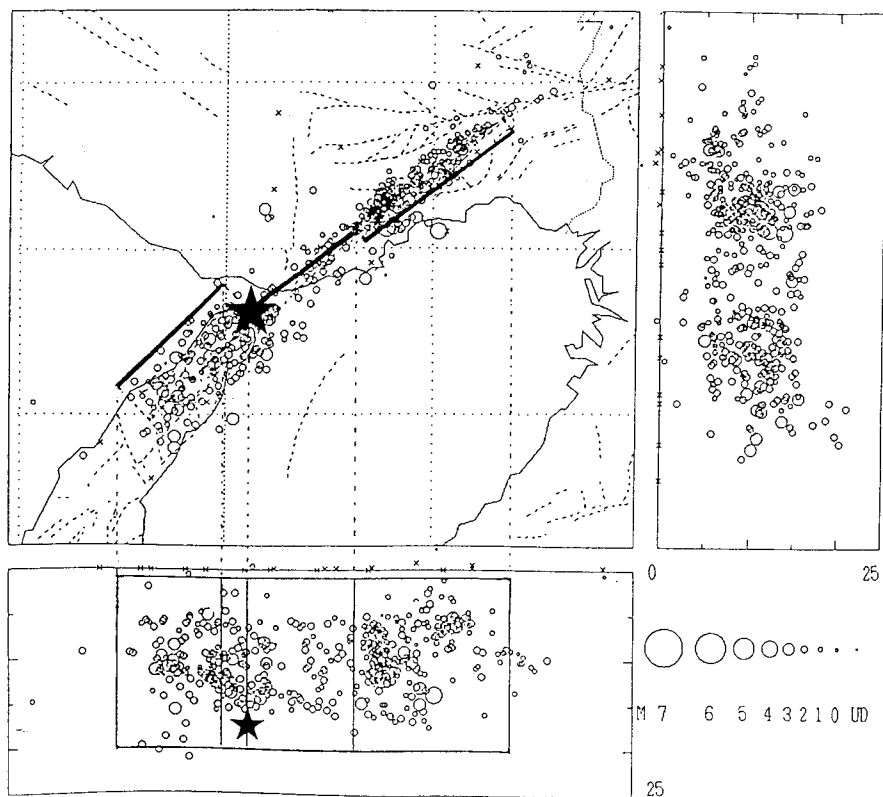


図10 波形インバージョンのためにモデル化された震源断層面
(断層は3つのセグメントからなると仮定)

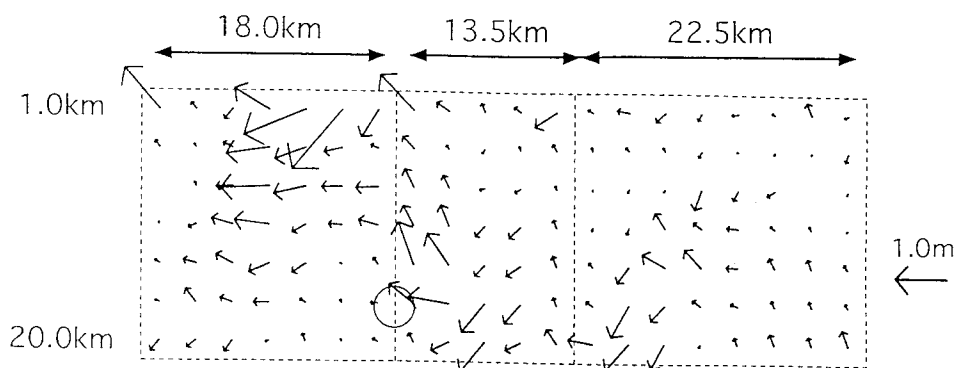


図 11 波形インバージョンにより求められた断層面内でのモーメント解放量（スリップ・ベクトルに対応）。

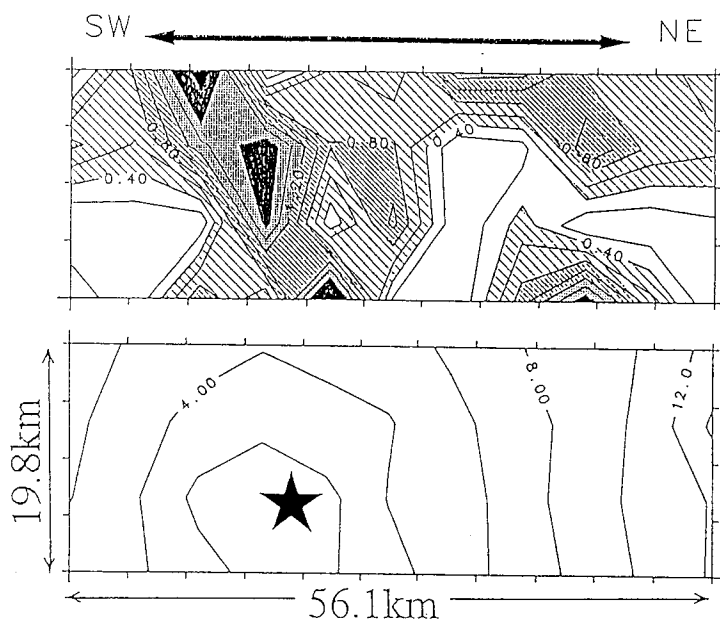


図 12 加速度波形の包絡形インバージョンによる短周期地震波生成強度分布（上図）と破壊伝播時間分布（下図）。

上記の波形インバージョンでは数秒よりも長周期の変位記録を用いている。地震時の被害に直接的に影響するのはより短周期の地震動である。断層面のどこで短周期の地震動が生成されたかを知るには上記の波形インバージョン法は地下構造推定の信頼性や理論計算の精度から困難である。そこで筆者等は震源近傍で得られる加速度波形の包絡波形を用いた震源インバージョン、包絡波形逆解法を開発して、断層面での短周期地震動の放射強度を求めてみた。得られた結果は図 12 に示される。強震動を構成する短周期地震動の生成域はストライク方向約 45km、深さ方向 1~19km の範囲となっている。主な短周期生成域は発震点から淡路側の浅いところにかけた領域に加えて神戸側の浅いところにもある。この神戸直下の浅いところで短周期の地震動の生成が阪神地域の大被害の源となったと考えられる。

5. 最大加速度・速度と震源断層の関係

この地震による強震動がこれまでの同様の規模の地震に比べて異常に大きなものであったのかどうかを調べるために、断層面からの観測点までの距離とそこで記録された最大加速度や最大速度の関係について調べてみる。

本震時に観測された各地の最大加速度と最大速度が本震の断層域からの最短距離の関数として図 13 に示される（図中□印）。最大加速度については Fukushima and Tanaka (1991)⁵⁾ による最大加速度の距離減衰式との比較がなされ、最大速度については福島 (1994)⁶⁾ による式との比較がなされている。図から震源近傍域の 20km 以内で観測された最大加速度は経験式の標準偏差の範囲にほぼ含まれていることがわかる。最大速度も種

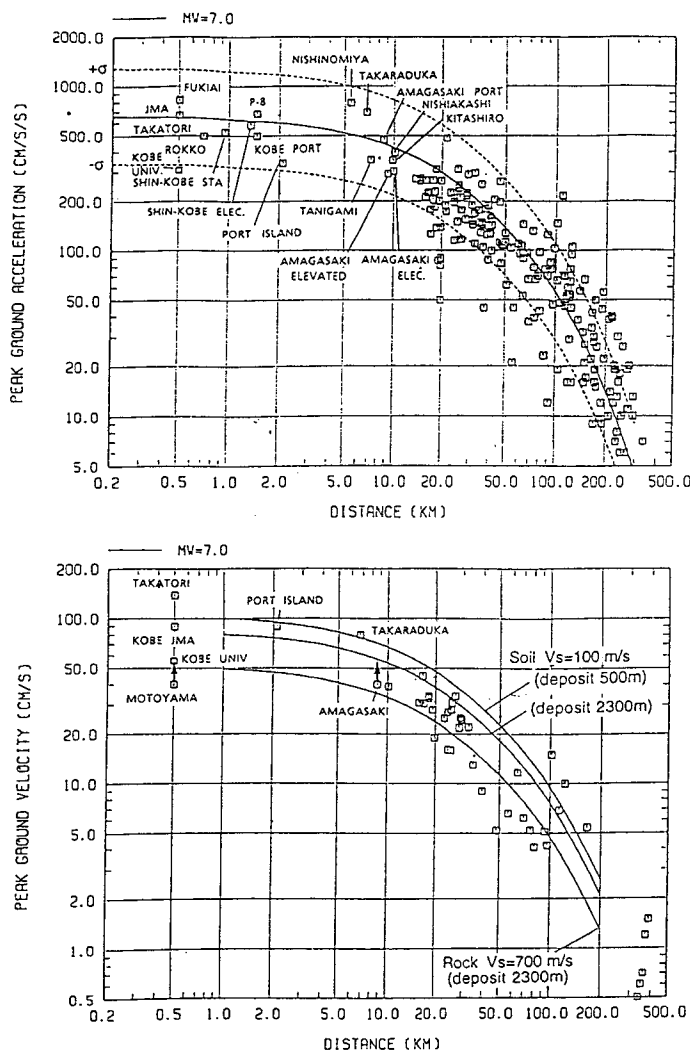


図13 上：最大加速度の距離減衰。実線は福島・田中（1992）による日本の平均的地盤におけるモーメントマグニチュード7.0 の地震に対する距離減衰式。点線はその標準偏差の範囲を示す。下：最大速度の距離減衰。実線で示される経験式は地盤条件により異なる。距離は断層からの最短距離とする。

々の異なる地盤条件の経験式の範囲に入っている。これらの関係からはこの地震による揺れは特に大きいものではなくこれまでの経験的關係から予測可能な範囲に入ることがわかる。

したがって最大加速度や速度からみる限り今回の地震動というものは、もしこの地域にこの程度の断層が動くという事が予測されたならば、地震動の大きさもある程度推定できたという事がわかる。そこが今後のこういう地震防災対策を考える重要な点だと思う。

もう一つ重要な点は、今回の地震の被害は衝撃的な地震動、おおきな上下動によって引き起こされたという考えがマスコミを賑わしたが、地震動記録からみて事実どうだったかということである。上下動というものが建築や土木の構造物では設計に考慮されていない、それが為被害が起こったのではないか、今回の地震は従来のものに比べて強震動として特に大きな上下動成分をもっていたのかをみる必要がある。

図 14 では水平動の最大加速度と上下動の最大加速度の大きさの関係をみることができる。従来から考えられていたのは、水平の加速度は上下動の約 2 倍大きいということである。だから構造の設計には水平のことだけ考えればいいとされていた。そのため上下動というのはあまり設計に考慮されていなかったのは事実である。この図から今回の地震も上下動は大ざっぱにみると水平動が 200ガル ぐらいまでは約 2 分の 1 の直線にそっており、今回もやはり経験的な関係とよく一致するような結果となっている。しかしながら、加速度が 200ガル より大きくなったところで、上下動と水平動が振幅としてはあまり変わらなくなっている。こういうことが起こる一つの理由としては、震源が近かったため震源から発

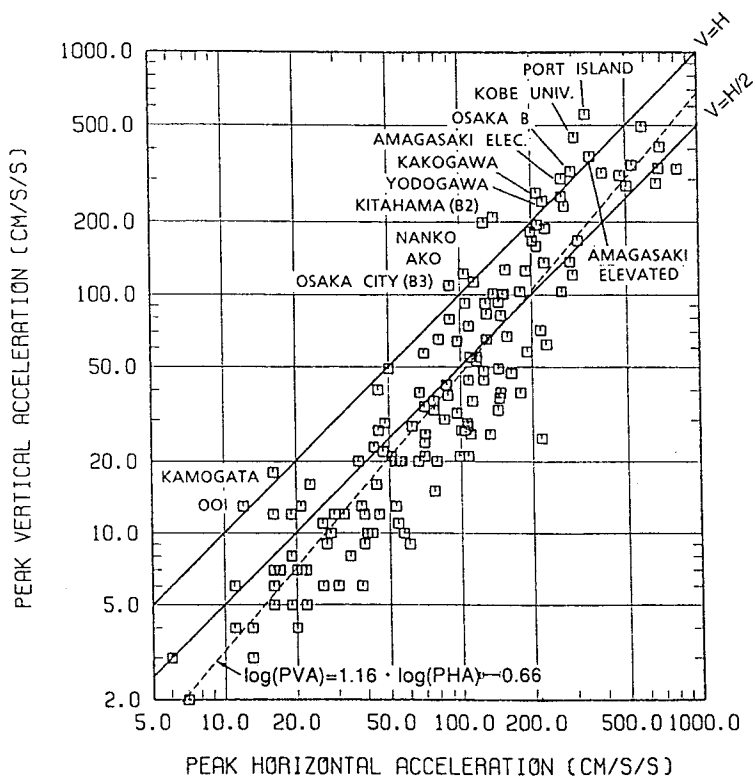


図 14 水平動の最大加速度と上下動の最大加速度の関係

生した縦波の振幅が大きくそのため上下動が大きいという説明がある。今回の地震に関する限り震源メカニズムは右横ずれで横ずれが縦ずれより大きかったため、震源近傍で縦波よりも横波の方が卓越する。事実として図7の震源近くの海洋気象台や神戸大学の記録で震源で生成された縦波（P波の初動部の上下動）は横波（S波部分の水平動）にくらべて大変小さい。神戸大学の記録で上下動の最大振幅の部分はS波部分に相当するので、震源からは縦波でなく横波として生成・伝播してきたものである。神戸大学で上下動が水平よりも大きかったわけであるが、これは神戸大学のトンネルは埋立地盤で作られており高周波数の上下動が表層付近の乾いたやわらかな層（遅いP波速度をもつ）で増幅されたためと考えられる。

上下動の最大加速度値が水平動よりも大きかった観測点を調べてみると殆どが海岸線であるとか、川筋であるとか、埋立て地盤であるとか、非常にやわらかい地盤であることがわかる。これらの事実から上下動が大きくなったのはむしろ地盤条件によるものというふうに結論することができる。これは表層付近で地下水レベルよりも浅いところにある乾いた層がおそいP波速度をもっており、そこでのP波の重複反射で上下動が大きくなるというこれまでの研究結果とよく一致している。この場合上下動の卓越周波数は一般に5 Hz以上の極めて高周波数のため必ずしも構造物に大きな影響を及ぼすことはないのであるが、構造物周辺の付属物の被害には関係すると思われる。

6. 被害集中域での地震動

本震時の断層破壊域は余震分布からこれまでの調査によりすでに活断層として知られていた帯状域に一致することはすでに述べた通りであるが、顕著な被害の集中は断層帯ではなく、断層から1～2 km 南側に巾1～1.5 km 程度の細長い帯状の地域で既存断層に並行して広がっているように見える。このような被害の集中がなぜ生じたのかを解明するため、筆者等は本震直後から東灘区付近で断層に近い丘陵部から被害集中地域を横断する南北方向のアレー状の強震動観測（図15）を行った。このネットからみて震央が北側約7～8 km にあるM 4.7 の地震による地震動の空間的变化が図16に示されている。断層域の北側の岩盤地域（KMC）および南側でも岩盤の極近傍域（KOB）では地震動は相対的に小さく、さらに南側の被害集中域（FKI）では地震動が大きく増巾されることがわかる。種々の到来方向の余震にたいして岩盤の観測点（KMC）に対して地盤上の観測点（KOB, NOM, FKI, ASY, FKE）の地震動のスペクトル比が図17に示されている。これらの地震動スペクトル比は表層地盤構造による地震動の増幅特性に相当するものである。FKIで最も大きく2 Hz付近の卓越周波数で20倍を越え、ASYやFKEでも約10倍以上となっている。NOMは卓越周波数がより高周波3～5 Hzにずれたところで20倍以上の増幅となっている。一方KOBはおなじ堆積地盤上ではあるが2～4 Hzの周波数で1～3倍とあまり大きくなく5 Hz以上の高周波数でのみ増幅されるようである。ここでのスペクトルのもう1つの特徴は比の値すなわち増幅度が地震により大きくばらついてみえることである。これは地震の到来方向に依存しており、表層地盤の2次元的な変化に対応していると考えられる。スペクトル比のピークの周波数、すなわち卓越周波数は、どの方向からの地震に対してもほぼ同じ周波数約2 Hzとなり、比較的安定している。2～3 Hzに卓越周波数をもち大きな増幅度のところと激甚被害地はよく一致していることから、地盤の地震動卓越周波数が木造住宅や中低層の

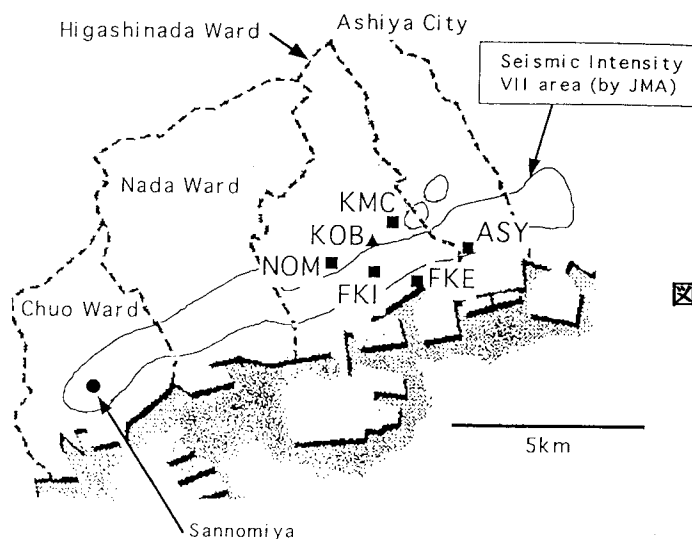


図 15 東灘区における余震観測のための水平アレー観測網

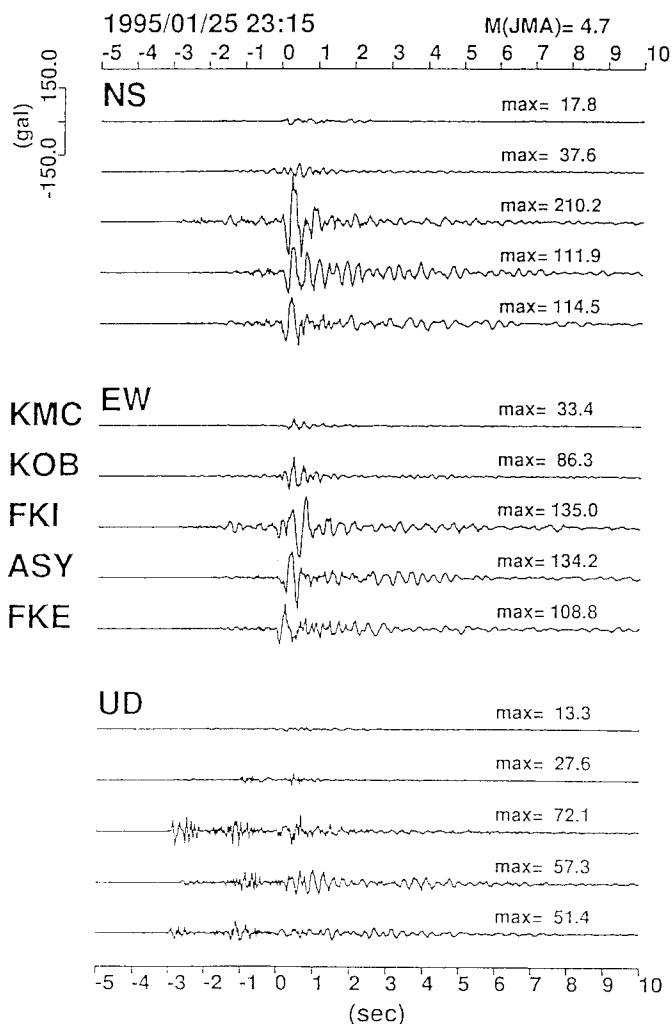


図 16 観測波形の例。地震は M4.7 (1995/01/23, 21:44) で、震源は KMC からみて北方約7km、深さは約10km。

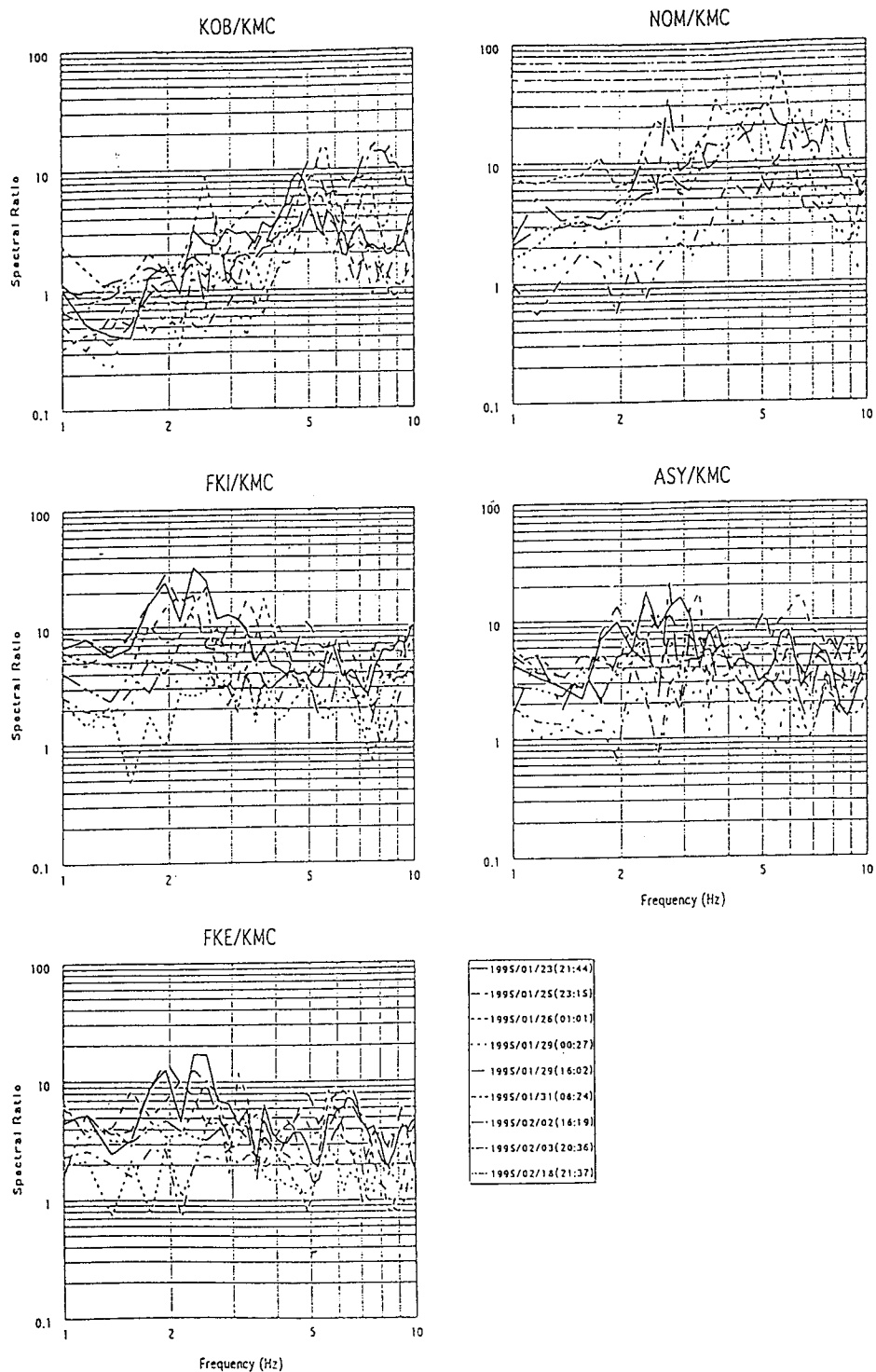


図 17 岩盤上の観測点 (KMC) に対する堆積上観測点 (KOB, NOM, FKI, FKE, ASY) のスペクトル比。

鉄筋コンクリート建物のそれに一致しているのが被害集中の一因と考えられる。

この付近の被害集中域を横断する方向（北北西－南南東）での地下構造の変化を明らかにするため反射法探査が図 18 に示される 2 つの測線でなされた（関西地震観測研究協議会）。得られた反射波断面が図 19 a, b である。基盤が典型的な逆断層の形状を有しており南側では急激に深くなっていることがわかる。これらの反射波断面を参考にしてこの付近の地下構造を図 20 のようにモデル化し地震動の数値シミュレーション（2.5次元の差分法）を試みてみた。このような地盤構造地域に地震波が入射した場合の合成された地震動の水平変化が図 21 のようになる。ここでは基盤側の KMC から北方約 7km 深さ 15 km にある横ずれ地震（1995 年 1 月 25 日の M4.7 地震に対応）を想定している。基盤が急激に深くなる地域で地震動のフォーカシングのような現象により地震動振幅が大きく増幅されている。図 22 に示されるように合成波形の形状は観測波形によく一致しているが、震災の帯の中にある FKI や FKE では振巾はまだ半分程度となっている。さらに表面付近に S 波速度 100 m/s 程度の軟らかい層を 10m 程度考えると振巾も一致する合成波形が得られる。

従って震度 7 の帯は基盤の形状と軟らかい表層地盤の両方を考慮した地震動の増巾効果により形成されたと考えられる。より南側の沖積層の厚い地域でなぜ被害がむしろ縮小しているようにみえるかは次に述べる軟弱地盤の非線形性を考える必要があると思う。

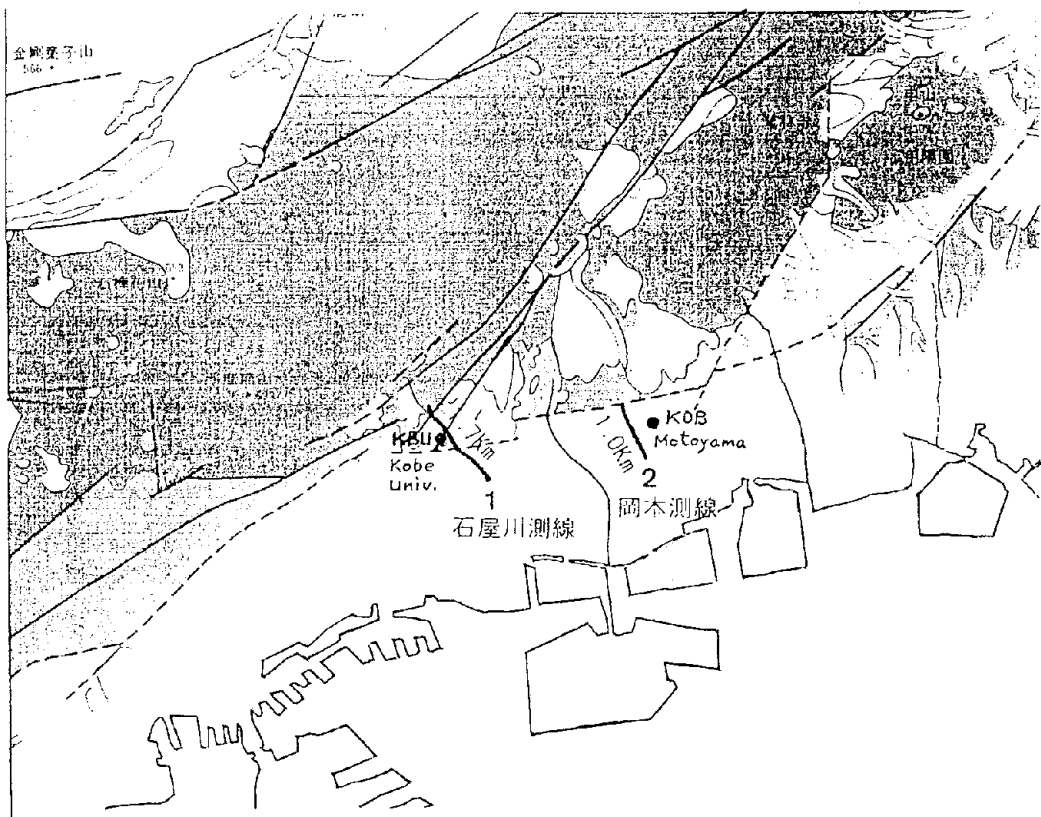
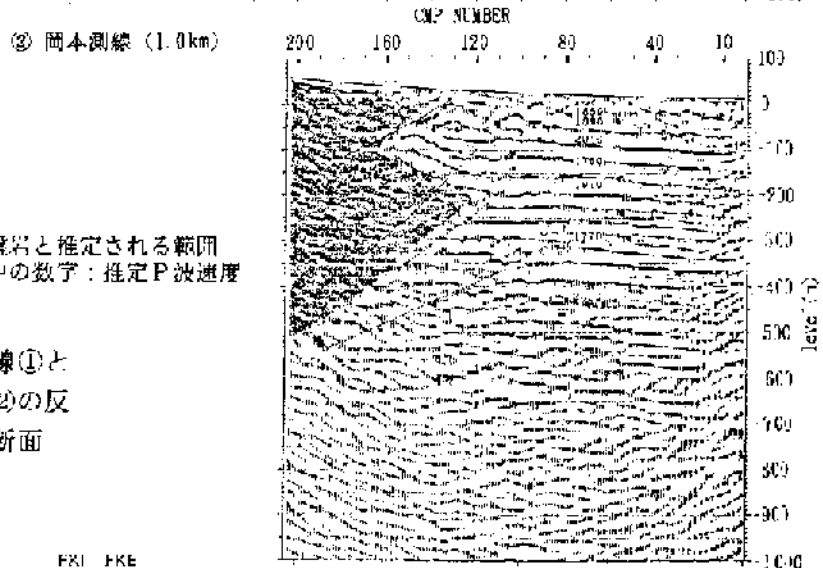
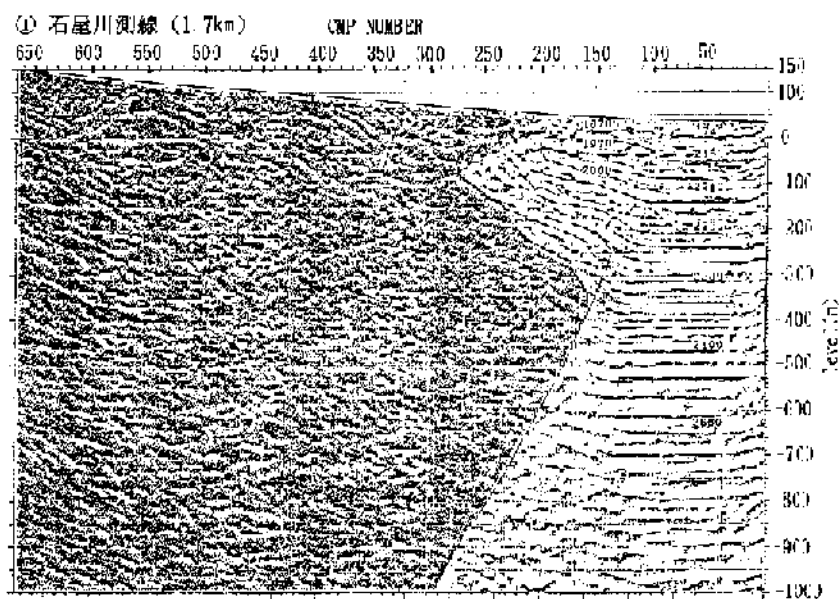


図 18 神戸市域での 2 つの反射波探査測線
1：石屋川測線。2：岡本測線。



■ 頁岩と推定される範囲
 図中の数字：推定P波速度

図 19 石屋川測線①と
 岡本測線②の反
 射波探査断面

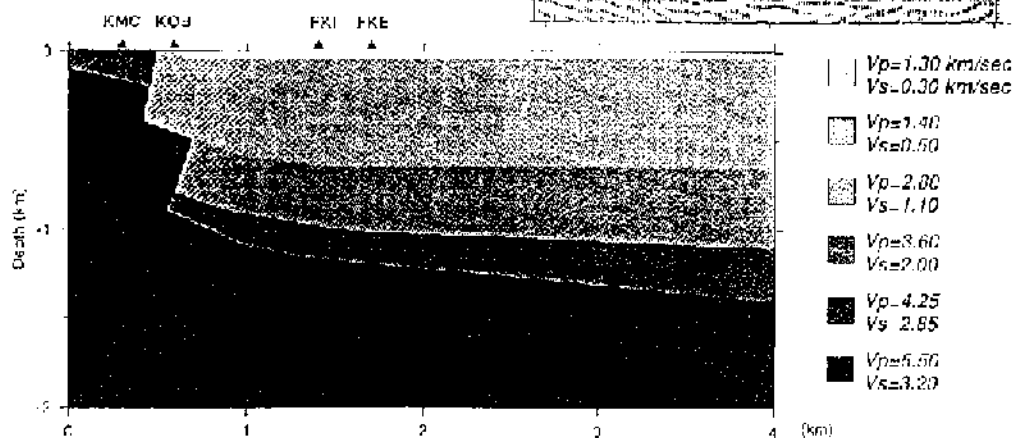


図 20 東瀕付近の被害集中域を横断する方向（北北西-南南西）での地下構造モデル。
 最近行われた関西地震観測研究協議会による反射波探査結果を基に推定。

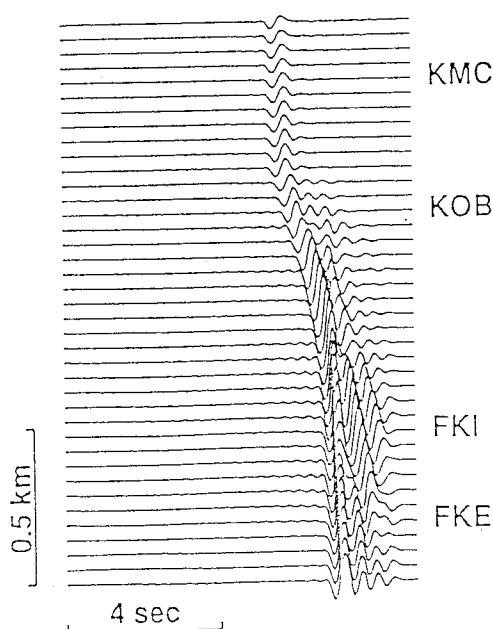


図 21 2.5 次元差分法を用いて図 13 の地下構造モデルに対して合成された地震動（速度波形）の空間分布。震源は KMC の左方 7km 深さ 14km に右横ズレ断層（図 8 に示される M 4.7 地震）を仮定。

1995/01/25 23:15

VELOCITY TRANSVERSAL comp.

BAND PASS FILTERED 0.1 - 2.5 Hz

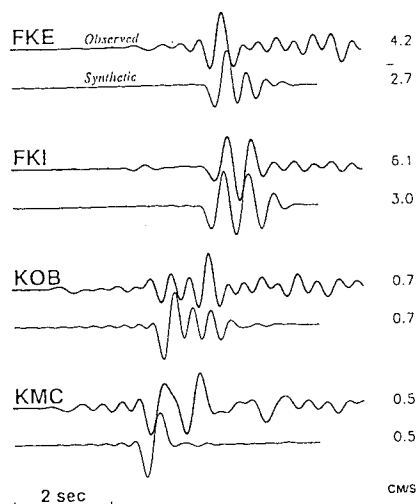


図 22 M4.7地震による観測記録と合成波形の比較。震源は図 13 の数値計算と同じとする。

7. 強震動に対する軟弱地盤の非線形挙動

今回の地震の被害の集中域は、沖積層があまり厚くない比較的地盤のよいとされてきたところであった。海岸近くの埋立地盤や沖積層の厚い地域でむしろ構造物の倒壊は少なかったように思える。この問題を考えるための貴重な記録が神戸市開発局によってポートアイランドで得られている。ここでは深さ 83m、32m、16m の 3 つのボーリング孔および地表からなる鉛直アレー観測網（図 23）で本震および余震の地震動が記録されました。ポートアイランドは海を埋め立て人工的に作られた島で、ボーリング資料によると地表面近くは埋立土砂（約19m）、その下に粘土や砂からなる沖積層（深さ約 37m まで）、さらに砂礫の洪積層と続く地盤構造となっている。地震動は一般に地表面近くの軟らかい表層で増幅されるが、ここでの本震の記録を見ると図 24 に示されるように地表面近くの水平成分の地震動が地中よりも逆に小さくなっている。上下成分は地中で小さく地表近くで急に大きくなっている。図 25 では鉛直アレーの本震観測記録と 1 次元線形地下構造モデルを仮定して計算された合成波形と比較している。水平方向成分のシミュレーションは SH 波の鉛直入射に、および垂直方向は P 波の鉛直入射に対し、最も深い -83m の地点で入射波と反射波の足し合わせで表せる合成波形が観測に等しいとし、-32m、-16m、および地表での地震動が求められる。地盤が線形的に振る舞うとすると水平成分については明らかに地表のみならず -16m や -32m でも観測より大きな振幅の合成波形となる。とくに地表の NS 成分の合成波形は 1300 ガル を超える大振幅となり観測の 3 倍以上にもなる。

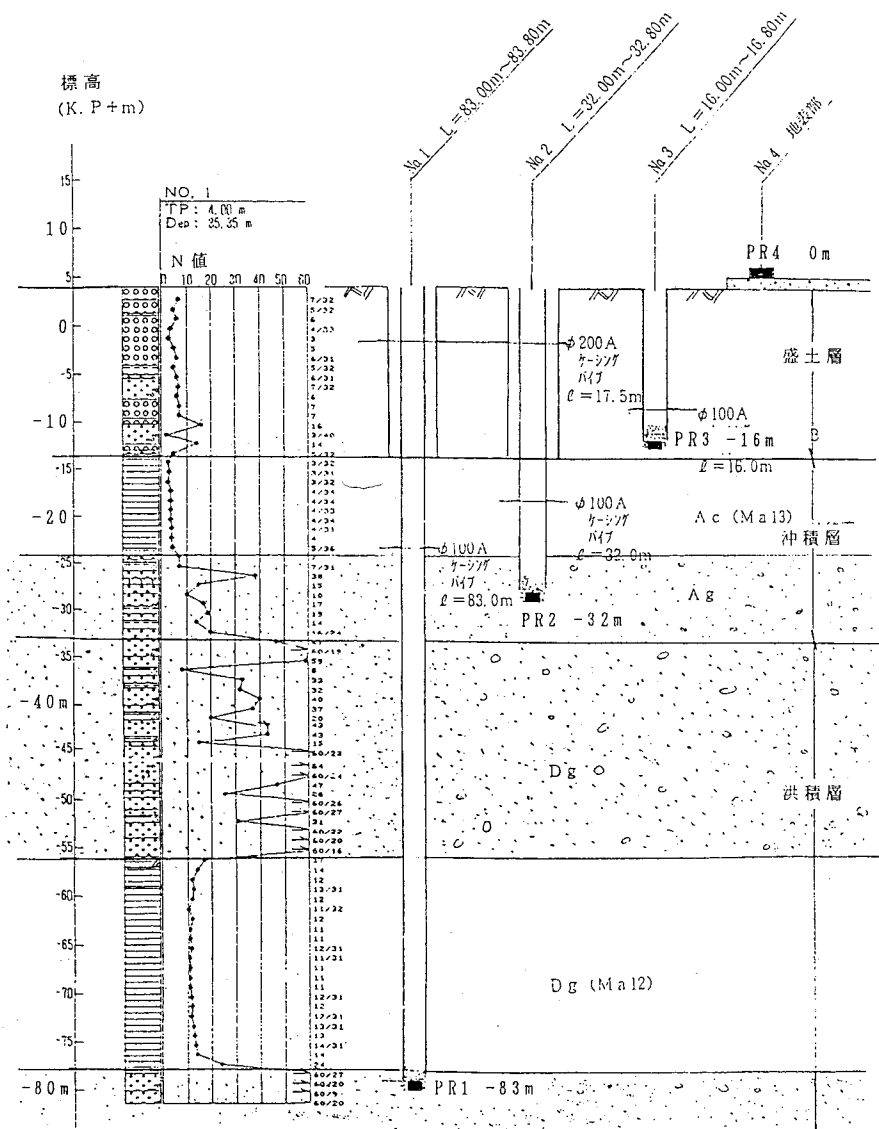


図 23 ポートアイランドでの鉛直アレー強震動観測網（神戸市開発局による）。
強震動加速度計は深さ 83m, 32m, 16m の 3 つのボーリング孔と地表に設置されている。

一方余震に対する同様の計算では合成波形の振幅はほぼ観測と一致している。これは本震の強震動に対して表層地盤が強い非線形性を示したことを意味していると考えられる。

9. おわりに

日本では、兵庫県南部地震が起こるまでは、1948年に死者 3895 名にもおよぶ大被害を受けた福井地震以後、都市を直撃する大地震は起こっていない。その間新潟、日本海中部、北海道南西部地震などの大地震は起こっているのであるが、これらはいずれも震源は海にあるため、津波による被害はあったが地震動による被害は極めて少なかった。見かけ上の被害の少なさは日本が防災先進国になったという錯覚を抱かせたきたように思える。

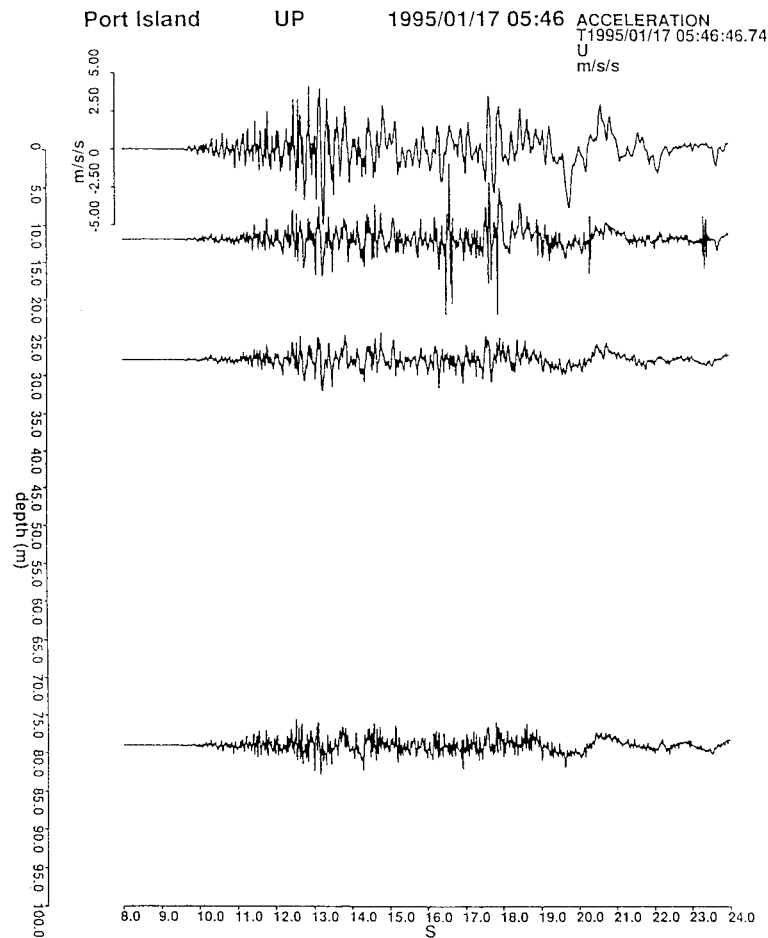
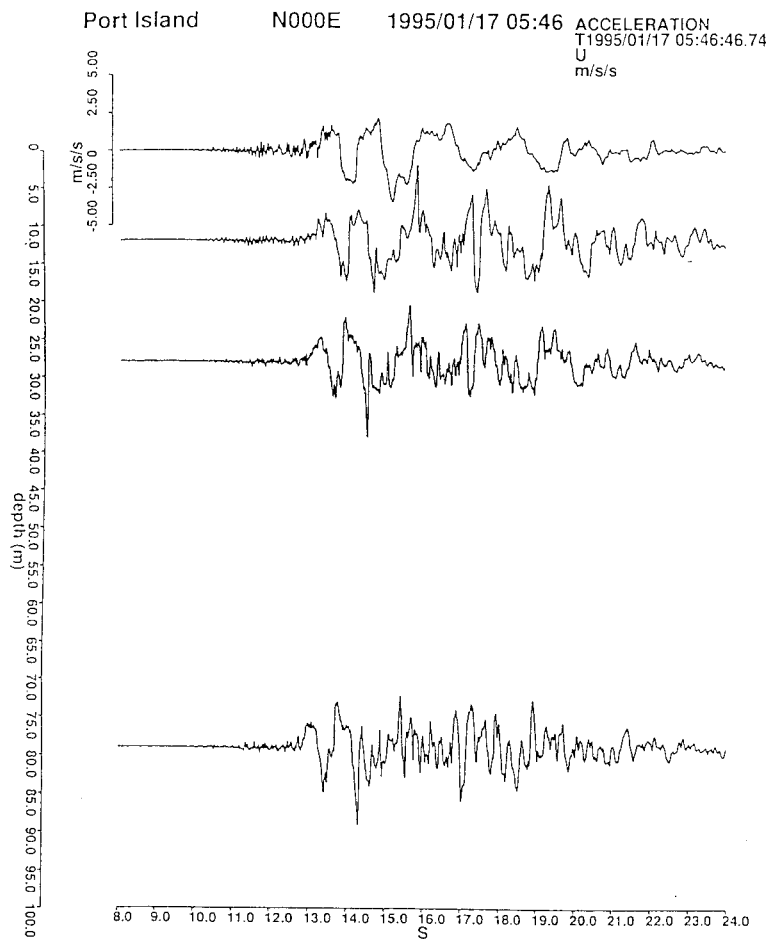
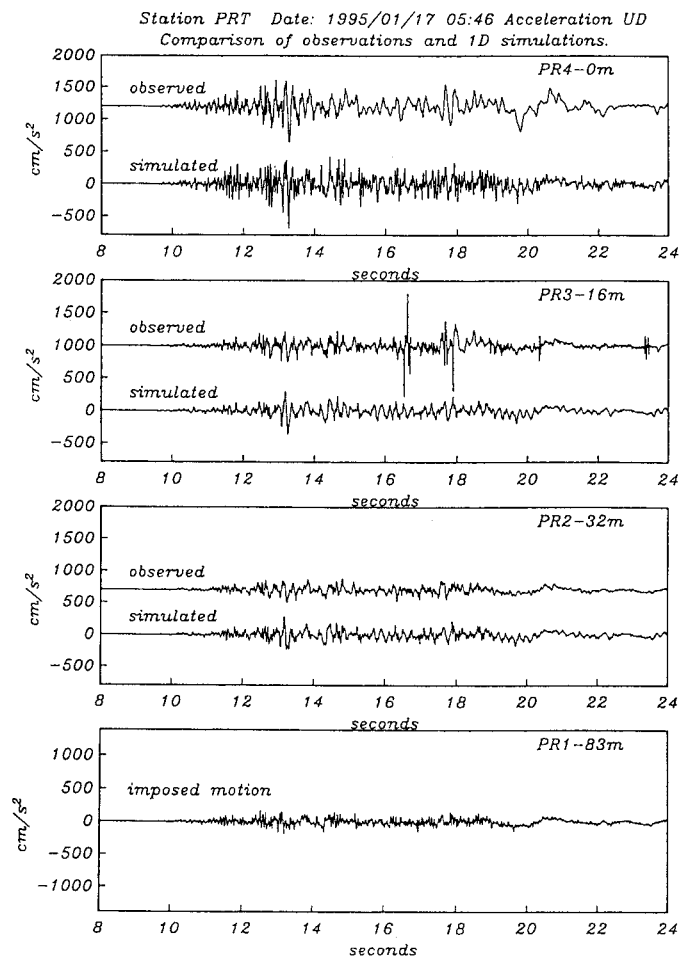
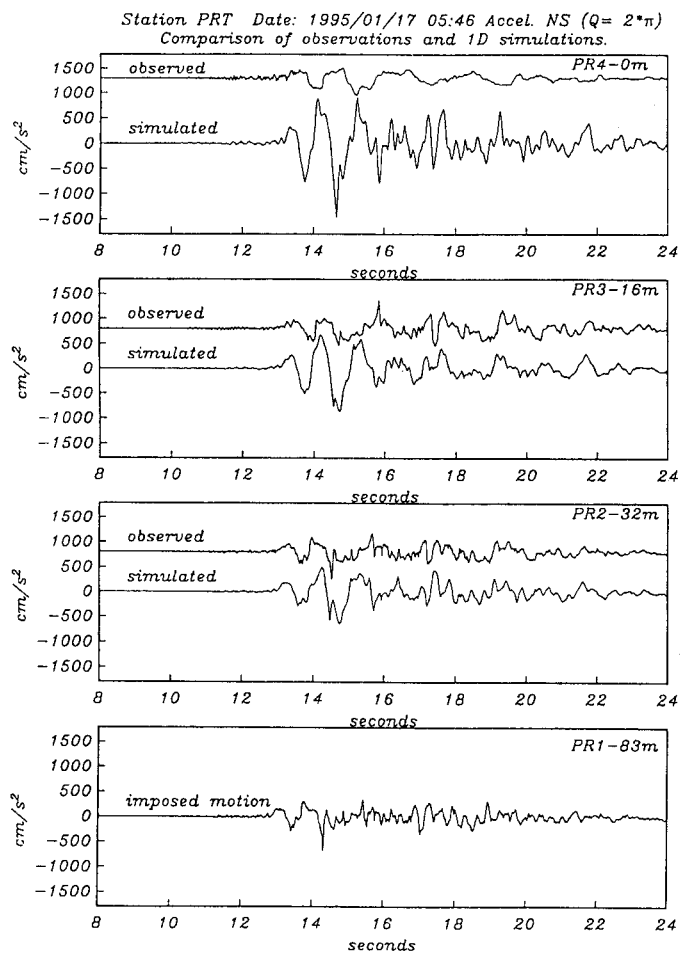


図 24 神戸市ポートアイランドの鉛直アレー観測網によって異なった深さ（83m, 32m, 16m, 0m）で観測された水平動および上下動の加速度波形記録。



・ 図 25 神戸市ポートアイランドの鉛直アレー観測網で観測波形（加速度）と水平成層で線形応答を仮定した地盤モデルによる合成波形の比較。
左：水平NS成分、右：上下動（UD）成分。

事実として今回の地震による強震動の大きさはこれまでのマグニチュード7クラスの地震に対する経験式によく一致している。歴史的には近畿の内陸部では四国沖に繰り返し発生する巨大地震に連動して活動期にはマグニチュード7クラスの地震が頻発している。これらのことは今回のような強震動は近畿における地震防災を考えると当然予想しておくべきものであったといえる。

本震及び余震の強震動記録を用いて波形インバージョンなどの解析により推定された本震の断層破壊域は必ずしも地震動被害の集中したところとは一致していない。余震の地震動観測から被害地と地震動が大きく増幅される地域とはよく一致しているので、地震防災対策において地盤条件の調査は最重要課題と考えられる。もう1つの問題は今回の地震の被害の集中域が、沖積層があまり厚くない比較的地盤のよいとされてきたところであり、海岸近くの埋立地盤や沖積層の厚い地域でむしろ構造物の倒壊が少なかったことである。表層地盤の強震動に対する非線形性が地震動災害の観点からは構造物にむしろ有利に働くことは防災対策を考える上で興味深いことである。

近代都市の地震に対する脆弱性は1989年のロマプリエタ地震や1994年のノースリッジ地震の災害で日本でもよく知られていた。阪神・淡路大震災は日本の都市はアメリカよりも耐震性能が優れているというような考えは誤りであることを明らかにした。このような大震災の可能性は当然日本のどの主要都市でも極めて高いと考えられる。このような大災害を繰り返さないために強震動予測に基づいた都市の耐震安全性の点検を行っていく必要がある。

謝 辞

本論のなかで、種々の機関の不断の努力で得られた兵庫県南部地震の震源域近傍の記録を使わせて頂いた。特に神戸市開発局、関西地震観測研究協議会、気象庁はデジタル記録をいち早く提供して頂いたことに記して感謝の意を表します。京都大学防災研究所地震予知研究センターからは余震分布など多くの資料を提供して頂き、清水建設株式会社和泉研究室による東灘区での貴重な余震記録を解析に使わせて頂いた。京都大学防災研究所地震動部門の皆様には多大の協力を得て本稿をまとめることができたことを感謝します。

参考文献

- 1) 茂木清夫：「地震—その本性を探る—」，東京大学出版会，1981.
- 2) 石川有三：特集 阪神大震災：地震メカニズム—兵庫県南部地震の特徴，日本の科学者，pp. 5-11，1995.
- 3) 飯高隆他：平成7年兵庫県南部地震の余震活動，平成6年度文部省科学研究費（総合研究A，代表：藤原悌三）研究成果報告書，pp. 98-102，1995.
- 4) 根本康雄他：私信，1995.
- 5) Fukushima, Y. and T. Tanaka: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 80, 757-783, 1990.
- 6) 福島美光：地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力時震動の経験的予測，ORI 研究報告 93-7，1994.