

(50) 兵庫県南部地震の震源モデルとシミュレーション

鹿島建設（株）：佐々木透／丹羽正徳／武村雅之

1. はじめに

95年1月17日5時46分52秒に発生（気象庁）した兵庫県南部地震は、気象庁マグニチュード（以下MJMA）が7.2、地震のエネルギーを表すモーメントマグニチュード（以下Mw）で6.8ないしは6.9と決定されている。内陸における同規模の地震としては、1927年の北丹後地震（Mw=7.0、Mwの値はいずれもKanamori,1973）、1943年の鳥取地震（Mw=7.0）、1948年の福井地震（Mw=6.9）などがあり、このような地震の震源近傍における地震動評価は、地震工学上重要な課題である。

兵庫県南部地震の断層モデルは、遠地記録を用いた菊地（1995）の震源過程、比較的近地の記録を用いた井出（1995）、入倉（1995）、笈（1995）のモデルなど、インバージョンによるものいくつか示されている。また、釜江（1995）、中村ほか（1995）らは、地震波の走時や粒子軌跡を用いて破壊過程のモデルを提案している。本検討では特に近地の記録の走時と粒子軌跡を用いて、破壊過程における強震動領域を推定し、震源域内と思われる近地の地震動を評価した。

2. データと手法

本検討では、本震のデジタル記録として関西地震観測研究協議会（以下関震協）のうち神戸工科大学、本山小学校、尼崎など近地のもの、気象庁から公開されている神戸海洋気象台（以下JMA）のもの、神戸市開発局のポートアイランド（以下P.I.）の記録を解析に用いた。この記録と後述する特徴的なフェーズを図1に示す。また、波形が図面として公開されているJR総研の記録も参考として用いたが、中村（1995）によれば、一部観測記録の水平方位に問題があるらしいとのことなので、参考程度に留める。

本検討では、震源モデルを構築するために地震記録の走時と粒子軌跡を用いた。その前提条件として、主要動をもたらした震源断層は、完全な横ずれ断層であり、なおかつ着目するフェーズは、震源からの射出角がほぼ90°に近い直達S波であると仮定する。この仮定条件によって、SH波を震源から観測点の方向（伝播方向）に直交して振動する水平動として読み取ることができる。この仮定の妥当性については後述する。

構築された破壊モデルによって、本震地震動をシミュレーションするために、Takemura&Ikeura（1988）の半経験的方法を用いる。ここで、グリーン関数としては関震協の観測点で得られた余震記録の中から選別することとした。

3. 震源モデル

JMAやP.I.など極めて震源断層に近いと思われる観測点の記録では、初期破壊によるS波から1秒以内に非常に振幅の大きなS波のフェーズが2波見られる（ここではそれぞれSa、Sbと呼ぶ）。そこでこの2波に着目し、粒子軌跡と走時からその震源を求め、震源モデルを構築することと

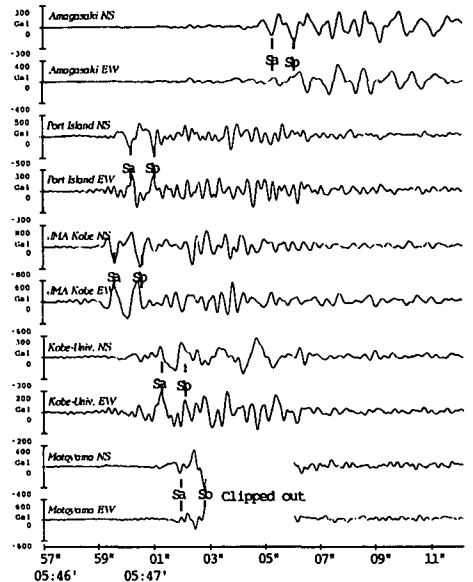


図1 本震波形と着目したフェーズ

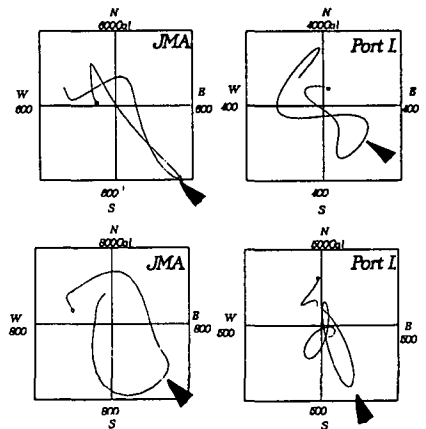


図2. Sa（上段）とSb（下段）の軌跡

した。

3.1 粒子軌跡による検討

前項で述べた仮定によって、Sa、Sb各々のフェーズの粒子軌跡の直交方向に震源があるとみなすことができる。そこで、各々の記録のSa、Sbと思われるフェーズの粒子軌跡を求めた(図2)。図3にはSa波の粒子軌跡から推定される震源を、図4にはSb波の粒子軌跡から推定される震源を示している。これらの図からわかるように、Sa波の震源は、破壊開始点に近い明石海峡周辺に、Sb波の震源は須磨区の周辺に決まる。

3.2 走時による検討

粒子軌跡によって、二つの大きな破壊を発生した震源の位置を特定できたが、その二つの震源の位置が妥当なものであるかどうかの判断と、深さの特定のため、走時を用いた検討を行った。走時は浜田(1984)の1983aを用い、震央距離としては粒子軌跡から求められた領域のほぼ中心と思われる位置からの距離を用いた。

この二つのフェーズの到達時刻と走時を比較したのが図5である。なお、Saの発震時刻は、ほぼ5時46分53秒、Sbの発震時刻は同55秒前後と思われる。走時からはSaの深さは0kmと10kmの間にあること、Sbの深さは10kmより稍浅いことが推定される。

なお、各々の記録のSa及びSb波の走時と観測点の震央距離は矛盾無く記すことができ、粒子軌跡から求めた位置は妥当なものであると判断することができる。

4. 本震波形のシミュレーション

4.1 シミュレーション手法

本検討では、Takemura & Ikeura (1988) による「震源の不均質滑りを考慮した半経験的地震動評価法」を用いて、兵庫県南部地震本震による地震動波形を評価する。この方法の特色は、適切な中小地震の地震動観測波形を用いることによって、比較的単純な計算方法にも関わらず、現実の波動伝播経路の特性をよく反映させた地震動評価ができる点にある。そのため現在では多くの手法が提案されている。

Takemura & Ikeura のもともとの手法では、断層面上の食い違い量の不均質性をあらわすパラメータとして、平均値が0の正規分布に従う確率量(標準偏差SD)を合成に際して設定する。本検討では、断層面上の不均質としてSa、Sbの存在をすでに仮定しており、確率量としての不均質は考慮しない。そのかわりとして、均質滑りに対応する評価 [Irikura (1983)] を各々の断層について行い、それらの結果を足し合わせる。

4.2 余震記録の選択

余震を本震のグリーン関数として用いる際、本震と余震の間には、相似則が成立するという仮定が前提である。しかし、要素として用いる地震の規模があまりに小さいと、相似則が成立しない可能性が考えられる。そのため、要素にはある程度規模の大きな地震を選択する必要があるので関係協で記録の得られている数百の余震のうち、MJMA4以上のものの中から適当と思われるものを選択した。選択に当たっては、評価する観測点までの伝播経路が本震からの伝播経路と類似であることを条件とした。この条件に基づいて、Saの震源、Sbの震

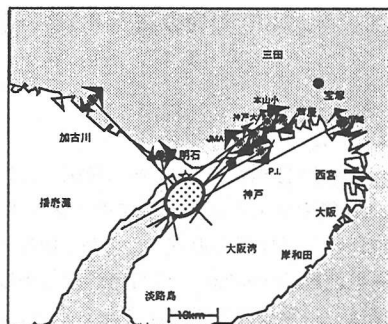


図3 Sa波の軌跡と推定される発震領域

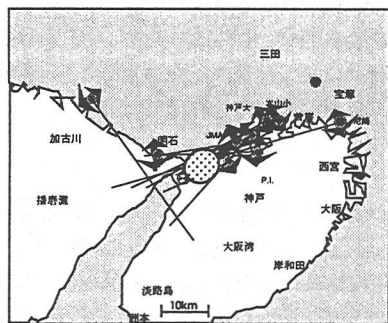


図4 Sb波の軌跡と推定される発震領域

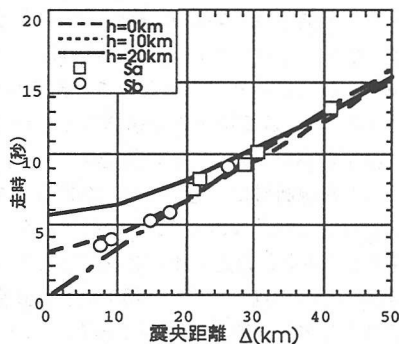


図5 Sa、Sbの走時と1983A

源、その他の震源領域を評価する要素地震を計3地震選択した。これらの要素地震の諸元を表1に示す。また、評価地点としては関東協の観測点の中で最も震源に近い神戸大学観測点を採用した。

4.3 シミュレーション

シミュレーションに当たって、本震のMwは気象庁から示されている6.8を採用した。また、断層モデルは地表に現れた野島断層を南限とし、Sbの震源を北端とする長さL=24km、幅はGeller (1976) に従い、 $w=L/2=12\text{km}$ と定めた。この値は余震分布の幅ともほぼ対応している。先に震源断層は完全横ずれを仮定しているため、断層の傾斜角は 90° 、走向は余震域から $N40^\circ E$ と定めた。断層はSa、Sb、その他(S1を含む)の三つに分割し、SaとSbはそれぞれ長さ5kmを仮定して全体の50%のモーメントを半ずつ割り当てた。また、残り50%のモーメントは全体の断層からSa、Sbの領域を除いた南側長さ14kmの領域に割り当てた。また、Sa及びSbの破壊開始点の深さは走時の検討結果を参考に5kmとし、その深さを断層上端であると仮定した。図6はこのモデルの模式図と要素に用いた余震の位置を示している。また、グリーン関数として用いた余震のMwは、MJMAに等しいと仮定した。また立ち上がり時間はKobayashi & Midorikawa (1982) の経験式から1.6秒とした。なお、破壊形式はSaとSbの領域が各々の破壊開始点からの円弧状破壊、南側の断層は北からのユニラテラル破壊を想定した。これらの諸元を表2にまとめる。

以上のパラメータを用いて、本震の神戸大学における地震動を評価した。その評価結果の一例を示す。なお、要素地震は観測記録の信頼周期範囲を考慮して、0.5~10Hzのバンドパスフィルター処理した後使用している。評価結果の一例を示す。

図7には得られた合成波形と神戸大学観測点における本震の水平地震動記録を示している。本検討で着目した二つのフェーズがよく表現されていることがわかる。また、図8には各々の疑似速度応答スペクトルを示している。合成結果は観測記録とよく対応していると言える。

更に、二つの強破壊領域SaとSbを設定した効果を検証するために、全体の断層面にモーメントを均等に分配し、破壊の不均質も ω^2 モデルに対応する確率量SD=1.0として断層面全体に与えるモデルを仮定し、震央からのバイラテラル破壊で合成した。図9はその合成結果であるが、Sa、Sbなどの特徴的なフェーズが見られず、最大加速度も本震よりかなり大きい。この結果からは、本震の地震動において、二つの強破壊領域が重要な効果をもたらしていたことがわかる。

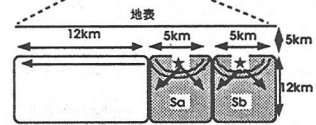
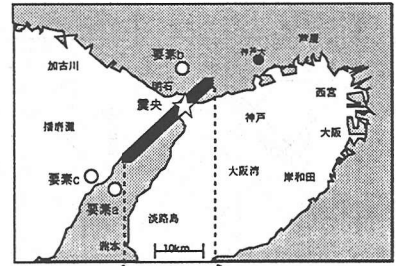


図6 断層モデルと要素の位置

表1 要素地震の諸元

	2月18日(a)	2月2日(b)	1月20日(c)
	淡路島	兵庫県南東部	播磨灘
Lon.	34.4N	34.7N	34.5N
Lat.	134.8E	135.0E	134.8E
Dep.	13km	8km	15km
M	4.9	4.2	4.4

表2 断層モデルの諸元

	全体	うちSa	うちSb	残部
長さ	24km	5km	5km	14km
幅	12km	12km	12km	12km
走向	N40E	N40E	N40E	N40E
傾斜	90°	90°	90°	90°
Mw	6.8	6.4	6.4	6.6
モーメント比	1	0.25	0.25	0.5
τ	1.6s	1.6s	1.6s	1.6s
要素地震	—	(a)	(b)	(c)
合成倍率	—	4x9x4	10x19x11	11x16x11

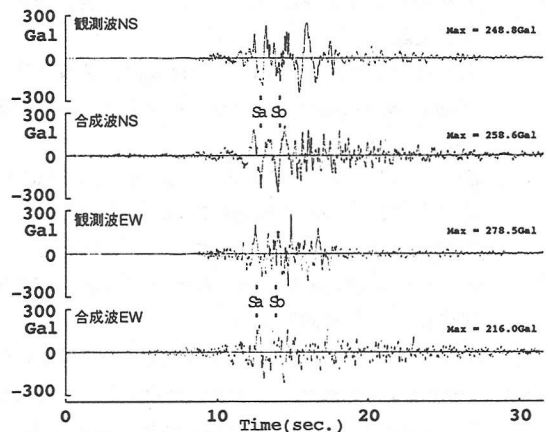


図7 観測波と合成波の比較

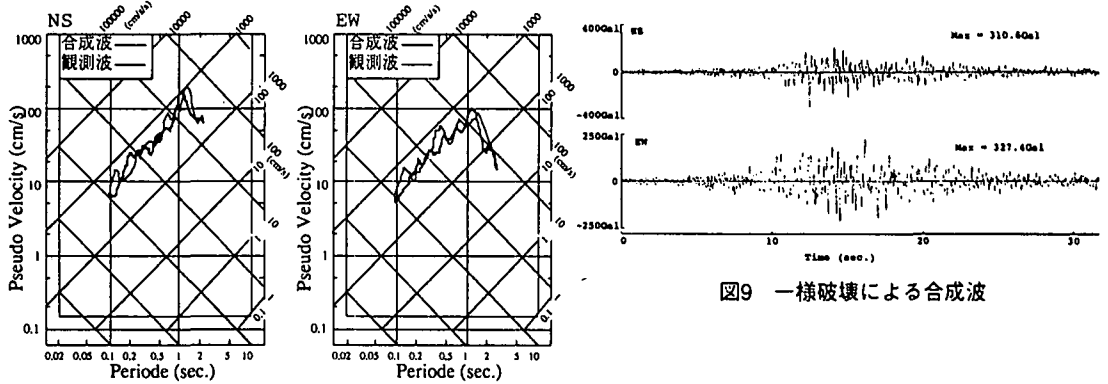


図8 合成波と観測波の応答スペクトル

図9 一様破壊による合成波

5. 議論及び結論

以上の結果は、初期破壊によるS波(S1)到達直後の二つの破壊的なフェーズSaとSbをよく表している。また、この破壊的な地震動をもたらした断層モデルは例えば菊地の第一の断層と整合しており、メカニズムもほぼ完全な横ずれである従って、先に粒子軌跡の検討の際に仮定した前提条件は、上述のメカニズム解及び震源深さが比較的浅いという結果から考え、ほぼ妥当なものであったことがわかる。また、走時データやシミュレーション結果も、粒子軌跡から求められた強破壊領域の位置を支持している。

また、破壊的な地震動をもたらした断層運動が、須磨区の沖合いから神戸側に10kmほどであるとした本検討の結果は、中村ほか(1995)による須磨沖から13km神戸側に破壊して止まったという指摘とも整合する。

なお、いくつかの逆解析による結果は淡路島において大きな破壊があり、神戸市での破壊的な地震動は例えば菊地のモデルの第二、第三の断層によるものであるとしているが、これらの結果は本震の大振幅が初期破壊直後に発生していることとは必ずしも整合しているとは言えない。本検討の結果からは、主要動の発生が時間的にも(破壊開始から4秒以内)、位置的にも(野島断層から神戸市須磨区まで)菊地のモデルの第一の断層運動の範囲内であり、第二断層以降の地震動への寄与は第一の断層に比べるとかなり小さいと考えられる。

謝辞

関震協の余震記録に関しては、大阪土質試験所の香川敬生氏のご協力をいただいた。記して感謝する。

参考文献

浜田信生：近地地震走時表の再検討、気象研究所研究報告 第35巻、109-167pp、1984

Irikura：Semi-empirical estimation of Strong Ground Motions During Larger Earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 33, 1983

Kanamori, H.：Mode of strain release associated with major earthquakes in Japan, Ann. Rev. Earth Planet Sci. 1, 213

菊地正幸：遠地の地震記録による震源メカニズム、兵庫県南部地震調査報告会記録、17-20pp、第四紀学会、1995

Kobayashi, H. & Midorikawa, S.：A Semi-Empirical Method for Estimating Response Spectra of Near-Field Ground Motions with Regard to Fault Rupture, Proc. 7th. ECEE 161-168pp

中村豊ほか：JR地震情報

中村豊：震災予防協会 ESG 研究発表会での講演から

Takemura and Ikeura：A semi-empirical method using hybrid of stochastic and deterministic fault model：Simulation of strong ground motions during large earthquakes, JPE, Vol.36, 1988

その他はいずれも95年春季地球惑星科学関連学会ポスターセッション及び講演