

# 直下地震による強震動のモデルの検討

東京大学 東原紘道\*

兵庫県南部地震の強震動を震源との関係で考察する。直下地震においては、震源と強震動の関係が強くなるのが予想されるので、強震動のモデルには、地震学の成果を取り込む必要がある。これによれば、兵庫県南部地震の神戸における強震動のうち、構造物に大きな被害を与えた主要部は、初期の3秒間に現れている。これは、気象庁震源の近傍であって、明石海峡の海底下15 km程度に位置する、代表長5 km程度の比較的限定された破壊域から、地震の初期に放出されたものである。しかし、明石海峡の地震テクトニクスについての観測研究は不十分であり、今後、強化する必要がある。

## 1. 研究の目的

兵庫県南部地震では、土木構造物および建築物の被害が、非常に大きかった。この原因は、構造物に適用された基準の古さに帰されることが多いようである。確かに最新の耐震基準等に従った構造物では、変形能力が大きく、崩壊に至り難い傾向がある。しかし、想定する地震動が不足していると、その弊害はいろいろなところに露呈するので、従来の耐震基準等の想定地震動の改訂の問題は、依然として残されている。

観測された地表面最大加速度の数値から見れば、従来の耐震基準等で想定された水準の2倍にも及ぶものであり、設計に考慮する地震荷重を高める必要は明らかである。しかし、それをどのようにするかについては、多面的な検討が必要であるので、これについては、別の場所で論じる。ここでは、専ら自然現象としての強震動について考えることとし、特に強震動の源泉、すなわち、地震動の主要部と震源との関係について考察する。

## 2. 論点の整理

### (1) 震源の解析

兵庫県南部地震は、大都市直下地震であり、防災実務の観点から見て、非常に大きな問題を提起している。しかし、この地震は、学術的にも興味深い意

義を有している。それは、直下地震では、地震学の関心事である震源と、地震工学の対象である被災地が、大きく重なり合うからである。

米国西海岸と異なり、我が国では、少なくとも最近の50年間にわたって、大都市を襲う近地の大地震は経験されなかった。このため、どうしても直下地震の理解が不十分であった。この間にも、遠地地震の震源の解析理論は大きな進展を遂げたが、それでもその成果は、耐震工学の枠組みを変えるものではなかった。ところが、大都市の近傍で発生した地震では、当然、その地震学的特性が、大きな影響を及ぼすものとなる。したがって、地震学と地震工学の境界領域に、新鮮な問題の切り口が現れると予想された。

しかし、この1年間の推移をみると、両者の関心領域には、なおギャップが残っており、震源過程に関する理論と強震動の関係についての研究は、十分な進展を見せていないように思われる。かつて、震源の断層モデルが登場した時期には、地震工学の入力地震動モデルは、確固とした物理的基礎を見いだしつつあるかのような観を呈していた。今回は、震源運動-強震生成の過程の実物が目の前で繰り広げられ、前例のないほどに大量のデータが得られたのであり、強震生成を、これまでのように、地盤での増幅だけでなく、震源の破壊の強さとの関係で理解する貴重な手がかりが与えられたことになる。

しかし、地震工学でこれまでになされた解析では、従来の遠地地震用の解析ツールが使用されており、直下地震の特性に根ざした手法は見えない。他方、

キーワード：兵庫県南部地震，強震動，震源過程

\* 東京大学地震研究所，03-3812-2111

地震学的研究である震源運動の推定（インバージョン）では、表層地盤の不均一性の壁＝空間分解能の限界があり、工学が必要とする情報を提供するに至っていない。

この、地震学と地震工学の間の空隙は、対象とする周波数帯域の違いに起因するところが大きい。後述する震源過程の研究に見られるように、震源過程を決定論的に追える限界が、概ね0.5 Hzよりゆっくりした波であるのに対し、地震工学では1 Hz以上の波が重要である。したがって、これまでも指摘されてきたように、強震動を震源との関係で定量的に捉えようとしても、1 Hz前後の帯域は、なお日の目を見ない谷間となっている。現実には、兵庫県南部地震で構造物に大きな被害を与えた主要動は、この谷間に入っており、この主要動の成因を知るためには、解析の精度を高める必要がある。

特に個々のイベントと強震動との関係を議論するためには、分解能の問題を解決しなければならない。インバージョンに用いる地震波速度データの精度、あるいはその基礎となる、地下の物性の構造のデータの精度の悪さを考慮すれば、地震学者が5 kmの分解能限界（地震波速度 $\approx 2.5$  km/secとして）に固執することはもっともである。なお、本年度には、国立大学の地震予知研究の一環として、兵庫県南部地震の地域で、大規模な人工地震調査が実施されており、従来のものよりはるかに高精度の速度構造が得られることになっている。

## （2）活断層研究の高まり

兵庫県南部地震を契機に、地震対策のための活断層調査が重視されるようになった。もともと、地質構造なかならず活断層、地盤の測地学的ふるまい、および地震活動は、その地域の地震活動を監視する基本的データセットであり、これらを複合的に整備することによって、従来より精度の高い地震活動の予測が期待できる。

## （3）入力地震波の作成

兵庫県南部地震以降の耐震設計では、従来よりも大きな地震荷重（これは強震動についての我々の知識の拡大の結果でもあるし、社会の経済的な負担能力の増大の結果でもある）のもとで、構造物を、高

度の塑性状態＝損傷状態の下で運用しなければならなくなる。これは、設計精度への要求が厳しくなると、従前の＜比較的弱い地震に対して弾性限界内に収める＞という考え方が、＜強い地震に対しても、相応の損傷でもちこたえる＞という考え方に変わってくるからである。もちろんこの方がはるかに真実の現象に近いが、それは膨大な設計コストを伴う。

現在の構造力学は、これに応えるように、解析技術（複雑な時刻歴シミュレーション技法と精密な実験による検証）を発展させてきている。このような新しい解析技術は、当然、従来よりも精密な地震動データを必要としている。特に、この過程は強い非線形過程であるから、その計算のためには、地震動の時刻歴データが必要である。しかも単純化した入力地震動モデルと高度な解析手法の組み合わせでは、モデルの悪い精度を忠実に織り込む結果、かえって使いものにならない結果を出すようになる。

この時刻歴データを、純粹に演繹的に導出するのはほぼ不可能である。そこで、実記録を基礎にした直下地震の地震波形のカタログを、体系的に蓄積することが必要である。この要求を満足できる地震動モデルを供給することが、地震工学の急務となっている。この要求は、当然、直下地震について強い。そのためには、活断層－破壊－波動放射といった震源運動に立ち入る必要がある。こうして始めて、耐震工学に、地域毎の活断層に即した、地質学的・測地学的調査の成果を反映させることができる。そのような研究にとって、兵庫県南部地震の事例は、重要なデータを提供してくれるものである。

## （4）破壊開始点の問題

後述するように、兵庫県南部地震の特徴は、強震動の主要部が、いきなり地震の初期に放出されたことである。これは、破壊開始点がとりも直さず強震動生成域であることを示している。したがって、強震動の主要部は、地震動解析の最大の障害であるところの波の干渉から、免れているとともに、その生成域が局限され、かつ特定されていることになる。このように、兵庫県南部地震は、直下地震の事例研究に適していることがわかる。

なお、傍論であるが、破壊の開始点近傍域の研究は、地震予知にとっても重要である。兵庫県南部地

震においても地震予知は全く機能しなかった反面、昼間の地震の場合の新幹線の安全など、地震予知の必要性があらためて強く認識された。地震予知にとっては、破壊の開始点（兵庫県南部地震では明石海峡）が大切な筈であるが、そのような研究計画は提起されていない。

我国の地震予知の主力は、地殻変動の観測に置かれている。近年ではボアホール型のひずみ計が導入されているが、地殻変動による地震予知の基本は、なお地表面での観測のようである。1944年東南海地震では、地表面の変位に顕著な先行現象が見られた。しかし、これは地下十数km以深での、再現性の明確でない震源の動きの影響を、それらの積分量である、地表面の変形によって認識しようとするものであり、観測点を網状に密に配置しても、逆解析を行うには感度が悪い。現行の地震予知の推進者が期待するような、応答のツボが存在するとしても、そのツボが事前に特定できていない限り、破壊の先行現象を捉えることは困難であると考えられる。

### (5) その他の論点

以上に述べた問題を考えるために、以下では、地盤による増幅については議論しない。地盤の増幅には、表層の軟弱地盤による増幅と不整形地盤による増幅があり、特に後者については既に多くの論考がある。また、表層地盤の非線形運動は、強震域の至るところで見られており、これは耐震工学上重要であるので、別の機会に議論する。

被害地域の北東部である、西宮市と宝塚市を結ぶ線以東、および被害地域より西部の強震動も重要であるが、やはり言及しない。

野島断層では、断層が表面に現れ、震源解析の結果では、長周期の地震動に反映する、地震モーメントが大きかった。このため、地震後の地球科学者の観測研究は、この断層に集中している。しかし、強震動への寄与は小さかったと考えられるので、ここでは考察しない。

### 3. 地殻変動

地殻変動の記録には、地表面の水平および鉛直の変位、および地中ひずみがある。図1に地表面の変

位を示す。矢印は水平変位、数字は上下変位である。

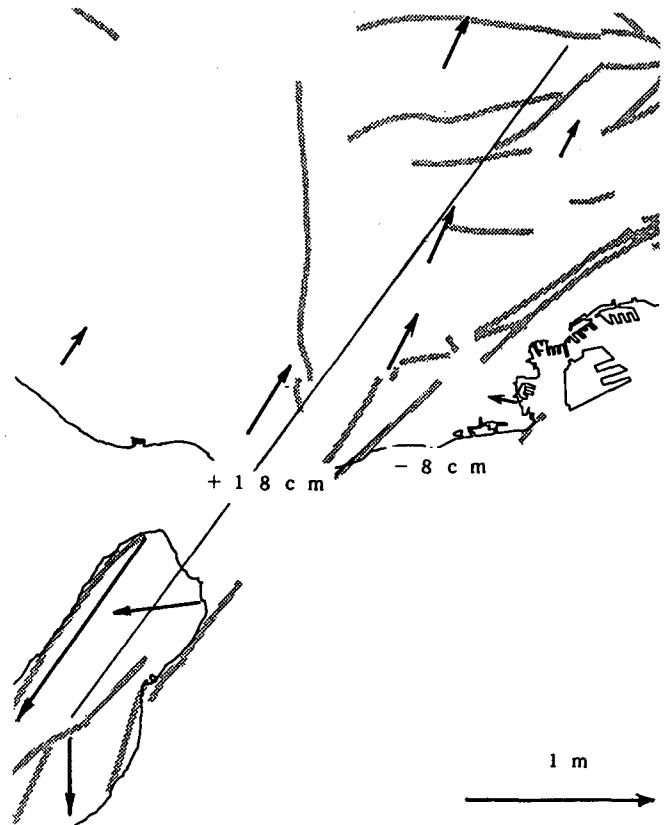


図1 地震前後での地表面の変位

巨視的には、野島断層および須磨断層-六甲断層系の右ずれ構造を示している。しかし、野島断層と須磨断層の線には、明瞭なオフセットがある。このため、図中の直線に沿って、明石海峡周辺で大きな伸びが生じている。また、本州四国連絡橋の明石海峡大橋では、2本の橋脚の間に、1.4 mに及ぶ大きな相対変位が生じていて、これは、明石海峡の南北伸長と調和的である。

このような断層線のオフセットはごく普通のこととされ、明石海峡のこのような伸長については、一部の地質学者や地震学者によって、説明が試みられている。しかしなお、すべてのデータを整合的に説き尽くすものはない。

須磨断層では26 cmの大きな上下変化が出ている。後述の吉田らは、これを、須磨断層の東側からの潜り込みと考えている。これは自然な考え方である。ただ、地球資源衛星（「ふよう1号」）の合成開口レーダーの解析結果では、垂水の隆起のパターンは明瞭な南側隆起である。したがって、真実の現象はもっと複雑な可能性があり、結論を留保する必要がある。

#### 4. 起震断層に関する議論

##### (1) 本州側断層の位置

本州において起震断層が存在することに争いはないが、その位置については議論が分かれている。まず、神戸市直下に有力な伏在断層があるとする意見が、主に地質学者から出されている。事実、通産省・地質調査所の音波探査によれば、神戸市東灘区の地下には断層が検出されている。しかし、工学の関心からすれば、この断層が地震時に動き、しかも大きな地震動を励起する場合に限り重要である。この可能性を示唆する若干の報告はあるが、明確に肯定する資料はない。

##### (2) 伏在断層

兵庫県南部地震によって、伏在断層による地震動の重要性が浮き彫りになった。梅田は、震源直上の一部の地域に、非常に大きい加速度が生じることを主張している<sup>1)</sup>。兵庫県南部地震においても、発震点である明石海峡において、大加速度が生じたことを推定している<sup>2)</sup>。これが事実であれば、工学上大きな問題である。しかし、明石海峡大橋の主塔では、そのような現象は記録されておらず<sup>3)</sup>、それから推定される地動もそのように大きなものではない<sup>4)</sup>。

#### 5. 強震動の性質

##### (1) 神戸海洋気象台の記録

震源近傍の、地上での水平動の観測記録は、比較的良好な地盤上に位置する海洋気象台を除けば、すべて非線形なふるまいをしており、考察に適しない。

図2は、海洋気象台記録のうち、主要動の初期の変位(m)を、E-W、S-N、上下の順に表示したものである。(時刻のゼロ点は、05:46:27である。)ここは地表面にあるから、地震動は複雑な攪乱を受けるが、主要動はほぼSH波になるため、基本的な構造を読みとることができる。

後述の震源解析で用いられたのと同じ弾性波速度データを用いて、破壊開始点(つまり気象庁の震源)からの到達時刻を見ると、縦波は白三角、横波は黒三角となる。弾性波速度の精度はよくはないが、これにより、主要動は破壊開始点の近傍から来ていると推測される。

大きな加速度運動は、図の時間軸の32-38にわたって継続しているのであるが、大きな変位は、32-34を含む、主要動の初めの約3秒間で終了している。この相では、3成分のピーク時刻がほぼ一致している。ここで見られる、南東→北西の運動は、北東-南西走向で鉛直断面をもつ右横ずれ断層運動に対応し、全体として単純なランプ状のモーメント関数で説明される。

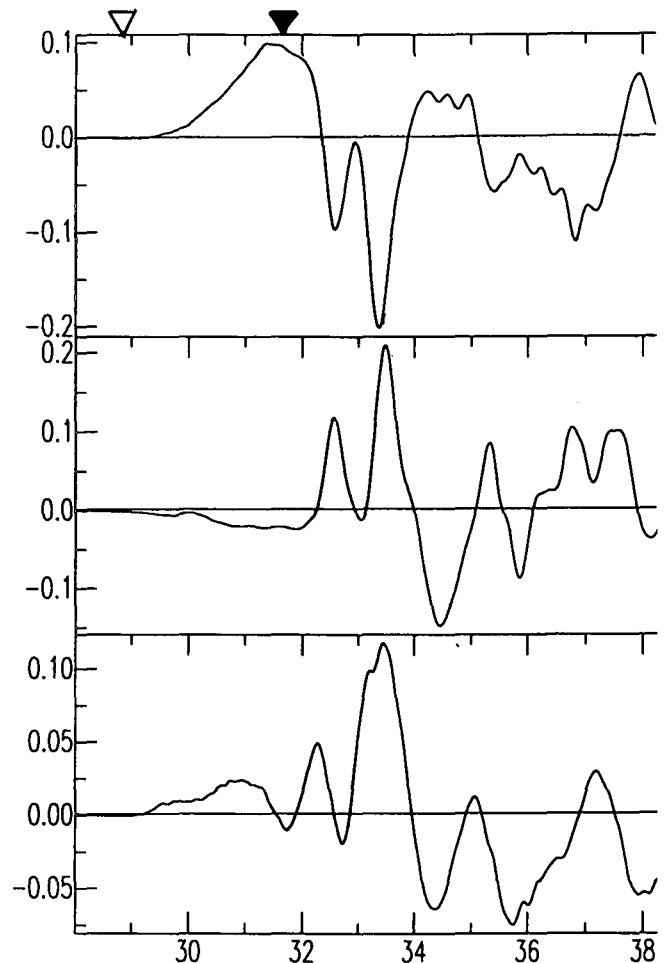


図2 海洋気象台での変位

##### (2) 地震波の近地項

図のE-W成分では、縦波到達時刻から横波到着時刻まで、ゆっくりしているが大きな変位が生じている。これは、弾性体中のくいちがいがから生じる波動の中の、近地項であると解釈される。

集中複双力源による波動励起公式によれば、縦波と横波の到達時刻の間には、近地項による応答として緩やかな振幅増大が生じる。この項は震源距離の逆2乗で減衰するもので、遠地地震の解析では、これが無視できる。しかし、震源点と海洋気象台では

距離は15 km程度であり、近地項の寄与は、従来の地震解析の主要項であった遠地項と同程度になる。

この近地項は、震源モーメントの積分であるため、ゆっくりした立ち上がりを示している。このような近地項による変位は、例えば1994年ノースリッジ地震における、Sylmarの記録などにも明瞭に見られる。

## 6. 震源運動に関する地震学の結果

兵庫県南部地震の震源運動については、既に多くの解析がなされている。

### (1) 遠地実体波による解析

菊地は、外国の観測点での遠地実体波の記録を用いて、3個のイベントを推定している<sup>5)</sup>。これによれば、主破壊の継続時間は非常に短くて、11秒である。第1のイベントは、明石海峡と野島断層域に比定され、地震モーメントの圧倒的部分を占めている。第2および第3については、本州に比定されているが、その位置の精度には問題がある。

### (2) 強震記録による解析

比較的多数の強震動記録が得られているため、断層面を仮定すれば、破壊過程を詳細に追跡することができる。井出・武尾は、気象庁の87型もしくは92型地震計による、震源距離150 km以内の強震記録を用い、予備的検討の結果を参考にして、淡路島から六甲山を経て宝塚に至る単一の平面状断層を設定し、その面上での地震モーメントの放出過程の時空間分布を推定している<sup>6)</sup>。

この解析によると、明石海峡の地下15 km地点で破壊が開始した。これは気象庁の震源点と一致する。最初の3秒間は、震源点近傍で強い破壊が持続する。その後、破壊は南西方向・上向きに進む。これは野島断層に比定されている。以上の過程は、菊地の遠地実体波の解析の第1イベントとよく対応していると考えられる。

図3に、この解析結果の初期2-3秒の破壊領域を示す。図は、上で設定した断層面に沿ったモーメント放出量の分布を示している。各図面の上端が地表面であり、格子の1辺は5 kmである。上端左側

の線は野島断層の位置を、三角印は、神戸気象台の位置を示す。

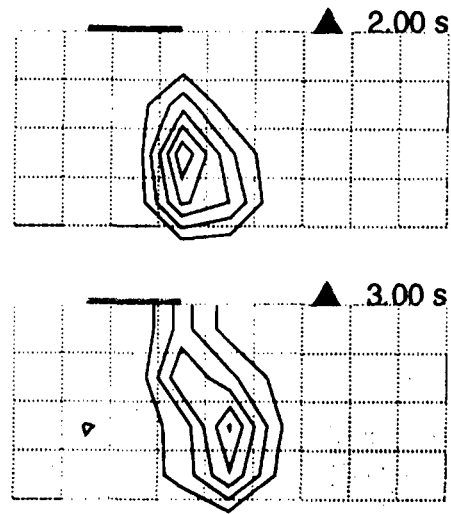


図3 初期2-3秒の破壊領域

図4は、比較的初期の余震分布を示したものであるが、本州側での分布がほぼ線上に集束しているのに対し、明石海峡から淡路島にかけては、余震位置は分散している。

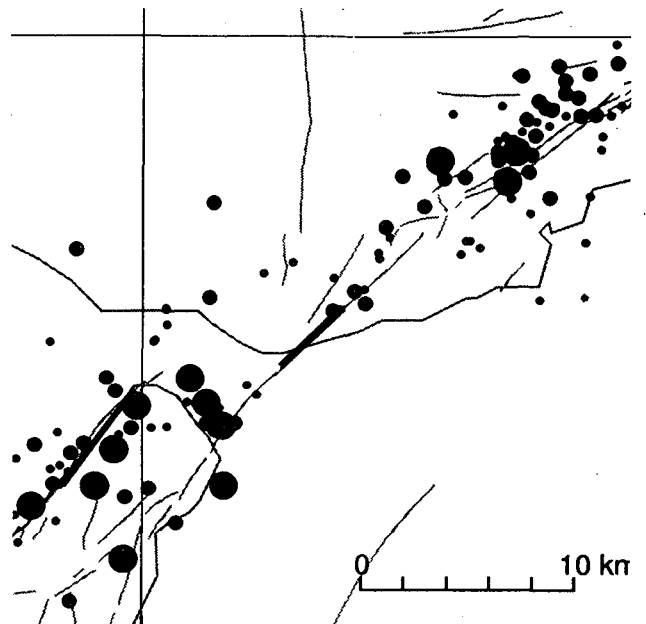


図4 余震分布

図中の線は既知の活断層を示し、特に太線は、活動が確認されている野島断層と須磨断層を示している。前述のように、両者は食い違っているため、この領域では、井出らの単一断層面の近似の適用性が吟味されなければならないことになる。

吉田らは、地殻変動、強震動記録、遠地実体波を同時に考慮する方法で震源過程を推定した<sup>7)</sup>。彼らは複数の平面断層を仮定した逆解析を多数のケースについて行い、それぞれのケースの解の挙動を観察し、最適な解として、淡路島では野島断層に対応し、明石海峡以北では、須磨断層を経て図4の余震線に対応する、2枚の断層面を与えている。

Wald も、遠地実体波と強震動を用い、吉田らとほぼ同じ2枚の断層面モデルについて、同様の解析をしている<sup>8)</sup>。

この二つの解析のいずれにおいても、発震時から南西方向・野島断層に破壊が進展するまでの、震源過程の前半の結果は、井出らの単一断層面モデルとたいへんよく一致している。遠地実体波を用いた菊地の解析ともよく一致しており、この部分の信頼性は高いと認められる。

しかし、主破壊の後半部である、本州側の破壊の位置の特定は不十分である。上述のいずれの解析によっても、神戸市北方に破壊域が推定されるが、その位置はばらつきが多く、信頼性はよくない。これは、震源過程の後半であるため、新規の破壊の寄与に、前半の影響が重なるためであると考えられる。また、上下動の再現性は概して不良である。

## 7. おわりに

兵庫県南部地震に関する地震学の研究を手がかりに、工学にとって重要な震源は、11秒間にわたる野島断層・六甲断層系の40kmではなくて、3秒間の明石海峡の5kmであることを述べた。今後、このような強い地震発生の条件の考察と、M8地震の多重震源モデルへの応用を試みる予定である。

## 【参考文献】

- 1) 梅田康弘：大破壊域の形成過程、月刊地球、Vol. 10, No. 12, pp. 753-758, 1988
- 2) 梅田康弘：1995年兵庫県南部地震の破壊成長過程－地震のブライトスポットと跳び石－、地質ニュース、1995
- 3) 本州四国連絡橋公団：兵庫県南部地震の明石海峡大橋への影響調査報告書、1995
- 4) 笠原覚、東原紘道、Kusnowidjaja, M.：構造物の強震データを用いた震源直上の地動のインバージョン解析、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集（投稿中）、1996
- 5) 菊地正幸：1月17日兵庫県南部地震のメカニズム（改訂版）横浜市立大学地震学レポートNo. 38, 1995
- 6) Ide, S., M. Takeo and Y. Yoshida : Source Process of the 1995 Kobe Earthquake : Determination of Spatio-Temporal Slip Distribution by Bayesian Modeling, Bulletin Seismological Society of America (in press)
- 7) Yoshida, S. et al. : Joint inversion of near- and far-field waveforms and geodetic data for the rupture process of the 1995 Kobe earthquake, Journal of Physics of the Earth (in press)
- 8) Wald, D. J. : A Preliminary Dislocation Model for the 1995 Kobe (Hyogo-ken Nanbu), Japan, Earthquake Determined from strong Motion and Teleseismic Waveforms, Seismological Research Letters, Vol. 66, No. 4, pp. 22-28, 1995

Study on the models of strong motion  
generated by large near-field earthquakes

Hiroichi Higashihara

Strong motion of Hyogo-ken Nanbu Earthquake was related to the source process. The principal part of the strong motion, which appeared in the first 3 sec, had been emitted from a confined rupture zone beneath the Straits of Akashi.