

(52) 強震記録から推測される兵庫県南部地震の断層運動

(財) 鉄道総合技術研究所 中村 豊

1. はじめに

地震被害を分析するには、①基盤における地震動の性質、②表層地盤による地震動の増幅作用、および③増幅された地震動が対象構造物に与える影響、に関する知識が不可欠である。基盤地震動の性質は地震断層の挙動と密接に結びついている。特に直下地震では断層運動を把握することが重要となる。

ここでは、JRの警報地震計による強震記録<sup>5)</sup>と気象庁87型地震計による神戸海洋気象台の強震記録に基づいて、兵庫県南部地震の断層運動を考察する。

2. 断層位置の特定

今回の地震に関係した断層が淡路島で地表面を切り裂いている。この位置は野島断層<sup>1)</sup>に一致し、約9kmにわたって連続的に確認されている。神戸側では断層は表面まで達していないが、海岸線に沿った水準測量によれば鉢伏山の麓付近を境に急変しており、断層の存在を示唆している。ここに相当する断層は須磨断層である。図1に震央付近の活断層分布図を示す。これには、本論文で言及する地震観測点の位置も示した。

気象庁は、震央(破壊開始点)の位置を淡路島北部(野島断層の北端)と発表し、後にやや東寄りに変更している。当初の震央位置と訂正された震央位置を明石海峡付近の海底地質図<sup>2), 3)</sup>(図2)で説明すると、次のようになる。すなわち、図中のF1断層と野島断層の接点付近が当初の震央位置、F5断層とF4断層の接点付近が訂正した震央位置に相当する。F4断層はF1断層につながり、さらに須磨断層に接続する。

工事中の明石海峡大橋の淡路側主塔(2P)は、F1、F4およびF5の断層で囲まれる地殻ブロックの上にある。2Pと本州側主塔(1P)の間にF1断層があり、淡路側橋台(2A)との間にはF4断層が存在する。本四公団による地震後のGPSによる相対変位測定の結果、本州側橋台(1A)を基準にして、1Pは変位せず、2Pはほぼ真西に1.3m変位、2Aは真西から約20°南の方向に1.4m変位した。このことから、海峡部ではF1断層が主体的に動き、F2、F4およびF5の断層は副次的に動いたものと想像される。

3. 強震記録波形に基づく断層の長さ推定

図1によると、西明石駅は動いたであろう断層群を横から見る位置にあり、宝塚駅は断層群の延長線上にある。図3は宝塚駅と西明石駅の加速度記録(南北成分)を示したものである。これによると、断層破壊の

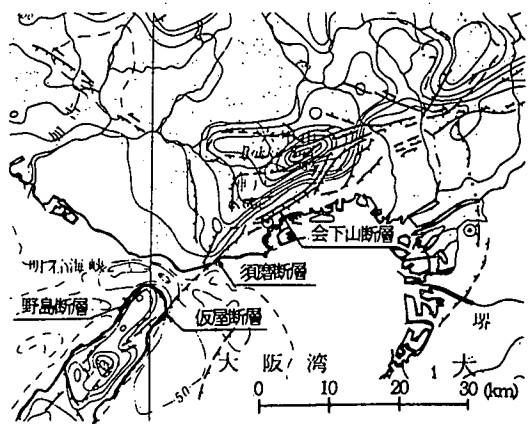


図1 震央付近の活断層分布図

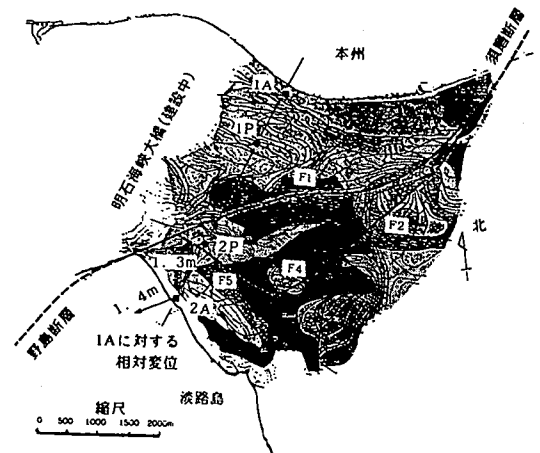


図2 明石海峡付近の地質図

伝播方向にある宝塚駅では、最大加速度は大きいものの、震動継続時間は西明石駅に比べて短くなっている。伝播方向にある宝塚駅の記録を細かく観察すると、緩やかに変化している加速度波形の途中の部分にかなり振動数の高い波形が重畳しているのが認められる。西明石駅の加速度波形の振動特性は比較的均一で、宝塚駅の低い振動数と高い振動数の中間的な特性を示している。このことから、宝塚駅の記録の低い振動数部分の波形は宝塚駅より遠ざかる方向の断層破壊を反映したものであり、高い振動数部分は宝塚駅に向かう断層破壊運動を反映したものと推測される。つまり、はじめ宝塚駅から遠ざかる方向に断層破壊が進み、続いて宝塚駅に向かう断層破壊が始まったものと考えられる。前者に対応する震動の継続時間は約6秒、後者は前者に約1.5秒遅れて始まり、後者に対応する震動の継続時間は約2秒であることが波形から読み取れる。

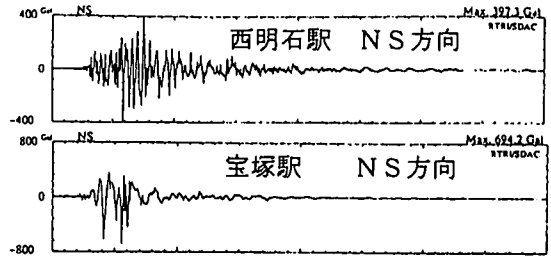


図3 西明石駅と宝塚駅の加速度波形

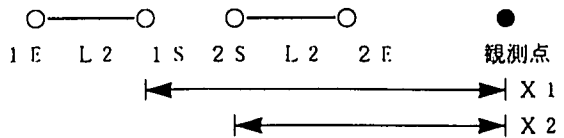


図4 断層と地震観測点の関係

宝塚駅の地震観測点は断層線の延長上にあるとして、断層と観測点の位置関係を図4のように表す。

L1およびL2はそれぞれ淡路側および神戸側の断層の長さである。1Sと1Eおよび2Sと2Eは、両断層の始点と終点をあらわす。X1とX2は宝塚駅から両断層の始点までの距離である。このとき宝塚駅で観測したL1断層およびL2断層の破壊時間T1およびT2はそれぞれ次のようになる。

$$T1 = L1 (1/Vr + 1/VS), \quad T2 = L2 (1/Vr - 1/VS)$$

$$\text{したがって、} L1 = T1 / (1/Vr + 1/VS), \quad L2 = T2 / (1/Vr - 1/VS)$$

VS、VrはそれぞれS波伝播速度、断層破壊速度であるが、ここでは、4.0km/s、2.5km/sと仮定する。

両断層の破壊開始の時間差をtとすると、1Sおよび2Sからの波動の到達時間差T12は次のようになる。

$$T12 = (X2 - X1) / VS + t, \quad \text{ゆえに} \quad t = T12 + (X1 - X2) / VS$$

記録波形から、T1 = 6.0秒、T2 = 2.0秒、T12 = 1.5秒、が得られ、両断層の長さは、L1 = 9km、L2 = 13kmと算定される。

L1断層は野島断層に対応し、その推定長さは確認された地表断層の延長に相当している。したがって、推定された断層長さはやや短めであるがほぼ妥当な値と考えられる。L2断層は須磨断層とそれに続く会下山断層に対応しているものと考えられる。また、明石海峡の断層方向の距離や今回の地震で小さな津波が発生している事実を考慮し、両断層の始点は海峡の中にあるものとして、X1 - X2 = 4kmを仮定すると、ふたつの断層の発生時間差は、t = 2.5秒と見積もられる。L1、L2については次節で再検討する。

#### 4. 震動変位軌跡にみられる断層運動

加速度波形を積分して、周期5秒、減衰定数0.552の気象庁1倍強震計相当の変位計による観測波形に変換すると<sup>4)</sup>、図5が得られる。これには、西明石駅、鷹取駅、宝塚駅および神戸海洋気象台の南北方向を例示したが、それぞれの水平2方向で変位軌跡を描くと図6のようになる。なお、宝塚駅の記録の東西成分は極性を検討し文献<sup>5)</sup>で示したを反転した。観測点の位置は図7に示す。断層付近の変位軌跡は断層直交方向に卓越したものになると考えられ、鷹取駅と神戸海洋気象台の軌跡は、近傍にほぼ西南西-東北東の走行の断層が存在することを示唆している。両者の軌跡を細かく観察すると、異なる傾きを持つふたつの長円軌跡(鷹取駅ではAおよびB、神戸海洋気象台ではA'およびB')が認められる。B、B'を細線、太線で示したが、それぞれ野島断層、須磨・会下山断層に対応するものと考えられる。

宝塚駅は断層群の延長上にあり、変位軌跡は断層群に直交する方向が卓越している。しかし、須磨・会下山断層に対応していると考えられる太線で示した軌跡は、はじめの位置から東方に移動してから描かれ、断層運動の終了とともに元の位置に戻っている。こうした軌跡の変化時点から各断層の破壊時間などを読みとると、 $T_1 = 7.0$  秒、 $T_2 = 2.5$  秒、および  $T_{12} = 1.5$  秒となった。前節での読みとり結果と多少異なっている。この程度の誤差は含まれるものと思われるが、加速度波形上の顕著な位相のみから読みとった前節の値より、軌跡の変化も併せて読みとった本節の値の方が信頼性は高いと推測される。

神戸海洋気象台は会下山断層東端付近にあり、ここからさらに別の断層に移っている可能性もあるが、とりあえず宝塚駅と同様な考え方で各断層の破壊時間などを読みとると、宝塚駅の結果と同じ値が得られた。これは、宝塚駅方向に向かう断層が神戸海洋気象台付近で止まっていることを示唆している。なお、図5に示した変位波形をみると、宝塚駅と神戸海洋気象台で互によく類似している。

宝塚駅と神戸海洋気象台の読みとり結果から、 $L_1 = 11\text{km}$ 、 $L_2 = 17\text{km}$ 、と算定される。両断層の発生時間差は、 $X_1 - X_2 = 4\text{km}$  を仮定すると、2.5秒となる。野島断層の地表面で確認された延長が約9kmであること、須磨海峡沖から神戸海洋気象台まで15km程度であること、などを考慮すると、ここで推定された断層長は概ね妥当と考えられる。

西明石駅の変位軌跡は複雑な形状を示している。これは野島断層や須磨・会下山断層に対応する変位運動と、海峡を渡る断層による変位運動が複合しているためと考えられる。

図7は各地震観測点の変位軌跡を同じスケールで描いたものである。これによると、断層の東側で圧倒的に大きな変位軌跡となっている。また、東側の観測点は断層に直交する方向の震動変位が大きく、これらの測点が断層線の延長線上からそれほど大きく離れていないことを示唆している。鷹取駅の変位軌跡をみると、須磨・会下山断層に対応する軌跡は野島断層に対応するものよりかなり大きくなっている。これに対して、神戸海洋気象台では両断層に対応する軌跡がほぼ同程度の大きさとなっている。このことも神戸海洋気象台が断層の終端部に位置していることを示唆している。

鷹取駅の変位軌跡には、ほぼ直線的な往復運動に続いて断層に沿った変位運動をするなど奇妙な動きをする部分がある。ここは須磨断層に対応する運動に続くところで、断層破壊が通過しているところに相当して

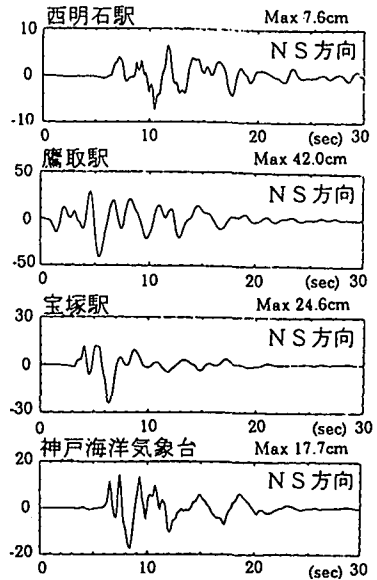


図5 変位波形 (加速度波形を積分した)

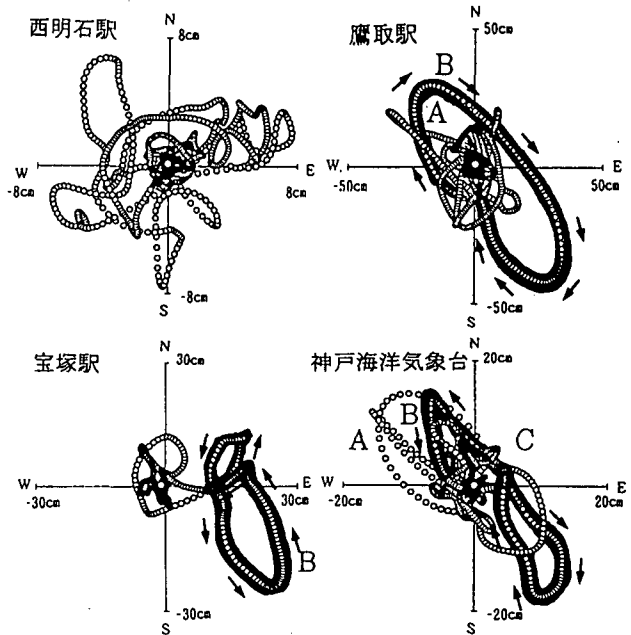


図6 水平2方向の変位軌跡  $\Delta t = 1/50\text{sec}$

鷹取駅の変位軌跡には、ほぼ直線的な往復運動に続いて断層に沿った変位運動をするなど奇妙な動きをする部分がある。ここは須磨断層に対応する運動に続くところで、断層破壊が通過しているところに相当して

いる可能性がある。これ以後動きは次第に直線的になり、地盤が塑性化していることをうかがわせる。

神戸海洋気象台では、須磨断層の破壊が始まってから 1.5 秒後に軌跡の回転方向が逆転している。この地点を算出すると、断層開始点から約 10km となり、ほぼ会下山断層との接合点に位置する。会下山断層は須磨断層にほぼ平行しているがやや南にずれており、神戸海洋気象台は両者の延長線に挟まれる位置関係にある。このことは軌跡の回転方向の逆転現象と整合する。

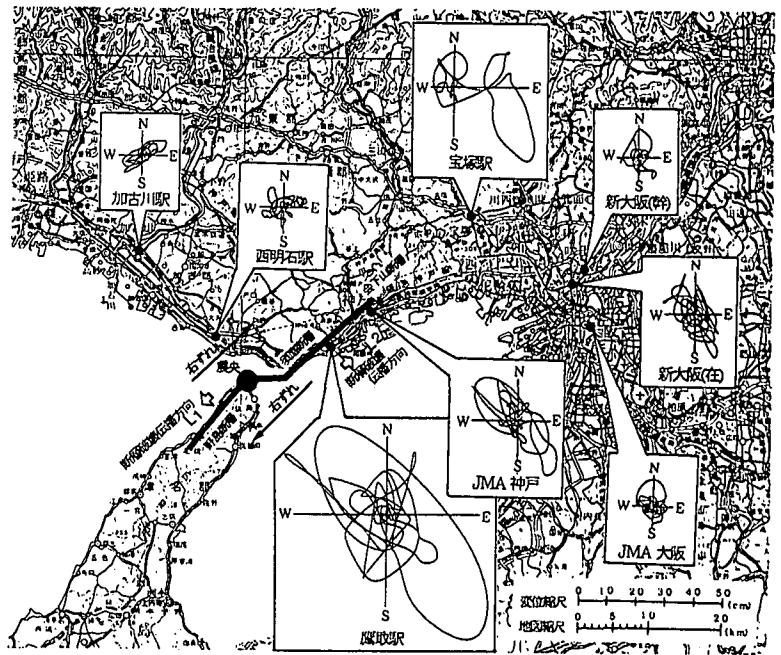


図7 各地点の変位軌跡

## 5. まとめ

以上の検討から、断層の運動は次のようであったと推定される。

江崎燈台付近の明石海峡海底で始まった断層破壊は、西南西とほぼ真西のふたつの方向に進み、ひとつは海峡をななめに横断しながら須磨断層に接続した。もうひとつは淡路島の北西海岸沿いにある野島断層を 11km ほど破壊した。最初の破壊から約 2.5 秒後に須磨沖の須磨断層に破壊が到達し、新たな大きい破壊が始まった。この破壊は東北東方向の神戸方向に 17km ほど進んで会下山断層の東端付近で止まった。この状況を図 7 に示している。推定された断層の位置や動きは、神戸市内の被害状況と矛盾しない。図 8 に示す京都大学防災研究所による余震分布は、ここで推定した断層位置で余震の発生が少ないことを示している。本震で大きく破壊されたところは余震は発生しにくいと考えられることから、ここで推定した断層の位置が妥当であることを示唆している。

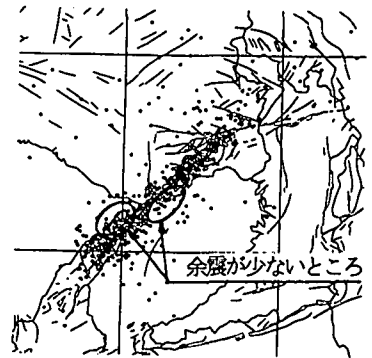


図8 余震分布図  
(京都大学防災研究所)

謝 辞：強震記録は J R 沿線の警報地震計によるものと気象庁の観測によるものを使用しました。地震計の保守管理を担当されている方々に謝意を表します。また (株) SDR の西永雅行氏には図面作成でお世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献：1) 活断層研究会：新編日本の活断層、東京大学出版会、1991.3、2) 伊崎 晃・金子徹一：明石瀬戸東部の音波探査とその解析、物理探査 13 巻 1 号、1960.3、3) 伊崎 晃・田中 武：明石瀬戸東部海底における先明石層群上面の等深線図、鉄道技術研究所報告 No.314、1962.6、4) 中村 豊：地震計の特性変換による地震動記録波形の微分・積分および特性補正、鉄道技術研究所報告 No.1315、1986.3、5) 中村 豊：1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析、J R 地震情報 No.23c、1995.2.15。