

兵庫県南部地震による地殻変動と断層運動の推定

橋本 学¹⁾

1. はじめに

1995年1月17日5時46分に発生した兵庫県南部地震(気象庁マグニチュード7.2)は、死者・行方不明者5,500人以上を数え、近代土木・建築構造物にも多大な被害を与えるなど、1923年関東大震災以来の被害をもたらした。あらためて都市直下に発生する内陸地震の恐ろしさを国内外に知らしめる結果となり、「活断層」が流行語とまでなった。今回の地震は、大局的には六甲山の山麓から淡路島にいたる六甲断層系の活動によるとの認識があるが、個々の研究者による独自の調査に基づいていろんな見解が出され、震源断層のイメージがはっきりしない。また、淡路島で地表に地震断層が出現したことから、一般に「活断層」が地震を起こすとの誤解を与えている感もある。我々地震科学に携わるものにとって、今回の地震の震源断層のイメージを提示し、これと地表に見られる活断層との関係を明らかにすることが、今後の内陸地震に対する防災対策への貢献として、今最も求められていることと考える。本小論では、国土地理院が実施した測地測量により明らかになった地殻変動を示し、これから推定される震源断層について議論する。

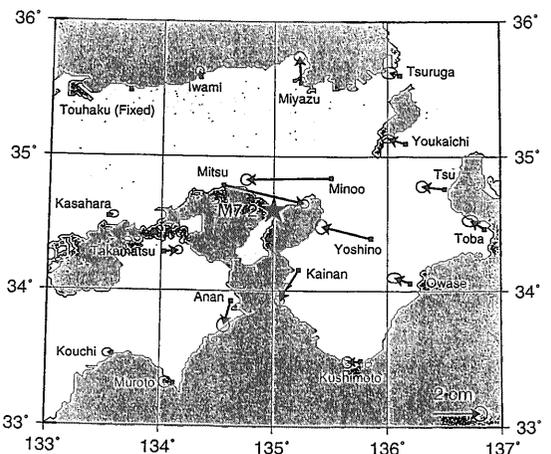
2. 測地測量により明らかになった地殻変動

菊池(1995)による世界の地震波形データの解析結果から、この地震は大きく3つの破壊が生じたことが示されている。一方、地形調査によると、淡路島には地表に断層が見つかったが、神戸側には確認されていない(中田ほか, 1995; 大田ほか, 1995; 栗田ほか, 1995; 熊木ほか, 1995)。これらのことから、複雑な断層運動が起きたことが推測され、断層運動の推定に決定的な情報を与える地殻

変動の観測結果に、当然のごとく注目が集まっている。ここに、測地測量により明らかになった地殻変動の概要を示し、これから震源断層についてどのような制約が加えられるか検討する。

2.1 水平変動

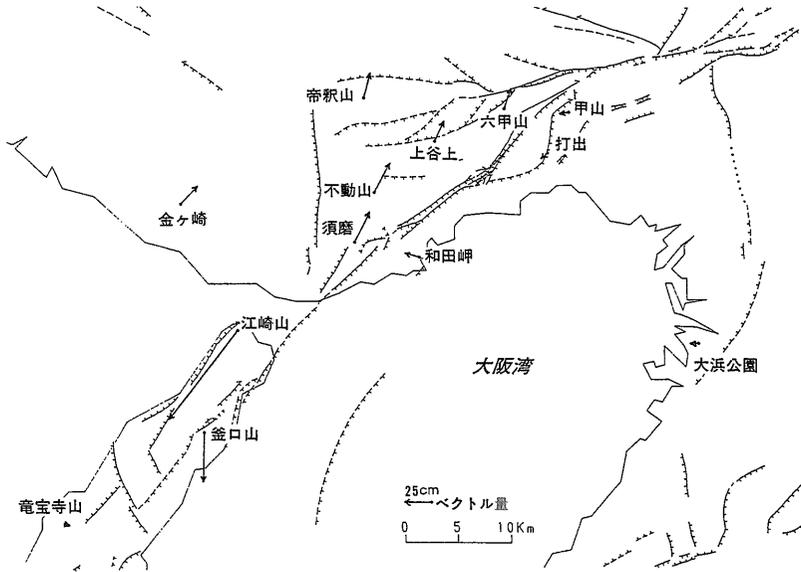
国土地理院は、昨年度からGPSの固定観測局(電子基準点)による全国規模の連続観測網の構築を進めており、昨年10月より全国210ヶ所の固定観測局からなる観測網の運用を開始した。この観測網では毎日の固定観測局の位置を決定しており、地震前後の期間のデータを比較することによりコサイスミックな変動が捉えられる。今回の兵庫県南部地震に伴って、震源を挟んだ両側で、向きが逆転する変位のパターンが明らかになった(第1図)(国土地理院, 1995)。すなわち、震源の西側の兵庫県御津局が東に約4cm、東側の大阪府箕面局が西に約4cm、奈良県吉野局が西北西に約3cm、北側の京都府宮津局が北へ約2cm、南側の和歌山県海南局や徳島県阿南局が南西に約2cm移動した。この変位のパタ



第1図 GPS連続観測により捉えた兵庫県南部地震のコサイスミックな地殻水平変動(国土地理院, 1995)

1) 国土地理院地殻調査部: 〒305 つくば市北郷1番

キーワード: 兵庫県南部地震, 地殻変動, 断層モデル



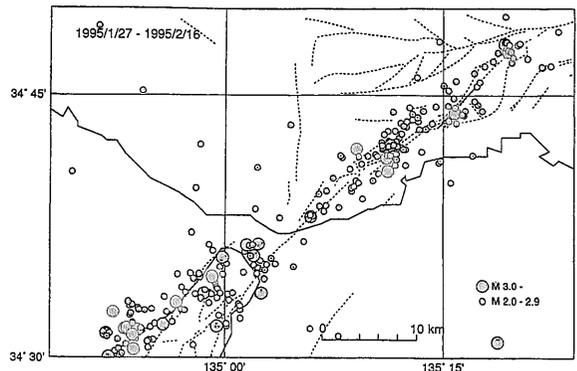
第2図 高度基準点測量により得られた阪神・淡路地方の地殻水平変動：1984～85の一次基準点測量と1995年の高度基準点測量の比較による(国土地理院, 1995)

ーンは、六甲断層系や野島断層等の北東—南西走向の断層が右横ずれ運動をしたとすると理解でき、地震観測から得られたメカニズムと調和する。

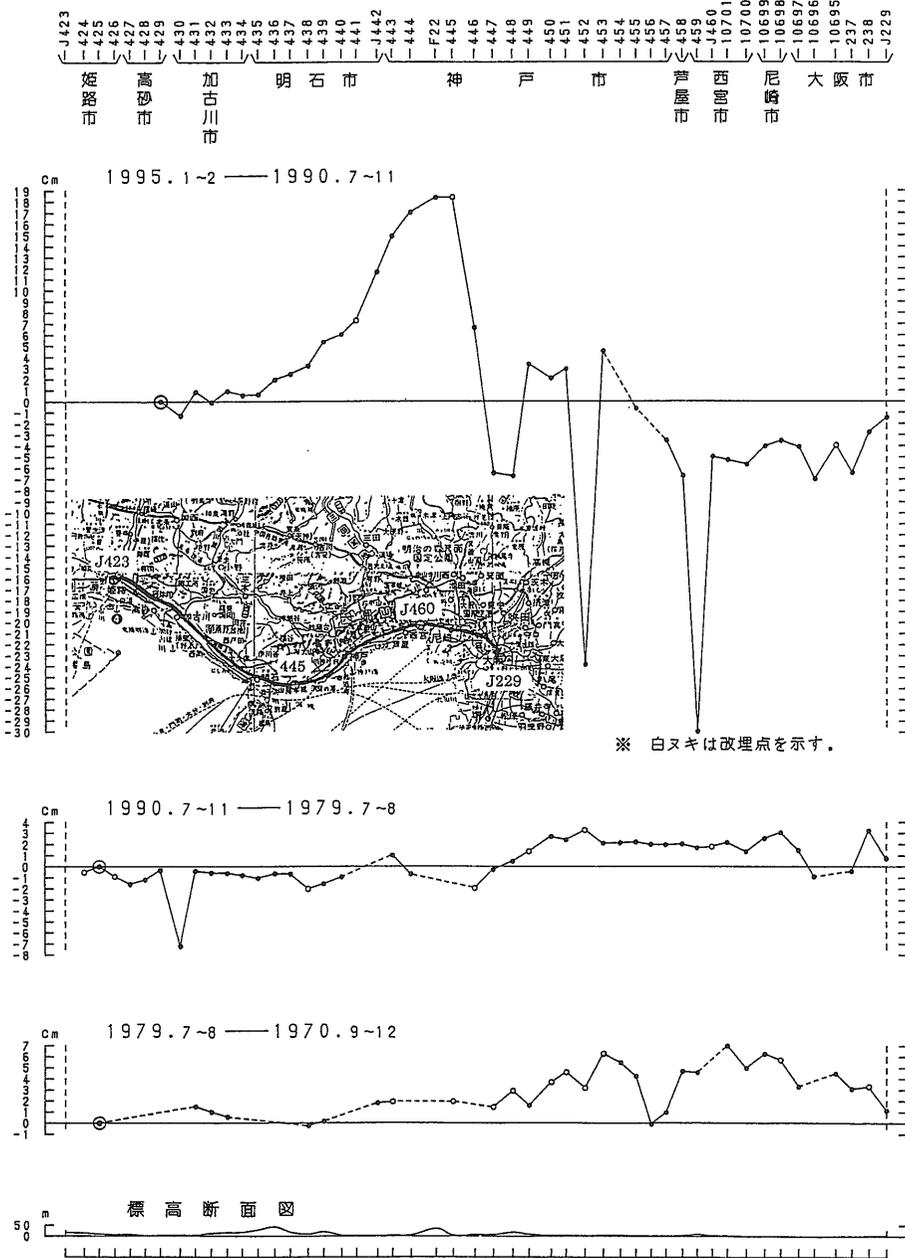
国土地理院は、その前身の陸地測量部の時代から、大地震が発生するたびに震源域周辺の三角点・水準点の測量を行い、地殻変動を明らかにしてきた。1973年からは光波測距儀を用いた辺長測量による精密測地網測量一次基準点測量を実施し、これまで日本全国を2回改測した。阪神地方では1975年と1984～85年の2度測量が実施されている(口絵1参照)。残念ながら、淡路島は1984～85年の1回しか実施されていない。地震後GPS測量により、阪神・淡路地方の三角点の改測を実施し、これらの地震前の精密測地網測量の結果と比較し、三角点の水平変動を求めた(第2図)(国土地理院, 1995)。淡路島では、野島断層の近傍の江崎山三角点が南西に約1m移動したのを始め、大きな変動が見られる。一方、神戸側では、六甲山系の山頂にあるいくつかの三角点は、北東に20～30cm移動している。この変動は、六甲山系の西側の三角点にも現れており、六甲山系から西側の変位は、連続的であると考えられる。このことは、何を示すのであろうか。野島断層を素直に北東に伸ばすと須磨断層や諏訪山断層などの六甲断層系にはつながらず、六甲山系の西側に上陸する。もし、そのような断層が

本州までのびているとすると、水平変位はここで不連続になるはずであるが、そうはなっていない。どうやら、野島断層は本州まで伸びていないらしい。

六甲山系の南東側の3つの三角点は、いずれも小さいながら西に移動している。六甲山系の三角点の変動と合わせて考えると、六甲山麓に右横ずれ断層が推定される。国立大学のグループのGPS観測により、六甲山麓にある神戸大学の変位が小さかったことが明らかにされている(名古屋大学, 1995)。国立大学や気象庁の観測によると、余震は六甲山麓の活断層に沿って分布しており(第3図)(平田,



第3図 国立大学の緊急地殻活動調査による兵庫県南部地震の余震分布(1月27日から2月16日)(平田, 1995)



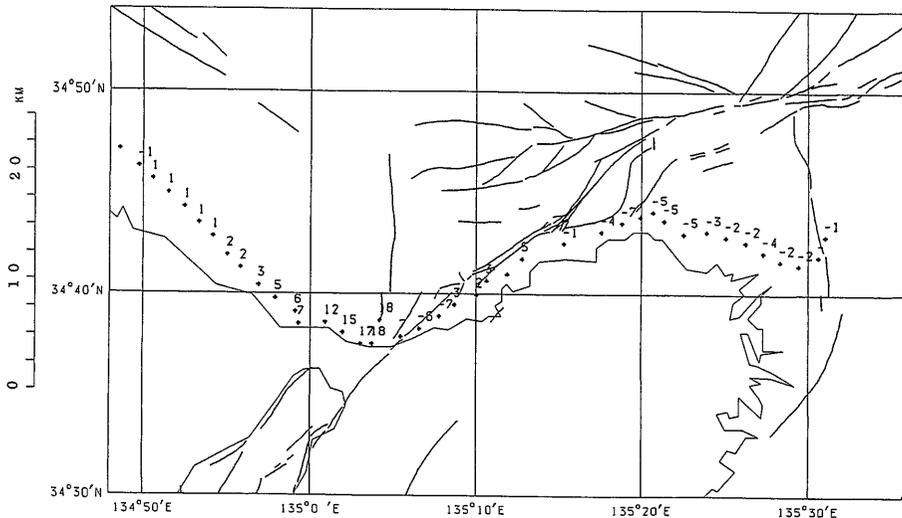
第4図 水準測量により得られた高砂～神戸～大阪間の路線沿いの上下変動：(上段)地震前後，1990年と1995年の比較，(中上段)1979年と1990年の比較，(中下段)1970年と1979年の比較，(下段)標高のプロファイル(国土地理院，1995)。

1995；気象庁，1995)，この三角点の変動と合わせて考えると，地表に現れなかった神戸側の震源断層は，六甲山麓の地下にあると結論できそうである。

2.2 上下変動

地震後の水準測量の結果，地震を挟む約5年間
1995年6月号

の上下変動が明らかになった(第4図，第5図)(国土地理院，1995)。明石から神戸市垂水にかけて隆起が見られ，最大は約19 cmにも達する。しかし，垂水からすぐ東でこの隆起は急に沈降へと転じ，その落差は約27 cmもある。ここに断層の存在が示唆



第 5 図 上下変動と活断層の地理的分布(国土地理院, 1995)

される。東にいくと、神戸市中央区付近で約 4 cm の小さな隆起が見られ、さらに東の芦屋、西宮では、また沈降が見られる。このように神戸から西宮間では、隆起・沈降が複雑に分布しており、神戸側の断層運動が複雑なものであることが推察できる。ただし、西宮以東は地盤沈下地帯であり、液化化現象も多く見られており、沈降量の100%が断層運動の結果と考えるのは早計かもしれない。

先程の水平変動で議論した野島断層の延長の可能性を再検討してみよう。野島断層の素直な延長は、神戸市垂水の隆起・沈降の境界には一致せず、むしろ明石の方にくる。明石付近は、上下変動で見ると連続的な変化を示しており、とても地表近くに震源断層があるとは考えにくい。このように、水平変動及び上下変動、いずれのデータから見ても、淡路島の野島断層が本州まで伸びていることには否定的であり、兵庫県南部地震は淡路島では野島断層、本土では六甲断層系の合計2つ以上の断層が運動したものと考えられる。

2.3 人工衛星搭載合成開口レーダーによる地殻変動の観測

近年、ERS-1 や JERS-1 などの資源探査衛星に搭載された合成開口レーダーの時期の異なる 2 回の撮影画像を処理し、干渉画像として地殻変動を明らかにする手法が開発され、1992年 Landers 地震や1994年 Northridge 地震に伴う地殻変動を捉えてきた。今回の兵庫県南部地震の発生を受けて、国土

地理院と宇宙開発事業団は協力して、JERS-1 の画像解析を行い、地殻変動の干渉画像を作成した(村上ほか, 1995)。図2に示されている地殻変動は、人工衛星と地表との視線距離の相対的な変化であり、レーダーの電波の波長(約12 cm)毎に色が繰り返す。すなわち、隣合う黄色の縞どうしの変動の差が、約12 cmであることを示す。したがって、干渉縞が込んでいるところは変動が大きいところである。また、地上から見た人工衛星の仰角が約50°であり、そのため視線距離の変化には地表の水平変動と上下変動がたし合わさった形で現れる。図2に明らかのように、神戸市内に変動の大きなところが見られる。水準測量から神戸市内では10 cm を越える大きな変動は観測されていないので、これは断層運動による右ずれの水平変位を示しているものと考えられる。神戸市の垂水区付近には、不連続的に色彩が変化するところが見られる。これは水準測量で見つかった隆起・沈降の境界に一致し、上下変動の効果も大きいと考えられる。淡路島では、北部に同心円状の半円形の干渉縞が見られる。人工衛星の方位と断層の走向との関係から考えて、野島断層の運動による水平変動の影響は小さく、主に上下変動を表しているものと考えられる。半円状になっていることは、野島断層の食い違い変位が断層面上で不均一であることを示唆している。

第1表 断層パラメータの諸源

断層	緯度 (°)	経度 (°)	長さ (km)	幅 (km)	深さ (km)	走向 (N° E)	傾斜 (°)	食い違い量 (cm)	すべり角 (°)	モーメント(×10 ²⁵) dyne・cm
①	34.777	135.323	10.0	9.0	2.0	233.0	80.0	85.5	158.7	3.1
②	34.723	135.234	10.0	9.0	2.0	233.0	80.0	41.2	194.9	1.5
③	34.668	135.144	7.5	10.0	2.0	233.0	75.0	61.1	153.3	1.8
④	34.628	135.081	5.0	10.0	2.0	233.0	75.0	74.0	121.4	1.5
⑤	34.608	135.004	15.0	10.0	0.0	225.0	95.0	236.5	188.0	14.2
モーメント 総計										22.1

緯度、経度は断層の東端の位置、深さは上端の深さを示す。傾斜は北西に傾き下がる角度を示す。すべり角は、左横ずれを0°、逆断層を90°と仮定。

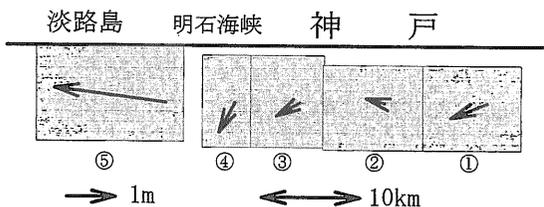
3. 最小二乗法による静的断層パラメータの推定

さて、これらの測地データを用いて、断層パラメータを推定してみよう。一般に断層運動の推定には、ディスロケーション・モデルが用いられる。ディスロケーション・モデルは、矩形の断層面に食い違い変位を与えて地表の変位や地中の応力を計算する手法である。兵庫県南部地震は、これまでの議論から明らかなように、2つ以上の断層が運動したと考えられる。1つの断層について長さ、幅、位置(上端の深さと一端の緯度、経度)、走向、傾斜、食い違い変位(横ずれ、縦ずれ)の9個のパラメータを決める必要がある。このモデルが提案された当初は、これらのパラメータをいろいろと変えて変位等を計算し、最も観測に合うものを探していたが、最近では観測値から最小二乗法を用いて直接パラメータを推定する方法がよくとられている。また、小さな断層面を多数分布させて、最小二乗法で食い違い変位を推定し、食い違い変位の断層面上での分布を求める研究も多い。そこで、ここでも複数の断層面を仮定して、その面上での食い違い変位量を推定し、

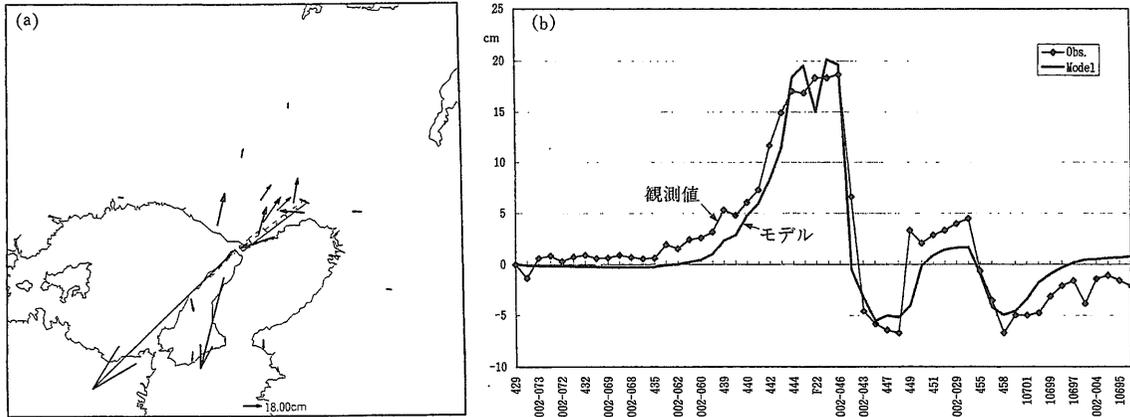
その分布を調べることにする。

使用したデータは、GPS連続観測から得られた水平変動ベクトル、GPS測量から得られた三角点間の辺長変化、そして水準測量から得られた比高変化である。ただし、比高変化には西宮以東のデータも含めて計算しているので、特に東部の断層についての結果の解釈は、慎重にしなければいけない。

このような計算をする場合、モデル断層の形状をしっかりと決めなければならない。ここでは、余震分布に合うように5つのモデル断層の位置を仮定し、その長さ、幅、傾斜角を調節しながら計算を繰り返し、残差二乗和の最も小さいものを選ぶ方法をとった。第6図と第1表に、これまでのところ最適と考えられるモデル断層を示す。また、第7図にこのモデルから期待される三角点の水平変動と水準点の上下変動を示す。おおむね、水平・上下変動とも観測データを説明する。このモデルによると、淡路島の野島断層に約230 cmの食い違い変位が見られる。この食い違い量は、地表の調査で得られた野島断層の変位量と合う。但し、地表の調査では1 m程度の上下変位が観察されているが、このモデルでは縦ずれ成分は少なく見摸られている。これは、淡路島には上下変動のデータが無いいため、よく評価されていないものと考えられる。一方、神戸側の断層の食い違い変位量は大きくても80 cmと推定される。この食い違い変位は西宮周辺の沈降を説明するためには必要であるが、この地域の沈降が液状化等の影響を含んでいるとも考えられるので、80 cmという値は上限と考えるのが適当であろう。また、明石海峡に近い断層はかなり逆断層の成分が大きい。さらに、神戸の中心部の直下の食い違い変位は約



第6図 測地データを説明する断層モデル。南東側から見たイメージ。各断層内の矢印は南東側ブロックの食い違い変位を示す。



第7図 第6図の断層モデルによる理論地殻変動：(a)水平変動とモデル断層の位置、(b)観測(◆)と理論上下変動(—)

40 cm と推定される。これらのことから、神戸側の断層は大きく2つの部分に分かれると考えられ、野島断層と合わせて食い違い変位の大きな部分は3つになり、菊池(1995)の地震波から求めた破壊の分布と定性的に合う結果となった。

このような断層モデルに基づいて、地震発生により引き起こされた周辺地域の破壊の応力の変化 ($\Delta CFF = \Delta \tau + \mu(\Delta \sigma - \Delta P)$: CFF, 破壊の応力 (Coulomb Failure Function); τ , 剪断応力; σ , 法線応力; μ , 内部摩擦係数; P , 間隙水圧)を計算することができる。有馬・高槻構造線や中央構造線で右横ずれ断層運動が起こるとすると、そのような断層運動を引き起こす破壊の応力は図3に示すような分布になる。これによると、震源断層の北東の丹波高原付近と南の大坂湾～和歌山付近、淡路島の北西部、西宮・尼崎付近、明石西方にも1 bars以上の応力増加域が見られる。この応力増加域は、おおむね余震域や本震発生後地震活動が活発化した地域(京都大学防災研究所, 1995)に一致する。

4. 残された課題

これまでの地震観測や測地測量、活断層調査等の結果、兵庫県南部地震の地震像はかなりはっきりしたといえるだろう。しかし、依然議論が続いている点もあることは事実である。ここに、そのいくつかを挙げておくことは、今後の研究の方向を探る上でも重要であろう。

4.1 “震災の帯”の解釈

地質・地形の研究者から、いわゆる“震災の帯”の直下に、潜在活断層があるとする主張が依然強い(嶋本ほか, 1995; 池田ほか, 1995)。軟弱地盤の分布と“震災の帯”が、必ずしも一致しないことがその主張の主な根拠である。確かに、測地データに基づく断層モデルでも、例えば二等三角点和田岬や打出などの変位をあまりよく説明できない。また、上下変動に見られる神戸市中央部における隆起も説明が難しい点であり、前述のような単純な断層モデルではモデル化できていないものがあるようだ。これについては、地下構造の精密な探査と、それにに基づく地殻変動や地震波動の計算が必要であろう。

4.2 六甲山の隆起と地震に伴う上下変動

地質学的なタイムスケールでは、六甲山が隆起していることがわかっている(例えば、藤田, 1983, 1985)。しかも、この隆起には、六甲山の南麓を走る活断層の運動が関与しているとされている。しかし、今回の兵庫県南部地震は一部逆断層成分の大きいところがあるが、ほぼ右横ずれ運動で説明され、六甲山の隆起にはあまり寄与しないことが推測される。1993年の北海道南西沖地震や1994年のCaliforniaのNorthridge地震でも、地形や地質時代の変動と合わない地殻変動が観測されており(Hashimoto et al., 1994; Hudnut et al., 1994), このような地震の地域的なテクトニクスでの位置付けが明らかにされなければならない。

測地データから得られた断層モデルと地形とに、興味深い一致があることに気付く。淡路島北端で

連続となり、ミ型に雁行する形で神戸側の断層が存在するが、この位置がまさに明石海峡である。このモデルでは、明石海峡に北東-南西方向の張力が働くことが考えられ、たとえば pull-apart basin が形成されることも予想される。このような運動が繰り返したことにより、明石海峡が形成されたと考えるのは荒唐無稽であろうか？

4.3 震源の位置、震源過程とモデル断層の関係

これまでの議論で、兵庫県南部地震は淡路島の野島断層と神戸側の六甲断層系の活動によるとするイメージが固まったと考えられる。しかし、ここで提案したモデルは必ずしも本震の震源とは調和的でない。京都大学や気象庁の決定した震源は明石海峡ないしは淡路島北端に位置し(京都大学防災研究所, 1995; 気象庁, 1995), 口絵3に示すモデル断層の位置とは合わない。モデル断層は震源の推定される明石海峡で不連続になっており、震源決定精度を考慮しても最初の破壊がどちらの断層上で発生したのかわからない。また、菊池(1995)は3つの破壊の内、最初の破壊はバイラテラルに伝わったとしているが、測地データによるモデルでは前述の断層の不連続があるため、すべてユニラテラルに破壊が進行したと推定される。今後検討すべき課題であろう。

今回の解析では、淡路島側にデータが十分でないため、淡路島側の断層を1枚で代表させたが、干渉SARの結果からも明らかのように、野島断層の食い違い変位には不均一な分布があることが推定され、その最大はやや南西にあると考えられる。本震の震源を淡路島側、神戸側いずれの側に仮定しても、震源は最大の食い違い変位とは一致しないであろう。このようなことは Landers 地震でも推定されており(Wald and Heaton, 1994), 破壊の開始地点と断層面上の食い違い量の最大の位置は一致しない例がある。断層面上の強度分布と破壊の進行に伴うダイナミックな応力変化との関係で決まるのであろうが、地震の短期予知の可能性と関係して無視できない問題と考え、今後の検討を期待したい。

4.4 活断層の活動の繰り返し周期

内陸活断層での地震は、主にトレンチ調査に基づいて、1,000年から10,000年で繰り返すといわれている。しかし、1596年の慶長の地震では野島断層を含む有馬・高槻構造線が活動したとの考えも提出されており(金折, 1995), もしそうであれば、約

400年で繰り返したことになり、活断層での地震の繰り返し間隔に大きな疑義を投げかける。但し、石橋(1989)は、この地震では京都付近の断層と中央構造線の鳴門断層が活動し、現時点では和歌山の中央構造線が活動したのか淡路島の先山断層が活動して六甲方面の断層運動につながったのかわからないとしている。実際、今回の地震では神戸側の地表に地震断層が現れなかったため、未来の人間が六甲断層系でトレンチ調査をしても、1995年の地震は認識されず、繰り返し周期を長く見積もることになるだろう。このようなことが過去になかったとはいえない。活断層の活動度を評価することの重要性は増しているが、果たしてこれまでと同様な観点・手法でよいのかどうか、検討する必要がある。

5. おわりに

測地測量により得られた兵庫県南部地震に伴う地殻変動を概観し、これに基づき静的な断層パラメータを推定した。その結果、今回の地震は、淡路島の野島断層および六甲断層系が活動したことが明らかになった。六甲断層系には神戸市垂水付近と六甲山南東麓に食い違い変位が大きいところがあり、野島断層の運動とあわせて3つの地震が次々と発生したと考えられる。また、食い違い変位量は野島断層が約2.3 mと圧倒的に大きく、六甲断層系の食い違い変位は1 mに満たないことが推定された。

兵庫県南部地震は、地震科学に携わる我々にとっても大きなショックであった。しかし、犠牲となられた方々に報いるためにも、この災害を教訓として地震科学の研究成果を今後の地震災害の軽減にいか

参考文献

- 栗田泰夫・吉岡敏和・水野清秀・下川浩一・宮地良典・杉山雄一・寒川 旭・釜井俊孝・磯部一洋・奥村晃史・佃 栄吉・吉田史郎・鎌田浩毅・松山紀香(1995): 1995年兵庫県南部地震に伴う地震断層と地盤災害。「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 55-58.
- 国土地理院(1995): 第1図13回地震予知連絡会提出資料.
- Hashimoto, M., Sagiya, T. Ozawa S. and Tada, T. (1994): Fault models for the crustal movements associated with the 1993 Off Kuroshiro earthquake and the 1993 Southwestern Off Hokkaido earthquake and their tectonic significance. Proceedings of the CRCM '93, Kobe, December 6-11, 1993, 57-64.
- 平田 直(1995): 平成7年兵庫県南部地震緊急地殻活動調査. 地

- 震学会ニュースレター, 6, 8-9.
- Hudnut, K. W., Murray, M. H., Donnellan, A., Bock, Y., Fang, P., Cline, M., Feng, Y., Shen, Z., Hager, B., Herring, T., King, R. (1994): Coseismic displacements of the 1994 Northridge, California, earthquake. Program for Northridge abstracts, SSA94, 40.
- 藤田和夫(1983): 日本の山地形成論: 地質学と地形学の間. 蒼樹書房, 466p.
- 藤田和夫(1985): 変動する日本列島. 岩波新書, 228p.
- 池田安隆・東郷政美・澤 祥・加藤茂弘・隈元 崇(1995): 墓石のずれから推定される初動分布と伏地震断層の挙動. 「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 45-46.
- 石橋克彦(1989): 1596年慶長近畿大地震で中央構造線が活動した可能性と1605年南海トラフ津波地震への影響. 地震学会講演予稿集, no. 1, 62.
- 気象庁(1995): 第113回地震予知連絡会提出資料.
- 金折裕司(1995): 足元に活断層. 朝日新聞社, 190p.
- 活断層研究会(1991): 新編日本の活断層—分布図と資料. 東京大学出版会, 437p.
- 菊池正幸(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.
- 熊木洋太・宇根 寛・国土地理院災害地理調査班・脇坂安彦・佐々木靖人・太田陽子・戸田 茂(1995): 六甲山地周辺地域の活断層と地変. 「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 51-52.
- 京都大学防災研究所(1995): 第113回地震予知連絡会提出資料.
- 村上 亮・藤原 智・斉藤 隆(1995): 干渉合成開口レーダーを使用した平成7年兵庫県南部地震による地殻変動の検出, 国土地理院時報「兵庫県南部地震特集号」. 印刷中
- 名古屋大学(1995): 第113回地震予知連絡会提出資料.
- 中田 高・蓬田 清・尾高潤一郎・朝日克彦・坂本晃章・千田昇(1995): 兵庫県南部地震で淡路島に現れた地震断層. 「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 29-30.
- 太田陽子・堀野正勝・国土地理院災害地理調査班(1995): 1995年1月17日兵庫県南部地震の際に出現した野島地震断層と被害状況. 「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 37-38.
- 嶋本利彦・堤 昭人・大友幸子・川本英子(1995): 神戸市・芦屋市・西宮市における地震被害と推定地震断層. 「1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会」記録, 41-42.
- Wald, D. J. and Heaton, T. H. (1994): Spatial and temporal distribution of slip for the 1992 Landers, California, earthquake. Bull. Seismol. Soc. Amer., 84, 668-691.

HASHIMOTO Manabu (1995): Coseismic crustal deformations due to the 1995 Kobe Earthquake and its fault model.

〈受付/受理: 1995年4月18日/4月25日〉