干渉 SAR によって得られた地表変位の勾配解析による 1995 年兵庫県南部地震の地表断層位置推定

国土地理院水沢測地観測所* 藤原 智†

国土地理院地理地殻活動研究センター** 小沢慎三郎・村上 亮・飛田幹男

Estimation of Fault Positions of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake Using Surface Displacement Gradient Detected by SAR Interferometry

Satoshi FUJIWARA

Mizusawa Geodetic Observatory, Geographical Survey Institute, Uchi-kumagawawa 42-2, Kuroishi-machi, Mizusawa 023-0101, Japan

Shinzaburo OZAWA, Makoto MURAKAMI and Mikio TOBITA

Geography and Crustal Dynamics Research Center, Geographical Survey Institute, Kitasato 1, Tsukuba 305-0811, Japan

(Received April 28, 2000; Accepted September 1, 2000)

The 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake in Japan caused large crustal deformation, however, only a few exposed faults have been identified by ground survey and detailed positions of the earthquake faults have not been mapped. The displacement field on the surface associated with the earthquake was mapped by a satellite radar interferometry image. The Synthetic Aperture Radar (SAR) interferogram generally shows elastic motion caused by the main earthquake but many discontinuities of the fault displacements are found, the latter of which can be most easily visualized in the surface displacement gradient. During the earthquake a concentration of damage, so-called damage belt, was observed. Though we found displacements probably caused by hidden faults just under the damage belt, the hidden faults were shorter in length and their displacements were smaller than those of the known faults running along the northern edge of the damage belt. However, strong seismic vibration was observed just on the small faults found in surrounding area of the main faults. Accordingly there is some possibility that the hidden small faults accelerated the main seismic vibration.

Key words: 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, SAR interferometry, Fault motion, Hidden earthquake fault, Damage belt.

§§1. はじめに

1995年1月17日未明に阪神・淡路地域を襲った

* 〒023-0101 水沢市黒石町内熊ヶ沢 42-2

** 〒305-0811 つくば市北郷 1 番

† 連絡責任者

現在所属: 科学技術庁研究開発局

〒100-8966 千代田区霞が関 2-2-1,

電話: 03-3503-8164, FAX: 03-3503-8169

E-mail: fujiwara@gsi-mc.go.jp

1995年兵庫県南部地震では、淡路側に明瞭な地震断層として野島断層が出現したが、神戸側には明らかな断層は地表に出現しなかった。このことから、いわゆる「震災の帯」[嶋本(1995)]が既知の断層列からずれた位置に現れたために、震災の帯の下に伏在断層があるのではないかという議論が起こったが、否定的な研究が多い[入倉(1996)など]。しかし、反射法地震探査などで伏在断層の存在を肯定する研究も根強い[渡辺・鈴木(2000)]

Fig. 1. Radar Line-of-sight (LOS) displacement from JERS-1 SAR interferogram. Contours indicate movement in every 2.5 cm towards the SAR satellite in the LOS direction (upward and/or eastward displacement) in the period from September 9, 1992 to February 6, 1995. Zero of the displacement is determined in no deformation area in northern and southern area of the SAR interferogram (Northern Hyogo Prefecture and Shikoku Island, out of this figure).

など]。いずれにせよ地震から5年を経た現在でも決定的な証拠は現れていないが、直下の伏在断層によって地震動が強化されたか否かについては、今後の内陸地震の防災対策のためにも検証されなければならない課題である。

それ以前の課題として、断層がどこに存在するのかという問題がある。断層の存在の確認には、変位の累積による地形の判別や地質の違いといった地質学的手法や余震分布などによる地震学的手法、断層運動で生じた地表変位計測による測地学的手法 [HASHIMOTO *et al.* (1996)] などがある。従来の測地学的手法は三角点や水準点の改測によって地表変位を求め、断層の運動を検出するものであるが、作業効率の点から、改測の周期や測点の密度に限界がある。その点、現在主流となりつつある宇宙測地技術を利用したGPS測量は、作業効率を高め、国土地理院の電子基準点に代表される連続観測でも画期的な成果をあげている [MIYAZAKI *et al.* (1997)]。しかし、詳細な断層の位置および変位を求めるには面的な密度が不足しているのが現状である。一方、航空写真による変位測定法 [国土地理院地理調査部地理調査技術開発室

(1996)] は面的に密な情報を得られるが、cmレベルの変位検出精度を得ることは困難である。

これらの欠点を補う新しい宇宙測地技術として干渉SAR (合成開口レーダー) があげられる。干渉SARは地表に特別な装置を必要とせずに、リモートセンシングによって地表の変位を捉える画期的な測地観測手段である。特に、面的な情報が得られる点ではGPS測量や水準測量よりはるかに優っている。この面的なデータを活用し、地震を引き起こした断層の位置および変位を詳細に計測することができる。本研究では、干渉SARによって得られた変位の勾配を解析することで地表における変位のリニアメントを見いだす。そして、兵庫県南部地震に関連した既知・未知の地表断層を検出し、また、それらが存在するか否かだけではなく、変位量をも明らかにする。

なお、本論文では地表の変位がリニアメントとして存在するものを地表断層と呼ぶことにするが、後述するようにその成因を特定できないので地表断層と地震断層は必ずしも一致しないことに注意が必要である。

§2. 干渉 SAR 画像

干渉 SAR は、数十 km 四方の範囲の地表変位を、約 100 m の空間分解能、約 1 cm の変位精度で一瞬に捉えることができる。国産の SAR 衛星である JERS-1 (ふよう 1 号) のデータを使用した、1995 年兵庫県南部地震の干渉 SAR 解析結果については村上・他 (1995) によって報告され、断層モデルも作成されている [OZAWA *et al.* (1997)]. その後、干渉 SAR 画像の作成技術が向上し、より質の高い干渉 SAR 画像が得られた [藤原・他 (1998)]. 本研究でも後者の改良された干渉 SAR 画像を用いている (Fig. 1). ここでは、本研究に使用した干渉 SAR データについて簡単に説明しておく。

干渉 SAR と GPS 観測を比べると、それぞれの観測方法に由来する特徴的な違いがみられる [藤原・飛田 (1999)]. 干渉 SAR が今回のような地表断層の検出にとって長所となるのは、被観測地に観測設備が不要で面的情報が瞬間的に得られる点である。逆に、短所となりうるのが、一定軌道を周回する衛星の性質上、観測の時期と方向 (衛星-地表の視線方向) が限られる点である。特に後者は注意が必要である。なぜなら干渉 SAR によって求められる地表変位は衛星-地表間の視線方向に沿った 1 次元量にすぎないためである。つまり、地表の各点についてその変位は 3 次元ベクトルをなすが、その変位ベクトルを衛星-地表間の視線ベクトルに投影したスカラー成分のみの観測が行われる。今回使用した干渉 SAR 画像の場合、画像中心付近の地表からみた衛星の視線方向の単位ベクトルは (東, 北, 上) = (0.62, -0.10, 0.78) であり、北から右回りに 99 度、真上から 39 度の角度をなす。このため、南北方向の変位には感度がほぼゼロで、上下方向と東西方向の変位のみ捉えることができる。しかし、単一の干渉 SAR 観測値からは上下成分と東西成分には分離できない。これらの性質より、地表断層の走向によって、横ずれ/縦ずれの変位各成分の検出感度が異なる。例えば、東西走向の地表断層で地表断層北側が南側に対して衛星の視線に沿った長さが長くなった場合、北側沈降または左横ずれの成分が卓越していることがわかるが、南北走向の地表断層では横ずれ成分はほとんど検知できない。

今回使用した干渉 SAR 画像には、データが取得された 1992 年 9 月 9 日から 1995 年 2 月 6 日までの期間に生じたすべての地表変位の蓄積が現れる。これには 1995 年兵庫県南部地震の本震、余震のみならず、この地震に直接関連しないテクトニックな変位や、地盤沈下、地すべりなどが含まれているであろう。しかし、1992 年以降、1995 年兵庫県南部地震以前には、この領域の地表に明瞭な地殻変動を起こすような地震活動はな

かったと考えられる。海岸沿いや埋め立て地での地盤沈下は十分にありうるが、地盤沈下がある程度 (例えば 2 km) 以上の長さにわたって地表断層のような明瞭なリニアメントを作る確率は低いものと予測される。しかしながら、兵庫県南部地震の本震の地表断層と余震の地表断層を分離することはできないので、本研究での地表断層位置の推定は、本震後 20 日間まで (1995 年 2 月 6 日) の余震による断層運動や aseismic な断層の余効すべりも含んでいる。

干渉 SAR の誤差要因については藤原・飛田 (1999) に概説されており、地表変位量の精度に直接関与するのは大気中の水蒸気遅延と 2 回の衛星の位置関係 (基線) の誤差である。本研究で使用した干渉 SAR 画像は南北に連続する 2 シーンをつなげることで広範囲を一度に解析して、基線に関する誤差を最小限に抑え、また、地形に相関する大気ノイズの影響を取り除くために、地形相関成分の除去の補正を行っている [藤原・他 (1999)]. 一方、震源域から遠く地表変位が十分小さい地域での変位残差より、大気ノイズは平均自乗誤差で 1 cm 程度であることも確かめている。

§3. 地表変位勾配による地表断層位置の検出

干渉 SAR は面的な地表変位検出手段として極めて優れている。しかしながら、大きな変動の中に埋もれがちな詳細な動きはそのままでは判別しにくかった。実際に Fig. 1 に示されるような変位量分布図から地表断層位置などを見いだすのは困難である。そこで、変位量そのままではなく、面的な地表変位の水平勾配 (gradient) を計算することによって、変位の急変地帯として地表断層位置を検出する [PRICE and SANDWELL (1998), FUJIWARA *et al.* (2000)].

干渉 SAR 画像から得られる面的な変位量の水平勾配の一例を Fig. 2 に示す。この図は、主要な断層とほぼ直交する北西-南東方向の勾配を示している。なお、独立した斑点状の異常は干渉 SAR 画像に含まれるノイズによるものがほとんどである。こうした勾配の図には、その極大・極小値が線状に分布しているもの (リニアメント) が数多くみられる。これらのリニアメントの中では既知の須磨断層や諏訪山断層付近のものが目立つが、他方向の勾配図なども詳細に調べることで、既知の断層に一致するものだけではなく、未知のリニアメントも見つかった。なお、各地表断層の変位量などは Fig. 3 で示したような断面図を作成して読みとるのが便利であるが、リニアメントとして水平面内で一様な構造をなしているかどうかは、勾配図での読みとりが適している。

干渉 SAR 画像に現れるこうしたリニアメントの原因

Fig. 2. NW-SE direction gradient of the LOS displacement field shown in Fig. 1.

Fig. 3. Cross sections of the LOS displacement and the topography along lines A, B and C shown in Fig. 2.

Fig. 4a. Faults found in this study in Kobe area. Dotted side of each fault shows that the LOS distance of the side changed longer (the side moved downward or westward direction).

としては、地震断層（余震も含む）またはその枝分かれした分岐断層のほかに、地質的な弱面に沿った地すべりやクリープ、干渉 SAR 特有のノイズなどが存在する可能性がある。干渉 SAR のノイズは大気中の水蒸気遅延によるものが大きい、空間スケールが大きいものほど大気ノイズの振幅が大きくなることから [FUJIWARA *et al.* (1998)], リニアメントに直交する方向に鋭い短周期の振幅をもつ線状の変位は、大気ノイズによるものとは考えられない。一方、干渉 SAR 画像はおおよそ 100 m 四方の画素に平均化しているため、それ以下の空間スケールの変位はランダムな誤差となる。したがって地表面近くの側方流動、液状化および地すべり現象などは、変位が局所的にばらつくので、今回の干渉 SAR 画像のように、長さ 2 km 以上にわたって、「整然」とずれが現れるとは考えにくい。ところで、本研究に使用した干渉 SAR 画像には 2 年半の長期にわたる地表変位が含まれているために、地震によって一度に変位したものだけではなく、ゆっくりとしたクリープ現象が含まれている可能性もあるが、現在のデータからは確認できない。

また、六甲山地北東側、淡路島西部、ポートアイランド、六甲アイランドや芦屋市、西宮市の海岸沿いの埋立地などでは、地表変位がリニアメントとしては現れず、ばらつきが大きくなっている。これは、地盤動の強さと地盤の状況によりランダムな運動が発生した場所だと考えられる。

§ 4. 各地表断層位置と変位の推定

地表面の変位がリニアメントとして確認できるものを Fig. 4 に示した。実際の地表断層線の検出にあたっては、勾配をとる方向を 45 度ずつ変えた 4 枚の勾配図 (Fig. 2 はその 1 つ) を作成し、それぞれの勾配の方向にほぼ直交する方向に勾配 (変位の微分) の極大・極小値が一樣なリニアメントをなすものを地表断層線的位置とした。変位量は Fig. 3 のような断面図を作成して求めており、原則として変位として 2 cm 以上、リニアメントの長さとして 2 km 以上のものを地表断層としている。

以下の各地表断層の詳細説明で既知の断層にほぼ一致するものは既知の断層名を記載しているが、地形などから確認されている既知の位置・走向などとは必ずしも一致していないものもあり、断層面の傾斜角による深部でのずれと地表でのずれの位置の違いなどを反映していると思われる。また、(括弧) で示したものは、対応する既知の断層が存在しないため現地の地名を記載しているものである。なお、abc 等の記号は便宜的に名づけたものであり、グルーピングに大きな意味はない。

各地表断層の変位の向きは、衛星視線方向と地表断層の走向によって推定されるものであるが、横ずれ/縦ずれを正確に分離できない。干渉 SAR からは推定されないが、地形などから推定される変位の向きは (括弧) で示している。概略の地表変位量は地表断層を挟む変位量の差で、A: 10 cm 以上、B: 5~10 cm、C: 3~5 cm、D: 1~3 cm で示している。なお、地表面がゆるやかに変位

している場合はこの変位の読みとりの誤差が大きくなる。

4.1 神戸側の各地表断層の詳細

a1) (榎谷) 榎谷川^{はせたに}左岸に沿った変位で、活断層研究会(1991)には示されていない。変位: 左ずれ/南東側隆起, D, 長さ: 6 km~

a2) (伊川谷) 活断層研究会(1991)には示されていない。変位: 左ずれ/南東側隆起, D, 長さ: 3 km

b) 高塚山断層 活断層研究会(1991)の報告より、南側で西に曲がっている。変位: 南東側隆起, D, 長さ: 3 km

c1) 山田断層 井上・他(1999)によれば、震度6以上の強い地震動の地点がこの地表断層沿いに分布している。活断層研究会(1991)の報告より、やや北側に存在するので、古々山断層と一致するかもしれない。変位: 左ずれ/南側隆起, C, 長さ: 5 km

c2) 六甲断層西部〔射場山断層〕湯槽谷山断層と一致するかもしれない。ランダムな変位を示しており、強震動による地盤変動が地質弱面である断層線に沿って複数発生しているものと思われる。山田断層も六甲断層西部も地表断層近傍の変位量に比べ地表断層から離れた地点での変位量が小さく、地表近くのみで変位が生じていることがわかる。変位: 左ずれ/南側隆起, C, 長さ: 4 km

d1) 大月断層, 五助橋断層南西部 大月断層または五助橋断層の南西部と一致している。あまり明瞭ではない。変位: 右ずれ/南東側沈降, C?, 長さ: 3 km

d2) 大月断層 大月断層の北東部で変位がみられる。変位: 右ずれ/南東側沈降, B?, 長さ: 5 km

d3) 五助橋断層北東部 五助橋断層の北東部と一致し、やや東に曲がっている。中田・他(1996)によれば、大月断層も五助橋断層も北東部が第四紀後半に活動したとは認められていないが、本研究では逆に北東部のほうに明瞭な変位のリニアメントが確認された。変位: 右ずれ/南東側沈降, B?, 長さ: 6 km

e) 有馬高槻構造線, 清荒神断層 有馬高槻構造線(e2)からやや南に屈曲して清荒神断層(e1)につながっている。清荒神断層と五助橋断層(d3)の間にもリニアメントが確認できる。井上・他(1999)によれば、震度6以上が、この有馬高槻構造線のこの部分の南側に分布しており、孤立した震度7の地域も気象庁(1996)によって見いだされている。変位: 右ずれ/南東側沈降, D, 長さ: 5 km~

f) (塩屋) 活断層研究会(1991)には示されていない。変位: 南東側沈降, D, 長さ: 3 km

g) 横尾山断層 水準測量によって明瞭な変位がみら

れている場所である。変位: 右ずれ/(南東側隆起), B, 長さ: 6 km

h) 須磨断層 これも水準測量によって明瞭な変位がみられている場所である。平行する横尾山断層より変位量は大きい。神戸側では地表断層を挟む変位量の差が最大になる場所である。変位: 右ずれ/南東側沈降, A, 長さ: (8 km)

i) 諏訪山断層 須磨断層からそのままリニアメントがつながり区別できない。布引断層と諏訪山断層の2つの断層がほぼ平行に走っているが、その中間あたりに地表変位勾配の極大値が走っており、南東側落ちの逆断層だとすれば、諏訪山断層の深部の動きであると解釈できる。なお、諏訪山断層から直線的な延長には五助橋断層が存在するが、五助橋断層の南西側(d1)の変位はそれほど明瞭ではない。変位: 右ずれ/南東側沈降, A, 長さ: (7 km)

j) 岡本断層, 芦屋断層南部 岡本断層は、渡辺・鈴木(2000)などに記されている断層である。諏訪山断層の東端から、走向を東北東から東に変えてつながっている。岡本断層に一致するリニアメントは芦屋断層の南部へそのままつながり区別できない。変位: 右ずれ/南東側沈降, A, 長さ: (10 km)

k) 芦屋断層 岡本断層の東部は芦屋断層に沿ってやや北に曲がるが(j), 芦屋断層の北部につながらず, k1が孤立したような変位がみられる。この変位は、山側のk1からjの東端へまとまってずり落ちているような巨大な地すべり状の変位である。地表付近の地すべりの場合、干渉SARの各画素の大きさからみた変位がランダムに近くなるために、このようなまとまった形での変位は認められない。したがって、滑った面は地表ではなく、ある程度の深さをもった場所であり、地表面でのマイクロでランダムな変位は小さく、地すべりというより断層運動的と推定される。このk1付近の変位のために、芦屋断層沿いのリニアメントがつながっていないように見えるが、北側のk2の部分で再び芦屋断層沿いの変位が明瞭になっている。k2ではリニアメントが複雑に屈曲している。変位: 右ずれ/南東側沈降, A~C, 長さ: (6 km)

11) 甲陽断層北東部 甲陽断層の北東延長にあたる。南側の変位ははっきりしない。変位: 右ずれ/南東側沈降, D, 長さ: 3 km

12) 西宮撓曲 はっきりとした一様なリニアメントが確認できるが、地表断層線の直交方向へは変位が遠方まで至っていないので、地表に近い部分での変位である。リニアメントとしては直線的ではなく北向きに大きく曲がっている。この曲がり方と位置は重力ブーゲー異常の急変帯と一致しており [志知・青木(1995)], 地下

の構造によるものであろう。気象庁(1996)による震度7の地域がこの撓曲沿いに孤立して存在する。変位: 右ずれ/南東側沈降, C~D, 長さ: 8 km

m) 元町撓曲 小さいながらもリニアメントが確認できる。渡辺・鈴木(2000)に記されているものに一部が一致する。地表断層線の南側が SAR 衛星に近づく変位であり, 地表断層変位は左ずれか南側隆起であるが, 地形からすると左ずれ成分が干渉 SAR に捉えられたと考えるのが自然である。しかし, 南方へ地盤が一様にずれることで南側が隆起した可能性もあり, 撓曲特有の複雑な変動を示していると思われる。リニアメントが分離していつながっていないが, 変位自体が小さいのでノイズに埋もれている可能性もある。「震災の帯」中に存在する。変位: 左ずれ/南側隆起, C~D, 長さ: (8 km)

n) (鷹取) 西側の須磨断層と同様に南側の海岸線が地表断層線の東側で北に曲がっている。これは南東側が沈降することで海岸線が後退していったと考えることができる。また, 海域の水中音波探査により, この地表断層の南側延長にあたる海中に断層が見つかった [岩淵・他(1995)]. 変位: 右ずれ/南東側沈降, B?, 長さ: 2 km

o) 和田岬断層 須磨断層の東側から和田岬にかけて地表変位勾配が非常に大きい。海側の変位がわからないので位置は明瞭ではないが, 和田岬付近に大きな地表断層運動が存在する。変位: 右ずれ/南東側沈降, A~B?, 長さ: 2 km

p1) (岩屋) この地表断層は和田岬断層を北東側に延長した場所に存在する。「震災の帯」中に存在する。変位: 右ずれ/南東沈降, C?, 長さ: 4 km

p2) (打越山) p1 の北方延長になる。岡本断層の北側一帯では変位が大きい動きが複雑でリニアメントの確認が難しい。変位: 右ずれ/南東沈降, C?, 長さ: 3 km

p3) (御影) p1 とともに変位は大きいものの, 海岸沿いの低地であるので, 地盤が悪いために液状化などによる変位が重なって明瞭ではなく, また, 短いので, 地表断層としての存在確実度は低いと思われる。「震災の帯」中に存在する。変位: 右ずれ/南東沈降, C?, 長さ: 2 km

p4) (八幡谷) p3 同様に変位は大きいがリニアメントの確認は難しい。変位: 右ずれ/南東沈降, C?, 長さ: 2 km

q1) (住吉) 元町撓曲同様の変位である。変位: 左ずれ/南側隆起, D, 長さ: 3 km

q2) 甲陽断層南部 q1 とは直線的につながらず, 変位のセンスも逆である。変位: 右ずれ/南東側沈降, D, 長さ: 3 km

Fig. 4b. Faults found in this study in Awaji area. Dotted side of each fault shows that the LOS distance of the side changed longer (the side moved downward or westward direction).

このほかリニアメントとしてははっきりしないものの, 名塩断層などの既知の断層を横切る場所で地表断層変位がみられる場所が数多く存在する。

4.2 淡路側の各地表断層の詳細

r) 野島断層 明瞭な地震断層が現れた場所だが, 強い地盤動のため地表面でのランダムな動きが大きくなり, 地震断層に沿ったリニアメントは干渉 SAR 画像では捉えられなかった(点線は地形による地表断層位置)。また, 野島断層の走向と衛星視線方向の関係で, 地表断層南東側で右ずれ変位(衛星から遠ざかる)と南東側隆起(衛星に近づく)が相殺する形になった。したがって, 干渉 SAR でのリニアメントの検出をさらに困難にしている。変位: (右ずれ)/南東側隆起, A, 長さ: (9 km)

s) 小倉断層, 水越撓曲 北側の野島断層は富島集落付近まで延びている。富島集落より南では小倉断層からさらに南の水越撓曲とつながっている。野島断層同様に横ずれ成分と縦ずれ成分が衛星視線方向の変動を相殺しているが, 右ずれ成分が卓越している。栗田・水野(1998)によれば, 水越撓曲沿いに地すべりや崩壊が確認されている。気象庁(1996)によれば, この断層に沿って震度7の地域が現れている。変位: 右ずれ/(南東側隆起), A~B, 長さ: 6 km

t) (室津) 活断層研究会(1991)には示されていない。変位: 右ずれ/(南東側隆起), D, 長さ: 2 km

u) (尾崎) 活断層研究会(1991)には示されていない。既知の志筑断層の南西側に存在するが, 志筑断層には変位はみられない。気象庁(1996)によれば, この地表断層の南側に震度7の地域が現れている。変位: 東側沈降, C, 長さ: 4 km

v) 育波断層 変位: 東側隆起, D, 長さ: 3 km

w) (久野々) 小規模ながらも地表断層に沿ったスムーズな変位がみられる。変位: 左ずれ/南側隆起, D, 長さ: 2 km

x) 東浦断層, 野田尾断層 東浦断層北部(x1)では西側沈降が卓越し, 南側(x2)では右ずれが卓越する。野田尾断層(x3)ではややランダムな変位が線上に複数並んでおり, スムーズな断層運動ではなく, 地質的な弱面としての断層面上に地震動によって変位が生じていると考えられる。変位: C~D, 長さ: (10 km)

y) (久留麻) 活断層研究会(1991)には示されていない。東浦断層の東側の地表断層。変位: 東側沈降, D, 長さ: 3 km

z) 灘川断層 地震時に地表まで現れた断層[栗田・水野(1998)]であるが, あまり明瞭ではない。この地表断層のすぐ西側の楠本断層での変位ははっきりしない。変位: 東側隆起, D, 長さ: 1 km?

8.5. 議 論

5.1 撓みとしての地表断層

今回見いだされたリニアメントのほとんどは, 断層が地表に達したのではなく, 撓曲として現れたものであると考えられる。これは, 基盤岩上に厚い堆積層が覆っているので, 堆積層中では明瞭に断層を形成できずに撓み曲がる構造となり, 地表付近ではゆるやかに変形している。このために, 地表では鋭い段差が現れにくいので現地調査での発見が困難になるが, 干渉 SAR を用い水平勾配をとることで 2 cm 程度の段差が線状に生じていれば撓曲でも地下の断層変位の検出ができる。なお, 実際に断層として切れている上面の深さは, 地表断層から離れた場所の変位と地表断層近くの変位を比べることである程度推定できると思われる。

地表変位の急変位置をもとに検出されたリニアメント(地表断層)が既存の活断層と驚くほどよく一致するという事実は, これらの既存活断層の動きを強く示唆するが, この活断層の動きが深さ方向にどのような形で分布しているのかということは今後推定していく課題と思われる。すなわち, リニアメントの位置情報を取り入れて, 断層モデルの再構築を行う必要があるが, 断層数が多いためにパラメータの自由度が高く, 精度良い結果はまだ得られていない。

5.2 地表断層位置のグループ構造

神戸側で変位量の大きい地表断層を大局的にまとめると;

- (1) 須磨断層-諏訪山断層
- (2) 岡本断層-芦屋断層南部
- (3) 五助橋断層, 大月断層

これら地表で表現される 3 グループの地表断層群が存在する。(3)の南部は不明瞭である。これは(2)と重なっているため, あるいは断層上面が深い場所にあるためだと思われる。菊地(1995)による地震波の解析によれば, 本震は 3 つのサブイベントに分けられ, それぞれの位置がこれらの地表断層群に相当している。測地データより求めた断層モデル[HASHIMOTO *et al.* (1996), OZAWA *et al.* (1997)]では, (1), (3)の位置は調和的であるが, (2)の存在は指摘されていない。ところで, 干渉 SAR データからは, 和田岬断層-岩屋-打越山という地表断層群の存在も示唆されるが, この地表断層群は海での変位がわからないこともあり, 存在の確実度は低いであろう。

これらの主たる地表断層では, 例えば Fig. 3A の須磨断層での変位が断層直上だけではなく, 地表断層に直交する方向に変位が遠方に及んでおり, 測地断層モデルで示されるように, 深い場所でも断層が動いていることを示しているが, その他の地表断層では変位が地表断層周辺にしか現れていないものが多く, 主たる地表断層以外では表層近くのみがずれたことを示している。

5.3 「震災の帯」と伏在断層

これまでも何度となく震災の帯の下に未知の断層があるという議論がされてきた。本研究によっても, 震災の帯の下にいくつかの地表断層(撓曲)の変位が見いだされている(Fig. 4 の n, m, p, q)。ところが, 震災の帯の北側に存在する断層系(須磨断層, 諏訪山断層, 岡本断層, 五助橋断層など)に比べると, その変位量も断層としての連続性も小さい。したがって, これらの震災の帯内の地表断層は主たる断層ではなく, 独立した小断層か主断層から枝分かれた分岐断層, または極めて強い地震動によって, 地震断層ではない地質弱面が強制的に滑ったものとして存在している可能性が高い。もちろん, こうした小断層群の存在により何らかの理由で震災の帯での地盤動が強化されたとも考えることもできるので, 震災の帯の形状と伏在断層の分布の関係は否定できない。

これに対して, 六甲北の山田断層, 有馬高槻構造線, 西宮撓曲や野島断層南の水越撓曲においては, 震度が周りに比べて大きい地域と本研究で見いだされた地表断層が一致しており, 地表断層直上付近で明らかに震度が大きくなる場所があることも事実である。ところで, これらの地域では明瞭な余震活動は必ずしも確認されていない[吉川・伊藤(1995)]ことから, 変位が本震とほぼ同時であった可能性がある。したがって, これらの断層が本震に誘発されて地震断層となつてほぼ同時に動いたために本震の震動を強化したとも考えられる。

5.4 地形と地表断層変位の相関

Fig. 3 より場所ごとの変位量と地形（標高）に相関があることがわかる。Fig. 3 の変位量は上下成分によるものだけではないが、これらの断面図は地表断層にほぼ直交しており、各地表断層の縦ずれ/横ずれ成分の比が大きく異ならないと仮定すれば、Fig. 3 で示されるような変位量は各地表断層ごとの上下成分の相対的な変動量を現している。このように極めて多くの場所で小規模から大規模に至るまで地震による変位が地形と相関があることは、岩手山近くで起こった M6 クラスの地震でも同様な例が確認されている [FUJIWARA *et al.* (2000)]. このことより、これらの地震の際には数多くの地表断層が生じて、ある範囲で地形によく似た変位を引き起こしていることがわかる。

§6. ま と め

1995 年兵庫県南部地震に伴い、地表では数多くの場所で断層状のリニアメントをなす変位（地表断層）が発生していることが確認されており、こうした大地震時には地表断層の検出手段として干渉 SAR 技術は極めて有効である。

神戸側の地表断層では、須磨断層から諏訪山断層にかけて最大の変位があった。そこから北東側への延長である五助橋断層、大月断層への変位はやや小さく、特に南西部は不確実であるが、北東部は有馬高槻構造線まで変位が確認できる。諏訪山断層の東側では市街地の北辺に沿うように真東に向きを変えた岡本断層付近が変動していたことがわかった。また、そのさらに東では武庫川岸への変位（西宮撓曲）がある。このほか、六甲山の北や明石市などの主断層から離れた場所にも地表断層が存在している。

淡路側の地表断層では、野島断層からその南の水越撓曲まで変位が続いている。また、変位は微小ながらも平行する東浦断層、直交する育波断層や志筑断層南側の未知の地表断層などが動いたことがわかった。

「震災の帯」の直下には兵庫県南部地震で多くの撓曲状の地表断層が形成され、その下には撓曲生成の原因となった伏在断層が存在する可能性があるが、仮に断層が存在したとしても、変位量、長さともに小規模であり、本震を引き起こした主断層は別の断層である。しかし、震災の帯の伏在断層が何らかの原因で地盤動を強化した可能性は否定できない。一方、主断層から離れた場所で動いた地表断層には明らかに周囲より震度が大きい地域が存在する。このほか、見いだされた各地表断層の地形と変位量に相関がある。なお、深部までも含めた断層位置の詳細は、今回の位置データを元に地殻変動のシミュ

レーションを行って再決定する必要がある。

謝 辞

干渉 SAR 画像の作成に関して国土地理院の中川弘之氏およびジェット推進研究所のポール・ローゼン氏の協力を得ました。ここに感謝いたします。

文 献

- 栗田泰夫・水野清秀, 1998, 1 万分の 1 兵庫県南部地震に伴う地震断層ストリップマップ—野島・小倉および灘川地震断層—説明書, 構造図 (12), 地質調査所, 74 pp.
- FUJIWARA, S., P. A. ROSEN, M. TOBITA and M. MURAKAMI, 1998, Crustal deformation measurements using repeat-pass JERS 1 synthetic aperture radar interferometry near the Izu Peninsula, Japan, *J. Geophys. Res.*, **103**, 2411–2426.
- 藤原 智・飛田幹男・村上 亮, 1998, 干渉 SAR における水蒸気情報の重要性, 気象研究ノート「GPS 気象学」(内藤勲主編), **192**, 199–212.
- 藤原 智・飛田幹男, 1999, 地表変動検出のための干渉 SAR 画像作成技術, 測地学会誌, **45**, 283–296.
- 藤原 智・飛田幹男・村上 亮・中川弘之・P. A. ROSEN, 1999, 干渉 SAR における地表変動検出精度向上のための基線値推定法と大気一標高補正, 測地学会誌, **45**, 315–325.
- FUJIWARA, S., T. NISHIMURA, M. MURAKAMI, H. NAKAGAWA, M. TOBITA and P. A. ROSEN, 2000, 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt. Iwate detected by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2049–2052.
- 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, 437 pp.
- 菊地正幸, 1995, 遠地実体波による震源のメカニズム, 月刊地球, 号外 **13**, 47–53.
- 気象庁, 1996, 震度を知る—基礎知識とその活用—, ぎょうせい, 238 pp.
- 国土地理院地理調査部地理調査技術開発室, 1996, 1995 年野島地震断層周辺の変位量図, 国土地理院, 技術資料 D. 1-No. 328.
- HASHIMOTO, M., T. SAGISA, H. TSUJI, Y. HATANAKA and T. TADA, 1996, Co-seismic displacements of the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, *J. Phys. Earth*, **44**, 255–279.
- 井上直人・柴山元彦・辻江賢治・領木邦浩・千田智志・岡本健太郎・根本泰雄・中川康一, 1999, 1995 年兵庫県南部地震の広域アンケート調査—高震度領域におけるアンケート震度と計測震度との関係—, 地震 **2**, **51**, 395–407.
- 入倉孝次郎, 1996, “震災の帯”をもたらしした強震動, 科学, **66**, 86–92.
- 岩淵 洋・春日 茂・穀田昇一・沖野郷子, 1995, 大阪湾の活断層, 月刊地球, 号外 **13**, 117–122.
- MIYAZAKI, S., T. SAITO, M. SASAKI, Y. HATANAKA and Y. IIMURA, 1997, Expansion of GSI's nationwide

- GPS array, Bull. Geograph. Surv. Inst., **43**, 23-34.
- 村上 亮・藤原 智・齊藤 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, **83**, 24-27.
- 中田 高・岡田篤正・鈴木康弘・渡辺満久・池田安隆, 1996, 1: 25,000 都市圏活断層図「大阪西北部」, 国土地理院, 技術資料 D.1-No. 333.
- OZAWA, S., M. MURAKAMI, S. FUJIWARA and M. TOBITA, 1997, Synthetic aperture radar interferogram of the 1995 Kobe earthquake and its geodetic inversion, Geophys. Res. Lett., **24**, 2327-2330.
- PRICE, E. J. and D. T. SANDWELL, 1998, Small-scale deformations associated with the 1992 Landers, California, earthquake mapped by synthetic aperture radar interferometry phase gradients, J. Geophys. Res., **103**, 27001-27016.
- 志知龍一・青木治三, 1995, 1995 年兵庫県南部地震震源域の重力異常, 月刊地球, 号外 **13**, 129-134.
- 嶋本利彦, 1995, “震災の帯”の不思議, 科学, **65**, 195-198.
- 渡辺満久・鈴木康弘, 2000, 神戸周辺の活断層と兵庫県南部地震時の地表変位, 月刊地球, 号外 **28**, 62-68.
- 吉川澄夫・伊藤秀美, 1995, 1995 年兵庫県南部地震の概要, 月刊地球, 号外 **13**, 30-38.