RADARSAT/SAR データ干渉処理による 地殻変動検出の試み

——2000 年鳥取県西部地震の地殻変動——

国土地理院* 矢来博司・中川弘之・飛田幹男・村上 亮
文部科学省研究開発局** 藤原 智

Preliminary Study to Detect Crustal Deformation by RADARSAT SAR Interferometry

—Crustal Deformation Associated with the Western
Tottori Prefecture Earthquake in 2000—

Hiroshi YARAI, Hiroyuki NAKAGAWA, Mikio TOBITA and Makoto MURAKAMI

Geographical Survey Institute, Kitasato 1, Tsukuba, Ibaraki 305-0811, Japan

Satoshi FUJIWARA

Research and Development Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology,
1-3-2 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8966, Japan

(Received October 3, 2001; Accepted January 23, 2002)

The coseismic displacement field on the Earth's surface associated with the Western Tottori Prefecture Earthquake (October 6, 2000) was mapped by spaceborne C-band SAR (Synthetic Aperture Radar) interferometry. We obtained the interferogram from two SAR scenes before and after the earthquake (September 17 and October 11, 2000, respectively) acquired by RADARSAT. We successfully detected not only the coseismic displacement field associated with the main shock on Oct. 6 but also the one associated with the sub-event on Oct. 8. C-band SAR interferometry is effective even on the flat or moderate terrain covered with vegetation in Japan.

We confirmed that the observed displacement field is consistent with the calculated field by the fault model that is constructed based on geodetic and seismic data. Complex fringe pattern associated with local deformation can be seen in Yumigahama Peninsula sand bar. Remarkable decorrelations in the interferogram may indicate occurrence of subsurface liquefaction along the coastal region. These findings strongly suggested the potential of spaceborne C-band SAR interferometry for seismic hazard monitoring in Japan.

Key words: The Western Tottori Prefecture Earthquake, SAR interferometry, RADARSAT, C-band, Liquefaction.

§1. はじめに

2000 年 10 月 6 日に鳥取県西部を震源とする $M_{JMA}7.3$ の地震が発生した。この地震により、震央付近では家屋の損壊やがけ崩れが多発し、道路、鉄道などの交通網や

ライフラインが大きな被害を受けた。また、臨海部の埋立地・干拓地では地盤の液状化が広範囲で発生し、港湾施設や農地などに甚大な被害が生じた。

この地震に伴う地殻変動が、GEONET の連続観測

* 〒305-0811 茨城県つくば市北郷 1 番

** 〒100-8966 千代田区霞が関 1-3-2

データの解析により捉えられた [国土地理院 (2001a)]. また、水準測量により、震源域周辺での地震に伴う上下変動が明らかにされている [国土地理院 (2001b)].

これらの GPS 観測や従来の測地測量で得られる地殻変動データは、観測点のみの離散データであるのに対し、合成開口レーダの干渉処理 (干渉 SAR 解析) では地殻変動を面的に捉えることができる。地殻変動を面的に捉えることにより、その地殻変動を引き起こした地下の現象をより詳細に推定することが可能となる。例えば、国産の SAR 衛星である JERS-1 (ふよう 1 号) の SAR データの干渉処理により、1995 年の兵庫県南部地震 [例えば、村上・他 (1995)] や 1998 年の岩手山の火山活動による地殻変動 [例えば、Fujiwara *et al.* (2000)] が捉えられ、断層や茂木モデルのパラメータが求められている [例えば、Ozawa *et al.* (1997), Nishimura *et al.* (2001)].

日本を対象とする研究でよく用いられる JERS-1 は波長 23.5 cm の L-band のマイクロ波を用いた SAR を搭載している。この JERS-1 は 1998 年 10 月に運用を停止している。現在運用中の SAR 衛星としては、欧州宇宙機構 (European Space Agency: ESA) が打ち上げた ERS-2、カナダ宇宙庁 (Canadian Space Agency: CSA) の RADARSAT があり、いずれも波長 5.6 cm の C-band のマイクロ波を用いている。

マイクロ波の波長は短いほど、干渉 SAR による微小な変位に対する感度が高くなる。しかし、波長が短くなるほど光の性質に近づき、植生の影響を受けやすくなる。

JERS-1 が用いている波長 23.5 cm の L-band のマイクロ波は、波長が樹木の葉や草のサイズよりも長いいため、これらを透過し、地表で反射すると考えられている。それに対し、ERS-1、2 や RADARSAT は波長 5.6 cm の C-band のマイクロ波を用いており、波長が短いために植生を透過できず、その表面でマイクロ波が反射すると考えられている。

植生は、時間とともに成長あるいは落葉したり、風による動揺などにより表面の状態が変化しやすい。そのような変化があった場合、マイクロ波反射体の状態が観測のたびに大きく異なるため、干渉が得られない。実際に、植生が多い地域では C-band の干渉が難しく、より波長の長い L-band は植生の影響をほとんど受けず干渉が得られる [Rosen *et al.* (1996)]. したがって、日本のように植生が多い環境では、C-band の干渉 SAR は困難であると考えられてきた。

このことから、日本における C-band の SAR を用いた干渉 SAR に関する研究は少なく、米澤・竹内 (1997,

1999, 2000) などの限られた例しかない。

しかし、L-band の SAR 衛星は、2004 年に打ち上げ予定の ALOS (陸域観測技術衛星) の運用が開始されるまでは存在せず、現時点で干渉 SAR に用いることができるのは C-band の SAR 衛星のみである。したがって、現在は、干渉 SAR での火山活動モニタリングや地震による地殻変動検出には、C-band の SAR を用いるしかない状況である。

ただ、マイクロ波の波長が短くなると植生地域では干渉性が悪くなるが、微小な変位に対する感度が高くなるという利点がある。このことは、微小な変動を捉える必要がある火山活動のモニタリングなどにとっては有益である。また、RADARSAT の後継機や ENVISAT などが順次計画されており、今後しばらくの間は C-band の SAR 衛星からのデータが継続的に得られると考えられる。

このことから、日本における C-band の SAR を用いた干渉 SAR による地殻変動検出の試みは重要である。

そこで、鳥取県西部地震の震央を含む地域について、C-band の SAR 衛星である RADARSAT の SAR データを用いて干渉処理を行い、地震による地殻変動や地盤状態の変化の検出を試みた。

§ 2. 干渉 SAR による地殻変動検出

Massonet *et al.* (1993) は、1992 年にカリフォルニア州で発生したランダース地震 ($M_w 7.3$) に伴う地殻変動を ERS-1/SAR データの干渉処理によって明らかにした。これ以後、1994 年のノースリッジ地震 ($M_w 6.7$) [例えば、Massonet *et al.* (1996), Murakami *et al.* (1996)], 1995 年のサハリン北部地震 ($M_w 7.0$) [Tobita *et al.* (1998)], 1999 年のヘクターマイン地震 ($M_w 7.1$) [Sandwell *et al.* (2000)] などの地震に伴う地殻変動が ERS-1、2 や JERS-1 を用いた干渉 SAR 解析によって捉えられている。

日本では、JERS-1 の干渉 SAR 解析により兵庫県南部地震 [例えば、村上・他 (1995), Ozawa *et al.* (1997)] や鹿児島県西部地震 [例えば、Fujiwara *et al.* (1998)] に伴う地殻変動が捉えられている。

また、本稿で用いた RADARSAT に関しては、レユニオン島フルネーズ火山の火山活動に伴う地殻変動を捉えた例 [Sigmundsson *et al.* (1999)] などの研究がある。

これらの干渉 SAR 解析で得られるのは、衛星と地上の各点の距離の変化量であり、地殻変動のうち衛星の視線方向成分のみの一次元量である。

SAR データの干渉処理を行うと、2 回の観測における衛星の位置と地上の各点との距離の差に応じた位相差

が求められる。この初期干渉画像には、地表の変動による変動縞だけでなく、2 時期の人工衛星軌道間の位置関係が異なることから生じる軌道縞と地形縞が含まれている。地表変動を求めるためには、初期干渉画像から軌道縞、地形縞を除去し、変動縞だけを取り出す必要がある。

軌道縞については、2 時期の人工衛星軌道間の位置関係（基線長）と地表のターゲット位置から計算することができる。地形縞については、解析する範囲のデジタル標高データ (DEM) があれば、軌道縞と同様に幾何学的な計算で補正が可能である [Massonnet *et al.* (1993)]. この DEM から計算された地形縞を用いる場合、2 回の SAR 観測データから地表変動を求めることができることから、2 パス法と呼ばれる。DEM が存在しない場合でも、地表変動がないか、または地表変動の速度が一定である別の干渉画像から地形縞だけを取り出して補正する方法がある [Zebker *et al.* (1994)]. この場合、用いる観測データの数によって、3 パス法、4 パス法と呼ばれる。

日本の場合、国土地理院の 50 メッシュ標高データが全国にわたって整備されており、現在の干渉 SAR による地表変動検出に十分な精度と分解能を持っていること

から、2 パス法が用いられる。

§ 3. 解析

3.1 解析データ

鳥取県西部地震にともなう地殻変動を求めるため、地震前と地震後の 2 時期のデータを用いて 2 パス法干渉 SAR 解析を行った。用いたデータは、RADARSAT が 2000 年 9 月 17 日 6:08 (JST) と 10 月 11 日 6:08 (JST) に震央付近 (Fig. 1) を観測したシグナルデータである。

RADARSAT は、地上分解能・観測範囲・観測入射角が可変であり、それぞれの組み合わせに応じてモードの名称が決められている。今回解析に用いたデータは、最も地上分解能の高いファインモード（分解能 10 m）で地表入射角が最も小さい（約 20° ）F1 モードでの観測によるものである。

3.2 解析手法

解析にはガンマ・リモートセンシング社の干渉 SAR 解析ソフトウェアを用いた。まず、RADARSAT/SAR シグナルデータから SLC (Single Look Complex, シングルルック複素画像) を再生した。

Fig. 1. Location of the study area. The large rectangular indicates the position of the SAR imagery. The small box indicates the area covered by Figs. 4 and 7. Open circles are earthquakes with magnitude greater than 3 between 17 September and 11 October, 2000. The star is epicenter of the Western Tottori Earthquake main shock. The Hypocenters determined by JMA and NIED.

Fig. 2. Interferograms of various looks. (a) 4 looks (4 pixels are averaged on azimuth and range direction), (b) 16 looks (4 looks after (a)), (c) 32 looks (4 looks after (a)). It is clear that coherence is gradually improved with enlargement averaging area. All interferograms are geo-coded to Universal Transverse Mercator (UTM) projection.

C-band の SAR は L-band の SAR と比べ干渉性が悪い、解析の中で行うマルチルック処理（隣接するピクセルの値を平均化する）の際に、JERS-1/SAR データの解析で用いている 4 ルック（4 ピクセル×4 ピクセルの範囲を平均化）よりも平均化する範囲を広く取った。一般に、ピクセルの平均範囲を広く取ると、地上分解能は低下するが干渉性が向上する。

まず、JERS-1 データの解析と同様に、SLC から 4 ルックの初期干渉画像を作成し、軌道縞・地形縞を除去して 4 ルックの差分干渉画像を得た (Fig. 2(a))。その後、得られた差分干渉画像についてさらに 4 ルックおよび 8 ルックの平均を行うことでそれぞれ 16 ルック、32 ルックの画像を作成した (Fig. 2(b), (c))。こうして作成した干渉画像に対し、Goldstein and Werner (1998) によるフィルターをかけた結果、32 ルック画像ではほぼ画像全体に渡って良好な干渉を得ることができた (Fig. 2(c))。

上記の方法とは別に、最初から初期干渉画像を 16 ルック、32 ルックで作成して解析を行ってみたが、初期干渉画像の段階での軌道縞・地形縞を含む干渉縞が平均化されてしまうためか、軌道縞と地形縞を除去した差分干渉画像では位相がランダムに分布し、干渉縞が現れなかった。

軌道縞・地形縞を除去する際、DEM と推定された基線長に基づいてシミュレートした干渉画像を、観測された干渉画像と比較し、両者が最も良く一致するように基線長を最小二乗法で推定している。推定を精度良く行う

ためには、位相から変動量への変換（アンラッピング）を画像の広い範囲で行う必要がある。しかし、今回の干渉画像では干渉が得られていない領域があり、広い範囲でアンラッピングすることができないため、推定精度があまり良くない。また、両者を比較する領域内では変動がないことを仮定しているが、今回解析した領域については、ほぼ全域が地震による変動を受けているため、軌道間距離を精密に推定することは困難である。そのため、作成した差分干渉画像には軌道縞が残存している可能性が高い。

軌道縞をできるだけ取り除くためには、変動が少ないと考えられる南側のシーンを接続して解析し、軌道間距離の推定精度を上げることや、GEONET の観測結果など実際に観測された変動量に基づいて干渉画像を調整するなどの検討が必要である。

§ 4. 検出された位相変化パターン

解析の結果、ほぼ画像全域に渡って干渉した画像を得ることができた (Fig. 3)。干渉図の色は 2 回の観測間での位相の変化量を示し、衛星からその地点までの視線距離の変動量に相当する。なお、衛星は画像の東側からマイクロ波を西向きに照射している。視線距離が短くなる（地表が衛星に近づく）と位相が減少し、逆に視線距離が長くなる（地表が衛星から遠ざかる）と位相が増加する。色の 1 周期は RADARSAT/SAR が用いているマイクロ波の波長の半分 (2.8 cm) の変動にあたる。なお、本稿

Fig. 3. Differential SAR interferogram by RADARSAT for the period from September 17, 2000 to October 11, 2000. This interferogram is 32 look image. The figure shows surface displacements in the line of sight to the satellite associated with the Western Tottori Prefecture Earthquake in 2000. Solid circles are earthquakes with magnitude greater than 1 (2000/9/17–2000/10/11). The stars are epicenters of the Western Tottori Prefecture Earthquake main shock ($M_{JMA}7.3$, 10/6) and the induced earthquake ($M_{JMA}5.5$, 10/8). The hypocenters are determined by JMA and NIED.

での干渉画像は、すべて地図座標(UTM)に投影変換したものである。

2回の観測の間に発生した地震($M_{JMA}1.0$ 以上)の震央分布と干渉画像との関係を見ると、震源域近傍で大きな位相変化が見られることがわかる。震源域の西側では、震央に近づくにつれて位相が減少している。このことは、震源域の西側では震央付近を中心として地表が衛星に近づく向きに変動(隆起もしくは東側への変位)したことを示している。

鳥取県西部地震のメカニズム解は西北西-東南東方向に主圧縮軸をもつストライクスリップ型であったことが示されており[例えば、菊池・山中(2000)]、南北に長い震度分布や余震分布などから北北西-南南東走向の左横ずれ断層と考えられている。干渉SAR解析により得られた位相変化パターンは、このメカニズム解と調和的である。

本震の震源域付近以外にも、10月8日に本震の西側で発生した誘発地震($M_{JMA}5.5$, 深さ8 km)の震源域付近において、干渉縞の不連続が見られる。この位相変化は変動量に換算すると微小であるが、震源域の西側では東側に比べ位相が $1/3\pi$ 程度ずれており、本震と同じく震源域の西側が東側と比較して衛星に近づく向きに変動したことを示している。位相が不連続になる境界が北北西-南南東に並ぶ震央分布と一致することから、この震央分布の方向を走向とするほぼ垂直の断層面が動いたものと考えられる。この地震のメカニズム解は西北西-東南東方向に主圧縮軸をもつストライクスリップ型であり[気象庁・大阪管区気象台(2001)]、北北西-南南東走向の断層面が左横ずれに動いたと考えられる。干渉SAR解析の結果は、これとも調和的である。

弓ヶ浜半島においては、複雑な位相変化パターンが検出された。Fig. 4は、4ルックの干渉画像の弓ヶ浜半島

Fig. 4. An enlarged interferogram near the Yumigahama Peninsula sand bar. This interferogram is 4 looks image. This figure shows complex fringes associated with local surface displacement.

周辺部を拡大したものである。弓ヶ浜半島は地形が平坦で植生も比較的少ないことから、山地ではほとんど干渉が得られていない4ルックの干渉画像においても、非常に良好な干渉が得られている。2回の観測時とも気象条件は安定しており、Fig. 4に見られる位相変化は地表の変動以外の要因（気象の影響等）によるものとは考えにくく、実際に発生した局所的な変動を示している可能性が高い。これについては、後の章で詳述する。

C-bandのSARは、日本のように植生が多い環境では干渉が困難と言われてきたが、今回の解析ではほぼ画像全体に渡って干渉を得ることができた。

しかし、本震の震央ごく近傍においては干渉が得られなかった。これは、地震による地殻変動が大きいため、あるいは地形が険しいためにコヒーレンス（相互相関）が低い、植生の状態が他の地域と異なっている、地震による地殻変動の勾配が大きく、解析の際に平均化する範囲よりも干渉縞の間隔が密になり干渉縞自体が平均化されてしまった、などがその原因として考えられるが、今のところ原因を絞り込むには至っていない。

森林などの植生が多い領域においてもほぼ干渉が得られた理由としては、2時期のデータの時間間隔が短く（24日：RADARSATの回帰周期）植生や地表面の状態

の変化が少なかったこと、軌道間距離の垂直成分が比較的短かった（約260 m）こと、などが考えられる。今回用いたデータは、RADARSATの南極観測ミッション（2000/9/3～11/7）が実施されていた期間に観測されたものであり、衛星の軌道制御が高精度（赤道における地上軌跡が1 km以内）で行われていた。このことから、1回の回帰でも軌道間距離が比較的短く、干渉が得られたと考えられる。

§ 5. 考察

5.1 断層モデルとの比較

鳥取県西部地震については、GPSの観測結果や地震波形のインバージョンなどから断層モデルが推定されている [例えば、鷺谷・西村(2000), Yagi and Kikuchi (2000), 関口・岩田(2000) など]。

Fig. 5は、鷺谷・他(2001)による断層パラメータを用いて計算される地殻変動を衛星視線方向の変動量に換算し、位相変化の空間分布をシミュレートした図である。色の1周期は干渉画像と同じく衛星視線方向の2.8 cmの変動を示している。矢来・他(2001)で用いた鷺谷・西村(2000)の断層パラメータを用いて計算したシミュレーション画像に比べ、震源域近傍で非常に複雑

Fig. 5. Simulated interferogram from the fault model by Sagiya *et al.* (2001). This figure shows calculated surface displacement in the line of sight to the satellite.

なパターンを示している。

Yagi and Kikuchi (2000) や関口・岩田 (2000) の断層モデルを用いて同様のシミュレーションを行ったところ、断層のごく近傍では変動量やパターンに差が見られるものの、今回干渉が得られた領域ではいずれのモデルもほとんど違いが見られなかった。

干渉 SAR 解析で震源域近傍での干渉が得られなかったこと、解析したデータには震源域の北半分しか含まれていないこと、得られた差分干渉画像は軌道縞が完全には除去されていないことから、詳細な議論は難しいが、震央付近から北西方向に伸びる同心の楕円状のパターンが表現されているなど、干渉 SAR 解析の結果と、断層モデルによる位相変化のシミュレーション結果は調和的であるといえる。

誘発地震 ($M_{JMA} 5.5$, 10 月 8 日) に伴う地殻変動のパターンは、観測とシミュレーション結果が比較的一致するものの、シミュレーション結果では断層近傍での干渉縞が不連続ではなく緩やかにつながっている。鷲谷・他 (2001) で用いられている断層のジオメトリは、誘発地震の断層上端の深さが 4.5 km と深めに設定されているために、シミュレートされた位相変化が断層近傍で緩やか

になったと考えられる。それに対し、観測で得られた干渉画像では位相の不連続の境界が非常に明瞭であることから、断層のすべりはかなり浅いところまで達している可能性がある。

C-band の干渉 SAR によって、地震に伴う地殻変動を検出することができたが、本震の震央近傍の山地においては干渉を得ることができなかった。このように、C-band の干渉 SAR は、日本の山地のような地形が険しい地域での地殻変動を検出する目的に用いるには限界がある。

L-band の SAR は C-band の SAR に比べ用いるマイクロ波の波長が長いことから、微小な変動に対する感度は劣るが、植生を透過し地表で反射するため、可干渉性の面では優れている。L-band の JERS-1/SAR では、干渉 SAR 解析により山間部においても良好な干渉が得られている [例えば、藤原・他 (1998), Nishimura *et al.* (2001)]。このように、L-band の SAR データを用いて干渉 SAR 解析を行えば、鳥取県西部地震のように山間部で発生した地震であっても、震源域近傍まで干渉が得られた可能性が高い。断層面上でのすべり分布等を推定するためには、特に震源域近傍での地殻変動を詳細に捉

えることが必要であり、L-band SAR を搭載した衛星の早期運用が望まれる。

それに対し、弓ヶ浜半島のように比較的起伏が少なく平坦な地形の領域では良好な干渉が得られ、微小な変動を検出することができた。したがって、適用する現象、地形、植生条件などを選べば、日本においても、C-band の SAR は地殻変動検出のための有力な手段となり得ると考えられる。

5.2 弓ヶ浜半島の変動

弓ヶ浜半島は、全体が砂州から構成されており、日野川から供給される土砂が沿岸流によって運搬・堆積し形成されたものである。今から約 1200 年前には半島ではなく「夜見島」と呼ばれる砂の島であり、中海の底に形成された砂州の外側に順次浜提列が付け加わる形で半島状の砂州に成長してきた [高安・徳岡 (1993)]。

この弓ヶ浜半島で、明らかに地震に伴う地殻変動によるものとは異なる変動が見られた (Fig. 4)。

半島の北部では、半島の中軸部から東側に向かって衛星から遠ざかる向きの変動が見られる (Fig. 4 中の a)。これは、弓ヶ浜半島が中海側から美保湾側へ順次付け加わっていったという形成過程から、美保湾側の形成年代がまだ新しいために、中海側に比べ変動しやすかったのではないかと考えられる。

また、半島の中軸部では、半島の長軸方向に平行な帯

状に位相の増加-減少のパターンを示している箇所 (Fig. 4 中の b) がみられる。変動が上下成分のみと仮定すると、沈降-隆起となる。これについても、弓ヶ浜形成の過程で半島に平行な砂州列が形成され、その間が軟弱な砂州間低地となったことを反映していると考えられる。

このことは、局所的な変動が地下の構造を反映している可能性があることを示している。

Fig. 6 は、徳山・他 (1990) による縄文海進以前の古地形の復元図である。古地形を示すコンターラインは、大西・松田 (1985) による中海層基底面等高線図を参照している [徳山・他 (1990)]。

干渉画像 (Fig. 4) では、半島先端の境港で境水道に平行な 1~2 cm の沈降 (または西向きの変位) を示す変動の帯 (Fig. 4 中の c) がみられ、Fig. 7 の古地形での河川とはほぼ一致するなどの対応は見られるものの、他の部分では明瞭な関係は見られない。しかし、この等高線図 (Fig. 6) については、弓ヶ浜半島中央部では基盤に達する試錐資料が少なく、不十分な点も多い [大西・松田 (1985)] ことから、さらに詳細な地下構造を用いた比較・検討が必要である。

干渉性に着目すると、弓ヶ浜半島の中軸部ではほぼ全体が干渉しているのに対し、ある境界より外側の美保湾あるいは中海に面する領域では全く干渉していない。国

Fig. 6. Estimated palaeogeographic map about 10,000 years ago based on a depth of Nakaumi formation [after Tokuoka *et al.* (1990)].

Fig. 7. Map showing the distribution of the damage caused by liquefaction [after Geographic Department, GSI (2000)]. Yellow area shows landfill or reclaimed land since 1899. Dark blue area in the yellow area is the area where liquefaction such as sand boil was confirmed.

土地理院地理調査部 (2000) による液状化被害調査図 (Fig. 7) と比較すると、この境界は、明治時代の海岸線にはほぼ一致し、干渉していない領域は、明治以降の埋立地あるいは干拓地であることがわかる。

例として米子空港周辺を詳細に見てみると (Fig. 8(a)), 埋立地・干拓地以外では良好な干渉が得られているのに対し、埋立地・干拓地では干渉が得られず、両者は明確に区別できる。植生が同様であると考えられる空港の滑走路周辺 (Fig. 8(b) 参照) においても、元々陸地であった東半分は良好に干渉しているのに対し、埋立地である西半分は位相がランダムに分布し全く干渉していない。

現地調査などにより、鳥取県西部地震の際にこれらの埋立地・干拓地の多くで地盤の液状化が発生したことが分かっている (Figs. 7, 8(b) の濃い青色部分)。液状化が起こった地域では、噴砂、噴礫や不等沈下による表面の特性の変化や、側方流動などによる地表変動があったと考えられる。このような状況が発生すると、干渉画像においては、隣り合うピクセルの位相変化がランダムになってしまい、結果として干渉が失われてしまう。

例えば、兵庫県南部地震では人工島であるポートアイランドや六甲アイランドにおいて大規模な液状化が発生したが、JERS-1 の干渉 SAR 解析では、これらの場所では位相が大きくばらついていて [藤原・他 (2000)]。

したがって、弓ヶ浜半島外周部の干渉が得られなかつ

た埋立地・干拓地の多くでは、地盤の液状化のために干渉が失われてしまったと考えられる。また、埋立地・干拓地のうち現地調査などで液状化現象が確認されなかった場所においても、表面現象として現れていないだけで実際には液状化が起っていた可能性がある。

空中写真の判読では、これらの沿岸部においては、噴砂が発生していない場所においても明らかに液状化による地下水の上昇で地盤が変色している箇所も多く見られた [谷田部 (2001)]。しかし、砂質土で通常から排水の良い部分以外では色調の変化が液状化によるものかどうか判断しにくいので、全体的な統一性から液状化被害調査図 [国土地理院地理調査部 (2000)] には表示されていない [谷田部 (2001)]。このように、光学センサに類するものでは判断が難しい箇所においても、SAR データの干渉性に着目することで、液状化が発生したかどうかを判断できる可能性がある。

このように、SAR データを用いることにより、液状化の被害地域を抽出できる可能性があると考えられる。しかし、干渉性に影響する要素 (例えば土地の利用状況) の検討についてまだ不十分な点があり、今後の検討が必要である。

§ 6. ま と め

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震 ($M_{\text{JMA}} 7.3$)

Fig. 8. (a) An enlarged interferogram near the Yonago airport. The region surrounded by white line shows landfill or reclaimed land [after Geographic Department, GSI (2000)]. The black area shows water area. (b) The map of damage by liquefaction near the Yonago airport enlarged from Fig. 7.

の前後に RADARSAT が取得した C-band SAR データを用いて干渉 SAR 解析を行った。解析の結果、ルック数を大きく取ることにより、ほぼ画像全域にわたって干渉を得ることができ、地震に伴う地殻変動による位相変化を面的に検出することができた。

検出された位相変化は、GPS 観測結果などにより推定された断層モデルから想定される地殻変動とほぼ調和的である。

また、本震による地殻変動だけでなく、本震の2日後に西側で発生した $M_{JMA} 5.5$ の誘発地震による微小な地

殻変動も検出した。

砂州で構成される弓ヶ浜半島において、局所的な変動を検出した。このような局所的な変動は、地盤の構造を反映している可能性があると考えられる。

弓ヶ浜半島の外周部の埋立地・干拓地においては、干渉が得られなかった。これは、地盤の液状化による表面の特性の変化や、側方流動などにより位相変動がランダムとなったためであると考えられる。このことから、SAR データの干渉性に着目することで、液状化の被害地域を抽出できる可能性があると考えられる。

今回、C-band の SAR データを用いた干渉 SAR により地殻変動を検出できたことは、植生の多い日本においても火山のモニタリングや地震による地殻変動の検出に適用できる可能性を示すものである。そのためには、今回のように軌道が精密に制御されていることが望まれる。ただ、今回の解析で震央近傍において干渉が得られなかったことからわかるように、地殻変動をより詳細に捉えるためには C-band SAR では干渉性が不十分であり、より干渉性の高い L-band SAR を搭載した衛星の早期運用が望まれる。

しかし、弓ヶ浜半島のように比較的起伏が少なく平坦な地形の領域では良好な干渉が得られ、微小な変動を検出することができたことから、適用する現象、地形、植生等を選べば、日本においても、C-band の干渉 SAR は地殻変動検出のための有力な手段となり得ると考えられる。

謝 辞

本研究に用いた RADARSAT データの所有権は CSA にあり、国土地理院と宇宙開発事業団との共同研究協定に基づき、宇宙開発事業団より提供を受けたものです。震源データについては、科学技術庁防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学、通商産業省工業技術院地質調査所、東京都、静岡県、神奈川県温泉地学研究所、横浜市、海洋科学技術センター、および気象庁により収集され、気象庁・科学技術庁が協力してデータを処理した結果を使用させていただきました。また、査読者の大村 誠氏、吉岡祥一氏には適切なコメントをいただき、本稿の内容を改善する上で非常に有益でした。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

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」(内藤勲夫編), 192, 199-212.

- Fujiwara, S., H. Yarai, S. Ozawa, M. Tobita, M. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, P. A. Rosen and C. L. Werner, 1998, Surface displacement of the March 26, 1997 Kagoshima-ken-hokubu earthquake in Japan from synthetic aperture radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4541-4544.
- Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M., Rosen, P. A., 2000, 2.5-D surface deformation of M6.1 earthquake near Mt Iwate detected by SAR interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2049-2052.
- 藤原 智・小沢慎三郎・村上 亮・飛田幹男, 2000, 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, 地震 2, **53**, 127-136.
- Goldstein, R. M. and C. L. Werner, 1998, Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 4035-4038.
- 菊地正幸・山中圭子, 2000, 2000 年 10 月 6 日鳥取県西部の地震 (M_{JMA} 7.3), EIC 地震学レポート No. 93s.
- 気象庁・大阪管区気象台, 2001, 近畿・中国・四国地方とその周辺の地震活動 (2000 年 5 月~2000 年 10 月), 地震予知連絡会報, **65**, 451-463.
- 国土地理院, 2001a, 中国地方の地殻変動, 地震予知連絡会報, **65**, 592-622.
- 国土地理院, 2001b, 鳥取県西部地方の上下変動, 第 141 回地震予知連絡会提出資料, 142-144.
- 国土地理院地理調査部, 2000, 鳥取県西部地震緊急調査報告, 国土地理院地理調査部ホームページ (<http://www1.gsi.go.jp/ch1www/tottorijisin-hp/tottorijisin.html>).
- Massonet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute, 1993, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, **364**, 138-142.
- Massonet, D., K. L. Feigl, H. Vadon and M. Rossi, 1996, Coseismic deformation field of the M=6.7 Northridge, California, earthquake of January 17, 1994, recorded by two radar satellites using interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 969-972.
- 村上 亮・藤原 智・斎藤 隆, 1995, 干渉合成開口レーダを使用した平成 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.
- Murakami, M., M. Tobita, S. Fujiwara, T. Saito and H. Masaharu, 1996, Coseismic crustal deformation of 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometric JERS-1 synthetic aperture radar, *J. Geophys. Res.*, **101**, 8605-8614.
- Nishimura, T., S. Fujiwara, M. Murakami, M. Tobita, H. Nakagawa, T. Sagiya and T. Tada, 2001, The M6.1 Earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 635-638.
- 大西郁夫・松田士朗, 1985, 出雲海岸平野下の第四紀堆積物, 山陰地域研究 (自然環境), **1**, 51-60.
- Ozawa, S., Mak. 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.
- Rosen, P. A., S. Hensley, H. A. Zebker, F. H. Webb and E. J. Fielding, 1996, Surface deformation and coherence measurements of Kilauea volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, *J. Geophys. Res.*, **101**, 23109–23125.
- 鷺谷 威・西村卓也, 2000, GPS で見た 2000 年鳥取県西部地震, 日本地震学会 2000 年秋季大会, T28.
- 鷺谷 威・西村卓也・畑中雄樹・福山英一・W. L. Ellsworth, 2002, 2000 年鳥取県西部地震に伴う地殻変動と断層モデル, *地震*, **54**, 523–534.
- Sandwell, D. T., L. Sichoix, S. Agnew, Y. Bock and J. Minster, 2000, Near real-time radar interferometry of the M_w 7.1 Hecctor Mine Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3101–3104.
- 関口春子・岩田知孝, 2000, K-net, KiK-net 地震記録を用いた断層破壊過程の推定, 京都大学防災研究所地震災害研究部門強震動地震学研究分野ホームページ (<http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/iwata/ttr.source.html>).
- Sigmundsson, F., P. Durand and D. Massonnet, 1999, Opening of an eruptive fissure and seaward displacement at Piton de la Fournaise volcano measure by RADARSAT satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 533–536.
- 高安克己・徳岡隆夫, 1993, 海跡湖の地史—1 中海・宍道湖, *URBAN KUBOTA*, **32**, 38–47.
- Tobita, M., S. Fujiwara, S. Ozawa, P. A. Rosen, E. J. Fielding, C. L. Werner, Mas. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, and Mak. Murakami, 1998, Deformation of the 1995 North Sakhaline earthquake detected by JERS-1/SAR interferometry, *Earth Planets Space*, **50**, 313–325.
- 徳山隆夫・大西郁夫・高安克己・三梨 昂, 1990, 中海・宍道湖の地史と環境変化, *地質学論集*, **36**, 15–34.
- Yagi, Y. and M. Kikuchi, 2000, Source Rupture Process of the Tottori-ken Seibu earthquake of Oct. 6, 2000, 東京大学地震研究所ホームページ (<http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/tottori/>).
- 谷田部好徳, 2001, 2000 年鳥取県西部地震における液化被害の状況, *国土地理院時報*, **95**, 129–137.
- 矢来博司・村上 亮・飛田幹男・中川弘之・藤原 智, 2001, RADARSAT の干渉 SAR でとらえた平成 12 年 (2000 年) 鳥取県西部地震に伴う地殻変動, *国土地理院時報*, **95**, 139–145.
- 米澤千夏・竹内章司, 1997, ERS-1/SAR のインターフェロメトリによる地形変動抽出可能性の検討, 写真測量とリモートセンシング, **36**, 59–63.
- 米澤千夏・竹内章司, 1999, ERS-1/SAR インターフェロメトリにおける基線長推定の方法及その地盤沈下検出への応用, 写真測量とリモートセンシング, **38**, 59–64.
- 米澤千夏・竹内章司, 2000, C バンド SAR データの干渉を用いた日本列島における地形変動抽出のための実験的検討, *測地学会誌*, **46**, 109–124.
- Zebker, H. A., P. A. Rosen, R. M. Goldstein, A. Gabriel and C. L. Werner, 2000, On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry; The Landers earthquake, *J. Geophys. Res.*, **99**, 19617–19634.