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
Crustal deformation of The Western Tottori prefecture earthquake in 2000 detected by RADARSAT SAR interferometry

地理地殻活動研究センター　矢来博司・村上　亮・飛田幹男・中川弘之
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Hiroshi YARAI, Makoto MURAKAMI, Mikio TOBITA and Hiroyuki NAKAGAWA

文部科学省研究開発局　藤原　智
Research and Development Bureau,
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology
Satoshi FUJIWARA

要　旨

平成12年（2000年）鳥取県西部地震の震央付近の地域について，RADARSATが地震発生前（9／17）と発生後（10／11）に取得したデータを用いて干渉SAR解析を行った。

解析の結果，ほぼ画像全域にわたって良好な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検出することができた。

解析により得られた地殻変動のパターンは，GEONETの観測結果から求められた断層モデルにより推定される地殻変動のパターンと大局的には調和している。

10／6の地震の西側で起こった誘発地震の震央付近と弓ヶ浜半島において，モデル計算とは異なる位相変化が見られた。誘発地震の震央付近では干渉縞が不連続になっており，誘発地震による地殻変動を示していると考えられる。

弓ヶ浜半島では地震の断層運動による地殻変動とは異なる局地的な変動が検出された。また，明治以前から陸地であった場所では非常によく干渉しているのに対し，明治以降の埋立地・干拓地では干渉が得られなかった。これらの地域の多くで液状化現象が発生していることから，干渉SARによる液状化発生地域の抽出可能性が示唆される。

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。日本で発生した内陸地震としては，1995年の兵庫県南部地震（M_{jma}7.2）以来のM7クラスの地震である。この地震により，震央付近では家屋損壊や崖崩れが多発し，道路，鉄道などの交通網やライフラインが大きな被害をうけた。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。

GEONETの連続観測データの解析により，この地震に伴う地殻変動が捉えられた。また，水準測量により，震源域近辺の地震に伴う上下変動が明らかにされている。

GPS観測や従来の測地測量により得られる地殻変動データが観測点のみの離散データであるのに対し，合成開口レーダーの干渉処理（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，1995年の兵庫県南部地震に伴う地殻変動が干渉SARにより捉えられ，断層モデルが推定されている（Ozawa et al., 1998）。

今回，鳥取県西部地震の震央を含む地域について，RADARSATが地震前と地震後に観測したデータを用いて干渉SAR解析を行い，地震に伴う地殻変動を捉えたのでその結果について報告する。

2. 干渉SARによる地殻変動検出

Massonnet 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に伴う地殻変動をERS-1を用いて明らかにした。これ以後，1994年のノースリッジ地震（Massonet et al., 1996, Murakami et al., 1996等），1995年のサハリン北部地震（Tobita et al., 1998），1999年のヘクターマイン地震（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で捉えられている。

日本では，JERS-1の干渉SAR解析により，兵庫県南部地震（村上ほか，1995, Ozawa et al., 1998等）や鹿児島県西部地震（Fujiwara et al., 1998等）に伴う地殻変動が捉えられている。

また，本研究で用いた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）などがある。

SARに用いられるマイクロ波は，波長によってX-band（波長24.0～37.5mm），C-band（波長37.5～75.0mm），

L-band（波長150～300mm）などに分けられる。JERS-1はL-band，ERS-1，2やRADARSATはC-bandのマイクロ波を用いている。

日本をフィールドとした干渉SARによる地殻変動検出に関するこれまでの研究は，JERS-1が搭載していたL-bandのSARデータを用いた解析が多く，ERS-1，2やRADARSATのようなC-bandのSARによる地殻変動検出の試みはまだ少ない（米澤・竹内，2000）。

マイクロ波の波長は短いほど，干渉SARによる地表変動の検出性が高くなる。しかし，波長が短くなるほど光の性質に近づき，葉や草を透過することができなくなる。

L-bandのマイクロ波は，C-bandのマイクロ波に比べて波長が長く，森林等の植生を透過し，地表で反射すると考えられるのに対し，波長の短いC-bandのマイクロ波はその植生の表面で反射すると考えられる。植生は，成長や落葉などにより，その表面が時間と共に変化する。また，風による動揺などでも表面の状態が変化することが考えられる。そのような変化があった場合，2回のSAR観測のそれぞれで反射するマイクロ波の状態が異なるため，干渉が得られない。

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）。このことから，日本のように植生が多い環境では，L-bandのSARに比べ，C-bandのSARは可干渉性の点で不利であると考えられてきた。

今回の解析では，これまでの予想に反し，C-bandのSARであるRADARSATを用いた干渉SAR解析により，ほぼ画像全域にわたって干渉を得ることができたので，その結果について以下に述べる。

3. 解析

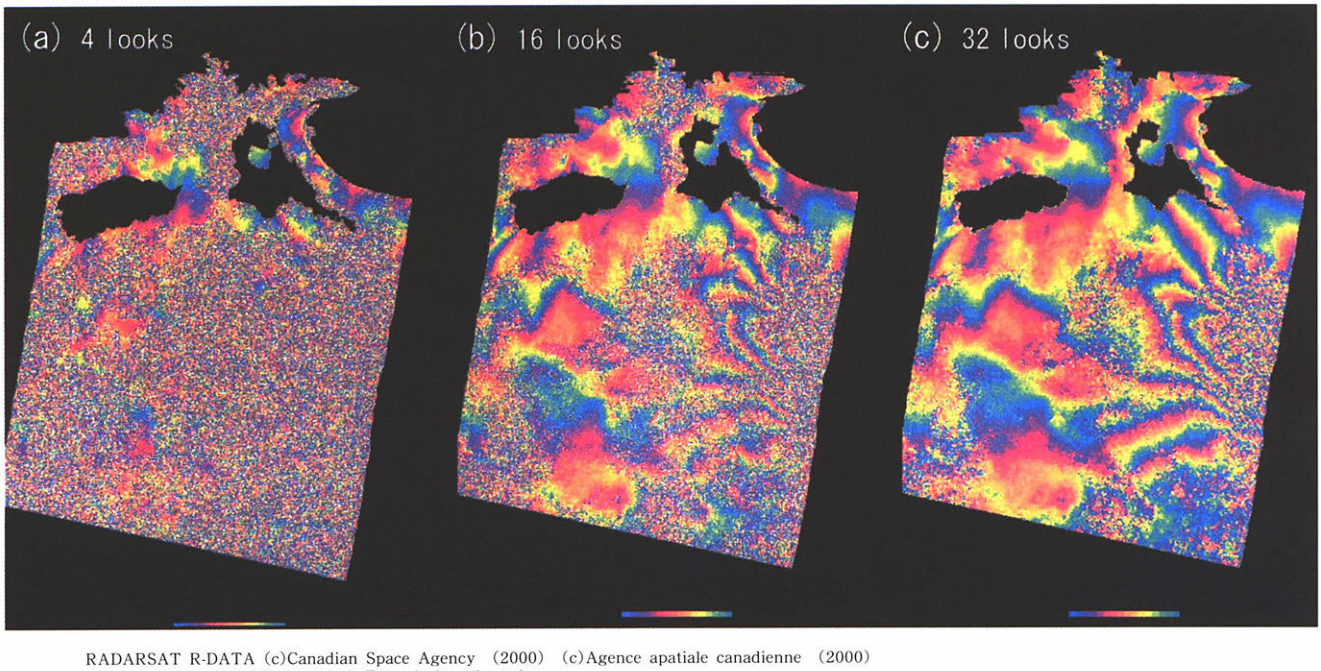
2000年鳥取県西部地震の震央付近の地域について，地震前と地震後の二時期のデータを用いた2パス法干渉SAR解析を行った。用いたデータは，地震をはさむ2000年9月17日(JST)と10月11日(JST)にRADARSATが観測したデータである。

RADARSATは，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，最も空間分解能の高いファインモード（10m）で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。

また，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。

C-bandのSARはL-bandのSARと比較して干渉性が悪いため，干渉を得るために，ピクセル間の平均をとる範囲を示すマルチルック数を，JERS-1の解析よりも大きくとった。一般に，ピクセル間の平均範囲を広くとると，干渉性が向上する。

まず，4ルックの初期干渉画像から軌道縞・地形縞を除去して4ルックの差分干渉画像（図1(a)）を作成し，それをさらに4ルック（4×4＝16），8ルック（4×8＝32）することで16ルック（図1(b)），32ルック（図1(c)）の画像を作成した。最初から16ルック，32ルックで干渉画像を作成すると，初期干渉画像，疑似干渉画像と



RADARSAT R-DATA (c)Canadian Space Agency (2000) (c)Agence apatiale canadienne (2000)
All right reserved. Tous droits re'serve's.
データ提供：宇宙開発事業団

図－1　マルチルック数を変えた干渉画像の比較。いずれの画像も，マルチルック処理後にGoldstein and Werner (1998)によるフィルターをかけている。
(a) 4 looks, (b) 16 looks (4 looks×4 looks), (c) 32 looks (4 looks×8 looks)

も縞がつぶれてしまい，最後の差分画像にフリンジがあらわれない。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わたって良好な干渉が得られた（図１(c)）。

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。

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ている変動量に基づいて干渉画像を調整することなど，今後の検討が必要である。

4. 解析結果

解析の結果，ほぼ画像全体にわたって良好に干渉した画像を得ることができた（図２）。干渉図の色は，衛星視線方向の変動量を示し，色の1周期はRADARSATが用いるマイクロ波の波長の半分（2.8cm）の変動にあたる。なお，この干渉画像は，地図座標に投影変換したものである。

図２を見ると，中海の南側に同心円状の干渉縞が現れているのがよく分かる。

干渉画像に震源分布を重ねてみると（図３），震源域近傍で変動が大きいことがわかる。この位相変化は，震央付近を中心として震源域の西側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。

地震波形を用いた研究（例えば，菊地・山中，2000）により，この地震のメカニズムは西北西－東南東圧縮の横ずれ断層型であったことが示されており，震度分布や余震分布等から北北西－南南東走向の左横ずれ断層と考えられている。干渉SAR解析から得られた変動は，このメカニズムと調和的である。

今回の解析では，変動が大きいと考えられる震源域近傍においては，ほとんど干渉が得られていない。これは地震による地殻変動が大きい，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，等がその原因として考えられる。

10／６の地震の西側で，干渉縞が不連続になっている箇所が認められる。この箇所は，余震域から西南西に約25km離れたところで10／８に発生したM_{jma}5.5の地震の震源域とよく一致する（図３）。したがって，この干渉縞の不連続は，誘発された地震による地殻変動を示しているものと考えられる。また，その変動のパターンから，この誘発された地震は，震源断層の向きがこの地震に伴う余震域の方向に一致し，10／６の地震と同じ左横ずれの断層運動であったと考えられる。

C-bandのSARは，日本のように植生が多い環境では干渉解析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わたって干渉を得ることができた。理由は現在のところよく分からないが，軌道間隔が比較的短かった（約260m）こと，２つのデータの時間間隔が短く（24日），２回のデータ間で地表面の変化が少なかったこと，等が考えられる。この24日という時間間隔は，RADARSATの回帰周期にあたり，１回の回帰で軌道間隔が約260mとRADARSATとしては短かったことから，今回の条件は非常に幸運であったといえる。

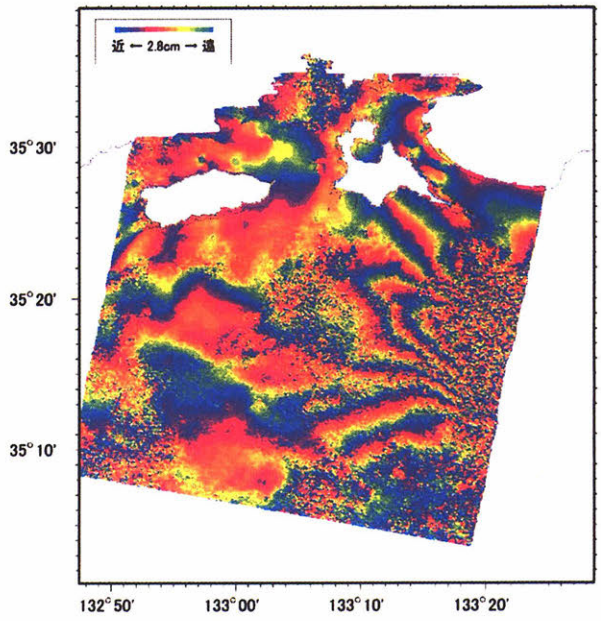
5. 考察

5. 1　断層モデルとの比較

鳥取県西部地震については，GPSや地震波の観測結果等から，いくつかの断層モデルが提出されている（例えば，鷺谷・西村，2000，Yagi and Kikuchi，2000，関口・岩田，2000等）。

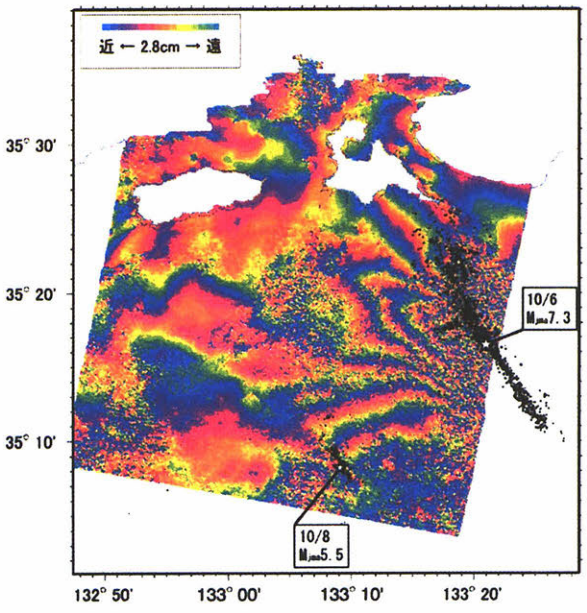
鷺谷・西村（2000）によるGEONETのデータから推定された断層モデル（表１）に基づき，地殻変動による位相変化のパターンを計算した（図４）。色の1周期は干渉画像と同じく衛星視線方向の2.8cmの変動を示している。このシミュレーション画像と解析により得られた干渉画像（図２，３）とを比較すると，10／８に発生したM_{jma}5.5の地震の震央付近での変動と，弓ヶ浜半島に見られる局地的な位相変化を除けば，大局的には調和しているといえる。しかし，干渉画像のフラットニングがまだ十分でないと考えられるため，さらに検討が必要である。

また，地震波形から求められた他の断層モデル（Yagi and Kikuchi，2000，関口・岩田，2000）についても同様の計算を行ったが，断層のごく近傍での位相変化パ



RADARSAT R-DATA (c)Canadian Space Agency (2000)
(c)Agence apatiale canadienne (2000)
All right reserved. Tous droits re'serve's.
データ提供：宇宙開発事業団

図２　RADARSATデータ（2000年9月17日-10月11日）の干渉SAR解析により得られた干渉画像



RADARSAT R-DATA (c)Canadian Space Agency (2000)
(c)Agence apatiale canadienne (2000)
All right reserved. Tous droits re'serve's..
データ提供：宇宙開発事業団

図3　解析により得られた干渉画像と震源を重ねて表示。データ取得間隔にあたる2000年9月17日06:07から10月11日06:07までの震源を表示している。震源は気象庁・科学技術庁による一元化処理結果を使用した。

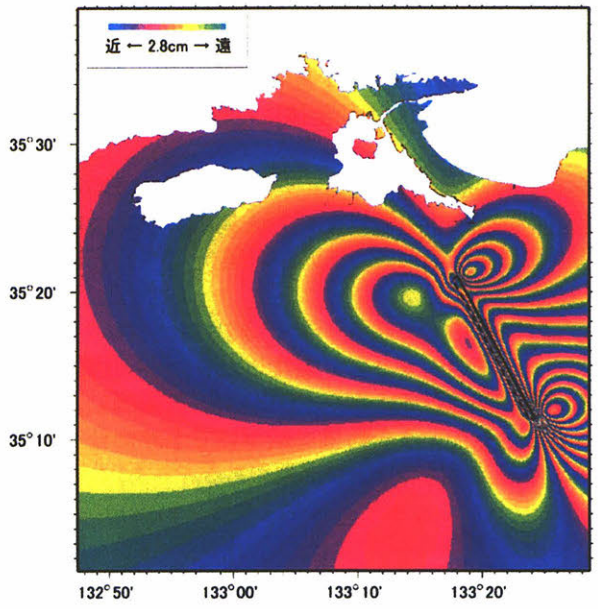


図4　鷺谷・西村（2000）の断層モデルを用いて計算した地殻変動による位相変化のシミュレーション画像。黒の実線は断層の上端を示す。

表－1　計算に用いた断層パラメータ。鷺谷・西村（2000）による。

断層北西端の位置	35.35°N,　133.30°E
断層上端の深さ	1 km
断層の大きさ	20km（長さ）×10km（幅）
走向	N152°E
傾斜角	86°
すべり角	-7°
すべり量	1.4m

ターンに差が見られたものの，断層から離れた領域ではモデル間で大きな差は見られなかった。

今回の解析では，震源域近傍において干渉が得られず，変動量が不明であるため，個々の断層モデルとの詳細な比較・検討は困難である。また，今回の解析結果のみから，断層面上でのすべり分布等，より詳細な断層モデルを推定することは難しい。

C-bandのSARは，用いるマイクロ波の波長が短いため，微小な変動を検出することが可能であるが，その反面，マイクロ波が植生の表面で反射するため，植生が多い地域では干渉性が低くなる。

L-bandのSARは，C-bandに比べ，用いるマイクロ波の波長が長いことから，微小な変動の検出性には劣るが，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。したがって，日本のように植生が多い地域では，L-bandのSARが有利である。

藤原ほか（1998）は，L-bandのSARを搭載したJERS-1（ふよう1号）のデータを解析し，兵庫県南部地震による地殻変動を検出したが，その解析の結果，震源域の北方の山間部においてもよく干渉した画像を得ている。このように，L-bandのSARデータを用いて干渉SAR解析を行う場合，今回の地震のように山間部で発生した地震でも，震源域近傍まで干渉が得られた可能性が高い。

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。

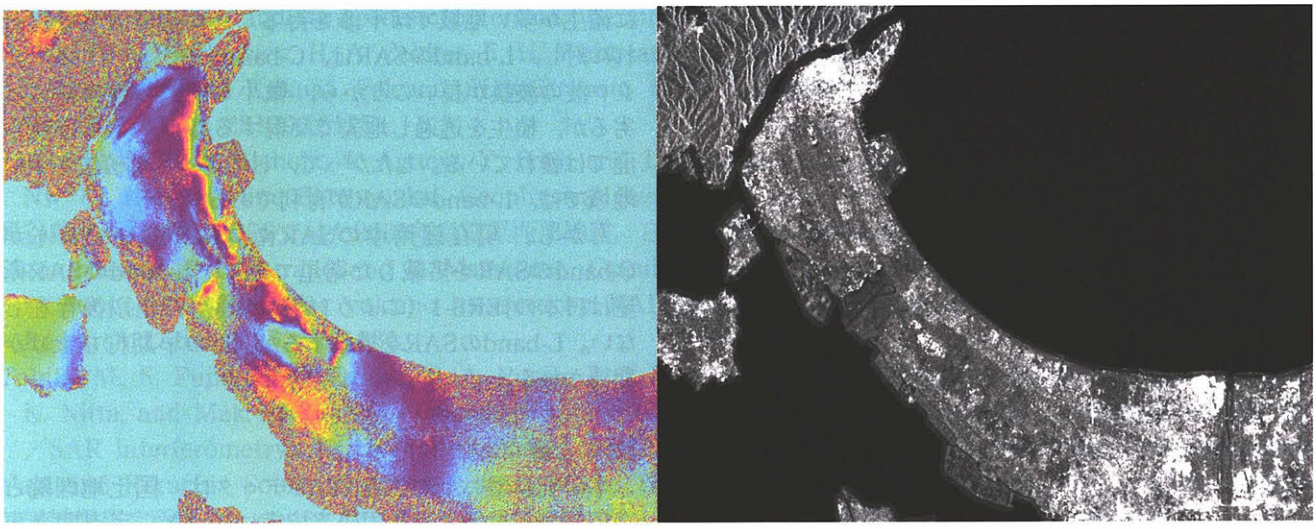
今から約1200年前に編纂された『出雲国風土記』によれば，その当時の弓ヶ浜半島は「夜見島」とよばれる砂の島であった。中海の底に形成された砂州の外側に順次浜提列が付け加わる形で半島状の砂州に成長してきた（高安・徳岡，1993）。

この弓ヶ浜半島において，地震に伴う地殻変動によるものとは異なる局地的な位相変化が検出された（図5(a)）。弓ヶ浜半島は地形がなだらかなためか，全体的に良く干渉しており，局地的な位相変化がきれいに現れている。この位相変化は，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，実際の変動を示しているものと考えられる。

今回利用したRADARSATのデータは，JERS-1やERS-1，2に比べて解像度が高く，変動している場所の特定がしやすい。

半島の北部では，半島の中軸部から東側に向かって，

(a)　(b)



RADARSAT R-DATA (c)Canadian Space Agency (2000) (c)Agence apatiale canadienne (2000)
All right reserved. Tous droits re'serve's.
データ提供：宇宙開発事業団

図5　弓ヶ浜半島の拡大図。4ルック画像を拡大したもの。画像は地図座標に投影する前の，レーダー座標系の画像。縦軸がアジマス方向，横軸がレンジ方向。　(a)干渉画像，(b)強度画像

衛星から遠ざかる向きの変動が見られる。これは，弓ヶ浜が中海側から美浦湾側へ順々に付け加わっていったという形成過程から，美浦湾側の形成年代がまだ新しいため，中海側に比べ地盤が軟弱で変動しやすかったものと考えられる。

また，米子空港（半島中部の反射強度が弱い領域）では，周囲に比べ，相対的に1～2cm程度衛星に近づく向きの変動が見られるが，これは，半島全体が砂州であることから，空港が隆起したのではなく，逆に周囲が全体的に沈下したものと考えられる。

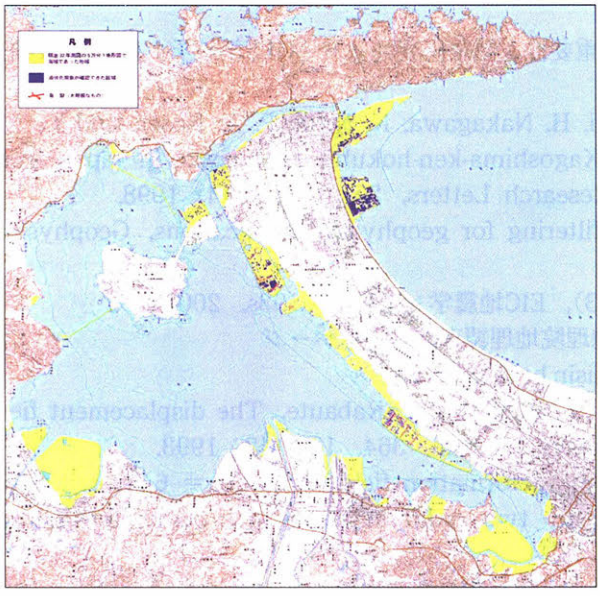


図6　国土地理院地理調査部による液状化被害調査図（国土地理院地理調査部，2000より）。黄色の領域は，明治32年の5万分の1地形図で海域であった地域を示す。青い領域は，液状化現象が確認された区域。

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，ある境界より外側では全く干渉していない。この両者は，反射波の強度画像（図5(b)）ではほとんど差が見られないにもかかわらず，干渉画像では明確に区別される。例えば，米子空港では，東半分は黄～赤の干渉色を示しているのに対し，西半分は位相がランダムに分布し全く干渉していない。

国土地理院地理調査部（2000）による液状化被害調査図（図6）と比較すると，この明瞭な境界線は，ほぼ明治時代の海岸線に一致し，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。また，現地調査等により，これらの埋立地・干拓地の多くでは，地盤の液状化が発生したことがわかっている。液状化が起こった地域では，噴砂や噴礫により地表が覆われたり，不等沈下を起こしたりすることにより，表面の特性が変化することが考えられる。

これらのことから，弓ヶ浜半島の外周部において干渉が得られなかった地域では，地盤の液状化が起こったために，地表の特性が変化し，干渉が得られなかったと考えられる。また，埋立地・干拓地のうち，現地調査等で液状化現象が確認されていない場所であっても，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こっていた可能性がある。

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，土地の利用状況等，干渉性に影響する要素の検討についてまだ不十分な点があり，干渉画像を地図座標に投影するなど地図と直接比較できる形で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_{jma}7.3)に関して，地震前後にRADARSATによって取得されたデータを用いて干渉SAR解析を行った。解析の結果，ほぼ画像全域にわたって良好な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検出することができた。

解析により得られた位相変化のパターンは，GEONETの観測結果から推定された断層モデルによる変動パターンから推定されるものとほぼ調和的である。

震源域近傍では干渉が得られず，変動量は不明である。干渉が得られなかった原因としては，変動量が大きいこと，あるいは地形が険しく，コヒーレンスが低いこと,植生等の状態が他の地域と異なっていること，等が考えられる。

得られた干渉画像について検討した結果，10／6の地震の西南西約25kmのところで10／8に発生したM_{jma}5.5の誘発地震による地殻変動をとらえていることがわかった。この地殻変動のパターンから，断層は左横ずれで，断層の向きは余震分布と同じ北西－南東方向と考えられる。

弓ヶ浜半島における局地的な変動をとらえることができた。半島の中軸部では非常によく干渉しているのに対し，明治以降の埋立地・干拓地では干渉が得られなかった。これらの埋立地・干拓地では，地盤の液状化のため，干渉が得られなかったと考えられる。

今回の解析において，震源域近傍で干渉が得られなかったように，C-bandのSARを用いた場合，日本のように植生が多い地域では干渉を得ることが困難である。それに対し，L-bandのSARは，C-bandに比べ，用いるマイクロ波の波長が長いことから，微小な変動の検出性には劣るが，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。したがって，日本のように植生が多い地域では，L-bandのSARが有利である。

しかし，現在運用中のSAR衛星はそのいずれもがC-bandのSARを搭載した衛星であり，L-bandのSAR衛星は日本のJERS-1（ふよう1号）の運用停止以後存在しない。L-bandのSARを搭載するALOSの早期打ち上げが期待される。

謝　辞

本研究に用いたRADARSATデータは，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，及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。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，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)，192，199-212，2000.

Fujiwara, S., H. Yarai, S. Ozawa, M. Tobita, M. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, P. A. Rosen and C. L. Werner, Surface displacement of the March 26, 1997 Kagoshima-ken-hokubu earthquake in Japan from synthetic aperture radar interferometry, Geophysical Research Letters, 25, 4541-4544, 1998.

Goldstein, R. M. and C. L. Werner, Radar interferogram filtering for geophysical applications, Geophysical Research Letters, 25, 4035-4038, 1998.

菊地正幸・山中圭子，2000年10月6日鳥取県西部の地震（M7.3)，EIC地震学レポートNo.93s，2000.

国土地理院地理調査部，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/tottori-jisin.html)，2000.

Massonet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute, The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, 364, 138-142, 1993.

Massonet, D., K. L. Feigl, H. Vadon and M. Rossi, Coseismic deformation field of the M = 6.7 Northridge, California, earthquake of Janualy 17, 1994, recorded by two radar satellites using interferometry, GeophysicalResearch Letters, 23, 969-972, 1996.

村上亮・藤原智・斎藤隆，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，83，24-27，1995.

Murakami, M., M. Tobita, S. Fujiwara, T. Saito and H. Masaharu, Coseismic crustal deformation of 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometric JERS-1 synthetic aperture radar, Journal of Geophysical Research, 101, 8605-8614, 1996.

Ozawa, S., Mak. Murakami, S. Fujiwara and M. Tobita, Synthetic aperture radar interferogram of the 1995 Kobe earthquake and its geodetic inversion, Geophysical Research Letters, 24, 2327-2330, 1997.

Rosen, P. A., S. Hensley, H. A. Zebker, F. H. Webb and E. J. Fielding, Surface deformation and coherence measurements of Kilauea volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry, Journal of Geophysical Research, 101, 23109-23125.

Sandwell, D. T., L. Sichoix, S. Agnew, Y. Bock and J. Minster, Near real-time radar interferometry of the Nw 7.1 Hetctor Mine Earthquake, Geophysical Research Letters, 27, 3101-3104, 2000.

鷺谷威・西村卓也，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，T28，2000.

Sigmundsson, F., P. Durand and D. Masssonet, Opening of an eruptive fissure and seaward displacement at Piton de la Fournaise volcano measure by RADARSAT satellite radar interferometry, Geophysical Research Letters, 26, 533-536.

Tobita, M., S. Fujiwara, S. Ozawa, P. A. Rosen, E. J. Fielding, C. L. Werner, Mas. Murakami, H. Nakagawa, K. Nitta, and Mak. Murakami, Deformation of the 1995 North Sakhalin earthquake detected by JERS-1 ／SAR interferometry, Earth Planets Space, 50, 313-325, 1998.

Yagi and Kikuchi, 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://wwweic.eri.u-tokyo.ac.jp/yuji/tottori/），2000.

関口春子・岩田知孝，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），2000.

高安克己・徳岡隆夫，海跡湖の地史－1　中海・宍道湖，URBAN KUBOTA，32，38-47，1993.

米澤千夏・竹内章司，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，46，109-124，2000.