

平成12年(2000年)の火山及び地震災害に関する国土地理院の活動

有珠山噴火に伴う水準測量

有珠山噴火に伴う測距・測角観測

有珠山における自動観測監視施設の設置

GPS連続観測による有珠山の地殻変動監視について

SAR画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動, 変動速度, 体積変化

有珠山西山周辺の火山活動に伴う標高値の変化

デジタル写真測量による有珠山の面的な地表変動の時系列把握

有珠山噴火に伴う火山活動と地形変化

有珠山航空磁気測量図の作成

有珠山噴火に係る緊急印刷と数値地図情報の緊急出力

火山災害対策GIS用データの提供

2000年有珠山噴火にともなうマグマモデルGPS連続観測を主とする地殻変動データによる推定

三宅島火山活動, 新島・神津島近海の地震活動及び鳥取県西部地震に伴う地殻変動の監視について

伊豆諸島北部で2000年に発生した火山・地震活動に関連した地殻変動

三宅島山頂の陥没地形の計測

2000年鳥取県西部地震における液状化被害の状況

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

神津島 南西へ 約63cm  
御蔵島 北西へ 約18cm

7月6日頃から新島一式根島、式根島-神津島、神津島-新島間の距離が、それぞれ伸び始め、地震等地殻活動の消長に伴って加速と停滞を繰り返しながら、ほぼ一様な伸びを示しており、8月19日頃からその伸びの速度が鈍化してきたが、伸びの傾向は続いており、8月29日までの総変化量は次のとおりである。◇

新島 - 式根島間 約30cmの伸び  
式根島 - 神津島間 約40cmの伸び  
神津島 - 新島間 約82cmの伸び

4. 三宅島、新島・神津島周辺の最新の地殻変動

三宅島、新島・神津島周辺の最新の地殻変動ベクトルは図-9.1, 9.2のとおりである。基準データは活動が活発化する前の平成12年6月21日～6月25日とし、最新の比較データは、平成13年1月16日とした。式根島を挟んで新島-神津島間が大きく広がっていること(80cm以上)、三宅島全体が収縮していること(三宅2は91cm)、三宅4が98cm、三宅2が80cmの沈降していることがそれぞれ観測されている。

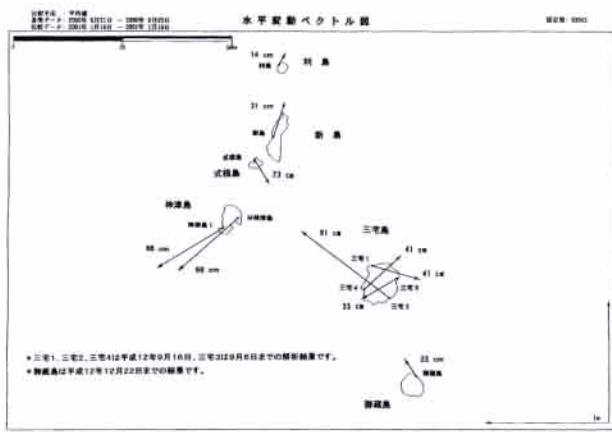


図-9.1

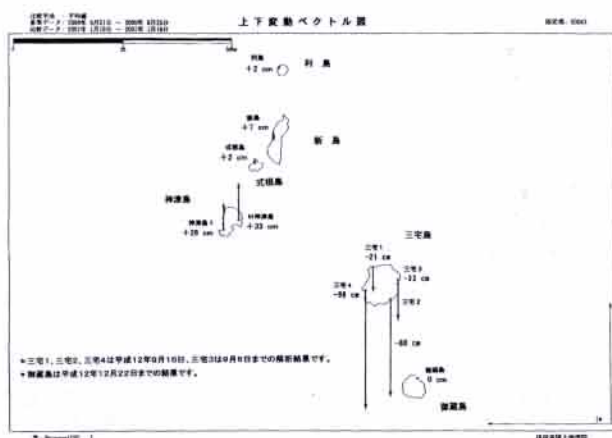


図-9.2

5. 鳥取県西部の地震活動に伴う地殻変動の監視

測地観測センターでは、10月6日13時30分頃、鳥取県西部でM7.3の地震発生に伴い、震度の大きかった周辺地域の電子基準点34点について、緊急解析システムを活用して3時間ごとのデータダウンロードと6時間データの解析を即開始した。解析結果から地震の断層運動を示す地殻変動が観測され、解析結果を地震調査委員会等に提供し、鳥取県西部の地震のメカニズムを解明する上での基礎資料を提供することができた。

平成12年10月6日臨時に開催された地震調査委員会では、東西方向に圧力軸を持つ横ずれ型、北北西-南南東の震源断層が左横ずれしたと考えられる。」評価がされた。

さらに、地震後の余効変動などの観測の強化のため臨時のGPS連続観測点T西伯、T黒坂の2点を設置し、10月16日から観測を開始した。

6. 鳥取県西部地震に伴って記者発表した地殻変動

① 平成12年10月7日(土) 00時15分の記者発表  
◇ 6日の鳥取県西部地震に伴うGPS連続観測結果:平成12年10月6日13時30分頃鳥取県西部で発生したM7.3の地震に伴い、6日21時までのデータから地震の断層運動を示す最大約17cmの地殻変動が観測された(鳥根県三隅町の三隅観測点を固定)。

震源の北側の電子基準点「米子」、「溝口」は北北東に約15cm、約14cm、震源の東側の「岡山新庄」は西北西に約10cm、震源の東側の「中和」は西側に約3cm、震源の西側の「松江」、「仁多」は東側に約6cm、約4cm、震源の南側の「日南」は南南西に約16cm、「神郷」は南側に約5cm、「西城」は南南西に約2cmそれぞれ変動し

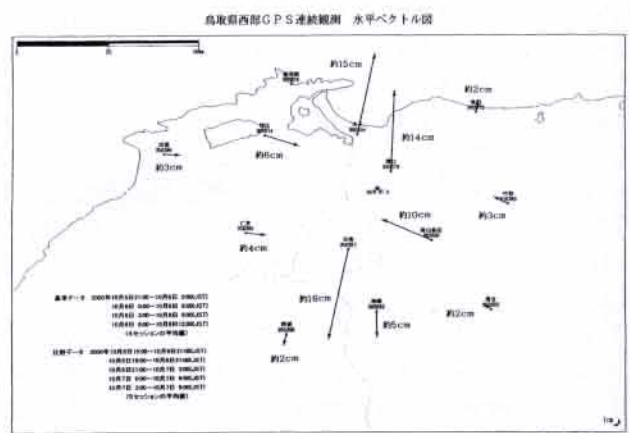


図-10

ていることが観測された(図-10)。

おわりに

有珠山の火山活動が終息しない時期に、磐梯山、北海道駒ヶ岳等の火山活動が活発化した中、三宅島の火山活

動，さらに新島・神津島の近海に活動の中心を移して地震活動が活発化し，さらに鳥取県西部地震が発生した。こうした状況の中で測地観測センターでは，緊急解析システムあるいはGEONETによる緊急解析をフル活用・フル動員して地殻変動監視を継続して行ってきた。同時に，地震活動前～地震発生直後～地震発生後～停滞（長期間）の間一貫して地殻変動資料を噴火予知連，地震調査委員会等に提供してきたことにより，噴火予知連での火山活動に関する適切な評価に基づく噴火予知連での統一

見解がだされたこと，地震調査委員会では地震活動に関する適切な評価が出されたことで防災の面，地震学的な面でも大いに役立った。このことは，長期化している地殻変動監視活動関係者の励みにもなっており，今までにない経験を積んだことで今後の防災計画に活かして行きたいと考えている。最後に，避難を余儀なくされている三宅島の住民の方々をはじめ，不安な生活を送っている伊豆諸島の住民の方々が一刻も早く普段の生活に戻れるよう切に願うものである。

# 2000年鳥取県西部地震における液状化被害の状況 Report on liquefaction disasters to The Western Tottori prefecture earthquake in 2000

地理調査部 谷田部好徳  
Geographic Department Yoshinori YATABE

## 要 旨

地理調査部では、鳥取県西部地震による被害状況等を地形学的な視点から緊急に把握するため、「液状化調査班」及び「地震断層等調査班」を編成した。本稿では、臨海部を中心とした、地震による地盤の液状化被害調査結果の概要について報告する。

### 1. 地震及び被害の概要

平成12年10月6日13時30分頃、鳥取県米子市南方を震源とするM7.3、震源の深さ約10kmの地震（気象庁）が発生し、鳥取県境港市、日野町で震度6強、西伯町、溝口町、会見町、淀江町、岸本町で震度6弱、米子市、島根県安来市、仁多町、宍道町などで震度5強を観測するなど、中国地方を中心に西日本の広い範囲で強い揺れを感じた。

震源に近い山間地の日野町や溝口町、島根県伯太町などでは、家屋の損壊や崖崩れが多数発生し、道路、鉄道など交通網やライフラインにも大きな被害をもたらした。

一方、境港市や米子市、島根県八束町などでは、家屋の損壊に加えて臨海部の埋立地や干拓地で地盤の液状化が広範囲で発生し、流通・港湾・漁業施設、農地や農業施設などに甚大な被害が発生した。

この地震では死者こそ出なかったものの、島根、鳥取両県下では、あわせて117名の負傷者、住家だけでも全半壊3,205棟をだした（平成12年12月19日現在・消防庁による）。

### 2. 液状化被害調査結果

#### (1) 調査の範囲

現地調査は10月12日から13日にかけて、美保湾及び中海の臨海部埋立地および干拓地を中心に、2名・1班体制で実施し、液状化現象にともなう噴砂、亀裂や陥没などの地盤変形、土木構造物などの被害状況について現地確認を行った。

また空中写真判読による被害状況の面的把握は、発災後に緊急撮影された空中写真撮影範囲（図-1参照）について行った。したがって中海の南岸や西岸については、現地調査による確認のみであるので、本報告では簡単なコメントと被害状況の現地写真のみを掲載した。

なお、図-1中の丸数字は、後述の主な地域の被災状況の各調査位置と項番号を示している。



図-1 調査地域の概要図

#### (2) 調査地域の地形・地勢の概要

米子市から境港市に伸びる弓ヶ浜半島は、幅3~4km、長さ約16~17kmにおよぶ長大な砂州で、東を流れる日野川から供給される土砂が沿岸流によって運搬され堆積して形成されたものである。

弓ヶ浜半島を構成する砂州は、米子市付近では全体が南広がり扇形の3列（美保湾側から外浜、中浜、内浜と呼称）確認できる。米子市の旧市街が立地するのは、このうちの内浜である。

半島中央部では、砂州列が収斂して砂州間低地（後背低地）が不明瞭になるが、境港市付近では北広がり扇形に小規模な砂州が多数分布するようになり、再び砂州列及び砂州間低地の地形が明瞭になる。

これらの砂州上には、部分的に砂丘が形成されていたが、開発等によりほとんど削られて、現在ではごく一部を残すのみである。

中海の南岸一帯は、飯梨川流域が扇状地性の低地であるほかは、宍道湖と中海を結ぶ大橋川付近をはじめ、大部分の地域は三角州性の低地（泥質）である。

中海には大根島、江島の2つの島があり、いずれも火山性の地形（溶岩台地）で地盤は安定している。

本地域の臨海部では埋立や干拓が盛んに行われ、境港市の竹内団地や昭和町、米子市の旗ヶ崎や崎津、和田浜、錦海、八束町の江島などで工業団地や住宅団地の造成が行われた。特に中海では近年、大規模な干拓が行われ、境港市の弓浜干拓地、米子市の彦名干拓地などが造

成されたほか、中海干拓本庄工区の施工が続いていたが、最近の公共事業見直しのなかで、干拓事業の中止が検討されている。

### (3) 液状化被害状況

#### 1) 埋立地・干拓地の抽出

一般的に強震時に液状化が起きやすいとされている埋立地や干拓地など旧水部の範囲を把握するため、旧版地形図と最新の地形図を比較し、約100年間に陸化した地域を図-2にとりまとめた。使用した地形図は下記のとおり。

- ① 5万 1 地形図旧版図（いずれも明治33年測図）  
「美保関」「米子」「境」「松江」
- ② 2万 5 千分 1 地形図  
「美保関」（平成12年部分修正測量）  
「米子」（平成9年修正測量）  
「母里」（平成10年修正測量）  
「境港」（平成10年修正測量）  
「揖屋」（平成9年部分修正測量）



図-2 埋立・干拓地の分布図

#### 2) 液状化被害調査図

本図は、国土地理院が発災直後に緊急撮影した空中写真を判読し、明瞭に確認できた液状化現象で生じた「噴砂による堆砂域（泥水流出域）」を、「噴砂」として表示したものである。図-3に凡例を示す。

沿岸部では、噴砂は発生していないが明らかに液状化により地下水が上昇し、地盤が暗灰～暗褐色に変色している箇所も多く見られる。ただし、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本図には表示していない。また、亀裂や段差等についても空中

写真で判読できる比較的大規模なものや、現地調査の際に確認できた主なものを表示した。

今回は、限られた時間で緊急調査を行ったものであり、現地を詳細に踏査すればもっと多くの液状化現象に伴う痕跡が認められたであろう。

なお、判読に使用した空中写真の諸元は次のとおり。

撮影日：平成12年10月7日

縮尺：約1/5,000

使用写真：CCG-2000-1 C1~C15

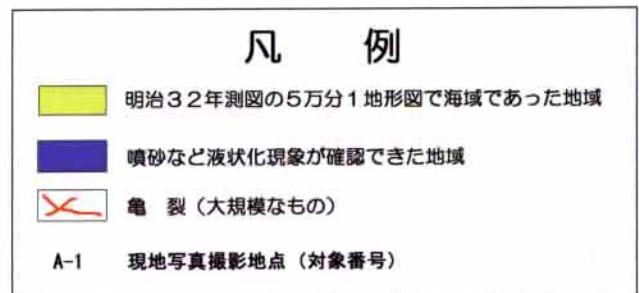


図-3 液状化被害調査図の凡例

#### 3) 主な地域の被災状況

##### ① 境港市竹内団地（埋立地）

本地域は境港市街の南東部、美保湾に面した埋立地である。

- ・埋立地全域で噴砂（噴砂口）や大きな亀裂、陥没などの地盤変形、排水路よう壁の倒壊、歩道敷石の破壊などが随所で見られる（写真-1）。
- ・噴砂口の大きなものは短径1mを越える。
- ・地域内の道路は30~40cmほどの比高で波打った箇所もみられる。
- ・埋立地全体が沈下し、道路縁石や建物、橋梁など構造物の抜け上がり現象が著しい（写真-2）。
- ・建物の本体自体には、外見上は大きな被害は見られ



図-4 調査図(竹内団地周辺)



空中写真-1 竹内団地南部



写真-3 外周道路の亀裂と陥没(A-3)



写真-1 噴砂(A-1)



写真-4 大きな噴砂口(A-4)



写真-2 道路縁石の抜け上がり(A-2)

ない(夢みなとタワー上階の窓硝子は一部損壊)。

- 埋立地の南部で液状化が著しいが、埋め立て時期の相違(新旧、新しいほど一般的に液状化しやすい)が関係していると思われる。(空中写真-1)

#### ②境港市昭和町(埋立地)

本地域は、境港市街の東部、美保湾及び境港に面した埋立地で、石油関連施設や水産加工団地、水産卸売市場等が立地する。

- 埋立地全体に液状化が見られるが、特に西側が著しい。
- 昭和南埠頭(通称4万トン岸壁)では、長さ200m以上の亀裂や段差が生じている。
- 付近の道路歩道の損壊も激しく、側溝からも噴砂して溝が埋まった状態である(写真-5)。
- 境水道に面した通称1万トン岸壁では、暗渠部のジョイント部に空隙ができ、一部で損壊が見られる。



図-5 調査図(昭和町周辺)



写真-6 カニかご岸壁と倒壊寸前の上屋(B-2)



写真-5 道路側溝からの噴砂(B-1)



写真-7 抜けあがった上屋の支柱(B-3)

- ・県営魚市場前では、道路を横切って、長さ3m以上の亀裂と噴砂が見られる。
- ・境港卸売市場（通称カニかご岸壁）では、液状化による地盤の流動や陥没等により、岸壁が海側に1m以上はらみだすとともに、場内も陥没した。また上屋を支えるコンクリート支柱が傾き、倒壊のおそれもでている。特に東棟の損壊が激しい（空中写真-2、写真-6、7）。



空中写真-2 境港卸売市場(カニかご岸壁)

③境港市外江町、島根県八束町・江島工業団地（埋立地）  
 本地域は、境港市街の西方、境水道及び中海に面した埋立地と中海に浮かぶ江島の埋立地である。

- ・外江町では、小規模な噴砂が多数認められ、また一部の住宅地では、連続して電柱の傾きが生じている。
- ・江島工業団地でも埋立地全域で噴砂が認められ、排水路の暗渠（カルバート）部分では、周囲の相対的な沈下により、12cm程度の抜け上がり現象が見られる。また上水道埋設部分に沿って幅、高さとも5～

6 cmの亀裂と段差が生じている（写真－8）。

- 明治32年測図の旧版地形図では確認できないが、江島の東南部も現海岸線の形状を見る限り、古い時代の埋立地と考えられるが、空中写真判読からは液状化は確認されなかった。
- 江島から松江市長海町へ抜ける干拓堤防（北回り道路）の堤外地では、大きな噴砂口や亀裂、段差がみられるほか、一部道路の損壊も見られる。（写真－9）

④境港市弓浜干拓地及び米子空港

本地域は、境港市南部の中海に面した干拓地及び埋立

地で、米子空港及び航空自衛隊の基地や施設が立地する。

- 干拓地全体で噴砂や地盤の隆起、陥没等が見られる。亀裂や液状化に伴う広い地盤の変色域は、特に干拓地南部で著しい。
- 干拓地内では相対的な沈下が認められ、管渠部の抜け上がり現象や排水路よう壁の倒壊・はらみだし、堤防の亀裂、道路の段差などが多数見られる（写真－9, 10）。
- 干拓地では、大根など野菜類の栽培が行われており、塩分を含んだ泥水の吹き上げによる塩害、灌漑設備



図－6 調査図(外江町、江島周辺)



図－7 調査図(弓浜干拓地、米子空港周辺)



写真－8 暗渠部分の抜け上がり(D-1)



写真－9 管渠部の抜け上がり(E-1)





写真-10 排水路よう壁の損壊(E-2)

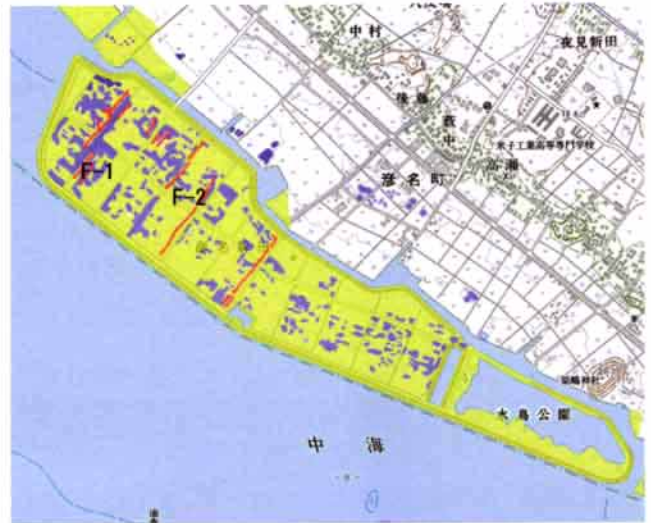
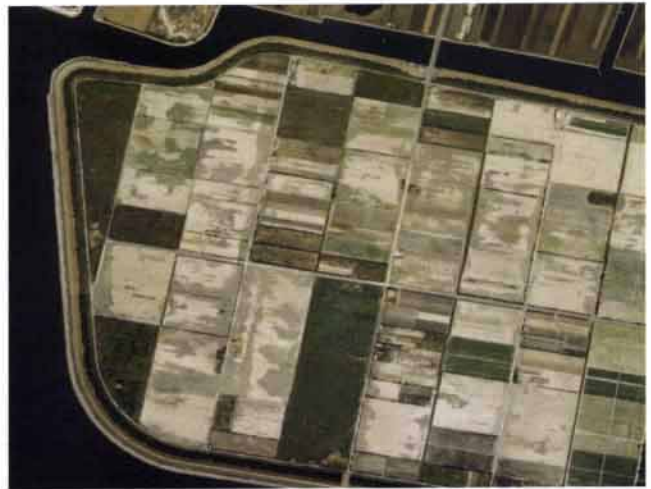


図-8 調査図(彦名干拓地)



写真-11 大根畑での噴砂(E-3)



空中写真-3 彦名干拓地西部

の損壊などが危惧されている(写真-11)。

- 米子空港内では、滑走路突端部(中海寄りの海域埋め立て部分)での噴砂が目立ち、同所の滑走路部分では大きな亀裂が生じている(写真判読による)。
- ターミナルビル西南側及び空港外のJR境線中浜駅の西側(小篠津町)付近で噴砂等が見られる。この付近は砂州間の低地の部分で、地下水位が高かったものと考えられる。

#### ⑤米子市彦名干拓地

本地域は、米子市街の北西部、中海に面した干拓地である。干拓地の西は低地及び砂州で、砂州の微高地に带状に集落が立地している。

- 干拓地全体で噴砂、地盤の隆起や陥没が見られる。大規模な亀裂や噴砂は、干拓地の西寄りで著しい。
- 西端部で見られる亀裂(噴砂口)は、幅が最大で120cm、長さが50mを越えるものもある(写真-12)。干拓地内の亀裂の方向は、概ね北東～南西である。



写真-12 巨大な亀裂と噴砂



写真-13 道路の陥没と亀裂(F-2)

- 干拓地内の道路でも亀裂や段差がみられ、大きなものは30cm程度の比高がある(写真-13)。
- 排水路よう壁の倒壊や堤防の亀裂など施設への被害も甚大で、同様に塩害も危惧されている。
- 藪中集落西南部の低地部ではまとまった噴砂が見られる。

⑥米子市安倍彦名団地, 旗ヶ崎, 米子港(埋立地)

本地域は、米子市街地西北部の中海に面する埋立地と低地及び砂州で、市街地の拡大域にあたり、住宅団地や工業団地、卸売団地、魚市場等が立地する。

- 安倍彦名団地では、噴砂や道路の亀裂・陥没、排水路よう壁の損壊、住宅や電柱の傾きなどが認められる(写真-14)。
- 下水処理場南方の護岸では、周囲の沈下により抜け上がりが見られる。沈下量は25cm~35cm程度あり、護岸自体も一部損壊している箇所がある(写真-15)。
- 旗ヶ崎では噴砂も多く、建物の抜け上がりも見られる。
- 米子港では、岸壁の大規模な陥没や亀裂が多数発生している。陥没の深さが1m以上のもの、亀裂の幅



写真-14 排水路よう壁の倒壊と歩道の陥没(G-1)



写真-15 護岸部の抜け上がり(G-2)



図-9 調査図(旗ヶ崎, 米子港周辺)



写真-16 米子港岸壁の陥没(G-3)

60cm以上の箇所、長さ40m以上の箇所も見られる(写真-16)。

- ・埠頭全体にわたり、噴砂や地盤変形により波打った状態が見られる。

#### ⑦米子市錦海団地(埋立地)

本地域は、米子市街の南部、島根県境に接する埋立地で、住宅団地や野球場などが立地している。

- ・噴砂及び団地内道路縁石の損壊、歩道上の亀裂や陥没が見られる。



写真-17 団地内駐車場の亀裂と陥没

#### ⑧安来市穂日島町(干拓地)

- ・干拓地北東部の堤防近くの農道上で、長さ20m程度の亀裂が見られる。

#### ⑨安来市恵乃島町(埋立地)

- ・最北部の護岸の一部が損壊し、付随する道路も隆起や陥没が見られる。



写真-18 護岸の損壊

#### ⑩安来市亀島町・潮美町(埋立地)

- ・和鋼博物館の北、道路上に大きな噴砂口(135cm×255cm、深さ55cm)もしくは噴砂による陥没口と、それらに続く噴砂口の列が亀裂状に見られる。



写真-19 巨大な噴砂口

#### ⑪東出雲町錦浜干拓地

- ・干拓地最北部、堤外の高水敷(アスファルト舗装のヘリポートあり)では、噴砂口や亀裂、地盤の隆起や陥没が見られる(写真-20)。
- ・干拓地内の外周道路の亀裂や排水路の中での噴砂跡などが散見される。
- ・干拓地全体で大規模に液状化が起こった様子は認められなかった。



写真-20 堤外地での噴砂と陥没

#### ⑫松江市富士見町(埋立地)

- ・噴砂や地盤変形など、液状化の明瞭な痕跡は現地調査では認められなかった。

**⑬大根島～松江市大海崎町に至る干拓堤防上の道路**

- ・全体にわたって隆起や陥没が見られる。特に中央部付近が著しい。

**(4) 液状化調査結果のまとめ**

本調査地域における液状化発生の著しい地域は、埋立地及び干拓地とはほぼ一致し、特に境港市では竹内団地や昭和町の埋立地、中海の弓浜干拓地などが、また米子市では、崎津や旗ヶ崎、米子港付近、錦海団地などの埋立地及び彦名干拓地などが大きな被害をうけた。

中海の南岸～西岸では、被災後撮影された空中写真がないため、点的な調査しかできなかったが、現地調査結果からは、ところどころで噴砂や道路の亀裂が見られるものの、広範囲には液状化は起きていないと判断され、西へいくほどその痕跡は少ないと考えられる。

米子市から境港市に伸びる砂州上(図-2の埋立地の部分を除く)では、米子空港ターミナルの西付近、JR中浜駅西付近で多数液状化の痕跡が認められる。この付近

は砂州間の低地の部分で、比較的地下水位が高かったことなどが考えられる。

また沿岸部に近い米子市旗ヶ崎～彦名町にかけての地域でも液状化の痕跡がまとまって見られるが、米子水鳥公園北東の粟嶋神社がのる高まりは、その名称や周辺の地名などから、明治初期あるいはそれ以前には島であったと考えられ、古い時代に周囲の水域の干拓などがなされた可能性もある。

それ以外の砂州地域では液状化の痕跡はあまり確認できなかった。

**3. おわりに**

本調査は、地理調査部緊急災害対策実施要領に基づいて編成された「緊急現地調査班」の谷田部好徳(地理第一課)と関崎賢一(地理第三課)が担当した。

また液状化被害調査図の作成において、現地調査や空中写真判読結果の図化、ホームページ掲載等に、柴原充氏(企画課)の協力を得た。

**参 考 文 献**

- 経済企画庁(1967):土地分類基本調査「米子」地形分類図,表層地質図及び同報告書  
鳥取県(1980):土地分類基本調査「美保関,境港」地形分類図,表層地質図及び同報告書  
島根県(1974):土地分類基本調査「松江」地形分類図,表層地質図及び同報告書  
消防庁(2000):平成12年(2000年)鳥取県西部地震(第45報)

# 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 $M_{\max}$ 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( $M_{\max}$ 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(Massonnet 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

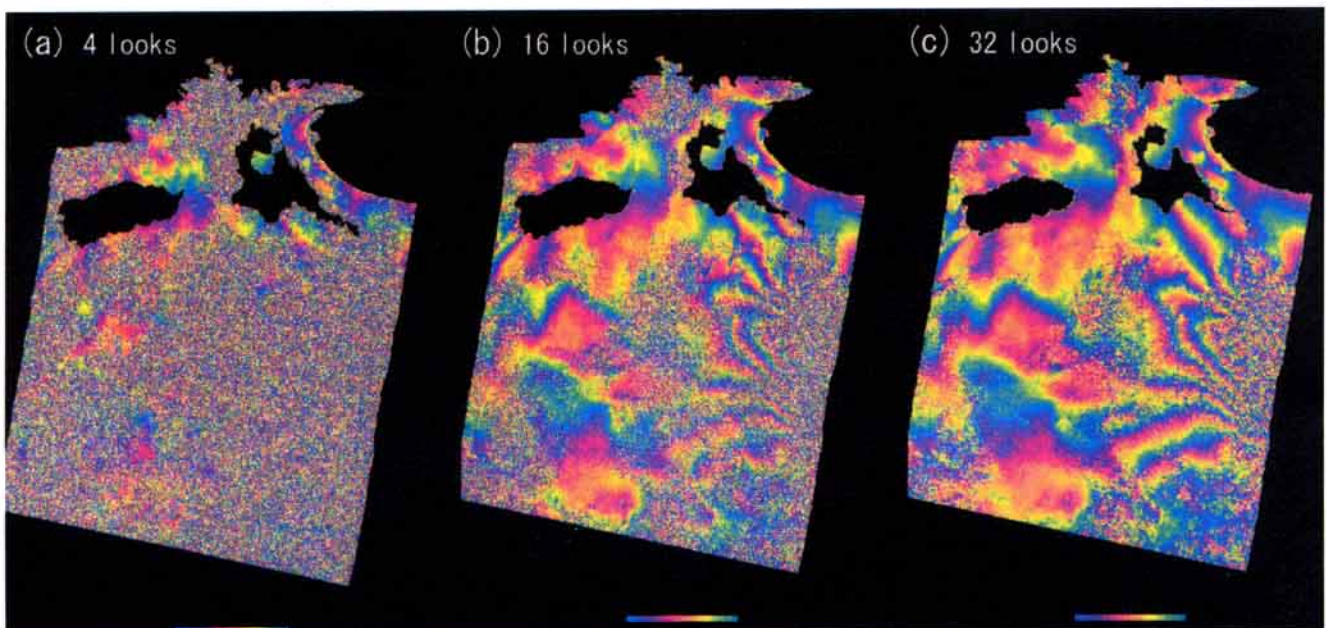
2000年鳥取県西部地震の震央付近の地域について、地震前と地震後の二時期のデータを用いた2パス法干渉SAR解析を行った。用いたデータは、地震をはさむ2000年9月17日(JST)と10月11日(JST)にRADARSATが観測したデータである。

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 $20^\circ$ ) 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( $4 \times 4 = 16$ )、8ルック( $4 \times 8 = 32$ )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 spatiale canadienne (2000)  
All right reserved. Tous droits réservés.  
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 $\times$ 4 looks), (c) 32 looks (4 looks $\times$ 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にくい。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、地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<sub>max</sub>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<sub>max</sub>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

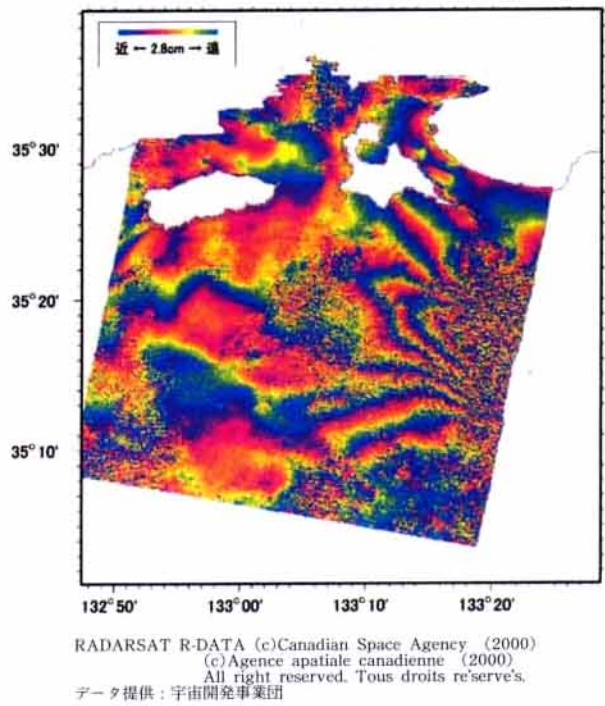
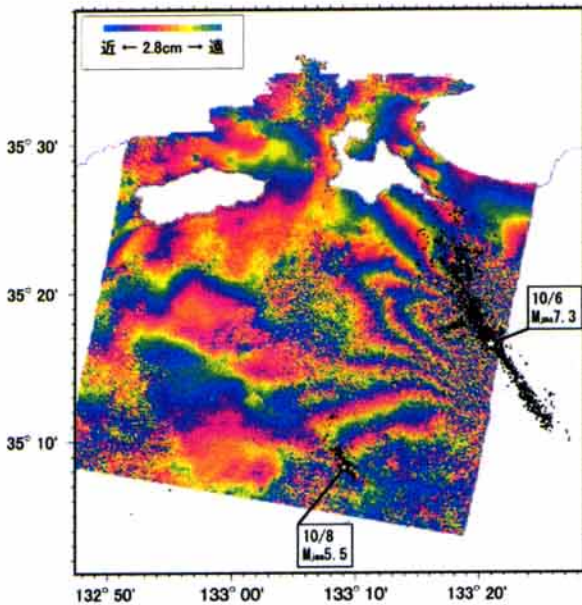


図2 RADARSATデータ(2000年9月17日-10月11日)の干渉SAR解析により得られた干渉画像



RADARSAT R-DATA (c)Canadian Space Agency (2000)  
(c)Agence spatiale 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。

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

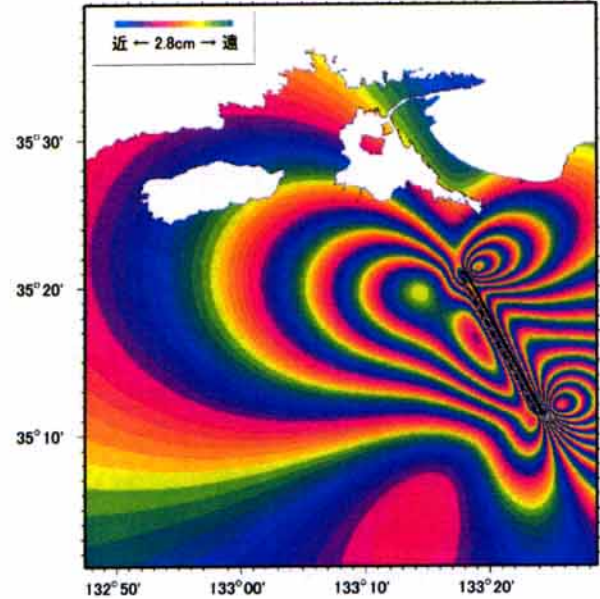


図4 鷺谷・西村(2000)の断層モデルを用いて計算した地殻変動による位相変化のシミュレーション画像。黒の実線は断層の上端を示す。

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	1.4 m

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。

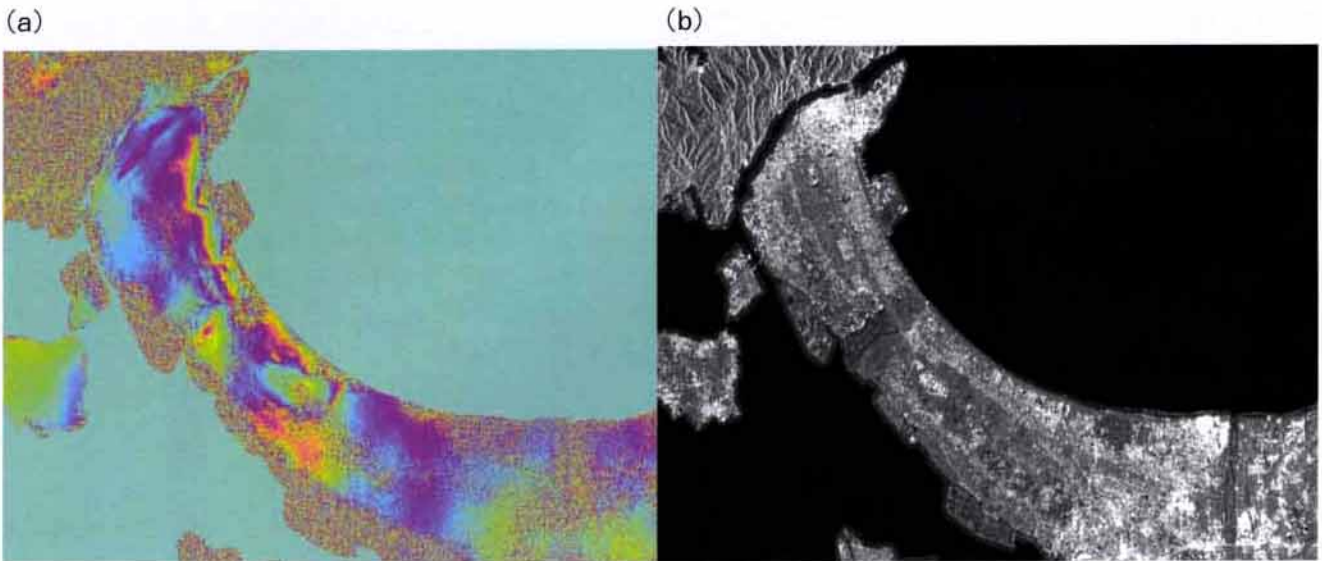
今から約1200年前に編纂された『出雲国風土記』によれば、その当時の弓ヶ浜半島は「夜見島」とよばれる砂の島であった。中海の底に形成された砂州の外側に順次浜提列が付け加わる形で半島状の砂州に成長してきた(高安・徳岡, 1993)。

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、





RADARSAT R-DATA (c)Canadian Space Agency (2000) (c)Agence spatiale canadienne (2000)  
All right reserved. Tous droits réservés.  
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。

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。



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。

## 6. まとめ

2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震 ( $M_{\text{max}}7.3$ ) 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はほぼ調和的である。

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のところでは10/8に発生した $M_{\text{max}}5.5$ 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、神奈川県温泉地質研究所、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 January 17, 1994, recorded by two radar satellites using interferometry, *Geophysical Research 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. Massonnet, 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://wwwweic.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・穴道湖, *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.