

衛星合成開口レーダー画像で抽出された平成 19 年（2007 年）能登半島地震に伴う地形変化 Landform Changes Triggered by the Noto Hanto Earthquake in 2007 Detected from Satellite Synthetic Aperture Radar Images

地理地殻活動研究センター 宇根 寛・佐藤 浩・矢来博司
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Hiroshi UNE, Hiroshi P. SATO and Hiroshi YARAI

要 旨

干涉合成開口レーダー（干渉 SAR）は、地表面の変位を面的に把握する技術として、すでに多くの実績がある。「だいち」に搭載された PALSAR は、干渉度が極めて高く、これまでにない高い分解能で変位を捉えることができる。国土地理院は、2007 年 3 月 25 日の能登半島地震（M6.9）に伴う地殻変動を「だいち」の SAR 干渉画像により解析し、精度の高い震源断層モデルの推定を行ったが、SAR 干渉画像には、断層運動による広域の弾性変形に加えて、局所的な地表の変位を反映した微小な変動パターンが多数みられた。筆者らは、これらは地震動に伴う数 cm～数 10cm のわずかな地すべり性の変状を捉えている可能性があると考え、これを実証するため、調査・解析を行った。地すべり地形分布図との重ね合わせや、現地踏査の結果、これらのパターンが地震動で発生した地すべりによる地表の変位を示していることが明らかとなった。「だいち」の SAR 干渉画像は、現地調査や空中写真判読では捉えることが難しい微小な地すべり性の変状を網羅的に捕捉していると考えられ、さらなる監視や防災対策立案のための、極めて有効な情報を提供していると考えられる。

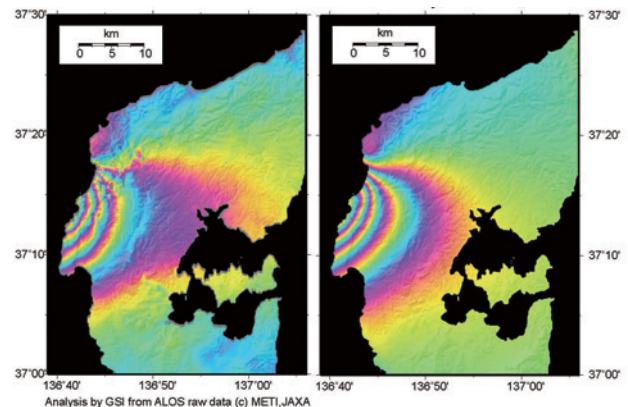
1. SAR 干渉画像にあらわれた能登半島地震の地表変動

干涉合成開口レーダー（干渉 SAR）は、地表面の変位を面的に把握する技術として、すでに多くの実績がある。2006 年 1 月に打ち上げられた陸域観測技術衛星「だいち」に搭載された PALSAR は、干渉度が極めて高く、これまでにない高い分解能で変位を捉えることができる。国土地理院は、2007 年 3 月 25 日の能登半島地震（M6.9）に伴う地殻変動を「だいち」の SAR 干渉画像により解析し、精度の高い震源断層モデルの推定を行った（雨貝ほか、2007）が、SAR 干渉画像には、断層運動による広域の弾性的変形に加えて、局所的な地表の変位を反映した微小な変動パターンが多数みられた。筆者らは、これらは地震動に伴う数 cm～数 10cm のわずかな地すべり性の変状が捉えられている可能性があると考え、これを実証するため、調査・解析を行った。

2. 地殻変動差分画像の作成

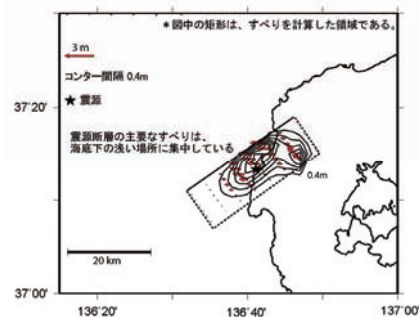
SAR 干渉画像には、地下の断層運動による広域的な弾性変形と地すべりなどの局所的な表層の変状が合成された変動が記録されていると考えることができる。このため、SAR 干渉画像から、震源断層モデルをもとに計算した広域的な弾性変形のシミュレーション結果を取り除いた差分画像を作成した。

図－1 は、地震前の 2007 年 2 月 23 日と地震後の 4 月 10 日に観測された PALSAR のデータを用いて作成された SAR 干渉画像である。図－2 は、図－1 の画像に最も適合するように推定された震源断層モデル（図－3）から地表の地殻変動量を計算し、その値をもとに、図－1 の条件（軌道、視線方向）のもとで観測されるべき干渉画像のシミュレーションを行ったものである。画素ごとに、図－1 の値から図－2 の値を取り除くことにより作成した画像が地殻変動差分画像（図－4）である。



図－1 SAR 干渉画像

図－2 断層モデルによる
干渉画像シミュレーション



図－3 震源断層モデル

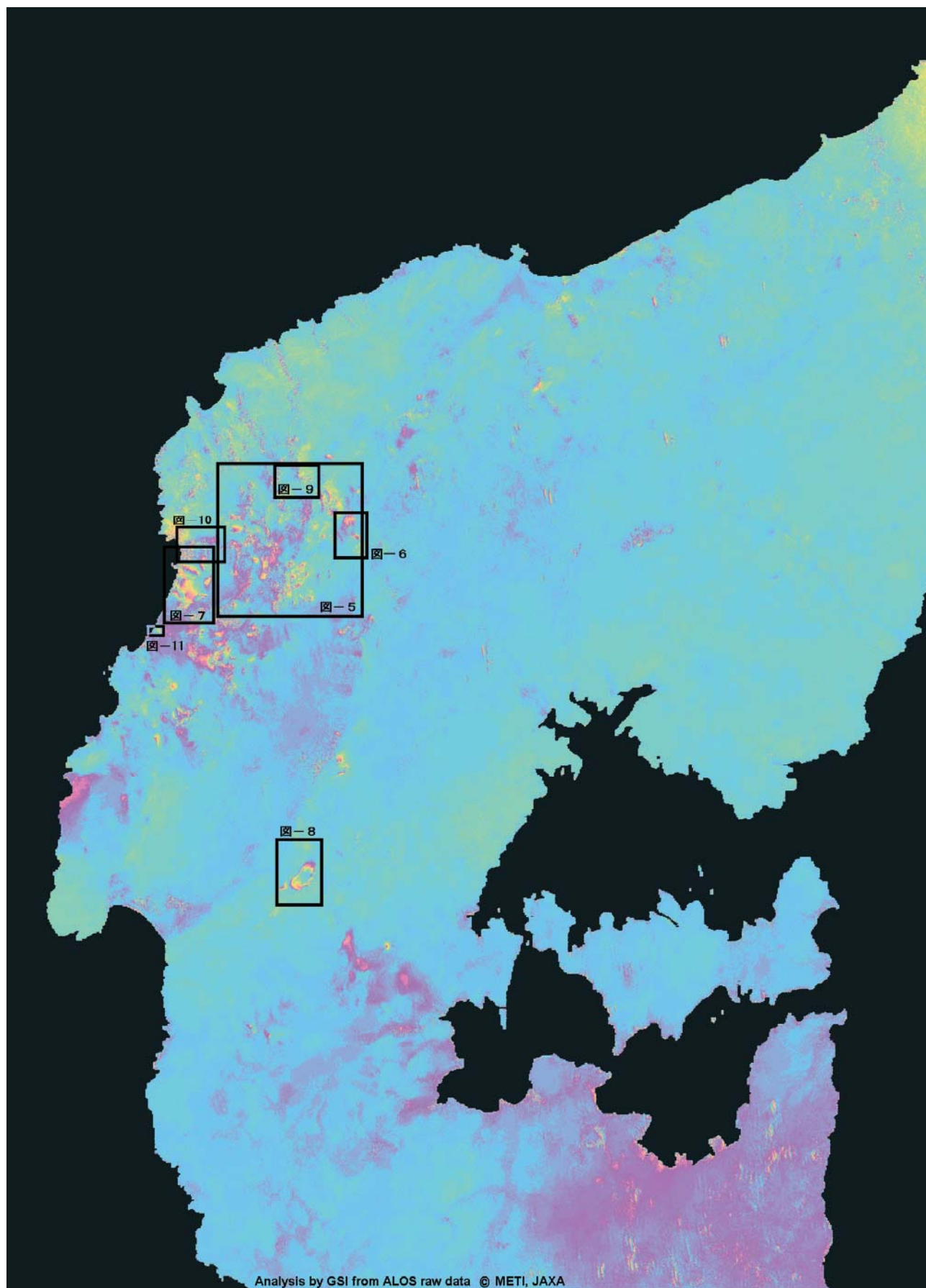


図-4 地殻変動差分画像

さらに、地表変動と地形や地物との関係を明確にするために、この画像を電子国土 Web システムに載せ、地形図と重ねて表示できるようにした (<http://zgate.gsi.go.jp/notojishin/notojishin.html>)。

3. 地表変動の認定と現地での確認

地殻変動差分画像を詳細に観察したところ、さまざまな変動パターンが判読された。中でも、山間部に、長さ・幅が数 100m 程度の楕円形や馬蹄形のパターンが多く見られた。変動量は干渉縞 1～2 周期分、すなわち衛星視線方向数 cm から 20cm 程度のもが多い。図-5 は、このようなパターンが最も多く見られた輪島市門前町東部の画像である。

地殻変動差分画像を防災科学技術研究所の地すべり地形分布図のデータと重ね合わせたところ、変動

パターンの多くは地すべり地形の分布と一致し、推定される変動の向きも概ね地形と整合的、すなわち、地すべり移動域の沈下もしくは最大傾斜方向への水平移動を示す変動であった。

このうちの数カ所を現地踏査した。輪島市門前町俊兼（図-6）では、既存の地すべり地形をなぞるように馬蹄形の変動パターンが現れ、周辺が一樣に青を示す中で、変動域は黄～赤を示していることから、全体が数 cm 衛星方向に近づいたことが示されている（すなわち西方向への移動もしくは隆起）。地形からみると、東南東から西北西に向かってすべった地すべりと考えられるから、この変動パターンが地すべりの再滑動を示しているとする、西方向への移動と考えられる。現地踏査の結果、変動パターンから滑落崖が想定される場所で、地震時に発生した

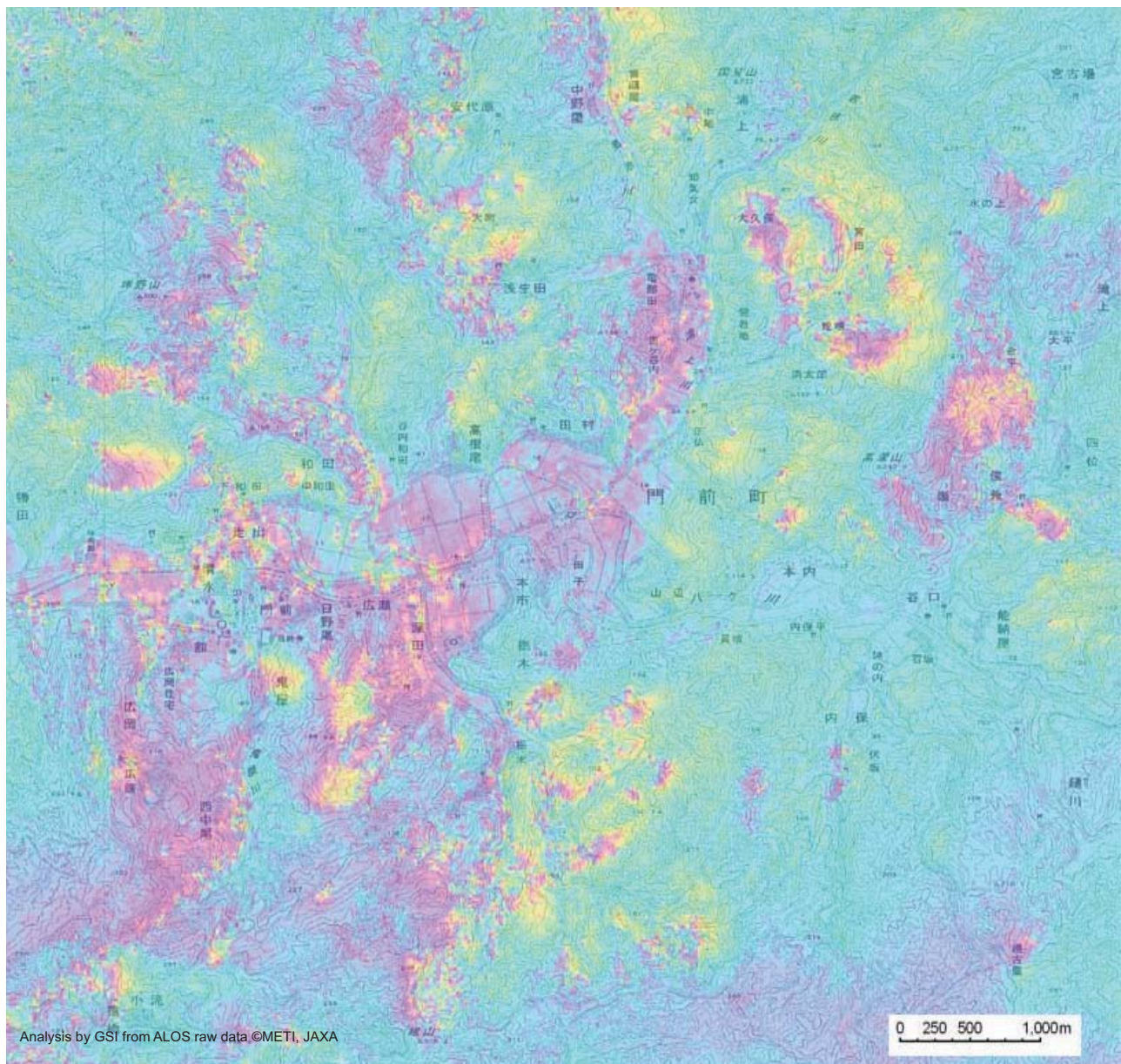


図-5 輪島市門前町東部の変動パターン

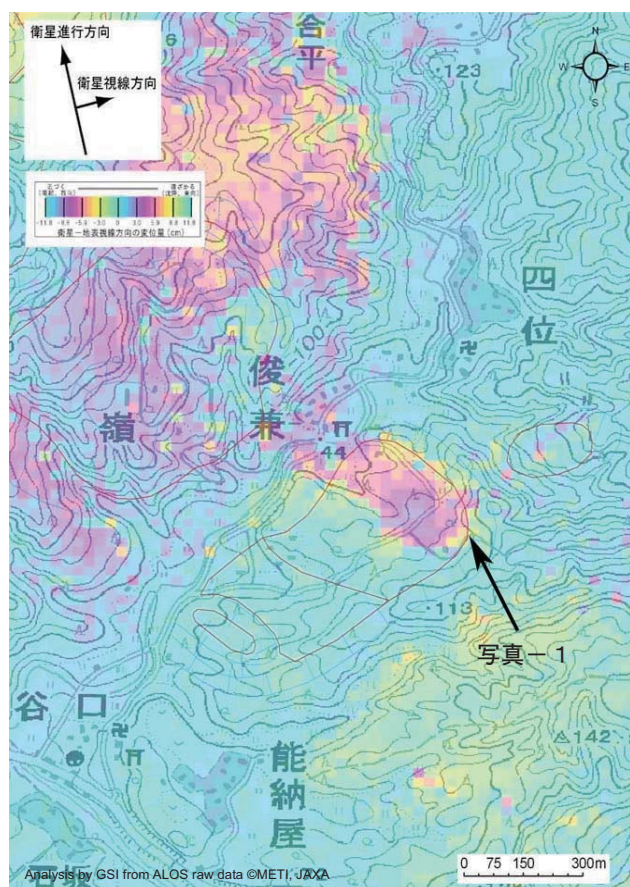


図-6 輪島市門前町俊兼の変動パターン。赤線は地すべり地形（防災科学技術研究所，2007）



写真-1 地すべりによる道路上の亀裂

と判断できる約 10cm の段差が地表に発見された（写真-1）。従って、この変動パターンは地震動で地表が西方向に移動したことを示していると考えられる。

図-7 は、輪島市門前町大生の変動パターンである。既存の地すべり地形の範囲にほぼ対応するように変動パターンが現れている。矢印に示した地点には、2 サイクルの干渉縞が現れており、縞の南側は北側に比べて 20cm 程度衛星に近づいたと判読できる。現地では道路上の亀裂や斜面変動による樹木の転倒などが観察され（写真-2）、斜面が西に移動していることが明らかとなった。このため、ここでも地震時の地表の変位が変動パターンに示されていると考えられる。

また、まったく既存の地すべり地形がみられない

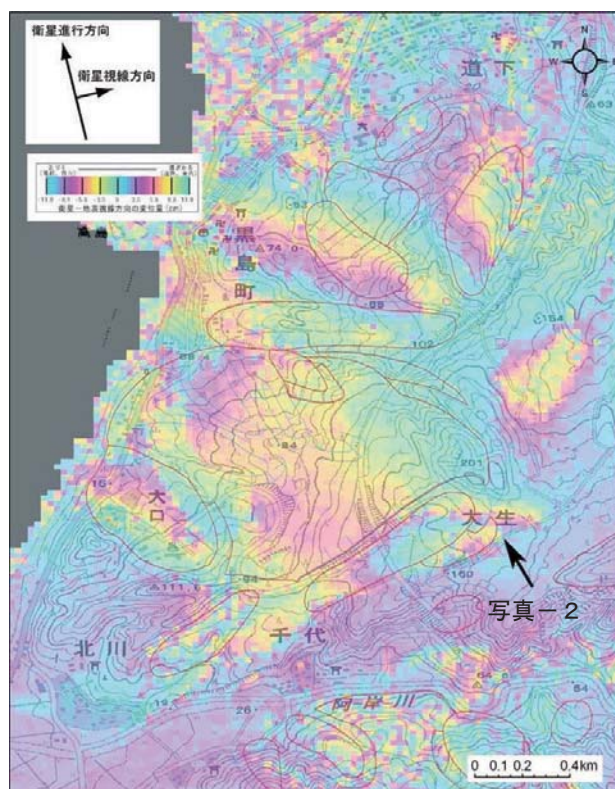


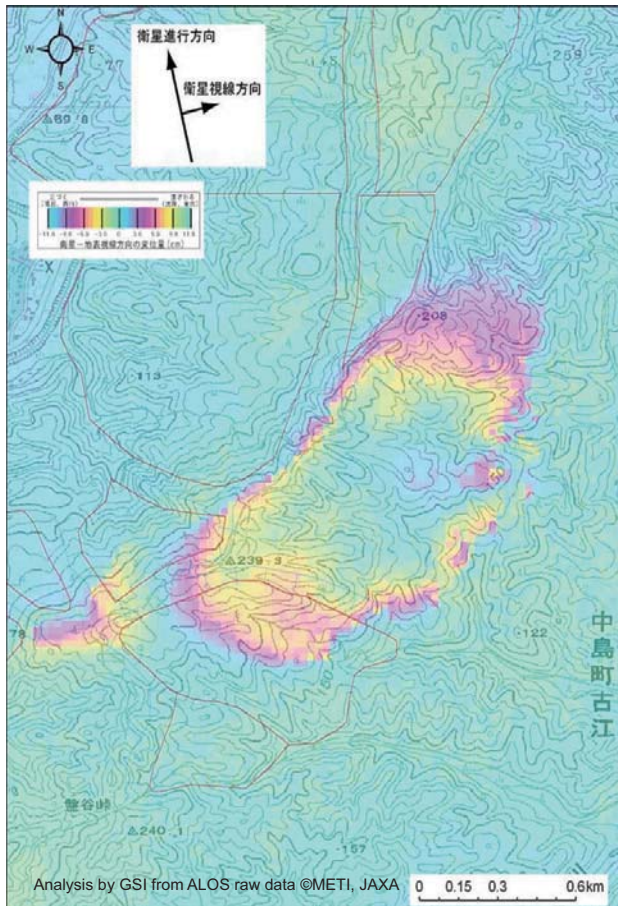
図-7 輪島市門前町大生の変動パターン。赤線は地すべり地形（防災科学技術研究所，2007）



写真-2 地すべりによる道路上の亀裂，斜面の変状

地点に明瞭な変動パターンが現れた場合もあった。七尾市中島町古江には、幅約 1.5km、奥行約 700m の楕円形の明瞭な変動パターンが現れた（図-8）。いくつかの尾根や谷を越えてパターンが広がっており、干渉縞から判断すると楕円の中心部は 10 数 cm 衛星から遠ざかっている（すなわち東方向への移動もしくは沈降）。広範囲のブロック状の初生的地すべりが生じたものと考えられるが、この地点では、現地で地表の変状は観察することができず、地元でも、擁壁の転倒等によるごく局所的な地すべりを除いて、この場所に大規模な地すべりが発生しているとは認識されていなかった。

一方、現地調査や空中写真判読から明らかに地すべりや斜面崩壊が認められる地点に、差分画像では



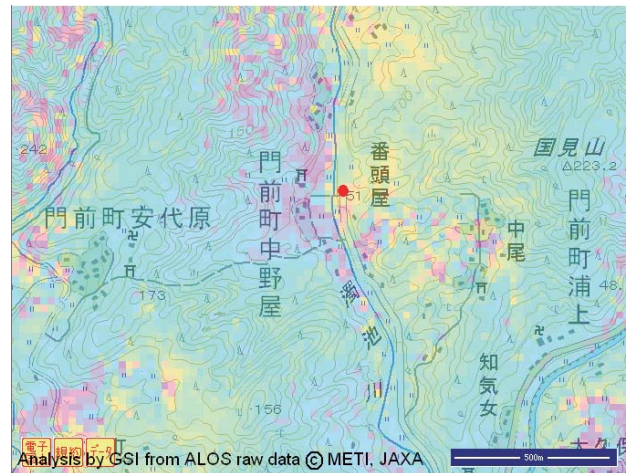
図－8 七尾市中島町古江の変動パターン

変動パターンが表れていない場合もあった。これは、地すべりや斜面崩壊の範囲が狭かったこと、地形変化が大きすぎて SAR が干渉しなかったことなどにより、変状の情報が得られなかったためと考えられる。

4. 地表地震断層は出現したか？

今回の地震発生直後、地震に伴って地表に地震断層が現れたとの報告がいくつか行われ、大きく報道された。しかし、報告された地点には、断層活動の累積を示すような地形的特徴が全く見られず、これらを地震断層とすることを疑問とする見方もあった。

図－9 は、そのうちのひとつである輪島市門前町中野屋の地殻変動差分画像である。この地点では、地震直後の 3 月 27 日に、金沢大学能登地震断層調査グループが「地震断層」として報告（金沢大学理学部地球学科，2007）した道路上の右横ずれを示す亀裂が発見されている（図中に赤点で示す）。画像では、地表地震断層の出現を示唆するシャープな地表の変位を示す画像は観察されず、この地点の東側の斜面（黄色の部分）がわずかに衛星方向に移動したことを示唆するパターンがみられ、「地震断層」は地震時の地すべり性の移動による変状である可能性が高いと判断できる。なお、その後、山形大と金沢大は、



図－9 「地震断層」の出現が報告された地点（図中の赤点）周辺の地殻変動差分画像

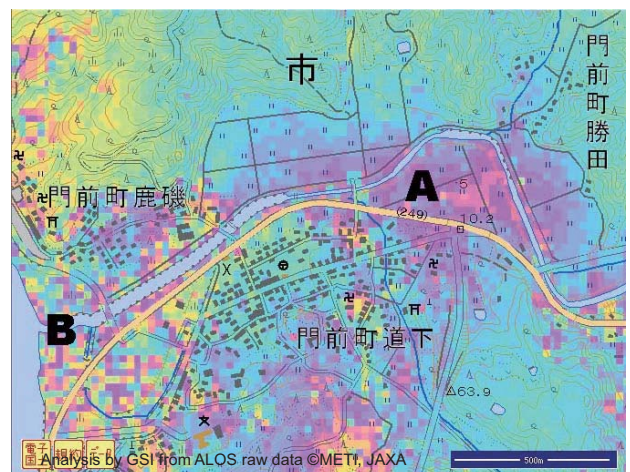
この地点でトレンチ調査を行い、この「地震断層」は、古い地すべりのすべり面で基盤岩と接する地すべり堆積物が流動化したことによる表層の変状であったことを明らかにしている（川辺ほか，2007）。前述の断層モデルで、断層の破壊が地表に到達したとは考えられないという結果が出ていることも合わせて、今回の地震では地震断層は出現しなかったと結論づけることができる。

5. 沖積層の沈下と砂丘の変形

今回作成した SAR 干渉画像による地殻変動差分画像は、このほかにもさまざまな地震に伴う非構造的な地形変化を捉えている。

5. 1 輪島市門前町道下付近

図－10 は、最も家屋倒壊などの被害が著しかった輪島市門前町道下周辺の地殻変動差分画像である。図中 A で示した地域では、図の中央を西流するハケ



図－10 輪島市門前町道下付近の地殻変動差分画像。A は沖積層の沈下、B は砂丘の変形を示す。

川の沖積低地の範囲が周辺より数 cm 衛星から遠ざかっていることがわかる。これは、地震動により未固結の沖積層（砂質沖積層、石川県、1991）が液化化もしくは圧密により沈下したものと考えられる。実際、この地域では、橋やカルバート、マンホールなどの地中の構造物が道路面などから抜け上がる現象が多数見られるが、これは、沖積層の地盤が沈下したことにより、基礎が比較的深い構造物が相対的に地盤から抜け上がったために発生したものである。

また、図中Bの周辺には、さまざまな色の画素が不規則に並び、干渉が得られていない。石川県(1991)によると、この地域の地盤は小規模な砂丘（八ヶ川河口域北岸）と沖積低地（八ヶ川河口域南岸の沿海部）で形成されていることから、砂丘砂や未固結の砂質沖積層が地震動によりさまざまな流動し、不規則な地表の変形が起こったことが考えられる。

このよう砂質地盤の流動は、1983年5月26日に発生した日本海中部地震（M7.7）でも報告されている。例えば能代市（1984, p. 70）は、砂丘が沖積低地や後背低地と接する付近では家屋などに著しい被害が生じ、そのような場所は地下水位が高くまた砂丘の柔らかなかつ均質な砂粒子のため液化化現象が生じやすいことを指摘している。また、砂丘縁約30°の斜面では、砂丘を取り巻くように等高線にほぼ平行して亀裂（群）が発達し、地盤が低地側に滑っていること、噴砂・噴水を伴わないことから、液化化現象というよりも地震動により重力的に不安定となって滑落したことを報告している。

国土地理院（1984）は、日本海中部地震によって、能代市の自然状態の低位砂丘（全戸数3,811戸）と人工盛土の砂丘間低地Ⅰ（全戸数3,769戸）では、家屋全壊率がそれぞれ3.6%と2.5%であり、家屋の建築年代にもよるが、砂丘上は必ずしも家屋の地震被害が少ないとは言えないことを既に明らかにした。2007年7月16日の新潟県中越沖地震（M6.8）の場合も、例えば宇根ほか（2007）は、柏崎市中心部の建物全壊被害は、砂丘上の南端を東西に延びる通りに沿って集中しており、地形と地震被害の関係を指摘している。

このように、砂丘上の地震による変形は、家屋に与える影響を考えると看過できない。

5. 2 輪島市門前町池田付近

図-11は、道下付近とは異なり著しい家屋倒壊などの被害が特に見当たらない輪島市門前町池田付近周辺（道下から南南西約3km）の地殻変動差分画像である。この図は、図中のA～Aの北東の道路交差点（14mの独立標高点で示される場所）の付近が数cm衛星に近づく、つまり集落自体が海側（西側）へ移動していることを意味している。写真-3は、A

から北東の道路交差点を臨んだ画像である。向こうの小高い丘に、その道路交差点が位置する。

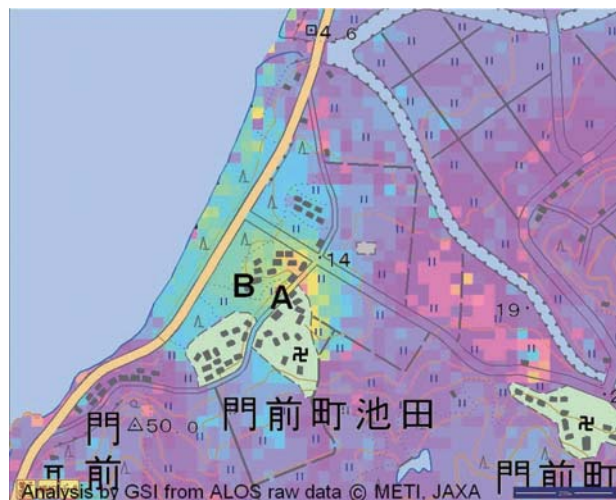


図-11 輪島市門前町池田付近の地殻変動差分画像。A、Bから撮影した写真がそれぞれ写真-3、写真-4である。



写真-3 海側（写真左）への地表の変形を示す道路上の亀裂の補修跡



写真-4 図-11のBにおける道路上の亀裂

道路の延長方向に沿って、道路地下の埋設物（例えばマンホールや接続する下水道管）の位置とは関係無く、比較的新しい路面に隙間を埋めたような補修跡が認められた。地震による微小な亀裂が路面に生じたのであろう。路面補修跡は、黄色シャツ着用者よりも後方、道路交差点を越えて延々と続いていた。

また、写真－4 は、図－11 の A より約 50m 海側の地点（図－11 の B）で撮影された写真である。写真－4 は、B から東北東の山側を撮影した写真である。ここでは横ずれを伴った亀裂が生じていた。

池田の集落付近は、図－11 にも示されているように、2 つの河川（阿岸川と南川）の合流点の南側に位置する。石川県（1991）は、写真－3 の手前の低地を沖積低地（砂質沖積層）、道路交差点が位置する向こうの高まりを砂丘と地形分類している。沖積低地と砂丘自体は海側に 2° と緩やかに傾斜しているが、写真－3 よりも右側（すなわち山側）には海側に $6^{\circ} \sim 10^{\circ}$ の傾斜の地すべりブロックがある。すなわち、沖積低地と砂丘はこのブロックの末端部に位置している。路面補修跡は引張性の亀裂を補修したと考えられるので、この地すべりブロックが海側に再滑動したものではないであろう。現地調査の時点が地震後 5 ヶ月経った後だったので、噴砂・噴水の痕跡を認められず、地盤液状化を伴ったのか不明であるが、図－11 を見ても、沖積低地、砂丘に相当する部分が全体的に海側に移動する動きを示していることから判断すると、地盤ごと海側に側方流動したと考えられる。

日本海中部地震の場合、国土地理院（1984）は、男鹿市野石字五光明地区を対象に、地震前後に撮影された空中写真を標定することによって、水路側に傾斜 1° で傾く砂丘堆積物（大沢ほか、1985）の斜

面が、地震による液状化によって水路側に移動したことを明らかにした。地震前後でも形状が変わらない農道を頼りにその地形変化図を読み取ると、2～3 m の移動があったことが示唆されている。この場合と比較すると、今回の地震の場合、沖積低地と砂丘の変位はかなり微小であったと考えることができ、そのために微小な変位を捉えることができる SAR 干渉画像でその変位がマッピングされたのであろう。

6. まとめ

「だいち」の SAR 干渉画像は、その干渉性と分解能の高さにより、これまでの調査手法では捉えることが難しかった微小な地すべり性の変動や地表地盤の変形を、高い精度で面的、網羅的に捕捉していると考えられ、さらなる監視や防災対策立案のための、きわめて有効な情報を提供していると考えられる。

一方で、地形変化が大きすぎると変動を SAR 干渉画像で捉えることはできず、これだけですべての地表変動を把握することはできない。また、通常の干渉画像は衛星視線方向の変化のみを捉えていることも、判読の際に留意する必要がある。このような特性を踏まえて、SAR 干渉画像による調査は、従来から行われてきた地表踏査や空中写真判読などと相互補完的に行われる必要がある。

今後、SAR 干渉画像による調査の手法について、新たな解析手法や事例研究を進め、地表変動の把握手法や、他の調査手法との組み合わせについてのマニュアル化を図る必要がある。

謝 辞

本研究で使用した ALOS PALSAR のデータは、国土地理院－宇宙航空研究開発機構間の共同研究協定に基づき提供されたものである。

参 考 文 献

- 雨貝知美・和田弘人・藤原みどり・鈴木 啓・飛田幹男・矢来博司（2007）：衛星合成開口レーダーを用いた平成 19 年（2007 年）能登半島地震に伴う地殻・地盤変動の検出。国土地理院時報，113，3-11。
- 石川県（1991）：土地分類基本調査「穴水・富来・剣地」，46。
- 金沢大学理学部地球学科（2007）：平成 19 年能登地震断層発見のお知らせ，<http://earth.s.kanazawa-u.ac.jp/homeJPN.html>（accessed 1 Oct 2007）。
- 川辺孝幸・富岡伸芳・坂倉範彦・石渡 明・平松良浩・奥寺浩樹・小泉一人（2007）：能登半島地震で動いた輪島市門前町中野屋地区の「断層」の発掘調査結果－第 3 報－，<http://kei.kj.yamagata-u.ac.jp/kawabe/www/nakanoya3/index.html>（accessed 1 Oct 2007）。
- 国土地理院（1984）：1983 年日本海中部地震調査図，国土地理院技術資料 D・1-No. 255。
- 大沢 穠・鯨岡 明・栗田泰夫（1985）：羽後浜田地域の地質。地域地質研究報告（5 万分の 1 地質図幅），57。
- 能代市（1984）：能代市の災害記録，613。
- 防災科学技術研究所（2007）：地すべり分布図データベース，http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/index.asp（accessed 4 Oct 2007）。