SAR干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析

Analysis of surface deformation induced by the Noto Hanto and the Chuetsu-oki

Earthquakes in 2007 using synthetic aperture radar interferograms

宇根 寛^{a)*}・佐藤 浩^{a)}・矢来博司^{a)}・飛田幹男^{a)}

Hiroshi UNE, Hiroshi P. SATO, Hiroshi YARAI and Mikio TOBITA

Abstract

The launch of the Advanced Land Observing Satellite 'Daichi' enabled us to detect the deformation of the land surfaces in detail with its high-resolution synthetic aperture radar sensor. We have observed a number of characteristic patterns reflecting the local surface deformation in an interferogram processed to detect the surface deformation triggered by the Noto Hanto Earthquake in 2007, which indicate the slight movements of landslides accompanied with the seismic motion. We processed an interferogram for Chuetsu-oki Earthquake in 2007 as well, and found several patterns suggesting the occurrences of subsidence and lateral flow of the soil. Thus, SAR interferograms can provide important information for monitoring of further development of deformation and planning of countermeasures.

Key words: synthetic aperture radar, interferometry, Advanced Land Observing Satellite 'Daichi', earthquake, surface deformation

和文要旨

陸域観測技術衛星「だいち」に搭載された合成開口レーダー（SAR）は、これまでにない高い分解能で地表の変動を捉えることができる。能登半島地震に伴う地表変動を解析したSAR干渉画像には、局所的な地表の変動を反映した微小な変化パターンが多数みられ、地震に伴うわずかな地すべり性の変動を捉えていることが明らかとなった。一方、中越沖地震についても同様な解析を行ったところ、地盤の沈下や側方流動を示唆するパターンが現れた。このように、SAR干渉画像は、さらなる変状の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することが明らかになった。

キーワード：合成開口レーダー、干渉解析、陸域観測技術衛星「だいち」、地震、地表変動

1. はじめに

干渉合成開口レーダー（干渉SAR）は、地表面の変動を面的に把握する技術として、地震時の地殻変動の解明や火山活動に伴う火山体の変動、地盤地下の広がりへの把握など、すでに多くの実績がある。

干渉SARを用いて地すべりの変動を検出する試みも行われており、わが国では、八幡平や遠音別岳の地すべりや兵庫県南部地震における芦屋断層付近の地すべりを検出した事例が報告されている（矢来ほか2004、関口ほか2005）が、良好な成果が得られた事例は多くない。清水ほか（2005）は、干渉SARによる地すべり地検知の可能性について、現状と課題をまとめているが、良好な結果が得られない原因として、干渉画像の干渉性（コヒーレンス）の問題が考えられるとし、分解能が高く、精密な軌道情報が得られるわが国の陸域観測技術衛星（打ち上げ後「だいち」と命名された。）のLバンドのSARにより、コヒーレンスが大幅に改善され、広域にわたる地すべり検知の可能性が高まるとしている。

また、海外でも、イタリア、スイス、アイスランドなどのヨーロッパ諸国や、米国、ニュージーランドなど、多くの地すべり抽出事例の報告がある（Hilley et al., 2004など）。しかしながら、海外の事例の多くはENVI-

SAT（欧州宇宙機関が運用する環境観測衛星）やRADARSAT（カナダが運用する商用レーダー衛星）に搭載されたCバンドのSARを用いていることから、特に植生のある山間部などではコヒーレンスが不十分で、面的な干渉画像を得ることができない。このため、長期にわたる観測データを用いて、後方散乱特性の時間的変化が少ない多数の点の移動量を求める定常散乱体干渉SAR（PSInSAR）の手法を用いて変動の抽出を行っている例が多い。Refice et al., 2000）は、地すべりのような小領域の現象を対象とした解析では、変動の範囲が大きいこと、植生がまばらなこと、変動が緩慢であることなどの特殊な環境のもとで、基線長の短い、適当な視線方向の、降雨直後でないSAR画像のペアが得られた場合のみ良好な結果が得られるとしている。

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、清水ほか（2005）が予想したように、干渉性が極めて高く、高い分解能で地表の変動を捉えた画像を提供している。すでに、2006年11月から活発化した硫黄島の火山性地殻変動や、2007年3月の能登半島地震、2007年7月の新潟県中越沖地震などに伴う地殻変動を詳細に明らかにし、地震断層の推定などに大きく貢献している（国土地理院, 2007a, b, c, 地震調査研究推進本部, 2008）。さらに、国土地理院では、「だいち」を利用した干渉SARにより、日本全国の地表変動を常時監視する体制の整備を進めている。

* 連絡著者／corresponding author

a) 国土地理院

Geographical Survey Institute

〒305-0811 茨城県つくば市北郷1

1, Kitasato, Tsukuba, Ibaraki, 305-0811 Japan

本稿では、「だいち」のPALSARにより、地震時のわずかな地すべりや地盤の変動を検出することができるようになったことを示し、地表変動の新たな検出手段としての干渉SARの可能性がきわめて大きいことを述べる。

2. SAR干渉画像にあらわれた能登半島地震の地表変動

2.1 SAR干渉画像の特徴

合成開口レーダー (SAR) は、人工衛星や航空機から地表に向けてマイクロ波を発射し、その反射波を観測することにより地表面の性状を把握する技術である。干渉SARは、地表の同一の地点のSAR観測を2回行い、衛星や航空機と地表との間の距離の変化によって生じる反射波の位相のずれを干渉画像として捉えることにより、2回の観測の間に発生した地表面の変動を面的に把握する技術である。SARに用いられるマイクロ波は、主にXバンド (波長約3 cm)、Cバンド (約6 cm)、Lバンド (約24 cm) があり、波長が短いほど解像度は高いが、コヒーレンスは低下する。特に、植生に覆われている地域では、XバンドやCバンドではほとんど干渉画像を得ることができない。「だいち」に搭載されているPALSARは、現在運用されている唯一のLバンドSARである。

干渉SARでは、地表面の変動を反映した縞模様のSAR干渉画像が得られる。干渉画像上の青→赤→黄→緑→青 (もしくはその逆) の一回りの色の変化は、2回の観測の間に半波長分の距離の変化があったことを示す。「だいち」のPALSARの波長は23.6 cmであるので、1周期の干渉縞は11.8 cmの距離の変化を示していることになる。通常、青→赤→黄→緑→青の変化は衛星から地表が遠ざかり、青→緑→黄→赤→青の変化は衛星に地表が近づいたことを表す。

また、衛星SARでは、電波が衛星から斜め下方に向かって発射される。「だいち」はほぼ南北の極軌道をもっているため、衛星が南から北に通過する (ascending軌道) 際には西方上空から、北から南に通過する (descending軌道) 際には東方上空から対象地域を観測する。南北方向の水平移動に対しては感度がない。「だいち」は46日周期で同じ軌道を通過するため、SAR干渉画像が得られる最短の間隔は46日である。

なお、干渉SARのしくみやSAR干渉画像の見方などについては、すでに多くの解説がある (国土地理院干渉SARホームページ (国土地理院, 2008) など)。

2.2 地殻変動差分画像の作成

2007年3月25日9時41分、能登半島西岸付近の深さ約10 kmでマグニチュード6.9の地震が発生し、最大震度6強が観測された (平成19年 (2007年) 能登半島地震)。この地震により死者1名のほか、多数の家屋が全壊するなど、大きな被害が発生した。国土地理院では、この地震に伴う地殻変動を「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、局所的な地表の変動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。

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日に対象地域の西方上空から観測された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, 小沢ほか, 2007) 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。

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>)。

2.3 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数見られた。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程度のものが多い。

この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 (防災科学技術研究所, 2007) 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。

筆者らは、このうちの数カ所を現地踏査した。輪島市門前町俊兼 (図-5) 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た。周辺が一様に青を示す中で、変動域は黄色～赤を示していることから、この範囲全体が西方上空の衛星の方向に数cm近づいたことが示されている。すなわち地盤が西方向に数cm移動したか、もしくは数cm隆起したことを示す。地形からみると、東南東から西北西に向かう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、地盤が隆起したことは考えにくく、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、地震時に発生したと判断できる約10cmの段差が地表に発見された (写真-1)。

図-1 SAR干渉画像。西方上空から観測。
Fig. 1 SAR interferogram

図-2 断層モデルによる干渉画像シミュレーション
Fig. 2 Expected interferogram from fault model

図-3 震源断層モデル (小沢ほか2007)
Fig. 3 Seismic fault model

図-4 地殻変動差分画像
Fig. 4 Residual interferogram

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-6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はほぼ対応するように変動パ

図-5 輪島市門前町俊兼の変動パターン
Fig. 5 Deformation pattern in Toshikane

図-6 輪島市門前町大生の変動パターン
Fig. 6 Deformation pattern in Ohae

ターンが現れている。矢印に示した地点には、周辺の青～青紫の範囲からみて黄→赤→青のサイクル2回分の干渉縞が現れており、縞の南側は北側に比べて20cm程度西方上空の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動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-7-1)。地形的には過去の地すべりを示す特徴はなく, また, いくつかの尾根や谷を越えてパターンが広がっている。この変動をより詳細に把握するため, Fujiwara et al.(2000) の手法を用いて, 異なる軌道からの2組のSAR干渉画像を解析し, 変動を上下方向と東西方向の成分に分離(2.5次元化)した。2006年12月23日と2007年5月10日に対象地域の東方上空から観測したデータを用いてSAR干渉画像を作成し, 上述の西方上空より観測した干渉画像と組み合わせて変動ベクトルの解析を行い, 上下方向(図-7-2)と東西方向(図-7-3)のそれぞれの移動量の分布を求めた。さらに, これをもとに最大の変動を示す地点を通る東西断面の変動ベクトルを求めた(図-7-4)ところ, 中島町古江では, 地すべりの構造から想定される変動パターンとよく整合する地表変動を示す結果が得られた。現地踏査では地表に亀裂等の顕著な地すべりの兆候を発見することはできなかったが, 楕円形のブロック全体が移動するすべり量最大数10cm程度の初生的地すべりが発生していたことが推定される。

なお, 地震後のSAR干渉画像では, この地すべりに伴う変動は観測されておらず, 地震時のみに活動したと考えている。

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。

2.4 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。

2.4.1 輪島市門前町道下付近

図-8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八ヶ川の沖積低地の範囲が紫～黄色を示していることから, 周辺(青)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)が液状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, 地震後, 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たが, 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, 全体的には青や紫の単調な色が示されている。このことは, 地盤に比較的一様な変動があったためにSARの干渉が得られていることを示しているが, 図中Bから南の海岸に沿った帯状の地域には, 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。砂丘砂や未固結の砂質沖積層が表層に分布する地域のみ干渉が得られていないことは, 砂質の地盤に地震動により不規則な地表の変形が起こったことを示していると考えられる。

2.4.2 輪島市門前町池田付近

図-9は, 輪島市門前町池田付近(道下から南南西約3km)の地殻変動差分画像である。この図のほぼ中央の集落付近が周辺の紫から青～黄色に変化しており, 局所的に数cm西方上空の衛星に近づいたことが示されている。このような局所的な隆起があったことは考えにくいことから, 集落全体が海側(西側)へ移動したと考えられる。池田の集落付近は, 2つの河川の合流点の南側に位置する。石川県(1991)は, 池田集落の周辺を沖積低地(砂質沖積層)及び砂丘と地形分類している。沖積低地と砂丘は海側に2°と緩やかに傾斜しているが, 集落よりも山側には海側に6°～10°傾斜する地すべり・崩壊ブロックがある。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。図-9を見ると, 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おり, 池田集落の立地する地盤ごと海側に側方流動したと考えられる。集落内の家屋等に著しい被害はみられず, ブロック状に移動したと思われる。

3. 中越沖地震の地表変動と被害

能登半島地震から4ヶ月足らずの2007年7月16日10時13分, 新潟県上中越沖の深さ約10kmでマグニチュード6.8の地震が発生し, 最大震度6強が観測された(平成19年(2007年)新潟県中越沖地震)。この地震により死者15名のほか, 柏崎市街地を中心に家屋が多数全壊するなど, 大きな被害が発生した。その被害の特徴としては, 地震の規模と地質的条件が2004年の中越地震と比較的似ているにもかかわらず, 多数の斜面崩壊や地すべりが発生した中越地震と異なり, 斜面崩壊, 地すべりの発生が比較的少なかったことと, 砂丘の縁辺部, 旧河道, 自然堤防など, 特定の地形条件をもつ地域に被害が集中したことがあげられる。

本稿では, 被害の要因となった地震に伴う地形変化を「だいち」のSAR干渉画像で抽出し, 被害, 地形変化の分布と地形条件の関係について考察することを試みた。

3.1 SAR干渉画像とその判読

図-10は, 地震前の2007年6月14日と地震後の9月14

写真-1 地すべりによる道路上の亀裂 (図-5の矢印の地点)
Photo 1 Cracks on road inferred by landslide

写真-2 地すべりによる道路上の亀裂, 斜面の変状 (図-6の矢印の地点)
Photo 2 Cracks and slope deformation inferred by landslide

図-7-1 七尾市中島町古江の変動パターン
Fig. 7-1 Deformation Pattern in Furue

日に西方上空 (ascending軌道) から, 図-11は地震前の2007年1月16日と地震後の7月19日に東方上空 (descending軌道) から観測されたPALSARのデータをそれぞれ用いて作成されたSAR干渉画像である。特にdescending軌道からの観測で, 震源近傍の観音岬付近を中心にした楕円形の干渉縞が明瞭に現れ, 震源断層による広域的な地殻変動を示している。なお, ascending軌道に現れている, 震源からやや離れた帯状の変動は, 活褶曲が成長したことを示していると考えられる (国土地理院, 2007d, Nishimura et al. 2008)。能登半島地震と同

図-7-2 上下方向の変動量 (水色: 低下, 黄色: 隆起)。赤線は図-7-4の断面位置。
Fig. 7-2 Vertical component of deformation

図-7-3 東西方向の変動量 (水色: 西方向, 黄〜赤: 東方向)。赤線は図-7-4の断面位置。
Fig. 7-3 East-west component of deformation

図-7-4 東西断面の地表変動ベクトル
Fig. 7-4 Surface Deformation Vectors

図-8 輪島市門前町道下付近の変動パターン。Aは沖積層の沈下, Bは砂丘の変形を示す。
Fig. 8 Deformation pattern in Toge

図-9 輪島市門前町池田付近の変動パターン
Fig. 9 Deformation pattern in Ikeda

様に, これらの画像をもとに地殻変動差分画像を作成し, 詳細に判読を行った。その結果, 能登半島地震の際のような地すべりを示す特徴的な変動パターンは見あたらな

かった。しかし、被害の著しかった柏崎市街地周辺をさらに詳細に観察すると、いくつかの特徴的な変動パターンがみられた。これらを、地形分類や被害分布(図-12)、現地調査の結果などと合わせて、変動の要因を検討した(図-13)。その結果、次のような特徴が明らかになった。なお、図-13はascending軌道(東方上空)の観測データから作成した差分画像である。また、下記の①~⑧は図-13の中の①~⑧に対応している。

- ① 被害の著しかった市街地中心部(通称えんま通り)の南側に東西方向の帯状の変動パターンが見られる。よく観察すると周辺の水色から帯の中心に向かって黄~赤に変化していることから、衛星方向に近づいたと判断でき、隆起したことを示すと考えられる。
- ② 市街地が立地している砂丘上に、北西に向かって青から赤~黄に変化する変動パターンが確認され、地盤の北西方向への移動と考えられる。
- ③ ①の崖の南の沖積低地に、①とは逆の青~赤~黄を示すパターンが認められ、地盤の西方向への移動と考えられる。
- ④ 市街地の東の沖積低地には、円形の中央に向かって青~赤~黄と変化する変動パターンが認められ、地盤の局所的な沈下を示しているとみられる。
- ⑤ 沖積低地には黄~赤~青のパターンも認められ、衛星に近づく変動であることから、東方向への移動と考えられる。
- ⑥ 鯖石川が砂丘を浸食して形成した低地では、さまざまな色の画素が不規則に入り乱れ、干渉画像が得られていない。ここでは現地で大規模な液状化が確認されている。
- ⑦ 市街地の東の沖積低地では、帯状に干渉画像が得られていない地域があり、液状化や地盤の流動を示していると考えられる。その範囲は沖積低地に載る薄い自然堤防の位置と一致する。
- ⑧ 市街地の南西の段丘面に楕円状の変動パターンが認められ、中心に向かって黄~赤~青と変化していることから、楕円形の隆起があったことになる。

これらについて、現地調査の結果等と併せてその変動の原因について考察した。

- ・①の隆起パターンが現れたのは砂丘南縁の直線状の崖の基部にあたる。砂丘の末端が最大傾斜方向の南側の沖積低地側に側方流動したことにより、基部が圧縮変形したと考えられる。
- ・市街地北部は砂丘が海側に向かって緩やかに北西方向に傾き下がっている。②の変動は、砂丘砂が地震に伴って傾斜方向に側方流動したことを示していると考えられる。
- ・③~⑤については、地下水位の高い沖積層の液状化や側方流動により発生したことが考えられる。
- ・砂丘を浸食して形成された低地は、砂層である上に地

図-10 中越沖地震に伴う地殻変動を示すSAR干渉画像。西方上空より観測。

Fig. 10 Interferogram from ascending orbit

図-11 中越沖地震に伴う地殻変動を示すSAR干渉画像。東方上空より観測。

Fig. 11 Interferogram from descending orbit

図-12 柏崎市街地の地形分類と被害分布。黄緑：低地，谷底平野，黄：砂丘，茶：自然堤防，薄茶：扇状地，橙：段丘，桃：埋め立て地。赤：建物の倒壊が卓越した箇所，青：液状化が卓越した箇所

Fig. 12 Landform classification and damage map

図-13 柏崎市街地の地殻変動とその解釈

Fig. 13 Deformation and its interpretation

下水位が高いことから、液状化や地盤流動が容易に発生すると考えられる。このため、不規則な地表変動が生じ、⑥のように干渉画像が得られなかったものと考えられる。

- ・本地域の沖積低地上の自然堤防は、砂が沖積層上に薄く堆積していると考えられ、軟弱な沖積層のふたをするような状態にあり、⑦に示された地盤変動が発生したと考えられる。
- ・⑧の隆起の原因については不明である。

3.2 沖積層や砂丘の変形と被害

能登半島地震や中越沖地震でみられた地盤の側方流動は、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。例えば能代市では、砂丘が沖積低地や後背低地と接する付近で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く均質な砂粒子のため液状化現象が生じやすいことが指摘されている（国土地理院，1984）。また、砂丘縁の約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、液状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。

日本海中部地震では、傾斜1°の砂丘堆積物の斜面が2～3m移動したことが報告されている。このような事例は特殊な場合と考えられてきたが、微小な変動を面的に捉えることができるSAR干渉画像で、地震時に沖積低地や砂丘の微小な側方流動が広範に発生している可能性が示唆されたといえることができる。

4. 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、地形の変化量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、PALSARの解像度は10mであるが、少なくとも100m程度以上の範囲が一様に周辺と異なる動きをしなければ干渉を得ることができない。また、画素間の変動量の差が数10cmを超えると干渉を得ることはできない。また、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（JAXA）間の共同研究協定に基づき提供されたものである。

引用文献

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，第113集，pp. 3－11。
 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
 Fujiwara, S., Nishimura, T., Murakami, M., Nakagawa, H., Tobita, M. and Rosen, P. A. (2000) : 2.5-D Surface Deformation of M6.1 Earthquake Near Mt Iwate Detected by SAR Interferometry, Geophys. Res. Lett., Vol. 27, pp. 2049－2052.
 Hilley, G. E., Burgmann, R., Ferretti, A., Novati, F. and Rocca, F. (2004) : Dynamics of Slow-Moving Landslides from Permanent Scatterer Analysis, Science, Vol. 304, pp. 1952－1955.
 石川泉（1991）：土地分類基本調査「穴水・富来・剣地」，46p.
 地震調査研究推進本部（2008）：2007年の主な地震活動の評価，
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/major_act/act_2007.htm.
 小荒井 衛・宇根 寛・西村卓也・矢来博司・飛田幹男・佐藤 浩（2008）：SAR干渉画像で捉えた平成19年（2007年）新潟県中越沖地震による地盤変状と活褶曲の成長，地質学雑誌。
 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.
 国土地理院（2007a）：人工衛星データを用いて硫黄島の地殻変動を詳細に把握，<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/0309-1.htm>
 国土地理院（2007b）：人工衛星データを用いて平成19年（2007年）能登半島地震に伴う地殻変動を詳細に把握，<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/0412.htm>
 国土地理院（2007c）：人工衛星データを用いて平成19年（2007年）新潟県中越沖地震に伴う地殻変動を面的に把握（第1報），
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/0720b.htm>
 国土地理院（2007d）：人工衛星データの解析により平成19年（2007年）新潟県中越沖地震に関連した地殻変動を新たに発見，
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007/1002.htm>
 国土地理院（2008）：国土地理院干渉SARホームページ，
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>
 Nishimura, T., Tobita, M., Yari, H., Amagai, T., Fujiwara, M., Une, H., and Koarai, M. (2008) : Episodic Growth of Fault-related Fold in Northern Japan Observed by SAR Interferometry, Geophys. Res. Lett., Vol. 35, L13301, doi: 10. 1029/2008GL034337.
 小沢慎三郎・矢来博司・飛田幹男・宇根 寛・西村卓也（2007）：平成19年（2007年）能登半島地震の震源断層モデル，国土地理院時報，第113集，pp. 49－54.
 Ozawa, S., Yari, H., Tobita, M., Une, H. and Nishimura, T. (2008) : Crustal Deformation Associated with the Noto Hanto Earthquake in 2007 in Japan, Earth Planets Space, Vol. 60, pp. 95－98.
 Refice, A., Guerriero, L., Bovenga, F., Wasowski, J., Veneziani, N., Atzori, S., Ferrari, A. R. and Marsella, M. (2000) : Detecting Landslide Activity by SAR Interferometry, Proceedings of the 2000 ESA ENVISAT Symposium, http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/gothenburg/207_refic.pdf
 関口辰夫・藤原 智・飛田幹男・矢来博司・大井信三（2005）：干渉SARによる地すべりの検出と地形との関係，日本地理学会発表要旨集，No. 68，pp. 95.
 清水孝一・山越隆雄・小山内信智・福嶋 彩・三尾有年（2005）：合成開口レーダの差分干渉処理技術による地すべり地検知の可能性について，日本地すべり学会誌，Vol. 42，No. 4，pp. 32－37.
 矢来博司・大井信三・関口辰夫・飛田幹男・藤原 智（2004）：JERS-1/SARデータの干渉解析による火山地域の地すべり変位の検出，平成16年度東京大学地震研究所共同利用（研究集会）「干渉SARの展開」（課題番号：2004－W－09）。（原稿受付2007年12月13日，原稿受理2008年5月12日）