

干渉SAR解析による斜面の微小変動の把握

神山嬢子・江川真史・水野正樹・國友 優

1. はじめに

近年、降雨規模の増加傾向に伴う大規模な土砂移動現象の発生により、社会的に甚大な被害をもたらす災害が発生している。大規模な土砂移動現象による被害を防止・軽減するための対策を適時適切に実施するためには、地すべりや深層崩壊等の予兆となる微小な斜面変動を早期に把握する必要がある。通常、地すべり性の斜面変動を把握するには、人工構造物における数cm～数十cm程度の変状や、斜面における数十cm～数m程度の亀裂、段差地形等の発生が目安になると考えられる。また、深層崩壊については前兆的な変動の顕在化と崩壊発生の関係の蓋然性は未だ解明されていないが、岩盤クリープ斜面等の重力性変形との関連性が深いと考えられている。

しかし、国土の約7割が山地である我が国において、局所的な斜面変動の有無や程度を、現地調査や個別斜面での変位計測でくまなく調査することは非現実的である。このような状況も踏まえ、国土交通省「土砂災害対策の強化に向けた検討会」において、気候変動等の影響により想定される土砂災害の大規模化や頻発化に対し、センシング技術の高度化による国土監視の強化が提言された¹⁾。

効果的かつ効率的な国土監視を行うには、モニタリング精度、広域性、コストのバランスがとれた、衛星リモートセンシング技術の活用が適していると考えられる。人工衛星をプラットフォームとするセンシング技術は様々あるが、一般的に数cm程度の計測精度で地表変位を面的に把握できる合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: 以下、「SAR」という)の二時期の観測データを干渉処理する技術(以下、「干渉SAR解析」という)が有効と考える。干渉SAR解析による斜面変動検出事例はこれまでも報告されているが^{2),3)}、一般的に山間地域は平地に比べ干渉性が低く、干渉SAR解析により斜面変動箇所の抽出が可能な環境条件、変動特性(変動速度、規模等)などが明らかになっておらず、実務利用に

至っていないのが現状である。そこで、斜面変動抽出における干渉SAR解析の適用性を明らかにするため、山間地域の干渉性を分析し、実際の斜面変動箇所における適用性を検討した結果を報告する。

2. 山間地域における干渉性の評価

2.1 干渉SAR解析とは

同一箇所での2時期の観測を行い、SARセンサから地表に向かって照射されたマイクロ波の後方散乱波の干渉処理により、位相のずれを把握し、2時期の観測の間に発生した地表変動を面的にとらえる技術である(図-1)。地表が変動している場合、干渉画像には位相差に応じた縞模様が見られ、色の変化によって衛星の視線方向における地表面と衛星の距離変化を把握することができる。

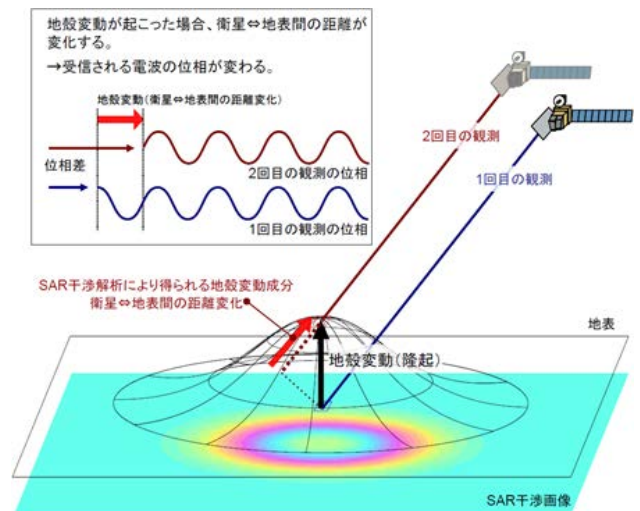


図-1 SAR干渉解析により得られる地殻変動成分の概略図⁴⁾

2.2 解析対象

本検討は、2006年10月～2011年4月までで定常運用された陸域観測技術衛星「だいち」(以下、「ALOS」という)のSARセンサ(以下、「PALSAR」という)の観測データを用いた。PALSARにはLバンドのマイクロ波が用いられており、海外衛星で主に使用されているXバンドやCバンドに比べ、波長が長く植生を透過しやすい特徴があるため、日本など森林が広がる地域において斜面変動を抽出するには、Lバンドが有効であることが示唆されている⁵⁾。

解析は、深層崩壊推定頻度が特に高いエリア⁶⁾を

含む地域 (図-2) を対象に、表-1に示すアーカイブデータを用いて解析を行った。

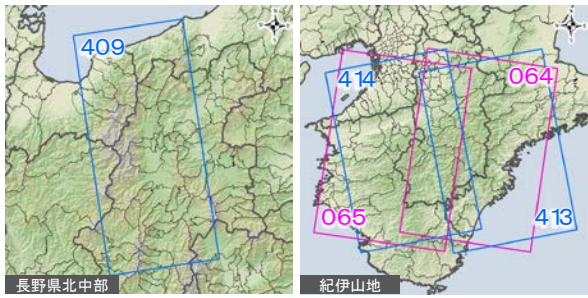


図-2 解析対象地域

表-1 解析に用いたALOS/PALSARシーン数

対象地域	軌道方向	軌道番号	シーン数
長野県北中部	北行	409	24
紀伊山地	北行	413	21
		414	24
	南行	064	10
		065	15

2.3 解析手法

干渉解析で斜面変動検出の課題となる山間地域の干渉性について、干渉性低下の要因と考えられる軌道間距離や撮像日間隔、斜面方位・勾配の指標について定量的評価を行った。山間地域内 (傾斜 10° 以上) を対象に、干渉性が良好である指標として、各解析ペアのコヒーレンスが0.3以上 (経験的に干渉画像上で変動縞が視認できる程度) の面積の割合を用いた。

2.4 解析結果

長野県北中部の干渉解析結果から、干渉性と軌道間距離の関係を分析した結果を図-3に示す。軌道間距離が長くなるにつれて山間地域の干渉性が低下傾向であり、軌道間距離1,000m程度以内で特に良好な干渉性が認められた。ただし、解析ペアに積雪期 (12月~3月) の画像を含むと、軌道間距離が短くても干渉性が低い傾向が認められた。また、撮影日間隔が長いと干渉性が低下する場合が見られた。

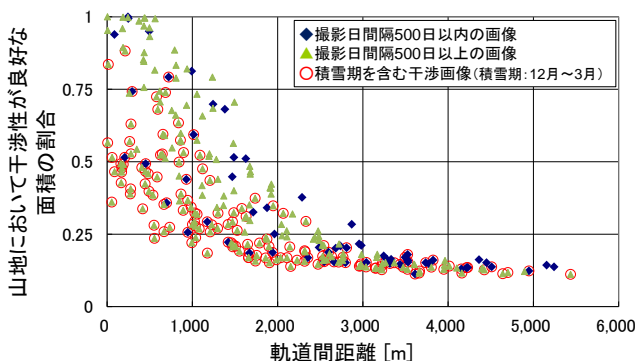


図-3 軌道間距離と干渉性の関係 (軌道番号409)

次に、干渉性と斜面方位・勾配の関係を分析した結果を図-4に示す。ここでは、斜面向き・勾配が干渉性に与える影響を評価するため、軌道番号毎に複数のコヒーレンス画像をスタックし、コヒーレンス画像の平均値を指標として用いた。両軌道とも斜面方位による干渉性に大きな違いは認められないが、北行軌道では南東方向斜面、南行軌道では南西方向斜面で干渉性が比較的良く、勾配が緩いほど干渉性が高くなる傾向が認められた。

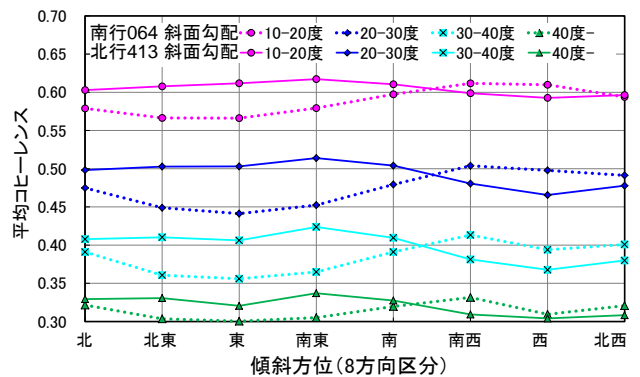


図-4 斜面方位・勾配と干渉性の関係 (軌道番号064,413)

3. 斜面変動検出における適用性検討

3.1 調査概要

調査地は、和歌山県田辺市を流れる右会津川の右岸に位置し、紀伊山地南縁部の標高300~400m程度、勾配 20° ~ 30° の東向き斜面である。地質は、古第三紀始新世の四万十帯音無川層の砂岩泥岩互層で、地すべり地形分布図データベースでは地すべり地形を呈している⁷⁾ (図-5)。当該斜面の変動状況を確認するため、現地調査やGPS計測を行うとともに、斜面変動履歴を把握するため既往資料調査と県へのヒアリングを行った。また、干渉SAR解析を行い、現地の変動状況と比較した。

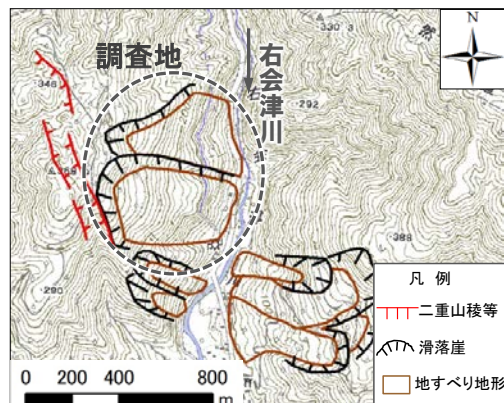


図-5 調査地周辺の地形状況

3.2 斜面変動調査結果

当該斜面の南北に大きく二つのブロックがあり、その斜面頂部には二重山稜が見られる（図-5）。滑落崖の比高が最大約50m、地すべりブロック内の農道には路面の段差や縁石の亀裂、緩斜面が点在し、北側ブロック下部斜面の法面では井桁工に変状が見られるなど、古くから地すべりが活動していたことが推測された。また、南側地すべりブロックの側部では、崩落により急崖が形成されている。

ヒアリングや既往資料調査の結果、昭和61年頃から斜面変動が確認され、北側ブロック下流側の下方斜面において、県が調査・観測を行った平成19年11月頃は孔内傾斜計で20～30cm/年程度の変位が確認されたことが分かった。また、平成23年6月～9月にかけて、台風や降雨により南側地すべりブロックの側部で度々崩壊が発生した（図-6）。地すべりブロック側部斜面の末端部の土塊が谷側に押し出されていることが推測され、その不安定化した土塊が台風や降雨をきっかけに、数回にわたり崩壊したと考えられる。また、地すべりブロック内4箇所GPS観測を行った結果、平成25年3月5日～平成26年11月7日の612日間に、約12cm以上の水平変位が観測され、地表変位の継続が確認された（図-6）。

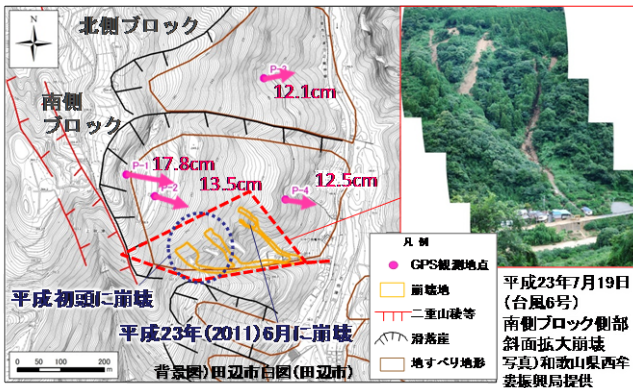


図-6 ブロック側部の崩壊状況とGPS計測結果

3.3 干渉SAR解析結果

調査地が含まれる軌道番号065（南行）、414（北行）のALOS/PALSARアーカイブ画像（図-2，表-1）を用いて干渉SAR解析を行い、干渉画像上で面的にある程度の広がりをもって連続的な色階の変化が見られる場所を変動縞として抽出した。軌道番号414のシーンでは、高い干渉性が得られた画像のうち4割弱のペアで地すべりブロック内における変動縞を確認した。そのうち、2008年7月～2010年10月の間の複数の画像ペアで、衛星の視線方向から遠ざかる方向の変動縞を確認した。図-7の干渉画像で

は地すべりブロックの周囲が全体的に水色であるのに対し、地すべりブロック内では滑落崖付近から水色→紫→ピンク→橙に色が変化し、周囲と比べ相対的に、衛星から遠ざかる方向に変動していることが読み取れる。このような変動方向は、東向きの変動縞が重力方向に変動した場合の方向と整合する。

一方、軌道番号065のシーンでは、変動縞が認められなかった。ALOSは衛星軌道方向の右斜め下方に向かってマイクロ波を照射するため、照射方向と斜面向きが正対する場合は、衛星と斜面間の距離変化が斜面変動により相殺される（図-8）。そのため、2回の観測間の距離変化が極めて小さく、変動を捉えることが出来なかったと考えられる。

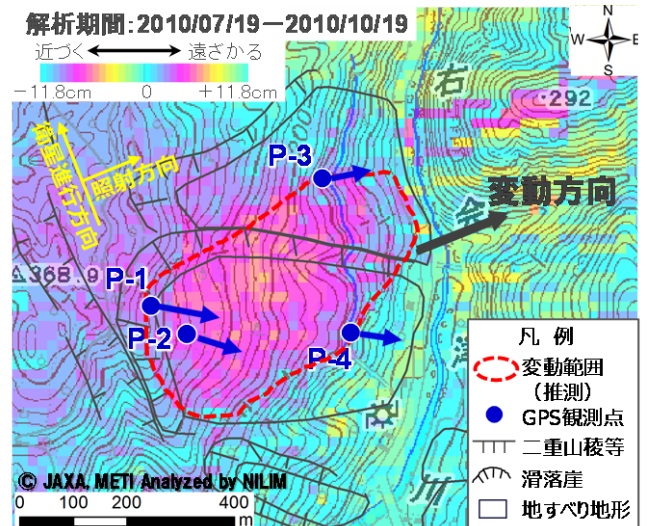


図-7 干渉SAR解析結果（軌道番号414）

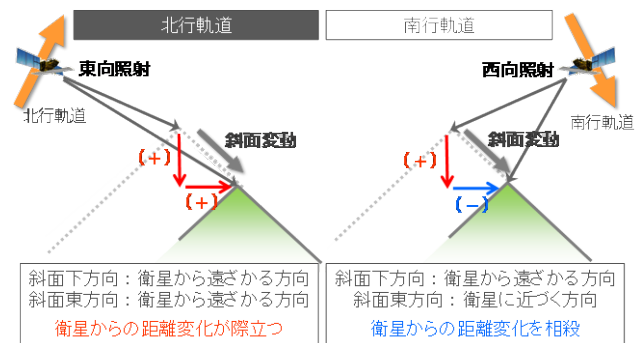


図-8 斜面変動把握における斜め観測のイメージ

3.4 斜面変動検出における干渉SAR解析の有効性

当該斜面では、地形図の判読を主とした地形的特徴から当初は大きく2つの地すべりブロックと認識されていたが、変位観測や現地調査、既往資料調査により、2つのブロックにまたがる斜面変動が推測された（図-7）。干渉SAR解析による変動縞の範囲もこれと概ね一致していることから、地形的特徴の解釈だけでは困難な実際の斜面変動範囲を把握する

上で、干渉SAR解析の有効性が示されたと考える。

また、干渉SAR解析と現地の斜面変動状況調査により得られた結果を時系列に整理した(表-2)。当該箇所では以前から斜面や構造物における変状、地すべりブロック側部の崩壊等、地すべりが継続的に活動していることが推測される。干渉SAR解析により変動縞が確認された前後の期間にも地すべりの活動が確認されており、地すべりの変動方向と範囲は、干渉SAR解析で複数時期確認された変動縞と調和的であることから、干渉SAR解析結果は地すべりの斜面変動を捉えた可能性が高いと考える。

表-2 変動状況の時系列

時期	変状状況	干渉SAR解析結果
昭和61年～平成2年 平成5年	◆側部崩壊 ◆変状	
平成19年3月～11月	◆変状 ◇観測(孔内傾斜計20～30mm/年)	ALOS 定常運用 期間 ↑ 変動縞 ↓ 変動縞
平成20年7月～平成21年10月	◆変状(平成21年7月)	
平成22年3月～平成22年10月		
平成23年4月	◆変状	
平成23年6月～9月	◆側部崩壊 (6/16崩壊、7/19崩壊、7/20拡大崩壊、9/4拡大崩壊) ◇観測(孔内傾斜計で変位あり)	
平成24年3月～平成26年11月	○観測(GPS 6.8mm/月)	

(凡例: ◆◇ヒアリング・既往資料調査、○国総研観測)

4. まとめ

本検討により、山間地域の干渉性において、主に軌道間距離や積雪期が干渉性に影響を与えていること、軌道方向に対する斜面向きにより、干渉性や変動検出に対する感度が異なることが分かった。また、地すべり性の変動が見られる斜面において、事例的に干渉SAR解析による斜面変動把握の有効性を確認することが出来た。

一方で、干渉SAR解析により把握可能な斜面変

動特性の解明には事例の積み重ねが必要である。今後は、平成26年11月に定常運用が開始された陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)を活用し、国土監視の実務利用を念頭においた斜面変動検出手法の検討・提案を行って参りたい。

謝 辞

本検討にあたり、SAR画像をご提供頂いた国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構、調査地に関する調査資料の提供や現地調査にご協力頂いた和歌山県西牟婁振興局はじめ関係各位に対し感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 土砂災害対策の強化に向けた検討会(2014) 土砂災害対策の強化に向けて 提言、
<http://www.mlit.go.jp/common/001047106.pdf>
- 2) 佐藤浩、岡谷隆基、小荒井徹、鈴木啓、飛田幹男、矢来博司、関口辰夫: SAR干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について—山形県月山周辺を事例にして—、日本地すべり学会誌、Vol.49、No.2、pp.61～67、2012
- 3) 佐藤浩、宮原伐折羅、岡谷隆基、小荒井徹、関口辰夫、八木幸司: SAR干渉画像で検出した2011年東北地方太平洋沖地震に関わる地すべり性地表変動、日本地すべり学会誌、Vol.51、No.2、pp.5～13、2014
- 4) 国土交通省国土地理院(2007年) 報道発表資料: 資料2 合成開口レーダー干渉解析の原理
<http://www.gsi.go.jp/WNEW/PRESS-RELEASE/2007-0720b-0720b-2.html>
- 5) Strizzi T, Farina P, Corsini A, Ambrosi C, Thuring M, Zilger J, Wiesmann A, Wegmuller U, Werner C (2005) Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry, Landslides, Vol.2, pp.193-201
- 6) 国土交通省砂防部(2010) 報道発表資料: 深層崩壊に関する全国マップについて、
http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000252.html
- 7) (独) 防災科学技術研究所、地すべり地形分布図データベース、<http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/>

神山嬢子



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室 研究
官
Joko KAMIYAMA

江川真史



国際航業(株)(前国土交通
省国土技術政策総合研究
所土砂災害研究部土砂災
害研究室 交流研究員)
Masafumi EKAWA

水野正樹



新潟大学災害・復興科学
研究所特任准教授(前
国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
主任研究官)
Masaki MIZUNO

國友 優



国土交通省国土技術政策
総合研究所土砂災害研究
部土砂災害研究室長
Masaru KUNITOMO