

リモートセンシング技術による斜面移動箇所探索手法の検討

佐藤 匠* 水野正樹** 内田太郎*** 岡本 敦****

1. はじめに

長期連続降雨や地震等を起因とする大規模崩壊は日本の各地で発生しており、直接の人的・物的被害のほか、多量の土砂が河道閉塞を引き起こし、湛水による決壊の危険性から下流の住民が避難する事態に発展する例も見られる。

このような大規模崩壊の発生危険箇所ポテンシャルについては(独)土木研究所が「深層崩壊*推定頻度マップ」等で危険地域を公表しているが、これは地形や地質・災害履歴等から導き出されたマクロスケールでの災害発生ポテンシャルの評価であり、どの斜面が危険なのかという評価ではない。従来このような大規模崩壊は岩盤クリープと呼ばれる重力変形によって岩盤が不安定化したところに地震や連続降雨などの外力が働いて発生することが指摘されており、多重山稜や斜面のクラックなどが危険箇所の指標とされている。また、地震や風化作用、工事などによる地下環境の変化によってこれまで見られなかった新たな箇所において斜面の不安定化・地すべりが発生する場合もあり、これらの箇所でも以降の地震・豪雨で大規模崩壊を引き起こす可能性がある。

本稿ではリモートセンシング技術を利用することによってこれらの大規模崩壊へと結びつく斜面変状を広域の山間地から抽出・モニタリングすることを目的としており、有効と思われる2種の手法について実際の現象との対比を行い、その特性を整理したものである。

2. 検討手法

2.1 検討手法の選定

日本国内の山間地域は森林限界以上の高標高部を除くと、そのほとんどが森林植生に覆われている。そのため斜面の微小な変状を抽出するには植生を透過する測定原理が必要となる。加えて効率的に広域を観測できる能力を有すること、斜面変

状を明確に検出できる空間分解能を保有すること、数～数十cmの微小な変動を抽出できることが斜面変状抽出を行う上での使用条件となる。

これらの条件を設定した結果、斜面変状を検出できる可能性がある技術として衛星観測によるDInSAR(L-band)と航空レーザ計測によるDEM画像解析(3D-GIV)の2種を選定した。

2.2 検討手法の概要

2.2.1 DInSAR(L-band波長帯)

DInSAR(Differential InSAR)は合成開口レーダ(SAR*; Synthetic Aperture RADAR)で取得されたデータを利用した解析技術の一つであり、2時期の電波位相のずれから地表のわずかな変状を面的に抽出する手法として、地すべりや地盤沈下モニタリング等で用いられている。標準的な解析方法で検出可能な変位量は数cmから十数cm程度で、使用周波数に応じて異なり波長が短いほど検出感度が高くなる。ただし表面構造が安定しない森林等の植生に覆われている場所では、植生の表面で反射するC-band(4-8GHz)やX-band(8-12GHz)といった短い波長帯では植物の成長や風の影響を受けて干渉性が失われるため利用には適さない。そのため干渉解析への適用が可能なのは表層の植生を透過して地表で干渉するL-band(0.5-1.5GHz)やP-band(0.25-0.5GHz)といった比較的長い波長帯となる。日本の陸域観測衛星ALOS(だいち)は2006年の打ち上げから運用停止となった2011年5月までL-band SAR "PALSAR"(波長帯1.27GHz)により世界全域の観測を実施しており、本研究ではこのデータを利用して解析を実施した。

2.2.2 DEM画像解析

本手法(手法名称「3D-GIV」)は航空レーザ等によって取得された高分解能・高精度DEM(数値標高モデル)から地形の起伏表現に優れた「地形解析図」を作成し、2時期で取得された同地区の地形解析図から画像解析で変化を抽出し、変位方向と量をベクトルとして出力するものである²⁾。一般的に地形変化の評価として用いられ

Some examinations to detect landslide movements with RS techniques in mountainous regions

*土木用語解説：深層崩壊の発生に関する微地形要素、SAR

る2時期の差分による地形変動量解析とは異なり、地形的特徴の移動を画像解析によって追跡するため計測誤差の影響を受けにくいことに加えて、標高値の上下変動ではなく水平方向の変動を取得できるため斜面変状の把握に優れる。検出可能な移動量はDEMの分解能に依存するが、1m分解能のDEMであれば0.1m単位での評価が可能である。

3. 検討結果

3.1 福島県土湯温泉周辺・塩の川地すべり

東北地方太平洋沖地震前後のALOS PALSARによるDInSAR解析で土湯温泉付近の大規模斜面変状が報告されており、本研究でも報告と同じペア（2011/2/2～2011/3/20）でのDInSAR解析を実施した。同地区は元々南北2km、東西3km程度の巨大な地すべり地形を呈しており、同地震において滑動が促進されたものとされている（図-1(a)）。3D-GIV解析でも地すべり地形の東向きの変動が検出されているが、周辺にも変動ベクトルが頻出している（図-1(b)）。これは地震による地殻変動の補正量が適切でないことが原因の一つとして考えられる。このことから、地震による地殻変動のような広域のマスムーブメントと地すべりの様な局所変位が合成した変動には、局所変位を抽出するための厳密な補正が必要と考えられる。

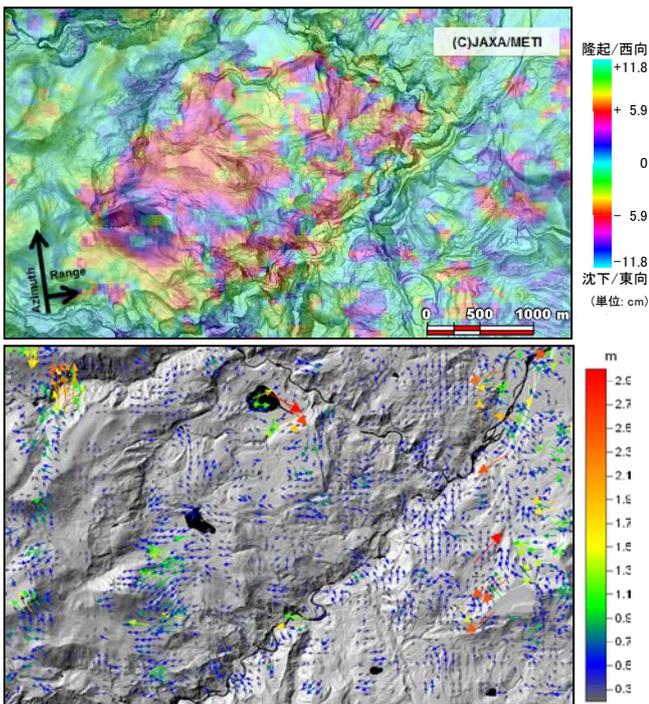
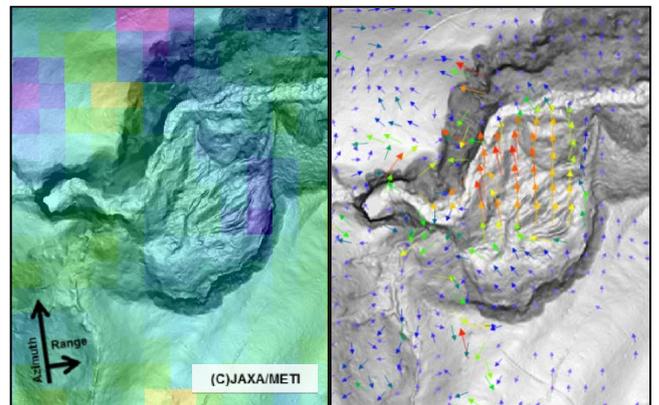


図-1 土湯付近DInSAR解析結果※
 (上：DInSAR(a)、下：3D-GIV(b))
 ※地殻変動による移動量補正済み

一方、この地すべり地形の北西部には従前から国土交通省が直轄事業として現地モニタリングを実施している「塩の川地すべり」が隣接しているが、DInSAR解析では変動を検出することが出来なかった（図-2(a)）。これは干渉ペアの期間が46日間と短かったことで変位量が少なかったことに加えて、斜面の変動方向がDInSARでは検出の難しい衛星のアジマス（進行）方向に沿っており、DInSARで評価が可能なレンジ（電波照射）方向の移動が少なかったことに起因している。



(a) DInSAR (b) 3D-GIV

図-2 塩の川地すべり部拡大（凡例は図-1を参照）

これに対して、同斜面の3D-GIV解析では2008年から2011年の3年間で北方向に2～3m程度の変動が抽出されている（図-2(b)）。これは現地実測データ（年平均移動量70cm）とも整合が取れており、良好な結果と考えられる。DInSAR解析は解析ペアとなる2時期の画像の取得間隔が開くほどに良好に干渉する確率が低下し、干渉しやすいとされるL-band波長帯であっても1、2年程度の時間間隔が限度である。そのためDInSAR解析では変位量を得るためにペアの間隔を伸ばしたい一方で干渉性を上げるためにペアの間隔を短くしたい背反条件が付きまとうが、3D-GIVでは高精度のDEMが取得できていれば解析に利用する間隔を広げるほど微小な変位を抽出できる利点がある。

3.2 雲仙普賢岳溶岩ドーム

雲仙普賢岳火口より東側に1991年噴火以降形成された溶岩ドームは従前より崩落の危険性が指摘されており、現在も国土交通省直轄事業として現地モニタリングが実施されている。同地区は国土地理院もALOS PALSARのDInSAR解析による定常観測を実施しており、溶岩ドームの動態傾向

が複数時期において干渉縞として抽出されている(図-3(a): 2007/6/27~2007/12/28)。

この地域は航空レーザでも複数回の計測が実施されているため3D-GIV解析によって評価したところ、平成15年8月から平成18年12月の3年間に溶岩ドームにおいて東方向15cmの変動がベクトルとして抽出された(図-3(b))。これは現地の光波距離計による観測結果とも整合しており、同解析手法が方向・精度ともに良好な結果であることが確認された。

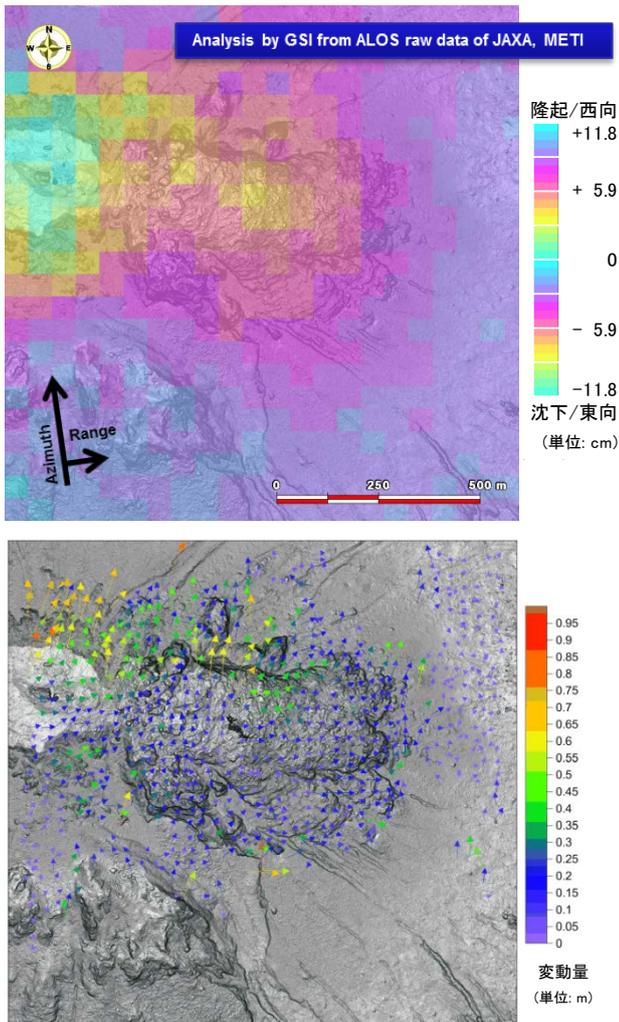


図-3 雲仙溶岩ドーム解析結果
(上: DInSAR解析(a), 下: 3D-GIV解析(b))

これまで同地域において航空レーザのDEMを用いた差分解析が実施されていたが、これは垂直成分の変動評価に留まっていたため、水平成分については評価ができておらずメカニズムの説明として限定されたものであった。

また地上からの光波観測は点観測であることに加えて、機器の有効距離や下から見上げることによる有効視認範囲の面でも制限があり、対象全体

を漏れなく網羅するモニタリングは困難であった。これらの課題解決策の一つとして3D-GIV解析が有効であると考えられる。

3.3 奈良県十津川村周辺

同地域においては平成23年9月に台風12号による長期連続降雨で大規模崩壊が多数発生したため、それ以前に観測されたALOS PALSARによるDInSAR解析を実施し、大規模崩壊発生箇所の前兆現象について確認を行った(図-4)。解析の結果、大規模崩壊(崩壊土砂量10万m³以上)の箇所において下降軌道(南向き、方位188°方向)・上昇軌道(北向き、方位352°方向)いずれの干渉ペアにおいても時間間隔の短いペアでは変動量に乏しく、時間間隔の長いペアでは軌道間距離・大気等の影響でノイズ縞が発生して有意な干渉縞が抽出できなかったことにより、前兆現象の抽出には至らなかった。

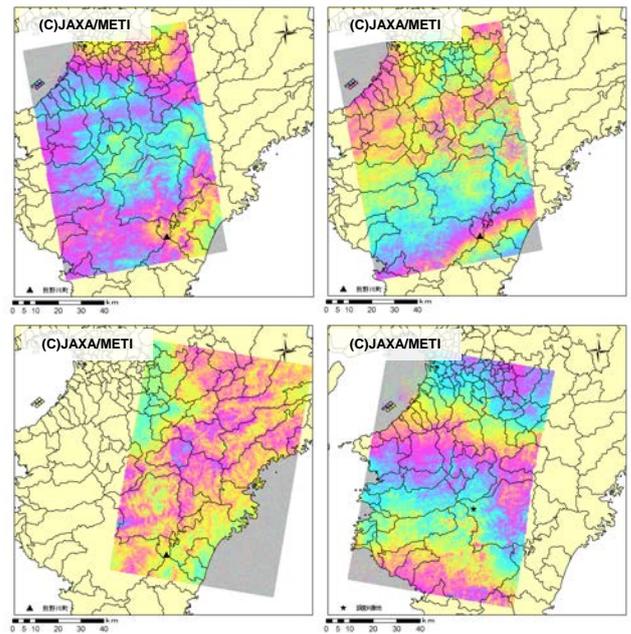


図-4 紀伊半島DInSAR解析結果(一部)

なお3D-GIVについては同地域における災害前に航空レーザ計測が実施されたのが一度のみであり、災害発生前の斜面変状は解析不能であったため実施していない。

4. まとめ

4.1 DInSAR

地震前後のデータを利用したDInSAR解析では広範囲に地すべりによる斜面変状を効率的に抽出できることが確認された。ただし検出感度は方位

によって異なっており、レンジ方向の動態に対しては良好な結果が得られるがアジマス方向の動態に対しては感度が鈍い。そのため衛星を利用したDInSARで斜面をモニタリングする場合にはアジマス方向の異なる下降軌道と上昇軌道を併用して監視することが求められる。この異なる軌道の組み合わせは、急峻な地形におけるレイオーバー（衛星から遠くに位置する高標高地と手前に位置する低標高地における電波反射時間の逆転）やシャドローイング（稜線などの電波遮蔽による背面の不可視領域）等のSARの原理上発生してしまう確認出来ない領域の解消にも貢献できる。

岩盤クリープのようなわずかな斜面変動に関しては干渉可能な中でペアの時間間隔を延ばすことで変位量を最大化することに加え、同地域における異なる時期の複数ペアで時系列解析を実施することにより、連続的な変位を抽出し大気遅延等のノイズから分離することが考えられる。

4.2 DEM画像解析

一方、3D-GIVは面的に均質なデータから解析が実施できるため、DInSARのように方位による感度特性や時間に伴う干渉確率の減少、不可視領域の発生といった利用上の制限が発生せずに解析できることに加えて、光波距離計やGPSなどの現地観測を面的に補完できる有効性も認められた。

ただし航空レーザ計測には多額の費用がかかることから、広域に対して頻繁にモニタリングを実施することは困難である。また時折航空レーザDEMに見られる「位置ずれ」がデータに含まれる場合、又は大規模地震による地盤の大きな変動があった場合にはその影響を直接的に受けるため、DEMデータの品質評価を実施し、必要に応じて補正処理する必要がある³⁾。

5. おわりに

以上の検討より、まず広域の斜面変位検出をSAR衛星によるDInSARで定期的実施し、衛星では評価が困難、あるいは変位の発生が疑われる箇所において航空レーザ計測により高精度DEMを取得して3D-GIV解析を実施、変位が確実に認められた箇所に対して現地観測機器を設置することが斜面モニタリングの体制として有効である。

また2012年現在において衛星L-band SAR衛星は存在せず広域斜面モニタリングの実施が困難であるため、次期L-band SAR衛星ALOS-2の早期投入・干渉用データ整備の開始が望まれる。

謝 辞

本研究の実施に当たり航空レーザデータをご提供戴いた国土交通省九州地方整備局雲仙復興事務所、国土地理院ならびにALOS PALSARデータをご提供頂いたJAXAに対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上亮、奥山哲、古屋正人、阿部隆博：ALOS(だいち)PALSAR による東北地方太平洋沖地震の地盤変動解析—山体崩壊の前兆把握への応用の検討—、日本火山学会2011年秋季大会講演予稿集、p.55、2011
- 2) Sakae Mukoyama : Estimation of ground deformation caused by the Earthquake (M7.2) in Japan, 2008, from the Geomorphic Image Analysis of high resolution LiDAR DEMs, Journal of Mountain Science, Vol.8, No.2, pp.239-245, 2010
- 3) 小林容子：レーザ差分解析精度向上に向けたDEM水平位置補正および差分対象範囲の検討、第33回測量調査技術発表会 技術発表・特別講演要旨集、pp.12~14、2011

佐藤 匠*



国際航業株式会社第二技術部（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 外研究員）
Takumi SATO

水野正樹**



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

内田太郎***



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、博士（農学）
Dr. Taro UCHIDA

岡本 敦****



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長
Atsushi OKAMOTO