特集報文:「真の豊かさ」を実感できる社会を目指して ~第5次社会資本整備重点計画を支える技術開発~

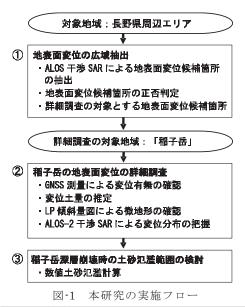
衛星干渉SARと航空レーザ測量とGNSS測量を用いた 深層崩壊の危険箇所抽出の試み

水野正樹・平田育士・王 純祥

1. はじめに

深層崩壊は、崩壊土砂量が多く、人家等に近接して発生すると崩壊規模や発生場所によっては、甚大な人命被害のおそれがある。このため、第5次社会資本整備重点計画の重点目標「防災・減災が主流となる社会の実現」に向け、崩壊の危険箇所を把握する手法の確立に努め、深層崩壊による被害の防止・軽減につなげることが必要である。

そこで、地震や豪雨等による深層崩壊の前に発生することがある長期のクリープ現象による斜面の変形を、地表面変位画像として広域から予め検知して、「深層崩壊の危険箇所の位置と変位状況と規模」を把握することを目指し、「衛星Lバンド差分干渉SAR解析」(以下「干渉SAR」という。)、GNSS測量、「航空レーザ測量の三次元データを用いた傾斜量図*」(以下「LP傾斜量図」という。)を用いた深層崩壊前の斜面の地表面変位状況の調査の有効性について事例研究を行った成果を報告する。研究対象地域は、長野県周辺域で、その中の稲子岳については詳細に地表面変位の調査を実施した。本研究の実施フローを図・1に示す。



Trial of an Investigation and Analysis Method for Deep-Seated Landslide Risk Areas Using the Satellite Interference SAR and Airborne Laser Survey and GNSS

2. 地表面変位の広域抽出

2.1 ALOS干渉SARによる地表面変位候補箇所の 抽出

長野県周辺地域を対象として干渉SAR画像を作成した。解析に使用した「日本の陸域観測技術衛星だいち」(以下「ALOS」という。)のSAR画像を表-1に示す。撮影時期は、2007/01/15~2011/01/26の間である。表-1 干渉SARに用いた

干渉SAR画像は、地 表面変位を示す変動縞 の干渉縞だけでなく、 植生、水蒸気、電離層 等の影響により多くの

ノイズの縞が出現する。※2007年~2011年撮像画像このノイズの縞の箇所は、変位方向と斜面向きとの整合性の確認や、地形情報から地表面変位が起きうる地形かどうかを判断して排除した。また、複数のALOS干渉SAR画像で同様の場所に変動縞が見られるかを確認することで、ノイズによる誤判読箇所を極力排除した。最終的にこれらの条件を満たした箇所を「地表面変位候補箇所」として抽出した。その結果、図・2に示すように、3つの軌道のALOS SAR画像を基に作成した干渉SAR

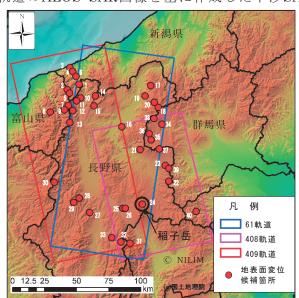


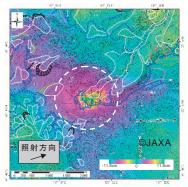
図-2 ALOS干渉SARの解析範囲と抽出した 「地表面変位候補箇所」

画像から、長野県小谷村赤倉山(図-3)など合計 40箇所の「地表面変位候補箇所」を抽出した。

2.2 地表面変位候補箇所の正否判定

抽出した「地表 面変位候補箇所」 について、一部記を 所の現地確認を をもとともに、 次の基準で地表面 変位のた。 行った。

・「◎定性的正 解」: 現地確認 により斜面の変



(2007/9/2、2007/10/18) 図-3 赤倉山におけるALOS 干渉SAR画像

形を確認した箇所、又は、各種資料に斜面の変 形が確認できる記載がある箇所。

- ・「△正解の可能性あり」:「地すべり地形分布図」」で地すべり地形と判定されている箇所、 又は、光学画像の微地形判読でクリープ現象や 地すべりに起因する微地形の可能性ありと判読 された箇所。
- ・「×不正解」: 現地確認等から不正解と判断され

表・2 ALOS 干渉SAR画像から抽出した「地表面 変位候補箇所」と判定結果

	友 []		C +11)	E 加木		
番号	箇所名	現地確認 結果	地すべ り地形 分布図	微地形 判読 結果	判定	備考
1	大所	0			0	
2	長栂山		0	0	Δ	
3	権現山近辺					採石場(光学画像)
4	黒姫山					採石場(光学画像)
5	白高地沢		0	0	Δ	
6	明星山		×			
7	鑓ヶ岳		×			
8	釜谷山		×			
9	中背山南		0		Δ	
10	赤倉山		0	0	0	各種資料 2)
11	栂池自然園		0	0	Δ	
12	八方山		0	0	Δ	
13	布引尾根		×	0	Δ	
14	奥裾花自然園		0	0	Δ	
15	奥裾花ダム		×			
16	松代温泉	対象外			対象外	平坦地の沈下
17	城蔵山		0		Δ	
18	大沼池		0		Δ	
19	飯盛山	×			×	
20	西舘山西側斜面	0			0	
21	金原ダム	対象外			対象外	
22	霊仙峰		×			
23	茂沢川上流		×			_
24	稲子岳	GNSS 測量			0	GNSS 測量
25	豊平(小泉山)	×			×	
26	豊平(大泉山)	×			×	
27	横川ダム		×			
28	中俣沢		×			
29	木曽川上流		×			
30	坂巻温泉		0	0	0	各種資料 3)
31	摩利支天		×			
32	三石山		0	0	Δ	
33	溝口		×			
34	草津町	対象外			対象外	耕作地
35	糠塚山	×			×	
36	大横川上流		×			
37	浅間山		×			
38	本白根沢		×			
39	矢川峠		0		Δ	
40	白泰山東側斜面		×	L		

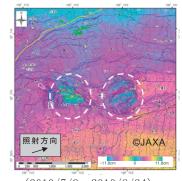
判定の凡例 ◎: 定性的正解、△: 正解の可能性あり、 ※: 不正解、 対象外: 土砂災害の対象外現象、 空白: 未調査 た箇所。

・「対象外」: 採石場等の土砂災害の対象外現象の 箇所。

この「地表面変位候補箇所」における地表面変位の有無の確認状況と判定結果を表-2に示す。まとめると次のとおりであった。

- ・「◎定性的正解」が5箇所。(根拠は、現地調査 が3箇所、各種資料が2箇所)
- ・「△正解の可能性あり」が11箇所。(根拠は、 地すべり地形分布図が10箇所、微地形判読が1 箇所)
- ・「×不正解」が4箇所。(根拠は、現地調査が4 箇所)
- ・採石場等の「土砂災害の対象外現象」が5箇所。 (根拠は、現地調査が3箇所、各種資料が2箇所)
- ・正解かどうか未調査が15箇所。

ここで、現地確認の結果、地表面変位している可能性が低く「×不正解」と判断した箇所は、平野の中の独立峰が多かった。平野の中の独立峰周辺では水蒸気分布が不均一になることが知られており、それにより電波の伝搬距離が変化した可能



(2010/7/9、2010/8/24) 図-4 豊平におけるALOS干 渉SAR画像

を示す状況は見られなかった。

2.3 詳細調査の対象とする地表面変位候補箇所

ALOS干渉SAR画像で抽出した地表面変位候補 箇所のうちの1つ、長野県小海町稲子岳³⁾(図-5)は、現地踏査を行ったが、地表面が変位して いるかどうか確認できなかった。この稲子岳は、 カルデラ状の地形の頭部にあり、① 西暦887 年 8月の五畿七道の地震(南海ー東海地震)で発生 した大月川岩屑なだれ(約3.5億m³)の発生源域 (図-5)にあると指摘⁴⁾ されている。② 西暦887 年8月崩壊の推定土砂堆積域には多くの人家が存 在5) する。③ 今後30年間に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率が高い6)。この①②③の理由から、地震等により深層崩壊が発生した場合には被害が出る可能性があると考えて詳細調査の対象箇所とした。

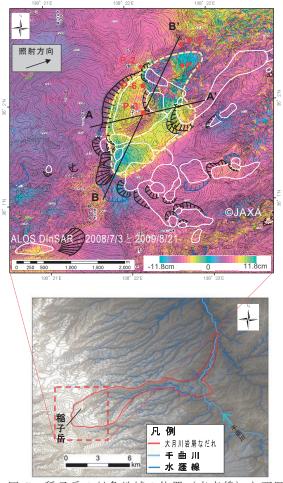


図-5 稲子岳の対象地域の位置(赤点線)と西暦 887年大月川岩屑なだれ範囲⁴⁾(赤線)と ALOS干渉SAR画像

※ALOS干渉SAR画像において変動縞が生じた変位領域を黄色点線で示す。

3. 稲子岳の地表面変位の詳細調査

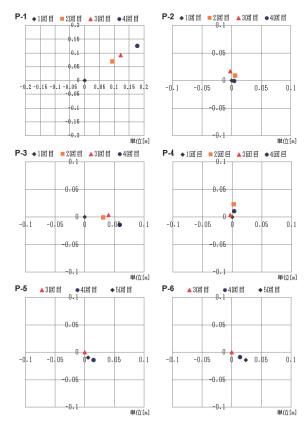
3.1 GNSS測量による変位有無の確認 3.1.1 方法

GNSS測量の測点は、ALOS干渉SAR画像で変位量の分布を予想し選点したP-1~P-4の4測点で開始し、3回目からP-5、P-6の2測点を追加して6測点で実施した。P-1~P-6の位置を図-5に示す。なおP-4は不動点として対象地域の外に設置した。測量は、電子基準点を既知点とした1級基準点測量相当の結合多角網を形成し、GNSS測量によるスタティック方式により計5時期(2013/10/23、2014/10/29 、2015/8/4 、2016/8/23 、

2016/10/27) において、水平位置並びに標高を算出した。計測は、時間が各測点で30秒間隔の連続3時間、各回とも同じ解析辺(P-1~P-4、P-5~P-6)で計測した。各測点について、GNSS測量した各回の測量結果を比較し、変位量を算出した。そして有意な地表面変位かどうかを判定した。GNSS測量結果の差の標準偏差の2倍の範囲をとった場合、正規分布ではこれ以上の誤差が生じる可能性は約5%と小さい。そこでこの値を「推定最大誤差」とみなし、2時期のGNSS測量結果の差が推定最大誤差を超える場合に有意な地表面変位であると判定した。なお、GNSS測量は一般的に水平方向よりも鉛直方向の精度が低いことから、水平方向のみを用いて判定した。

3.1.2 GNSS測量結果

水平方向について、P-1~P-6のそれぞれ初回を原点として、GNSS測量した2回目~5回目の変位量と変位方向の計測結果を図-6に示す。この結果から稲子岳山体のP-1、P-3、P-6の3測点で有意な地表面変位があると判定した。GNSS測量による有意な各測点の地表面の変位状況を表-3に示す。



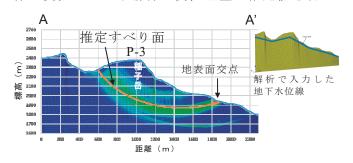
※横軸 (X軸) が東西方向、縦軸 (Y軸) が南北方向を表す。 図-6 GNSS各測点の変位量と変位方向 (単位:m)

表-3 稲子岳GNSS測量の各測点の地表面変位状況

測点	有意な地 表面変位	地表面の変位状況
P-1	あり	1,035日間で計測された変位量は218mm
P-2	なし	1,035日間で有意な変位は認められない
P-3	あり	1,035日間で計測された変位量は62mm
P-4	なし	(不動点) 有意な変位は認められない
P-5	なし	450日間で有意な変位は認められない
P-6	あり	450日間で計測された変位量は28mm

3.2 変位土量の推定

GNSS測量の結果を基に、稲子岳に地表面変位 があると判定した。そこで、稲子岳の変位土量を 推定するため、P-3の3回目GNSS測量による変位 方向を図-7に示すAA'断面(図-5参照)方向に 設定して、AA'断面の位置でせん断強度低減法 と震度法7)の解析を地下水考慮で実施して、最大 せん断ひずみ速度コンターを図-7のとおり算出し た。ここで使用した解析ソフトは、FLAC3Dで ある。この図-7における「最大せん断ひずみ速度 の高い層 (断面方向)」は、地表面交点が図-5の 干渉SAR画像の変動縞境界と概ね一致するとと もに、形状が背後地形と概ね合致したため、すべ り面の位置と推定した。さらに図-5の干渉SAR画 像に黄点線で示す領域を変動縞が表れた地表面変 位領域(変位平面) と考えて、図-7(AA'断 面) と図-8 (BB' 断面) のすべり面で稲子岳全 体が変位している場合の変位土量の推定値を約2



※ P-3付近の亀裂は考慮していない 図-7 震度法によるAA' 断面における最大せん断 ひずみ速度コンターと推定すべり面

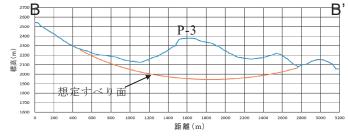
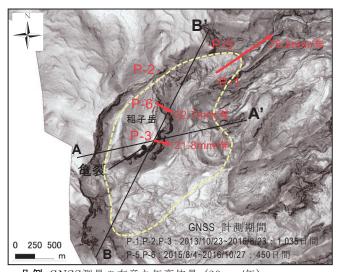


図-8 変位土量計算と数値土砂氾濫計算で用いた BB'断面における想定すべり面

億 \mathbf{m}^3 (1.9×10 8 \mathbf{m}^3) と算定した。なお、すべり面が深いと推定され、調査ボーリングは未実施である。

3.3 LP傾斜量図による微地形の確認

国土交通省松本砂防事務所が実施した航空レーザ測量のLPデータ®を入手して、図-9のLP傾斜量図を作成し稲子岳の微地形を確認した。その結果、図-10に示すようにP-3付近の山体には開口亀裂を含む大小の亀裂の微地形が判読できた。



凡例 GNSS測量の有意な年変位量 (20mm/年): →

図-9 稲子岳のLP傾斜量図とGNSS測量の水平方向変位とALOS 干渉SAR画像の変位領域(黄点線)

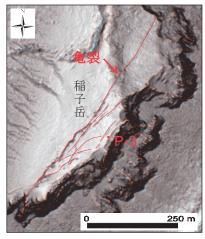


図-10 LP傾斜量図で判読したP-3測 点付近の亀裂(赤線)の状況

3.4 ALOS-2干渉SAR画像による変位分布の把握

ALOSより高分解能な「だいち2号」(以下「ALOS-2」という。)で新たに作成した干渉SAR画像により地表面変位の平面分布を推定した。図-11に示す複数のALOS-2干渉SAR画像で図-12に示す「沈下」、「東方へ変位」、「押し出し」領域の

変位分布が現れた。干渉SAR画像は、ノイズを 含む可能性があるが、GNSS測量の計測結果と概 ね整合することを確認した。

図-12のALOS-2干渉SARの変動縞がノイズでなく地表面変位である場合、GNSS測量のP-3、P-6の変位方向から、稲子岳山体は全体が下流方向へ変位していると考えられる。

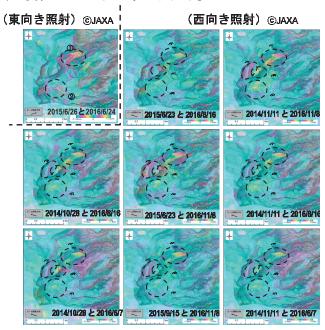


図-11 稲子岳のALOS-2干渉SAR画像に現れた地 表面変位を表す変動縞

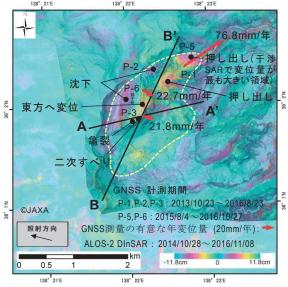


図-12 ALOS-2干渉SAR画像とGNSS測量とLP傾 斜量図から推定した稲子岳山体の変位分布

3.5 稲子岳の地表面変位の考察

図-12のALOS-2干渉SAR画像から、稲子岳で安定性が特に低いと考えられる次の2箇所の斜面を特定した。図-12で測点P-1を含む北東側にある「押し出し」領域は干渉SAR画像の黄色点線で囲

まれた変位領域内で最も変位速度が大きく、この 斜面は安定性が特に低い変位ブロック(土量数百 万m³程度と推定)と考えられる。図-10のP-3付 近のLP傾斜量図から判読した山体亀裂の南東側 (谷側)のブロックは、図-13のALOS-2干渉SAR 画像で山体本体と比べて色が変化(図-13の赤点 線部分)していることから変位方向が山体本体と 異なると考えられ、「二次すべり」を形成してい ると判断した。この「二次すべり」も斜面安定性 が低く崩壊しやすい斜面と考えられる。

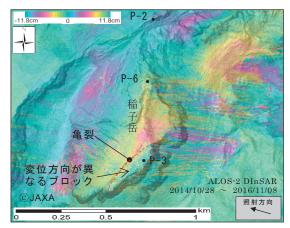


図-13 稲子岳付近を拡大したALOS-2干 渉SAR画像

4. 稲子岳深層崩壊時の土砂氾濫範囲の検討

今回の手法を用いると、地表面変位している領域が把握できることから、変位する土量を推定して、地震等により変位領域が崩壊した場合を想定した数値土砂氾濫計算による検討が可能となる。数値土砂氾濫計算結果の例を図-14に示す。この計算箇所の現地の様子を図-15に示す。

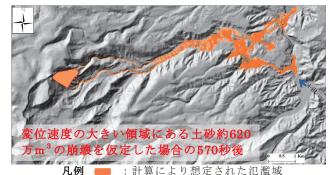


図-14 数値土砂氾濫計算結果の例



図-15 稲子岳と流下方向の様子

5. おわりに

本稿では、干渉SAR画像とLP傾斜量図と GNSS測量を併用して深層崩壊の危険箇所を抽出 することの有効性について事例研究を行った。

干渉SAR画像は、ノイズを含むが、変位領域 と変位量の分布が画像に現れることから、大規模 土塊の微小な地表面変位の広域探索と変位分布の 把握が、低コストで可能となる。これにLP傾斜 量図の微地形判読とGNSS測量を併用することで、 干渉SAR画像のノイズ判別、LP傾斜量図の微地 形判読の精度向上、GNSS測量の測点設置位置選 定の適正化が図られるため、地表面変位有無の判 別の信頼性が向上する。これにより、長期のク リープ現象の後に発生するタイプの深層崩壊に対 する危険箇所抽出に有効であることを示した。た だし、ALOS-2干渉SAR画像から変動縞として検 出できる可能性がある変位量の最小値(検出限 界)は、(衛星視線方向への換算値で)1cm~ 2cm程度である。SAR撮影する2時期間の地表面 変位量がこれより小さいクリープ現象等は、検知 できない。そして、変位量が(衛星視線方向への 換算値で) 4cm程度以上になると、ALOS-2干渉 SAR画像による検出確度が高くなる。他にも、 衛星軌道方向(南北方向)の地表面変位は、変位 方向の中で、干渉SARの検出確度が最も低くな ることに留意が必要である。

また、今回の研究では、GNSS測量の開始時点が航空レーザ測量前であったため、LP傾斜量図による微地形確認を行う前にGNSS測量の測点を設置した。その後、LP傾斜量図の微地形確認で亀裂の存在が判明し測点の追加設置を行った。今回の手法では、GNSS測点を選点する際に、既存のLP傾斜量図を確認することとして、「干渉SARによる地表面変位の広域抽出」→「既存LP傾斜

量図による微地形の確認」→「GNSS測量による変位の確認」の順で調査を実施することが最も効果的と考えられる。

現在、国土交通省は、地形地質的に深層崩壊の 頻度が高い地域を対象に、干渉SAR画像を用い て大規模崩壊危険箇所等の地表面変位を広域的か つ継続的に抽出することを目指して検討している。

今回試行した手法が今後実運用されて、危険箇 所が把握されることに期待する。

謝辞

本研究で用いたALOS SARデータは、宇宙航空研究開発機構(JAXA)から提供を受けました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 防災科学技術研究所:地すべり地形分布図データ ベース、2007
- 2) 国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所:金山沢 不安定土塊対策概略検討業務報告書、図3.3.1、 2013
- 3) 小荒井衛、中埜貴元、戸田堅一郎、大丸裕武:地 すべり性斜面変動の前兆を干渉SARと航空レーザ 測量で捉える、日本地球惑星科学連合大会、 HDS29-05、2014
- 4) 森俊勇、坂口哲夫、井上公夫:日本の天然ダムと 対応策、砂防フロンティア整備推進機構、p36、 2011
- 5) 総務省統計局:平成22年国勢調査小地域集計、 2012
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:全国地震動予測地図2017年版、2017
- 7) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2012
- 8) 国土交通省北陸地方整備局松本砂防事務所:平成 25年度信濃川上流域航空レーザー計測(その3)業 務報告書、2014

水野正樹



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部 深層崩壊対策研究官、博士(学術) Dr. MIZUNO Masaki

平田育士



研究当時 国土交通省国土技術 政策総合研究所土砂災害研究部 砂防研究室 交流研究員、現 (株) パスコ HIRATA Ikushi

王 純祥



研究当時 新潟大学災害・復興科学研究所 特任准教授、博士(工学) Dr. WANG Chunxiang