<u>特集報文:「真の豊かさ」を実感</u>できる社会を目指し ~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

ALOS SAR 画像						
	長野県周辺域					
	軌道番号	シーン数				
南行軌道	61	8				
北行軌道	408	14				
	409	24				
合	46					

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、一部箇 所の現地確認を実 施するとともに、 次の基準で地表面 変位の正否判定を 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」¹⁾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

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				対象外	採石場(光学画像)
4	黒姫山				対象外	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	1	×			
23	茂沢川上流		×			
24	稻子岳	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	1	×			
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	1	×			
37	浅間山	1	×			i
38	本白根沢	1	×			
39	矢川峠	i	0		Δ	
40	白素山宙側斜面	1	×			

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

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-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



億m³(1.9×10⁸m³)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編



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-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
- 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
- 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



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



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