LANDSLIDE DETECTION METHOD BY INSAR ANALYSIS AND ITS APPLICABLE RANGE

崎山朋紀¹・榎原伴樹¹・坂口武弘¹・田中健貴²・木下篤彦³・江川真史⁴・ 佐藤匠⁵・久保毅⁶・鈴木大和⁷・山下久美子⁸

Tomoki SAKIYAMA, Tomoki ENOHARA, Takehiro SAKAGUCHI, Yasutaka TANAKA, Atsuhiko KINOSHITA, Masafumi EKAWA, Takumi SATO, Takeshi KUBO, Yamato SUZUKI and Kumiko YAMASHITA

1 非会員 和歌山県土砂災害啓発センター (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

² 非会員 農修 国土交通省近畿地方整備局大規模土砂災害対策技術センター(〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那 智勝浦町市野々3027-6)

³正会員 農博 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒649-5302 和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

4 非会員 理修 国際航業株式会社 (〒660-0805 兵庫県尼崎市西長洲町 1-1-15)

5 非会員 農修 国際航業株式会社 (〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1)

6 非会員 国際航業株式会社 (〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1)

7 非会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

⁸非会員 理修 元国土交通省国土技術政策総合研究所(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

(国際航業株式会社(〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1))

The landslides, triggered by torrential rain due to Typhoon Talas in 2011, caused enormous casualties and huge economic losses on the Kii peninsula. It is important to detect landslide activity at an early stage in order to reduce such damage. In this study, we used InSAR analysis images using ALOS-2 data to detect landslides in the area. 3D-GIV analysis was also used for comparison. And then, based on the detection findings, we conducted field surveys in order to support our findings. As a result, we have confirmed that this method was effective. However, there was a possibility of missing slope movements with this method alone.

Key Words: InSAR, ALOS-2, 3D-GIV, landslide detection, slope movement

1. はじめに

平成 23 年紀伊半島大水害では、和歌山県内をはじめ 近隣の奈良県・三重県などで大規模な崩壊が発生し、被 害が出ている¹⁾.これらの被害を軽減するには、事前に 崩壊危険箇所を把握しておくことが重要である。崩壊危 険箇所抽出技術として、現在レーザプロファイラによる 地形判読²⁾や空中電磁探査による地下情報把握技術³⁾な どが検討されている.これらは高精度に危険箇所が把握 できるメリットはあるものの、コストが高いことと調査 を実施できる時期が限られているというデメリットがあ る.これらを補う技術として、リモートセンシング技術 の一つである干渉 SAR 解析が挙げられる.干渉 SAR は、 人工衛星から地表の同一の場所に対して 2 回の SAR (合成開口レーダー)観測を実施し、それらを干渉させ て得た位相の差から地表変動を推定する技術である⁴⁾. この技術は安価であることと定期的に広域な衛星画像が 得られるというメリットがある.これまで、干渉 SAR 解析で斜面変動を捉えた研究は多くあるが^{5,99},他のリ



北行軌道・西					
1時期目	2時期目	間隔			
2014/09/15	2015/06/22	280日間			
2015/08/26	2016/08/24	364日間			
2016/06/20	2016/11/21	154日間			
2016/06/20	2017/06/05	350日間			
2016/08/10	2017/08/09	364日間			
2017/06/05	2018/01/29	238日間			
2017/08/09	2018/08/08	364日間			
北行軌道・中央					
1時期目	2時期目	間隔			
2014/08/13	2015/02/25	196日間			
2015/02/25	2015/06/03	98日間			
2015/04/13	2015/12/21	252日間			
2015/04/13	2016/07/04	448日間			
2015/06/03	2016/06/01	364日間			
2015/09/09	2016/09/07	364日間			
2015/12/21	2016/03/28	98日間			
2016/03/28	2016/07/04	98日間			
2016/06/01	2017/02/08	252日間			
2016/07/04	2016/12/05	154日間			
2016/07/04	2017/06/19	350日間			

2016/08/24 2017/08/23 364日間 98日間 2016/12/05 2017/03/13 2017/02/08 2018/01/10 336日間 2017/03/13 2017/06/19 98日間 2017/06/19 2018/04/09 294日間 2017/08/23 2018/08/22 364日間 北行軌道・東 1時期目 2時期目 間隔 2014/09/10 2015/03/11 182日間 2015/11/18 2016/02/24 98日間 2016/09/07 2017/09/06 364日間

【出典:地理院 SAR マップ】

図-1 干渉 SAR 画像の判読に用いた干渉ペア,実施範囲

モートセンシング技術により面的に斜面変動を捉えた結 果と比較をした事例は少ない.

本研究では、干渉 SAR 解析結果(地理院 SAR マップ) を用いた斜面変動把握を行い、また他のリモートセンシ ング技術や現地調査と比較を行うことで、その適用範囲 を明らかにし、今後の広域モニタリング手法の検討に役 立てることを目的とする.

調査方法 2.

(1) 干渉SAR画像による斜面変動の抽出

干渉 SAR 画像による斜面変動の抽出を行った. 抽出 には国土地理院の干渉 SAR 解析結果(ALOS-2 の取得 データによる解析結果, 高分解モード, 北行軌道 26 ペ ア・南行軌道 28 ペアの合計 54 ペア)を使用した. 各ペ アの時間間隔は最短で2ヵ月,最長で1年間強のもので ある. ALOS-2 搭載の合成開口レーダーから照射される 波長約24cmのLバンドの電波は、樹木の枝葉を透過し やすく,変化の少ない幹や地表面などで反射することか ら森林でも干渉を得ることができる. 判読に用いた干渉 解析のペアと実施範囲を図-1 に示す. また, 干渉 SAR 画像を用いて抽出するにあたり、以下の判断基準に従っ て抽出作業を行った.

- ・斜面単位に相当する局所的な干渉縞が確認できる.
- 干渉縞の分布する範囲が斜面変動を引き起こす地形と して整合的である.
- ・複数の時期にわたって干渉縞が確認できる(継続して 変状が発生している).
- ・電波照射方向と斜面変動方向に矛盾が見られない.
- 他の衛星画像等で人為的な地形改変が認められない。

(2) 地形変動解析(3D-GIV 解析)による斜面変動の抽出

3D-GIV とは、航空レーザ計測データから斜面変動箇 所を抽出する技術であり、樹木など地表遮蔽物をフィル タリング処理した 2 時期の数値標高モデル(DEM)か ら地形解析図を作成し、画像解析処理により変位ベクト ルを面的に算出するものである. 干渉 SAR 画像による 抽出結果と対比するため、既往の航空レーザ測量成果を 用いた 3D-GIV 解析により、斜面変動箇所の抽出を実施 した. 3D-GIV 解析の実施範囲と解析ペアを図-2 に示 す.

(3) 現地調査の実施

干渉 SAR 画像及び 3D-GIV 解析により抽出した斜面 変動のうち、変動規模、現地へのアクセスを考慮して 10 箇所を絞り込み、実際に崩壊の兆候を確認するため 現地調査を実施した(図-3).現地調査では、あらかじ



図-2 3D-GIV 解析の実施範囲・解析ペア

め航空レーザ計測データを用いて微地形判読を実施した後、斜面や道路等の構造物に現れる変状などを確認した.また、GNSS 観測をおこない干渉 SAR 画像及び 3D-GIV 解析による抽出結果と対比した.

3. 調査結果

干渉 SAR 画像より 116 箇所の斜面変動を抽出した. そのうち 26 箇所で複数ペアの斜面変動を確認した.また, 3D-GIV 解析により 141 の斜面変動を抽出した.現地調査を実施した 10 地区の調査結果は以下のとおりである.

(1)和歌山県田辺市·上秋津地区

a) 斜面変動の抽出結果

この地区では、2014 年以降 2018 年までの干渉 SAR 解析結果から、7 つのペアで斜面変動に伴うと考えら れる干渉縞を確認した.干渉縞の色調階から最も変動 の大きい場所では電波照射方向で 8cm 程度の斜面変動 が発生しているものと考えられる(図-4).

b)現地調査結果

対象斜面は、全幅 650m程度、全長 500m程度の地す べり斜面である.斜面頭部付近では旧農道の変状、南 側端部では表層崩壊など顕著な変状が認められた(写 真-1).これらの変状は、干渉 SAR 画像から読み取れ る変動範囲と概ね整合していた.また、この斜面では、 2時期の GNSS 基準点測量による変位量を算出した. その結果を表-1 に示す.2013 年 3 月と 2019 年 1 月の 計測結果を比較した結果、変位が最も大きい P-1 で累



b)	NO	地区名	調査場所	
	1	上秋津	和歌山県田辺市上秋津	
	2	伏拝	和歌山県田辺市本宮町伏拝	
	3	大日山	和歌山県田辺市本宮町本宮	
	4	宮井	和歌山県新宮市熊野川町宮井	
	5	椋井	和歌山県新宮市熊野川町椋井	
	6	尻剣谷川	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町井関	
	7	金山谷川	和歌山県東牟婁郡那智勝浦町井関	
	8	寺尾	和歌山県伊都郡かつらぎ町大字寺尾	
	9	清水	奈良県五條市大塔町清水	
	10	惣谷	奈良県五條市大塔町惣	

図-3 (a)現地調査実施箇所位置図, (b)は(a)の数字の箇所の地区名を示す.





写真-1 現地写真(上秋津).矢印は移動方向.

表-1 GNSS 測量結果(上秋津地区)

観測点	観測時期	水平変 位(m)	変位 方向
P-1	2013/03/05-2019/01/22 • 23	0.502	東
P-2	2013/03/05-2019/01/22 • 23	0.455	東
P-3	2013/03/05-2019/01/22·23	0.304	東
P-4	2013/03/05-2019/01/22·23	0.325	東

積 0.502m(約 8.5cm/年),最も小さい P-3 で累積 0.304m(約 5.2cm/年)であった.干渉 SAR 解析と GNSS 測量の結果を比較すると,いずれも東方向に約 8cm/年であり,両者の変動の傾向は概ね一致していた.

(2)和歌山県新宮市熊野川町・宮井地区a)斜面変動の抽出結果

2015 年以降 2018 年までの干渉 SAR 解析結果におい て5つのペアで斜面変動に伴うと考えられる干渉縞が確 認された.干渉縞の色調階から,最も変動の大きい場所 では電波照射方向で 8cm 程度の変動が発生しているも のと読み取れる(図-5).

一方、3D-GIV 解析では地形変動を示す纏まったベクトル群が検出された(図-6).この範囲では、2013 年から2017年の4年間で最大1.5m程度の変動ベクトルが検出された.ベクトル群は、干渉 SAR で検出した斜面変動を示すと考えられる干渉縞の範囲内にあり、かつ干渉縞の色階調から変動が周辺に比べて大きいと読み取れる北側部分に集まっている.また、ベクトル群の方向が干渉 SAR の抽出結果と概ね整合していることからも、

解析結果は干渉 SAR による斜面変動の抽出結果を裏付けるものであると考えられる. なお,干渉 SAR 画像と 3D-GIV 解析画像が重複する箇所において,同一斜面を 両手法で同時に検出できた事例は1箇所のみであった.

b)現地調査結果

対象斜面は、全幅 330m程度、全長 800m 程度の地す べり斜面である.地すべりブロック頭部では複数の階段 状の滑落崖、根曲がり、地表の不陸が認められ、また、



図-5 干渉 SAR 画像(宮井地区). 国土地理院の SAR 干渉画像 2017/02/08-2018/01/10_AR を加工して著者 が作成.



図-6 3D-GIV 解析結果(宮井地区) 解析ペア 2013-2017

农工 因-5 〒 F-2~10 07 GIN55 例里柏木 (百开地)
--

観測点	観測時期	水平変 位(m)	変位 方向
P-2	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.109	北東
P-3	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.127	北東
P-4	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.064	北東
P-7	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.06	北東
P-8	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.241	北東
P-9	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.212	北東
P-10	2014/11/20, 21-2017/10/26	0.157	北東

ブロック内においても、切土法面の崩壊, 亀裂, 根曲が り等の多数の変状が認められた. これらの変状は抽出し た変動範囲と概ね整合していた.

この斜面では治山事業による GNSS 基準点測量の実 績があることから、その結果(表-2)と干渉 SAR の結



図-7 3D-GIV 解析結果(金山谷川地区) 解析ペア 2012-2017



写真-2 現地写真 (金山谷川地区)

果を対比した. 2014 年 11 月と 2017 年 10 月の計測結果 を比較した結果,変位が最も大きい P-8 で累積 0.241m (約 8.2cm/年),最も小さい P-7 で累積 0.060m(約 2.0cm/年)であった.干渉 SAR 解析で電波照射方向で ある東方向に約 8cm/年,一方 GNSS 測量の結果では北 東方向に約 8cm/年であり,両者の変動の傾向は概ね一 致していた.

(3)和歌山県東牟婁郡那智勝浦町井関・金山谷川地区 a)変動斜面の抽出結果

3D-GIV 解析から地形変動を示す纏まったベクトル群 が検出された. この範囲で 2012~2017 年の5 年間で最 大1.5m程度の南向きの変動ベクトルが検出された(図-7). 一方,干渉 SAR 画像では当該斜面から斜面変動を 検出できなかった. この理由については,変動が 2012 ~2014 年の間に発生し,その後止まっている可能性や, 今回現地調査対象とした他の斜面変動領域と比較して狭 いことから抽出できなかった可能性などが考えられる.

b)現地調査結果

対象斜面は、全幅 70m程度、全長 100m 程度の地す べりブロックで、明瞭な滑落崖と顕著な変状を有してお り、ブロック内には開口亀裂や段差、倒木が多数認めら

表-3 調査結果一覧

NO	地区名	変位の有無		現地調査 斜面など	斜面変動地定	斜面傾
		干涉SAR 画像判読	3D-GIV 解析	変状の有 無	動症 規模(m)	斜方向
1	上秋津 ※GNSS測量	0		0	W650 L500	東
2	伏拝	0	×	0	W200 L200	北西
3	大日山	0	×	×	W400 L400	東
4	宮井 ※GNSS測量	0	0	0	W330 L800	北東
5	椋井	×	0	0	W400 L500	東
6	尻剣谷川	×	0	0	W100 L100	北東
7	金山谷川	×	0	0	W70 L100	南
8	寺尾	0		0	W270 L400	北
9	清水	×	0	0	W110 L350	東
10	惣谷	×	0	0	W600 L800	北

れる(写真-2). 3D-GIV 解析ではブロック全体に変 位が認められ,現地と概ね整合していた.

(4)その他

その他,現地調査結果の概要を表-3に示す.

現地調査の結果,干渉 SAR で抽出した大日山地区を 除く4地区で,斜面変動の痕跡が確認された.大日山地 区では,干渉 SAR 画像で3cm 程度の変動が読み取れた ことから,微小な斜面変動であったために目視で確認で きるような痕跡を現地で確認できなかった可能性がある. また,4地区のうち斜面変動の規模が最も小さかったの は伏拝地区で,その規模は概ね200m×200mであった. 一方,3D-GIV 解析では,抽出した6地区すべてにおい て,顕著な斜面変動の痕跡を確認できた.

4. 考察

現地調査の結果,干渉 SAR 画像により抽出した大日 山地区を除く4地区において,顕著な斜面変動の痕跡が 確認された.これらの痕跡は,発生した時期は不明であ るが,干渉 SAR 画像から読み取れる変動範囲と概ね整 合していた.また,上秋津地区及び宮井地区の2地区に おいて干渉 SAR 画像と GNSS 測量結果の斜面変動の傾 向が概ね一致していたことからも,これら4地区で確認 された痕跡は斜面崩壊の兆候を示しているものと考えら れ,干渉 SAR 画像を用いて崩壊危険斜面を抽出する手 法は有効であると考えられる.

対象地区のうち,同一斜面を両手法で同時に検出で きた事例は宮井地区のみであった.この斜面では 3D- GIV 解析において 2013~2017 年の 4 年間で最大 1.5m 程度の変動ベクトルを検出した.一方,干渉 SAR 画像 では、3D-GIV 解析と解析データの時期に多少ずれはあ るものの、2015~2018 年に 5 つのペアで斜面変動を表 す干渉縞が抽出でき,各ペアで最大 8cm 程度の変位が 読み取れた.また,干渉 SAR 画像で抽出した斜面変動 は、GNSS 測量結果とその傾向が概ね一致していた.こ れらのことから,干渉 SAR 画像はこの領域で長期的に 継続している斜面変動を捉えたものだと考えられる.

3D-GIV 解析で抽出できたが干渉 SAR 画像で抽出で きなかった事例が5地区あった.これらの地区では変位 量数十 cm 以上の斜面変動が把握された.大きな変動を 検知したにもかかわらず干渉 SAR 画像で抽出できな かった理由として,以下の可能性が考えられる.

・干渉 SAR と 3D-GIV 解析の観測期間に多少のずれ があることから、干渉 SAR 解析ペアの期間内に動き がなかった.

・大気中に含まれる水蒸気の影響などによるものと 考えられるノイズが多数の解析ペアで確認されたこ とから,斜面変動があったにもかかわらず斜面変動 を検出できなかった.

・ALOS-2 による干渉 SAR では、人工衛星からマイ クロ波を横斜め方向(東西方向)に照射しその反射 波の位相を受信するという観測の原理上、南・北向 きの斜面では、地すべりの変動方向が衛星への視線 方向と直交する方向であり斜面変動の距離に対して 感度が悪くなり検出できなかった.

・斜面変動領域が検出可能なサイズを下回っていた.

干渉 SAR 画像で抽出できたが 3D-GIV 解析で抽出で きなかった事例が 2 地区あった. これについては、3D-GIV 解析で検出できる斜面変状は水平変位量数 10cm 以 上であり、精度の違いから抽出できなかったものと考え られる.

5. まとめ

本研究では、干渉 SAR 解析結果を用いた斜面変動把 握を行い、その適用範囲を明らかにするため、他のリ モートセンシング技術である 3D- GIV 解析による抽出 結果や現地調査との比較を行った.得られた結果を以下 に示す.

- ・干渉 SAR 画像から 8cm 程度までの斜面変動が抽出 できた.
- ・干渉 SAR 画像により概ね 200m×200m 以上の広さの斜面変動が抽出できた.

・干渉 SAR 画像を用いて崩壊危険斜面を抽出する手 法は有効である. 一方で干渉 SAR だけに依存した斜 面変動モニタリングは斜面変動を見逃す可能性があ る. 以上のことから, 干渉 SAR を用いて斜面変動を把握 する場合には, 干渉 SAR の特徴を把握した上で場面に 応じ, 他のモニタリング手法とうまく組み合わせる必要 があることを確認した.引き続き, 効率的に崩壊危険箇 所を把握するためのモニタリング手法について検討を進 めていく予定である.

参考文献

- 松村和樹,藤田正治、山田孝,権田豊,沼本晋也,堤 大三,中谷加奈,今泉文寿,島田徹,海堀正博,鈴木 浩二,徳永博,柏原佳明,長野英次,横山修,鈴木拓 郎,武澤永純,大野亮一,長山孝彦,池島剛,土屋 智:2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した 土砂災害,砂防学会誌,Vol.64, No.5, pp.43-53, 2012.
- 2) 花岡正明, 齋藤信哉, 高田浩穂, 佐藤健一, 佐藤雄太, 藤原伸也, 向山栄, 高見智之, 小林容子, 久保毅, 福 島昇, 横尾泰広:航空レーザ計測データを用いた地表 面変位量把握の事例と課題 -最上川水系立谷沢川流 域 濁沢川池ノ台地区における事例-, 平成 25 年度 砂防学会研究発表会概要集, pp.A-136-137, 2013.
- 木下篤彦,北川眞一,大山誠,内田太郎,河戸克志, 阿部征輝,奥村稔:平成23年大雨台風12号により紀 伊半島で発生した深層崩壊周辺の広域比抵抗構造特性, 平成25年度砂防学会研究発表会概要集, pp.B-356-357, 2013.
- 4) 国土地理院:国土地理院の干渉 SAR ホームページ, http://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/gsi_sar.html, 2018.
- 5) 水野正樹, 王純祥, 三五大輔, 西川大亮, 平田育士: DinSAR と航空レーザ測量と GNSS を用いた稲子岳の 地すべり調査, 平成 30 年度砂防学会研究発表会概要 集, pp.511-512, 2018.
- 6) 平田育士,吉川和男,三五大輔,野呂智之,神山嬢子, 鈴木大和,阪上雅之:干渉 SAR 解析における変動縞 判読方法の検討, 平成 29 年度砂防学会研究発表会概 要集,pp.B458-B459, 2017.
- 7) 石塚師也,藤井幸泰,金子誠,高橋亨,松岡俊文:干 渉SAR 解析によって推定した地表変動と地すべりブ ロックとの関連―白山甚之助谷周辺の地すべりを例に 一,応用地質,第57巻,第6号,pp.289-294頁,2017.
- 8)山中雅之、中埜貴元、和田弘人、仲井博之:全国干渉 SAR 解析による斜面変動の検出事例、第8回土砂災害 に関するシンポジウム論文集,pp.55-60,2016.
- 9) 江川真史,國友優,神山嬢子,松下一樹,吉川和男, 三五大輔,平田育士:国土監視ツールとしてのLバン ド SAR 干渉解析の活用について,平成 27 年度砂防学 会研究発表会概要集, pp.B194-B195, 2015.

(2019.4.2 受付)