第67回(2023年度) 北海道開発技術研究発表会論文

衛星SAR解析による道路土工構造物等 の維持管理の効率化の検討

一令和3年度国道229号乙部地区岩盤崩壊箇所の 衛星SARデータ解析結果報告

北海道開発局 建設部 道路維持課 ○宇津味 聖也 浦 建一郎 応用地質株式会社 メンテナンス事業部 小松 慎二

国土交通省では、道路安全確保のため法面等の道路防災点検を行っているが、毎年の維持管理費が負担となっている。一方、新たな技術として人工衛星により取得したSAR画像を解析し、地盤の変動を確認することで、道路維持管理を効率化する手法が検討されている。本稿では、国道229号乙部町の岩盤崩壊箇所において、衛星SAR画像を用いた変動量解析を行い、今後の道路維持管理に活用するための適用性や課題について検証したものである。

キーワード:衛星SAR、ALOS-2、土工構造物、維持管理、効率化

1. はじめに

現在、国土交通省では、管理する道路の多くで航空IPデータを整備しており、道路防災危険箇所の再抽出作業が行われている。一方、それら潜在的危険箇所の進行性を確認するには定期的な現地調査等が必要となり、広範囲の道路を維持管理するには多大な労力を要している。本報告では、過年度の被災箇所について、人工衛星で取得された被災前のSAR(合成開ロレーダ)画像を解析することで、周辺斜面の変動状況を確認可能か検証した。さらに、波長の異なる2つのSAR画像の解析結果を比較することで解析精度やその特性を明らかにした。

壊が頻発しているほか、ロープアクセスによる亀裂調査 の結果から不安定な岩塊が点在していることが確認され ている。対象道路は同崩壊を受けて、現在も通行止めと なっており、別線ルートの準備工事が進められている。

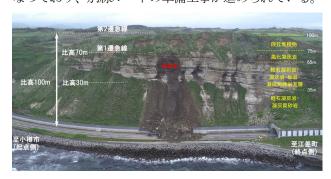


図-1 検討箇所全景(令和3年6月被災直後)¹⁾

2. 検討箇所の概要

検討は、令和3年6月に岩盤崩壊が発生した北海道爾志郡の国道229号乙部地区で実施した。図-1に対象箇所の鳥瞰写真を示す。幅35m×高さ40m×奥行き5m(崩壊土量約2,900㎡)の崩壊が発生し、道路が被災した。

地質状況は、新第三紀(約2,300万年前から250万年前に形成)の凝灰質砂岩、砂岩、軽石凝灰岩等の五層を基盤とし、その上位に第四紀(約250万年前以降)の段丘堆積物が被覆。斜面は、層状構造で砂岩層を主体とし、凝灰質砂岩等の薄層が挟在し、いずれも数十cm~3m程度の層厚をなしている。崩壊箇所周辺は過去にも同様の崩

3. 解析方法

(1) 衛星SAR解析について

人工衛星により取得した衛星SAR画像を用いた変動量解析は人工衛星から地表に向けて掃射したマイクロ波の反射波を受信することにより地表の変位を検出する技術である。複数回の観測で受信した反射波の位相差(正弦波のピークのずれ)を求めることで変動量 Δ Rを解析する(図-2)。衛星SARは、過去の観測データがアーカイブされているため遡り解析が可能である。また、衛星写真(光学画像)と異なり夜間や悪天候時の観測も可能であるため、災害直後等の活用が期待されている。日本上

UTSUMI Seiya, URA Kenichiro, KOMATSU Shinji

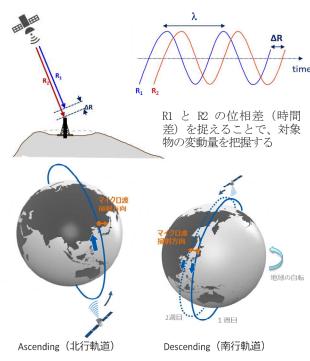


図-2 衛星 SAR 解析の概要

空では衛星SARはAscending(北行軌道)とDescending (南行軌道)の航路をとり、マイクロ波の掃射方向は進 行方向に直交となる東西方向になることから、東西方向 に比べると南北方向は変位の検出精度が劣ることがある。 本検討では、マイクロ波掃射方向と直交する西向き斜面 となる。

(2) SAR衛星の選定

現在、日本上空で解析に使用できる代表的なSAR衛星の波長・周期・稼働期間を表-1に示した。本研究では、波長が長く植生透過能力が高いALOS-2の解析を主体とし、表-1の中で唯一オープンデータ化されているSENTINELの解析を一部区間で行い、バンド数(波長)等の違いによる解析結果の比較を行った。

表-1 日本で適用できるSAR衛星の特徴

衛星名	運用機関	運用期間	衛星周期	バンド数	主な観測幅	主な分解能
ALOS-2(だいち2号)	JAXA (日本)	2014-現在	14日※ (年3~4回)	L (約24cm)	50km	3×3m
ALOS-4(だいち4号)	JAXA (日本)	(予定)	14日	L (約24cm)	200km	3×3m
RADARSAT-2	MDA (カナダ)	2007-現在	24日	C (約5cm)	20km	3×3m
SENTINEL-1	ESA/EC (EU)	2014-現在	12日	C (約6cm)	80-250km	5×20m
TerraSAR-X	DLR (ドイツ)	2007-現在	11日	X (約3cm)	30km	3×3m
COSMO SkyMed	ASI (イタリア)	2007-現在	8日	X (約3cm)	40km	3×3m

※高分解能の撮影は年3~4回

(3) 解析手法の選定

衛星SAR画像を用いた変動量解析は、いくつかの種類が提案されている。本検討では、「合成開口レーダー (SAR) の道路土構造物の維持管理への活用マニュアル

UTSUMI Seiya, URA Kenichiro, KOMATSU Shinji

(案) (令和3年7月)」、「地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル(平成29年3月)」を参考に、PS-InSAR法(永久散乱体を用いた干渉SAR)とした。PSInSAR法は集積画像の全てに抽出される正弦波の相関性(コヒーレント)の良い測定点(PS点:Permanent Scatterers)を選定し、衛星軌道補正・大気補正を行い、地表面変動データのみの画像データを作成する手法である。この手法は1999年にイタリアで開発され^{2/3}、その後改良を重ね、都市部の地下開発や山岳地域の地すべりなどに活用されている。

(4) 衛星SAR画像を用いた変動量解析(PSInSAR法)の流れ

解析の流れを図-3に示した。解析は以下のとおり実施した。

- ① 計測情報を確認し、対象箇所の画像を選定し、調達する。(TAXAからの購入)
- ② 前処理として画像の位置合わせ後、振幅画像を作成する。
- ③ 作成した画像からPS候補点を抽出する。
- ④ 各画像を組み合わせて干渉画像を作成し、抽出したPS候補点のコヒーレントを算出・確認する。
- ⑤ ベース画像と使用する全ての画像との干渉画像を 作成した後に算出した複数の干渉結果の差を重ね 合わせることで大気遅延フィルターを作成し、大 気圏の電離層のノイズや大気中の水蒸気のノイズ を除去する。
- ⑥ アンラッピング処理(位相の折り畳みを絶対量に変換する処理)を行い、視線方向の変位量を算出する。
- ⑦ 以上により得られた解析結果に位置情報を統合し 地図へ投影する。
 - ①衛星SAR画像の調達 (対象箇所の画像選定,画像入手等)
 - ②前処理 (画像位置合わせ,振幅画像作成等)
 - ③PS候補点抽出 (PS点·DS点抽出)
 - ④干渉画像作成 (コヒーレント算出・PS点絞り込み等)
 - ⑤誤差低減処理 (大気·電離圏補正, 地形補正等)
 - ⑥変位量算出 (アンラッピング処理, 2.5次元解析)
 - ⑦地図投影処理 (ジオコード化)

図-3 衛星SAR画像を用いた変動量解析の流れ

(5) 解析期間・衛星画像データの選定

ALOS-2の画像アーカイブの調達範囲を図-4に、撮影日時を表-2に示す。本解析は高分解能での撮影画像のみ用いることから、表-2の枚数が全てとなっており、うち、崩壊前の画像38枚(Ascending(北行軌道)で15枚、Descending(南行軌道)で23枚)を用いて解析を行った。

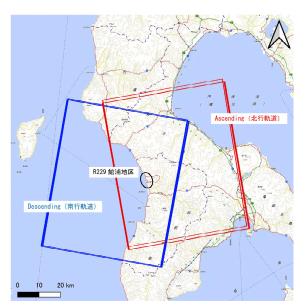


図-4 SAR画像調達範囲

表-2 SAR画像撮影日時

■Descending (南行軌道)

	part	124			part	19
	frame	830			frame	2770
	オフナディア角	35.4			オフナディア角	32.4
No.	ID	撮影日時	1	No.	ID	撮影日時
1	ALOS2047090830-150407	2015/04/07		1	ALOS2033562770-150106	2015/01/06
2	ALOS2053300830-150519	2015/05/19	1	2	ALOS2070822770-150915	2015/09/15
3	ALOS2057440830-150616	2015/06/16		3	ALOS2081172770-151124	2015/11/24
4	ALOS2084350830-151215	2015/12/15	1	4	ALOS2095662770-160301	2016/03/01
5	ALOS2105050830-160503	2016/05/03		5	ALOS2110152770-160607	2016/06/07
6	ALOS2113330830-160628	2016/06/28	1	6	ALOS2120502770-160816	2016/08/16
7	ALOS2150590830-170307	2017/03/07		7	ALOS2132922770-161108	2016/11/08
8	ALOS2165080830-170613	2017/06/13		8	ALOS2149482770-170228	2017/02/28
9	ALOS2208550830-180403	2018/04/03	1	9	ALOS2163972770-170606	2017/06/06
10	ALOS2258230830-190305	2019/03/05		10	ALOS2174322770-170815	2017/08/15
11	ALOS2272720830-190611	2019/06/11		11	ALOS2186742770-171107	2017/11/07
12	ALOS2297560830-191126	2019/11/26		12	ALOS2203302770-180227	2018/02/27
13	ALOS2312050830-200303	2020/03/03		13	ALOS2217792770-180605	2018/06/05
14	ALOS2326540830-200609	2020/06/09		14	ALOS2228142770-180814	2018/08/14
15	ALOS2365870830-210302	2021/03/02	災害	15	ALOS2240562770-181106	2018/11/06
16	ALOS2398990830-211012	2021/10/12	火告	16	ALOS2257122770-190226	2019/02/26
17	ALOS2405200830-211123	2021/11/23		17	ALOS2281962770-190813	2019/08/13
18	ALOS2423830830-220329	2022/03/29		18	ALOS2294382770-191105	2019/11/05
19				19	ALOS2310942770-200225	2020/02/25
20				20	ALOS2325432770-200602	2020/06/02
21				21	ALOS2335782770-200811	2020/08/11
22				22	ALOS2348202770-201103	2020/11/03
23				23	ALOS2364762770-210223	2021/02/23
24				24	ALOS2389602770-210810	2021/08/10
25				25	ALOS2433072770-220531	2022/05/31
26	l			26	ALOS2443422770-220809	2022/08/09

4. 解析結果

ending(北行軌道

図-5にALOS-2のAscending (北行軌道) とDescending (南行軌道) の時系列解析結果図 (年平均変位) を示す。衛星からの距離が遠ざかると暖色系、近づくと寒色系で示した。両軌道を比較するとDescendingは上部斜面から急崖部下方の測定点がほとんどない。Descendingは西向きにマイクロ波を照射するため、地形の影となる範囲(レーダシャドー)になっている。

図-6に三次元地形モデル上に掃射したマイクロ波の解

析結果を示す。崖部の上部斜面と下方斜面には測定点が一定の密度で分布するが、直壁箇所の測定点が少ない。 衛星の画像データは平面2次元上に展開されるため、急 崖部分では鉛直方向の測定点の密度が低くなっているた めと考えられる。



図-5 干渉SAR画像解析結果(年平均変位mm)

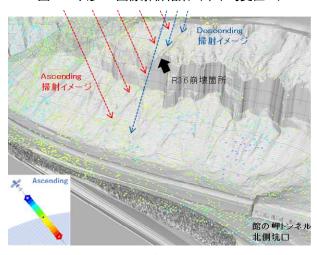


図-6 三次元地形モデルへのマイクロ波投影図



つづいて、図-7に代表点の経時変化図を示す。令和3 年6月の崩壊箇所の南端の測定点Cでは、6年で28mmの累 積変化が確認された。また、測定点Bでは最大で60mm程

UTSUMI Seiya, URA Kenichiro, KOMATSU Shinji

度の累積変位が確認された。対象区間は3~5年おきに崩壊が繰り返されている。現在も微小な変位が累積傾向の箇所があるため、今後も崩壊が頻発すると予想される。一方、崩壊前の前兆現象(変位の加速等)は読み取れないことから、現在の撮影頻度(2~3回/年)では、岩盤崩壊の予兆を捉えることは不透明である。

次に、路面変状箇所(測定点E)について、ALOS-2と SENTINELのDescendingの解析結果を示す(図-8)。測定 点Eは、海岸擁壁背後の旧道の路面が陥没している(図-9)。2つの衛星の経時変化図を比較すると変位の傾向は 一致するものの、短期間の変動幅が異なることがわかる。 解析にはさまざまな誤差要因を含むが、本解析による変

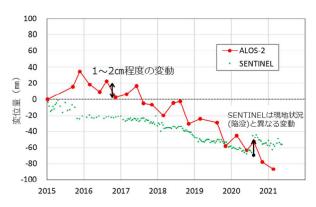


図-8 ALOS-2とSENTINEL解析結果の比較(E地点)



図-9 海岸擁壁背後路面の変状状況(E地点)

表-3	ALOS-2とSENTINELの解析結果の特徴
-----	-------------------------

衛 星	変位検 出精度	観測頻度	特 徴
ALOS-2	cm単位	年 3~4回	・ 植生下の自然斜面でも変位を検出可能。・ 誤差が大きいため複数シーンを解析し経時変化を確認する必要がある。
SENTINEL	mm単位	2週間 1回程度	・ 植生下は観測不可能。・ 盛土や路面等の変位検出精度が高い。・ 定量を超えると検出できないことがある。

動傾向から推察するとALOS-2は1~2cm程度、SENTINELは 数mmの解析誤差を含んでいると考えられる。ALOS-2と SENTINELの解析結果の特徴を表-3にまとめた。

5. まとめ

ALOS-2の衛星SAR画像を用いた変動量解析により崩壊 箇所周辺斜面は被災前より変位が累積していたことが確認された。ただし、崩壊の予兆を捉えるような顕著な変位の変化(加速等)は現在の撮影頻度では確認できなかった。衛星SARは、斜面の形状や向きによっては測定点が得られないことがあるため、事前に衛星の軌道や地形条件を確認する必要があるが、過去に遡って危険箇所の変状の累積性を確認できることがわかった。

ALOS-2とSENTINELの解析結果の比較から、SENTINELの方が短期間の解析誤差は小さいものの、長期的な傾向は両衛星で類似していることがわかった。ALOS-2は、植生透過能力の高いバンド数(波長)のレーダーを搭載していることから、自然斜面の変動特性を広域に把握可能なため、アーカイブされた長期間の画像を解析することで、斜面変動を効率的に確認する手法の一つとして有効であると判断した。

謝辞: SAR画像は、国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物研究部と国立研究開発法人宇宙航空研究開発 機構との陸域観測技術衛星2号観測データ提供に関する 協定に基づき取得した。解析結果のとりまとめにあたっ ては、国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研 究部の方々他多数の方にご助言をいただいた。また、国 土交通省北海道開発局函館開発建設部から資料の提供、 および現地調査における様々なご協力を頂いた。深く御 礼申し上げる。

参考文献

- 1) 北海道開発局函館開発建設部: 国道 229 号乙部町館浦地区 斜面対策技術検討会, 2021, URL: https://www. hkd. mlit. go. jp/hk/douro/v151sd0000000sar. html (2024/1/10)
- 2) Alessandro. F.; C. Prati.; F. Rocca.; Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001, vol39, pp. 8–20.
- Alessandro, F.; C. Prati.; F. Rocca, A. Rucci.: A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011, vol. 49, pp. 3460-3470.